

德國 Sauerlach 地熱電廠初探及再生能源市場簡介

工業技術研究院 綠能與環境研究所 工程師 劉力維
資深工程師 李伯亨

一、簡介

再生能源憑證交易可將綠能對環境友善的價值具體化，對地熱與生質能再生能源發電業者而言，可彌補躉售制度無法涵蓋的建置再生能源設備成本，亦可於再生能源自發自用時，增加收入來源。建構再生能源憑證(Renewable Energy Certificate, REC)制度，可讓具環境永續發展理想的企業與用戶藉由購買憑證，降低企業的排碳量對環境產生的衝擊，實現環境保護之理想。本計畫團隊執行標準檢驗局地熱與生質能再生能源憑證技術發展計畫，獲得資助參訪德國地熱電廠，並與電廠、地質、地熱及機械專家進行討論交流，獲得德國地熱資源開發、電廠設計、利用及管理經驗，可作為臺灣未來地熱資源開發及憑證查核之參考。

本團隊參訪德國 Sauerlach 地熱電廠，其位於德國慕尼黑南端 19 公里之阿爾卑斯山腳邊，該電廠於 2013 年完成建造及發電，藉由井下泵浦將 1000 公尺深的熱液(飽壓態)抽取至地表提供發電系統運轉，其熱液最大流量為 400 噸/小時，溫度約 140 °C，該裝置容量為 5 MWe，除了提供慕尼黑市約 16,000 戶家庭的電力，地熱水亦作為 Sauerlach 居民之區域型加熱系統(district heating)來源，由於該電廠位處於社區旁且發電系統具有結垢問題，相關設計可作為臺灣溫泉區或地熱區開發之參考。德國再生能源電價收購制度於 2000 年開始執行，並於 2014 年強制要求再生能源電廠營運商具有自行銷售電能之義務，電力市場由躉購轉向自由化，可作為臺灣綠電憑證發展之參考。

二、研究內容

(一) 地熱發電系統分類

地熱發電依據取熱型態可分為：傳統式地熱發電又稱熱液型地熱發電系統(Hydrothermal Systems)、傳統式深層地熱發電-開放式(Enhanced Geothermal Systems)及新型深層地熱發電-密閉式(Complex Energy Extraction from Geothermal resource)，相關類型系統說明如下；其中 Sauerlach 地熱電廠屬於傳統式地熱發電，以導向鑽探技術搭配井下泵浦，在有限空間內採取多目標經營、無人化管理及低環境衝擊，以達到最佳熱能運用與開發。

- (1) 傳統式地熱發電為藉由生產井鑽井，將地底下之地熱儲集層(蒸汽及水)透過套管導引至地表進行發電，發電後之熱水藉由回注井注入回到地熱儲集層內循環再利用(圖 1)。

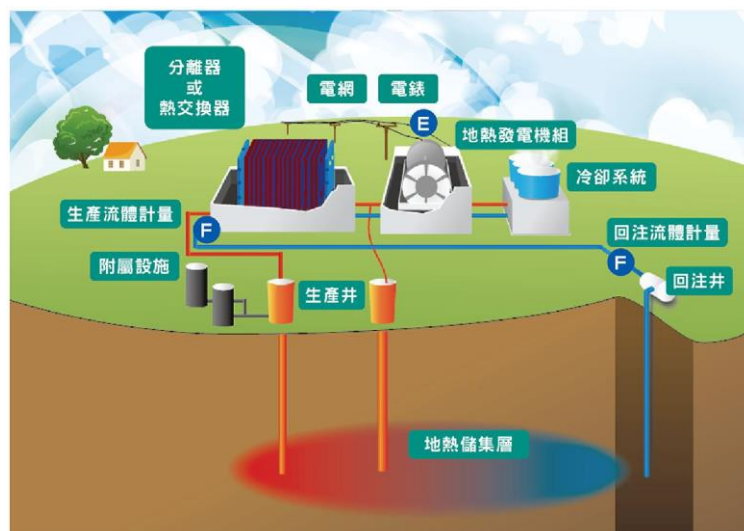


圖 1、傳統式地熱發電

- (2) 深層地熱發電依據流體循環開放方式不同，可分為開放式及密閉式地熱發電。其中，開放式地熱發電系統，乃藉由高壓流體製造人工裂隙。生產井之流體用來發電後，將其尾水回注到該地層裂隙，將地層裂隙內之熱能汲取至地表發電，依此周而復始地取熱發電(圖 2)。

