

簡禎富

清華講座教授

資料挖礦與大數據分析以提昇半導體產業良率與智能製造技術

現職：國立清華大學工業工程與工程管理學系 / EMBA / MBA 清華講座教授
科技部「IC 產業同盟」產學技術聯盟暨深耕工業技術計畫 主持人
「清華 - 台積電卓越製造中心」主持人
IEEE Technical Committee on Semiconductor Manufacturing Automation Co-Chair

學歷：哈佛大學商學院 高階經理人班 (PCMPCL) 結業
威斯康辛大學麥迪遜分校決策科學與作業研究 博士
威斯康辛大學麥迪遜分校工業工程 碩士
國立清華大學工業工程系暨電機工程系雙學位 學士 (斐陶斐榮譽學會榮譽會員)

經歷：國立清華大學主任秘書 / 副研發長兼首任產學合作執行長、台積電工業工程處副處長、加州大學柏克萊分校傅爾布萊特學者、科學園區固本精進計畫推動辦公室總主持人、「竹科 2.0」規劃計畫主持人等

榮譽：行政院國家品質獎 (研究類個人獎)、科技部傑出研究獎、教育部產學合作研究獎、經濟部大學產業經濟貢獻個人獎、傑出工程教授、工業工程獎章、呂鳳章先生紀念獎章、科技管理學會院士、APIEMS Fellow、IEEE TASE 2011 最佳論文、IEEE TSM 2015 最佳論文等





資料挖礦及大數據分析 推動「工業 3.5」智慧製造 協助提升製造良率和決策品質

喜歡彼得·杜拉克《旁觀者》的歷練，更認同他說過的：「管理最重要的創新都來自於實證」，因此從半導體產業開始，簡禎富教授行勝於言，透過長期深耕的產學合作研究，在產業場域中實際驗證一身所學，並不斷學習成長，終於走出一條不一樣的路。

簡禎富教授領導國立清華大學決策分析研究室和 IC 產業同盟研究團隊專注資料挖礦和大數據分析、資源調度優化與智慧製造決策之技術研發，以產學合作研究、技術移轉與顧問等方式協助廠商，縮短先進製程導入至良率提升量產所需的時間，和解決諸多複雜製造決策與資源優化問題，協助台臺灣廠商發展先進的大數據分析技術和智慧製造決策能力，並進一步擴散至產業鏈上下游的其他高科技廠商及傳統產業，各項研發成果均能導入合作廠商，做到理論研究經得起論文發表的學術檢驗且實證效益能夠協助合作廠商產業化上線的嚴格標準，創造具體產業價值。

競爭從未休止，稍有差池就錯失領先優勢，這是高科技產業生態的生存法則。半導體產業進入奈米製程世代後，關鍵尺寸和允差持續微縮，逼近物理極限的嚴苛挑戰，製造程序更複雜，光罩層數及影響變數更多，且前後製程又會產生多層疊代的複雜交互作用，生產過程中稍有變異或異常，就可能造成良率損失甚至延誤產品量產上市的時機。

面對產品特徵、製程技術、設備參數、生產環境、投入材料和人為因素等各種變數複雜交纏的難題，領域專家的經驗和傳統的分析方法已經不足以快速找到可能的線索，簡禎富教授在過去 20 年專注臺灣半導體產業的良率提升和智慧製造決策，因此隨著半導體製程不斷演進和接觸面越來越廣，而能夠一層一層地夯實資料挖礦、大數據技術和問題洞察力。

雖然用五年在清華大學取得工業工程系暨電機工程系雙學位，但簡禎富教授不到四年就取得美國威斯康辛大學麥迪遜分校工業工程碩士及決策科學與作業研究博士學位，讓他更體會扎實的基本功的重要。1996 年返回清華大學任教，他用創業精神成立「決策分析研究室」，並設計商標和 Enabling A+ Decisions 的品牌宣言。簡教授提到為何不循往例以教授姓名為研究室命名，「因為我希望研究室的成就榮耀清華和所有研究伙伴們，而不只是教授個人。」簡教授期望「決策分析研究室」(DALab) 之於清華，能一如「媒體實驗室」(MediaLab) 之於美國麻省理工學院。

