

航空器循環經濟學： 永續發展及成長

洪上庭，陳敬霖，楊文忠
中華民國航飛行員協會

摘要

隨著全球航空業的快速發展以及環保意識的提升，退役航空器的回收與處置已成為永續航空產業的關鍵議題。本研究以航空器循環經濟學（Aircraft Eco-Economy Industry）為核心，提出「退役航空器處置策略」（Aircraft Disposal and Recycle, D&R），並分析國際成功案例例如空中巴士 PAMELA 計畫及航空器機隊回收協會（AFRA）的實踐經驗。透過拆解、材料回收及再利用等方法，不僅可最大化退役航空器的剩餘價值，亦能有效降低對環境的負面影響。本文特別聚焦於台灣的產業優勢，探討其在全球航空器回收市場的潛力與發展策略，旨在為航空業的永續發展提供建設性建議。

本文使用之圖片僅為評論或研究目的，屬於合理使用範疇（Fair Use）。原作版權歸屬於原作者，無意侵犯其合法權益。如有任何疑問，請聯繫中華民國航飛行員協會。

1. 結論

1.1. 研究背景

航空業近年之普及徹底改變了交通運輸方式，卻也不可避免地對環境造成了影響。隨著環保意識的抬頭，越來越多研究在嘗試降低航空業對於環境的衝擊，如永續航空燃油之研發。而另一方面，根據國外研究統計，自商用航空業發展以來，至今已有超過 8,500 架航空器退役，且預計於未來二十年內，更有約 12,000 至 20,000 架之航空器將達到退役年限（End of Life, EoL）。隨著航空業飛快發展，眾人焦點也逐漸轉移到再生利用及

永續發展。當前，退役航空器管理效率低下，時常導致資源浪費與更多的環境破壞。本研究強調需要向循環經濟模式轉型，重點關注資源回收、廢棄物減量，以及在航空器生命周期末端推行環保政策之建議。

1.2. 新冠肺炎疫情凸顯之問題與商機

疫情期間，國際航班銳減，各航空公司暫時封存之飛機停滿了世界各地之機場，諸多機場甚至不得不關閉部分滑行道作為臨時停機位來滿足封存之需求。專營北美及亞洲轉機之航空公司也為了節省支出，從強調縮短地面中轉時間，轉為費盡心思安排飛機

停放及封存。基於市場需求及運營成本的考量，相當高比例之航空器面臨被拆解回收的選擇，然而在折舊導致之帳面虧損及緊張的現金流等因素之財務壓力驅使下，大多數達到退役年限之航空器，皆未能成功回收其殘餘價值，反而是被匆忙報廢、棄置荒漠，以便維持公司的財務健康。

1.3. 研究動機

航空器循環經濟學（Aircraft Economy Industry）這一概念，由中華民國民航飛行員協會之產業與技術發展委員會研討後提出，旨在應對國際上環保意識提升與航空公司盈利導向的背景下，提供既經濟又環保的方式，來評估如何處置及回收航空器，即退役飛機處置策略（Aircraft Disposal and Recycle, D&R）。此概念強調通過再利用、材料回收和熱能回收等方法，不僅能降

低對環境的影響，亦能最大限度地發揮退役飛機之剩餘價值。此領域在國際上與學術界仍處於起步階段，未來有望成為航空業永續發展的重要方向。

1.4. 研究目的與範圍

- 評估國際計畫如 AFRA 與 PAMELA
本研究旨在探討全球推行的退役航空器管理計畫，包括國際民航組織與航空器機隊回收協會（AFRA）與 PAMELA 專案的架構與成效，分析其對提升資源利用效率及環境保護的貢獻。
- 分析現有退役航空器管理方式
系統性地剖析當前退役航空器管理的現況，包括其操作流程、挑戰與不足之處，並檢視現有做法對環境



圖1 疫情期間被封存之航空器佔據滑行道

（來源：BBC 中文網，〈肺炎疫情與「飛機墳場」：航空業不景氣造就沙漠奇景〉
<https://www.bbc.com/zhongwen/trad/business-53635963>）

與經濟的影響。

發展的方向邁進。

- 探索航空業的循環經濟模式
深入研究循環經濟模式在航空業的應用潛力，特別是在退役航空器資源回收及再利用上的具體策略，藉此尋求平衡環保與經濟效益的最佳方案。
- 建立永續航空器生命周期管理的全面框架以現有管理經驗與研究為基礎，提出一套適用於航空器全生命周期管理的綜合性框架，涵蓋設計、運營、退役及再生利用的關鍵策略。

本論文聚焦於退役航空器管理的經濟與環境影響，檢視全球性的創新技術與實踐應用，旨在為政策制定者、產業領導者與環境倡導者提供具體建議，推動航空業朝向永續

2. 航空器循環經濟學

退役航空器之回收與處置相關概念最早由波音公司於 2005 年提出，並於隔年開始實施報退役航空器先進管理流程（Process for Advanced Management of End-of-Life Aircraft, PAMELA），旨在應對未來可能的大量航空器報廢以及生態影響問題，專注於航空器之拆解、零組件回收、材料分類與分離以及其最終處理。該流程不僅示範性地將報廢航空器對環境之影響大幅降低，並且最大化其殘餘價值，展示了高效且永續地處理產品壽命結束之模式（End-of-Life Solutions, EoLS），持續朝向將上述過程標準化之目標邁進。此一模式不久後獲得歐洲政府的大力支持，逐漸推廣到歐洲各國家中。



圖2 航空器之處置示意圖

（來源：The Future of Aviation Sustainability: Commercial Aircraft Disassembly, Dismantling, and Recycling Industry.
www.linkedin.com/pulse/future-aviation-sustainability-commercial）



圖3 回收過程之拆解示意圖

(來源：The Market for Commercial Aircraft Disassembly, Dismantling and Recycling.
<https://global-recycling.info/archives/5849>)