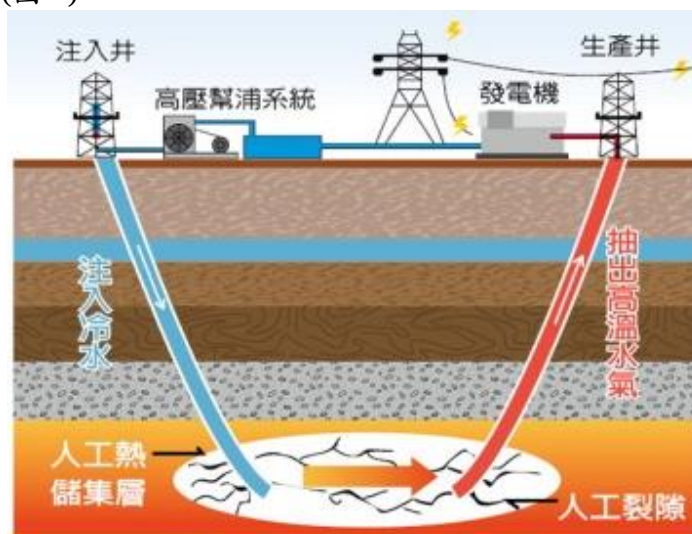


圖 2、傳統式深層地熱發電-開放式

- (3) 密閉式地熱系統，乃透過雙層套管(冷源外管、熱源內管)之方式，將地層中之熱源藉由流體取自地表發電，一般該鑽井口徑較大且以多支取熱管束所構成，以提升取熱面積及發電量(圖 3)。

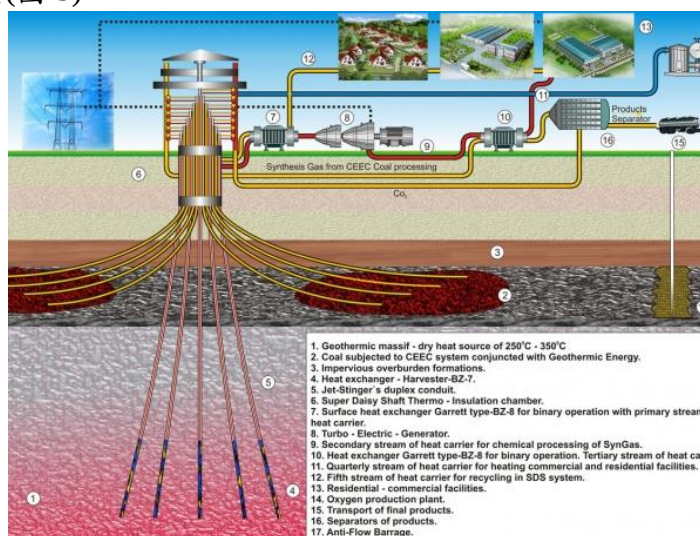


圖 3、新型深層地熱放電-密閉式(摘自: <http://sevenrocksmine.com/projects-in-motion/>)

(二) 德國再生能源收購型態轉型

德國再生能源電價收購制度於 2000 年開始執行，針對不同再生能源，提供固定收購費率 20 年；於 2004 年持續調高太陽能、生質能及地熱能之固定收購費率；2009 年再次調升風力(陸域及離岸)、水力、生質能、地熱及太陽能收購費率；2012 年開始調整再生能源補貼費率下修機制並於 2014 年開始設定每年再生能源裝置容量之上、下限度，以避免快速裝置容量擴張，影響區域電力系統供需調配及原電力饋線之容量超載。於 2017 年則依據區域電網容量來限定新增再生能源開發量。

2017 年可再生能源法為大多數的可再生能源導入招商制度，在 2014 年德國再生能源法(Erneuerbare-Energien-Gesetz, EEG)中，電價拍賣僅限於地面太陽能系統，而目前則為離岸風能系統為主流，並引進離岸風力法，該法強制離岸風電參與拍賣機制。

