

國際酸性地熱系統開發案例分析

工研院綠能與環境研究所研究員 彭筱涓

工研院綠能所為協助政府儘速達成再生能源政策目標，積極尋求地熱開發先進國家針對大屯火山地熱資源進行評估，釐清大屯火山區地熱潛能分布狀況，區塊劃設範圍及優先開發順序。而多年來在大屯火山地區的探勘井調查成果可見此區域儲集層普遍存在酸性特徵，而地熱井工程所使用之材料常因無法承受流體腐蝕作用而造成安全問題。為了更快速的了解國際中開發高溫酸性地熱儲集層所面臨的挑戰與解決手段，工研院綠能所蒐集共七處國際酸性電廠開發案例資料，並針對各案場之酸性流體開發克服方法進行討論，而地熱井為地熱開發過程中重要的一環且井體位於地下深處，若受到腐蝕而損壞，亦難以修復，故本次所討論之案例皆以採取措施以避免地熱井井體腐蝕進行分析。

地熱田酸性腐蝕類型包含以下二種，其一為酸性地下含水層腐蝕井體外部水泥及套管(下稱外部套管腐蝕)，其二為酸性地熱流體造成井體及地表設施內部侵蝕及腐蝕(下稱內部腐蝕)。外部腐蝕之案例共有三處，分別為紐西蘭 Ohaaki、紐西蘭 Rotokawa 及菲律賓呂宋島 Bacman 地熱田，以上三案例皆可見其金屬套管外部的水泥相對較快地受到腐蝕，腐蝕處多為局部存在，而三案例亦皆以材料之選擇作為克服方案。內部腐蝕案例則共有四處，分別為日本本州 Onikobe、菲律賓棉蘭老島 Mount Apo、菲律賓萊特 Mahanagdong 及美國加州 Geysers 地熱田。

以下依各案克服酸性方法進行簡要描述：

1. 外部腐蝕：

(1) 紐西蘭 Ohaaki

Ohaaki 地熱田之酸性流體為高碳酸氫根離子酸性溶液，為

確保井的完整性與安全性，此地熱田著重於井管材料選擇，所使用之井套管為碳鋼(K55 和 J55)套管；另針對腐蝕問題建立套管定期監測機制，藉以確認井管腐蝕程度及擬定應對措施；而當井體使用已達預期年份，即水泥固封放棄使用。

(2) 紐西蘭 Rotokawa

Rotokawa 地熱田之酸性流體為高碳酸氫根離子酸性溶液，其外部腐蝕亦是由材料選擇作為克服方法，該地熱田許多井在地下約 800 公尺處皆出現局部的外部腐蝕現象，除監控井腐蝕程度外，為延長井管使用壽命，此地熱田採用較小管徑之雙相合金(RK5 和 RK29)作為套管材料(Sewell et al., 2013 及 Pogacnik et al., 2019)。

(3) 菲律賓呂宋島 Bacman

Bacman 地熱田淺層富含硫酸鹽酸性流體，其外部腐蝕不僅造成套管腐蝕穿孔，富含硫酸鹽的流體流入井內並引發硬石膏水垢的沉澱，爾後該地區鑽探的新井如預期出現酸性含水層，套管材料則會選擇使用碳鋼和高鉻鋼(CR-22)的複合管柱(See et al., 2005)。

2. 內部腐蝕：

(1) 日本本州 Onikobe

Onikobe 地下 600 m 處為高酸腐蝕區域(Matsuda, 2017)，此地熱田曾使用 4 口 pH 3~3.5 之酸性地熱井長達 4 年。其中二口井套管使用 CR-25 合金設計，井口至分離器則使用不鏽鋼材料，如維持流體低流速狀態，則可產生鈍化垢來保護套管，並保持水井完好無損(Abe, 1993)。

(2) 菲律賓棉蘭老島 Mount Apo

Mount Apo 地熱田之地熱流體為 pH 3~6 酸性流體，其於 2013 年設置的碳鋼井體僅 3 個月即因腐蝕造成穿透性損壞，後續亦選擇於材料進行改善，重新以 316 不鏽鋼進行加工後再次投入營運，並搭配監控設備進行監測，重新規劃後之新井體及電廠預估可使用 20 年以上(Camba et al., Forthcoming 2021)。

