

甲烷水合物研究—探索未來的新能源及其對環境的衝擊

台灣大學海洋研究所 劉家瑄、徐春田

一、前言

甲烷水合物(methane hydrate)是甲烷氣體分子在高壓及低溫的環境下，被呈籠形架構的水分子包含而形成的一種類似冰晶體的化合物[1]。這種不依賴任何化學鍵，單純是一類物質的分子被另一類物質的分子包在其結晶架構中所形成的籠形包合物(clathrate)[2]，自十八世紀在實驗室中被合成以來，一直是科學家們很有興趣的研究目標。1930年代中，甲烷水合物被發現是造成天然氣輸送管阻塞的主要原因，純學術的研究開始有了應用價值。而天然形成的甲烷水合物直到1960年代及1970年代，才分別被發現存在於極區的永凍層及海域的大陸斜坡與大陸隆堆之下。隨著科學家對自然生成的甲烷水合物有更清楚的認識，人們瞭解到它在地球上其實有廣泛的分布。科學家們估計目前已知的全球甲烷水合物之甲烷含量大約有20千兆立方公尺($20 \times 10^{15} \text{m}^3$)，其所能提供的有機碳能源是全球已知所有石油、天然氣等化石燃料能源總量的兩倍[3]。這龐大的潛在經濟價值，促使世界上許多國家積極的投入甲烷水合物的調查及研究工作。

除了潛在的能源價值外，科學家們也注意到甲烷是非常活躍的「溫室氣體」，和同量的二氧化碳氣體相較，其增溫效率要大上20倍。因此，若埋藏在地下的甲烷水合物受到擾動而解離，其釋放出來的甲烷氣如果進入大氣層，會對全球氣候造成相當大的影響。五千四百萬年前所發生的「古新世末極熱現象」(Latest Paleocene Thermal Maximum)，當時深海海水的溫度升高了4到6°C，很可能即是甲烷水合物大量解離所造成的結果[4]。

海床下甲烷水合物的解離也有造成地質變化的危險。當甲烷水合物在海底的沉積物中形成時，它填充了沉積物中的孔隙，卻也防礙了地層在正常沉積狀況下壓密脫水及礦物結晶等

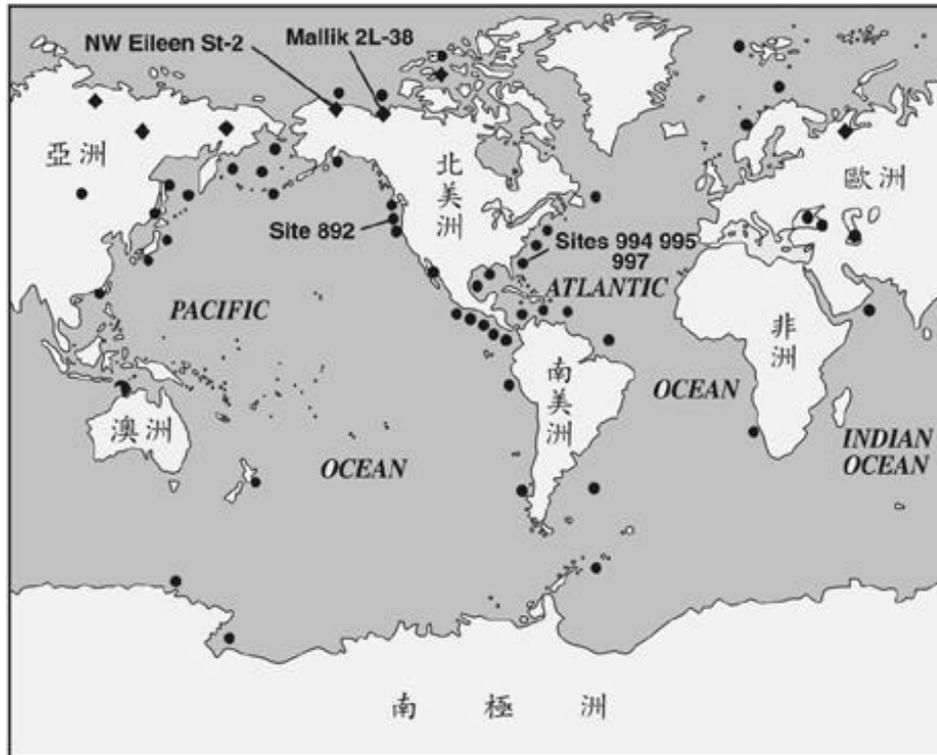
成岩作用的發展。一旦環境溫壓改變，地層中的甲烷水合物解離成甲烷氣和水，反而形成地層中的弱帶，導致其上海底沉積物的崩塌及滑移。這類受甲烷水合物解離而造成的海底崩移在世界各處均有許多觀測報導[5,6]，而其對海域人造設施(如鑽井台、海底電纜等)的毀損，以及造成海嘯的威脅，更是不容忽視。

