

地震對二氧化碳地質封存的影響 — 以苫小牧 CCS 示範計畫為例

楊智豪* 俞旗文**

摘要

日本北海道苫小牧 CCS (Carbon Capture and Storage) 示範計畫由日本政府推動，進行二氧化碳分離、回收、利用、運輸，地下封存技術調查與研發，商業化調查與驗證測試；整體計畫由日本 CCS 調查株式會社 (簡稱 JCCS) 負責執行。JCCS 在 2009~2011 年調查階段選定了北海道苫小牧港區下方兩組不同深度的地層 (萌別層、滝ノ上層)，作為二氧化碳封存的儲集層。示範計畫於 2019 年 11 月 22 日，已達成總灌注量約 30 萬噸的預設目標。

2018 年 9 月 6 日，北海道膽振東部發生規模 6.7 的地震。此事件提供了檢驗二氧化碳地質封存地震安全性難得的實例經驗。JCCS 根據其風險管理手冊，採取了緊急事件應變措施，並隨後進行與地震事件衝擊相關的安全評估作業，以昭公信。本文經由管道取得專家審定後完整的安全評估報告，特為文分享此案例經驗。本案例中，JCCS 綜合監測科學證據與模擬結果指出：(1) 地震震源與灌注點位置比對顯示在地質上兩者並無連續性關係，可排除膽振東部地震是因為二氧化碳注入前述的兩個儲集層所誘發；(2) 灌注區域連續進行微震監測關聯事件分析顯示地震前後並未有微震事件發生。因此排除二氧化碳封存作業與北海道東部膽振地震有直接關聯；(3) 從數值模擬與實測的結果相互驗證，得知地震發生後監測到的壓力升高，可解釋為與震央位置附近的斷層位移，使得地殼變形所致；(4) 根據實測儲集層壓力和溫度數據，得知北海道膽振東部地震並未造成地層內二氧化碳的洩漏。

關鍵字：苫小牧、CCS 示範、碳封存、膽振東部地震、北海道

一、前言

2018 年 9 月 6 日凌晨 03:07 北海道發生了重大地震。震央位於北緯 42.7 度、東經 142.0 度，靠近北海道膽振 (Iburi) 綜合振興局所轄的勇拂郡厚真町附近，距札幌市約 70 公里，距東京都約 790 公里。本次地震規模為 Mw 6.7，震源深度約 37 公里 (參考維基百科)。日本氣象廳命名為平

成 30 年北海道東部膽振地震 (Hokkaido Eastern Iburi Earthquake)。

地震震央也位在日本北海道苫小牧市 (Tomakomai City) 東邊約 30 公里，為苫小牧 CCS 示範計畫 (Tomakomai CCS Demonstration Project) 自 2016 年 4 月灌注二氧化碳開始以來，所遭逢的最大地震侵襲。震央距離二氧化碳注入區域水平距離約 30 公里，區域範圍內量測到最大震度為 7

* 中興工程顧問社大地工程研究中心助理研究員

** 中興工程顧問社大地工程研究中心副主任

級；在苫小牧 CCS 示範場址附近所量測到的震度則小於 5 級 (158 gal)。隨後，於 2019 年 2 月 21 日，同地又發生了一次地震規模為 Mw 5.8。據示範計畫執行者日本 CCS 調查株式會社 (以下簡稱 JCCS) 在震後科學性自評證明：這兩次地震事件均未對場址造成嚴重影響，但事業主管機關要求 JCCS 必須對當地居民安排進行地質封存安全性公聽會，並邀集專家對 JCCS 提出的科學性安全評估報告作說明；此報告必須進行專家審查確認。

2019 年 8 月 28 日~30 日，本社派員隨同台灣碳捕存再利用協會 (以下簡稱 TCCSUA)，應日本 JCCS 邀請參觀苫小牧示範計畫場址。期間聽取地震事件對場址的影響評估，也取得了審查結果正式的安全評估英文報告審「Research Report on Impacts of Hokkaido Eastern Iburi Earthquake on CO2 Reservoir 2nd edition」(2019 年 8 月)。爰此，本文乃參考該報告的內容，分享此「地震是否危及二氧化碳的儲集層封存安全」難得的日本經驗。

二、苫小牧 CCS 示範計畫

日本北海道苫小牧 CCS 示範計畫由日本政府推動，進行二氧化碳分離、回收、利用、運輸，地下封存技術調查與研發，商業化調查與驗證測試；由日本 CCS 調查株式會社 (以下簡稱 JCCS) 負責執行。JCCS 公司創立於 2008 年 5 月，由 35 家與 CCS 產業相關的公司包含：電力公司、石油公司、石油開發公司和設備工程公司等合資成立。成立宗旨即為碳捕捉及封存整合性示範計畫在日本進行全面性的調查與研究。

示範計畫總時程共九年 (如圖 1)。其中三階段時程規劃如下：

1. 2012~2015 年 (準備階段)：在選址完成後，進行二氧化碳注入設備的設計與建造、鑽鑿注入井以及法規與安全準則之研究。
2. 2016~2019 年 (灌注階段)：進行二氧化碳灌注作業，目標灌注量為 30 萬噸。
3. 2015~2020 年 (監測階段)：2015 年起進行基

線監測；2016 年灌注作業開始進行後，同步執行監測作業，直到 2020 年。之後，仍會另案延續灌注後長期監測。

(一) 儲集層與灌注深度

計畫場址位於北海道苫小牧港區一帶，緊鄰北太平洋 (如圖 2)，在 2009~2011 年調查階段透過海域三維震測、探查井岩心分析、井測資料等，選定了兩組深度不同的砂岩、火成岩作為二氧化碳封存目標儲集層 (Reservoir rock)。此二儲集地層之分層剖面示意圖 (如圖 3)。

