

新型態潔淨能源天然氣水合物



組成與性質

天然氣水合物（gas hydrate），或簡稱為氣水合物，是指在低溫高壓環境下，氣體分子被籠狀結晶架構的水分子所包含而形成的一種冰晶狀固體籠晶。籠晶主要是指兩種或兩種以上的分子結合而成的晶體，其中主成分分子依緊密或最密堆積方式組成籠狀結晶架構，副成分分子則被包裹在籠狀架構的空隙中。

自然界產出的天然氣水合物，包含的氣體分子可能有甲烷(CH₄)、乙烷(C₂H₆)、丙烷(C₃H₈)、異丁烷(C₄H₁₀)、正丁烷(C₄H₁₀)、氮(N₂)、二氧化碳(CO₂)、硫化氫(H₂S)等。由於自然界產出的天然氣水合物中，90% 以上所包含的氣體分子主要是甲烷，因此也通稱作「甲烷水合物」。

天然氣水合物結晶構造中的每一個籠狀空隙，理論上僅能容納一個氣體分子。但實際上這些籠狀空隙被氣體分子所填滿的程度不一，天然氣水合物所含的氣體分子數不固定，因此沒有固定的計量化學式。通常用 $mM \cdot nH_2O$ 表示，其中 M 是氣體分子，m 是氣體分子數，n 是水分子數。一般而言，水分子數約為氣體分子數的 6 倍。到目前為止，科學家已經發現 3 種不同的天然氣水合物結晶構造。

天然氣水合物外觀通常如純白潔淨、半透明至不透明狀的冰晶，如果有油氣分子混染，則呈現黃褐或紅褐色。在常溫常壓下，天然氣水合物快速分解，通常 1 單位體積的甲烷水合物，可以分解產生 150 ~ 180 單位體積的甲烷和 0.8 單位體積的水。因此，一旦遇到火源，就可以持續燃燒，形成冰火或水冰火共存的特異現象，因而俗稱「可燃冰」或「甲烷冰」。

天然氣水合物的分布

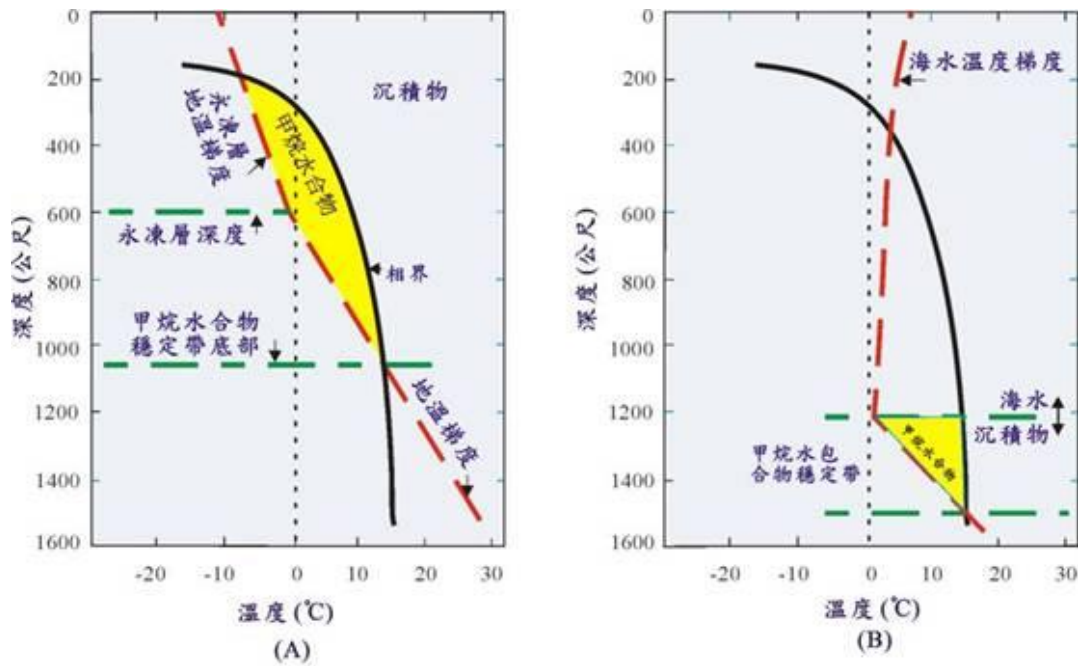
受限於溫度、壓力、水與氣體組成、需要大量甲烷氣供應源等生成控制因素，天然氣水合物存在的地質環境，多局限在極區永凍層、深水區等有大量沉積物堆積、沉積速率快，而且富含有機物的區域。深水區的天然氣水合物大多分布在大陸邊緣，水深 500 至 3,000 公尺海域的大陸斜坡、大陸隆堆等地區。少數如大陸內海、湖泊等深水區，也有天然氣水合物的蘊藏。

