

メタンハイドレートフォーラム 2017

# 「第2回海洋産出試験について」

- ・ 経緯と試験の目的
- ・ 作業の工程と実施状況
- ・ 生産プロファイル等の取得データと成果の紹介
- ・ 新たな課題とそれらへの取り組み、将来への指針

メタンハイドレート資源開発研究コンソーシアム (MH21)

フィールド開発技術グループ 山本晃司 (JOGMEC)

2017年11月29日

東京大学 伊藤国際学術研究センター 伊藤謝恩ホール

# 本日の内容

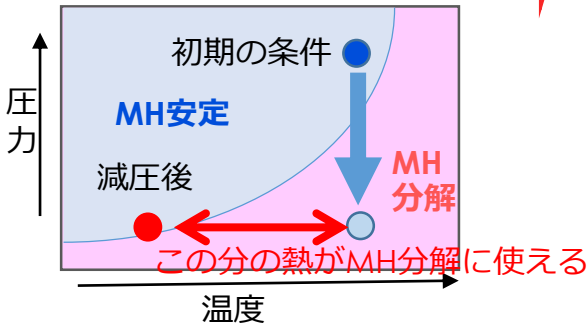
---

- これまでの研究経緯と第2回海洋産出試験の目的
- 作業の工程と実施状況
- 試験の結果と取得されたデータと成果
- 新たな課題とそれらへの取り組み、将来への指針

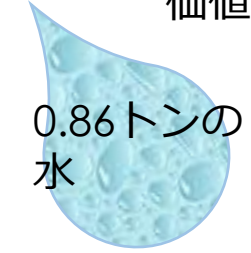
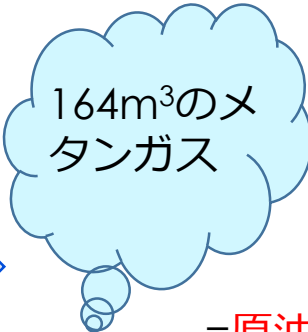
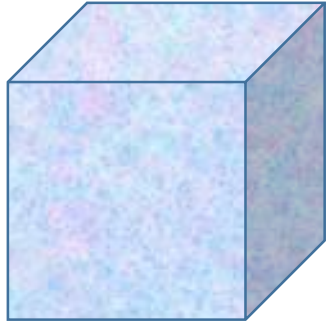
# メタンハイドレートについておさらい

分解させるの必要な熱 = 約 400MJ

- 人工的に加熱しようとする、ハイドレート及び周辺の地層を平衡温度まで上げるための熱も必要
- 減圧法では、平衡温度を下げることで地層のもつ顕熱熱源に利用する（人工的に投入する必要なし）



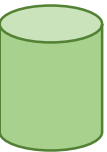
1m<sup>3</sup> (0.9トン) のメタンハイドレートのかたまり



燃焼させると約 6500MJのエネルギー



=原油1bblとほぼ同じ 価値 (57ドルくらい)



1000m分くみ上げるのに8.6MJのエネルギー

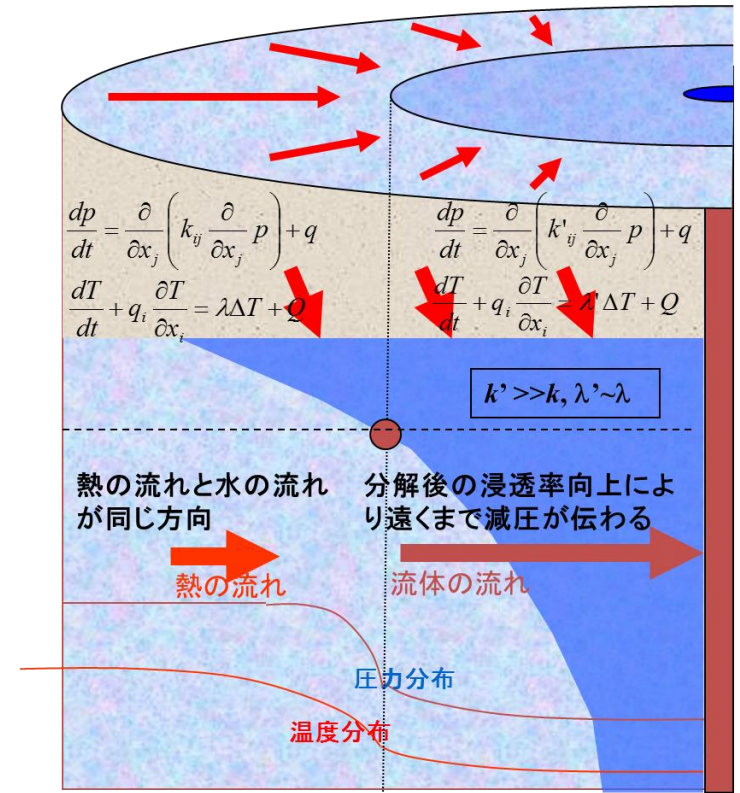
- 第二渥美海丘で 3MPaまで減圧 するのに必要

大水深（400m以上の深さ）の比較的浅い（海底から数百m以内）堆積物の中にある

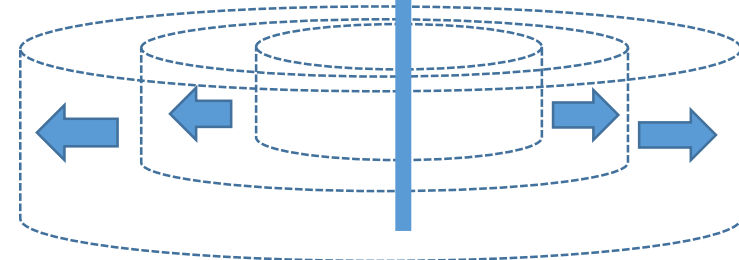
- 大水深：開発コストが大きくなる
- 海底面下の浅い地下
- ⇒利点：掘削コストが若干安くなる
- ⇒不利な点：地層が未固結・軟弱で、地層・坑井の安定性に課題

# なぜ海洋産出試験を行ったのか

- 地下における**流体と熱の動き**が、メタンハイドレートの分解と生成を支配している。
- これまで実施してきた、**陸上での産出試験**や、**室内実験・数値シミュレータ**を用いた研究で、砂質堆積物の孔隙中のハイドレートに関しては、井戸を掘って水をポンプでくみ上げて減圧するだけで、**人工的に熱を与えなくても、効率的にガスを生産**できる可能性が示されてきた。
- しかし、その手法が、**非均質で未知の点が多い海底の地層**中で本当にうまくいくのか、**長期的に成立しうるのか**わからない。
- 実際に海底に井戸を掘って手法を適用し、
  - ハイドレートの分解挙動、水・ガスの生産挙動を知る
  - データを解析して、地下の流体と熱の輸送現象への理解を深める
  - 安定的に減圧を実現し、ガスを生産するために必要な技術の適用性を確認する
- これらを通じて、メタンハイドレートの**エネルギー資源としての価値、経済性**に関する情報を得る



分解が進めば、分解反応が起きる「分解フロント」の面積が広がりガス生産レートが上昇すると予想される

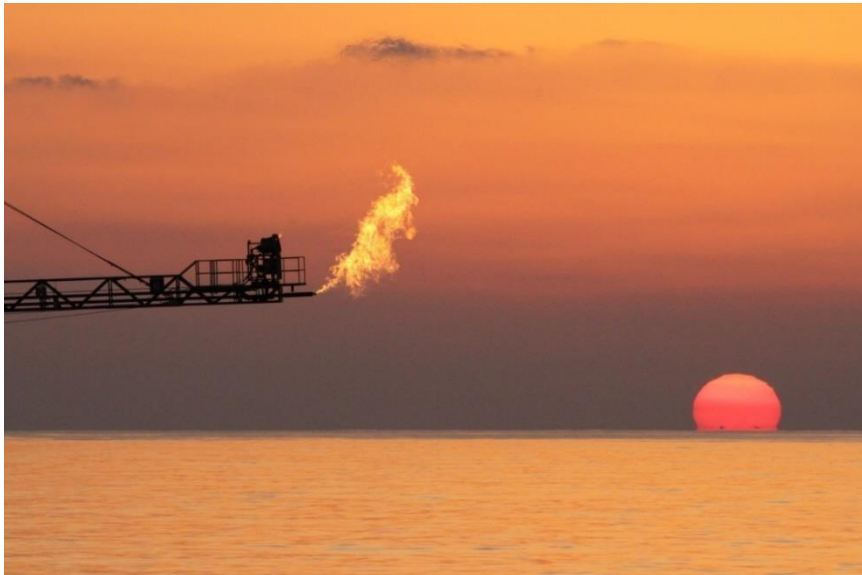


# 過去の産出試験から（JOGMECが関わったもの）

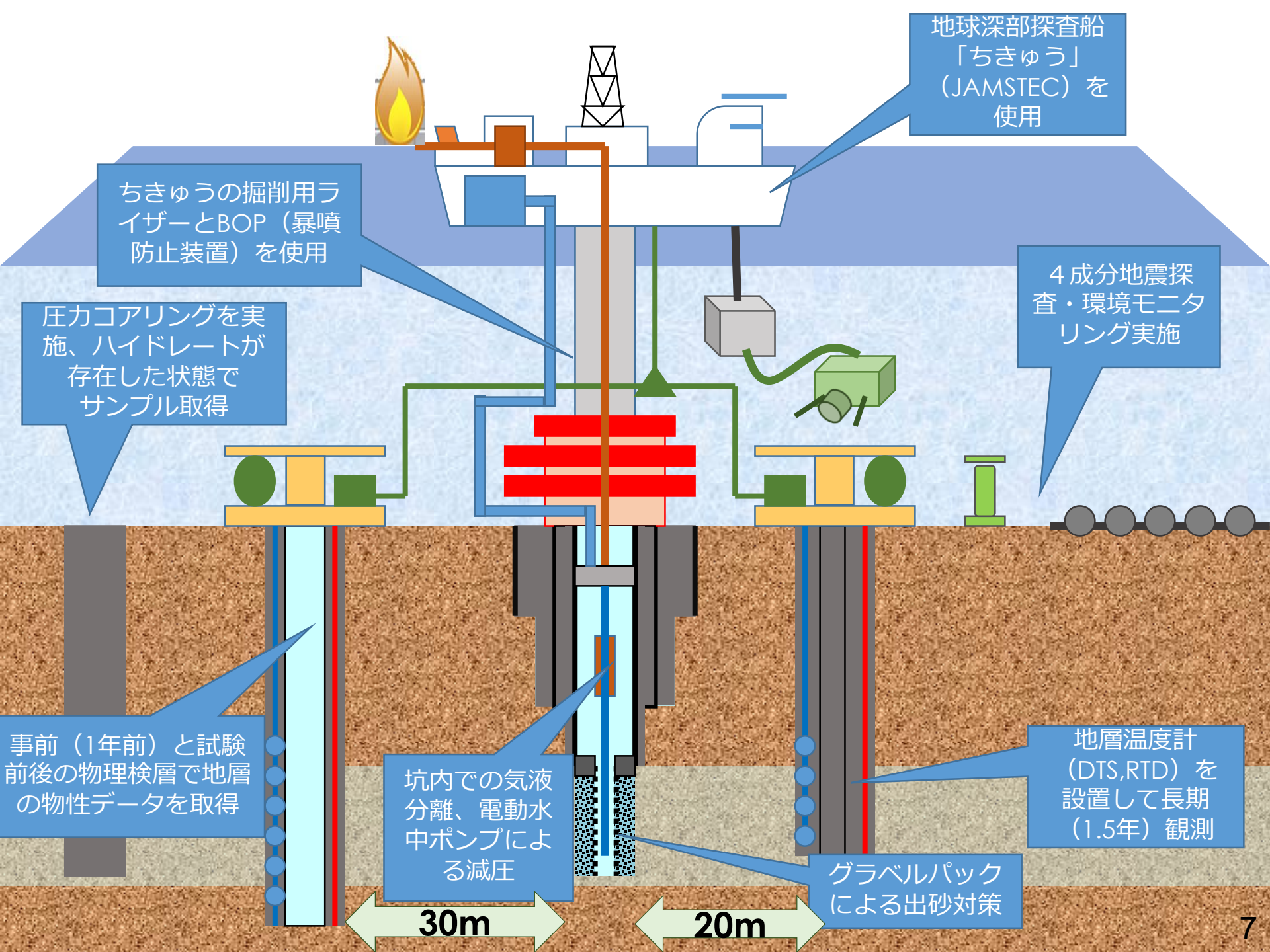
- Mallik 2002：第1回陸上産出試験（カナダ・マッケンジーデルタ）
  - 温水循環法で世界で始めて意図的にハイドレートからガスを生産した。しかし、生産量は少なく、また数日で生産は減退してしまった。
  - 一方、小規模な減圧実験では、減圧法でガスが生産できることを証明できた。
- Mallik 2007/2008：第2回陸上産出試験（カナダ・マッケンジーデルタ）
  - 2008年には、減圧法を適用して、5日間安定的にガスを生産することに成功した（春が近づき、撤収期限となって終了）
- Ignik Sikumi 2012：メタン-二酸化炭素置換実験と減圧法適用（アラスカ・プリュードベイ油田）
  - CO<sub>2</sub>を圧入してCH<sub>4</sub>と置き換えて生産する手法の実験を行い置換が起きたことを確認した
  - 引き続いて、約3週間の減圧を実現、ほぼ安定的にガスを生産した
- 第1回海洋産出試験 2013（東部南海トラフ第二渥美海丘）
  - 出砂で終了するまで、減圧法で6日間連続してガスを生産した

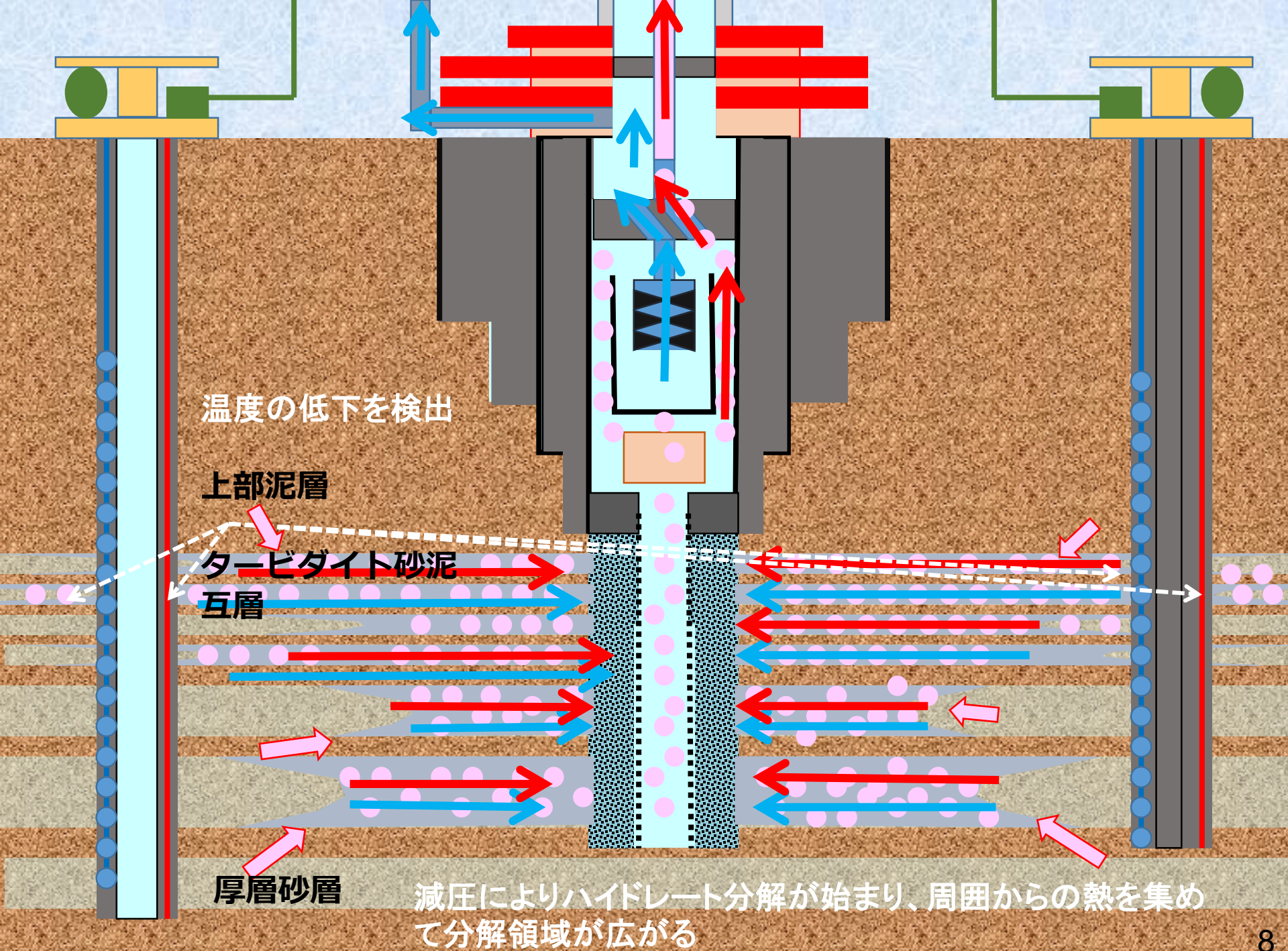
# 第1回海洋産出試験の実施（2013）

- 第二渥美海丘（渥美半島・志摩半島沖）
- 水深1000m、海底面下約300mにあるハイドレート濃集帯の約40m区間に減圧法を適用
- 2012年に生産井とモニタリング井2本（温度観測・検層用）を掘削、モニタリング装置を設置。また圧力コアリングを実施してサンプルを取得した。
- 6日間、日産約20,000m<sup>3</sup>、累計119,000m<sup>3</sup>（大気圧下）のメタンガスを生産
- 急激な出砂により試験を終了

