

摘要

臺灣科學園區為高科技產業之核心聚落，其製程設備與無塵室運作需長時間、高穩定度電力供應，對電力品質要求極高。另為因應我國淨零排放政策，政府以能源轉型與減碳為戰略核心，並將再生能源發展視為達成淨零的關鍵途徑。因此，推動再生能源不僅為減碳需要，亦可強化能源自主性、提升供電韌性與分散風險。

本研究考量小水力發電具穩定供電、低碳排放、長壽命及可與既有水系整合等特性，適合作為科學園區實現能源韌性與碳中和目標的分散式綠電方案。園區內五類潛在水源「配水管網壓差、製程冷卻水、污水出流水、灌溉圳道及雨水滯洪池」皆具可利用之水位差與流量條件，可轉化為再生能源。若於不影響主要水利與製程功能下導入適配技術，不僅能於非尖峰時段提供穩定綠電、降低對外部電網依賴，亦可提升再生能源占比，實踐「一水多用」與永續用能理念。

惟科學園區推動小水力發電的挑戰並非侷限在技術或經濟面，而在於法規與行政程序複雜。涉及水利署、能源署、台電及園區管理局等多重機關，行政審查冗長，水權申請、躉購電價認定及設施安全規範等問題皆影響民間參與意願。為此，本研究建議建立「專案整合模式」與單一審查窗口，釐清法規定位，使能源回收型發電可納入躉購電價制度。技術面推動模組化與智慧化，結合能源管理系統 (EMS) 提升運轉效率；經濟面採分階段示範與碳權、綠電交易結合；治理面則導入公私協力 (PPP) 模式，形成共管共營的平台架構。

透過制度簡化、技術整合與公私協力，小水力發電許可成為園區推動低碳轉型與循環用水的關鍵力量，展現高科技產業邁向永續與智慧能源管理的具體實踐。

關鍵字：小水力發電、科學園區、碳中和

目錄

壹、	前言.....	1
一、	研究緣起.....	1
二、	研究方法.....	1
貳、	小水力發電系統.....	2
一、	小水力發電系統介紹.....	2
二、	小水力發電應用現況.....	4
三、	小水力發電之困境.....	6
參、	小水力發電應用於臺灣科學園區的可行性評估.....	9
一、	科學園區潛在水力資源.....	9
二、	技術可行性分析.....	11
三、	經濟效益分析.....	12
四、	環境影響分析.....	13
五、	法規限制分析.....	15
六、	風險評估.....	17
肆、	結論與建議.....	20
一、	整體結論與應用優勢.....	20
二、	關鍵推動策略與建議措施.....	20
伍、	參考文獻.....	23

圖目錄

圖 1	小水力發電應用於科學園區之優勢及推動策略.....	22
-----	---------------------------	----

表目錄

表 1	小水力發電水輪類型之功能與差異彙整表.....	2
表 2	重點國家小水力發電技術類型與適用場域差異分析彙整表.....	7
表 3	科學園區潛在水力資源所適用之小水力發電技術分析.....	11
表 4	科學園區潛在水力資源之經濟效益評估.....	13
表 5	科學園區潛在水力資源之環境影響評估.....	14
表 6	小水力發電之耐變流性能的設計方式.....	18
表 7	小水力發電應用於科學園區之推動建議措施.....	22

壹、前言

一、研究緣起

臺灣科學園區為我國高科技產業的重鎮，半導體、光電與精密機械等產業集中於此，不僅推動國家經濟發展，在全球供應鏈亦扮演重要角色。然高科技產業對能源需求極大，尤以晶圓製造廠與精密設備的運轉，需有長時間的電力供應穩定性。如部分科學園區中的大型半導體製造廠，其單一廠區的電力需求已相當於一個中小城市的規模，凸顯高科技產業對能源的龐大需求，因此，所用電力呈現尖峰時段需求高、全年穩定負載的特性。在全球淨零碳排轉型的浪潮下，國家發展委員會於 2022 年 3 月 30 日公布「臺灣 2050 淨零排放路徑及策略總說明」，藉由推動再生能源、能源效率提升及低碳製程等政策，以落實淨零轉型目標。^[1]

有鑒於此，為配合 2050 淨零排放及能源轉型政策，除藉由發展太陽能發電、風力發電、水力發電、生質能、地熱能、海洋能等前瞻能源科技^[1]，國家科學及技術委員會亦於 2023 年 3 月提出「淨零科技方案」^[2]，透過 5 大淨零科技領域（永續及前瞻能源、低碳、負碳、循環、人文社會科學）之整合推動，加速技術落地應用與導入前瞻科技研發，以降低對化石燃料的依賴，進而減少碳排放，同時建構穩定電力供應系統。另賴清德總統於 2025 年 10 月 18 日為小水力發電產業發展論壇致詞中表示政府近年來已將小水力發電納入能源轉型政策，期許產官學界持續跨域合作，讓小水力發電在能源轉型中發揮更大作用。^[3]

然而，科學園區的電力需求與再生能源供給之間仍存在顯著差異，因此，如何兼顧能源韌性、降低碳排放與產業永續，成為當前重要的課題。在此背景下，小水力發電 (Small Hydropower) 作為一種環保且穩定的再生能源，且具備分散式、可與既有水利或排水系統結合、運轉穩定的特性，逐漸成為能源供應和永續發展的關鍵選項。^{[4][5][6]} 因此，若能在科學園區周邊導入，結合工業用水循環系統、再生水廠排水、甚至園區防洪排水設施，不僅能將廢污水流轉化為綠電，亦可增加園區能源自主性，減輕對外部電網的依賴。

二、研究方法

本研究蒐整小水力發電之特性、發展及應用現況、困境，並評估應用於科學園區的可行性進行探討，進而提出可行性策略，其研究方法如下所示：

（一）資料蒐集與彙整：國內外小水力發電之發展及應用現況、小水力發電應

用的困境。

(二) 資料分析：小水力發電應用於科學園區之可行性分析。

(三) 建議研析：小水力發電於科學園區落地應用的可行建議。

貳、小水力發電系統

一、小水力發電系統介紹

(一)技術特性

臺灣小水力發電通常指裝置容量未達 20 MW (百萬瓦) 的水力發電系統，相較於大型水壩式水力發電，小水力發電多屬分散式、低衝擊能源，多以河川、排水或灌溉渠道、再生水系統中的水位落差來進行發電，因此，具有環境影響低、運行穩定、壽命長等優勢。^{[4][7]} 其發電原理為水流因高低落差產生位能差，經由進水口導入壓力管道推動水輪機旋轉，進而帶動發電機產生電能，產生的電力透過變壓器與電網相連，最後透過控制併網系統輸送至電網或在地使用。^[8]

多數小水力發電專案屬於規模小且多應用於「流域取水→引水→落差→水輪→發電」的 run-of-river (川流式) 系統，常用的水輪機組類型依據水頭差異包括衝擊式 (Pelton) (多用於高落差) 和反應式 (Francis、Kaplan/Propeller) (多用於中、低落差) 水輪，其功能與差異詳表 1。^[9] 小水力發電具有中高轉換效率 (視水輪類型與部分負載而定)、運轉成本低、可長期穩定發電等優點。然而，小水力發電仍具有初期建置成本、取水水權、河川生態影響、季節性流量變動等問題是技術設計時必須克服的。^{[5][10]}

表 1 小水力發電水輪類型之功能與差異彙整表

水輪機種類	適用條件	主要功能與特性	適用場域
佩爾頓式 (Pelton)	高落差(>50 m) 低流量	將水的位能高效轉化為動能。採用噴射式單輪或多輪設計，是高山溪流或微水力離網系統的最佳選擇	高山地區、小型山溪水力發電、偏遠離網社區
法蘭西斯式 (Francis)	中落差(10–200 m) 穩定流量	將水的位能與動能轉化為機械能。採用半軸向設計，具備高效率和優異的調峰能力，適合併網發電	中型水庫、灌溉渠道、河川、分散式併網小水力電站
卡布蘭式 (Kaplan)	低落差(2–30 m) 高流量	將水的動能直接轉化為旋轉動力。採用軸向水流設計，其可調式葉片能自動適應不同流量的變化，維持發電效率	河道徑流、灌溉渠道、工業排水、低落差河流小水力
螺旋槳式 (Propeller)	低落差(1–15 m) 高流量	將水的動能直接轉化為旋轉動力。能藉由調整葉片角度，有效解決氣穴現象 (Cavitation) 問題	渠道、圳路、自來水管線或水壩

