

# 黑鮪的黑科技

## 代理孕母 (Surrogate Broodstock)

圖、文 / 臺灣國立海洋大學水產養殖系退休教授 郭金泉

數十年來，太平洋黑鮪 (Pacific Bluefin Tuna, PBT, *Thunnus orientalis*) 的完全養殖被視為海洋界的「聖杯」。然而，黑鮪魚需要 3-5 年才能性成熟，體重可達近百公斤，這導致養殖空間、時間和勞力成本極高，限制了人工魚苗的大規模推廣。

面對野生黑鮪魚資源日益枯竭 (目前產卵生物量僅為未開發水平的 10.2%)，日本科學家發明了一項革命性的技術——黑鮪代理孕母 (Surrogate Broodstock)。這項技術利用體型小、生長快的魚類作為「代工廠」，快速且低成本地生產出純種黑鮪魚精子與卵子，將育種週期縮短 50% 以上，為全球水產養殖帶來了顛覆性變革。

### 1. 技術原理：跨物種的生殖細胞移植

代理孕母技術的核心概念是異種生殖細胞移植 (Xenogeneic Germ Cell Transplantation)，其原理是將供體 (黑鮪魚) 的生殖幹細胞植入接受體 (代理孕母 (魚)) 的生殖腺，使接受體產生供體物種的配子 (精子或卵子)。

- 核心概念：將黑鮪魚的生殖幹細胞 (精原細胞或卵原細胞) 作為「基因種子」，移植到代理孕母 (魚) (如小型鯖科 (mackerel) 魚類) 的體腔內。

這些幹細胞會遷移 (migrate) 至代理孕母 (魚) 的生殖腺，並在那裡發育成熟，產生純種黑鮪魚的精子或卵子。注：意指這些被注射到腹腔的黑鮪魚幹細胞，會被代理孕母 (魚) 生殖腺的化學信號所引導，主動遷徙 (或游移) 至生殖腺，並成功嵌入其中。

- 生物學基礎：鯖科魚類間的生殖系統具有高度同源性。此技術的關鍵在於將細胞移植到剛孵化不久的魚苗 (例如在孵化後 9 天內)，此時魚苗尚未擁有成熟的免疫系統，因此可以避免跨物種移植引起的免疫排斥。
- 關鍵優勢：代理孕母 (魚) 利用其快速成熟與低養殖成本的特性，完美避開了黑鮪魚親魚養殖所需龐大空間和資源的限制。

### 2. 突破進展：從鯖魚到小型鮪魚

科學家們不斷優化「代理孕母」的選擇，尋找最理想的「載體」，以最大化移植效率和魚苗存活率：

#### 2.1 成功案例一：

##### 鯖魚種苗的自體繁衍 (2022)

在黑鮪技術應用前，科學家首先在鯖科魚類中實現了技術驗證。

- 代理孕母(魚)選擇：使用了雌性藍鯖(*Scomber australasicus*)和雄性白腹鯖(*S. japonicus*)雜交而成的雜交鯖魚。這些雜交魚因其生殖細胞幾乎退化或缺失，強調魚體內缺乏製造精卵的原始細胞，成為理想的「無菌」接受體。注：這裡的「無菌」並非指沒有細菌，而是指沒有或缺乏自身的生殖細胞。這樣能確保移植進去的黑鮪魚幹細胞不會與代理孕母(魚)本身的生殖細胞競爭或混雜，達到100%產出純種黑鮪魚配子的目的。
- 成果：成功使雜交鯖魚產生了純種的白腹鯖精子和卵子。最關鍵的突破是，這些成熟的代理孕母魚在同一魚池內能夠自然交配，並成功孵化出完全正常的白腹鯖魚苗，證實了代理孕母魚產生的配子具有完整功能。

## 2.2 頂尖突破：

### 黑鮪魚精子生產加速器 (2024)

為縮短黑鮪魚的世代時間，研究轉向尋找更合適的「鮪屬」代理孕母(魚)。

- 代理孕母(魚)選擇：找到了雜交小鮪魚(Hybrid Little Tuna, HLT，東方小鮪 *Euthynnus affinis* 與大西洋小鮪 *E. alletteratus* 的雜交種)。相比於白腹鯖、鰹魚或東方小鮪，HLT 具有更高的黑鮪生殖細胞嵌入率，且幼魚存活率更高。
- 成果：成功在 HLT 身上實現了太平洋黑鮪精子的異種生產。這些代理孕母(魚)在短短 8 個月大、體重僅約 1 公斤時，就開始產生功能性黑鮪精子。這與野生黑鮪魚需 3-5 年性成熟、重達上百公斤相比，是一個巨大的時間和空間效益突破。注：黑鮪魚屬於金槍魚族(Thunnini)，這一族包含了所有大型且具有溫血能力的真鮪魚。體型較大，成熟較慢，通常棲息

