



星球永續健康線上直播

AI 藥物研發產業 (7)

人工智慧個人化癌症疫苗

2026 年 3 月 11 日

地緣政治、科技革新與氣候變遷三股力量同時推動全球秩序的轉變，使人類社會必須持續適應新的歷史情境與發展挑戰。當前人工智慧亦快速改變醫學研究與疾病治療模式。過去疫苗主要應用於傳染病的預防與控制，而近年隨著基因體學、免疫學與人工智慧技術的進展，疫苗免疫療法逐漸延伸至癌症治療領域為精準醫療開啟新方向。本週我們將聚焦 AI 輔助個人化癌症疫苗 的最新進展，並介紹精準智慧黑色素癌疫苗臨床試驗研究成果與臨床應用潛力。

健康科學新知

美國-伊朗武裝衝突定位爭議：「戰雲密布」

2026 年 2 月 28 日，美國總統川普與以色列對伊朗發動大規模軍事攻擊，迅速升高中東緊張局勢。此次行動鎖定伊朗飛彈、防空與核設施，在攻擊行動開始即造成多名伊朗高層軍政人物死亡，被國際觀察視為具有「斬首作戰」特徵。美國政府對於發動伊朗軍事行動正當性川普對外提出的理由包括摧毀伊朗彈道飛彈能力、阻止其發展核武、削弱海軍力量，以及切斷對代理武裝組織的支持，但美國政府對於戰後伊朗政治安排與軍事任務完成明確條件。外界普遍認為美國發動攻擊時間點與伊朗當前相對脆弱的戰略處境有關。經過以色列近年持續打擊伊朗在區域內的代理勢力，加上 2025 年對伊朗核與防空設施的攻擊，以及 2026 年初伊朗國內抗議升高，川普可能判斷這是一個可以重創伊朗的關鍵時機。伊朗自 1979 年人質危機以來一直是美國難解的對手，川普顯然希望成為能夠「解決伊朗問題」的總統。在美國與以色列持續空襲伊朗之際，外界開始關注是否會有地面部隊介入，而最可能的力量並非美軍，而是流亡伊拉克北部的伊朗庫德反對派武裝。庫德族團體表示，跨境行動構想其實已準備多年，但若沒有美國先建立禁飛區、削弱伊朗政權的空中與重型武器能力，庫德武裝不可能貿然行動，否則代價將極高。



目前已有六個伊朗庫德反對派團體開始進行政治與軍事協調，希望在伊朗局勢出現重大變化時共同介入，爭取未來政治重組中的位置。面對伊朗與中東複雜關係，國際間擔憂初步軍事成功不等於政治成功。伊朗仍保有對波斯灣周邊國家、美軍基地及美國外交設施進行報復的能力，戰事數日內已造成美軍傷亡，並擴大至科威特、沙烏地阿拉伯、阿拉伯聯合大公國、卡達與黎巴嫩等地。真主黨也加入戰局，以色列隨後對黎巴嫩展開報復性空襲，使衝突逐步從美伊以三方對抗擴大為區域性危機。同時，能源設施與國際航運與能源重要隘口荷姆茲海峽航運安全受威脅，推高全球油氣與運輸風險，顯示這場戰爭的外溢影響已超出軍事層面。

若伊朗在高層遭斬首後仍由強硬派接掌，可能更加堅信唯有取得核武才能確保政權安全；若政權瓦解，則可能引發內戰與敏感軍事物資失控。川普政府一方面強調這不是伊拉克式的長期戰爭，另一方面又表示戰事可持續四到五週甚至更久，顯示其政策敘事存在明顯張力。國會內部對動武合法性也出現爭議，因為川普對伊朗威脅的描述，從「迫在眉睫」逐漸轉為「幾乎形成」，削弱了其法律正當性。中東衝突也反映川普對外政策的更大轉向，強調以直接軍事力量、威懾與壓倒性打擊來迫使對手讓步。此策略短期內可能產生震懾效果，也可能讓其他國家重新估算挑戰美國的代價，但若缺乏戰後安排與區域穩定機制，則可能讓中東局勢更加動盪，並使全球政治環境承受更高風險。

中東地緣危機全球影響：「油震天下」

美國與以色列對伊朗發動大規模軍事行動後，中東局勢迅速由以伊雙邊衝突擴大為跨區域、多戰線的高強度危機，戰火同時蔓延至波斯灣、黎巴嫩、加薩與東地中海，並牽動美國、歐洲盟友及多個阿拉伯國家。伊朗對波斯灣國家的報復行動明顯超出外界預期，攻擊對象不僅包括美軍基地，也波及機場、港口、飯店及油氣基礎設施，使波斯灣國家不再只是後方支援區，而是直接成為主要戰場。美軍則投入一個世代以來在中東最大規模的軍力部署，持續對伊朗進行全天候打擊；以色列也同步擴大對德黑蘭與貝魯特的攻勢。戰事短期內難以結束，且伊朗高層遭重創後的決策真空，使未來談判與停火前景更加不明。衝突重塑波斯灣安全與政治趨勢，阿聯、杜拜皆受到軍事行動直接影響，



