

# 冰島古佛斯瀑布成因

## Geological Origin of Gullfoss in Iceland

梁勝雄 | 經濟部中央地質調查所

Liang, Shen-Hsiung | Central Geological Survey, MOEA

### 古佛斯瀑布與惠特河

「歐洲沒有能與古佛斯媲美之瀑布，她狂野和憤怒超過了美國尼加拉瓜瀑布，未善用的水流量復一年地不斷流入峽谷。可是，很快的古佛斯瀑布將被用來發電，為冰島南部帶來充足的光與熱。(No waterfall in Europe can match

Gullfoss. In wilderness and fury it outdoes the Niagara Falls of the United States. Thousands of unharnessed horse-powers flow continuously into the gorge, year in year out. Soon, however, Gullfoss will be harnessed for electricity production to supply inhabitants of the south of the country with abundance of light and heat.)」

1907年出版的丹麥旅遊書如此說道！

百年前的文字讚嘆古佛斯瀑布 (Gullfoss) 能與尼加拉瓜瀑布媲美，不過好在預言沒有成真！百年後的今日，瀑布沒用來發電，反而成為冰島黃金圈旅遊熱門景點之一，年年吸引破百萬觀光客目光，前往參觀。

古佛斯瀑布是冰島第二大瀑布 (圖 1)，僅次位於冰島東北部的黛提瀑布 (Dettifoss)，其冰島語為「黃金瀑布」之意。瀑布約略位於冰島西南部惠特河 (Hvítá) 中段。惠特河發源於朗格冰原 (Langjökull) 下的惠陶爾湖 (Hvítárvatn，圖 2)

位於極圈邊緣的冰島，同時是座火山島。除了冰多與火山多之外，瀑布也多！其中，古佛斯瀑布雖然是冰島第二大瀑布，卻是以特殊的雙階瀑布取勝！但她是如何形成的，瀑布背後又有什麼人文故事呢？

由東北往西南方向流動注入大西洋，全長超過 130 公里。

冰島西南部年降水量在 1,000 至 2,000 毫米之間，得利於充沛水量，瀑布流下的平均水量於夏天時為每秒 140 立方公尺；冬天則為每秒 80 立方公尺，曾測得最高洪水為每秒 2,000 立方公尺。瀑布特別之處在於有兩階，第一階高度約 11 公尺，第二階高度約 21 公尺，總計 32 公尺高。然而是什麼原因而形成特殊的雙階瀑布呢？這一切可能與當地地質構造與岩體特性有關！

