

メタンハイドレートフォーラム2014

海洋産出試験： 成果の概要と今後の計画

MH21フィールド開発技術グループリーダー
山本 晃司

メタンハイドレート資源開発研究コンソーシアム
Research Consortium for Methane Hydrate Resources in Japan

本日の話題

- 第1回海洋産出試験：メタンハイドレート商業化への道筋における今回の試験の位置づけ
- どんなデータが得られたのか、そして知りたかったことと分かったこと
- 次に何をすべきか、しようとしているのか

1

メタハイについておさらい

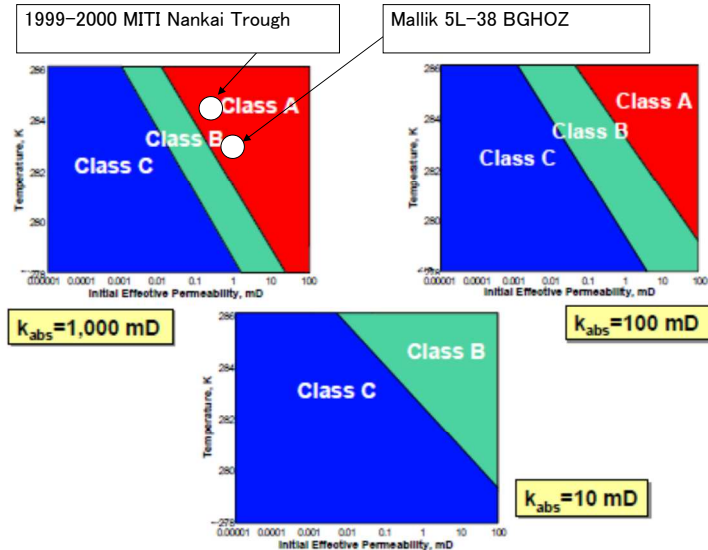
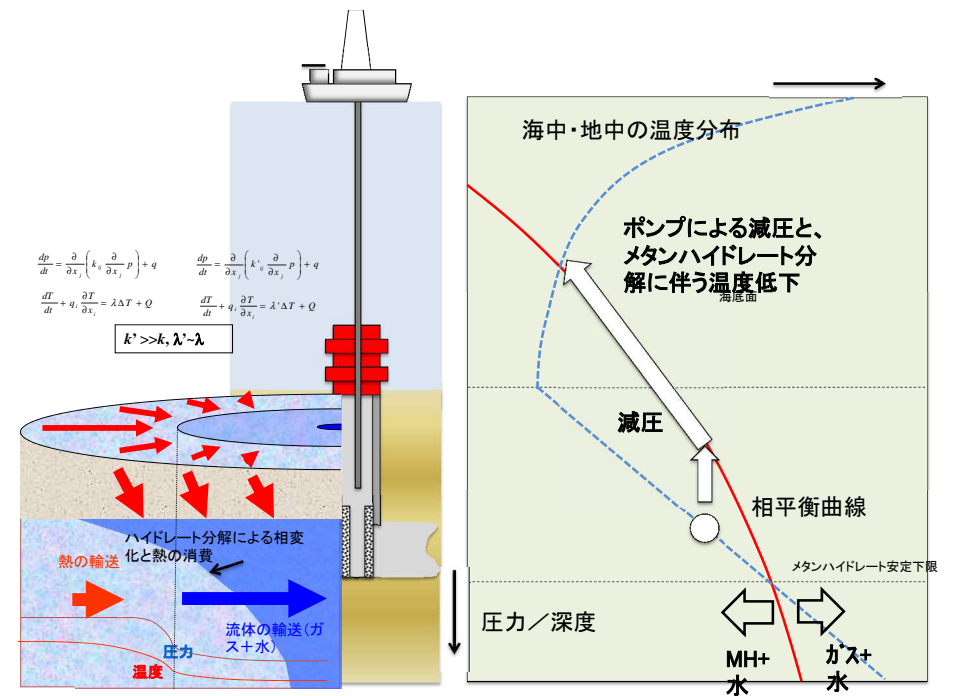
- 1m³ のメタンハイドレート
= 概ね164Sm³のメタンガス
= 1 bbl (0.157m³) の原油と同じエネルギー生産量
(エネルギー集積度は高くない。経済価値としては、100ドルくらい)... あまりコストの高い手法は現実的ではない。
- 1kg のメタンハイドレートを分解させるのに、436.8kJのエネルギーが必要(分解潜熱)
 - 燃焼させれば、約7300kJの熱が発生するので、エネルギーの投入が必要なければ黒字にはなるが...
- 大水深の比較的浅い堆積物の中にある
 - 大水深：開発コストが大きくなる
 - 海底面下の浅い地下
 - 利点：掘削コストが若干安くなる
 - 不利な点：地層が未固結・軟弱で安定性に課題
- 天然ガス... エネルギー業界の生物(なまもの)
 - 輸送と貯蔵にコストがかかる。特に設備投資が大きい。(パイプライン、LNG製造設備、貯蔵施設)
 - 需要と供給のマッチングが重要
 - 売り先が決まってから、長期契約を結び、開発開始
 - 需要変動に合わせた供給が必要

当面の目標：砂層中のハイドレートを原位置で分解させてガスを採取する

- 砂層：ハイドレートが分解すれば(分解する前もある程度は)浸透率が存在する
 - 物質が移動する余地
 - 熱も移動する余地
- 石油開発で使われている技術(特に増進回収法の技術)の応用で可能
 - 技術的なブレークスルーは必要ない
- 環境影響が限られる
 - 海底面の擾乱は坑井周囲に限られる
 - メタンガスと海底・大気を隔離した状態で作業

減圧法

- 圧力を下げることによって平衡温度を下げ、MH・地層・間隙流体の持つ顕熱を利用して分解させる＝自然の熱エネルギーによる分解手法
 - 石油の一次回収法に対応する
- 期待されるエネルギー効率
 - もしもガス・水比（大気圧下での体積比）が200であれば、エネルギー産出比は100程度が期待できる。
- 基本的に圧力を上げるオペレーションが不要
 - 地層を（引っ張り・せん断で）破壊するリスクが小さい
- 地下で発生する事象のプロセスが単純
 - 熱と流体が同じ方向に流れる
 - 地下の水理学的・熱力学的特性に関する情報を得やすい→他の手法を検討するのに必要な情報が得られる
- ただし、適用範囲は限られる
 - 温度が高く、初期（メタハイ分解前）及び有効（メタハイ分解後）の浸透率がいずれも十分高いことが必要。
 - 本当に減圧がうまくできるのか、圧力をコントロールできるのか
 - うまく流体が井戸に流れてこない
 - 他のところ（海底面、帯水層など）から水を引いてきてしまい、いくらポンプで汲んでも圧力が下がらない



Kurihara et al., (2004)による減圧法の適用に関するハイドレート分解のクラス分類。初期浸透率 k_{init} 、絶対浸透率 k_{abs} 、及び地層温度 T が主要なパラメータである。Mallik 5L-38ハイドレート下面及びMITI南海トラフハイドレート層はいずれもClass Aに分類できる。

減圧法・熱刺激法のエネルギー効率

分解熱とメタン燃焼熱の関係

- 1kgのMH分解に必要な熱量=436.8kJ
- 1m³のメタンハイドレートの質量は約910kg、それを分解させるのに必要な熱は**390MJ（+顕熱分）**
- 燃焼熱は890.36kJ/mole～1m³のMHから生産させるガス1645m³=7400moleからは**6.58GJ**の熱を取り出せる。
 - どれだけ効率的に熱をメタハイに伝え、分解に使わせるか