資料來源：1. Paish, O. (2002)^[5]、U.S. Department of Energy. (2021)^[11]、IHA (2023)^[12]。

2.本研究自行彙整。

(二)應用潛力

小水力發電作為一項成熟的再生能源技術，其應用潛力極為廣泛，包括：山區溪流、農業灌溉渠道、都市自來水管網的壓差回收、以及工業廢水或排水系統等。^[5]

1. 核心優勢與效益^{[10][13]}

(1)高穩定性與可靠性：發電穩定度高，不受日照或風力等間歇性因素影響，能有效彌補風能與太陽能的間歇性不足，且可作為分散式基載電力來源，對於偏遠或離網地區的能源供應尤其具有關鍵價值。

(2)經濟與環保效益：發電過程不需燃料，具有低碳環保特性，且設備壽命長（約 20-30 年）、維護成本低。

(3)經濟可行性：雖然初期投資相對較高，但在合適的水文與工程條件下，透過長期的營運與維護，其平準化能源成本 (Levelized Cost of Energy, LCOE)¹能夠與其他再生能源競爭，證明其在能源結構中具備經濟可行性。

2. 規劃效率提升：透過利用地理資訊系統 (GIS) 結合水文資料分析，開發者可以更精準地盤點潛在的開發點位，從而大幅提升小水力發電專案的規劃與實施效率。^[14]

(三)政策面

我國已將小水力發電視為達成淨零轉型目標的重要環節，並透過多面向的政策工具積極推動其發展。^{[3][15][16][17]}

1. 政策誘因強化：藉由躉購電價 (Feed-in Tariff, FIT)² 制度，針對不同發電級距的小水力發電專案，提供差異化的收購費率，以鼓勵民間投資。

¹ **平準化能源成本**：提供一個能在不同發電技術中相比較的成本基準。意即先計算一個能源系統在整個壽命期間所需的成本（資本支出、維運成本等），再除以系統預計能產生的能量，即可得出每單位（千瓦小時，kWh）能源的生產成本。因此，平準化能源成本乃是評估能源系統在整個生命週期內生產每單位能源（每千瓦時）的平均成本，故可用於比較不同發電技術的經濟效益，將所有相關成本（包括建置、運營、維護和燃料成本）分攤到預計的總發電量上。

² **躉購電價**：一種推廣再生能源發電保證收購制度。與固定金額的補貼不同，躉購是由政府或台電公司以特定費率在特定年限收購所產生的電。目前躉購費率視裝置容量大小，分為政府規定及競標價兩種定價方式。小水力發電之費率依據裝置容量的不同級距而不同。

2. **潛力場址盤點**：與經濟部水利署等單位合作，積極盤點農田水利設施及既有河川的潛在發電機會，以發掘穩定且可開發的資源。
3. **開發流程簡化**：透過簡化行政審批與許可流程，有效降低開發業者的設置成本與技術門檻，加速專案落地。

在國際上，世界銀行與國際金融公司 (IFC) 等重要機構皆強調小水力發電在能源轉型中的關鍵角色，並要求專案必須嚴格兼顧河川生態流量維持、魚道設計及環境影響評估。^[18] 國內相關研究亦指出，臺灣的小水力發電政策推動，仍需與水權協調及環境保護配套措施緊密結合，才能有效提升社會的接受度，實現能源發展與生態保育的雙贏。^[19]

二、小水力發電應用現況

針對國內外應用小水力發電之應用現況、政策、挑戰及未來趨勢等進行彙整，以了解各國對小水力發電發展，同時彙整重點國家在小水力發電技術類型與適用場域之差異，如表 2。

(一)美國^{[11][20]}

1. **現況**：美國的小水力發電主要集中於現有水利設施改造（非動力水壩）、川流式應用，及部分工業管道或灌溉渠道加裝小型水輪的分散式應用。美國能源部指出，超過 90,000 座非動力水壩具備加裝水力發電潛力。
2. **政策/優勢**：聯邦能源管理委員會 (FERC) 對 10 MW 以下小型專案設有簡化許可程序。因此，小水力發電被認為最具經濟性，且具備低落差、低環境衝擊、分散式與模組化等特性。
3. **未來趨勢**：聚焦於既有設施改造、分散式電網整合與智慧化管理。藉由智慧化系統與遠端監控，將效率與可靠性最大化，並與微電網或儲能系統整合，支持地方能源自主和緊急備援。

(二)挪威^{[21][22]}

1. **現況**：作為全球水力發電比重最高的國家之一，小水力電站主要分布於山區與河谷，用於補充地方電網和為偏遠地區供電。
2. **挑戰**：政府近年來加強對水域生態系統的環境保護，直接限制了新建小水力發電廠的開發。
3. **未來趨勢**：發展核心轉向環境友善、智慧化管理與社區分散式電力，旨

在平衡能源供應與生態保護。

(三)巴西^{[12][23]}

1. **現況**：儘管電力結構仍以大型水力發電為主，小水力發電占比不高。但因氣候乾旱與能源結構多元化的需求，市場對小型、低環境衝擊的專案關注度提高。
2. **挑戰**：氣候乾旱對大型水力發電的影響，促使市場尋求分散式替代方案。
3. **未來趨勢**：定位為「區域補充能源」，並積極納入分散式發電市場，以減少對大型集中式電力的依賴，增強能源安全與結構多元化。

(四)印度^{[24][25]}

1. **現況**：將小於 25 MW 定義為小水力發電並納入再生能源。主要集中於喜馬拉雅山區及東北部地區，總可開發潛力超過 20 GW，截至 2024 年已開發約 4.9 GW。
2. **政策/措施**：透過技術升級、財政補助、躉購電價 (FIT) 及水資源整合等措施推動。
3. **未來趨勢**：發展核心是為偏遠地區提供電力與併網。

(五)日本^{[26][27][28]}

1. **現況**：將小於 1 MW 定義為小水力發電。主要利用現有灌溉渠道、水庫等基礎設施進行升級改造。
2. **優勢**：減少環境影響並提高能源利用效率。
3. **未來趨勢**：隨著對低碳能源需求的增加，小水力發電在地方能源自主和災後重建中的角色將更加重要。

(六)韓國^{[29][30][31]}

1. **現況**：預計至 2030 年每年新增 7 GW 的可再生能源容量，其中包括小水力發電，以提高能源結構的多樣性。
2. **政策/挑戰**：韓國國務院修訂「新及再生能源開發，利用和推廣促進法」施行細則，提高強制性再生能源供給比率（2026 年目標達 25%）。然而，產業界面臨太陽能原料價格高漲、發電收益性不如預期等挑戰，使達成目標具有難度。

3. **未來趨勢**：著重於與其他可再生能源（如太陽能、風能）的整合，以提高能源供應的穩定性與可靠性，並將併網和環境保護作為主要發展目標。

(七) 中國^{[32][33]}

1. **現況**：作為全球水力發電裝機容量最大的國家，小水力發電主要為依附於溪流、灌溉渠道與既有水利工程的川流式電站，多集中在偏遠山區與農村地區。
2. **政策/挑戰**：國家規劃中仍大力發展大型水力發電項目。但在「十三五」規劃中，提出了嚴格控制中小流域之中小型水力發電開發的要求。
3. **未來趨勢**：主要發展趨勢為現有設施升級改造、環境友善與碳效益專案，並配合智慧化監控以提高既有資源的利用率。

