

原子能科技民生應用發展策略藍圖

(111 年至 114 年)

善用原子能技術，提升產業價值，促進永續發展



行政院原子能委員會

行政院 111 年 4 月 7 日
院臺科字第 1110003185 號函備查

目 次

目 次.....	I
圖目次.....	III
表目次.....	V
第一章 前言.....	1
第二章 國際趨勢	3
第一節 國際原子能總署	3
第二節 美國	6
第三節 歐盟	10
第四節 中國大陸	14
第五節 日本	18
第三章 民生應用重要議題及分析	22
第一節 健康與民生	24
第二節 能資源與環境	35
第三節 前瞻應用科技	38
第四節 產業經濟	57

第四章 原子能科研布局策略	65
第一節 原子能人才培育	67
第二節 環境永續及產業加值	68
附錄、原子能科技民生應用各領域議題形成流程	73

圖目次

圖 2-1 IAEA 推動聯合國永續發展目標	3
圖 2-2 日本 2015 年原子能技術民生應用及市場規模案例	19
圖 2-3 日本輻射應用協會所盤點之原子能於民生應用之技術	20
圖 3-1 促進社會經濟發展的策略與科研布局（108 至 111 年）	23
圖 3-2 全球診斷及治療用途之同位素需求	25
圖 3-3 台灣 SPECT 及 PET 檢查次數統計	28
圖 3-4 植物育種市場(2018 至 2023 年)	32
圖 3-5 量子計算應用全球市場推估	42
圖 3-6 量子計算應用全球市場 2019 產業別占比	43
圖 3-7 中子檢測應用全球市場 2019 各產業別占比	46
圖 3-8 日本中子源設施分佈	48
圖 3-9 日本兼具照相用途的中子源設施分佈	48
圖 3-10 低軌衛星之應用及成長態勢	52
圖 3-11 立方衛星各項子系統之全球市場規模	52
圖 3-12 我國半導體產業鏈	60
圖 3-13 全球半導體設備市場趨勢	61
圖 3-14 半導體微影技術發展歷程	63

圖 4-1 原子能科技民生應用科研布局策略.....	66
圖 4-2 善用原子能技術實踐聯合國永續發展目標.....	69
圖 4-3 運用原子能技術提升六大核心戰略產業價值.....	70

表目次

表 3-1 「精準放射醫療」領域之技術群組項目及排序	30
表 3-2 「糧食及農業」領域之技術群組及排序	34
表 3-3 「環境及水資源」領域之技術群組及排序	37
表 3-4 「量子科技」領域之技術群組及排序	45
表 3-5 「中子科技」領域之技術群組及排序	51
表 3-6 「太空科技」領域之技術群組及排序	56
表 3-7 「工業應用」領域之技術群組及排序	59
表 3-8 近年國內 IC 產業產值	61
表 3-9 「半導體製程」領域之技術群組及排序	64

第一章 前言

為拓展原子能科技民生應用，妥善運用原子能及其衍生技術跨領域研究提升產業附加價值，以增進社會福祉並厚植國家科技能量，實踐聯合國 2030 年「永續發展目標」(Sustainable Development Goals; SDGs)。行政院原子能委員會配合國家整體發展策略，盤點各項原子能技術，借鏡國際原子能科技發展趨勢，並徵詢專家學者意見，探討國內原子能技術產業應用潛力，在政府「科技發展策略藍圖」的基礎上，評析符合國情的原子能科技民生應用發展方向，提出「原子能科技民生應用發展策略藍圖」，做為未來推動國內原子能科技發展之指導方針。鑒於原子能科技民生應用範圍甚廣，本策略藍圖著重原子能技術於醫療、農業、工業、環境及前瞻科技等民生議題發展，未涉及原子能於發電應用之核能安全及核後端產業等核能政策範疇。

本策略藍圖將原子能科技民生應用之議題分為：「健康與民生」、「能資源與環境」、「前瞻應用科技」與「產業經濟」4 大面向，共有 8 大領域：「精準放射醫療」、「糧食和農業」、「環境與水資源」、「量子科技」、「中子科技」、「太空科技」、「工業應用」及「半導體製程」，包含 45 項技術項目，以支持提升政府「六大核心戰略產業」價值，並推動聯合國 9 項永續發展目標，部分技術項目雖受限國內市場及特殊

性較難產業化，但仍需國家投入穩定資源強化相關基礎設施、人才培育及關鍵技術建立，以因應國際競爭及貿易保護政策下，維持國內相當自主能力。

第二章 國際趨勢

第一節 國際原子能總署

國際原子能總署(International Atomic Energy Agency, IAEA)近年來積極推廣原子能科技和平用途，參與解決人類面臨的問題，支持各國實踐聯合國 17 項永續發展目標(Sustainable Development Goals, SDGs)，包含運用原子能技術促進和實踐在能源、人類健康、糧食生產、水資源管理及環境保護所涉 9 項目標¹（圖 2-1）。



圖 2-1 IAEA 推動聯合國永續發展目標

資料來源：IAEA 網站

IAEA 將原子能在民生的應用上劃分為「糧食和農業」、「人類健康」及「放射性同位素和輻射技術」議題²。在「糧食和農業」方面，

¹ 參見 IAEA 網站，<https://www.iaea.org>。

² IAEA, Nuclear Technology Review 2020, IAEA-GC(64)/INF/2.

在 2050 年氣候變遷計畫中，預測節肢物種入侵的發生將平均增加 18%，物種入侵的擴大不僅是植物害蟲，還有蟲媒傳染病(vector-borne diseases)，影響不僅是傳染媒介的時空分布和種群動態，更加速了其生命週期，包括寄生蟲的生命週期、傳播方式和傳播途徑等。IAEA 應用原子能技術加強昆蟲不育技術，以作為蟲害綜合治理的方案；而在整個食品生產鏈中，輻射照射技術可以幫助保護食物的品質，延長其保存期限以確保食品安全，其它如穩定同位素和微量元素分析、磁共振波譜和質譜分析等技術，除可用於驗證食品產地，支援食品追蹤系統的技術建置外，亦可用於監測溫室氣體排放、評估海水酸化及追蹤污染物傳輸等氣候變遷及環境之影響，據此擬訂水資源管理、環境保護及農業改善對策。

在「人類健康」方面，原子能技術已廣泛應用於醫學上，包含核子醫學、放射診斷、放射治療相關技術及設備建立，在診斷和治療各種疾病（尤其是癌症和心血管疾病等非傳染性疾病）相當重要，亦使用輻射照射對於手套和注射器之類的醫療用品進行消毒，另外同位素示蹤技術也使用在診斷和防治營養不良，並且原子能技術及其衍生技術還可應用於傳染性疾病的早期預警、健康危害管理及風險降低，包括伊波拉病毒、登革熱等傳染病。

在「放射性同位素和輻射技術」方面，原子能科技可以使工業產品更安全，提高品質及附加價值，還可以提高工業生產率，使工業流程更有效率、更環保且更具成本效益。在輻射照射技術應用部分，以電子束或加馬射線等對於產品進行消毒、延長保存期限和修復歷史古文物，以及清除工業廢水和空氣中的污染物，亦可用於修飾材料以提高其品質和使用壽命，例如創建新的材料使電纜具有耐火性、生物可分解的食品包裝物和用於治療傷口的水凝膠藥物，以及半導體製程上運用 X 光、電子束、離子束等進行晶片表面圖案化等；在同位素示蹤技術應用部分，可用於診斷和改善工業製程，或用於追蹤沿海地區因施工、疏濬或傾倒造成的沉積物的移動及分布；在非破壞檢測部分，使用 X 光、加馬射線或中子之工業照相技術，可無損的檢測材料的裂縫和缺陷，以確保材料（如飛機、天然氣和石化管線）的質量和完整性，或在天然災害後驗證建築物及橋樑的安全性。

第二節 美國

美國在原子能技術應用上成熟且多元，除核能發電外，亦包含醫學應用、學術及科學研究、工業應用³，在醫學應用部分，包含放射診療及核子醫學，平均每 10 名美國人就有 7 名接受 X 光診斷或放射治療，美國醫院及放射中心每年約執行 1,000 萬例核子醫學相關手術；在學術及科學研究部分，包含運用同位素技術用追蹤環境污染物經由大氣及水域之傳輸路徑研究，水資源、土壤及營養學管理，以及考古學所用之碳-14 定年法等；在工業應用部分，包含二氧化硫和氮氧化物之工業廢氣處理、非破壞檢測、材料改良等，此外，原子能技術在農業、太空探索、文資保存等領域亦有相當廣泛之應用⁴，為當代社會不可或缺之重要技術，美國顧問公司曾在 2020 年針對 13 項主要原子能技術（非發電）應用相關市場產值進行分析（詳如表 2-1），其預估每年全球總產值超過 5,000 億美元，並且正在迅速增長⁵。

³ 參見美國核管會網站。

<https://www.nrc.gov/about-nrc/radiation/around-us/uses-radiation.html>

⁴ 參見美洲核能協會網站。

<https://www.ans.org/nuclear/radiation/uses/>

⁵ Roger H. Bezdek, Global Market for Radiation Applications, Jan. 2020.

https://www.researchgate.net/publication/340959805_Global_Market_for_Radiation_Applications

表 2-1 全球主要輻射應用市場規模

市場	全球產值	年均複合成長率 (CAGR)
食品照射	2.5 億美元	5%
可發生游離輻射設備	400 億美元 (醫學：320 億美元 工業：60 億美元 研究：20 億美元)	5%
磁共振造影導引放射治療	3 億美元	20%
醫用 X 光防護玻璃	3.5 億美元	2%
醫學診斷及放射藥物	60 億美元	9%
輻射固化產品	85 億美元	7%
輻射偵測	300 億美元	4%
輻射劑量管理	2.5 億美元	14%
抗輻射電子元件	7 億美元	4%
輻射防護與屏蔽	0.6 億美元	4%
放射藥物及治療	170 億美元	9%
放射治療	70 億美元	7%
兆赫茲設備及系統 (防恐及保安)	1.7 億美元	31%

資料來源：Roger H. Bezdek (2020)

美國政府 2021 年 6 月針對半導體製造及先進封裝、大容量電池、關鍵礦物及材料、藥物和原料藥等 4 項關鍵供應鏈提出檢討報告⁶，全球半導體製造市場雖集中於亞太地區，但在半導體設備市場主要仍

⁶ The White House, Building Resilient Supply Chains, Revitalizing American Manufacturing, And Fostering Broad-Based Growth, 100-Day Reviews under Executive Order 14017, June 2021.

由美國、日本及荷蘭等國主導，與原子能技術較為相關之微影光源、離子佈植、電漿蝕刻等設備，在關鍵技術上美國仍具領導地位。此外，在半導體測試部分，用於測試晶片單事件效應(Single Event Effects; SEE)抗輻射能力之基礎設施，美國在產生足夠離子種類和能量以滿足 SEE 測試需求的離子束加速器實驗室不到 6 個，可能無法滿足未來太空任務及其產業發展需求。

美國能源部 17 個國家實驗室體系（如圖 2-2）為其重要科研支柱，擁有加速器、反應器、高能量雷射等先進核設施，這些實驗室多以政府所有，委外營運的方式管理，成立 75 年來共獲得 118 項諾貝爾獎，並發現週期表上的 22 項元素⁷。這些實驗室因應國家科研任務需求，作為技術科學研究銜接產業應用之中介角色，並採用跨領域合作的方式面對龐雜的研發挑戰，以將基礎科學轉化為產業創新，如 Lawrence Berkeley、Lawrence Livermore 及 Sandia 國家實驗室於 1997 年與民間半導體財團 EUV LLC 合作開發以雷射電漿產生極紫外線(EUV)光源之原型機，即為未來半導體 EUV 微影製程商業化奠定良好基礎⁸。

⁷ U.S. Department of Energy, The State of the DOE National Laboratories: 2020 Edition.

⁸ 參見美國 Sandia 國家實驗室網站。

<https://www.sandia.gov/media/NewsRel/NR2001/euvlight.htm>

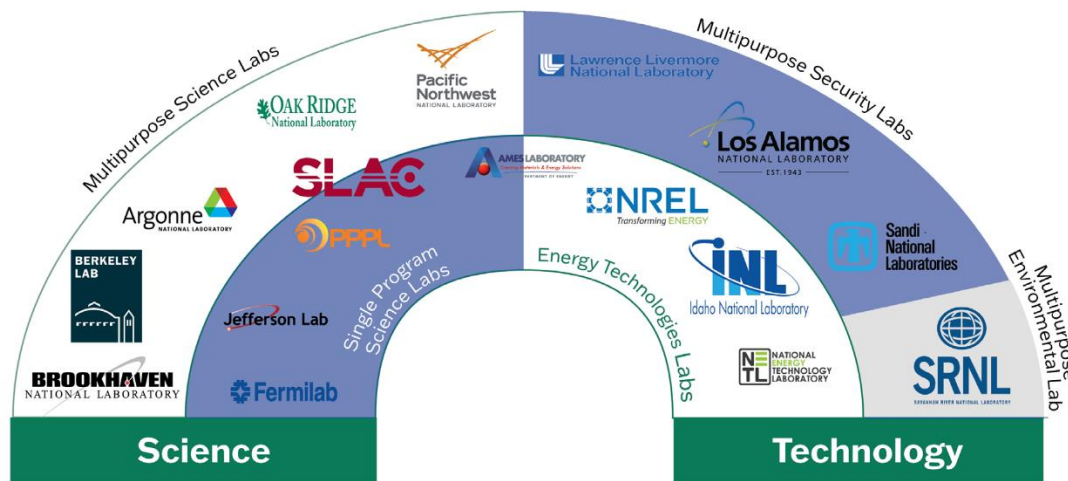


圖 2-2 美國能源部國家實驗室任務體系

資料來源：美國能源部國家實驗室 2020 年報

IAEA 在 2010 年制定了原子能和平運用倡議(Peaceful Uses Initiative; PUI)，以籌集成員國捐款支持 IAEA 推動人類健康、水資源管理、糧食安全、環境保護、核能安全及核電基礎設施發展。迄今美國已向 PUI 捐款超過 1 億美元，其中，約 790 萬美元用於強化癌症診斷及治療能力，約 430 萬美元用於改善全球水資源短缺，約 840 萬美元用於動物疾病防治和生產力提升，約 600 萬美元用於提高作物產量、延長糧食保存能力和蟲害去除，約 790 萬美元用於海洋酸化及問題改善等⁹。此外，美國能源部 Idaho 及 Oak Ridge 國家實驗室與 IAEA 互為研究用反應器夥伴關係¹⁰。

⁹ 參見美國國務院網站。

<https://www.state.gov/peaceful-uses-initiative/>

¹⁰ 參見國際原子能總署網站。

<https://www.iaea.org/about/partnerships/international-centres-based-on-research-reactors-icerrs>

第三節 歐盟

歐盟將原子能科技民生(非發電)應用依市場劃分為「醫療健康」、「工業應用」及「科學研究」3大類¹¹，詳如圖 2-3 所示，相關民生應用多以工具或設備型式，結合其他技術領域廣泛應用於產業，以提高產品及服務之附加價值，對於歐盟國家經濟成長率、高階工作及創新具有相當之影響力。在「醫療健康」方面，包含放射影像診斷、放射治療及核醫藥物，預估其設備、軟體、服務產值加總，約達 50 億歐元(全球 283 億歐元)；在「工業應用」方面，輻射(帶電粒子、X 光、加馬輻射、中子)廣泛應用於醫用消毒、食品檢疫、工業及半導體製造、非破壞檢測及環境偵測使用，僅工業輻射設備全球產值即超過 50 億歐元，但主要市場由美國及亞洲地區所主導；在「科學研究」方面，著重光源、加速器、醫學、中子源及核融合相關研究，歐盟每年對於關鍵基礎科研設施之投入約 4 億歐元(全球約 15 億歐元)。

為了穩定歐洲國家放射性同位素藥物的供應，歐洲藥品管理局和歐盟委員會採取了許多策略，以找出可能的中長期解決方案。因此，歐洲委員會和利益相關者於 2012 年 6 月成立了歐洲醫用放射性同位素供應觀察站，旨在將所有相關訊息彙整到歐盟機構和國家政府的決

¹¹ European Study on Medical, Industrial and Research Applications of Nuclear and Radiation Technology. EU.
https://ec.europa.eu/energy/studies_main/final_studieseuropean-study-medical-industrial-and-research-applications-nuclear-and_en?redir=1

策者中，以協助制定策略和計畫。該觀察站遵循由醫學放射性同位素高階小組所建立的 OECD/NEA 原則，並在歐盟中著重於實現的具體性。歐洲觀察站有四個總體戰略目標：支援整個歐盟的 Mo-99/Tc-99m 安全供應、確保 Mo-99/Tc-99m 的供應議題能有很高的政治能見度、鼓勵建立永續經濟結構的供應鏈，以及建立對供應鏈和產能的定期審查¹²。

歐盟亦使用穩定金屬同位素來識別微粒污染的來源¹³，多接收器感應耦合電漿質譜儀(multi-collector inductively-coupled-plasma mass spectrometer, MC-ICP-MS)使用穩定同位素檢測金屬濃度，使科學家能夠研究銅和鋅等污染金屬的環境化學，該技術可用於識別和了解微粒污染在大氣中的運輸過程。ISOTRACE(金屬穩定同位素作為大氣環境中的污染物示蹤劑)計畫使用穩定同位素比率來追蹤影響城市空氣品質的污染物金屬來源，目的是能對歐洲主要城市中，原始材料的同位素分離和大氣微粒中的同位素變化所隱藏機制能有更好理解。研究人員還收集了倫敦和巴塞隆納在不同時期和不同高度的微顆粒物，結果說明了在不同的城市之間以及一年中的不同時間，主要鋅源會有所不同；因此，每個城市都需要考慮特定時段內獨特的來源評估和減排

¹² European observatory of the supply of medical radioisotopes. EU.

https://ec.europa.eu/euratom/observatory_radioisotopes.html

¹³ Stable Isotopes of Metals as Pollutant Tracers in the Atmospheric Environment. EU.

