解 説

基礎試錐「南海トラフ」におけるメタンハイドレートの探鉱*

高橋 秀明**・米澤 哲夫***・武富 義和****

(Received July 26, 2001 ; accepted November 9 2001)

Exploration for natural hydrate in Nankai-Trough wells offshore Japan

Hideaki Takahashi, Tetsuo Yonezawa and Yoshikazu Takedomi

Abstract: Exploration for natural methane hydrate was carried out in the Nankai-Trough offshore Japan at a water depth of 945m over an 88 day period, from November 1999 to February 2000. This was a national project led by Ministry of International Trade and Industry (MITI) to seek a new energy source. It was organized by Japan National Oil Corporation (JNOC) in collaboration by Japan Petroleum Exploration Co., Ltd as the drilling operator. The Nankai-Trough well was drilled with R & B Falcon's deepwater semisubmersible, the "M.G. Hulme, Jr.". The location was selected where BSR (Bottom Simulating Reflector) is the clearest on the seismic section. Six wells within 100m distances were drilled through the BSR horizon and the hydrate rich formation was confirmed between 1,135m to 1,213 m BMSL (below mean sea level). This paper describes the planning, preparatory phase and the challenging operations.

Key words: hydrate, deepwater, offshore, exploration, Nankai-Trough

1. はじめに

大水深下あるいは永久凍土下の堆積物中に存在するメタンハイドレートは、その資源量が従来型の油・ガスの約2倍あるといわれ、次世代エネルギー源として期待されている (Kvenvolden¹⁾)。とりわけ、油・ガスの生産に乏しくかつ深海に囲まれた日本では、それに早くから着目し、通産省 (当時) は1995年度を初年度とする「第8次国内石油および可燃性天然ガス資源開発5ヵ年計

画」の一環として、その最終年度となる1999年度に日本周辺海域でメタンハイドレート層を掘削して資源としての可能性を調査することを決定した。石油公団は直ちにその実施体制を整備し、民間会社を率いて準備作業を開始した。

掘削地点は、すでに科学者達によってメタンハイドレートの存在が示されていた南海トラフ海域に決められ (Sato *et al.*²⁾, Ashi *et al.*³⁾), 1996年と1997年に同海域で実施された震探作業の結果、静岡県天竜川河口沖合約50km、水深950mの地点が選定された (図1)。ここでは、震探断面図においてハイドレートの存在を示唆するBSR (Bottom Simulating Reflector) が海面下1,240m相当のところに明瞭に確認されている (図2)。図3は、メタンハイドレートが存在しうる温度圧力条件の領域 (実線の左下側) を示したものであるが、本井で予想される地層温度 (破線) と深度約1,240mで交わることからしても、震探断面図に見られた約1,240mのBSRはハイドレート層の基底を示すものであらうと思われた。

なお、本井では、浅部のハイドレート層を調査した

* 平成13年5月1日、Offshore Technology Conferenceにて講演 This paper was presented at OTC2001 (Offshore Technology Conference) in Houston on May 1, 2001 and published as OTC 13040. The authors were permitted by OTC to publish its Japanese version onto the Journal of the JAPT under the copyright of OTC.

** 石油資源開発(株) Japan Petroleum Exploration Co., Ltd.

*** 石油公団 Japan National Oil Corporation

**** 経済産業省 Ministry of Economy, Trade and Industry

後、そのまま深部の油・ガスの探鉱をも兼ねるという計画であった。そのため、本ロケーションはBSRだけでなく、深部に油・ガスのポテンシャルをもつ第三紀の構造も備える地点が選定され、掘削深度は海面下2,800mと計画された。

本稿では、この世界初のメタンハイドレート探鉱プロジェクトとなった基礎試錐「南海トラフ」について、計画と準備から実作業と結果に至るまでを掘削オペレー

ションの視点から報告する。

なお、本稿は、2001年5月1日ヒューストンでのOTC2001において同著者が発表した「Exploration for Natural Hydrate in Nankai-Trough Wells Offshore Japan (OTC 13040)」の、著者による邦訳である。OTCの許可を得て石油技術協会誌に掲載するもので、著作権はOTCにある。

2. 共同研究「メタンハイドレート開発技術」

1995年、本プロジェクトが具体化した直後、石油公団TRC (Technology Research Center) は民間10社を率いて5ヵ年計画の共同研究「メタンハイドレート開発技術」を立ち上げた。その目的は、基礎試錐「南海トラフ」の掘削で最大の成果が得られるべく技術的な準備を行うことである。ここでは、ハイドレートの存在と量をどのような手段を使ってどう評価するか、またメタンハイドレートの分解・生成のメカニズムなどが精力的に研究された。その中で掘削グループが研究した主な課題4つを下に紹介する (Ohara⁴⁾)。

2.1 掘削泥水

大水深掘削では通常、泥水中にハイドレートが生成されないように注意を払う。ハイドレートができると坑口装置などに問題が生じるからである。そのため、泥水中に10~15 wt% のNaCl や5~10 wt% のグリコールを混入するなどして、坑内をハイドレートが安定して存在できない環境にする。ところが、ハイドレート層を掘進する場合は、地層中のハイドレートが溶けないように注

図1 ロケーションマップ

図2 震探断面図

図3 メタンハイドレート平衡曲線と予想地層温度

意を払わなくてはならない。ハイドレートが溶けると、ガスが発生して危険な状況になったり、坑が崩れたり、コアがうまく回収できなかったりするからである。それには坑内を、ハイドレートが安定して存在できる環境にしておく必要がある。これらの相反する2つの条件を満たすため、ハイドレートの速度論的安定性が研究された(Maeda. *et al.*⁵⁾, Okui. *et al.*⁶⁾)。すなわち、ハイドレートの生成も分解も時間的に遅くさせる効果をもつ添加剤の選定実験が繰り返された。Lecithin, Polyvinylpyrrolidone (PVP), および Polyvinylcaprolactam (PVCap)などを比較した結果、PVCapが最も効果的であることが分かった。結論として、基礎試験「南海トラフ」のハイドレート層掘削には、0.6wt%のPVCapを混入したNaCl/KCl/Polymer泥水を使うことにした。低温でのレオロジー特性に問題ないことも実験で確認した。