(八) 臺灣^{[15][16][17][19][34]}

1. **現況**：臺灣地形落差大、雨量集中且灌溉設施密集，具備發展潛力。截至 2024 年，商轉中小水力發電廠共有 30 座，裝置容量總計為 152.2 MW。
2. **政策/措施**：透過智慧控制、耐洪設計與躉購電價 (FIT) 政策推動。
3. **未來趨勢**：發展核心為既有水利設施升級（灌溉渠道、自來水系統及工業排水設施）、一水多用、分散式併網。目標是強化能源韌性，在分散式能源與減碳政策中扮演補充角色。

三、小水力發電之困境

小水力發電雖具備分散式供電、環境友善及能源在地化等多重優勢，但在實際推動與普及化過程中，仍面臨來自技術、環境、政策、經濟四大面向的挑戰。綜合國內外發展經驗，其主要困境分述如下：

(一) 技術面

1. **發電穩定性受限**：河川的水文條件易受季節性變化及氣候變遷影響，導致發電量不穩定，難以精準預測與整合至電網。^[35]
2. **設計與維護成本高**：缺乏標準化模組，設施的設計與後續維護皆需因地制宜，導致技術成本和維護複雜度相對提高。^[5]
3. **模組化不足**：缺乏標準化、可快速複製的設備模組與建置流程，因此，難

表 2 重點國家小水力發電技術類型與適用場域差異分析彙整表

國家	水源類型	流量/落差	水輪機種類	主要特性	適用場域	差異特點(政策與環境考量)
美國	非動力水壩/ 小型水庫	流量穩定/中低落差	Francis/Kaplan	改造既有水壩、可 併網、效率中高	改造既有水壩、補充分散 式電力	注重既有設施改造與分散式能源， 政策簡化許可程序
	徑流型溪流	流量季節性/低落差	Kaplan/Propeller	安裝簡易、環境衝 擊低	偏遠社區或國家公園	適合離網應用，環評嚴格
	灌溉渠道/工 業管道	流量固定/低落差	小型水輪機/低 頭徑流水輪	模組化、易整合	農業灌溉系統、工業管道	分散式應用為主，低落差效率較低
挪威	山區溪流/中 小型水庫	中低流量/中低落差 或流量穩定/中落差	Francis/Kaplan	可併網、效率中 高、可調峰	偏遠社區與地方電網補 充、地方電力調節	高環境要求，政策限制多，水力調 峰能力強
	河谷徑流	流量季節性/小落差	Kaplan/Propeller	安裝靈活、生態衝 擊低	偏遠社區或示範專案	社區與生態保護兼顧
巴西	中小河流	流量季節性/中落差	Francis/Kaplan	可併網、效率穩定	區域電網補充、偏遠地區	與風能、太陽能競爭，亞馬遜保護 限制
	小型水壩	流量穩定/中落差	Francis	調峰能力佳	地方電網補充負載	市場競爭與環境限制並存
	山區溪流	季節性中低流量/中 落差	Pelton/Francis	高落差效率佳	偏遠山區村落、離網應用	季節性流量限制大，電網接入挑戰 明顯
印度	灌溉渠道/小 型水庫	流量穩定/低落差或 流量可控/中低落差	小型水輪機 /Francis/Kaplan	易整合灌溉、可併 網、穩定性佳	農業灌溉區、地方電網補 充負載	財政補助與躉購電價支持，政策鼓 勵與灌溉結合
日本	既有水庫	流量穩定/中落差	Francis/Kaplan	可調峰、效率穩定	地方電網補充	偏遠地區併網或離網應用
	山區溪流	中低流量/中落差	Pelton/Francis	高落差效率佳	偏遠山區社區	離網與小型社區應用為主
韓國	河流	季節性流量/中落差	Francis/Kaplan	可調峰、效率穩定	地方電網補充、偏遠地區	與其他可再生能源整合，政策支持 增強
	徑流型溪流	中低流量/低落差	Francis/Kaplan	安裝靈活、效率中高	偏遠山區與農村社區	現今政策轉向升級改造與環境友善
中國	既有水庫/小 水壩	流量穩定/中落差	Francis/Kaplan	可併網、長期運行	地方水利工程、碳交易專 案	專案納入碳權交易，政策導向環境 與效率
	灌溉渠道	流量固定/低落差	小型水輪機	模組化	農田、地方水利設施	結合農業與水利使用，一水多用
台灣	山區溪流	中低流量/中落差	Francis/Pelton	適合偏遠離網、效 率中高	山區社區或農業灌溉區	結合灌溉與水力，政策支持 FIT (躉 購電價)，一水多用策略
	灌溉渠道	流量固定/低落差	小型水輪	模組化、易整合灌溉	農業灌溉及地方電網補充	一水多用策略
	自來水/工業 排水	流量穩定/低落差	小型水輪 /Kaplan	可即時發電、效率中	城市或工業區分散式能源	分散式併網與工業應用為主

資料來源：本研究自行彙整，引用文獻[11]-[34]。

以快速推廣與規模化。^[36]

(二)環境面

- 1.生態衝擊疑慮：興建攔河設施可能阻礙魚類等水生生物的洄游路徑，影響河川生態系統的完整性。^[37]
- 2.水質與水流壓力：改變自然水流模式或影響水質特性，可能對既有的河川生態造成額外壓力。^[38]
- 3.地方抗爭風險：若缺乏充分的環境影響評估及公眾參與審議程序，容易引發地方社區對生態破壞的疑慮與環境抗爭。^[39]

(三)政策面^[40]

- 1.行政程序冗長：水權申請³、土地使用及環境影響評估等審批流程過於繁瑣，導致開發時程冗長，不利於資金規劃。
- 2.跨部門協調不足：相關主管部門之間缺乏有效協調與整合，行政效率低落，成為推動的瓶頸。
- 3.缺乏投資誘因：政策誘因與配套補助措施相對不足，難以有效吸引民間資本投入小水力發電專案。

(四)經濟面^{[5][36]}

- 1.規模經濟效益低：小水力專案通常投資規模小，但單位建置成本高，且資金回收期長。
- 2.售電價格吸引力不足：售電價格受限於現行政策與電業市場機制，經濟吸引力不足以與其他大型或成熟的再生能源競爭。
- 3.社區參與度偏低：地方社區或民間資金因規模及風險考量，參與投資的意願偏低。

綜上所述，小水力發電的持續推廣，必須在政策法規的優化、技術模式的創新以及生態環境的保護之間尋求穩健平衡。藉由整合水資源管理與再生能源開發，方能有效促進國家的永續發展目標。

³ **水權申請**：小水力發電利用公共水流須符合「水利法」中的水權登記（發電用水需取得水權）和建造審核規定，並依據「水利法施行細則」中的規定申請水權年限（五年至二十年），且不得超過電業執照的有效期間。

參、小水力發電應用於臺灣科學園區的可行性評估

臺灣科學園區為高科技產業聚落，不僅用電需求大，更對電力供應的穩定性與持續性有嚴格要求。隨著我國再生能源政策的推動，園區內除太陽能外，亦可考慮使用小水力發電，作為分散式的綠電來源，以強化電網韌性及電力去碳化，逐步邁向碳中和目標。本研究針對科學園區可能具備的潛在水力資源和小水力發電之技術可行性、經濟效益、環境影響、法規限制及風險因素等進行綜合評估，以了解小水力發電在科學園區的應用潛力。

一、科學園區潛在水力資源

我國科學園區的開發多屬於高度都市化區域，天然河川落差有限。因此，潛在可利用的水源主要集中於人工水系及其相關設施。本研究盤點出五類具有高效能回收潛力的小型水力資源系統，略述如下。

(一)配水管網壓差

科學園區普遍設有高架配水池，用於自來水或工業用水的配水。此系統水壓通常不低於 0.3 kg/cm^2 ，其核心功能確保園區三大需求：[41][42]