<https://cordis.europa.eu/article/id/182928-stable-metal-isotopes-trace-atmospheric-particulates>

策略。

歐盟國家原子能科研機構在尖端科技研發上扮演關鍵角色，如歐盟聯合研究中心(JRC)、德國於利希研究中心(Forschungszentrum Jülich)、法國原子能與替代能源署(CEA)、英國原子能署(UKAEA)等，各機構運用其核設施進行相關基礎科學探討、環境保護及工業應用研究，並與政府行政任務緊密結合，扮演原子能科技發展公私協力、軍民共用等制度之重要推手¹⁴。

歐盟理事會 2019 年 5 月認可核能及輻射技術在醫學、糧食及農業、環境、工業、材料、太空及文化遺產等非發電應用扮演重要角色¹⁵，除請歐盟執委會支持相關領域研究，提出包含穩定歐盟同位素藥物供需、改善病患及醫事人員輻射防護及安全、促進同位素、核醫藥物及游離輻射之醫學創新應用等目的之行動計畫，並鼓勵成員國持續與 IAEA、聯合國糧食及農業組織(FAO)及世界衛生組織(WHO)等國際組織之原子能科技非發電應用合作及推廣，特別在於支持發展中國家實現聯合國永續發展目標(SDGs)上，諸如營養及健康、糧食及農業、環境及水資源、工業創新等領域。

¹⁴ 翁曉玲、鍾秉正、紀和均，「核能研究機關改制行政法人之法制研究：組織定位及監理制度之研析」研究報告，110 年。

¹⁵ 參見歐盟理事會網站。

<https://www.consilium.europa.eu/en/press/press-releases/2019/06/06/the-council-underlines-role-of-non-power-nuclear-technologies/>

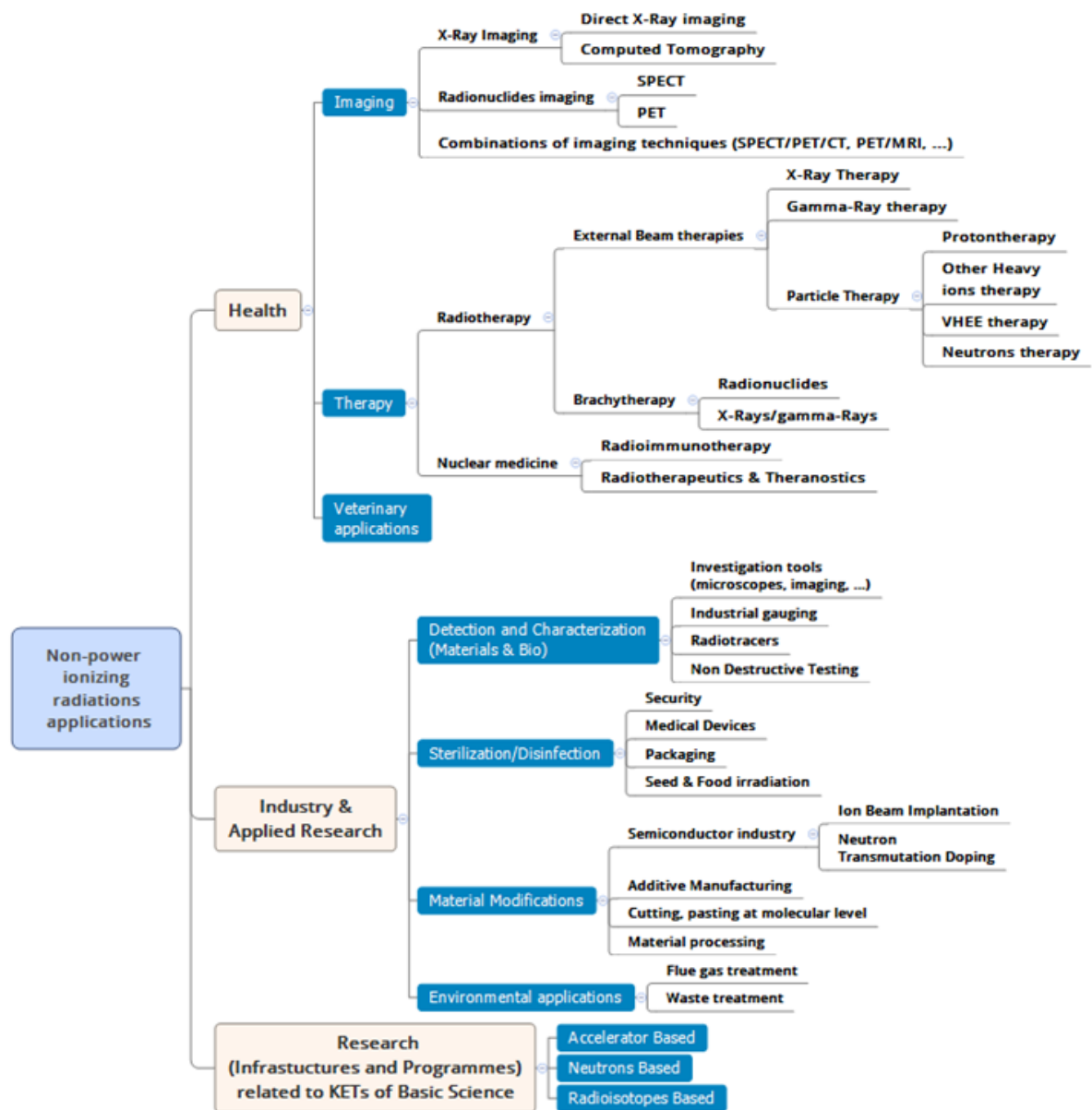


圖 2-3 歐盟原子能於民生應用之技術

資料來源：NucAdvisor / Technopolis Group (2018)

第四節 中國大陸

中國大陸將原子能科技民生應用劃分為工業、農業、醫療、公共安全及環境保護領域¹⁶，工業領域方面，包含運用輻射照射進行滅菌與加工、高分子材料改質以及非破壞檢測等；農業領域方面，包含植物誘變育種、農產品輻照加工、農業同位素示蹤、昆蟲輻射不孕技術應用等；醫療領域方面，包含放射影像醫學、核子醫學及放射治療等；公共安全領域方面，主要在於利用 X 射線、加速器及射源成像技術於機場及海關進行貨櫃、車輛、爆炸物和行李檢查，以防制各類恐怖攻擊及犯罪活動；在環境保護領域方面，主要運用電子束和 γ 射線為主的輻照技術進行廢氣、廢水及污泥處理，以有效降解污染物毒性並避免二次污染物之產生。按中國大陸於 2015-2016 年針對原子能科技民生應用之全國性調查¹⁷，全國計 400 個以上相關機構及公司從事原子能技術相關研發，並產出 10 萬個工作機會，在民生應用領域上以工業 55% 為最大宗，其次分別為醫療領域 18%，農業領域 17%，公共安全領域 5%，其他應用 5%，迄 2016 年底總產值逾 3 千億人民幣，年複合成長率達 20%，且在 GDP 占比上僅 0.4%，其相較美國 3-4%，

¹⁶ 參見中國國家原子能機構網站。

<http://www.caea.gov.cn/n6758882/n6758897/c6792702/content.html>

¹⁷ Lixin Shen, "Status and Prospect of Application of Radiation Science and Technology in China: a national report," IAEA ICARST 2017.

<https://www.iaea.org/events/icarst-2017/presentations>

日本、歐盟 2-3%GDP 占比，顯示未來成長幅度可期。

中國大陸將近有 80 個以上研究機構及大學從事原子能科技民生應用研發，並有加速器、研究用反應器及光源設施等重要基礎建設，以驅動相關技術產業化及民生應用，除在可發生游離輻射設備及鈷-60 射源已有自產及外銷能力，在醫院放射治療及診斷上亦有顯著成長，每年約 2,100 萬人次接受核子醫學影像檢查，輻射加工農產品占比已達全世界總量半數，在工業環保應用上，2020 年已在浙江金華落成世界最大電子束廢水處理設施，日處理 3,000 萬升紡織廢水，達 70% 再利用率，每年可節省 45 億升水¹⁸，在 COVID-19 疫情期間，中國大陸亦運用原子能技術於醫用防護物資、冷鍊食品外包裝之滅菌消毒，以及醫療廢棄物及廢水處理等。

中國大陸在 2021 年提出「十四五規劃」¹⁹，在科研創新部分聚焦人工智慧、量子通訊、積體電路、腦神經科學、生物科技、航太科技等戰略性前瞻科技研究，並強化 X 射線自由電子雷射、高能量同步輻射、加速器驅動次臨界系統、高強度重離子加速器等科研基礎設施建設，以建構利於基礎研究之良好科研生態。另因應美國在半導體關鍵技術「卡脖子」之貿易保護措施，將強化晶片設計工具、半導體設備

¹⁸ 參見國際原子能總署網站。

<https://www.iaea.org/newscenter/news/started-with-iaea-support-chinas-electron-beam-industry-opens-worlds-largest-wastewater-treatment-facility>

¹⁹ 中華人民共和國國民經濟和社會發展第四個五年規劃和 2035 年遠景目標大綱。

及材料之自主能力開發，並布局絕緣閘雙極電晶體(IGBT)、微機電系統(MEMS)，以及碳化矽(SiC)及氮化鎵(GaN)等次世代半導體發展。

中國原子能科學研究院為中國大陸主要原子能科研機構，隸屬中國核工業集團公司，受中國核工業集團公司與中國科學院雙重領導，其組織架構如圖 2-4，是中國大陸原子能科學技術基礎性、綜合性科研基地，素有大陸核工業「搖籃」與「老母雞」的美譽，現有職員 4,200 餘人，其中高級科研與工程技術人員 1,300 餘人²⁰。

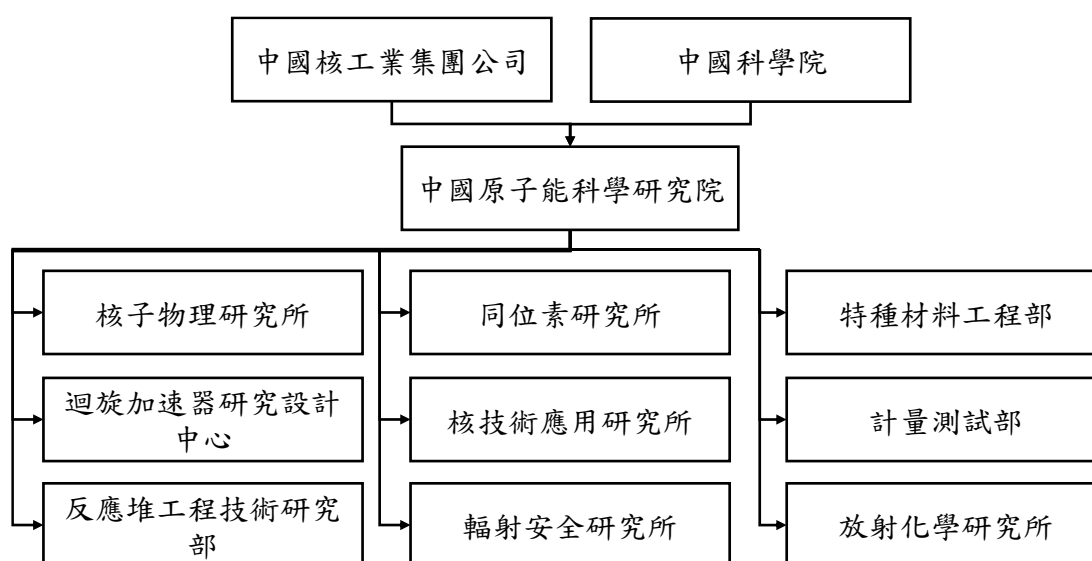


圖 2-4 中國原子能科學研究院組織架構

資料來源：蔡璞（110 年）²¹

²⁰ 參見中國原子能科學研究院網站。

http://www.ciae.ac.cn/subpage/gaikuang_1.htm

²¹ 蔡璞、丁鯤，國際原子能科研機構發展趨勢及技術布局研究，行政院原子能委員會核能研究所委託研究報告，110 年。

中國大陸近年積極與 IAEA 發展夥伴關係，除共同設立原子能技術昆蟲不育中心，與發展中國家分享蚊媒傳染病防治的知識和經驗外，亦與歐洲國家積極建立原子能技術在糧食及農業應用、生物技術、作物種原交換等領域之合作關係²²。中國大陸 2021 年與 IAEA 簽署為期 5 年（2021 至 2026 年）之諒解備忘錄，以支持發展中國家運用原子能技術實現聯合國永續發展目標²³，其包含支持 IAEA「核技術應對塑膠污染倡議」(NUTEC Plastics)和「人畜共患疾病綜合行動」(ZODIAC)等倡議之實施。中國大陸在 IAEA 第 65 屆會員國大會亦宣示將拓展原子能技術應用，協助發展中國家解決糧食安全、衛生健康、環境治理等民生問題，以實踐聯合國 2030 年永續發展目標²⁴。

²² 參見中國農業科學院網站。

<https://gh.caas.cn/hzdt/122482.htm>

²³ 參見國際原子能總署網站。

<https://www.iaea.org/newscenter/news/iaea-and-chinas-development-agency-sign-groundbreaking-agreement-to-support-developing-countries>

²⁴ 參見中國國家原子能機構網站。

<http://www.caca.gov.cn/n6759305/n6759320/c6812493/content.html>

第五節 日本

日本原子能科技民生應用主要分為工業、醫療、農業領域²⁵，工業領域包含材料加工、檢測、滅菌等，醫療領域包含核醫藥物診療、硼中子捕獲治療(BNCT)、粒子線治療等，農業領域包含品種改良、食品照射、蟲害防治等，在醫農工領域經濟規模已由 1997 年的 3 兆 5 千億日圓至 2015 年成長為 4 兆 3 千 7 百億日圓（成長率達 25%），日本內閣府原子力委員會在 2017 年以 2015 年之資料估算日本輻射利用之市場經濟規模²⁶，其調查基礎為以應用輻射所衍生的產品價值，如核子醫學診斷及治療之醫療支出、工業半導體、醫材利用輻射改質、滅菌等產品之出貨金額。調查結果如圖 2-5 所示，根據該報告，工業占 51%、醫療 44%、農業 5%，各領域使用輻射計算的產品及服務總市場規模 43,700 億日元，約 11,580 億新台幣（以 2015 年匯率 0.265 計算），工業領域較重要的產業包含半導體（占工業應用之 5 成以上）、醫材、醫療照射設備、輪胎、電線等。而相較 2005 年之結果，工業應用因半導體出貨額減少而略有縮減，而醫療應用則因核醫診斷及治療更普及而明顯成長，年複合成長率約 4%。

²⁵ 日本內閣府原子力委員會，日本原子力白書（令和 2 年度版），2020 年。

²⁶ 日本內閣府原子力委員會，放射線利用の經濟規模調査（平成 27 年度），2017 年。

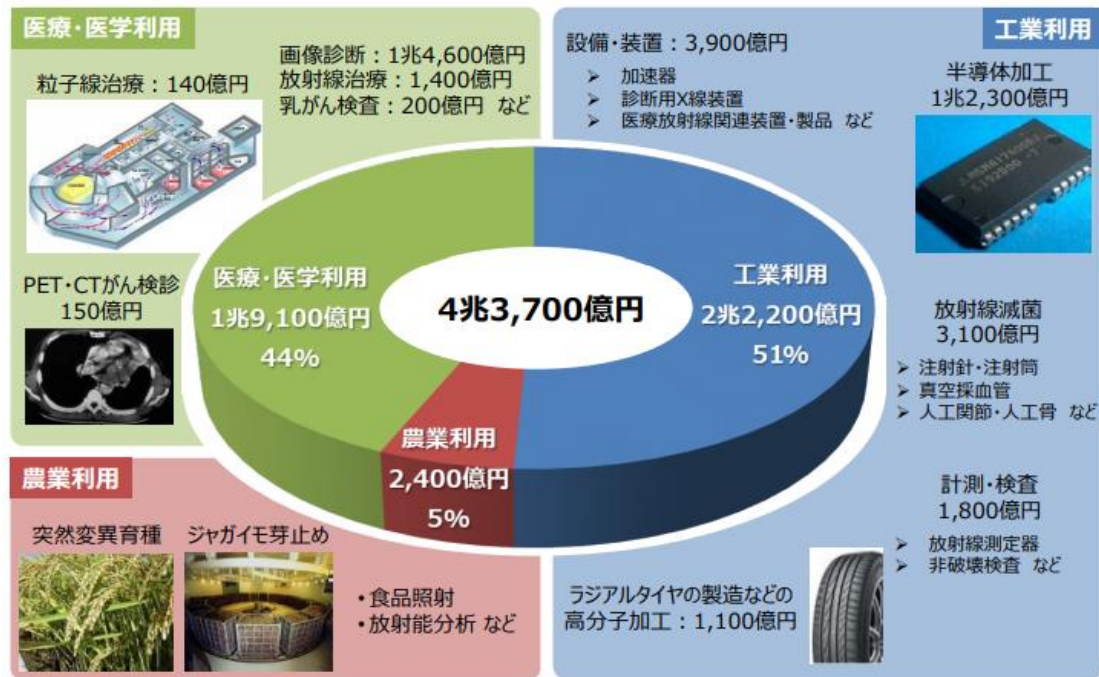


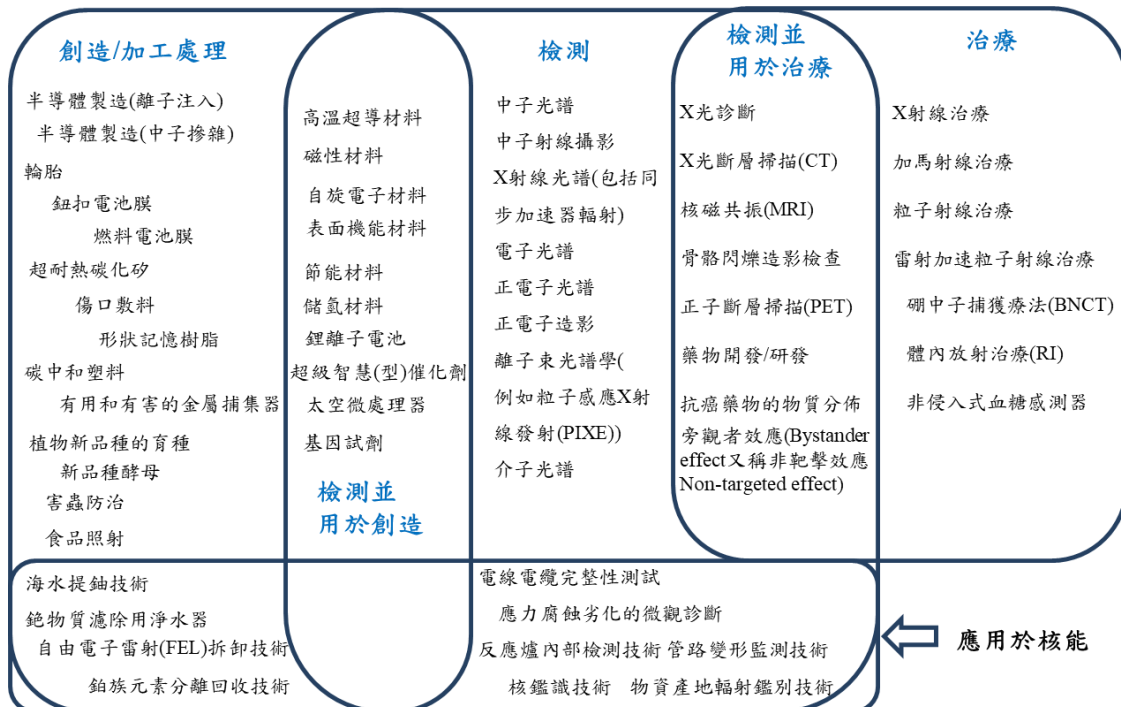
圖 2-5 日本 2015 年原子能技術民生應用及市場規模案例

資料來源：日本內閣府原子力委員會(2017)

