
**防砂壩小水力發電潛能評估模組之開發與
技術驗證**

**Developing the assessment methodology of
a small hydropower potentiality coupled
with sabo dams in the perspectives of
green and renewable energy
(成果報告)**

執行單位：國立臺灣大學

執行期間：112年02月08日至112年12月31日

計畫主持人：施上粟 教授

共同主持人：楊勝崎 執行長

農業部農村發展及水土保持署 編印

中華民國 112 年 12 月

(本報告書內容及建議純屬執行單位意見，僅供本署施政參考)

摘要

本計畫透過基礎研究及調查，建立完整的集水區防砂壩執行小水力或微水力發電時的評估流程，包括：水資源及發電潛力、生態水文及廊道評估、經濟效益評估等。並以設計情境進行概念驗證，回應本研究關鍵科學問題：在相同發電量下，小水力電廠能否營造小型人造洪水改善下游生態；同時評估探討各研究方案對防洪、減碳、結構物安全等方面提供的共效益(co-benefits)，成果可作為農業部農村發展及水土保持署未來在進行新式防砂壩設計或現有防砂壩改良時的參考依據。本計畫研究區域為礮溪上游及其支流清水溪，該處特色為：(1) 具有一座現有固床工結構物；(2) 河川水量及水質穩定；(3) 生態及廊道衝擊較低；(4) 地點可即性高，相關單位曾有調查，故基本資料收集、基礎調查相對容易。本年度主要研究進展及重點成果為：(1) 已建立完成評估模組：生態水文模式、棲地廊道模式、經濟效益模式；(2) 完成現地調查並建立相關資料庫：DEM、空照圖資、雨量紀錄、流量紀錄、生態紀錄、水下地形、水深流速等；(3) 研究區能滿足情境目標：流量 0.1~0.5 立方公尺/秒、發電量 6,000~8,000 度/年；(4) 水理、棲地結構品質及廊道特性分析結果，證實設計方案具備提升生態效益能力；(5) 完成發電潛能評估與情境設計之概念驗證。

關鍵詞：小水力發電、固床工、生態水文、棲地廊道、經濟效益

Abstract

This research aims to develop the potential evaluation module for small- and micro-hydropower constructed with existing sabo dams and groundsills. The technology will also be implemented into commercial services through complete industry-university cooperation. The scope of the application contains water resources simulation, a comprehensive assessment model, and a tradeoff optimization model. Therefore, in addition to evaluating the power generation potential of each site with an economic model, this study incorporates a hydrodynamic model and an eco-hydrological model to estimate the impact of different release strategies from power generation on the local riverscape and habitat structure and quality. While appreciating the green power and clean production supply for the development of a circular economy, it can also consider the conservation of the downstream aquatic ecosystems. At the same time, we also evaluate and explore the co-benefits provided by various research programs regarding flood control, carbon reduction, and structural safety. The expected results can be used as the basis for the future design of new sand control dams by the Water Conservation Bureau or the improvement of existing sand control dams. The study area is the upper reaches of the Sulfur Creek, located at the lower edge of the Yangmingshan National Park catchment area. It has the following advantages for conducting this study: (1) An existing groundsill is in-situ for examining the proposed hypothesis of this study; (2) The river water quantity and water quality are good and stable; (3) The ecological and corridor impacts are relatively low; (4) The location is highly accessible, and relevant units

have conducted surveys, so collecting historical data and field surveys is relatively manageable.

The main research progress and key achievements can be found as follows:

1. Evaluation modules have been established: ecohydrological, habitat corridor, and economic benefit models.
2. Data collection and on-site investigation have been carried out, such as digital elevation model, aerial photos, basin rainfall records, river flow records, ecological data, river bathymetry, water depth, and flow velocity.
3. The primary situational goals have been set for the following scenario simulations: river flow of 0.1-0.5 m³/s and installed power generation of 6000-8000 kWh/year.
4. The SRH-2D hydrodynamic model has been constructed and validated, while the habitat structure, endemic fish habitat quality, and river corridor characteristics have been incorporated for quantitatively simulated and analyzed. The results of the analysis of habitat structure for fish habitat quality and corridor connectivity confirm that the present design scenario can satisfy hydropower generation and enhance ecological benefits.

Keywords: small-hydro, groundsill, eco-hydrological model, habitat structure, economic model

目次

摘要.....	I
Abstract.....	II
目次.....	IV
表次.....	VI
圖次.....	VII
第一章 緒論	1-1
第一節 關鍵課題	1-1
第二節 計畫目標及研究架構	1-4
第三節 工作項目與進度掌握	1-5
第二章 研究地點及現地調查	2-1
第一節 研究地點	2-1
第二節 資料蒐集	2-15
第三節 現地調查	2-20
第三章 模式整合及評估方法	3-1
第一節 生態水文流態模式	3-1
第二節 水理棲地廊道模式	3-5
第三節 經濟效益評估模式	3-13
第四章 發電潛能評估與情境設計	4-1
第一節 評估模組建立	4-1
第二節 水理情境設計及生態棲地分析	4-3
第三節 發電策略擬定	4-23
第四節 財務分析	4-31
第五節 概念驗證	4-34
第五章 結論與建議	5-1

第一節 結論	5-1
第二節 建議	5-3
參考文獻.....	參-1
附錄一、期中報告審查意見及回覆	附-1
附錄二、期末報告審查意見及回覆	附-6
附錄三、Powerspout LH 詳細介紹	附-11

表次

表 1-1 本計畫問題定義彙整	1-3
表 1-2 重要工作項目表	1-6
表 1-3 預定進度表	1-7
表 2-1 礮溪流域水域動物調查表	2-12
表 2-2 清水溪監測站說明	2-30
表 3-1 棲地流況之主要類型分類說明	3-9
表 3-2 棲地品質分類表(ELKINS ET AL., 2007)	3-10
表 4-1 現況情境之棲地單元與棲地品質統計表	4-5
表 4-2 現況情境之棲地單元景觀指數表	4-6
表 4-3 現況情境之棲地品質景觀指數表	4-6
表 4-4 現況與各情境之流量分配圖表	4-12
表 4-5 設計情境之棲地單元統計表	4-13
表 4-6 設計情境之棲地品質統計表	4-13
表 4-7 設計情境之棲地單元景觀指數表(1/3)	4-14
表 4-7 設計情境之棲地單元景觀指數表(2/3)	4-14
表 4-7 設計情境之棲地單元景觀指數表(3/3)	4-15
表 4-8 設計情境之棲地單元多樣性指數(SHDI)表	4-15
表 4-9 設計情境之棲地品質景觀指數表(1/3)	4-16
表 4-9 設計情境之棲地品質景觀指數表(2/3)	4-16
表 4-9 設計情境之棲地品質景觀指數表(3/3)	4-17
表 4-10 設計情境之棲地單元多樣性指數(SHDI)表	4-17
表 4-11 POWERSPOUT 模擬發電量說明列表	4-30
表 4-12 本計畫初步規劃案場情境設計之益本比分析表	4-32

(以下略)

圖次

圖 1-1 1986-2020 年農田水利署完成之 16 處案場	1-2
圖 2-1 礪溪流域地理位置圖	2-2
圖 2-2 礪溪流域之歷年水質指標(2018-2022)分布圖	2-7
圖 2-3 研究區域地理位置圖	2-14
圖 2-4 清水溪分流示意圖	2-14
圖 2-5 礪溪流域之 5 公尺網格數值地形模型成果圖	2-16
圖 2-6 礪溪流域鄰近之中央氣象局氣象觀測站地理位置圖	2-17
圖 2-7 臺灣石鱚照片	2-19
圖 2-8 臺灣石鱚之流速、水深適合度曲線	2-19
圖 2-9 本計畫現地調查照片集錦	2-21
圖 2-10 VBS-RTK 量測點位分布圖	2-23
圖 2-11 本計畫佈設清水溪流量監測之超越機率圖	2-24
圖 2-12 FLOW WATCH FW450 手持式流速儀校正關係圖	2-26
圖 2-13 斷面流量計算示意圖(CHOW ET AL., 1988)	2-26
圖 2-14 手持式流速儀量測河川斷面流速與水深量測現地照片	2-26
圖 2-15 矩形堰示意圖（左）；現地固床工溢流流況圖（右）	2-28
圖 2-16 水深流速計及水位計安裝位置圖	2-31
圖 2-17 水位計現地照片	2-31
圖 2-18 水位調查成果圖	2-32
圖 2-19 水深調查成果圖	2-32
圖 3-1 礪溪流域之 WMS 水文模型建置成果圖	3-4
圖 3-2 礪溪流域之 HEC-HMS 水文模型建置成果圖	3-4
圖 3-3 清水溪之 SRH-2D 水理模式建置成果圖	3-7
圖 3-4 以福祿數劃分河川之棲地單元(ENTWISTLE ET AL. 2019)	3-10

圖 4-1 整合之評估模組運作流程(水動力+生態水文+棲地廊道+經濟效益模式)	4-2
圖 4-2 現況情境之水深分佈圖	4-7
圖 4-3 現況情境之流速分佈圖	4-7
圖 4-4 現況情境之棲地單元分佈圖	4-8
圖 4-5 現況情境之棲地品質分佈圖	4-8
圖 4-6 設計情境#1 之棲地單元分佈圖	4-18
圖 4-7 設計情境#2 之棲地單元分佈圖	4-18
圖 4-8 設計情境#3 之棲地單元分佈圖	4-19
圖 4-9 設計情境#4 之棲地單元分佈圖	4-19
圖 4-10 設計情境#5 之棲地單元分佈圖	4-20
圖 4-11 設計情境#1 之棲地品質分佈圖	4-20
圖 4-12 設計情境#2 之棲地品質分佈圖	4-21
圖 4-13 設計情境#3 之棲地品質分佈圖	4-21
圖 4-14 設計情境#4 之棲地品質分佈圖	4-22
圖 4-15 設計情境#5 之棲地品質分佈圖	4-22
圖 4-16 問題拆解—既存防砂壩是否可以結合小水力發電	4-23
圖 4-17 小(微)水力規劃案場之周圍環境水系圖	4-24
圖 4-18 案場環境水頭落差量測	4-24
圖 4-19 微水力發電機組規格說明	4-26
圖 4-20 微水力發電機組選用圖	4-27
圖 4-21 POWERSPOUT LH 於清水溪之開發策略	4-28
圖 4-22 商用併網行逆變器(左);逆變器規格說明(右)	4-33
圖 4-23 再生能源歷年發電成本	4-38
(以下略)	

第一章 緒論

第一節 關鍵課題

小水力發電(small hydro)可應用於自來水廠、污水廠、河川到農業灌渠等地點，具有極高的發展潛能，可望成為臺灣重要的再生能源。依據《再生能源發展條例》的定義，小水力發電係指利用圳路或既有水力設施，設置未達 2 萬瓩的水力發電系統。國際小型水力發電中心與聯合國工業發展組織的報告指出，目前全球小水力發電已開發的裝置容量約 75 百萬瓩(GW)，還有 173 百萬瓩(GW)的發展潛能。擁有 20 年小水力開發經驗的「日本小水力發電株式會社」半田宏文社長也認為，臺灣有 3 百多座逾 3 千公尺的高山，加上降雨豐沛，發展小水力發電的條件甚至比日本更好。再者，小水力只要有水，24 小時都可以持續發電，在同樣裝置容量的條件下，年發電量約為太陽能的六倍，屬於供電較穩定的再生能源。

在國家能源轉型計畫中，小水力逐漸成為重點發展項目。為了達成 2050 年再生能源佔總發電量 60~70%的目標（國家發展委員會，2022），小水力發電儼然成為繼光電、風電後的第三棒。因為環保意識的抬頭，大型水力發電廠與大型水庫越來越難興建。臺灣早在 1986 年就開始興建小水力發電廠，包括西口電廠、烏山頭電廠、卑南小水力發電廠等，截至 2020 年農田水利署已完成了 16 處案場（圖 1-1）。另外，經濟部水利署在 2017 年公告評估全台具小水力潛能地點共 79 處，其中屬河川有 47 處、屬灌溉渠道有 32 處。近期，2023 年 10 月農業部農田水利署配合政府綠能政策，農田水利署公布 13 處小水力發電潛力場址（包含桃園、苗栗、高雄、宜蘭、花蓮及臺東等管理處），

提供產業界及學研界共同協助評估暨合作開發，總預估設置容量達一千 kW 以上。

案場名稱	管理處	裝置容量(kW)
西口電廠	嘉南	11,520
烏山頭電廠	嘉南	8,750
卑南小水力發電廠	臺東	3,960
八田電廠	嘉南	2,196
關山圳小水力發電廠	臺東	800
八卦池下游南岸聯絡渠道(5k+680)	雲林	250
后里低落差示範電廠	臺中	110
太平渠幹線(9K+180)	花蓮	80
石門大圳(櫻花步道段)	石門	20
林內圳(鄰近斗六堰)	雲林	10
林內圳(序列式機組)	雲林	10
南岸聯絡道(水利會文物館園區內)	雲林	10
竹東圳(1K+380)	新竹	5
旗山圳一幹線(0K+300)	高雄	5
吉安圳二幹線(0K+775)	花蓮	5
吉安圳一幹線南華分支線	花蓮	1.5



圖 1-1 1986-2020 年農田水利署完成之 16 處案場

然而，各地的開發計畫對於下游生態系統多止於「沒有影響」，實屬可惜。因為氣候變遷導致豐枯水量更為懸殊，將會對下游生態系統造成衝擊，設計良好的小水力電廠或許可以在兼顧發電量的前提下，透過改變引流策略來幫助下游生態系統，意即保留小型人造洪水，藉以增加棲地的橫向連續性、或移除優勢物種等。

為了積極推動淨零碳排、增加綠能之政策目標，行政院農業部農村發展及水土保持署嘗試推動以防砂壩等既有構造物結合小水力發電，作為農村社區、環境改善、監測儀器等電力來源。在小水力電廠遍地開花之際，農業部農村發展及水土保持署超前部署，提出引流(發電)策略如何兼顧經濟發展與生態保育。本計畫屬兩年期研究計畫，目前為第一年研究，整體擬回答的兩個科學及實務問題為：

- 一、第一年（112 年度）：既存防砂壩結合小水力發電效益
- 二、第二年（113 年度）：適當的引流策略兼顧發電量與生態保育

根據研究團隊的經驗與訪談利害關係人，今年度計畫擬解決問題定義如表 1-1：

表 1-1 本計畫問題定義彙整

問題定義	
既存防砂壩是否可以結合小水力發電？	
決策者	成功標準/指標
1. 農村發展及水土保持署、水利署、縣市政府(主管機關)。 2. 投資方。	1. 年發電量 6,000 度以上。 2. 10 年內回收。
影響決策者的重要力量	解決問題的時間範圍
1. 是否降低結構安全？ 2. 是否降低通洪能力？ 3. 附加價值，例如生態效益、減碳效益等。 4. 投資報酬率夠好嗎？	1. 1 年（利用礮溪發展完整的評估流程，包括規劃設計、放流策略研擬、情境分析到生態評估，以及探討可行的引流策略與補償機制）。
範圍/限制	需要的準確度
1. 開發方式可以平行複製。 2. 只取能量、不取流量（發電後即刻返還）。	1. 情境設計。 2. 情境模擬。 3. 真實財務分析。

第二節 計畫目標及研究架構

本計畫之主要目標係發展一套「防砂壩小水力發電潛能評估模組」，除了以經濟模式評估各場域的發電潛力外，更納入水動力模式與生態水文模式，藉以評估不同的放流（發電）策略對於當地河川景觀、棲地指標物種的影響，以期在享受潔淨電力供應與循環經濟發展的同時，也能兼顧下游濱溪生態系統的保育。透過完整的研究，期待搭配防砂壩等既有構造物發展的小水力發電，有機會發展為永續低碳的水綠能(Green and Sustainable Energy)。

本計畫擬以兩年的計畫期程完成概念驗證(Proof of Concept; PoC)與服務驗證(Proof of Service; PoS)。第一年擇定一處小水力發電案場，並導入完整的評估流程，包括規劃設計、放流策略研擬、情境分析到生態評估，以及探討可行的引放流（發電）策略與補償機制；第二年進一步發展「防砂壩小水力發電潛能評估模組」。

今年屬於兩年期計畫的第一年，本計畫擇定一處小水力案場導入完整的評估流程，包括：生態水文模式、棲地廊道模式、經濟效益模式，同時以設計情境進行概念驗證，嘗試回答本計畫的第一個問題：既存防砂壩是否可以結合小水力發電。

第三節 工作項目與進度掌握

本計畫重要工作項目如表 1-2 所示，以「防砂壩小水力發電潛能評估模組」、「以設計情境進行概念驗證」、「執行成果報告」三者為主，並另依此三大工作項目之工作內容、工作量比例、本計畫管考事項，分配作業日程及預定進度，以利管理本計畫之執行進度，詳見表 1-3。

「執行成果報告」依本計畫管考事項持續辦理，重要檢核時間點為：（1）112 年 7 月 17 日前提送期中成果報告書；（2）112 年 11 月 13 日前提送期末成果報告書；（3）112 年 12 月 26 日前提送成果報告書、相關資料、結束會計報告。

表 1-2 重要工作項目表

重要工作項目	工作數量				預算金額(千元)		實施地點	備註
	單位	全程計畫目標 (112/01-113/12)	至 111 年度 止累計成果	本年度 預定目標	水保署 經費	其他配 合經費		
防砂壩小水力發電潛能評估模組	套	100	0	60	600	0	臺北市	水動力模式、生態水文模式、經濟模式
以設計情境進行 概念驗證	式	100	0	100	300	0	新北市	提出至少 3 種可行性的放流策略
執行成果報告	式	100	0	50	100	0	臺北市	提送期中、期末、成果報告書

表 1-3 預定進度表

重要工作項目	工作比重 (%)	預定進度	112 年			
			1-3 月	4-6 月	7-9 月	10-12 月
防砂壩 小水力發電 潛能評估模組	60	工作量或內容	水動力模式	生態水文模式	經濟模式	-
		累計(%)	30	70	100	100
以設計情境 進行概念驗證	30	工作量或內容	評估設計情境	確定設計情境	應用模組進行分析	概念驗證
		累計(%)	10	20	80	100
執行成果報告	10	工作量或內容	計畫說明書 籌備期中報告書	期中報告書	籌備期末報告書及 成果報告書	期末報告書 成果報告書
		累計(%)	25	50	75	100
累計總進度(%)			25	53	85	100

第二章 研究地點及現地調查

第一節 研究地點

一、流域概述

本計畫研究區域在新北市金山區的磺溪流域，此處有生態，鄰近陽明山國家公園；有生活，位於清水磺溪園區上游約 300 公尺處；有生產，為農田水利署北基管理處金山工作站取水供農業灌溉事業使用。因此本計畫進一步思考，磺溪流域是否有生電的可能性。

磺溪屬中央管河川，隸屬於經濟部水利署轄管之中央管河川，其發源於大屯火山群七星山北麓，河道蜿蜒，經三和橋出山谷後河幅始漸開闊，進入金山沖積平原河幅較為寬廣，再經南勢、下六股，於社寮與來自西北向之支流清水溪與西勢溪會合後入東海。磺溪流域北臨淡水沿海河系流域，南與淡水河流域為鄰，東濱東海及基隆沿海河系流域。行政管轄分屬臺北市士林區、北投區及新北市金山區。流域內交通以公路為主，下游有省道台二線以南北橫越，由金山可北通石門、淡水，南抵野柳、基隆。磺溪流域地理位置如圖 2-1 所示。



圖 2-1 礮溪流域地理位置圖

(一) 流域特性

礮溪水系因下游地勢較為平坦，且受人工開闢渠道等人為因素影響，水系類型大致呈平行狀，而上游因高山峻嶺，地處陽明山國家公園保護區，受自然山勢分水走向而呈樹枝狀，幹流長約 13.75 公里，流域面積約 50 平方公里，平均坡降約 1/15。

(二) 地質特性

通過礮溪流域之主要斷層為金山斷層，其屬臺灣北部區域屬於存疑性活動斷層。金山斷層為一東北走向之逆斷層，東北延伸入海西南沿尖山（南莊層）中角溪至重和村穿過礮溪河谷至大屯火山群，更向西南經臺北盆地邊緣，金山斷層局部為臺北盆地的沖積層所掩覆，西南端可能連結臺北斷層。本流域上有一褶皺位於金山斷層北方，屬向斜構造，呈東北西南走向。本區域地層分

布主要有上新世桂竹林層二鬮段、中新世紀晚期桂竹林層大埔段、南莊層及現代沖積等。

礮溪流域土壤屬黃壤、紅壤及石質土交雜分布；中下游多屬黃壤，尤以支流清水溪及西勢溪流域之中下游區域均為黃壤分布區，支流之上游區域具紅壤分布；礮溪下游沖積平原為礮石、砂及黏土等沖積土分布，社寮—金包里山及中角海岸為因季風形成之沙丘，另獅頭山海岬以石質土分布為主。各種土壤特性茲分述如下：

1. 黃壤：母岩質經弱度化育而生成之土壤，有時可因淋洗作用較強而使粘粒明顯往剖面下層移動，養分（鉀、鈉、鈣、鎂）有的已流失而呈黃、黃棕或紅棕色，多生成丘陵地上之相對地形較安定、坡度起伏較和緩之處。
2. 紅壤：紅壤生成於洪積母岩台地，土層較厚，質地細緻，肥力及物理性較差。又可分為紅棕色紅壤及黃紅色紅壤兩種。
3. 石質土：由母質經由簡單之物理、化學風化作用生成之土壤，含石量超過 50% 以上，排水、通風良好，通常分布於山坡地或森林地之陡峭區，地形不穩定，甚易崩坍，不宜農牧用途，只宜造林保育。
4. 沖積土：土壤物質經河流沖刷後，帶至下游而漸次淤積成固定土壤者，土層中之顏色因人為耕作漸有所改變成淡黃色，因此可以區分有新沖積土與老沖積土。

(三) 氣象特性

礮溪流域內現存之氣象觀測站僅餘三和氣象觀測站，隸屬於

中央氣象局，鄰近流域範圍則另有金山氣象觀測站、鞍部氣象觀測站、竹子湖氣象觀測站，亦皆隸屬中央氣象局，可幫助釐清該流域之氣象特性。

磺溪流域位於臺灣北部，每年十一月至翌年四月盛行東北季風，因地形的影響氣流往上抬升，造成流域雨量豐沛。每年五月至十月間盛行西南風，受臺灣地形影響，西南氣流遭中央山脈阻隔，雨量較少；另夏季颱風多由臺灣東部及東北部登陸，因磺溪流域地處迎風面，且無地形阻隔，颱風之強風豪雨常直接侵襲本流域。流域內冬季多雨，夏季乾旱。就年雨量而言，各雨量站降雨量之差異主要為山區雨量較大，平原地區較小，由中央氣象局提供之統計降雨量資料（1991 年~2020 年）可觀察出，從沖積扇平原之 2,888.1 毫米（金山站）至高山區之 4,697.1 毫米（鞍部站），差距達 1,809 毫米，可判斷磺溪流域降雨量空間分布並不均。此外，降雨的時間分布亦不均，各月份降雨量差異顯著。以九月至隔年五月為雨季，山區部分尤以九至十一月降雨量更大，流域整體之平均年降雨量由下游河口向上游山區遞增。另在颱風暴雨時期，其雨量分布則受颱風規模、路徑、地形而有所不同之反應。

由鄰近磺溪流域之中央氣象局主要氣象站月平均氣溫統計，磺溪流域最冷的時節為冬季十二月到隔年三月，山區氣溫較低，月平均氣溫約在 9.8~12.8 度，平地月平均氣溫約在 15.8~17.6 度；最熱的時間是六月到九月，整體月平均溫度約 21.9~29 度。

相對濕度因地形、季節不同均有些許差異，北部山區相對濕

度月平均約為 86~90%，平原濱海地區約為 80%；山區之相對濕度因季節變化較小，但冬季受東北季風因素影響，相對濕度較夏季高；而平原濱海地區之夏季相對濕度較低，均在 80%以下。

(四) 人文地理與社會經濟狀況

磺溪流域整體行政分區包含臺北市士林區、臺北市北投區、新北區金山區，因上游屬陽明山國家公園管轄之範圍，居住人口稀少，流域內人口主要分布於中下游，故人口以中下游之新北區金山區境內為統計對象。根據新北市金山區公所 112 年整理統計資料指出，截至 112 年 10 月為止新北市金山區，該區人口總數為 20,401 人，男性占 10,055 人、女性占 10,346 人，較男性多 291 人；人口密度每平方公里人數約為 423 人，共計 15 里、201 鄰、總戶數為 7,285 戶，每戶人口數為 2.80 人，各里人口數最多者為金美里 5,561 人，占地面積為 0.4 平方公里，可謂地狹人稠，其次為美田里，人口數為 4,409 人，磺港里、五湖里人口數為 1,827 人居第三位，最少人口數為西湖里 172 人，而土地最廣為重和里之 24.5 平方公里，人口數 1,203 人，相對為地廣人稀（新北市金山區公所，2023）。

該流域內之經濟型態多以農業、漁業為主，根據新北市金山區公所統計農耕土地面積及農戶人口數，耕地面積總計 843.84 公頃，其中水稻耕作面積約 28.93 公頃。除耕種水稻外，該區亦種植台農 66 號紅心甘藷、筴白筍、跳石芋頭與箭竹筍等經濟農作物，尤以紅心甘藷為金山區之名產，近年來金山區農會推動一年一度金山甘藷節，亦帶動本地區觀光農業之發展。