2.2 泥水冷却システム

たとえPVCapを混入した泥水を使用したとしても、またハイドレート層をケーシングで隠したとしても、泥水温度がハイドレートを分解するのに十分高温であれば、ハイドレート層は溶けて問題を起す。それを解決するため、泥水冷却システムが設計された(Ichikawa. *et al.*⁷⁾)。

最初に設計されたシステムは、ハイドレート層深度での泥水温度をどんな作業においても常にハイドレートの平衡温度より低くするよう、15deg.Cの地上泥水を2.3 m³/minのレートで3deg.Cに冷却する520 kWのもの

であった。しかし、リグ上に配置することができないほど大きな寸法となったため、研究チームは、冷却能力を極力保ったまま小型化する方法を模索した。なんとかリグに載せられるサイズとして最終的に設計されたものは440 kWとなり、やや不足する冷却能力は、ポンプレートを落としたり、ライザーパイプに沿うブースターラインを通して地上泥水を循環することなどによって補うことができると判断された。小型化したとは言え、重量は70 tonあり、メインデッキと調泥剤ルームのかかなりのスペースを占める寸法であった。プレートタイプの熱交換器は、掘削中の泥水と同等のソリッド分を含む泥水を循環してテストし、実作業に耐えるものであることを確認した。

2.3 坑内温度および圧力シミュレーション

掘削中、コアリング中、あるいは循環中など、いかなる作業においても、その時のハイドレート層の温度と圧力を予測することができれば非常に有益である。もし、ハイドレートの平衡曲線を超える温度と圧力が予測されれば、地層中のハイドレートが溶けはじめるので注意しなくてはならない。1つの研究チームが坑内温度と圧力のシミュレーションプログラムの開発を手がけた。このプログラムはWhiteCoal-Tと命名され、次の特徴を有している(Kawamura. *et al.*⁸⁾)。

- ・温度と圧力の両方を同時に求め、それらがハイドレート平衡曲線の内側にあるか外側にあるか判断できる。
- ・圧力を求めるハイドロリクス計算において、泥水のレオロジー特性が温度によって変化することを考慮している。すなわち泥水が冷却され、その結果粘性等が上昇することを計算に入れている。
- ・大水深のライザーパイプに使われる浮力体の熱伝導率を考慮している。
- ・温度は、深度および経過時間軸に対して出力されるだけでなく、ある深度での坑壁から奥に向かう水平距離に対しても出力される。
- ・パーソナルコンピュータにおいて、優れたGUI (Graphical User's Interface)で簡単に操作できる。

本シミュレーションプログラムは1998年中頃ほぼ完成し、以降、これを繰り返し実行させることによって、坑内温度を制御する方法および泥水冷却装置の必要性について議論を重ねた。

2.4 コアサンプラー

ハイドレートコアサンプルの採集は本プロジェクトの最も重要な目的の1つである。地下に存在するハイドレートをそのまま分解させずに回収するべく、PTCS (Pressure and Temperature Core Sampler)と呼ばれ

る新しいコアサンプリングシステムが開発された (Wakishima. *et al.*⁹⁾) (図4)。採集されるコアの外径は 2-5/8", 長さは 3m, 10-5/8" のコアビットでコアを 3m 切削すると、コアはインナーバーレルに格納され、インナーバーレルは中の圧力と温度を保持したまま 6-5/8" ドリルパイプ内をワイヤーラインで巻き上げられる。地上でそれを回収し終わると、空のインナーバーレルがワイヤーラインによって降下され、再び 3m のコアリングが繰り返される。インナーバーレルの圧力保持機構はボールバルブにより、低温保持機構はペルティエ効果を原理とする Battery-powered Thermo-Electric Cooler (TEC) による。また、インナーバーレルは断熱構造になっており、中の低温が保持されやすくなっている。地表に上がってきたインナーバーレルは、すぐに室内温度 5 deg.C の専用サービスユニットに入れられ、インナーバーレル内部の温度と圧力を測定し、ガスおよび液体の採取をしながら圧力を解放した後、コアを取り出す。

このシステムは米国ソルトレークシティの Aumann & Associates Inc. が設計・製作し、2回のフィールドテストが、カナダのマッケンジーデルタ (1998年3月) と、新潟県の石油公団柏崎テストフィールドの実験井 (1998年12月) で実施された。フィールドテストで判明した問題点はすべて「南海トラフ」の作業開始前に解決させた。

3. オペレーションの準備

3.1 大水深掘削リグの調達

石油公団主導の元に各共同研究が進められる一方、基礎試錐「南海トラフ」の掘削オペレーションを請け負う

石油資源開発(株)では、その準備作業が進められた。

その中で最も困難を極めたのは大水深掘削リグの確保であった。当時、大水深掘削は世界的なブームでありながら、太平洋海域で作業している大水深リグはほとんどなく、また、本プロジェクトの作業期間はあまり長くないため、わざわざ大西洋から日本までリグをもってくるほどの魅力を多忙なコントラクターに与えることができなかった。基礎試錐「南海トラフ」の前の年度に掘削される予定であった基礎試錐「三陸沖」を1年遅らせて、両井を同じリグを使って連続的に掘削することにしたのは、リグ調達の可能性を広げる策であった。

唯一、当時ブラジル沖で稼働していた Falcon Drilling 社のダイナミックポジショニング式ドリルシップ Peregrine-2 が入手可能との情報を得、交渉を開始した。かなり老朽化した第2世代のリグであったため、日本の厳しい気象条件下で問題なく作業できることを確認するべく、リグインスペクション、ライザーパイプの応力解析、およびダイナミックポジショニング能力の評価作業を、掘削ロケーションにおける気象・海象統計データおよび海流調査結果をもとに行った。その結果抽出された、アップグレードすべき装置とそのスケジュールは主要な契約条件となった。さらには、PTCS コアリング用 6-5/8" ドリルパイプをスタンドバックさせるための四本場の改造、泥水冷却装置の設置場所、および国内で義務づけられているカッティング搬送システム、日本の法規に適合した航路標識灯、航空障害灯の設置、鉱山保安法上のクルー資格等々、特殊な仕様を多く盛り込んだ契約を1997年初めによく締結することができた。