日本輻射應用協會 2017 年發布輻射運用的經濟規模調查²⁷，其將原子能民生應用的領域劃分為發電、工業、醫學與醫療和農業，其中核能發電佔了 54%、工業應用 26%、醫學與醫療 17%、農業 3%，在工業應用中，以半導體產業為大宗，其次依序為高分子、設備、殺菌及計測/檢查，在醫學與醫療領域中，以診斷影像為主，其次依序為乳腺癌測試及正子斷層掃描儀(positron emission tomography; PET)檢查；在農業領域中，則有蟲害防治、食物輻照及誘變育種等。而日本輻射應用協會亦希望各技術領域能有創新的研究，包括以前從未設想

²⁷岡田漱平，量子ビーム科学・放射線利用の過去・現在・未来，放射線利用振興協会，2017 年 8 月。

的技術，盤點結果如圖 2-6 所示。



CT: computed tomography, MRI: magnetic resonance imaging, PET: positron emission tomography, BNCT: boron neutron capture therapy.

圖 2-6 日本輻射應用協會所盤點之原子能於民生應用之技術

資料來源：岡田漱平(2017)，核能研究所重繪

輻射及放射性同位素技術廣泛用於先進科學、工業、醫學、農業以及環境保護等領域，目前已經產生了可與核能發電相媲美的經濟規模，在科學研究上，隨著加速器技術的顯著進步，量子束（如中子束、同步輻射以及雷射等）技術已經成為創新的有力工具。未來，研發機構和大學將有計畫地運用既有成果，同時，為了進一步活用量子束等輻射及放射性同位素相關技術，研發基礎的強化（解決設備老舊的問

題和適當的人力運用)及人才培育亦備受重視。日本主要有兩個原子能科研機構及一個設施機構²⁸，分別是原子力研究開發機構(JAEA)與量子科學技術研究開發機構(QST)，以及高能加速器研究機構(KEK)，JAEA 專注於核電領域的相關研究，並汲取福島核電廠事故的經驗教訓，重新評估核電安全，QST 則專注於原子能科技的基礎研究與民生用途，包括量子束科學研究、放射醫學科技、核融合研究等工業創新應用，KEK 則為高能物理學與加速器科學的綜合研究機構，提供日本大學相關領域基礎研究所需共用設施。

日本政府認為原子能科技可在先進科技、工業應用和醫療保健等領域提高生活品質，並與實踐聯合國永續發展目標(SDGs)密切相關，除已於 2010 至 2018 年專案撥款 IAEA2,470 萬歐元，以解決國際上傳染病預防、癌症治療和農業生產力等緊急需求²⁹，日本量子科學技術研究開發機構(QST)、放射線曝露者醫療國際協力推進協議會(HICARE)亦與 IAEA 在人類健康議題上執行合作計畫³⁰，此外，日本亦透過亞洲核合作論壇(FNCA)經營亞太地區國家原子能科技醫學、農業、工業、環保應用之合作交流³¹。

²⁸ 蔡璵、丁鯤，國際原子能科研機構發展趨勢及技術布局研究，行政院原子能委員會核能研究所委託研究報告，110 年。

²⁹ 參見日本外務省網站。

https://www.mofa.go.jp/press/release/press4e_002241.html

³⁰ 參見 IAEA 網站。

<https://www.iaea.org/about/partnerships/collaborating-centres>

³¹ 參見亞洲核合作論壇網站，<https://www.fnca.mext.go.jp/>

第三章 民生應用重要議題及分析

配合總體國家科技發展政策規劃，在 108 至 111 年「科技發展策略藍圖」³²的基礎上(如圖 3-1 所示)，盱衡國際原子能科技發展趨勢，國內民生基本需求及產業發展優勢，綜觀當前國人關注的各項與科技政策相關之社會議題，分為「健康與民生」、「能資源與環境」、「前瞻應用科技」與「產業經濟」等面向：「健康與民生」強調完善醫療診斷及治療與農業永續及糧食安全，保障民眾生命安全；「能資源與環境」著重環境衛生及水資源管理，確保環境永續，且所有人都能獲得潔淨的水；「前瞻應用科技」重視新興科技崛起與科技研究及創新能力，以因應未來趨勢挑戰；「產業經濟」關注產業製程改善及價值提升，以帶領產業創新轉型，活絡經濟動能。

本章節針對上開議題擬定因應策略，藉由重要議題的辨識，盤點原子能科技於民生應用之技術群組，匯集各領域專家學者建言，研擬因應策略與措施，以打造國家競爭優勢，維持全球創新領先。

³² 科技部，科技發展策略藍圖（民國 108 年至 111 年），108 年 7 月 25 日。

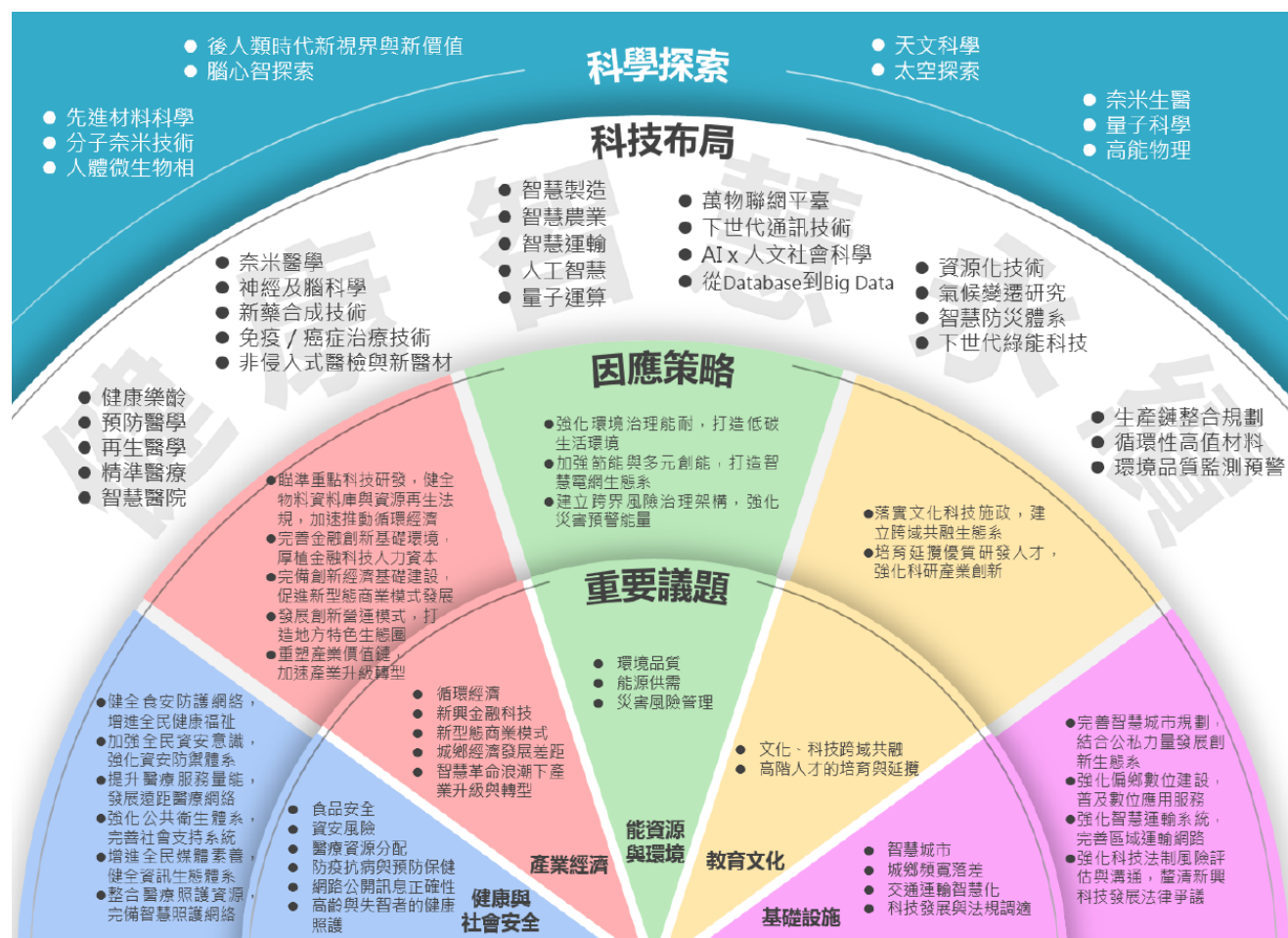


圖 3-1 促進社會經濟發展的策略與科研布局（108 至 111 年）

資料來源：科技部（108 年）

第一節 健康與民生

一、醫療

根據日本內閣府原子力委員會的研究²⁶，其 2015 年原子能於醫療應用的市場規模約 1.9 兆日元，若以日本 2015 年投入產出統計資料中估算³³，醫療相關產業(醫藥品及醫療保健)之總產值約 55.8 兆日元(約新台幣 15 兆元)，比例約占 3.5%，其中影像診斷(含牙科)、PET 及電腦斷層照影(computed tomography, CT)用於癌症檢查及乳癌檢查占醫療應用經濟規模的近 8 成。

由日本的經驗及我國國內之需求來看，不論是診斷及治療，所需要相應的核醫放射藥物/同位素開發及自產是值得我國優先投入的方向。參考 Mordor Intelligence³⁴及 BCC Research³⁵等國際報告分析之放射性同位素需求規模，大致分為下面 4 類(如圖 3-2)，診斷用途方面，包含單光子斷層掃描儀(single photo emission computed tomography, SPECT)和 PET 所需搭配之同位素，SPECT 使用的放射性醫用同位素占市場最大宗，PET 使用的放射性醫用同位素則次之，不過未來的成長速度也較快；治療用途方面， α 發射子(emitters)治療藥物或 β 發射

³³ 統計で見る日本，平成 27 年産業連関表取引基本表(生産者価格評価)，2015 年。

[https://www.e-stat.go.jp/stat-](https://www.e-stat.go.jp/stat-search/files?page=1&layout=datalist&toukei=00200603&tstat=000001130583&cycle=0&tclass1val=0)

[search/files?page=1&layout=datalist&toukei=00200603&tstat=000001130583&cycle=0&tclass1val=0](https://www.e-stat.go.jp/stat-search/files?page=1&layout=datalist&toukei=00200603&tstat=000001130583&cycle=0&tclass1val=0)

³⁴ Mordor Intelligence, Global Nuclear Medicine Radioisotopes Market (2020-2025), 2020.

³⁵ BCC Research, Radiotherapy, Radiopharmaceuticals and Nuclear Medicine: Global Markets, 2019.

子治療藥物市場規模雖然較診斷用途之市場小，但成長性都很高，2023 年 PET 使用之放射性同位素藥物之市場規模約是 2018 年的 1.8 至 2.3 倍之間，而治療用途的藥物也都在 2 倍左右。

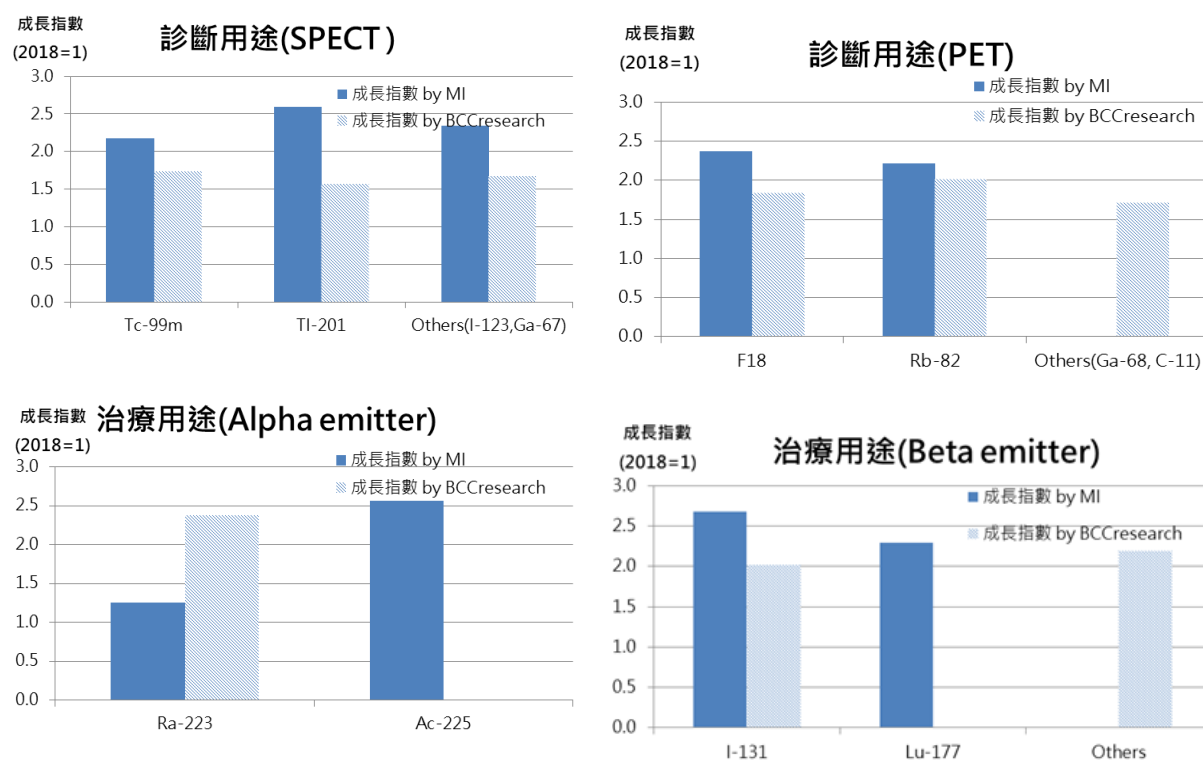


圖 3-2 全球診斷及治療用途之同位素需求

資料來源：Mordor Intelligence 及 BCC Research 國際報告，核能研究所重繪

日本的原子能技術、產業背景及人口結構、還有生活型態與我國相近，以下參考日本 2018 年對同位素使用之調查³⁶，觀察其對診斷及治療用途之研發投入方向，並作為我國之參考。從診斷的成長趨勢來

³⁶ 公益社団法人日本アイソトープ協会，アイソトープ利用の現状と課題，2018 年 12 月 11 日。
<http://www.aec.go.jp/jicst/NC/iinkai/teirei/siryo2018/siryo43/2.pdf>

看，日本 2007 年 SPECT 檢查次數占 7 成以上，但 PET 檢查件數則成長快速，10 年間約成長了 0.7 倍，至 2017 年有近 4 成是採 PET 檢查，因此 PET 使用的同位素造影劑需求隨之增加。另外從治療來看，日本的密封型放射性同位素用於治療攝護腺癌的需求最多，子宮頸癌、子宮內膜癌、腦血管疾病等也都有需求。而非密封型放射性同位素，則用於治療甲狀腺機能亢進及甲狀腺癌為主，占約 8 成，不過近年則有大量應用於攝護腺癌的骨轉移，占了約 3 成³⁷，主要原因可能在於攝護腺癌位居日本男性癌症第二高，國內需求明確。

若比較日本與我國 PET 及 SPECT 之年使用次數(如圖 3-3)，日本人口約是我國的 5 倍，日本 PET 使用次數則高於我國許多，是我國的 10 倍，顯示日本使用 PET 已形成趨勢，我國 PET 檢查次數較 10 年前成長了近 1 倍之多，但仍以 SPECT 為主流，而由日本之經驗可知，PET 未來之需求及所需的同位素成長相當可期。另外，我國前 10 大癌症也包含乳癌（女性）、肺癌、攝護腺癌、甲狀腺癌等，和日本核醫應用相近，且約有一半的癌症患者會接受放射性治療。不同於日本，我國肝癌人數在前五大之列，因此針對肝癌所需之核醫藥物(如氟-18 去氧葡萄糖)是肝癌 PET 造影最廣泛使用的核醫藥物³⁸，對國

³⁷ 公益社団法人日本アイソトープ協会，第 8 回全国核医学診療実態調査報告書，2018 年。
<https://www.jrias.or.jp/report/cat4/401.html>

