

天然氣水合物的發展趨勢

台綜院研一所 劉致峻、梁弘

【摘要】

天然氣水合物是一種在低溫高壓的自然環境下所形成的固態結晶物，被歸屬於非傳統油氣資源。因具有分佈廣泛、資源豐富、相對潔淨等優點，雖距離商業化開發仍有一段距離且尚未免除其開發對環境造成衝擊的疑慮，天然氣水合物仍然被主要國家列為未來重要能源選項之一，持續投入相關之技術研究、環境監測與探採工程。而考量與臺灣位置相近的南海海域擁有良好的天然氣水合物生成環境，在我國亟需拓展能源自主地當下，應加速跨入天然氣水合物開發領域。而本文蒐整天然氣水合物近年文獻資料，敘明其發展概況，以供閱者初窺其堂奧。

關鍵字：非傳統天然氣（Unconventional Natural Gas）、天然氣水合物（Natural Gas Hydrates）。

壹、前言

非傳統（Unconventional）油氣資源相對於傳統（Conventional）油氣資源，係儲藏在頁岩、煤層或緻密砂岩層裡，因為地層孔隙緻密、滲透率低、黏滯度高，甚或以固態，需要採用先進的技術進行開採，以致難以降低生產成本。根據國際能源總署（IEA）的分類，此類非傳統油氣資源包括油砂（Oil Sand）頁岩油（Oil Shale, also known as Kerogen Shale）、緻密油（Light Tight Oil）、緻密氣（Tight Gas）、煤層甲烷氣（Coal-bed Methane）、頁岩氣（Shale Gas）與天然氣水合物（Natural Gas Hydrates）等。其中，天然氣水合物是一種在低溫高壓的自然環境下所形成的固態冰狀結晶物，又因天然氣水合物所含的氣體組成多以甲烷（Methane）為主，故常泛稱為甲烷水合物（Methane Hydrate）。

雖然目前天然氣水合物的開採技術仍有待突破，商業運轉是否對環境造成衝擊仍有疑慮，但是因其地理分佈廣泛、資源存量豐富並且具備潔淨能源特性，故仍被各個主要國家列為下一代重點能源選項。爰此，本文將針對天然氣水合物之相關文獻資料進行蒐整，並敘明其發展概況供參。

貳、天然氣水合物的特性

（一）高潔淨

天然氣水合物是一種在「低溫高壓」的環境下，以固體型態存在的天然氣，其組成之氣體分子有甲烷、乙烷、丙烷、異丁烷、正丁烷、氮、二氧化碳或硫化氫等，而在自然環境下所生成的天然氣水合物通

常以甲烷為主要成份。天然氣水合物之外觀呈現冰狀，在常溫常壓下可以火點燃，故又稱為「可燃冰」（翁子偉等人，2013）。

天然氣水合物分解釋放的天然氣主要是甲烷，標準狀態下，水合物分解後氣體體積與水體積之比為 164:1，即一個單位體積的水合物分解可釋放 164 個單位體積的甲烷氣體，故天然氣水合物的能量密度極高，約為一般傳統天然氣的 2 至 5 倍，煤的 10 倍。

此外，天然氣水合物是一種十分潔淨的能源，因為甲烷燃燒後幾乎不產生環境污染物質，其硫氧化物（SO_x）排放量為零；氮氧化物（NO_x）的排放量亦只有燃煤的 20-37 %、燃油的 33-50 %；二氧化碳（CO₂）的排放量只有燃煤的 57 %、燃油的 67%（陳崇憲，2008）。但是值得注意的是，甲烷本身亦為溫室氣體，且其造成溫室效應的能力甚高（<http://0rz.tw/Lrgsg>），故其開採仍有環境隱憂。

（二）分佈廣

天然氣水合物的在自然環境下生成的溫壓條件為溫度攝氏 7℃ 與 50 標準大氣壓，故推算全球海洋總面積 90% 的海域具有天然氣水合物形成的溫壓條件。故天然氣水合物的分佈極廣（可參見圖 1 與圖 2），目前在水深大於 300~500 公尺的大陸棚、深水海台、海底盆地的淺部地層¹以及極地凍土帶中已直接或間接地發現天然氣水合物的存在。（<http://0rz.tw/N0Tui>）。