較淺 Moebetsu 層 (萌別層)，深度約在海床下 1,000~1,200 公尺，為第四紀砂岩層，岩層厚度約 100 公尺，孔隙率約 20~40%，滲透率約 9~25 md。此儲集層上方有厚度約 200 公尺泥岩作為蓋層 (Cap rock)。

較深 t1 member of Takinoue 層 (滝ノ上層的 t1 段)，深度約在海床下 2,400~3,000 公尺，為中新世火成岩或火山碎屑岩，岩層厚度約 600 公尺，孔隙率約 3~19%，滲透率約 0.01~7 md。此儲集層上方有厚度約 1,100 公尺中新世泥岩層作為其蓋層。

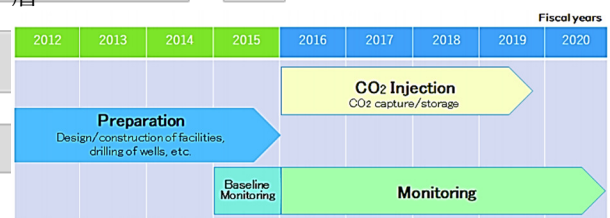


圖 1 苫小牧 CCS 示範計畫總時程 (分三階段)

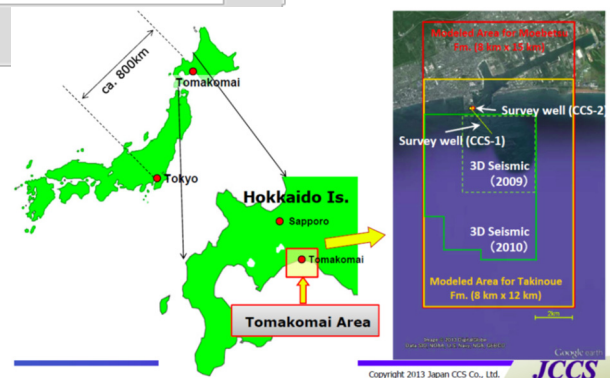


圖 2 苫小牧 CCS 示範計畫位置圖

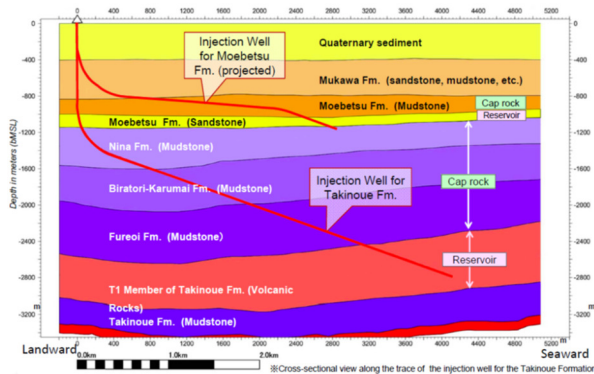


圖 3 苦小牧地區兩口 CO₂ 注入井與地層剖面示意圖

(二) 捕獲設備與灌注設備

目標儲集層調查工作完成後，JCCS 即開始著手設計與興建示範計畫地面設施，並鑽鑿兩口斜井至兩處目標儲集層。

苦小牧 CCS 示範計畫地面設備鳥瞰圖與標示各處相關設施說明（如圖 4）。地面設施包括：氣體供應與分流設備、二氧化碳捕獲設備（Absorption tower, Stripping tower, Flash tower）、二氧化碳灌注設備（Compressor, Injection wells），以及控制大

樓（Control building）。二氧化碳來源為鄰近既有的「出光興產煉油廠」，在氫氣的製程中利用變壓吸附（Pressure swing adsorption, PSA）原理，純化製氫所剩之尾氣（Off gas）。

尾氣包含二氧化碳（體積約占 44~59%）、氫氣、甲烷、一氧化碳等，利用 2.5 公里長的管線，輸送到二氧化碳捕獲設備。

二氧化碳捕獲設備係採用胺類吸收法，捕獲純度大於 99% 二氧化碳，每年約可捕獲 220,000 噸（每天約 600 噸）二氧化碳供灌注使用。捕獲後剩餘的氣體，則回收作為鍋爐以及發電機組蒸氣渦輪用的燃料。

最後，經過壓縮機增壓後，純化的二氧化碳輸送至廠內地表注入設備，分別經由兩口注入井灌注至兩個不同的儲集層中。兩口注入井包括注入點位在 Takinoue 層的注入井（簡稱 IW-1），與 Moebetsu 層的注入井（簡稱 IW-2）。台灣 TCCSUA 協會成員於參觀場址當日（2019 年 8 月 29 日）站立在井頭旁合照（如圖 5）。