與領導企業深度合作研究 練出紮實基本功和產業洞察

「高科技產業承受極大的技術挑戰和時間壓力，產學合作就像是空中加油的高難度任務。」簡禎富教授苦笑著說明與高科技業者的合作並不容易，「良率提升是跟時間賽跑，我們也得跟著全速奔跑不能脫隊。」簡教授帶領的研究團隊常常成為側翼的游擊隊，走出不同於公司正規軍的蹊徑，「臺灣工程師的工作和考績壓力太大了，反而妨礙需要深度思考的分析。」面對合作企業嚴格的時程及產出要求，簡教授總是頂住所有壓

力而讓團隊成員有足夠的思考空間。「我們要當刺客，而不是食客。」所以計畫一旦完成，簡教授總是回來專心練功，對於演講邀約，每個月也有自己的額度限制，以免「不務德而勤遠略」。

不過，他也不諱言自己選擇學生或合作伙伴的標準極高，「會面試 2 次以上，先讓學生或研究員了解理念，我們的研究挑戰性極高且工作相當繁重，我要找志同道合、可以並肩作戰的夥伴，而不是寫論文工具。」所以研究團隊規模雖大，平均一年發表的期刊論文不到 6 篇，因為要完成計畫上線驗證，並過了保密期之後才會發表。儘管如此，發表的論文由於兼顧理論和實務，所以受到國內外產學界重視，包括 1 篇 HiCi 論文，並榮獲 IEEE TASE 2011 年度最佳論文、IEEE TSM 2015 年度最佳論文、工程論文獎和工業工程論文獎；指導的學生論文也都年年獲獎。經過產學合作的嚴酷洗禮及簡禎富教授的指導，所帶出來的學生都有真才實學，總是成為各界爭搶的人才，「能夠培養青出於藍、行勝於言的人才是我最大的光榮。」他說。在自我訓練和學生指導上，都要求在理論基礎、分析技術及實際貢獻上，三者缺一不可，「用學術研究解決實際產業問題，也為臺灣產業培養經世濟民的人才。」



雖然有許多企業要求與簡禎富教授團隊合作，但他絕不與第二家同性質的公司合作，「同一個領域中，我們只會和一家企業合作」簡教授非常堅守這個原則，已是眾所皆知，「從事大數據和決策分析，我們的研究會接觸到公司的機密，沒有信任如何深入合作？」因此，除了台積電、旺宏、聯發科、創意電子、采鈺及旺矽等半導體上下游業者外，也和友達光電、台達電、廣達電腦、晶元光電及茂迪等產業龍頭，以及中華精測、宏遠紡織興業等隱形冠軍執行產學合作計畫。合作對象大多是該領域的領導企業，「因為他們必須先面對未來的挑戰」。隨著將研究能量往產業鏈上下游擴散並互相印證，簡教授累積問題點的突破，再擴大為對製造網絡和產業生態系統的瞭解，並應邀擔任台積電、聯發科、台達電及友達光電的顧問，參與內部計畫，時間都長達兩年，因此整合成更深一層的理論建構和分析架構，發展出突破性的研究和選題的洞察。

台積電「教授後研究」讓研究轉骨的成長歷程

2002 至 2003 年在美國加州大學柏克萊分校擔任傅爾布萊特學者 (Fulbright Scholar)，返國後，簡禎富教授應邀擔任台積電製造技術委員會的資深顧問，製造技術中心設有各種技術委員會，做為跨廠區的知識管理與標竿學習平台。然而，製造管理不同於結構化製程技術，某個廠區的最佳實務 (Best Practice)，不一定可以直接應用在其他地方，需要因時、因地制宜的轉換。這樣的經驗鍛鍊他將複雜實際問題架構以建立其他環境可以應用的分析模式。其中，發展資料挖礦和製造大數據分析以推導不同的產能組態和產品組合下，最適合的在製品水位和調控機制，可以在不影響產出下有效降低生產週期時間，榮獲 IEEE TASE 2011 年度最佳論文；並發展「綜合晶圓效益」(Overall Wafer Effectiveness, OWE) 指標和提升 OWE 的發明專利，開發能建議客戶 IC 設計尺寸的智慧決策系統。