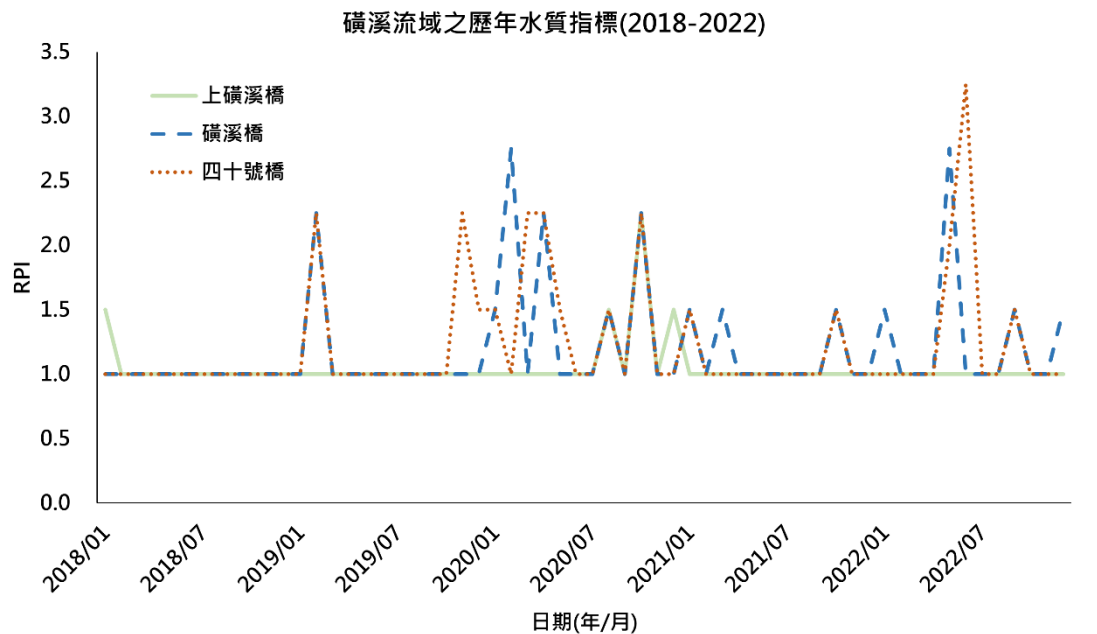
該流域內磺港漁港為一中型漁港，也是金山最大的漁港，主

要以延繩釣漁業為大宗，少數從事火誘網漁業，漁獲物以石斑、黑喉、嘉臘、赤鯨、馬頭、火口、白鯧、烏口、透抽、小卷、白口、花市、花枝等為主，漁產相當豐富。除此之外，更有其他漁港所沒有的溫泉資源，新北市政府及金山區公所等單位有鑑於目前漁業經營日益困難，傳統漁業朝觀光休閒轉型是必然的趨勢，使磺港漁港結合漁業、溫泉及周邊景點等條件，朝向漁業轉型及漁港多元利用，讓漁業得以永續經營方向而努力。

(五) 河川水質

行政院環境保護署於磺溪流域內設有三處水質監測站，分別為上磺溪橋測站、磺溪橋測站、四十號橋測站。上磺溪橋測站位於上游河段，磺溪橋測站及四十號橋測站則於下游河段。各測站依每月量測之溶氧量、生化需氧量、懸浮固體、氨氮之四項水質資料計算河川污染程度指標(River Pollution Index, RPI)，該指標可分為四級：未受污染(<2.0)、輕度污染($2.0\sim3.0$)、中度污染($3.1\sim6.0$)、嚴重污染(>6.1)。本計畫整理此三測站由2018年至2022年之歷年水質變化見圖 2-2。由圖可見，磺溪橋測站及四十號橋測站之 RPI 指標變化相較於上游之上磺溪橋測站頻繁，常介於輕度污染及中度污染間，除水系特性之外，亦受到下游兩岸居民活動之影響。整體而言，磺溪流域多介於未受污染至中度污染之間，隨流量豐枯呈週期性變化，水質尚稱良好。另磺溪流域上游發源或流經大屯火山群，其最後一期噴發大約在 30 萬年前，之後火山活動雖然停止，然在火山地區地層仍有許多小斷層或裂隙，當雨水下滲成為地下水，與地下深處的熱源接觸，形成熱水或熱氣，並混合著岩漿所釋出的硫、氯等氣體，再沿斷層或裂隙上升至地

表，形成溫泉或噴氣孔，故流經此區域之磺溪，礦物離子含量較高，屬 pH 值較低之酸性水質。



資料來源：行政院環境保護署；本計畫整理繪製。

圖 2-2 磺溪流域之歷年水質指標(2018-2022)分布圖

(六) 流域植物分布

磺溪流域自河口至上游陽明山國家公園區，境內野生植物涵括平原農田生態及次生林地等分布，參照 106 年磺溪治理規劃檢討報告，茲以磺溪下游至磺溪上游分處敘述：

1. 磺溪出海口會合處（磺溪下游）

山丘上避風處日照強，木本植物以木麻黃，野桐為主；磺溪出海口舊河道有野荳薺、水毛花等水生植物。

2. 西勢溪與磺溪交會口

兩岸為水泥砌牆，近海處高木，如木麻黃、黃槿、林投、榕樹等、兩旁則有農業時期留下之竹林，令有次生植被如芒草、蘆竹、及大花咸豐草等；河床旁邊有水生植物如稗、水丁香、細葉水丁香、鴨舌草、斷節莎、墨菜、八字蓼；尚有沙崙生態植物如三葉五加、木麻黃、馬櫻丹、海桐、小葉桑、桔梗蘭、茵陳蒿、短葉水蜈蚣、白茅、馬鞍藤、草海桐、蔓荊、天人菊、文殊蘭、濱刺麥等。

3. 三界壇清水溪旁

農作物有荷花、筊白筍、水芋等。旱田中有水生植物如八字蓼、小花水丁香、滿江紅、粉綠狐尾藻、長梗滿天星、水竹葉、尖瓣花、水芙蓉、翼莖闊苞菊、水蕨、七星山穀精草、細葉碎米薺、中國水竹葉、白花霍香薊、鼠麴草等；另有芋麻、水竹葉，喬木下有伏石蕨、橢圓腺蕨、傅氏鳳尾蕨、鱗蓋鳳尾蕨、長葉腎蕨、密毛蕨等蕨類，並有芒草、李氏禾等多種禾本科植物。路旁的水圳邊小水溝旁有杜虹花、細葉芋麻、水竹、魚腥草、糯米糰、扛板歸、漢氏山葡萄、雞屎藤、香蘭、禾本科幼苗、雀榕等植物分布。

4. 下六股農田

積水的田裡水生植物豐富，周圍有以杜鵑為主的園藝，其他如九留米、麻竹、過溝菜蕨、白花紫蘇、針蘭、畦畔莎草、大井氏水莞、水芹菜、水蓴衣、野慈姑、茯苓菜、心葉母草、鴨舌草及八字蓼等；旱田則有爵床、

細葉蘭花參、王爺葵、長梗滿天星、扛板歸等為優勢種，溝渠中仍有水棉等植物分布。

5. 金山平原河灘地

該處農業墾殖，呈次生林相，常見的有食茱萸、相思樹、苧麻、小葉桑、青箱子、杜紅花、臺灣澤蘭、蛇莓、灰木、三葉五加、白茅、艾草、火炭母草、點地梅、雙面刺、狗尾草等。

6. 礮溪中橋（礮溪中游）

沖積扇河床有砂土、鵝卵石、壤土，溪邊緣有樹護堤，皆屬陽性樹種，中游河灘以上便是農業區，溪谷有堰壩，混合清水可半灌溉，溪流窄變開闊，水流緩和，有砂土堆積及小鵝卵石與紅土礫石層，礮溪流入平原，形成自由曲流，洪水期因淤塞，流域改道，堆積成開闢地，可長植物漸成植被，接近水邊轉快，河岸灘地，土壤豐厚，植被豐富，有禾本科植物、菊科植物（如大花咸豐草、含羞草、牽牛花、鼠尾粟），高灘地則有如烏柏、水同木、苧麻、杜虹花、蓖麻、野棉花、蘆竹、牛筋草、裡白刺蔥、食茱萸、臺灣野桐、紫蘇、羊蹄、香楠、島榕、紅楠、香葉樹、變葉懸鉤子、腺葉懸鉤子、酸藤、日本山桂花、山桂花、長梗紫麻、山黃麻、紫花霍香薊、相思樹、海州常山、青箱子、李氏禾、紅蓮蕉花、白匏子、青苧麻、小葉桑、五節芒、象草、杜鵑花、碎米薺、薄姜木、王瓜、紅果、牛乳榕、山柿、風藤、麻竹、海桐、紫花醉醬草、銳葉牽牛、槭葉牽牛、開卡

蘆、白花紫蘇、白茅、翼莖闊芭菊、林投、南美朱槿及臺灣何首烏等。

7. 中游開闊地農田

有蛇莓、夏枯草、光風輪、狗尾草、青葙子、芭蕉、幹花榕、裡白蔥木、白匏子、血桐、杜虹花、江某、樹杞、臺灣澤蘭等。往上游處河床變窄水流急，石塊變大，三和橋下攔砂壩河岸以陽性植物為主，其中山黃麻最多；農田植物與中游相似，但兩岸較原始，再往上小平地有梯田，及園藝作物等。

8. 礮溪上游

山谷有闊葉林，有芋麻、江某、棕葉蘆，有苔蘚及草藻類生長，另有紅刺蔥、白匏子、筆筒樹、水桐木、山棕、楠木、月桃、芒草、東方狗脊蕨、申跋、原生的金毛杜鵑、水鴨腳秋海棠、冷清草、水冬瓜、蜜花芋麻、食茱萸、華八仙、五節芒、野桐、山黃麻、裡白刺蔥等。古河床之河階臺地，斷面石頭大，河流改道，河床長出芒草，水流湍急，河岸兩旁有水鴨腳、水冬瓜、龍船草、烏毛蕨、長梗紫麻、山芋等。礮溪頭面對東北季風，300公尺就有雲層，上升氣流擋住山頂，山頂下雨帶來雨量，產生北降植物，東北季風下的植被都是迎風面，風壓大且溫度低，植物特徵為葉乾淨、圓形樹冠、低矮。其植物包含箭竹、粟蕨、金毛杜鵑、滿江紅、紅星杜鵑、中原氏杜鵑、華八仙、狹瓣八仙等。另調查有烏皮九芎、假赤楊等。森林主要的樹木為開闊地陽性樹種，如山黃

麻、白匏子、野桐、幹花榕、牛乳榕、九丁榕、菲律賓榕、烏柏、食茱萸、裡白刺蔥等。沿溪有次生林地，主要林木有楓香、鵝掌柴、樹杞、細葉饅頭果、錫蘭饅頭果、樹梅、烏皮九芎、大葉楠等樹種。

(七) 流域動物分布

磺溪流域之動物物種亦相當豐富，主因為流域上游為陽明山國家公園，居住人口稀少，生物可利用之棲地較多，整體可以陸域動物、水域動物分述：

1. 陸域動物

磺溪上游穿梭在山林之間，從空中鳥瞰狀似一棵樹的枝幹。因地屬陽明山國家公園，人為干擾較少且植物茂密，森林生態系統豐富，森林密佈使野生動物容易繁衍。早年山羌、水鹿、山豬、臺灣獼猴數量多，後因盜獵者多獵殺山羌、水鹿、山豬，目前大型野生動物僅存山豬、臺灣獼猴；山羌、水鹿則已絕跡，穿山甲因國家公園保護，近年來常見於磺溪頭一帶。此區之蛇類物種相當多樣，常見的有赤尾青竹絲、眼鏡蛇、龜殼花、過山刀、青蛇、水蛇。而食物鏈下方的蛙類數量更多，常見的有澤蛙、貢德氏赤蛙、梭德氏赤蛙、福建大頭蛙、拉都希氏赤蛙、褐樹蛙、艾氏樹蛙、臺北樹蛙、面天樹蛙、中國樹蟾、小雨蛙、盤古蟾蜍、黑眶蟾蜍等 13 種。居於食物鏈上方的猛禽亦是本區的主角，如大冠鷲、松雀鷹等。

中游流域以平原為主，地景上多為水田，造就水田

伴生動物，如食物鏈下游的負子蟲、松藻蟲、紅娘華、搖蚊、蟋蟀、螺貝及蝌蚪，供養了多種蜻蜓有白痣珈蟪、青紋細蟪、烏帶晏蜓、薄翅蜻蜓等。

下游河口常見灰瓣足鵲覓食，該水鳥來自西伯利亞，因市場魚肉販倒廚餘而吸引，常年聚集於此。海尾沙崙則形成天然屏障，成為北海岸最重要候鳥棲地，內側水田沼地常見雁鴨種、鷺鷥科、鵲科、鵲科、鷗科及鷺鷥成群聚集，本地留鳥如小白鷺、黑鷺等整年可見。

2. 水域動物

磺溪因上游大量的溫泉、氧化鐵等酸性物質沖入磺溪，水棲生物無法生存，直到下游美田段至出海口，溪水大幅稀釋後才出現蝦蟹類、龜、鰻魚等，兩大支流的清水溪、西勢溪則有豐富的水棲生物，尤其以清水溪的水棲生物族群數量最豐，如表 2-1。

表 2-1 磺河流域水域動物調查表

生物族群	物種
魚類	臺灣鬚鱨、臺灣石鱨、臺灣鏟頰魚、粗首鱨、鯽魚、泥鰍、赤吻斑蝦虎、臺灣纓口鰍
蝦蟹類	澤蟹、蔡氏澤蟹、日本絨螯蟹、米蝦、臺灣沼蝦、日本沼蝦、大和沼蝦、粗糙沼蝦
螺貝類	捲螺、榔螺、圓田螺、石田螺、川卷、塔卷、瘤卷、網卷、河蚌、蛤蜊
水棲昆蟲	水蠅、水蜈蚣、負子蟲、龍蟲、水黽、鼓蟲、長鬚石蠶、石蠶蛾幼蟲、蜉蝣幼蟲、石蠅幼蟲

資料來源：經濟部水利署第十河川局，2017。

二、研究區域選定

本計畫研究區域為清水溪河段，屬縣（市）管河川，為磺溪主要支流之一，行政分區為新北市金山區，上游集水區主要為陽明山國家公園範圍，下游則匯流入磺溪，總長約 3.4 公里，該處屬陽明山國家公園管理處、行政院農業部農村發展及水土保持署、經濟部水利署第十河川分署等三處公部門轄管範圍交會處，其地理位置圖如圖 2-3。

研究區域河道總長約 142 公尺，地理位置鄰近天籟飯店，可由台 2 甲線（陽金公路）經金山市區後抵達，交通、資源補給相對便利，大幅減輕現地勘查之困難度。經了解，於研究區域上游之無名橋左岸有部分待開發之私人土地，將來規劃興建休憩民宿，有用電量之需求。此外，本計畫於現地勘查時發現在清水溪匯流入磺溪處有一既設之固床工，高差約 2.5 公尺，形成一段可有效發展小水力發電之潛勢區域。固床工除發揮抬昇清水溪水位、提供水頭落差外，亦發揮導流功能，使其另一處支流流量增加，提供水棲生物棲地，該支流下游流經磺溪頭清水園區後又匯入磺溪主流，如圖 2-4 所示。基於上述各因素，本計畫認為清水溪之該河段符合具備用電需求、發電潛勢、生態效益之因素，故選定此處作為本計畫之研究區域。

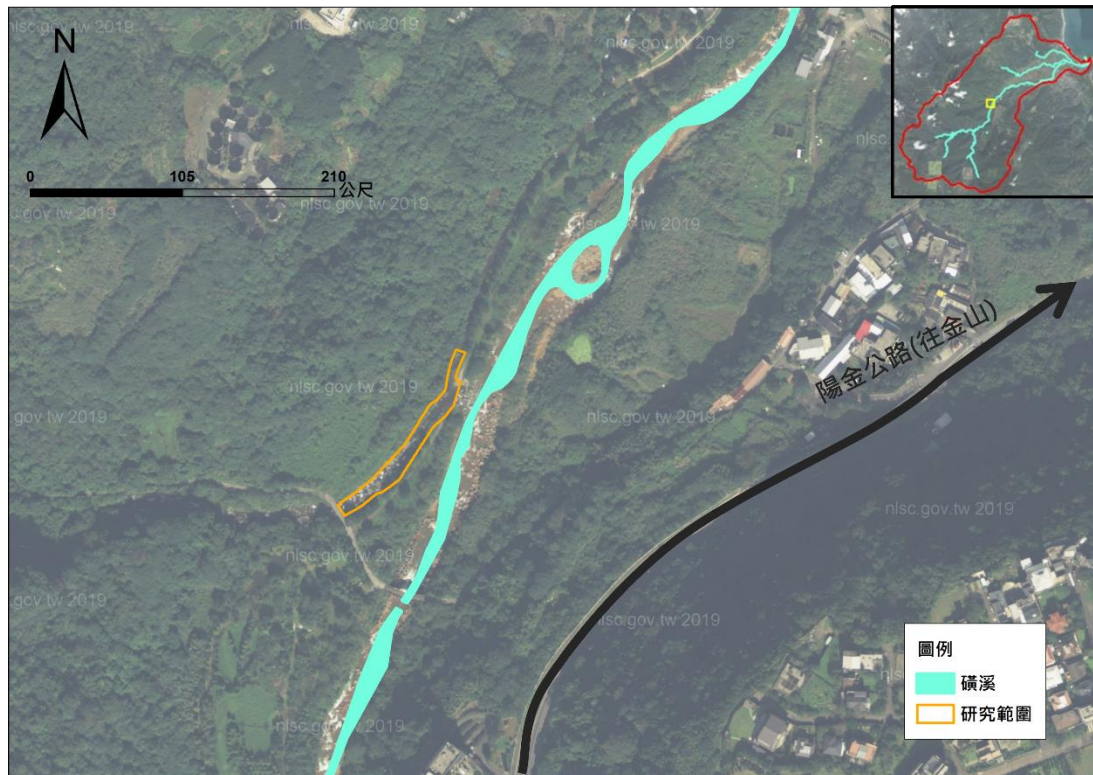


圖 2-3 研究區域地理位置圖



圖 2-4 清水溪分流示意圖

第二節 資料蒐集

一、集水區資料蒐集

本計畫研究區域屬磺溪流域之子集水區範圍內，除針對磺溪集水區之特性（如土地利用、土壤特性等）進行資料蒐集外，其地勢起伏也為重要之地理資訊，故本計畫由內政部國土測繪中心之免費開放資料，蒐集臺北市、新北市之 20 公尺網格數值地形模型(Digital Elevation Model; DEM)資料，其可透過政府資料開放平臺(<https://data.gov.tw/>)直接下載使用，無須透過正式公文索取，其提供之網格地形資料可直接透過地理資訊系統(Geographic Information System; GIS)檢視並擷取所關注區域之地形資料，減少對於電腦硬體之負擔，可有效提升建置水理數值模型之效率及成功率。

本計畫研究區域之清水溪屬縣（市）管河川，其地形調查資料較少，僅可透過內政部國土測繪中心公開之 20 公尺網格數值地形模型資料大致了解其地形起伏，然本計畫重點關注之河段河寬約 5 公尺至 13 公尺，且位於河川之中上游區域，地勢起伏較大，河道內有許多大型石塊，以解析度為 20 公尺 × 20 公尺之數值地形尚屬精確度不足。為精準掌握河道內之地形輪廓，有必要蒐集更加細緻之數值地形模型資料，本計畫已正式提出申請索取內政部國土測繪中心之 5 公尺網格數值地形模型資料，因該數值地形模型屬於管制資料，需透過正式之函文申請及簽署資料管制同意書，提交管制資料使用人員列表、申請數值高程圖號，待內政部國土測繪中心核准之後才可使用，目前已於本年度 9 月經國土測繪中心核准後領取資料，對於數值模型之建立及模擬將有極大之幫助，磺溪流域之 5 公尺網格數值地形模型成果如圖 2-5 所示。除 5 公尺網格數值地形模型外，本計畫另規劃針對重點關

注河段進行多點之現地地形調查，主要目的為更加了解河道內之地勢起伏，細化其高差輪廓，加密地形變化較大之區域，以此輔助 5 公尺網格數值地形模型，由此兩者地形資料蒐集建立較精準且完整之數值地形模型，以提升水理模式模擬分析之準確度。

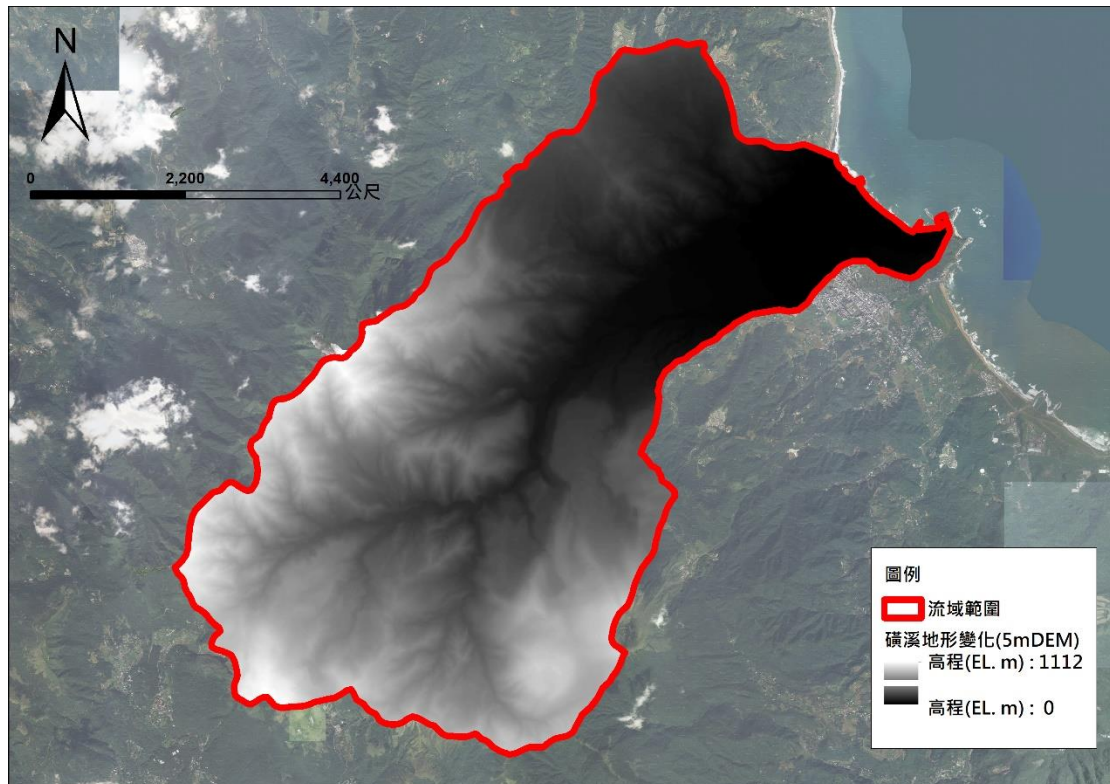


圖 2-5 礧溪流域之 5 公尺網格數值地形模型成果圖

二、水文資料蒐集

礧溪流域內現存之氣象觀測站僅餘三和氣象觀測站，隸屬於中央氣象局，鄰近流域範圍則另有金山氣象觀測站、鞍部氣象觀測站、竹子湖氣象觀測站，其地理位置如圖 2-6。可透過蒐集上述之氣象觀測站紀錄之氣象資料，如降雨量、蒸發量、氣溫等參數，以掌握研究區域之氣象特性。本計畫預計建立一完整流程，將蒐集之集水區資料建立降雨—逕流模式，並輸入降雨量資料模擬該集水區發生降雨事件時，

其雨水於地表入滲後形成之地表逕流，匯集於磺溪主河道及其支流所能提供之河水流量多寡，以利評估小水力發電情境設計及發電機組選擇。

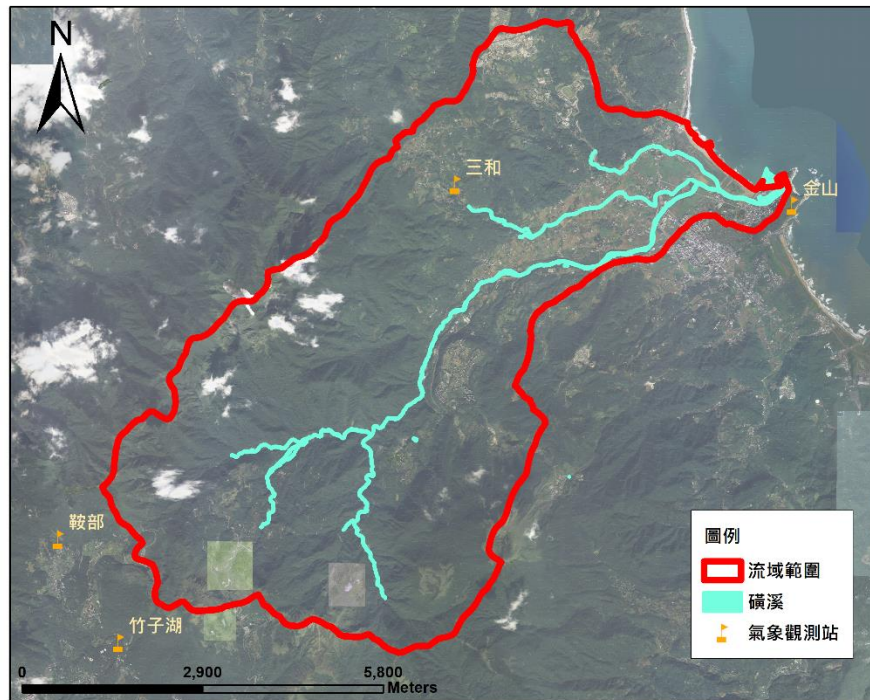


圖 2-6 磺河流域鄰近之中央氣象局氣象觀測站地理位置圖

三、魚類適合度資料蒐集

本計畫之研究區域位於磺河流域主要支流之清水溪。如前節所述，磺溪主流因受發源地流經大屯火山群，溫泉、氧化鐵等酸性物質沖入河水，使得水棲生物無法生存，而支流清水溪則蘊含豐富之水棲生物。為於此處安裝小水力發電機組，本計畫將設計多種水理情境，除評估其發電效益及適用發電機組外，亦將評估對於環境生態所帶來之正面效益或負面效果，故本計畫導入棲地適合度指標(Habitat Suitability Index; HSI)以評估在不同設計情境下，指標物種對於棲地之適合度指

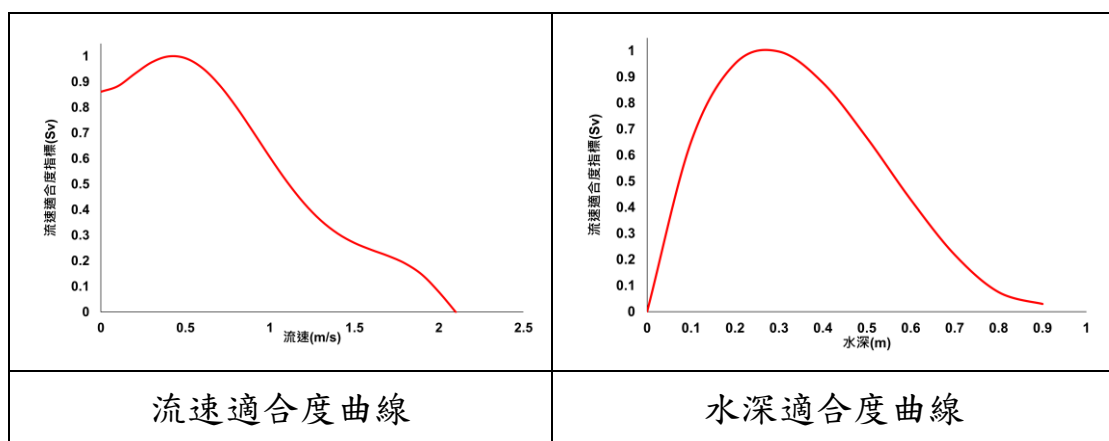
標，藉此了解對於生態環境之效益或衝擊程度。棲地適合度指標通常以流速適合度曲線及水深適合度曲線計算而得，該兩者適合度曲線可依不同之流速、水深，計算某特定物種之流速適合度指數、水深適合度指數，其範圍皆介於 0 至 1 間，並屬無因次參數，再透過幾何平均計算出棲地適合度指標。

