

掘削・分別・回収方式による表層型メタン ハイドレートを採掘する方法に関する提案

谷 和夫^{1*}・田中 洋輔²・森澤 友博³・飯田 宏⁴

¹東京海洋大学 学術研究院 海洋資源エネルギー学部門 (〒108-8477 東京都港区港南4-5-7)

²東亜建設工業 (株) 技術研究開発センター (〒230-0035 神奈川県横浜市鶴見区安善町1-3)

³東亜建設工業 (株) 土木事業本部 エンジニアリング事業部 (〒163-1031 東京都新宿区西新宿3-7-1)

⁴東亜建設工業 (株) 土木事業本部 機電部 (〒163-1031 東京都新宿区西新宿3-7-1)

*E-mail: ktani00@kaiyodai.ac.jp

海底のメタンハイドレートを採掘する方法として掘削・分別・回収方式を2003年に提案していた。その後の探査の進展により、賦存する深さや性状として南海トラフで採掘試験が行われている海底深部の砂層型と日本海東縁等で確認された海底面直下の表層型の概念が定着し、前者については減圧により分解したメタンガスを回収する方式が開発されつつある。一方、後者の表層型の採掘については明確な方向性が定まっていないが、掘削・分別・回収方式は浅部であるほど有利であるので有力な候補であると期待される。そこで、表層型メタンハイドレートを対象に、以前に提案した掘削・分別・回収方式を再検討し、解決すべき技術課題についてまとめた。

Key Words : methane hydrate, mining, excavation, separation, retrieval

1. はじめに

1990年代からわが国で進められているメタンハイドレート開発プロジェクトでは、在来型の天然ガス資源と同様に坑井を利用して熱刺激法（加熱法）ないし減圧法によって海底地盤中のメタンハイドレート（以後、MHと称す）を分解してメタンガスを回収する採掘方法が研究されている¹⁾。一方、著者の一人は、この分解する方法とは異なる採掘方法として掘削（Excavation）・分別（Separation）・回収（Recovery）方式（以後、ESR方式と称す）を2003年に提案していたが²⁾、ほとんど研究開発できなかった。

探査の進展により、2010年頃からMHの賦存する深さや性状に基づく分類として、海底深部の砂層型と海底面直下の表層型の概念が定着した。前者の砂層型MHについては、メタンハイドレート資源開発研究コンソーシアム（MH21）により太平洋側の南海トラフで採掘試験が行われており、減圧により分解したメタンガスを回収する採掘方法が開発されつつある。一方、後者の表層型MHの採掘については明確な方向性が定まっていないが、ESR方式による採掘は浅部であるほど有利であるので有力な候補の1つであると思われる³⁾。

そこで、この表層型MHを対象に、2003年に提案した

ESR方式による採掘方法を再検討することとした。特に、日本海側に賦存する表層型MHを想定して、ESRの各プロセスを具体的にイメージして、解決すべき技術課題を抽出した。

2. 2003年に提案した掘削・分別・回収方式の概要

(1) 想定していたメタンハイドレート層（問題設定）

2003年当時に想定していた我が国の近海の海底地盤中に存在するMH層の形態を図-1に示す。海水温の深度分布と平均的な地温勾配（0.03℃/m）を仮定して、MHが安定な温度・圧力条件より、MH層が存在することが可能な海底の深さ D_s は数百m以上となる。さらに、海底面からMH層の基底までの深さ D_{MH} は、水深 D_s が大きくなるほど大きく、数百mオーダーと見積もられた。掘削長が数千mにも及ぶ海底の油田やガス田の開発実績を考慮すれば削井は容易だが、最深部までの明かり掘削（海底露天掘り）は極めて困難であろう。

海底の堆積層に賦存するMH層の性状としては、未固結な砂層や固結した砂岩層の間隙をMHが充填する場合（いわゆる間隙充填型）の他に、塊状の単体で連続した地層を形成する場合も想定していた。しかし、個々の

