

讓癌細胞自滅的黑科技！ 「癌細胞斷電」技術

陳英齊助理教授 / 葉晨聖講座教授
臺北醫學大學生醫材料暨組織工程研究所 / 成功大學化學系



成功大學葉晨聖講座教授帶領的跨領域團隊，結合化學、材料與生物醫學專長，共同完成了這項創新研究。
(由左至右：陳英齊助理教授、邱文泰教授、吳誠文主委、葉晨聖講座教授、蘇文彬醫師、許火順博士。)

前言：尋找癌症治療的「第四條路」

在人類與癌症對抗的歷史中，我們從手術切除、化療毒殺，再到放療燒灼，近年更發展出免疫療法與標靶藥物，努力提高治療效果並降低副作用。然而，癌細胞狡猾多變，特別是位於腫瘤深處的缺氧細胞，對化療與放療都不敏感，更容易造成復發與轉移。

如果我們不再專注於「攻擊」癌細胞，而是從能量來源下手呢？近期，由成功大學、臺北醫學大學、高雄醫學大學、國輻中心合作的研究團隊提出一種全新策略：不靠藥物、不靠光、不靠加熱，而是直接「抽走癌細胞的電子」，讓它失去維持生命的能量，慢慢走向死亡。

我們將具有電子傳導能力的細菌之細胞膜包覆在黃金奈米粒子外，研發出具「電子吸塵器」功能的奈米平台—Au@MIL。它不會盲目攻擊細胞，而是精準破壞癌細胞的氧化還原平衡，開啟一條前所未有的抗癌新道路。

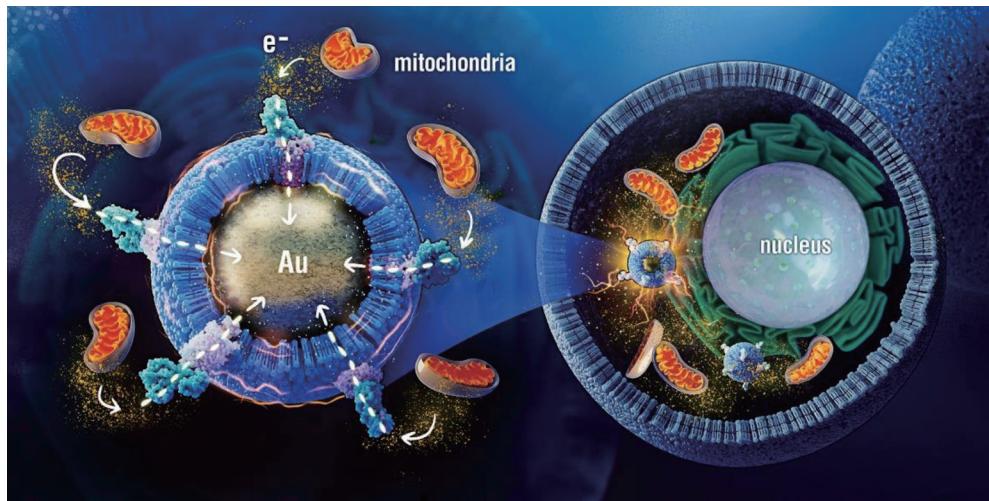
第一章：癌細胞的阿基里斯之踵—貪婪的電子流動

在細胞世界裡，電子就像維持生命的能量貨幣，負責細胞的運作、修復與生存。癌細胞為了快速成長，就像開足馬力的工廠，需要大量電子維持旺盛運作，因此電子流動特別頻繁，也是它最大的弱點。

傳統化療與放療，是利用活性氧攻擊癌細胞，像在工廠裡放一把火，試圖燒毀機器。但活性氧的產生需要氧氣，偏偏腫瘤深處常常缺氧，等於在真空中點火，效果自然有限。

因此，研究團隊換個思路：既然癌細胞那麼依賴電子，如果我們不是放火攻擊，而是「拔掉它的電源插頭」行不行？於是，我們設計了能吸走癌細胞電子的奈米平台—就像一個「電子吸塵器」，把電子源源不絕地吸走。