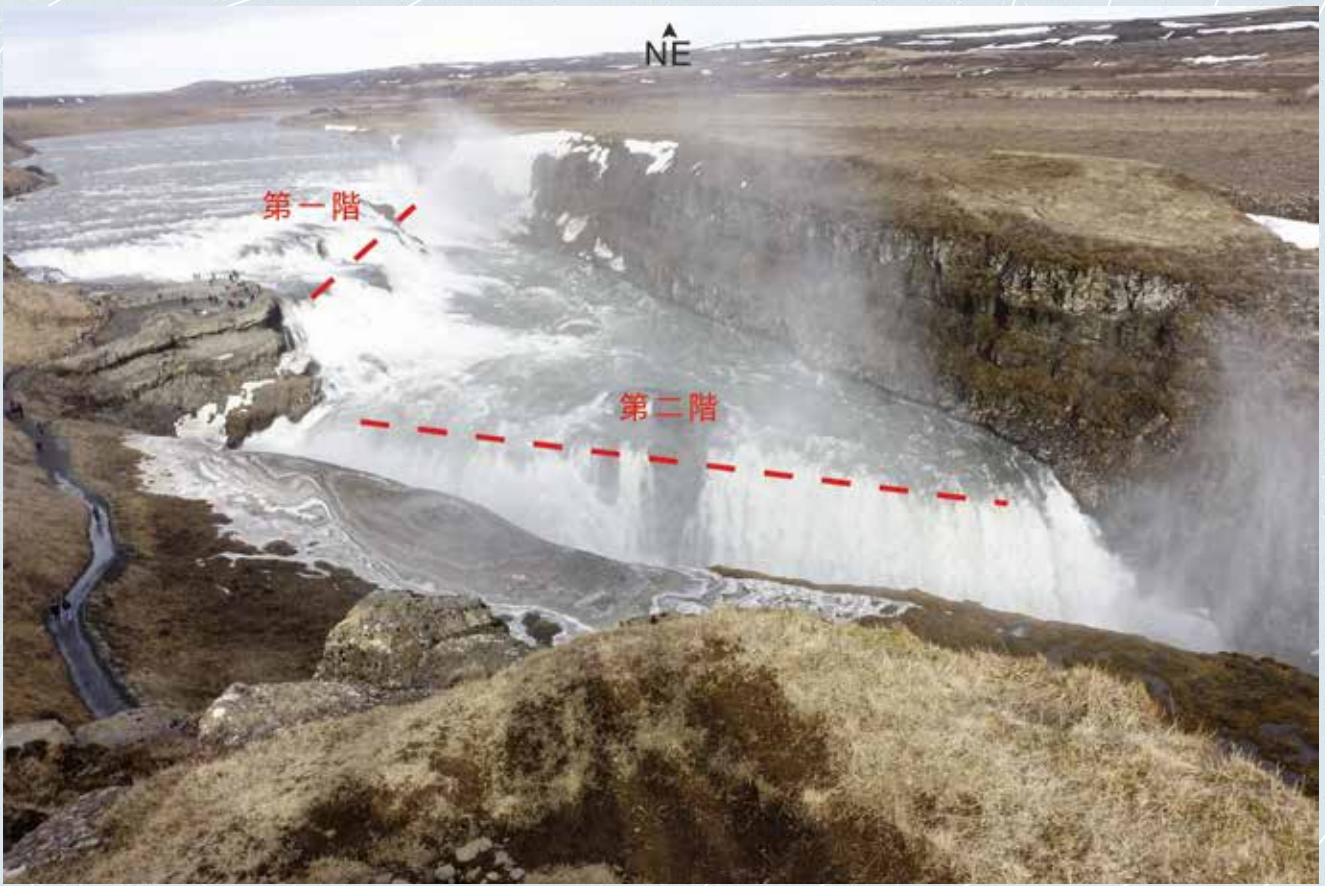


圖1 古佛斯瀑布或稱黃金瀑布，是個雙階瀑布，也是冰島熱門景點之一



圖2 惠特河地理位置圖

## 冰島西南部地質構造

中學地理或是地球科學課本是這樣說的：「河流主支流所形成之水系能形成不同型式，主要受控於下伏岩層性質與構造所控制，次之與河流高度變化、氣候、植被等發育歷史有關；當河道受到斷層等地質構造運動或火山噴發等地表變化使河流突然中斷，或因流水侵蝕等因素造成河床有地勢差，這些都能使河流產生瀑布。」

進一步地說，冰島位於北大西洋中洋脊上，為歐亞板塊與北美板塊邊界，兩板塊每年以約 2 公分左右速率，反向分離，洋脊向北延伸，構成冰島火山鏈。

板塊張裂分離的運動過程中，除伴隨正斷層、地震與火山等地質活動外，也造成許多走向和中洋

脊近乎直角相交之破裂帶，加拿大多倫多大學威爾遜 (J.T. Wilson, 1908-1993) 教授稱之為轉形斷層 (Transform Fault)。在冰島有兩大轉型斷層系統 (圖 3)，分別是位於東北部的毛瑙斷裂帶 (Tjörnes Fracture Zones, 簡稱 TFZ) 與西南部的南冰島地震帶 (South Iceland Seismic Zone, 簡稱 SISZ)，或稱雷克雅內斯斷裂帶 (Reykjanes Fracture Zones, 簡稱 RFZ)。

其中與本文介紹相關之南冰島地震帶 (圖 4)，主要斷層運動行為是左移，故於地塊與地塊間會產生右移斷層，斷層間的地塊會稍稍逆時針旋轉，由於地塊旋轉類似在書架上傾斜的一排書，構造地質學家稱之為「書架斷層 (Bookshelf Faulting)」 (圖 5)，書架斷層被視為年輕斷層帶之標誌。