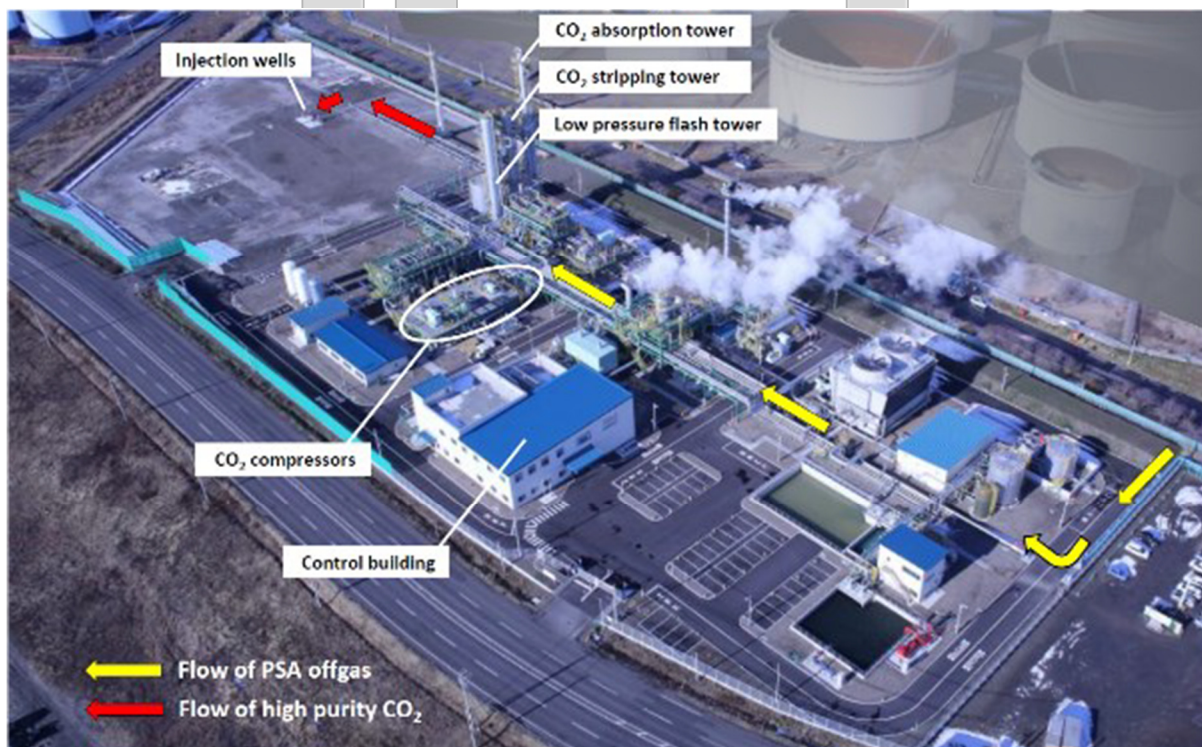


圖 4 示範計畫地面設備鳥瞰圖

注入壓力則依照不同岩層靜水壓來調整。Moebetsu 層最大操作注入壓力為 9.7 MPa；Takinoue 層最大操作注入壓力為 23 MPa。本示範計畫安全極限的灌注壓力，一般定為蓋層強度 90%，例如在 Moebetsu 層，極限灌注壓力定為 12.6 MPa。

二氧化碳注入速率取決於注入期間煉油廠的操作負載，同時也受儲集岩層條件影響。



圖 5 台灣 TCCSUA 成員參觀現地兩口注入井內外設施

(三) 注入井與灌注作業

兩口注入井皆從陸域垂直往下深鑽，到了預定深度後轉向朝海域方向斜鑽，持續鑽進到最有可能的儲集層位置，穿孔注入點座落於離岸約 3~4 公里處。以 Takinoue 層為儲集層的注入井 IW-1 最大傾斜角度為 72 度，總計鑽進 5,800 公尺，鑽進垂直深度為 2,754 公尺，鑽進水平長度為 4,347 公尺。以 Moebetsu 層為儲集層的注入井 IW-2 最大傾斜角度為 83 度，總計鑽進 3,500 公尺，鑽進垂直深度為 1,161 公尺，鑽進水平長度為 2,900 公尺（如圖 3）。

淺的 Moebetsu 層灌注作業從 2016 年 4 月開始進行；深的 Takinoue 層灌注作業，則從 2018 年 2 月才開始進行。絕大部分二氧化碳灌注於 Moebetsu 層。因該地層壓力於灌注後仍保持穩定，升壓量很小，成為主要儲集層。Takinoue 層的火山碎屑岩，孔隙連通條件不佳，灌注過程發現升壓太快，因而於短期內便停止灌注。

本案至 2019 年 11 月 22 日終於達成計畫目標

300,000 噸二氧化碳灌注作業。最終累積灌注二氧化碳總量為 300,110 噸，包含 Moebetsu 層 300,012 噸與 Takinoue 層 98 噸。

(四) 監測系統

為確保二氧化碳注儲的安全性與穩定性，監測二氧化碳在儲集層中的移棲行為，是一件相當重要的任務。因此必須建立一套縝密的監測系統，來偵測二氧化碳是否會洩漏至上方蓋層。

由於日本是一個地震相當頻繁的國家，必須透過詳細的測量與驗證以比對二氧化碳地質封存與地震間的關係。因此計畫主要監測設施除設置兩口注入井（IW-1, IW-2）外，尚有三口監測井（OB-1, OB-2, OB-3）、一條海底電纜（Ocean bottom cable, OBC）、四組海底地震儀（Ocean bottom seismometer, OBS）、一組陸上地震儀。

表 1 為示範計畫主要的監測設施與相關項目。各監測設施的空間配置情形（如圖 6）。為了解二氧化碳在地層中移棲行為，於 2017 年累積注入二氧化碳至 Moebetsu 層達到 65,000 噸後，進行三維震測與資料比對分析。比對分析主要係將量測結果與未注入前基線（Baseline）調查成果相互比較，從兩者震測比對訊號差異處可視為封存至該地層的二氧化碳分布範圍（如圖 7）。其分布範圍與模擬注入 61,238 噸的結果相似。由上述監測系統獲取的資料，可持續反饋以強化數值模擬模型，精進二氧化碳移棲分析，並進一步以持續性反饋預測後續增加注入的二氧化碳分布的範圍。

表 1 苦小牧 CCS 示範計畫監測設施

監測設施	監測項目	監測頻率
注入井	井下：溫度、壓力	連續監測
	井頭：壓力、二氧化碳注入率	連續監測
監測井	井下：溫度、壓力、微震、自然地震	連續監測
海底電纜	微震、自然地震、三維震測訊號	連續監測
海底地震儀	微震、自然地震	連續監測
陸上地震儀	微震、自然地震	連續監測
二維震測	二氧化碳移棲分布	定期監測
三維震測	二氧化碳移棲分布	定期監測
海洋環境監測	化學、物理、生物資料	定期監測