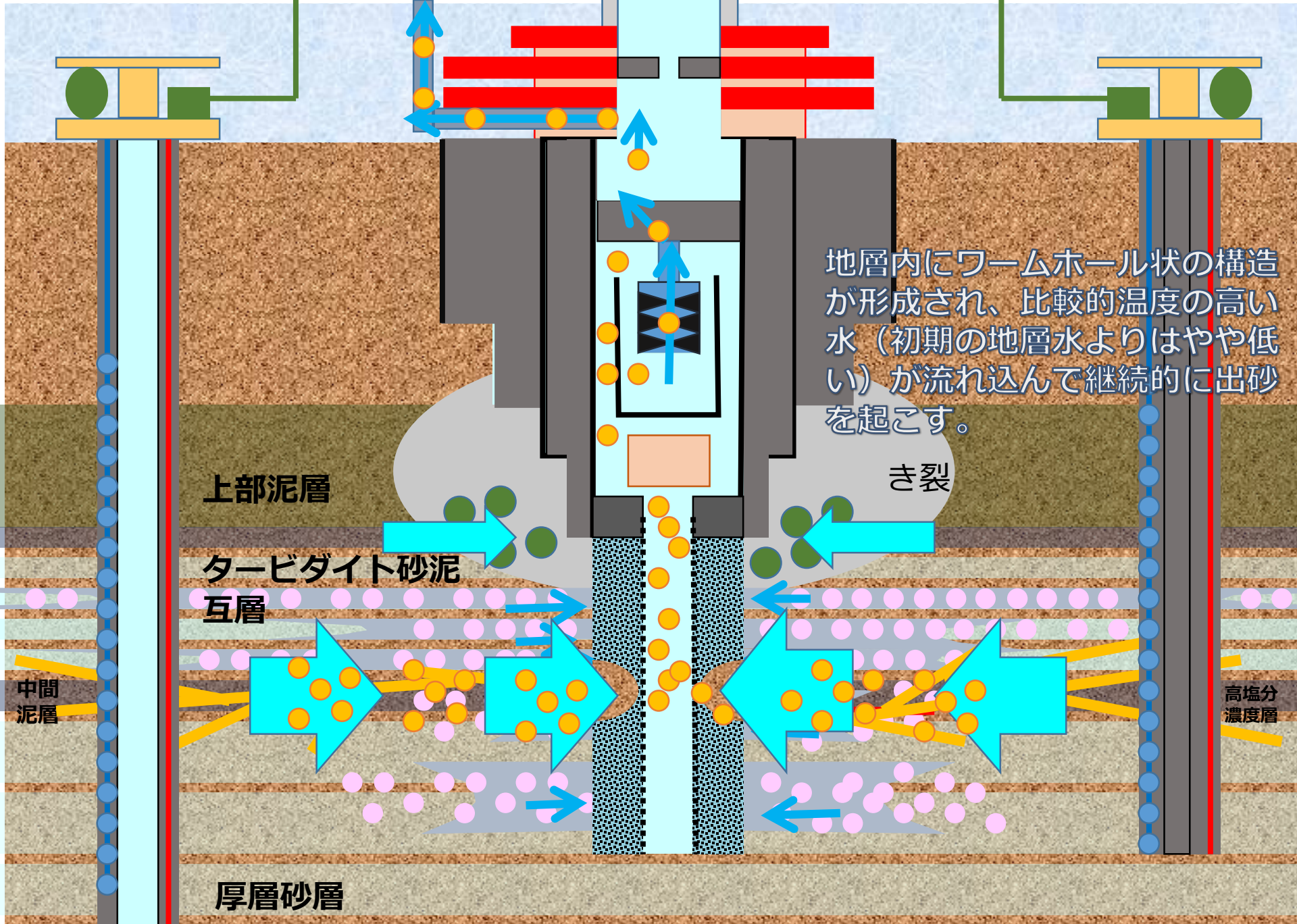




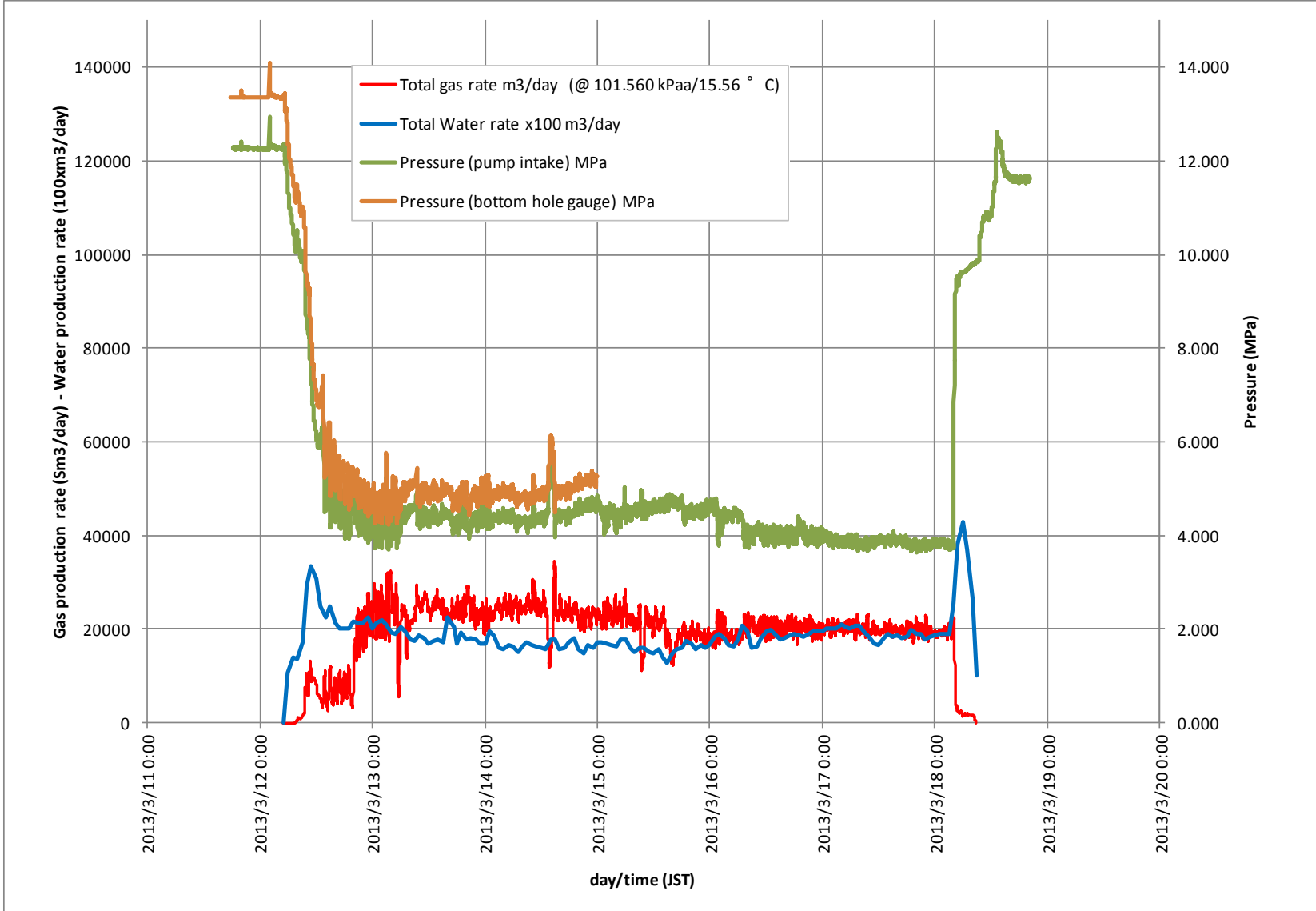








# 2013年第1回海産試験：坑底圧力とガス・水生産レート



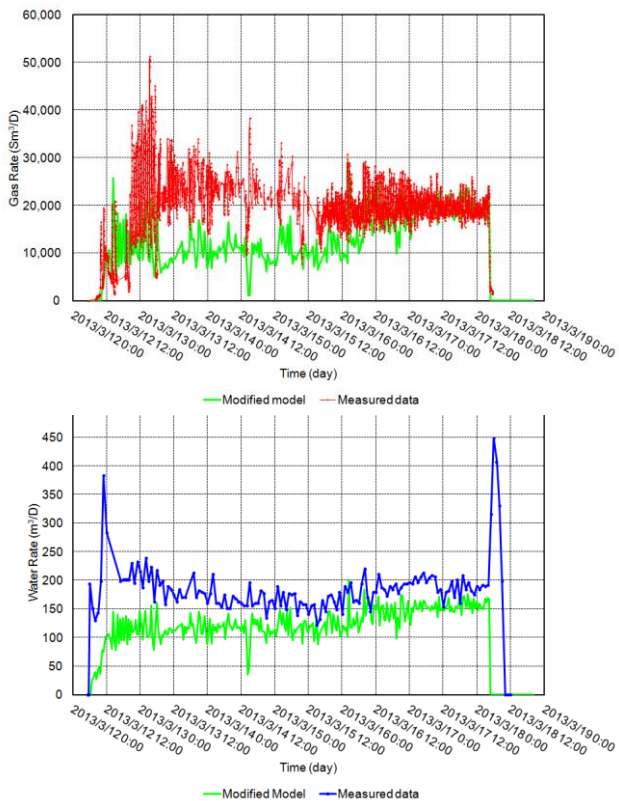
- 累計ガス生産量: 119000m<sup>3</sup> (大気圧下)
- 累計水生産量 : 1245m<sup>3</sup>

# 第1回海洋産出試験の成果と課題

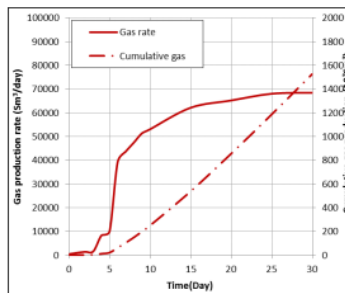
- 海洋の坑井（水深1000m、海底面下約300m）において減圧法の適用が実現可能であり、ハイドレートを分解させてガスが生産できることを証明した。
- しかし、出砂で試験が短期で終わったことから、
  - 安定的にガスを生産できることは証明できなかった
  - 長期的なガスの生産挙動（～経済性においてもっとも重要な情報）について、十分なデータが取得できなかった。
- 課題：
  - 出砂対策装置・生産用機器の機能の改良などによって、**安定的な減圧を実現すること⇔海底での生産を実現するための技術的な課題**
  - それによって、中長期的なガスの生産挙動と、貯留層内での熱と流体の移動、それによる**ハイドレート分解挙動に関する情報を得ること⇔貯留層の条件・応答の知識に関する課題**

# 数値シミュレータによるヒストリーマッチング結果の比較と第2回試験の生産量予測

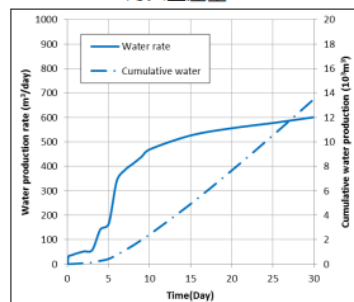
## 第1回試験結果のヒストリーマッチング



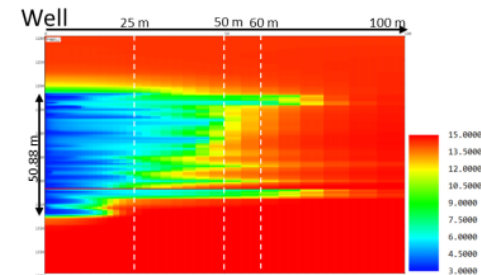
## 第2回試験結果の生産量予測



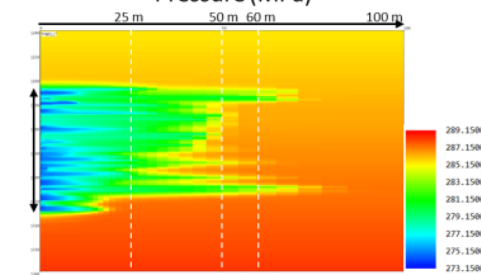
ガス生産量



水生産量



P3 (P2) Pressure (MPa)



P3 (P2) Temperature (K)

P3井での1ヶ月後の貯留層内の圧力(上)、温度(下)変化

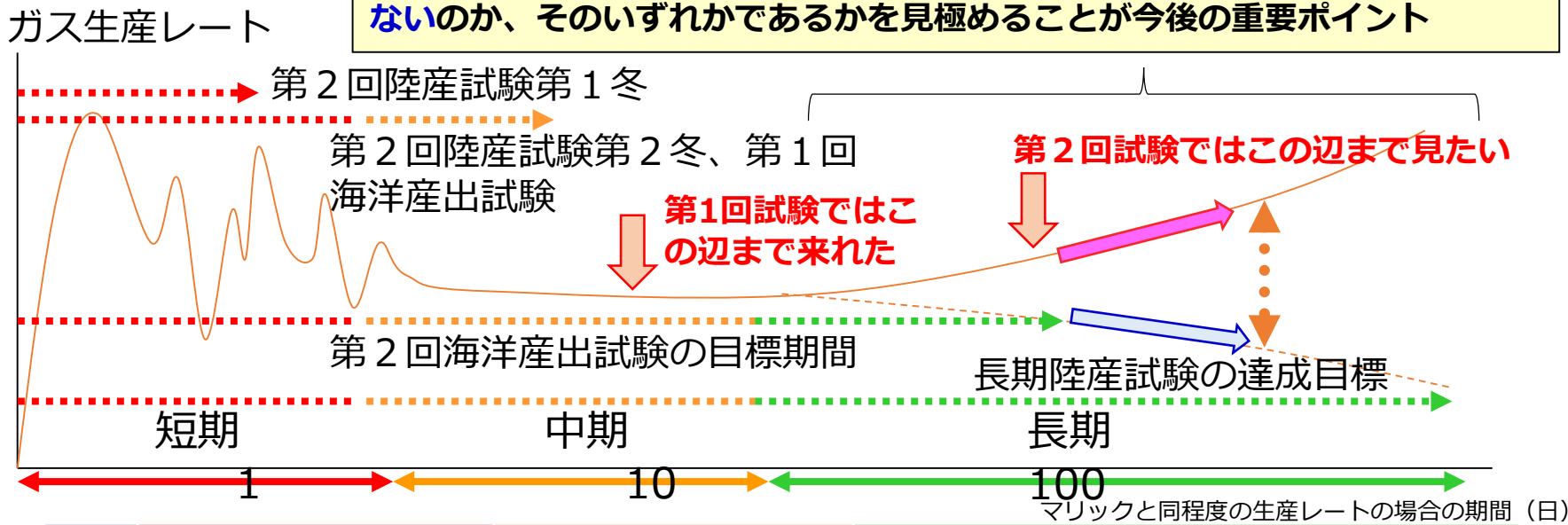
**実際にこのような挙動を示すのか？**  
 自然の中には数値シミュレータのモデルには表現されていないいろいろな要素が存在しているが、、、

試験の結果を受けて、地層の浸透率を再評価し、コア・検層データなどから合理的と思われる範囲内で変化させて、もっとも生産挙動を適切に再現できる値を選んだ結果（青：計測された水レート、赤：計測されたガスレート、緑：シミュレーション）（第28回開発実施検討会資料）

第1回試験の結果と第2回試験の事前掘削で得られた貯留層のデータを元に、坑底圧力を7→5→3MPaと変化させたときの、ガス・水生産量の予測（第32回開発実施検討会資料）

# フィールド試験の期間と得られると期待される情報

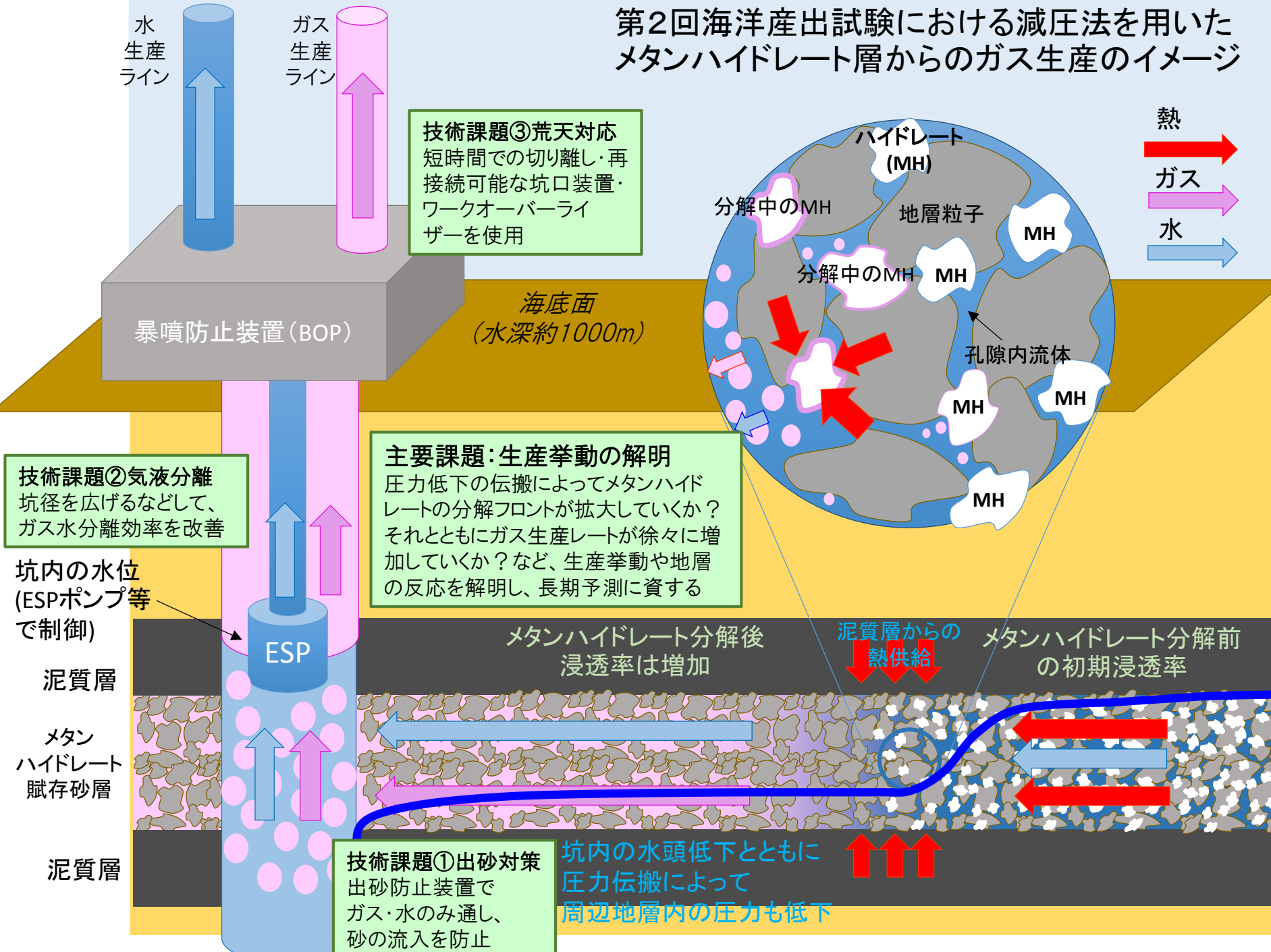
減圧法でのMH生産の場合、分解フロントが拡大することによる生産量の増大が見込まれている。実際にこの現象が生じるのか、あるいは熱の供給が十分でなかったり、貯留層障害が起きたり、水生産量が増大したりして生産量が増えないのか、そのいずれかであるかを見極めることが今後の重要ポイント



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。一方でスキン形成、圧密などの生産障害、機器の磨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。