2.1. 退役航空器處置策略

(Aircraft Disposal and Recycle, D&R)

本文退役航空器處置策略涵蓋兩種不同的方向，分別為「處置 (Disposal)」與「回收 (Recycle)」，這兩者在航空器生命週期中扮演不同角色，並常因定義不夠明確而被混淆。

2.1.1. 處置 (Disposal)：

處置指的是將航空器拆解 (Disassemble) 後，並針對保留完整性且具二手市場價值之部件，進行檢修、再利用，之後重新投放市場中。例如，航電設備、發動機零件或機艙內可重複使用的部件，經過檢修認證後可作為二手零件售出，延續其使用壽命。這一過程強調的是「維持部件功能性」，使其再次投入使用。

2.1.2. 回收 (Recycle)：

回收更多地涉及航空器的拆毀 (Dismantling)，針對已無法繼續使用之

部件，進行材料的分離與再加工。含有可再生利用之材料（如鋁合金、鈦金屬等）將被收集，經過熔化、提純和重製，轉化為原生金屬材料，並根據重量進行售賣或再投入其他製造流程。這一過程側重「材料的再生利用」，降低資源浪費並減少環境負擔。

上述處置回收過程不免地會產生相對應之成本，而非是僅依靠分類材料便可回收 (Salvage) 航空器之殘餘價值。此過程仍會涉及諸多不同行業之分工與合作，如金屬熔化處理公司、皮革收集及再加工公司等，抑或是負責修復部件、進行適航認證、以及後續轉售二手市場之航空器維修工廠。後續的章節將更詳細地討論這些過程，說明將退役飛機一步步轉化為可處置回收之最終產品的方法與途徑。

處置回收之過程越詳細、越有組織，航空器則更有機會可以有較高的回收比例。根據一間參與空中巴士飛機回收計劃的修護公司 Tarmac Aerosave 之報告，此類回收方式能夠回收航空器總重量之比例高達 92%、

引擎部件總重量之比例更達驚人的 99%。以 Airbus 320 航空器系列為例，其機體結構主要由鋁及鋁鎂合金（72%）、鋼（9%）和鈦（6%）組成，此部分金屬在航空器退役後均可回收，經專業渠道處理後熔制成再生金屬，用於製造非航空應用之新零組件；複合材料和其他材料則可用於熱能回收或按照當地法規進行處置。

上述報告中可清楚了解到，若處置回收過程成熟、透過專業分工以有效地控制成本，航空器相當可觀的一部分可被回收再利用，其潛在之收益是相當可觀，更甚，在重視環保的地區如歐盟等地，通過此處置回收過程甚至可將獲得之碳權再加以變賣。

2.2. 退役航空器處置過程 (D&R Process)

2.2.1. 步驟一：存放退役航空器

無論航空器是決定報廢或經由處置過程回收價值，第一步驟皆為尋找一適合存放航空器之場所，常見的選擇如南加州物流機場附近之沙漠地區，當地乾燥的天氣特性有助於防止航空器零部件之腐蝕，且相較機場停機坪停放費用更為便宜。

2.2.2. 步驟二：是否轉售航空器之決策

比較航空器直接轉售可獲得之利益及經由處置可回收之成本後，公司將決議是否轉售。如決定直接將轉售飛機，則過程到此結束；如果不轉售而選擇透過處置流程，則進入步驟三。

2.2.3. 步驟三：拆解 (Disassembling) 與拆卸 (Dismantling)

拆解是指將航空器分解並保持零部件的完整性以便再利用或出售；拆卸更是指將金屬切割和粉碎，以便進一步運輸至金屬回收公司進行熔化回收。對於一般航空公司來說，維修領域可以應對拆解過程，而拆卸則需要交由專業公司來處理，比如金屬回收公司、大型器具報廢處理公司。

2.2.4. 步驟四：零組件管理與材料管理

拆解所獲得之產物進入零組件管理，拆卸之產物則是進入材料管理，兩者之概念可以區分為兩組，一組為零組件（儀器、引擎部件等），另一組則是材料（如金屬、塑料、皮革等）。零組件管理包括對零部件的分類、整新；材料管理則包括次級材料回收、熔化等過程。

2.2.5. 步驟五：廢棄物處理

材料管理和零組件管理之步驟結束後，殘餘無法再利用或回收之物品，將進行最後的分類，區分方式為判斷其是否可以焚燒，如果可以焚燒，此類物品將被運用於熱能發電，也被稱為熱能回收；其餘無法焚燒之物品將被送往填埋場，做為廢棄物掩埋處理。

2.2.6. 步驟六：回收所有退役產品的價值

從上述五個步驟中，我們會發現航空器的轉售或再利用，包括零件、原材料和熱能，皆為各個流程末端的產出項目。航空公司可以進行一系列的經濟評估，選擇一種能夠回收退役航空器之最大價值的方法。值得注意的是，D&R 過程也需要一定的成本，這些成本的消耗也是評估是否進行 D&R 之決策的重要元素。