圖 6 場址近域監測設施配置

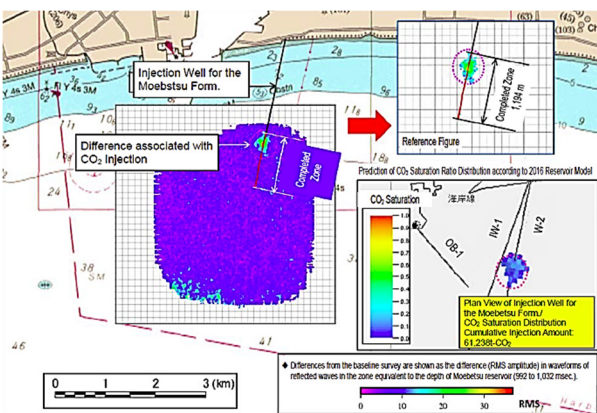


圖 7 三維震測監測結果示意圖

(五) 緊急災害風險管理規則

2016 年 4 月二氧化碳灌注前，JCCS 針對發生緊急災害需採取的應變措施制訂內部規則。其框架根據基本風險管理手冊，為各計畫項目（包括：陸上捕獲設備、陸上注入設備、離岸儲集層、公共關係等）制訂一套風險管理手冊。地震發生時，便使用此手冊，採取相對應的措施。

JCCS 亦針對陸上捕獲與注入設備建立一套獨立的緊急停機系統（Emergency shutdown system, ESS）。當發生嚴重災害因子（例如：爆炸、火災、環境破壞、人為破壞、重要設備損壞）或設施異常，該設施於運行時可以安全地停止、關閉和隔離。

2018 年 9 月 6 日地震前後（2018 年 9 月 1 日~10 日）示範計畫之設備狀態，整理如表 2。地震發生當下，二氧化碳捕獲設備正處於關閉模式，

但是如果設施處於正常運行模式，則緊急停機系統會被啟動，因為設施檢測到的加速度為 158 gal，此值已超過 150 gal 關閉的安全標準。

然而地震事件發生時，JCCS 尚未有針對長時間停電與網路斷線處置方案。因此注入井、監測井與海底電纜的資料數據收集中斷，亦無法進行資料驗證。因此 JCCS 為避免相關操作設備、辦公設備、通訊設備、資料監測設備因停電而失效，提出改善方法，包括：（1）新增示範計畫中心緊急電源供應（80kva）；（2）新增電池供應給注入井資料記錄計使用。

表 2 地震前後苦小牧 CCS 示範計畫之設備狀態

日期	設備狀態
2018/9/1	9/1 前二氧化碳捕獲與注入設備均運作正常。而後二氧化碳供應來源發生問題，乃暫時停止供應二氧化碳，以致二氧化碳注入作業也隨之暫停。因此二氧化碳捕獲與注入設備保持待機狀態，以便二氧化碳恢復供應後可以隨時重新注入。
2018/9/5	二氧化碳來源廠商延後恢復二氧化碳供應的時程，相關設施從待機模式切換至停止模式。
2018/9/6	03:07 發生地震，捕獲裝置附近的地震儀量測到 158 gal 的震動，若在正常運作模式下，該震度會觸發緊急停機，但實際上設備處於停止模式，所以並未執行緊急停機。停電導致監測設備停止。
2018/9/8	電力恢復供應。恢復捕獲與注入設備至地震前的停止模式。
2018/9/10	監測設備恢復運作。

三、二氧化碳注入與地震關聯性分析

北海道膽振東部規模 6.7 大地震，震央距離二氧化碳注入區域水平僅約 30 公里，在苦小牧 CCS 示範場址附近所量測到的震度小於 5（158 gal）。大地震勢必引發公眾對當地二氧化碳封存安全性疑慮。以下是整理 JCCS 計畫團隊，就所蒐集的監測量測資料，以科學性角度，分別評析探討二氧化碳注入與地震關聯性。旨在澄清地震是否因為二氧化碳注入地下深部儲集層誘發，或是否有洩漏之可能。

(一) 地震震源與灌注點位置比對

由日本氣象廳自 1997 年 10 月起歷史地震資料得知，示範場址鄰近區域不時會發生規模 4.0 以上的地震，最近一次在 2017 年 7 月也曾發生規模 5.1 地震，震源深度為 27 公里。地震學家可由區域地體構造探究這些地震發生的原因。

北海道南部區域地體構造為太平洋板塊隱沒至千島海溝 (Kuril trench)，千島島弧 (Kuril arc) 由東往西碰撞東北日本島弧 (Northeastern Japan arc)。千島島弧的上部地殼擠壓造成一系列的逆衝斷層，形成日高山脈 (Hidaka mountain range)；千島島弧的下部地殼則向下移動至東北日本島弧之下 (如圖 8)。

而在膽振東部區域，從日高 (Hidaka) 至浦河町外海 (Offshore of Urakawa) 一帶，地震的特徵是發生在外海的地震會比發生在陸上的地震，位於更深的位置。本次地震事件震源位於 37 公里深基盤。地質剖面 X-X' 顯示地震震源位置 (如圖 9)，主要位於以變質岩為主的山脈逆衝斷層帶內，與逆衝斷層帶西側注入二氧化碳場址所在的