顯示中東國家過去透過降溫策略維持穩定的模式已面臨壓力。阿曼長期奉行平衡外交，也在本輪戰事中受到波及，反映中立空間正快速縮小。沙烏地阿拉伯則處於關鍵位置，一方面可能因伊朗實力削弱而獲得更大區域影響力，另一方面也必須面對一個受創但可能更不穩定的伊朗所帶來的持續風險。對波斯灣各國而言，駐紮美軍究竟代表安全保障，或反而使本國成為攻擊目標，已成為必須重新評估的核心問題。黎巴嫩與加薩則呈現戰爭外溢形式。黎巴嫩方面，以色列已在南部展開地面行動並持續轟炸貝魯特南郊，真主黨也恢復以火箭與無人機反擊，使黎巴嫩再度成為以伊代理對抗的重要前線，並造成大量平民流離失所。加薩方面，以色列在對伊朗開戰之際關閉邊境通道，使本已脆弱的人道情勢迅速惡化。當地約兩百萬人口面臨新的糧食危機，糧食儲備極低，基本物資價格大幅上漲，居民因長期戰爭失去住家與收入，能夠自行儲糧者十分有限。對許多加薩家庭而言，再次陷入饑荒的恐懼甚至超過空襲本身。

能源與航運衝擊則使這場區域戰爭快速轉化為全球經濟風險。伊朗不僅攻擊周邊產油國與天然氣設施，也透過威脅荷莫茲海峽航行安全，實質干擾全球能源運輸。油輪通行量大幅下降，多處港口、煉油廠與液化天然氣設施受損或停擺，帶動油價與天然氣價格快速上升。由於波斯灣是全球石油與液化天然氣的重要出口樞紐，衝突若持續，亞洲將率先承受供應壓力，歐洲則面臨天然氣價格與庫存雙重壓力，全球通膨、運輸成本與經濟成長也將受到連鎖影響。土耳其則是典型高風險國家，不僅高度依賴伊朗天然氣，也可能面對能源價格上升、通膨反彈、難民流入與庫德問題再度升高等多重壓力。這場戰爭的關鍵風險，已不只是以色列、伊朗與美國之間的軍事對抗，而是它正在同步改變中東安全秩序與全球經濟風險結構。波斯灣國家的平衡外交、美軍駐防安排、黎巴嫩的主權與武裝問題、加薩的人道困境、能源航運安全，以及全球市場對通膨與成長的預期，都已被納入同一條危機鏈。只要荷莫茲海峽風險未解除、區域能源設施持續受攻擊、伊朗內部權力真空未被填補，這場危機就可能成為中東秩序重組與全球經濟重新定價的重要轉折點。

美英同盟生隙 歐陸儲備核武：「同盟裂痕」



中東戰火升高與歐洲安全疑慮交織，美英法在對伊朗衝突與核威懾議題上出現新調整。英國起初不願參與美國與以色列對伊朗的第一波攻擊，也不同意讓美軍直接使用英國基地執行初始打擊，原因在於英國政府對行動的法律依據有所疑慮，並受到伊拉克戰爭歷史經驗影響。英國首相施凱爾強調英國不支持從空中(以武力)推動政權更替，任何軍事行動都必須具備清楚法律基礎與可達成的目標。隨著伊朗展開報復攻擊波及英國在賽普勒斯的阿克羅蒂里基地及損及英國區域利益，英國最終同意在「防禦性」前提下，允許美軍使用英國基地打擊伊朗飛彈儲存與發射設施。英國政府將這項決策界定為保護英國公民、軍事設施與盟友的集體自我防衛措施。即便如此英國與美國仍處關係緊張局勢。川普公開批評施凱爾，認為英國在初始行動中未能表態實質支持美國，顯示美英不如以往，此外英國政府在表達有限度支援美國行動後強調美英在情報、軍事合作與中東區域支援上仍維持密切協作，但川普政府對此則無正面回應。

法國總統馬克宏則趁著安全環境惡化之際，宣布擴大法國核武庫，並推動歐洲層級的核威懾合作。延續稍早於俄烏戰爭四週年發言立場，馬克宏在中東爆發大規模軍事行動後更強調面對俄羅斯威脅、中國軍力上升及美國防務焦點轉移，法國必須提升核威懾能力與可信度建立歐陸軍事強權實力，同時更明確地把法國核力量連結到歐洲安全。他提出與德國、波蘭、瑞典、丹麥、荷蘭、比利時等國深化合作，包括共同演習、戰略對話，並且未來在盟國境內發展核武能力或實質部署具核投射能力法國戰機。不過，法國仍強調這項計畫是北約核任務的補充，美國與北約仍是歐洲安全的主要支柱。目前已有許多歐洲國家對法國的歐陸核武提升倡議表示支持。德國與法國共同成立核威懾指導小組，波蘭與瑞典表態願意參與此歐陸核武提升策略深入談判，丹麥、比利時與荷蘭也支持展開更密切的戰略合作，但多數國家仍不願在本國部署核武。這顯示歐洲各國雖尚未準備脫離北約架構，卻已開始尋求由歐洲自身主導、可作為美國安全承諾補充的威懾工具。