減圧法

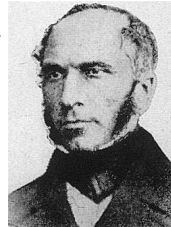
- 減圧法に必要なポンプの動力＝（単位時間あたりの水の生産量×昇圧の度合い（＝減圧度））／ポンプの効率
- メタンハイドレートの分解で生じるガスと水の堆積の理論的な比率＝200程度
- 地下水も一部一緒に組み上げるとしてその比率が100まで低下と仮定
- 日産10000m³のガスを生産するためには、一日100m³の水を生産する＝1.16×10⁻³m³/secのレートで水を生産する
- 10MPa減圧することでその生産が確立されたとすると、そのための仕事率は、
 - 1.16×10⁻³ (m³/sec)×10E6(N/m²)=1.16×10⁴ (Nm/sec)=11.6(kW)
- 一日あたりとすると、約**1GJ**必要
- 10000m³からのメタンガスから得られるエネルギー＝**401GJ**
 - **ポイント：どれだけ少ない水生産量で、多くのガスを取り出せるか**

メタンハイドレートの生産は、多孔質媒体中の2つの輸送問題(熱+物質)に帰着できる(どの手法でも一緒)

反応速度

$$Q = \int_V \frac{dm^{(g)}}{dt} dV = \int_V K_d \exp\left[\frac{\Delta E}{RT}\right] A(f_0 - f_g) dV$$

$$\nabla \cdot (\lambda_c \nabla T) - \nabla \cdot \sum_{(i)} \rho^{(i)} \mathbf{v}^{(i)} C^{(i)} + \sum_{(i)} \frac{dm^{(i)}}{dt} C^{(i)}$$



熱の輸送とエネルギー保存

$$+ \left[q_H \frac{dm^{(g)}}{dt} + Q_m \right]$$

$$= \frac{\partial}{\partial t} \left[(1 - \phi) \rho^{(R)} U^{(R)} + \phi \sum_{(i)} \rho^{(i)} S^{(i)} U^{(i)} \right]; i = 1, g, j = 1, g, h$$

物質(流体)の移動と物質保存

$$-\nabla \cdot (\rho^{(i)} \mathbf{v}^{(i)}) + \frac{dn^{(i)}}{dt} M^{(i)} = \frac{\partial}{\partial t} (\phi \rho^{(i)} S^{(i)}); i = 1, g$$



$$\mathbf{v}^{(i)} = - \frac{kk_r^{(i)}}{\mu^{(i)}} \nabla p^{(i)}$$

(3a)

(3b)

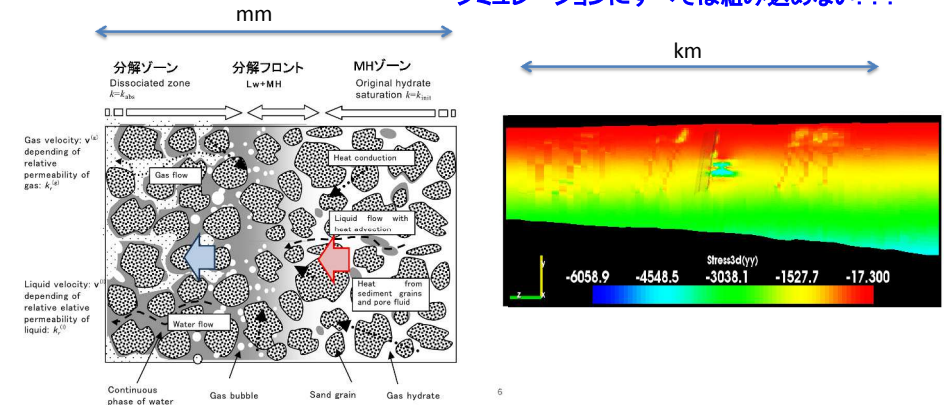
Jean Baptiste Joseph Fourier (1768-1830)

ではいったい何が難しいのか？

現実の地質状況における-さまざまなスケールの非均質性
Pore scale (micromechanics) to reservoir scale (geological heterogeneities)

+ 地下のことは見えない

シミュレーションにすべては組み込めない...



出所: Google Earthに加筆

図3 衛星画像で見える断層(中央構造線:赤点線)



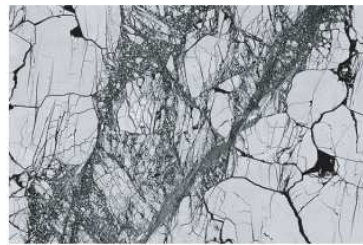
出所: JOGMEC et al (2006a)

図4 断層に伴うフラクチャー



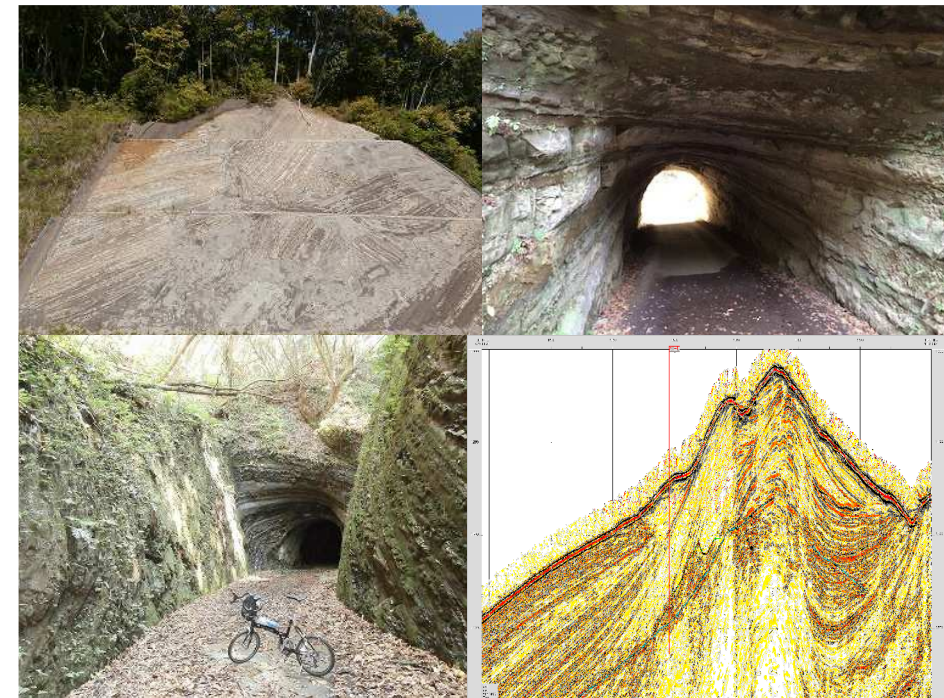
出所: JOGMEC et al (2006a)

図5 露頭で観察されるフラクチャー

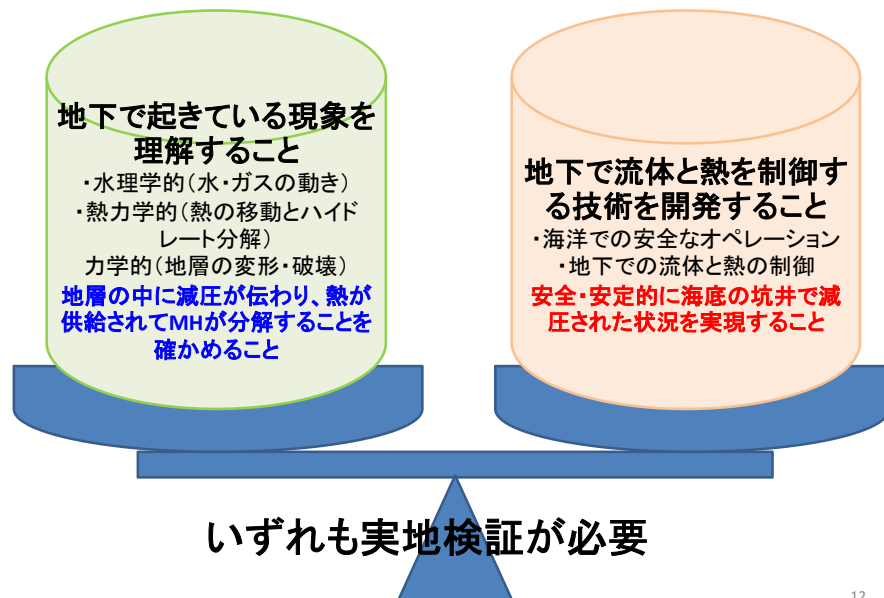


出所: JOGMEC et al (2006a)