沉積岩地區，在地質上並無連續性關係，應可排除膽振東部地震是因為二氧化碳注入僅有不到 3 公里地下深部的兩個儲集層所誘發。

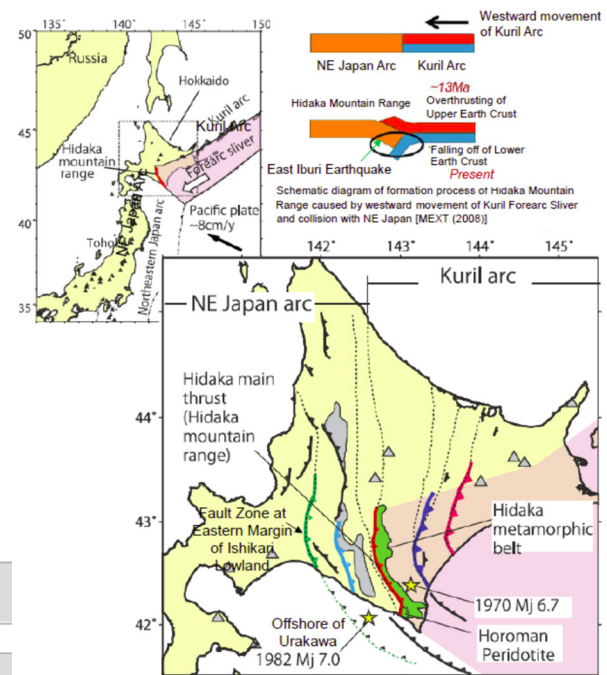
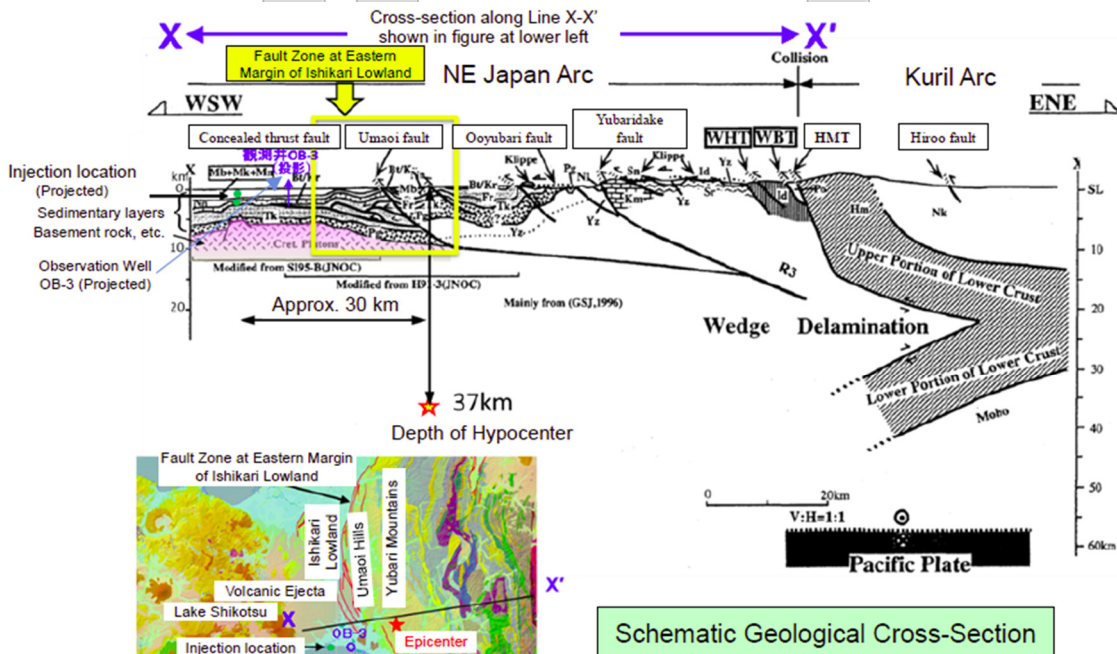


圖 8 北海道南部地體構造示意圖



Source: National Institute of Advanced Industrial Science and Technology; additions made by JCCS
 Source: Journal of the Japanese Association for Petroleum Technology, VOL. 65, No. 1, Tanio ITO (2000)

圖 9 北海道膽振東部地震震源與地層剖面示意圖

(二) 地震活動與場址相關性分析

除了示範計畫監測設備所蒐集的資料，JCCS 另外結合場址附近四個日本政府設置的 Hi-net (High-sensitivity seismograph network) 自然地震網所形成的「自然地震監測區」，並將注入點周圍東西 6 公里、南北 6 公里，深度約 15 公里的區域，定義一處「微震監測區」，區內設置高感度微地震觀測網，透過觀測資料來評估注入作業對儲集層的影響。

微震監測區位置(如圖 10)。微震監測區內，監測系統能監測到所有與二氧化碳注入有關的微震活動，觀測精度可達地震規模 -0.5 以上的地震事件。

2015 年 2 月 1 日~2020 年 5 月 30 日之間，微震監測結果，偵測出發震事件的位置及深度與次數及時間序列(如圖 11)。在注入作業開始前，2015 年 4 月~2015 年 8 月之間，在微震監測區測到 9 次微震事件；在注入作業開始後，2017 年 8 月測到 3 次微震事件。這些微震均發生在約 6 公里或更深的位置，代表監測可以記錄到該地區可能發生之最小規模自然地震。2017 年 8 月 3 次微震事件後，在微震監測區域就未再監測到有類似微震事件發生。在圖 11 中時間序列亦包括 2018 年北海道東部膽振地震事件。

另外，與上述相同時間序列內，在自然地震監測區監測結果顯示樽前山 (Mt. Tarumae) 以南

地區與石狩低地 (Ishikari lowland) 東部邊界斷層帶南部鄰近及其延伸地區，有明顯的微小地震活動。但這些監測到偶發的小地震和微震事件，與苫小牧場址注入作業時間點，以及 2018 年 8 月膽振東部地震時間點，並沒有明顯的相關性。

如先前所述，在地震發生前自然地震監測區確有觀測到許多小型地震活動。膽振東部地震發生後，在苫小牧港東部自然地震監測區內也可觀測到許多小地震和微震事件。這些地震被認為是主震後發生的餘震活動。儘管地震發生次數顯著增加，但震源位置並沒有超出先前歷史地震震源分布範圍。在二氧化碳封存位置附近微震監測區內，根據監測資料直到 2019 年底灌注結束，皆未觀察到與膽振東部地震對應的地震活動或區域變化。