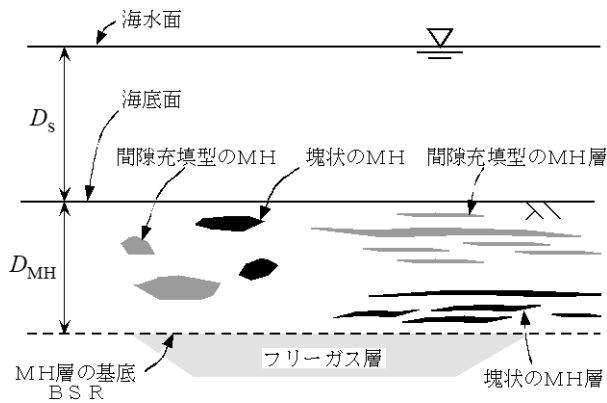


図-1 2003年に想定していた海底のMH層の形態²⁾

MH層の分布範囲、形状、連続性、MH含有率等についてはよく分かっていなかった。

(2) 問題意識

2003年当時に検討されていた海底のMH層の採掘方法は、在来型の天然ガスと同じく坑井を基点として、MHを熱刺激法（加熱法）や減圧法等によって分解して放出されたメタンガスを回収する分解・回収方式であった⁴⁾。しかし、海域での坑井利用の実績はあるものの、回収効率や生産性、連続生産の信頼性、周辺地層の安定性等に関する懸念もあり、エネルギー収支、経済性、安全性、環境親和性等の総合的な観点からより信頼性が高い生産方法の開発が望まれていた³⁾。

(3) 掘削・分別・回収方式の特長

固体資源を採掘する方法として一般的な掘削・精製方式を参考に、さらにMHの安定条件等の物理化学的な特性と海洋土工の技術水準を考慮して、図-2に示すESR方式による生産が好適と考えた。このESR方式による生産の特長として以下を示していた²⁾。

- ① 掘削に関わる要素技術には、浚渫、切土、トンネル・空洞の掘削あるいは露天や坑道による固体資源の採掘で培われた機械施工技術を応用することができる。
- ② 分別（破碎・選別・不純物除去）や回収に関わる要素技術には、陸上ないし浅海において既に確立された土木技術を応用することができる。
- ③ MH層の性状（連続性や含有率）によらず採掘が可能で、分別したMHと分解したメタンガスのすべてをドーム状の膜構造によって回収できる。
- ④ 遠隔操作や自動運転等において急速な進歩が期待できる建設ICTを活用することができる。

掘削プロセスには、MH層が厚く集積する場合には浅部は露天掘り方式を深部は立て坑・横坑方式を、逆にMH層が薄く分散する場合には虫食い方式を想定していた。回転するビットによる圧砕またはブレードの押圧によるリッピングによる掘削の機構と、ポンプ吸引による移送手段を組み合わせた浚渫がイメージされていた。