図6 顕微鏡で観察されるフラクチャー



フィールドでの試験の役割



12

では何をすれば良いか

- 地下の地層の物性値とその分布を知ること
 - 地表、海面から地震探査等で調べる
 - 実際に井戸を掘って、センサーを下したり(物理検層)、サンプルを取って(コアリング)分析したりする
 - 井戸に圧力をかけたり、水を引いたりして応答を調べる(坑井テスト)
- 実際にガスを生産してみる
 - 生産手法を適用してみる
 ←そのためには、減圧を実現するための技術が必要になる

13

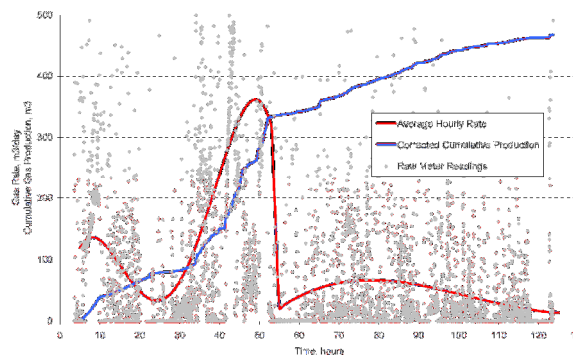
では何をすれば良いか

- 地下の地層の物性値とその分布を知ること
 - 地表、海面から地震探査等で調べる
 - 実際に井戸を掘って、センサーを下したり(物理検層)、サンプルを取って(コアリング)分析したりする
 - 井戸に圧力をかけたり、水を引いたりして応答を調べる(坑井テスト)
- 実際にガスを生産してみる
 - 生産手法を適用してみる
 ←そのためには、減圧を実現するための技術が必要になる
 ... 探査と試験はセット→貯留層評価

14

Mallik 2002第一回陸上産出試験: 世界最初の意図的なガス生産

- 2002 Mallik 5L-38: 日本・カナダ・インド・ドイツ・米国の5か国共同研究
- 温水循環法で、5.5日の間に 470Sm³ のガスを生産した。
- 最大レートは日産350m³であったが、急激にレートが低下した。
 - 熱が伝わらなかった
 - き裂が形成されてガスが他の地層に抜けてしまったなど



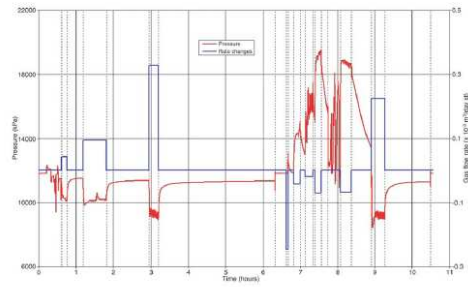


Figure 3. Downhole-pressure and average-production-rate data obtained during the MDT-2 test (gas hydrate zone at 1089.8 m KB). JAFEX/JNOC/GSC et al. Mallik 5L-38 gas hydrate production research well. Abbreviation: st, standard conditions.

圧力検層ツールMDTによる、
小規模減圧実験も実施。有
限の(ゼロでない)浸透率が
メタハイ層内にあることを確
認した

→減圧法にGOサイン

Hancock et al., 2005

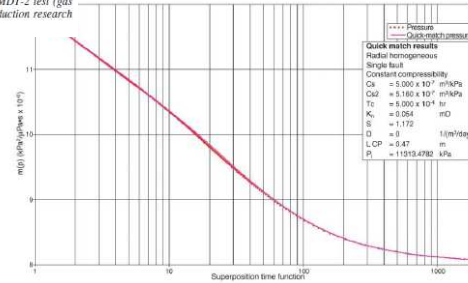
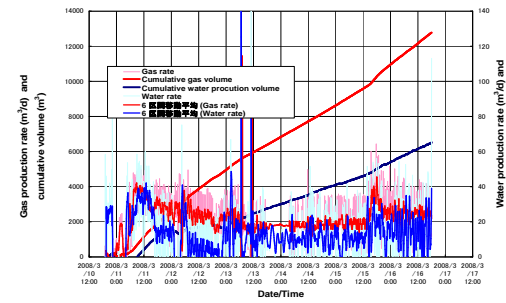


Figure 16. Semilog plots of the optimum matches between the measured and synthesized MDT pressure data for the final (post-micro) buildup. MDT-2 test (gas hydrate zone at 1089.8 m KB). JAFEX/JNOC/GSC et al. Mallik 5L-38 gas hydrate production research well. Abbreviations: C_s , wellbore-storage coefficient (initial); C_{s2} , wellbore-storage coefficient (final); D , turbulent-skin coefficient; K_p , permeability (horizontal); LCP, distance to constant-pressure boundary (m); mD, pseudopressure; P_i , initial reservoir pressure; S, skin damage; T_e , time to end of initial wellbore-storage calculation.

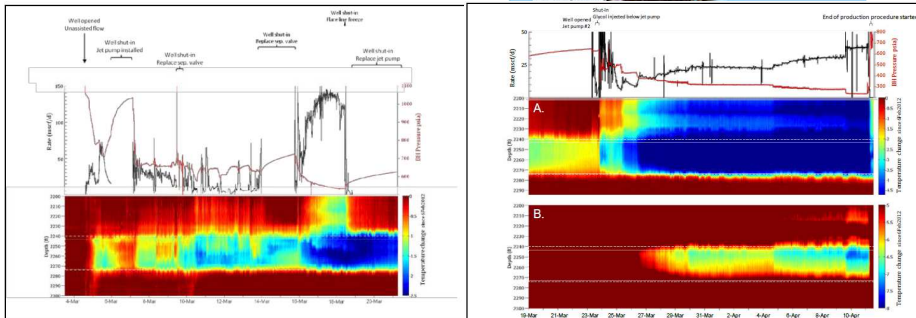
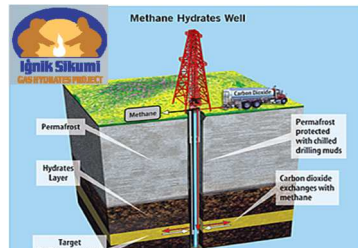
Mallik 2007-2008第2回陸上産出試験: 減圧法で連続・安定的な生産に成功

- 2007-2008 Mallik 2L-38: 日本・カナダの共同研究
- 2007は、減圧を実現して半日で約800Sm³のガスを生産、出砂で停止
- 2008は、出砂対策を施して、5.5日で13,000Sm³のガス生産(春の雪解けが近づき終了)



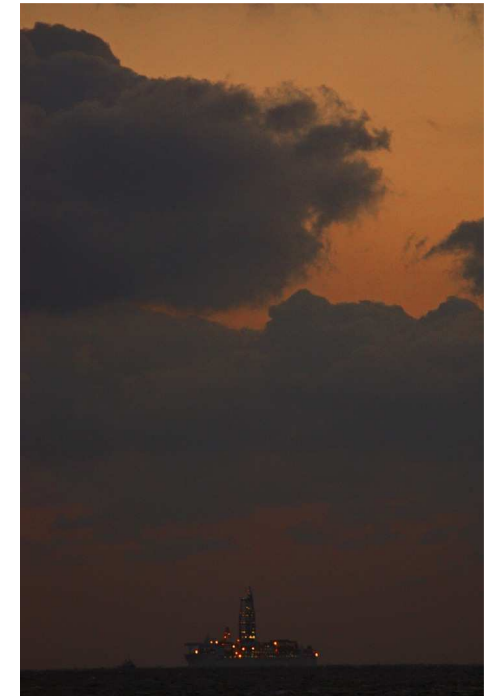
Ignik Sikumi CH4-CO2 置換実験 (2012: ConocoPhillips-JOGMEC-USDOE)