一旦失去電子，癌細胞的能量系統就會中斷，無法修復、無法運作，逐漸崩解死亡。而正常細胞因代謝較低，對



圖一 Au@MIL 奈米粒子結構示意圖。放大圖(左)顯示核心為黃金奈米粒子(Au)，外層包覆來自產電細菌的細胞膜(MIL)。細胞場景圖(右)則示意該粒子進入癌細胞後，利用膜上的細胞色素蛋白將癌細胞線粒體(mitochondria)中的電子引導至黃金核心，造成癌細胞「失電」而亡 [1]。

電子依賴不高，影響反而很小。這就是全新概念的「電子飢餓療法」(圖一)。

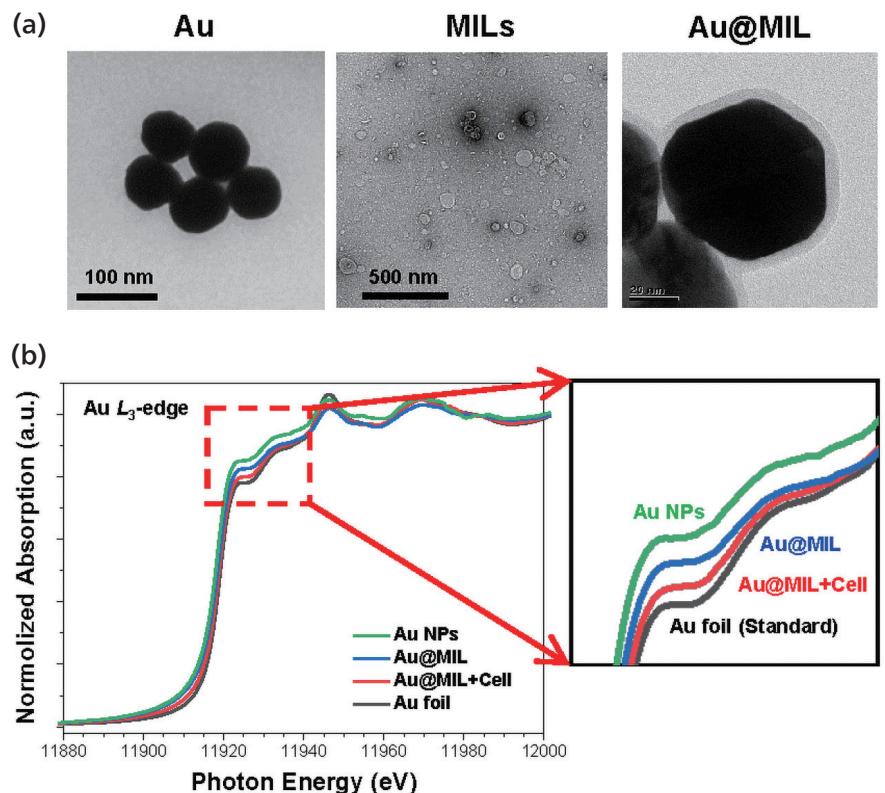
第二章：向大自然借靈感— 穿著「細菌雨衣」的黃金戰士

為了製造這個微觀世界的「電子吸塵器」，研究團隊進行了一場跨界合作，找來兩位強大的盟友：一位是材料界的貴族「黃金奈米粒子(Au NPs)」，另一位是微生物界的發電高手「希瓦氏菌(*Shewanella oneidensis* MR-1)」。