2.3. 處置經濟效益評估

前述提到之過程旨在完整地說明 D&R

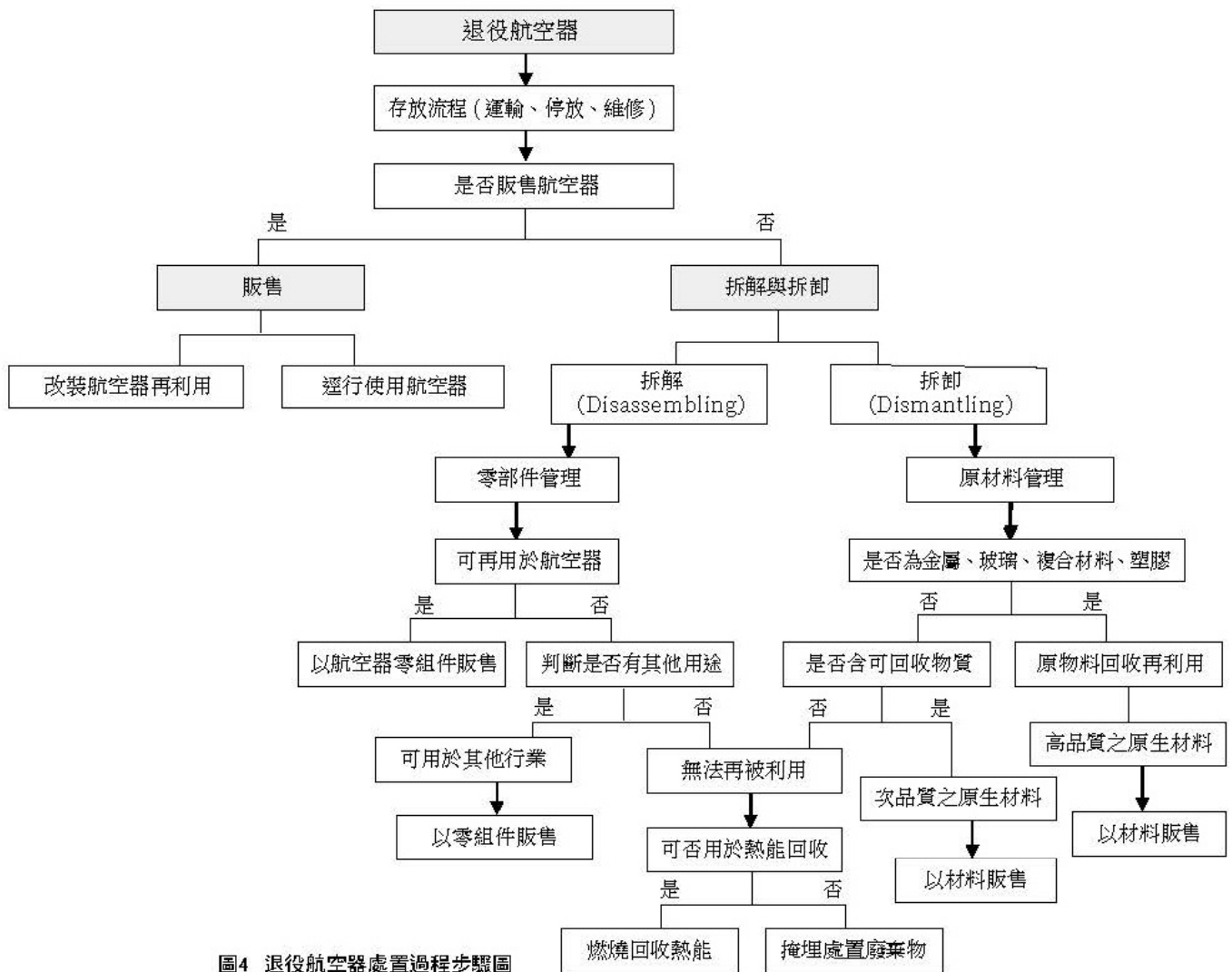


圖4 退役航空器處置過程步驟圖

過程中成本如何產生，以及 D&R 產品及細項之說明。本章節將詳述由國外研究機構設計出之經濟效益指標，並逐一介紹計算經濟指標時所需之元素，以協助航空公司及相關機構作出處置退役航空器之決策，而此處置之經濟效益評估即為本航空器循環經濟學中最为精華之部分。

2.3.1 退役航空器處置成本 ($C_{D\&R}$)

首先是評估退役航空器處置成本，即

$$C_{D\&R} = \sum_k C_{D\&R,k} = C_{D\&R, \text{storing}} + C_{D\&R, \text{disassembly\&dismantling}} + C_{D\&R, \text{component_management}} + C_{D\&R, \text{material_management}} + C_{D\&R, \text{reuse}} + C_{D\&R, \text{alternative_reuse}} + C_{D\&R, \text{energy_recovery}} + C_{D\&R, \text{land_filling}} + C_{D\&R, \text{recycling_lq}} + C_{D\&R, \text{recycling_hq}} + C_{D\&R, \text{resale}}$$

公式 1 評估退役航空器處置成本

D&R 過程之成本。如前章節所述，在航空器被拆解成較小元件（含零部件及原材料等退役產品）之前，需要經過多個步驟處理進行，具體而言，共有十個步驟會產生成本，此類步驟包括存放、拆卸與拆毀、零部件管理、材料管理、再利用、替代再利用、熱能回收、填埋、低質量回收、高質量回收、轉售（如公式 1）。

$$C_{D\&R,k} = \sum_j C_{D\&R,k,j} = C_{D\&R,k,labour} + C_{D\&R,k,material} + C_{D\&R,k,energy} + C_{D\&R,k,facility} \\ + C_{D\&R,k,tooling\&equipment} + C_{D\&R,k,miscellaneous}$$

公式 2 各步驟之元素細項

上述中每個步驟可再細分為六個元素，這些元素於每個步驟中獨立發生，分別為勞動（labour）、材料（material）、能源（energy）、設施（facility）、工具與設備（tool&equipment）、雜項成本（miscellaneous）。參考下面的公式，可以看到 $C_{D\&R,k}$ 為將此十項各自所擁有之六元素成本加總，即為總成本 $C_{D\&R}$ 。

2.3.2 退役航空器所剩餘之價值 ($V_{residual}$)

其次是評估退役航空器所剩餘之價值，即航空器之殘存現值。當涉及「現值」時，應當一併考慮折舊率及通膨率來做計算，以適當地反映航空器當下之價值，而後再做出財務決策。下列公式（公式 3）先對航空器之價格（ P_{AC} ）進行通膨調整，反映到當前財政年度（ FY ）之價值，再扣除因折舊所造成之價值損耗（ $C_{depreciation}$ ），最終得到航空器在當前財政年度之殘存價值（ $V_{residual}$ ），即可用於財務決策，如再利用或報廢之判斷。