台灣西南海域已觀測到廣泛分布的甲烷水合物[7,8]。鑑於其在能源價值上的潛力及其對環境與地質災害的潛在威脅，我們需要對甲烷水合物展開有規畫的研究。本文旨在介紹甲烷水合物的研究發展過程與現況，並提出我們對研究台灣海域甲烷水合物的想法。

二、甲烷水合物的研究

大自然中除了極少數的氣體(如氫氣、氮氣)之外，絕大部份的氣體分子均能和水分子在適當的溫壓條件下結合成籠形包合物。這類氣水包合物的英文名稱為「gas hydrate」，嚴謹的名稱應為「天然氣水包合物」[9]。然因自然界中發現的「天然氣水包合物」其氣體成份以甲烷為主，常被稱為甲烷水合物。本文採用較通俗的「甲烷水合物」來代表「天然氣水包合物」。

甲烷水合物的研究雖說是從十八世紀氯氣水合物(chlorine hydrate)首先在實驗室中被合成即已開始，但真正受到重視是1967年俄國人在位於極區的Messoyakah氣田中發現天然生成的甲烷水合物，並認為該氣田至少有30%開採出的天然氣來自解離後的甲烷水合物。1970年代初期，天然的甲烷水合物在黑海的海床下被鑽取到，科學家們推測甲烷水合物應廣泛的分布在全球溫壓條件適合的地層之中。三十年來的研究調查，全球目前已有77個地區發現有天然甲烷水合物的存在(圖一)[10]。這些甲烷水合物的分布均侷限於海域的大陸斜坡與隆堆處、兩極的永凍層地帶、以及少數的內陸海或深水湖泊中。隨著世界各國對甲烷水合物的調



圖一 全球已知甲烷水合物分布地點(修改自[10])。圓圈標示在海域或深水湖底的甲烷水合物，菱形標示在極區永凍層下的甲烷水合物。Mallik 2L-38 為甲烷水合物鑽探研究井的位置，Site 892、994、995、997 為海洋鑽探計畫鑽探海底甲烷水合物的位置。

查研究逐漸重視與展開，更廣泛的甲烷水合物分布是可以預期的。

研究甲烷水合物最大的誘因毫無疑問在於其潛在的能源價值，而科學家們對甲烷水合物解離所可能引發的地球氣候變遷與海床崩塌等地質災害的顧慮，更增加了甲烷水合物研究的重要性[5]。為了探究甲烷水合物在天然氣開發上的潛力，以及在全球氣候變遷與地質災變上所扮演的角色，過去三十年來科學家們積極的進行下列各相關研究：

(一) 甲烷水合物之來源與生成條件

甲烷水合物的生成主要取決於環境的溫度、壓力以及甲烷氣體存在的濃度三項要素。沉積物中甲烷氣體的來源主要有二：一是藉由有機作用(biogenic process)，也就是由微生物把沉積物中的有機質分解並轉化為甲烷氣；另一則為無機之熱分解作用(thermalgenic process)所產生的甲烷，即是沉積物中之有機質被深埋後，經由高溫的分解作用而產生甲烷。至於大