分別プロセスには、圧壊方式やミル方式を応用して破

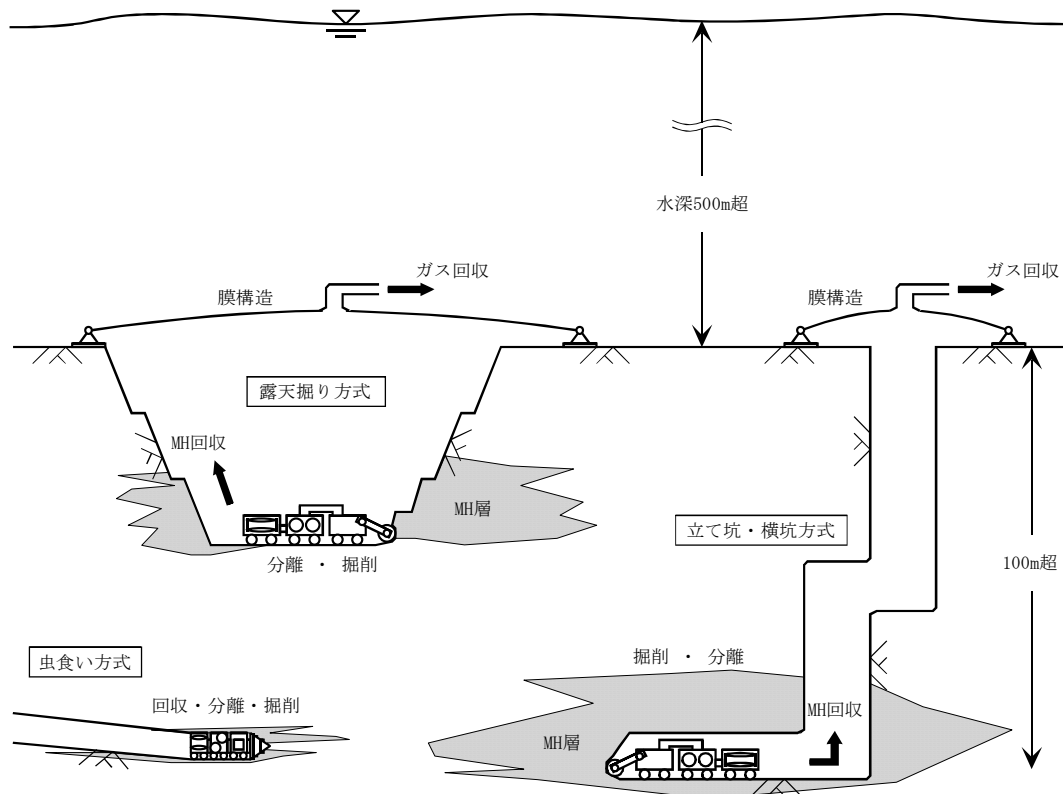


図-2 2003年に想定していたESR方式による生産の概念²⁾

砕（細粒化）した後に、MH（密度 0.91g/cm^3 ）と土砂（密度 2.3g/cm^3 以上）の密度差を利用した浮上・沈降及び遠心分離による比重選別を想定していた。

さらに回収プロセスには、MH（固体）も分解したメタンガス（気体）も補足可能なシェル形状ないしテント形状の大規模な膜構造を利用し、ポンプ吸引ないし自然の浮上作用により精製施設に移送することを考えていた。また、掘削ずり（残滓）の処分には採掘跡地の埋戻しを利用するとしていた。

(4) 全体システムのイメージ

海上ないし陸上との供給・連絡の経路を有する固定基地を鉱区内の適切な位置に設けて、周辺鉱区にさまざまな作業を行う機動部隊を派遣する分散型基地方式をイメージしていた。中心となる固定基地は、重機類へのエネルギーや資材の供給、各機器のメンテナンス、MHとメタンガスの一時的な貯蔵や処理等の様々な機能を担う総合的なサポート・ステーションである。機動部隊は遠隔操作・自動制御の移動型ロボットである重機類から編成され、掘削・分別・回収の各作業を分担する採掘ユニット、施工作業を行うインフラ整備ユニット、探査・観測活動を行う調査ユニット、あるいは事故時の救助活動を行うレスキュー・ユニット等の各種サポート・ユニットが考えられた。

3. 表層型メタンハイドレートを対象とした採掘方法の提案

(1) 採掘面からみた表層型メタンハイドレートの特徴

探査が進展するにつれて、海洋のMHの産状等に係る分類として砂層型と表層型の概念が定着してきた。前者の砂層型MHは図-1の間隙充填型に概ね該当するもので、海底から深さ数百メートル程度のポーラスな堆積層中に様々な形状や寸法で賦存するものが想定される。一方、後者の表層型MHは図-1に明瞭には表示されていないが、海底面直下に塊状ないし層状に賦存すると想定されるので、浅部に図示されたものが概ね該当する。90年代から砂層型と区別して認識されるようになり、わが国でも日本海東縁で2000年代に入り積極的に探査が進められるようになった。