P_{AC} 為航空器購入之價格；

$(1+I)^{FY-FY_0}$ 為考慮自購買年至評估年之通膨影響，將航空器價格進行通膨調整；

FY 為財政年度（Fiscal Year），標示某一年度，其中 FY_0 為該航空器購買之財政年度；

$$V_{residual} = P_{AC}(1+I)^{FY-FY_0} - C_{depreciation} = \frac{P_{AC}}{n_{depreciation}} \left((1+I)^{FY-FY_0 n_{depreciation}} - (1+I)^{n_{depreciation} (FY-FY_0)} \right)$$

公式 3 航空器殘值評估

I 為通膨率；

$C_{depreciation}$ 因折舊造成之價值損耗；

$n_{depreciation}$ 為航空器總折舊年數，亦為預估使用壽命。

2.3.3 回收處置後之價值 ($V_{residual}$)

之後則需要評估回收處置後之價值，由於 $V_{salvage}$ 是經 D&R 過程後之價值，而在計算經濟指標時（公式 4），此價值包含著未來值（FV: Future Value），因此必須使用給定的回報率（ r ）來反向計算 $V_{salvage}$ ，即反映未來值之現在價值（PV: Present Value）（公式 5），從而使此項目適用於現值的方程（任何項目皆必須推算為現值，才可代入同一方程式以提供參考並作出決策）。

$$PV = \frac{FV}{(1+r)^n}$$

公式 4 反映未來值之現在價值轉換方式

$$V_{residual} = \frac{V_{salvage}}{(1+r_{D\&R})^{n_{D\&R}}}$$

$$V_{salvage} = V_{residual}(1+r_{D\&R})^{n_{D\&R}}$$

公式 5 反映未來之航空器殘值與回收處置價值

$$V_{salvage} = V_{component_reuse} + V_{component_alter_reuse} + V_{energy_rcv} + V_{material_hq} + V_{material_lq} + V_{resale}$$

公式 6 各細項總和即為總產出價值

$V_{salvage}$ 由六個項目之組合價值，包括：組件再利用 ($V_{component_reuse}$)、組件替代再利用 ($V_{component_alter_reuse}$)、能源回收 (V_{energy_rcv})、高質量材料 ($V_{material_hq}$)、低質量材料 ($V_{material_lq}$)、飛機轉售 (V_{resale})，下方公式顯示了如何將 $V_{salvage}$ 計算為現值。

2.3.4 循環經濟指標 $I_{D\&R}$

將總產出價值 ($V_{salvage}$)、航空器殘值 ($V_{residual}$) 和總處置成本 ($C_{D\&R}$) 結合於同一方程式中，形成下方公式中之經濟指標 $I_{D\&R}$ 。簡而言之，如處置後總產出價值減去飛機殘值超過總處置費用 ($I_{D\&R} > 1$)，即意味著處置航空器是具有經濟價值地；反之如 $I_{D\&R} < 1$ ，則意味著處置航空器並不具備經濟價值。

$$I_{D\&R} = \frac{V_{salvage} - V_{residual}}{C_{D\&R}}$$

公式 7 循環經濟指標可迅速判斷是否有回收價值

3. 國際處置回收產業現況與發展

儘管航空器回收計畫在國際間逐步展開，但其進展明顯落後於汽車回收行業。汽車回收與處置市場已發展成熟，擁有龐大的二手市場、零部件市場以及廢棄汽車回收處理廠等完善的產業結構。這些特點，包括覆蓋範圍廣泛及相對較低的入行門檻，使得汽車回收產業得以迅速成長（如圖 4）。相比之下，航空器之處置與回收業務面臨更多的



圖 4 汽車拆解專業機台十分鐘內即可完成一整部車的拆解過程，且會針對特殊零件進行分類。

（來源：兩岸三地中古車市場剖析（4-3）

<https://www.carnews.com/nocategorized/216491>）

挑戰。首先，航空器造價高昂，能負擔其金額之買家僅限於航空公司及少數私人企業，不僅一手市場狹小，二手市場更是寥寥無幾。此外，二手航空器的認證過程十分繁瑣且嚴格，也進一步限制了其回收市場的發展空間。

以歐洲為例，該地區的報廢車輛回收及其殘值處理行業已經非常完善，並受到嚴格且完善的經濟規範與環保法規監管。而即便航空器之處置回收產業仍處於起步階段，但不難預期歐洲對航空器之處置與回收產業同樣會給予與汽車產業相似的嚴格法規和高標準要求。

3.1. 空中巴士 PAMELA 計畫

PAMELA 計畫（Process for Advanced Management of End-of-Life Aircraft）是一項專門針對退役航空器處理之創新計畫，致力於為航空業帶來更加可持續、經濟且環保的

解決方案。每年約有 700 至 800 架航空器退役，傳統之處理方式效率低下，回收率僅約 50%，大部分廢棄物最終被填埋，對環境造成極大負面衝擊。本計劃旨在通過創新技術和標準化流程，實現飛機部件和材料的最大化回收，並推動航空業之循環經濟。

PAMELA 計劃於 2005 年首次啟動，試點設施位於法國。其核心目標是提升航空器全生命周期之環保處理能力，從設計階段即考量後續拆解與回收之便利性。該計劃採用了模組化拆解技術和數位化追蹤系統，不僅能快速識別和分離可回收材料，還可確保所有回收部件之來源與流向透明，避免非法廢棄物之問題。

