

1.天然ガス

都市ガスとして使用されているガスの主な成分はメタンガスですが、日本はその原料となる天然ガスのほとんどを海外から輸入しています。2007年度に海外から輸入した量は約820億 m^3 (6,830万トン)で、この量は20年前の356億 m^3 と比較して2.3倍もの増加となっています。天然ガスの使用量は世界的に見ても増大しており、日本では今後、電力需要や都市ガス需要量の増加、天然ガス車や、さらには家庭用燃料電池の普及などから、2030年までにさらに300億 m^3 の天然ガスの供給が必要になると見積もられています。

天然ガスの大きな特長は、燃焼時の二酸化炭素、窒素酸化物や硫黄酸化物の発生が他の化石燃料である石炭や石油と比較して少ないことです。例えば、二酸化炭素の排出量は同じ熱量を得ようとした場合、石炭を100とすると、石油は80、天然ガスは57です。また、硫黄酸化物が通常は発生しません。

このように天然ガスは燃料として用いた場合、他の化石燃料より環境に与える悪影響の少ないエネルギーですが、2007年度の国内生産量は37億 m^3 であり、国内全体の消費量のわずか4%程度しかありません。この天然ガスが国内で大量に発見されれば、純国産のエネルギー資源量が飛躍的に増大することになります。

2.メタンハイドレート

三次元的な結晶構造の隙間に他の分子が閉じ込められた化合物をクラスレート化合物と呼びます。もともとの結晶構造が水である場合が「ハイドレート」で、水の結晶の中に閉じ込められた分子がメタンである化合物が「メタンハイドレート」です。通常、目にする氷（水の結晶）は六方晶系です。メタンハイドレートの結晶の一部を図1に例として示します。

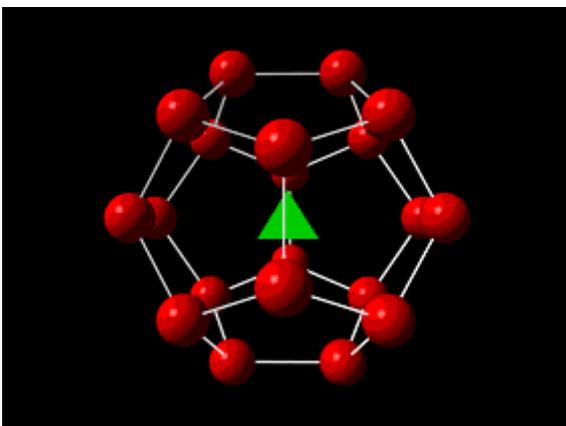


図1 水分子の作るカゴ¹⁾

この結晶は12面体で、頂点にある球が酸素分子で、それを水素分子が繋いでいます。これは水の分子が作る「カゴ」と見ることができます。この12面体の他にも14面体あるいは16面体の結晶構造があります。この3種類の構造のうち、12面体が2個、14面体が6個組み合わさったものをタイプI、12面体が16個、16面体が8個組み合わさったものをタイプIIと呼びますが、タイプIIのメタンハイドレートは不安定であり、メタンハイドレートのほとんど

どはタイプ I です。タイプ I のメタンハイドレートでは、水分子 46 個に対してメタン分子を最大で 8 個取り込むことができます。したがって、メタンハイドレートの分子式は $\text{CH}_4 \cdot 5.75\text{H}_2\text{O}$ と表すことができます。また、その密度は $0.91\text{g}/\text{cm}^3$ です。これらのことからメタンハイドレート 1cm^3 が分解すると 0.8cm^3 の水と、最大で 172cm^3 (1 気圧、 0°C) のメタンが理論的に発生することになります。ただし、天然のメタンハイドレートでは、図 1 に例で示した「カゴ」の全てにメタンが含まれているわけではありません。メタンの含まれているカゴの割合を占有率と呼びますが、天然のメタンハイドレートではその値は 0.9 から 0.95 程度とされています。仮に占有率が 0.95 であるとすれば、 1cm^3 のメタンハイドレートから約 165cm^3 (1 気圧、 0°C) のメタンが得られることになります。

メタンハイドレートは簡単に言えば低温で高圧の環境で存在することができます。図 2 はメタンハイドレートの安定領域を示した図ですが、横軸には温度、縦軸には圧力がとつ

