

出國報告（出國類別：訪問）

參訪日本理化學研究所與東京理 大學交流討論量子科技研發

服務機關：國家科學及技術委員會

姓名職稱：賴明治/自然科學及永續研究發展處處長

派赴國家：日本東京

出國期間：114 年 2 月 6 日至 114 年 2 月 9 日

報告日期：114 年 3 月 7 日

摘要

量子電腦被視為下一代計算技術，具有超越傳統電腦處理特定問題的潛力，此次訪問在深入瞭解日本在量子電腦硬體、軟體、演算法及相關應用方面的最新發展，並探尋臺日雙方在量子科技領域的潛在合作機會。訪問期間，參訪團參觀了理化學研究所(RIKEN)-富士通量子電腦研發中心，瞭解其在超導量子電腦技術、HPC-QC混合式運算平台以及量子技術應用研究等方面的進展。此外也拜會了東京理科學大學蔡兆申院士，就超導量子位元技術發展及未來合作進行了交流。透過此次訪問，對日本量子科技的發展現況和未來趨勢獲得第一手資訊，並為我國量子科技的發展提供了參考。

目錄

壹、 出訪目的.....	1
貳、 出訪行程.....	1
參、 出訪人員.....	2
肆、 參訪紀要.....	3
一、 參訪理研-富士通量子電腦研發中心.....	3
二、 拜訪東京理科大學量子研究學者蔡兆申院士.....	7
伍、 心得與建議.....	9

壹、出訪目的：

量子電腦被視為下一代計算技術，具有超越傳統電腦處理特定問題的潛力，臺灣的鄰國日本在量子科技領域投入大量資源，包含政府支持、學術研究以及企業發展。為了解日本在量子電腦科技上的發展與未來里程碑，參訪日本理化學研究所(Institute of Physical and Chemical Research, RIKEN, 簡稱理研) 與東京理科學大學，並針對量子科技研發進行交流及洽談合作。此次參訪目的在深入了解日本在量子電腦硬體（如超導量子位元）、軟體、演算法以及相關應用方面的最新進展，規劃透過與日本國內量子研究領域的領先機構和專家的交流，可以獲取關於量子電腦技術發展趨勢、挑戰以及未來應用前景的第一手資訊。

貳、出訪行程：

日期	2/6（四）	2/7（五）	2/8（六）	2/9（日）
城市	桃園-東京	東京-埼玉縣和光市-東京	東京-群馬縣藤岡市-東京	東京-桃園
日程	啟程（長榮BR189）	參訪理研	拜會東京理科學大學 蔡兆申院士	返程（長榮BR19）

1. 參觀量子電腦實驗室，了解相關技術細節

量子電腦作為一種顛覆性的新興技術，將展現出巨大的潛力和廣泛的應用前景，可望解決傳統電腦無法處理的複雜問題，例如：新材料的研發、藥物開發、密碼學等，有望在科學、技術和經濟社會等各個領域帶來深遠的影響。日本理研是日本首屈一指的研究

機構，在量子科技領域投入了大量的資源。在量子基礎研究探索新的量子計算原理、開發新的量子位元技術，以及研究量子演算法等；技術方面開發量子電腦的關鍵技術，例如超導量子位元的製備和控制、低溫技術、量子測量技術等；理研也與日本企業和其他研究機構合作，共同推動量子電腦的研發和應用。例如：與富士通合作成立了理研-富士通量子電腦研發中心(RIKEN RQC-Fujitsu Collaboration Center)，整合雙方在超導量子計算和資訊處理方面的優勢，加速量子電腦的實用化。

另外國際合作也是推動我國量子科技發展的重要途徑，透過合作可以加速我國量子科技的發展和應用。此次參訪與日本關鍵科研機構在量子位元材料、低溫控制電路和次系統、HPC-QC 混合式運算以及軟體演算法等方面尋求潛在合作機會。