PAMELA 在試點中拆解了一架舊型 A300 飛機，成功回收了 85% 之材料，包括鋁、鈦、鋼以及複合材料。其中，金屬部件經過處理後重新投入航空製造業，而航電設備與引擎等高價值零件則進行重新認證，約佔飛機總價值之 30%。這些零件之二次銷售創造了顯著的經濟效益。一架平均重量約 100 噸之航空器回收後，僅由鋁和鈦等高價值金屬即可產生約 20 至 30 萬歐元收入，而經認證之零件則可帶來超過 50 萬歐元之總收益。除了前述之經濟效益，本計劃還透過高效利用航空器殘值，為航空公司節省大量處理成本，更顯著減少資源浪費，推動了航空業循環經濟。

此計劃專注於環保處理技術，成功將廢物填埋率降低至 5% 以下。對於退役飛機中約 1 至 2 噸之燃油殘渣和液壓油，經由專業之去污染技術，確保有害物質被完全清除和妥善處理。而複合材料和塑膠部件，雖然有著較高之技術挑戰，仍透過開發多項創新

處理方法來提升回收效率。其中最核心之創新技術為模組化拆解技術以及數位化追蹤系統，此類技術不僅提升了回收效率，更確保了所有部件之來源與流向透明。據空中巴士統計，該計劃每年可減少約 50,000 公噸之碳排放，並顯著降低對天然資源的依賴。相較於傳統廢棄處理方式相比，此計畫降低了 70% 的廢物填埋率，更將航空產業之整體回收率提升至全新的水平。

此計劃之成功為航空器生命周期管理奠定了成功的基礎，也為航空業未來之退役處理樹立了標杆。其模式和數據對於有意商業化航空器回收產業之企業提供了寶貴的參考，尤為在資源再利用和供應鏈整合方面具有重要之啟發意義。對於台灣等地區探索航空器回收商業化之業者，本計劃提供了有效之藍圖，可在此基礎上進行本地化創新，推動產業可持續發展，不僅實現了退役航空器資源之高效回收，更創造了經濟與環境雙贏之局面，為全球航空業的未來發展指明了一個方向。

3.2. 航空器機隊回收協會

波音公司與多家航空及回收公司於 2006 年共同成立了航空器機隊回收協會（Aircraft Fleet Recycling Association, AFRA），該協會是一個專注於航空器回收與可持續管理之全球性非營利組織，致力於推動航空產業之環保標準化及最佳實踐。其初衷是為了應對航空業中退役航空器數量日益增長所帶來之環境挑戰。隨著航空器達到其使用壽命終點，協會提供此類航空器環保、安全且經濟有效之回收方案。

此協會之核心工作包含開發和推廣拆解與回收之行業標準，其「最佳實踐標準」

(Best Management Practices, BMP) 在飛機拆解和材料回收領域被視為權威指南。這些標準涵蓋如何安全拆卸飛機、回收高價值材料（如鋁合金和複合材料）、以及如何適當處理有害物質，例如燃油殘留和其他化學物品。此標準認證為企業提供了高水準之操作指引，並有助於提升行業透明度和信譽。

據統計，到 2035 年將有超過 40,000 架航空器達到其使用壽命終點。這些航空器中約 90% 之材料可以被回收和再利用，主要為鋁、複合材料、和一些高價值航空零件，例如發動機和航電設備。除了技術層面之研究與標準制定，該協會也致力於推廣航空業之循環經濟概念。透過與航空公司和回收商之合作，不僅可以減少退役航空器對環境之影響，更可提升材料再利用率和價值鏈效益。例如一架波音 747 飛機經由高效拆解流程和材料分選技術，可回收超過 60 噸之鋁合金，大幅降低初級金屬之開採需求，從而減少碳排放。

在經濟層面上，航空回收業之市場規模不斷擴大，據估計，至 2030 年，全球航空器回收市場之價值將達到 50 億美元。該協會透過促進行業標準化和技術創新，為這一市場提供了重要的推動力。

3.3. 其他計畫

上述國際計畫之成功案例，對全球航空器回收產業發展起到了積極推動作用。然而，受限於航空器本身高技術門檻、產業鏈之特殊性以及市場規模較小等因素，航空器拆解與回收產業目前仍處於起步階段。下方列出部分發展中之相關計畫：

- CIRPASS 計畫：該計畫由歐洲多家航

空業及回收業組織聯合發起，旨在推動航空器生命周期全流程追蹤，並整合回收環節的數位化管理。CIRPASS 還試驗了 AI 技術在航空器拆解中的應用，以提高精準度和效率。

- Boeing's ecoDemonstrator Program：此計畫雖主要聚焦於航材環保製造，但同時關注退役材料的再利用技術研究。例如，ecoDemonstrator 已測試了使用回收碳纖維製造新部件的技術，並計畫在未來 5 年內進一步商業化。
- Sustainable Aviation Project (SAP)：該計畫由多家跨國企業及學術機構聯合推動，專注於研發航空器複合材料的高效回收技術，並強調降低拆解過程中的碳排放。SAP 還積極推動與全球供應鏈的合作，以確保回收材料能再次投入製造流程中。
- European Aviation Circular Economy (EACE)：此計畫由歐盟資助，目標是全面提升航空器的回收效率，並推動關鍵零部件的再製。EACE 還開展了多項試點項目，探索綠色能源在回收設施中的應用。
- NASA's Advanced Composite Consortium (ACC)：美國航太總署 (NASA) 領導的聯盟專注於航空器複合材料的循環利用與創新拆解技術。ACC 研發了多項專利技術，降低了回收過程中對環境的影響，並提升了碳纖維回收的質量。

3.4. 學術方面之研究

目前，學術界對退役航空器回收及永續再利用的研究仍相對有限，導致該領域的發展速度緩慢。然而，隨著全球環保意識的提升，愈來愈多航空公司及國家開始重視並投入資源於退役航空器回收系統（End-of-Life System, EoLS）之建設。一些主要學術研究機構及專案包括：