魚類是最常做為水域生物棲地品質的評估對象(Shih et al., 2008)，本計畫參考河川生物指標物種分析及其適合度曲線研究(經濟部水利署水利規劃試驗所，2010)所建立之各河川物種，選擇以臺灣石鱮(*Acrossocheilus paradoxus*)作為本計畫之指標物種，如圖 2-7。臺灣石鱮為臺灣特有種魚類，廣布臺灣北部、西部、南部、東部河川，為初級淡水魚類，多喜歡棲息於水流湍急、溶氧較高之溪流及較清澈之深潭下層，成魚白天較常躲藏於石縫之中，夜間才出來覓食，幼魚則終日在沿岸、石頭間或岩壁上穿梭覓食。雜食性，主要攝食石頭上的藻類及水生昆蟲，其流速適合度曲線與水深適合度曲線見圖 2-8。使用該二曲線計算適合度指標時，需注意流況是否超越其適用範圍，流速適合度曲線適用範圍為流速介於 0~2.08 公尺/秒；水深適合度曲線適用範圍為水深介於 0~0.9 公尺。



資料來源：台灣魚類資料庫，<https://fishdb.sinica.edu.tw/chi/home.php>。

圖 2-7 臺灣石鱚照片



資料來源：經濟部水利署水利規劃試驗所，2010；本計畫繪製。

圖 2-8 臺灣石鱚之流速、水深適合度曲線

第三節 現地調查

本計畫目前已進行 3 次現地調查，歷次照片整理如圖 2-9。目的在掌握研究區域之地形地貌、水深流速、生物棲地、小水力發電潛力等。其中，為蒐集更加精準且詳細之現地資料，以提供水動力模式、生態水文模式模擬研究區域之水理情況與生物棲地結構，本計畫研擬調查研究區域之水域地形資料及流量、水位之水文資料，於模式模擬時將可更加貼近真實情況。本計畫除規劃傳統即時測量外，也於現地設置多處監測站，以利蒐集不同時間之連續性數據資料。





圖 2-9 本計畫現地調查照片集錦

一、地形調查

目前對於河道地形的量測方式，多數以量測多條河道斷面後進行河道方向內插，描述整體河道地形變化，因此本計畫規劃量測之斷面多選以河貌明顯變化處、突縮或突擴處、河道彎曲及匯流處等對於水理狀況與地形內插結果影響較甚之區域。量測河道斷面方式有測深桿、測深錘、鉛魚或回聲測深儀等，然因本計畫關注河段之水深於空間上變化較大，較不適用傳統之量測方式，故本計畫利用虛擬基準站即時動態定位技術(Virtual Base Station Real-Time Kinematic; VBS-RTK)，其運作原理為：將衛星資料即時計算轉換為所量測點之三維坐標，扣除量測桿長即可得到河道斷面地形，其解算速度快且架設方便，並可獲得公分級精度定位，非常適合用於野溪地形調查。

本計畫於 2023 年 7 月 4 日於清水溪研究區域範圍內進行地形調查，共規劃 181 個量測點如圖 2-10 所示，並於 9 月份申請取得 5 公尺網格數值地形模型 DEM 資料，故可由 5 公尺網格數值地形模型資料作為基礎，局部重點關注區域則以 VBS-RTK 現地地形調查之成果加密修正，建立較為細緻之數值地形模型，以供水理模擬分析及生物棲地分布模擬使用。



圖 2-10 VBS-RTK 量測點位分布圖

二、流量調查

了瞭解研究計畫區域內之流量、水位變化，以提供設計情境參考及水理模式之邊界條件設定，本計畫分別安裝一處流量站及兩處自記式壓力水位計進行監測調查，其地理位置圖如圖 2-16 所標示。

本計畫於 2021 年 6 月 28 日在新北市金山區重和里清水溪匯入礮溪主流處之前預先佈設一處「輕量級感測器－水深流速計」（經緯度坐標：25.20835, 121.59337），藉以量測不同時間點的流量資料，詳細監測站說明可參考表 2-2。另外，「輕量級感測器」其具備快速安裝及拆除、方便攜帶、一體成型等優點。在量測資料傳輸是以低功耗廣域網路(Low- Power Wide-Area Network; LPWAN)的 NB-IoT 傳遞至雲端主機儲存。

此流量站迄今已收集了超過 16,000 筆資料（回傳頻率為 1 筆/每小時）。流量分析的時間起迄為 2021 年 6 月 28 日至 2023 年 5 月 9 日，將這段期間的流量繪製成超越機率圖(exceedance probability)，如圖 2-11，可以初步掌握監測期間之流況 ($Q_{50}=0.503\text{m}^3/\text{s}$ ， $Q_{80}=0.229\text{m}^3/\text{s}$)，這些資料可提供後續的生態水文分析及小（微）水力發電潛能評估非常重要的參考依據。

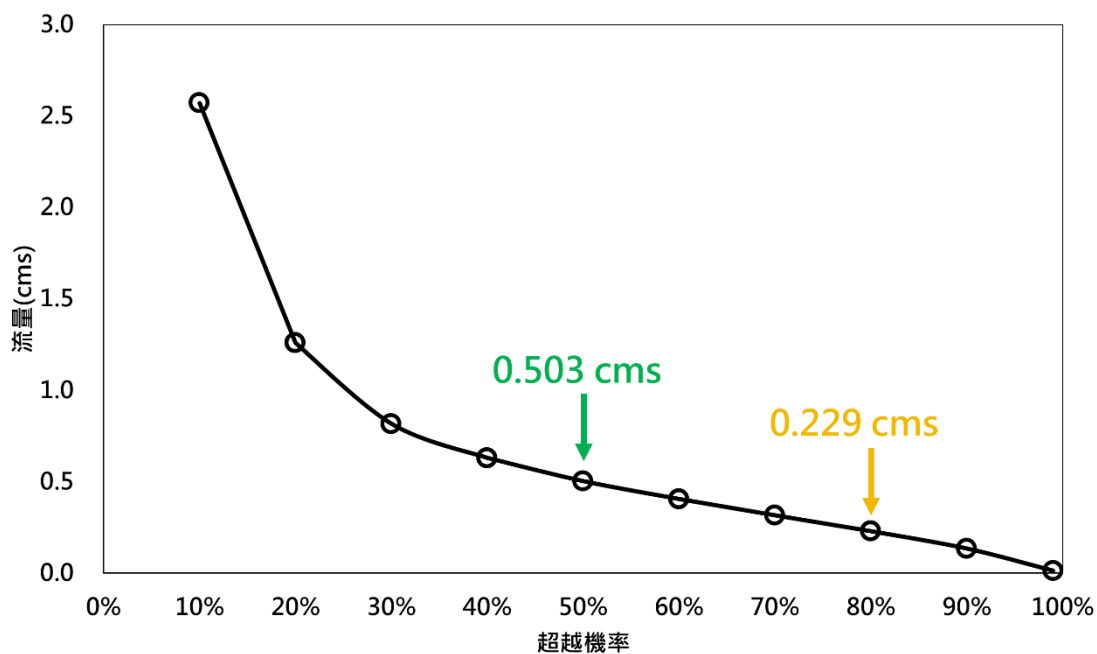


圖 2-11 本計畫佈設清水溪流量監測之超越機率圖

上游處可透過監測站得到流量資料，下游段則需要倚靠現地測量調查流量，因研究區域下游段之清水溪分成兩股水流，一股經固床工後匯入礮溪主流，另一股則流向下游之礮溪頭清水園區後才匯入主流，故有其必要掌握其分流後之各支流之流量。本計畫將分別以流速計搭配水深量測，建立研究區域各斷面之流量外，同時於研究區域下游匯流口架設之水位計，搭配匯流口之幾何長度與流量調查成果，訂定匯

流口斷面之堰流係數 C_d ，可應用於堰流公式透過水位水深值快速推估流量。以下分別說明斷面流量與匯流口流量監測方法。

本計畫使用之流速儀屬手持式流速儀，型號為 GENERAL Flow Watch FW450。本流速儀底部可裝設螺旋槳探頭，其轉動速度將會於儀器內部換算後，直接於手持面板上顯示該時刻之流速，其可量測流速範圍介於 0.1 至 10 公尺/秒，解析度為 0.1 公尺/秒。此外，本流速儀已於臺大水工所之室內水槽進行流速校正，用以推估實際流速，其校正結果如圖 2-12 及式 2-1。

本研究區域共劃設 28 個斷面，各斷面橫向每 0.5 至 1 公尺（圖 2-13 中 Δw_i ）以流速儀與皮尺分別量測各斷面之平均流速(average velocity)與平均水深。根據 Chow et al. (1988)，當水深小於 2 英尺（約 60.96 公分）時，流速量測位置位於約 0.6 倍水深（由底部算起）；水深大於 2 英尺時，則可量測 0.2 倍水深與 0.8 倍水深位置之流速後平均。此外，為以連續方程式推算斷面流量，本計畫將利用皮尺，於流速量測位置同時量測其水深。各斷面之流量之推估如圖 2-13 及式 2-2 之關係計算。利用手持式流速儀與皮尺量測河川斷面流速與水深之現地調查照片如圖 2-14。

$$V_t = 0.4699V_m + 0.700 \quad \text{式 2-1}$$

$$Q = \sum_{i=1}^n V_i d_i w_i \quad \text{式 2-2}$$

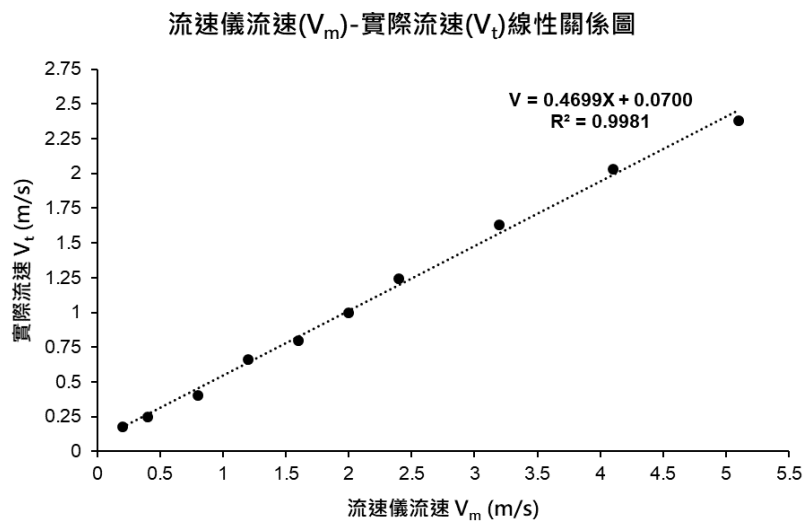


圖 2-12 Flow Watch FW450 手持式流速儀校正關係圖

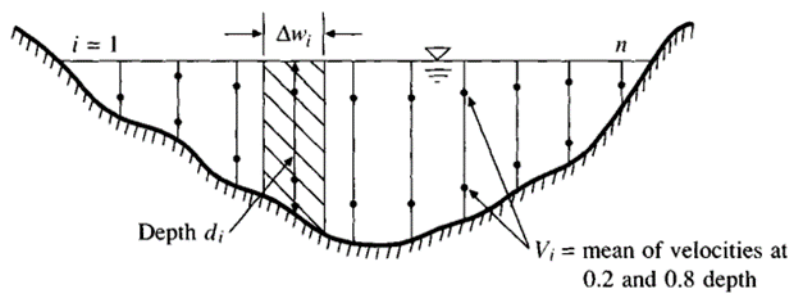


圖 2-13 斷面流量計算示意圖(Chow et al., 1988)



圖 2-14 手持式流速儀量測河川斷面流速與水深量測現地照片

上述之流速計與水深量測以推估流量之方法可推估量測時的流量，惟對於水力發電發展而言，必須釐清豐枯期的流量變化，於水力發電規劃時，才可確保其運作具有足夠效益。本計畫初步判釋清水溪與礮溪匯流口處具微水力發電潛能，因此其於不同季節的流量變化將會直接影響發電效益。然而，定期量測斷面流速與水深將耗費大量成本。由於匯流口之固床工幾何形狀似明渠流之矩形堰(rectangular weir)，因此可藉由現地監測資料，搭配堰流公式，建立匯流口的流量與水位關係，進一步連續性監測水力發電潛域之流量隨時間與季節之變化。利用堰流理論建立流量關係之調查方法說明如下。

考慮水流經過堰體之束縮之矩形堰公式如式 2-3 所示。堰流流量 $Q(\text{m}^3/\text{s})$ 與堰底以上之水頭 $H(\text{m})$ 呈 1.5 次方正比，同時因束縮產生了流量係數 $C_d(\text{m}^{-0.5}\text{s}^{-0.5})$ 。 B 為矩形堰寬度(m)， g 為重力加速度(m^2/s)。若理想化無束縮狀況，流量係數 C_d 則為 1。

$$Q = C_d \frac{2}{3} B \sqrt{2g} H^{1.5} \quad \text{式 2-3}$$

根據式 2-3，為求得匯流口矩形堰之流量係數 C_d ，須於量測堰寬 B 後，建立流量 Q 與堰上水頭高 H 之率定關係。流量 Q 部分，本計畫將利用先前所述之流速與水深量測方法，在不同水深時，於匯流口斷面量測該時對應之流量；此外，本計畫於匯流口堰體上游約 5 公尺處架設一水位計，其可監測流量量測時的對應水深；堰寬 B 則利用皮尺量測。藉由多組流量 Q 與堰上水頭高 H 之數對，利用式 2-3 之關係可推導匯流口之堰流流量係數 C_d 。求得流量係數後，後續即可利用匯流口上游之水位計資料與式 2-3，長期且連續性監測匯流口的流量隨時間之變化，進而評估本微水力發電潛域的潛在發電量。

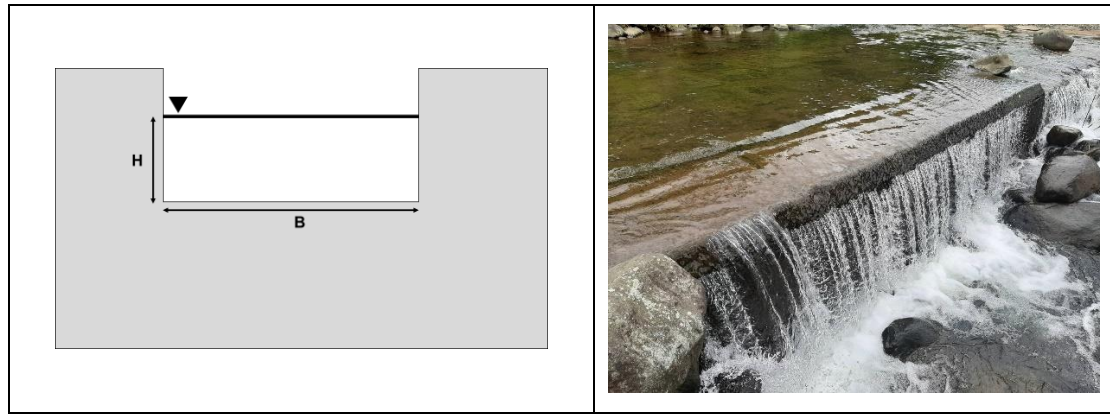


圖 2-15 矩形堰示意圖（左）；現地固床工溢流流況圖（右）

三、水位調查

考量研究區域內缺乏水位監測站，本計畫於 2023 年 7 月 4 日安裝自記式壓力計以進行常時之水位高程監測調查，分別於關注河段之中游、下游區段各安裝一支自記式壓力計，主要負責監測水中之壓力值，並於鄰近灘地安裝一支負責監測大氣壓力之自記式壓力計，藉此利用兩者之壓力差值推算水位高程，其計算公式如下。

$$H_{WL} = H_g + \frac{P_W - P_A}{\rho g} \quad \text{式 2-4}$$

其中，

H_{WL}	=水位(m)
H_g	=地表高程(m)
P_W	=水中自記式壓力計壓力值(mba)
P_A	=空氣中自記式壓力計壓力值(mba)
ρ	=水密度(kg m^{-3})
g	=重力加速度(9.8m s^{-2})

欲進行水位推算前，須得知自記式壓力計安裝位置之地表高程，否則扣除後的壓力值僅能代表壓力計位置之水深變化，而非絕對高程值。本計畫即於安裝自記式壓力計同時透過 VBS-RTK 量測其地表高程，透過水中及空氣中監測之壓力差值推算該點水位。

本計畫所使用之自計式壓力計型號為 Onset HOBO U20L，為長筒形壓力計。外殼直徑 3.18 公分、長 15.24 公分，外殼材質為聚丙烯，可適用於淡水與鹹水環境，以確保長期使用無故障；內部以陶瓷壓力傳感器感應絕對壓力並記錄於水位計中。另可依照使用者需求設定資料紀錄的時間間隔，本計畫目前採用 1 筆/每 15 分鐘之記錄頻率。

使用直徑 4 英吋、總長 1 公尺之 PVC 管作為自記式壓力計之保護措施，安裝前須預先將其整管管壁鑽孔以利水流進入，於安裝點位下挖一定深度後，將 PVC 管部分管長埋入以固定，形成觀測井。考量現地河道底質參雜許多較大之石塊（直徑大於 20 公分），人工能下挖之深度有限，經多次評估與選擇設置點位後，當向下挖深至觸及大石塊後，即埋設 PVC 管並回填土方，另取鄰近河床上之石頭堆疊於 PVC 管四周，以防止 PVC 管遇大流量而傾斜或傾倒。最後將自記壓力式壓力計用尼龍繩綁妥於 PVC 管內後，進行頂部封蓋，即完成水位計裝設作業，如圖 2-17。

紀錄日期自 2023 年 7 月 4 日開始，每月定期進行資料蒐集及儀器維護，因自記式水位計安裝位置於河道中央，雖有以現地之天然石塊進行加固工程，然仍可能因上游之較大流量導致觀測井受損，故每月維護之重點為確認觀測井是否有偏移、傾斜、PVC 管受損、堆砌石塊減少等。水位資料記錄圖 2-18，目前已記錄餘 4 個月之水位資料，惟因 10 月之調查遇山區雷雨，天候不佳，故未進行河道中之水位計資料蒐集，以至於圖 2-18 中尚未呈現 10 月之水位資料，該部分將於成果報告中呈現。整體而言，中游水位變化多介於 81.8~82.0 公尺之間，水深多介於 0.3~0.6 公尺之間，下游水位則介於 80.9~81.2 公尺之間，水深多介於 0.6~0.8 公尺之間，變化起伏較小，僅於 8 月 3 日觀

察到發生較高之水位，推測應為卡努颱風挾帶大量降雨而造成。

表 2-2 清水溪監測站說明

設立地點	新北市金山區重合里
設立日期	110 年 6 月 28 日
經緯度座標	(25.20835, 121.59337)
高程(EL. m)	92
地點描述	磺溪旁進天籟飯店之清水溪，屬於縣管河川，周邊屬私人土地，監測點位座落於清水溪無名橋上，可開車直達。
現地照片	



圖 2-16 水深流速計及水位計安裝位置圖

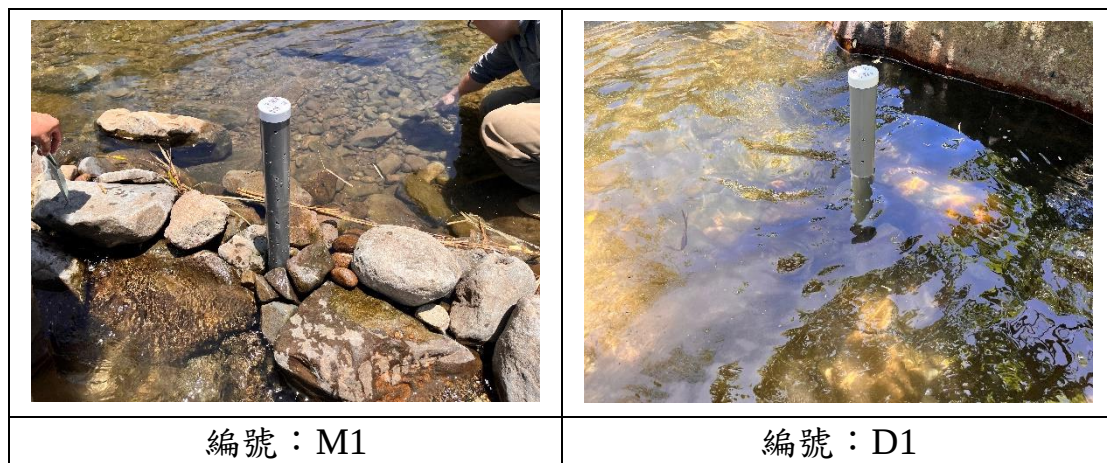


圖 2-17 水位計現地照片

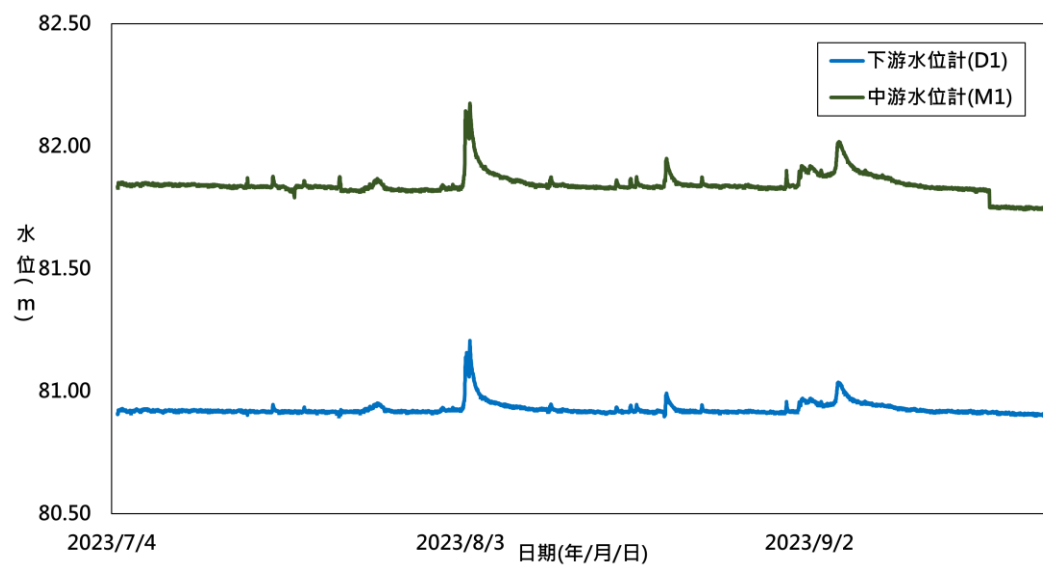


圖 2-18 水位調查成果圖

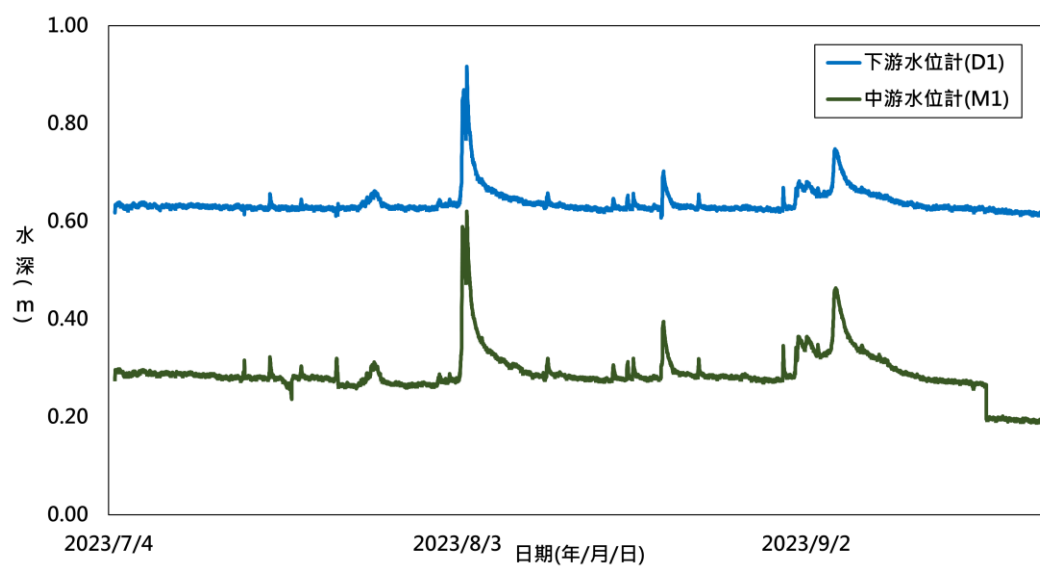


圖 2-19 水深調查成果圖

第三章 模式整合及評估方法

第一節 生態水文流態模式

本計畫生態水文流態模式主要目的在執行河川豐枯期流態分析及水資源發電潛力評估。蒐集之歷年降雨量、流量資料模擬分析清水溪之常流時期流態，因該子集水區受季節性豐枯水期影響，一年中之流量變化有明顯之差異，本計畫將建立水資源發電潛力評估模組，分析一年之中豐枯水期之發電效益，評估是否透過人工方法提升小水力發電機組之發電量，如透過人工砌石導流更多河水進入發電機組，提升其流量，石塊材料可由現場取得，如此一來即使石材遇洪流量而被沖垮，也不會額外增加河道之廢棄物。

流態分析包括超越機率分析(exceedance probability; EP)及小波分析(wavelet analysis; WA)。超越機率的觀念常被應用於水文的頻率分析中，待分析的通常有雨量、流量、水位等物理量，目的是為了找出大於這些物理量特定值的機率，藉以瞭解其發生的可能性大小，以便做工程上的規劃設計或者防災應變。超越機率之公式如式 3-1。

$$P(X \geq x_m) = \frac{m}{N + 1} \quad \text{式 3-1}$$

雖然透過超越機率的分析，能夠瞭解歷年各流量所占時間的總和百分比，然而將連續的時間序列打散後再依據流量大小進行排序，可能造成區間資料存在時間不連續的情形，無法看出流量出現時間或持續時間。而水力發電效能亦應考量到該流量能否持續推動水輪機以及乾濕兩季目標流量的發電效益。因此，為了在使用超越機率的同時加入時間的因素，本計畫評估不同超越機率流量區間在乾濕兩季的最大連續持續時間，並統計連續出現至少數小時的次數，以決定將此流量