在深水區域。小鮪魚(*Euthynnus*)屬於小鮪族(*Euthynnini*)，這一族通常包含體型較小、成熟較快、但血緣與真鮪魚接近的魚類(如鰹魚類)，經常出現在沿海水域。

## 3. 永續與保育的巨大潛力

代理孕母技術不僅是養殖的效率工具，更是全球魚類資源保育的一項戰略資產。

- 遺傳資源長期保存：魚類的卵子因體積大且富含脂質，難以像精子一樣冷凍保存。但透過此技術，科學家可以將黑鮪魚的未分化生殖幹細胞冷凍儲存(Germ Cell Cryobanking)，從而永久保存了父系和母系的全套基因組。
- 抗衡基因衰退：透過將冷凍的優良基因(經選擇性育種或來自野生優勢個體)細胞移植到大量代理孕母(魚)中，可以避免因世代近親繁殖導致的基因多樣性下降和遺傳漂變(Genetic Drift)，有助於長期維護魚類遺傳資源。
- 加速育種與量產：該技術使育種計畫的世代時間縮短，且可以透過同步誘導大量代理孕母(魚)成熟，來同步獲得精子和卵子，解決傳統育種中親魚難以同步排卵的問題，大幅加速優良品系的建立與量產。
- 應用廣泛性：除了黑鮪魚和鯖魚，這項技術概念也被用於包括鱒魚在內的多種硬骨魚(Teleost Fishes)的物種保育與水產養殖中，具有廣泛的應用潛力。黑鮪代理孕母使用的物種直到科(Family)的層級(鯖科 Scombridae)都屬(源自)共同的祖先。

