



可燃燒的冰

——21世紀的新能源替代品



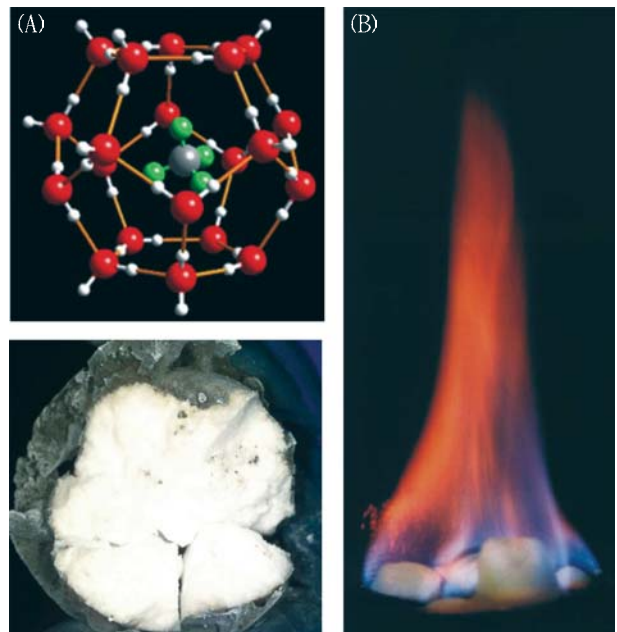
劉家瑄／台大海洋研究所

近年來有關天然氣水合物的報導常見諸報章雜誌，也引起人們廣泛的注意。什麼是天然氣水合物？它的重要性到底如何？天然氣水合物和我們又有什麼樣的關係？這篇文章將針對天然氣水合物做簡單的介紹。

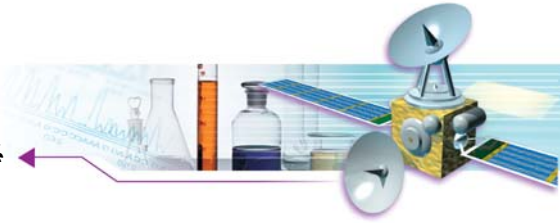
什麼是天然氣水合物

天然氣水合物 (gas hydrate) 是氣體分子被呈籠狀架構的水分子所包含，而形成一種類似冰晶狀的固態物質 (圖 1)。這種氣體分子和水分子的結合並不依靠任何化學鍵，純粹是氣體分子被包裹在水分子所形成的籠狀架構空隙中，與一般化學反應所產生的水合物性質並不相同。這種籠狀包合物 (clathrate) 通常存在於低溫與高壓的環境之下，而水分子所能夠包裹住的氣體分子其種類繁多，有甲烷、乙烷、丙烷等烷烴類氣體，以及二氧化碳、氮氣等常見氣體。由於自然界中存在的天然氣水合物中之氣體絕大部分 (>95%) 是甲烷，因此人們常用「甲烷水合物」來稱呼學理上較為嚴謹的「天然氣水合物」一詞。本文遵循我國學界的共識，「甲烷水合物」專指氣體分子為甲烷的水合物，而以「天然氣水合物」通稱一般的氣體水合物。由於甲烷水合物晶體形似冰塊，在常溫與一大氣壓之下會解離 (類似溶解) 成為甲烷氣和水，而散發出的大量甲烷氣一經點火就會燃燒，因此也被戲稱為「會燃燒的冰」 (圖 1)。

天然氣水合物早在十九世紀初期就已被化學家在實驗室中合成出。戴維 (Humphrey Davy) 和法拉第 (Michael Faraday) 把氯氣和水混合，在低溫情況下發現液體中出現了固態的物質。接下來的一個多世紀，化學家在實驗室中不斷的將各種氣體與水合成這種不靠化學鍵就能形成的奇怪化合物質，直到 1930 年代，罕默施密德 (E. Hammerschmidt) 提出天然氣水合物是造成寒冷地區天然氣輸送管阻塞的主要原因，天然氣水合物的研究才從純學術研究中走出，進入工業界的應用研究階段。其後三、四十年間，研究人員仔細的調查、分析天然氣水合物的物理與化



