

地熱能源應用模範生—— 冰島

Iceland's Geothermal Energy Story

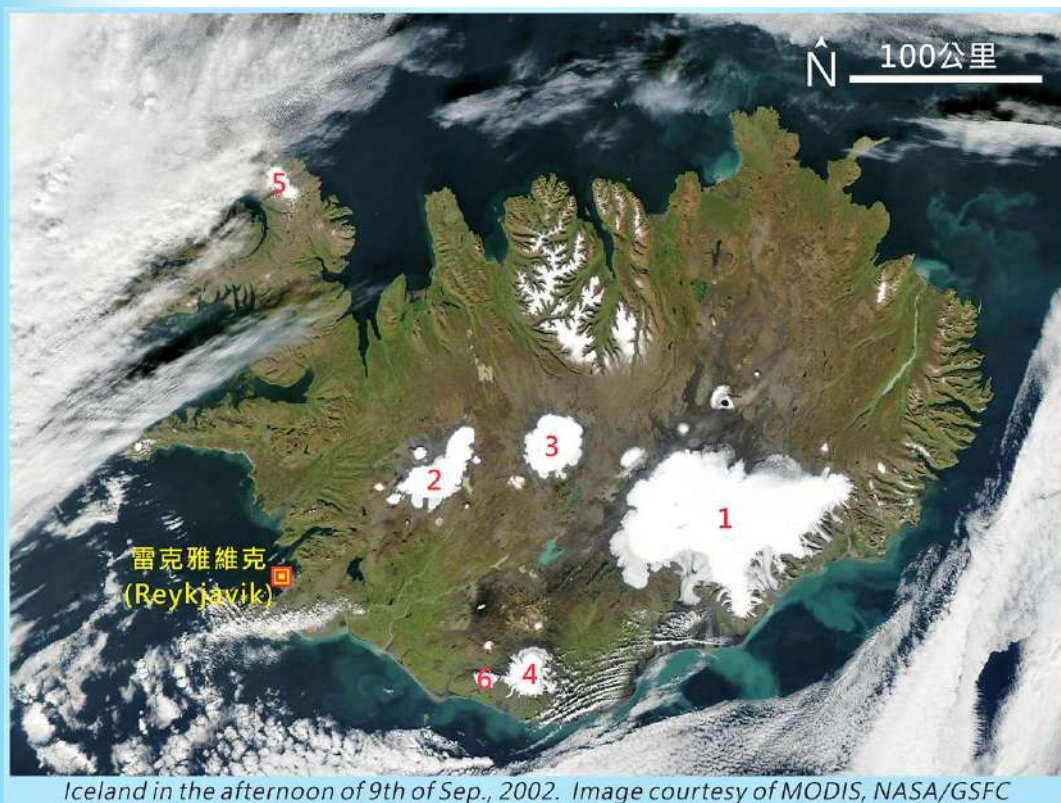
梁勝雄

經濟部中央地質調查所

Liang, Shen-Hsiung

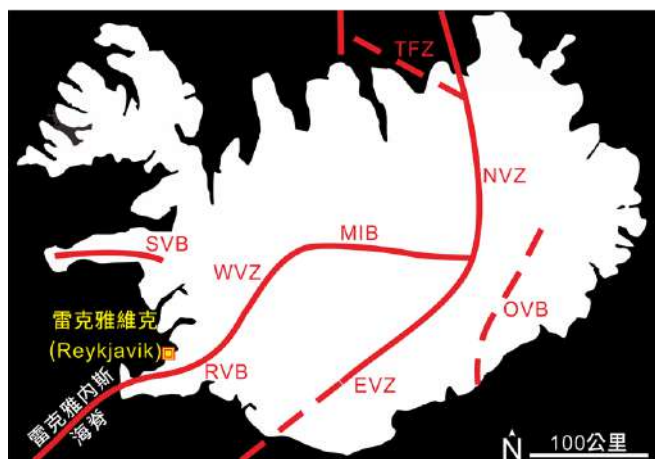
Central Geological Survey, MOEA

近年來，我國努力推動能源轉型，發展可再生且永續能源（再生能源）。北極圈附近有一個跟臺灣一樣，同為島國的冰島——已經完成能源轉型，甚至還能將技術輸出！本文以地熱能源為例，從地質條件切入，帶各位瞭解冰島如何用它來發電？期望它山之石，可以為錯。