德國再生能源法中，提到再生能源獎勵機制之電力收購制度，促使將電價市場機制導入再生能源發電中。EEG2.0(2014)提到強制要求再生能源電廠營運商有自行銷售能源之義務、再生能源財務補貼將逐步導向透過拍賣競標之程序取得，依不同再生能源技術有不同的競標機制，由固定收購制度導向拍賣競標制度，以使再生能源電力市場多元化及自由化。

於地熱資源開發中，在德國鑽井及地熱水循環風險較高，乃由於該儲集層深度較深，直至目前為止仍為投資之阻礙且尚未與電力收購費用達到平衡。在德國地熱發電系統常與供熱、供暖一起整合應用，故發電系統當每發 1 度電(kWh)，則可得到 3 分歐元(新台幣約 1.07 元)的獎勵補助；目前躉購費約 25 分歐元/度電。

(三) Sauerlach 地熱電廠概要

地熱電廠構成要素包含熱源、冷源及發電系統，其中熱源藉由地熱井鑽鑿將地層之蒸汽或水導引上來，而發電機之膨脹器(渦輪)後端與冷卻系統銜接(冷源)，以於膨脹器前後端產生高、低壓，致使發電機組將熱能轉換成機械能，再由機械能轉換成電能。以下為 Sauerlach 地熱電廠之相關參數說明。

- (1) 為 Triplet system，包含一個生產井與兩個注入井(1 production-, 2 injection-wells)，生產方式:井下多級式泵浦(葉輪有結垢問題)-酸洗 6 個月/一次，工期一天，並回收酸液。
- (2) 井深為 4757 公尺至 5567 公尺。
- (3) 地下水位:200 公尺(非抽取狀態)~270 公尺(抽取狀態)、井下泵浦深度:1000 公尺深。
- (4) 地熱水流率最大產率 400 噸/小時，溫度約 140°C。
- (5) 採用 2 階段 ORC-process(Organic Rankine Cycle；ORC) (由 Turboden 提供技術支援)，使用之流體為 R245-fa (Penta-Fluor-Propan)。冷卻系統:氣冷式(56°C 降至 20°C 再回流至冷凝器)。
- (6) 提供電力 5100 kW、年發電量 40000 MWh、提供熱能 4000 kW、年產熱 4000 MW、每年 CO₂ 減量 36000 tons。
- (7) 鑽井工期 2007 年至 2009 年。
- (8) 電廠於 2011 年 4 月開始建造，於 2013 年 1 月竣工。電廠營運:無人化，遠端監控(3 天巡檢一次，檢查工作流體是否洩漏)；中控室位於慕尼黑。

(四) Sauerlach 地熱電廠建置

此電廠利用地熱流體取熱發電，並於冬季時，由供電轉為供暖，成為多目標利用之電廠。電廠周遭由於住有居民，故在開發上採用導向鑽鑿技術鑽鑿四口井(一口生產井、兩口回注井、一口廢棄井)，以降低電廠所需之面積(圖 4)，透過導向鑽鑿開採地層內之熱源，並利用生產井及回注井之槽孔水平距離以換取較大之熱交換面積(圖 5)，其水平距離可達 2 公里。本取熱系統利用取熱不取水之方式，採取全量回注方式，以維持儲集層之壓力，乃為電廠運維之重要因子。