▲圖 1 (A)甲烷水合物之籠形架構，(B)燃燒中的天然氣水合物



學性質，並提出它們形成的模式，然而主要的目的，卻都在尋找阻止天然氣水合物形成的方法（以避免輸氣管阻塞）。1960年代末期，俄國探勘人員在西伯利亞西部的大型天然氣田中發現沈積物地層中含有大量天然氣水合物，並且解離的天然氣水合物可能提供了部分開採出的天然氣。隨後，在北美洲阿拉斯加北坡的永凍層之下，也發現了大量自然存在的天然氣水合物。這些發現引起了油氣探勘界的注意，世界上許多國家開始關注於天然氣水合物的研究。1970年代，天然氣水合物的標本在黑海海床被採集到，加上「深海鑽探計畫（Deep Sea Drilling Project）」在1970到1980年代中在許多大陸邊緣的海床下鑽探到天然氣水合物存在的證據，人們開始了解到天然氣水合物在地球上的分布相當廣泛，也開始關注其對地球環境的影響。

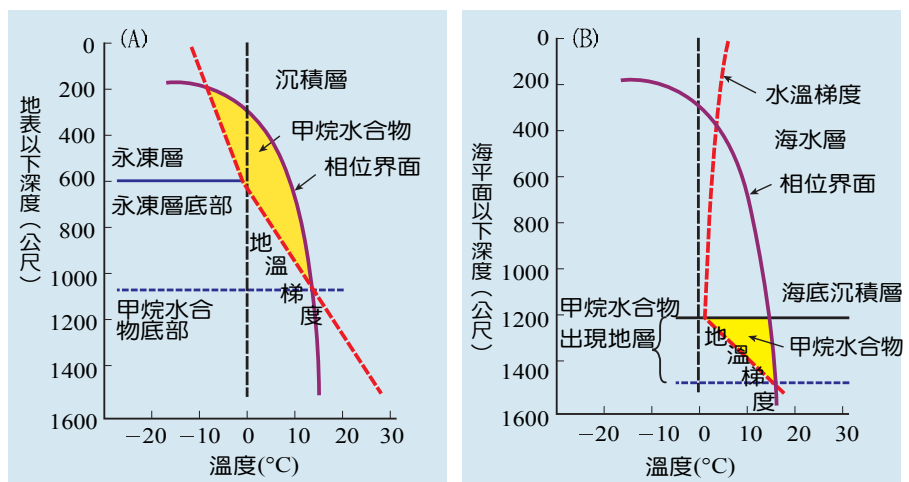
天然氣水合物的生成與分布

天然氣水合物需要在高壓及低溫的環境下，由足夠量的氣體分子與水分子結合而形成。因此，適當的溫度與壓力，以及有大量氣體的供應，是天然氣水合物形成的必要條件。科學家很早就建立了天然氣水合物之氣體與水的二成分系統相平衡關係。以甲烷水合物為例，在攝氏0度的溫度下，要三十個大氣壓的壓力，甲烷與水才會形成水合物；而在一個大氣壓的情況下，溫度要降到零下40度，甲烷水合物才會穩定存在（Katz et al., 1959）。

在地球上，南、北兩極地區的永凍層以及大陸斜坡一帶的海床下面均有適合天

然氣水合物存在的溫、壓條件，這可以從甲烷水合物的穩定相位曲線與極區和大陸斜坡地區的地溫梯度與深度關係圖（圖2）來說明。圖2中的紫色曲線代表甲烷是以氣態或水合物態存在的相界面溫壓關係曲線，只有在曲線左側溫度較低、壓力較大（壓力隨深度增加而增大）的環境下，甲烷與水才能結合成水合物的相態。圖2(A)代表極區永凍層的環境，紅色虛線為不同深度的地下溫度變化。從地下溫度、壓力的變化與甲烷水合物相界面曲線的關係來看，甲烷水合物可以在約200公尺到1080公尺深度的地層中形成（淺於200公尺，壓力不足；深過1080公尺，溫度太高）。圖2(B)顯示在大陸斜坡處的溫、壓環境。只要其下地層中藏有大量的甲烷氣，甲烷水合物就可能在海底到海底以下三百多公尺的沉積層中出現。超過海床以下三百多公尺深度的地層，由於地溫的升高，甲烷水合物則又解離成甲烷氣與水的狀態了。

的確，目前在南、北兩極地區的永凍層以及大陸斜坡一帶的海床下面有為數不少的地區發現有天然氣水合物的存在，包括台灣西南海域（圖3）。在這些地區的淺部地層中，應該都含有大



▲圖2 甲烷水合物在(A)極區永凍層與(B)海域環境下其相位界面和環境溫、壓關係圖。紫色曲線為甲烷水合物相位界面，紅色虛線為溫度變化曲線，黃色區域為甲烷水合物穩定範圍