1999年1月、Peregrine-2 がブラジルからシンガポ

図4 PTCS (Pressure and Temperature Core Sampler) 概念図

ルへの長い航海をまもなく終えて、オーバーホールとアップグレードにとりかかろうとする直前、新しく合併してできた R & B Falcon Drilling 社は、Peregrine-2 の代わりに西アフリカで操業していた係留方式の半潜水型リグ M. G. Hulme Jr. の使用を提案してきた。大水深リグマーケットが緩み Peregrine 2 の改造にかかる費用対効果が小さくなったことと、ちょうど同社の M. G. Hulme Jr. が入手可能になったことが、その背景にある。契約条件について再度大議論の末、最終的にこの提案は合意された。直ちにリグインスペクション、係留解析、大型アンカーハンドリングトローイングボートの調達、漁業交渉のやり直し、さらには多くの申請書の変更のすべてを、掘削作業開始予定日を遅らせることなく迅速に完了させた。

3.2 掘削計画

以下は掘削計画を策定する際に論議された主な検討内容である。

3.2.1 シャローガスに対する安全対策

最も心配されたことは、深度 1,240 m の BSR を掘り抜くときにシャローガスが噴出する可能性であった。なぜなら、BSR とは地震波速度の速い上層と地震波速度の遅い下層との間のコントラストであり、それはとりもなおさずハイドレートが豊富で密度の高い層とフリーガスが存在し密度の低い層の境目を表すものと思われたからである。また図 3 を見ても分かるように、1,240 m はハイドレートの平衡点に一致しており、それ以深はメタンはガスとして存在することを意味する。実はこのフリーガスも、ハイドレート同様に資源となりえないか調査の対象とされていた。

当初の基本掘削計画では、ハイドレート層直上と思われる 1,150 m あたりにサーフェスケーシングをセットし、ライザーパイプを通して泥水循環しながらハイドレート層の掘削とコアリングを行う予定であった。こうすればマッドロギングデータもカuttingサンプルも得られるし、またフリーガスは泥水比重あるいは BOP (Blowout Preventer) によりコントロールできると思われていた。このため、循環泥水にハイドレートの生成・分解抑制機能をもたせたり、循環される泥水の温度を上げないように冷却する装置を開発することは非常に重要な課題であった。

しかし、1997 年中旬にこの計画を再検討したところ、浅部の地層が弱すぎるため非常に困難であることが分かった。1,150 m の地層破壊圧勾配は等価泥水比重で 1.09 SG と計算され、ソリッドを含んだ海水ベース泥水をライザーパイプを通して循環するだけで逸泥する可能性が非常に高いことが予想された。また、シャローガス

に遭遇した場合、BOP を閉じチョーク/キルラインを通してキックコントロールしようとするれば、背圧によって地層が破壊してしまうことが分かった。ガスがライザーパイプ内に侵入した場合、それがリグに達するころには著しく膨張し非常に危険な状態をもたらす。海底面で放散させたほうが、途中の潮流によりリグから十分離れた場所で海面に到達するため、むしろ安全と思われた。

よって、大水深でシャローガスの危険がある場合は、ライザーパイプを使わずに掘削するのが最も安全であるとの結論に至った。このため、ハイドレート層およびフリーガス層の調査は、マッドロギングデータとカuttingサンプルの取得を断念し、コアと電検だけで評価することになった。ライザーパイプなしで電検ツールを坑内に降げる方法として、6-5/8" OD ドリルパイプを海底面まで降げて坑内のぞかせ、その中にツールを降げるように計画した。ハイドレート層の調査を終えて、深部の油・ガスを探鉱するために、いずれはライザーパイプと BOP をセットしなくてはならないが、その深度は地層破壊圧が等価泥水比重で 1.25 SG になると予測される 1,600 m とした。

ライザーパイプを使わないにしても、もし大量のガスが海底面に噴出した場合は、安全に作業を続けるのは難しい。セメンチングもうまくいかないであろう。このロケーションでそのようなガスが噴出するかどうかを知るため、メインホールの掘削開始前に、小径 (8-1/2") のパイロット坑を BSR の十分下まで掘削するように計画された。掘削中は海底面で、ROV (Remotely Operated Vehicle) が坑口を観察し続け、かなりの量のガス噴出が確認された場合、ここでの掘削は断念し、別のロケーションに移動しなくてはならない。

ここで問題となったのはその判定基準であった。最終的には図 5 に示すフローチャートにしたがって作業を実施することにした。すなわち、ガスが噴出した場合、それを比重 1.15 SG の泥水で抑圧できなければ、重泥で抑圧後にロケーションを移動する。もしガスフローが 1.15 SG の泥水で抑圧されたならば、その後 1,600 m にケーシングを入れてライザーパイプをセットするまで、坑内には常に 1.15 SG の泥水を満たすようにして全作業を行う。このためには、膨大な量のバライトとベントナイトが必要となる。この基準は、実際のリグの泥水ミキシング機器が 1.15 SG の泥水であれば必要なレートで作泥し続けられるという調査結果に基づいて決められた。

ロケーションを移動しなくてもよいと決定されれば、さらにもう 1 本パイロット坑を掘削する。その目的は、LWD (Logging While Drilling) によって、ハイドレート層およびフリーガス層と思われる深度をおおむね把握

図5 シャローガス対策フローチャート

し、その後のメインホールで実施されるコアリングの区間を決定することである。最初のパイロット坑でLWDを使わず、あえて2坑目を掘って使う理由は、大量のガスが噴出した場合に内径の小さなLWDがダイナミックキル作業の妨げとなるからである。どちらのパイロット坑もメインホールからの距離は30mとした。