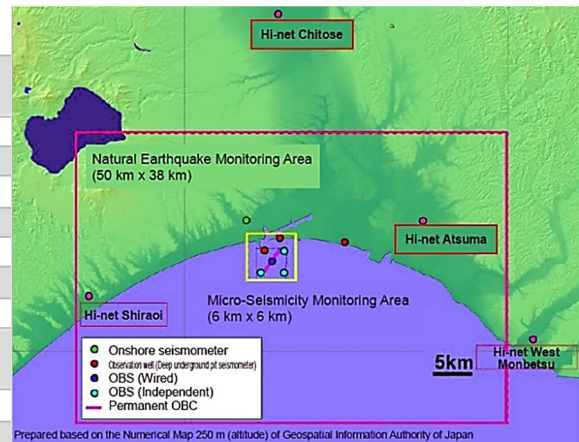
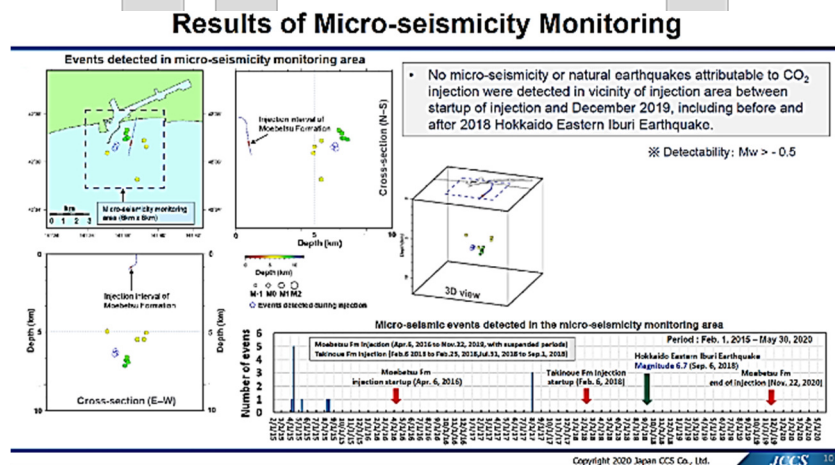


圖 10 場址廣域自然地震監測站配置



(2015 年 2 月 1 日~2020 年 5 月 30 日)

圖 11 微震觀測結果

(三) 預測誘發地震機制數值模型分析

經過檢驗示範計畫實際蒐集的地震監測數據，整合數值模型分析與模擬二氧化碳注入行為，亦可作為評估二氧化碳注入與是否誘發地震之間關係的科學性驗證。

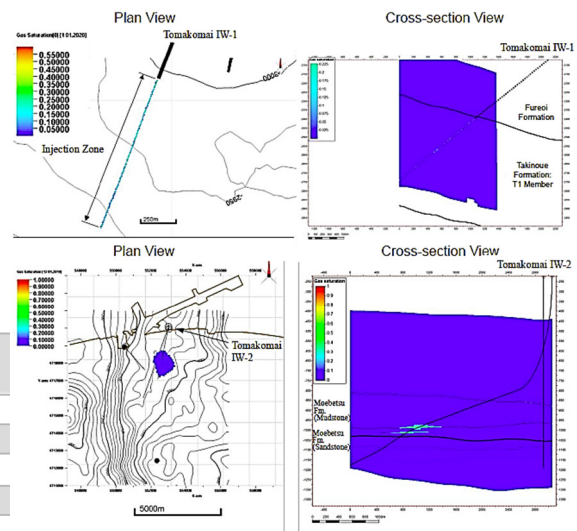
在 2011 年示範計畫開始前，JCCS 早已進行注入二氧化碳在儲集層與蓋層中發生誘發地震可能性評估。在模擬二氧化碳注入總量為 750,000 噸（每年注入 250,000 噸，共計 3 年）的情境分析中，二氧化碳注入造成應力變化，在岩石內斷層裂隙表面的摩擦力會因裂隙內液壓上升而下降，累積應變會被釋放，而誘發地震。其中一評估項目為滑移趨勢係數（滑移面上剪切應力與滑移強度的比值），當係數超過 1 時斷層裂隙將發生滑移。斷層滑移的空間分布，可作為研判分析情境下誘發地震潛在趨勢的重要參考。

在實際注入前 Moebetsu 層和 Takinoue 層滑移係數空間分布情境分析結果顯示，二氧化碳注入會使儲集層壓力上升約 2 MPa 左右；兩地層計算結果顯示該滑移係數上升皆未超過 1，故分析研判二氧化碳注入作業不會誘發斷層裂隙滑動，但不排除仍會有發生一些小規模微震的可能。

此外，為了解二氧化碳注入對震源斷層影響，研究團隊使用實際注入記錄建立的儲集層模型（更新至 2018 年 7 月），對二氧化碳注入結束後進行二氧化碳熱力學行為模擬，並假設累積的注入量（Moebetsu 層 300,000 噸、Takinoue 層 750 噸），重新估算儲集層中二氧化碳飽和度和壓力增量。