作為後續研究評估的目標流量。

小波分析法是針對一個綜合水文訊號(例如河川流量或降雨量),利用有限長且快速衰減的某類型母小波,以平移(translation)與延展(dilation)的方式,進行各種頻率、訊號強度的多尺度分析,經常用於分析包含許多不同頻率能量的時間序列資料,近期也常被作為分析現地水文資料隨時間變化的工具(Daubechies,1990、White et al., 2005)。在不同時間尺度(time scale)中的離散時間序列 x_n (其中 $n = 0, 1, \dots, N-1$, N 為時間序列之長度。其連續小波轉換可以被定義為 x_n 與小波函數 Ψ 的卷積(Torrence et al., 1998),如式 3-2。

$$W_n(s) = \sum_{n'=0}^{N-1} x_{n'} \Psi^* \left[\frac{(n' - n)\delta t}{s} \right] \quad \text{式 3-2}$$

其中, δt 為時間步長; s 為小波尺度; Ψ^* 為 Ψ 之共軛複數; $\eta = (n' - n)\delta t / s$ 為時間之無因次項。

本計畫將建立一套流程,將雨量資料經由地表逕流模式轉換為可用流量資料,而後利用該流量資料進行流量與流態分析,分析決定目標流量後,再將其設為邊界條件進行水理計算及水力發電潛能評估。本計畫擬透過 WMS(Watershed Modeling System)建立降雨—逕流模型, WMS 為專業的水文模型軟體,用於水文學和水資源管理領域的數值模擬和分析,其提供了一個用於建立、編輯和分析水文模型的圖形化使用者界面,使用者能夠進行各個階段之水文建模。WMS 可以用於許多不同的水文模型,包括降雨—逕流模型、水文水資源模型、水庫操作模型等。其支援多種數值模型,包括 HEC-HMS、SWMM、HEC-RAS 等,除此之外 WMS 還提供了一些額外的功能,如地理資訊系統(Geographic Information System; GIS)數據的導入和分析、地形和地貌

分析、數據編輯和轉換等。WMS 為一個功能豐富且易於使用的水文模型軟體，可幫助進行準確之水文模擬和分析，以支援水資源規劃和管理的決策制定。本計畫於 WMS 中將清水溪集水區數值高程模型 (Digital Elevation Model, DEM) 資料進行資料處理、建構河川級序、集水區分割，並轉換成 HEC-HMS 集水區模型。接著於 HEC-HMS 中設定集水區水文條件，將降雨資料輸出逕流資料。

HEC-GeoHMS (Geospatial Hydrologic Modeling Extension) 是一套由美國陸軍工兵團 (U.S. Army Corps of Engineering Center) 開發的工具集，主要用於地理空間的水文系統模擬計算。HMS (Hydrologic Modeling System) 為美國陸軍工兵團開發的降雨－逕流模型，可用於計算大小型集水區的供水、洪水事件或逕流歷線。模式在降雨－逕流模型的建立上主要區分為流域模組、氣象模組與控制設定三大部分，可針對各個子集水區設定入滲損失法、逕流轉換法、基流量等更詳細的水文參數以利模式進行計算分析。本計畫目前已完成建立礮溪流域整體集水區之水文模型，其成果如圖 3-1、圖 3-2 所示，以此模型即可將此集水區之降雨量轉換為礮溪流量，提供水動力模式之邊界條件進行模擬。

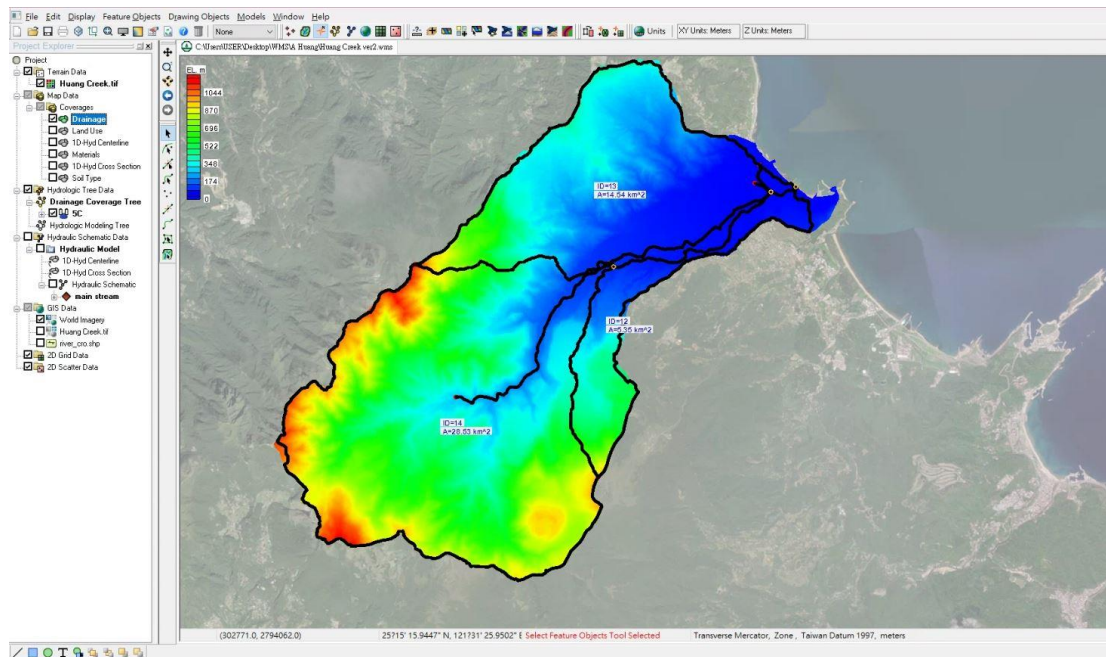


圖 3-1 磺溪流域之 WMS 水文模型建置成果圖

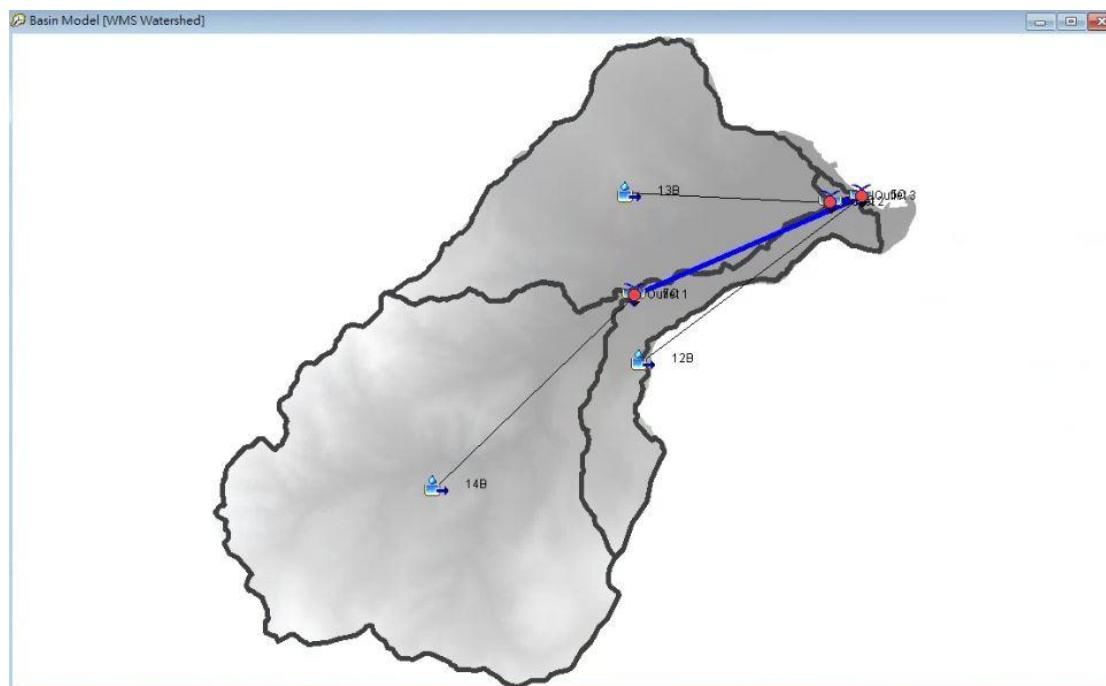


圖 3-2 磺溪流域之 HEC-HMS 水文模型建置成果圖

第二節 水理棲地廊道模式

一、水理模式

本計畫採用 SRH-2D(Sedimentation and River Hydraulics – two dimension)水理模式建立清水溪之數值模型。SRH-2D 模式為臺灣水利署與美國墾務局雙邊長期合作之模式，其除收斂相對穩定可靠外，同時能與很多現有模式結合（如粒子追蹤模式、海洋模式等）。在二維水理的模擬上，模擬的網格一般分為結構(structured)網格與非結構(unstructured)網格，結構網格的格點之排列井然有序，非結構性網格的格點之排列則無脈絡可循，SRH-2D 可以自由選用或混用這兩種網格，模式使用者可以依據河段的筆直或是蜿蜒情形採用最適合的網格形式。SRH-2D 之水理控制方程式如下所示：

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = e \quad \text{式 3-3}$$

$$\frac{\partial(hu)}{\partial t} + \frac{\partial(hu^2)}{\partial x} + \frac{\partial(huv)}{\partial y} = \quad \text{式 3-4}$$

$$\frac{\partial(hT_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(hT_{xy})}{\partial y} - gh \frac{\partial(z_b + h)}{\partial x} - \frac{\partial(\tau_{bx})}{\partial \rho} + \bar{D}_{xx} + \bar{D}_{xy}$$

$$\frac{\partial(hv)}{\partial t} + \frac{\partial(huv)}{\partial x} + \frac{\partial(hv^2)}{\partial y} = \quad \text{式 3-5}$$

$$\frac{\partial(hT_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial(hT_{yy})}{\partial y} - gh \frac{\partial(z_b + h)}{\partial y} - \frac{\partial(\tau_{by})}{\partial \rho} + \bar{D}_{yx} + \bar{D}_{yy}$$

其中， t 為時間； h 為水深； u 為 x 方向之水深平均流速分量； v 為 y 方向之水深平均流速分量； e 為過量降雨率； g 為重力加速度； T_{xx} 、 T_{xy} 、 T_{yy} 為水深平均紊流應力； $\bar{D}_{xx}$ 、 $\bar{D}_{xy}$ 、 $\bar{D}_{yx}$ 、 $\bar{D}_{yy}$ 為水深平均延散項； z_b 為底床高程； ρ 為密度； τ_{bx} 、 τ_{by} 為底床剪應力。

本計畫採用 SRH-2D 模式中的定床模擬，評估現況及不同設計情境下，清水溪河道水理的變化情況，主要關注其水深及流速之變化，接著可透過生態水文模式分析其生物棲地結構。

模擬範圍之地形以內政部國土測繪中心之 5 公尺網格數值地形模型為主，輔以現地地形調查之局部加密測量點位成果，建立整合之二維平面地形。並以此地形成果為模式基礎建立網格(mesh)，網格解析度原則上採 1 公尺 × 1 公尺，並根據地形、地景變化較顯著之區域與重點關注之區域適當加密網格，以取得較詳細的水理成果。

水理邊界採用上游於清水溪無名橋架設之監測流量，搭配自記式水位計量測之下游水位資料，分別做為入流及出流邊界，即可進行變量流之模擬，以此檢驗水理模式之準確性。本計畫之清水溪研究區域屬中上游河段，於現地調查時觀察到其底床質粗糙，多以礫石（粒徑大於 2 毫米）為主且參雜許多卵石、大型石塊，故本計畫參照過往文獻（如 Chow, 1959 等）建議之曼寧 n 值範圍，以 n 值為 0.03、0.04、0.05 於模式中進行設定，並透過方均根誤差(root-mean square error, RMSE)檢驗模擬之水位資料，找出最適宜之曼寧 n 值。方均根誤差可用於評估模式之預測及重現能力，以實測資料與模擬資料之間之關係計算而得，當該值越小則代表模擬資料越貼近實測資料，計算方法如式 3-6。方均根誤差計算成果分別為 0.0056(n = 0.03)、0.0117(n = 0.04)、0.0321(n = 0.05)，顯示以曼寧 n 值為 0.03 進行模擬能得到較為貼近真實流況之流場資料。

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (O_i - P_i)^2}{N}} \quad \text{式 3-6}$$

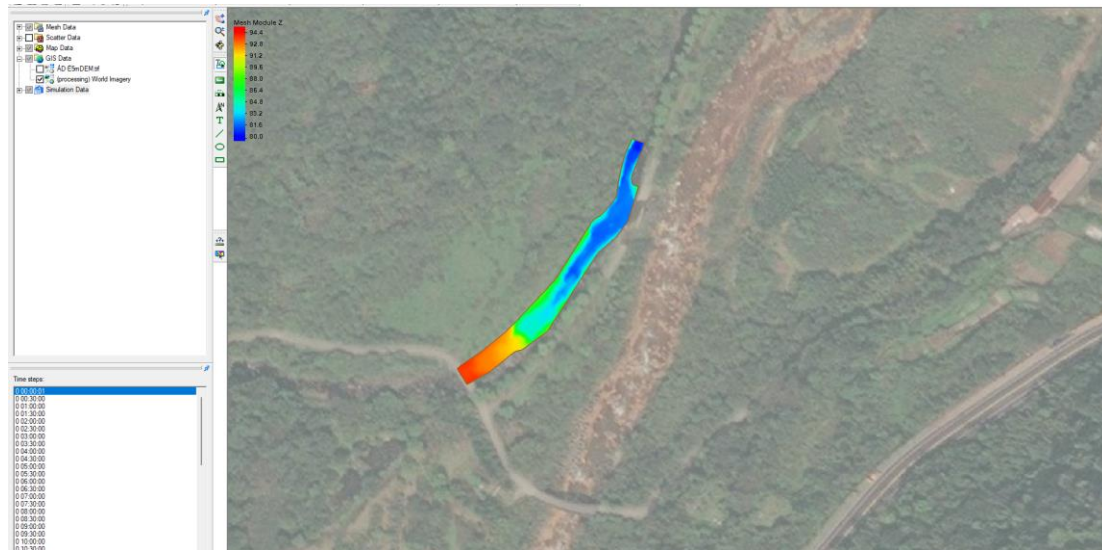


圖 3-3 清水溪之 SRH-2D 水理模式建置成果圖

二、棲地單元及棲地適合度指標

棲地單元(morphological unit; MU)為依照河川的流量、流速、水深等水理特性以及河道特性（坡度、深度、底質等）所區分，河川之多樣流態及形貌亦造就多種水域形態之棲地單元。棲地單元的劃分主要分為兩種，第一種以不同福祿數(Fr)劃分，如 Entwistle et al., (2019)，可將棲地單元分成淺瀨(riffle)、深流(run)、深潭(pool)、淺流(glide)及急流(cascade)等 5 種，如圖 3-4。第二種則是以水深、流速劃分棲地單元，共可劃分為淺瀨(riffle)、深流(run)、深潭(pool)、淺流(glide)四種(Chuang et al., 2016)如表 3-1 所示。本計畫則選以水深、流速劃分棲地單元。

自 20 世紀末以來，基於物理因素及其與目標物種關係的棲地模型已被用於評估棲地適合度(Bovee, 1982)，這些模型已成為河流管理的重要工具(Mouton et al., 2007)。因人為活動進入自然區域，可能干擾到自然河流系統，或破壞棲地的原生狀態。因此，恢復和改善棲地

質量需針對原始生態系統中的特定物種，例如魚類、底棲大型無脊椎生物等。以臺灣中部地區之烏溪流域兩種特有魚類：粗首馬口鱮(*Opsariichthys pachycephalus*)和明潭吻蝦虎(*Rhinogobius candidianus*)，來說明指標物種不同的棲息地偏好，粗首馬口鱮是一種遷移受限的魚類，喜好棲息於河川的中、下游及溝渠中水流較緩的潭區或淺灘。幼魚為雜食性，以藻類、水生昆蟲及有機碎屑為食，而明潭吻蝦虎是棲地受限的魚類，分布於溪流上、中游之水流較急之溪流河段。以水生小型脊椎與無脊椎動物為食。

棲地適合度指標(Habitat Suitability Index; HSI)是根據棲地特徵和棲地對指標物種的影響計算得出(U.S. Fish and Wildlife Service, 1981)。Elkins et al. (2007)提出以全域棲地適合度指標(Global Habitat Suitability Index, GHSI)以表示河川的棲地品質，該指標可以由流速適合度指標和水深適合度指標之幾何平均值計算而得，由最不适合棲地(0分)分至最佳棲地(1分)，用於估計棲地適合度之流速和水深的臨界棲地特徵可透過水理模擬獲得，並參考河川生物指標物種分析及其適合度曲線研究(經濟部水利署水利規劃試驗所，2010)開發的棲息地適宜性曲線來確定適宜性指數之分數，如式 3-7 所示。Elkins et al. (2007)又將 GHSI 劃分為 5 種棲地品質(Habitat Quality; HQ)，等級 5 為高品質棲地(High-quality habitat)，表示此種流場狀態下為該指標物種最偏好且最適宜之生存環境；等級 1 為最不適棲地(Non-habitat)，表示此種流場狀態下該指標物種幾乎無法生存，分類如表 3-2。棲地品質包括週邊環境營造的生物廊道，可反應微棲地健全狀況與河川健康與否，透過現地調查及數化方式可進一步瞭解其時間、空間變異情形。

$$GHSI = \sqrt{S_v \times S_d} \quad \text{式 3-7}$$

上式中 S_v 和 S_d 分別為流速適合度指標、水深適合度指標，可透過流速及水深計算而得。

綜合上述，本計畫除辨識河川水域之棲地單元外，另將選擇清水溪之指標物種（臺灣石鱚），計算其棲地適合度指標並進行棲地品類分類，藉此評估在不同設計情境下，該指標物種對於棲地之適合及喜好程度，以了解基於提升小水力發電效率，而透過人工方式使河段之流態產生變化下對於生態環境之效益或衝擊。

表 3-1 棲地流況之主要類型分類說明

棲地類型	流況說明
深流(run)	水深大於 0.7 公尺、流速大於 0.6 公尺/秒的水域
深潭(pool)	水深大於 1.4 公尺、流速小於 0.6 公尺/秒的水域
淺瀨(riffle)	水深小於 0.7 公尺、流速大於 0.6 公尺/秒的水域
淺流(glide)	水深小於 1.4 公尺、流速小於 0.6 公尺/秒的水域

水域棲地單元分類圖	
水深 (m) 水深	深潭(Pool)
	深流(Run)
淺流(Glide)	淺瀨(Riffle)
流速(m/s)	

表 3-2 棲地品質分類表(Elkins et al., 2007)

GHSI	Habitat Quality	Class
0	Non-habitat	1
0-0.1	Pool-habitat	2
0.1-0.4	Low-quality habitat	3
0.4-0.7	Medium-quality habitat	4
0.7-1.0	High-quality habitat	5

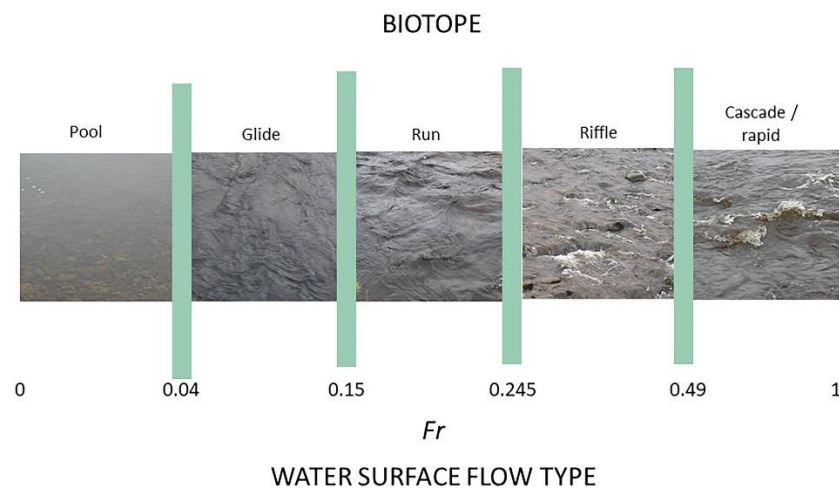


圖 3-4 以福祿數劃分河川之棲地單元(Entwistle et al. 2019)

三、景觀指數計算模式

為了評估棲地景觀特徵的空間現象，本計畫應用美國農業部 (USDA) (McGarigal et al., 2012) 所開發的景觀指數計算軟體 FRAGSTATS，其可分析棲地區塊(habitat patches)的組合(描述了與區塊類型的多樣性和豐富度相關的特徵)和配置(說明了區塊的空間特徵和排列、位置或方向)，可以了解生態系統的結構與功能等，包含急流、水潭、淺灘和岸邊緩流等(McGarigal et al., 2015)。FRAGSTATS 將景觀指標依不同尺度分為三大類：塊區指標(patch metrics)、類別指標(class metrics)、景觀指標(landscape metrics)，塊區指標以塊區進行

指數計算，塊區即為景觀中之最小單位，此類指標可幫助了解各單位於整體景觀中之空間配置；類別指標以使用者預先將塊區進行分類後之各類別進行指數計算，可幫助了解各類別於整體景觀中之空間配置；景觀指標以整體景觀進行指數計算，可幫助了解空間中多個景觀之空間配置。棲地景觀的型態(pattern)、面積、區塊(patch)、邊緣、形狀、最鄰近(nearest-neighbor)、傳染(contagion)和散佈(interspersion)等方面可通過以下 11 個指標計算：面積百分比指數(proportion of landscape; PLAND)、區塊數量(number of patches; NP)；平均區塊大小(mean patch size; MPS)、總邊(total edge; TE)、邊緣密度(edge density; ED)、平均形狀指數(mean shape index; MSI)、面積加權平均形狀指數(area-weighted mean shape index; AWMSI)、平均區塊分形維數(mean patch fractal dimension; MPFD)、面積加權平均區塊分形維數(area-weighted mean patch fractal dimension; AWMPFD)、平均最鄰近距離(mean nearest-neighbor distance; MNN)、散佈並列指數(interspersion and juxtaposition index; IJI)，棲地之多樣性則可由 Shannon Weaver 多樣性指數(Shannon Weaver diversity index；SHDI)表示。其中，NP 和 MPS 的指標與區塊大小和變異性有關；TE 和 ED 指數與邊緣密度有關；MSI、AWMSI、MPFD、AWMPFD 的指標與區塊形狀的複雜程度有關。區塊大小、區塊變異性、邊緣密度、區塊形狀的複雜性、平均最鄰近距離和散佈並列指數代表了可能影響人口傳播、生態穩定性、生存機會等生態過程的景觀配置與遷移(McGarigal and Marks, 1994)。

本計畫主要關注目標為各棲地單元與棲地品質，係先將各塊區進行分類後之成果，故主要由類別指標(class metrics)進行指數計算，並選以 NP、PLAND、TE、ED、MNN 分析整體棲地結構，NP、PLAND

可用以分析棲地單元與棲地品質於河道中所佔之面積、百分比；TE、ED 可用以分析魚類進入不同棲地單元之難易度，亦可分析不同棲地品質之交互作用；MNN 可用以分析相同棲地單元、棲地品質相隔之距離，以了解魚類於棲地單元之間所需移動之距離。另選擇由景觀指標(landscape metrics)之 SHDI 分析整體河道中之棲地多樣性，SHDI 為 0 時表示景觀之僅有一種棲地，而 SHDI 越高則表示景觀中之棲地越多樣。

第三節 經濟效益評估模式

根據經濟部能源局 112 年度再生能源電能躉購費率正式公告，小水力發電標準為：增訂不及 500 瓩級距，躉購費率每度 4.8936 元，500 瓩以上不及 2000 瓩部分，躉購費率每度 4.2285 元；2000 瓩以上，維持 111 年度費率水準，即每度 2.8599 元。本計畫初步規劃小（微）水力預定案場的裝置容量（計算方式如式 3-8）小於 500 瓩，因此以躉購電價每度 4.8936 元作為計算基礎，進行益本比進行分析，分別以「淨現值」、「益本比」與「內部報酬率」等評估指標，並以「攤提」方式計算「年均化成本」計算方式如下（參考小水力發電之潛能調查與評估，2019）：

$$P=Q \times H \times \rho \times g \times \eta \quad \text{式 3-8}$$

其中，P 為裝置容量(kW)、Q 為通過水輪機組的流量(m³/sec)、H 為有效水頭落差(m)、g 是重力加速度(m²/sec)、 ρ 為水密度(kg/m³)、 η 是綜合轉換效率(%)。

淨現值係用以表達計畫方案之整體淨效益。其計算方法係將各期淨效益（即總成本-總效益）之現值加總，如式 3-9 所示：

$$NPV = \sum_{t=1}^n \frac{R_t - C_t}{(1+i)^t} \quad \text{式 3-9}$$

其中，NPV 為淨現值、 R_t 為第 t 年產出效益（元）、 C_t 為第 t 年投入成本（元）、n 是機組使用年限、i 是折現率。

若經濟益本比大於 1，則表示整體效益大於整體成本，值得投資，計算公式如式 3-10 所示。

$$\frac{B}{C} = \sum_{t=1}^n \frac{R_t}{(1+i)^t} / \sum_{t=1}^n \frac{C_t}{(1+i)^t} \quad \text{式 3-10}$$

其中，B 為產出效益總額（元）、C 為投入成本總額（元）。

內部報酬率用於表達計畫方案之效率，其計算方法係使總體淨效益等於零之折現率，即為內部報酬率。內部報酬率愈大，愈值得投資，計算公式如式 3-11。

$$\sum_{t=1}^n \frac{R_t - C_t}{(1+r)^t} = 0 \quad \text{式 3-11}$$

其中，r 為內部報酬率（%）。

第四章 發電潛能評估與情境設計

第一節 評估模組建立

本計畫整合以下各模式進行模組化，包括：水動力模式 SRH-2D、生態水文模式、棲地廊道模式以及經濟效益模式，如圖 4-1 所示。

整合之模組流程重點整理如下：(1)水文模組進行集水區範圍內的水資源蘊藏量進行估算，並提供作為流態分析及水動力模式邊界條件之用；(2)水動力模式係用來模擬與取得局部河道的二維水深(water depth)及流速(velocity)；(3)生態水文模式以水動力模式的結果評估下游棲地結構與棲地品質。(4)經濟效益模式則是根據可利用來進行發電的流量($Q_w = Q_{50} - Q_d$ ，其中 Q_{50} 為河道上的平均流量， Q_d 為可維持棲地結構與品質所需流量)、現場環境可允許的設計水頭、以及本計畫建議採用微水力發電機組(PowerSpout LH)的運轉效率曲線，進行可發電量計算與躉購的利潤分析。