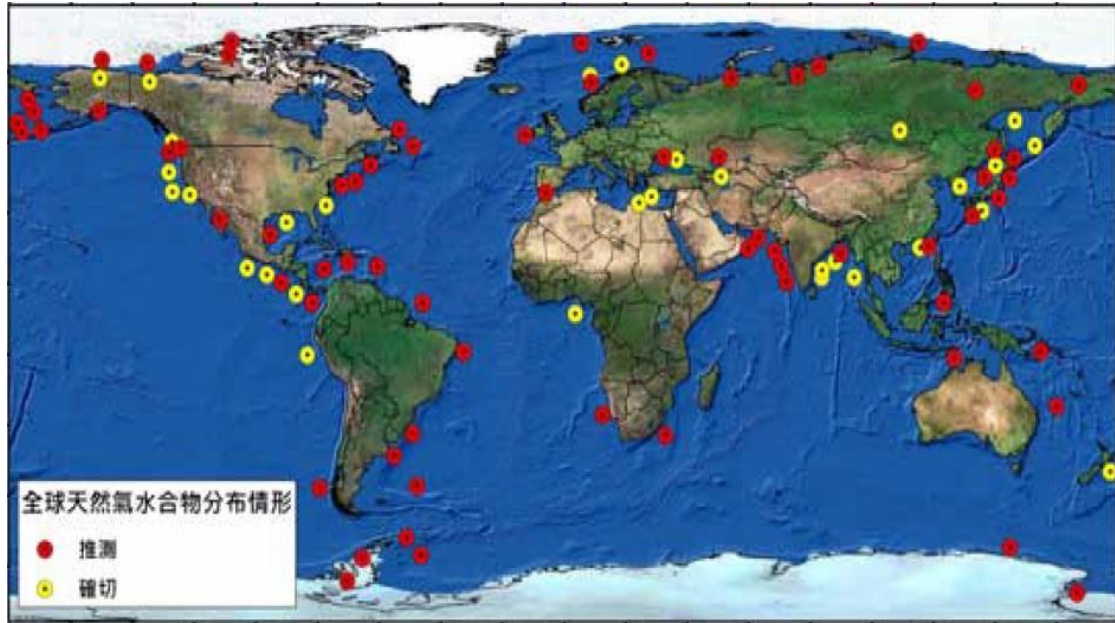
¹ 天然氣水合物於海洋的主要分佈區包括大西洋海域的墨西哥灣、加勒比海、南美東部陸緣、非洲西部陸緣和美國東海岸外的布萊克海台等，西太平洋海域的白令海、鄂霍茨克海、千島海溝、沖繩海槽、日本海、四國海槽、日本南海海槽、蘇拉威西海和紐西蘭北部海域等，東太平洋海域的中美洲海槽、加州海濱和秘魯海槽等，印度洋的阿曼海灣，南極的羅斯海和威德爾海，北極的巴倫支海和波弗特海，以及大陸內的黑海與里海等（<http://0rz.tw/OrhXy>）。

(三)儲量豐

因探採天然氣水合物岩心的所費不貲，故目前多數估算天然氣水合物資源量的方法係根據淺部沉積物採樣分析與間接的地球物理資料來推測天然氣水合物甲烷量的參數²，並在天然氣水合物在一定範圍內於橫向與縱向上分佈是連續的假設下，以體積法公式進行估算（翁子偉等人，2013）。但因各海域沉積物之參數與來源亦不一與估算方式的些微差異，因此資源量的估算有所不同。