³⁸ 曾玉琴、王美惠，開發肝病診斷與治療用核醫藥物之市場評估，核能研究所，2019 年。

內相對重要。

除了癌症檢測，臺灣地區老年人的比例已迅速上升，依據衛生福利部(民國 100 年)委託台灣失智症協會進行之失智症流行病學調查結果，以及內政部 108 年 12 月底人口統計資料估算：台灣 65 歲以上老人約 360 萬人，其中輕微認知障礙(mild cognitive impairment, MCI)有 65 萬人，失智症有 28 萬人，占 7.78%，也就是說 65 歲以上的老人約 13 人即有 1 位失智者³⁹。由此可見診斷失智症所需的診斷技術及同位素(如 F-18)具有市場潛力。及早佈局 PET 診斷所需之放射診斷藥物，以及目前市場需求大但國際尚未成熟、獨占之放射性治療藥物所需之同位素，可因應未來需求並使我國減少對進口核醫藥物的依賴程度，甚至可進一步供應鄰近亞洲國家之需求。

³⁹ 張剛瑋，核子醫學分子影像應用於阿茲海默症之診斷探討，能源資訊平台，2020 年。

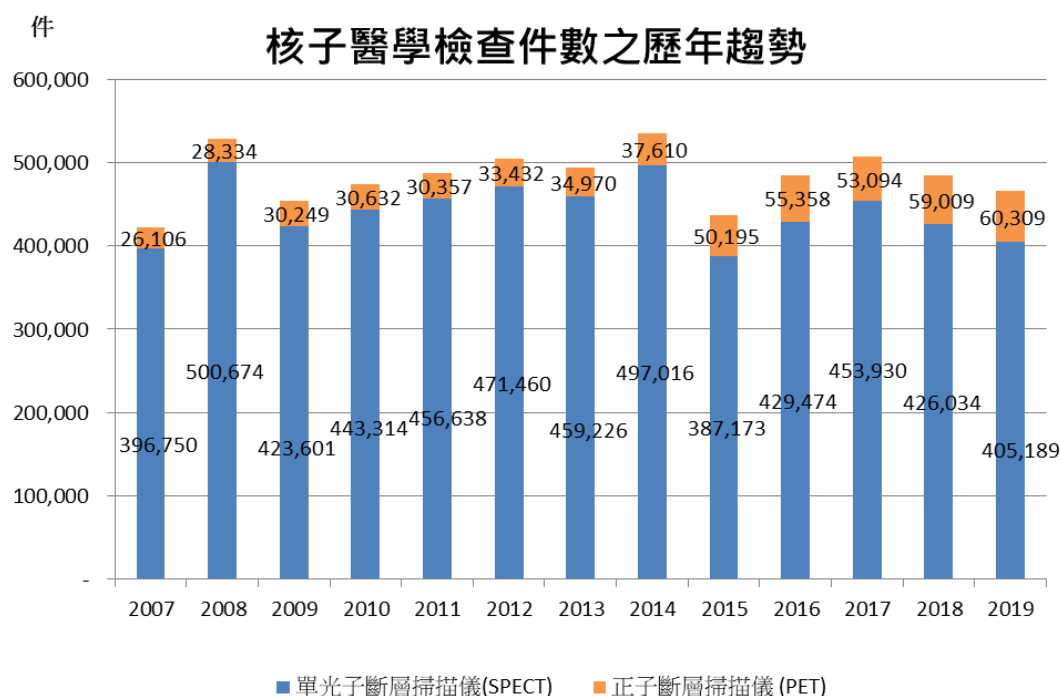


圖 3-3 台灣 SPECT 及 PET 檢查次數統計

資料來源：衛生福利部⁴⁰

「醫療」領域之技術群組項目及排序如表 3-1 所列，由於國內在「放射診斷藥物」及「放射治療藥物」的研發上，已累積一定能量，普遍認為未來應持續發展，故發展優先排序最高，且由於診斷重於治療，故應以放射診斷藥物研發為先，其次為放射治療藥物。由於藥物研製後，需經食品藥物管理署查驗登記，才能臨床試驗，其中需具藥物法規背景的專業人力協助，然相關人材較為缺乏。另外，有關 AI 應用在放射醫療影像，國內已有實際案例，而 AI 影像技術可用來評估劑量(dosimetry)的需求，或是結合機器學習或深度學習辨別出特定的腫瘤紋理，以對病患癒後提供相關資訊，但目前應用在臨床判讀的價

⁴⁰ 衛生福利部，108 年醫療機構現況及醫院醫療服務量統計，2019 年。

值較低。

根據行政院第十一次全國科學技術會議中的「議題二：科研與前瞻」，因應科技跳躍性發展，需要跨部會與跨域協作的科研布局，提出許多前瞻技術，其中在精準醫療(Precision Medicine)方面，國內在精準放射醫療之放射診斷/治療藥物研發上，已積累相當能量，在 109 年疫情期間核研所核醫製藥在穩定國內供藥上就發揮很大作用，配合國內更多迴旋加速器的規劃建置 (如中子、質子及重粒子等)，未來在藥物供給上勢必扮演更重要的角色。故配合我國未來科技政策的跨部會與跨域布局，精準放射醫療亦可視為值得發展的技術群組。

表 3-1 「精準放射醫療」領域之技術群組項目及排序

發展 優先 排序	技術群組項目	綜合建議
高	□ 放射診斷藥物研發 如：Dolacga 肝功能造影劑、Ga-68 同位素生產/孳生器、放射性與免疫/細胞合併療法開發、FAPI 標靶⁽¹⁾、Alpha-synuclein⁽²⁾ □ 放射治療藥物研發 如：Lu-177 藥物、標靶型的硼中子藥物⁽³⁾	1. 國內已累積一定的研究能量，且未來應持續發展。 2. 診斷重於治療，故建議以「放射診斷藥物研發技術」為先，其次為「放射治療藥物研發」。 3. Ga-68 同位素生產/孳生器未來市場需求大，對藥物研發至臨床試驗相當重要。 4. 國內市場有限，不建議發展醫療設備，應以核醫診斷及治療藥物為利基市場，俾利同時具備不可替代性及臨床需求性等優勢。 可能的困難： 藥物研製至臨床試驗，缺乏具藥物法規背景的專業人力協助。
中	● 碳-14 與分子影像平台應用於生技藥物開發 ● 輻射影像技術開發/AI 放射影像技術	1. 國內近幾年已建立相關技術，對國內未來生技產業、製藥及診斷等貢獻會愈來愈大。 2. AI 影像技術可用來評估劑量 (dosimetry) 的需求，或是結合機器學習或深度學習辨別出特定的腫瘤紋理，以對病患癒後提供相關資訊，但目前應用在臨床判讀的價值較低。
低	◆ 應用於核醫藥物創新開發	「AI 應用於核醫藥物創新開發」相較於「AI 放射影像技術」在臨床應用上目前較不具價值。

註：(1) FAPI: Fibroblast activation protein inhibitor (纖維母細胞活化蛋白抑制劑)

(2) Alpha-synuclein：α-突觸核蛋白(腦神經退化造影劑)

(3)由於目前核子反應器太少，導致標靶型的硼中子藥物產業價值有限，但如果政府願意投入資源研究，技術有所突破，對癌症治療會有顯著效果。

二、糧食及農業

IAEA 長期且持續投入原子能技術於糧食及農業上的民生應用，近年來與聯合國糧食和農業組織合作，利用昆蟲不育技術作為蟲害綜合治理方案的一部分，於 2018 年為塞內加爾(Senegal)的尼亞伊(Niayes)地區抑制采采蠅(tsetse fly)的工作提供了有益支助，此舉顯示透過原子能技術於蟲害防治的應用可有效降低糧食成本並提高產質；同年，IAEA 在防治作為登革熱(dengue)、基孔肯雅熱(chikungunya)、寨卡病毒(Zika virus)和黃熱病(yellow fever)傳播媒介埃及斑蚊和白線斑蚊等傳播疾病蚊蟲的不育技術方面取得了重要的研發進展，有助於抑制病媒蚊；同年，在茅利塔尼亞(Mauritania)和辛巴威(Zimbabwe)的貧困農村地區引入了與原子能技術相關的小規模滴灌技術，採用穩定同位素氮-15 和中子來測量土壤含水量，在這些乾旱地區建立最有效的施肥和用水方式，然後培訓當地專家和農民使用該技術及安裝適合當地的小型滴灌系統。另 IAEA 亦投入解決糧食作物對抗氣候變化的研究，於水稻和高粱耐熱、耐旱性方面取得了重大進展，改進了突變育種綜合篩選技術，以開發適應氣候變化的智慧型作物品種⁴¹，農作物育種的市場規模如圖 3-4 所示⁴²。

⁴¹ IAEA Annual Report 2018, IAEA-GC(63)/5.

⁴² MarketsandMarkets, Plant Breeding and Crispr Plants Market (Global Forecast to 2023), 2018.

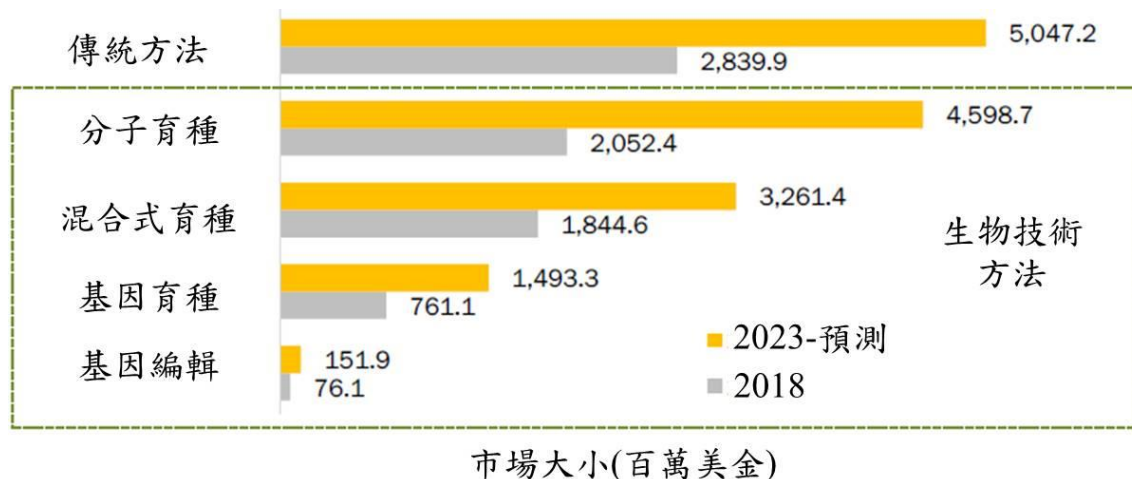


圖 3-4 植物育種市場(2018 至 2023 年)

註：傳統育種技術是指開發新的性狀和種子，然而隨著農業生物技術的出現，植物育種者目前正在探索雜交、分子育種和基因工程。

資料來源：MarketsandMarkets (2018)，核能研究所重繪

澳洲亦運用輻射照射技術，以避免植物有害生物隨農產品貿易傳播，危及農業生產環境安全。以鮮果為例，出口前的檢疫以低溫、蒸熱及溫湯處理後，往往會造成果實傷害，影響果實品質或儲架壽命，為解決此問題，可應用低劑量輻射照射處理新鮮果實，滅除感染於新鮮果實之有害生物，亦不影響果實品質及儲架壽命，且無輻射殘留問題。2011 年澳洲認可輻射照射為針對果實蠅有效檢疫處理方式之一，同時亦為國際規範認可 150Gy 可殺滅果實蠅科之檢疫措施，主要原理為利用輻射照射害蟲，干擾其正常細胞功能，使其發生延緩或停滯

新陳代謝作用，無法發育及羽化，達到殺蟲目的⁴³。

「糧食及農業」領域的技術群組項目及排序如表 3-2 所列，由於我國精緻農業相當仰賴出口，而利用輻射照射控制蟲害防治已成功應用於高價水果，且產業鏈有一定規模及技術可行，故技術群組「輻射照射用於蟲害防治」的發展優先排序最高，另在發展優先排序高的另一項技術群組「輻射照射於食品安全及品質檢測」，早在 1900 年代就有食品輻照相關研究，初期應用於抑制農產品內的微生物、殺滅食品中的有害生物、延遲蔬果的熟化、抑制馬鈴薯及洋蔥發芽以及降低新鮮蔬果貯運過程中腐爛率，其技術相對成熟，若能針對高單價食品之標的產品進行開發相關流程，可延長儲架壽命與提升產品品質與增加實際價格。

值得一提的是，「精準放射醫療」領域中所採用的同位素技術在農業領域亦相當重要，可用來追蹤某種植物的生長（如在逆境情況下的生長），對植物產量及產值具有效益，亦可用於海洋魚類資源研究（如營養位階解析及食物網追溯）。而原子能科技於農業上應用，可與生物產業機電等系所長期合作，以達技術深根，且如何從學術研究至實際應用，亦需具機電整合背景的專業人力，才可達產業化目標。

⁴³ 陳素琴、許雅真，赴澳大利亞參與「輻射照射應用於植物檢疫風險管理研討會」出國報告，行政院農業委員會動植物防疫檢疫局、行政院衛生福利部食品藥物管理署，2016 年。

另外，輻射照射食品已是許多國家簽訂農產品進出口雙邊協議項目之一，且接受輻射照射食品的數量逐年攀升，未來宜加強輻照技術可提升安全但不會污染食品的科普教育⁴⁴。

表 3-2 「糧食及農業」領域之技術群組及排序

發展 優先 排序	技術群組項目	綜合建議
高	□ 輻射照射用於蟲害防治 □ 輻射照射於食品安全及品質檢測	1. 輻射照射用於蟲害防治對於相當倚賴經濟作物出口的本國精緻農業而言，利用輻射照射控制蟲害防治已成功應用於高價水果，但需評估是否對果實品質會有影響，整體產業鏈已有一定規模，具有可行技術層面，相關投入之技術開發應有立即性的回饋。 2. 輻射照射於食品安全及品質檢測技術相對成熟，若有高單價食品之標的產品進行開發相關流程，可延長儲架壽命與提升產品品質與增加實際價格。
中	◆ 突變/誘變育種經濟價值作物 ◆ 輻射照射於誘變根圈微生物及園藝作物誘變育種之開發與應用	1. 現今的基因都已可解碼，特殊基因的基因轉植技術於作物改良上已經相當成熟且廣泛利用，而透過突變/誘變的方式為傳統品種改良，其缺點為機率小且無方向性。 2. 誘變育種技術可擴大植物基因突變之機率，對於多年生木本及需多樣化之花卉與觀賞植物性狀突變與篩選有所助益，輔以分子育種技術及智慧化育種機制，仍為糧食與農業應用之潛力項目⁴⁵。

⁴⁴ 行政院原子能委員會，107 年第 5 次委員會議紀錄，2018 年。

⁴⁵ 行政院農業委員會 110 年 9 月 13 日農科字第 1100053070 號函意見：輻射誘變育種對於多年生木本及需多樣化之花卉與觀賞植物性狀突變與篩選有所助益，輔以分子育種技術及智慧化育種機制，仍為糧食與農業應用之潛力項目。

低	◆ 農業環境清潔，例如 有害氣體 (如 甲烷、硫化氫) 的消除 ◆ 穩定同位素量測應用於產品溯源、產區識別、真偽鑑定	1. 農業環境清潔可透過原子能技術打斷有害分子的化學鏈結，有效達到消毒滅菌的功用。 2. 穩定同位素檢測於糧食與農業領域，可作為同位素溯源(貿易)、產區識別、真偽鑑定，具民生應用的重要性、可行性及產業化可能性之潛力，另可用於作物於逆境生長的觀察及量測，以及海洋魚類營養位階解析及食物網追溯，進而找出改良方式。
---	---	---

第二節 能資源與環境

在能資源與環境方面著重「環境及水資源」領域，以穩定國內發展永續精緻農業為目標，開發整合性穩定同位素分析、地球化學、地下水水流與傳輸模擬等技術及應用，研究開發抗旱作物機制及用水量管理、國土土質及水源監測、地下水或土壤鹽化評估等監控平台，作為政府施政參考並增加國土永續發展應用契機。

「環境及水資源」領域的技術群組項目及排序如表 3-3 所列，目前經濟部水利署重視的是以穩定同位素探討河川地下水補注量及使用量問題，因此以「全國地下水資源穩定同位素與水文地質分布圖集繪製」及「環境示蹤劑應用」為發展順序最高的技術群組，原能會可與水利署、環保署等單位溝通，在政府委託計畫上要求民間單位使用穩定同位素等相關技術，以帶動產業需求。其中「環境示蹤劑應用」技術群組包含海洋環境示蹤劑，海洋環境示蹤劑應用包含利用放射性

同位素（例如：鈣-45 等）作為精準示蹤劑追蹤海水酸化程度，以及檢測魚類及海洋沈積物中的汞和甲基汞，及其他海洋污染物如微塑料 (Micro-plastics) 和奈米塑料 (Nano-plastics) 的移動。而「發展 X-ray CT」主要是電腦斷層 (CT) 在台灣很有發展潛力，可應用於工程細部結構上的檢測。在研究及可行性評估階段，政府可先挑選重要技術並投入資源培植，待技術成熟後，再進入市場以帶動產業化，例如在離岸風電建置上，目前遭遇的是海床的地質結構問題，此與海床地下水有關，其在飽和情況下可能造成土壤液化，而導致風機倒塌，此議題目前於國內不容易解決；另外在風場開發上，還需要能對鑽取的岩心進行破壞性檢測的儀器，這些工作在國外海事工程、石油工程界已逐步成為標準工作程序及全球趨勢。國內未來若能投入相關軟、硬體開發及推展實務應用，在我國各項電子產業供應鏈完整的狀況下，是下一步能投入的高階理論及技術工作。

另外，在碳-14 直線加速質譜儀方面，由於其相當昂貴，全球（美國除外）每個國家最多 1 至 2 台。目前國內學術使用的碳-14 直線加速質譜儀建置於臺灣大學，但是否能商業化至地下水定年，仍值得探討。目前國際文獻中，穩定同位素比值質譜儀 (stable isotope ratio mass spectrometer, IRMS) 之鑑識利器已廣泛被運用於地質、海洋、環境變遷、環境污染、醫藥及藥檢、農業、生態及鑑識科學等領域。穩定同