圖 4、Sauerlach 地熱電廠

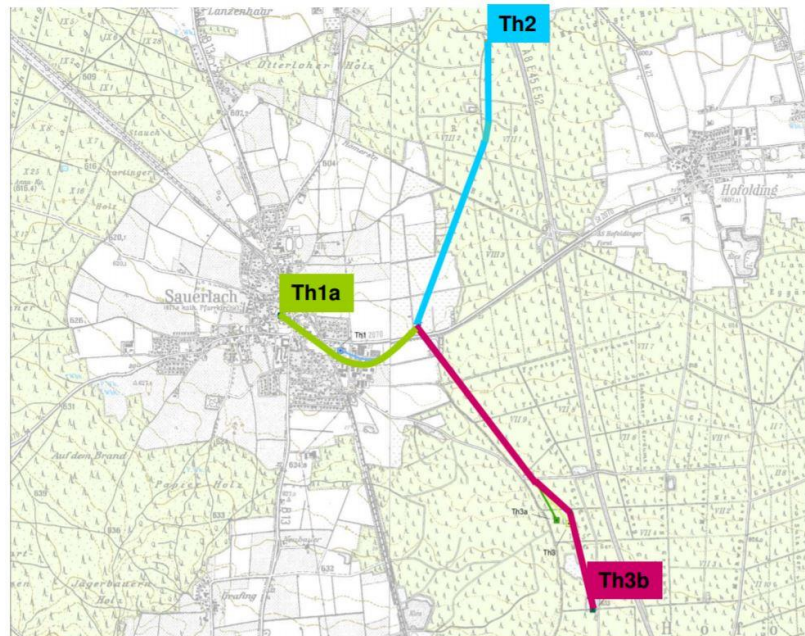


圖 5、生產與回注井投影位置圖(摘自: Geothermie-Heizkraftwerk Sauerlach, SWM, 2017)

本發電廠由於地下水位面低於地表面，藉由井下泵浦將地下熱液抽引至地表，看似能量不足，但在整個電廠經營與管理上，其實具有較高之安全性(圖 6)。但由於該區域地質影響，會有結垢之問題產生，故在井下泵浦及儲集層管理之維護上，佔有相當大的比重在。

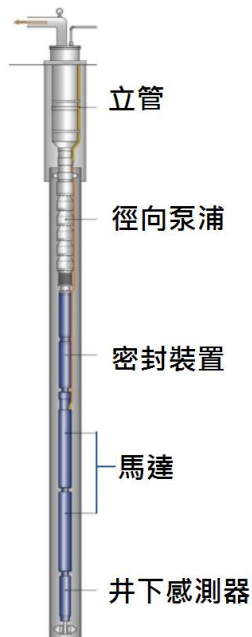


圖 6、井下泵浦結構與安裝(摘自:編修 Geothermie-Heizkraftwerk Sauerlach,SWM, 2017)

本電廠為提升整體開發與使用效率，採用兩階段之取熱模式(圖 7)，以提高取熱及發電效率。其中包含高溫取熱發電迴路 A、低溫取熱發電迴路 B 及區域供暖取熱迴路 C。

本電廠為避免地熱流體造成蒸發器損壞，其設計自動過濾系統，以攔阻地層之砂質或懸浮物質；壓力容器包含兩套預熱器、蒸發器及工作流體儲存槽(圖 8)；透過殼管式熱交換器進行取熱，使工作流體膨脹產生壓力能推渦輪旋轉做功。