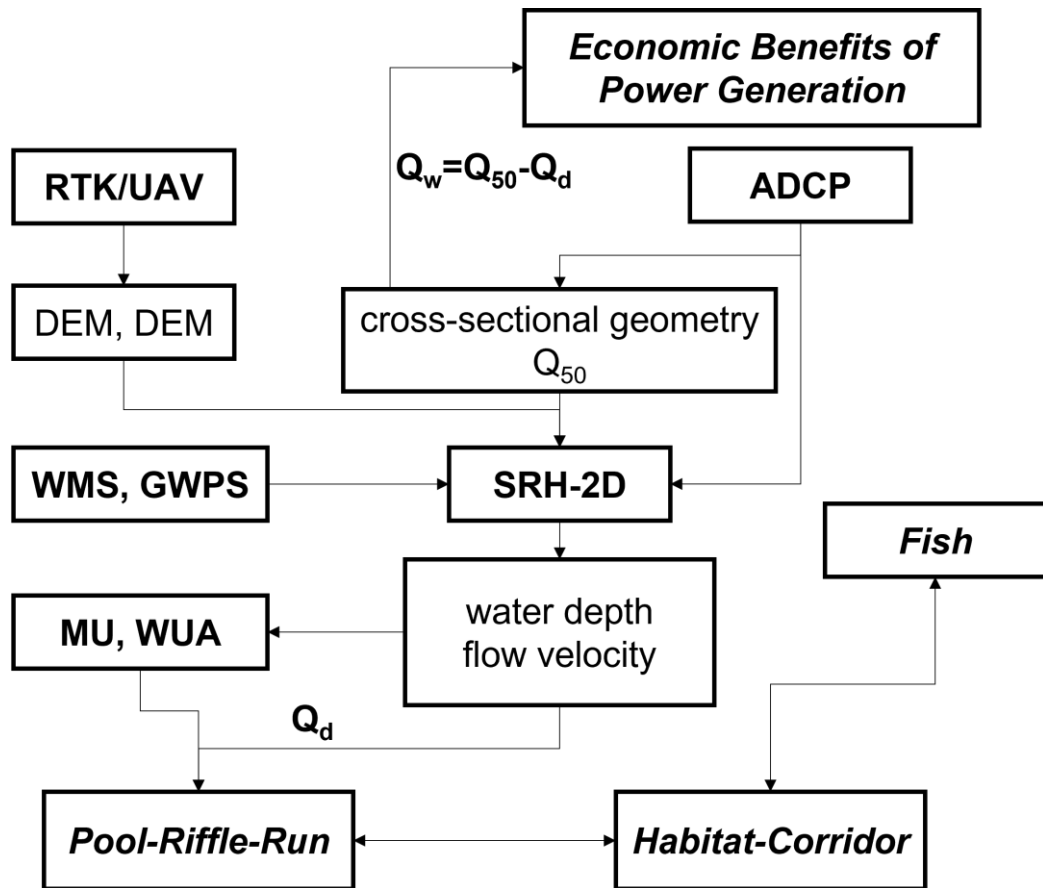


圖 4-1 整合之評估模組運作流程（水動力＋生態水文＋棲地廊道＋經濟效益模式）

第二節 水理情境設計及生態棲地分析

本計畫由向內政部國土測繪中心申請之 5 公尺網格數值地形模型資料，輔以 VBS-RTK 現地地形調查之成果，於 SRH-2D 模式中建立較為細緻之數值地形模型。研究區域上游之高程約介於 90 公尺至 94 公尺之間，中游則介於 84 公尺至 82 公尺，河道中多有大型石塊，使得河道內高程於部分區域有些微之增加，下游多介於 82 公尺至 80 公尺，下游靠近固床工附近則趨於平緩，往親水公園分流處為高程最低點（80 公尺），此數值地形模型建置成果將提供現況情境及設計情境之水理模擬。

一、現況情境

本計畫由 2021 年 6 月 28 日至 2023 年 5 月 9 日間所監測之流量資料繪製超越機率圖進行分析，大致了解清水溪之整體流況。為掌握清水溪現況之整體流況，本計畫以流量超越機率為 50%(Q_{50})之流量，配合於現地以斷面流速之方式推算之流量作為固床工溢流之流量邊界(Q_w)，並假設河道邊壁、底床之入滲量十分微小且可忽略，由質量守恆之觀點推求下游分流至清水園區之流量(Q_d)作為邊界條件，模擬清水溪現況之流場，成果如圖 4-2、圖 4-3。現況情境於中、下游之水深較深，最大可達約 1.0 公尺，流速也相對較慢，多小於 0.5 公尺/秒，上游水深較小，多處不及 0.5 公尺，流速則較快，常可達 1.0

公尺/秒，部分區域則因地形突降而產生流速趨緩、水深增加之現象。

透過現況情境之流場資料。

本計畫接著分析其棲地單元結構與台灣石鱚之棲地適合度（表 4-1），統計其面積及百分比，棲地單元百分比計算以深潭(pool)、淺流(glide)、深流(run)、淺瀨(riffle)進行計算，而陸域(land)非屬於魚類棲地，故僅統計其面積。成果發現現況之以淺流(glide)為主要之棲地單元，總面積達 988.4 平方公尺，佔整體棲地單元結構之 76.3%，上游及下游坡度較陡處因流速提升而形成淺瀨(riffle)，總面積達 305.5 平方公尺，佔整體棲地單元結構之 23.6%，而中游有一小部分區域形成深流(run)，總面積僅 0.9 平方公尺，佔整體棲地單元結構之 0.1%，如圖 4-4，於棲地單元百分比計算僅納入深潭(pool)、淺流(glide)、深流(run)、淺瀨(riffle)進行計算，而陸域(land)非屬於魚類棲地，故本計畫僅統計其面積。棲地適合度分析詳見圖 4-5，現況大多皆為高品質棲地(Class = 5)，總面積約 729.0 平方公尺，佔整體面積之 56.3%，中品質棲地(Class = 4)和低品質棲地(Class = 3)分別佔 93.2 平方公尺及 161.9 平方公尺，此三者之總面積達 984.1 平方公尺，佔整體面積之 80%，顯示現況之流場環境多為適合台灣石鱚生活之水域。更細部分析可觀察出大部分高品質棲地從上游至下游幾乎彼此相連，形成棲地廊道，顯示台灣石鱚偏好之流場環境分佈空間廣，可順利於上、下游

之間來回移動，若局部區域遭遇棲地結構改變（如土塊滑落、較大植生傾倒至河道內）亦可往上、下游進行避難，充分使用整體棲地環境。

為了解棲地單元與棲地品質於空間中之分佈情形，本計畫使用 FRAGSTATS 景觀指數計算模式，選以 NP、PLAND、TE、ED、MNN、SHDI 分析整體棲地結構，如表 4-2、表 4-3。棲地單元之景觀指數計算成果可觀察出淺流(glide)因相連成一處大面積之棲地，故其 NP = 1，PLAND 高達 68.6%，TE 則為最高之 369.3 公尺，表示魚類要進入淺流(glide)最為容易。而棲地品質之景觀指數計算成果發現由高品質棲地(Class = 5)之 PLAND 為最高(33.1%)，而 TE 則由中品質棲地(Class = 4)之 832.1 公尺為最高，顯示中品質棲地較容易與其他品質棲地發生交互作用，推測其 TE 最高之原因為中品質棲地多包圍面積佔最多之高品質棲地形成，故有較長之 TE。最不適棲地(Class = 1)之 MNN 高達 11.7 公尺，表示最不適棲地較為分散，亦代表其餘品質高之棲地相對較集中分佈，對於台灣石鱸之使用有較大之幫助。

表 4-1 現況情境之棲地單元與棲地品質統計表

棲地單元	面積 (m ²)	百分比 (%)	棲地品質	面積 (m ²)	百分比 (%)
深潭(pool)	0.0	0.0	1	168.3	13.0
淺流(glide)	988.4	76.3	2	142.4	11.0
深流(run)	0.9	0.1	3	161.9	12.5
淺瀨(riffle)	305.5	23.6	4	93.2	7.2
陸域(land)	146.7	-	5	729.0	56.3

表 4-2 現況情境之棲地單元景觀指數表

類別指標(class metrics)					
棲地單元	NP (個)	PLAND (%)	TE (m)	ED (m/ha)	MNN (m)
深潭(pool)	0	0	-	-	-
淺流(glide)	1	68.6	369.3	2562.7	-
深流(run)	1	0.1	3.7	25.6	-
淺瀨(riffle)	7	21.1	261.4	1814.0	4.9
陸域(land)	7	10.2	107.9	748.6	11.7
景觀指標(landscape metrics)					
景觀	SHDI				
清水溪	0.8245				

表 4-3 現況情境之棲地品質景觀指數表

類別指標(class metrics)					
棲地品質	NP (個)	PLAND (%)	TE (m)	ED (m/ha)	MNN (m)
1	7	10.2	107.9	748.7	11.7
2	40	17.7	397.4	2757.9	1.9
3	12	18.4	719.6	4994.3	1.9
4	7	20.6	832.1	5774.9	2.4
5	12	33.1	418.6	2905.1	2.2
景觀指標(landscape metrics)					
景觀	SHDI				
清水溪	1.5642				

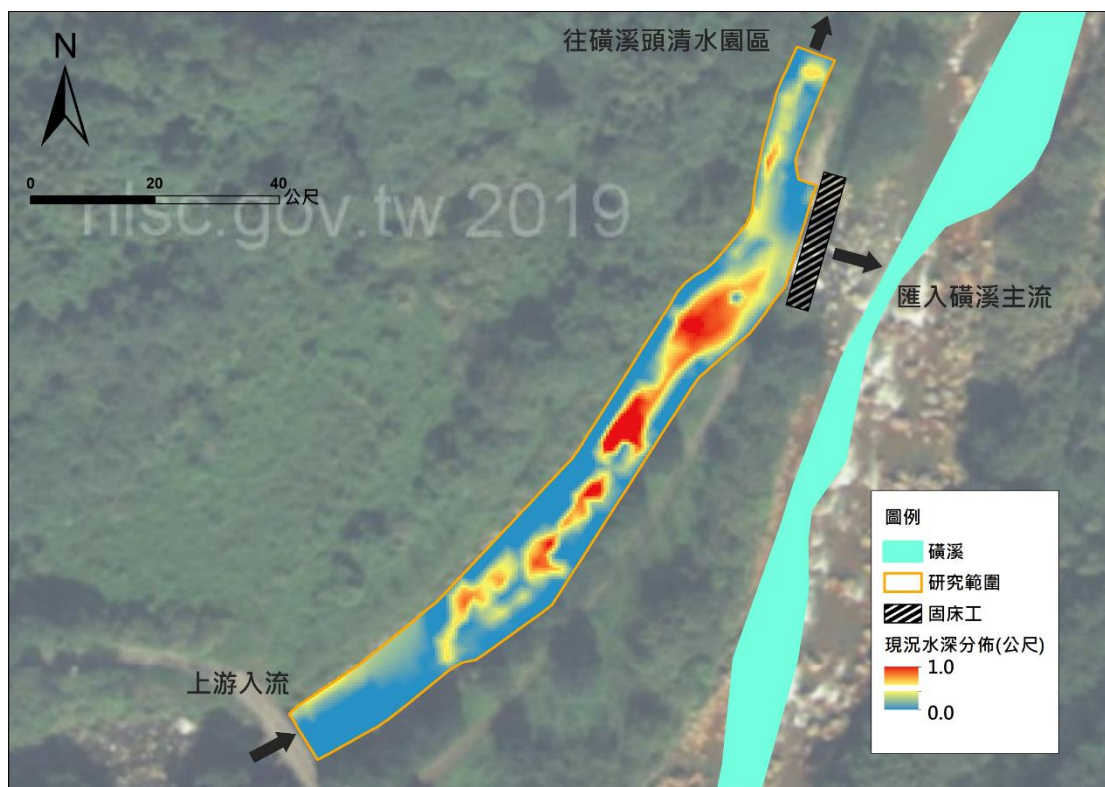


圖 4-2 現況情境之水深分佈圖

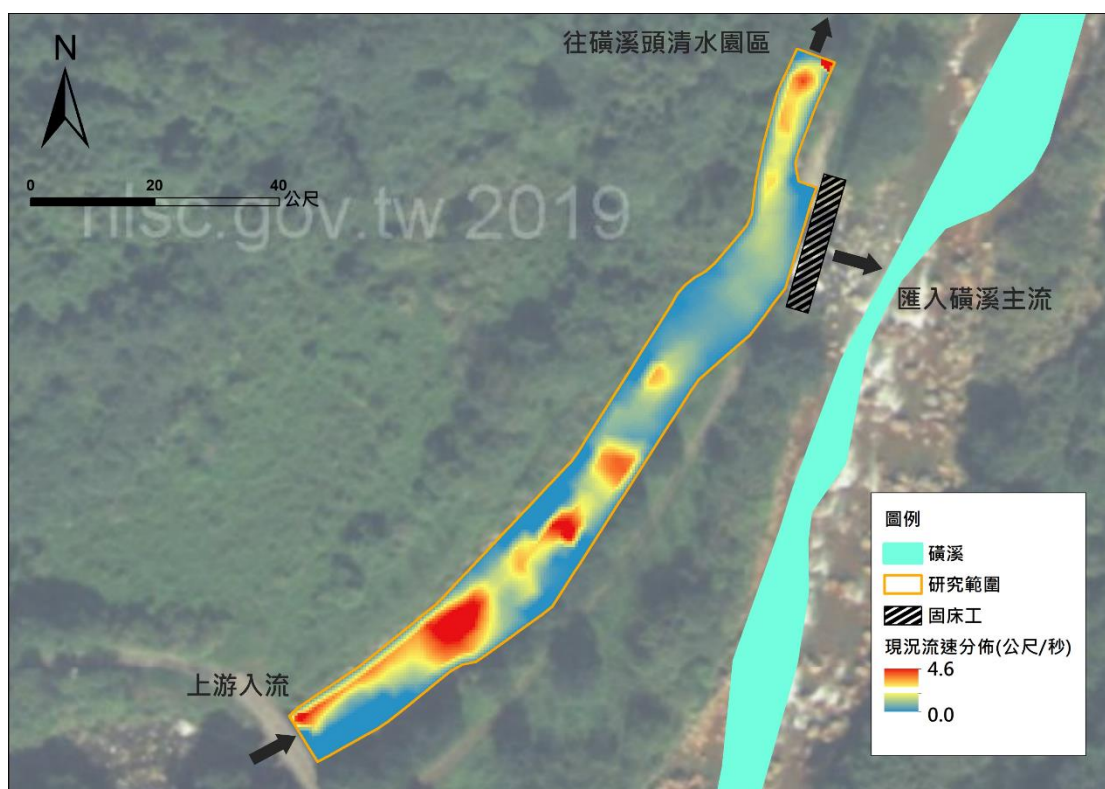


圖 4-3 現況情境之流速分佈圖

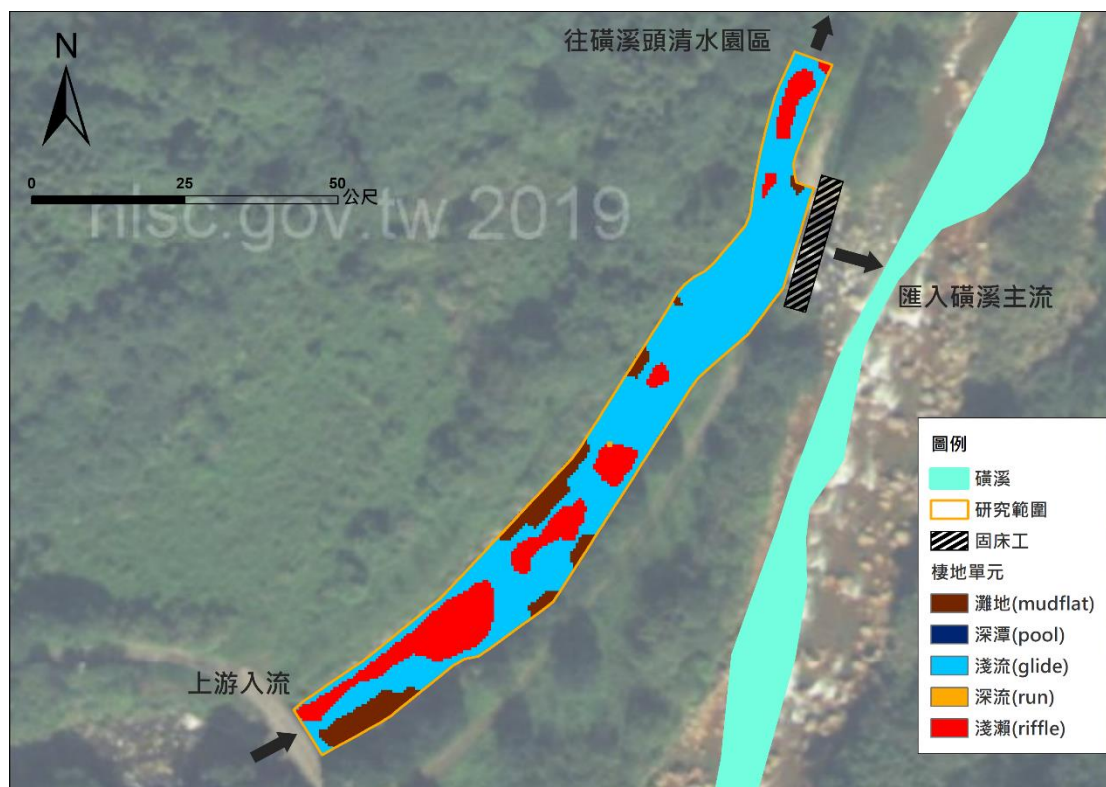


圖 4-4 現況情境之棲地單元分佈圖



圖 4-5 現況情境之棲地品質分佈圖

二、設計情境

本計畫設計於固床工上加設小水力發電機組，機組之選用將受到可流經水輪機組之流量控制，故有必要針對固床工不同之溢流量情境評估棲地結構與棲地適合度之變化。基於此目的，本計畫設計五種不同之分流量情境，如表 4-4，固床工之溢流量 Q_w 分別設計為 0.1、0.2、0.3、0.4、0.5 m^3/s ，下游分流量 Q_d 則為 0.403、0.303、0.203、0.103、0.003 m^3/s ，現況情境以#0 表示。

不同設計情境之棲地單元結構在中、下游變化較明顯（如圖 4-6~圖 4-10），整體上仍以淺流(glide)為主要棲地單元，所佔面積介於 982.1~1017.8 平方公尺間，佔整體棲地單元逾 75%，其次則為淺瀨(riffle)，面積約介於 262.4~311.9 平方公尺間，佔整體棲地單元約 20~25%。當溢流量 Q_w 提升至 0.4 m^3/s 時（設計情境#4），表示下游分流量 Q_d 減少為 0.103 m^3/s ，可在下游處明顯觀察出流速緩、水深大之深潭(pool)形成，面積可達 9.8 平方公尺，而當溢流量提升至 0.5 m^3/s 時（設計情境#5），下游分流量 Q_d 僅剩於 0.003 m^3/s ，深潭(pool)的面積也增大（面積達 12.8 平方公尺），棲地單元統計如表 4-5。於棲地適合度分析中發現設計情境#1 至#5 皆有大遍之高品質棲地，面積約介於 647.4~745.8 平方公尺間，佔整體棲地品質逾 50%，並可形成連結上、下游之棲地廊道，統計高品質棲地(Class = 5)、中品質棲地

(Class = 4)和低品質棲地(Class = 3)之面積則介於 928.4~994.4 平方公尺，且百分比加總逾 70%，顯示各設計情境於計畫範圍內大多可提供台灣石鱚適合之棲地品質。細部觀察設計情境#4 及#5，可明顯發現下游分流處的棲地品質大多轉為最不適棲地(non-habitat, Class = 1)，其面積也增加至 185.2、186.5 平方公尺，分別佔 14.3%、14.4%，顯示下游分流處大多較不利於台灣石鱚生存，為保持河道棲地廊道之暢通，初步判斷 Q_d 最少須為 $0.203 \text{ m}^3/\text{s}$ （設計情境#3），此時固床工之溢流量為 $0.3 \text{ m}^3/\text{s}$ ，代表最大可利用於發電之關鍵流量為 $0.3 \text{ m}^3/\text{s}$ ，棲地品質統計表如表 4-6，分佈圖如圖 4-11~圖 4-15。

另進行景觀指數之計算，成果如表 4-14。由棲地單元進行景觀指數計算（表 4-7），成果發現各設計情境之淺流(glide)仍連成一大面積棲地，NP 保持為 1，而 PLAND 亦為各情境之最大者，約於 68~70% 間，其次則為淺瀨(riffle)，PLAND 介於 18~21% 間。深潭(pool)僅於設計情境#4 及#5 中出現，但所佔比例小，PLAND 皆小於 1%。TE 和 ED 以淺流(glide)為各情境之最大者，顯示淺流(glide)最容易和其他棲地單元產生交互作用。MNN 中以淺瀨(riffle)為最大，表示分隔之淺瀨(riffle)彼此相距較遠，淺流(glide)、深流(run)則因接連成單一棲地(NP = 1)，故無法計算其 MNN。另分析其景觀指數(landscape metrics)之 SHDI，如表 4-10，可發現以設計情境#5 之 SHDI 為最大，達 0.8363，

顯示該情境之棲地單元最為豐富，其原因為深潭(pool)僅於設計情境#4 及#5 中形成，其中又以設計情境#5 之深潭(pool)佔比較大(PLAND 為 0.9%，於設計情境#4 中 PLAND 為 0.7%)。而設計情境#3 之 SHDI 為設計情境中最小者，僅 0.8115，顯示設計情境#3 之棲地單元較趨向單一棲地單元，經比較該情境與其他設計情境之棲地單元 PLAND，可發現設計情境#3 中淺流(glide)之 PLAND 為 69.8%，較其他設計情境大，又設計情境#3 僅包含三種棲地單元，因此使其 SHDI 較小。

棲地品質之景觀指數計算成果可見表 4-11，整體以高品質棲地(Class = 5)之 PLAND 最高，多介於 30.1~33.5%之間，NP 則為 10~12 個，顯示其大多相連，且所佔之面積最大，而最不適棲地(Class = 1)PLAND 為最小，皆小於 12%，不適棲地(Class = 2)之 NP 最多，最高可達 47 個，顯示其分佈較為破碎。TE 及 ED 則以中品質棲地為最高，代表中品質棲地較易受其他品質棲地之影響，台灣石鱸可較容易移動至中品質棲地。MNN 則以最不適棲地(Class = 1)為最大，多為 10 公尺左右，表示其各塊區相距甚遠，而 NP 最高之不適棲地(Class = 2)之 MNN 為 1.9 公尺，為整體次小者，可推測不適棲地(Class = 2)因分佈較集中，但塊區彼此之間有夾雜其他品質棲地。另分析景觀指數(landscape metrics)之 SHDI，與棲地單元相異之處為棲地品質有優劣之分，當較優質之棲地較多時，對於台灣石鱸生存較為有利，故設計

情境以趨向單一高品質棲地為較佳，亦表示 SHDI 較小。分析成果可發現其中以設計情境#1 為最小，僅 1.5395，代表其趨向單一棲地品質，而該情境佔比最大之棲地品質為高品質棲地(PLAND = 33.5%)，其次為中品質棲地(PLAND = 20.7%)，顯示整體環境中以品質較佳之棲地為主要組成，對於台灣石鱚之生存有較大之幫助。

表 4-4 現況與各情境之流量分配表

情境設定	Q_{50}	Q_w	$Q_d(Q_{50}-Q_w)$
現況#0	0.503	0.139	0.364
設計情境#1	0.503	0.100	0.403
設計情境#2	0.503	0.200	0.303
設計情境#3	0.503	0.300	0.203
設計情境#4	0.503	0.400	0.103
設計情境#5	0.503	0.500	0.003

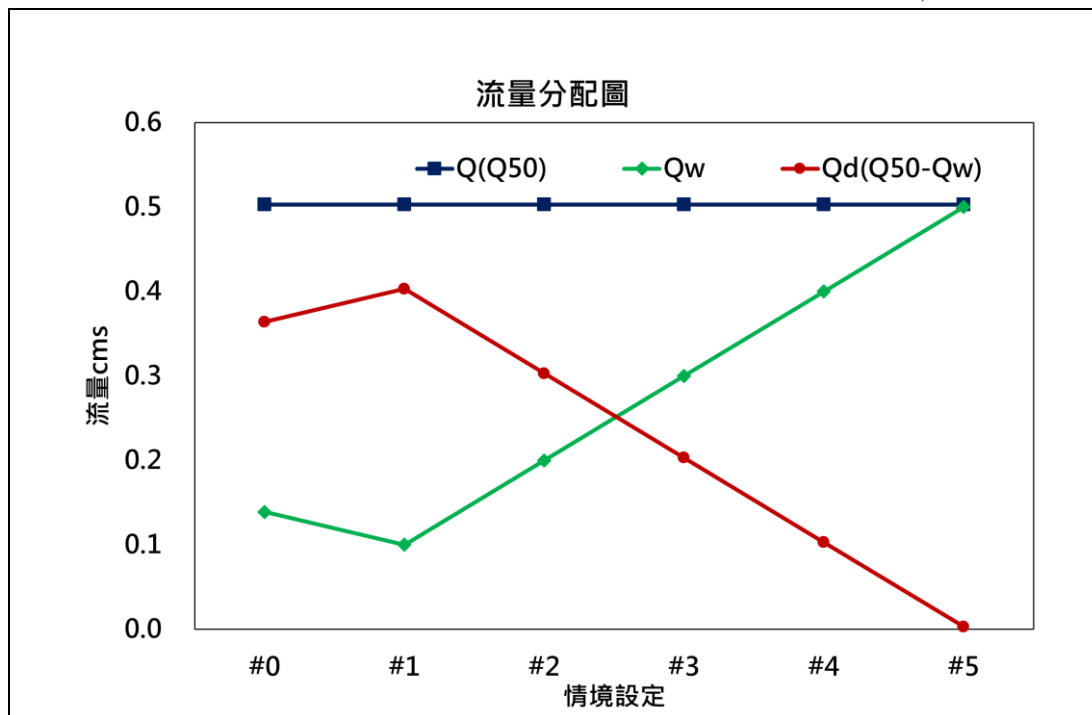
單位： m^3/s 

表 4-5 設計情境之棲地單元統計表

棲地單元	設計情境									
	#1		#2		#3		#4		#5	
	面積 (m ²)	百分比 (%)	面積 (m ²)	百分比 (%)	面積 (m ²)	百分比 (%)	面積 (m ²)	百分比 (%)	面積 (m ²)	百分比 (%)
深潭(pool)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	9.8	0.8	12.8	1.0
淺流(glide)	982.1	75.8	990.1	76.6	1006.5	77.9	1013.5	78.3	1017.8	78.7
深流(run)	0.9	0.1	1.1	0.1	1.1	0.1	1.1	0.1	1.1	0.1
淺瀨(riffle)	311.9	24.1	301.9	23.3	284.3	22.0	269.6	20.8	262.4	20.3
陸域(land)	146.7	0.0	148.4	0.0	149.7	0.0	147.6	0.0	147.6	0.0