位素的分析與鑑定技術(例如：氫、氧、碳、氮和硫等穩定同位素)可增加對於這些元素在自然生態系統中的瞭解、分布，並加以廣泛應用於農業及相關生態環境上的各項研究工作中，同時 IAEA 亦早已將此方面技術的發展，列為原子能科技於和平用途應用之重點，顯現此領域已是國際發展的必然趨勢。

表 3-3 「環境及水資源」領域之技術群組及排序

發展 優先 排序	技術群組項目	綜合建議
高	□ 全國地下水資源穩定同位素與水文地質分布圖集繪製 □ 環境示蹤劑應用 □ 發展 X-ray CT	1. 國內目前已經有相關技術，若加以推動，未來可更普及，可列為短期內優先發展項目。 2. 國內目前仍無大規模工業用 X-ray CT，主要用於醫療，國外方面歐洲主要用於工業及地質檢側，美國則用於醫療。國研院儀科中心的 X-ray CT 主要應用於醫療。CT 在台灣很有發展潛力，可應用於工程細部結構上的檢測。
中	● 放射性同位素技術 ● 穩定同位素技術 ● 利用放射性元素觀測孔隙介質多相流與層積研究 ● 發展野外原子能技術儀器	「放射性同位素技術」和「穩定同位素技術」在國內已探討很多，對於自然環境機制有顯著貢獻。 可能的困難： 因為使用量與市場小，要產業化有其困難，在民生應用方面的貢獻也非常有限。
低	◆ 工業污染物處理 ◆ 輻射誘發的持久性有機污染 (Persistent Organic Pollutants, POPs) 降解技術	以長期來看，並不確定能否產業化。

第三節 前瞻應用科技

一、量子科技

近年來隨著原子理論與實驗技術的成熟，量子技術有著各種革命性的用途，所以量子科技紛紛變成各國努力的目標，過去主要國家的量子科技發展策略如下：

中國

推動量子資訊科學是中國 2006 - 2020 年國家中長期科學和技術發展的第一優先要務，在這 15 年計畫中就有 4 項重大科技專案與量子科技有關，並指定量子通訊為 2030 年前六大科學與技術開發專案之一，尤其特別關注量子金鑰傳輸，每年投資在量子技術約 2.44 億美元，並推動世界上最大的國家量子計算倡議，導致中國研究人員發表量子計算相關的科學論文是量子通訊論文數量的兩倍多，此外中國也建設合肥國家綜合科學中心及其量子資訊和量子科技創新研究院，它被認為是安徽省科技創新的「第一號工程」，該院以推動量子力學和量子資訊基礎研究、量子資訊技術應用以及關鍵設備的研發，各大企業也創立自己的量子研究實驗室或是合資開創新量子公司。

美國

雖然美國對量子技術研發沒有正式的發展策略，但是政府各部門以及產業都陸續推動各自的量子技術項目。而且 2015 年在總統的行政命令下，也啟動了國家戰略計算倡議。美國空軍研究實驗室(U.S. Air Force Research Laboratory) 建立了量子通訊和量子資訊科學實驗室，專注於量子數據的集成與資料傳輸加密和高頻率下的量子金鑰傳輸，而陸軍研究實驗室的基礎研究部門專注於量子資訊科學程式和支援工作，包括量子感測、微型定位導航、計算和通訊。

國防高等研究計畫署(Defense Advanced Research Projects Agency)則是進行了三個量子技術專案包括量子通訊系統的發展、量子輔助的感測及成像計畫，以及量子軌道共振光譜項目，希望利用量子光子學更好地評估創傷性腦損傷和創傷後壓力症候群。情報高等研究計畫署(Intelligence Advanced Research Projects Agency) 的量子增強優化項目涉及多年的研究努力，以開發特殊用途的量子演算法和硬體，專注於解決困難的優化問題。洛斯阿拉莫斯國家實驗室(Los Alamos National Laboratory)量子研究所成立於 2002 年，專注於量子計算和量子密碼學。量子人工智慧實驗室由美國國家航空暨太空總署(NASA)、大學空間研究協會和谷歌(Google)聯合組成，旨在探索量子電腦解決傳統超級電腦難以或不可能解決的問題的潛力。國家安全局則是專注於量

子密碼分析並確保政府重要系統的安全。

美國海軍研究辦公室量子計畫支持研究海洋環境對量子金鑰傳輸的安全影響和量子電腦演算法，以直接支援海軍。桑迪亞國家實驗室在過去的 11 年裡已經在內部研究基金上投資了大約 7,600 萬美元，以資助在各種項目下的量子感測、量子通訊和量子計算的研究。市場上，大量量子新創公司也紛紛成立，而大企業包括谷歌、微軟 (Microsoft)、IBM、英特爾(Intel)、洛克希德·馬丁(Lockheed Martin)在內的主要科技公司都在資助量子計算研究。

歐盟

在過去 20 年裡，歐洲委員會資助約 6 億美元在量子科技研究，未來，歐盟及其成員國針對量子技術的年度預算約 5.15 億美元，此外歐盟也在 2016 年建立量子技術旗艦計畫，在 10 年的時間內，資助 11 億美元，投資的範圍從基礎量子研究到可以產業化的產品，包括量子計算、感測、通訊、測量和模擬。

日本

日本政府於 2016 年成立了國立研究開發法人量子科學技術研究開發機構(National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology)，以推動量子科學與技術的進步，每年投資約 4.87 億美

元。企業的部分，東芝公司在量子密碼學和量子計算方面也有一定程度的投資，並在劍橋研究實驗室成立了量子資訊集團。

南韓

發展量子技術主要以企業為主，SK 電信公司在量子通訊領域投入鉅資，於 2015 年與佛羅里達大西洋大學建立合作夥伴關係，推動量子物理研究，應用於密碼學、硬體工程、和量子計算，在 2016 年也投資了量子亂數產生器，並於 2017 年與諾基亞(Nokia)公司合作，以建立 SK 電信量子金鑰傳輸系統和諾基亞公司的下一代光傳輸系統相交互操作模式，另外也與德國電信公司(Deutsche Telekom)建立量子聯盟，以確保量子計算時代的安全通訊。

新加坡

新加坡國立大學於 2007 年與新加坡國家研究基金會和其教育部等其他合作夥伴成立了量子技術中心，該中心收到了 1.25 億美元的資金以支援 10 年期的研究計畫，此外新加坡國家研究基金會與中國國家自然科學基金成立合作夥伴關係，宣佈聯合資助專案，支持中新兩國在量子技術領域的研究人員合作。

國際市調報告顯示量子計算較量子通訊以及量子感測之市場大（占總體市場約 8 成），目前量子計算中，硬體市場規模又占整體近 8 成，未來硬體部分的年複合成長率達 32%，占市場規模的 5 成左右，而未來應用軟體的年複合成長率更高達 59%，占市場規模的 3 成以上（圖 3-5），而其應用所觸及的產業分佈很廣，包含：保健及製藥、金融業、政府及公共安全、國防及航空航太等合計占 5 成以上（圖 3-6）⁴⁶。國際量子科技目前著重硬體發展，但設備昂貴，故我國應以培養人才為優先，未來待全球發展出現主流規格，再結合我國半導體產業優勢進入國際供應鏈。

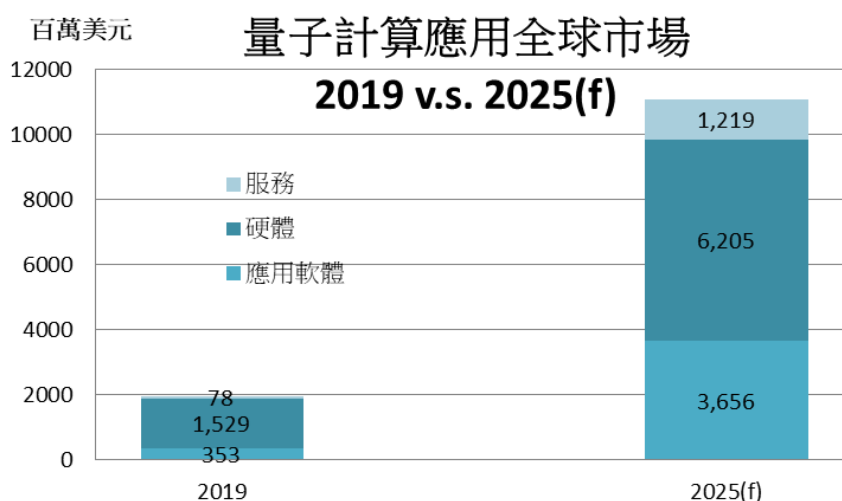


圖 3-5 量子計算應用全球市場推估

資料來源：Mind Commerce (2019)，核能研究所重繪

⁴⁶ Quantum Technology Market: Computing, Communications, Imaging, Security, Sensing, Modeling and Simulation 2019-2025, Mind Commerce, 2019.

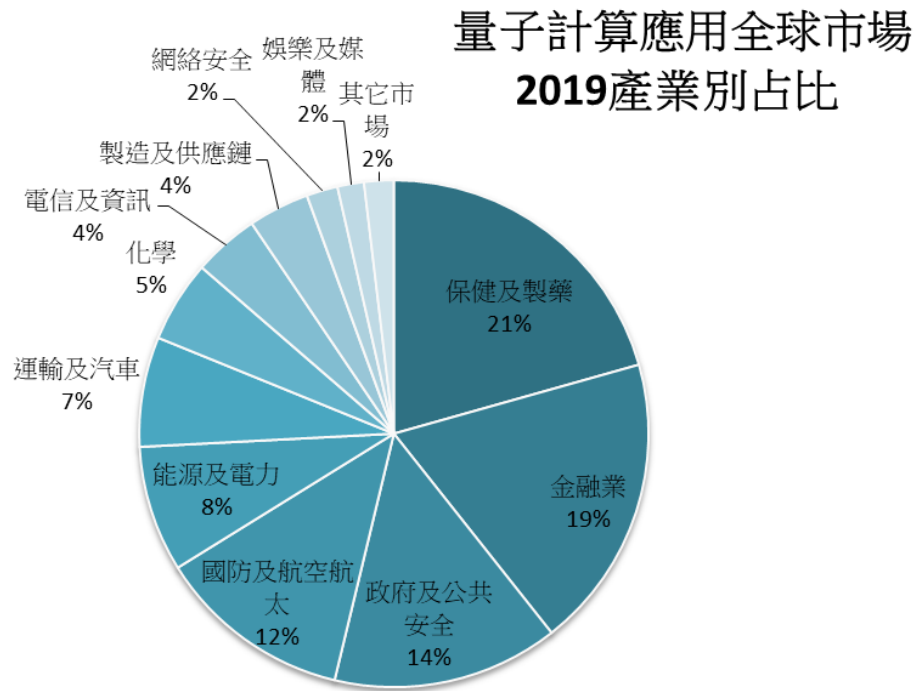


圖 3-6 量子計算應用全球市場 2019 產業別占比

資料來源：Mind Commerce (2019)，核能研究所重繪

量子科技屬於曼哈頓計畫，需大量的人力（至少數百人至千人在某特定技術群組）及經費（一年至少數億至數十億在某特定技術群組）才能成功發展，我國身為小型經濟體，無大量資源拚全球領先，應穩定經費投資在教育、基礎研究或量子演算法上，以持續培養人才，維持基本能量，待量子科技有某全球領導者勝出後，再利用國內既有人才專攻其中的關鍵零組件製作或運用量子科技以解決各種應用問題。以國內目前的狀況來說，量子科技領域最重要且最有效的投資還是教育，無論要培養量子科技的老師或是學生都是必須的，有了充裕的人才庫，未來發展任何子領域才有成功的可能。若要坚持持續培養量子科技

人才，可仿照國際主流趨勢，基於現有的高級中等學校課程綱要⁴⁷，持續加深或加廣量子科技相關選修，提前佈署下一量子世代的人才庫。

「量子科技」領域的技術群組項目及排序如表 3-4 所列，國內現在量子科技所投資的量子硬體技術較為發散，針對「量子電腦及量子模擬器（硬體）」所列 3 項技術：超導量子位元、矽量子點以及量子光電晶片為國內目前普遍認可的技術發展，惟未來仍需就國際趨勢及國內技術發展情形滾動式檢討。在「量子演算法與量子計算之應用（軟體）」領域中，目前仍需大量物理、數學人才，才能進行程式的撰寫，可先專攻編譯器(compiler)演算法，這樣才能讓普羅大眾、其他領域的人才也能進來撰寫程式及應用量子電腦解決各領域的問題。

國內若要發展量子科技，除了倚靠政府經費，更要想辦法得到產業的支持，才有可能有足夠的經費與人力，尤其是目前量子科技的關鍵零組件製作都與半導體技術有關，而我國未來的半導體產業要在全球持續領先，優先布局量子科技的各項候選技術及培養人才是無法避免的趨勢，宜由政府、半導體產業及學界形成 3 方聯盟，共同發展量子科技。另以當前國內的人才及經費，宜專注於某一特定量子硬體技術，否則不易有成果出現。

⁴⁷ 教育部 110 年 10 月 20 日臺教資(六)字第 1100141716 號函意見：十二年國民基本教育自然科學領域高中階段已納入量子現象為主題之一，至有關量子科技將由國家教育研究院，納入下一波課綱研修之參考。

表 3-4 「量子科技」領域之技術群組及排序

發展 優先 排序	技術群組項目	綜合建議
高	□ 量子電腦及量子模擬器（硬體）：超導量子位元、矽量子點以及量子光電晶片 □ 量子演算法與量子計算之應用（軟體）	1. 我國已經有投入超導量子位元、矽量子點以及量子光電晶片相關研究，具備較多人才，且半導體是我國產業強項，很適合用半導體技術製造這些量子電腦控制系統、固態系統及晶片等硬體設備。 2. 量子演算法與量子計算之應用的投資成本相對其他技術低廉，加上量子硬體現逐漸成熟，已可在硬體上建立量子軟體平台，若有人才投入，量子演算法將可快速發展，解決很多超級電腦無法處理的問題，可應用在生醫、金融、化學、材料分析等方面。
中	● 量子通訊	國際上已有產業及商用產品出現，如中國國盾公司，且與國家安全有關，可避免洩密或被竊聽，是各國資安發展的重點。 可能的困難： 我國對此技術領域投入較少，現在起步研究的話，可能追不上國際領先腳步。
低	◆ 量子感測器	相對其他技術群組而言，此技術的成熟度較低，離產業化較遠，比較接近基礎科學，我國投入的資源及相關的人才都比其他技術少。

二、中子科技

美國、歐盟、中國、日本、澳洲、韓國、印度及印尼等國家，都先後積極投資中子設施的建設與開發，從全球市場中子檢測之使用端

角度來看⁴⁸（如圖 3-7 所示），醫療保健占了 1/3，航空航太及工業占比亦超過 1/3。中子對於大型物件的穿透力，可以幫助風機渦輪等關鍵零組件的殘餘應力分析等疲勞壽命的研究，或交通建設中的軌道與橋樑檢修，對於特殊原子的中子截面積可以有助於偵檢傳統研究設施不易量到的特殊元素，進而應用於儲氫、鋰電池、鈉電池、先進觸媒材料技術的研發，在醫療議題方面，中子亦可應用於藥物設計與輸送的研發⁴⁹。

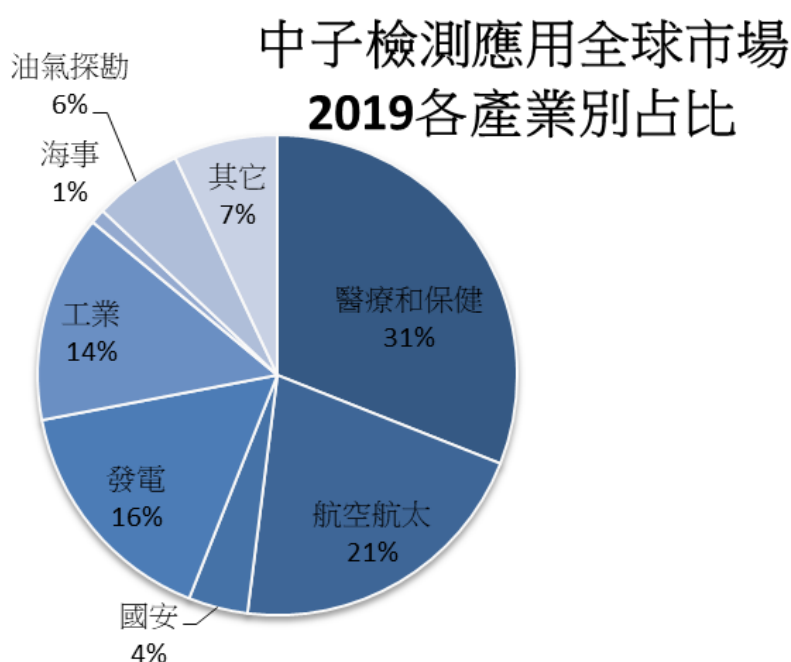


圖 3-7 中子檢測應用全球市場 2019 各產業別占比

資料來源：Industry ARC (2020)，核能研究所重繪

⁴⁸ Neutron Detection Market - Forecast (2020 - 2025), Industry ARC, March 2020.