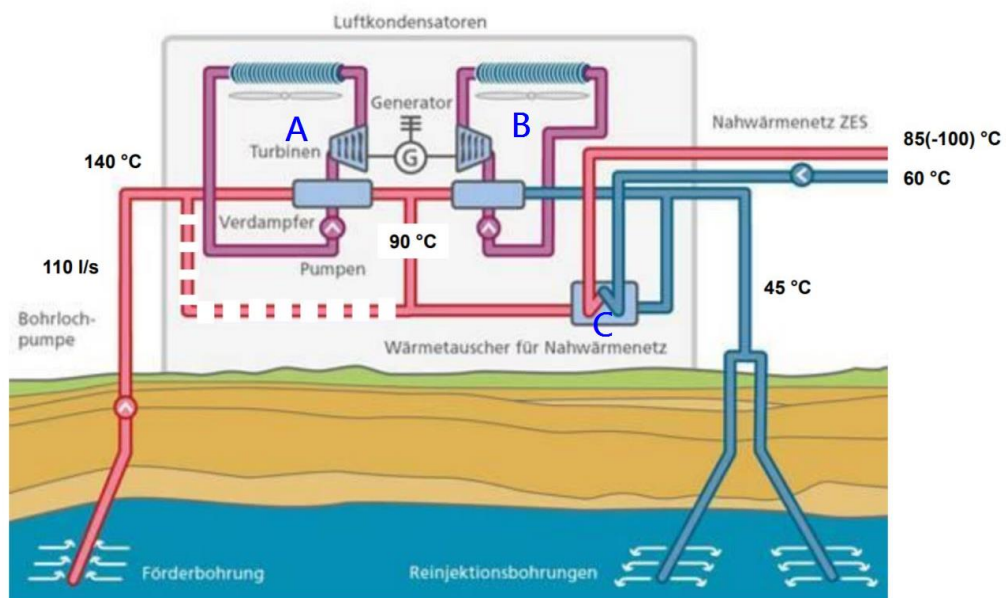


圖 7、取熱與發電系統配置圖(摘自:編修 Geothermie-Heizkraftwerk Sauerlach,SWM,2017)

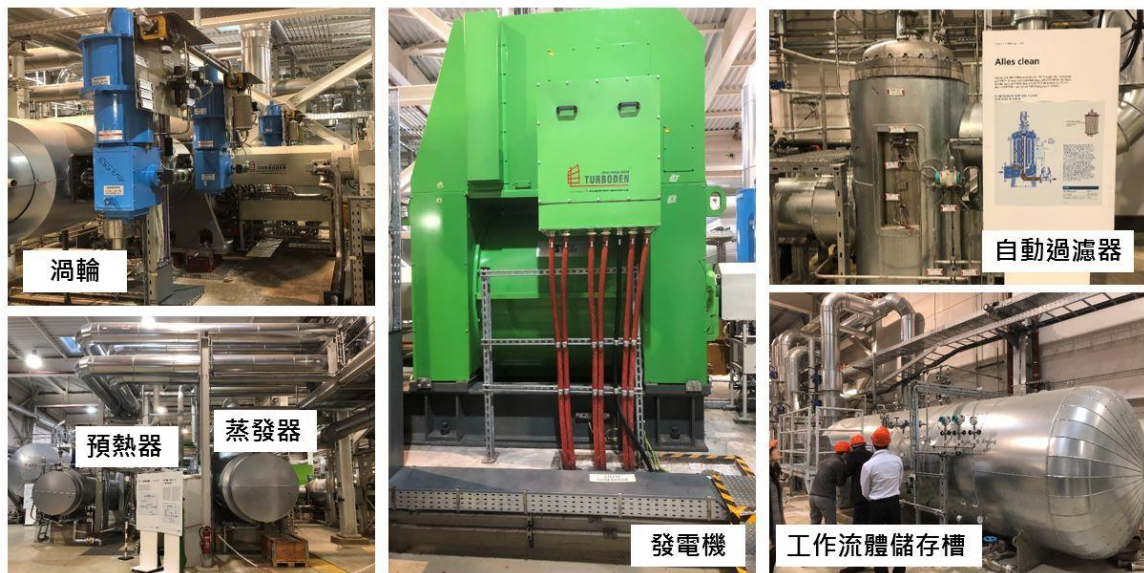


圖 8、發電系統元件

為了提高發電量，Turboden 公司針對 Sauerlach 地熱電廠的發電裝置是採用有機朗肯 (Organic Rankine Cycle；ORC) 雙循環系統；以進口溫度 140 °C 的地熱水而言，與相同熱交換面積的單級循環裝置/不同工作流體相比，可增加約 10 % 的淨發電量，如圖 9 所示。具備兩道獨立的工作流體迴路的優點還包括當其中一個循環迴路需要關閉以進行維護工作時，另一道迴路亦可以獨立運作。