## 4. 挑戰與未來展望

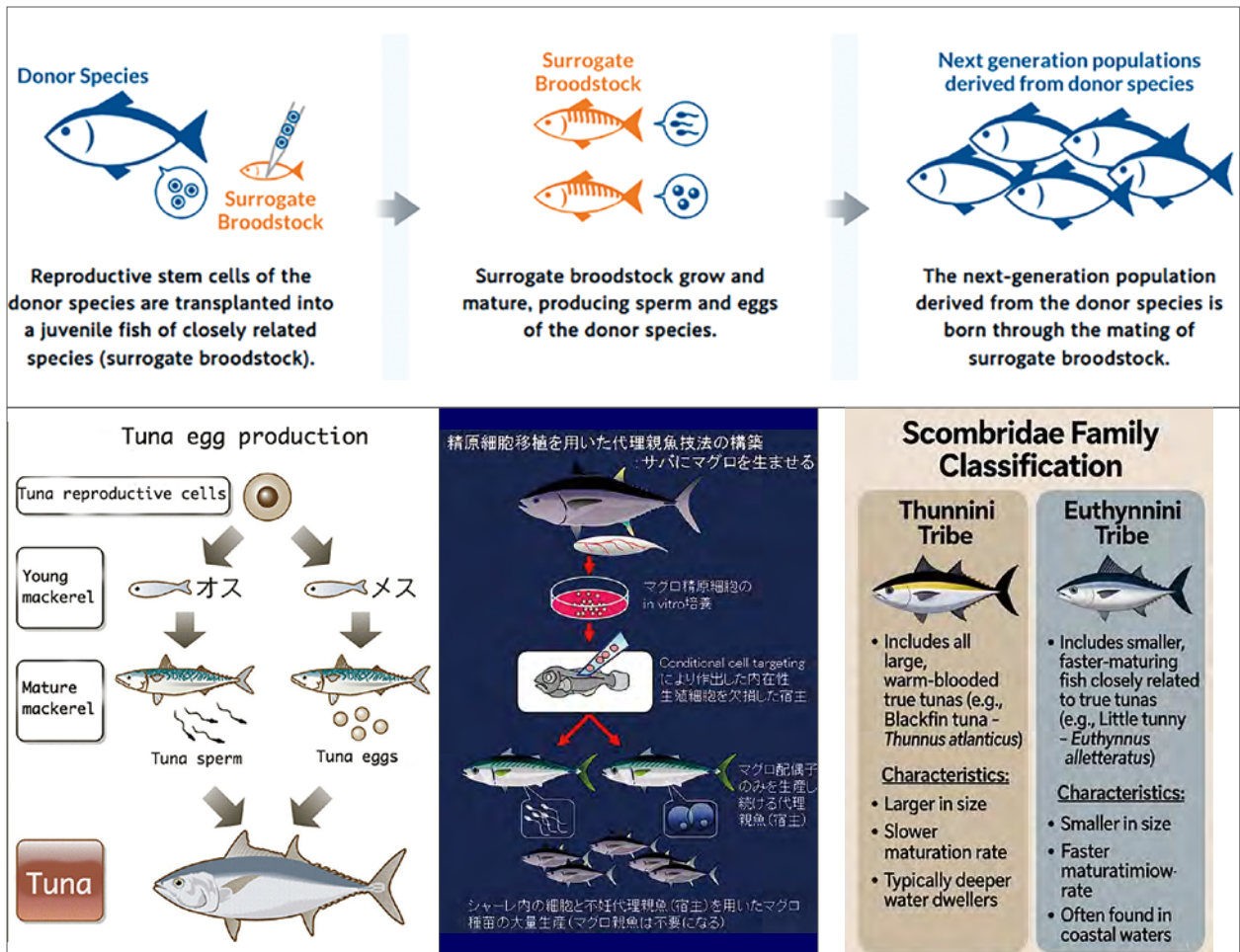
挑戰	核心問題與解決方案
免疫排斥風險	魚類免疫系統成熟後會排斥異種細胞。 解決方案：必須在代理孕母（魚）的幼體階段（免疫系統不成熟期）進行細胞移植。
代理孕母（魚）選擇	需選擇對移植細胞兼容性高且幼體存活率高的魚種。 解決方案：透過雜交技術生成無生殖細胞（Germ Cell-less）的雜交種，如雜交鯖魚和雜交小鮪魚，作為理想的「生殖細胞缺陷或缺失的接受體，無菌」（germ cell-deficient, Germ Cell-less Recipient）載體。注：無菌是常用的科普意譯。這裡的「無菌」並非指沒有細菌，而是指沒有或缺乏自身的生殖細胞。這樣能確保移植進去的黑鮪魚幹細胞不會與代理孕母（魚）本身的生殖細胞競爭或混雜，達到 100% 產出純種黑鮪魚配子的目的。
倫理與法規	跨物種細胞移植引發潛在的生物倫理爭議。 解決方案：最終產生的 F1 世代黑鮪魚是純種的，不含代理孕母（魚）的基因，但仍需建立透明的基因追蹤系統並遵循國際法規標準。

展望未來，隨著細胞篩選、移植技術（如 AI 自動化）的進一步優化，代理孕母技術預計將在 2030 年左右實現全面的商業化，有望供應全球市場黑鮪種苗的關鍵部分，從根本上緩解野生黑鮪魚資源的枯竭壓力，支持全球永續水產養殖的目標。

### 主要參考文獻

1.Kawamura, W., Yazawa, R., Takeuchi, Y., Kamio, S., Ichida, K., Hattori, R. S., ... & Yoshizaki, G. (2024). Bluefin tuna sperm production is hastened by surrogacy in small Euthynnus. *Nature Communications*, 15(1), 8128. <https://www.nature.com/articles/s41467-024-52393-4>

2.Tani, R., Yazawa, R., Kamio, S., Kawamura, W., Morita, T., Takeuchi, Y., & Yoshizaki, G. (2022). Establishment of surrogate broodstock technology in Scombridae species by germ cell transplantation. *Aquaculture Research*, 53, 2760–2771. <https://doi.org/10.1111/are.157912022>



## 簡介黑鮪代理孕母技術 (Surrogate Broodstock)

代理孕母技術是一項突破性育種創新，目的在解決黑鮪 (*Thunnus thynnus/orientalis*) 養殖中種苗生產成本高、週期長的挑戰。該技術起先利用生長快、體型小的魚類 (如鯖魚, *Scomber japonicus*) 作為「代理孕母」，透過移植黑鮪的生殖細胞，使鯖魚產生黑鮪的精子或卵子，從而加速種苗生產並降低成本。