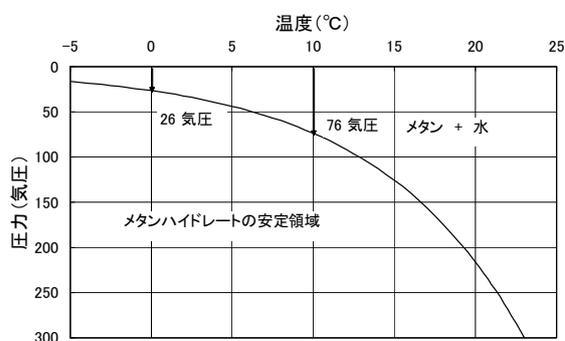


図 2 メタンハイドレートの安定領域

てあります。この図の中で示した線 (生成・解離平衡線と呼びます) の左側がメタンハイドレートの安定領域で、線の左側はメタンガスと水とが分離している領域です。図を見ると例えば 0°C では 26 気圧以上、 10°C では 76 気圧以上がメタンハイドレートの安定領域であることが分かります。図 2 の範囲外となりますが、大気圧 (1 気圧) ではマイナス 80°C 以下が安定領域です。実験室で、密閉した金属容器を外側から冷却しながら、高圧のメタンガスと水とを閉じ込めることにより、メタンハイドレートを合成することができます。このようにして合成されたメタンハイドレートは白色の細かい粒状あるいはグラニュー糖のようなちょっと粗めの粒状をしています。メタンハイドレートは水の結晶中にメタンを含んだ物質ですから、火をつけると図 3 に示すように燃えるので、「燃える氷」と呼ばれることもあります。



図 3 燃える氷

3.メタンハイドレート資源

実験室でメタンハイドレートが合成できるのと同じく、自然界においてもメタンが十分にあり、低温で高圧という環境下でメタンハイドレートが存在することができます。このような条件を満たす場所は限られており、シベリアなどの永久凍土層や海底下となります。

実際に歴史上、初めて地下からメタンハイドレートが採取されたのは、1967年、シベリアのヤクーチャの永久凍土層からでした。永久凍土層では、地表から数100m地下までの地層が凍っており、地下は深くなればなるほど圧力が高くなるので、図2で示した安定領域となることが有ります。けれども、地下では、深いところほど温度が高くなりますから、ある一定以上の深さになるとメタンハイドレートが安定して存在することができません。したがって、メタンハイドレートが存在する深さには上限と下限とがあります。

永久凍土層は陸地の極地方にあります。海洋ではどうでしょうか。海面では一般に水深が深くなればなるほど、水温は徐々に下がっていき、場所によって異なりますが海底では4℃程度まで低下します。図2から温度4℃では圧力がおよそ50気圧以上であれば、ハイドレートが安定して存在することが分かります。水圧は10mごとに1気圧上昇しますから、海洋では500mより深いところであれば、メタンハイドレートが存在する条件が整います。さらに海底下では、海底よりもさらに圧力が高くなるために、メタンハイドレートは存在できますが、数100m以上の深度になると地熱のために地層温度が高くなり、メタンハイドレートができることはありません。その深度より深いところでは、気体として存在することもあり、これはフリーガスと呼ばれています。

日本には永久凍土層はありませんが、日本周辺海域のメタンハイドレートの資源量について試算した1996年の論文²⁾があり、この結果では、メタンハイドレートとその下のフリーガスを合せて、7.35兆m³としています。はじめに述べたように2007年度のガスの海外からの輸入量、国内の生産量は合計で857億m³でしたから、約86年分に相当する天然ガスが日本周辺海域にあることにあります。

日本周辺海域のより詳細な資源量の評価結果としては、南海トラフで実施された例があります。これは石油公団（現石油天然ガス・金属鉱物資源機構、JOGMEC）が1999年から2000年にかけて実施した合計で6本の海洋掘削井（基礎試錐「南海トラフ」と呼ばれています）からのデータと、2004年には約30本の掘削井（基礎試錐「東海沖～熊野灘」と呼ばれています）で得られた詳しいデータをもとに推定されたものです。この資源量の推定では、対象とする海域をメタンハイドレートが地層内に濃集している海域（濃集帯と呼びます）と、そうではない海域とに分けて資源量を計算していますが、資源量はこの調査海域の濃集帯で、5,739億m³としており、これは日本の天然ガスの年間消費量の約7年分に相当します。日本の周辺海域には南海トラフの他にも有望な地域があり、今後、他の海域においても新たな調査が始まれば、より詳細な資源量が明らかになるでしょう。