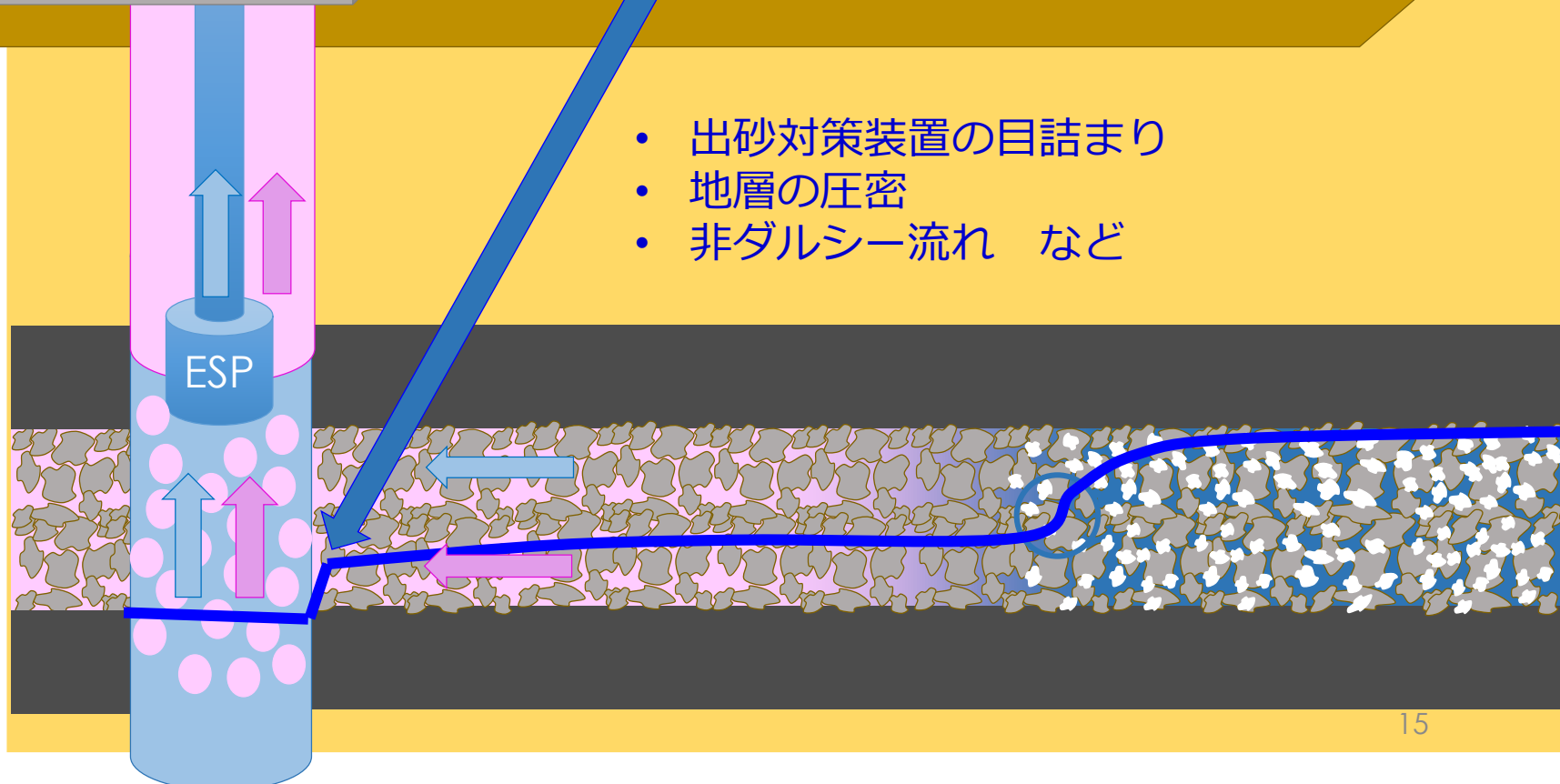
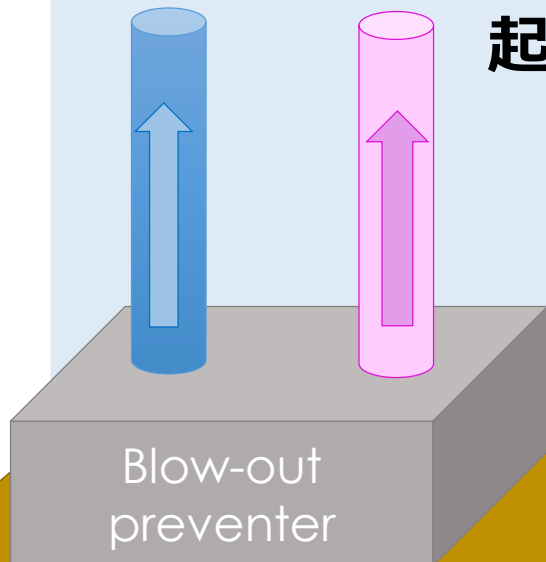
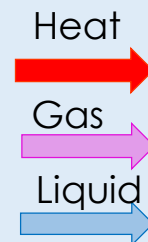
# 第2回海洋産出試験における減圧法を用いたメタンハイドレート層からのガス生産のイメージ





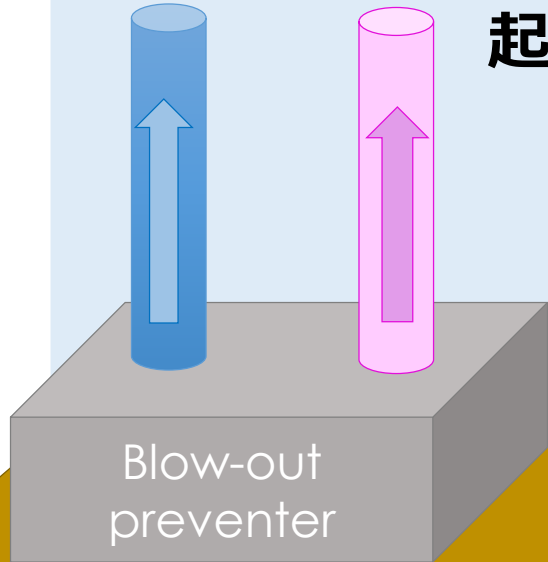
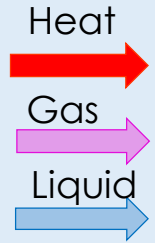
# 起こるかもしれないと思っていたこと（１）

坑井周辺での圧力低下 $\Delta P$ が大きくなって、減圧が地層の奥まで伝わらないため、ガスの生産レートが増えない／減る

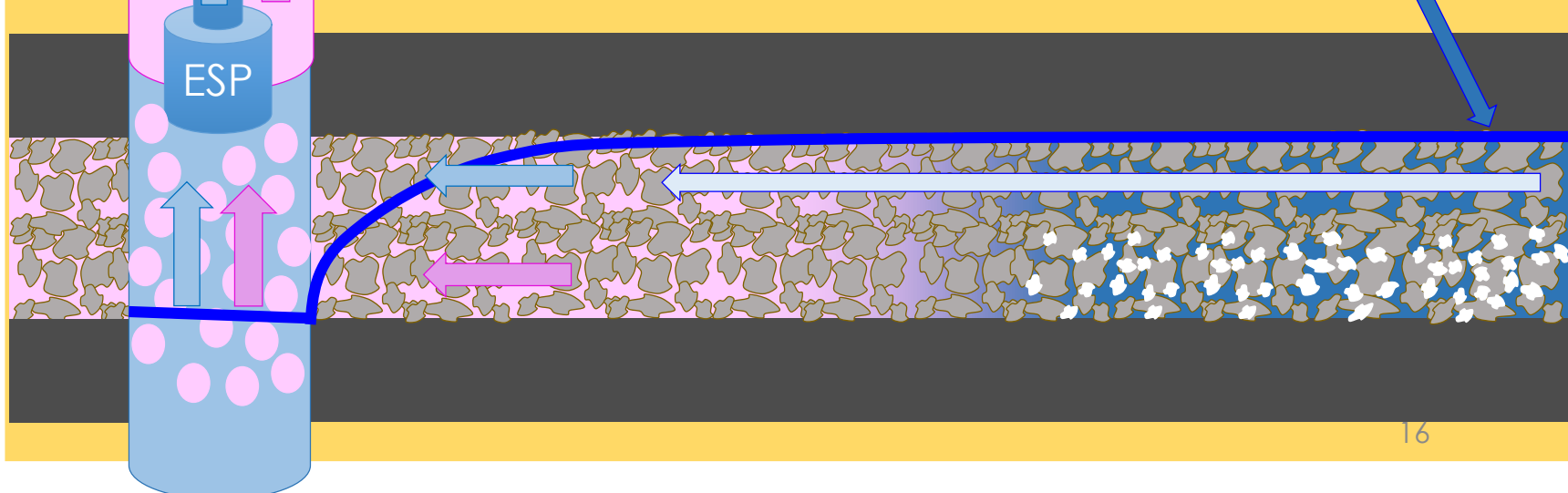


## 起こるかもしれないと思っていたこと（２）

地層から供給される水が多くなりすぎて、汲んでも汲んでも減圧された領域が広がらなくなる



- 地層傾斜の影響
- ハイドレート濃集状況の非均質性（水平方向）
- 特異的な水層の存在（垂直方向）
- 分解の異方性



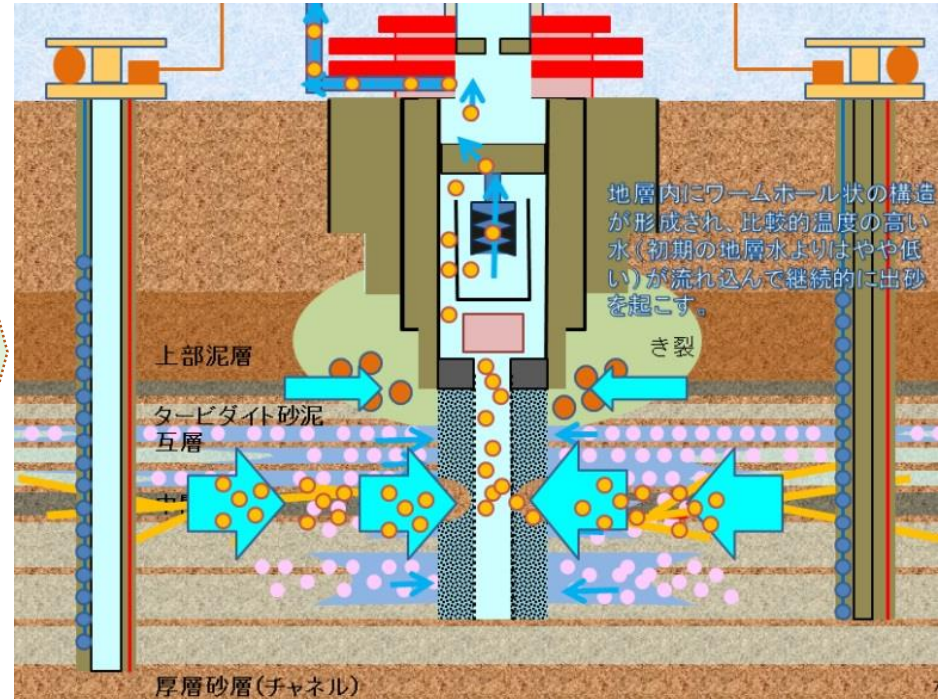
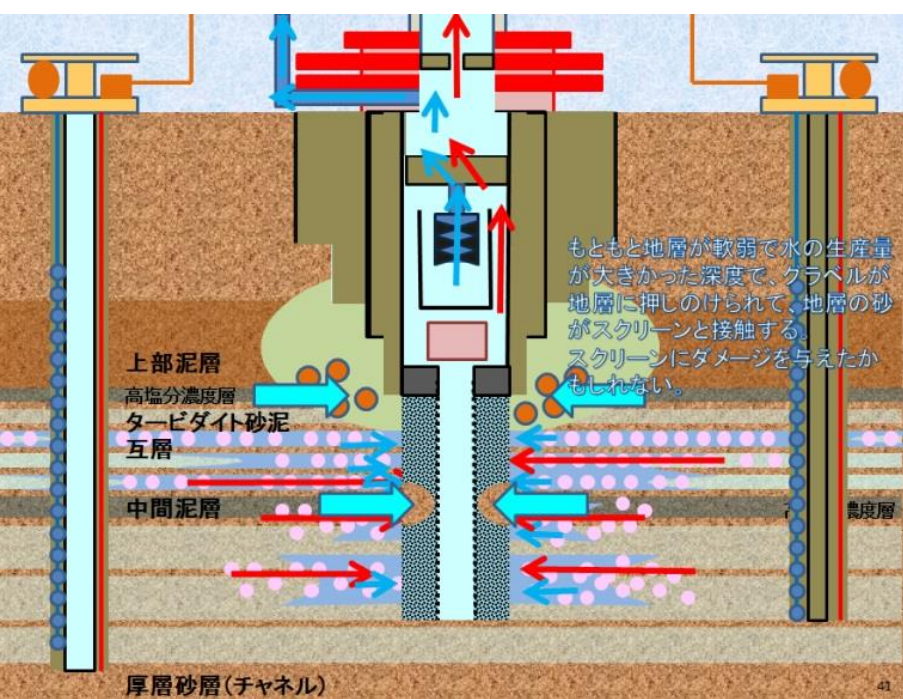
## 第 1 回試験で生じた課題

- グラベルパックは、機器が健全であれば出砂対策装置として優れていたと評価しているが、グラベルの移動・装置の力学的損傷などで途中で機能を喪失したと思われる。
- 一方、出砂対策装置の目詰まりリスクが小さいことも必要（細かい砂は流してしまう）

## 課題解決の方向性

- 移動しにくい固体の出砂対策装置で、かつ地層との間に隙間が小さい
- 目詰まりがしにくく、かつ磨耗されにくい
- 設置作業が単純で、リスクが小さく、所要時間が短い  
といった装置で多重の防御を行う。

# 第1回試験の出砂発生シナリオ



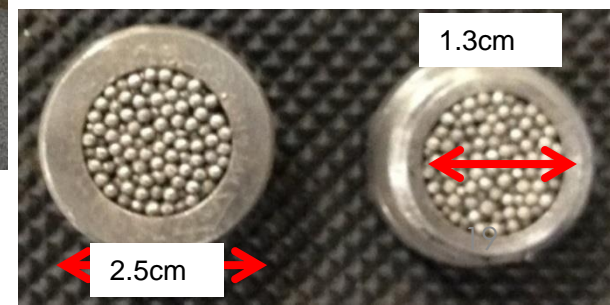
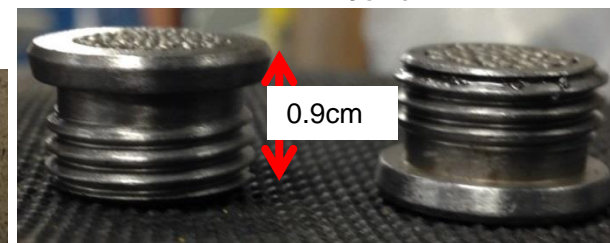
地層温度計の解析、実験結果、シミュレーション結果や過去のトラブル事例から考えられる状況：

- ◆ スクリーン（金属フィルター）周りに置かれた比重の小さいグラベル（粗い砂）が重たくて流速の速い砂のスラリーに押しつけられて、スクリーンに直接砂が流れ込んで出砂対策装置を破壊した



# 選定された出砂対策装置

- グラベルのように流出・移動する恐れがなく、変形やエロージョンにも強い形状記憶ポリマーを使った出砂対策装置GeoFORM™ (Baker Hughes Inc.) に、金属ビーズインサートを追加。
  - 金属ビーズインサート：0.6mm程度のステンレスボールを拡散接合にて固めたもの。仕上げ区間内に8,000個程取り付け。
  - 過去に比較的低温の環境で使用された実績があり、8例中7例で成功、1例は設置作業中の損傷で失敗。
- 坑底で膨張させるタイプと、膨張させたものを設置するタイプの2タイプを使用。
- 低温用の活性化剤を検討して選定。
- 出砂・出水のリスクが高いとみられる層があれば、パッカーで隔離する。



形状記憶ポリマーを使用した出砂対策装置 (GeoFORM™) が膨張して坑内を充填する状況の解説図。

# 技術課題への対応2：荒天による緊急切り離しの可能性を下げる

## 第1回試験で生じた課題

- 前回は掘削船「ちきゅう」の掘削用ライザーと防噴防止装置（BOP）を用いて試験を行った。
  - この掘削用ライザーは、海底面下数千メートルまで掘削し、高圧のガス・油が上昇してきても安全に作業するための装置であり、低圧のメタンハイドレート坑井には過剰装備である。
  - 装置の降下・揚収に時間がかかる（設置だけで4日程度）など、坑井の切り離し・再設置や切り替えが難しくなる。（第1回試験の仕組みでは実質的に再接続は不可能）
  - 第2渥美海丘の条件では、荒天時に緊急切り離しが必要になる可能性が高く、長期の連続フローは難しいと考えられた。

## 課題解決の方向性

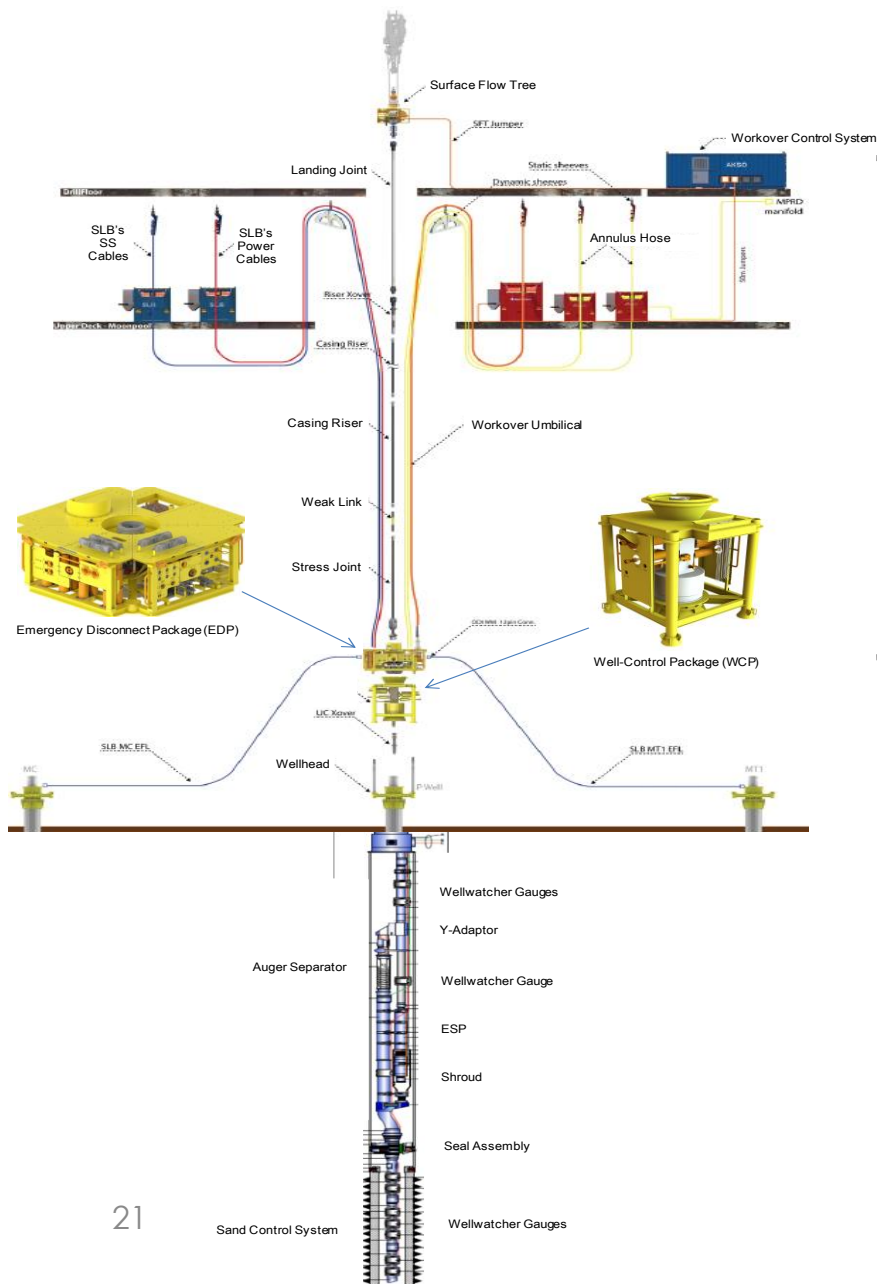
- 荒天で船が大きく定位置からずれても切り離さなくても良いように、余裕を大きいシステムにする。
- 切り離しても再接続して試験が再開できるようにする