MM21が2013～2015年度に行った表層型メタンハイドレート資源量調査の報告⁹⁾に基づいて想定した日本海における表層型MHの概念を図-3に示す。賦存する範囲は、水深 D_s が500～1,000mで、海底深部から上昇するフリーガスがガスチムニー構造を形成して泥火山のように浅所に径が数百mの円丘状の高まり（マウンド）が発達する部分と考えられている。岩塩ドームや断層に関連して同

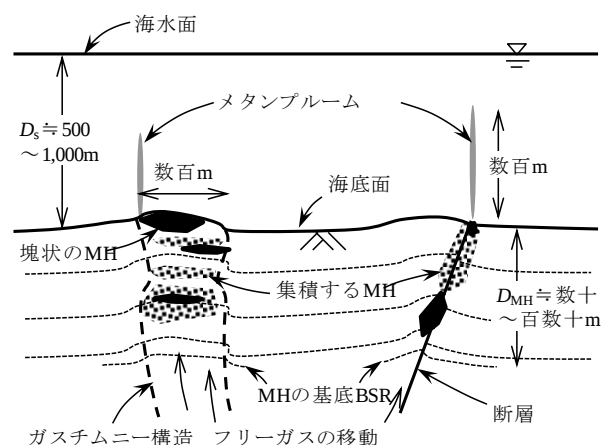


図-3 日本海において想定される表層型MH層の概念

様な起源と考えられるMHが見られることから、砂層型を層序規制型、表層型を構造規制型と呼ぶこともある⁹⁾。ガスチムニー構造の内部におけるMHの分布は、深さ D_{MH} はたかだか百数十mまでで、構造や性状は多様と報告されている。

(2) 採掘方法のイメージ

表層型MHを対象とした固体資源として掘削・分別・回収するESR方式による生産の概念を図-4に示す。特徴は、掘削・分別に海洋土工技術の活用とドーム状の膜構造による採掘したMHや分解したメタンガスのみならず湧出するメタンブルームも含めた回収である。

MH回収率の向上（理想的には採掘全量の回収）と環境影響の範囲を限定することを目的としたドーム状の膜構造の寸法が鍵となるが、海底での施工を考慮すると、径が概ね数十mが限界と想定される。

一方、掘削深さについては、ガスチムニー構造の柱状の形状を考慮すると、長大な法面を有する露天掘りは掘削量が過大となるので経済的ではない。掘削範囲をガスチムニー構造の内部に限定することができる掘削方法が好適であるが、施工方法として図に示す2例が考えられる。1つは図中の右側に示す方法で、土留め工による立坑掘削で、もう1つは図中の左側に示す方法で、泥水等の安定液を利用した連壁や場所打ち杭の施工である。各方法とも、陸上ないし浅水域において深さが百m超の実績があるので、表層型MHが存在する深さ D_{MH} （ $\leq$ 百数十m）までの採掘は技術的には実現が可能と思われる。

なお、土留め工による立坑掘削の場合は、掘削したMH層を膜構造の外に移送してから分別・回収となる。一方、安定液を利用した掘削の場合は、安定液を攪拌ないし循環する中でMHを分別・回収することになる。