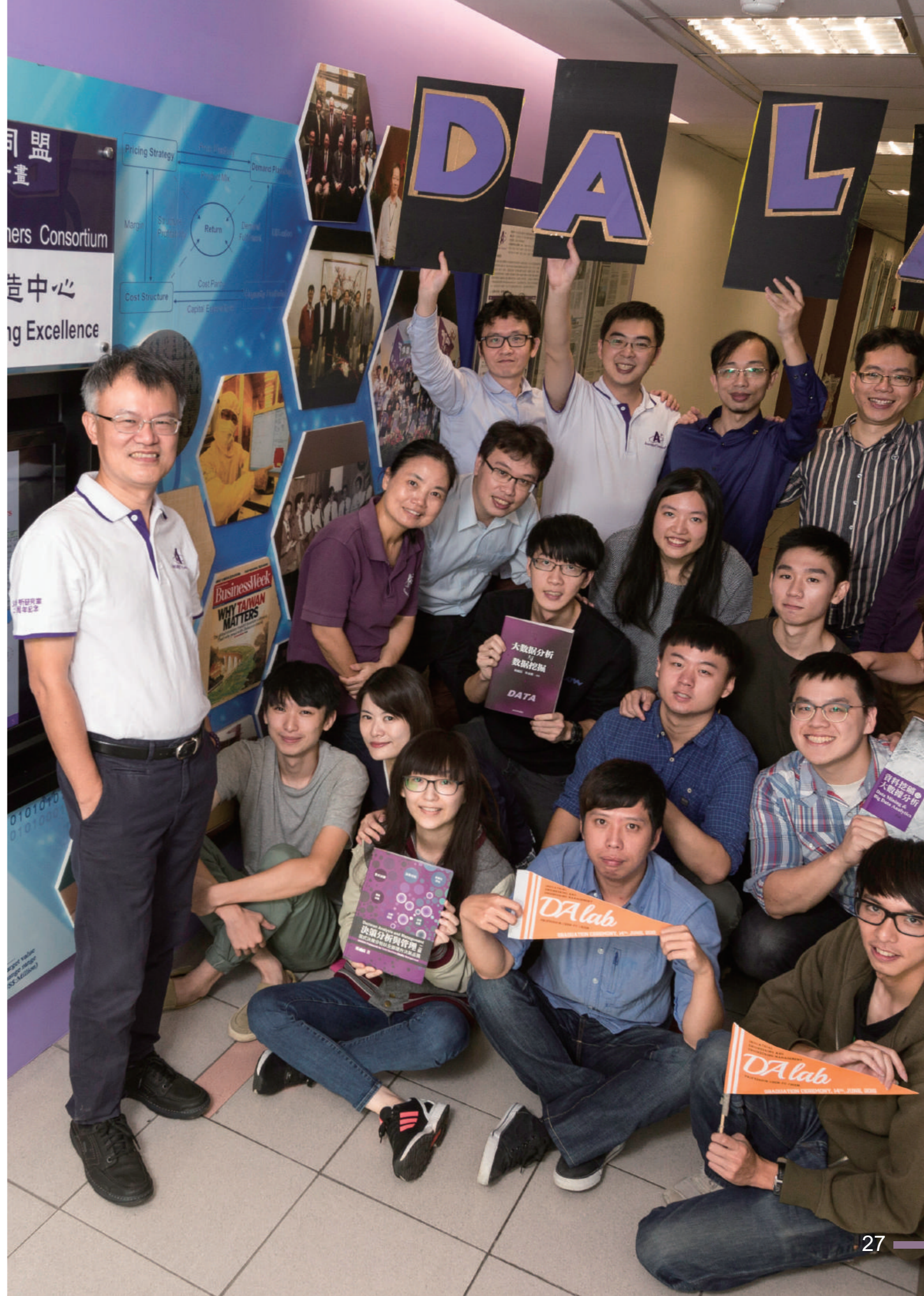
2005 至 2008 年簡禎富教授擔任台積電工業工程處副處長，成為台積電第一位借調的國內學者。「這段歷程讓我的研究脫胎換骨、功力大增。」簡教授曾比喻為修習「教授後研究」