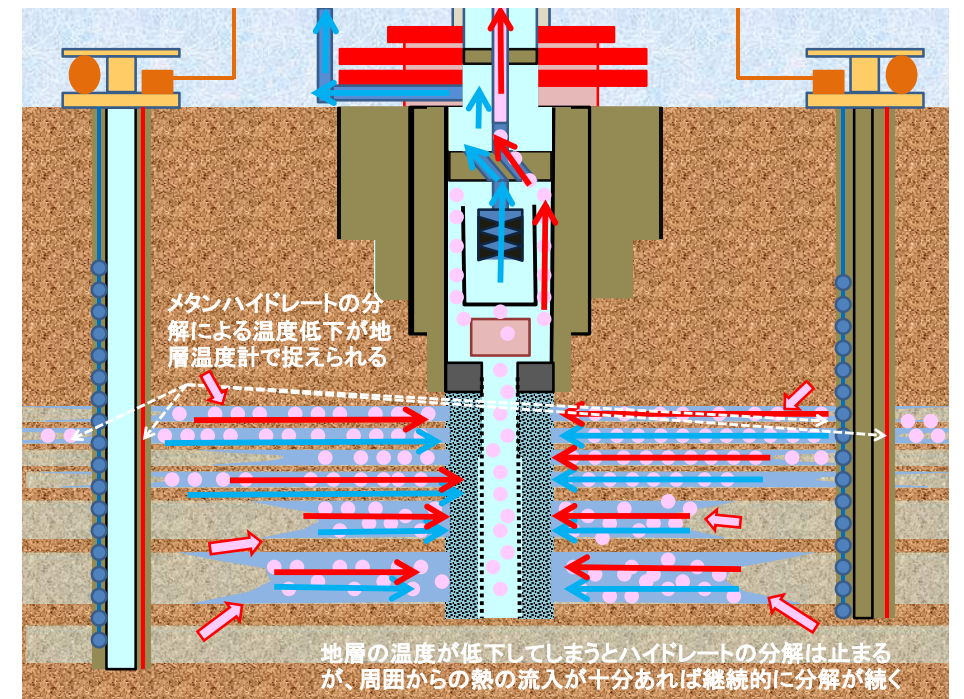
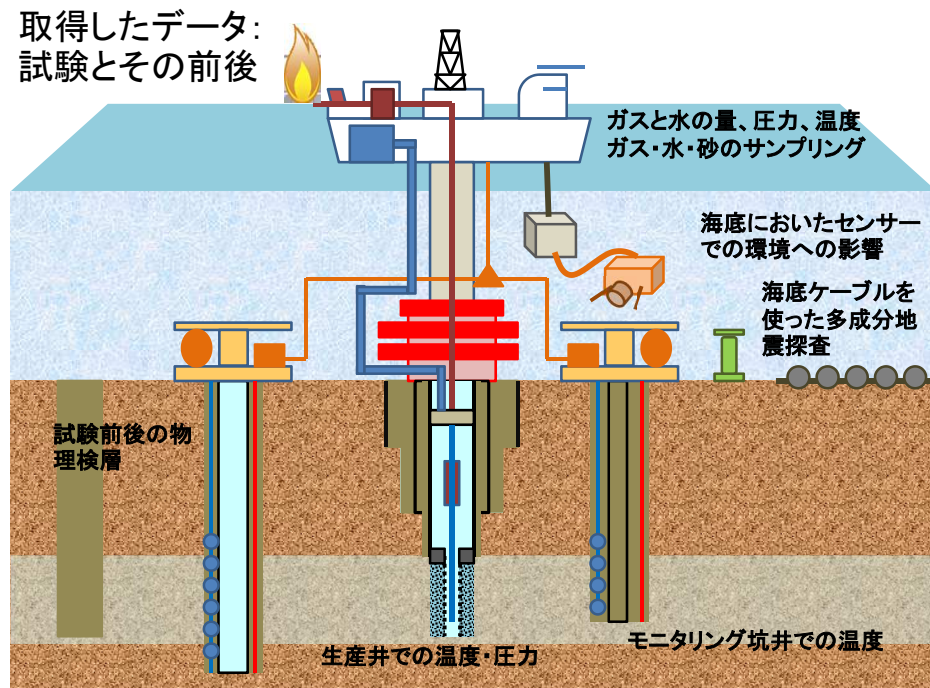
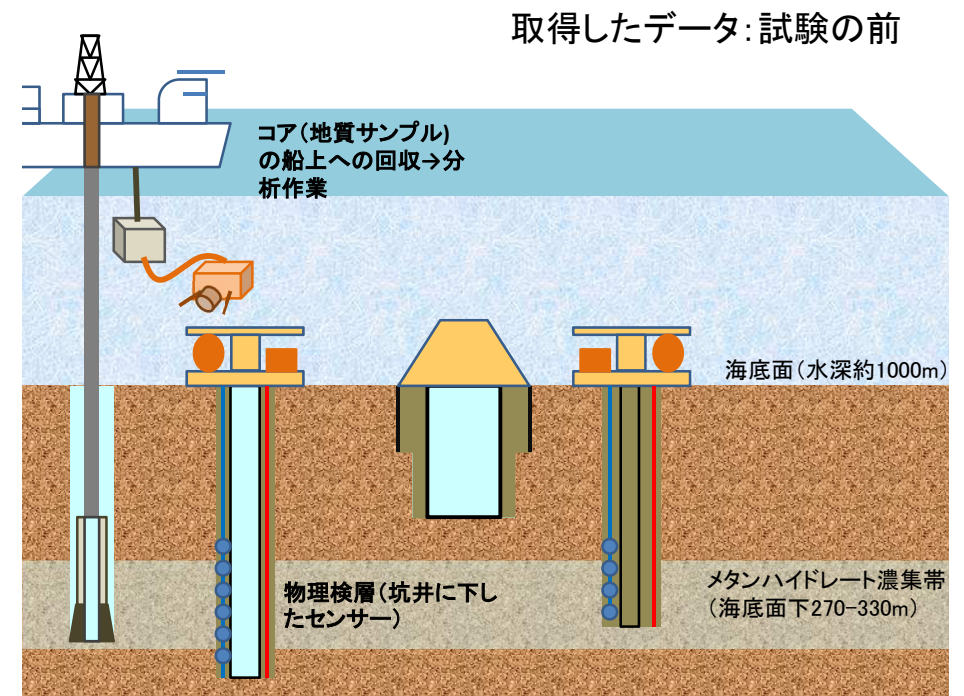
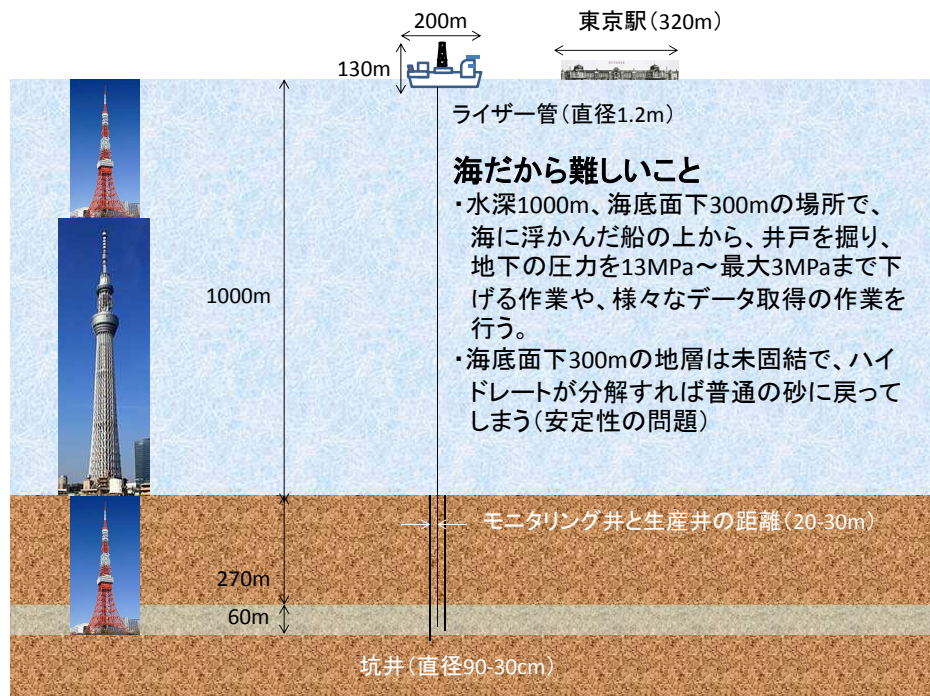
メタンハイドレートのメ
タンをCO2と置換して生産