科學家常常利用地溫梯度與天然氣水合物的平衡相圖，來推測天然氣水合物穩定帶的理論界限。

當溫度及壓力在穩定帶的上限及下限之外時，不會有天然氣水合物的生成，或者原已生成的天然氣水合物會分解成水及甲烷氣。一般認為永凍層地區的天然氣水合物賦存範圍，大約在地下 150 到 2,000 公尺之間。而深水區天然氣水合物的形成深度，通常需要在水深大於 300 到 500 公尺，賦存範圍約在海床下 1,000 公尺以內。

目前科學家常藉由岩心或氣體樣品、海底仿擬反射、電測、海底氣體噴柱、岩心孔隙水的氯離子濃度異常低等指標，來確認天然氣水合物的賦存與分布。到 2005 年為止，科學期刊上所報導的天然氣水合物分布區，已經多達 93 處，預期未來還會陸續確認更多的賦存區。

除了地球以外，科學家也發現部分行星的外層及其衛星中也含有「甲烷冰」，例如冥王星的表面就含有可觀的「甲烷冰」。據推測，哈雷彗星的頭部也可能含有「甲烷冰」。



圖三、結合永凍層(A)與陸緣海域(B)之地溫梯度與甲烷水合物相圖資料，可顯示不同產狀下的甲烷水合物生成的溫壓範圍。

天然氣水合物賦存指標

目前在海域遠距調查中，常常做為天然氣水合物賦存指標的特徵，包括海底仿擬反射面、地球化學特性的異常、海床地貌與淺部地層特徵等。

海底仿擬反射面：海底下沉積層中如果有天然氣水合物存在，常會在反射震測剖面上呈現一個高阻抗，與海床近乎平行，但相位相反的強反射面，又稱為海底仿擬反射面或似海底反射面。海底仿擬反射面是天然氣水合物存在的重要指標，也可以指示天然氣水合物穩定帶下界深度。

地球化學特性的異常：藉由沉積物組成與地球化學特性的異常，例如海洋底水的甲烷含量高、沉積物孔隙水的氯離子含量低、沉積物間隙的甲烷含量高、硫酸鹽—甲烷界面深度的異常淺、有自生性甲烷源碳酸鹽的出現等現象，也可以知道是否有天然氣水合物賦存的潛能。

海床地貌與淺部地層特徵：利用水下攝影、側掃聲納等探測技術，觀測海床地貌與海底生物群落的特徵，例如麻坑、氣體噴柱、泥火山、隆錐、煙柱、泥隆堆、碳酸鹽類隆堆、天然氣水合物隆堆、以及特殊化學自養性生物群落，例如冰蟲、管狀蠕蟲類、貽貝類、蚌類、菌席等，都可以直接或間接表示有天然氣水合物賦存的可能。此外，天然氣水合物賦存區也常伴隨有泥貫入體或冷泉等現象。

夢幻能源

目前已知的天然氣水合物賦存區，廣泛分布在全球的永凍層、陸緣深水海域、以及少數的深水湖泊或內海等地區。科學家推測全球 27% 的陸域永凍層及 90% 的陸緣海域沉積物中，都可能含有天然氣水合物存在。此外，據估計海域天然氣水合物的儲藏量大約是陸域的 100 倍。全球天然氣水合物的甲烷總量大約有 2 萬兆立方公尺，其中有機碳的含量約有 10 兆公噸，大約是目前已知所有的傳統化石燃料能源中有機碳儲量總和的兩倍。

天然氣水合物是一種非傳統的化石能源，甲烷能源密度——也就是每單位體積的能源礦產所產生的甲烷體積——是傳統化石能源，例如天然氣田的 2~5 倍以上，煤、油田、油頁岩等能源礦產的 10 倍以上。和其他的傳統化石能源比較，甲烷氣是一種比較潔淨的能源，燃燒後不會排放硫氧化合物，而氮氧化合物的排放量也只有燃煤的 20~37% 或燃油的 33~50%，二氧化碳的排放量只有燃煤的 57% 或燃油的 67%。