(Post-Professor Research) 學位。台積電的主管同儕都是一時之選，就如同指導教授和口試委員一般，「透過身歷企業戰場的旁觀，讓我一層層地去探究這些大哉問的問題本質，並發展出整合的製造策略架構。」簡教授總是心懷感激「母校」台積電的教育和師長的提攜。

喜讀歷史的簡禎富教授，常常以古鑑今，借調台積電工程處副處長期間，提出中央幕僚單位應如主管「兵、馬、錢、糧」的「軍機處」，以對應人力、設備、資本及訂單等企業營運資源的運籌。他自喻為「軍機處行走」，善用學者身份傾聽瞭解不同主管的想法，提出「PDCCCR」(Pricing-Demand-Capacity-CapEx-Cost-Return) 製造策略方法論，涵蓋定價策略、需求預測和訂單滿足、產能規劃、資本支出、成本結構等影響財務報酬、環環相扣的營運決策，協助促進組織調整與決策流程再造，並發展成本龍捲風 (Cost Tornado Program) 等相關分析技術作為「IE 十大建設」，進而將工業工程處轉型為「營運資源規劃處」。

隨著產業進入大者恆大的競爭賽局，建造一座 12 吋晶圓需要美金 40 億元以上的投資，其中超過六成的資金都用於購買幾年就折舊的機台，然而半導體產能建置擴充和設備採購決策的前置時間長，加上需求變動大，因此必須承受高度不確定的決策風險和壓力。「摩爾定律逼得製程技術持續微縮與產品演進的更迭下，半導體業者必須不斷更新或升級設備，才能維持競爭優勢。」因此，簡禎富教授整合產品生命週期與技術擴散理論為基礎，利用資料挖礦和大數據分析技術，發展考慮多世代技術擴散、技術替代、重複購買、價格、市場成長率和季節等因素的商業分析技術，並建立一個隨著時間推移而調整和更新需求預估的最小化最大可能後悔 (mini-max regret) 決策機制，有系統地減少制定產能策略的決策風險。

簡禎富教授並以清華大學為名發展「紫式決策」，將決策分析方法從技術層、作業層、垂直整合到策略層，以全面提升決策品質。TSMC(中國)有限公司總經理杜隆欽曾撰文推薦簡教授所著《決策分析與管理》一書，「決策是企業界最





具挑戰的管理工作，過程中的不確定性、時效、預期結果和執行等元素，都可以左右企業的成敗。自從簡禎富博士加入本公司後，已將各種決策分析方法有效的運用在企業策略、產能投資、廠址選擇及設備評估等，並發展龍捲風圖分析排序法等已有效降低成本，令人更加肯定決策分析和產學合作的價值。」

客製化大數據分析應用系統 提升決策效能

隨著半導體製程持續微縮，變異的允差 (tolerance) 也不斷挑戰物理極限。「自動化 12 吋廠月產能超過 10 萬片晶圓，同時有十幾種製程配方參數 (recipe) 生產各種產品，每片晶圓要經過數百道到上千道反覆循環的製造程序。每個工作站有十幾個到幾十個精密的反應室 (chamber) 可以選擇、生產過程中可以隨著時間讀取幾萬種即時監控資料、近萬個線上抽樣檢測的量測值 (metrology)，以及上百種在一片晶圓上不同位置測量的電性測試參數，再加上積體電路複雜的迴流生產模式，使得自動蒐集累積的大數據，除了有大量 (Volume)、多樣 (Variety)、快速變動 (Velocity) 以及真實性 (Veracity) 等 4V 特性之外，還有主效應不明顯、資料分布不均衡、迴

流製程的複雜交互作用等挑戰。」簡禎富教授指出，若要發揮大數據價值，不能僅靠商業軟體，「儘管商業軟體可以支援大數據分析，但不是把巨量資料倒進去就自動會有結果，需要針對產業需求和問題特性發展客製化的應用模組，讓一般工程師很容易使用，而專注在分析結果的詮釋和問題解決。」

許多半導體公司都成立工程資料分析 (Engineering Data Analysis) 系統開發團隊，以整合統計、資料挖礦、資訊技術與領域知識，分析各類相關工程資料、快速查詢、產生報表圖形，以協助工程師排除異常提昇良率。