國際核武管制挑戰：「核序動搖」

近年全球核武管制體系面臨壓力，核試驗議題再度受到關注。中國新疆羅布泊核試



驗場附近曾偵測到可疑微震訊號，引發外界對低當量核試驗的討論，但目前仍缺乏確切證據。同時，美國、俄羅斯與中國持續發展新型核武與投射系統，在軍控條約弱化下，專家警告全球可能出現新一輪核武競賽。學界指出，過去核試驗曾造成放射性污染與長期健康風險，現代模擬與實驗技術已可維持核武庫可靠性，呼籲各國強化軍備控制與透明機制，以避免核秩序進一步動搖。

AI 軍武轉化壓力：「AI 軍臨界」

美國國防部與人工智慧公司 Anthropic 衝突源於政府要求其人工智慧模型可在所有合法情境下被軍方使用，但 Anthropic 堅持維持兩項安全紅線，即不得用於對美國民眾的大規模監控，也不得用於完全自主武器系統。談判破裂後，美國國防部將 Anthropic 列為供應鏈風險，限制與國防合約相關單位使用其技術。Anthropic 認為該決定缺乏法律基礎，執行長達里奧·阿莫代伊表示將透過司法途徑提出挑戰，並擔憂此舉可能造成市場寒蟬效應，使企業與政府機構因政治壓力而避免與公司合作。

這項政策迅速在產業與市場層面引發連鎖反應。微軟表示在非國防專案中仍會持續使用 Anthropic 技術，而洛克希德馬丁則計畫在六個月內逐步移除其 AI 系統 Claude。法律與學界也質疑國防部是否具備足夠授權對企業採取如此強力措施。另一方面，Anthropic 的民間產品使用量反而上升，Claude 一度登上 App Store 免費榜首。與此同時，OpenAI 與國防部達成新的人工智慧合作協議，但隨後增加條款，明確禁止系統被用於監視美國公民，以回應外界對軍事 AI 應用的疑慮。這場爭議也引發科技業內部廣泛討論。Google、OpenAI 等公司的員工發起公開信與連署，要求企業對軍事人工智慧用途設下更明確界線，並呼籲公司在大规模監控與自主武器議題上維持安全原則。部分員工與學者認為，當人工智慧快速進入軍事與國家安全體系時，企業、政府與社會需要更清楚的制度與倫理框架。此次衝突因此被視為人工智慧治理的重要案例，突顯技術發展、國家安全與公民自由之間日益複雜的權力與責任關係。

太空資料中心可行性：「算力上天」

由於地面資料中心受電力、建設許可與社區反對限制，科技業開始評估在軌道部署



「太空資料中心」。此概念利用持續太陽能供電與較少土地限制，形成分散式運算衛星網路。其可行性主要取決於火箭發射成本、衛星運算密度與設備價格。若可重複使用火箭大幅降低發射成本，太空資料中心未來可能成為人工智慧基礎設施的新選項。

未來生物研究 Auto-Lab：「智實共研」

AI 與機器人結合的「自主實驗室 (Auto-Lab)」正改變生物研究模式。研究顯示，AI 科學家 (GPT-5) 可分析實驗結果並設計新條件，再由機器人自動執行實驗。該系統在 6 個月內測試超過 3 萬種條件，使無細胞蛋白質合成成本再降低約 40%。雖然機器人靈活度與設備成本仍是限制，但 AI+自動化實驗室被視為未來生命科學的重要研究基礎設施。

氣候變遷跨物種影響：「生態警鐘」

研究顯示，在未受砍伐或開發影響的熱帶雨林中，鳥類數量仍持續下降。長期監測發現，巴拿馬、厄瓜多與巴西等地的食蟲鳥類減少最為明顯。科學家認為主要原因包括氣候變遷造成乾季升溫、降雨改變與昆蟲數量下降。由於鳥類在授粉、種子傳播與昆蟲控制中扮演關鍵角色，其減少可能對整體雨林生態系統造成長期影響。

AI 輔助個人化癌症疫苗

紀錄片《Breakthrough》意指「突破」，象徵癌症治療上的革命性創新，並講述被譽為癌症免疫療法之父的 Jim Allison 的科學歷程與人生故事。Jim Allison 本人出生於美國南部德州，從 1980 年代開始投身免疫學研究，特別是將免疫系統應用在癌症治療上。為 Allison 由年母親因淋巴癌過世。他的家族中還有多位親人也因癌症離世，包括兩位舅舅分別死於黑色素瘤與肺癌，哥哥則死於攝護腺癌，他自己一生中也曾三度罹癌。正因為親眼目睹家人接受放射治療與化學治療時所承受的痛苦，這些經歷深深影響了他，也讓他決定投入免疫療法研究，希望能找到更有效、也更人性的癌症治療方式。在過去很長一段時間裡，癌症治療其實選擇非常有限。如果不是在早期發現並能透過手術完全切除，醫學界大多只能依賴化學治療或放射治療。化學治療屬於全身性治療，放射治療則是局部治療，雖然可以殺死癌細胞，但同時也會對正常細胞造成傷害，往往帶