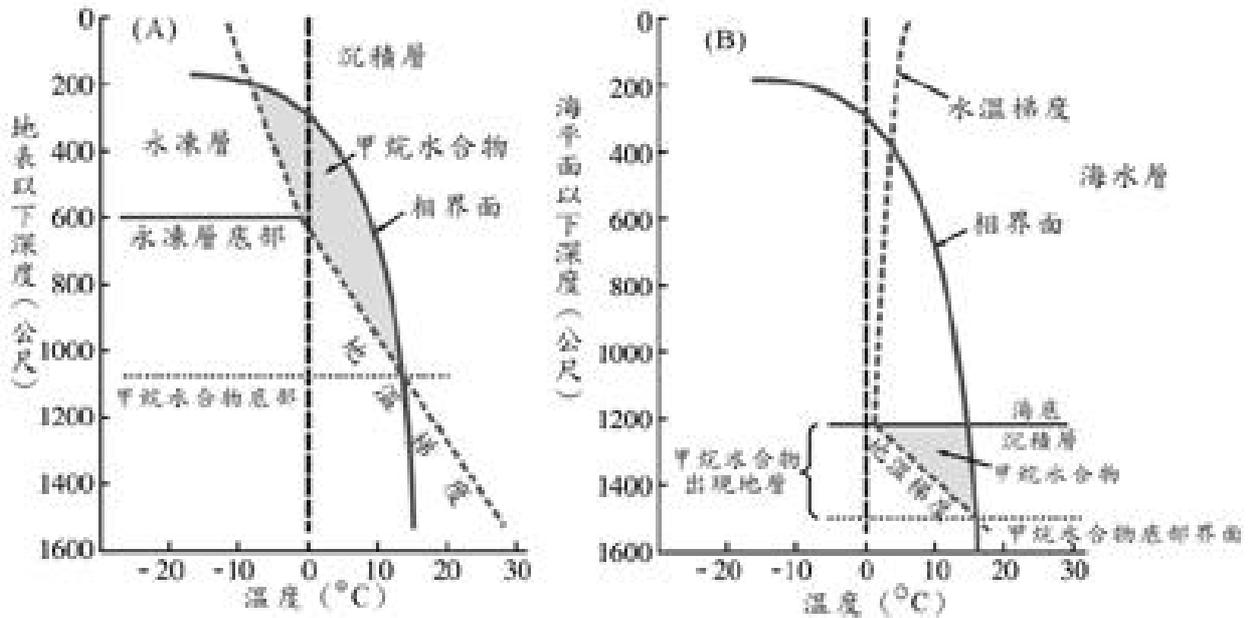
自然中適合甲烷水合物生成的溫、壓條件則存在於高緯度的永凍層之下(圖二 A)，以及三百公尺到數千公尺深的海床之下(圖二 B)。

(二) 甲烷水合物之偵測

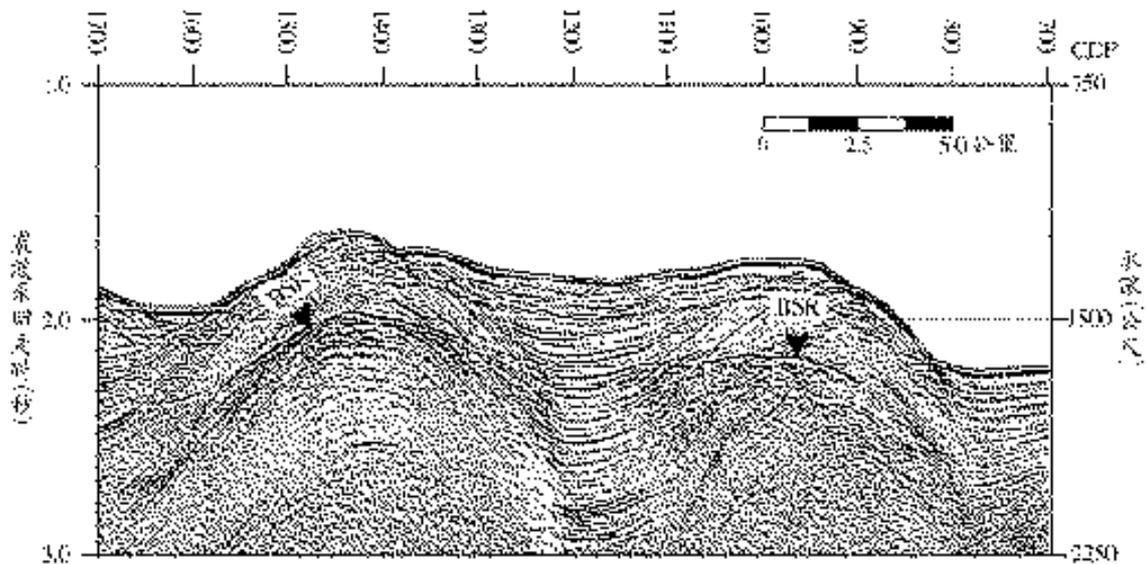
甲烷水合物之偵測到現在為止，對科學家而言仍是一個挑戰。最直接的偵測方法是鑽井在岩心標本中見到甲烷水合物。但鑽井價格昂貴，鑽探地點有限，因此間接的地球物理或地球化學方法就成為重要的偵測工具。