- 英國 Cranfield University：該校專注於航空與環境之交互研究，其永續航空技術中心（Centre for Sustainable Aviation Technologies）對航空器材料回收技術之研發提供了重要貢獻。
- 美國麻省理工學院（MIT）：其航空與航天部門（Department of Aeronautics and Astronautics）進行了多項關於航空器生命周期與材料循環利用之研究。
- 德國航空航天中心（DLR）：該機構積極研究複合材料之回收技術，並與多家航空公司合作開展退役航空器處置之實驗項目。
- 歐洲航空環保研究聯盟（Clean Sky Joint Undertaking）：該組織聯合了歐盟內多個學術機構及企業，致力於航空器設計、使用與回收的全流程環保優化。

未來，隨著航空器退役數量逐年增加，其衍生的環境挑戰將成為全球性問題。在此背景下，如何有效發展航空器的回收處置技術及建立完善的回收產業鏈，將成為各國亟需面對的課題。儘管台灣航空器回收尚處於

發展初期，但此類經驗與研究皆可為本地產業提供參考，協助建立高效且環保之航空回收產業鏈，並支持企業參與全球航空永續發展之合作網絡。

4. 台灣發展航空器回收產業之潛力

4.1. 曾經的拆船王國：台灣的金屬回收產業

台灣面臨缺乏自然礦產資源的挑戰，而冶煉金屬之過程則因能源成本過高及環保問題而備受挑戰，因此為了滿足長期依賴進口之金屬需求，金屬回收產業在早期台灣成為一項十分繁榮之產業。該產業自民國 40 年代逐漸興起，民國 60 至 80 年之間，台灣在國際造船業界榮獲「拆船王國」之名號（圖 6 為高雄港拆船行業蓬勃發展之盛況）。當時，舊船之拆解和回收為金屬回收業提供了巨大的支持，持續且穩定地供應了十大建設期間建築業所需之鋼材。然而，拆船業在當時被認為是一個高污染產業，受高雄市民強烈地反對，導致政府轉而專注於高科技產業，拆船業也因此漸漸沒落。



圖 6 高雄拆船業是成就十大建設的要角之一

（來源：<https://storystudio.tw/article/gushi/kaohsiung-shipbreaking-industry/>）

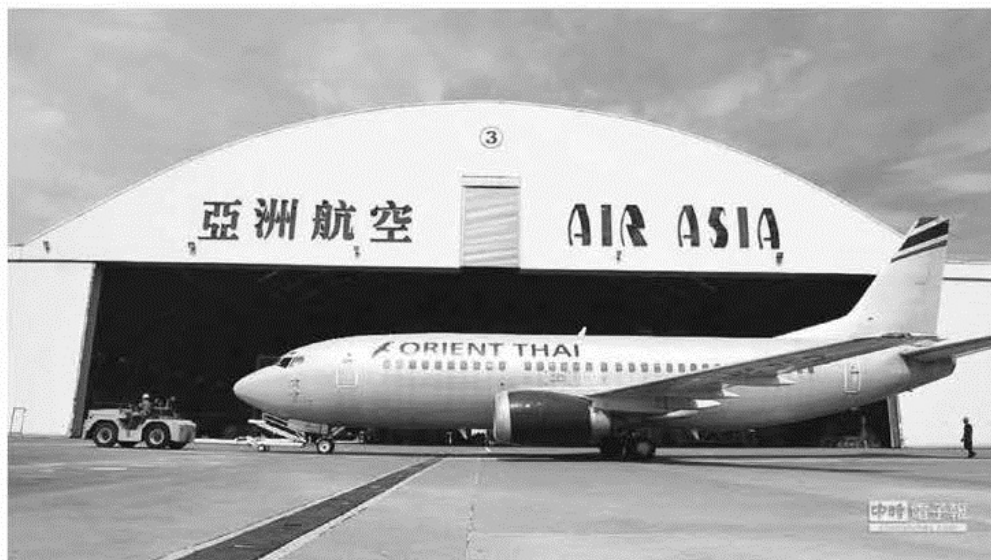


圖 7 亞洲航空於台南機場旁之維修機坪從事多項檢修相關服務

(來源：<https://www.chinatimes.com/newspapers/20170817000325-260511?chdtv>)

根據 PAMELA 計畫之展示，現今之 D&R 過程可以達到高度系統化及環保效益，不同於過去使用傳統拆解方法和鋼材管理所造成之巨大污染。台灣具備進行金屬回收業務的條件、環境、技術及經驗，是十分有機會發展出完善的航空器循環經濟學，以環保方式回收退役航空器，不僅能具備與當時「拆船王國」相同之益處，更能改善為人詬病的污染問題。

4.2. 強大的飛機維護能力

台南當地著名的亞洲航空公司（如圖 7），專門從事航空器維護，其業務範圍不僅涵蓋 A/B/C/D 級檢查、適航指令、服務通報、CPCP/SSID、結構損傷修理、機身修改及翻新，更甚該公司還能夠進行多機型的維護工作，包括空中巴士 A320、ATR、波音 737、Dash-8 和 MD80 系列，甚至軍用 C130 和 P3C 航空器也包含在內。由此可見，除了航空公司之外，業界也有公司有能力進行上述提及之零組件管理，且高雄機場及台南機場之停機過夜費用便宜、機場使用率不高、跑道長度足夠，十分適合國際間退役之航空

器來此處進行處置及回收，既環保又較報廢更具經濟性。倘若能將航空器維護能力與金屬回收業務進行高效地結合，台灣具備良好之發展 D&R 產業條件，並成為全球領先的環保先鋒，推動中華民國民航飛行員協會所提出之「航空器循環經濟學」理念。