來相當大的副作用與痛苦。正是在這樣的背景下，Allison 持續投入 T 細胞免疫機制的研究，最終發現調控免疫系統的重要機制，開啟了免疫檢查點治療（immune checkpoint therapy）的新時代。也因為這項突破性的發現，他在 2018 年與日本京都大學的本庶佑教授共同獲得諾貝爾生理學或醫學獎，為癌症治療帶來了歷史性的重大突破。Jim Allison 在大學時期的研究背景。當時正值戰後社會快速發展的年代，他在大學時期就投入抗癌藥物與細胞研究，之後在德州大學奧斯汀分校完成微生物學與生物科學博士學位。他早期的研究與從細菌或微生物中分離出的酵素 asparaginase 有關，該成分具有抑制腫瘤細胞生長的作用。這種從不同生物體中尋找抗癌機制，和今天癌症治療不斷尋找新策略的思路相當類似。在 1980 年代，人們對免疫系統的理解仍然有限。雖然知道 T 細胞、B 細胞與抗體在免疫反應中的作用，但免疫系統如何被啟動、如何被調控，當時仍然不是很清楚。Allison 希望找到免疫系統的「開關」，特別是 T 細胞受體的調控機制。後來他發現 CTLA-4 是抑制 T 細胞活化的重要分子，這項發現奠定了癌症免疫療法的重要理論基礎。

研究團隊最初嘗試使用相關藥物時，並未立即觀察到治癒效果，因此一度被認為可能無法成功。然而，Allison 進一步提出另一種可能的解釋：人體免疫系統中同時存在活化與抑制兩種調控機制。若 CTLA-4 的功能實際上是抑制 T 細胞活性，那麼只要能夠阻斷這個抑制機制，便可能重新啟動免疫細胞，使其攻擊癌細胞。在當時對免疫調控機制尚未充分理解的年代，要提出並持續投入研究驗證這一觀點，需要相當堅定的科學信念與研究堅持。後續研究證實 CTLA-4 確實是抑制 T 細胞活化的重要分子。因此研究團隊發展出能夠結合 CTLA-4 的單株抗體，藉由阻斷此一抑制訊號，使免疫系統重新啟動對腫瘤細胞的攻擊。從機制上而言，癌細胞常透過啟動免疫抑制訊號，使自身偽裝為「正常細胞」，從而逃避免疫系統的辨識與攻擊。而當單株抗體阻斷 CTLA-4 受體後，這種免疫抑制作用被解除，癌細胞便無法再有效躲避免疫監控，其「偽裝」被揭露後，T 細胞便能辨識並攻擊腫瘤。此一療法最早應用於黑色素瘤（melanoma）治療。

紀錄片中提到的一位重要案例，是第一批接受免疫療法臨床試驗的患者 Sharon。



她在年輕時被診斷為晚期黑色素瘤，並已出現肺部與腦部轉移。當時由於腦部腫瘤轉移，她必須接受放射治療，而為了使放射線能夠精準定位腫瘤位置，治療過程中需使用金屬固定框架進行頭部定位，對患者而言負擔極大。然而在接受一段時間的治療後，病情仍未出現明顯改善。此時，她的主治醫師將她納入創新的免疫療法臨床試驗。在當時，這是一項相當具有風險但也極具突破性的決定。紀錄片亦提到，在這項概念最初提出時，許多製藥公司對此仍抱持觀望態度，不願投入資金。然而當研究逐漸顯示其潛在療效後，製藥公司開始投入資源，推動藥物研發與臨床試驗。此外，免疫療法在臨床評估上也面臨新的挑戰。傳統癌症治療多以「腫瘤是否縮小」作為主要療效指標，但免疫療法的作用機制不同。治療初期，由於大量免疫細胞進入腫瘤組織，影像上反而可能出現腫瘤暫時增大的情況，之後才逐漸縮小。因此若僅以腫瘤體積變化作為評估標準，可能會誤判療效。因此研究團隊提出新的評估觀點，即以患者整體存活時間（overall survival）作為重要指標。這一觀點最終獲得美國 FDA 的接受。隨著 Allison 團隊在基礎研究與臨床試驗上的持續努力，相關藥物最終成功上市，為晚期黑色素瘤等癌症患者帶來新的治療選擇，也正式開啟了癌症免疫療法的新時代。