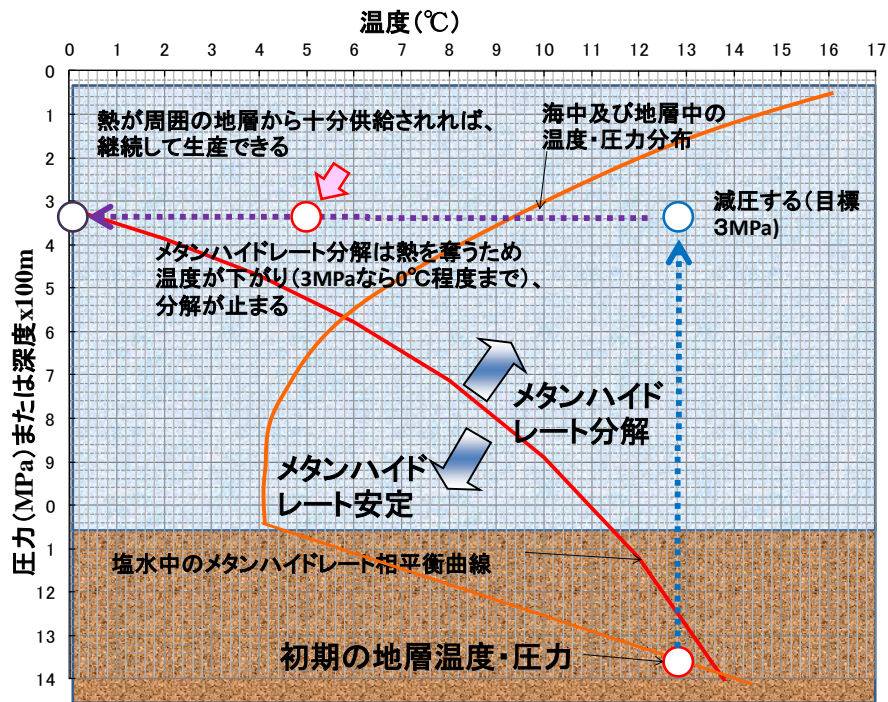


Schoderbek et al., CoP-DOE Final report (2013)

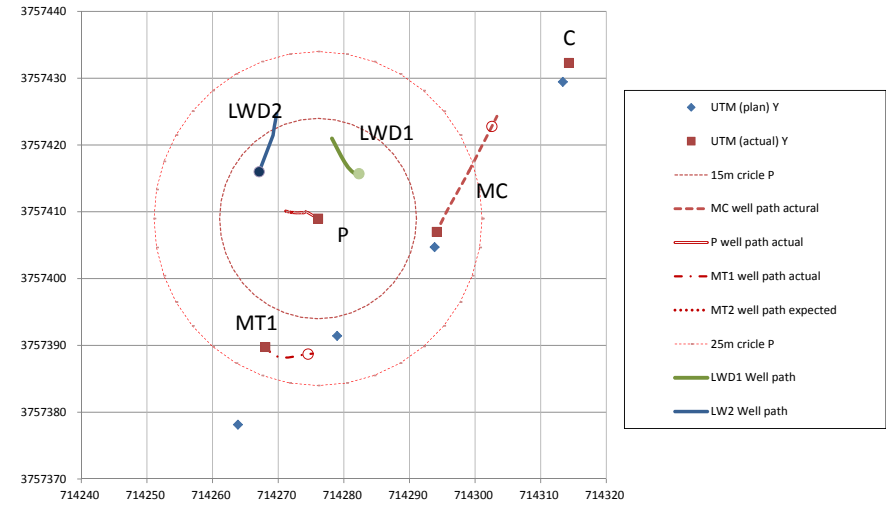
陸から海へ





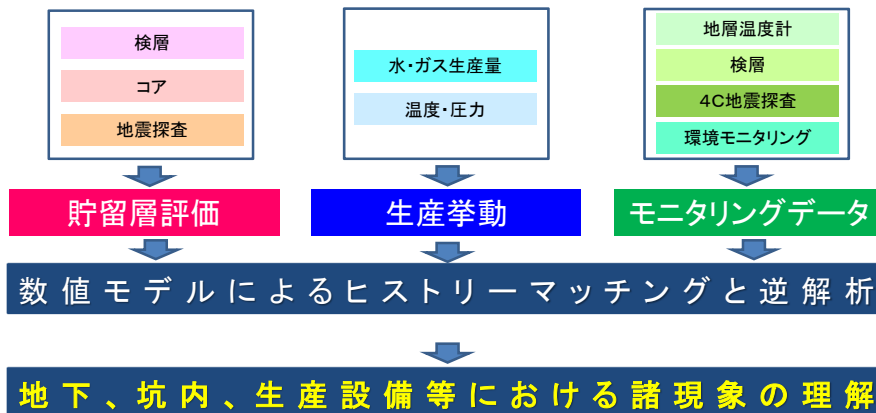


今回掘削した坑井の位置と坑跡の配置



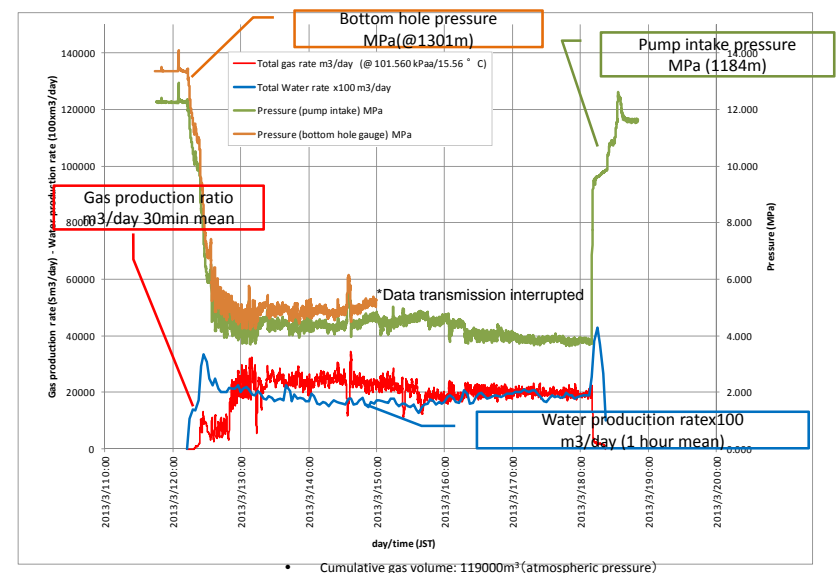
UTM座標 53系(単位m)

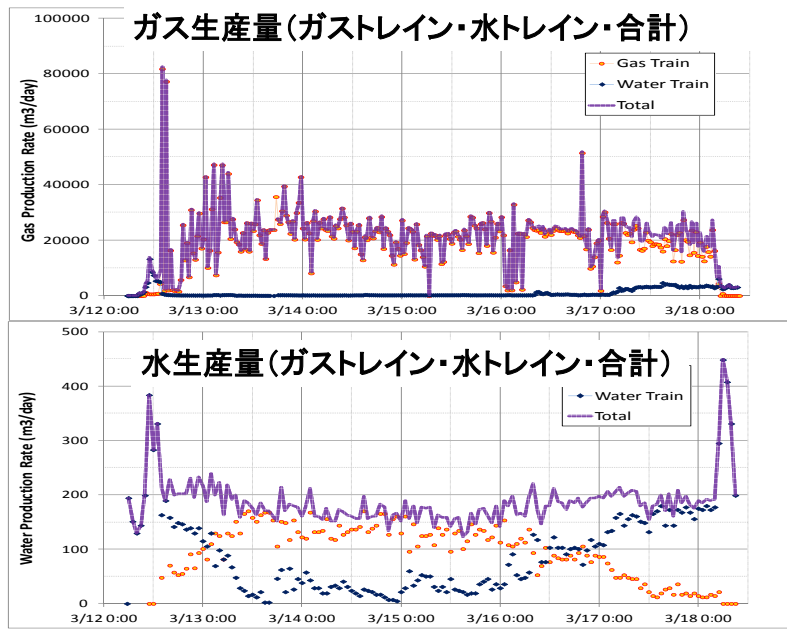
分析の流れ



- ✓ 事前に得られた地層のデータをもとに、基礎となる貯留層モデルを構築
- ✓ 試験で得られた生産データとモニタリングデータと、貯留層モデルを利用した数値シミュレーションの結果を比較...貯留層モデルと仮定した物理的プロセスが正しいか確認
- ✓ 貯留層モデルを更新、地層の中で起きている現象の理解を高める