2. 拜會與聽取專家的意見和建議，洽談專家來台指導

拜會東京理科大学研究推進機構總合研究院蔡兆申教授，蔡教授是超導領域的專家，也是我國中央研究院院士，曾獲美國物理學會會士 (2000)、日本應用物理學會會士 (2010)，在低溫固態物理具有深厚的造詣和豐富的經驗，因為量子態非常脆弱，容易受到環境干擾，超導體提供的無電阻環境有助於維持量子位元的量子態，從而實現更長時間的相干性和更高精度的量子計算，而低溫超導研究對於超導量子電腦的開發及運行具有關鍵的角色。因此拜會與蔡教授會談，討論未來合作及返臺指導的可能性。

參、出訪人員：

自然處賴明治處長、量子系統推動小組召集人果尚志教授、執行長張文豪教授、及總工程師王明杰研究員等。

肆、參訪紀要：

一、參訪理研-富士通量子電腦研發中心

理研-富士通量子電腦研發中心(以下簡稱量子電腦研發中心)位於位於日本東京都北方埼玉縣和光市的理化學研究所內，是理研和日本富士通(Fujitsu)公司共同設立的聯合研究中心。這個研究中心的成立主要是結合理研在超導量子計算技術方面的領先優勢，以及富士通在計算技術和量子技術應用知識方面的專長，共同推動超導量子電腦的研發與實用化，期望在量子計算領域取得突破性進展，為解決複雜的社會問題和推動科學技術的發展做出貢獻。

理研(RIKEN)，正式名稱為理化學研究所(Institute of Physical and Chemical Research)，由日本企業家澀澤榮一及其他各界領袖參考了德國的威廉皇帝協會於 1917 年創立，最初是一個私立研究基金會，由於成立初期未能獲得政府的資助，理研主要依賴私人企業及部門的資金。隨著時間的推移，理研不斷發展壯大，最終轉變為一個國家研究與開發機構。在理研的歷史中，有許多重要的人物做出了卓越的貢獻，例如第一任所長菊池大麓和將理研的組織結構進行重大改革的大河內正敏。此外，理研也與多位諾貝爾獎得主有著關聯。理研後來轉變為國家研究與開發機構，代表日本政府對科學研究在國家發展中關鍵作用的日益重視和支持，這也為理研提供了更穩定和充足的資金，使其能夠擴大研究範圍並提升影響力。

理研的研究領域非常廣泛，主要包括物質科學、生物科學、醫學科學、腦科學和計算科學。在物質科學領域，理研進行著包括新材料開發和能源問題解決等前沿研究；生物科學的研究則涵蓋了從分子生物學到生物資源開發的各個方面；醫學科學的研究旨在闡明人類疾病的發病機制並開發新的治療方法；腦科學的研究致力於理解大腦的功

能和克服精神疾病；計算科學的研究則著重於高效能計算和人工智慧的發展與應用。

表 1. 日本理化學研究所代表性研究領域

研究領域	代表性中心	研究重點簡述
物質科學	尖端物質科學研究中心 (CEMS)	新興材料科學的開創性研究，重點在能源問題和永續社會的構建。
生物科學	生物系統動力學研究中心 (BDR)	揭示生物體生命週期中發生的基本生物學過程，包括人類的生命週期。
醫學科學	綜合醫學科學研究中心 (IMS)	闡明人類疾病的發病機制，並通過對人類基因組和免疫功能的前沿研究建立新的治療方法。
腦科學	腦科學中心 (CBS)	從基因和細胞層面到整個身體和社會系統，對大腦和心智的功能進行基礎研究，並開發創新技術。
計算科學	計算科學研究中心 (R-CCS)	以超級計算為中心，目標是高效能計算本身的研究，以及將其應用於解決科學和社會難題。

量子電腦研發中心於 2021 年 4 月設立，整合理研所研發的超導電路量子電腦尖端技術，以及富士通的運算技術、基於客戶視角的量子技術應用知識，共同進行超導量子電腦實用化的研發。將開發可實現千位元級大規模化的硬體與軟體技術，以及可實用的相關的應用程式研發，在目標是開發有助於解決難以解決的社會問題、具備容錯能力的超導量子電腦之基礎技術下推動各技術層面的研究。理研和富士通此前已有多項合作，包括共同開發用於 RIKEN Fugaku 超級電腦的 Fujitsu A64FX 處理器。這項合作充分利用了領先研究機構（理研）和主要科技公司（富士通）的互補優勢，為推進量子計算技術創造了強大的協同效應。理研在超導量子位元方面擁有基礎研究的專業知識，而富士通則在計算技術、系統整合以及對潛在應用的理解方面具有優勢。這種專業知識的劃分和結合加速了開發過程，並增加了創造實用量子計算解決方案的可能性。先前在 Fugaku 超級電腦上的成功合作為雙方在複雜技術專案上的合作奠定了信任和能力基礎。