1. **穩定供水**：利用重力原理，提供穩定的水壓和充足的供水能力，滿足產業用水需求。
2. **應對緊急情況**：作為臨時蓄水設施，在供水管線受損或缺水時，提供基礎用水量的應變能力。
3. **配合用水需求**：透過調節供水，平衡科學園區巨大的用水量需求，確保生產活動不中斷。

潛力評估：此系統中未被利用的剩餘水頭 (Excess Head) 即可透過安裝壓差式渦輪進行能源回收。

(二)製程冷卻水與循環水系統

科學園區以積體電路、光電等高科技產業為主，對製程冷卻穩定度要求極高。因此，普遍建置有由冷卻水塔、冷凝器、循環泵浦與集水槽等組成的製程冷卻水系統。

潛力評估：此系統水流穩定且連續運轉，循環水在克服高程差後，其高流量與長時間運轉的特性，使循環路徑中具備可供回收的穩定水力位能。

(三) 污水處理廠出流水與再生水系統

各科學園區的污水處理廠每日放流水總量可達數萬噸，這些排放水經三級處理後水質穩定，且多數廠區已建置再生水回收系統，將再生水回用於非製程用途。

潛力評估：由於廠區廢水設施的出水口與其承受水體（下游河川或排水道）之間，常存在有利的高度落差，放流水在排放過程中，自然蘊含可利用的水力位能。

(四) 鄰近灌溉或排水圳道

科學園區選址多使其排水系統鄰近由農田水利署或地方政府管理的農田灌溉圳道或都市排水系統。

潛力評估：這些渠道的水流量因灌溉需求而具備穩定且全年持續的特性，流況可預測性高。園區放流水匯入圳道時，出水處與圳道間常保有有效水位落差與流速條件，是發展低水頭、穩定流量小水力資源的極佳環境基礎。

(五) 雨水滯洪池與排水系統

為符合防洪與環保需求之規範，科學園區皆建置了完善的雨水滯洪池與排水泵浦系統。

潛力評估：此系統在強降雨或颱風期間啟動，滯洪池可瞬時儲存大量雨水。當滯留水體透過排水泵浦或重力排出時，會產生短時間內的高流量和顯著的排放落差。這形成了間歇性、高瞬時功率的水力條件，為結合抽水發電或小水力發電等應用提供了潛在的資源。

二、技術可行性分析

上述所盤點之園區潛在水力資源，針對每一項水源的特性評估適合的小水力發電技術。如表 3 所示。

表 3 科學園區潛在水力資源所適用之小水力發電技術分析

潛在水力資源	系統特性與流況	壓差或水頭條件	適合之小水力發電技術	技術應用評估
1. 配水管網壓差	管網輸送過程中常有壓力調節閥或區域壓差（約 5–30 m），水流穩定且連續	小至中水頭、穩定流量	壓差式渦輪機或微型渦輪機	可直接取代減壓閥，兼具節能與發電效益；不影響供水品質與穩定性，維護簡單
2. 製程冷卻水與循環水系統	冷卻塔或熱交換系統間具持續循環流量；若設有高低位水槽，具位能差	中水頭、穩定流量	管內渦輪機或閉迴路小水力系統	可利用冷卻水回流段或落差回收能量；可與變頻泵整合，提升系統能源效率
3. 污水處理廠出流水與再生水系統	出流水排放或回收再利用時常經由輸送管或放流渠；日流量穩定	中至低水頭、穩定流量	橫流式或渦流式水輪機	可於放流水渠或再生水輸送管段設置發電；具綠能象徵性與減碳效益，維護容易
4. 鄰近灌溉或排水圳道	常年有一定流量，雨季更豐沛；多為明渠流	低水頭、大流量	卡布蘭式或阿基米德螺旋式水輪機	適合開放式渠道設置，施工簡易、對環境友善，可與在地農田水利會合作
5. 雨水滯洪池與排水系統	雨季時排放量大且瞬間水位差明顯；枯水期流量小	間歇性中高水頭、變動流量	渦流式或衝擊式水輪機（視落差而定）	可結合排水泵浦站設計為「雨季發電」系統；需設儲能或併網調節機制以應對間歇性

資料來源：本研究自行彙整，引用文獻[43]-[49]。

科學園區內具備多元的水力資源型態，本研究評估合適的小水力發電技術（如壓差式渦輪、管內式水輪機、阿基米德螺旋機等），如壓差式渦輪 (Pressure Reducing Turbine)、管內式水輪機 (In-Pipe Turbine)、或阿基米德螺旋機 (Archimedes Screw) 等，使園區能夠在不影響主要供水、製程或排水功能的前提下，達成多重效益：

- (一)能源回收：將原本浪費的位能或水壓轉化為電力。
- (二)碳減量：產生綠色能源，直接減少對傳統電力的依賴。
- (三)綠能示範：樹立高效能的水資源與能源整合利用典範。

上述五類潛在水力資源，若能依其水源特性（如流量、落差、運轉穩定性）與不同的小水力技術搭配，將能體現科學園區「一水多用」的策略潛力，進而實現科學園區永續發展與低碳轉型的關鍵路徑。

三、經濟效益分析

針對上述所分析的科學園區五大類潛在水力資源及所適用之小水力發電技術的結果，針對其經濟效益，包括投資成本、發電潛力與收益，及園區能源策略整合等面向進行評估。

(一)投資成本

小水力發電的主要成本集中在水輪機與發電機組的購置與安裝，及電網接入費用。

1. **成本最低：**配水管網壓差與雨水滯洪池（若採用水泵反轉）的潛在成本較低，因為它們大多利用既有管道或泵浦，無需新建大型土木結構。
2. **成本適中：**製程冷卻水、污水處理廠及圳道的應用需要中等的投資，可能涉及管道改裝、機房設置或引水結構的土木工程。

(二)發電潛力與收益

發電潛力與收益主要取決於水流的穩定性和年運轉時數。

1. **高收益潛力（基載）：**配水管網壓差與製程冷卻水系統。這兩種系統的水流幾乎是全年穩定、持續運轉（年運轉時數可達 7,000 至 8,000 小時以上），產出可預測且穩定的綠電，可獲得最高的躉購電價 (FIT) 收益或實現最高的自發自用節省。
2. **中等收益潛力：**污水處理廠與灌溉圳道。水流穩定，但可能受限於污水處理量波動或灌溉季節性。
3. **最低收益潛力：**雨水滯洪池。因其間歇性極高，主要價值在於緊急應變而非穩定的電力收益。

(三)園區能源策略整合

小水力發電在園區能源策略中扮演關鍵角色：

1. **分散式能源補充：**小水力發電具有高穩定性，能有效彌補太陽能和風能的間歇性，作為分散式能源補充，穩定地方電網。
2. **提升能源韌性：**在颱風、地震等緊急情況下，部分小水力發電系統（如配水管網壓差）可提供獨立運轉能力，提升園區的能源韌性。
3. **綠色形象與碳減量：**利用原本浪費的水力位能進行能源回收，符合「一水多用」策略，有助於科學園區達成碳排放與永續發展目標。