4.メタンハイドレート層からのメタンの採取法

2004年に実施された基礎試錐「東海沖～熊野灘」から、この海域の地層はタービダイト砂泥互層であることが分かりました。タービダイトとは、陸からの土砂が混濁流によって押し流され、海底面に堆積したものです。この混濁流は地震などが原因で発生します。この混濁流は数十年から数百年間隔で間欠的に、繰り返し発生するので、数cmから数mの

砂層と泥層が交互に堆積している地層となります。東海沖～熊野灘の場合には、メタンハイドレートは、砂泥互層中の砂層に多く含まれていることが分かりました。

図 2 で示したように、メタンハイドレートが存在しているとすれば、その場所の温度、圧力は安定領域にあるはずですが、実際に東海沖海域の水深 720m、海底下深度 164.3m の地層から採取された砂質試料の砂粒子の間の孔隙にメタンハイドレートが含まれていました。この地層の圧力は 86 気圧、温度は 10℃程度と推測されますから、この地層の環境は安定領域内です。

この場所からメタンハイドレートあるいはメタンは取り出すためにはどのようにしたら良いでしょうか。石油や天然ガスであれば、坑井を掘削して、それらを含む地層（貯留層と呼びます）に坑井が到達すれば、石油や天然ガスが噴き出してきました。これは石油や天然ガスの貯留層内の圧力が高いためです。しかしながら、メタンハイドレートは地層内では固体ですから、噴き出すということは期待できません。また、石炭のように坑道を掘削し、人間がその中に入ってメタンハイドレートを採掘するというのも、陸地から数 10km 離れた海底下であることや深度が 1,000m 程度であることを考えると、あまり現実的とは言えません。結局、生産するための方法として可能性が高いのは、メタンハイドレートを地層内で何らかの方法でメタンと水とに分解し、坑井から上昇してくるメタンを取り出す方法となります。

地層内でメタンハイドレートをメタンと水とに分解させる方法として考えられているのは、大別すれば「減圧法」、「加熱法」と「インヒビター法」と呼ばれる三つの方法です。「減圧法」とはメタンハイドレート層の圧力を下げることによって、メタンハイドレートを分解する方法です。具体的には坑井の下部に水中ポンプを設置して水を汲み上げ、坑井下部の水頭圧を下げることによってメタンハイドレート層の圧力を低下させます。例えば、坑井から水を汲み上げた結果、坑井内の水位が 10m 低下すれば、坑井の下部の水圧は 1 気圧低下することになります。メタンハイドレートが分解すると、メタンと水になりますから、分解を進行させるためには連続して水を汲み上げることになります。

「加熱法」とは坑井内に例えばヒーターを設置してメタンハイドレート層を加熱する、あるいは熱水を坑井内で循環させてメタンハイドレート層を加熱する等の方法です。熱水を坑井内で循環させるためには、坑井内に長い鉄管を挿入し、その鉄管の内側から熱水を注水し、鉄管の外側と坑井の隙間から熱水を排水することにより行います。この方法ではメタンハイドレート層を加熱するためのエネルギーが必要となりますから、熱効率の良い方法とは言えません。

「インヒビター法」とは、メタノールや塩分などの薬剤を水と混ぜてメタンハイドレート層に注入する方法です。このような薬剤を混入した水をメタンハイドレート層内に注入すると、その成分の濃度により、図 2 に示した曲線を移動させることができます。すなわち、圧力の低下や、温度の上昇が主な目的ではなく、今まで安定であったメタンハイドレートを化学平衡的に分解する領域へ移動させることが目的です。この方法では、使用する

薬剤が高価であることや、薬剤の使用による環境への影響が心配です。

その他、二酸化炭素ガスがメタンよりも水ドレートになりやすいことを利用して、メタン水ドレート層に二酸化炭素ガスを押し込み、メタンと置換する方法等も検討されています。

現在のところ、南海トラフで見られるような砂泥互層に対して最も有効であると考えられているのは「減圧法」であり、場合によっては「加熱法」や「インヒビター法」を併用する方法です。「減圧法」は「加熱法」と比較されることが多いので、誤解されることがありますが、「減圧法」といってもメタン水ドレートの分解は吸熱反応であり、1kg 当たり約 400kJ の熱エネルギーが必要となります。もし、熱の供給がなければ、メタン水ドレートを分解することはできません。砂泥互層の場合には、メタン水ドレートを含んでいる砂層と、その上下の泥層が熱の供給源となります。