⁴⁹ 黃爾文，中子科技應用：借鏡國際最新發展以超前部署台灣未來情境，能源資訊平台，109 年。

澳洲核子科技組織(Australian Nuclear Science and Technology Organization; ANSTO)定位中子應用的新方向為新興工業的研發，以助澳洲擺脫太過倚重礦業出口的產業困境，藉由中子非破壞的研究優勢，結合大學與研發單位，選定智慧機械中的新興主題 3D 列印，以研發優勢，從原料到製程、再到產品的全套產線 know-how，其它的新興領域還包含了超導電纜的研發、與波音公司合作的航太元件開發、雪梨大橋的防蝕與除垢、大型金屬管線焊接、電廠使用扇葉危安檢測與交通基礎建設中的鐵軌及飛航安全等。

日本中子源規模從大到小皆有且數量不少，中子源類型包括反應器中子源（JRR-3、KUR）、散裂中子源（J-PARC）及加速器中子源（RANS、KUANS、HUNS、SHI-ATEX 及 IBNCT 等），其中加速器中子源數量最多，分佈如圖 3-8 所示⁵⁰。中子照相為中子源的基本應用，圖 3-9 所示為日本兼具中子照相用途的中子源分佈⁵¹，圖中的數值是指該中子源位於樣品處的熱中子通率。日本中子源除了傳統的中子散射、中子繞射及中子照相應用外，也致力於發展醫療應用，尤其用於硼中子捕獲治療(BNCT)。

⁵⁰ Yoshiaki Kiyonagi, "Compact Accelerator-driven Neutron Sources (CANSs) and their applications in Japan," SPES @ Ferrara, Italy, Jan 2019.

⁵¹ Yoshiaki Kiyonagi, "Neutron Imaging at Compact Accelerator-Driven Neutron Sources in Japan," Journal of Imaging, 2018.

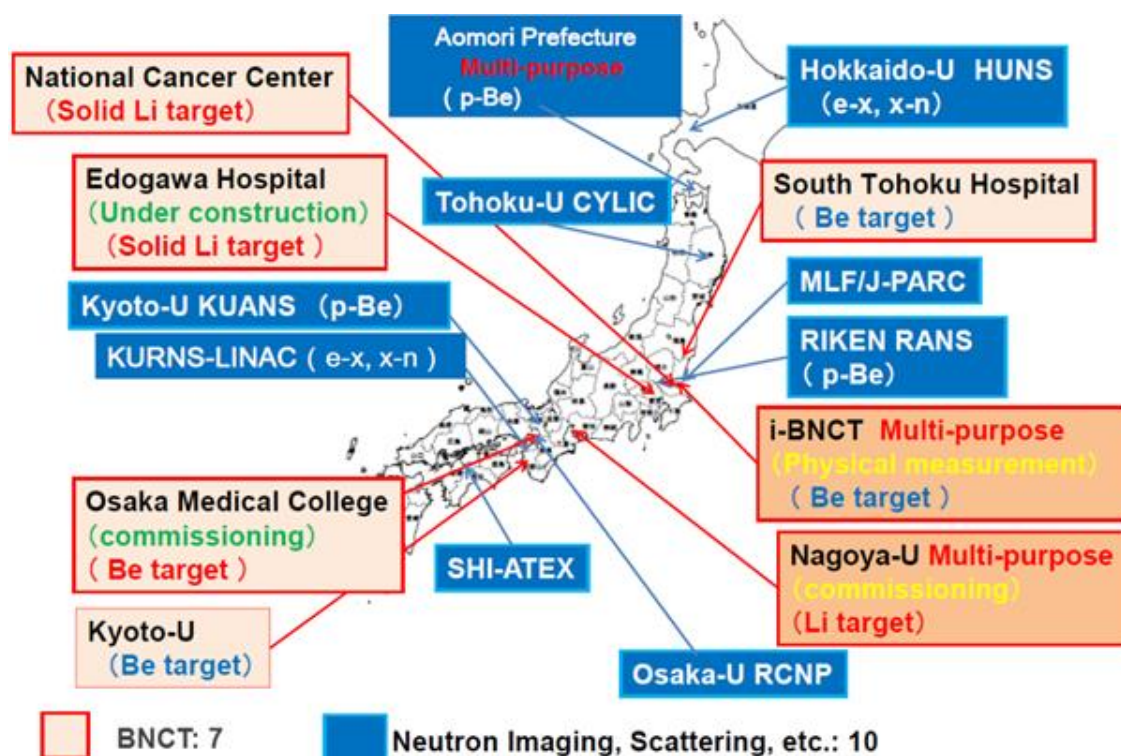


圖 3-8 日本中子源設施分佈

資料來源：Yoshiaki Kiyanagi (2019)

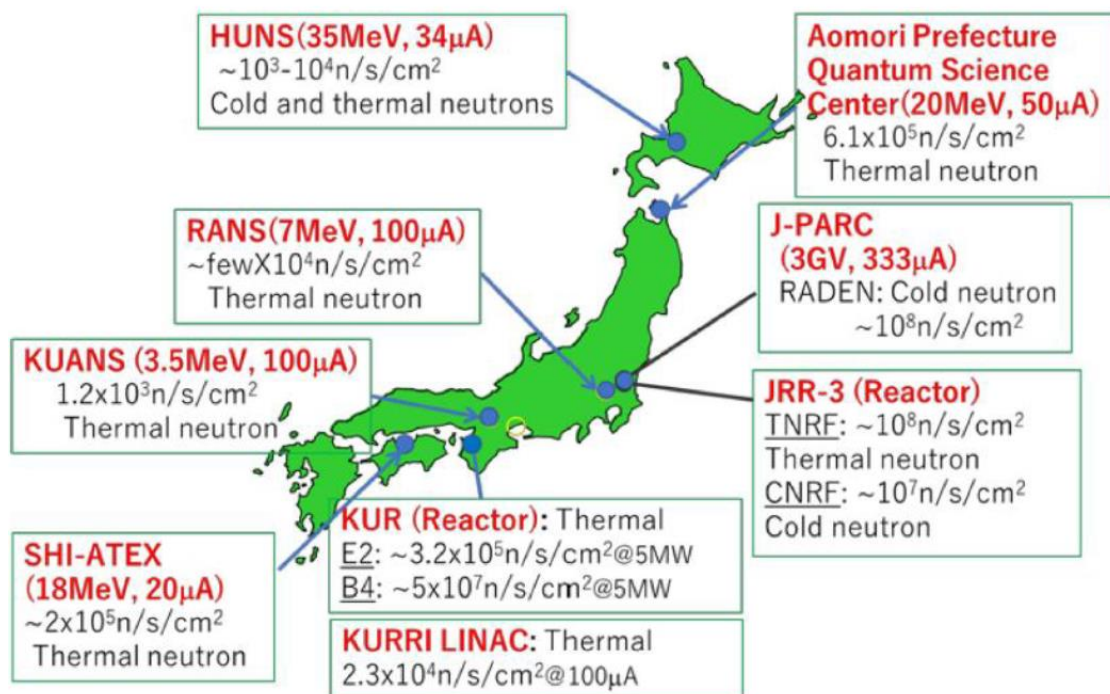


圖 3-9 日本兼具照相用途的中子源設施分佈

資料來源：Yoshiaki Kiyanagi (2018)

中國大陸在 2017 年完工的散裂中子源(China Spallation Neutron Source; CSNS)，是繼英、美、日後的世界第四個散裂中子源，預期具中子核(neutron nuclear)資料量測、中子檢測器校準及中子輻射等效益⁵²；歐洲散裂中子源(European Spallation Source; ESS)位於瑞典隆德，是一所正在建設中的跨領域科研機構，為迄今世界上通量最高的脈衝散裂中子源，由來自歐洲的 17 個國家攜手建設和共同運營這，散裂過程產生的中子束能夠為材料科學、化學、醫學、生物工程和地球物理學等科學實驗提供幫助。其實驗設施建置在瑞典隆德，數據管理和軟體中心則坐落於丹麥的哥本哈根⁵³。

小型中子源一般是指可和交通運輸工具結合的可攜式中子源；中型加速器中子源在國內除可作為教育目的，亦可提供國內核醫所需的同位素藥物（如核能研究所的 30MeV 迴旋加速器在穩定國內核醫供藥上就發揮很大作用）；大型加速器散裂中子源建造耗資太大，必須尋求國際合作（如台澳中子實驗設施 SIKA⁵⁴），運用於新型材料分析與開發。此外，政府應重視人才培育，以避免在完成相關儀器建置後，無相關專業人力可運作。

⁵² 參見「中國散裂中子源工程」網站，網址：<http://csns.ihep.cas.cn/>。

⁵³ Colin J. Carlile, Ryoichi Miyamoto, and A. Pahlsson, “European Spallation Source Technical Design Report,” April 2013.

⁵⁴ 吳淩銘、張烈錚，台灣首座冷中子三軸散射儀—SIKA，科儀新知 204 期，104 年 9 月。

我國目前並沒有大型的中子研發基地，但透過切合國家發展需要的選題，引入合適的中子設備，與篩選合適積累的方向，將可用上中子這項各國已經導入民生科技，超前部署我國的未來情境。有鑑於此，我國已規劃於核能研究所建置 70MeV 迴旋加速器，主要用途為(1)提供開發新醫用同位素及核醫藥物所需的同位素，與備援現有核醫藥物生產。(2)進行質子照射研究如太空科技輻射抗輻射驗證平台。(3)利用質子束撞擊靶材產出中子源，進行中子照射、中子影像分析及中子繞射分析等研究⁵⁵。此外，若能符合醫療器材與藥物等二類法規的情況下且國內如有硼中子捕獲治療更多的需求，亦可進一步評估設置硼中子捕獲治療相關設施以支援臨床之硼中子捕獲治療研究。是以，建置新的迴旋加速器對我國未來醫療、科技、經濟，乃至國防自主能力的提升都相當重要。

「中子科技」領域的技術群組項目及排序如表 3-5 所列，值得我國開發的中子應用包含「同位素生產及應用」、「新型功能性材料開發」以及「中子斷層影像及殘餘應力分析」等，國內同位素生產及其應用已在進行，應持續精進，由於中子源設施之維運有一定的成本壓力，可搭配國家同步輻射中心，其運作以提供國內科學研究為主，朝功能互補、民生科技應用、市場需求導向的議題發展，如前述同位素藥物

⁵⁵ 杜定賢，日本 SHI-ATEX 加速器中子源參訪，核能研究所出國報告，2019 年。

市場需求、非破壞檢測、新型功能性材料開發等，包含我國所需之能源材料（如電池）、生醫材料等。

表 3-5 「中子科技」領域之技術群組及排序

發展 優先 排序	技術群組項目	綜合建議
高	□ 同位素生產及其應用 □ 新型功能性材料開發（能源材料、生醫材料） □ 中子斷層影像、殘餘應力分析（包含醫學、非破壞性檢測、國防及航空檢測）	1. 同位素生產及其應用目前已在進行，應持續並繼續精進。 2. 在材料研究及開發的應用中，中子技術是唯一能有效檢測微量摻雜、磁特性、輕原子的工具。 3. 中子斷層影像、殘餘應力分析值得國內積極推展，其應用範疇相當大，在醫學為異質細胞早期偵測，工業則為非破壞性檢測。
中	● 生物分子功能（如蛋白質酵素、糧食改質）研究 ● 中子活化分析	1. 糧食改質研究時間較長，短期不易見成效。 2. 中子活化分析已可以用其它方法取代。
低	◆ 中子偵測器之開發及運用	為國內未來可發展之技術群組，但相較於發展優先排序高和中所列的技術群組（中子科技在材料及醫學上的應用），較不具迫切性。

三、太空科技

近年來美國及歐洲正快速大規模發展體積小、重量輕的低軌道 (Low Earth Orbits; LEO) 衛星，預估在 2027 年前，還會有 20,000 顆 LEO 衛星升空。低軌道衛星因為發射成本低、研發週期短等，近年來用於地球觀測、氣象、科學研究探索、通訊、導航與國防監視等，可

實現衛星網路覆蓋全球之目標，2017 年開始大幅度成長，年複合成長率達 44%⁵⁶，如圖 3-10 所示。

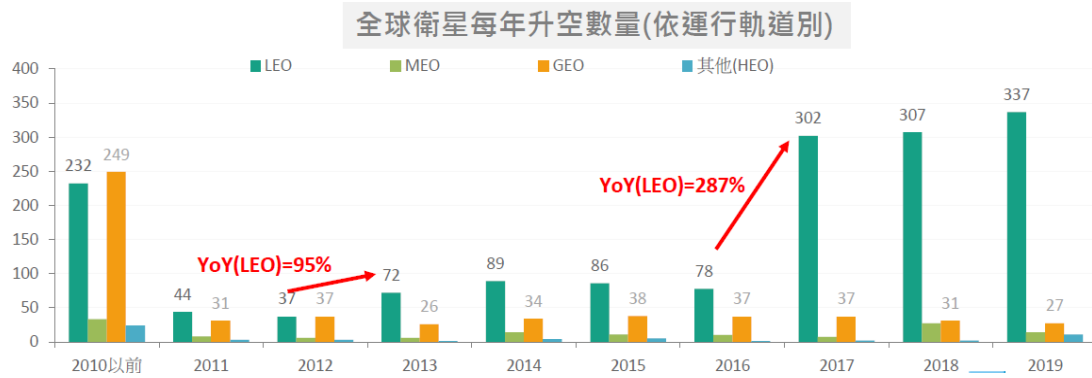


圖 3-10 低軌衛星之應用及成長態勢

資料來源：109 年 IEK 產業報告

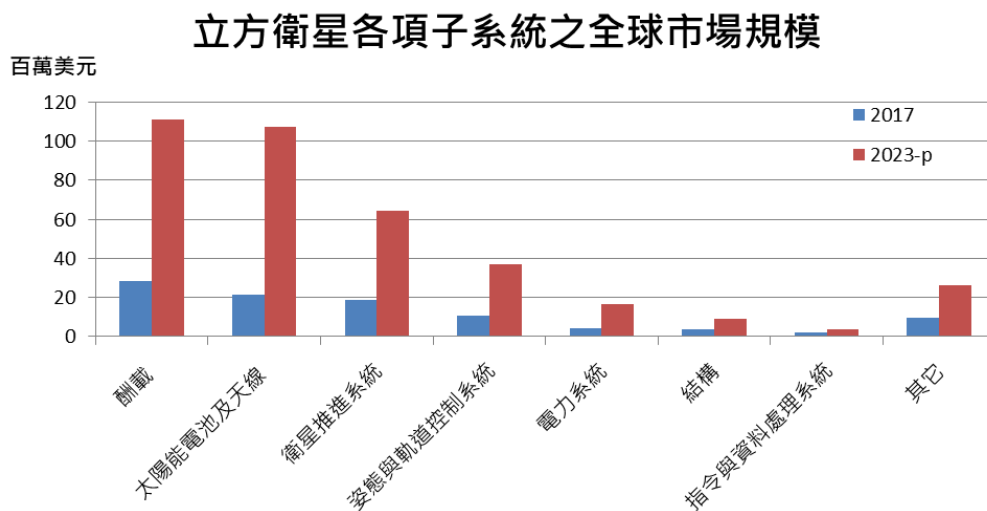


圖 3-11 立方衛星各項子系統之全球市場規模

資料來源：Marketsandmarkerts (2018)，核能研究所重繪

⁵⁶ 呂珮如，低軌衛星通訊發展趨勢與台灣商機，IEK 產業報告，109 年 7 月。

未來立方衛星所需之太陽能設備及天線之全球市場規模僅次於衛星酬載（如科學實驗的儀器、通訊設備等），如圖 3-11 所示，太陽能設備及天線市場將占立方衛星製造市場的 30%，年複合成長率達 25%，是成長率最高的項目，而各項子系統都必須用到之抗輻射晶片，衍生之產業效益不可小覷。

109 年國內約 80 多家太空產業相關廠商，2019 年直接與衛星產業相關產值約為新台幣 81 億元，分成三大領域：地面設備(80%)、衛星製造(19%)及發射服務(1%)，衛星製造產值約新台幣 15 億元（地面設備國內已有多家切入國際供應鏈）⁵⁷，我國衛星產業衛星製造的部分產值至 2020 年預估約可達 54 億台幣⁵⁶，其中金屬零組件、太陽能設備、半導體封測、天線及系統整合等將有機會打入國際市場⁵⁸。

2023 年全球衛星製造產值估計將高達 375 億美元⁵⁹，以 2019 年我國衛星製造占全球產值之比例估計國際市場滲入率，我國衛星製造約占全球衛星製造產值的 0.6%，若未來積極發展衛星製造，以目前我國目前衛星地面設備之國際市場滲入率約 4%估算⁵⁶，則未來衛星製造產值將更樂觀。

⁵⁷ 陳靖惠，太空產業現況與未來發展之初探，金屬工業研究發展中心，109 年 2 月。

⁵⁸ 蘇明勇，新太空時代下衛星產業發展挑戰與契機，IEK 產業報告，108 年 10 月。

⁵⁹ Cubesat Markt – Global Forecast to 2023, Marketsandmarkerts, 2018.