- 1. 黃金奈米粒子：**在奈米尺度下，黃金不只是貴金屬，更是穩定、安全、擅長接收電子的材料，就像電子的保險箱，是理想的電子儲存載體(圖二)。
- 2. 發電細菌的細胞膜(MIL)：**黃金不會自己去找電子，因此研究團隊借用了會「傳電子」的細菌膜。這種細菌原本就生活在缺氧環境，細胞膜上有許多像導電電線的蛋白質，能把電子傳給外界的金屬(圖二(a))。利用同步輻射X光吸收光譜非破壞性的穿透檢測，我們證實包覆細胞膜的黃金奈米粒子，確實擁有極佳的電子接收能力(圖二(b))。
- 3. 把兩者結合，怎麼做到的？**研究團隊用一種特殊技術，把細菌膜

取出來，像外套一樣披在黃金奈米粒子外。這層「生物外衣」既能幫粒子接近癌細胞，又能把電子從細胞內傳送到黃金核心(圖二)。

就這樣，能主動吸走癌細胞電子的奈米平台—Au@MIL誕生了。它不是藥，而是會「讓癌細胞失去能量」的智慧奈米球。



圖二 (a) 電子顯微鏡下的 Au@MIL 奈米粒子。右側小圖中深黑色的球體為黃金(Au)核心，周圍模糊的一圈即為成功包覆的細菌細胞膜(MIL)，這層膜是傳遞電子的關鍵。(b) 同步輻射X光吸收光譜顯示，Au@MIL 能有效接收並儲存電子。圖中綠色曲線代表原本的黃金奈米粒子，紅色曲線則是與細胞反應後的狀態；可以看到紅色曲線的整體強度明顯下降，這證實黃金奈米粒子成功吸收來自癌細胞的電子，導致其電子空缺被填補 [1]。

第三章：電子飢餓療法— 不流血的溫柔殺戮

當 Au@MIL 進入癌細胞後，一場無聲卻致命的能量戰悄悄展開。不需要光、不需要加熱，也不靠藥物，它只是默默地吸走癌細胞維持生命最重要的資源—電子。Au@MIL 外層的細菌膜就像導電電線，會抓住癌細胞中的電子並傳送到黃金核心，讓電子源源不絕地流失。電子一旦離開細胞，就像工廠被拔掉電源，整個系統開始崩潰。癌細胞失去電子後，首先喪失維持生命穩定的氧化還原平衡，接著細胞膜和粒線體等結構像「生鏽」般逐漸受損，變得脆弱易碎；最終，粒線體這座能量工廠停擺，細胞無法再製造 ATP，逐漸走向死亡。更特別的是，這種方式不需要產生活性氧，也不靠氧氣參與，因此即使在最難治、傳統療法常常失效的缺氧腫瘤深處，Au@MIL 依然能發揮作用。這種「不攻擊細胞，而是切斷它的能源」的策略，正是電子飢餓療法的核心。

第四章：尺寸的奧秘與缺氧環境的剋星

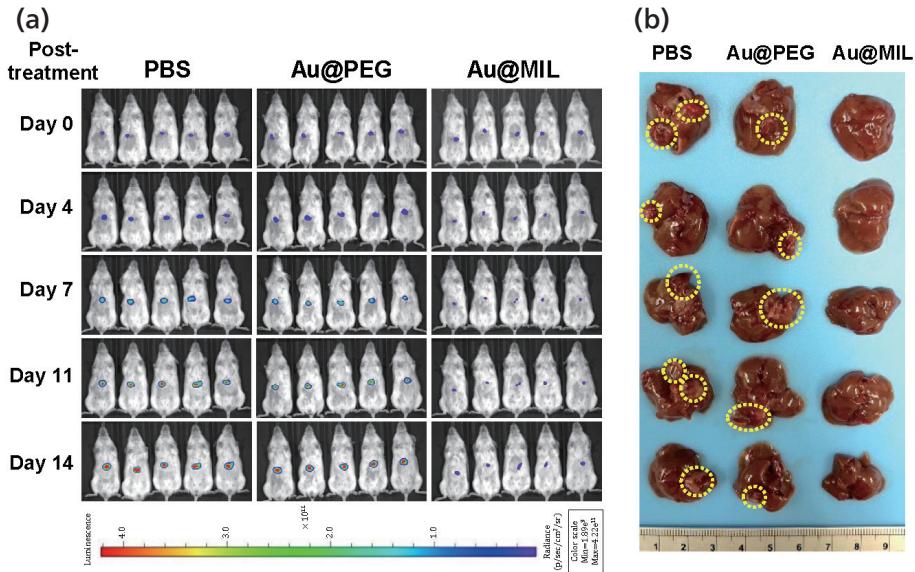
在技術優化過程中，研究團隊發現一個有趣的「尺寸效應」：15 奈米、70 奈米與 100 奈米的 Au@MIL 中，反而是最大的 100 奈米效果最好。原因不在於大小，而是它能承載更多細菌膜蛋白，也就是傳輸電子的「導線」。實驗顯示，100 奈米顆粒上的細胞色素數量是 70 奈米的 3.4 倍，就像把羊腸小路換成高速公路，電子傳輸速度大幅提升，因此吸電子效率最高。