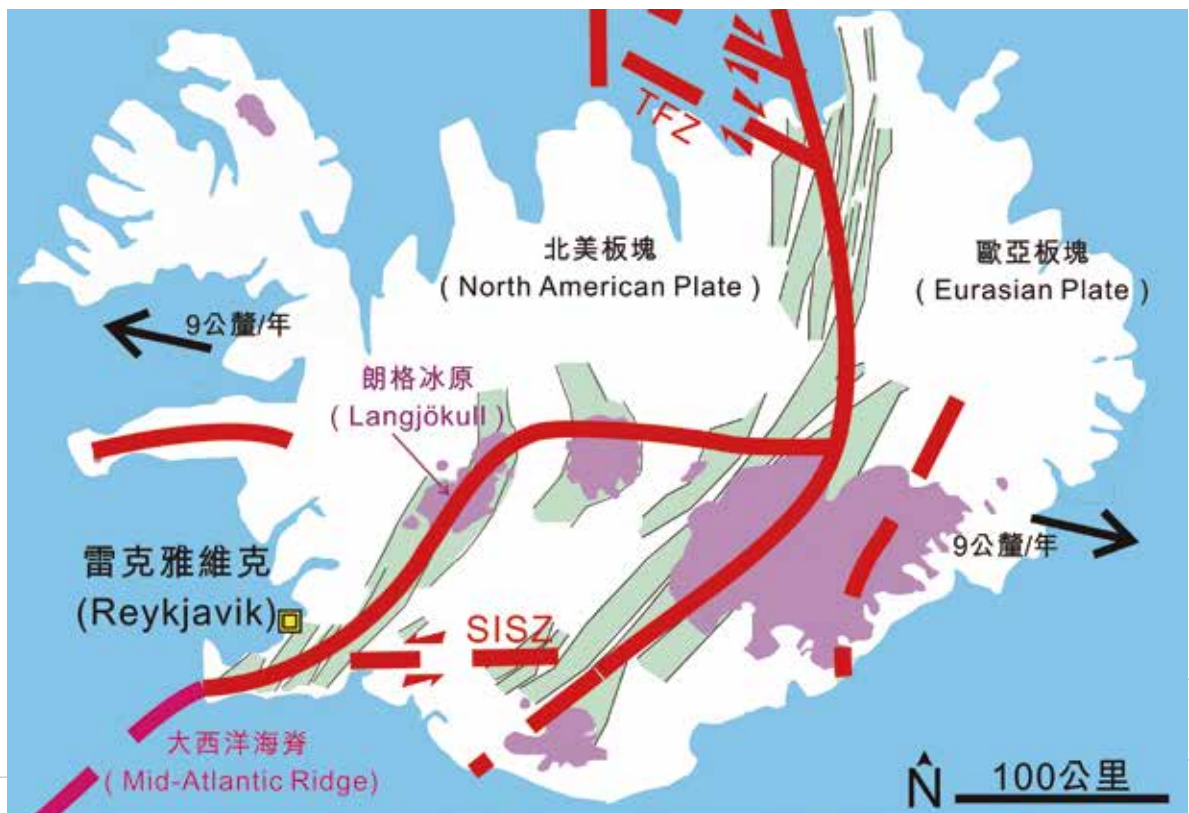
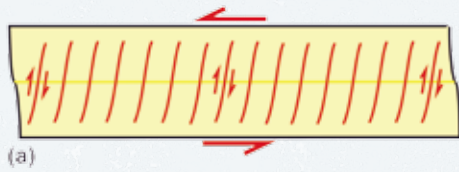
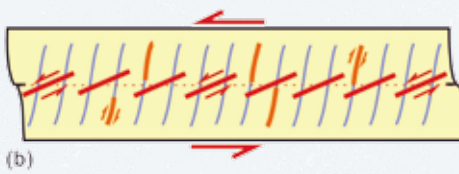