行政院 108 年核定第三期的「太空科技長程發展計畫」，自 108 年至 117 年，預計 10 年投入 251 億元，結合國內產、學、研界能量，創建高成本效益且具競爭力的太空計畫，持續精進本土太空技術，挑戰尖端太空任務，同時擴散太空技術產業效益，培育太空科技人才，建立太空產業鏈。109 年 7 月 21 日國家實驗研究院國家太空中心與長庚醫院、長庚大學、核能研究所、宜特科技公司、中央研究院物理研究所及清華大學原子科學技術發展中心，共同簽署合作備忘錄組成「台灣太空輻射環境驗測聯盟」，透過聯盟成員各自具備的輻射測試、驗證與分析能量，經由專業分工與策略合作，建立國內完整的輻射測試環境、測試規範與驗證機制。110 年 6 月 16 日我國制定公布「太空發展法」，以促進我國太空活動及太空產業之發展，鑒於我國在電子元件及半導體領域具優勢及完整供應鏈，政府可透過系統整合商，整合我國電子與半導體產業介接產品輻射驗測，發展太空科技供應鏈各項抗輻射零件，以促進太空科技自主率與產業附加價值⁶⁰。

衛星使用的電子元件在太空中會受到游離輻射環境影響，造成總劑量效應(Total Dose Effect; TDE)與單事件效應(Single Event Effects;

⁶⁰ 國家發展委員會 110 年 9 月 7 日發產字第 1100016912 號函意見：109 年已成立「台灣太空輻射環境驗測聯盟」，建立國內完整的輻射測試環境、測試規範與驗證機制。另鑒於我國在電子元件及半導體領域具優勢及完整供應鏈，政府可透過系統整合商，整合我國電子與半導體產業介接產品輻射驗測，發展太空科技供應鏈各項抗輻射零件，促進太空科技自主率與產業附加價值。

SEE)，總劑量效應是累積性的元件劣化，係由於電子元件長期曝露於輻射環境下而逐漸退化失效，單事件效應則為瞬時性的電子干擾，是由粒子輻射通過或靠近電路中的敏感節點所引起電路系統失效⁶¹。輻射效應對電子元件所造成的傷害與防治是研發抗輻射晶片非常重要的課題，國內需要建立足以模擬太空游離輻射環境之平台，以進行相關晶片輻射可靠度測試。由於衛星上使用的電子元件體積越做越小，使得元件每一次狀態改變所需的能量和電荷越來越小，導致太空輻射造成的單一事件效應變得嚴重，如何提升在太空使用的電子元件抗單一事件效應的能力，是太空科技特別關注的議題。

「太空科技」領域的技術群組項目及排序如表 3-6 所列，商業化太空科技為未來 10 年國際上之發展重點方向，我國應掌握良機，適時切入國際市場，基於國內完整的半導體產業鏈，包括製程、封裝、電子電路設計技術等，若結合抗輻射技術及太空科學領域，可生產適用於 6G 世代所需微型低軌道衛星，帶動產業升級。

「抗輻射之電子電路設計技術」、「太空用的積體電路製造技術」因有高度國內需求，值得優先投入。「抗輻射之太陽能電池及衛星電池製程發展」也有具規模的市場需求，並與現行利潤偏低的太陽能電池及鋰電池作市場區隔，倘若抗輻射之太陽能電池及衛星電池要應用

⁶¹ 黃楓台、林俊良，太空輻射對衛星任務影響及因應之道，能源資訊平台，109 年。

於太空科技，電池使用年限為一重要因素，需使用超過 10 年才具可行性。另外國內仍需建立可作太空環境驗證之共同平台（如提供原子能技術中的質子照射，模擬低軌道衛星的輻射環境），俾供各種應用層面之零組件進行測試及驗證，連結跨產業應用，擴大衍生效益。

表 3-6 「太空科技」領域之技術群組及排序

發展 優先 排序	技術群組項目	綜合建議
高	□ 抗輻射之電子電路設計技術 □ 太空用的積體電路製造技術	半導體元件設計原本就為我國強項，只要加強抗輻射之設計經驗和技術，可生產出因應未來大量發展低軌道衛星所需要的抗輻射半導體元件，是最重要且極具有產業化可能性的技術。
中	● 抗輻射之太陽能電池及衛星電池製程發展	由於國內電池需求量小因此廠商目前並無太大意願投入，但隨著未來低軌道衛星將大量發展，抗輻射電池將具有廣大市場，國內目前電池製造業已經有技術成熟且成本低的優勢，只要加強抗輻射技術，未來在太空科技領域極具產業價值。
低	◆ 精進模擬太空游離輻射環境設施和即時量測系統^註 ◆ 半導體元件及晶片於輻射效應下之可靠度研究及測試方法^註	目前國內已經具有模擬太空游離輻射環境設施，對於高能輻射研究與測試相當重要，須要再精進。通常須由特定單位如核能研究所等提供服務，因此本身無法形成產業。

註：此兩技術群組對於太空科技的技術發展均相當重要，受限於特殊性較難產業化，而基於產業化的考量因此排序後移，但仍需政府大力支持以強化相關基礎設施、人才培育及關鍵技術建立，維持國內相當自主能力。

第四節 產業經濟

一、工業應用

原子能技術於工業應用主要有：材料改性(material modification)、工業輻射照相(industrial radiography)、核子計測儀技術、放射性示蹤劑及地下礦源勘查等。材料改性是利用各種輻射源，諸如放射性核種、各種能量的電子加速器以及由它們衍生的 X 光等，進行聚合物的交聯、斷鍊、接枝，以製造特殊之工業或醫療用品等；工業輻射照相為一種利用 X 光、 γ 射線和中子穿透各種材料的能力來檢查材料以偵測不易發現之缺陷的方法，例如天然氣和輸水管道，儲罐和結構元件中的焊縫；由於不同物質對放射性同位素（如鈷-60、銫-137、銥-90、鉬-241 與鈾-252 等）所放出 X 光、 γ 射線與中子的吸收、穿透與散射程度均不相同，可利用核子儀器計測放射線強度的變化，從而偵知物質之厚度、密度、均勻度、液位、界面、觸媒床高度與溼度等（只需計測儀，不需呈現影像）；放射性示蹤劑是具有原子或核子、物理、化學或生物特性的物質，廣泛用於偵測工業用反應爐之液體、氣體和固體的流速。還可應用於探索化學反應之反應機制；地下礦源勘查方面，同位素可應用在石油與礦產的探採包括中子技術用於測量煤的熱值及含灰量，另外天然 γ 射線光譜可被廣泛運用在石油、天然氣、鈾礦的探勘，此外放射線同位素激發 X 射線螢光法則被用於鋅礦漿含鋅

量的測定，同位素也可用在鋁、銅、鈷、鎳、鉛、鐵、鎂等傳統礦產及海底錳核及磷礦的探測。

日本工業用途中約 55%以上用於半導體相關產業，製造醫療用的造影設備產值，占了約 18%，屬於較高的項目（如圖 2-5），主要源於其國內對醫療診斷的需求。其它則以非破壞性檢測占 8%左右，材料改性約 8%（如子午線輪胎），以及醫療器材及材料之滅菌等用途占 5%，如人工關節、透析器（人工腎臟）等為大宗⁶²。

「工業應用」領域的技術群組項目及排序如表 3-7 所列，「非破壞性檢測」及「核子計測儀技術」技術群組可用於材料之性質檢測，近幾年國內需求增加，很有發展潛力。另外，大數據的應用在產業發展中越來越重要，若能整合核子計測等其他感測器與 5G 物聯網的多重感測器技術，將可高值化數據，提升品質，包含透過物聯網對機器、裝置、人員進行管理，亦可搜尋物件位置、軌跡追蹤，防止失竊以及輻射劑量監測，有助因應近年社會關切之非破壞檢測業輻射安全管理。

「材料改性」技術群組可直接應用於產品之製程改善，例如可以修改塑料的結構和特性，或是分解塑料以製成原料，而改性或功能化新材料或原料都可用於生產商業上可行的再生塑料消費品，具有建立塑料

⁶² 柳澤和章，わが国の放射線利用分野の経済規模について，2011 年 4 月。
https://www.jstage.jst.go.jp/article/radioisotopes/60/4/60_4_189/article/-char/ja/

循環經濟的潛力，該技術對於民生應用重要性、可行性及產業化可能性雖高，但技術突破後縱深淺，可能導致利潤降低。

表 3-7 「工業應用」領域之技術群組及排序

發展 優先 排序	技術群組項目	綜合建議
高	☐ 非破壞性檢測 ☐ 核子計測儀技術	可用於材料之性質檢測，其應用可行性亦高。
中	● 材料改性(包含建立塑料循環經濟)	材料改性技術直接應用於產品之製程改善，其對於民生應用無論就重要性、可行性及產業化可能性，均具高信心度。 可能的困難： 較難掌握。技術突破後縱深淺，導致利潤降低。
低	◆ 放射性示蹤劑 ◆ 地下礦源勘查	1. 需考量國內人才、市場需求性等因素。 2. 地下礦源勘查技術在國內發展較為不易，且涉及環境議題須事先取得社會共識。

二、半導體製程

我國擁有全球最完整的半導體產業聚落及專業分工，如圖 3-12 所示，半導體產業鏈上游為 IP 設計及 IC 設計業，中游為 IC 製造、晶圓製造、相關生產製程檢測設備、光罩、化學品等業，下游為 IC 封裝測試、相關生產製程檢測設備、零組件（如基板、導線架）等業⁶³，IC 製造的流程是將晶圓廠所做好的晶圓，以光罩印上電路基本圖樣，

⁶³ 參見「產業價值鏈資訊平台」。網址：<https://ic.tpex.org.tw/introduce.php?ic=D000>。

再以氧化、擴散、化學氣相沉積法(chemical vapor deposition; CVD)、蝕刻、離子佈植等方法，將電路及電路上的元件，在晶圓上製作出來。原子能及其衍生技術已廣泛應用於半導體製程，如微影光源、離子束摻雜、電漿技術輔助應用及非破壞性檢測等，惟國內重要半導體製程設備多被少數的國際大廠壟斷。

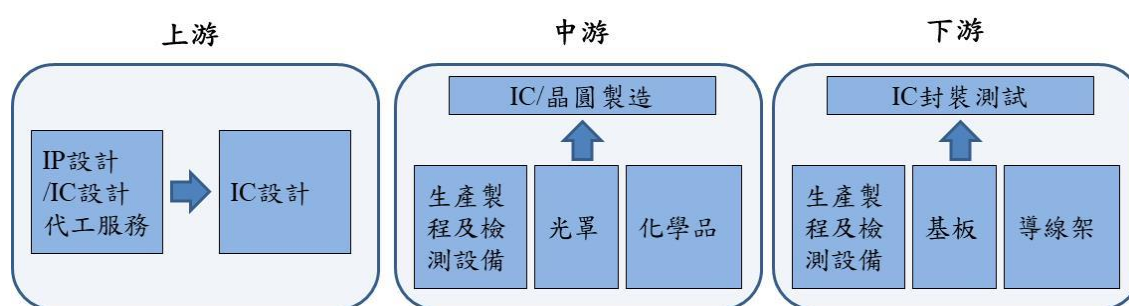


圖 3-12 我國半導體產業鏈

資料來源：產業價值鏈資訊平台(2020)

近年國內 IC 產業產值逐步成長，109 年產值更達 32,222 億元⁶⁴，如表 3-8 所示，我國除半導體先進製程領先全球，近年受惠於中美貿易戰及 COVID-19 疫情的影響，導致資通訊供應鏈轉移，為我國帶來轉單效應，但長期以來，國內半導體先進製程的設備均被少數國際大廠壟斷，單就美國、日本、荷蘭等 3 個國家掌握在手上的半導體設備與零組件即超過 75%，且鄰近的韓國與中國大陸也正全力地追趕與美、

⁶⁴ 台灣半導體產業協會(TSIA)，2021 年第一季台灣 IC 產業營運成果，2021 年 5 月。

日、荷之間的差距，我國自應設法提高相關設備與零組件的自給率，讓台灣在世界的半導體優勢得以維持，甚至進一步擴大，在國際上持續佔有一席之地⁶⁵。全球半導體設備市場上，以微影製程設備佔半導體製造設備市場的比值為最大⁶⁶，如圖 3-13 所示。

表 3-8 近年國內 IC 產業產值

IC 產業產值(億元新臺幣)	2017 年 產值	2018 年 產值	2019 年 產值	2020 年 產值
IC 設計業	6,171	6,413	6,928	8,529
IC 製造業	13,682	14,856	14,721	18,203
晶元代工	12,061	12,851	13,125	16,297
記憶體與其他製造	1,621	2,005	1,596	1,906
IC 封裝業	3,330	3,445	3,463	3,775
IC 測試業	1,440	1,485	1,544	1,715
總計	24,623	26,199	26,656	32,222

資料來源：TSIA；工研院產科國際所(2021/05)

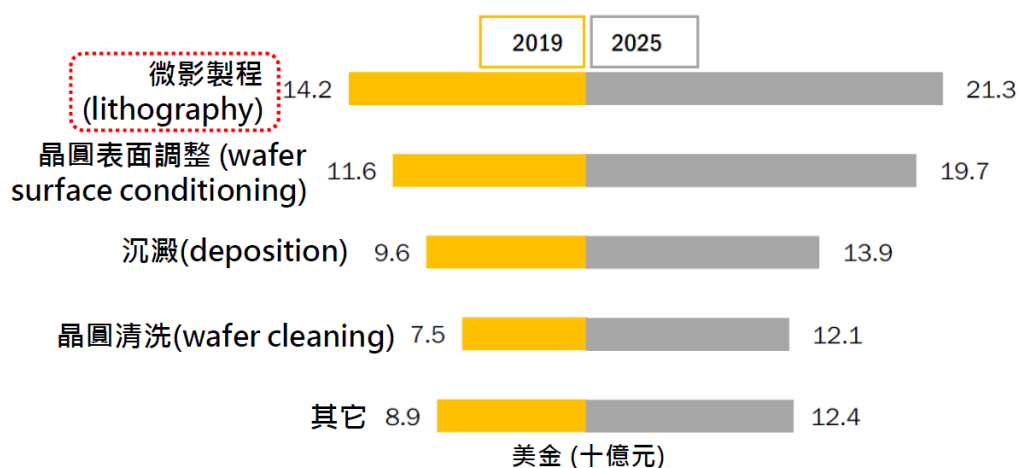


圖 3-13 全球半導體設備市場趨勢

資料來源：Marketsandmarkerts (2019)，核能研究所重繪

⁶⁵ 林玉祥、廖培凱、李佳翰，原子能於半導體應用，能源資訊平台，110 年 3 月。

⁶⁶ Semiconductor Manufacturing Equipment Market – Global Forecast to 2025, Marketsandmarkerts, 2019.

微影(Lithography)作為半導體製造中定義電路圖像的關鍵製程，始終被認為是讓摩爾定律(Moore's Law)持續有效的關鍵技術和經濟因素之一，目前花費在微影製程的經費往往佔整個元件製作絕大部份的成本，而且這個比例尚有逐年增加的趨勢，其重要性不言可喻⁶⁷。微影技術之發展進程如圖 3-14 所示⁶⁸，2013 年以浸潤式微影技術為主，其以折射率較高的液體替代氣體突破微縮限制，2015 年為鰭式場效應電晶體(fin field-effect transistor; FinFET)技術，製程從 193nm 進步至 20nm，並克服電子穿隧效應產生之漏電現象，2018 年採取極紫外光(extreme ultraviolet; EUV)技術，有助於減少光罩數降低成本，製程從 20nm 進步至 7nm，但 EUV 製程的高能耗將使得用電費用升高，此外照射保護膜等材料激化的粒子使得晶片受汙染的可能性提升，將導致良率降低以及成本上升。在製程達 7nm 以後的 IC 製造技術可能方向，應跳脫原本以矽為基礎的互補式金氧半導體(complementary metal-oxide-semiconductor; CMOS)元件製程，以新材料、新技術來創新更高性能、低能耗、相容於現有製程同時具備成本優勢的製造形態，例如量子計算晶片(quantum computing chip)、石墨烯 FET、以 III-V 族材料為基礎，整合光學元件所實現的光學計算⁶⁹。

⁶⁷ 李建霖、蔡坤諭，極紫外光微影—延續摩爾定律的重要技術，能源資訊平台，110 年 4 月。

⁶⁸ 楊正瑀、劉智文，後摩爾時代半導體技術發展趨勢，MIC 產業報告，108 年。

⁶⁹ 劉美君，從新興應用看半導體製造技術的變革新趨勢，IEK 產業報告，107 年。

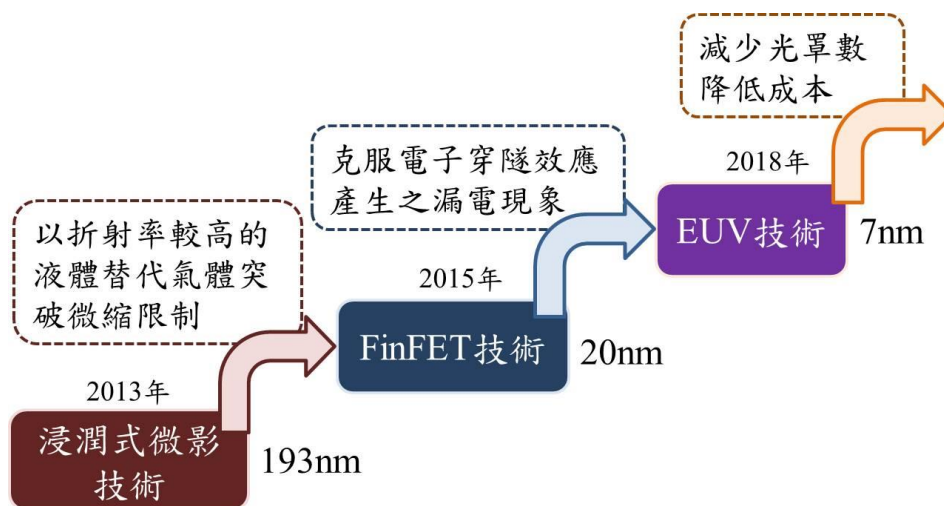


圖 3-14 半導體微影技術發展歷程

資料來源：MIC 產業報告（108 年）

「半導體製程」領域的技術群組項目及排序如表 3-9 所列，「微影技術」和光源技術及光罩製造有關，「蝕刻技術」、「離子佈植」則和電漿技術及晶圓製造有關，「半導體檢測」主要為應用電子束、離子束及 X 光等輻射進行晶圓之非破壞檢測。「微影技術」除現已商轉的 EUV 與深紫外光(deep ultraviolet, DUV)⁷⁰，亦包含次世代更短波長的 BEUV (beyond EUV)及 X 光波段光源，在國內人才培育已很紮實，但和國際相比落差仍大，且微影技術相較於其它技術的門檻為高，應強化相關基礎研究。「中子矽晶植磷」是一相當成熟的技術，在功率元件(power device)製造中具獨特性，但因市場規模小且受限需有中子源較難以推廣。