更驚喜的是，Au@MIL 在極低氧氣的環境下仍能發揮強大殺傷力。缺氧腫瘤往往讓傳統療法束手無策，但 Au@MIL 不需依賴氧氣來產生活性氧，而是直接抽走電子，即使在 1% 氧氣的模擬缺氧環境中也能有效殺死癌細胞。

為證明真的是「電子轉移」造成致死效果，研究團隊在金核心外加上一層二氧化矽絕緣層，阻斷電子流動。結果癌細胞幾乎不受影響，就像拔掉插頭的吸塵器，完全失效。這清楚證明，奪走癌細胞的電子，而不是細菌膜本身的成分，才是真正致命的關鍵。

第五章：安全性與未來展望

新療法再有效，安全性始終是第一考量。Au@MIL 會吸走電子，那會不會連正常細胞也一起傷害？研究團隊將它



圖三 小鼠腫瘤治療實驗。圖(a)顯示經過 Au@MIL 治療後，小鼠體內的腫瘤發光訊號(代表癌細胞活性)顯著降低。圖(b)則是治療 14 天後取出的肝臟腫瘤照片，可以看到最右側 Au@MIL 組別的腫瘤體積最小(幾乎無法看到)，證明顯著的治療效果[1]。

分別測試在十多種癌細胞與正常細胞上，結果發現：癌細胞大量死亡，但正常細胞幾乎不受影響。原因在於癌細胞電子流動旺盛，而正常細胞代謝較低，電子穩定，不容易成為攻擊目標。換句話說，Au@MIL 並非盲目殺傷，而是專挑「電子流動特別活躍」的癌細胞。

在動物實驗中(圖三)，研究團隊將 Au@MIL 注射至肝癌小鼠體內，腫瘤縮小明顯，生存期延長，小鼠體重、肝腎數值都維持正常，也沒有器官損傷或溶血問題，顯示其安全性與臨床轉化潛力。

結語：開啟癌症治療的物理時代

這項發表於 2025 年的研究，不僅僅是發明了一種新藥，更是展示一項全新的治療概念。它不依賴傳統生化毒性，而是利用「電子轉移」的物理機制來治療癌症。Au@MIL 就像是一個微型的「特洛伊木馬」，它披著細菌的外衣潛入腫瘤，利用癌細胞自身的代謝特性，優雅地抽走維持其生命的電子能量。這不僅解決了傳統療法面臨的抗藥性與缺氧難題，更展現奈米醫學在精準治療上的無限可能。

未來，研究團隊將繼續優化這項技術，探索其在多種難治性癌症中的應用。或許在不久的將來，我們能見證這項實驗室裡的「黃金」成果，轉化為造福病患的臨床解方，讓「餓死」癌細胞不再只是夢想，而是一種溫柔且強大的現實。

參考文獻：

- Y.-C. Chen et al., Nat. Commun. **16**, 3253 (2025).