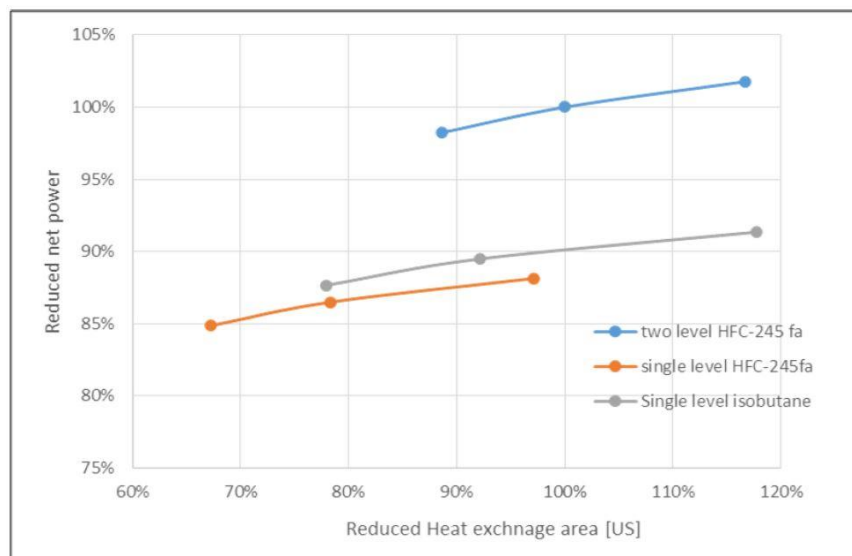


圖 9、Sauerlach 地熱發電系統之熱交換器與效率比較(摘自: Turboden Geothermal References in Bavaria: Technology, Drivers and Operation, 2015)

(五) Sauerlach 地熱電廠之構成要素及設計

地熱流體之酸鹼值、工作流體蒸發溫度、冷凝壓力及電廠營運管理之考量下，相關電廠構成要素之設計相當重要，以下整理 Sauerlach 地熱電廠各個系統或迴路之設計原則，可作為臺灣未來地熱電廠設計之參考(參考來源: Turboden Geothermal References in Bavaria: Technology, Drivers and Operation)。

(1) 熱交換器及管線

熱交換器具有傳遞熱能之功能，可由地熱水熱能傳遞至工作流體側。工作流體吸熱變成汽態高壓之工作流體。殼管式熱交換器應用於本發電廠之高溫(HT)及低溫(LT)循環系統。避免腐蝕及使用年限問題，熱交換器材質以適用於該地熱水質條件，經評估後採用超級雙相不銹鋼 SAF2507(包含:板材、三通管線、隔板及熱交換器管)。位於熱交換器與發電機以外之輔助元件(變壓器、逆變器及支撐結構)之內部連接管線材料為奧氏體不銹鋼材質。位於工作流體側之熱交換器及大部分管線材料則為傳統之碳鋼材質。高溫與低溫循環系統均配置有關斷閥，能夠隔離熱交換器至各區段管路(維護操作使用)。關斷閥裝設於地熱水側及工作流體側，藉由小區域之排空以進行維護保養作業，可大幅縮短操作時間。

(2) 氣冷系統

地熱流體吸收之熱能藉由渦輪轉換成機械能，而作功後段(渦輪出口端)之汽態工作流體則藉由氣冷式冷卻系統將其冷凝成液態。本電廠主要考量工作流體、自耗能及噪音影響，以採用氣冷式冷卻系統。允許噪音強度、電源自耗，為傳動系統與馬達選用規格之重要參數(當環境噪音允許程度較低時，風扇可選用小型氣冷式風扇或高強度玻璃纖維材質葉片)。散熱管束由碳鋼製成，熱交換管外側具有小型翼片，其材質為鋁質，本系統之冷卻系統風扇當停止率達 35%仍可正常發電運轉。為了不同冷凝壓力之限制影響，此冷凝器由許多小型氣冷式冷凝系統以平行排列組合而成。

(3) 有機朗肯發電系統之輸送泵浦

本電廠位於 Sauerlach 為當前最高利用效率的地熱電廠，此電廠採用不同的組合型態設計而成。高溫與低溫迴路各裝設一顆泵浦，並各備有另一顆完全相同的泵浦當作備用使用，並透過控制系統監測；當發生任何異常狀況時，系統自動切換至另一顆泵浦，使整個有機朗肯發電系統維持運轉。

(4) 排水系統

本電廠大約有 70 噸的工作流體，開發成本與工作流體的種類影響排水系統之設計。至於氣冷卻系統的設計重點在於限制避免工作流體的滲漏，並在不危及維護操作當下，其排水能力能確保單獨排放本發電系統各迴路中之不同體積的流量。當本發電系統之過濾器阻塞時，應可切換至另一顆備用泵浦，並保持整個系統持續運轉，在此同時，方可進行過濾器之更換及清除。排出的液態相流體及回收的蒸汽導引至主要回收槽體內，再執行清理過濾器並裝設回去，維修期間不影響營運及發生發電系統下降之現象。而排水系統設計應考量包含：