表 4 科學園區潛在水力資源之經濟效益評估

潛在水力資源	核心水力條件	適用微水力技術	投資成本(相對)	經濟效益(發電與收益)	策略價值與整合
1.配水管網壓差	高水頭 (>0.3 kg/cm ²)、穩定流量、全年運轉	壓差式渦輪 (PAT)、管內式水輪機	低 (利用既有管網，無需大型土建)	高 (基載電力) 水流穩定，發電量穩定且具高可預測性	能源回收、自發自用、減少水壓調節設施耗能
2.製程冷卻水與循環水系統	大流量、中低落差、連續運轉 (高於 8,000 小時/年)	Francis /Kaplan；管內式水輪機	中 (需配合製程系統設計與整合)	高 (穩定電力) 運轉時數高，電力輸出穩定，利於降低生產碳足跡	製程綠電、提升能源自給率、符合永續供應鏈要求
3.污水處理廠出流水與再生水系統	穩定流量、中低落差 (排放點落差)	Kaplan /螺旋槳式 (Propeller)；阿基米德螺旋機	中 (結合既有放流口，土建要求低)	中高 流量大且穩定，再生水系統具全年穩定發電潛力	園區公用設施電力、符合環保與再生水回用策略
4.鄰近灌溉或排水圳道	穩定流量、低水頭、季節性 (灌溉需求)	阿基米德螺旋機；螺旋槳式 (Propeller) /Kaplan	中 (需建置引水或匯流結構)	中 (季節性穩定) 灌溉期間穩定發電，符合一水多用策略	分散式併網、水資源與能源整合利用典範
5.雨水滯洪池與排水系統	高瞬時流量、高度間歇性、顯著排放落差	Pelton /Francis (高落差)；水泵反轉發電 (PAT)	低 (若利用既有泵浦反轉)	低 (間歇性功率) 發電量難以預測，主要價值為緊急備用電力	防洪與能源整合，提升園區能源韌性與緊急應變能力

資料來源：本研究自行彙整，引用文獻[43]-[49]。

四、環境影響分析

根據前述對科學園區五大潛在水力資源系統的盤點及小水力發電的特性分析，其對科學園區的環境影響主要體現在正面效益和負面衝擊兩個方面。

(一)正面環境效益

小水力發電在科學園區的應用，其最大的環境價值在於對抗氣候變遷和提升資源效率。

1. 強化能源穩定性與韌性：小水力發電可以 24 小時運轉，發電穩定性高，能全年穩定輸出，具有聚沙成塔效益，故能強化園區的能源韌性，因此，有助於園區的綠能需求趨勢。
2. 低環境衝擊的綠能開發：相對水庫等大型水力發電場域對生態衝擊較大，小水力發電可結合既有水道及水利設施運轉，對環境影響較少。
3. 符合綠能發展趨勢：經濟部能源署鼓勵小水力發電可結合既有水道，可與科學園區利用人工水系的策略相結合。

(二)負面環境衝擊評估

小水力發電最大隱憂是「截流衝擊生態」，但這類衝擊在科學園區的人工水系應用中，風險極低或不存在。

1. 對生態環境的衝擊極低

(1) 不涉及自然河川改造：潛在資源多為人工水系（如管網、循環水、排水道）或既有設施（如水壩、滯洪池）。這避免了大型水壩建設對自然河川生態、魚類遷徙、泥沙淤積和土地淹沒的衝擊。

(2) 管內應用無生態影響：配水管網壓差和製程冷卻水系統採用管內式水輪機，屬於封閉式系統，對外界生態環境完全沒有影響。

2. 噪音與振動（可控的局部影響）：運轉中的水輪機和發電機可能產生噪音與振動，但由於裝置通常位於既有的廠房、水利設施機房或地下空間，且規模微小，透過設置隔音罩和減振基礎，其對園區周邊環境的影響可降至最低。

3. 對水文與水質的影響（圳道應用風險可控）：僅有鄰近灌溉或排水圳道的應用需要考慮水流匯入或引出的設計。只要確保設計符合農田水利署或地方政府的規定，保持圳道既有水流條件與水質穩定，即可將水文和水質影響控制在可接受範圍。

表 5 科學園區潛在水力資源之環境影響評估

潛在水力資源	環境衝擊分析	結論
1.配水管網壓差	應用在封閉的自來水或工業用水管網中，對外界生態完全無影響	無生態衝擊
2.製程冷卻水與循環水系統	應用在廠區內封閉的循環水系統，對外界生態完全無影響	無生態衝擊
3.污水處理廠出流水與再生水系統	利用放流水與承受水體間的落差，不改變既有排放量，僅回收排放過程中的位能	極低生態衝擊
4.鄰近灌溉或排水圳道	- 水權與取水規範：必須嚴格遵守水權申請程序，確保不影響圳道下游的灌溉需求，並符合法規要求的基流量 (Ecological Flow)。 - 設施建置：應採用如阿基米德螺旋機等對水流和泥沙影響最小的技術，並確保水利設施對魚類等水生動物的影響極小化，避免成為環團的阻力。	高生態衝擊
5.雨水滯洪池與排水系統	僅在防洪或排水時運作，不影響常態水文，且利用人工設施	極低生態衝擊

資料來源：本研究自行彙整，引用文獻[43]-[50]。

科學園區發展小水力發電是環境效益遠大於負面衝擊的綠色能源方案。主要的效益是低碳排放的穩定電力來源，且能提升水資源利用效率。而其最大的負面

環境隱憂（河川截流對生態的衝擊）主要發生在天然河溪，而非科學園區主要利用的人工水系。因此，只要將焦點放在既有設施整合與人工水系，並在涉及鄰近圳道時嚴格控制取水量與設計生態友善設施，即可有效規避小水力發電的生態風險。

五、法規限制分析

小水力發電具有「分散式、低碳、低環境衝擊」的優勢，是科學園區實現碳中和目標的潛力技術。然而，由於科學園區屬於依「科學園區設置管理條例」劃設的特殊管理區域，其推動受制於多重法規的限制。

（一）園區管理與土地使用限制：行政統籌為關鍵^[51]

科學園區內的土地分區與公共設施受到「科學園區土地使用分區管制要點」的嚴格管制。

1. **設施認定與用途限制**：小水力設施多屬公用設施性質，若設置於排水、再生水廠或滯洪池等公共設施範圍內，須經園區管理局審查同意。這可能涉及用途變更或附屬設施認定程序。
2. **安全與規範**：發電設備的興建與接線必須納入園區建築與地下管線安全管理範疇。
3. **解決方案**：在園區內推動小水力發電，應採「公共設施整合型」或「能源示範設施」模式，由園區管理局統籌協調，以兼顧空間管制、安全及能源效益目標。

（二）水權與水利管理限制：防洪優先與程序繁瑣^{[52][53]}

小水力發電涉及對公共水流的利用，必須符合「水利法」⁴、「再生能源發展條例」⁵及「電業法」⁶等規定取得主管機關核准或水權許可。

1. **非法取水風險**：科學園區的潛在水源皆屬公共設施或特定用途水源。若未取

⁴ **水利法**：小水力發電是利用公共水流發電，因此必須依據「水利法」向主管機關申請水權或興辦水利事業，並遵守相關規定，如確保生態基流量、符合審核要點〔如果小水力發電設施涉及截斷水道的建造物（如圍水築堰），應依據水利署「申請施設跨河建造物審核要點」及「水利建造物建造改造或拆除審核作業要點」等規定辦理，並取得主管機關核准〕、環境友善措施、避免水道過度人工化等。

⁵ **再生能源發展條例**：推動小水力發電的上位法規，其相關規定主要用於規範再生能源的推廣和設置，依其規定，再生能源發電設備享有優先併入電力網的權利。

⁶ **電業法**：小水力發電設備的設置和運轉須依照「電業法」向電業主管機關申請相關許可。

得許可即設置發電裝置，將構成非法取水行為。

2. **防洪與通洪安全**：排水系統的主要功能為防洪與排水，因此，小水力設施的設置不得影響其通洪安全。
3. **程序繁瑣**：業者普遍認為水權申請程序繁瑣，且園區水源多屬工業用水、自來水或灌溉用水，申請發電水權時可能受到原用途的優先權限制。
4. **解決方案**：本研究建議可由園區管理局以公共設施共用名義整合申請水權，並以附屬能源回收設施形式納入相關工程計畫中。