## 第2回試験での具体的対応策

- 海底油田の改修作業等で用いられているワークオーバーライザーを使用する。
  - 軽量で、降下・揚収が速やかに行える。
  - 緊急切り離しに要する時間が短いため、許容される船の偏距が大きくとれて、切り離しの可能性を低減できる。（掘削用ライザーでは14mだった船の位置のずれの限界を、ワークオーバーライザーは30mまで許容）
  - 電気系統（電源・センサー／制御信号）配線を水中コネクタで接続し、再接続できるようにする



# 選定された産出試験システム案



## ワークオーバーライザーシステムの使用を決定

既存システムで新規開発要素が少なくリスクが低い、実績が多く安全で法にも適合する、新たに装置を製造して購入しても作業期間の短縮と離脱時の揚収・再降下の日数・費用を勘案するとより経済的と判断した。

### ワークオーバーライザーシステム

- ガスの導管には9-5/8"ケーシングを使用 (降下・揚収が短時間で行える)
- 水の導管にはホースを2本設置
- 船のBOPに変わって、軽量で再接続が容易なEDP・WCPを使用

スプール+チュービングハンガー、一体型(オプション3)

改良された坑内試験システム

# 技術課題への対応3：確実な減圧制御のための坑内機器

## 第1回試験で生じた課題

- 前回試験では、ガスと水の分離が確実に行えなかったことが、坑内圧力を制御することを難しくした。
  - 坑内に断面積が小さい個所が多くガス・水の流速が早くなって効率的に重力分離ができなかった。
  - 体積の大きなガスのスラグ（ガスの塊）が発生した。
- 坑内機器が複雑で、降下・揚収に時間がかかり、ケーブルの断線などのリスクも大きかった。
  - 一部、データの欠測が生じた。

## 課題解決の方向性

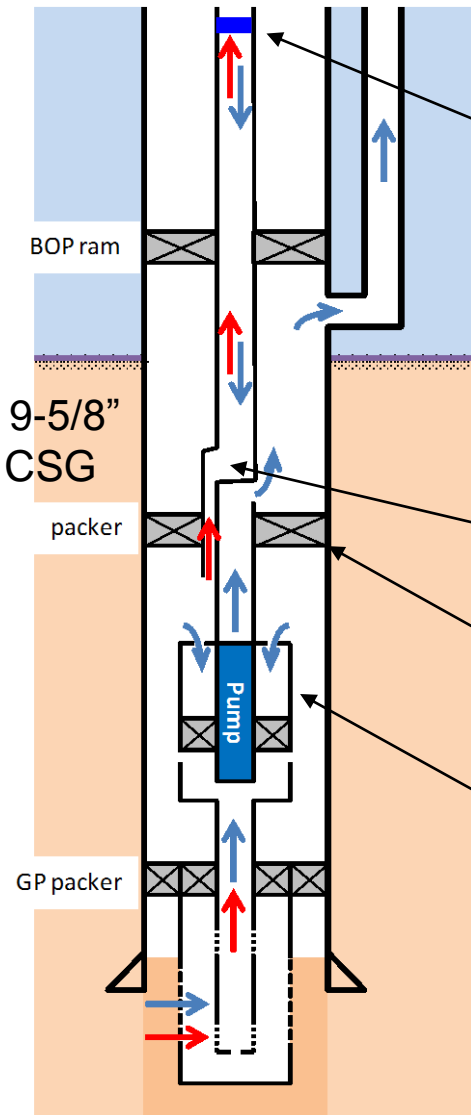
- ガス・水分離の確実性を実現して圧力の制御を可能とする。
- 作業の容易さ（複雑さの回避）、必要なデータを確実に取得できるなどを考慮。

## 第2回試験での具体的対応策

- ポンプを設置する区間のケーシング径を広げ（9-5/8"→13-3/8"）、断面積を広げて流速を落として分離効率を上げる。
- 前回同様にESP（電動水中ポンプ）で減圧するが、簡素化されかつ広い断面積と長い分離区間を確保した坑内機器を設計した。
- 生産区間の温度・圧力の分布を計測可能にした。（前回は温度のみ深度分布を計測できた）

## 第1回試験の坑内水・ガスフロー

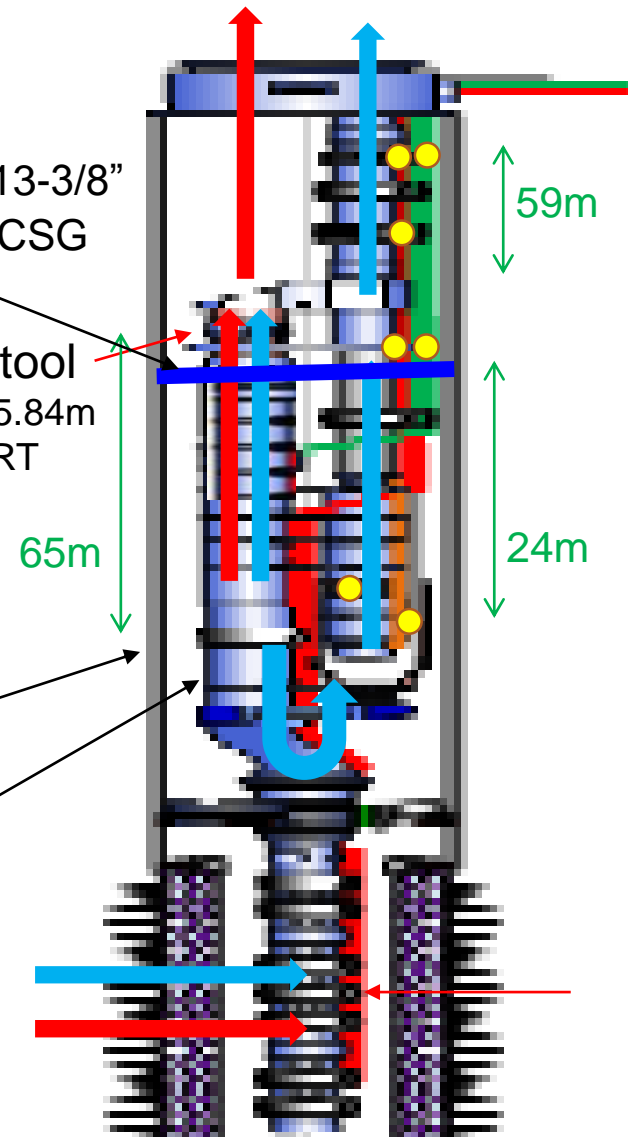
## 第2回試験の坑内水・ガスフロー



液面がガス導管（6-5/8" DP）内にあったのを、坑口に背圧をかけることで、13-3/8" CSG内、さらにY-tool トップより下に持つてくることで、スラグフローを防止し、ガス水分離を確実なものとした

流速が速くなる狭隘部をなくす  
ケーシング径を9-5/8"から13-3/8"に拡大  
ESPを7"シュラウドに収めていたのをデュアルチュービングに変更

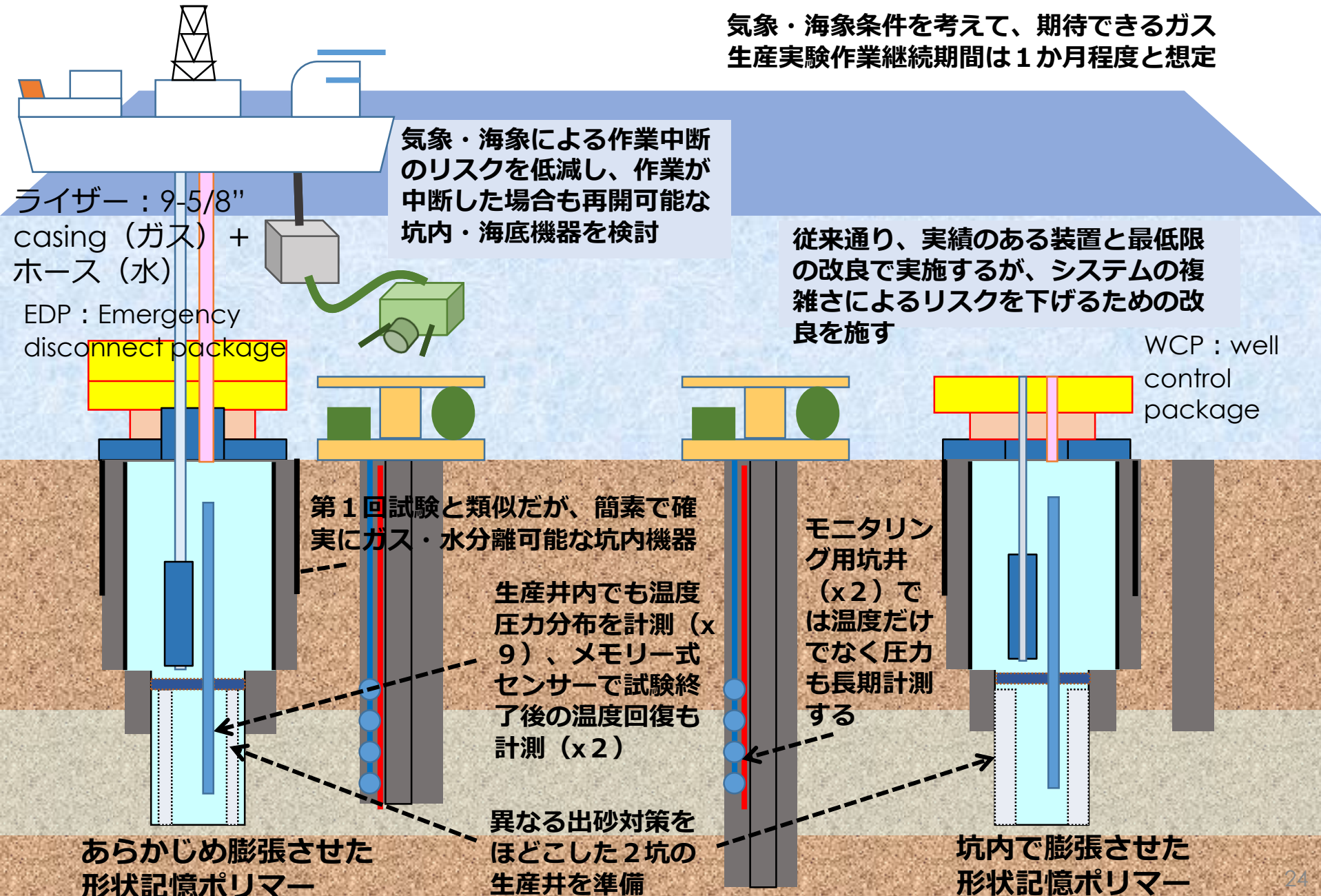
以上により、流路面積を増やして（3倍以上）、流速を落とし、ガスと水の重力分離を向上させた。



# 最終的な試験のコンセプト

第1回試験と同様に浮遊式掘削リグを使用。

気象・海象条件を考えて、期待できるガス生産実験作業継続期間は1か月程度と想定



### P3にて最初に生産実験、引き続きP2で生産実験

- 単純な作業で設置でき、活性化剤の生産水への混入もない（海洋汚染の心配のない）、あらかじめ膨張させた形状記憶ポリマーで良好な結果が得られれば、今後もこの技術を適用し続けることができる。
- ただし、細粒が形状記憶ポリマーと地層の間に流れ込むと目詰まりが起これり生産量が低下する可能性がある。
- 形状記憶ポリマーの目詰まりがより小さいとみられるP2でも生産して比較する

### 初期の13.5MPaから、7→5→3MPaと三段階で減圧

- 7及び5MPaで生産量が安定するまで数日保持する。
  - 坑内機器等の装置の動作確認作業
  - 急激な減圧による坑井・地層へのダメージを防ぐ
  - 3つの異なる条件のデータセットを入手することで、貯留層評価とハイドレート分解予測の精度を上げることができる。（変数に対して方程式の数を増やせる）
- 3MPaでなるべく長く生産できるようにする方針。
- 7MPaではハイドレート再生成のリスクがあるので、長期は保持しない。

### 出砂が発生した場合

- 出砂検知器の設置や坑内圧力の計測で、早期に出砂を検知
- スペアのないEDP, ライザー, 船上設備へのダメージを防ぐことが最優先
- 減圧度を調整して水生産量を下げて出砂が抑制できないかトライ
- コントロールできない時は、坑内の砂を排除して次の坑井に移る。

### 大量の水が生産された場合

- 減圧度でコントロールできなければ、次の坑井に移行。

### ガスも水も生産が低下した場合

- 出砂対策装置の影響があるか確かめるために次の坑井に移行。

P3

M13

M12

P2

# 本日の内容

- これまでの研究経緯と第2回海洋産出試験の目的
- **作業の工程と実施状況**
- 試験の結果と取得されたデータと成果
- 新たな課題とそれらへの取り組み、将来への指針



# 全体スケジュール

## 2016年5-6月：事前掘削

- モニタリング用坑井の掘削と物理検層データの取得（地層の状況の把握）
- 温度・圧力モニタリング装置の設置
- 生産井の浅い部分（ハイドレート濃集帯より上部）の掘削

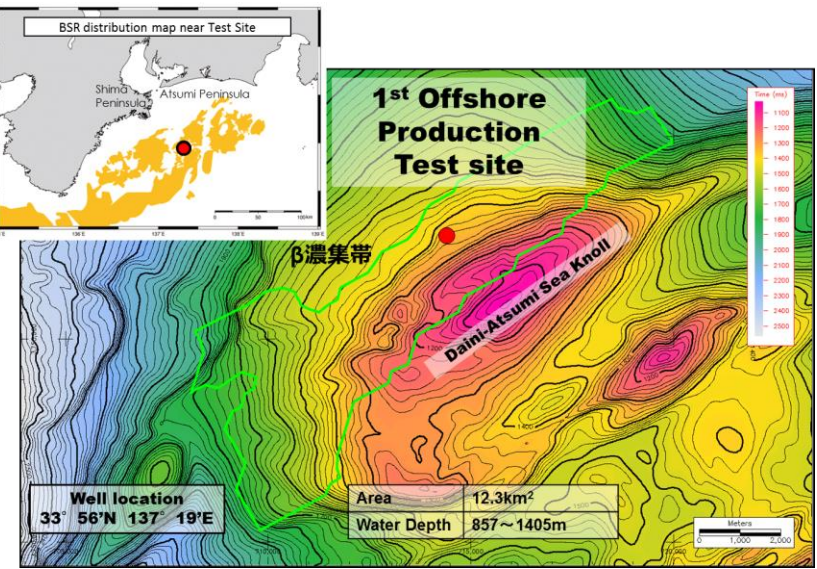
## 2017年4-7月：ガス生産実験

- 生産井ハイドレート濃集区間掘削
- 出砂対策装置・坑内機器設置
- ガス生産実験

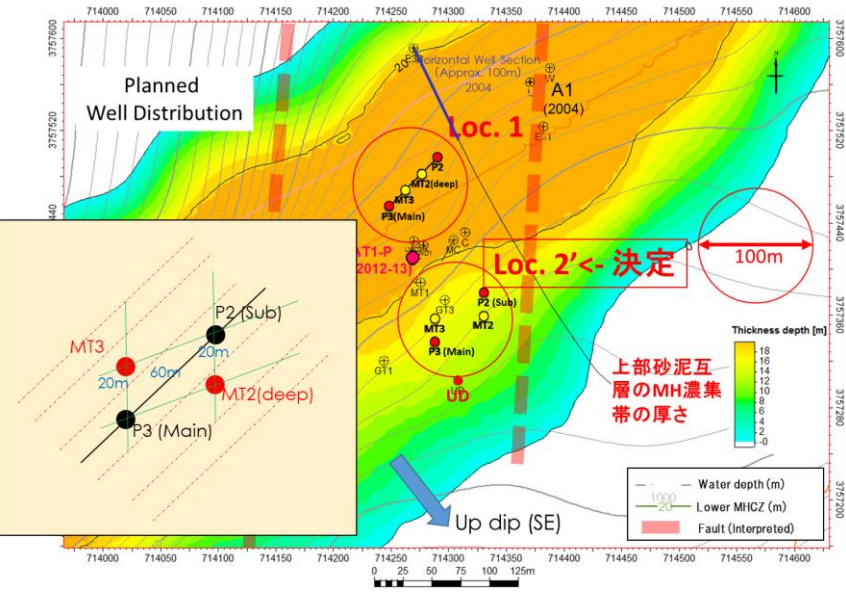
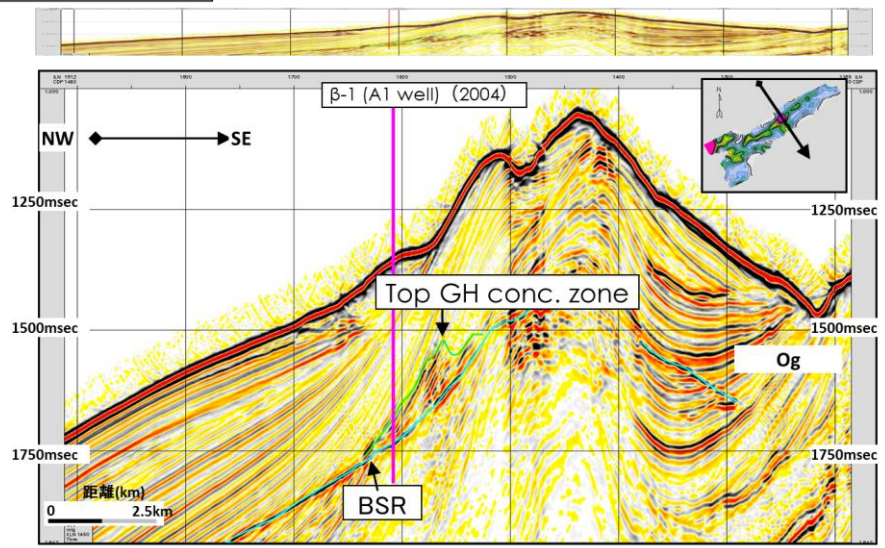
## 2018年前半：追加データ取得と廃坑作業

- 出砂などのトラブル原因の追究や貯留層の特性をよりよく知るための追加データ取得
- 廃坑作業と原状復帰

# 第二渥美海丘：渥美半島～志摩半島の沖合



in scale

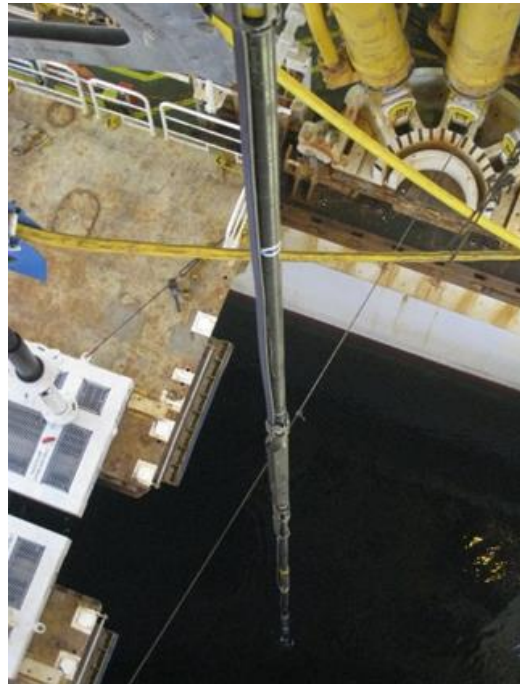
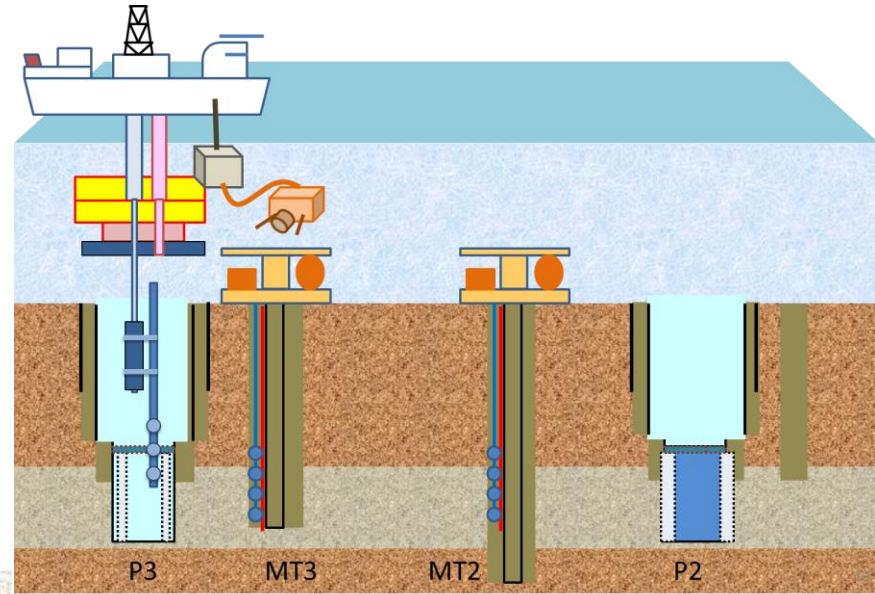