量子電腦研發中心目前中村泰信博士擔任主任，本次參訪量子電腦研發中心，由該中心富士通量子研究所所長佐藤信太郎博士帶領的

四人團隊報告富士通與理研中心針對超導量子電腦開發的時程與進度及 HPC=QC 耦合運算可能的應用領域等，瞭解到該中心的研究方向主要集中在以下幾個方面：超導量子電腦技術的開發、理研超導電路量子計算技術與富士通的計算技術整合、以及基於客戶需求的量子技術應用研究。

佐藤所長向參訪團隊說明技術細節外，提到富士通與理研於 2023 年共同研發 64 量子位元超導量子電腦，也推出混合量子運算平台。這運算平台是將開發的 64 量子位元超導量子電腦的運算能力與富士通開發當時世界上最大的 40 量子位元量子電腦模擬器相結合，為企業提供可與量子模擬器結合使用的混合量子運算平台。新的混合平台可以輕鬆地將有雜訊的中型量子(NISQ)電腦的計算結果與量子模擬器的無錯誤結果進行比較，有助於加速量子應用中錯誤緩解演算法的性能評估等領域的研究。

佐藤所長提到 2023 年的混合量子運算平台中使用的新型 64 量子位元超導量子電腦，是利用日本理研於 2023 年 3 月宣布的日本首台超導量子電腦的技術，這部量子電腦是日本文部科學省「量子飛躍旗艦計畫」(MEXT Q-LEAP)的一部分，包含一個整合的 64 個超導量子位元晶片（量子電腦運算功能的核心元素），並採用與理研量子電腦類似的垂直佈線方案，使其具有可擴展性以適應未來的擴展。它也利用 NTT 建構的量子位元控制軟體實現量子位元的高精度控制。新型超導量子電腦理想情況下可計算多達 264 個量子疊加和糾纏態，可望實現經典電腦難以實現的規模計算。

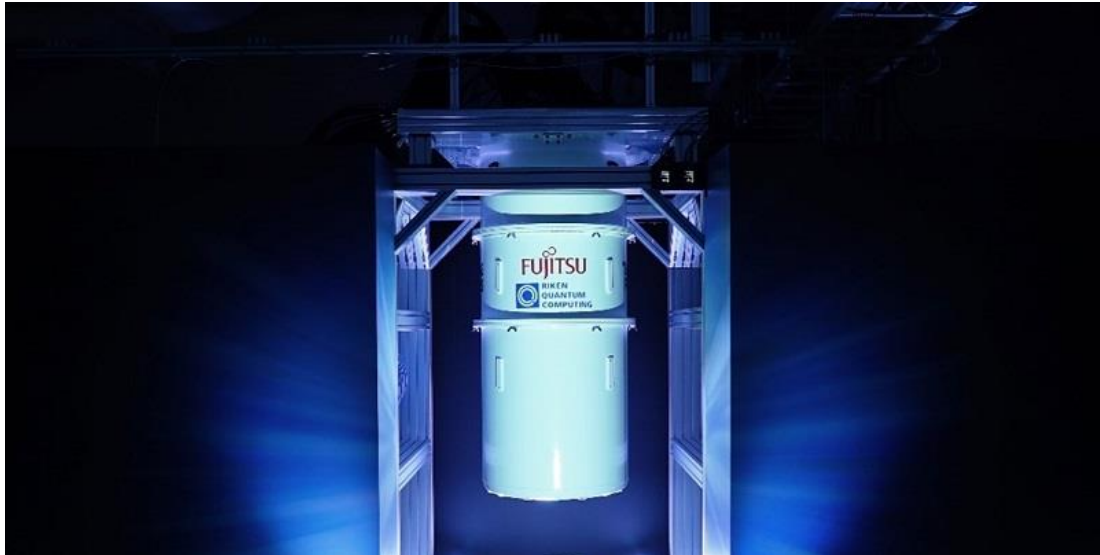


圖 1.日本理研富士通量子電腦研發中心 2023 年開發的量子計算機
(資料來源：富士通官網)