量的天然氣。然而，這些天然氣是怎麼形成的呢？

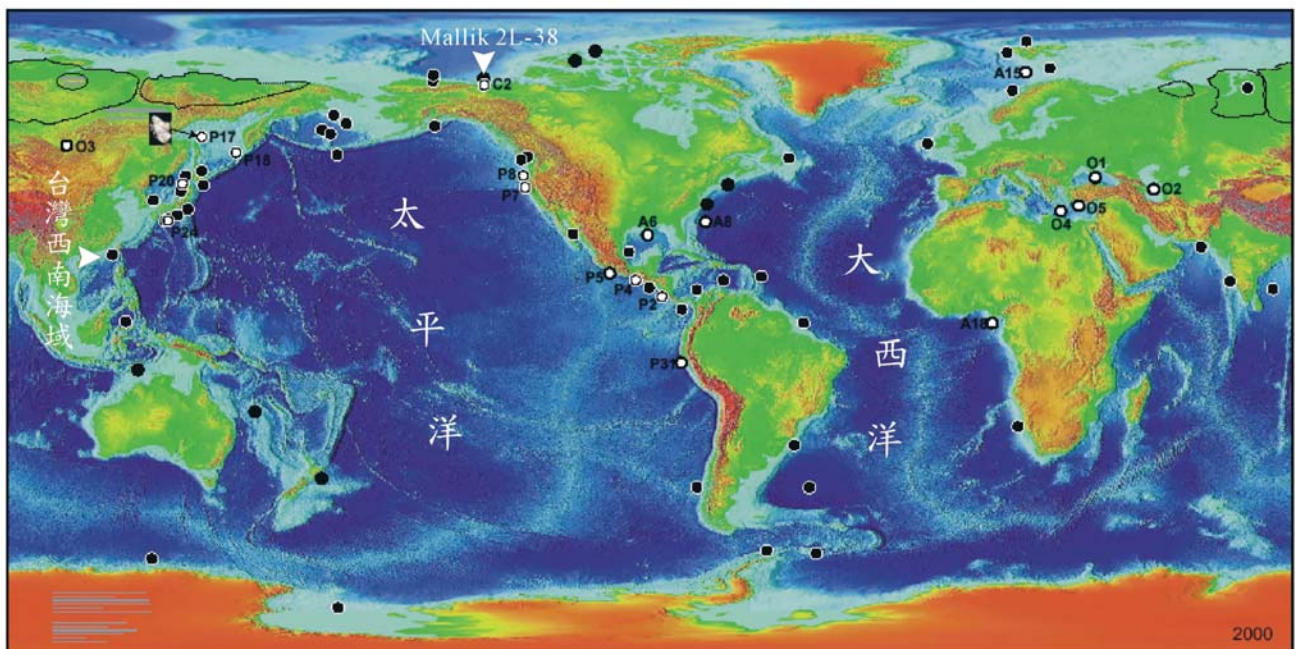
一般認為地層中天然氣的來源主要可分為由生物作用（biogenic）所產生的或是由熱分解作用（thermogenic）所產生的。地層中的微生物在分解沉積物中有機物質時，會產生甲烷氣，其中主要的生化反應有二氧化碳的還原作用與醋酸鹽類的發酵作用兩種。生物作用所產生的甲烷氣多半存在於淺部的地層中，是一般天然氣水合物中甲烷氣的主要來源。

由熱分解作用所產生的甲烷氣係指有機質隨著沉積物被深埋後，經由高溫的分解作用而產生出來的甲烷氣。熱分解作用所產生的甲烷氣通常埋藏深度頗深，必須藉由如斷層或高孔隙率地層等管道傳送到接近地表處，再形成天然氣水合物。生物作用與熱作用所產生的甲烷氣，其碳與氫同位素的組成有明顯的差異，這可用來辨別甲烷氣的來源。另外，由微生物作用和熱分解作用所形成的天然氣，其烷烴類氣體物質組成比例也會不同，藉由甲烷對乙烷與丙烷總和之比值變化，亦可區分甲烷的來源是生物作用或是熱分

解作用所形成。

天然氣水合物的重要性

由於 1970 年代到 1980 年代之間科學家們在許多大陸邊緣的海床之下發現廣泛分布的天然氣水合物，對其性質與蘊藏量開始有了較清楚的認識。科學家們推估全球天然氣水合物中甲烷含量大約有 20,000 兆立方公尺。這個數字一般人很難想像有多大，但如說這些甲烷所能提供的有機碳能量是目前全球已知所有石油、天然氣等化石燃料總量的兩倍，就知道這些甲烷水合物潛在的能源價值了。事實上，天然氣水合物的能源潛力是吸引世界上許多國家積極投入天然氣水合物調查研究的主要原因。日本、美國、加拿大等國家所組成的研究團隊曾分別於 1999 年與 2002 年在加拿大北邊的麥坎錫三角洲進行天然氣水合物的探勘與開發研究井之鑽井採樣研究，對天然氣水合物的能源開發技術獲得了寶貴的資料與經驗。日本更於 2001 年展開了大規模的天然氣水合物調查研究與開發計畫（MH21 Program），預期在