■ 試験候補地点：前回に引き続きデータの豊富な第二渥美海丘で試験を行った。Loc.1とLoc.2'の二候補を選んで検討したが、地質調査井AT1-UDの検層ログ、生産シミュレータによる評価結果、生産に関わるリスク評価の結果などから、Loc.2'で試験を行うと決定した



# 第2回海洋産出試験のガス生産実験の経緯

- 4/1 ちきゅう傭船開始
- 4/6 清水港出港、22時に現場到着。4/7 作業開始
- ..... P2井→P3井の順に掘削し、出砂対策装置を降下
- 次に、P3井に坑内機器・海底機器を降下

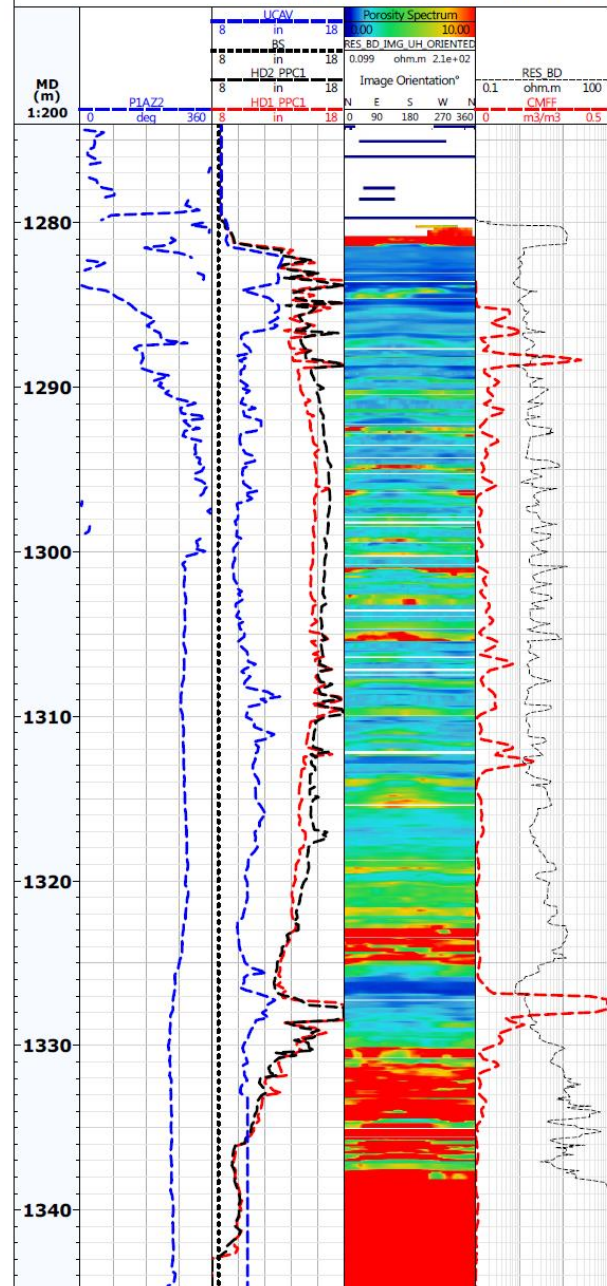




Well: AT1-P2-02

P2

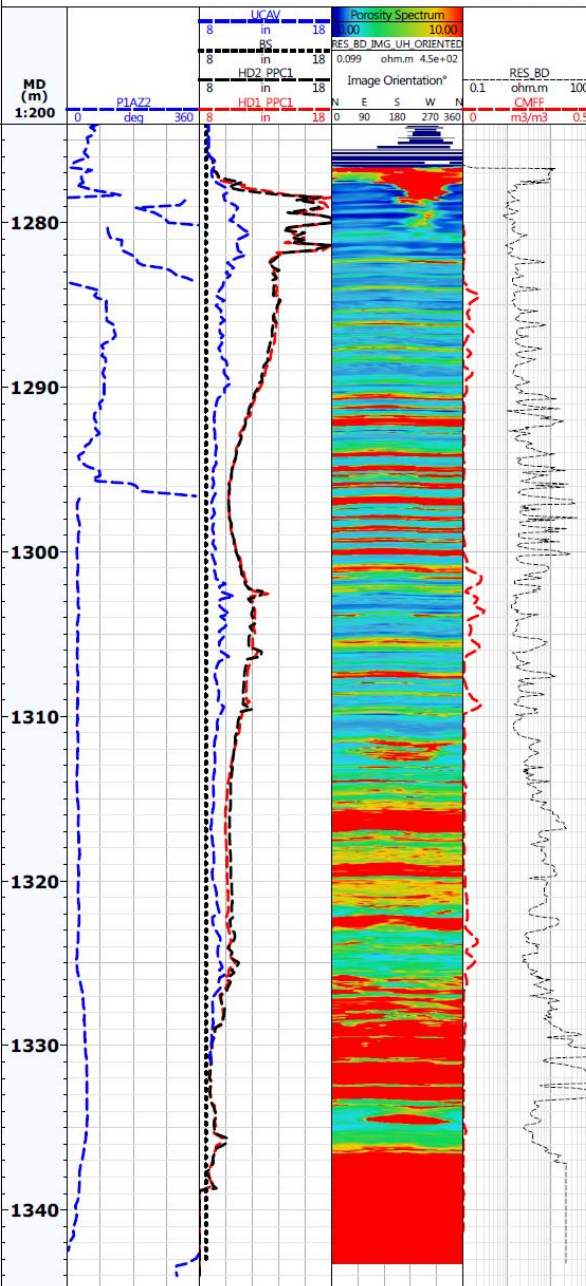
Elevation:  
Elevation datum:  
Total depth: -999.25  
Coordinate system:  
X: 714330.4  
Y: 3757380.4  
Longitude: 137° 19'  
Latitude: 33° 56' 6"



Well: AT1-P3-02

P3

Elevation:  
Elevation datum:  
Total depth: -999.25  
Coordinate system:  
X: 714288.0  
Y: 3757338.0  
Longitude: 137° 19'  
Latitude: 33° 56' 4"

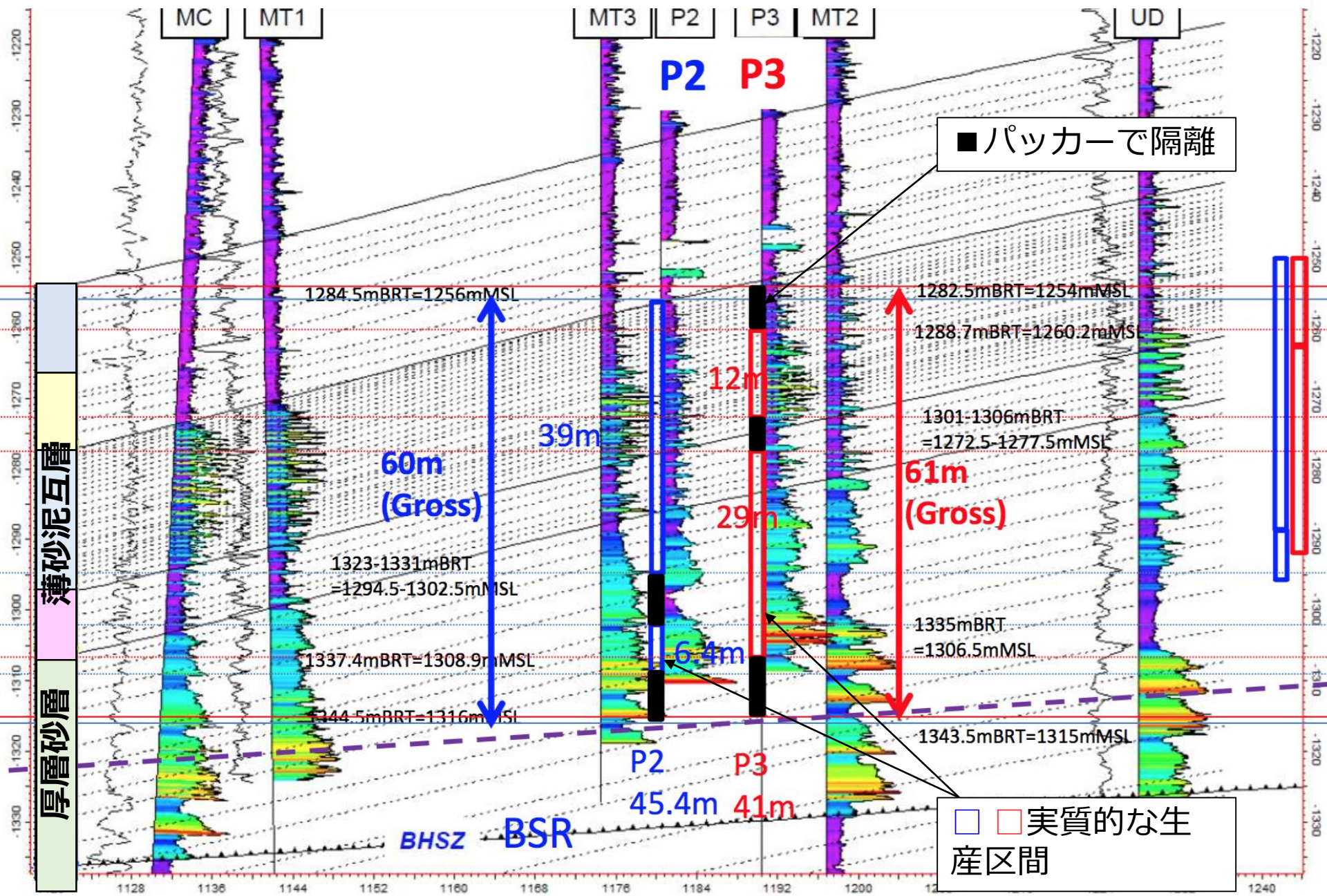


## 予想外の事象：坑径 拡大が顕著だった

- これまで、メタンハイドレート層は概ねビット径の通り掘れていた。
- 今回は、P2井ではビット径の倍以上、注意して掘ったP3井でも1.5倍くらいに拡大した区間がある。
- これまで掘った井戸に比べてハイドレートが比較的少なかったこと、ゆっくり掘りすぎたことなどが原因か？
- そのため、形状記憶ポリマーは地層に密着せず隙間が空いた、パッカーは十分に機能しなかったと考えられる。

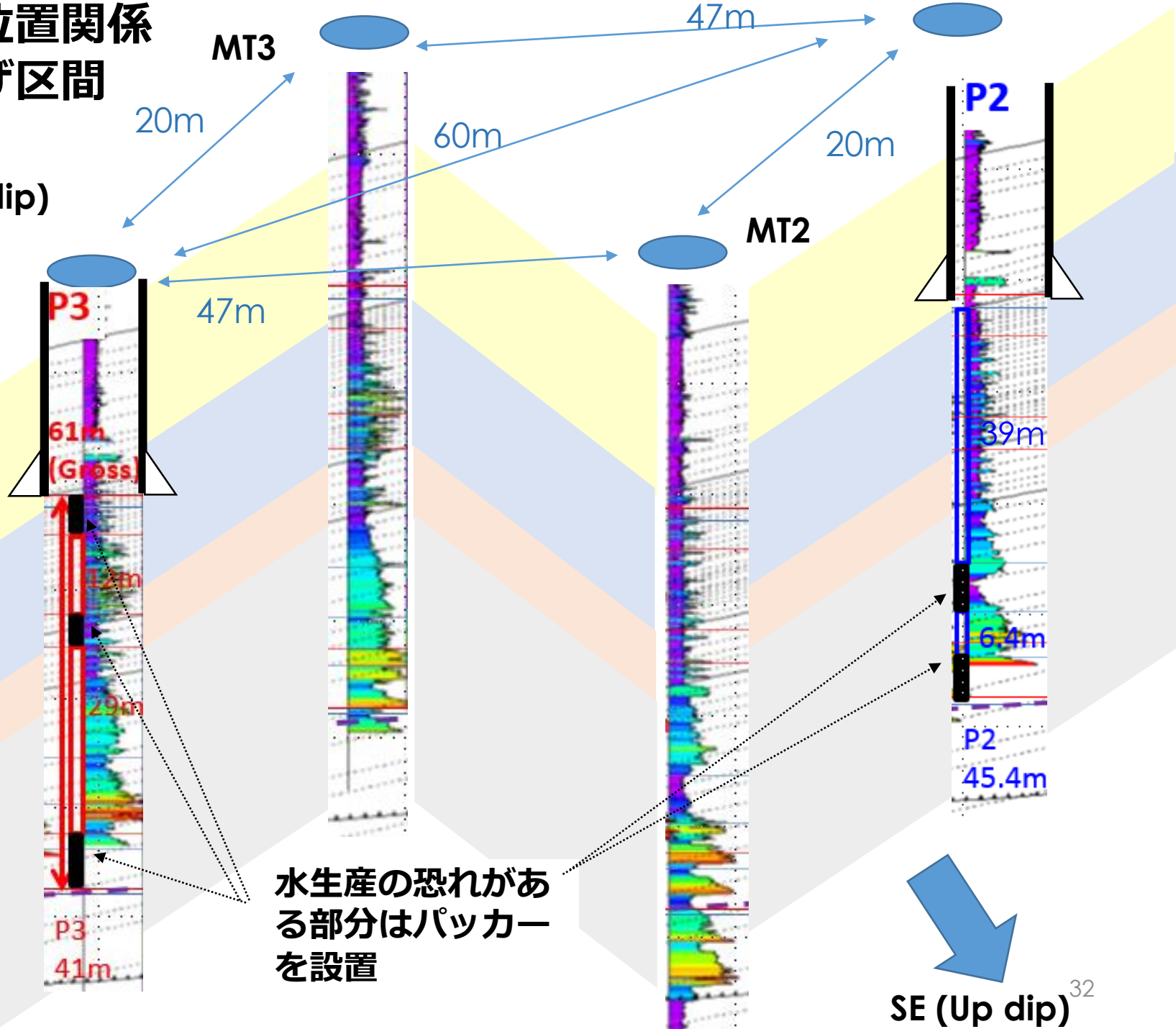


# 比抵抗検層ログ (ハイドレート濃集状況) と坑井の仕上げ区間



# 坑井の位置関係 と仕上げ区間

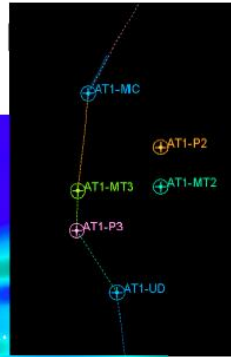
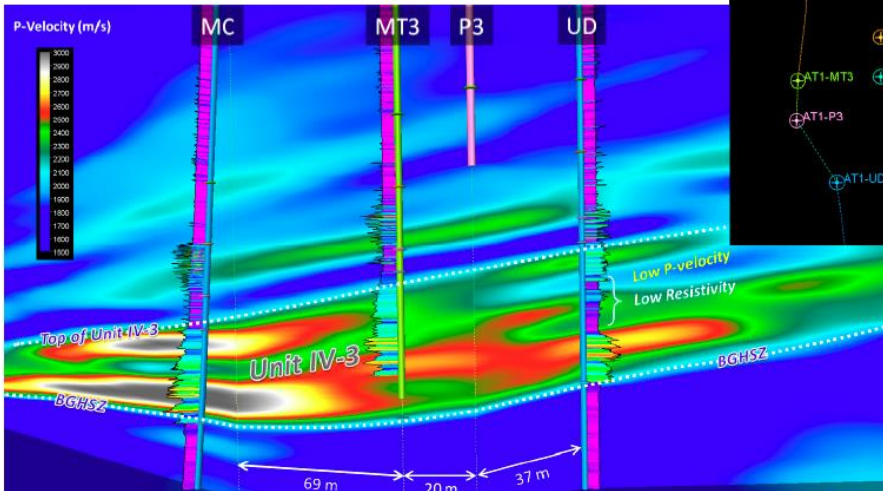
NW  
(Down dip)



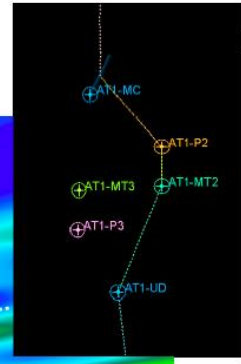
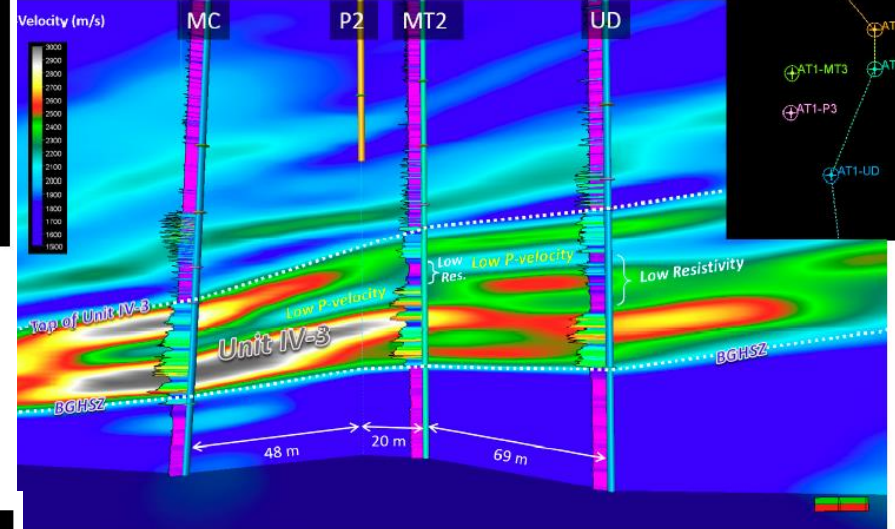