(三)電力法規與併網管理限制：認定爭議與饋線安全^{[53][54][55]}

小水力發電雖為再生能源，但其電能使用、售電和安全仍需遵循「電業法」和「再生能源發展條例」。

1. **自用與供電限制**：依現行制度，非電業者不得對外供電。企業自設設備僅能作為自用電力。若欲併入台電系統，須通過台電併網審查並登錄為再生能源發電業。
2. **躉購費率 (FIT) 認定爭議**：過去曾有污水處理廠出流水發電被認定不適用再生能源電能躉購費率的爭議，這導致電力收購價可能少一半，大幅降低了投入意願。⁷
3. **併網安全與饋線限制**：小水力發電屬中低壓發電設備，需符合「電氣設備規則」的安全檢驗。場址評估亦須考慮電力饋線分布是否許可，若容量過大或饋線不足，將增加併網的工程難度。
4. **解決方案**：本研究建議採「自發自用、餘電併網」方式，或由政府部門整合成區域型再生能源專案統一申請，以兼顧併網安全、行政效率及能源策略整合。

(四)環境影響與能源管理規範：可控但需審慎評估^{[56][57]}

小水力發電仍需符合環境與能源管理的要求，確保能源回收過程的透明度和環境的穩定性。

⁷ **躉購費率認定爭議**：依「再生能源發展條例」中對小水力發電的定義是以「自然水流」為基礎，而污水處理廠的水流是經過泵浦加壓輸送到各單元，因此不符合此定義。且目前臺灣的法規尚未將污水處理廠出水發電納入「再生能源」，因此無法適用「再生能源發展條例」的相關補助和躉購機制。故儘管污水處理廠出流水發電具備穩定的綠電生產潛力，這類「未利用能源回收」仍面臨制度上的限制，未能被納入再生能源體系。

1. **環境影響評估 (EIA)**：雖容量低於 2 MW 且設於既有設施內者通常可免環評，但若涉及水道改變、滯洪池結構調整或排水流量控制，仍需依「環境影響評估法」進行審查。
2. **能源與碳排盤查**：「能源管理法」及「溫室氣體減量及管理法」要求園區內大型事業將發電設施納入能源盤查與碳排報告，以確保整體能源使用透明化。
3. **解決方案**：本研究建議採用模組化、非干擾性技術⁸（如旁通式渦輪⁹或壓差式發電機¹⁰），以利用現有水力資源回收能源，同時維持水體自然條件，故可有效降低環境衝擊，並應經主管機關初步確認不影響原有水利與環保功能。

六、風險評估

小水力發電系統之成功建置與長期運行涉及多層次的系統性風險。本研究針對技術、經濟、環境、法規與管理等五大主要面向進行風險評估。

(一)技術風險 (Technical Risks)

科學園區可利用的水力資源多為低落差、變動流量型態，對系統設計的精準度與客製化程度要求極高。

1. **設計與效率不確定性**：若未能精確評估水流特性，可能導致機組效率不穩、發電量低於預期或設備提前損壞。
2. **運轉穩定性挑戰**：園區水源（如排水管網、再生水系統）的操作條件會隨降雨、製程需求或維修時段而波動，對機組的運轉穩定性構成挑戰。
3. **介面整合風險**：存在與現有排水或水處理設施的介面整合風險，控制系統若不相容，可能影響原系統的核心功能或引發安全疑慮。

⁸ **非干擾性技術**：相較於傳統壩式或攔河式水力發電，非干擾性技術無須改變河道形態或築設蓄水設施，能維持原有水流動態與泥砂運移，避免棲地破壞及魚類洄游受阻等問題。且此類系統可直接設置於既有管路、排水渠道或滯洪池出水口，減少大規模土木開發與土地利用變更，進而降低地形與植被破壞風險。由於系統運作過程維持通流狀態，不會造成水體滯留、溶氧下降或水質惡化，對水生生物之影響極小。其渦輪設計流速低、進水口尺寸小，並可搭配魚道或繞流設計，避免魚類捲入與機械傷害。整體而言，非干擾性小水力發電能在不影響原有水文與生態條件下有效回收能量，兼顧再生能源利用與環境永續目標。

⁹ **旁通式渦輪**：可設於現有管路或分流支管，不必新建取水或放水設施。

¹⁰ **壓差式發電機**：可直接安裝於管網中，利用管道高低壓差或流速能量發電。

4. **建議對策**：本研究建議於設計階段應進行詳細的水文與水力模擬分析，並選用模組化、耐變流¹¹、低維護的渦輪或壓差式發電機組。

表 6 小水力發電之耐變流性能的設計方式

發電機組類型	技術特徵	耐變流設計重點
渦流式 (Vortex type)	利用旋轉水流產生動能	水流變化時仍能保持穩定旋渦結構
橫流式 (Cross-flow)	水流兩次通過渦輪葉片	流量變化範圍廣、效率曲線平穩
螺旋槳式 (Propeller type)	葉片角度可調	可隨流量自動調整出力
壓差式 (In-pipe type)	利用管內壓差發電	對流量變化不敏感，穩定性高

因此，在科學園區排水系統中，雨季與旱季流量差可達數倍，若採用耐變流性高的渦流式或壓差式機組，即使流量小於設計值，仍能維持一定的發電效率。

(二)經濟風險 (Financial Risks)

小水力系統屬於初期投資較高、回收期較長的再生能源設施，其財務可行性容易受到外部因素影響。

1. **投資報酬率 (ROI) 偏低**：由於園區水資源多為間歇或調節性流量，年平均利用率可能偏低，將直接影響投資報酬率。
2. **政策與市場不確定性**：儘管躉購電價 (FIT) 提供收益保障，但費率逐年下降，若缺乏額外補助或碳權收益，可能使專案的財務可行性下降。
3. **行政與工期延誤成本**：設施須經多機關審查，若行政程序繁複或配合園區基礎設施施工導致工期延誤，將造成投資風險上升。
4. **建議對策**：本研究建議採取分階段建置策略（先導型示範 → 正式擴建），並將效益結合園區 ESG 策略或碳權、綠電交易等非電費收益，以提升收益穩定性。

(三)環境風險 (Environmental Risks)

小水力發電雖為低衝擊型能源，但在園區的特定公共設施中仍須評估其潛在干擾。

1. **防洪與排水功能干擾**：若設於排水系統或滯洪池，設施可能產生阻水、淤積或渦流效應，導致排水效率降低，增加暴雨期間的淹水風險。
2. **水質與設施腐蝕**：若設備設置於污水處理廠或再生水管線，需確保不影響水

¹¹ **耐變流**：意指發電機組或渦輪在不同流量與流速條件下仍能維持穩定運轉與效率的性能，即設備對「水流變動」的適應能力。

質、曝氣與消毒程序，避免造成水質變異或設備腐蝕。

3. **環評與審查要求：**即使是小水力發電系統，但若工程涉及地形改動或新建構造物，仍需依「環境影響評估法」進行審查與監測。
4. **建議對策：**本研究建議設計上應採非干擾型水路結構（如旁通式渦輪或管內壓差機組），並進行環境監測與防災模擬，以降低對園區防洪與水質的潛在風險。

(四)法規與管理風險 (Regulatory and Management Risks)

涉及的主管機關與法規眾多，增加了專案的複雜性與不確定性。

1. **多重法規與行政權責不明：**涉及水權申請、併網許可、施工審查及公共設施利用等多重法規，若法規界線或申請責任不明，可能導致專案延宕或核准困難。
2. **所有權與維運責任爭議：**在公共排水或再生水系統上設置發電設施，須釐清設施所有權及維運責任，否則將影響後續保險、維修與電費結算。
3. **管理與監測機制不足：**若系統為多單位共用，需建立完善的管理與監測機制，以避免運轉權責爭議。
4. **建議對策：**本研究建議由政府部門主導整合，建立「整體能源專案模式」，統一辦理申請與審查作業，並採取政府與企業共同投資、利益分潤的合作機制。此舉可有效降低個別業者在行政程序與管理上的風險，同時提升專案推動效率與資源整合效益。

(五)營運與維護風險 (Operation and Maintenance Risks)