由於天然氣水合物具有分布廣、儲量大、潔淨等優勢，越來越多的科學家與政府機構把天然氣水合物視為 21 世紀最有潛力的替代能源。

對環境的衝擊

如果不計入地殼中的分散態有機碳總儲存量，全球天然氣水合物的碳儲量約略大於其他的岩石圈、水圈及大氣圈等碳儲量的總和。因此，天然氣水合物是地殼淺部的重要碳儲存庫。

由於天然氣水合物的賦存深度淺，多分布在陸表以下 2,000 公尺或海床下方 1,100 公尺深的範圍以內，一旦發生海水水面下降或海水溫度升高等地質事件時，受到減壓或升溫的效應，會使得天然氣水合物穩定帶的底部位置向上而變淺。同時，位在新的穩定帶底部下方原有的天然氣水合物會發生分解，產生的富含氣水的高壓流體會儲聚在新穩定帶底部下方，而形成地層結構弱帶。一旦受到後期的重力或地震作用，可能引發海床崩陷或滑移，並釋出大量的甲烷氣。

甲烷也是一種強效的溫室氣體，每單位質量的甲烷對全球溫室效應的影響，在 1 百年的期間，大約是同質量二氧化碳的 23 倍。或者以 20 年的期間來估算，大約是同質量二氧化碳的 62 倍。源自於天然氣水合物的甲烷氣，如果進入大氣，會導致大氣中甲烷的組成比率驟增，改變大氣圈原有輻射性質，嚴重影響全球氣候。

如果海床崩陷或滑移的規模夠大，甚至會產生海嘯，危害附近海岸居民的生命與財產。科學家發現，過去曾發生與天然氣水合物分解有關的海底崩移區域，包括西南非陸緣外海的大陸斜坡與隆堆、美國東部大西洋大陸斜坡、挪威陸緣外海、阿拉斯加的陸緣蒲福海域等地區。裏海及巴拿馬北部外海的海底泥火山，也與天然氣水合物分解產生的大量甲烷向上噴出有關。

能源輸儲與二氧化碳減量

目前天然氣都採用管線或容器來運送，或儲存成為氣態或液態天然氣。隨著天然氣水合物合成技術的進展，採用固態天然氣水合物的方式來運送與儲存天然氣，是未來天然氣輸送儲存方法的另一項選擇。

由於天然氣水合物具有自保效應，在常壓下只要保持在攝氏零下左右的低溫，分解速率就十分緩慢，在運輸過程中，也不容易氣化，而且比重在 0.85 ~ 0.95 之間，也比液態天然氣的 0.42 ~ 0.47 來得大，更能節省運輸所需要的體積。另外，液態天然氣的生產和保存，必須維持在攝氏零下 162 度以下的超低溫。綜合考慮生產製程、儲存、運送、氣化等相關成本，以天然氣水合物型態輸儲天然氣的總成本不但比液化天然氣低，安全性也比液化或壓縮天然氣高。

日本三井造船公司正在研發以天然氣水合物型態輸儲天然氣的商業化作業系統，到目前為止，已經研發出天然氣水合物製造器，每天的生產容量可以達到 600 公斤。為了增加運輸效率，採用粒化製程來生產球粒狀的天然氣水合物，以增加穩定度與儲存率，並提高輪船裝載與卸載的效率。

科學家也已發現在極高壓和低溫的環境下（大約 2,230 個大氣壓和攝氏零下 24 度），水和氫也能形成氫水合物。因此，在未來的氫能時代，以氫水合物型態來輸儲氫能源應屬可行。如果能把二氧化碳等溫室氣體，以氣水合物的型態儲置在自然或人為的低溫高壓環境中，對於未來全球大氣中的二氧化碳減量工作將有極大的助益。

目前科學家除在陸域找尋適當的封閉構造或封儲的物質，來儲置或轉換二氧化碳以外，也積極研究以二氧化碳水合物型態把二氧化碳儲存在海底或海床下的地層中，來達到減量的目標。