4.3. 符合政府政策方向，由政府支持的潛力

自民國 113 年起，中研院設立了「關鍵議題研究中心」，目前鎖定量子科技和淨零科技兩大領域，根據行政院發布的信息，淨零科技之精髓源自「氣候變遷因應法」，包含五大領域：永續及前瞻能源、低碳、負碳、循環和人文社會科學，旨在減少碳排放及提高資源再利用率，此目標恰好符合航空器回收產業之精神，回收航空器之金屬以減少冶煉需求、降低金屬提煉產業及高碳產業之污染，並提高資源利用率，如有公司遵循航空器循環經濟學之精神、致力於發展此一產業鏈，該企業將更容易獲得各國政府之支持，相較於仍處在發展中且尚未注重環保政策之東南亞國家，將是台灣企業的一大優勢。

5. 退役航空器回收處置產業鏈

5.1. 航空器退役規劃與評估

航空器在使用 15 至 25 年後，會開始考慮退役或轉售，而其中牽涉的因素非常廣泛，但可以簡化為以下兩者為主：

1. 市場需求：市場上對二手零件和發動機之需求
2. 燃油效率較低之老舊機型在高油價時更可能被提前退役。

而航空公司處理退役航空器主要有四種方式：

1. 延長服役或租賃：轉售或轉租給其他航空公司
2. 拆解與回收：將航空器拆解為零件與材料以獲取其殘餘價值
3. 改裝或教育訓練用途：改裝為貨機或進行升級，或用於員工訓練使用
4. 永久停放：作備用機或送往飛機存放場

而這項決定取決於航空公司之相對應能力。如航空公司是否有現金流經濟壓力，能否承受 D&R 過程消耗現金且延遲殘值回收的時間，以及航空公司是否有能力自行拆解飛機等因素，皆會影響航空公司如何處理退役航空器。當面對拆解與回收時，一般有以下三種選擇：

1. 航空公司自行完成 D&R 流程
航空公司自行完成所有 D&R 流程，並獲取飛機的殘餘價值。此方式適合擁有

龐大機隊及強大維護能力的航空公司，如印度 Indigo 航空、阿聯酋航空、亞洲航空及中國境內主要航空公司，此類公司能夠標準化 D&R 方法，降低成本並提高效率。

2. 航空公司將 D&R 流程外包
給 EoLS 公司航空公司將所有 D&R 過程外包給專業 EoLS 公司，支付處置費用給 EoLS 公司，而後續 D&R 所產生的價值仍歸航空公司所有。
3. 航空公司將飛機出售給 EoLS 公司
航空公司將飛機出售給 EoLS 公司，該公司進行 D&R 並獲取所有 D&R 產品價值。這種方式較為適合台灣的航空公司，因機隊規模不夠龐大且飛機型號多樣化，退役飛機數量有限難以發展出標準化流程，因此將 D&R 過程外包給 EoLS 公司會更為合適。

5.2. 拆解及拆卸

為確保符合環境規範，環保處理為首要步驟，包括對燃料殘餘、潤滑油及化學物質的安全處理。此部分通常可由航空器維修廠商或專業拆解廠商提供專業支持，以減少對生態的影響，如國際上之 Aircraft Demolition 及 Air Salvage International 專門提供高效之拆解與拆卸服務，能夠同時保障環保和效率。

而後則是 D&R 過程中最為關鍵之步驟，涉及航空器系統、結構及有害物質之拆解與處理。高價值零件如發動機、航電設備及起落架需要專業設備與技術支持，一般由航空器維修廠商或專業零件供應商提供專業服務。結構拆卸則需依賴高效切割技術和物流

支持，由航空器維修廠商或材料回收公司協作完成。

拆解階段的另一項挑戰是面對多樣化飛機型號之適應能力。拆解機構需要建立靈活之標準化流程，以應對不同結構設計需求，這大大增加了專業設備和技能的要求。此外，拆解後之零部件物流管理也十分重要，物流公司需確保零件安全快速地運輸至相關市場。

5.3. 零組件回收與管理

航空器中約 90% 之零件可回收再利用，尤其如發動機、航電設備及機艙內部設施等高價值部件。發動機經檢測及翻修後，需要經過測試與認證服務，一般由航空器維修廠商及認證機構提供服務，才能以二手零組件之形式重新進入市場。航電設備及其餘航空器特有設備除作為相關機型之備用材料外，則主要透過航空器設備供應商販售給小型航空公司或區域航空公司。機艙內部設施如座椅及廚房設備，則可通過創意改造與設計應用於其他領域，如室內設計。

上述回收流程皆需符合國際標準（如 ATA Spec 300）並經過適當認證，GA Telesis 等企業在全球範圍內提供專業之零部件回收供應鏈服務。而零組件回收之商業模式達一定規模後更可設立集中倉儲與分銷系統，以提高回收效率並降低市場價格波動風險。此外，建立專業零件市場平臺有助於加快交易速度，增強市場透明度。

5.4. 材料回收與管理

航空器結構中之材料（如鋁合金、鈦合金、碳纖維等）具有高度回收價值。鋁和鈦常被用於新世代結構或汽車製造業，此類回

收需要高純度回收技術，相關金屬回收公司於此可發揮關鍵作用。碳纖維回收雖技術挑戰較高，但具有廣泛應用潛力，如製造自行車或運動器材，此部分則可交由新穎材料開發公司負責。如 ELG Carbon Fibre 與波音合作回收廢舊碳纖維，用於製造汽車零件及其他商品，展現了材料回收的創新應用。其他合金材料則可廣泛應用於工業製造領域，此部分需依賴高效分離技術，可由工業材料公司提供支持。

材料回收之成本控制是關鍵之一，回收公司需優化分類流程，並開發高效之機械設備以降低能耗。此外，材料市場之波動性也會對回收策略有一定之衝擊，此類問題需要通過長期之合作供應商來穩定整體需求。

5.5. 其他應用

航空器具有多樣化之創新應用可能性，如改造為餐廳、咖啡館或博物館展品，這部分需要空間設計與創新能力，可與建築設計公司合作來達成。藝術創作也是一可發展領域，如將機翼或部分機身材料改造為藝術裝置，藝術品創作公司則在此領域具有相對的潛力。如 Air Hollywood 利用退役飛機打造電影場景，並為航空迷提供模擬飛行體驗，結合了商業與文化價值。其他應用還包括設立專門的航空主題公園或活動空間，吸引旅遊和商業活動的結合。這類創新應用需要政府和私人投資的協同合作，以最大化經濟效益和社會影響。