在 AI 發展之後，是否能夠將免疫療法進一步擴展，類似過去在傳染病領域中廣泛成功應用的疫苗技術？傳染病疫苗之所以具有高度效果，主要原因在於抗體能夠精準辨識病毒與病原體的特定結合位置，因此可以高度專一地作用於病原體，而不會影響其他正常細胞，因而在安全性與準確性上具有明顯優勢。然而，對於癌症而言，情況則複雜得多。這也是為什麼傳統化學治療往往面臨較大的副作用問題，以及許多現有免疫療法抗體仍然存在限制。其原因在於癌細胞的抗原具有高度變異性，使得抗體難以完全精準辨識特定標靶，因此可能同時影響其他正常細胞。在過去的研究中，利用傳統 AI 進行抗體設計面臨相當大的困難。抗體本身是一種蛋白質，其功能高度依賴蛋白質的立體結構，而蛋白質的三維結構是由胺基酸序列折疊形成。若缺乏像 AlphaFold 這樣能夠預測蛋白質結構的技術，要精準設計具有高度專一性的抗體幾乎是不可能的。因此，要發展能夠精確辨識腫瘤標靶的抗體，必須先能理解並預測這些蛋白質結構。



此外抗體結合區域 (binding region) 具有高度可變性，而腫瘤細胞在不同時間與不同腫瘤微環境下，其抗原結構也可能持續改變。如果無法即時辨識這些高度變異的結合區域，就很難設計出具有專一標靶能力的抗體。因此，次世代 AI 模型的出現，開始為抗體設計帶來新的可能性。這些方法強調透過 AI 進行加速 AI 創新設計 (de novo)，也就是從零開始設計新的蛋白質結構與抗體分子。這個概念可類比為組合魔術方塊，不同的小結構可以透過不同方式組合，形成多種可能的排列。癌症個人化疫苗的設計，也類似於在眾多可能組合中找到最適合特定病人的結構。然而這項任務相當困難，因為每位病人的腫瘤突變型態不同，因此對應的最佳結構組合也各不相同。即使當前 AlphaFold 已經能夠大幅提升蛋白質結構的預測能力，但在腫瘤抗原高度可變的情況下，相關結合區域仍然可能隨時間與腫瘤微環境而快速變化。這也使得個人化癌症疫苗的設計長期以來一直非常具有挑戰性。過去要建立這些可變區域的結構模型往往需要耗費大量時間與計算資源，但隨著 AI 技術的快速發展，這項原本極為困難的任務如今開始逐漸可行。目前 AlphaFold 的研究仍在持續進展，其核心目標是透過蛋白質胺基酸序列預測三維立體結構。以 AlphaFold2 為例，它可透過大量多序列比對 (multiple sequence alignment)，結合既有蛋白質結構資料庫推測蛋白質可能形成的三維結構。從生物資訊學的角度來看，胺基酸序列的比對相對容易進行，因為可以透過序列分析找到對應的蛋白質與其結構特徵。了解蛋白質的胺基酸排列後，便可以進一步回溯到其對應的 RNA 與 DNA，理解整個由基因到蛋白質生成的生物過程。然而在 AlphaFold2 的階段，仍然無法完全描述蛋白質與其他分子之間的複雜互動關係。近年來隨著物理學中的擴散模型 (diffusion model) 被引入分子結構預測領域，研究者開始能夠更進一步模擬分子之間的動態變化，逐步推測分子在不同狀態下的結構以及蛋白質與 DNA、RNA 或其他小分子之間可能產生的交互作用。這些技術上的突破，使得人類在癌症疫苗與個人化醫療領域看到了新的可能性。事實上。在 COVID-19 mRNA 疫苗出現之前，mRNA 技術早已被嘗試應用於多種癌症疫苗研究之中。而今日人工智慧在抗體設計與蛋白質結構預測上的進展，正為這些研究提供重要的技術基礎。在 AlphaFold 系統中，模型利用 pLDDT



(predicted Local Distance Difference Test) 指標評估結構預測可信度，分數越高，表示該區域結構預測的可靠程度越高。因此在某些區域，預測可信度可能接近 100 分，而在另一些高度變異的區域，分數可能仍然落在較低的範圍。這也說明了目前 AlphaFold 技術仍然面臨的挑戰，雖然已能大幅提升蛋白質結構預測能力，但在高度可變的分子區域，仍然需要進一步改進。因此，研究者開始結合不同研究團隊的成果，持續推進下一代模型的發展。AlphaFold 主要研究者之一 David Baker 也提出新的研究方向：如果直接預測大型蛋白質結構仍然困難，是否可以從更小的分子單位開始設計，逐步建構出所需的蛋白質結構。這樣的策略，也為未來人工智慧在抗體設計與個人化癌症疫苗研發方面提供創新研究途徑。