▲圖 3 全球已知天然氣水合物分布地點。白色圓圈代表該處已採集到天然氣水合物的標本，黑點代表天然氣水合物的存在是藉由地球物理、地球化學或地質資料的證據（取自 K. Kvenvolden, 美國地質調查所）



2015年開始商業化的生產由天然氣水合物開採出來的天然氣。

另外，甲烷是非常活躍的溫室氣體，和同量的二氧化碳氣體比較，其增溫效率大了20倍。近年來由於工業發展，人類排放的大量二氧化碳已形成溫室效應而造成全球增溫。有這麼多的甲烷以水合物的形態貯存在地表之下，只要一小部份甲烷水合物受到擾動而解離，釋出的大量甲烷如果進入大氣中，可能對全球氣候造成極大的影響。古氣候學家發現在大約5400萬年前，地球的溫度曾快速的增加了3到5度（稱為「古新世末極熱事件」），有許多學者認為這個事件是因為一個大地震或隕石撞擊，造成海床下天然氣水合物的大量解離，甲烷氣釋放到大氣層中所造成的。

除了對全球氣候可能有影響之外，海床下蘊藏的天然氣水合物也有造成地質災變的危險。天然氣水合物大多分布在大陸斜坡處，海床坡度本來就比較陡，海底沉積物中若含有天然氣水合物，固然能增加沉積物的固結，但一旦因環境溫、壓改變，天然氣水合物解離成水和天然氣，則反而形成地層中的弱帶，容易導致海底崩移。大規模的海底崩移不僅能造成該處人為設施（如鑽井台、海底電纜等）的毀損，更有可能形成海嘯，危害到沿海地區。研究人員發現，大陸斜坡一帶許多大規模的海底崩塌、滑移和天然氣水合物的存在有密切關係。現在天然氣水合物對大陸斜坡地區所可能造成的潛在地質災害，已成為許多國家研究調查的重點項目了。

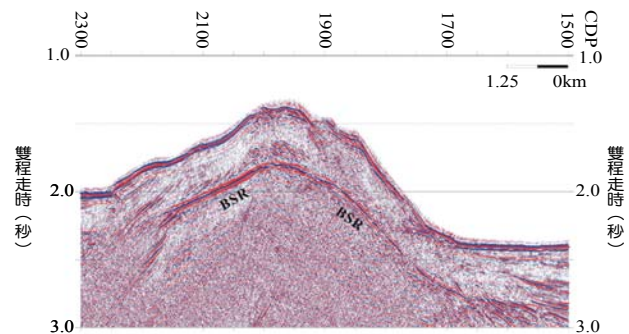
鑑於天然氣水合物潛在的經濟價值（可能成為二十一世紀的重要能源），以及其對地球環境所可能造成的影響（全球增溫、地質災害），目前世界上許多國家對天然氣水合物均積極進行研究調查。而寄望能成功開發天然氣水合物為能源的一些國家（如日本、美國、加拿大、印度、韓國等）更成立了國家計畫，積極投入天然氣水合