2010 年台積電推動工程資料分析系統升級改版，儘管國外技術顧問公司積極爭取合作開發，但是台積電除了擴充強化內部團隊外，也決定委託簡禎富教授帶領的決策分析研究室執行「製造智慧與資料挖礦以協助先進奈米製程提升良率」的產學合作研究計畫，包括六個子題，協助開發部分的分析模組並，分別與各相關部門協同合作。對於所有團隊成員而言，都有跟時間賽跑的壓力，「所幸決策分析研究室已經從不斷的實戰中，對特殊資料的處理方式與分析架構等都有深入的體會和見解，並能善用大數據分析技術與領域專家



的經驗。」簡教授剖析這項艱難任務可以合作成功的原因，「除了專業分析能力外，並肩作戰的互信和使命必達的配合度。」

然而，計畫一開始，簡禎富教授就發現，儘管過去有類似問題的分析經驗，奈米製程問題遠比以前要複雜好幾倍，雖然把所有研究人力都投入，仍然艱苦奮鬥。為了在期限內達成任務，除了找畢業學生回來幫忙外，更破天荒地緊急招募 5 個博士後研究員，包括跨領域的生物資訊和統計人才，有些人在計畫結束後，轉換跑道加入台積電相關部門；有些人則繼續留在決策分析研究室。而這個經驗，也讓整個研究團隊大幅成長，並引進不同專長的人才。

在與合作開發單位一起打拼下，團隊整合資料挖礦和大數據分析技術、資料處理和圖形化軟體，成功發展多變量事故分析、晶圓圖診斷等不同分析功能模組，輔助工程師進行資訊樣型分析和專業判斷，可以大幅縮短使用者的學習曲線，加速良率提升、降低成本並縮短先進製程的量產速度。成功案例《台積電以大數據提升製造智慧》經台積電同意，已收錄在《哈佛教你精通大數據》(2014) 一書中；並撰寫《資料挖礦與大數據分析》(2015) 成為教材和工具書。



提出工業 3.5 破解工業 4.0 的威脅進逼

隨著物聯網和雲網端的整合，以及先進國家「工業 4.0」及「再工業化 (Manufacturing Renaissance)」等製造戰略思維改變，國際品牌大廠開始扶植就近的大數據分析公司和團隊，希望除了遠端掌握供應鏈的相關資訊、增加能見度外，更提升到大數據分析和數位決策層面，並逐步穿透供應鏈上下游廠商，實現為其掌控的網宇實體系統 (Cyber-physical systems, CPS)，大數據未來勢必成為改變遊戲規則 (game changer) 的推手。

「製造智慧化和工業物聯網是必然趨勢，但是台灣有無必要迎合外國的策略？工業 4.0 許多標準和專利早就被佈局綁定了。」認為對的事，簡禎富教授相當敢言。「臺灣必須思考未來的價值和定位。臺灣基礎工業能力和資源，很難與美、德、日等國並駕齊驅去實現工業 4.0，且工業 4.0 相關技術仍在演化中，不用急於導入。」因此，簡教授提出「工業 3.5」作為工業 3.0 和未來的工業 4.0 之間的「混合策略」，也就是在目前臺灣擅長的製造系統上，整合大數據分析和經驗，先發展智慧製造系統，建立工業 4.0 所需的彈性決策能力，並拉開和紅色供應鏈等後進者的差距，「另一方面，除了提升基礎工業技術和軟硬體設



備外，更應垂直整合其上的分析能力和管理軟實力，才可望維持競爭優勢，研擬工業 3.0—工業 3.5—工業 4.0 的策略藍圖。」

例如，宏遠紡織興業因為認同「工業 3.5」的策略，也為了維持臺南市山上區老廠的競爭力，所以找簡禎富教授產學合作。宏遠紡織興業是研發各種創新機能布供應各大運動品牌的隱形冠軍，除了面臨臺灣傳統產業的困境外，還有民生消費品需求少量多樣的挑戰，透過內建資源調度優化和大數據分析的數位決策引擎，讓生產決策的應變彈性更大、規劃週期更長，並能降低存貨，提升產能利用率。