3.2.2 ハイドレート層に対する泥水温度コントロール

ハイドレート層をライザーパイプを使わずに掘削することが決定された後、そのパラメータを入力して、温度圧力シミュレーションプログラム WhiteCoal-T で、ハイドレート層の温度を繰り返し計算し直した。図6は、ハイドレート層の1,150m、1,200m、1,250mをコアリング中、それぞれの深度における、坑井中心から半径方向に0.9m奥の地層内温度と圧力を計算した出力例である。温度と圧力がハイドレートの安定領域を超えないため、その部分のハイドレートは分解しないことが分かる。これは海面近くの温かい海水がドリルパイプ内を下る際に、海底近くの冷たい海水によって冷却されるためである。ライザーパイプがないためドリルパイプが直接冷やされることと、コアリング時のポンプレートは

図6 White Coal-T の出力例1
コアリング中のハイドレート層の温度

0.75 m³/min と小さく、また 6-5/8" ドリルパイプは内容量が大きいため、冷却時間が比較的に長くなることが、冷却効果を高めている。この出力結果から、ハイドレート層をコアリングする時には、泥水冷却装置は必要ないという結論に至った。

しかし、地層温度が最も高温となる TD 2,800m 付近をライザーパイプを使って掘進中はどうであろうか。小径の 5" ドリルパイプ内を高レートでポンプされる泥水は、途中冷やされる間もなく高温の深部地層を掘削するビットに至り、暖められてアニユラスを上昇する途中、ケーシングの外側のハイドレート層を溶かしてしまわないであろうか。ライザーパイプはその外側の冷たい海水からドリルパイプを隔離するため、海底付近での冷却効果は小さい。図 7 はその時のハイドレート層の温度を予測した WhitCoal-T の出力結果である。8-1/2" 坑を 2,550m, 2,650m, 2,800m 掘進中、あるいは 2,800m でコアリングもしくは電検時、ハイドレート層 1,240 m における温度の水平分布を示したものである。坑内の泥水温度は 25 deg.C を超えるが、その熱は坑井の中心から 1m 離れるとほとんど影響を及ぼさないことが分かる。ハイドレートの分解は促進反応 (Promoting reaction) ではなく、自己保存的反応 (Self-preservation reaction) であることに着目すると、分解は奥へ奥へと進むのではなく、坑井中心から約 1m の範囲内で止まると予想される。この程度の限られた量の分解であれば、ケーシングアニユラスを口元まで完全にセメントで充填すれば問題にならないと思われた。よって、この場合においても泥水冷却装置は必要ないと判断し、その製作および設置はこの段階で取りやめることとなった。

3.2.3 泥水計画

ハイドレート層調査時は、ハイドレート層の温度と圧力がハイドレートの安定領域内に維持されることが分かったため、ハイドレートの分解を抑制する泥水はあまり重要でなくなった。実際のところ、ライザーレスで掘削することが決まった時点で、高価な泥水を海底面に排出しながらポンプし続けるのは非現実的なものとなっ

図 7 WhiteCoal-T の出力例 2

8-1/2" 坑掘進中のハイドレート層の温度

た。よって当初計画していた 0.6 wt% の PVCap を混入した NaCl/KCl/Polymer 泥水は使わないことにし、ホールクリーニングのためにベントナイト泥水を適宜フラッシュするが、基本的には海水をポンプして掘削するという泥水計画に変更された。

ハイドレート層がケーシングで隠され、ライザーパイプがセットされた後は、通常の大水深掘削で使われる、高濃度の NaCl を混入した海水ベースのポリマー泥水、すなわちハイドレート生成抑制泥水を採用する。

3.2.4 ケーシング計画

図 8 は計画坑内図である。ハイドレート層は 10-5/8" 坑でコア掘りを行った後、17-1/2" 坑に拡張掘し、13-3/8" ケーシングで隠す。通常 30" の次は 20" であるが、クロスオーバージョイントを使うことにより裸坑部のケーシングは 13-3/8" とした。この非常に重要なケーシングセメンチングの成功率を少しでも高めようとしたからである。

4. 掘削作業と結果

4.1 パイロット坑 No.1

リグ M.G. Hulme Jr. は、基礎試錐「三陸沖」の掘削を成功裏に終わらせた後、1999年11月10日「南海トラフ」のロケーションに到着し、アンカーを 8 点設置した。まずメインホールの掘削地点を海底面で正確に決めるため、ビット直上にビーコン (音波発信器) を取り付け、ドリルパイプで海底面直上まで下げた。リグ船底のハイドロフォン (音波検知器) が示すビーコンとリグの相対位置と、DGPS (Differential Global Positioning System) が示すリグの絶対位置との関係から、ビーコンが予定の座標に来るようにリグをアンカーウィンチ操作によって動かす。掘削予定地点にビーコンを導いたら、ビットを着底させ (この時、掘削地点の水深は 945 m と記録された。), ROV がその回り 3 箇所にビットから 8m ずつ離してマーカーを置く。マーカーには ROV が約 100 m 離れたところからも検知できるソナーフレクターが装備されている。またリグから下げられるいかなる編成も ROV はソナーで検知できるので、これ以降 ROV は、リグから下げられる編成が、この三角形に配置されたマーカーに対して、どのような位置にあるかを常に把握することができ、リグではその情報をもって、リグ自体をアンカーウィンチで動かし、編成を海底面の目的位置に着底させることができる。

このようにして、8-1/2" ビットをパイロット坑 No.1 の予定掘削位置すなわち三角形に配置されたマーカーの中心より WSW 方向に 30m のところに導いた。このパイロット坑は、掘削中にガスが噴出するかどうかを

図8 計画坑内図

ROVで見極めるのが目的であるが、はたして海底に巻き上がる土砂の中で、ガスを確実に検知できるかどうか懸念された。そのため、掘削を開始する前に、ROVのソナーがガスをどう検知するかをテストしてみた。ROVを海面下約20mの位置に潜らせ、同時にそこまでリグからエアホースを下げ、エアバブルを強くしたり弱くしたりして、ROVのテレビカメラとソナーにどう映るかを確認した。その結果、微弱なバブルでもROVソナーに音波異常として確実に検知されることが分かった。