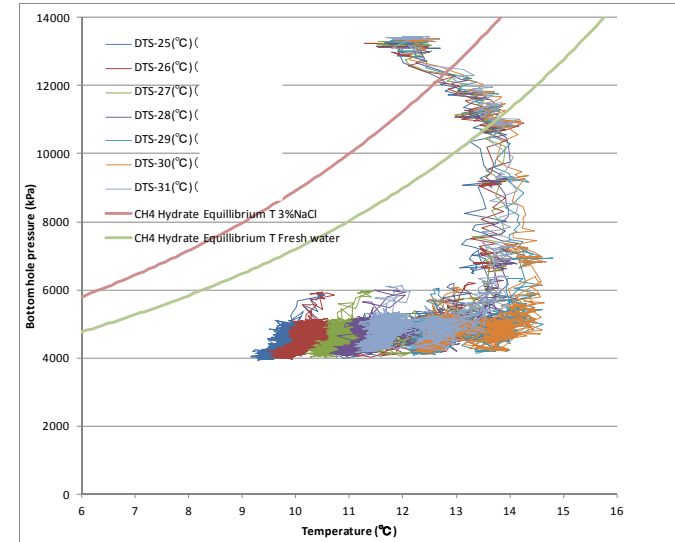
坑内の圧力と、ガス・水生産レート





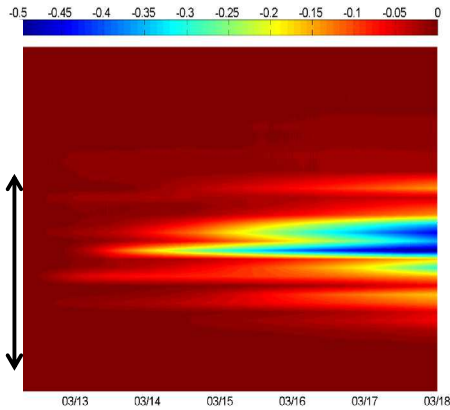
ガスの生産ラインに水が、水の生産ラインにガスが混じった。(分離が完璧ではなかった)→管内で水・ガス混相流がどのように挙動したか？

生産井 坑底 温度(DTS)・圧力:MH分解等により生産される流体の温度が徐々に下がっていく。

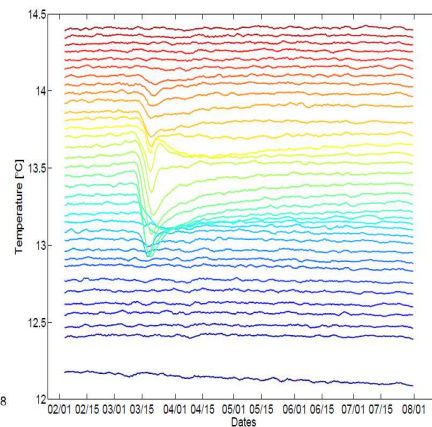


- 生産試験中のモニタリング井における温度変化:メタンハイドレートの分解によるとみられる温度の低下が、生産井から25mほど離れたモニタリング井で確認された。
- 温度の低下は特定の深度に見られる:どのような特性の地層でハイドレートの分解が進むのか？

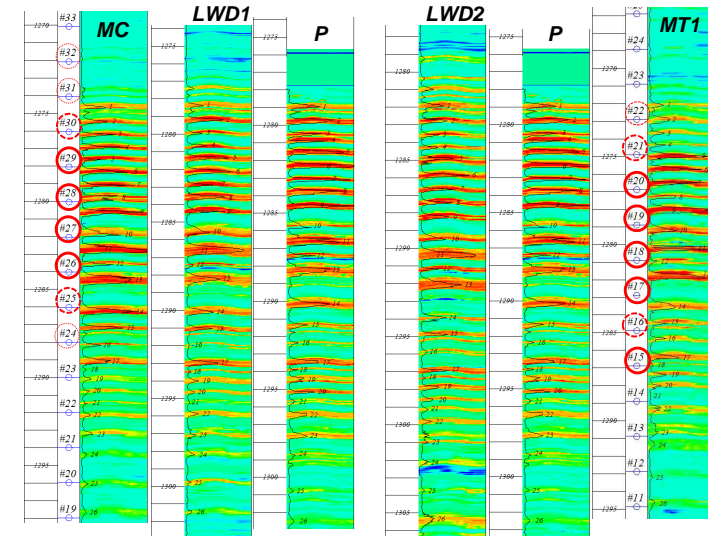
- 試験前に取得された比抵抗イメージログ(P, MC, TM1)と、試験後にP近傍で掘削された二つの坑井の比抵抗イメージログ(LWD1, LWD2)に差が見られ、MH分解や出砂の影響が考えられる。



試験中の温度の低下



試験前後の長期挙動(温度の低下とその回復が記録された)

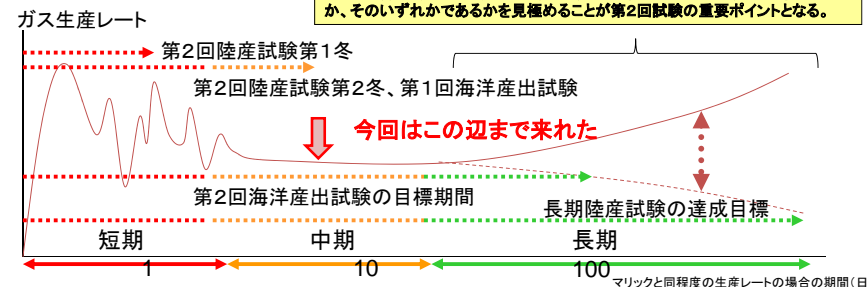


得られたデータとわかったこと

- 試験に先立って、地層の物性や状態を知るのに不可欠な物理検層とコア(地質サンプル)の取得に成功した。
 - 検層データの評価の精度を上げることができた
 - ハイドレートを保持した状態で圧力コアを分析できたので、より信頼性の高い貯留層パラメータが得られた
- 出砂がおきるまで、ポンプを運転して水をくみ上げることで、初期に13.5MPaあった坑内の圧力を4.5MPaまで下げることができた。
 - ガス・水分離の問題はあったが、坑内を減圧することに成功。ただし、最終ターゲットの3MPaには到達しなかった。
- 地層内のメタンハイドレートを分解させてガスを生産することができた。
 - モニタリング井の温度低下などのデータから、特定の深度では生産井から25-30m離れた範囲に減圧の影響と分解が及んだことが確かめられた。
 - 生産ガス量は日産約20000立法メートル(標準状態)でほぼ一定しており、地層から供給される熱とハイドレートの分解による吸熱がほぼ平衡する条件が確立されたと考えられる。

産出試験における試験期間・ガス生産量と達成できる課題

減圧法でのMH生産の場合、分解フロントが拡大することによる生産量の増大が見込まれている。実際にこの現象が生じるのか、あるいは熱の供給が十分でなかったり、貯留層障害が起きたり、水生産量が増大したりして生産量が増えないのか、そのいずれかであるかを見極めることが第2回試験の重要ポイントとなる。