傳統抗體結構複雜，研究尋求將抗體結構縮小並重新設計發展奈米抗體(nanobody)。這種 de novo 設計，重新進行抗體生成。奈米抗體具有結構較小、緊湊連結組合特性，因此若能從奈米抗體重新設計與組合，人工智慧便可以在其中發揮重要作用。正如同 AI 透過大型語言模型結合自動化實驗系統，大量進行奈米抗體的組合與演化，經過多次篩選與優化後，進一步工程化發展為全型抗體 (full-length antibody)。這些全型抗體未來可能發展為多種用途的治療性抗體藥物，成為新一代疫苗與免疫治療重要基礎。隨著抗體設計能力的提升，傳染病疫苗或癌症疫苗皆可發展精準個人化療法。目前在這一領域中，許多重要研究團隊已投入相關研究，包括麻省理工學院 (MIT)、史丹佛大學、華盛頓大學，以及 Arc Institute 等研究機構。其中由諾貝爾獎得主 David Baker 所領導的團隊，在蛋白質設計與人工智慧抗體工程方面扮演了關鍵角色。他們已成功設計出多種新型抗體結構，為未來抗體藥物與疫苗開發提供了重要基礎。因此，從結構較簡單的奈米抗體作為起點，再透過人工智慧快速進行篩選與組合，逐步發展為功能完整的抗體，可能成為未來抗體設計的重要策略之一。從這個角度來看，精準抗體的標靶藥物轉化，也為個人化癌症疫苗的發展提供了新的可能性。

精準抗癌疫苗研發平台 PIONEER 流程從腫瘤基因定序 (tumor sequencing) 開始，先取得患者腫瘤的特異性基因資訊，接著透過 AI 進行分析，從中篩選可能具有治療潛



力的新抗原 (neoantigen)。在完成新抗原篩選後，系統便可進一步設計相應的免疫標靶，進而活化 T 細胞免疫反應，使免疫系統能夠辨識並攻擊腫瘤細胞，最後達到標靶清除腫瘤的效果。這也構成了整個精準抗癌疫苗研發的核心流程。值得注意的是，在 AI 慧輔助之下，整個研發流程的速度大幅提升。從基因資料的分析到候選治療標靶的產生，最快甚至可在 48 小時內完成。相較於傳統藥物研發需要耗費長時間的實驗與篩選，這樣的速度可說是非常顯著的突破。此外 AI 也能協助研究者辨識傳統方法難以發現的潛在治療靶點，因此在精準醫療與個人化癌症疫苗的發展上，提供了新的可能性。

在 PIONEER 平台的基礎之上建立疫苗研發平台 Evaxion。此平台主要涵蓋五個核心步驟：首先是抗原識別，接著進行抗原設計，再進入抗原驗證，之後進行候選抗原優化，最終篩選出疫苗候選物。在這個系統中，還包括幾個重要的子平台。例如 EDEN 與 RAVEN。其中 EDEN 主要用於分析多種細菌與病毒相關抗原，而 RAVEN 對於新興病毒的抗原識別特別具有優勢。這兩個平台結合後，可以同時辨識 B 細胞抗原與 T 細胞抗原提高疫苗設計精準度。在抗原識別之後，研究流程會從先前所提到的奈米層級設計開始，進行個人化抗原修飾，並評估其是否能夠有效嵌入 T 細胞表位 (epitope)。完成設計後，便進入抗原驗證階段，包括體外實驗與體內實驗，以評估其免疫反應與安全性。在驗證完成之後，研究團隊會進一步進行候選抗原的最佳化，並選出最具有潛力的疫苗候選物。不同的疫苗形式也會在此階段進行設計，例如 DNA 疫苗、mRNA 疫苗或蛋白質疫苗，並依需求加入適當的佐劑，以形成最終的疫苗藥物設計。PIONEER 作為核心的人工智慧分析平台，主要負責整合免疫相關資料並支援疫苗設計流程。透過這樣的 AI 系統，不僅能夠分析新型病毒，也能結合蛋白質結構資訊進行貝氏推論 (Bayesian inference) 與模型預測。其中 BIFROST 平台便利用這類方法，在維持蛋白質結構穩定的情況下優化抗原表位的嵌入。這些技術的整合，使得精準疫苗的設計與開發逐漸成為可能，也為未來個人化癌症疫苗與新型疫苗的發展提供了重要的應用基礎。