1999年11月13日、パイロット坑 No. 1 が掘削開始された。ガスが噴出した場合に備えて、泥水タンクには1.50 SGの高比重抑圧泥水を満たし、またバルクタンクにはバライトを満載した。陸上資材基地とサブライポートはさらなる補給に備えた。リグではセーフティーミーティングを開き、ガスが噴出した場合のダイナミックキルの手順をクルーに周知徹底させた。主要な作業員はROVが映し出す海底坑口部の映像とソナースクリーンを見続けた。最もガス噴出の可能性の高い深度1,240m近辺では、掘進率を1m/minに抑え、細心の注意を払って監視した。1,600mまで掘削したが、結局、ガスバブルは確認されなかった。ビットを揚管後、ROVは

さらに1時間坑口で観察を続けたが、ガスバブルは全く見られなかった。つまり、このロケーションでは、以降の作業を安全に計画どおり遂行できることが分かった。

4.2 パイロット坑 No. 2

続いて、パイロット坑 No. 2 の掘削に移った。このパイロット坑は、LWDでハイドレート層およびフリーガス層と思われる深度を把握し、この後のメインホールでのコアリング区間を決定することが目的である。RAB-CDR-CDNからなるLWDツール（ソニックツールは入手できず。）を8-1/2 inchビット直上に取り付け、この編成を前述の方法でパイロット坑 No. 1 とは反対方向にメインホールから30m離れた箇所に導き、掘削を開始した。この方向は、地層の走向と一致させている。各井で同じ地層が出現する深度の差を最小にするためである。LWDログの精度を上げるため、掘進率は0.5m/minにコントロールしたので、1,486mに到達するのに30時間かかり、そこで抑留された。数度にわたり高比重高粘性泥水をポンプしたところ、12時間後に離脱に成功した。コアリング区間を決めるための情報はすでに取得できていたため、この深度で掘進を中止した。ここでもROVは海底面で坑口の監視を続けたが、ガスバブルは見られなかった。

図9はパイロット坑 No.2 で得られた LWD ログである。1,183m から 1,207m にガンマレイが低く、比抵抗の著しく高い層が何枚もある。ドリリングパラメータを記録するドリラーのログにはこれらの深度で高いトルクが記録されている。これらは、ハイドレートを多く含む砂層の存在を示唆するものと考えられ、メインホールのコアリング区間を次のように定めた。PTCS の使用は最も重要な層に限定した。

- ・ 1,110m ~ 1,175m : 通常のコアリングシステムによるコアリング
- ・ 1,175m ~ 1,254m : PTCS でのコアリング
- ・ 1,254m ~ 1,272m : 通常のコアリングシステムによるコアリング

4.3 メインホール

海底面上に設置された3個のマーカの中心に 36" ビットを導き、1999年11月18日メインホールの掘削を開始した。996m (海底面下 51m) に 30" ケーシングをセットした後、10-5/8" 坑を 1,110m まで掘進し、コアリングが行われた。

4.3.1 コアリング

1,110m から 1,175m までは、Security DBS 社の従

来型のコアバーレルが使用された。外径 4" で長さ 9m のコアサンプルは 8-1/2" コアビットで切削され、超軟質層用に設計されたクラムシェル型キャッチャー "PosiClose™" によって捕獲される。最初の 2 回はそれぞれ 9m のコア回収に成功した。しかし、3 回目および 4 回目で一度に 18m のコアが回収できるようにコアバーレルを 2 本つないで下げたところ、それぞれ 42% および 28% の低回収率となった。5 回目は再度コアバーレル 1 本で 9m のコアを切削したところ回収率は 75% に上がった。地質はほとんどシルトとクレイで、数枚の薄い砂を挟んでいた。これらのコアにハイドレートは目視できなかったが、1,128m 以深のコアが入っていたバーレル内にあった海水にはガスバブルが観察されている。

1,175m から 1,254m では、圧力と温度を保持したコアサンプルを採取するため、PTCS が使われた。ツールジョイントの内径が 5.906" という特別仕様の 8-5/8" OD ドリルカラーと 6-5/8" OD ドリルパイプが組まれ、この中をインナーバーレルがワイヤラインによって揚げ下げされる。3m のコアを切削しては、それを密封したインナーバーレルをワイヤラインで取りに行き、地上で回収した後、空のインナーバーレルをまたワイヤライン

図9 パイロット坑 No.2 での LWD ログとコアリング計画

図10 メインホール 17-1/2" 坑でのホールキャリパー

で置いてくるという1サイクルに4・5時間かかるため、この間での計27回のPTCS コアリング作業に5日間を費やした。27回の平均コア回収率は37%であった(79m コアリングし29mを回収)。温度と圧力の保持機構はそれぞれまれに効いていなかったものがあった。

PTCSで回収されたコアの多くはシルトとクレイであるが、それらに挟まれた何枚かの薄い砂(厚くても2m程度)には非常に興味深い特徴が見られた。まずコアを取り出すと砂の表面からガスバブルが湧出した。このガスは分析の結果メタンであることが分かった。またこの砂の内部に温度計を突き刺すと-2deg.Cから-3deg.Cの値を示した。これは中で吸熱反応が進行していることを意味している。さらにこの砂サンプルの孔隙中の塩分濃度を測定すると100から200mMolと異常に低い値を示した。通常のものは海水と同じ550mMol位である。これらの現象は、砂の孔隙内にハイドレートが存在しそれが溶けていることを示す。特に1,181mと1,204mの砂サンプルが顕著で、その低い塩分濃度の値から、ハイドレートは孔隙の80%を占めていたと計算された。これらの深度はパイロット坑No.2のLWDログ(図9)で記録された異常に高い比抵抗の深度と一致している。これらの深度で、コアリング中に高いビットトルクが記録されていることと、コアの回収率が高いのは、おそらく、ハイドレートを含む砂層は、In-situの状態ではかなり固く締まっているからと思われる。