Iceland in the afternoon of 9th of Sep., 2002. Image courtesy of MODIS, NASA/GSFC

1
冰島夏季衛星影像，拍攝時間2002年9月（編修自美國太空總署高達德太空飛行中心）。雷克雅維克為冰島首都，另紅色數字1至6依序為瓦特納冰原、朗格冰原、霍夫斯冰原、米達爾斯冰原、德拉格冰川與艾雅法拉冰帽



2



3

2

冰島火山區分布簡圖。RVB為雷克雅內斯火山帶 (Reykjanes Volcanic Belt)；WVZ為西部火山區 (West Volcanic Zone)；MIB為冰島中部火山帶 (Mid-Iceland Belt)；EVZ為東部火山區 (East Volcanic Zone)；NVZ為北部火山區 (North Volcanic Zone)；TFZ為毛瑞張裂帶 (Tjörnes Fracture Zone)；OVB為爾來米火山帶 (Öræfi Volcanic Belt)；SVB為斯奈山火山帶 (Snæfellsnes Volcanic Belt)。

3

冰島常見的岩石——玄武岩

「江上之清風，與山間之明月，耳得之而為聲，目遇之而成色。取之無禁，用之不竭，是造物者之無盡藏也。」這是知名文豪蘇軾在《前赤壁賦》留下的絕美詞句，他在一千多年前就告訴您我，空氣流動、光能等物理現象是造物主提供的無盡至寶，就是永續能源 (Sustainable Energy)，或叫再生能源 (Renewable Energy)。

永續能源是指能滿足現代人的需求又不損害後人滿足其需求的能源，例如風力能、太陽能、地熱能、水力能、海洋能和生質能等等。本文以同為島國的冰島地熱發電為例，簡介當地所擁有的地質條件，以及何種狀況下，讓他們積極能源轉型發揮優勢，最後在能源轉型後，所帶來的經濟效應。

冰島的自然環境

位於極圈邊緣的冰島 (Iceland)，是世界上第十八大的島嶼，主島面積約101,826平方公里，約為2.8個臺灣島大小，海岸線將近5,000公里，顯示其海岸相當曲折；雖然位置上接近北美格陵蘭島 (Greenland)，但因為語言文化等因素，通常被歸類為歐洲。地處高緯，位於北大西洋與北冰洋交匯地帶，但很幸運的是因北大西洋暖流經過，冬季氣溫相對同

緯度其他地區並不算低，夏季氣溫全島則在7至12攝氏度之間，僅有五大現代冰川及少部分高地有降雪存在 (圖1)。

冰島地形像一個倒扣的碗公，是一碗狀高地，中間相對地勢較低，多在400至800公尺之間。位於冰島東南端的華納達爾斯赫努克火山 (Hvannadalshnúkur)，標高2,110公尺，為全島最高峰，曾於18世紀初期噴發過。全島有62.7%是苔原，湖泊與冰川占其表面積14.3%，僅23%有植被。氣候也由東北部的苔原氣候往南逐漸過渡為溫帶海洋性氣候，由北往南的年平均降水量——隨氣候的轉變由少變多——從400公釐逐漸上升至2,000公釐。

冰島的地質簡介

冰島地處大西洋中洋脊 (圖2)，為歐亞板塊和北美板塊的分離板塊邊界 (Divergent Boundary)，組成岩石為火成岩，其中以玄武岩 (Basalt) 分布範圍最廣 (圖3)，其他尚有安山岩 (Andesite) 與流紋岩 (Rhyolite) 等，主要為上部地函物質部分熔融 (Partial Melting) 後成為岩漿，經由中洋脊裂谷湧出而後冷卻堆積而成。

所謂分離板塊邊界是因為張力作用驅使原先的地殼向兩

側擴張延伸而變薄，使上部地函經熔融而冒出地表產生新的地殼，在大陸板塊產生裂谷，如東非裂谷；在海洋板塊則形成中洋脊，是全世界最長的「山脈」，全長超過8萬公里，然而超過90%的中洋脊皆位於海平面以下，僅有少部分的島嶼能高於海平面上，如太平洋的復活節島，以及本文主角冰島。為什麼它們能突出海平面呢？部分科學家認為可能跟熱點(Hot Spot)有關！