物的研究調查與開發工作。

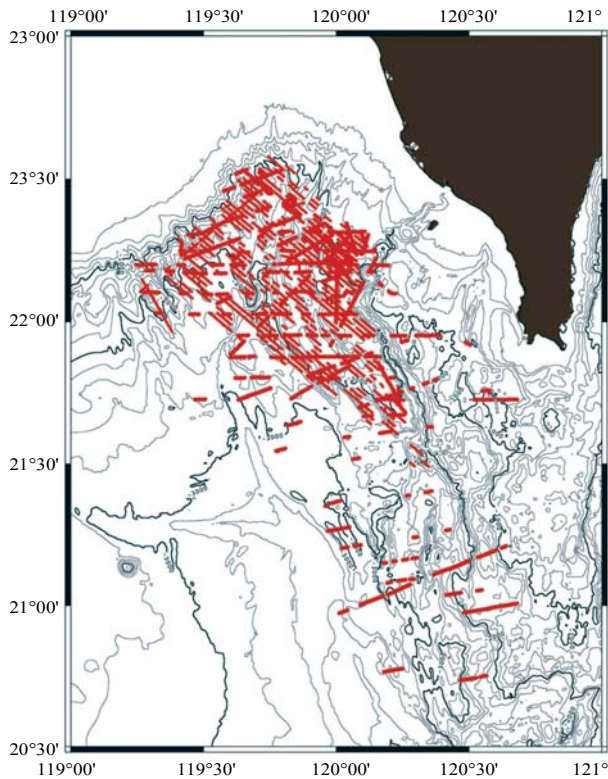
台灣的天然氣水合物

要知道天然氣水合物是否存在於地層當中，最直接有效的方法自然是鑽井採樣。但鑽井的費用非常高昂，在沒有鑽井的地區，我們需要藉由其他的地球物理和地球化學方法，來推估地下是否有天然氣水合物的存在。事實上，要調查一個地區是否有天然氣水合物存在於地層之中，最有效也是最經濟的方法便是採用反射震測的技術。早在1970年代初期，研究人員即已發現在海床之下的地層中若是存在有天然氣水合物，在震測剖面上常會觀察到一個非常特殊（大致平行海底但相位相反）的反射信號，稱為海底仿擬反射。後續的研究顯示海底仿擬反射代表了天然氣水合物在地層中的底部，是由含天然氣水合物的地層與其下含游離氣體的地層之介面所造成（見小常識）。現在，海底仿擬反射已廣泛地被用來顯示海域天然氣水合物分布的範圍了。

1990年代初期，我國學者在台灣西南海域進行海洋研究調查，就從收集來的震測資料剖面中觀察到許多「海底仿擬反射」（圖4），顯示西南海域海床之下蘊藏有天然氣水合物。後續的研究調查顯示在台灣西南海域中，從七、八百公尺到三千多公尺深的海床下均有廣泛分布之天然氣水合物（圖5），因而台灣西南海域也被納入世界



▲圖4 台灣西南海域反射震測剖面上所顯示的海底仿擬反射信號



▲圖五 台灣西南海域海底仿擬反射信號分布圖。細線代表反射震測剖面位置，粗線代表分布位置，陰影區域為主要天然氣水合物分布範圍

上主要的甲烷水合物分布地區之一（見圖 3）。

目前我國學者在中央地質調查所的資助下，正展開一為期四年的研究計畫，利用各種地球物理、地球化學、以及地質學的技術，對台灣西南海域的天然氣水合物可能分布區域進行調查分析。希望能瞭解台灣西南海域天然氣水合物的物

理與化學性質，並對其詳細的分布形態以及儲量做出估算。對於能源短缺，絕大部分化石燃料需要仰賴進口的我國而言，未來如果能成功的開發蘊藏在台灣西南海域海床之下的大量天然氣水合物，將有助於解決我國能源短缺的問題。

參考資料

1. 林朝宗、鐘三雄、羅聖宗、李曉芬、王詠絢、費立沅（2002）天然氣水合物的特性與調查研究規劃策略。二十一世紀海洋新能源—天然氣水合物研討會論文集，1-38 頁。
2. 劉家瑄（2002a）可燃燒的冰塊。科學月刊，第三十三卷，第二期，156-165 頁。
3. 劉家瑄（2002b）研究天然氣水合物國際發展，礦冶，第四十六卷，第四期，13-17 頁。
4. 劉家瑄、徐春田、史菲利、傅式齊、宣大衡（1999）台灣西南海域甲烷水合物潛存之分析。海洋新資源探勘開發專題研討會論文集，93-107 頁。
5. 鐘三雄、張碩芳（2001）甲烷氣水包合物的回顧與展望。地質彙刊，十四號，第 35-82 頁，中央地質調查所。
6. M21 Research Consortium, <http://www.mh21japan.gr.jp/english/mh21-1.html>
7. National Methane Hydrate R&D Program, <http://www.netl.doe.gov/scng/hydrate/>



海底仿擬反射（bottom simulating reflector，簡稱 BSR）

海床之下的地層中如果含有天然氣水合物，其傳遞震波的速度和地層的密度都會比一般的地層要快。而隨著深度增加，地下的溫度也逐漸增加，當地層溫度增加到超過天然氣水合物穩定帶的溫度時，地層中的天然氣水合物即解離為游離氣體和水。含游離氣體的地層其傳遞震波的速度較慢、密度也較低，在物理性質上和其上方富含天然氣水合物的地層有相當大的差異，因此在這兩個地層的介面處會產生很強的震波反射信號，且其震波信號之相位與海床反射信號之相位相反。由於這個反射信號的位置往往出現在海底之下的某一個固定深度（受地溫梯度控制），其起伏隨海床之起伏而變化，故稱為海底仿擬反射。