PTCSでのコアリング後、もう2回、従来型コアバレルを使ったコアリングを1,254mから1,272mで行い、計5.5mのシルトサンプルを回収した(回収率30%)。期待された砂層が回収できなかった理由は、おそらく、それがハイドレートを含まないのであまりにも軟らかかったからと推定される。

すべてのコアサンプルはリグで記載を行った後、直ちに地上の各研究所に送られ、各種分析および計測に供された。ハイドレートを特に多く含むコアサンプルについては、圧力容器に収め、さらにそれをドライアイスで包んで輸送した。実験室でのコア分析結果の1つとして、メタンガスの炭素同位体を分析したところ、このガスは微生物起源(biogenic)であることなどが報告されている。

ROVはここでもコアリング作業中、常に坑口を監視し続けたが、ガスバブルは観察されなかった。

4.3.2 電 検

10-5/8"坑を13-3/8"ケーシングセット深度の1,600mまで掘削後、17-1/2"坑に拡張する前に電検が行われた。ライザーパイプがないので、6-5/8"ドリルパイプを30"ケーシングにのぞかせて、その中に電検ツールを

降下させた。しかし、ツールは1,140m以深どうしても降がらなかった。

ビットを降げてワイバートリップと循環を行った後、再度試みたがツールは同じ深度でつかえた。17-1/2"坑に拡張後、再度試みたが、坑内状況は拡張前とほぼ同様であった。今度は、サイドエントリーサブを取り付け、6-5/8"ドリルパイプの内部にツールをセットしてドリルパイプと電検ツールをともに坑底まで降げた後、ドリルパイプと電検ツールを交互に揚げて測定するよう試みた。しかし、ドリルパイプ自体1,260mでつかえて降がらなかった。結局、HALS-DSI-EMS-GRを1,260m以浅で測定したにとどまった。ガンマレイと比抵抗の測定結果はパイロット坑No.2のLWD結果と同様であった。それ以外のログは坑径の異常拡大によりデータの精度が悪く、地層評価に使えるものではなかった。図10はこのとき得られたキャリバーログである。何ヶ所かキャリバーツールの最大径32"を超えたところがあるが、その深度はメタンハイドレートをあまり含まない砂層に対応する。ハイドレートを多く含む砂層はそれほど拡大していない。ハイドレートが溶ける温度にならなかったからであろう。このように坑径が著しく大きいところとそうでないところが交互に出現する理由は、ハイドレートを含まない未固結層とハイドレートを多く含む固結層の互層を、時間をかけてゆっくりとコアリングしながら掘り抜いたためと思われる。

4.3.3 13-3/8" ケーシングセメンチング

1999年12月13日、1,613mに13-3/8"ケーシングをセットし、ハイドレート層を隠すセメンチングを行った。Dowell Schlumberger社のDeepCRETE™セメント(スラリー比重1.40 SG)でフルホールセメンチングを行った。キャリバーログを見た後直ちに、追加分のセメントおよび添加剤を発注し、スラリー110m³分を確保した。これはリグタンクのすべてを使った最大量である。セメンチング作業時後半、ROVにより海底面へのセメントリターンが確認されている。しかし、BOPとライザーパイプを設置後にCement Bond Log(CBL)を測定したところ、1,305mより上にセメントが効いている兆候は全く見られなかった。続いてVSP(Vertical Seismic Profile)を予定どおり行ったが、セメントボンド不良のためデータの質は悪かった。ROVによって確認されたセメントの海底面へのリターンは、不規則に拡大した坑内をチャネリングして上昇したセメントの一部であったと思われる。

早速、補修セメンチングをするべきかどうか議論されたが、結論は、補修セメンチングは行わずに深部の掘削を行うことになった。確認されたハイドレートは何枚か

の薄い砂層の孔隙を満たす程度のものであり、それがこれからの掘削中に坑壁から奥数 10 cm の範囲で溶けたとしても、あと 1 ヶ月で終わる掘削作業を妨げるものではないと判断したからである。

4.3.4 TD (Total Depth) までの掘削

BOP およびライザーパイプをセットし、計画どおり、深部第三紀層の油・ガスを探鉱するため 2,800 m まで掘削した。しかし、油・ガス兆がなかったため、そのまま 8-1/2" 坑を 3,300 m まで延長した。3,300 m で最終電検を行った後、本井は 2000 年 1 月 20 日廃坑された。

2,200 m 以深掘進中、海底面の 13-3/8" ケーシングの外側から弱いガスバブルが時々間欠的に出ていることが ROV によって観察されている。そして、BOP の下側のガスが溜まりやすいような箇所にシャーベット状のハイドレートが生成されているのをテレビモニターが映している。ROV は以降毎日それをコンピューターで掻き落とししたり、ジェットポンプで吹き飛ばしたりして除去に努めた。またウェルヘッドと BOP を接続する H4 コネクターに通ずるポートにグリコールを注入し、切り離すときに問題が生じないようにした。これらの作業のせいか、坑口装置に機能の異常はなかった。このガスは、セメントで隠しきれなかったハイドレート層が深部から上がってくる泥水の熱で溶けて発生したものであろう。本井廃坑後、このガスは完全に止まっている。

5. 追加調査

リグを復員させる前に、同ロケーションでハイドレート層だけをターゲットとした追加調査井をもう 3 坑掘削することが決められた。図 11 に各坑井の位置を示す。各井の目的を下に記す。

- ・追加調査井 No. 1：メインホールから 10 m 離れた地点で 10-5/8" 坑を 1,300 m まで掘削し、メインホールで達成できなかった各種の電検を行う。
- ・追加調査井 No. 2：メインホールから 20 m 離れた地点で 10-5/8" 坑を 1,149 m まで掘削した後、1,149 m から 1,223 m まで PTCS コアリングを行う。実験室での分析用コアサンプルをより多く採集するためである。
- ・追加調査井 No. 3：メインホールからアップディップ方向 (SSE) に 100 m 離れた地点で 10-5/8" 坑を 1,300 m まで掘削して、電検を行う。ハイドレート層がアップディップ位置でどのように変化して現れるかを調査するためである。