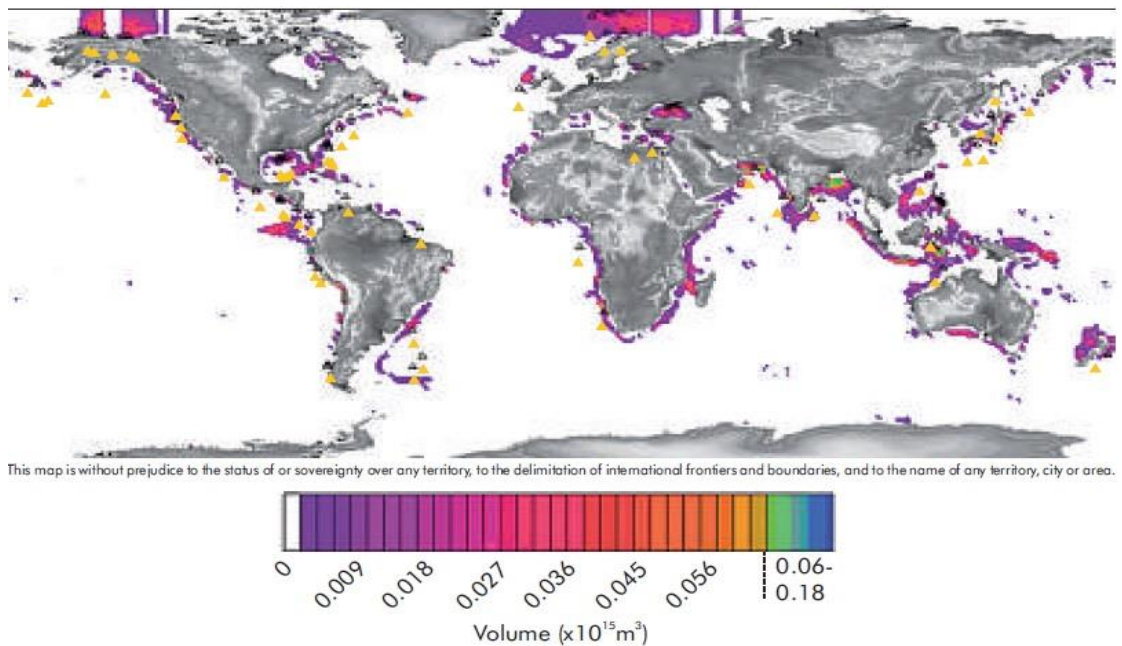
但即使不同研究之估算結果不同，但仍顯現天然氣水合物之資源量極大。例如根據陳崇憲等人（2008）所引用之Kvenvolden（1998）的估算，全球天然氣水合物的甲烷總資源量約有 21×10^{15} 立方公尺，其有機碳含量約有10兆公噸，約為目前已知所有傳統化石燃料能源，所含有機碳總儲量的2倍。又如國際能源總署（IEA）出版的世界能源展望（WEO, 2009）指出，雖然30年來對天然氣水合物資源量的估計隨著對此資源的探勘瞭解增加而下降，但天然氣水合物的資源量估計值仍然為目前傳統天然氣蘊藏量的好幾倍。本文蒐羅天然氣水合物資源量估算之相關文獻，包括EIA（1998）、Kvenvolden（1999）、IEA（2009）、IIASA（2012）再重新整理如表1所示。

² 參數包括：水合物的分布區和水合物厚度、含量及天然氣飽和度等。



註：「推測」代表依據地球物理或地球化學資料進行推論、「確切」代表取得天然氣水合物岩心。
資料來源：翁子偉等人（2013），引自 Kvenvolden & Lorenson（2001）、Kvenvolden & Rogers（2005）

圖 1、全球天然氣水合物分佈情形（1）



註：三角形為天然氣水合物於深度不足海平面 3000 公尺的海床蘊藏點。
資料來源：IEA（2013b），“Resources to Reserves 2013”，p.188，轉引自 Klauda and Sandler（2005）

圖 2、全球天然氣水合物分佈情形（2）

表 1、世界天然氣水合物的甲烷資源量估計列表

單位：1*10¹⁵（千兆）平方公尺

年份	參考資料	海域資源量	陸地資源量	全部資源量
		高低範圍 (最佳估計)	高低範圍 (最佳估計)	高低範圍 (最佳估計)
1977	Trofimuk <i>et al.</i>	5–25	(0.057)	—
1981	McIver	(3.1)	(0.0031)	—
1981	Dobrynin <i>et al.</i>	(7,600)	—	—
1988	Kvenvolden and Claypool	(40)	—	—
1988	Kvenvolden	(21)	—	—
1990	MacDonald	(21)	—	—
1994	Gornitz & Fung	26–140 (26)	—	—
1995	Harvey & Huang	23–91 (46)	—	—
1995	Ginsburg & Soloviev	(1)	—	—
1996	Holbrook <i>et al.</i>	(7)	—	—
1997	Makogon	(15)	—	—
1997	Dickens <i>et al.</i>	2-20	—	—
1998	Kvenvolden, K.A.	—	—	0.99-46 (21)
2004	Milkov	1-5	—	
2007	Ananenko	—	—	2.5-21