系統的長期效益取決於穩定的運轉與高效的維護管理。

1. **設備磨損與效率下降：**運轉環境潮濕且含懸浮物多，易造成設備磨損、堵塞或效率下降，若維護不當，將導致發電中斷或運轉成本上升。
2. **維護困難度高：**園區內施工空間可能受限，維修作業需配合既有設施運作時段，增加維護困難度。
3. **監控與優化不足：**若系統監控未與園區能源管理平台整合，將難以即時偵測異常或優化發電策略。
4. **建議對策：**本研究建議規劃階段應導入智慧監控與預防性維護系統 (Predictive Maintenance)，並建立標準作業程序 (SOP) 與緊急應變計畫，以

提升系統可靠度與長期效益。

綜上所述，小水力發電在實務推動上，必須將風險管理聚焦於水源穩定性、行政整合與維運管理等三個面向，進而能有效降低小水力發電推動過程之不確定性，確保系統安全、經濟及永續運行。

肆、結論與建議

一、整體結論與應用優勢

小水力發電可作為科學園區實現碳中和目標的潛力技術，其具備穩定供電、低碳、低環境衝擊、壽命長、可與既有水系整合等多重優勢。

- (一) 技術可行性高：小水力發電系統具備穩定供電、低碳、低環境衝擊、壽命長等優勢，極適合應用於科學園區的人工水系統。
- (二) 潛力大：園區內五大潛在水源（配水管網壓差、製程冷卻水、污水出流水、灌溉圳道、雨水滯洪池）均可藉由適配的技術，在不影響主要水利或製程功能下，達成能源回收與碳減量雙重目標。
- (三) 經濟性良好：雖然初期投資高，但由於運轉穩定性高、維護成本低，特別是配水管網壓差與製程冷卻水系統，長期具有良好的成本回收性。
- (四) 環境衝擊極低：園區主要利用人工水系，生態衝擊極低，符合環保政策。
- (五) 核心定位：小水力發電是科學園區實現「分散式能源、循環用水與低碳轉型」的重要選項，可作為園區「一水多用」及「綠能示範區」的核心措施之一。

二、關鍵推動策略與建議措施

為克服法規和行政限制，有效釋放園區小水力資源潛力，本研究建議措施應從政策、技術、經濟和永續發展四個面向著手：

(一) 政策與制度面：強化行政統籌與法規鬆綁

1. 整合推動機制：建議由政府部門統籌規劃專案，整合水利署、台電公司及能源署等相關單位，建立單一窗口審查與協調機制，以簡化行政流程、縮短審查時程，提升小水力發電專案推動之效率與可行性。
2. 推動試辦與補助：建議設立「小水力能源推動專案辦公室」，統籌示範建置補助與碳權收益認定等申請作業，提升民間參與誘因。

3. 明確法規定位：應訂定明確規範，允許公共水系中附設的發電用途以能源回收型態納入再生能源躉購制度 (FIT)。
4. 產官學研的跨域合作：持續透過產官學研的凝聚共識與跨域合作，使小水力發電在能源轉型中發揮更大的作用。

(二) 技術與工程面：導入標準化與智慧化管理

1. 標準化技術選用：選用壓差式渦輪、管內式水輪等低干擾技術，推動標準化模組設計，降低工程成本與維護難度。
2. 設施整合共構：應結合再生水及防洪設施，在再生水回用及滯洪池排放系統中嵌入發電模組，兼顧防洪安全與能源回收效益。
3. 智慧化運維與 AI 管理系統整合：利用我國的 AI 技術優勢，將小水力發電系統深度整合至園區能源管理系統 (EMS) 中，即建立即時監控與預防性維護機制。透過 AI 管理系統，能夠精準定位園區內能源耗損設備及時段，並對小水力系統的運作狀態進行即時分析，從而實現發電效率優化及智慧化管理，將大幅提升系統的可靠度和長期效益，是實現園區永續發展目標的關鍵策略。

(三) 經濟與營運面：實施分階段策略並結合多元收益

1. 分階段示範：採分階段示範建置策略，先於污水廠、再生水設施與配水系統設置示範場域，再依成效擴及全區。
2. 多元收益模式：將小水力發電績效納入園區碳盤查與綠電交易平台，透過非電費收益提升投資報酬率。
3. 公私協力 (Public-Private Partnership, PPP)¹²：推動公私協力模式，鼓勵由管理局、事業單位與民間能源公司共同投資與分潤，建立共管共營的再生能源平台。

(四) 環境與永續發展面：確保零衝擊與示範推廣

1. 低干擾設計優先：優先選擇不改變水道結構的旁通式或封閉管內系統，

¹² **公私協力模式**：透過公私協力模式，可結合公部門之政策、用水及設施資源，與民間業者之技術創新與營運經驗，形成互補機制。政府可提供法規簡化、租稅或躉購電價等誘因，並協助媒合適當地點與水源資料；民間業者則負責系統設計、建置與維運，分攤投資風險。因此，可藉由此一模式提升計畫財務可行性，縮短行政流程，並促進民間資金與技術導入，進而使再生能源推動得以更具持續性與效率。

確保防洪與水質安全。

2. 納入 ESG 評估：將小水力發電績效納入園區永續發展評估指標（如 ESG 評估），作為低碳轉型的重要項目。
3. 強化示範推廣：透過園區案例展示小水力與循環水利用成果，提升企業與社會對再生能源的接受度。

表 7 小水力發電應用於科學園區之推動建議措施

面向	具體措施	預期效益
政策制度	設立「小水力能源推動專案辦公室」	行政統籌與加速核准
技術工程	1. 導入模組化、標準化水輪機設計 2. 結合 AI 能源管理與再生水系統	降低施工與維護成本 提升園區能源自主率
經濟營運	推動民間參與公共建設模式與綠電交易制度	穩定收益與吸引投資
環境永續	採低干擾設計與環境監測	兼顧防洪與生態保護

小水力發電應用於科學園區的可行性已獲多面向驗證，其優勢在於可利用既有人工水系、環境衝擊低、發電穩定且具長期經濟效益。未來若能透過制度創新、技術整合及示範引導，將有助於科學園區建立「綠能自主、生態共存、低碳永續」的新典範，並成為我國再生能源多元化發展的重要推進力量。