5.1 追加調査井 No. 1

メインホールで坑径が著しく不規則に拡大し電検ツールを降げることができなかったのは、軟硬の互層をゆっ

図 11 各井位置図

くりとコアリングしたからであると判断し、ここでは速やかに掘削して直ちに電検を行うべく努めた。2000 年 1 月 22 日、追加調査井 No. 1 は 10-5/8" ビットでの掘削を開始し、海底面 (945 m) から 1,300 m までを 5 時間で掘削した。坑内を高粘性泥水で満たした後、6-5/8" ドリルパイプを海底面下 30 m まで下げ、その中に電検ツールを降げていった。しかし、ツールはドリルパイプを数 m 出たところでつかえてしまった。ドリルパイプ下端の位置を何回か変えて試みたが、ツールは常にドリルパイプを出るとすぐに降がらなくなった。電検ツールを巻き上げ、6-5/8" ドリルパイプを循環しながら坑底 1,300 m まで下げ、高粘性泥水で坑内を満たした後、1,000 m までゆっくりと揚管し、再度電検ツールをドリルパイプ内に降げていったところ、ツールは初めて坑底まで降がった。次の 5 run すべてを測定し、ハイドレート層に関する大変貴重な電検データをようやく得ることができた。

DSI-GR-EMS

HALS-GR

VSP (Zero offset, 71 levels)

FMI-GR

CMR-GR

図 12 に主なログを並べて示す。一番左のキャリパーログを見ると、依然坑径は部分的に拡大しているがメインホールの (図 10) よりはずっと良い。メインホールで採集したコアのうちハイドレートを多く含むサンプルの深

図12 追加調査井 No.1 での主な電検ログ

度では、著しく高い比抵抗とともに、高い音波速度と低い CMR 孔隙率が観察された。そのような層の厚さは FMI ログから合計で 20m と数え上げられた。また、これらのログから計算されたハイドレート含有量は最大で孔隙中の 75% と報告され、コアサンプルの塩分濃度異常から計算された 80% という値に近いものとなった。なお、砂層の平均孔隙率は 36% と評価された。

注目すべきは、音波検層ログにおける 1,215m と 1,240m あたりに見られる P 波の異常減衰である。VSP においても両深度で低速度の層を確認しており、うち 1 つは震探断面図で BSR として表わされている (図 2)。これらの現象はフリーガスの存在を示唆するものである。実際、ガスはこれらのログに表れる程度に存在したのであろう。しかし、掘進中に噴出するほどのものではなかったというのが事実である。

5.2 追加調査井 No.2

2000 年 1 月 25 日、リグをもう 10m 動かし、追加調査井 No.2 の掘削を開始した。1,149m まで 10-5/8" 坑を掘削後、PTCS によるコアリングを行った。コアリング区間はそれまでに得られたデータをもとに厳選された。すなわち、1,149m～1,158m (3run)、1,178m～1,187m (3run)、1,199m～1,214m (5run)、1,220m～1,223m (1run)、計 36m (12run) が選ばれた。コアリング区間以外は、コアリング編成のまま、インナーバレルをセットせず、コアビットで掘削した。地層が軟らかいことと、コアビットが肉厚であるためそれが可能であった。2.5 日かけて、計 16.9m のコアを回収し (平均回収率 47%)、実験室にさらなる貴重なサンプルを提供することができた。1,153m のコアサンプルに目視できるハイドレートの結晶を確認している。

5.3 追加調査井 No. 3

リグをアップディップ方向 (SSE) に 100 m 移動し、2000 年 1 月 29 日、追加調査井 No. 3 を掘削開始した。1,300 m まで 6 時間で掘削した後、追加調査井 No. 1 で得られた経験をもとに、6-5/8" ドリルパイプをまず坑底まで下げ、循環して高粘性泥水で坑内を満たし、1,000 m までゆっくりと揚管した。そうして電検ツールをドリルパイプ内に降げていったところ、次の 6 run すべて坑底まで問題なく降げることができた。

DSI-GR-EMS

HALS-GR

VSP (Zero offset, 60 levels)

FMI-GR

CMR-GR

MDT-GR

アップディップ方向に掘削されたため、各地層は追加調査井 No. 1 よりも 9 m 浅く現れた。しかし、ハイドレート層基底と思われる高比抵抗層群のボトムは追加調査井 No. 1 と同様 1,213 m であった。つまり新しい高比抵抗の砂層が基底に出現した。また高比抵抗層群のトップは追加調査井 No. 1 および No. 2 より 6 m 浅い 1,135 m であった。追加調査井 No. 1 ではハイドレートを含んでいたのに、ここでは高比抵抗を示さなかった砂層も 2 ～ 3 枚あった。音波検層において、追加調査井 No. 1 と同様ここでも 1,215 m と 1,240 m あたりに P 波の異常減衰が見られている。

これをもって、リグ M. G. Hulme, Jr. は 8 基のアンカーを回収し、2000 年 2 月 5 日にシンガポールに向けて復員を開始した。

6. 結 論

- (1) 海洋で世界初のメタンハイドレートを対象とした探鉱が、日本の南海トラフ、水深 945 m の地点で実施され、海面下 1,135 m から 1,213 m 間の何枚かの砂層の孔隙にメタンハイドレートの存在を確認した。ハイドレートの総量は特に大きなものではなかったが、大水深海域でその量を評価する手法は確立された。
- (2) 心配されたシャロースガスの噴出はここではなかった。しかし、それに対して準備した安全対策は、今後の大水深掘削、とりわけ BSR を掘り抜こうとするオペレータに有効である。
- (3) 新たに開発したコアリングシステム「PTCS」と、坑内温度圧力シミュレーションプログラム「WhiteCoal-T」は、ハイドレートの探鉱に有用なツールである。