表 4-6 設計情境之棲地品質統計表

棲地品質	設計情境									
	#1		#2		#3		#4		#5	
	面積 (m ²)	百分比 (%)	面積 (m ²)	百分比 (%)	面積 (m ²)	百分比 (%)	面積 (m ²)	百分比 (%)	面積 (m ²)	百分比 (%)
1	160.6	12.4	170.9	13.2	174.8	0.135	185.2	14.3	186.5	14.4
2	139.8	10.8	146.3	11.3	170.9	0.132	177.4	13.7	180.0	13.9
3	155.4	12.0	169.6	13.1	190.3	0.147	192.9	14.9	194.2	15.0
4	93.2	7.2	91.9	7.1	90.6	0.07	89.3	6.9	86.8	6.7
5	745.8	57.6	716.0	55.3	668.1	0.516	650.0	50.2	647.4	50.0

表 4-7 設計情境之棲地單元景觀指數表(1/3)

類別指標(class metrics)										
棲地單元	設計情境#1					設計情境#2				
	NP (個)	PLAND (%)	TE (m)	ED (m/ha)	MNN (m)	NP (個)	PLAND (%)	TE (m)	ED (m/ha)	MNN (m)
深潭(pool)	0	0	-	-	-	0	0	-	-	-
淺流(glide)	1	68.1	377.1	2617.1	-	1	68.7	372.9	2588.3	-
深流(run)	1	0.1	3.7	25.6	-	1	0.1	4.6	32.0	-
淺瀨(riffle)	7	21.6	269.2	1868.5	4.4	7	20.9	261.4	1814.1	4.8
陸域(land)	7	10.2	107.9	748.7	11.7	8	10.3	111.6	774.3	9.8

表 4-8 設計情境之棲地單元景觀指數表(2/3)

類別指標(class metrics)										
棲地單元	設計情境#3					設計情境#4				
	NP (個)	PLAND (%)	TE (m)	ED (m/ha)	MNN (m)	NP (個)	PLAND (%)	TE (m)	ED (m/ha)	MNN (m)
深潭(pool)	0	0	-	-	-	2	0.7	14.8	102.4	2.3
淺流(glide)	1	69.8	360.0	2498.7	-	1	70.3	343.4	2383.6	-
深流(run)	1	0.1	4.6	32.0	-	1	0.1	4.6	32.0	-
淺瀨(riffle)	7	19.7	246.6	1711.7	4.4	5	18.7	217.6	1510.1	9.7
陸域(land)	8	10.4	113.4	787.1	9.7	8	10.2	111.1	771.1	9.8

表 4-9 設計情境之棲地單元景觀指數表(3/3)

棲地單元	設計情境#5				
	NP (個)	PLAND (%)	TE (m)	ED (m/ha)	MNN (m)
深潭(pool)	2	0.9	16.6	115.2	2.3
淺流(glide)	1	70.6	335.6	2329.2	-
深流(run)	1	0.1	4.6	32.0	-
淺瀨(riffle)	4	18.2	207.9	1442.9	6.3
陸域(land)	8	10.2	111.1	771.1	9.8

表 4-10 設計情境之棲地單元多樣性指數(SHDI)表

情境設定	SHDI
現況情境#0	0.8245
設計情境#1	0.8296
設計情境#2	0.8248
設計情境#3	0.8115
設計情境#4	0.8337
設計情境#5	0.8363

表 4-11 設計情境之棲地品質景觀指數表(1/3)

類別指標(class metrics)										
棲地品質	設計情境#1					設計情境#2				
	NP (個)	PLAND (%)	TE (m)	ED (m/ha)	MNN (m)	NP (個)	PLAND (%)	TE (m)	ED (m/ha)	MNN (m)
1	7	10.2	107.9	748.7	11.7	8	10.3	111.6	774.3	9.8
2	39	17.1	388.6	2697.1	1.9	44	17.8	407.1	2825.1	1.9
3	14	18.6	712.2	4943.1	1.7	12	18.7	733.9	5093.5	1.7
4	8	20.7	831.2	5768.5	2.4	8	20.5	838.6	5819.7	1.9
5	12	33.5	418.1	2901.9	2.2	11	32.7	418.6	2905.1	2.4

表 4-12 設計情境之棲地品質景觀指數表(2/3)

類別指標(class metrics)										
棲地品質	設計情境#1					設計情境#2				
	NP (個)	PLAND (%)	TE (m)	ED (m/ha)	MNN (m)	NP (個)	PLAND (%)	TE (m)	ED (m/ha)	MNN (m)
1	8	10.4	113.4	787.1	9.7	9	12.0	121.2	841.4	10.2
2	47	18.5	415.4	2882.7	1.7	37	17.1	411.7	2857.1	2.0
3	10	18.9	753.7	5231.0	2.1	12	20.9	712.7	4946.3	1.9
4	8	20.9	872.2	6053.3	2.2	9	20.3	798.9	5544.6	2.2
5	11	31.3	440.7	3058.6	2.3	10	29.7	396.0	2748.3	2.5

表 4-13 設計情境之棲地品質景觀指數表(3/3)

類別指標(class metrics)					
棲地品質	設計情境#5				
	NP (個)	PLAND (%)	TE (m)	ED (m/ha)	MNN (m)
1	9	12.0	121.2	841.4	10.2
2	38	17.0	408.0	2831.5	1.7
3	10	20.6	703.9	4885.5	2.0
4	10	20.3	789.2	5477.4	1.7
5	10	30.1	392.3	2722.7	2.4

表 4-14 設計情境之棲地單元多樣性指數(SHDI)表

類別指標(class metrics)	
情境設定	SHDI
現況情境#0	0.8245
設計情境#1	0.8296
設計情境#2	0.8248
設計情境#3	0.8115
設計情境#4	0.8337
設計情境#5	0.8363

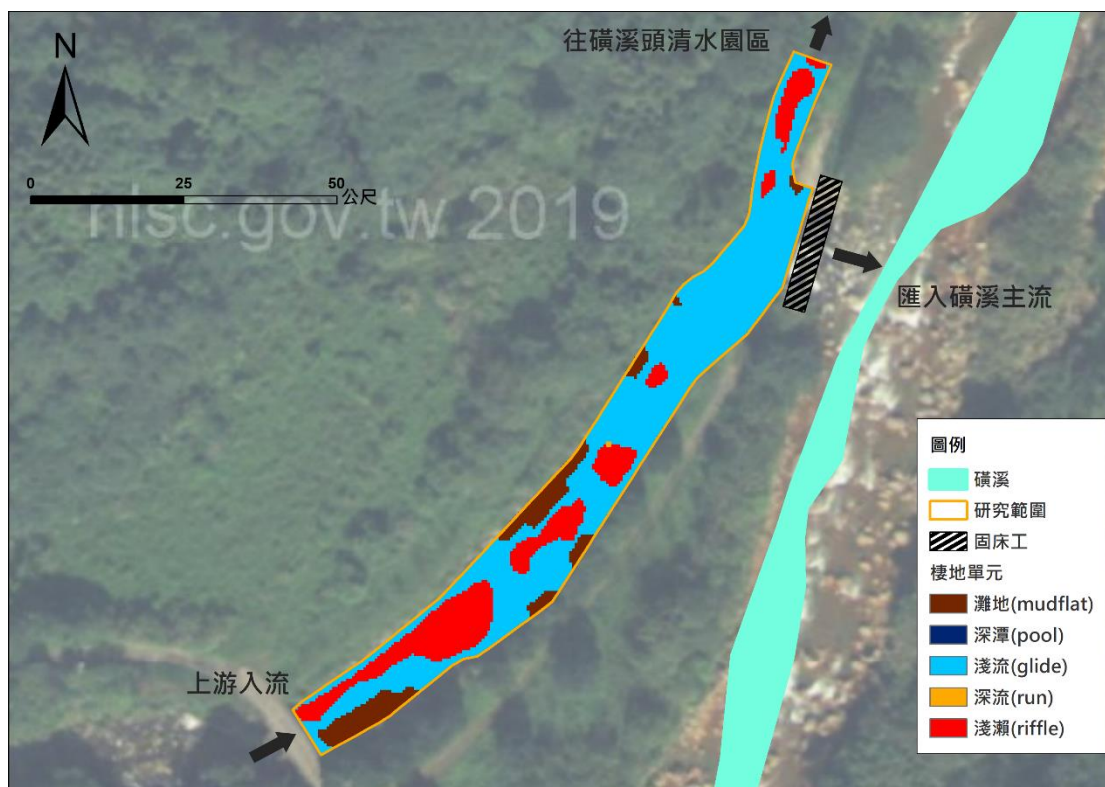


圖 4-6 設計情境#1 之棲地單元分佈圖

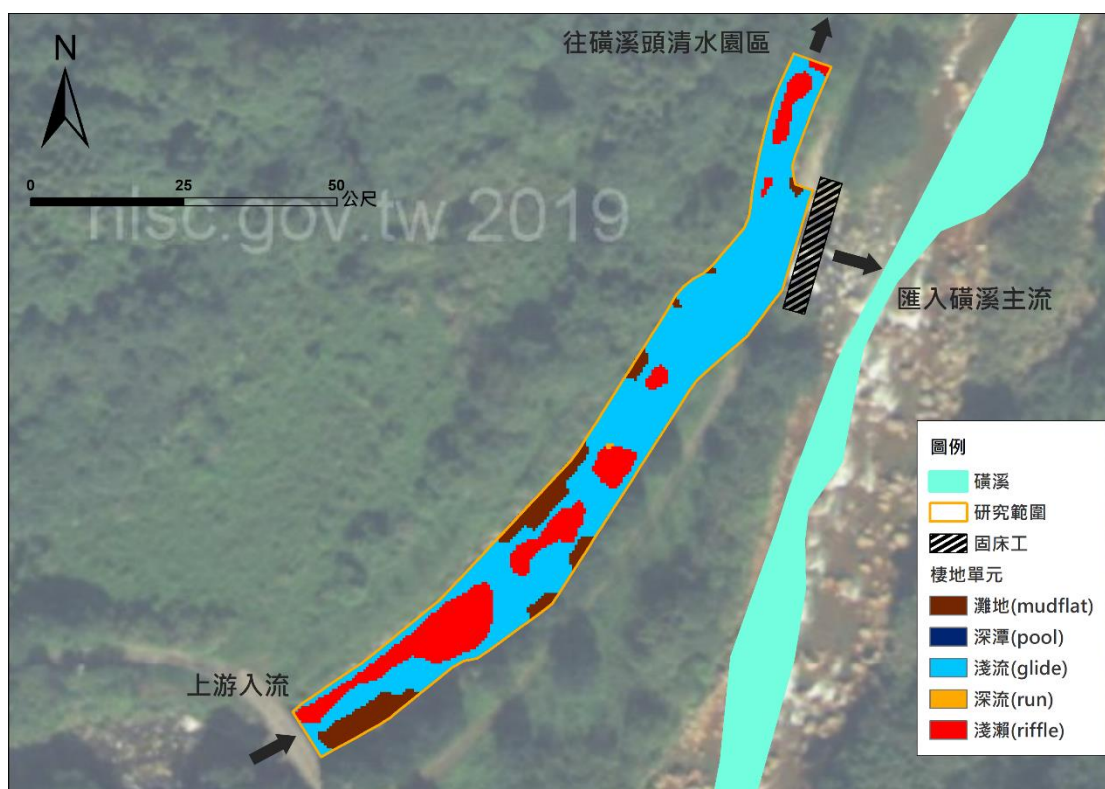


圖 4-7 設計情境#2 之棲地單元分佈圖

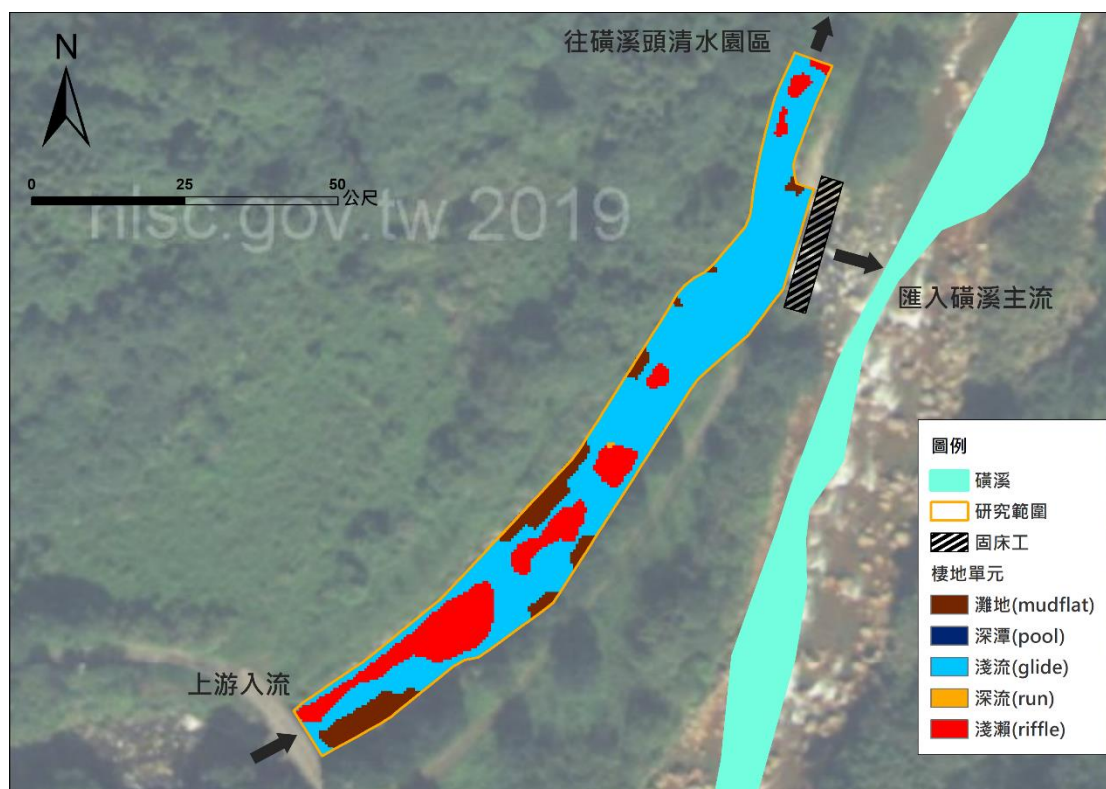


圖 4-8 設計情境#3 之棲地單元分佈圖

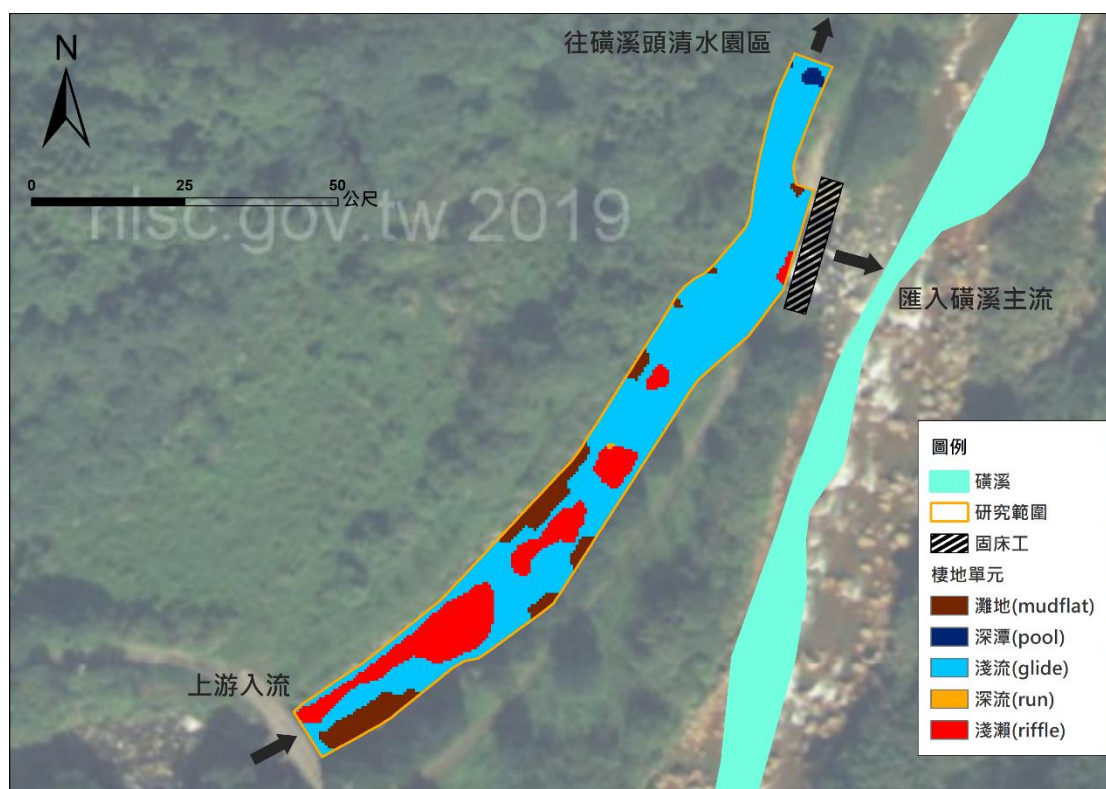


圖 4-9 設計情境#4 之棲地單元分佈圖

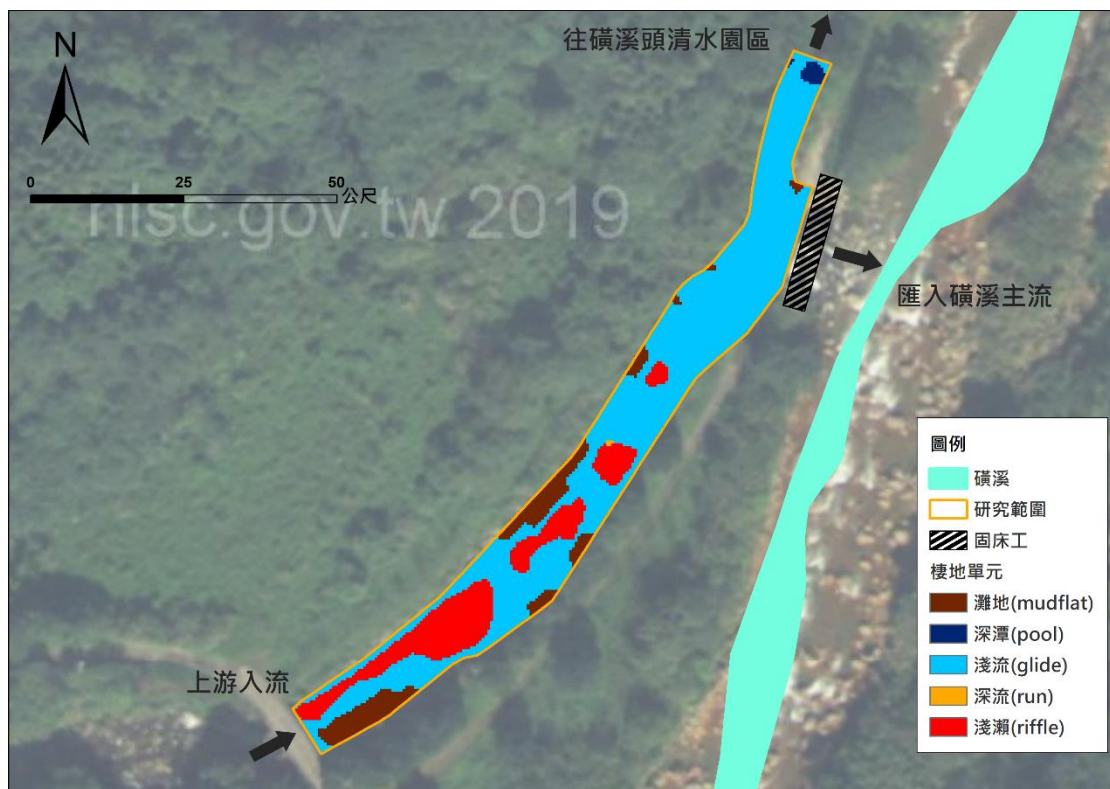


圖 4-10 設計情境#5 之棲地單元分佈圖

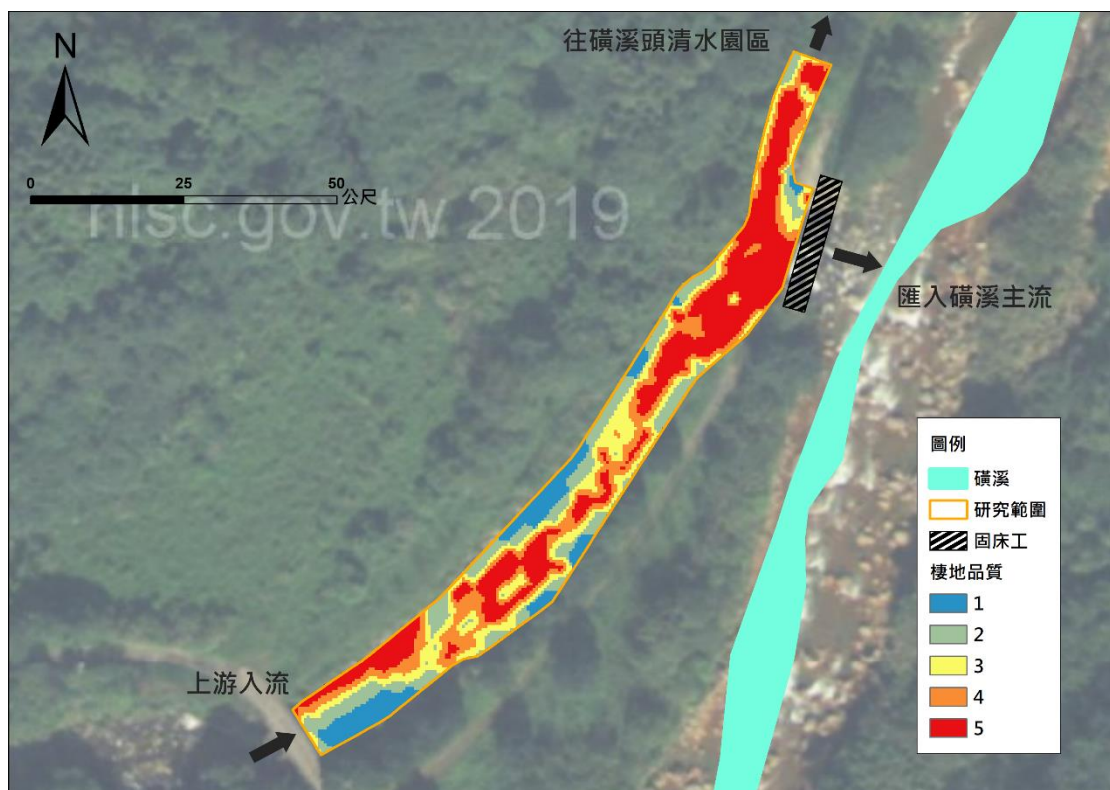


圖 4-11 設計情境#1 之棲地品質分佈圖



圖 4-12 設計情境#2 之棲地品質分佈圖



圖 4-13 設計情境#3 之棲地品質分佈圖

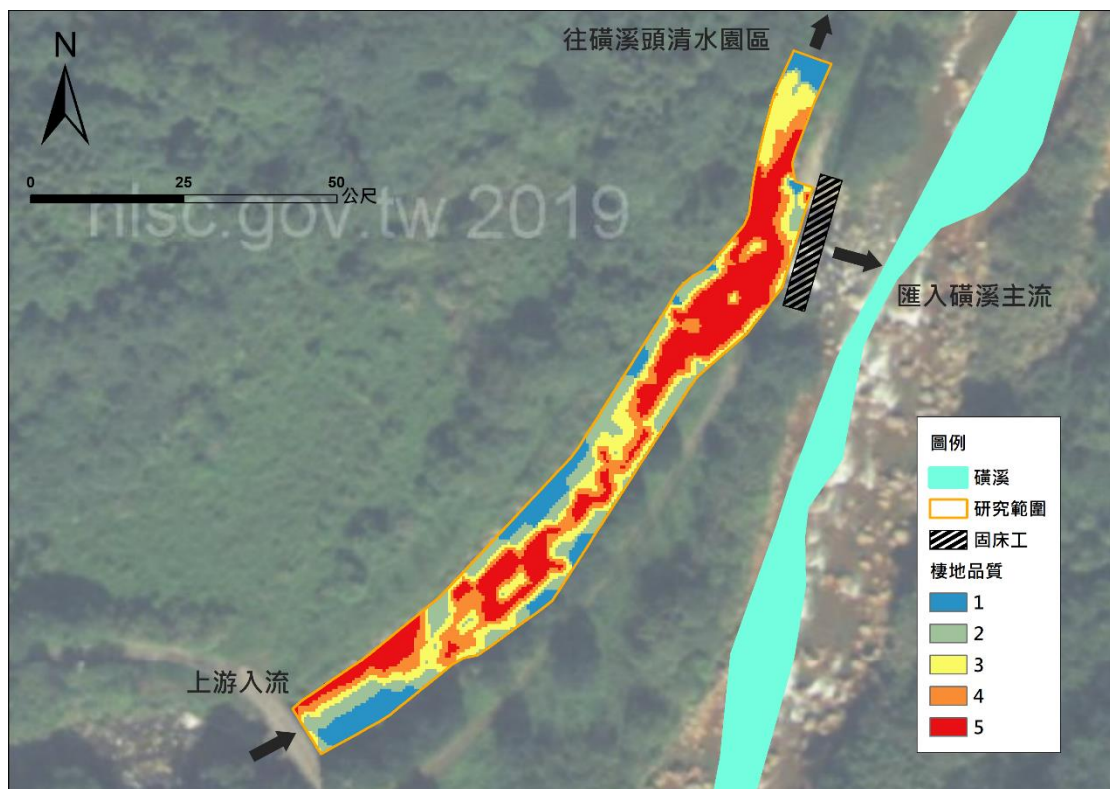


圖 4-14 設計情境#4 之棲地品質分佈圖

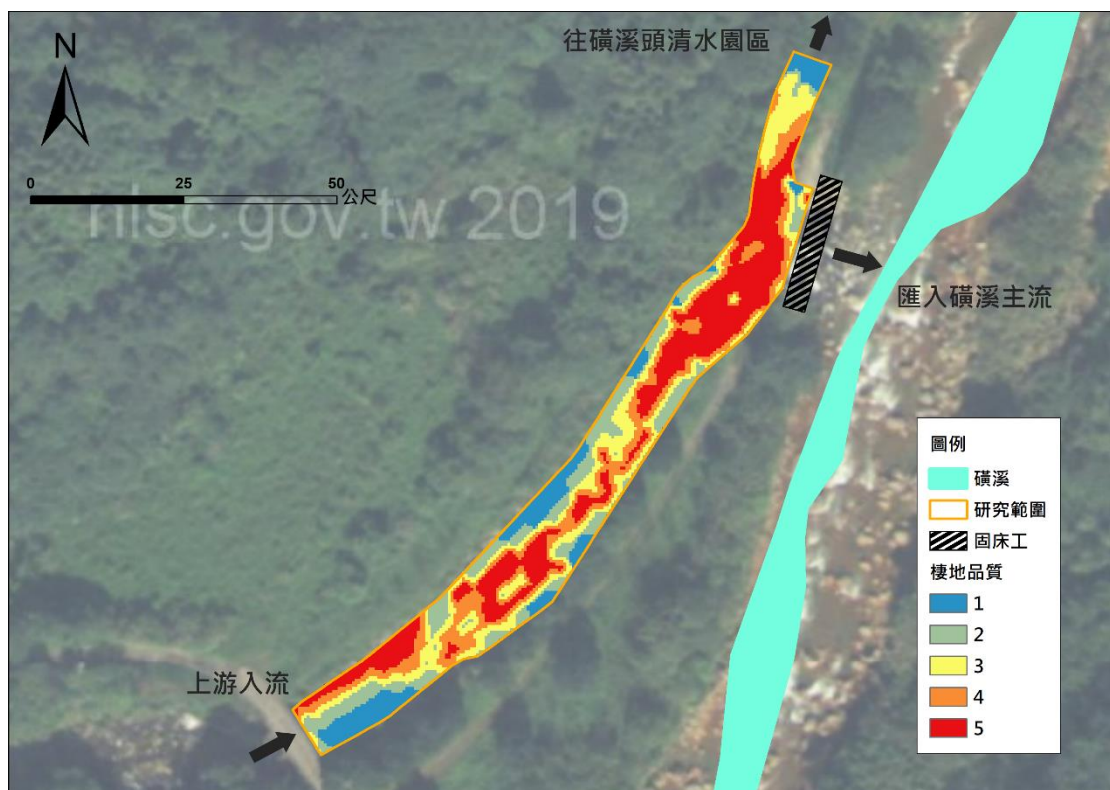


圖 4-15 設計情境#5 之棲地品質分佈圖

第三節 發電策略擬定

在擬定開發策略前，本計畫進一步拆解今年度問題—既存防砂壩是否可以結合小水力發電（如圖 4-16）。在設計端，必須吻合以下幾個條件：（1）附掛式的發電機組、（2）不阻水的引流方式、（3）模組化開發方式。

