



對抗溫室效應 二氧化碳變石頭

游允彤 文

生活在台灣，多少會覺得夏天越來越炙熱難受。台灣夏天的最高溫及平均溫度正在逐年攀升，而科學家們將這樣的現象歸因於「溫室效應」。根據環球生態基金會（**Universal Ecological Fund**）發表《有關氣候變化的真相》報告顯示，依照現在的二氧化碳排放量，地球的平均溫度將在**2050**年前上升攝氏兩度。聽起來或許沒有很多，但是在過去的一萬年中，地球的平均溫度其實也只上升兩度而已。

溫室效應最大元凶 二氧化碳

溫室效應系指陽光穿過大氣層後進入地球表面，而地球表面將熱能反射時，卻被溫室氣體，如二氧化碳、甲烷等吸收，將熱能再次傳回地球，使地球表面溫度上升。

根據京都議定書（**Kyoto Protocol**）之規範，溫室氣體共有六種，其中二氧化碳所占比例最大，主要來源為火力發電所燃燒的石化燃料（煤、重油）及汽油、柴油的燃燒。隨著經濟與人口成長，減少碳排放量儼然成為人類永續發展的共識，然而除了減量，科學家們也提出一個新方式，就是將二氧化碳變成石頭。

碳捕捉與封存，簡稱**CCS**（**Carbon dioxide Capture and Storage**），指的是將二氧化碳收集與埋藏，避免其進入大氣中造成溫室效應。目前的**CCS**技術分為四種，包括構造封存、殘餘氣封存、溶解封存及礦化封存。哥倫比亞大學、南安普敦大學和冰島大學組成的研究團隊即利用「礦化封存」的技術，在冰島的地熱發電廠展開實驗，將發電廠的排放的二氧化碳注入地底下，與地層中的金屬離子反應，完成二氧化碳「礦物化」的過程。研究團隊提到以往相關的實驗成果多指向二氧化碳需幾百至幾千年才能完成礦物化，然而此次的實驗證明只需不到兩年，實驗中**95%**的二氧化碳都成功變成石頭。而這項研究成果也登上權威科學期刊《**Science**》，是**CCS**技術的一大突破。

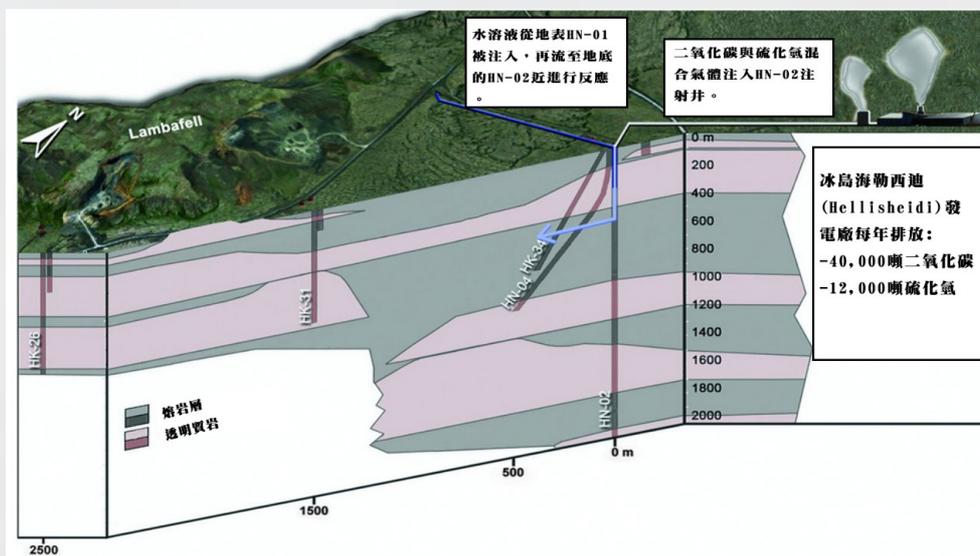




研究者拿著成功礦化的碳酸鹽類。(圖片來源／[The Earth Institute, Columbia University](#))

實驗架構與追蹤方式

實驗的基本架構，是將二氧化碳溶於水中並注入地底下，二氧化碳會與地層中的鈣、鎂離子反應，分別結合為碳酸鈣與碳酸鎂。首先，科學家們從地表向下開鑿一個2000公尺深的注射井，以及其餘八個300至1500公尺不等的觀測井，而後將二氧化碳水溶液注入注射井中，溶於水的二氧化碳會藉由岩石的孔隙流入岩層並與離子反應，剩下的二氧化碳水溶液會流至觀測井中，每一個觀測井底下皆裝備抽水馬達，以利研究者取得水溶液樣本。



二氧化碳水溶液由地表的HN-01井流向HN-02的注射井，接著流入岩層與離子反應，反應後的水溶液會再流至其餘觀測井中。(圖片來源／游允形重製) 資料來源：《[Science](#)》