(3) 技術的な課題

経済性と信頼性、安全性が高い施工技術として500m

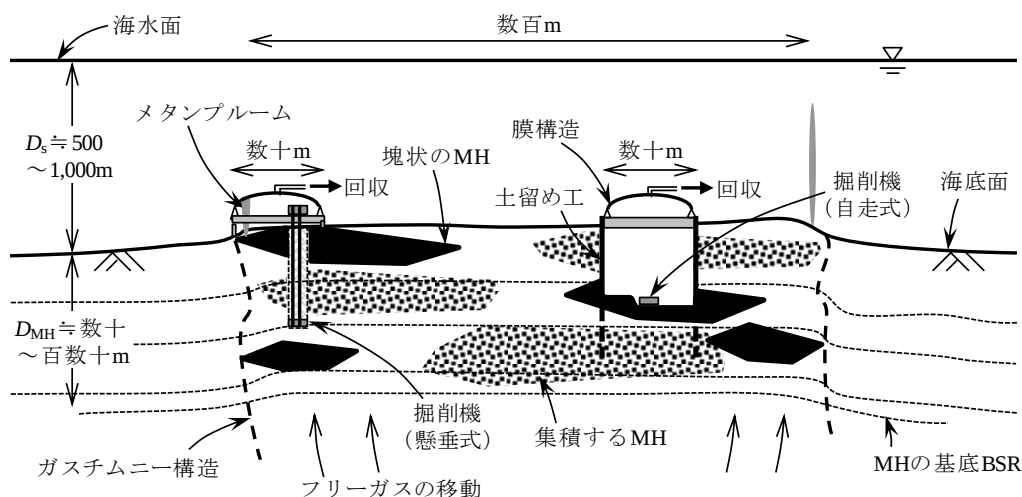


図-4 表層型MHを対象としたESR方式による生産の概念

超の大水深への適用が最大の課題である。特に、掘削プロセスについては土留め工あるいは安定液を利用した掘削方法が、分別プロセスについては効率の良い比重選別方法が、回収プロセスについては膜構造の施工や移送中の管内閉塞の防止が重要である。様々な重機や機器類と共にシステム全体のロバスト化（メンテナンス・フリー化、長寿命化、交換・修理の容易化等）も重要な課題である。

4. まとめ

表層型メタンハイドレートを対象とした採掘方法として掘削・分別・回収方式を再検討し、解決すべき技術課題についてまとめた。各プロセスの要素技術は陸上ないし浅水域では既に確立された土木技術ではあるので実現可能性は高いが、各要素技術を深海に適用するための技術開発が望まれる。

謝辞：青山千春氏（東京海洋大学），川岸靖氏（太陽工業（株）），福岡浩氏（新潟大学），渡邊裕章氏（九州

大学），佐々木拓郎氏（三菱ガス化学（株））には貴重な示唆を受けた。

参考文献

- 1) 増田昌敬：砂層型メタンハイドレートの商業的開発に向けた技術展望，第45回石油学会年会・秋季大会講演要旨集，1A12，pp.33-38，2015。
- 2) 谷和夫：掘削・分別・回収方式による海底のメタンハイドレートを採掘する方法に関する提案と解決すべき技術課題，第48回地盤工学シンポジウム，地盤工学会，pp.383-388，2003。
- 3) 谷和夫：海底に賦存するメタンハイドレート資源を採掘する様々な方法の検討と提案，第33回岩盤力学に関するシンポジウム，土木学会，pp.397-402，2004。
- 4) メタンハイドレート資源開発コンソーシアム：平成14年度研究成果報告，2003。
- 5) 松本良：総説 メタンハイドレートー海底下の氷状巨大炭素リザーバ発見のインパクト，地学雑誌，118(1)，pp.7-42，2009。
- 6) 資源エネルギー庁 HP：
<http://www.meti.go.jp/press/2016/09/20160916006/20160916006.html>（2016/9/16公表）

PROPOSAL OF EXCAVATION-SEPARATION-RECOVERY METHOD FOR MINING OF SHALLOW TYPE METHANE HYDRATE

Kazuo TANI, Yousuke TANAKA, Tomohiro MORISAWA and Hiroshi IIDA

In 2003, one of the authors proposed a mining technology for ocean methane hydrate by excavation-separation-recovery techniques, namely ESR method, with best support of most advanced marine civil engineering and automated execution technology. Focusing on the shallow type of methane hydrate recently found in the Sea of Japan, the idea of this ESR method has been attempted. The features of this refined E-S-R method are two-fold; (1) the mining areas are covered with dome-shaped structures to confine any environmental disturbances, and (2) the methane hydrate layers are excavated as solid resources by remotely controlled heavy machinery with suitable retaining technologies.