### 1. 技術原理

- 核心概念：將黑鮪的生殖幹細胞 (精原細胞或卵原細胞) 移植到代理孕母 (魚) (如鯖魚) 的生殖腺，誘導其發育成黑鮪魚的精子或卵子。代理孕母 (魚) 作為「載體」，利用其快速成熟與低養殖成本特性，替代黑鮪親魚直接產卵。
- 生物學基礎：鯖科魚類間生殖系統高度同源，基因相容性高，允許跨物種生殖細胞存活與分化。移植後，代理孕母 (魚) 的生殖腺成為黑鮪魚配子生成場所，產出攜帶黑鮪魚基因的配子。
- 關鍵優勢：鯖魚成熟期僅 6-12 個月 (vs. 黑鮪魚 1.5-2 年)，體型小 (0.5-1kg vs. 20-50kg)，養殖成本僅為黑鮪魚的 10-20%，大幅降低育種資源需求。

## 2. 技術流程

代理孕母技術涉及多步驟精細操作，需整合細胞生物學、基因技術與養殖管理。以下為標準流程：

### (1) 生殖細胞採集：

- 從黑鮪幼魚或成魚採集生殖幹細胞（精原細胞或卵原細胞）。通常選取 6-12 個月齡黑鮪魚（體重 5-10kg），因其生殖細胞活性高。
- 方法：手術提取生殖腺或非侵入性活檢，後經離心分離與酶解獲得純化細胞。

### (2) 代理孕母（魚）準備：

- 選用鯖魚（如日本鯖魚）作為代理孕母親魚，需無菌或基因改造（如三倍體化）以抑制自身生殖細胞發育，確保移植細胞主導配子生成。
- 三倍體鯖魚（染色體異常，天然不育）常用於提高移植成功率，2024 年成功率達 90%。

### (3) 細胞移植：

- 將黑鮪魚生殖細胞經由微注射植入鯖魚生殖腺或腹腔。注射微劑量細胞 / 魚，視代理孕母魚大小而定。
- 使用螢光標記（如 GFP）追蹤移植細胞存活與分化，確保其融入代理孕母魚生殖系統。

### (4) 生殖腺發育與配子生成：

- 移植後，鯖魚在受控環境（水溫 24-26°C，鹽度 30-35ppt）養殖，6-8 個月內生殖腺成熟，產生黑鮪魚精子或卵子。
- 試驗顯示，約 70% 鯖魚能穩定生成黑鮪魚配子，單尾產卵量達 10,000 ~ 1000,000 顆。

### (5) 人工授精與孵化：

- 收集代理孕母魚產生的精子與卵子，進行人工授精。卵子孵化於 28-30°C 水溫，48-72 小時內孵化為魚苗。
- 2024 年試驗中，F1 世代魚苗存活率達 30-35%，較傳統人工授精（20-25%）提升顯著。

## 3. 技術優勢

- 成本效益：代理孕母魚養殖成本低（每尾年成本約 5 美元 vs. 黑鮪魚 50-100 美元），適合大規模種苗生產。
- 時間效率：代理孕母魚成熟期縮短 50-70%，種苗供應週期從 2 年降至 8-12 個月。
- 永續性：減少對野生黑鮪魚親魚捕撈（目前僅剩 10% 種苗來自野生），降低生態壓力。
- 靈活性：技術可推廣至其他鯖科魚類（如土魷魚），具廣泛應用潛力。

#### 4. 挑戰與解決方案

- 挑戰 1：配子品質穩定性問題：部分代理孕母魚產生的黑鮪魚配子品質不均，導致受精率偏低（50-60% vs. 理想 80%）。解決方案：優化移植細胞篩選（如流式細胞術分選高活性細胞），並調整代理孕母魚營養（如高 DHA 飼料）提升配子成熟度。
- 挑戰 2：移植成功率波動問題：不同批次鯖魚對移植細胞的接受度差異大，部分試驗失敗率達 30%。解決方案：使用基因改造三倍體鯖魚或免疫抑制劑降低排斥反應。
- 挑戰 3：規模化瓶頸問題：細胞移植與孵化需要高技術操作，限制大規模應用。解決方案：自動化設備（如微注射機器人）與 AI 監控系統降低人工需求。
- 挑戰 4：倫理與法規問題：跨物種細胞移植引發生物倫理爭議，部分市場（如歐盟）對基因改造魚有嚴格限制。解決方案：建立透明的基因追蹤系統，確保 F1 世代無外源基因，並遵循 FAO 與區域養殖標準。

項目	代理孕母技術	傳統黑鮪育種
成熟時間	6-12 個月（鯖魚）	1.5-2 年
種苗成本	0.5 美元 / 尾	2-3 美元 / 尾
魚苗存活率	30-35%	20-25%
養殖成本	5 美元 / 尾 / 年	50-100 美元 / 尾 / 年
生態影響	低（無需野生親魚）	高（依賴野生捕撈）