註：以上數據為四捨五入至兩位有效數字（significant figures）。

資料來源：

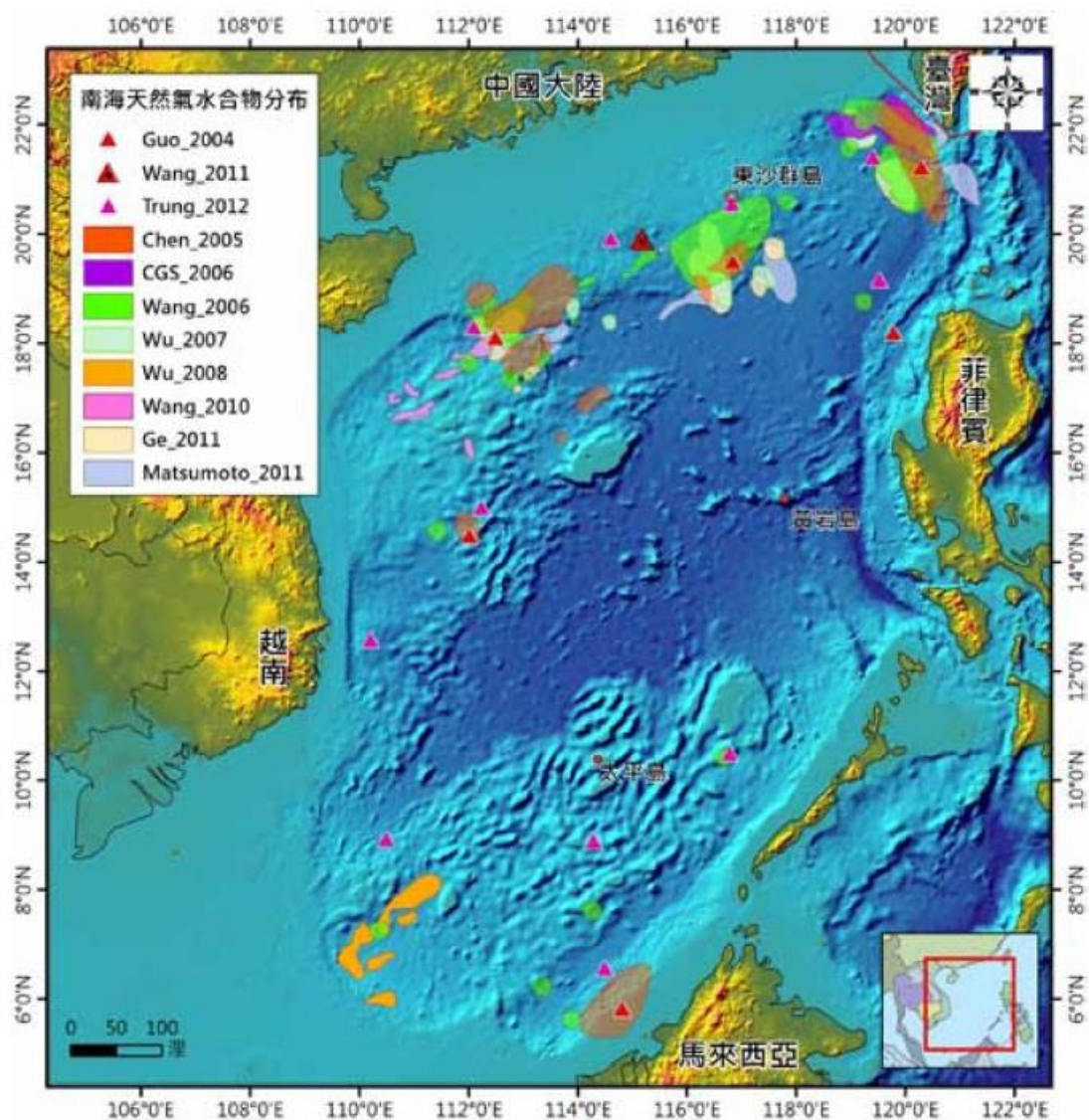
1. A.A. Trofimuk, N.V. Cherskii, and V.P. Tsaryov, “The Role of Continental Glaciation and Hydrate Formation on Petroleum Occurrence,” R.F. Meyer, ed., *The Future Supply of Nature-Made Petroleum and Gas* (New York, 1977) , pp. 919-926.
2. R.D. McIver, “Gas Hydrates,” *Long-term Energy Resources* (1981) , pp. 713-726.
3. Dobrynin, V. M., Korotajev, Yu. P. & Plyushev, D. V. (1981) in *Long-Term Energy Resources*, eds. Meyer, R. F. & Olson, J. C. (Pitman, Boston) , pp. 727–729.
4. K.A. Kvenvolden, “Methane Hydrate—A Major Reservoir of Carbon in the Shallow Geosphere?” *Chemical Geology*, Vol. 71 (1988) , pp. 41-51.
5. Kvenvolden, K. A. & Claypool, G. E. (1988) *Open-File Rep.—U. S. Geol. Surv. Rep.* 88-216.
6. MacDonald, G. T. (1990) *Clim. Change* 16, 247–281. Harvey, L. D. D. & Huang, Z. (1995) *J. Geophys. Res.* 100, 2905–2926.
7. V. Gornitz and I. Fung, *Potential Distribution of Methane Hydrates in the World's Oceans: Global Biogeochemical Cycles*, Vol. 8, No. 3 (1994) , pp. 335-347.
8. Harvey, L. D. D. & Huang, Z. (1995) *J. Geophys. Res.* 100, 2905–2926.
9. Ginsburg, G. D. & Soloviev, V. A. (1995) 27th Annual Offshore Technology Conference, (Offshore Technology Conference, Richardson, TX) , OTC 7693, Vol. 1, pp. 513–518.
10. Holbrook, W. S., Hoskins, H., Wood, W. T., Stephen, R. A., Lizarralde, D. & Leg 164 Science Party (1996) *Science* 273, 1840–1843.
11. Makogon, Yu. F. (1997) *Hydrates of Hydrocarbons* (PennWell, Tulsa, OK) .
12. Dickens, G. R., Paull, C. K., Wallace, P. & the ODP Leg 164 Scientific Party (1997) *Nature* (London) 385, 426–428.