# 地震探査による各垂直断面内の音響インピーダンス分布と検層による比抵抗の分布の関係

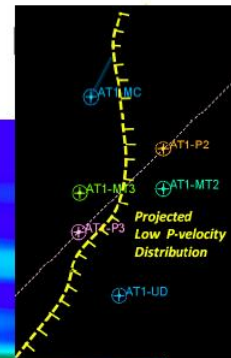
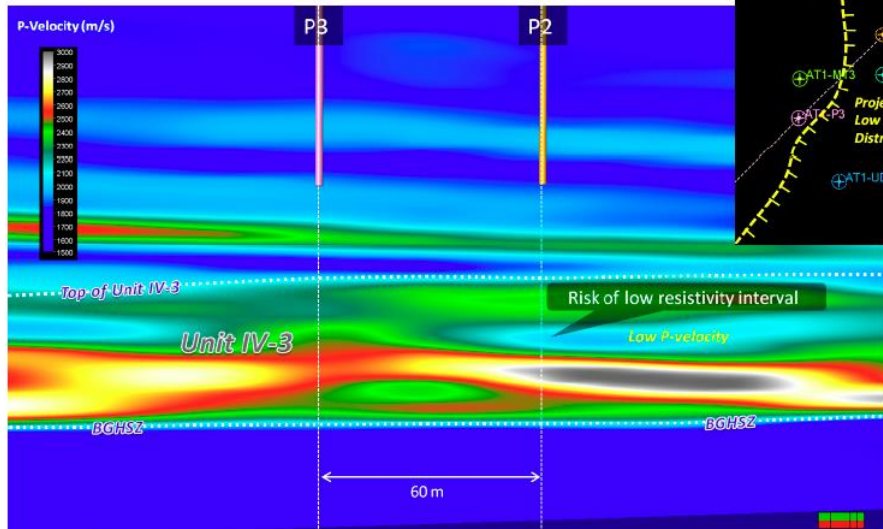
(a)



b)



(c)

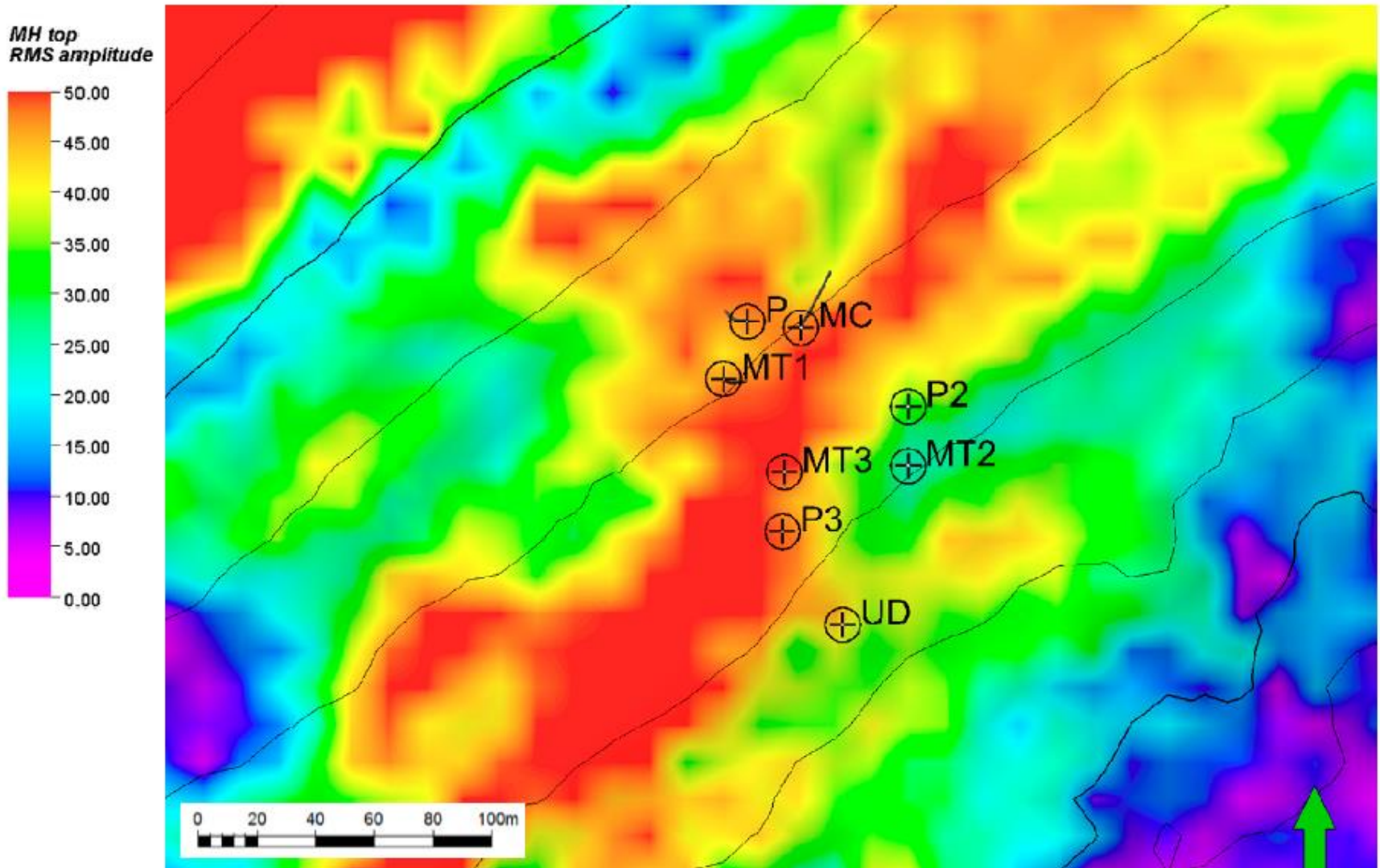


Tamaki et al. *Energies* **2017**, 10, 1678;  
doi:10.3390/en10101678

これまでに得られた多数の坑井からのデータと、地震探査による情報で、第二渥美海丘のハイドレート濃集帯の中のハイドレート濃集状況は均質ではないことがわかってきた。

# MH濃集帯トップの地震波反射振幅の分布

当該位置における濃集帯内のハイドレートの積算量と関係深いと考えられている。



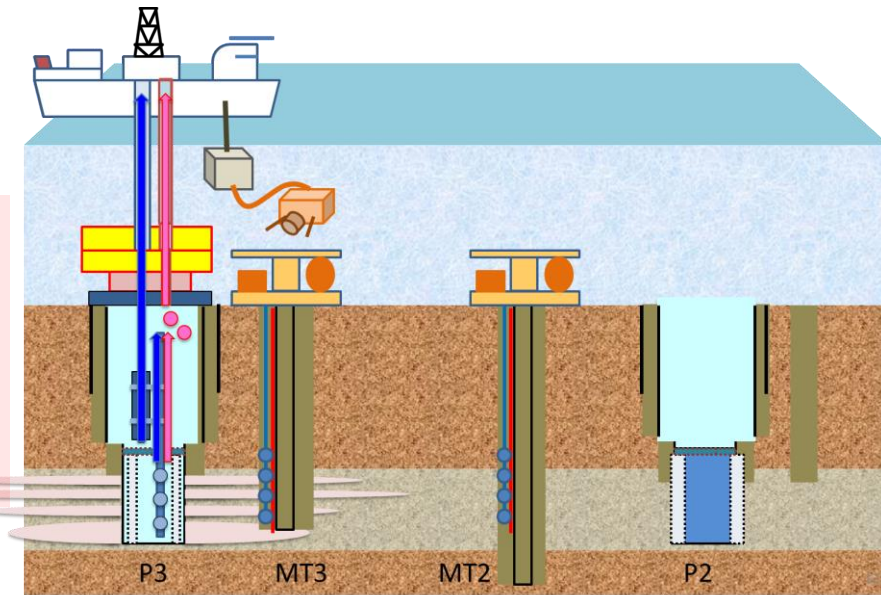
# ここまでで取られたデータから

- 2013年の坑井（P,MC,MT1）は良く似た地質とハイドレート飽和率であったが、今回の坑井は、堆積物（砂・シルト）の連続性はよいが、**ハイドレート飽和率のばらつきが大きい（水平方向に非均質性がある）**
- 全体的に、**上部砂泥互層のハイドレート飽和率は低め**
- 2013年の坑井でも見られた**顕著にハイドレート飽和率が低い砂層（～帯水層）**が見られる。その位置（深さ）は坑井によって若干異なる。
- **地震探査のデータと比較してみると、ハイドレート濃集状況の非均質性が予想される。**
- **水層を隔離するためにパッカーを設置したが、坑径拡大の影響で十分には機能していない可能性がある。**
- 坑径拡大の影響で、**出砂対策装置と地層に隙間**ができており、砂がスラリー化して動きやすい、**目詰まりを起こさせやすい**状況になった可能性がある。

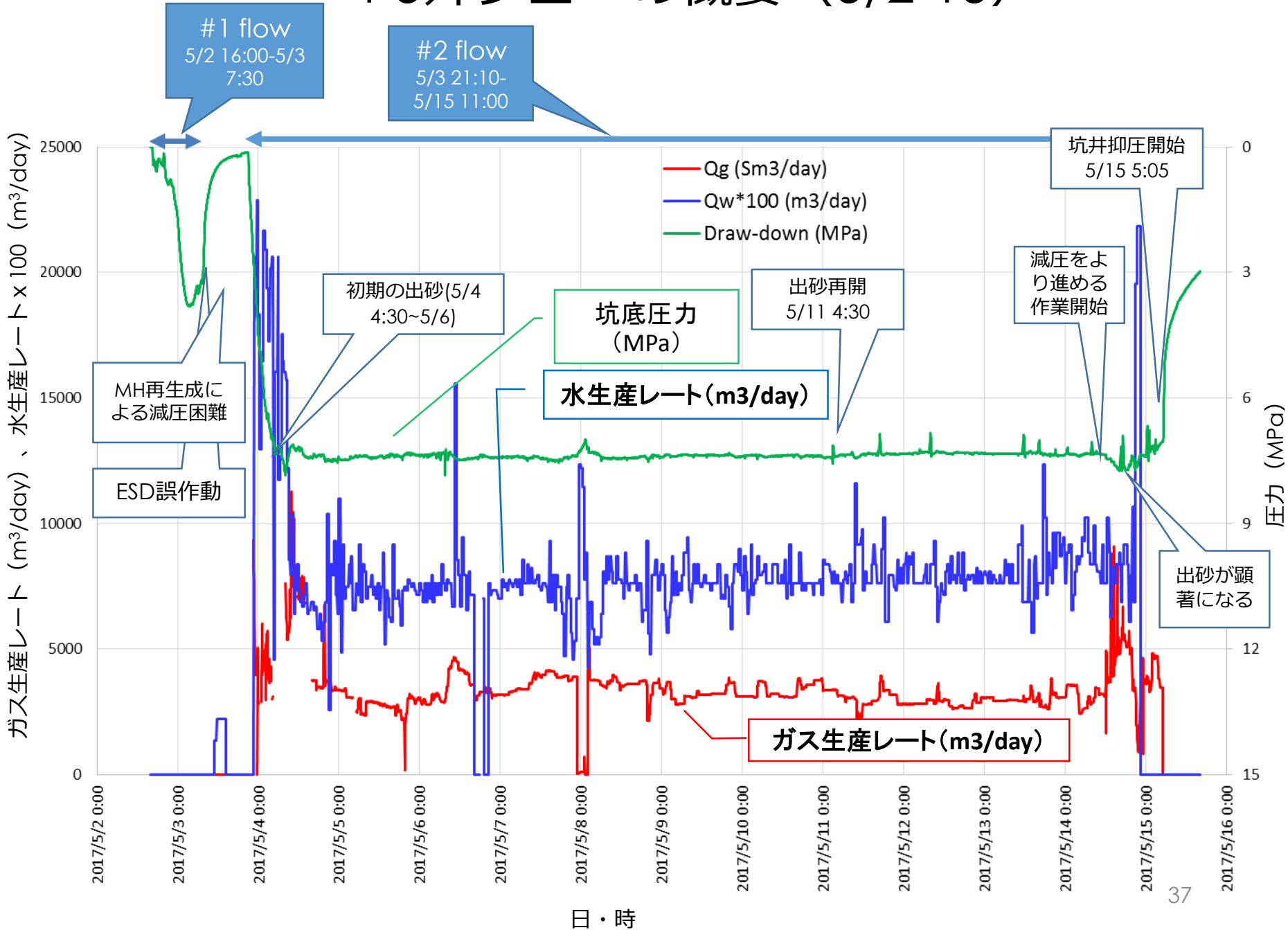


## 第2回海洋産出試験のガス生産実験の経緯

- 4/1 ちきゅう備船開始
- 4/6 清水港出港、22時に現場到着。4/7 作業開始
- ..... P2井→P3井の順に掘削し、出砂対策装置を降下  
次に、P3井に坑内機器・海底機器を降下
- 5/2 P3井で減圧開始、安全装置誤作動で一時停止  
後再開。5/4頃からガス量増加**
- ..... 5/4-5/6に少量の出砂  
ガス生産レートは3千m<sup>3</sup>/日程度。  
坑底圧力5.6MPa程度で維持  
5/11以降は出砂が顕著になる
- 5/15 砂の対処が困難となり、P3井の減圧を停止。**
- ..... P3井からEDPを切り離して離脱



# P3井フローの概要 (5/2-15)



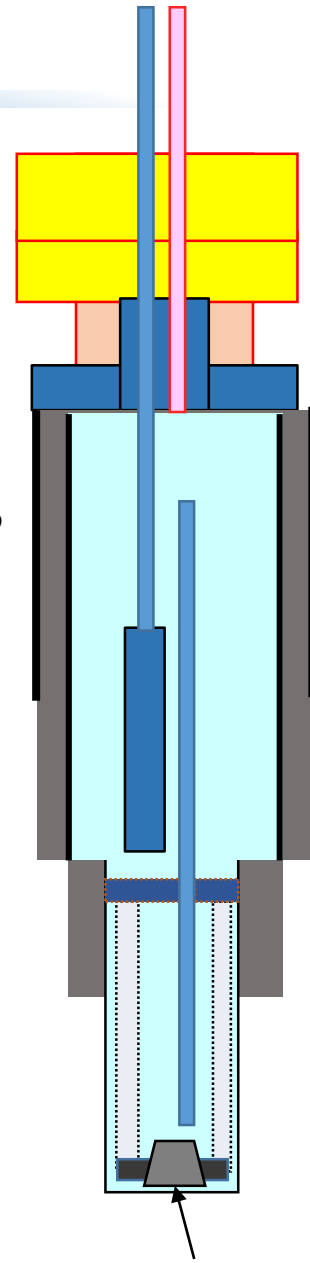
# P3井の出砂とP2井での対策

## 出砂の原因

- 坑内の温度・圧力データから、砂は井戸の最下部付近から侵入していることがわかった。
  - 温度と密度が高いものがゆっくり坑内を上昇していくのが観察された。
- 出砂がごく初期から起こっているため、出砂対策装置が破壊されている可能性は低いと考えられる。
  - 室内実験等で、今回使用した出砂対策装置を初期から破壊するのは困難だろうと予想される。
  - 坑井最下部には逆止弁がついているが、それが機能しないとそこから砂が入り込む可能性がある。
- 一方、坑内のハイドレート生成対策で急激に減圧したことが装置の破壊を招いた可能性も残っていた。

## 対策

- 逆止弁が機能しなくても砂が流入しないように、坑内機器最下部にプラグを設置した
- 多少出砂しても生産が継続できるように（船上の機器のダメージを防ぐように）、砂の除去装置を強化し、設備の配置等も変更した。
- なるべくゆっくり減圧することとしたが、その場合はハイドレート生成のリスクがあるので、予防のためにライザー内をインヒビター（ジエチレングリコール）で満たした。
  - 生産水に混ざるため、産業廃棄物として陸に持ち帰って処理した。

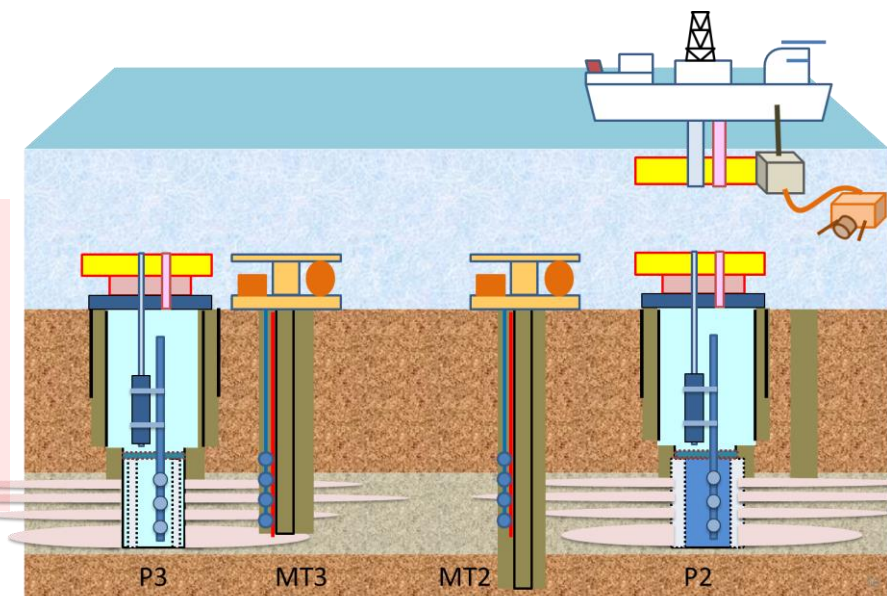


逆止弁



## 第2回海洋産出試験のガス生産実験の経緯

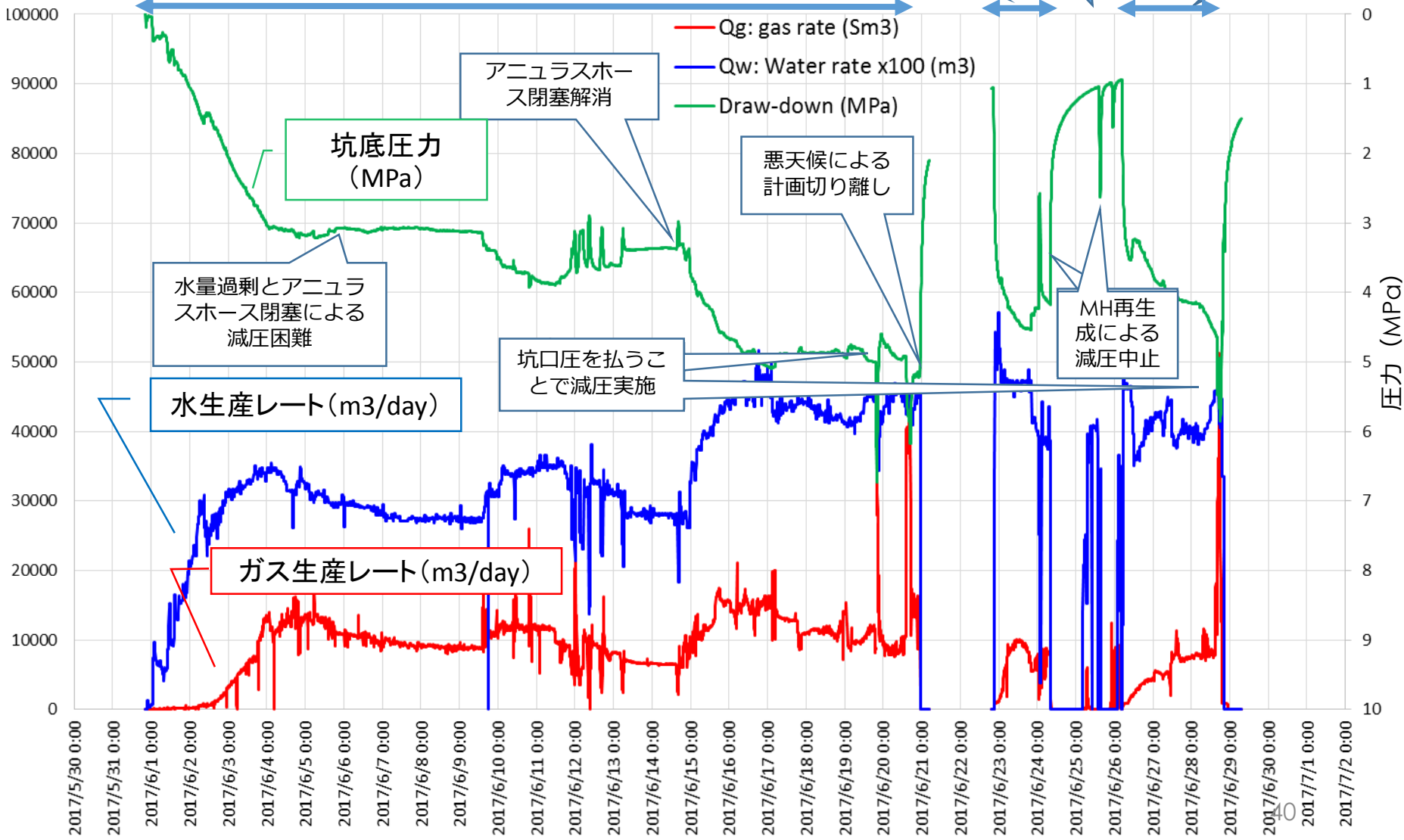
- 4/1 ちきゅう傭船開始  
4/6 清水港出港、22時に現場到着。4/7 作業開始  
..... P2井→P3井の順に掘削し、出砂対策装置を降下  
次に、P3井に坑内機器・海底機器を降下
- 5/2 P3井で減圧開始、安全装置誤作動で一時停止後再開。5/4頃からガス量増加**  
..... 5/4-5/6に少量の出砂  
ガス生産レートは3千m<sup>3</sup>/日程度。  
坑底圧力5.6MPa程度で維持  
5/11以降は出砂が顕著になる
- 5/15 砂の対処が困難となり、P3井の減圧を停止。**  
..... P3井からEDPを切り離して離脱  
P2井に移動。追加出砂対策後、坑内機器を降下  
活性化剤の排出、船上砂処理設備の増強
- 5/31 P2井で減圧を開始。徐々にガス量増加**  
..... 出砂はなし。ガス生産レートは1万m<sup>3</sup>/日前後。  
ただし、水生産レートが高く、気液分離が不調。  
坑底圧力8MPa程度(水量が過大)
- 6/28 P2井の減圧を停止し、ガス生産を終了**  
..... P2井から離脱。P3井に戻り坑内機器一部を回収