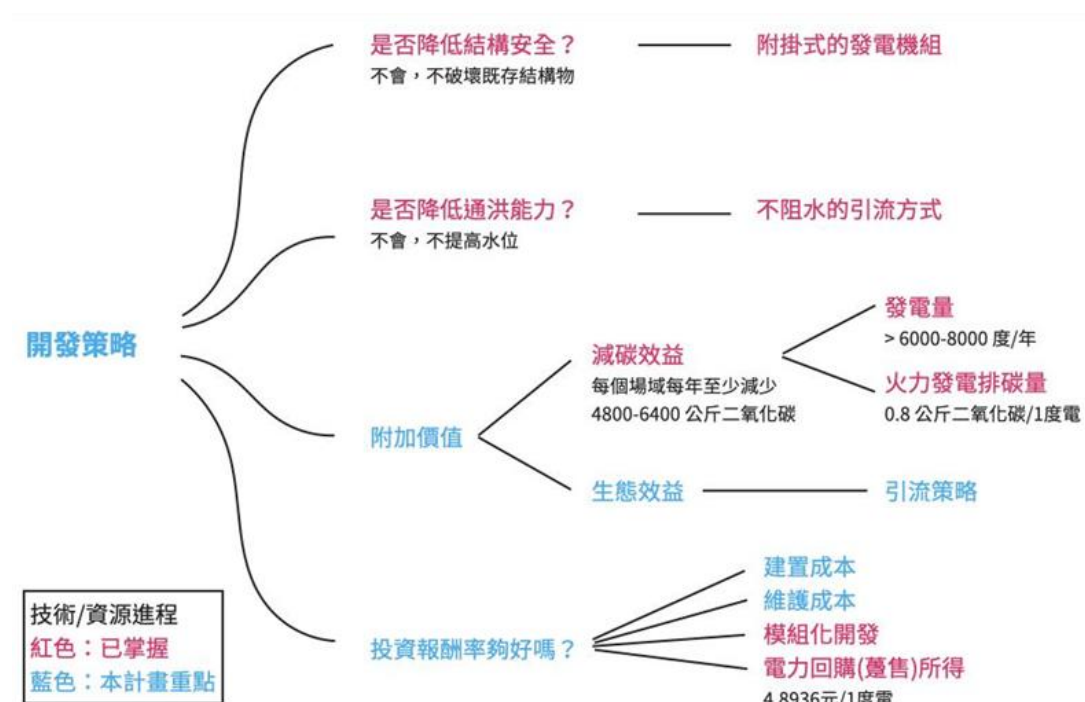


圖 4-16 問題拆解—既存防砂壩是否可以結合小水力發電

首先，根據環境條件如水頭落差、既有結構物（固床工）、人員容易到達處等考量下，初步評估可設置小（微）水力預定案場（以下簡稱案場）如圖 4-17 所示，其位置在礮溪清水園區沿礮溪支流的上游約 300 公尺處（註：此案場為圖上箭頭標示由礮溪支流經固床工分流至礮溪）、經緯度座標（25.20918, 121.59395）、海平面高程 86 m。

在 2023 年 5 月 9 日本計畫團隊至案場進行勘查及相關地形、水文量測，其中在案場量測的水頭落差約有 2.5 公尺，當天拍攝照片如圖 4-18。



圖 4-17 小（微）水力規劃案場之周圍環境水系圖



圖 4-18 案場環境水頭落差量測

根據案場環境的水頭落差、引流量（需以維持小（微）水力發電機組安裝處之下游棲地結構與棲地品質為準則）、既有結構物（即以低土建、安裝附掛式發電機組為設計開發核心）之初步評估後，本計畫選擇紐西蘭原裝進口的 PowerSpout LH 系列的小（微）水力發電機組。該機組採用模組化的設計概念，其益處如下：（1）水輪機皆需定期維護保養，若同時安裝多個機組，維護保養期間將可持續發電，過程中僅需暫停部分機組；（2）模組化且輕量化的機組，其有更經濟的運送費用及安裝時間。圖 4-19 為產品規格說明，詳細資料可參閱附錄一。

微水力發電機組建議採用低水頭的 LH，其發電量由場域的水頭與流量決定，如圖 4-20 所示。LH 的水頭係指水輪機水面到尾水水面的水位差，與在空氣中運行、並且由水柱驅動的衝擊式水輪機（Pelton 與 Turgo）不同，LH 的水輪機必須完全浸沒在水中，因此水輪機需設置於洩水管的上方，利用充滿水的洩水管產生的吸力驅動水輪機。水輪機的轉軸連結到上方的交流發電機，從而產生電力。因此，即便在高水位的狀況下，發電機組被水淹沒的機率較低。LH 也已被證實在合適的場域，其轉換效率可以超過 60%，最大發電量達 1.6 瓩。

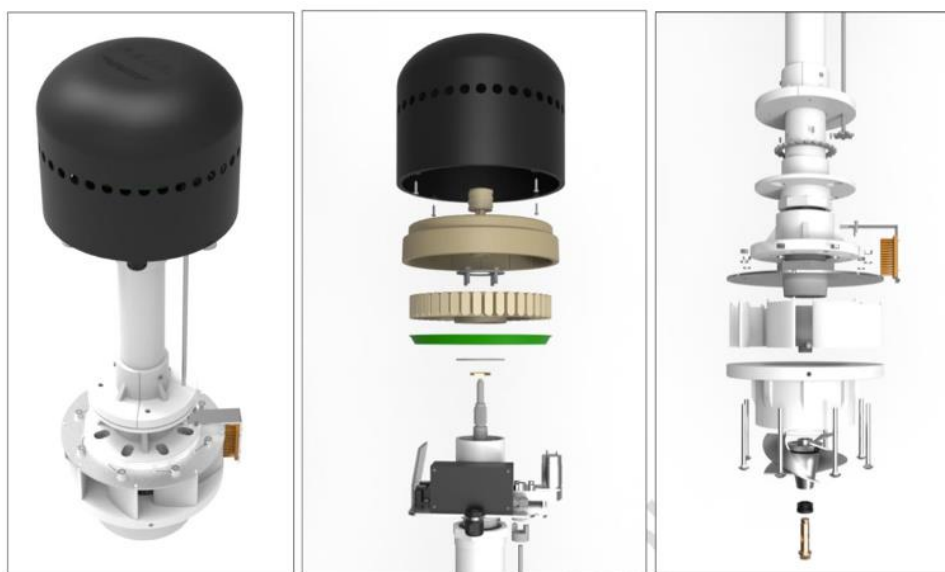
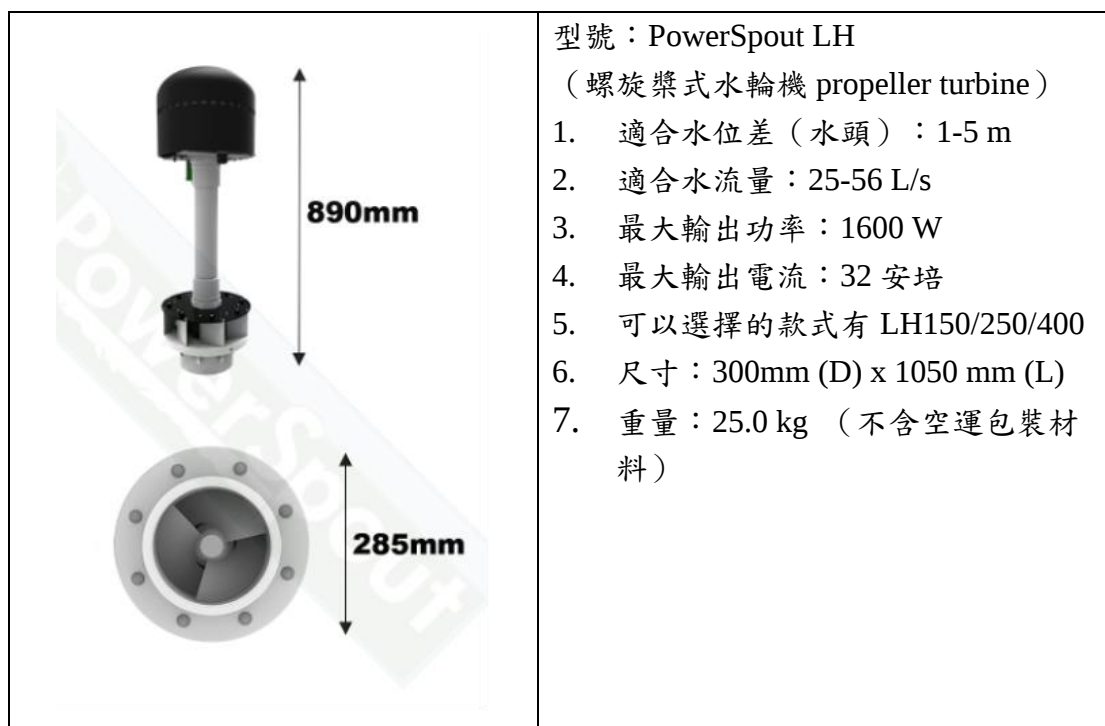


圖 4-19 微水力發電機組規格說明

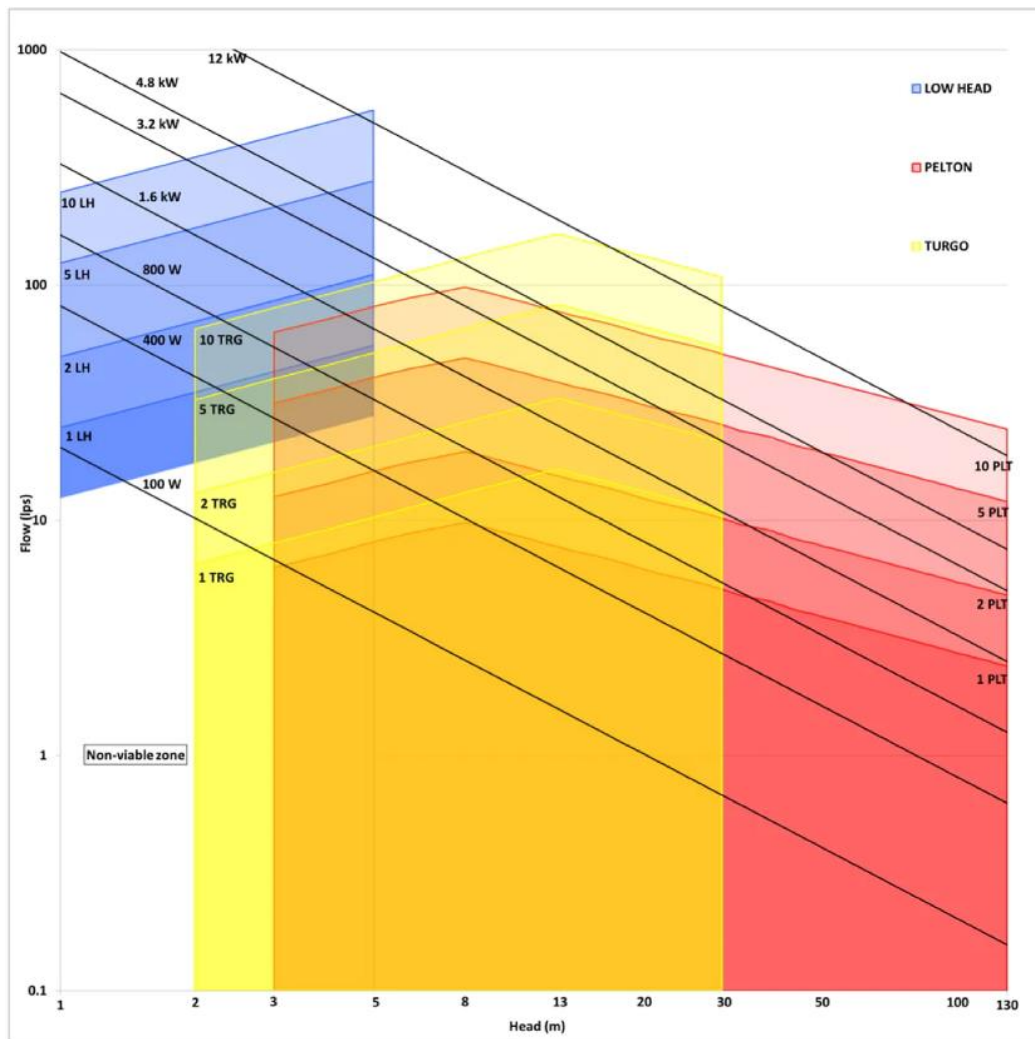


圖 4-20 微水力發電機組選用圖

圖 4-21 簡要說明小（微）水力發電機組的配置，其在清水溪右岸沿著固床工以近似平行且不阻水的引流方式，往其下游方向延伸，且使用固定支架將一座開放輸水槽（形狀以長方體為主）安裝在礮溪的河床上。此外，就地利用清水溪河床上的天然砌石，以人為排列去導引水流方向（即從清水溪往礮溪方向），使得河川水能順利地進入輸水槽並通過機組進行發電。另外，在槽體內裝設有洩水管可將發電後的河川水排入礮溪。



圖 4-21 PowerSpout LH 於清水溪之開發策略

本計畫根據前述之案場情境設計，進一步需釐清各情境下之發電量。應用 PowerSpout 提供的計算軟體進行模擬與估算，相關的參數

設定說明如下：案場需設置一座長方體形式的開放輸水槽，其尺寸為長 2.5 公尺、寬 2.0 公尺、高 0.3 公尺、槽體坡降 4‰，水頭落差設定 2.5 公尺，引流量設定 $0.12 \text{ m}^3/\text{s}$ （註：小於可用於發電的最大流量 $0.3 \text{ m}^3/\text{s}$ ，其說明可參考本章第二節－水理情境設計及生態棲地分析），採用 3 台 PowerSpout LH 機組。結果顯示：輸水槽內的水深 65 毫米、流速 0.9 公尺/秒，發電量可達 1.4 瓩（此為模擬發電量，可能視實際條件有所增減），其他相關水力條件(Hydro)、電力結果(Electrical)詳如表 4-15 所示。

表 4-15 PowerSpout 模擬發電量說明列表

Preferences	Type: LH / LH Pro Units: Metric
Hydro	<u>Results:</u> Available Flow: 120.0 lps (i.e. liters/s) Used Flow: 117.0 lps LH Head: 2.5 m Flume Material: General steel Flume Fall: 10 mm Flume Width: 2.0 m Flume Height: 300 mm Flume Length: 2.5 m Water Depth in Flume: 65 mm at 0.9 m/s Flume Capacity: 1,298.0 lps Draft Tube Diameter: 190 mm Number of PowerSpout LH Units: 3 Operating RPM: 1,088 rpm "No Load" RPM: 1,632 rpm
Electrical	<u>Results:</u> LH Output Voltage: 162 V LH "No Load" Voltage: 325 V Target Cable Efficiency: 90 % Actual Cable Efficiency: 96 % Cable Length: 20 m Load Max Voltage: 400 V Load Min Voltage: 50 V Actual Load Voltage: 155 V Cable Material: Copper Cable Size: 0.949 mm ² Cable AWG: 17 AWG Cable Amperage: 9.1 A
Actual Total Output	1,416 W

第四節 財務分析

本計畫係依據行政院主計處頒訂之「國營事業固定資產投資專案計畫編製評估要點(2013)」第一條：「投資計畫之效益分析，應以現值報酬率法及淨現值法為主，收回年限法為輔，並作風險與不定性分析」，以訂定開發小（微）水力發電的財務評估準則。分析時，應揭露預測之假設條件及資料來源。相對應的計算公式可參照第三章第三節的經濟效益模式。

表 4-16 為本計畫初步規劃案場情境設計之益本比分析表。根據成果，本案場在第 30 年可取得投資回本。計算參數設定為：使用 PowerSpout LH 系列的小（微）水力發電機組的初期建置成本為 25 萬元/瓩（2023 年），乘以 1.4 瓩發電量可計算得成本為 35 萬元，每一年維護費設定為初期建置成本的 5%，設備保險費為建置成本的 1%（納入風險考量），且假設每年物價上漲指數為 2%，流量利用率為 80%（即每一年的發電時數佔整年時數之 80%，約為 7,008 小時），折現率採計 5.25%，台電躉購價為 4.8936 元（20 年期）。

另開發策略採用 PowerSpout LH，利用 LH 產生之電能在裝置內被整流成直流電，因直流電在電纜中的傳輸效率較交流電更高，同時可以適用於最大功率點追蹤(Maximum power point tracking, MPPT)的控制器或併網逆變器。圖 4-22 說明國內能搭配 LH 使用的逆變器(可

視情況調整品牌與型號，本計畫預計採用 PV-3000S-V 作為案場之逆變器）。由於小（微）水力發電目前的市場規模不如太陽光電，因此逆變器供應商大多不願意配合，且必須支付昂貴的開發費用。若無法搭配商用的併網逆變器，逆變器供應商大多不願意配合，且必須支付昂貴的開發費用，最終將導致財務面無法支撐服務模式。

表 4-16 本計畫初步規劃案場情境設計之益本比分析表

發電潛能 (kW)	潛能發電量 (度/年)	年發電效益 (元)	設置成本 (元)	益本比 (30年)	淨現值 (30年)	內部報酬率 (30年)	年均化成本 (30年)	註： 1. 台電躉購價格(小水力不及500瓩) 4.8936元/1度 2. 初期建置成本 25萬元/kW			
1.4	9,811	48,012	350,000	1.00	3,280	4.84%	2.43				
建置成本	維護費及 保險費用	投入成本 (C _i)	產出效益 (R _i)	折現率 (i)	運作年期 (年)	年成本C (元)	年效益B (元)	累積成本 (元)	累積效益 (元)	益本比 B/C	年均化成本 (元/度)
350,000	21,000	371,000	48,012	5.25%	1	352,494	45,617	352,494	45,617	0.13	35.93
0	21,420	21,420	48,012	5.25%	2	19,336	43,342	371,830	88,959	0.24	18.95
0	21,840	21,840	48,012	5.25%	3	18,732	41,180	390,563	130,139	0.33	13.27
0	22,260	22,260	48,012	5.25%	4	18,140	39,126	408,703	169,264	0.41	10.41
0	22,680	22,680	48,012	5.25%	5	17,560	37,174	426,263	206,439	0.48	8.69
0	23,100	23,100	48,012	5.25%	6	16,993	35,320	443,256	241,758	0.55	7.53
0	23,520	23,520	48,012	5.25%	7	16,439	33,558	459,695	275,316	0.60	6.69
0	23,940	23,940	48,012	5.25%	8	15,898	31,884	475,594	307,200	0.65	6.06
0	24,360	24,360	48,012	5.25%	9	15,370	30,294	490,964	337,494	0.69	5.56
0	24,780	24,780	48,012	5.25%	10	14,855	28,783	505,819	366,277	0.72	5.16
0	25,200	25,200	48,012	5.25%	11	14,353	27,347	520,173	393,623	0.76	4.82
0	25,620	25,620	48,012	5.25%	12	13,865	25,983	534,037	419,606	0.79	4.54
0	26,040	26,040	48,012	5.25%	13	13,389	24,687	547,427	444,293	0.81	4.29
0	26,460	26,460	48,012	5.25%	14	12,926	23,455	560,353	467,748	0.83	4.08
0	26,880	26,880	48,012	5.25%	15	12,477	22,285	572,830	490,034	0.86	3.89
0	27,300	27,300	48,012	5.25%	16	12,040	21,174	584,869	511,207	0.87	3.73
0	27,720	27,720	48,012	5.25%	17	11,615	20,118	596,484	531,325	0.89	3.58
0	28,140	28,140	48,012	5.25%	18	11,203	19,114	607,687	550,439	0.91	3.44
0	28,560	28,560	48,012	5.25%	19	10,803	18,161	618,490	568,599	0.92	3.32
0	28,980	28,980	48,012	5.25%	20	10,415	17,255	628,905	585,854	0.93	3.21
0	29,400	29,400	48,012	5.25%	21	10,039	16,394	638,944	602,248	0.94	3.10
0	29,820	29,820	48,012	5.25%	22	9,674	15,576	648,618	617,825	0.95	3.00
0	30,240	30,240	48,012	5.25%	23	9,321	14,799	657,939	632,624	0.96	2.92
0	30,660	30,660	48,012	5.25%	24	8,979	14,061	666,918	646,685	0.97	2.83
0	31,080	31,080	48,012	5.25%	25	8,648	13,360	675,567	660,045	0.98	2.75
0	31,500	31,500	48,012	5.25%	26	8,328	12,693	683,895	672,738	0.98	2.68
0	31,920	31,920	48,012	5.25%	27	8,018	12,060	691,913	684,798	0.99	2.61
0	32,340	32,340	48,012	5.25%	28	7,718	11,459	699,631	696,257	1.00	2.55
0	32,760	32,760	48,012	5.25%	29	7,429	10,887	707,059	707,144	1.00	2.49
0	33,180	33,180	48,012	5.25%	30	7,148	10,344	714,208	717,488	1.00	2.43



第五節 概念驗證

本計畫根據第四章發電潛能評估與情境設計，就科學及實務問題的說明如下，包括：(1)能否生態雙贏？(2)是否具有減碳效益？(3)是否降低結構安全性？是否影響通洪能力？(4)投資報酬率表現如何？

一、能否生態雙贏？

從過往的文獻回顧及資料蒐集，已有大量的證據表示用於水力發電的大壩可能會改變既有流態、破壞河川連續性，對於下游生態有負面影響（如 Milhous, 1990; Petts, 1984 等），其包括：指標物種在不斷變化的河道邊緣擱淺(stranding)、指標物種向下游遷移、洄游受阻導致產卵(spawning)和飼養(rearing)成功率降低。

雖然小（微）水力電廠不需要建設大壩與水庫，部分生態友善的設備甚至可以允許魚類通過，但是在一年中的某些時間、以及一天中的某些時間仍可能造成流態改變，例如因為電力需求增加（如傍晚），以機組的最大容許量進行發電，導致放流量趨於固定，意即規則化原本隨時間變動之放流量，而變動的流量有助於維持產卵和飼養棲地，以及觸發產卵、孵化(hatching)和遷徙(migration)等生物線索(biological cues)，然這部分的影響尚缺模式及技術妥善量化，使電廠經營者上無法有效預測和減輕負面影響。

基於上述原因，本計畫納入「棲地廊道模式」，評估於流態改變

後對於棲地及生物之效益與衝擊。以台灣石鱚生存為例，至少保留通過下游之棲地廊道流量 $Q_d (= 0.203 \text{ m}^3/\text{s})$ ，註：現況 Q_d 的常時流量值為 $0.364 \text{ m}^3/\text{s}$ ，可維護高品質棲地環境及棲地結構。本計畫的發電策略擬定引流量設定 $0.12 \text{ m}^3/\text{s}$ （即 $Q_w = 0.12 \text{ m}^3/\text{s}$ ，符合可用於發電的最大流量 $0.3 \text{ m}^3/\text{s}$ ），透過財務分析說明需在第 30 年才可能取得投資回本，但是從兼顧低衝擊開發與生態涵養的角度來看，卻是有機會使得永續經營的效益達到最大化。

二、是否具有減碳效益？

情境設計的發電量模擬結果顯示：引流量約 $0.12 \text{ m}^3/\text{s}$ ，發電量可達 1.4 瓩。假設每年可發電時數為 7,008 小時（約占整年時數之 80%），本計畫研究區域的年發電量即約為 9,811 度，且排碳量為 0 公斤，相比燃煤之每度發電量的排碳量約需 0.8 公斤，意即每年可以減少約 7,849 公斤排碳量。

雖然單一場域的減碳量看起來不高，但是全臺目前有超過 3,000 座既存固床工（朱達仁等，2005），倘若這些場域都可以搭配微水力設備發電，粗估有約 3000 瓩的潛能待開發，表示每年可以生產約 1,800 萬度的綠電。減少約 1,440 萬公斤的排碳量。

三、是否降低結構安全？是否影響通洪能力？

本計畫規劃採用微水力發電機組，與單一場域發電量大於 100 瓩之小水力發電機組相比，微水力發電機組主要採用附掛設備方式，此種安裝方式可有效縮短工期，通常也不需使用重型機具，例如挖土機、吊車等，且不需要破壞既存固床工或堤岸、擺放發電機組於渠道之中、興建上池或引水道等。因此微水力發電機組之安裝方式，並不會降低結構物的安全性或佔用通洪空間，可以有效降低主管機關的對於河防安全之疑慮。

值得一提的是，若能成功建立示範案場，即可建立此施工及安裝之完整標準流程，包括取水口、輸水管、開放水槽、微水力發電機組、逆變器、併網型儲能機等模組。也就代表可以將此流程應用在其他場域，只需要按照各場域之地理特性、水文特性，調整取水口位置、輸水管長度、放流管長度，就可以快速且有效地建立這套系統，不需要因場域差異而重新設計。