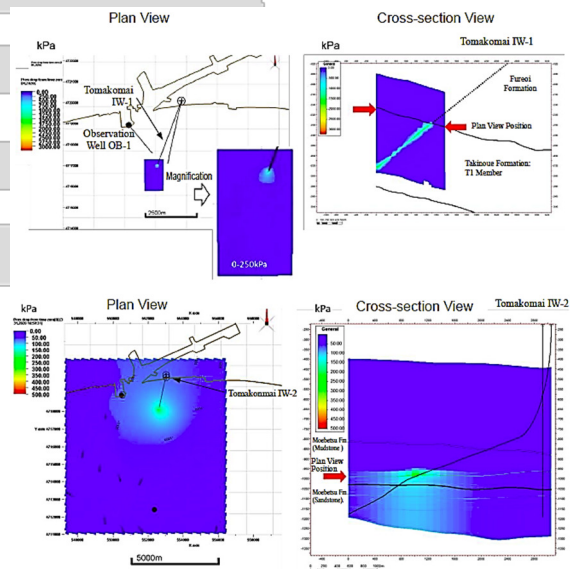
有關注入 300,000 噸後兩儲集層最終飽和度分布變化分析結果（如圖 12）。壓力變化分布結果（如圖 13）。此模型預測顯示：在 Takinoue 層，注入井中的壓力增加約 5 MPa（考量注入壓力上限），地層壓力到注入區域外約 50 公尺處遞減至 2 MPa，而距離 1 公里處的地層壓力則減至 0.25 MPa 以下；至於 Moebetsu 層，根據以往的注入記錄，注入井注入壓力上限導致地層壓力增加

約 0.7 MPa。北海道膽振東部地震震央位置距離二氧化碳注入點超過 30 公里，因此二氧化碳注入造成震央位置的應力增量僅約為 1Pa（帕）。換言之，二氧化碳注入所造成的影響大約是潮汐（幾千帕）對地殼施加的應力變化 1/1000。這表示若與潮汐相比，其影響可以忽略不計，因此若考慮二氧化碳注入點位置與注入壓力微小變化，實不足以誘發北海道膽振東部地震。



(上) Takinoue 層、(下) Moebetsu 層

圖 12 預測注入作業結束後的 CO₂ 飽和度空間分布



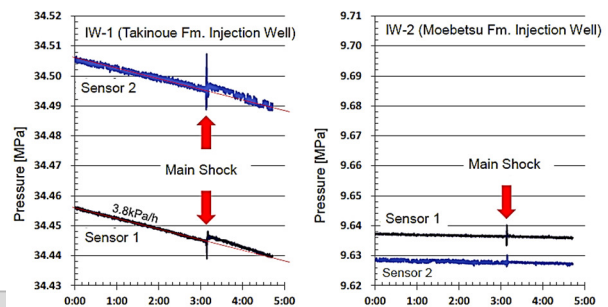
(上) Takinoue 層、(下) Moebetsu 層

圖 13 預測注入作業結束後的壓力增量空間分布

(四) 地震發生地層注入溫度與壓力的變化

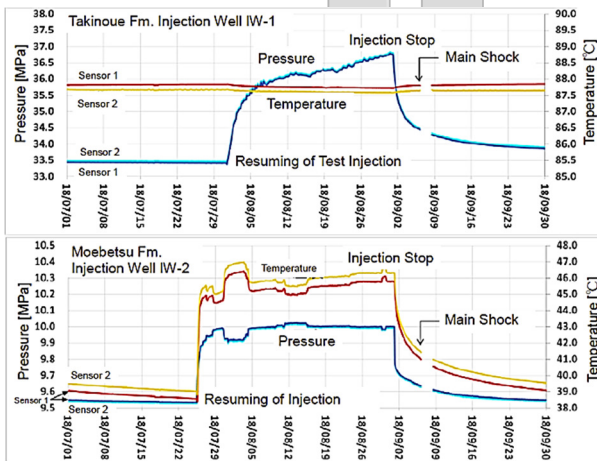
本計畫兩口注入井中，皆部署石英振盪高精度感測器，以進行井內溫度與壓力持續性觀測，經過井內觀測值歷時變化，可反饋改善數值模型分析準確性，亦可作為注入操作安全指引。因此膽振東部地震後，提供重要的安全評估佐證資料（如圖 14），並顯示深處 Takinoue 層注入井 (IW-1) 的測試灌注於 2018 年 7 月 30 日恢復，淺處 Moebetsu 層注入井 (IW-2) 的注入作業於 2018 年 7 月 25 日恢復。在地震發生前，於 2018 年 9 月 1 日，由於煉油廠源頭停止供應二氧化碳，使得注入作業暫時停止。因此，兩口注入井的壓力都呈現下降趨勢。在 IW-1 中地震發生時井下溫度呈上升趨勢，因為注入的二氧化碳溫度低於地層溫度；在 IW-2 中由於注入二氧化碳溫度高於地層溫度，井下溫度呈下降趨勢。由於地震停電導致監測數據中斷，但檢視整體資料，地震前、後井內溫度/壓力的變化趨勢，並沒有出現異常。

IW-1 井下兩個壓力計 (sensor-1, sensor-2) 卻都出現些微上升 (如圖 15)，但在地震發生前三小時壓降速率約為 3.8 kPa/hour，主震後井下壓力突然上升了約 1.8 kPa，隨後壓力隨著時間逐漸減小，並逐漸回復主震前的壓力回降趨勢。由於在地震發生後 95 分鐘停電，而停止數據記錄，因此無法完全了解當時數據情況，所幸從既有數據之趨勢可以推斷出，井下壓力在數小時內又恢復原來的壓力下降趨勢。



(左) Takinoue 層、(右) Moebetsu 層

圖 15 北海道 2018 年東部膽振地震前後
井下壓力變化



(上) Takinoue 層、(下) Moebetsu 層

圖 14 兩口注入井溫度壓力監測結果

IW-1 注入過程中壓力升高，反應了注入量與壓力之間的關係，Takinoue 層內壓力已增加到 37 MPa，雖仍低於壓力上限 (38 MPa)，已逼近管制值。儘管沒有發現由地震引起的溫度和壓力變化，但在主震發生後，由詳細的資料檢視發現