那麼，要怎麼知道二氧化碳是否成功與地層中的離子反應？

實驗利用碳12的同位素碳14 (^{14}C)，合成標定碳14的二氧化碳 ($^{14}\text{CO}_2$)，將其一併溶於二氧化碳水溶液中。碳12和碳14在化學性質(與離子的反應速率)與物

國立交通大學機構典藏系統版權所有 Produced by IR@NCTU

物理性質（沸點、溶解度）上皆相同，讓實驗結果不會因為添加碳¹⁴而受影響，唯一的差別在於碳¹⁴具有放射性，因此較容易被觀測，且在自然環境中存量相當少。也就是說，只要採集到含有碳¹⁴的碳酸鈣或碳酸鎂，就代表是來自實驗的二氧化碳與離子反應出的產物，因此碳¹⁴可以被拿來當作實驗的追蹤劑。

成功關鍵 注射方式與岩層種類

根據觀測井中採集到的樣本，發現碳¹⁴的濃度比最初合成的二氧化碳水溶液低，合理的解釋就是二氧化碳地層中的離子發生反應，但是這樣的結果只是推測，還不足以證明二氧化碳確實有與離子反應並且礦物化。實驗進行到第550日時，觀測井中的抽水馬達故障，實驗被迫暫停，而研究者取出壞掉的抽水馬達後，發現故障主因為岩石卡住機械零件。於是研究者將岩石樣本進行分析，發現岩石中碳¹⁴的濃度和他們當初注射在二氧化碳水溶液中的濃度一模一樣，故可證明二氧化碳確實成功礦物化。

為什麼這次的實驗可以有突破性的成果？主要的原因在「選擇注入的岩層種類」以及「二氧化碳的注射方式」。

根據《超臨界二氧化碳對魚藤坪砂岩礦化封存機制的影響》顯示，砂岩的活性較低，因此需要較長時間才能完成礦化的過程。本次實驗之所以選在冰島進行，是因為冰島有許多火山，而火山噴發後形成的「玄武岩」則含有大量能與二氧化碳反應的離子。此外，玄武岩在地球表面的覆蓋率極高，大大提升此技術在發展成熟後被廣泛運用的可行性。



冰島海勒西迪（Hellisheidi）發電廠附近的玄武岩結構。（圖片來源／[The Earth Institute, Columbia University](#)）

另外，此次實驗有別於以往直接將二氧化碳以氣體或是飽和水溶液的型態注入，而是以「非飽和水溶液」的型態進行實驗。大同大學生物工程學系游吉陽教授表示，以非飽和水溶液注入能使二氧化碳更有效與離子反應，而過飽和溶液會使氣體以泡泡的形式漂浮在溶液表面，導致氣體揮發而無法與離子反應。

台灣也曾在2005年進行二氧化碳礦化的相關研究（蛇紋岩礦化封存CO₂能力與機制），利用電腦模擬的方式計算二氧化碳氣體注入蛇紋岩的反應情形。蛇紋岩的主要成分為蛇紋石，含有大量的鎂離子，且廣泛分布於中央山脈東側。模擬結果顯示隨著二氧化碳加壓程度提高，蛇紋石依序變質為水鎂石、葉蛇紋石、菱鎂礦、皂石、滑石及綠脫石，使蛇紋石失去封存二氧化碳的能力。上述研究成果說明二氧化碳的注射型態（氣態或液態）與選擇的岩層種類皆是實驗成敗的重要因素，應證冰島發電廠實驗的成功案例。

低成本高安全 前途看好

以往CCS技術被認為價格高昂，因為二氧化碳在環境中幾乎不可能獨立存在，要將二氧化碳分離再進行封存是實驗中最昂貴的環節，然而此次除了以純二氧化碳進行實驗外，也嘗試將不同氣體與二氧化碳混合並注入玄武岩中，發現如此也能成功與礦物反應，這樣的研究成果證明未來二氧化碳礦物化的技術成本將會大幅降低。

然而，二氧化碳封存技術的安全性仍受到大眾質疑。可以將情況想像成喝碳酸飲料時，如果劇烈搖晃瓶身再打該瓶蓋，飲料便會噴灑出來。同理，當地層發生劇烈變動時，地底下的二氧化碳水溶液可能從地表噴發。不過，游吉陽表示，此次實驗以活性高的玄武岩為注射目標，使二氧化碳與離子能夠快速反應，地底下二氧化碳濃度會在短期內被大幅降低，也因此減少二氧化碳在地底下可能產生的不穩定性。

儘管仍有安全上的疑慮，此次的實驗結果仍令人振奮，將以往認知的二氧化碳礦物化時間縮短至兩年，使這項原本時間和金錢成本皆高的技術被拿來重新討論與審視，而實驗中的各項操作變因（選擇注入玄武岩、與其他氣體混合注入），也使此技術能在未來被廣泛運用的可能性提高，不僅成為因應溫室效應的新對策，也開啟環境永續發展的契機。



記者 游允彤



編輯 楊佩臻