大數據分析處理半結構和非結構化資料仍有限制，臺灣辛勤累積的製造管理經驗、供應鏈調度彈性、生產現場累積的知識 (know-how)，這些正是其他國家欠缺的資源，簡禎富教授建議，「只要市場很大利潤很高的藍海，一定會吸引跨國強權競逐，最後必然淪為微利競爭的紅海。因此，臺灣應該針對特定產業領域，利用這些智慧資產的相對競爭優勢，發展利基型的「藍湖策略」(Blue Lakes Strategy)，深入開發更獨特的、客製的大數據分析和智慧製造系統，使臺灣先在先進製造價值鏈中卡位，以和跨國企業通用型的大型資訊系統競爭，也就是以『工業 3.5』的破壞性創新，提前收割製造系統轉換到工業 4.0 的價值。」簡教授認為臺灣地狹人稠，不應該發展無人化的工業 4.0，「鋼鐵人 (臺灣工業 3.5) 和機械人 (德國工業 4.0) PK 的話，成敗仍未可知？」

主持「IC 產業同盟」暨「清華 - 台積電卓越製造中心」

2012 年簡禎富教授開始主持科技部「IC 產業同盟」暨「清華 - 台積電卓越製造中心」。「工業 4.0 是另一個產業革命的開始，但國內僅有少數領導公司培養自己的大數據分析和智慧製造團隊，發展相關技術，許多公司以為只要買一些軟體設備和教育訓練就可以了，而忽略分析人才的培養、自主技術開發和組織的變革。將來面對國際產業的競爭，就像工業 2.0 時的甲午戰爭，清朝北洋水師空有亞洲最強大的德製定遠號、鎮遠號戰艦，但因為人員訓練和管理跟不上，反而輸給日本海軍。」簡教授提出他的憂心。



因此，IC 產業同盟與台積電共同主辦「半導體大數據分析競賽」，並整合支援各項軟硬體設備的協辦單位，打造實戰擂臺，鼓勵跨校跨系系組隊，不僅是國內首次針對半導體產業舉辦的大數據競賽，更為所有的參賽者開班培訓，邀請台積電專家和 IC 產業同盟研究員分享實際案例和大數據分析技術，增強參賽學員的半導體、資料挖掘及大數據分析等軟硬體應用和產業知識，以培養臺灣產業所需的人才。至今已經連續舉辦三屆，每年都能吸引超過六百人以上，不同校系的大學部、碩士和博士生跨領域組隊參加，並協助上下游廠商整合成為完整的大數據分析產業價值鏈。

簡禎富教授希望 IC 產業同盟能夠扮演智庫、觸媒、第三方和人力資本儲備銀行等不同的角色，來研究半導體產業跨公司的重要議題，協助不同公司解決跨供應鏈上下游的問題，並深耕大數據分析、資源調度優化與智慧製造決策之技術研發，進一步擴大為供應鏈整合的決策機制和智能化決策系統。2007 年經教育部顧問室推薦參加哈佛大學商學院 PCMPCL 受訓結業，簡教授即積極撰寫臺灣高科技產業個案，已經發表包括台積電 (The



TSMC Way: : Meeting Customer Needs at Taiwan Semiconductor Manufacturing Co.) 等 12 篇哈佛管理個案，「希望能藉由哈佛個案讓國際知曉臺灣製造的實力。」簡教授說，「工業 2.0 的代表之一就是福特汽車的組裝線，而豐田生產系統 (Toyota Way) 其實只是工業 2.0 的改良版，卻是全世界所有學生產管理的人一定會學到的；希望台積電 (TSMC Way) 滿足客戶複雜需求的智慧決策能夠成為工業 3.5 或工業 4.0 的新典範，台灣就可以發揮更大的影響力」。

總是憂國憂民的簡禎富，他念茲在茲的都是台灣產業的未來；熱愛清華的他，總是以清華校訓「自強不息、厚德載物」自我要求，受益於跨界學習的經驗，他用台積電分紅在科學園區附近買地蓋「紫軾書院」，希望作為園區、大學和各個社會階層跨領域交流共學的平台，以培養更多人才，成為「河汾之間」。未來，台灣的產業無疑將面臨更嚴酷的挑戰，令人慶幸的是，簡禎富和許多深耕基礎工業技術的專家學者，將讓台灣產業繼續茁壯迎向未來。