# P2井フローの概要 (5/31-6/28)

ガス生産レート (m<sup>3</sup>/day) 、水生産レート (m<sup>3</sup>/day) × 100 (m<sup>3</sup>/day)

- #1 flow 5/31 20:30-6/20 23:00
- #2 flow 6/22 20:30-6/24 8:10
- #3 flow 6/25 14:25-6/25 15:20
- #4 flow 6/26 4:50-6/28 18:50



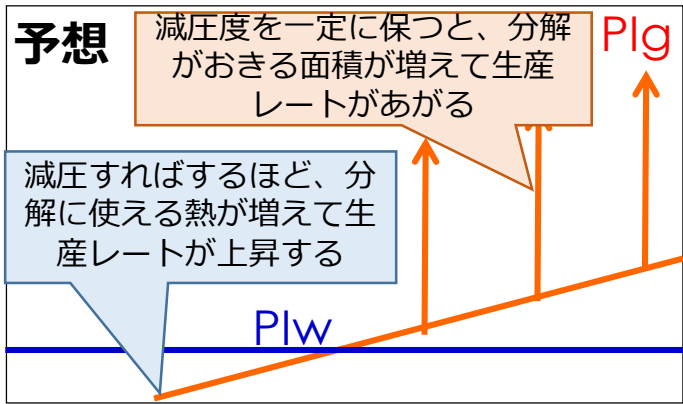
圧力 (MPa)

# 生産結果の概要

	AT1-P3	AT1-P2
試験期間*	2017年5月2日16:00~ 2017年5月15日11:00 #1 flow 5/2 16:00-5/3 7:30 (0d15h30m) (ESD誤作動による休止) #2 flow 5/3 21:10-5/15 11:00 (11d13h50m) 合計フロー期間：12d5h20m	2017年5月31日20:30~ 2017年6月28日18:50 #1 flow 5/31 20:30-6/20 23:00 (20d2h30m) (荒天による計画切り離し) #2 flow 6/22 20:30-6/24 8:10 (1d11h40m) (管内ハイドレート除去作業) #3 flow 6/25 14:25-6/25 15:20 (0d0h55m) (管内ハイドレート除去作業) #4 flow 6/26 4:50-6/28 18:50 (2d14h0m) 合計フロー期間：24d4h5m
最大減圧度	7.85MPa (13.0MPa – 5.15MPa)	瞬時値6.73MPa (13.0MPa – 6.27MPa) 安定期間 約5MPa (13.0MPa – 8MPa)
累積生産量	ガス：40,849.9Sm <sup>3</sup> 水：922.5m <sup>3</sup>	ガス：222,587.1 Sm <sup>3</sup> 水：8246.9m <sup>3</sup>
主要イベント	出砂検出期間 #1 5/4 4:30~5/6 6:00 #2 5/11 5:00~5/15 5:00	出砂なし 計画切り離し 6/21 6:15-6/22 11:30

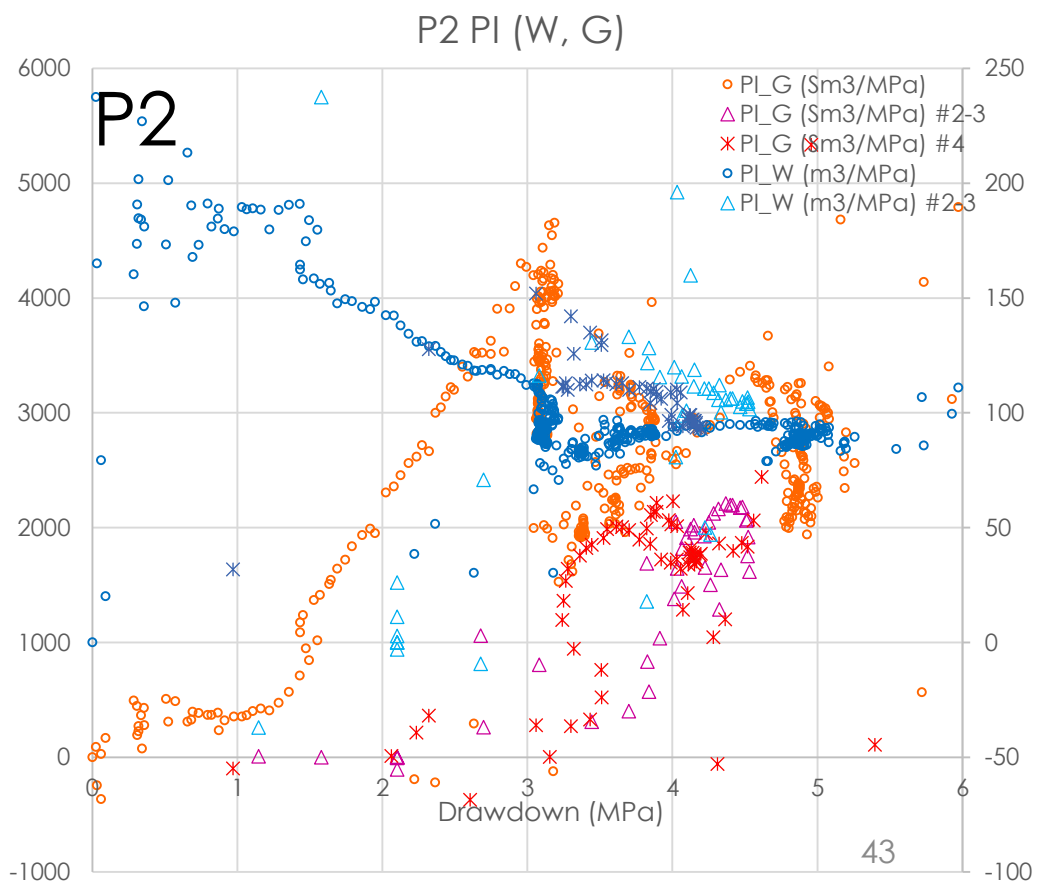
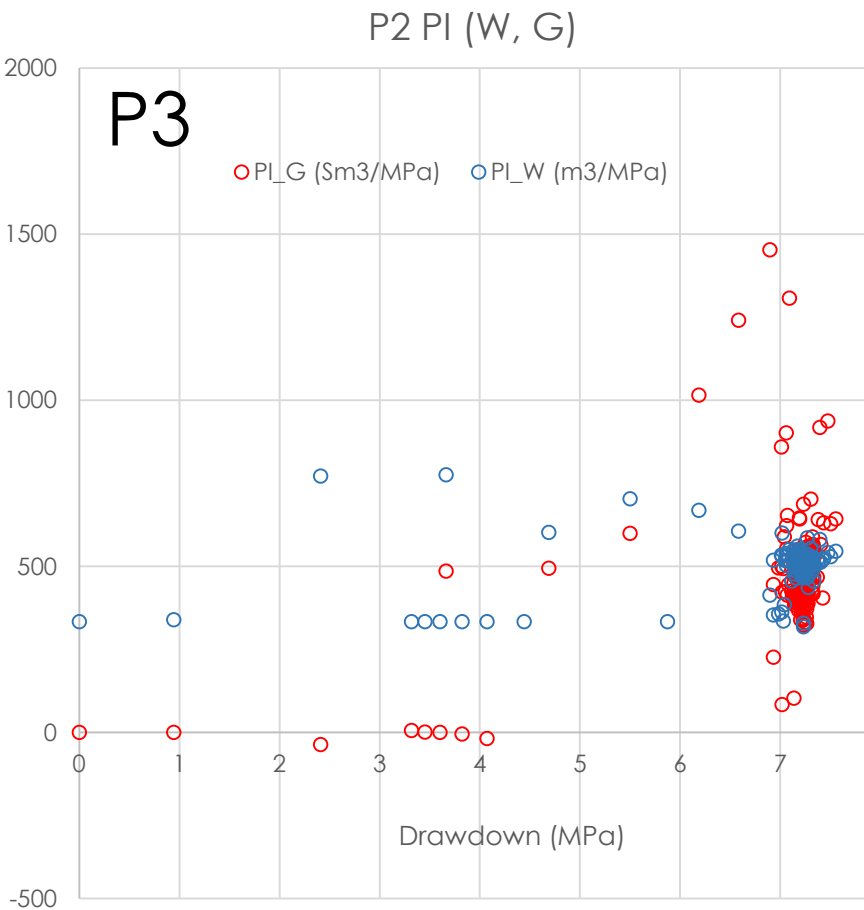
\*試験期間は電動水中ポンプ（ESP）作動時間を基準としており、実際のガス生産期間は若干前後する。

- これまでの研究経緯と第2回海洋産出試験の目的
- 作業の工程と実施状況
- **試験の結果と取得されたデータと成果**
- 新たな課題とそれらへの取り組み、将来への指針



# 減圧度と単位減圧度あたりのガス・水生産レート ( $PI_g/PI_w$ (m<sup>3</sup>/day/Mpa))の関係

予想通り、減圧度が上がるとガスの生産量は上昇していったが、その後時間経過につれてどんどん増えていくという現象は見られなかった。



# 生産井とモニタリング井の温度データの比較

P3生産中は上部の温度変化は小さい (MH分解は進んでいない)

生産井で低温のもの (ハイドレート分解水とガス) が  
入ってきた深度ではモニタリング井戸でも温度低下が見られる

MT3井 T

MT2井 T

Time of origin: 2017/05/02 16:00:00

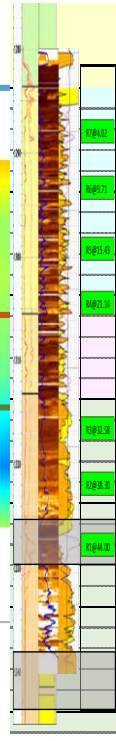
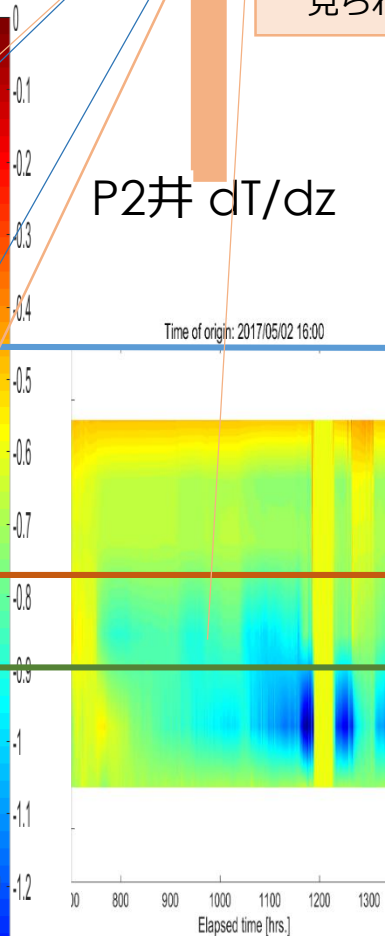
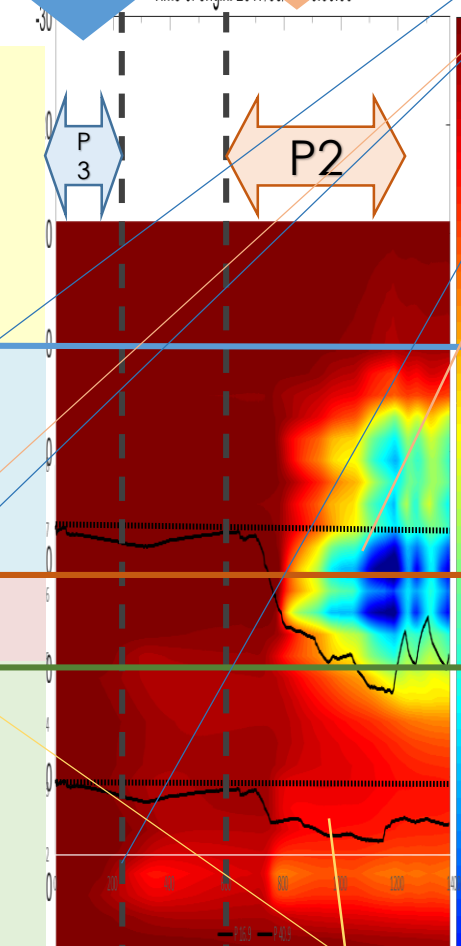
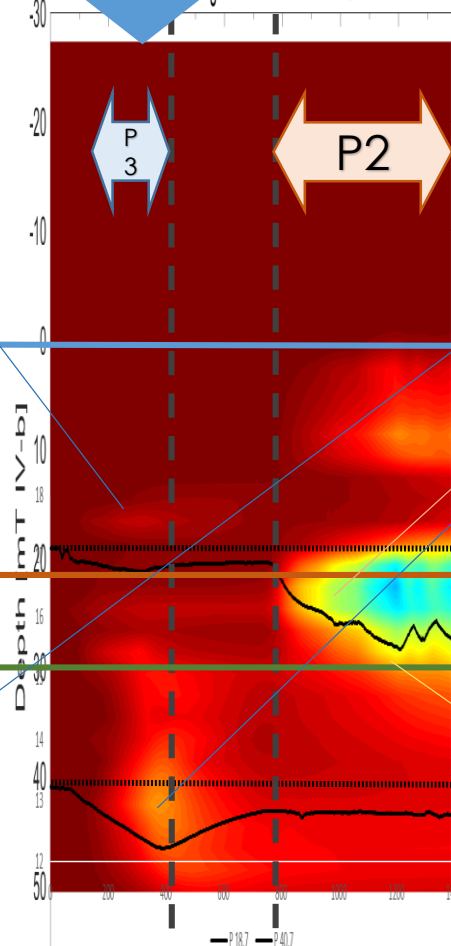
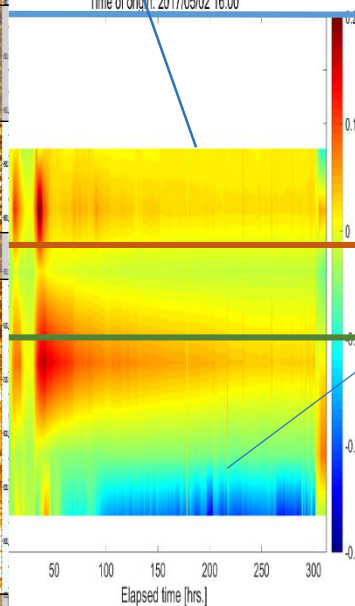
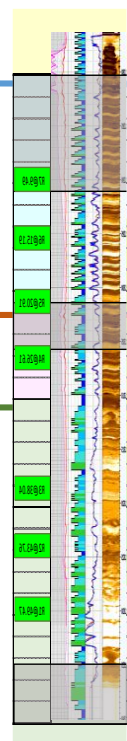
Time of origin: 2017/05/02 16:00:00

P3井 dT/dz

P2井 dT/dz

Time of origin: 2017/05/02 16:00

Time of origin: 2017/05/02 16:00



P2生産中は途中から温度・圧力が  
予想ほど下がらなくなる



# 生産データ・モニタリングデータからいえそうなこと

- 予想されたガス生産量が増大するという現象は見られなかった
- P3では減圧の度合いに対してガス・水生産レートが小さい
  - ガスは主に下部の厚層砂層区間から生産されている。
  - 上部の砂泥互層の寄与は小さい
  - 近いモニタリング井まで分解がようやく届いた程度
- P2では、水レートが高いとともに、減圧度が小さいうちからガスレートも高い
  - 上部砂泥互層区間の下部や中間層の寄与が大きい
  - 水は最上部から多く進入している
  - 遠いほうのモニタリング井まで分解が届いているが、温度・圧力は下げ止まっている？