5.開発課題

日本でのメタン水ドレート資源の開発は、2002年3月に「メタン水ドレート資源開発研究コンソーシアム」、通称 MH21 研究コンソーシアムが設立され、国家プロジェクトとして実施されています。このプロジェクトでは、研究分野を「資源量評価」、「生産手法開発」、「環境影響評価」の三つに分けて研究を行っています。上で述べた東海沖～熊野灘の海域調査や資源量の評価は「資源量評価」の成果の一部です。このプロジェクトでは、2016年にメタンガスの商業的生産を目指しています。これまで、カナダにおいて試験的にメタン水ドレートが生産された例がありますが、現在、商業的な生産が行われている例はありません。それは、長期にわたってメタン水ドレート層からメタンを安定して経済的に取り出すための手法に不明な点が多いからであると言えます。

それでは、具体的にメタン水ドレート層からメタンを取り出すと地層の中で何が起きるのでしょうか。

まずいちばん最初に坑井から水を汲み上げると坑井の底にあるメタン水ドレート層の圧力が低下します。その結果、坑井の近傍から周囲へのメタン層へと順次圧力が低くなっていき、圧力が低下した箇所ではメタン水ドレートが分解してメタンと水になります。メタンや水は圧力が低い坑井のある方向へと流れていきますから、メタンと水は坑井を通じて地上へと回収されることとなります。

このときに起きるメタン水ドレート層内の物理的な現象は複雑です。メタン水ドレートは砂層の中の小さな空隙の中で固体として存在しています。砂層の中のメタンや水はこの空隙を通して流れるのですが、もともとの固体のメタン水ドレートの量が多ければ多いほど、空隙が少なく、メタンや水が流れにくいこととなります。

メタン水ドレートが分解すると、砂層の中の空隙が増加し、メタンや水が流れやすくなります。一方、砂層を減圧すると砂層に加わる地圧が増加し、空隙が押しつぶされて、メタンや水が流れにくくなります。つまり、減圧法による生産では、メタン水ドレート

の分解に伴い、メタンや水が流れやすくなる現象と流れにくくなる現象の二つが同時に起きるわけです。

メタンや水が同時に空隙を流れる場合、その比率に応じてメタンや水の流れやすさが異なります。例えば水の量がメタンと比較して非常に多い場合には水のみが流れ、メタンは空隙内に取り残されることとなります。それとは逆に、メタンが多い場合には、水が流れないこともあり得ます。これらメタンや水の流れやすさが、その比率に応じてどのように変化するかを知ることは、メタンの生産量を予測する上で大変に重要です。

メタンハイドレートが分解すると、もともとは砂層の骨格の一部であった構造が変化するので、砂層全体として収縮します。この収縮は時間とともにゆっくりと進行しますが、メタンハイドレート層は海底下数 100m にあるとはいえ、海底面が不規則に沈下したばかりには、環境に悪影響を与えることも考えられます。環境影響を評価する上からも、メタンハイドレート層の力学的な性質を知ることが重要です。また、砂層を構成する砂が水の流れとともに、坑井内に大量に流入する可能性もあります。この現象は出砂現象と呼ばれていますが、大量の砂によって坑井が埋まってしまった場合には、生産を中断しなければなりません。

既に述べたようにメタンハイドレートの分解は吸熱反応ですから、周囲の泥層から連続的に熱が供給されなければなりません。その結果、周囲の泥層の温度が低下しますが、氷点以下となった場合には氷が生成され、氷が砂層の空隙を閉塞して、メタンの生産速度が低下することも考えられます。

このように、海底下のメタンハイドレート層からメタンを生産した場合に何が起きるかを予測するためには、メタンハイドレート層やその上下の層内の水、メタンの流れ、熱の流れ、変形の様子などが時間とともに、どのように変化するかを総合的に取り扱う必要があります。そのために数値計算が必要となります。この数値計算を行うためのプログラムの開発も重要な研究課題です。

6.おわりに

国内におけるメタンハイドレート資源の開発は、経済産業省が実施しています。この研究の内容については、MH21 研究コンソーシアムのホームページ¹⁾に、詳細に分かりやすく書かれています。本文を見て、より詳しくメタンハイドレート資源について知りたい方はこのホームページをご覧くださいをお勧めします。

参考文献等

- 1) <http://www.mh21japan.gr.jp/japanese/index.html>
- 2) Satoh, M., Maekawa, T. and Okuda, Y., J. Geol. Soc. Japan, 102 (11), pp. 959-971 (1996)