(3) 菲律賓萊特 Mahanagdong

Mahanagdong 地熱田之地熱流體為中性 pH 高濃度氯離子滷水，此地熱田使用較大井徑的碳鋼套管，腐蝕發生後再以較小孔徑套管取代；除材料考量外，此地熱田亦注入氫氧化鈉(NaOH)進行酸鹼中和，並成功的將 pH 值從<4 提昇至 5 (Belas-Dacillo et al., 2010)。

(4) 美國加州 Geysers

Geysers 地熱田為含 HCl 飽和過熱蒸汽冷凝成之鹽酸，當過熱酸性氣體於井管內上升過程中達露點(dew point)則會冷凝為具強烈腐蝕性之酸性流體，針對此一特性，Geysers 之操作手段為透過控壓使得露點發生在地表，再利用氫氧化鈉(NaOH)中和酸性(Gallup and Farison, 2010)；另亦可針對含有 HCl 之氣體進行鹼洗滌，再透過深部注水，增加蒸汽並減少非冷凝氣(Farison, 2019)；材料上則選擇 2507 雙相不鏽鋼及超鉻合金管材以減輕腐蝕程度。

以上案例說明在低 pH 的酸性地熱系統中，亦可透過相關酸腐蝕風險降低技術策略與手段，達成酸性地熱電廠開發之目標，並藉此做為大屯山酸性地熱電廠開發之參考。

參考文獻：

- Abe M. 1993. Long term use of acidic reservoir at Onikobe Geothermal Power Plant. In: Lee KC, Dunstall MG, Hochstein MP, editors. Proceedings of the 15th New Zealand Geothermal Workshop; 1993 Nov 10–12; Auckland, NZ. Auckland (NZ): Auckland University. p. 227–233.
- Belas-Dacillo KA, Daco-ag LM, Alcober EH, Villa RR, Jr., Parayno GE, Andrino RP, Yglopaz DM, Guillan NT, Peralta JF. 2010. MG9D acid well utilization: revisiting the past and harnessing its future. In: Proceedings of the World Geothermal Congress. 2010 Apr 25–30; Bali, Indonesia. [place unknown]: International Geothermal Association.
- Camba JRB, Malibiran MAO, Tamboboy RJT, Faja KS, Sambrano BG, Aragon GM. Forthcoming 2021. The use of corrosion resistant alloy to address erosion corrosion problem in a well in Mt. Apo Geothermal Field, Philippines. In: Proceedings World Geothermal Congress; 2021 May 21–26; Reykjavic, Iceland.
- Farison J. 2019. Geysers lessons learned and EGS results [PowerPoint presentation]. Presented at Geothermal Research Society of Japan – EGS Workshop; 2019 Nov 20; Kumamoto, Japan.
- Gallup DL, Farison JR. 2010. Testing of materias in corrosive wells at the geysers geothermal field. In: Proceedings of the New Zealand Geothermal Workshop 1998; Auckland, NZ. Auckland (NZ): University of Auckland. p. 331–339.
- Matsuda K. 2017. Acid geothermal fluid utilisation in Hatchobaru and other fields in Japan. Presented at Taiwan Start to Steam 3-day

Geothermal Workshop on Acid Volcanic Geothermal Systems and the Challenges for Power Development.

Pogacnik J, Melia K, Calibugan A, Jackson M. 2019. Rotokawa annual report 2019. [Auckland] (NZ): Rotokawa Joint Venture Limited. Prepared for the Waikato Regional Council.

See FS, Fragata JJ, Solis RP. 2005. The BacMan Geothermal Field, Philippines: geochemical changes and operational challenges after ten years of production. In: Horne R, Okandan E, editors. Proceedings of the World Geothermal Congress. 2005 Apr 24–29; Anatolia, Turkey. Auckland (NZ): International Geothermal Association. p. 2415–2420.

Sewell S, Hernandez D, Winick J, Wootton D, Jackson M. 2013. Rotokawa Annual Report. 1 July 2012 – 30 June 2013. [Auckland] (NZ): Rotokawa Joint Venture Limited. Prepared for the Waikato Regional Council.