13. K.A. Kvenvolden, "Estimates of the Methane Content of Worldwide Gas-Hydrate Deposits," Methane Hydrates: Resources in the Near Future?, JNOC-TRC (Japan, October 20-22, 1988) .
14. Milkov, A.V. (2004), "Global Estimates of Hydrate-bound Gas in Marine Sediments: How Much is Really Out There", Earth-Science Reviews, Vol. 66, pp. 183-197.
15. Ananenkov, D. G. (2007) : Role of Gas in Development of Global and Russian Fuel and Energy Industry in XXI Century, Paper P-1. In Proceedings of the International Conference on World Gas Resources and Reserves and Advanced Development Technologies , VNIIGAZ , Moscow

再把目光專注到亞洲，2000年日本通產省宣佈在日本靜岡縣御前崎近海發現了天然氣水合物含量高達20%的砂岩層，並估算該海域水合物中蘊藏的天然氣儲量達7.4兆立方公尺；另外估計鄂霍次克海、日本海東北邊緣等海域之天然氣水合物蘊藏量約6兆立方公尺（陳崇憲，2008，pp.61-62）。

另外，根據翁子偉（2013），因為南海北部海域具備水合物形成及穩定存在所需要的成礦地質條件，包括沉積構造環境、合適的溫壓條件、充足的氣源、有效的運移通道、有效的儲集層和保存條件等。因此南海天然氣水合物蘊藏相當豐富，主要集中在臺灣西南陸坡、臺南盆地、東沙群島南坡、珠江口盆地西南、西沙海槽、南薇西盆地以及南沙海槽（汶萊-沙巴盆地）（圖3）。大致來說都是分佈在南海周緣的大陸斜坡附近，尤其是南海北部陸坡的臺灣西南海域、東沙群島南部海域與珠江口盆地西南緣分佈最廣，亦為最富集。

而翁子偉（2013）整理相關南海海域天然氣水合物之數據，估算全部南海天然氣水合物資源量概略有3.2~170兆立方公尺，其中臺灣西南海域天然氣水合物資源量則約有0.5~2.7兆立方公尺，另外位於南海北面、靠近珠江口的神狐海域之天然氣水合物資源量則約有14.7~194億立方公尺。



資料來源：翁子偉（2013），p.67。

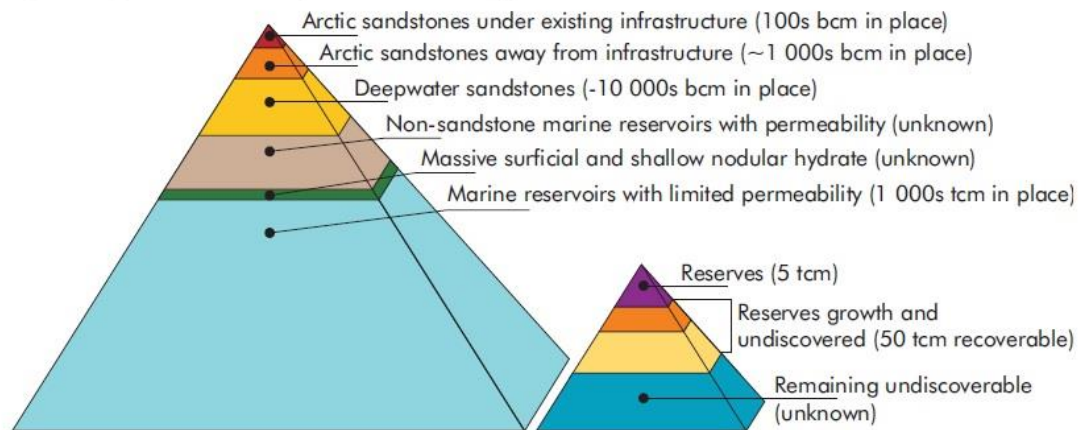
圖 3、南海天然氣水合物分佈

參、技術發展與趨勢

根據IEA（2013）引用自Boswell and Collett（2006）的資料顯示，目前位於北極圈的現存基礎設施可接觸的天然氣水合物資源量（resources）約為100十億立方公尺（bcm），而現存設施無法接觸的北極圈天然氣水合物資源量約為1,000 bcm，加上約為10,000 bcm的深海天然氣水合物資源量，為目前已知的天然氣水合物資源量（詳見圖

4)。而傳統天然氣的蘊藏量（reserves）則約為5,000 bcm。

非傳統天然氣資源的資源量由小到大依序為緻密氣、頁岩氣、煤層甲烷氣、天然氣水合物，然而非傳統天然氣資源其開採困難度從容易到困難的亦是這個順序，詳見圖5（林再興，2013）。



資料來源：IEA（2013），“Resources to Reserves 2013”，p.189，轉引自 Boswell and Collett（2006）。

圖 4、天然氣水合物資源量金字塔



資料來源：林再興，2013。

圖 5、油氣資源量與生產成本金字塔

目前大多數天然氣水合物的實際資源量規模仍屬未知，而且資源

量並非一定可以開採出來，仍待具體評估與實地探勘（如US Minerals Management Service目前正進行中的相關探勘活動）。即便開採出來，仍不一定具有經濟價值。此係因除了位於墨西哥灣現存的油氣探勘設施附近的天然氣水合物蘊藏地外，目前進行深海探勘天然氣水合物的成本非常的高（IEA，2013b）。而且，天然氣水合物的探勘過程中，尚可使用傳統的油氣探勘設備，但是若要進一步予以開採，則是另外一回事。