1. 震測法

目前要偵測甲烷水合物是否存在於地下地層中，最快速有效的方法就是檢視反射震測剖面中是否觀測得到海底仿擬反射(bottom simulating reflector, 簡稱 BSR)。海底仿擬反射(圖三)是從甲烷水合物的底部(即甲烷水合物穩定帶的下界面)所反射回來的震波信號。其形成的原因在於地層中有甲烷水合物存在時，其密度與傳遞震波的速度要比周圍含水及氣的沉積層來得大。甲烷水合物底部以下的地層中由於



圖二 甲烷水合物在(a)極區永凍層與(b)海域其相界面和環境溫、壓關係圖(修改自[3])。



圖三 台灣西南海域海域反射震測剖面上所顯示的海底仿擬反射 (BSR)。海底仿擬反射代表地層中甲烷水合物的底部。由於它的位置通常出現在海底之下的一個固定深度，其起伏和海底起伏相仿，故稱為海底仿擬反射。

地溫高過甲烷水合物穩定帶的溫度，甲烷以氣態存在於地層中，使得甲烷水合物的底部成為一個其上、下地層物理性質差異很大的界面，在震測剖面上表現出一個強反射界面。也因為在海床之下甲烷水合物底部的深度主要受地熱梯度控制，而使得該強反射界面大致平行於海

底，因此被稱為「海底仿擬反射」。通常海底仿擬反射信號強的地方，代表甲烷水合物地層下方存在著氣態甲烷。但有的地方地層中雖有甲烷水合物，震測剖面上卻不見明顯的 BSR，這通常是因為甲烷水合物層較薄或其下氣體脫逸，因此 BSR 並不是甲烷水合物存在的唯一指

標。

2. 地球化學分析

要有足夠濃度的甲烷氣體存在是甲烷水合物生成的必要條件之一，因此量測海底或地層中孔隙水的甲烷濃度常被用來推斷地層下方是否存在甲烷水合物。然在沉積物孔隙水或海水中影響甲烷含量的因素相當多，僅依靠甲烷在底層海水或海床沉積物孔隙水中的含量變化要推估其下方是否存在甲烷水合物並不可靠。Borowski et al. [11] 提出利用海床活塞岩心標本中孔隙水的硫酸鹽還原濃度曲線來推估地層中甲烷流量的方法。硫酸鹽濃度值在海床以下變小的速率越快，則其地層下方甲烷流量越高，甲烷水合物存在的機率也越大。另外，經由海洋鑽探計畫所鑽取的甲烷水合物地層岩心標本分析結果顯示，含甲烷水合物的地層其孔隙水中的氯離子濃度會降低，而 O^{18} 同位素組成則增高[12, 13]。