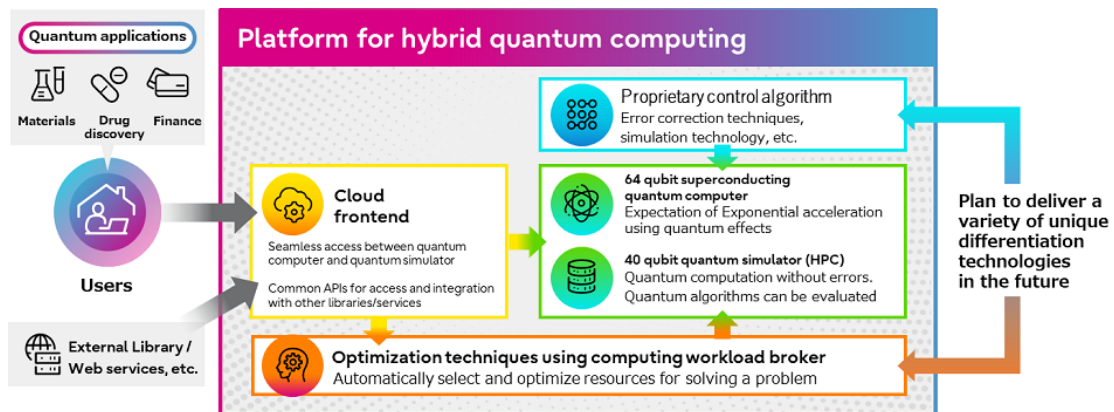


圖 2. 混合量子運算新平台概述 (資料來源：富士通官網)

二、拜會東京理科學大學蔡兆申院士

蔡兆申院士是我國中央研究院數理組院士，在國際量子科技領域做出卓越貢獻的物理學家，其主要研究工作在東京理科學大學進行。他目前是東京理科學大學的教授，同時也是日本理研新興物質科學中心（CEMS）超導量子模擬研究團隊的負責人。蔡教授在超導量子位元領域做出了開創性的工作，並於 1999 年參與完成了全球首次成功的超導量子位元實驗。憑藉其卓越的學術成就，蔡教授榮獲了多項著名獎項和榮譽，包括朝日獎、日本學士院獎、西蒙紀念獎和江崎玲於奈獎等。在加入東京理科學大學和理化學研究所之前，蔡教授曾在日本電氣股份有限公司（NEC）和理化學研究所擔任重要職位。他的研究領域涵蓋了超導量子電路的整合技術以及利用超導共振器開發玻色子編碼。此外，蔡教授還提出了利用摺紙結構來實現量子晶片配線的創新方法，為量子晶片的封裝做出了重要貢獻。他也積極參與多項研究計畫，包括利用超導人工原子實現光子量子資訊處理的 CREST 計畫以及 FIRST 量子資訊處理計畫。蔡教授在超導量子計算領域的奠基性工作和持續的研究投入，使其成為該領域極具影響力的學者。

蔡兆申院士目前的研究重點主要集中在超導量子電路和量子資訊處理。他近期在利用克爾參數振盪器進行量子資訊處理方面取得了顯著進展，包括觀察到量子干涉現象並演示了單位元和雙位元量子邏輯運算。近期，蔡教授還在多個研討會上發表了關於糾纏貓態的實驗開極操作、超導量子位元和量子電腦等主題的演講。此外，他的研究團隊還探索了非厄米超導量子電路中的相變以及在量子狀態下實現單向微波傳輸。蔡教授的團隊也致力於開發利用量子電路冷卻器快速初始化超導量子位元的技術。蔡教授及其團隊在探索先進量子現象和開發未來量子電腦關鍵組件方面所進行的前瞻研究，特別是在超導電