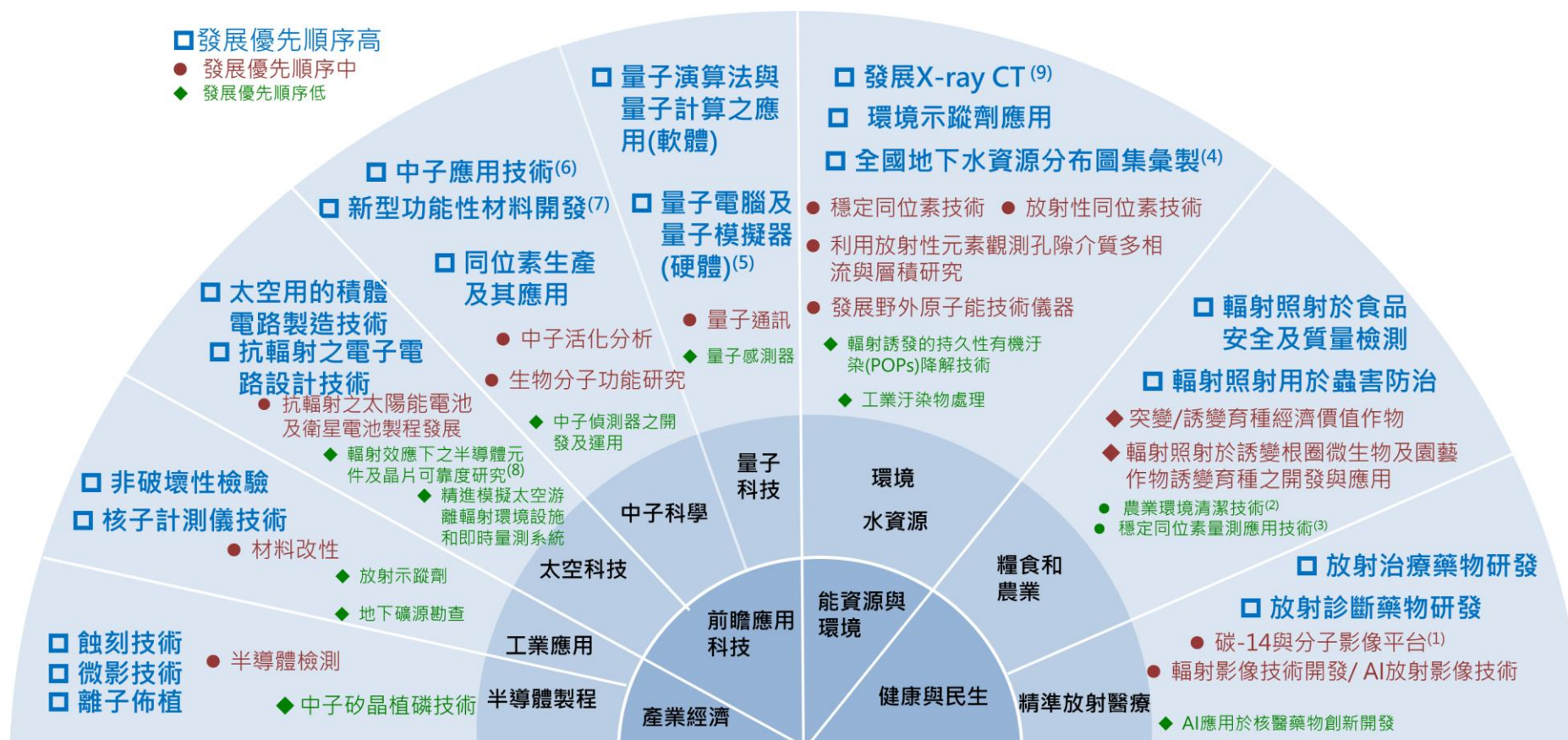
⁷⁰ EUV (10 nm 以上) 技術目前已商轉，波長更短的則稱為 BEUV(10 nm 以下)，科學上 10nm 以下可稱為 Soft X-ray。

表 3-9 「半導體製程」領域之技術群組及排序

發展 優先 排序	技術群組項目	綜合建議
高	☐ 微影技術 ☐ 離子佈植 ☐ 蝕刻技術	1. 半導體製程缺一不可，很難評估哪個技術群組重要、哪個不重要。 2. 國內目前以蝕刻技術、微影技術及離子佈植為主要研究方向。
中	☒ 半導體檢測	
低	☒ 中子矽晶植磷	受限需有中子源，較難推廣。

第四章 原子能科研布局策略

因應國際永續發展趨勢及國內產業轉型需求，我國原子能科研布局策略以「產業加值」及「環境永續」為兩大核心主軸，如圖 4-1「原子能科技民生應用發展策略藍圖」所示，本藍圖將原子能科技於民生應用之議題分為：「健康與民生」、「能資源與環境」、「前瞻應用科技」與「產業經濟」4 大面向，共有 8 大領域：「精準放射醫療」、「糧食和農業」、「環境與水資源」、「量子科技」、「中子科技」、「太空科技」、「工業應用」及「半導體製程」，並包含 45 項技術項目之發展優先順序，以布局產業轉型及加值化所需關鍵原子能技術，並促進環境及社會永續發展，值得一提的是，各技術項目優先排序係以產業價值為主要考量，部分項目受限國內市場及特殊性雖較難產業化，但仍需國家投入穩定資源強化相關基礎設施、人才培育、強化社會溝通及關鍵技術建立，以因應國際競爭及貿易保護政策下，維持國內相當自主能力。



註：(1)應用於生技藥物開發、(2)例如有害氣體的消除、(3)應用於產品溯源、產區識別、真偽鑑定、(4)穩定同位素與水文地質分布圖集繪製、(5)超導量子位元、矽量子點以及量子光電晶片、(6)中子斷層影像、殘餘應力分析（包含醫學、非破壞性檢測、國防及航空檢測）、(7)能源材料、生醫材料、(8)於輻射效應下之可靠度研究及測試方法、(9)亦可用於醫療設備，具跨領域應用發展潛力

圖 4-1 原子能科技民生應用科研布局策略

第一節 原子能人才培育

人才為國家之根本，尤其在原子能未來的民生、產業、環境與永續議題上，教育或基礎研究皆需向下扎根，特別是量子科技領域，以國內目前的狀況來說，最重要且有效的投資仍是教育，提前佈署下一量子世代的人才庫，未來才有可能驅動相關技術發展。本策略藍圖所涉及基礎研究及人才培育議題，已於 109 年第 11 次全國科學技術會議「科研與前瞻」議題提出討論，並納入「110 至 113 年國家科學技術發展計畫」⁷¹目標「完善科研體系，布局前瞻科技」實施，以長期挹注為原則，積極強化跨領域整合之基礎研究，促成跨學科與跨領域以及原子科技基礎研究間的相互融合協作，期以開拓國內科研新局。

原子能科技民生應用及環境永續相關的各級教育、社會溝通機制、溝通議題運作，為建構社會支持、認識與認同之根本途徑⁷²。對於原子能科技於醫療及工業應用已相當普及且為民眾所接受，惟對於輻射照射食品仍有待加強，國際上接受輻射照射食品的數量逐年攀升，未來除需強化輻射照射技術應用於民生之影響評估外，並需推廣其技術可提升安全但不會污染食品之科普教育。

⁷¹ 科技部，國家科學技術發展計畫（民國 110 年至 113 年），110 年 5 月。

⁷² 科技部 110 年 9 月 2 日科部工字第 1100053190 號函意見：針對原子能之國際應用趨勢涉及 SDGs、前瞻科技(量子、中子)、高科技應用等，相關的各級教育、社會溝通機制、溝通議題運作，誠屬重要，其為建構社會支持、認識與認同之根本途徑。

第二節 環境永續及產業加值

原子能技術在實現聯合國永續發展目標(SDGs)上扮演關鍵角色，由國際經驗可知，我國在運用原子能技術實踐永續發展目標上(圖 4-2)，在能源與環境議題上，可利用同位素技術進行環境污染物追蹤、評估海水酸化及溫室氣體排放等影響，以因應永續海洋(目標 14)、永續生態(目標 15)、氣候變遷(目標 13)及碳中和等議題提出對策，並繪製全國地下水文分布，以妥善管理水資源(目標 6)，以及加強輻照技術於環境或工業污染物處理，建置海水與海洋環境輻射監測站，以防範境外輻射之風險⁷³。另可運用非破壞檢測技術進行離岸風機缺陷檢測及能源材料開發，以提升能源安全及效率(目標 7)；在健康與民生議題上，可運用輻射照射技術強化食品安全、蟲害防治及育種改良，或運用同位素技術進行作物營養管理，以強化糧食供給韌性(目標 2)，並藉由放射醫學科技對於癌症、心血管等疾病之診斷及治療，促進國人健康福祉(目標 3)；在產業經濟與前瞻科技議題上，可運用原子能技術在材料改性、半導體製造及非破壞檢測業等工業創新及產值提升(目標 9)；在國際合作議題上，可積極運用國內原子能科研成果作為外交軟實力，延伸既有歐、美、日交流管道或爭取跨國性計畫

⁷³ 海洋委員會 110 年 9 月 3 日海綜計字第 1100009065 號函意見：為保護海洋環境，持續加強放射性同位素和輻射技術於環境或工業污染物之監測處理，提升發展優先順序，並建置海水與海洋環境輻射監測站，以防範境外輻射之風險。

之契機，積極建立相關交流合作管道，藉由槓桿效應以達雙贏、多贏之成果效益，以建立全球夥伴關係（目標 17）。

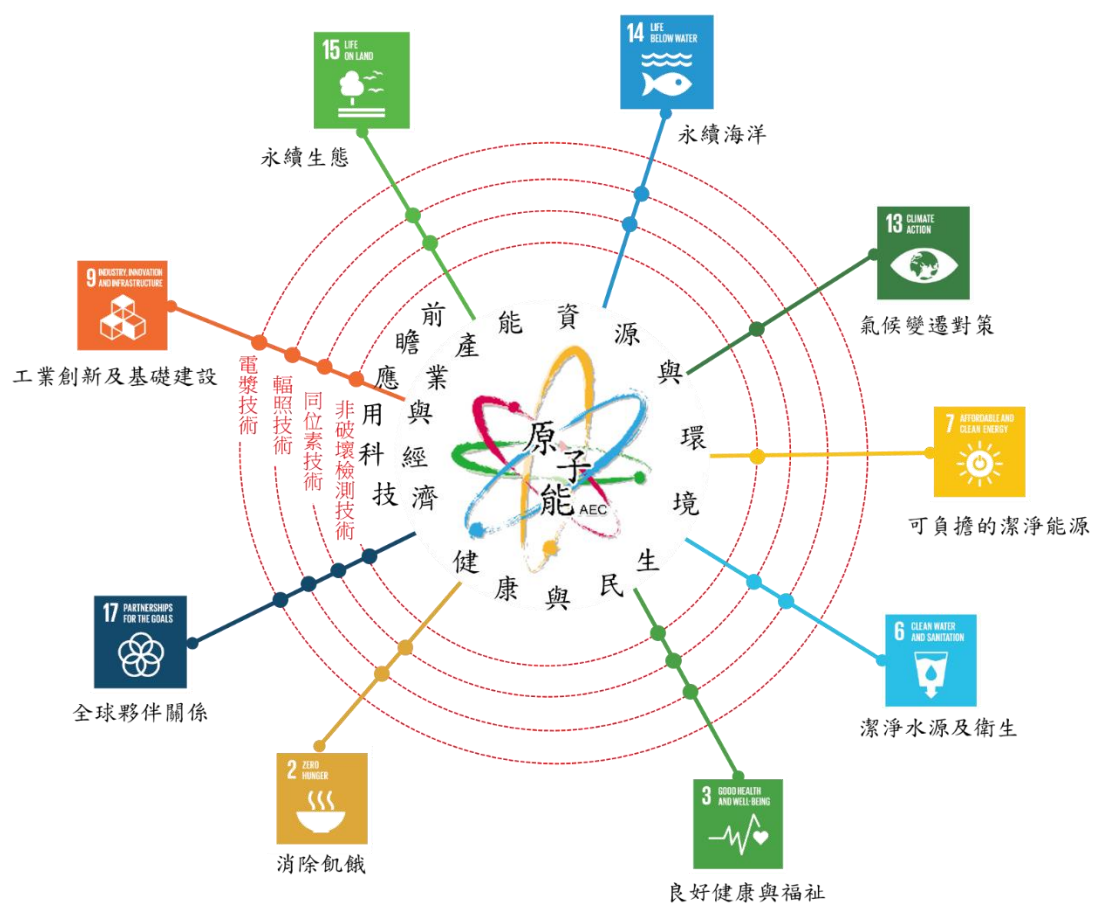


圖 4-2 善用原子能技術實踐聯合國永續發展目標

因應 COVID-19 疫情及中美貿易戰所導致的全球經濟劇烈變動與供應鏈加速重組，蔡總統在 2020 年就職典禮上宣示，將在五+二產業創新的既有基礎上，打造「六大核心戰略產業」，並透過建立臺灣品牌、提供靈活多元的金融支援、打造安全的產業發展環境與匯聚及培養數位人才等，讓臺灣成為未來全球經濟的關鍵力量⁷⁴，在支持六大核心戰略產業的發展上，可透過原子能技術建立國內自主關鍵技術及民生產業物資（圖 4-3）。

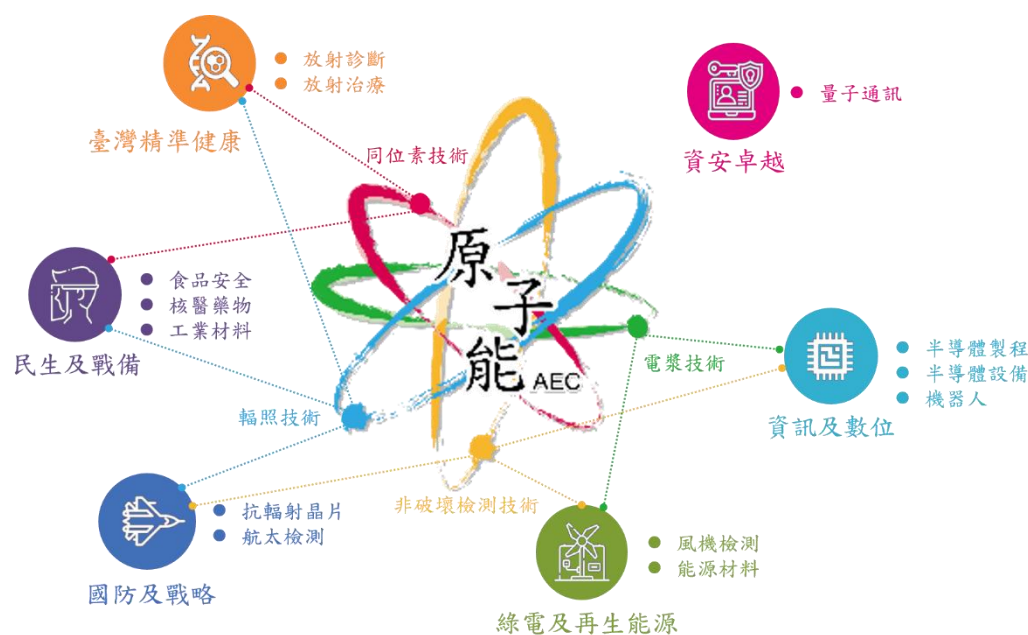


圖 4-3 運用原子能技術提升六大核心戰略產業價值

⁷⁴ 國家發展委員會，六大核心戰略產業推動方案（核定本），110 年 5 月。

在「資訊及數位」產業方面，立基我國完整半導體供應鏈，加強離子束、光源等電漿及非破壞檢測技術研發，以降低重要半導體設備仰賴進口之風險，另因應國內核電廠陸續除役，發展相關遠端機器人技術，以降低作業人員輻射風險；在「國防及戰略」產業方面，因應低軌道通訊衛星所需太空抗輻射電子元件需求，建立電子元件輻射照射驗證平台，以帶動國內抗輻射晶片研發量能，另建立國內航太檢測能量所欠缺中子源技術；在「綠電及再生能源」產業方面，運用電漿製程及材料分析技術，開發更低碳之能源材料，並建置離岸風電所需非破壞檢測能量；在「臺灣精準健康」產業方面，持續精進國內放射診斷及治療技術，以提升國人健康福祉；在「民生及戰備產業」方面，妥善運用原子能技術強化醫、農、工業之產業供應鏈韌性，包含運用同位素及輻射照射技術強化農糧保存技術及工業材料加值，建置新型迴旋加速器穩定國內核醫藥物供需等；在次世代「資安卓越」產業之量子通訊方面，超前佈署相關量子科技基礎研究及人才培育。

原子能科技民生應用的技術發展於國內已積累相當能量，技術範疇從基礎科學跨足前瞻應用科技，可因應社會經濟變遷需求整合跨領域進行研發，作為我國在面臨各方面趨勢挑戰下之解藥良方，由於涵蓋領域甚廣，需由政府跨部會資源整合進行研發，俾尋求最大效益，導入產業發展，如表 4-1 所示。

表 4-1 各領域跨部會整合資源建議

本策略藍圖劃分領域	跨部會整合資源建議
環境及水資源	科技部、經濟部、海委會、環保署
糧食及農業	科技部、衛福部、農委會
精準放射醫療	科技部、衛福部、經濟部
量子科技	科技部、教育部
中子科技	科技部、經濟部、農委會、交通部
工業應用	科技部、經濟部
半導體製程	科技部、經濟部
太空科技	科技部

附錄、原子能科技民生應用各領域議題形成流程

本策略藍圖以所蒐集的國內外技術資料，就重要性、可行性及產業化可能性等要素徵詢專家、學者意見⁷⁵，並彙整相關議題及意見，藉此釐清國內未來在原子能應用發展上的技術需求，俾作為政府推廣原子能科技民生應用及技術發展策略之方針，議題形成流程如下：

1. 研析國內外相關資料，依產業經濟、前瞻應用科技、能資源與環境、健康與民生等 4 面向盤點各項領域及技術群組。
2. 徵詢各領域專家、學者對於各技術群組之建議與看法，藉由專家意見的回饋，修正技術群組項目。
3. 共舉辦專家會議 8 場，以確認各領域技術群組之名稱、內容及排序。
4. 完成建構我國環境及水資源、精準放射醫療、太空科技、糧食及農業、量子科技、半導體製程、工業應用、中子科技 8 大領域之原子能科技於民生應用發展的策略藍圖。

⁷⁵ 共徵詢專家學者 34 名，領域涵括物理、核子醫學、放射科學、生物科技、農業科技、食品科學、海洋科學、地球科學、環境工程、核子工程、太空科技、材料工程、電機工程、半導體科技、醫學工程等學科。