

這些研究不再局限於傳統生物學，而是整合了人工智慧、材料工程、再生醫學、循環經濟及社會治理。

以下分為五大技術領域進行解析：

一、 人工智慧與數位分身 (AI & Digital Twins)

利用計算科學解決大規模監測中人力成本高、標準不一的問題。

- **影像辨識與自動化：** * **YOLO 架構應用：** 針對 10 種關鍵珊瑚進行高準確度自動辨識，並整合無人水下載具 (UUV) 進行非侵入式監測。
 - **Fish-i 系統：** 透過 AI 輔助影像處理，將魚類視覺普查「去門檻化」，甚至開發出可攜式的「Fish-i Box」讓在地社區能在缺乏高運算設備下於現地處理數據。
- **3D 建模與數位孿生：** * **攝影測量普及化：** 透過 Samsung 的行動裝置（開發專屬 Ocean Mode 與 Oasis App），讓復育實務者能低門檻地建立 3D 數位模型，量化礁體變化。
- **預測模型：** * **機器學習預測韌性：** 整合多重、甚至相互矛盾的指標，辨識珊瑚礁復原的「臨界點」，協助管理者將資源投放於最具潛力的礁區。

二、 材料工程與再生醫學 (Engineering & Regenerative Medicine)

借鑑跨學科技術，開發新型育苗與保護機制。

- **骨整合技術應用：** * **Clip-and-Grow 平台：** 靈感來自再生醫學，利用鈦金屬 (Titanium) 的**骨傳導性**，誘導珊瑚蟲自發遷移至金屬夾上，達成無損、非破壞性的「低侵入性採集」。
- **工業廢物再利用：** * **鈦屑多孔支架：** 將工業加工產生的帶狀鈦屑壓製成圓盤，模擬天然礁體縫隙，作為珊瑚蟲繁殖的高效能、低成本支架。
- **生物材料創新：** * **Coral Fort™：** 開發全球首款通過第三方認證的「海洋生物分解」防護裝置 (PED)，利用 PHA 材料解決鸚哥魚掠食問題，並達成維護零成本。

三、 生態工程與產業共設計 (Ecological Engineering)

將硬體設施、能源與生態修復結合。

- **混合型海岸防護：** * **珊瑚消波塊系統：** 透過實驗室水槽測試，證實將珊瑚整合進消波堤設計中，能透過其三維結構顯著提升波浪能量消散效率。
- **跨產業綠能整合：** * **浮動光電 (FPV) 遮蔭：** 評估在潟湖設置太陽能板，除了低碳發電，是否能透過「遮蔭效果」降低海洋熱浪導致的珊瑚白化風險。
- **中尺度流體晶片：** * **Lab-on-a-Chip：** 開發小型化晶片系統，精準控制溫度、流體與養分，在實驗室桌面上即可進行長時間的珊瑚碎片培育與壓力測試。

四、 循環經濟與多營養層級養殖 (Circular Economy & RAS)

優化育苗過程中的資源效率。

- **跨部門廢水再利用：** * **高鹽度滷水養殖：** 將醃漬蔬菜產業的廢棄高鹽水用來培養杜氏鹽藻，進而製成海膽飼料，達成低碳、高產量的草食性生物復育。
- **精密養殖技術：** * **垂直式多層 RAS：** 開發具備獨立調控光譜、自動機械手臂轉移（溫度調控）的垂直養殖系統，提升空間效率與熱馴化能力。
 - **光週期調控：** 針對海膽進行多層立體養殖，利用光照強度差異與夜間攝食特性優化生長速度。

五、 社會治理與在地賦能 (Social Governance)

強調「社區主導」與「全球工具本土化」的方法論。

- **生物多樣性播種 (ARMS)：** * 結合自動化監測結構與石灰岩人工礁，將隱蔽性生物群落轉移至新礁體，並邀請當地漁民參與共設計，強化在地管理權。
- **知識民主化：** * 將全球遙測課程翻譯為史瓦希里語，建立青年主導的技術培訓據點，縮小南方國家與北方國家間的技術落差。
- **低技術解決方案：** * **泰國模式：** 運用重力供水、在地材料開發「低技術門檻孵化系統」，證明在資源有限環境下也能達成高效復育成果。