路和新型量子資訊處理方法上的投入推動著該領域的發展。

本次拜會蔡院士安排在東京近郊群馬縣藤岡市川端家園與參訪團進行交流，蔡院士認為相較於傳統電腦，量子電腦在處理速度和解決複雜問題的能力方面具有顯著的優勢，他強調量子電腦能夠同時探索多種可能性並處理更多資訊。蔡院士也認識到早期超導量子位元在穩定性方面面臨的挑戰，但在延長相干時間方面已經取得了顯著的進展。參訪團成員分別向蔡院士請益我國在量子電腦相關科技發展未來走向，也洽談他回臺指導超導量子電腦核心技術的開發事宜。蔡院士也答應在今年下半年回臺灣訪問。



圖 3. 蔡兆申院士（左三）與賴處長（左二）及參訪團成員合影

伍、心得及建議

此次拜訪日本的理研-富士通量子電腦研發中心及拜訪東京理科大学重量級量子科技學者受益良多，詳細如下：

一、參訪理研-富士通量子電腦研發中心。

富士通針對量子計算問題，開發出結合量子運算技術與高效能運算技術（下稱 HPC）的自動混合運算技術。他們設計 AI 能根據設定的計算時間、運算精度與成本等條件，自動選擇最佳計算機運算。此次參訪由富士通量子研究所所長佐藤博士帶領的四人團隊報告富士通與理研中心針對超導量子電腦開發的時程與進度及 HPC-QC 混合式運算可能的應用領域等，該機構與大學研究中心的合作模式，值得我國未來推動量子產業產學合作的參考。

從 2023 年 3 月日本首台超導量子電腦的問世到同年 10 月 64 位元系統的成功開發，如此快速的進展，顯示出該合作在技術發展方面取得了顯著的加速。這兩個里程碑的時間如此接近，表明理研-富士通量子研究中心內部擁有高效且富有成效的研究和開發流程。這種快速的進步表明了強烈的承諾和對資源的有效利用。採用與理研早期量子電腦相似的垂直佈線方案，表明該合作在架構方法上具有戰略重點，這種方法在超導量子電腦的可擴展性方面很有前景，值得我國參考。

另外理研與富士通開發的混合平台的開發，也突顯了量子計算的現狀，在這個階段，模擬器在演算法開發、錯誤校正研究以及彌合通往容錯量子計算的差距方面發揮著至關重要的作用。物理量子電腦與模擬器的明確結合是因為目前量子硬體有其侷限性。模擬器由於沒有錯誤，使研究人員能夠在受控環境

中測試和完善量子演算法和錯誤校正技術，然後再將其部署到有雜訊的量子硬體上。這種混合方法對於推動實用量子計算的進展至關重要。這種平台的雲端架構表明了一種策略，可在使更廣泛的用戶（包括公司和研究機構）更容易獲得量子計算資源，從而促進合作並加速對實際應用的探索。通過提供對量子電腦和模擬器的遠端存取，將在普及對這些先進計算資源的存取，鼓勵創新和在各個領域開發新的量子應用。

對於世界目前量子電腦的最新發展(截至 2025 年 1 月)根據本次參訪以及返臺後蒐集的資料，整理出以下表格

倡議/組織	量子位元數(最高)	主要技術	主要優勢/重點	商業化情況/展望
理研-富士通量子研究中心	64	超導量子位元	混合平台、高精度量子化學計算、垂直佈線可擴展性	富士通已推出商業量子電腦系統，並提供混合雲平台。目標是 1000 個量子位元。
IBM Quantum	127	超導量子位元	量子位元數量領先、廣泛的軟體和雲端服務	提供雲端量子計算服務，目標是到 2023 年實現 1000 個量子位元（雖未達成，但仍在推進）。
Google Quantum AI	53	超導量子位元	曾宣稱實現量子霸權、在錯誤校正方面有進展	專注於研究，並在錯誤校正方面取得重要突破。

二、 拜訪東京理科學重量級量子科技學者蔡兆申

蔡兆申院士是超導量子電腦先驅，雖然年屆七十，在超導量子位元設計仍有諸多構想，其實驗室在日本東京理科學和理研。目前蔡兆申院士與我國超導量子電腦發展有密切關係，也是本

次拜訪的重點之一。為加強與蔡教授的合作，這次拜訪也正式邀請蔡教授申請國內的玉山學者，希望蔡教授能每年在台停留三個月，一方面給予指導量子推動計畫的研究方向，另一方面也能參與培育臺灣量子科技的高階人才。