- A. 回收槽/回收裝置具有足夠容積以存放整廠之工作流體。
- B. 兩種輸送設備，一組泵浦以輸送液態工作流體，由儲存槽至發電機組端，另一個則使用空壓機，提取蒸汽流體至冷凝器，並再輸送至主要儲存槽內。
- C. 冷水循環使用 R-134a 當作工作流體，以冷卻蒸汽態之 HFC-245fa。

(5) 輔助設備

有機朗肯發電系統通常由不同輔助系統所構成，若該輔助設備與電廠營運非常密切，其設計應以可靠度最高為原則。輔助設施與一般電廠營運相關性包含：

A. 潤滑迴路

本系統總共有六個潤滑迴路系統，其高可用性之保證為各備用泵浦及安裝在各迴路中的備用儀器儀表均正常運作。此外其配置必須完整將高溫及低溫迴路系統區隔開來管理。若在停止其中一個循環迴路時，需要再啟動此電廠，只需要開啟之潤滑油迴路。

B. 輔助冷卻系統

此密閉迴路以混合水與乙醇，此系統以冷卻發電機渦輪及齒輪箱之潤滑油，該迴路由以下構件所組成：板式熱交換器以冷卻潤滑油(兩組氣冷系統及兩個泵浦所組成)。在潤滑迴路中，備用泵浦及儀器儀表之裝設，以達到最高效率之使用。在此迴路中氣冷系統也建置備源。但事實當一座氣冷系統失效時，此第二座氣冷系統仍可透過增加風散轉速以消散其熱能。因此在一般正常運轉時，其自耗功較低及在發生故障時可保證其電廠之正常運作。

C. 不凝結氣體清除系統

此系統用以監測進入發電系統之非凝結氣體(如空氣)及透過自動模式下進行消除(空氣可能於運轉時或在冬季，其冷凝壓力低於大氣壓力而進入發電系統內)；其電廠產生電力乃根據其相對設計冷凝壓力值。故在維護不凝結氣清除系統時，關閉發電系統是不被允許的。

D. 儀器儀表

為保證系統之可靠度，該儀器儀表主要調節迴路(如:液位、壓力)或主要警報且均有備用源設計並與不同人機介面上輸入/輸出板片連接。

E. 離散式控制系統

此控制系統使用 PCS7，由該模組管理及控制整個電廠。備用之中央處理器及伺服器均安裝在發電系統上；此電廠可藉由遠端控制或自動控制以完成發電機啟動及停機程序。

F. 變壓器

升壓及降壓使用之變壓器均有備用系統之設計。

(6) 孤島模式

位於 Sauerlach 地熱電廠，依據電力設計其電力輸配採用孤島模式。假設外電失效，則此發電系統仍可供應輔助設備電力(包含井下泵浦)，因此維持電廠之運轉。此孤島模式已成功應用及完成測試，在於進氣閥門設計，能夠精細調節電力輸出及減緩渦輪超速之危害；孤島模式之優勢為：

A. 整個電廠之營運維持及與新的電網重新聯接之特性。

B. 花費較少的時間在於運轉前檢查及重新啟動電廠。

C. 限制啟動及停止地熱泵浦循環次數。

D. 大量沉澱物沿著地熱井下垂直段產生，一般侷限在於互相連通之地熱泵浦與地表上電力座。有時此沉澱物可能會造成井下泵浦啟動異常。故需要長時間檢修及昂貴的費用對營運影響可想而知，除此之外必須卸下井下泵浦及清潔此連接之電力線。

E. 過濾器使用於地熱水循環迴路中，以避免流體管線中阻塞。事實上，當電廠停止運轉，其增加結垢物於管線中或過濾器中沉澱之風險。清除作業需要時間與金錢及對妥善率之負面影響很大。

F. 可增加多目標使用性，以分配熱能至區域供暖使用。

三、結論

德國之 Sauerlach 電廠開發技術包含導向鑽鑿及井下泵浦(深度 1000 公尺)抽取技術等，值得臺灣引進或開發。其中導向鑽探可提升臺灣在有限空間內開發或在國家公園之地熱開發限制下，達到最有效之土地利用及最低之環境影響衝擊。對於井下泵浦使用，雖然佔維護成本相當大的比重，但其具有管理簡易及安全性高的優點，當發電系統異常或是需檢修時，僅需控制井下泵浦停止，熱源可作最有效之管理及調控，在臺灣地熱或溫泉之非自湧井條件下，可採用此井下泵浦抽取技術，以加速地熱能源之開發與管理。