時期の特徴	減圧作業の不安定さや坑井周辺の局所的な現象により生産レートが変動する時期	坑内圧力が一定に保たれ、準定常的なガス・水の流れが確立する時期	分解範囲拡大による熱の供給増加による分解レート向上、あるいは生産障害による低下等、ゆっくりとした長期的変化が生じる時期
分解挙動	平均分解半径が坑井から数十cmにとどまり、地層の熱の他、坑井やセメントの影響を受けている	平均分解範囲が1mを超えて、坑井の影響は小さくなる。地層の元もとの熱と周囲からの熱供給がハイドレートの分解熱とバランスする	平均分解範囲が数m以上に達し、分解領域の広がりによる熱供給状況の変化が見え始める。一方でスキニング形成、圧密などの生産障害、機器の摩耗等のトラブルが生じる
達成課題	装置が機能し、減圧によりガスが生産できることは確認できるが、その後の推移は予想できない。	減圧法における熱収支が評価できて生産挙動の将来予測に役立つが、分解範囲拡大による影響や生産障害はわからない。	長期挙動予測や機器の長期信頼性など将来の商業生産に直接用いることができる情報が得られる。

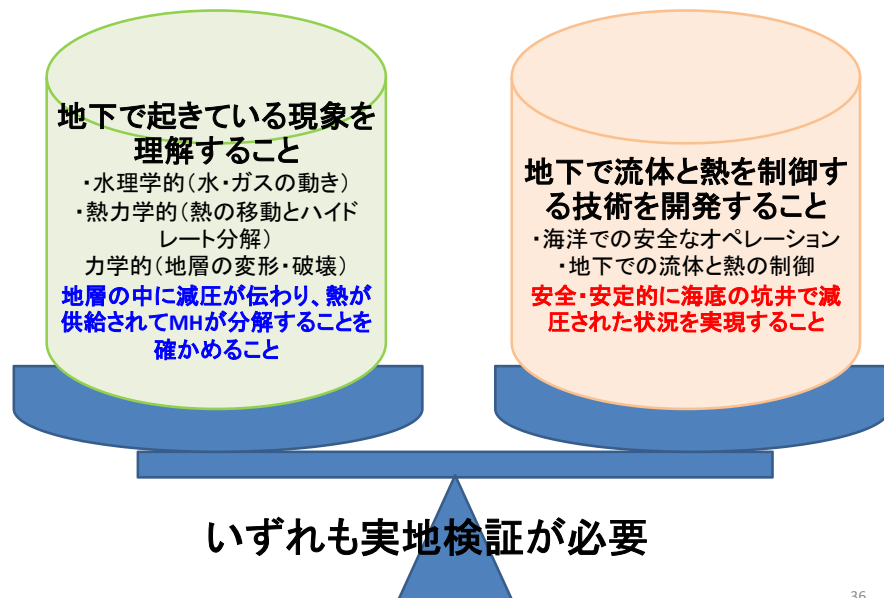
第1回海洋産出試験: 残された疑問点

- どこで、どのように分解が起きたのか? そのとき、流体と熱の流れはどうなっていたのか... 長期続けばどうなっていたか。
 - ヒストリーマッチングを進める。
 - 新たに得られたコアや検層のデータを利用。
- 坑内をガス・水がどう動いたのか。ガス・水分離はなぜ完全にはならなかったのか。
 - 生産データ・温度データ等を分析。
- 出砂はどこで、どうして起こったのか。
 - なぜ出砂対策装置は働かなくなったのか?
 - 出砂が起きた時、地層の中ではどういうことが起きていたのか。
 - 砂を止められればフローは継続できたのか? 出砂以外にも安定的なフローを止める要因はないのか?

第1回海洋産出試験: 現状の認識

- 減圧法でガスが出せることは証明できたが、安定的に生産できる方法であることは証明には至っていない。
 - 技術的な課題
 - 坑内機器
 - 出砂対策装置
 - 貯留層の課題
 - 熱は十分供給されるか
 - 水を引き込まないか
 - 貯留層障害(スキニング)の増大... など
- 海底の浅いところで、本当に安定的に生産できるのか?
 - 力学的安定性の課題
- 減圧法が経済的な生産手法あることを証明するには、長期の生産挙動が予想通りであること、さらに改善したり、課題の対策を施したりできることを証明する必要がある。

フィールドでの試験の役割



36

では何をすべきか: 減圧法の限界を見極める

- なるべく長い期間フローを継続した試験を行いたい。
- そのためには
 - 出砂等で生産が阻害されないこと
 - 長期安定に位置保持できて、かつ経済的な生産方式、機材と船
 - 海底や坑内に置く機材の検討
- 海洋ではお金がかかるので、シミュレータや実験と組み合わせるのはもちろん、陸での試験も検討したい。

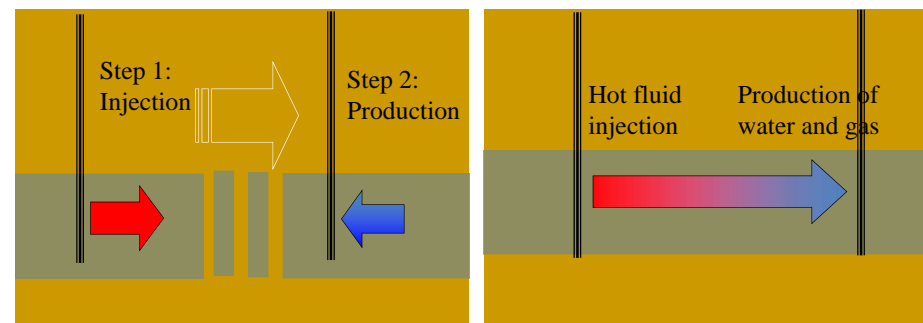
37

減圧法がうまくいかなくなる現象(1)

- 熱の供給が十分でない～生産レートが伸びない、減っていく(取り残しが増え、回収率が下がる)...生産は継続できても十分な経済性が得られない
- 熱サポートによる増進回収技術・生産性向上技術の必要性が生じる

38

- 熱を供給する方法を考える
 - 単一坑井、複数坑井
 - 熱源: 人工的な熱源、深部の温かい水を使う
- 熱を使わない方法を考える
 - CO₂ 置換、異種ガス圧入、インヒビター圧入等



減圧法がうまくいかなくなる現象(2)

- 坑井の周囲で地層の水利特性が変わってしまい、差圧が増える(スキンエフェクト)
 - 圧密
 - 細粒分の移動・集積
- 水圧破碎などの方法で浸透率を向上させる(坑井刺激法)

40

減圧法がうまくいかなくなる現象(3)

- 非均質な地層の中で、減圧が効果的に遠くまで伝わらない
 - 砂層の連続性
 - 断層の影響
- 傾斜した地層や断層などの影響で帯水層と導通してしまう
 - 水の量が少なければ熱の供給源として働くかもしれないが、大量の水を引き込めば減圧し続けられなくなる
- 分解範囲をコントロールする坑井配置、減圧スキーム等

41

減圧法がうまくいかなくなる現象(4)