在此處觀察到的壓力升高可被認為是某種類型的同震變化，而同震壓力變化的原因可能為：地震發生時靠近震央處的斷層發生位移，而導致地殼變形，進而引起地塊發生應變變化。關於這種靜態地殼變形，研究團隊考慮到初始餘震分布，建立震源斷層的數值模型 (如圖 16)。模型分析計算場址觀察點的壓力變化估計值。計算結果顯示，二氧化碳注入點係位於震源斷層面解壓縮場域之中，地震後地層流體壓力升高，顯示其應變分布 (如圖 17) 與正應力變化 (圖 18)。假設儲集層平均的走向和傾角 (N45°W / 10°NE) 與此處計算所得的整體應變分布有關。在 Takinoue 層的注入點，計算得到地層流體壓力上升約 1.9 kPa。此模擬結果與實際監測結果相近 (上升約 1.8 kPa)，因此可將監測的壓力升高，解釋為與震央位置附近之斷層位移，使得地殼變形所

致。由於 1.8 kPa 變化幅度非常小，監測到的壓力變化，並不會對儲集層中產生任何異常影響，也沒有因地質構造的破裂導致二氧化碳滲漏的可能性。因此，根據上述分析結果，2018 年 10 月 19 日由包含地震學專家組成的「苦小牧 CCS 示範計畫評審會議」達成以下共識：(1) 地震沒有造成二氧化碳洩漏；(2) 尚無數據顯示二氧化碳封存與地震之間存在直接關係。

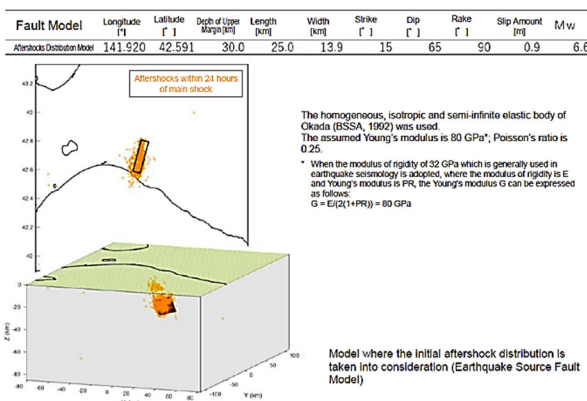


圖 16 震源斷層的數值模型

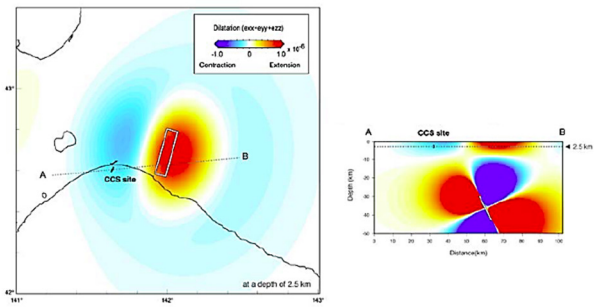


圖 17 應變之模擬結果

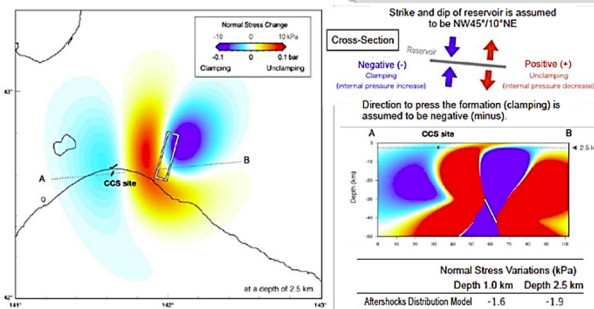


圖 18 正應力之模擬結果

四、結 論

北海道東部膽振地區 2018 年 9 月 6 日發生的規模 6.7 地震事件，提供檢驗二氧化碳地質封存地震安全性難得的實例經驗。JCCS 根據其風險管理手冊，採取緊急事件應變措施，並隨後進行與地震事件衝擊相關的安全評估作業，以昭公信。

經專家審定的安全評估報告中，JCCS 綜合監測科學證據與模擬結果指出：(1) 地震震源與灌注點位置比對，顯示在地質上兩者並無連續性關係，可排除北海道東部膽振地震是因二氧化碳注入兩個儲集層所誘發；(2) 灌注區域連續進行微震監測關聯事件分析，顯示地震前後並未有微震事件發生，因此排除二氧化碳封存作業與北海道東部膽振地震有直接關聯；(3) 從數值模擬結果與實測結果相互驗證得知，地震發生後監測的壓力升高，可解釋為與震央位置附近之斷層位移，使得地殼變形所致；(4) 根據實測儲集層壓力和溫度數據，北海道東部膽振地震並未造成地層內二氧化碳洩漏。

本案例因應地震發生的事前準備與事件衝擊安全評估經驗，適可提供國內未來推動二氧化碳封存計畫參考，俾規劃出適切的場址風險管理程序與完整安全監測系統。

參考文獻

- Japan CCS CO., ltd. (2019) Tomakomai CCS demonstration project, 2019 年 8 月台灣碳捕存再利用協會參觀苦小牧示範計畫場址，日本 JCCS 簡報資料
- Japan CCS CO., ltd. (2018) Research report on impacts of Hokkaido Eastern Iburi Earthquake on CO2 reservoir (Second edition), 北海道膽振東部地震對 CO2 儲集層衝擊研究報告
- 產業技術環境局環境調和產業·技術室 (2016) 二酸化炭素削減技術実証試験事業 (中間評価) 事業成果 (詳細版), 平成 28 年 3 月 1 日第 30 回評価ワーキンググループ資料 3-3
- 澤田嘉裕 (2020) Experience of Tomakomai CCS project, Deep dive workshop, Asia clean energy forum 2020 簡報資料
- 石井正一 (2020) Tomakomai CCS demonstration project - achievements and future outlook, Japan-Asia CCUS forum 2020 簡報資料