圖 3 冰島地質構造簡圖，紅色虛線為轉型斷層帶，紅色實線為火山帶，綠色區塊為斷裂帶，紫色區塊為冰川區，詳細介紹請參閱內文

(a) 第一階段：左移斷層斷裂帶之間會先發育南北向右移斷層



(b) 第二階段：發育雷多 (Riedel) 斷裂帶，南北向右移斷層則逐漸不活躍，南冰島地震帶屬於此階段



(c) 第三階段：塊體間產生一條新的斷層斷裂帶

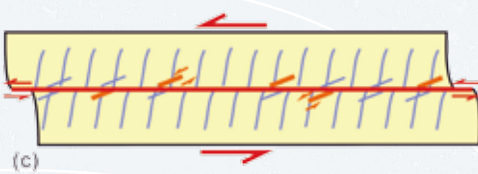


圖 4 東西向左移斷層斷裂帶發育模式圖

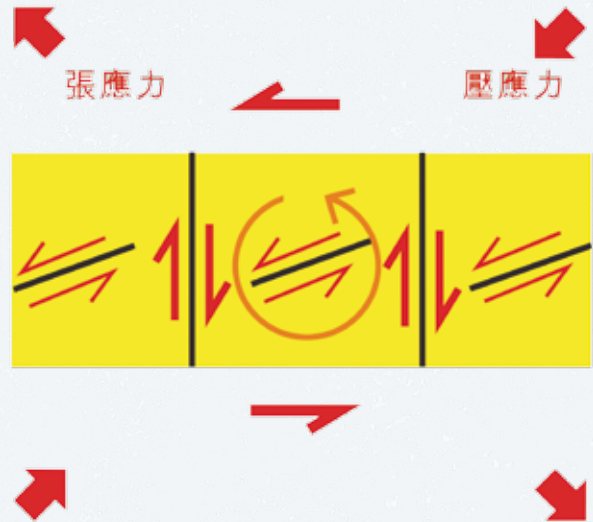


圖 5 書架斷層示意圖，以左移斷裂帶為例，地塊會稍稍逆時針旋轉

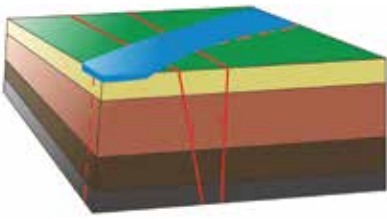
## 古佛斯瀑布成因

惠特河發育受控於前述之構造作用，斷層附近的岩石相對破碎容易受到河水侵蝕，進而形成深邃的河谷，如惠特河谷最大深度約為 70 公尺；靠近古佛斯瀑布附近河道受兩道橫移斷層影響（圖 6），呈鋸齒形「之」字幾何形狀，為古佛斯瀑布為雙階，提供其中一個關鍵因素（圖 7），另一個關鍵要素則是岩體特性（圖 8）。

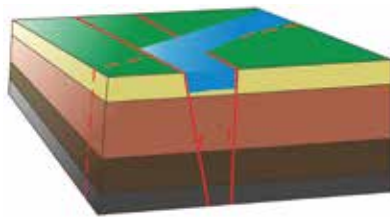


圖 6 因斷層等構造影響，惠特河發育深邃河谷且形成古佛斯瀑布

(a) 原始的河流方向



(b) 因斷層結構或破裂隙等，導致河流改變流向並下切及向源侵蝕



(c) 現今所見之瀑布形貌，仍持續侵蝕

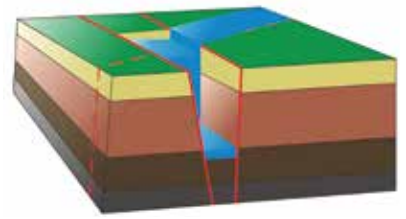


圖 7 古佛斯瀑布演化示意圖

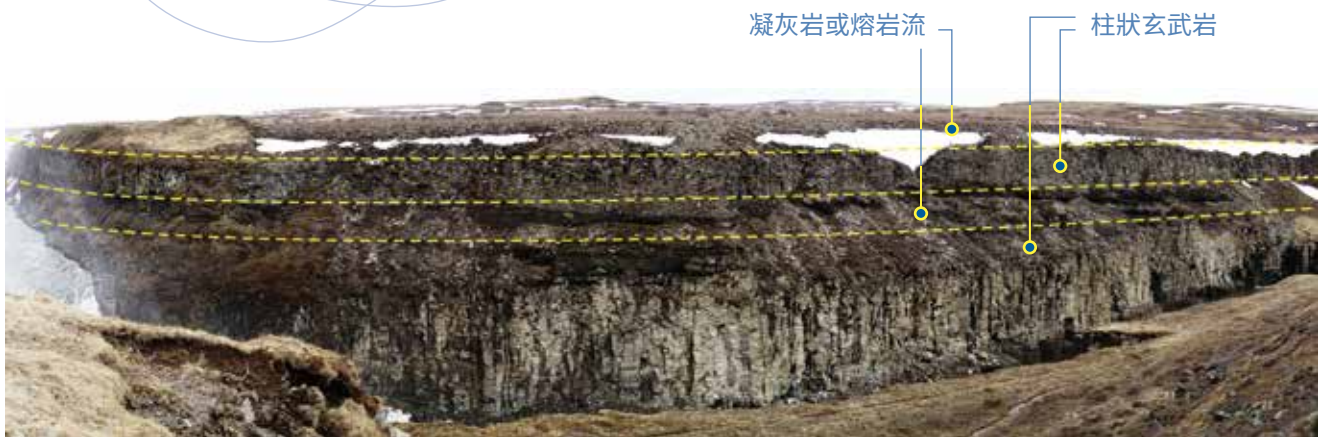


圖 8 古佛斯瀑布附近岩體剖面

當地主要組成之岩層有二，其一為存在大量垂直裂隙的柱狀玄武岩；其二為凝灰岩與或冷卻熔岩流等（圖 9）。一般可能會認為「堅硬」玄武岩對於水流能有很強之抗侵蝕能力，但真的是這樣嗎？