天然氣水合物的生成條件為溫度攝氏7°C與50標準大氣壓，故開採的技術可應用熱力法（Thermal Stimulation）或減壓法（Pressure Reduction），分解天然氣水合物，使之釋放出天然氣，然後進行回收。熱力法有蒸氣注入法、熱水注入法、熱鹽水注入法和電磁加熱法等；減壓法則通過鑽井減壓。

然而，根據IEA（2013b, p.195），在開採的過程中，一旦失去高壓和低溫的環境，甲烷就會迅速地從水合物結構中脫離出來，釋放到大氣中。迄今為止，還沒有一項技術能使安全地將天然氣水合物大規模的從海底轉移到陸地上予以保存。而目前則將研究目標轉移到如何透過化學合成的方法，例如仿照注入二氧化碳以釋放煤層氣的方式，將二氧化碳注入水合物內與甲烷進行分子結構的合成，使得水合物在釋放甲烷的同時，水合物本體仍可維持完整。

綜上所述，天然氣水合物的開採成本取決於多種因素，從地質條件（如透氣性沉積物，地層壓力，位置和水合物沉積大小）到探勘、開採、保存、運送等。要滿足上述的條件將所費不貲，根據國際應用系統研究所（International Institute for Applied System Analysis, IIASA）所做的2012年全球能源評估報告（Global Energy Assessment, 2012, GEA）來看，天然氣水合物的開採成本估計值高達13美元/GJ，是頁

岩氣的2美元/GJ的六倍以上，為造成目前天然氣水合物迄今無任何商業化生產的例子之主要原因。換言之，在考量目前的技術水準與能源價格之下，天然氣水合物的蘊藏量其實相當微小（林再興，2013）。

例如：根據IIASA（2012）的評估，由於目前天然氣水合物的蘊藏位置多半處於海底盆地的厚深、不連續的地層內，加上以現行技術下消耗的能源不敷成本（非傳統天然氣資源的開採會比傳統天然氣的開採更耗能源。就天然氣水合物而言，若扣除開採所耗的能源，其淨能源所得大約會因而降低20%以上），以及目前仍依賴傳統能源設施的能源市場現況下，全球具有經濟效益的天然氣水合物的蘊藏量估計值約為0-12,638 EJ，其平均值約為6,319 EJ，僅為技術上可開採的天然氣水合物的平均蘊藏量估計值118,596 EJ的5.33%，更不達所有天然氣水合物的平均資源量估計值（1,355,197 EJ）的0.46%，詳見表2。

不過目前仍有幾個小型的實驗性生產成功案例，根據IEA的國際能源展望（World Energy Outlook 2013, p.119），例如：2002年的加拿大Malik的天然氣水合物實驗開採計畫及2013年3月的日本沖繩海槽（Naikai Trough）的天然氣水合物實驗開採計畫。其中，後者是全球首次近海（沖繩海槽東側，本州渥美半島南方約70公里處，水深約1,000公尺）天然氣水合物產出試驗，成功藉由解壓法（Depressurization Method）於深海底解離固態天然氣水合物，連續產氣量達1,248立方公尺（平均每日產量為208立方公尺）。雖然最後因為出砂量增加的緣故暫停試驗，大體上仍算成功（NETL, 2013, pp.1-2）。

表 2、天然氣水合物之資源量、可採量與符合經濟效益的蘊藏量

Table 7.13 Recoverable gas hydrate resource potentials.			
Region	Theoretical potential	Technical potential	Economic potential
	[EJ]	[EJ]	[EJ]
USA	782–122,128	395–12,213	0–1229
CAN	298–71,049	142–71,049	0–712
WEU	37–490,153	11–11,758	0–1177
EEU	0–820	0–83	0
FSU	820–80,997	402–8100	0–808
NAF	0–30,439	0–1449	0–71
EAF	0–155,883	4–15,588	0–779
WCA	37–211,061	22–21,106	0–1054
SAF	75–208,676	34–20,868	0–1043
MEE	0–30,439	7–3044	0–30
CHN	0–14,158	4–1416	0–142
OEa	0–21,386	4–2139	0–212
IND	37–49,589	11–4959	0–496
OSA	0–27,682	7–2768	0–276
JPN	37–3726	19–373	0–37
OCN	37–53,427	11–5343	0–533
PAS	37–205,323	15–20,532	0–2053
LAC	149–198,766	67–19,877	0–1986
SOO*	75–357,779	37–35,782	0
ARC**	75–439,409	45–43,926	0
Total	2,496–2,772,889	1237–238,428	0–12,638

* Southern Ocean

** Arctic Ocean

資料來源：IIASA（2012），“Global Energy Assessment”，p. 458.