• **P3で予想より生産量が少なかった要因**

• **P2で小さい減圧度で多量のガスと水が生産された原因**

• **生産量の上昇が見られなかった原因**

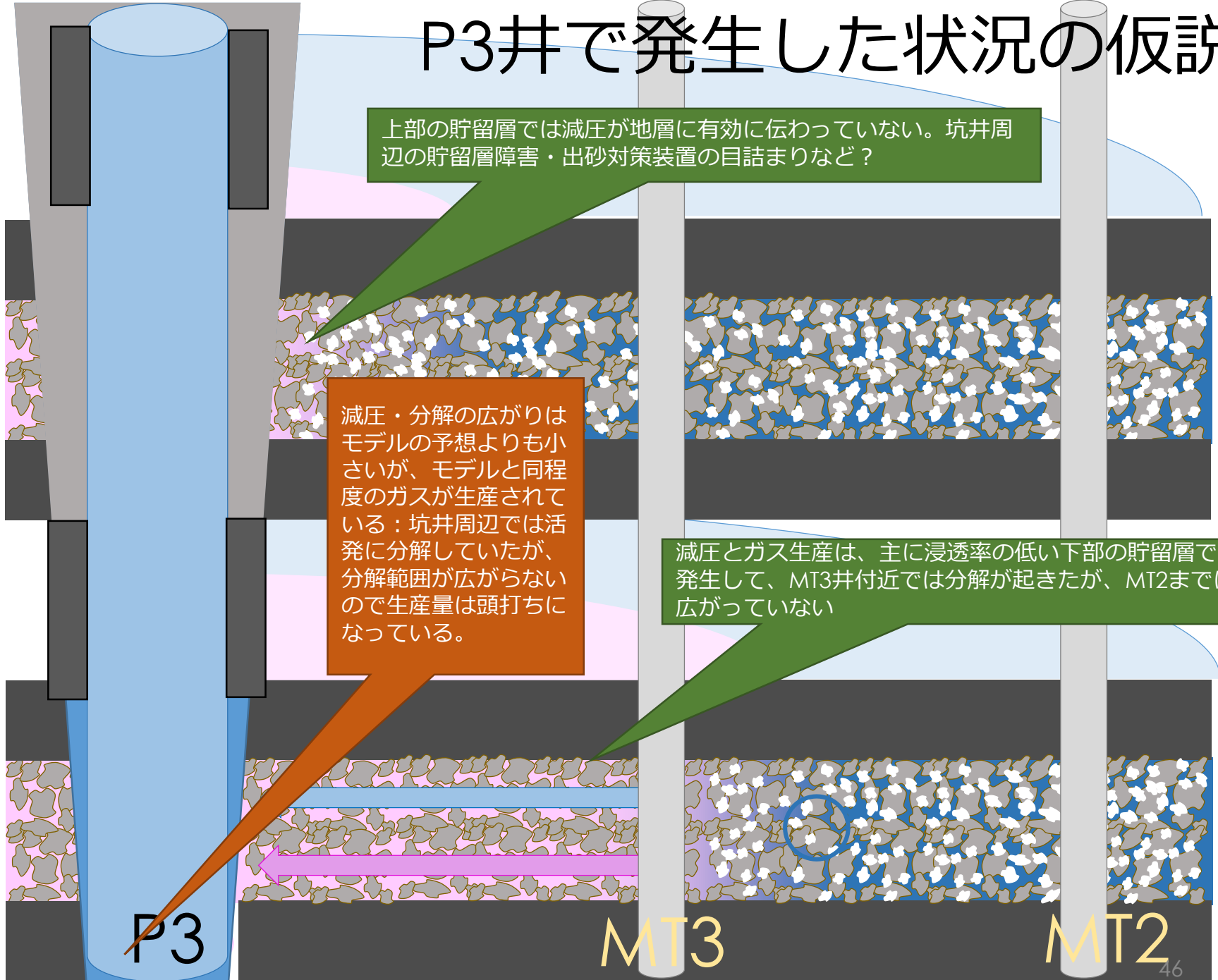
← **長期的な生産挙動を予想するには、これらについて知る必要がある。**

# P3井で発生した状況の仮説

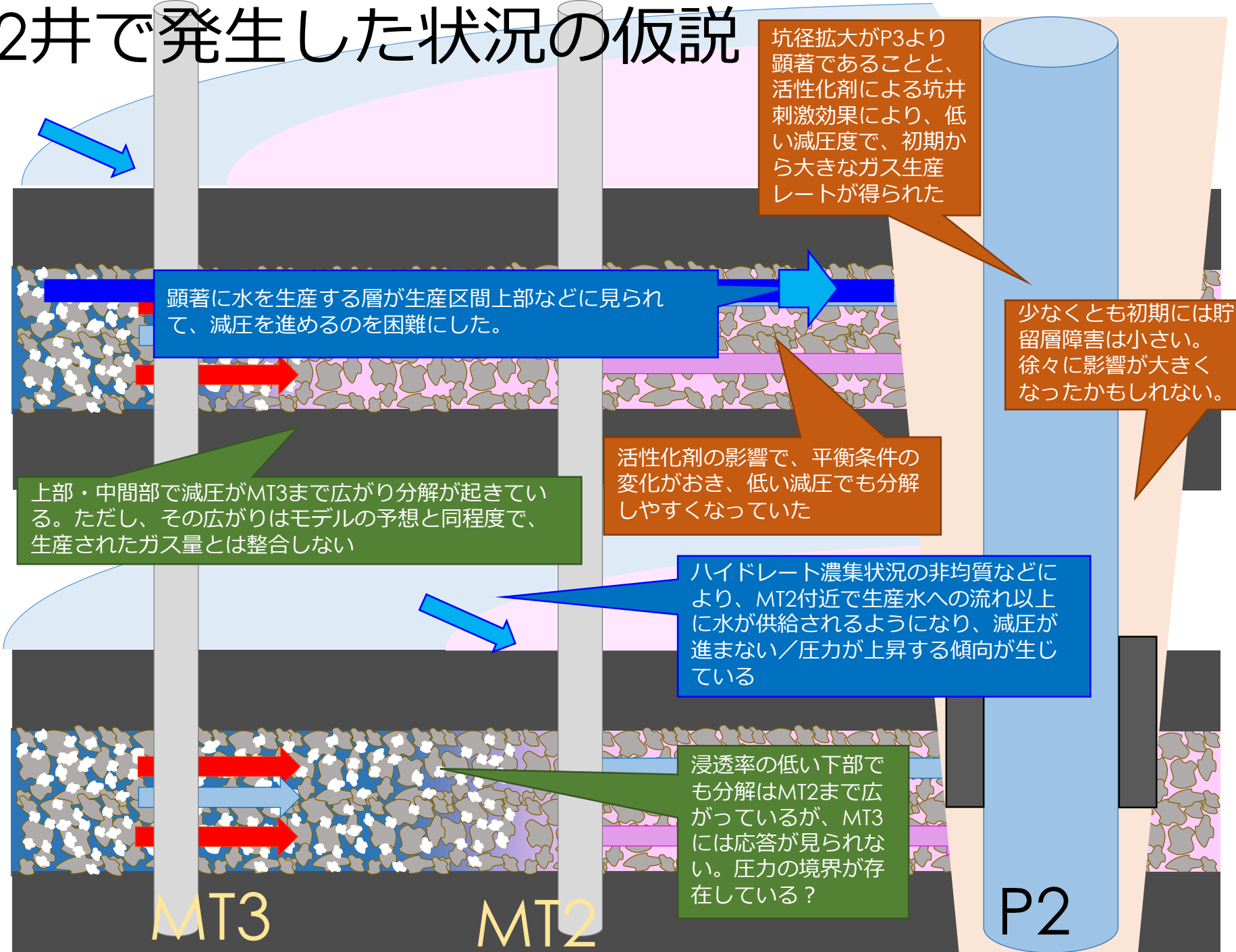
上部の貯留層では減圧が地層に有効に伝わっていない。坑井周辺の貯留層障害・出砂対策装置の目詰まりなど？

減圧・分解の広がりモデルの予想よりも小さいが、モデルと同程度のガスが生産されている：坑井周辺では活発に分解していたが、分解範囲が広がらないので生産量は頭打ちになっている。

減圧とガス生産は、主に浸透率の低い下部の貯留層で発生して、MT3井付近では分解が起きたが、MT2までは広がっていない



# P2井で発生した状況の仮説



坑径拡大がP3より顕著であることと、活性化剤による坑井刺激効果により、低い減圧度で、初期から大きなガス生産レートが得られた

顕著に水を生産する層が生産区間上部などに見られて、減圧を進めるのを困難にした。

少なくとも初期には貯留層障害は小さい。徐々に影響が大きくなったかもしれない。

上部・中間部で減圧がMT3まで広がり分解が起きている。ただし、その広がりモデルの予想と同程度で、生産されたガス量とは整合しない

活性化剤の影響で、平衡条件の変化がおき、低い減圧でも分解しやすくなっていた

ハイドレート濃集状況の非均質などにより、MT2付近で生産水への流れ以上に水が供給されるようになり、減圧が進まない/圧力が上昇する傾向が生じている

浸透率の低い下部でも分解はMT2まで広がっているが、MT3には応答が見られない。圧力の境界が存在している？

MT3

MT2

P2

# P2,P3 (たぶんPも) で見出されている現象のポイント

## 見られる傾向

- 初期の圧力低下は早めにモニタリング井に通じているが、あるところで下げ止まって遠くまで広がっていかない
- ガスの生産量が増えていかない。むしろ遞減傾向。水の実産量は一定または遞増傾向。

## 考えられる理由

- 浸透率の非線形性
  - 浸透率の流量依存性  $K(q_w, q_g)$  ← 非ダルシー流れ
  - 浸透率の減圧度への依存性  $K(\Delta P, \sigma')$  ← 圧密の影響など
  - 浸透率の時間依存性 (あるいは積算流量依存性)  $K(t, \int q dt)$  ← スキンの形成など
- 生産挙動の異方性・非均質性
  - ハイドレート飽和率の非均質性・地質の非均質性などによる水流動経路の存在、またはハイドレートの分解・流体移動による生成とそれによる水の流れ込み
  - 分解フロントの進展の異方性
- 熱供給メカニズムのモデルとの相違



- これまでの研究経緯と第2回海洋産出試験の目的
- 作業の工程と実施状況
- 試験の結果と取得されたデータと成果
- **新たな課題とそれらへの取り組み、将来への指針**

# 現在実施中の検討と今後の予定

- MH21研究コンソーシアムの技術者・研究者、委託先民間会社、及び外部の有識者を交え、3つのワーキンググループを組織して、データの分析・評価を実施中
  - WG1:貯留層評価と貯留層応答
  - WG2:出砂などの力学的現象
  - WG3:坑内機器・管内流動
  - さらに、外部の専門家を招いてデータレビュー会議を実施
- 検討結果は、順次公表していく予定
- 今後新たに得られる予定のデータ・情報
  - 環境モニタリング結果（海底面沈下・メタン濃度など）
  - 4成分地震探査の結果（分解モニタリング）
  - 生産井・モニタリング井の坑内温度・圧力の長期観測結果
  - 廃坑時に実施予定の圧力コアリング（地質サンプル取得）
  - 廃坑時のカメラによる坑内観察、機器回収など
- 実施予定の陸上産出試験において、今回の知見を活かし、また課題解決に役立てる方針

# 技術課題：出砂対策等の力学的影響

- P3の出砂については、出砂対策装置本体ではなく付属装置（最下部の逆支弁など）のリークの可能性も考えられるが、確かではない。
  - P2では出砂が見られなかったが、P3と同じレベルまで減圧していないので、出砂対策装置の破壊が起きなかったか検証できてない。
- 未固結堆積物中の坑井の不安定性があらためて明らかになった。
  - 坑径拡大については、循環時間の長さが影響を与えたと考えられる。
    - このことが、パッカーによる隔離、形状記憶ポリマーと地層の密着といった、予定された状況を実現することを不可能にした。
  - 砂が流動化するなど、未固結層特有の現象が、P3井の生産が少なかったこと、継続的に出砂したことなどに影響したと思われる。
- 出砂原因の究明、出砂対策装置の目詰まりの有無の検証などのために、来年実施予定の廃坑作業時に、坑内をカメラで観察することやP3井全体を掘り出す（冠浚）作業も検討している。
  - 費用対効果、リスクの大きさが課題。
- 室内実験やシミュレーションによる事前評価、検証も必要であるが、モデルでは再現できない現象が多いので、**経験を積み重ねて徐々に改善**していかざるを得ない。

# 技術課題：管内流動と生産システム

- 水流量が多いときはガス・水分離ができなかったという点は、実験・数値計算で原因究明を進める。
  - ガス気泡径、粘性など初期の検討と条件が違う要素があったと思われる。
  - 国内外の機関と協力して、実験・解析を進める。
- 商業生産時と今回は使用する機器構成が異なるので、今回発生した問題を解決するというよりも、将来に向けての知見を増やすという観点でアプローチする。
  - 検証自体が研究テーマではなく、検証を通じて将来の機器設計に活かせるような知見の習得、実験・シミュレーション手法の確立などができることが重要。
  - 混相流のまま地表に上げるなど、気液分離を前提にしない生産手法も検討する必要がある。
- 気象・海象の影響をなるべく受けずに継続的に試験を行うという目標については、計画切り離し1回があったものの、再接続・試験再開でき、概ね良好な結果であった。
- 減圧の途中段階ではハイドレート生成が避けられないことが明らかになり、早く減圧を進めるか、インヒビターを使用するかなどの対策を講じる必要があることがわかった。
  - ただし、インヒビターの使用は水処理への負担が大きい。



# 技術課題：貯留層評価と分解挙動

- 地震探査・物理検層などの情報を統合して、貯留層の非均質性に関する知見が得られるようになった。
  - 特に、**ハイドレート飽和率が低い領域 = 水層の拡がり**の知見が得られ、生産挙動に大きな影響を与えると考えられる。
- P3井における出砂、P2井において生産挙動が当初の予想と大きく違ったことなどから、**予定した減圧度での試験ができなかったが、数週間の継続的なフローにおいて生産井・モニタリング井で温度・圧力・流量などの多くのデータが得られて**、分解挙動の知見が増した。
- 実際の生産挙動は、当初の予想と大きく異なっていた。特に、**生産量が増加していく現象は確認できなかった**。
  - P3とP2で生産挙動が大きく異なる。
  - 試験の条件が予定と違っていたが、モニタリング井のデータなどから、今のところ今後増加していく見込みは見えてない。
  - その原因としては、地層・ハイドレート濃集状況の**非均質性**、**坑井周辺**での現象（圧力損失など）、**流動パラメータの非線形性**、**熱輸送プロセス**がモデルと異なる可能性などが考えられる。
- 今後は、**モデルからのアプローチ（順問題的・演繹的）とデータからのアプローチ（逆問題的・帰納的）を統合して検討を進める**。
  - 何がわかっていないのか再確認（わかったつもりで、実はわかっていないことがあるのではないか）
- **現象の理解だけでなく、生産量を増やすという目的に向かった検討に着手**
  - **生産量を増やすのに有益な情報はないか？**

# 今後のステップとフィールドでの活動：モデリングと探査・調査に関して

- 長期の生産挙動を知るために必要な知識がまだ十分ではない。
  - モデルの理論の側面と、データの側面のそれぞれについて。
- 地層の非均質性、水層の存在などが生産に与える影響の大きさが認識されたので、海洋のフィールドにおいて、どのように貯留層パラメータの三次元的広がりに関する情報を集めるのか検討する必要がある。
- 非均質性をモデル化する手法、影響の大きさを見極める方法の検討も必要
- 過去のデータを見る限り、このような非均質性や水層の存在はハイドレート濃集帯に一般的な特徴と見られる。
  - 均質な場所を探すか？（現実性は？）
  - 非均質性を受け入れて、その影響を考慮した生産手法を考えるか

# 今後のステップとフィールドでの活動：技術開発

- 水層の回避不可能性や水量の予測困難さから、扱える水レートのレンジを広げること、水層に遭遇したときの地層隔離の方法も技術開発の課題となる。
  - 揚水の技術と水処理の方法
  - 水層を隔離できる仕上げ技術
- 現実の地層中では減圧法のみで生産量が経済的にペイするレートまで増えていかないことを想定して、経済性を高める方法も検討する。
  - 坑井の設計、仕上げなどで坑井あたりのレートを上げる検討が必要。
  - 浸透率が高い水層の存在は、インヒビター・異種ガス置換などを考えるとむしろ有利な条件かもしれない。発想を変えてアプローチする必要がある。
  - 全体的なコストダウンは必須。井戸の寿命が短いことを前提にする必要がありそうである。
- 生産を妨げない出砂対策の模索を続ける。

# 今後のステップとフィールドでの活動：陸上産出試験

- 陸上産出試験は、長期挙動を知る場であることともに、生産増進技術的用途など、条件を変えて様々な研究を行う場として活用することを考える。
  - 長期の試験が可能、ある程度柔軟な対応が可能、といった陸上の優位さを活かす計画を立てる。
- そのため、必要な事前のデータ取得（検層・コアリング等）、モニタリングプログラムなどを研究プログラムを整備する。
  - 本件は米国との共同研究の予定であり、パートナーの米国エネルギー省、協力を仰ぐ鉱区権者・オペレータの理解を得る必要がある。
- 現在、アラスカ・プリュードベイ油田内の一地点を試験候補地点と定め、試掘を実現すべく調整中。
  - 通年で作業可能な地点を選定
  - データが少ないため、まず試掘から着手する予定



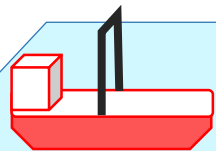
# 今後のステップとフィールドでの活動：海洋産出試験

- 現状で、ただちに数ヶ月～1年といったより長期の試験に進むことはできないと認識している。
- 今後も、海底の貯留層の特性、流動・熱輸送特性をよく知ることが重要になると考える。そのために、どんな調査や試験を行う必要があるか検討する。
  - 少しでも長期のフローが望ましいが、それ以上に作業の柔軟性が保てること、圧力・温度・流量（坑内・地層中）などのデータがきちんと得られることの優先順位が高い。
  - ガス生産だけでなく、水理特性を知るための坑井テストなど、地層の情報を最大化するためのプログラムが必要。
- さらにその先のステップとして、経済性のある生産量を実現するための技術の適用を行う試験を行う必要がある。
- どこで試験をすべきか、試験の前にどんな準備が必要か、よく検討する。
  - 資源フィールドとして有効な場、生産に適した場が日本近海に存在するか確かめるための探査は継続して行う。

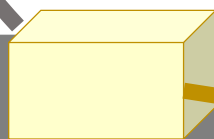
# まとめ

- 出砂や予想以上の水量により、当初計画した減圧度は実現できなかったが、モニタリング井のデータなどから、地層中の熱・流体の移動やハイドレート分解に関する重要な情報が多く得られた。
  - 単純化されたモデルでは表現されきっていなかった様々な事象・状況によって、予想された生産挙動と実際は大きく異なっていた。
- 生産挙動予測をより適切に行えるように分析を進めるとともに、生産量を増やす方法、コストを下げ方法の検討を始めなければならない。
  - 最初から浸透率の高い層の存在は増進回収法の適用に使える可能性
- そのため、まずは慎重にデータを分析すること、陸上産出試験や海洋での調査・試験などの場を利用して、できるだけ低コストで現象の理解と技術の開発を進めていくことが必要。
  - 最終的には日本近海の資源を開発できるように、探査・調査も進めていき、ハイドレートを含む海底の堆積物への理解を高めていくことも必要である。
- 今までは現実のデータが乏しかったので、理論とモデル主導で検討を進め、計画を立ててきた。今回の試験で、実際の貯留層の情報が格段に増したので、より自然界の現実に応じた計画策定に移行していくことが必要であり、また今回得られた情報でそれが可能な状況になった。

# まとめ



低コストで安全・安定的、かつ柔軟に対応できる試験システム（洋上・海底・構内）



地質・ハイドレート濃集状況の非均質や水層の広がりについての探査手法、モデル化・影響予測手法

一坑井あたりの生産量をあげる掘削・仕上げ手法

事前・事後の水層の遮蔽

坑井周辺での障害（圧力損失）の低減と対策（坑井刺激法等）

地層の特性を利用した生産手法・生産増進法

生産を阻害しない出砂対策

# 謝辞

- 試験の計画・準備・実施に関わったすべての皆様：
  - JMH、JDC、MQJ、SKK、MWJ、JAMSTEC、JOE
  - SLB、AKSO、BHI、Halliburton、テルナイト、OOC、朝日航洋
  - METI、JOGMEC、AIST
  - その他すべての皆様
- データの解析に関わったWG1/2/3のメンバー、有識者の皆様
- 作業に理解をいただいた各漁協、海底ケーブル関係各社、気象庁、JAMSTEC、愛知県・三重県・静岡県・蒲郡市・静岡市、その他地元の皆様