(三) 甲烷水合物的分布與儲量

要評估甲烷水合物的經濟價值，其在地層中的分布形態與儲量是非常重要的資訊。震測剖面中 BSR 雖然指出甲烷水合物底部的位址，但對其上界面卻無法有效辨識。地熱的量測與模擬可以提供調查地區甲烷水合物穩定帶的深度分布，但也只是顯示甲烷水合物可以生成的範圍，並無法推估實際的存在量。要知道地層中甲烷水合物分布的形態與儲量，最好的掌握自然是來自鑽井採樣的結果。即始採上來的岩心標本中之甲烷水合物已因溫、壓條件的改變而解離，地球化學分析技術仍可以相當準確的指出岩心標本中甲烷水合物層分布的厚度。鑽井時的井測資料則是另一組獨立的重要資訊 [14]。在沒有鑽井的地區要推估甲烷水合物的分布，目前主要仰賴一些地球物理分析方法，如震波速度構造之建立(含甲烷水合物的地層一般均為高速層)、震波信號中振幅與支距的變化關係模擬、震波屬性分析等等[15]。如何能更有效的應用這些方法或發展出新的分析技術以更正確的推估甲烷水合物之分布與貯量，則是研究甲烷水合物的地球物理學家們目前努力的方向。

(四) 甲烷水合物與沉積物物理性質

甲烷水合物在未固結的沉積物中形成或解離，對於沉積物表現出的物理性質會有很大的改變，甲烷水合物解離後形成的剪力弱帶更是造成沉積物崩移的主要原因之一，因此含甲烷水合物的沉積層其物理性質的研究一直是一個重要課題。更特別的是，地層中甲烷水合物穩定帶的分布是一個動態系統，會隨著環境的改變而改變。如何掌握地層中之甲烷以水合物態或以氣態存在時沉積物之物理性質，是能正確使用震測資料來模擬分析甲烷水合物分布的重要因素。

科學家們利用在實驗室中合成之甲烷水合物，模擬其在沉積物中的不同狀態，量測其物理性質的變化，提供了一些含甲烷水合物之沉積層其物理性質的基本資料，而實地(in situ)量測含甲烷水合物地層的物理性質則能提供更真實的數據。海洋鑽探計畫(Ocean Drilling Program, 簡稱 ODP)一些鑽探航次，以及日本、美國與加拿大合作在加拿大北部麥坎錫三角洲(McKenzie Delta)所進行的 Mallik 2L-38 鑽探研究井(位置見圖一)，在這一方面提供了許多珍貴的資料[14]。但要確實了解甲烷水合物地層的物理特性，更多的實地觀測資料是必需的。

(五) 對甲烷水合物系統的探討

由於地層中的甲烷水合物是一個動態系統，我們必需瞭解其動力機制，然而這也是目前最欠缺的知識。到現在甲烷在地層中是如何形成的？如何移棲？如何聚集並形成甲烷水合物？如何解離而讓甲烷氣脫逸出該系統？這些關鍵性的問題仍沒有清楚的解答。甲烷氣進出水合物系統的流量對環境改變的反應與變化也是評估甲烷水合物能源開發及甲烷水合物解離對環境的衝擊所必需掌握的。科學家們正發展利用井下實地監測設備(如 CORK 系統)、三維或甚至四維的震測、以及複雜的電腦數值模擬程式等技術，來探索甲烷水合物動力系統的問題。

三、未來研究發展與我們應有的作為

世界上有越來越多的國家相繼投入甲烷水合物的調查與研究工作，日本和美國是其中最積極的國家。美國很早就開始其對甲烷水合物

的研究工作，而 1997 年更正式由能源部主導展開「國家甲烷水合物多年期研究計畫」，結合學術界、產業界與政府研發機構，積極推動甲烷水合物的相關研究，並訂下於 2015 年達到甲烷水合物的商業開發目標。日本本身缺乏自主能源，對甲烷水合物的能源開發更是不遺餘力，自 1995 年開始展開一系列的五年研究計畫(目前執行第二期五年計畫)，也預定於 2015 年開始商業生產。而日本除了與美國和加拿大合作在永凍層進行甲烷水合物鑽探研究(Mallik 2L-38 號井)，也獨自在南開海槽(Nankai Trough)進行海域甲烷水合物鑽探研究。此外，現(2002 年)正與美國、加拿大、德國、印度等國家合作，在 Mallik 2L-38 號井附近鑽探「開發研究井」(Mallik Production Research Well)，以研發甲烷水合物的開採技術。