熱點是指在地球深部升起大量熱的地函物質造成之熱柱，垂直上升到地表即為熱點，直徑可以有數百公里，熱點表現在地球表面為火山活動。當板塊在熱點上活動時，就像一張蠟紙在燃燒的蠟燭上移動，會形成一條點狀的燒痕(圖4)。地球上最有名的熱點是夏威夷群島，同樣也可用來解釋冰島的成因。但有另一派持反對意見的科學家，他們認為冰島缺乏像夏威夷一樣清晰的火山島鏈，且透過熱異常與地震波走時等研究，也沒有太多符合熱點的特徵，因此冰島地質演育史仍然是一個熱門的研究領域。

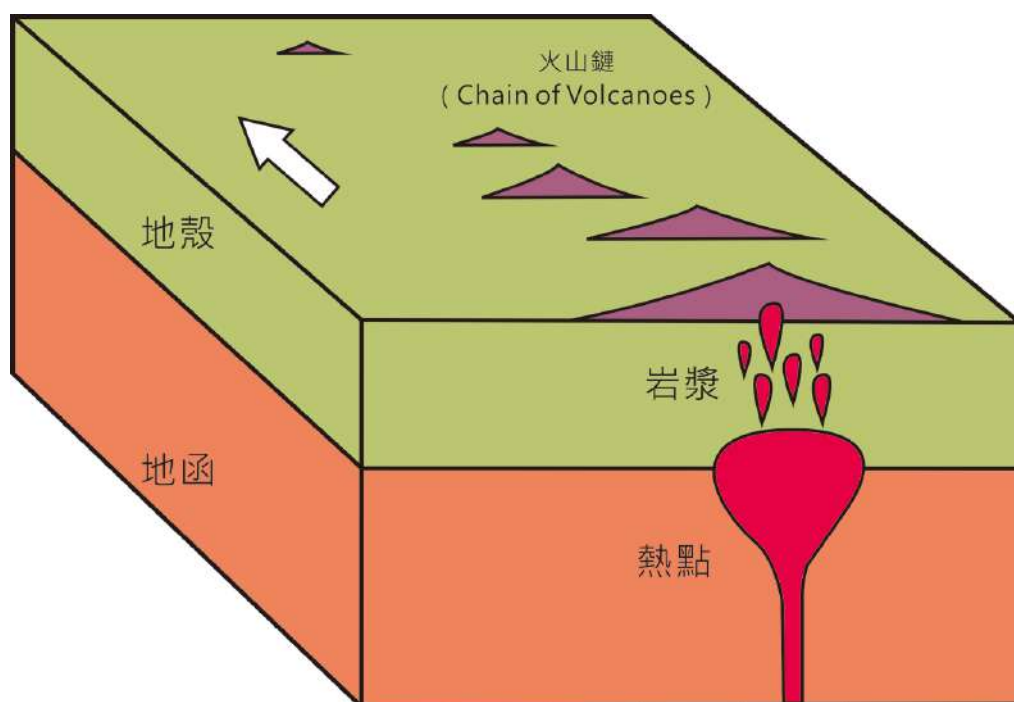
根據放射性定年結果，冰島的火成岩年代可上溯至新生代中新世(距今約16-18百萬年前)，以地質時間尺度來說，冰島是一塊年輕的土地，這意味著冰島地底下仍非常活躍，全島有超過200座的火山，其中至少有20座仍為活火山，分布在幾個火山區或張裂帶，更有600多個溫泉，沿線能觀察到正斷層、高溫地熱場、裂谷群、火山錐及間歇泉(圖5)等地質現象。

冰島在一萬多年以前的冰河期，全島皆被冰川覆蓋，而後氣候暖化，冰川逐漸褪去，殘存相當多的冰川地質遺跡，如冰川沉積物、峽灣、冰磧石與U型谷(圖6)等。現今約占土地面積11%的現代冰川，由大到小分別為瓦特納冰原(Vatnajökull)、朗格冰原(Langjökull)、霍夫斯冰原(Hofsjökull)、米達爾斯冰原(Mýrdalsjökull)、德拉格冰川(Drangajökull)，以及艾雅法拉冰帽(Eyjafjallajökull)。近年更因氣候暖化加劇的關係，冰川不斷消融，德拉格冰川是近年來唯一沒有縮小的冰川。

冰島的地熱資源

現今的冰島是世界上貧富差距很小、生活水準極高且經濟富裕的國家之一，獨特的地質環境造就適合利用地熱能的條件。古代的冰島人就開始利用地熱資源，例如洗滌和沐浴，或是當地人笑稱的烤麵包，而後近期用於為房屋、溫室和游泳池等處供暖，工業利用如食鹽與矽藻土煉製、魚乾製品等，以及保持街道無雪等相當多的用途，現今至少有90%以上的家庭都使用地熱能直接供暖。