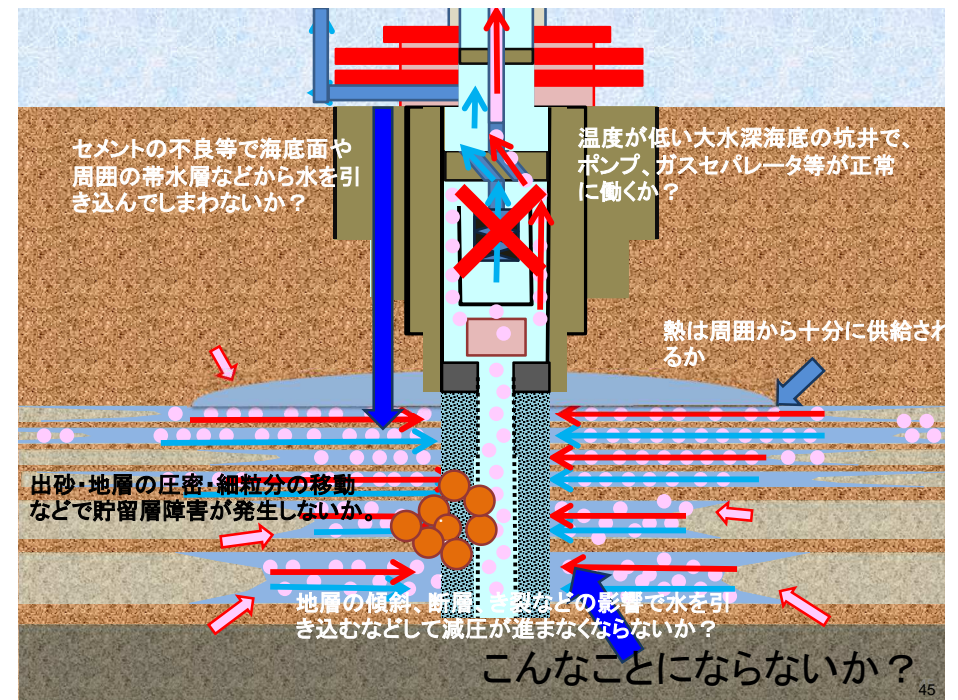
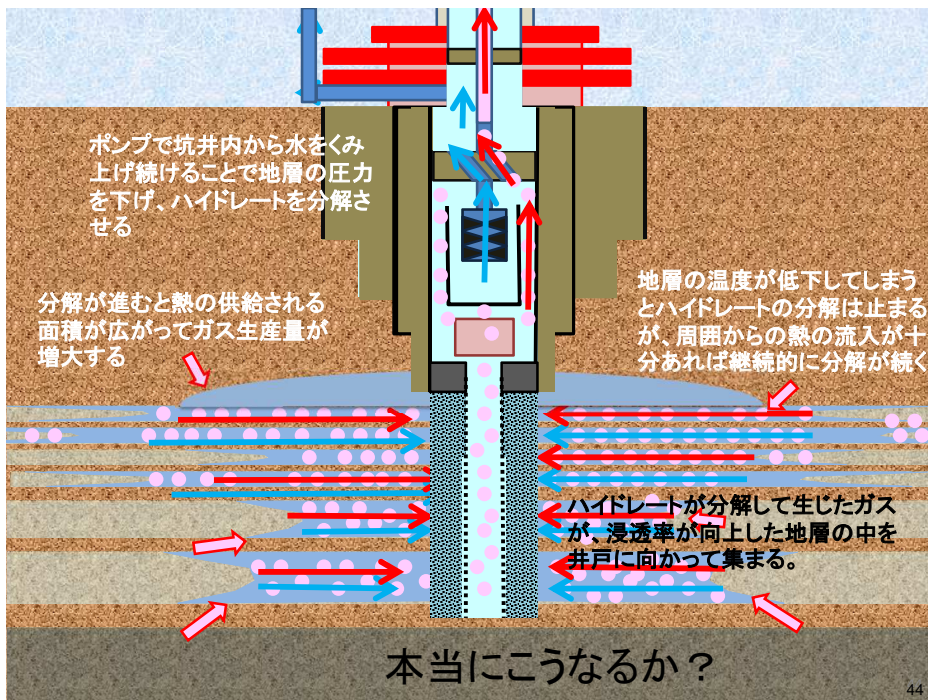
- 坑井の周囲で地層の大きな変形や破壊が起きる。
 - その結果、、、
- 坑井が構造的に破壊される(ケーシングの圧潰等)
- 地層の水利特性が変わる
 - 圧密による浸透率低下(前述)
 - 引張り、せん断破壊による浸透率向上～うまく働けば生産性の向上になるが、坑井周辺などで海底や帯水層との導通につながる。

42

さらに、商業化に向けては？

- 生産性を向上させる方法、減圧法を限界を補う方法の検討
- コストダウン
- 日本近海の気象・海象条件で、安全かつ経済的に生産を続けられる洋上の設備
- 地震・海底地すべりなどのリスクの評価と対策
- 生産したガス・エネルギーを経済的に陸に運ぶ手法
- 社会的に受容させるための条件を満たすこと
 - 環境影響
 - 社会や他の産業への影響

43



今後すべきことの基本的な考え方と課題

経済的で、気象・海象条件に適合し、一定期間安定的に稼働させられるフリートと船上設備

- 掘削用及び試験用ベッセル、サポートベッセルの構成と選択
- 気象・海象条件によらず数カ月稼働できること
- 船上機器のフットプリントやベッセルの選択

HSE、法・環境基準等への適合

- ライザーレスでどこまで作業できるか
- 生産水・ガスの処理
- 環境モニタリング等

トラブル対策や生産性向上策の適用が可能な柔軟性

- 適用する手法の検討
- 船上設備・海底/海中機器の設計への反映

長期試験に適した海底・海中の機器・試験技術

- 緊急時の離脱と復旧に対応
- フローアシュアランス(ハイドレート再生防止)
- 確実な水・ガス分離
- 水ガス生産量の変動に対応
- 潮流の影響回避

長期安定かつ、海底地盤や海底ケーブルの条件と適合した船体の位置保持

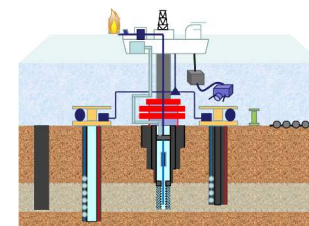
- 海底地盤・ケーブルの調査
- 海底地盤に適したアンカリング方式
- チェーン・ケーブル
- リグとの適合、必要に応じて改造

出砂対策、Well Integrity等を考慮した坑井設計

- 貯留層評価に対応した仕上げ区間
- 坑井の数、垂直/水平/傾斜井
- 出砂対策技術の検討・設計

生産の長期安定性を評価できるモニタリング技術

- 坑内・海底の機器
- 船上との通信
- 坑井設計への反映

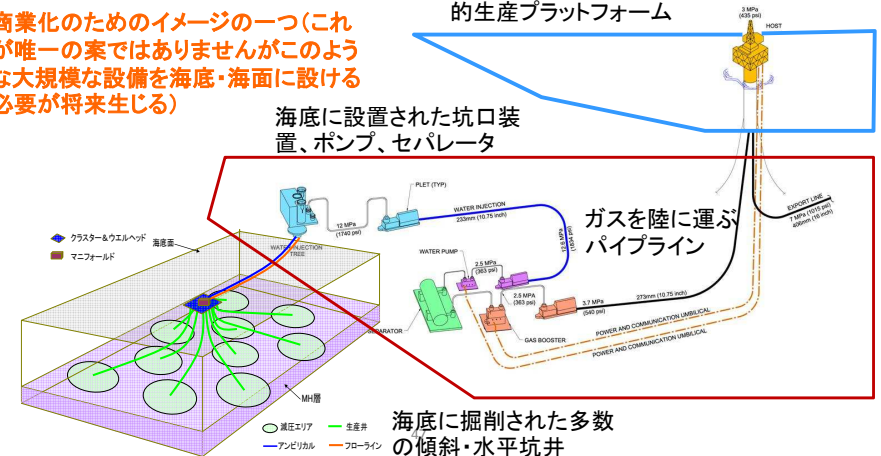


第一回海洋産出試験:基本的に既存の技術の組み合わせ、レンタル可能なものはなるべくレンタル、柔軟に複雑な作業ができるが日単価の高い掘削リグ

商業化のためのイメージの一つ(これが唯一の案ではありませんがこのような大規模な設備を海底・海面に設ける必要が将来生じる)

海上に設置された半恒久的生産プラットフォーム

海底に設置された坑口装置、ポンプ、セパレータ



海底に掘削された多数の傾斜・水平坑井

次のステップとして

- まず、出砂対策・坑内機器の改善など、技術で対処できる改善を施して、より長期の試験が実現できる状態にあることを確かめる
- そのうえで、より長期の海洋産出試験を目指す
- 生産性を向上させる方法などのより研究的・実験的な作業については、コストのかかる海洋での作業だけでなく、実験室やコンピュータシミュレーションでの研究、陸上でのフィールド試験等で、十分検討を進める。