在個人化精準疫苗療法的研發進程中，癌症疫苗的發展與傳染病疫苗研究密切相關，特別是針對細菌與病毒的疫苗技術。以 EDEN 平台為例，其中一個重要的疫苗候選物是



針對金黃色葡萄球菌 (EVX-B1) 的疫苗。若回顧感染症的發展，許多重要疾病都與球菌類細菌相關，因此若能成功設計針對此類病原體的有效抗體與疫苗，將具有相當重要的前瞻性。這類疫苗未來不僅可能應用於敗血症或皮膚感染等疾病，也有助於提升臨床治療的便利性與效率。另一個重要的研究方向則是針對淋病雙球菌 (EVX-B2)。近年來，淋病感染問題日益嚴重，其主要原因在於抗藥性菌株的快速增加。因此疫苗研發為克服抗藥性問題的重要策略之一。此外在 RAVEN 平台中針對巨細胞病毒 (Cytomegalovirus, CMV) 進行疫苗研發。由於許多病毒不斷出現新的變異型，RAVEN 平台便是為了提升對新型病毒抗原識別能力而建立。透過 PIONEER、EDEN 與 RAVEN 等多個 AI 平台的整合，逐步建立起一個完整的疫苗研發架構。這樣的技術基礎也進一步推動了個人化癌症疫苗的發展。例如目前正在研究中的 EVX-01，主要應用於轉移性黑色素瘤；EVX-02 則作為黑色素瘤的輔助治療疫苗；此外 EVX-03 亦被應用於非小細胞肺癌 (NSCLC) 的疫苗研究。目前部分相關研究已進入第二期臨床試驗階段，特別是在轉移性黑色素瘤的治療上顯示出相當重要的潛力。對整體醫學發展而言，這代表個人化精準醫療與個人化癌症疫苗正逐步從概念走向實際臨床應用。同時，在其他癌症疫苗領域，例如子宮頸癌疫苗等研究，也出現類似的發展方向。然而，相關技術仍面臨不少挑戰與需要進一步驗證的問題，因此未來仍需要更多研究與臨床試驗來確認其長期效果與安全性。

然而精準免疫療法在臨床應用上仍然存在一些潛在的隱憂。人體免疫系統是否會將 AI 所設計的全新抗體或疫苗結構視為外來分子，進而產生非預期的免疫反應。特別是這些從奈米抗體設計開始所產生的新型分子，其免疫反應與安全性仍需要進一步評估。因此，在進入第二期臨床試驗及後續研究之前，相關療法仍必須通過嚴格的安全性與免疫反應驗證。對於疫苗或免疫藥物而言，最重要的臨床證據包括安全性與免疫原性 (immunogenicity) 的評估，這些都是臨床試驗中不可或缺的重要指標。換言之，即使 AI 平台能夠加速個人化癌症疫苗的設計，在真正進入人體試驗之前，仍然必須透過細胞實驗與動物實驗進行嚴格的功能與安全性驗證。只有在這些基礎研究確認其安全與有效之後，才能逐步推進至臨床試驗階段。目前，AI 在 AlphaFold 等技術的推動下仍持



續快速發展。從早期的蛋白質結構預測，到奈米抗體設計，再到進一步發展為全型抗體，相關技術正逐步推動個人化癌症疫苗的發展。若未來這類療法能夠透過單次疫苗注射即可誘發有效的抗腫瘤免疫反應，甚至減少傳統治療所需的多次療程，將對癌症治療模式帶來重大改變。

精準智慧黑色素癌疫苗臨床試驗

臨床上腫瘤突變負荷 (TMB) 雖可作為免疫治療反應的指標，但是否會產生「可被 MHC 呈現」的新抗原，才真正影響免疫治療成效。為解決「新抗原難以精準挑選」的問題，研究導入 PIONEER AI，結合患者腫瘤 DNA/RNA 與 HLA 型別，用來精準預測並篩選高品質專一抗原胜肽。製藥端則搭配 CAF09b 佐劑 (結合陽離子脂質體)，可雙管齊下活化抗腫瘤所需的 CD4+ 與 CD8+ T 細胞，強化免疫反應。一項個人化新抗原疫苗 (EVX-01) 試驗設計：納入 12 位轉移性黑色素瘤患者，皆接受常規 PD-1 抑制治療。劑量分三組：500 μg (n=5)、1000 μg (n=3)、2000 μg (n=4)。給藥時程為每兩週一次，共 6 次；前 3 次採腹腔內注射、後 3 次採肌肉注射，以提升 T 細胞反應。流程包含腫瘤切片與血液樣本採集、腫瘤定序設計個人化疫苗，並合併免疫檢查點治療以啟動抗腫瘤免疫反應。臨床應用以皮內注射與皮膚切片的方式驗證疫苗誘導的免疫反應，在第 6 次疫苗施打後兩週進行延遲型過敏反應 (皮膚測試)，並對切片進行免疫斑點與細胞內細胞激素染色等分析。結果顯示可偵測到對 EVX-01 相關新抗原的特異性免疫反應，且疫苗誘導反應以 CD4 T 細胞為主，同時亦觀察到 CD8 T 細胞參與訊號，支持其能在組織層級啟動免疫系統對新抗原的辨識。EVX-01 合併 PD-1 抑制治療的初步療效與劑量觀察：整體 12 位患者中有 8 位 (67%) 達成緩解，其中 2 例完全緩解、6 例部分緩解。高劑量組 (2000 μg) 表現更突出：4/4 (100%) 達成緩解，包含 1 例 16 個月完全緩解、3 例部分緩解。結論 EVX-01 與 PD-1 併用可提升免疫系統臨床活性，高劑量顯示較佳的腫瘤反應，後續臨床驗證將以 2000 μg 作為第二期臨床試驗治療劑量。

此臨床研究亦發現依據疫苗所選新抗原的 PIONEER-4 分數分組後，高分組患者無病存活時間顯著較長，Kaplan - Meier 曲線呈現出較佳的疾病控制趨勢。此結果顯示由 AI-