以保持街道無雪來說，在高緯度的國家，因為會下雪的關係，除了使用鏟雪車外，還會在道路上噴灑鹽水，藉此讓冰變成液態，也更容易讓鏟雪車把冰從路面上刮除；但鹽會鏽蝕混凝土、橋樑與汽車的金屬，如果進入地下水系統或是





5



6

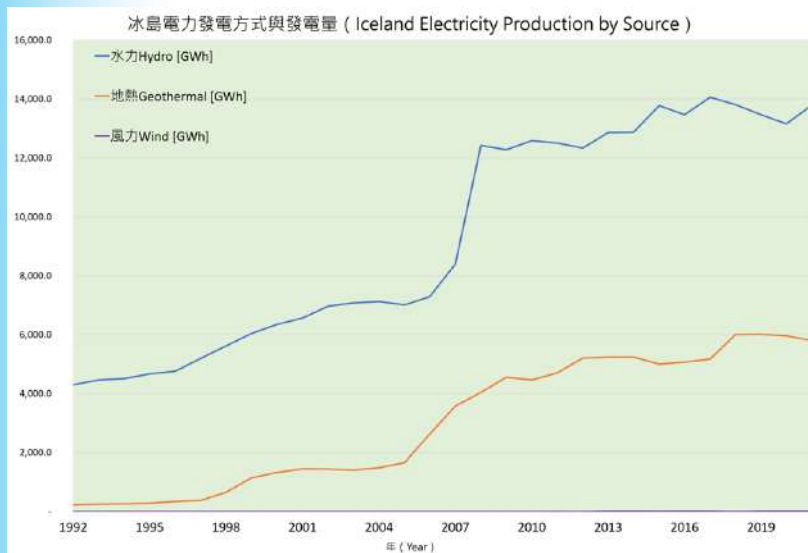


7

5
冰島間歇泉 (Geyser)。英文 Geyser 的詞源為冰島語的 Geysir，語意為「噴湧而出的」，照片中噴發的間歇泉為史托克 (Strokkur) 間歇泉

6
殘存冰川地形——U型谷

7
遠眺賈納爾芙拉格發電廠 (詳細說明請參閱內文)



8

冰島電力發電方式與發電量(資料來源：冰島國家能源署，文件編號：OS-2022-T003-01)。統計從1969年開始，惟筆者選用資料較齊全的1992年至2021年，值得一提的是2011年開始，冰島政府也逐步開發風力發電

河川系統，還可能危害生態環境。而冰島在市區道路鋪設的地熱水管線，讓道路保持在零度以上，大幅降低鹽的使用。

另以發電為例，進一步說明地熱用途。原來在20世紀初期，冰島仍是歐洲最窮困的國家之一，同時高度仰賴泥炭、進口煤炭與石油等化石燃料以獲取能源；可是就在世界一次次發生石油危機時，當地人意識到只有穩定能源價格，並使能源自主，國家才能真正擺脫貧困走向富裕，並開始努力朝此發展。政府利用政策強烈鼓勵在電力生產中使用可再生能源，1970年代開始實驗性探勘與發展地熱能源，2000年前後才真正具備規模，現今有9座地熱發電廠。

賈納爾芙拉格發電廠(Bjarnarflag Power Station，冰島語：Bjarnarflagsvirkjun)是冰島最古老的地熱發電廠之一(圖7)，於1969年營運，為冰島北部米湖地區供暖與供電，不過它並未對外開放參觀。目前冰島對外開放的地熱發電廠為赫利舍迪發電廠(Hellisheiði Geothermal Power Plant，冰島語：Hellisheiðarvirkjun)，是世界第八大、冰島第一大；除了12月25日與1月1日外，全年開放參觀，有機會到訪冰島，不妨安排半天空檔前往參觀。

冰島國家能源署(Orkustofnun, National Energy Authority of Iceland)統計資料顯示該國幾乎所有固定能源都來自可再生資源，其中有超過85%以上的能源來自本土。就電力供應來源而言，冰島目前有75%的電力來自水力發電，25%的電力來自地熱發電，地熱發電的占比還逐年提升(圖8)。此外，冰島政府與聯合國合作將自身地熱技術推廣到同樣為板塊張裂環境的東非大裂谷周邊國家，以及協助培育來自世界各地的地熱工程師。