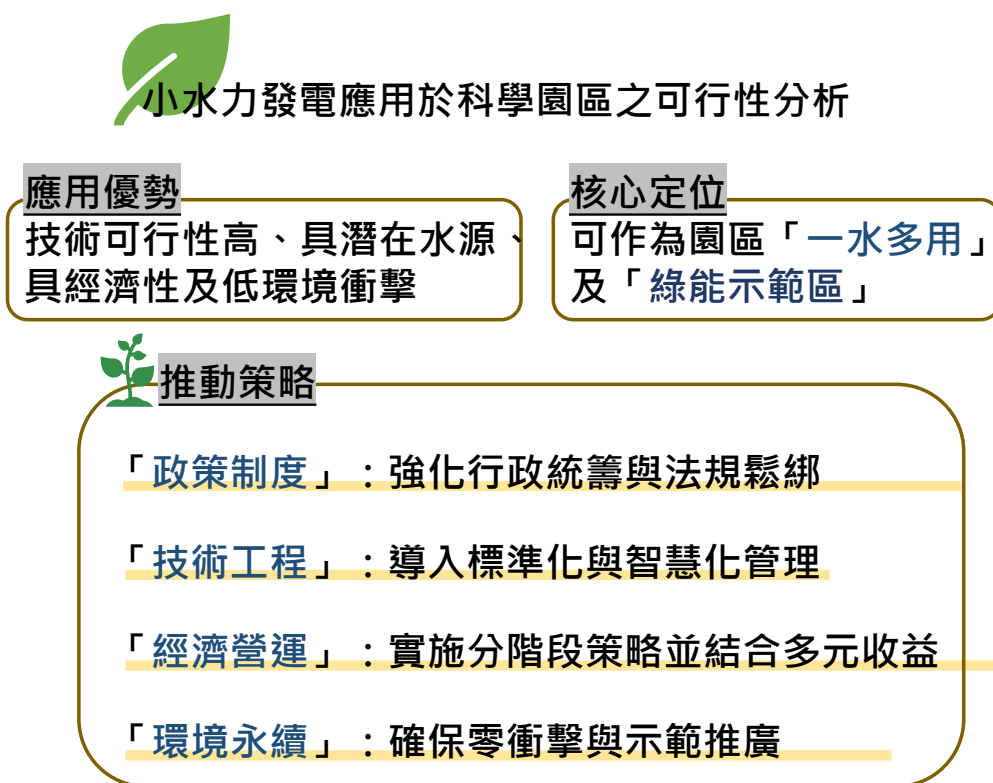


圖 1 小水力發電應用於科學園區之優勢及推動策略

資料來源：本研究自行繪製。

伍、參考文獻

1. 國家發展委員會、環境保護署、經濟部、科技部、交通部、內政部、農業委員會、金融監督管理委員會（2022 年 3 月 30 日），臺灣 2050 淨零排放路徑及策略總說明。
2. 國家科學及技術委員會（2023 年 3 月），淨零科技方案，第一期 2023 - 2026。
3. 總統為小水力發電產業發展論壇致詞 期許產官學界跨域合作 讓小水力發電在能源轉型中發揮作用，中華民國總統府新聞，2025 年 10 月 18 日。
<https://www.president.gov.tw/News/39541>
4. 經濟部水利署第一河川分署（2025 年 9 月 12 日），一水多用！小水力發電：綠能轉型的一環，第 0661 期。
5. Paish, O. (2002). Small hydro power: Technology and current status. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 6(6), 537–556.
6. United Nations Industrial Development Organization, & International Center on Small Hydro Power. (2019). *World Small Hydropower Development Report 2019*. Vienna, Austria: UNIDO.
7. International Energy Agency (IEA). (2021). *Hydropower Special Market Report: Analysis and Forecast to 2030*. Paris, France: IEA.
8. 王士豪、張益誠（2019），台灣再生能源推動下小水力發電之應用評估，*能源工程期刊*，35(2)，45 - 58。
9. U.S. Department of Energy. (n.d.). *Types of Hydropower Turbines*. Office of Energy Efficiency & Renewable Energy.
10. World Bank, & ESMAP. (2020). *Small Hydropower Handbook*. Washington, DC: World Bank.
11. U.S. Department of Energy. (2021). *An Assessment of Energy Potential at Non-Powered Dams in the United States*. Washington, DC: DOE.
12. International Hydropower Association (IHA). (2023). *Hydropower Status Report 2023*. London: IHA.
13. International Energy Agency (IEA). (2022). *Hydropower Special Market Report*. Paris, France: IEA.
14. Klein, S. J. W., & Whalley, S. (2022). Review of small hydropower performance and costs. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 154, 111852.
15. 游保杉、李宛澍（2021），水力發電的氣候調適策略與風險管理，*台電月刊*，706 期。
16. 曾耀民（2019 年 1 月 2 日），再生能源電能躉購費率之研析，*立法院議題研析*，編號 R00611。
17. 經濟部能源署（2025 年 1 月 2 日），114 年度再生能源躉購費率正式公告。
18. International Finance Corporation (IFC). (2017). *Environmental, Health, and Safety*

Guidelines for Small Hydropower Projects. Washington, DC: World Bank Group.

19. Wu, K. C., Lin, Y. H., & Chang, C. H. (2023). Research and analysis of promotional policies for small hydropower in Taiwan. *Energy Policy*, 178, 113539.
20. Federal Energy Regulatory Commission (FERC). (2024). Small/Low Impact Hydropower Licensing Exemptions. Washington, DC: FERC.
21. Hedger, R. D., et al. (2025). Environmental impact assessment of small-scale hydropower in Norway: A regional analysis of Trøndelag. *Journal of Environmental Management*, 350, 120432.
22. The Guardian. (2025). Norway parliament votes on hydropower in protected rivers.
23. Reuters. (2024). Brazil's hydropower future faces challenges from drought and deforestation.
24. Ministry of New and Renewable Energy (MNRE), Government of India. (2024). Small Hydro Power (SHP) Programme.
25. Council on Energy, Environment and Water (CEEW). (2023). Small Hydropower in India: Market and Challenges.
26. IMARC Group. (2025). Japan Small-Scale Hydropower Market Size & Forecast 2033.
27. IMARC Group. (2025). Japan Hydropower Equipment Market 2033.
28. 胡慕情、賴冠丞（2017年9月11日），能源再生社會—日本小水力發電轉動農村再造，環境資訊中心。
29. Grand View Research. (2022). South Korea Small Hydropower Market Size & Outlook, 2030.
30. Reuters. (2025). South Korea plans two new large nuclear reactors, more renewables in energy mix.
31. The Guardian. (2025). A structural dependence on heavy industry: Can South Korea wean itself off fossil fuels?
32. International Hydropower Association (IHA). (2024). Region Profile: East Asia & Pacific. London: IHA.
33. South Pole. (2024). Huóshuǐ Small Hydropower Project. Zurich: South Pole Group.
34. 劉宏仁、林文勝、游景雲、陳谷汎（2024），小水力發電之發展歷程、現況與推動建議，*土木水利*，51(1)，1－12。
35. Gaudard, L., et al. (2018). Seasonal aspects of the energy–water nexus. *Energy Policy*, 123, 749–761.
36. Kumar, A., et al. (2011). Hydropower. In IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation.
37. Kaunda, C.S., et al. (2012). Potential of small-scale hydropower for electricity generation in sub-Saharan Africa. *Renewable Energy*, 44, 386–393.
38. 陳儷方、戴永華、王燕華、余采滢（2025年8月16日），台灣小水力發電進退兩難，是綠電解方還是生態隱憂？，聯合報。

39. 地球公民基金會（2024 年 7 月 22 日），小水力發電不該任意排除，應實施環評標準。
40. 蔡幃帆、王亭雅、王亭軒（2024 年 1 月 4 日），小水力發電：社區凝聚或是生態波瀾？，小世界周報。
41. 經濟部水利署（2016 年 6 月 6 日），自來水用戶用水設備標準，水字第 10504602540 號。
42. 苗栗縣政府（2021 年 12 月 22 日），竹南科學園區高架水塔及地下蓄水池新建工程開工動土，縣府新聞。
43. Carravetta, A. (2013). Pump as Turbine (PAT) design strategy for energy recovery in water distribution networks. *Water*, 5(3), 1211–1225.
44. Balacco, G. (2020). Pump as Turbine for the Energy Recovery in a Water Distribution Network. *Energies*, 13(6), 1503.
45. InPipe Energy. (n.d.). The HydroXS® In-Pipe Energy Recovery System (Product & Case Studies). Retrieved from <https://inpipeenergy.com>
46. Edirisinghe, D.S., et al. (2022). Enhancing the performance of gravitational water vortex turbines. *Renewable Energy*, 191, 801–814.
47. Maika, N. (2023). A review of gravitational water vortex hydro turbines. *Energies*, 16(2), 745.
48. Quaranta, E., et al. (2020). Hydropower case study collection: Innovative low-head converters. *Sustainability*, 12(4), 1238.
49. Thakur, R. (2024). Potential of the Archimedes screw to generate sustainable energy. *Renewable Energy*, 223, 119527.
50. 陳儷方、戴永華、王燕華、余采滢（2025 年 8 月 5 日），截流衝擊生態 小水力發電隱憂，聯合報。
51. 國家科學及技術委員會（2018），科學園區設置管理條例。
52. 經濟部水利署（2023），水利法。
53. 經濟部能源署（2024），再生能源發展條例及再生能源電能躉購費率作業要點。
54. 台灣電力股份有限公司（2023），再生能源發電系統併聯技術要點及再生能源發電設備免併網審查作業原則。
55. 經濟部（2025），電業法。
56. 環境部（2023），環境影響評估法及相關審查準則。
57. 陳建志、林志鴻（2022），小水力發電於台灣法制與推動困境分析，*水利工程期刊*，30(2)，45 – 57。