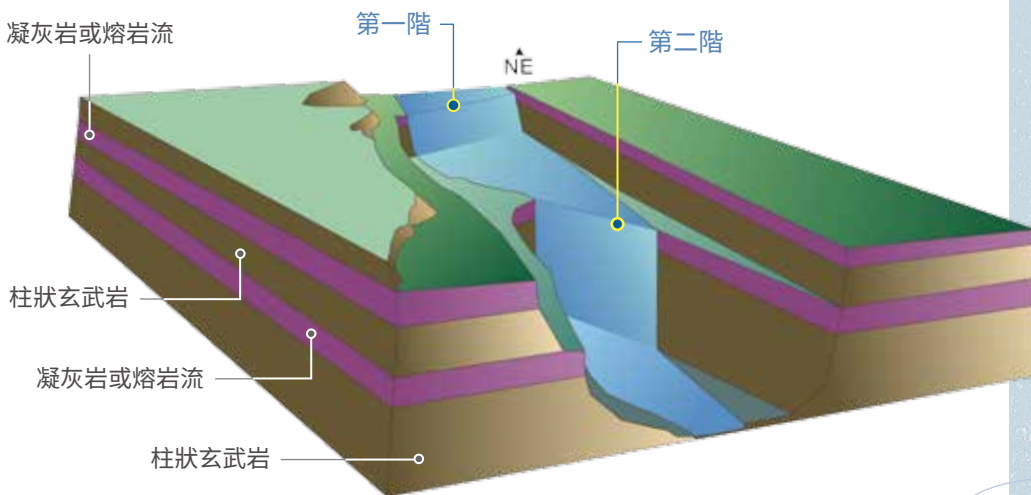


圖 9 凝灰岩或熔岩流等水平岩層與柱狀玄武岩互層，也是雙階古佛斯瀑布形成要素之一

原來玄武岩垂直的柱狀節理會因上方水壓而變脆弱；若我們仔細觀察，能發現雙階瀑布的表層岩體為凝灰岩或冷卻熔岩流等構成的水平岩層（圖 10），岩層中裂隙也較少，故相較充滿垂直裂隙的柱狀玄武岩更能抵抗河流下切侵蝕的力量。因為這兩個主要地質關鍵要素，再配合水文條件等因素，為冰島造就與尼加拉瓜瀑布旗鼓相當的壯觀瀑布！



圖 10 相當於瀑布第一階之凝灰岩層

## 後記

能有如此的美麗地景，除萬年以來的地質成因外，過去百年來，人類的作為也是關鍵！當地的故事如此闡述：「20 世紀上半葉，原先瀑布所有人希望將瀑布用來開發水力發電，但因其中一位地主女兒——托馬斯多蒂爾（Sigríður Tómasdóttir, 1874-1957）反對，而到處請命，最終獲得冰島當地民眾大力支持，讓電廠投資案破局，托馬斯多蒂爾也被視為冰島第一位環保人士（圖 11）。

因托馬斯多蒂爾，百年前的旅遊書預言沒有實現，也讓現今世界各地到訪冰島的民眾，能有機會欣賞如此壯闊的地質美景。



圖 11 托馬斯多蒂爾雕像

### 延伸閱讀：

- Angelier, J., F. Bergerat, M. Bellou, C. Homberg, 2004. Co-seismic strike-slip fault displacement determined from push-up structures: the Selsund Fault case, South Iceland. *Journal of Structural Geology*, vol. 26, 4, p. 709-724.
- Green, R. G., K. F. Priestley, R. S. White, 2017. Ambient noise tomography reveals upper crustal structure of Icelandic rifts. *Earth and Planetary Science Letters*, Vol. 466, p. 20-31. <http://doi.org/10.1016/j.epsl.2017.02.039>
- Gudmundsson, A. (Eds.). 2017. Chapter 8- Gullfoss, in the *Glorious Geology of Iceland's Golden Circle*, GeoGuide, p.105-112. Switzerland; Springer International Publishing AG, DOI: 10.1007/978-3-319-55152-4\_8.