Sauerlach 地熱電廠採用無人化電廠之管理，透過網際系統連線監控發電數據、監測儀器隨時檢測高壓段或法蘭端口是否洩漏工作流體及搭配定期人員巡檢，以達到最有效之管理及發電模式，可作為臺灣離散式或大型電廠設計之參考。

Sauerlach 地熱電廠以多元化經營，結合博物館、發電及供暖並搭配兩階段取熱模式，以增加約 10 % 的淨發電量；採分段取熱系統，其中一套系統檢修或異常狀況時，持續由另一套系統持續取熱發電、另外透過相關泵浦、過濾器或是冷卻系統之備源建置、超裕度設計及搭配變頻設備，以大幅提升整體系統之可靠度及發電效率。

對於結垢潛能較高的場址，酸洗為最有效率清除管內及裂隙(儲集層)結垢物之工法，臺灣由於地下水資源豐富，故在此工法使用上受到許多限制，但在德國如今仍採用酸洗作業，其主要原因在於儲集層(開採深度)較深及有效率之回收及處理酸液，可作為臺灣結垢潛能區開發評估。

德國積極開發再生能源。即使普遍地熱資源不佳(儲集層溫度約 140℃)，仍加深鑽井深度(普遍至深度 5000 公尺)與使用井下抽取泵來進行地熱資源利用。同時，在建構優良之投資環境方面，德國配合較高躉購費率(25 分歐元/度電)、專業嚴謹的第三方電量查驗與檢測驗證制度，以及地熱探勘保險來推動地熱發電。本文以臺灣地熱資源雖屬於中低溫型，但普遍較德國為佳，儲集層溫度高於 140℃之深度多可以在 2000 公尺以內獲得，且多為自噴井，適合雙循環地熱發電系統。本文以德國 Sauerlach 地熱電廠之雙循環發電系統為例，分析商轉之雙循環地熱發電相關系統，可提供臺灣地熱發電再生能源憑證之現場電量參考。

四、誌謝

本次組團參訪德國與冰島地熱電廠，感謝經濟部標準檢驗局之經費補助，致使本參訪團得以順利成行。

五、參考文獻

1. 闕棟鴻，103，德國計劃刪減再生能源補貼與產業電價折扣，工業技術研究院，臺灣。
2. Joseph Bonafin, Marco D Carria, Mario Gaia1 and Andrea Duvia, 2015, Turboden Geothermal References in Bavaria: Technology, Drivers and Operation , Proceedings World Geothermal Congress, pp.1-8.
3. Josef Frey and Andrea Miller, Munich – a pioneer in climate protection. The SWM renewable energy strategy, 2017, SWM, pp.1-37.
4. Stefan Birle, Geothermie-Heizkraftwerk Sauerlach, 2017, SWM, pp.1-16.
5. Paul Gipe , 2011 , Germany to boost geothermal feed-in tariffs , 2018/7/7 檢索，取自 <http://www.renewableenergyfocus.com/view/19026/germany-to-boost-geothermal-feed-in-tariffs/>.
6. Stefan Birle , 2011 , Geothermal Feed-in Tariffs Worldwide , 2018/7/20 檢索，取自 http://www.wind-works.org/cms/index.php?id=83&tx_ttnews%5Btt_news%5D=254&cHash=6eb3845eb4cac7b037b4267b4118f645.
7. Joseph Bonafin , 2017 , Geothermal Binary Plants Optimized For Zero Emission Operation , 2018/7/20 檢索，取自 <http://unmig.sviluppoeconomico.gov.it/unmig/info/omc2017/-presentazioni/geotermia/bonafin.pdf>.
8. <http://sevenrocksmining.com/projects-in-motion/>