四、投資報酬率表現如何？

本計畫研究區域產出之綠電以自用為主要規劃用途（小型社區自給自足的分散風險模式），但也可以透過併網，以躉購費率將電力販售給台灣電力公司，或是以轉供方式將電力及再生能源憑證賣給有綠能需求的廠商或用電大戶，以台電躉購方式為例，本計畫研究區域的

年發電量約為 9,811 度，每年的綠電回購所得則可達 48,012 元。根據國內外水力發電廠的操作經驗，設計良好的水力發電設備可以持續使用 30~40 年，另一方面，若以落實 ESG(Environmental; Social; Governance)理念之企業將完全使用綠電，配合臺灣淨零轉型，未來綠電將會更靈活蓬勃發展，其帶來之效益無法單以投資報酬率衡量其附加價值。

雖然目前的投資回收年限偏高，但是微水力場域可持續獲利達 30 年，加上 SUNRUN(<https://www.sunrun.com/>)在住宅型太陽能成功的商業模式，本計畫認為只要能降低每度電的發電成本，即便是僅有 1~2 瓩的發電潛能也值得開發，詳細說明如：一棟公寓大廈的樓頂面積約 15~24 坪，約可鋪設 5~8 瓩的太陽能，每年可生產 6,140~9,824 度的綠電。微水力發電機組只要有水流的場域，可以持續 24 小時發電，以發電量 1-2 瓩的發電機組而言，即能生產 6,000~12,000 度的綠電。且如此之設備規格僅需直接附掛於既有設施或結構物上，無需額外土建工程，也幾乎不需佔地成本，容易獲得場域主管機關的支持。

本計畫的開發策略為設置示範案場，同時建立其標準流程，並推行至全臺多處之類似場域（既存之固床工、攔河堰、防砂壩等），若能順利推展，相信每千度的發電成本將可大幅降低，甚至有機會降低至約略目前條件的 1/3（圖 4-23），故本計畫對推動「既存防砂壩結

合小水力發電」的前景仍相當樂觀，預期將成為具吸引力的投資標的。

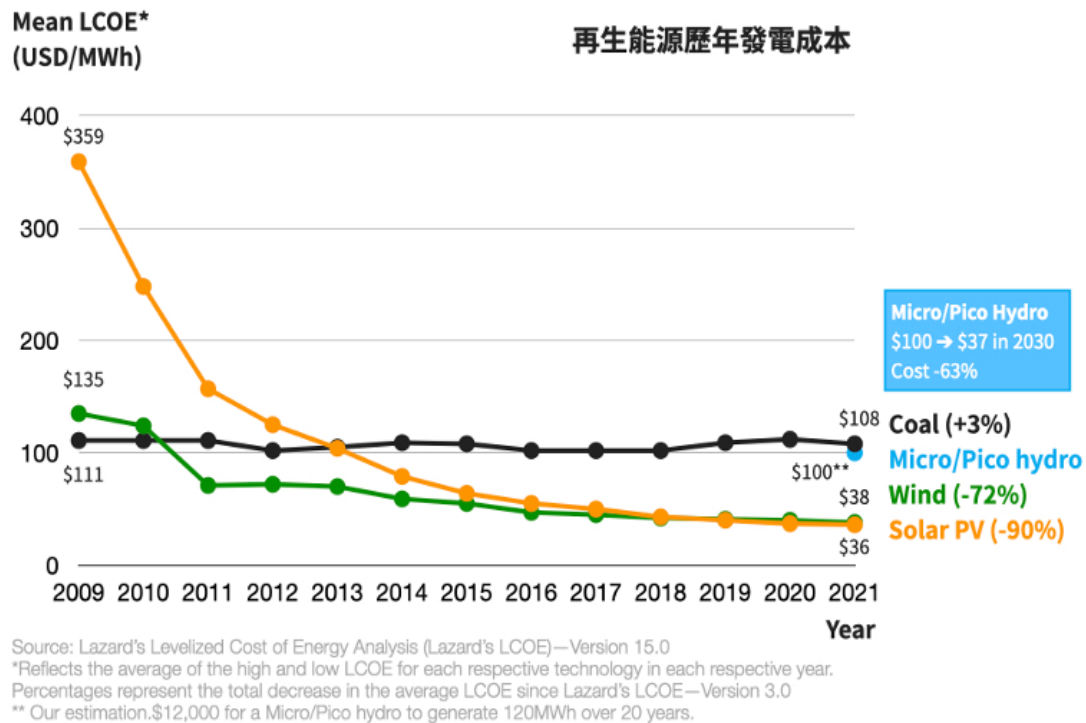


圖 4-23 再生能源歷年發電成本

第五章 結論與建議

第一節 結論

1. 本計畫研擬完整的「防砂壩小水力發電潛能評估模組」，從水動力模式、生態水文模式、棲地廊道模式、微水力發電經濟效益模式等，成功串聯整合各個模式的交互作用下，可分析在小區野溪內防砂壩採用低衝擊式微水力發電開發的經濟效益可行性，且同時在環境生態保護的永續經營下取得平衡性。
2. 以本計畫的研究區域礮溪上游及其支流清水溪的為例，考慮標的物種台灣石鱚的生存環境下，根據「防砂壩小水力發電潛能評估模組」分析指出，維持放流至下游之棲地廊道流量 Q_d ($0.203 \text{ m}^3/\text{s}$)，小於現況的常時流量下 ($0.364 \text{ m}^3/\text{s}$) 即不取水發電，就能於該河道中、下游處營造出可友善台灣石鱚的高品質棲地環境以及棲地結構。
3. 當達到保護環境生態的永續經營平衡性後，採用低衝擊式的微水力發電建置(即不造成河道上既有水利結構物的構造損傷、離槽開發不影響河道斷面通洪能力等)，在基本設計階段是考量與自然環境共生的方式進行施作，例如以天然砌石作為分水工導引水流進入取水口，在取水量 Q_w 設定為 $0.12 \text{ m}^3/\text{s}$ 時，此流量小於研究場域可用於發電的最大流量 $0.3 \text{ m}^3/\text{s}$ ，因此能最

大程度降低對河川生態基流量的衝擊，而透過微水力發電經濟效益模式於財務分析後，大約需第 30 年有機會達致投資回本。

4. 根據國外水力發電廠的操作經驗，設計良好的水力發電設備可以持續使用 30 以上，若以落實 ESG 理念之企業將完全使用綠電，配合臺灣淨零轉型，未來綠電將會更靈活蓬勃發展，其帶來之效益無法單以投資報酬率衡量其附加價值。
5. 本計畫的開發策略為設置示範案場，同時建立其標準流程，並推行至全台灣多處之類似場域，例如既存之固床工、攔河堰、防砂壩等。

第二節 建議

1. 本年度已完成擇定一處研究場域導入完整的評估流程，包括規劃設計、放流策略研擬、情境分析到生態評估，以及探討可行的引放流(發電)策略擬定，並完成概念驗證。建議下一步可將此「防砂壩小水力發電潛能評估模組」評估流程，模組化複製應用至貴署管轄下適合開發微水力發電建置的野溪內防砂壩。
2. 除台灣石鱚這種游泳性魚類外，亦可建立其他指標魚種之棲地適合度分析（例如底棲性魚類），也可將水棲昆蟲、兩生類等不同物種納入考慮，可較全面分析對於生態環境之衝擊。
3. 比較現況及五個設計情境模擬結果，發現在固床工分流量較高時，下游分流處將出現較大面積之不適棲地，後續可擴張其模擬範圍，以掌握其受固床工分流量影響之範圍。
4. 本計畫模擬分析發現高品質棲地彼此相連可形成棲地廊道，其可提升生物對於棲地之使用效率，對於生態環境之意義重大，考量目前國內外尚缺乏相關量化棲地廊道之研究成果，本計畫認為有必要針對棲地廊道投入更多之研究能量（例如：潭瀨流棲地結構形成、維持及演育，以及野溪廊道指標的發展）。
5. 小水力發電機組鎖定之野溪多位於流域中、上游河段，其河道天然產砂量以及基流量相對較不穩定，建議於實地安裝機組前，

先透過現地實驗測試攔砂、引水、接管之方式是否能順利執行。

6. 鑑於臺灣河川野溪流態有明顯峰枯季節差異，後續可再研究將時間序列（time-series-based）方法論納入超越機率分析中，並分別計算四季及峰枯兩季的適合用以發電的總時間（分散總時間及連續總時間）。
7. 為降低發電機組對魚類產生之影響，本計畫採用外掛方式安裝微水力發電機組，對於現有結構物之破壞、改變較小，使用河道內之空間也較小，引流路線上除加裝欄柵、格網等阻擋措施外，亦可透過降低引流前水域之棲地品質，使魚類因該水域環境不適合生存、繁殖而自然避開使用，減少魚類誤入水輪機組之機會。

參考文獻

1. Bovee, K.D., 1982. A guide to stream habitat analyses using the instream flow incremental methodology. Instream Flow Information. US Fish and Wildlife Service, DC, USA.
2. Brunner, G.W., 2016. HEC-RAS River Analysis System- User' s Manual, Version 5.0. US Army Corps of Engineers, California, USA.
3. Chow, V.T., 1959. *Open Channel Hydraulics*. McGraw-Hill, New York.
4. Chow, V.T., Maidment, D.R., Mays, L.W., 1988. *Applied Hydrology*. McGraw-Hill, New York.
5. Chuang, M.D., Chou, W.C., Zeng, Y.S., 2016. The study of river habitat classification—A case study of Wu river. *TW J. of Biodivers.*, 18 (2), 157 – 168
6. Daubechies, I., 1990. The wavelet transform, time-frequency localization and signal analysis. *IEEE transactions on information theory*, 36(5), 961-1005.
7. Hung, L.Y., Wang, S.M., Yeh, T.K., 2022. Collaboration between the government and environmental non-governmental organisations for marine debris policy development: The Taiwan experience. *Mar. Policy*, 135, 104849.
8. Kuo, P.H., Shih, S.S, Otte, M.L., 2021. Restoration recommendations for mitigating habitat fragmentation of a river corridor. *J. Env. Man.*, 296, 113197.

9. McGarigal, K., 2015. FRAGSTATS Help Maps. University of Massachusetts, Massachusetts.
10. McGarigal, K., Cushman, S., Ene, E., 2012. FRAGSTATS V4: Spatial Pattern Analysis Program for Categorical and Continuous Maps. University of Massachusetts, Massachusetts, USA.
11. McGarigal, K., Marks, B.J., 1994. FRAGSTATS V2: Spatial Pattern Analysis Program for Quantifying Landscape Structure. Forest Science Department, Oregon State University, Corvallis, Oregon, USA.
12. Milhous, R.T., 1990. The calculation of flushing flows for gravel and cobble Bed Rivers. In: Chang HH, Hill JC (eds) Hydraulic engineering. American Society of Civil Engineers, New York.
13. Mouton, A.M., Schneider, M., Depestele, J., Goethals, P.L.M., De Pauw, N., 2007. Fish habitat modelling as a tool for river management. *Ecol. Eng.* 29, 305 – 315.
14. Petts, G.E., 1984. *Impounded rivers: perspectives for ecological management*. Wiley, New York.
15. Shih, S.S., Huang, Z.Z., Hsu, Y.W., 2022. Nature-based solutions on floodplain restoration with coupled propagule dispersal simulation and stepping-stone approach to predict mangrove encroachment in an estuary. *Sci. Total Environ.* , 851, 158097.
16. Shih, S.S., Liu, C.H., Nien, J.H., 2022. In-river weir effects on the alteration of flow regime and regarding structural stream habitat. *J. Hydrol.* , 128670.
17. Shih, S.S., Yang, S.C., Lee, H.Y., Hwang, G.W., Hsu, Y.M., 2011. Development of a salinity-secondary flow-approach model to predict

- mangrove spreading. *Ecol. Eng.* 37:1174-1183.
18. United States Fish and Wildlife Service, 1981. Standards for the development of habitat suitability index models for use in the habitat evaluation procedure. Division of Ecological Services Manual. U.S. Fish and Wildlife Service, DC, USA.
 19. Water Resources Planning Institute, Water Resources Agency (WRA), Ministry of Economic Affairs (MOEA), 2005. Investigation of current status in Wu river system. Water Resources Planning Institute, WRA, MOEA, Taichung, Taiwan.
 20. Water Resources Planning Institute, Water Resources Agency (WRA), Ministry of Economic Affairs (MOEA), 2010. A Study of Biotic Indicators and Habitat Suitability Curves (2/3). Water Resources Planning Institute, WRA, MOEA, Taichung, Taiwan.
 21. White, M.A., Schmidt, J.C., Topping, D.J., 2005. Application of wavelet analysis for monitoring the hydrologic effects of dam operation: Glen Canyon Dam and the Colorado River at Lees Ferry, Arizona. *River Res. Appl.* 21(5), 551-565.
 22. Yang, S.C., Shih, S.S., Hwang, G.W., Adams, J.B., Lee, H.Y., Chen, C.P., 2013. The salinity gradient influences on the inundation tolerance thresholds of mangrove forests. *Ecol. Eng.* 51: 59-65.
 23. Young, P.S., Cech Jr., J.J., Thompson, L.C., 2011. Hydropower-related pulsed-flow impacts on stream fishes: a brief review, conceptual model, knowledge gaps, and research needs. *Rev. Fish Biol. Fisheries.* 21, 713 – 731.
 24. 巨廷工程顧問公司，2008。河川及供排水渠道發展小水力發電潛

- 能評估及可行性先期研究，經濟部水利署。
25. 行政院主計處，2013。國營事業固定資產投資專案計畫編製評估要點。
 26. 朱達仁、李宗儒、施君翰，2005。石門水庫上游集水區防砂壩現況與管理分析。臺灣林業 31(3)：49-57。
 27. 楊尊華，2017。中科自主智慧防災水情系統建置計畫(虎尾園區)，科技部中部科學園區管理局。
 28. 楊勝崎，2012。河岸紅樹林擴張之生態水利模式建立。土木工程學系(所)，博士論文，國立臺灣大學。
 29. 楊勝崎，2018。中科自主智慧防災水情系統第二期建置計畫，科技部中部科學園區管理局。
 30. 楊勝崎，2019。中科自主智慧防災水情系統第三期建置計畫，科技部中部科學園區管理局。
 31. 楊勝崎，2020。109 年度中科自主智慧防災水情系統維運服務，科技部中部科學園區管理局。
 32. 國家發展委員會，2022。臺灣 2050 淨零排放路徑及策略總說明。
 33. 經濟部水利署第十河川局，2017。磺溪治理規劃檢討報告。
 34. 經濟部水利署，2019。小水力發電之潛能調查與評估。
 35. 經濟部，2023。112 年度再生能源電能躉購費率正式公告。

附錄一、期中報告審查意見及回覆

審查意見	意見回覆
1. 貴校所提期中報告書，經書面審查通過，同意撥付第 2 期款，審查意見請納入期末報告書回應，並於 112 年 11 月 13 日前函送期末報告書 5 份，俾利辦理期末審查作業。	遵照辦理。
2. 請蒐集最新資料用以佐證分析，例如 2020 年農水署案場數、2016 年台電盤點 16 處小水力發電廠址、110 年金山區人口及產業等資料請更新。	已更新增加經濟部水利署在 2017 年公告評估全台具小水力潛能地點共 79 處，其中屬河川有 47 處、屬灌溉渠道有 32 處；農業部農田水利署於 2023 年 10 月配合政府綠能政策，農田水利署公布 13 處小水力發電潛力場址(P.1-1)；以及新北市金山區公所在 111 年底整理統計該區 110 年的區內人口、產業等資料(P.2-5)。
3. 本計畫雖屬研究性性質，但於野溪進行調查，仍屬勞動部所規範之臨水作業，請主持人注意臨水作業區域的職場安全。防止調查人員在鄰近河川、海岸或其	感謝委員提醒，已增購安全帽、救生衣、救生圈等安全裝備，於野溪調查時要求作業人員確實穿著，並於岸上配置兩名人員戒備天氣變化及溪水狀況，可隨時提

審查意見	意見回覆
他水域及邊坡作業時，因為溪水暴漲或土石流造成撤離不及，並應著適當之安全裝備(圖 2-8)。	醒溪水中之作業人員，以應變野外調查時之突發狀況。
4. 請說明水流含砂對測量儀器之耗損狀態及觀測值之校正。	本計畫在有橫跨河道的橋梁上設置一台非接觸式的雷達波水位計，以及數支設置在河道上的接觸式水位壓力計(此類水位計為耗損品)，量測水深研究區域的水深變化。針對微水力發電流量需求，或是維持生態品質的基流量，我們需要的是河道常時的平均流量資料(i.e. 多為清澈的水流為主、常時平均水位)作為流量分配之設計依據；反之，當洪水來時(i.e. 多為含砂量高的水流、高水位)，則可作為實施避災行動的參考值。
5. 所選定之礮溪，於調查時期並未遭遇豪雨，水流多呈清澈常流水，依目前規劃配置及附錄 PowerspoutLH 之說明，對於洪峰及含砂水流之因應及設備本體	Powerspout LH 的基本設計屬於離槽方式，僅取水口設置於河道上，若要進一步持續開發會再提出細部規劃，並考量天然災害的配套措施，例如在氣象署發布涵

審查意見	意見回覆
之安全，應加以詳述其引水及防範機制；每年之維護成本僅為建置成本之 5%，應加入風險因子重新評估。	蓋該區域的颱風或豪雨警報時，即會啟動應變行為，例如停止取水等。另外，在微水力發電建置的益本比分析表中已更新增加每年設備保險費（初估約需增加總建置成本的 1%），分擔因天然災害可能造成設備的損失風險(表 4-16)。
6. 本研究如能建立一套防砂壩小水力發電潛能評估方法，可讓本署各分署對於轄區內防砂壩全面進行評估，有助於本部淨零排放政策。	本計畫由生態水文模式建立水文模式，分析計畫範圍之水文資料，並提供給水理模式進行水理模擬，分析水理特徵（流速、水深），之後反饋於生態水文模式建立棲地單元與指標物種之棲地適合度，找出對於指標物種友善之關鍵流態，並由經濟效益評估模式分析其發電潛能及益本比計算，以此整套流程可得到在基於生態友善之條件下，所能取水發電之投資報酬率。整體評估模組運行方式可見圖 4-1。
7. 建議聚焦山坡地等小區野溪內防砂壩，並依據野溪特性建立	本計畫今年度選定陽明山國家公園集水區範圍的磺溪上游及其支

審查意見	意見回覆
評估模組，以利未來評估應用。	流清水溪為研究區域，該處有固床工結構物(可視為一座小型防砂壩)、河川水量及水質穩定、生態資料較為完整、且人車容易到達進行研究調查。透過本計畫的執行成果建立一套評估防砂壩小水力發電潛能評估模組之開發與技術驗證流程作為依循，接續再往淺山區域的山坡地等小區野溪內防砂壩進行模組化複製。
8. 根據 PowerSpoutLH 小水力發電機組的配置，以天然砌石人為排列去導流，若遇突發性豪雨導致機組設備與砌石排列損壞與改變，後續修復及維護如何即時且經濟，建議進行評估。	本計畫在微水力發電建置的基本設計階段是考量與自然環境共生的方式進行施作，例如以天然砌石作為分水工導引水流進入取水口。的確，上述方式有可能會因洪水造成河道地貌改變而影響取水功能，需在災後進行具時效性內的復原工作。這一部分亦會在確定有進一步持續開發微水力發電建置時，於細部規劃書中納入緊急災害應變、復原流程等。
9. 人員與案場進行量測作業，應多加注意職安問題，著正確安	感謝委員提醒，已增購安全帽、救生衣、救生圈等安全裝備，於

審查意見	意見回覆
全裝備，周圍配有相應安全設施，以防溪水暴漲或人員打滑等突發危險狀況產生。	野溪調查時要求作業人員確實穿著，並於岸上配置兩名人員戒備天氣變化及溪水狀況，可隨時提醒溪水中之作業人員，以應變野外調查時之突發狀況。
10. 為因應機關組織改造，機關名稱修正為「農業部農村發展及水土保持署」，報告書封面及內文等請依本署最新範本格式撰寫，相關範本檔案請至本署電子圖書管理中心下載 (https://elibrary.ardswc.gov.tw/)。	遵照辦理。已按貴署電子圖書管理中心提供之最新範本格式修正本報告封面、封底、側邊及內文之機關名稱、署徽。

附錄二、期末報告審查意見及回覆

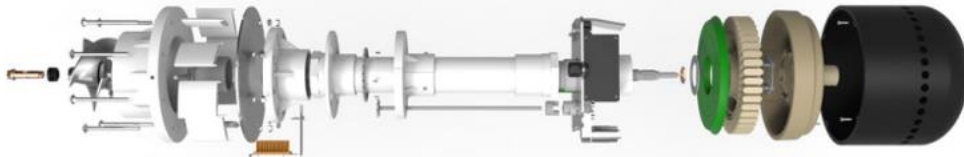
審查意見	意見回覆
1. 野溪土砂的不均勻特性及穩定基流量是否會影響發電機組維運，接管流或渠流是否可改善，建議可現地實際架設實驗。	因為本計畫「防砂壩小水力發電潛能評估模組之開發與技術驗證」執行期程至今年底(112 年)結束。所以，委員所建議實際架設實驗的推展，本計畫團隊會以臺中市和平區十文溪八仙山國家森林遊樂區內完成裝置容量 2.4 kW 的微水力發電場域，持續進行評估(112 年 11 月 30 日完成建置，本計畫團隊為參與成員之一)。這個場域的發電水源是取自十文溪，透過接管的方式輸送至下游約 140 公尺處的微水力機組進行能量轉換發電。然而，十文溪在豪大雨期間的水流也會呈現夾帶土砂狀態，與野溪特性相似。因此，本計畫團隊將持續蒐集這個場域的水量、水質與實際發電量的資料，待蒐集資料量具有代表性後，再依序進行資料分析，提供科學化資訊，利於後續執行相關研究參考。另外，後續研究

審查意見	意見回覆
	可嘗試加入 time-series-based EP 分析，應可計算出較為精準的峰枯季節可用之發電總時間（分散總時間、連續總時間），以更明確評估發電效益。
2. 防砂壩小水力發電設置有無考量後續維護管理？野溪水量枯豐差異甚大，要如何克服？對節能減碳之綠色能源一環，有發展之空間與利用。	目前在國際上對於微水力發電機組建置範疇是被定義成分散式能源，針對微小而分散的機組維護管理，一定是建議採取遠端監控的高效率方式。當有特定的異常警戒值持續回傳至中央伺服器，例如：水源變化異常、機組設備健康度異常等，會先以遠端操控方式進行關機保護。若觸及至異常行動值，則會在可安全作業時間內，派專業人員至現場進行修整復原。另一方面，面對野溪豐枯水量的極端差異問題，本計畫團隊在執行微水力發電建置的基礎規劃階段，多以採用並聯式的機組設計配置（即在枯水期時可常保有至少一台的機組正常運作；在豐水期間，則可開啟多台

審查意見	意見回覆
	機組並行發電，使得發電量可達到最佳狀態)，進行適應環境性的調控。
3. 小型發電設施是否被土砂影響，對魚類是否影響。	為了降低微水力發電機組的曝險機率以及後續維運的頻率，在微水力發電建置的基礎規劃階段一定會優先考量現地環境情形，例如土砂影響、洪峰流量、結構物等，再進行設計配置。若該環境是屬於高風險區域，那就不應該進場設置；反之，若是在可承受的風險條件下，則是依現地風險最低且符合引流路線的區塊，進行設計後建置。本計畫採用外掛方式安裝微水力發電機組，對於現有結構物之破壞、改變較小，使用河道內之空間也較小，引流路線上除加裝欄柵、格網等阻擋措施外，亦可透過降低引流前水域之棲地品質，使魚類因該水域環境不適合生存、繁殖而自然避開使用，減少魚類誤入水輪機組之機會。
4. 益本比分析除建置成本外，建議納入維護管理費用，減碳效益亦可納入。	在成果報告書的表 4-16 益本比分析表中，已納入維護管理費用進行分析，每一年維護費設定為初期建置成本的 5%，設備保險費為建置成本的 1%（納入風險考量）。成果報告書 P.4-35 說明了在本計畫的情境設計下，發電量模

審查意見	意見回覆
	擬結果顯示：引流量約 $0.12 \text{ m}^3/\text{s}$，發電量可達 1.4 瓩。假設每年可發電時數為 7,008 小時（約占整年時數之 80%），本計畫研究區域的年發電量約為 9,811 度，且排碳量為 0 公斤，相比燃煤之每度發電量的排碳量約需 0.8 公斤，意即每年可以減少約 7,849 公斤排碳量（相當於平均一棵樹要花 654 年之久才可吸收完畢的二氧化碳量）。
5. 棲地品質分類之因子其定義，計算方式為何？	棲地品質分類係根據 Elkins et al., 2007 所建議之方式計算。其首先根據物種之流速適合度曲線及水深適合度曲線計算該物種之流速適合度(S_v)、水深適合度(S_d)，再透過幾何平均之方式計算全域棲地適合度指標 ($GHSI = \sqrt{S_v \times S_d}$)，Elkins 進一步將 GHSI 依照表 3-2 分類為 5 種級距，以此掌握研究區域中不同區域之棲地品質。

附錄三、Powerspout LH 詳細介紹



Required head and flow per turbine (According to the turbine selection diagram): **Head: 1 - 5 meters; Flow: 14 - 55 liters/sec.**

The PowerSpout LH is a propeller type turbine. This type gives the maximum shaft rpm from the lowest head of water. The propeller is completely submerged in water (unlike the Pelton and Turgo turbines that run in air, driven by a jet of water).



The Powerspout LH propeller is situated at the top end of a tube that connects two bodies of water. The head of pressure on the propeller is actually created by the suction effect of water in the draft tube below the turbine. It is important that this tube is full of water, so both the turbine at the top, and the mouth of the tube at the bottom must be completely submerged in water.

The drive shaft connects the propeller to an alternator above the water level, which produces electricity. The current is rectified within the unit to DC suitable for a Maximum Power Point Tracking battery charge controller or a grid-tied inverter. Contrary to popular myth, DC is more efficient than AC for transmission of power in cables.



One advantage of situating it at the top of the draft tube is that the PowerSpout LH turbine is very unlikely to suffer flooding at times of exceptionally high rainfall. The rising water level in the tailrace will however reduce the operating head, and therefore the power output (Watts).

A PowerSpout LH turbine is more likely to be closer to your home than a PowerSpout PLT or TRG. LH turbines will be installed on larger streams which tend to meander down valley bottoms where homes are typically closer. PowerSpout LH turbines are best employed by locating a part of the river that drops 2-5 m quickly (over a set of rapids). The generation capacity of your site is determined by the water supply, primarily by the vertical distance the water falls (head) and how much

water flows in a given time (flow rate). Please note that the "head" for the LH is the drop in height between the water surface at the tailrace.