工業安全與應用

油氣田的探勘與開發作業，從鑽井到生產平臺的輸送管線，多位處高壓低溫的操作環境中。在這種操作條件下，天然氣水合物很容易在井孔、鑽管、高壓油氣輸送管線或相關設施中晶出，而堵塞油氣輸送的通道。嚴重時，甚至可能造成油氣輸送管線或相關設施的毀損，進而危害作業人員的安全。因此，科學家從 1930 年代起，開始注意並研究高壓油氣管道晶出天然氣水合物的機制，進而解決如何避免天然氣水合物晶出所衍生管道堵塞的問題。

據估計，目前為避免天然氣水合物在高壓油氣管道晶出所造成管道阻塞的問題，全球每年加入甲醇等化學抑制劑的費用超過兩億美元以上。另外，其他一般常用的防治措施有：（1）在定壓條件下，利用絕緣法或加熱法，使油氣輸送與生產加工的作業溫度高於天然氣水合物生成溫度。或在定溫條件下，作業環境保持在低於天然氣水合物的生成壓力。（2）利用脫水作用降低流體中的水分，避免形成天然氣水合物。（3）加入甲醇或鹽分等，抑制天然氣水合物的晶出。（4）改變流體的化學組成，例如減少形成天然氣水合物的化學成分，或加入非天然氣水合物的化學成分。（5）加入動力學抑制劑，避免或延遲天然氣水合物的晶出。（6）利用天然氣水合物的生長緩和劑，或管件內部塗上非親水性材質的覆膜，來抑制天然氣水合物的成簇作用。

藉由天然氣水合物生成與分解過程的熱力學、熱動力學、實驗模擬等研究，可以在其他工業上應用的項目包括：（1）把天然氣水合物形成時，水與氣包含而把其他溶質或溶劑排離的原理，應用在中藥濃縮、果汁提純或海水淡化上。（2）天然氣水合物／蓄冰冷凍空調的新技術。（3）熱泵型空調新技術、環保型製冷劑及氟氯碳化合物替代劑技術。（4）新型儲能冰箱的材料。（5）相變儲能的材料。（6）中央空調等大型空調系統的節能工程技術。（7）深層水的處理技術。

未來展望

天然氣水合物不僅是一項新型態的天然氣資源，也是影響全球氣候變遷、碳循環及安全的重要因子。因此，天然氣水合物究竟是沉睡在地殼淺處的能源寶藏，還是人類未來的夢魘，將取決於人們對它了解的程度。目前國際天然氣水合物的相關研究議題，主要包括資源特性的評估、開發技術與生產利用、氣候變遷、海床穩定、工業安全、能源輸儲、工業應用等。

從 1990 年代後期開始，美國、日本、印度等國家，陸續把天然氣水合物的研究列入國家型的中長程研發計畫，全程計畫經費都超過 1 億美元。其他如加拿大、英國、巴西、智利、挪威、俄羅斯、德國、法國、瑞士、韓國、中國大陸、捷克、烏克蘭等國家，也都積極展開天然氣水合物的相關研究。

這些國家積極發展天然氣水合物研究的目標，都預期在 2015 年以後，發展出能與環境調和的探採與開發技術，符合天然氣水合物資源永續利用與經營的目標，來解決傳統化石燃料能源日漸枯竭的危機，以確保能源的供應。

我國經濟部中央地質調查所已經在 2004 年，開始推動「臺灣西南海域天然氣水合物賦存區調查研究」4 年期科技計畫，調查高雄—恆春外海面積約 1 萬平方公里的深水海域。綜合現有地球物理、地球化學、海域地質等資料，顯示臺灣西南海域水深 600 ~ 3,500 公尺的區域，具有各項天然氣水合物賦存的徵兆，而且賦存的潛能相當高，有機會成為世界上天然氣水合物的重點地區之一。然而國內對於天然氣水合物的相關研究，目前仍處在起步的階段。

天然氣水合物的研究，需要整合許多科學與工程學科，方能達到資源永續利用的最終目標。此外，任何新型態的能源，由基礎調查、探勘、開發到生產利用的歷程，常常需要 30 到 50 年的時間。因此，我國應及早籌劃國家型天然氣水合物研究計畫，分工循序地推動臺灣周圍海域天然氣水合物的調查，加速各項關鍵技術的研發，以確實掌握臺灣周邊海域天然氣水合物的賦存潛能，並進行可行性與經濟效益評估，才能及時掌握國內天然氣資源自主的可能契機。