地熱資源除了用來發電，最為人所知的就是溫泉(圖9)！冰島當地最有名的溫泉品牌為藍潟湖溫泉(Blue Lagoon，或簡稱「藍湖溫泉」)，因湖水呈蒂芬妮藍(Tiffany Blue)而得名，2012年被《國家地理雜誌》列為世界二十大奇景，每年接待超過170萬人次遊客。潟湖浴池是人工的，原為地熱電廠發電後的泉水回滲區，但後來因乾癬患者浸泡後發現有舒緩效果，進而開啟相關事業。2017年資料顯示藍潟湖溫泉公司的年利潤超過3,000萬歐元，除了泡溫泉外，更將乳白色二氧化矽(圖10)等沉澱物質開發成保養品，並進行醫美診所、旅館等多角化經營，帶動上下游觀光、醫美，乃至生技等產業鏈發展。

後記

現代的生活、交通的往來、資訊的傳播，皆離不開能源，尤其是電！石化燃料作為能源的比例，已經降至10%以下，但冰島當局不以此為終點，已經著手進行，再進一步降低對石油的需求，鼓勵企業與個人購買及使用電動車作為島上往來的交通工具。

因國際石油危機，逐步調整對於石化燃料的依賴，轉型為百分百的本土永續能源，利用政策與法規，一方面鼓勵發展本土能源；一方面透過環境影響評估，保護不能開發的區域，將開發造成的影響降至最小。冰島的經驗，能給我國很多借鏡的機會。臺灣介於歐亞板塊和菲律賓板塊之間，地震頻繁，地熱資源豐富。假以時日，我們可以跟上冰島。



9



10

9

藍潟湖溫泉(說明詳如內文)

10

乳白色二氧化矽等沉澱物，開發為醫美產品，帶動生技產業發展

*本篇圖片皆由作者攝影、編修或自繪。

延伸閱讀

- 梁勝雄、許晉瑋、陳建良(2016)。冰島火山活動愈來愈頻繁—都是氣候變遷惹的禍？地質，35(1)，82-87。
- 梁勝雄、蔡文慈(2019)。冰島北部惠爾火山—火山渣錐地形。臺灣博物，38(3)，68-71。
- 梁勝雄、蔡文慈(2020)。地熱廢水變成億元產值—冰島藍潟湖溫泉。臺灣礦業，72(4)，I-IV。
- 梁勝雄(2020)。冰火之島，冰島金圈地質之旅。大地技師，21，84-91。
- 梁勝雄(2021)。冰島古佛斯瀑布成因。臺灣博物，40(1)，52-57。
- 梁勝雄(2021)。冰火之島，冰島米湖鑽石圈地質之旅。大地技師，23，72-81。
- 梁勝雄(2022)。冰島南部凱瑞斯火山—火山口湖成因。臺灣博物，41(3)，46-51。
- Foulger, G. R., Z. Du, B. R. Julian (2003). Icelandic-type crust. *Geophysical Journal International*, 155 (2), 567-590. <https://doi.org/10.1046/j.1365-246X.2003.02056.x>
- Logadóttir, H. H. (2013). Iceland's sustainable energy story: A model for the world? *UN Chronicle*, 52 (3), Apr. 2013, 40-45. <https://doi.org/10.18356/639208ee-en>
- Melsted, O. (2022). Eliminating fossil fuels: Iceland's transition from coal and oil to geothermal district heating, 1930-1980. *History and Technology*, 37 (4), 527-547. <https://doi.org/10.1080/07341512.2022.2033386>
- Mims, C. (2008). One Hot Island: Iceland's Renewable Geothermal Power. *Scientific American*. Retrieved February 13, 2023, from <https://www.scientificamerican.com/article/iceland-geothermal-power/>
- National Energy Authority of Iceland (2023). Geothermal. Retrieved February 13, 2023, from <https://nea.is/geothermal/>
- Stein, C.A., S. Stein (2003). Mantle plumes: heat-flow near Iceland. *Astronomy & Geophysics*, 44 (1), 1.8-1.10. <https://doi.org/10.1046/j.1468-4004.2003.44108.x>
- Trønnes, R. (2002). *Geology and geodynamics of Iceland*. Nordic Volcanological Institute, University of Iceland, 1-19.