- (4) ハイドレートを含まない未固結な層とハイドレートを多く含む固結した層との互層を、時間をかけて掘削すると、坑径が著しく大きいところとそうでないところが交互にでき、電検やケーシングセメンチングは大変困難になる。このような層を掘り抜く時は、できるだけ速やかに掘削し、すぐにケーシングで覆うべきである。
- (5) ハイドレートの存在を調査する最も簡単な方法は LWD である。パイロット坑 No. 2 で得られた LWD ログは、メインホールで得られたコアサンプルとよく対応する。音波検層ツールを備えた LWD を使えばより確実に評価できる。
- (6) 震探断面図における BSR の深度は、音波検層ログにおける P 波の異常減衰深度と一致した。フリーガスはハイドレート層の直下にログに表れる程度に存在したのであろうが、掘進中に噴出するほどのものではなかった。

7. 今後の計画

メタンハイドレートの資源としての可能性を評価するには、量と生産性の両方を評価しなくてはならない。

量を評価するには、より多くの坑井を掘削して広がりを確認しなくてはならない。その際、本プロジェクトで確立された手法を駆使することはいうまでもない。またそれら新しいロケーションの選定にあたっては、本井で得られたすべての地質情報を基に、さらなる震探データの取得と解釈によって BSR をより確実に特定することが必須である。

生産性を評価するために、ハイドレートの分解をシミュレーションするプログラムが現在開発されている (Masuda, *et al.*^{10)~12)})。これに入力するパラメータとして、本井のコアサンプルや電検で確認されたハイドレート層の物性値が使われるのは当然である。さらに、石油公団は 2002 年 2 月にカナダのマッケンジーデルタで、GSC (Geological Survey of Canada), USGS (United States Geological Survey), USDOE (United States Department of Energy), および GFZ (GeoForschungs Zentrum, Germany) と共同で、永久凍土下のメタンハイドレートの生産テストを計画している。その結果はシミュレーションプログラムの検証にも使われる。

メタンハイドレートの資源としての可能性を調査する我が国の計画は、経済産業省主導のもと前進しつつある。

謝 辞

経済産業省、石油公団、および 5 年間の共同研究に従

事された民間10社から、発表の許可を頂きお礼申し上げたい。また、本プロジェクトを成功に導いたすべての方、とりわけ準備段階において斬新な計画の1つ1つを決定した基礎試錐技術検討委員会およびメタンハイドレート開発推進委員会の委員の方々、共同研究に取り組まれた方々、また国内最初の大水深オペレーションに終始現実的な助言をくれたコンサルタント Mr. Riley Sheffield, および特殊なウェルコントロール計画をともに考えてくれたコンサルタント Mr. Colin Leach に感謝する。実作業においては、誰も経験したことのない新しい作業のすべてを常に最善の方法で遂行した M. G. Hulme Jr. のリグクルー、そして昼夜海底面で我々の安全を見守り続けてくれた Oceaneering 社の ROV クルーにも心から感謝する。

最後に、本邦訳を石油技術協会誌に掲載することを許可して下さい。OTC に謝意を表す。

SI 単位換算係数

$SG \times 1.0 \text{ E}+3 = \text{kg/m}^3$

Inch (本文中は"で表示) $\times 2.54 \text{ E}-2 = \text{m}$

参 考 文 献

(OTC には下記の英文で発表されているものだけを紹介した。)

- 1) Kvenvolden, K. A., 1993 : A primer on gas hydrates. The future of energy gases. U.S. Geological Survey Professional Paper, 1570.
- 2) Satoh, M., Maekawa T. and Okuda Y., 1996 : Estimation of amount of methane and resources of natural gas hydrates in the world and around Japan. *Jour.Geol. Soc. Japan*, **102**, 959.
- 3) Ashi, J. and Tokuyama, H., 1997 : Cold seepage and gas hydrate BSR in the Nankai Trough. *Proceedings of the International Workshop on Gas Hydrate Studies*, the Second Joint Japan-Canada Workshop, 256.
- 4) Ohara, T., 1998 : Drilling operation penetrating methane hydrate. *Proceedings of the International*

Symposium on Methane Hydrates, JNOC-TRC, Chiba, Japan, 87.

- 5) Maeda, Y and Okui, T., 1998 : Influence of additives on kinetics of methane hydrates. *Proceedings of the International Symposium on Methane Hydrates*, JNOC-TRC, Chiba, Japan, 269.
- 6) Okui, T., Maeda, Y., Konno, S., 1998 : Kinetic control of methane hydrates in drilling fluids. *Proceedings of the International Symposium on Methane Hydrates*, JNOC-TRC, Chiba, Japan, 293.
- 7) Ichikawa, Y., Nonaka, A., Urano, T., Yasuhara Y., 1998 : Development of mud cooling system installed on-board of drill ship. *Proceedings of the International Symposium on Methane Hydrates*, JNOC-TRC, Chiba, Japan, 161.
- 8) Kawamura, K., Ichikawa, Y., Urano, T., Chiang J. H., 1998 : Development of downhole temperature and pressure simulation program for drilling/completing natural methane hydrate. *Proceedings of the International Symposium on Methane Hydrates*, JNOC-TRC, Chiba, Japan, 149.
- 9) Wakishima, R., Imazato, M., Nara, M., Aumann, J. T., Hyland, C., 1998 : The development of a pressure temperature core sampler (PTCS) for the recovery of in-situ methane hydrates. *Proceedings of the International Symposium on Methane Hydrates*, JNOC-TRC, Chiba, Japan, 107.
- 10) Masuda, Y., Naganawa, S., Ando, S., and Sato, K., 1997 : Numerical calculation of gas-production performance from reservoirs containing natural gas hydrates. SPE38291,
- 11) Masuda, Y. *et al.*, 1998 : Development of a numerical model for predicting hydrate - decomposition behavior in reservoirs. *Proceedings of the International Symposium on Methane Hydrates*, JNOC-TRC, Chiba, Japan, 185.
- 12) Masuda, Y. *et al.*, 1999 : Modeling and experimental studies on dissociation of methane gas hydrates in berea sandstone cores. *Proceedings of the third International Gas Hydrate Conference*, ParkCity, Utah, USA.