不過值得再次提醒的是，如果天然氣水合物開採不當，其後果非常嚴重。如上所述，由於甲烷對於溫室效應所起的作用比二氧化碳要大二十倍；而開採天然氣水合物的過程若導致甲烷氣體的大量洩漏，將可能引起強烈的溫室效應（IEA 2013c, p.119）。另外，大陸棚的天然氣水合物開採十分困難，一旦出了井噴事故容易造成海嘯、「海底

滑坡」(大陸棚動盪甚至海床塌方)、海水毒化等災害(<http://0rz.tw/gHDmk>)。

肆、結語

整體而言，目前天然氣水合物的開採技術仍有待突破，雖對環境可能造成的影響仍有疑慮，但是因其資源存量豐富且具備潔淨能源特性，故仍被各個主要國家列為下一代重點能源選項。包括美、日、中等主要國家，都已持續投入龐大經費與人力於天然氣水合物的技術研究、環境監測與探採工程。

相對而言，臺灣實際推動天然氣水合物調查研究的起步甚晚，估計落後先進國家10年以上(林朝宗，2012)，但考量與臺灣位置相近的南海海域擁有良好的天然氣水合物生成環境，在我國亟需拓展能源自主地當下，實可投入適足資源跨入天然氣水合物開採領域，以期能確保臺灣國家未來的能源戰略安全性。

伍、中文參考文獻

1. 林再興(2013)，「非傳統油氣的資源量及蘊藏量」，*科學發展*，490期，2013年10月，pp.6-9。
2. 林朝宗(2012)，「我國天然氣水合物調查研究之進展與展望」。
3. 翁子偉、羅聖宗、黃瑞賢、李建鋒(2013)，「南海天然氣水合物分佈與資源量概況」，*鑛冶*，中國鑛冶工程學會會刊，第五十七卷第二期，pp.56-70。
4. 陳崇憲、陳金德、羅聖宗(2008)，「我國天然氣水合物發展」，*碳經濟*，第十一期，pp.58-68。

陸、英文參考文獻

1. IEA (1998) , “Natural Gas Issues and Trends”, p.78.
2. IEA (2009) , “World Energy Outlook 2009”, p.411.
3. IEA (2013a) , “Redrawing Energy Climate Map”, OECD/IEA, Paris.
4. IEA (2013b) , “Resources to Reserves 2013”.
5. IEA (2013c) , “World Energy Outlook 2013”.
6. IIASA (2012) , “Global Energy Assessment”, pp.457-458.
7. Kvenvolden (1999) , “Potential effects of gas hydrate on human welfare”,
National Academy of Sciences colloquium “Geology, Mineralogy, and Human
Welfare”, Vol. 96, pp. 3420–3426, Colloquium Paper.
8. NETL (2013) , “Japan Completes First offshore methane hydrate production
test”, *Fire in the Ice*. Vol. 13, Issue 2, US. Department of Energy, U.S.A.

柒、網路資訊

1. http://www.kepu.net.cn/gb/technology/new_energy/web/a10_n44_nn91.html
(<http://0rz.tw/N0Tui>)
2. http://www.coalmus.org.cn/showsec.asp?News_Id=43 (<http://0rz.tw/0rhXy>)
3. <http://www.epa.gov.tw/QuickFind/Q41.htm> (<http://0rz.tw/Lrgsg>)
4. [http://science.howstuffworks.com/environmental/green-tech/energy-production/
frozen-fuel4.htm](http://science.howstuffworks.com/environmental/green-tech/energy-production/frozen-fuel4.htm) (<http://0rz.tw/gHDmk>)