此外，退役航空器零部件也可用於教育用途，如員工訓練或學校航太科系教育，此部分可向相關需求公司或學校販售。

5.6. 廢棄物處理

D&R 過程中的廢棄物需妥善處理，以符合環保規範。其中主要分為可燃廢棄物和不可燃廢棄物之處理方式。對於可燃廢棄物，通常採用熱能回收（燃燒）技術，通過高效燃燒設備將廢棄物轉化為熱能，如蒸汽或電力。此過程需要專業的燃燒設備供應商和熱能管理公司參與。

不可燃廢棄物則多採用掩埋方式進行處理，需選擇專用之掩埋場地，確保對周邊環境影響降到最低。掩埋處理需符合當地環保規範，並定期監測其環境狀況，應交由廢棄物管理公司執行。

國際航空組織（如 ICAO）已推動廢棄物處理的標準化，為航空產業的可持續發展提供了指導。廢棄物處理還需要追蹤與報告系統，以確保所有步驟符合環境政策，並提高整體透明度。

5.7. 法規與政策支持

政府與國際組織對航空器回收處置產業之政策支持為成功的關鍵。相關法規的制定可確保整個 D&R 流程符合環境與航空規範，這部分可參考國外已逐漸發展成熟之相關標準制定，如 EASA Part 145 或由 AFRA 所提出之 BMP。而政策激勵包括提供稅收優惠、碳權交易、經濟補貼及技術支持，則可鼓勵企業參與航空器回收。如歐盟之 Flightpath 2050 政策致力於提高航空器材料之回收率，為全球樹立了標桿。

此外，政府可協助促進國際合作，創建跨國資源共享平台，幫助鄰近國家或地區更高效地回收航空資源，這對全球環境及初

創之航空器回收處理產業的穩定具有重要意義。

5.8. 產業商機與建議

整合供應鏈是提升效率之重要方向，從拆解到材料回收之全流程服務需要供應鏈協作平台與技術整合，須有具備相關專業知識之廠商提供支持。而持續不斷地與政府溝通以促進相關法規及政策的制定也是促進此產業快速發展的另一重要策略。本地化需求方面，結合台灣市場特色，與漢翔航空等本地企業合作可打造區域回收中心，這部分則需要在地化技術之支持與產業網絡之建立，若能由如漢翔航空等具備一定維修技術之企業偕同本地航空公司一同推動，將可大大提升本產業之發展可行性。

航空器回收處置產業是一個環保與經濟並行的行業，其發展潛力巨大。台灣可以充分利用其地理位置及技術優勢，在亞洲市場中佔據重要地位。此外，未來技術創新和國際合作將成為推動該行業進一步發展的關鍵，這需要產業各方的共同努力。

6. 結論

本文透過航空器循環經濟學之研究，提出 D&R 處置策略，並借鏡國外成功之案例，期望台灣以其成熟的金屬回收技術和卓越的飛機維護能力，發展其航空器循環經濟，實現台灣在此領域之巨大潛力。透過引入系統化的退役航空器處置與回收流程，台灣有望成為亞洲地區航空器回收市場的領導者。不僅能有效提升資源再利用率，實現經濟與環境的雙贏，更能支持全球 2050 淨零排放目標。為此，需進一步整合本地供應鏈並結合國際合作，共同推動技術創新與政策支持，

使航空器循環經濟成為未來永續發展的重要驅動力。✈

7. 參考文獻

- Zhao, X., Verhagen, W. J. C., & Curran, R. (2020). Disposal and Recycle Economic Assessment for Aircraft and Engine End of Life Solution Evaluation. *Appl. Sci.* 2020, 10(2), 522; <https://doi.org/10.3390/app10020522>
- Ribeiro, J. S., & Gomes, J. de O. (2015). Proposed framework for End-Of-Life aircraft recycling. In *Proceedings of the 12th Global Conference on Sustainable Manufacturing*. Instituto Tecnológico de Aeronautica, São José dos Campos, SP, Brazil.
- Airbus. (2022, November). End of life: Reusing, recycling, rethinking. <https://aircraft.airbus.com/en/newsroom/news/2022-11-end-of-life-reusing-recycling-rethinking>
- Aircraft Fleet Recycling Association (AFRA). (2021). Best Practices for Aircraft Recycling and Dismantling. <https://afraassociation.org>
- ELG Carbon Fibre Ltd. (2020). Carbon Fibre Recycling Technology: Industrial Applications and Environmental Benefits. ELG Technical Report.
- Boeing. (2018). Sustainability in Aerospace: Innovations in Material Recycling. Boeing Corporate Report.
- 行政院，淨零科技方案（第一期 2023-2026），網址：行政院全球資訊網。
- 黃文星，付建勛，林偉凱，2011. 台灣金屬資源再生技術的現況與展望．台灣金屬資源再生技術的現況與展望．科學發展，457 期，pp. 92-96.
- Hamidreza Zahedia, Christian Masclea, Pierre Baptiste, 2016. Advanced Airframe Disassembly Alternatives; an attempt to increase the afterlife value. *Procedia CIRP*, 40, 168-173.
- Ellen MacArthur Foundation. (2020). Circular Economy in Aviation: Key Strategies for Sustainability. Ellen MacArthur Reports.
- Scheelhaase, J., Müller, L., Ennen, D., Grimme, W., 2022. Economic and Environmental Aspects of Aircraft Recycling. *Transportation Research Procedia*, 65, 3-12.
- Toward a strategic approach to end-of-life aircraft recycling projects <https://doi.org/10.5539/jms.v3n3p76>