除了美國、日本、加拿大之外，印度、英國、韓國、中國大陸等國也相繼展開甲烷水合物研究的國家計畫，而國際上兩個主要的科學鑽井計畫，ODP/IODP 與 ICDP (International Continental Drilling Program)，均把甲烷水合物的鑽探研究列為主要的研究目標之一。

台灣西南海域有廣泛的 BSR 分布，但到目前為止，除了個別的震測與地熱之學術研究外，尚未見有計畫的進行測勘與調查工作，地質與地球化學分面的相關研究也還未展開。而我國擁有的天然能源資源相當匱乏，絕大部份仰賴進口，更應該積極對台灣西南海域甲烷水合物的能源潛能進行評估作業。在作法上，可結合國內相關學、研與產業界，推動兩個五年期的調查研究計畫。第一個五年期中將利用地球物理、地球化學與地質等探勘技術，對台灣西南海域甲烷水合物的分布形態、生成機制、蘊藏架構、物理化學性質等基本資料進行收集、整理與分析，以擇定最有開發潛力的地點。而第二個五年期則進行開發評估研究，鑽探甲烷水合物研究井，採集實地資料，估算甲烷水合物之儲量，掌握甲烷水合物與甲烷氣儲集層的物理與化學特性，再進行電腦模擬，評估甲烷水合物的能源開發價值。若有能源開發價值，產業界即可順利接手，進行開發工作。即使不認為有能源開發價值，此項研究工作對於台灣西南海域甲烷水合物的瞭解以及海域地質

災害的調查與防範，亦會有重要的貢獻。我國在甲烷水合物的調查研究工作上落後國外至少十年，因此如何積極展開相關研究，增進我們對台灣西南甲烷水合物的瞭解，實是刻不容緩的。

參考文獻

- [1] E.D. Sloan, Jr., *Clathrate Hydrate of Natural Gases*, 2nd. ed., Marcel Dekker, New York, 730 pp. (1998).
- [2] H.J.M. Powell, *J. Chem. Soc. London*, **61**, (1948).
- [3] K.A. Kvenvolden, *Chem. Geol.*, **72**, 41 (1988).
- [4] G.R. Dickens, *Geophys. Monograph*, **124**, 18, Am. Geophys. Union (2001).
- [5] K.A. Kvenvolden, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **96**, 3420 (1999).
- [6] W.P. Willon, J.W. Nealon, M.H. Taylor, M.W. Lee, R.M. Drury and C.H. Anton, *Geophys. Monograph*, **124**, 211, Am. Geophys. Union (2001).
- [7] W.C. Chi, D.L. Reed, C.S. Liu and N. Lundberg, *Terre. Atmo. Ocean. Sci.*, **9**, 779 (1998).
- [8] 劉家瑄、徐春田、史菲利、傅式齊、宣大衡，*海域新資源探勘發專題研討會論文集*，93 (1999).
- [9] 鐘三雄、張碩芳，*地質彙刊*，**14**，325，中央地質調查所 (2001).
- [10] K.A. Kvenvolden, *Geophys. Monograph* 124, 211, Am. Geophys. Union (2001).
- [12] G.R. Dickens, C.K. Paull, P.J. Wallace and the ODP Leg 164 Scientific Party, *Nature*, **385**, 426 (1997).
- [13] R. Matsumoto and W.S. Borowski, *Proc. Ocean Drilling Program, Sci. Results*, **164**, 59 (2000).
- [14] T.S. Collett, *Geophys. Monograph*, **124**, 189, Am. Geophys. Union (2001).
- [15] R.D. Hyndman, G.D. Spence, R. Chapman, M. Riedel and R.N. Edwards, *Geophys. Monograph*, **124**, 273, Am. Geophys. Union (2001).