Immunology 平台預測並選入疫苗的新抗原若具有較高免疫原性分數，可能與較佳的臨床治療結果相關。相較下依腫瘤突變負荷 (tumor mutational burden, TMB) 高低分組時，兩組的 PFS 曲線並未呈現明顯差異，顯示在本研究中 TMB 對於預測治療效果的能力較為有限。這些結果支持以 AI 預測的新抗原品質作為個人化疫苗設計的重要依據，並可能比傳統的腫瘤突變負荷更能反映臨床療效。

該個人化疫苗目前已推進至第二期臨床研究追蹤建立治療劑料療程，前期引導 (lead-in) 階段，患者接受 PD-1 免疫檢查點抑制劑 pembrolizumab 治療。給藥方式為 400 mg 靜脈注射，每 6 週一次，持續 12 週。此階段的目的是在於先啟動抗 PD-1 免疫反應使腫瘤微環境活化，並建立基線腫瘤反應評估。完成前 12 週 pembrolizumab 單獨治療後，進入疫苗合併治療 (vaccination) 階段。此時在持續 pembrolizumab 治療的同時加入個人化新抗原疫苗 EVX-01。疫苗以肌肉注射方式給藥，每次 2mg，每兩週施打一劑。整個疫苗療程包含 6 劑啟動劑量 (priming doses)，用於建立新抗原特異性免疫反應，之後再施打 4 劑加強劑量 (booster doses)，以維持並增強 T 細胞免疫反應。此設計利用先行 PD-1 抑制解除免疫抑制，再以個人化新抗原疫苗擴增腫瘤特異性 T 細胞，期望提升整體免疫治療效果。

第二期臨床試驗追蹤結果免疫學分析顯示，所有完成 priming 劑量的患者均可偵測到新抗原特異性的 T 細胞反應，且多數 EVX-01 所選擇的新抗原均能誘發免疫反應，顯示 AI-Immunology 平台能有效預測具有免疫原性的腫瘤抗原。安全性方面，EVX-01 相關治療不良事件多為第 1 至第 2 級，包括注射部位反應、腹瀉、皮疹與疲倦等，僅觀察到 1 例第 3 級肝炎，整體未見因疫苗與 pembrolizumab 併用而增加額外毒性。研究結果顯示，EVX-01 結合抗 PD-1 免疫治療具有良好的安全性與免疫活性，中位追蹤時間為 12.6 個月，無疾病惡化存活期 (PFS) 為 11.3 個月。在僅接受 pembrolizumab 治療的前 12 週時，腫瘤反應分布為 8 名患者 (50%) 達部分緩解、6 名 (37.5%) 為疾病穩定 2 名 (12.5%) 為疾病惡化。在第 48 週可評估的 12 名患者中，有 3 名 (25%) 出現反應深化，其中 2 名由 SD 轉為 PR，1 名由 PR 轉為完全緩解 (CR)。此外，有 1 名在第 12 週被



評估為疾病惡化的患者，後續腫瘤持續縮小，在第 72 週時腫瘤體積較第 12 週減少 50%，較基線減少 21.4%，並於第 52 週的 PET 檢查顯示代謝性完全緩解。此臨床研究顯示 AI-Immunology 平台可有效預測具有免疫原性的腫瘤新抗原，並成功應用於 EVX-01 個人化疫苗設計。疫苗接種後，多數患者產生新抗原特異性的 T 細胞反應，且誘發的免疫反應數量與強度與臨床療效呈現正向關聯，支持 AI 驅動的新抗原選擇策略在個人化癌症疫苗開發中的可行性與臨床潛力。EVX-01 與抗 PD-1 免疫治療併用展現良好的安全性與臨床活性，部分患者在治療過程腫瘤療效反應加強達到較長的無疾病惡化存活期。此外，疫苗新抗原的 AI 預測分數與存活結果呈現關聯，而腫瘤突變負荷則未顯示明顯預測能力，顯示新抗原品質可能是影響治療效果的重要因素。

以上內容將在 2026 年 3 月 11 日(三) 10:00 am 以線上直播方式與媒體朋友、全球民眾及專業人士共享。歡迎各位舊雨新知透過[星球永續健康網站專頁](https://www.realscience.top/)觀賞直播！

- 星球永續健康網站網頁連結: <https://www.realscience.top/7>
- Youtube 影片連結: <https://reurl.cc/o7br93>
- 漢聲廣播電台連結: <https://reurl.cc/nojdev>
- 不只是科技: <https://reurl.cc/A6EXxZ>



講者：

陳秀熙教授/英國劍橋大學博士、許辰陽醫師、陳立昇教授、嚴明芳教授、林庭瑀博士

聯絡人：

林庭瑀博士 電話: (02)33668033 E-mail: happy82526@gmail.com

劉秋燕 電話: (02)33668033 E-mail: r11847030@ntu.edu.tw