

核能安全委員會委託研究期末報告

114 年度我國原子能施政支援體系建構計畫
(NSC11312098L)

分項研究：我國原子能科技決策支援體系建構

財團法人核能資訊中心

財團法人核能與新能源教育研究協進會

主持人：郭瓊文、王仲容

中華民國 114 年 11 月 14 日

目錄

	頁次
中文摘要.....	1
Abstract.....	2
第一章 前言.....	4
第二章 原子能科技民生應用趨勢研析	6
(一) 各國/組織原子能科研資訊蒐集與研析.....	7
(二) 國內原子能科研相關機構歷年發展與規劃計畫與成果蒐集與研析.....	15
(三) 初步原子能科技發展策略及決策支援平台規劃與資訊更新.....	16
(四) 舉辦原子能民生應用各技術領域之專家學者座談會.....	18
(五) 國內各產業發展現況盤點規劃.....	21
(六) 我國原子能科技施政決策支援體系政策建議與修訂.....	30
第三章 次世代核能技術研析及發展策略研析	50
(一) 國際核融合計畫與相關技術發展.....	50
(二) 小型模組化反應器(SMR)於各國發展類別	54
(三) 各國合作及相關管制單位資料蒐集.....	59
第四章 討論.....	89
(一) 討論.....	89
(二) 後續工作規劃.....	90
第五章 結論.....	92
參考文獻.....	95
附件一、第一場「農業與環境+工業應用」座談會 會議紀錄.....	116
附件二、第二場「量子中子科技+太空科技+半導體製程」會議紀錄.....	122
附件三、第三場「精準放射醫療+人工智慧」座談會 會議紀錄.....	127
附件四、第四場「次世代核能技術+人工智慧」座談會 會議紀錄.....	130

圖目錄

	頁次
圖 2-1 初步原子能科技發展策略及決策支援平台架構	16
圖 2-2 臺灣 SPECT 及 PET 檢查次數統計(以上 2010 至 2024 年共 15 年度).....	25
圖 2-3 全球半導體市場成長評估	27
圖 2-4 國原院 115-119 年度 SMR 研究計畫規劃構架	29
圖 2-5 IAEA 推動聯合國永續發展目標	30
圖 2-6 美國能源部之國家實驗室分布	33
圖 2-7 歐盟原子能民生應用之技術分類架構	34
圖 2-8 日本原子能民生應用	36
圖 3-1 ITER 巨型超導磁體	52
圖 3-2 聚界潔能 Alpha E 桌上型教育系統	53
圖 3-3 EAST 核融合裝置	54
圖 3-4 International Conference on Small Modular Reactors and their Applications 封面	58
圖 3-5 KAERI HANARO 實驗型反應器	58
圖 3-6 KAERI SMART-ITL	59
圖 3-7 KAERI KURT 試驗用隧道	59
圖 3-8 燭龍一號工程樣機	80
圖 3-9 貧化鈾電池示意圖	80
圖 3-10 中國核電廠位置	81
圖 3-11 截至 2024 年 5 月已運轉或興建中的核電廠	81
圖 3-12 NuScale 小型模組化反應器的剖面圖	82
圖 3-13 ARC-100 示意圖	82
圖 3-14 泰拉能源熔融氯化物快中子反應器 Molten Chloride Fast Reactor (MCFR) 示意圖	83
圖 3-15 Kairos 氟化鹽反應器 Fluoride Salt-Cooled High Temperature Reactor (FHR)示意圖	83
圖 3-16 整體式熔鹽反應器 Integral Molten Salt Reactor (IMSR)示意圖	84
圖 3-17 X Energy 公司 Xe-100 示意圖	85
圖 3-18 通用原子公司快速模組化反應器 Fast Modular Reactor 示意圖	86
圖 3-19 Radiant 公司微型反應器 Kaleidos	86
圖 3-20 伊利諾大學 HTGR 反應器示意圖	87
圖 3-21 Spring CAMP meeting 2025 NRC	87
圖 3-22 Spring CAMP meeting 2025 KIT	88
圖 3-23 Spring CAMP meeting 2025 LFR	88

表目錄

	頁次
表 1-1 本計畫所蒐集之主要國家/組織原子能科研資訊清單	8
表 2-2 109-114 年度原子能科技學術合作研究計畫-MF 統計	15
表 2-3 109-114 年度原子能科技民生應用科技計畫-核安會與國原院統計	15
表 2-4 初步原子能科技發展策略及決策支援平台規劃與資訊更新	17
表 2-5 第一場「農業與環境」+「工業應用」座談會議程	18
表 2-6 第二場「量子中子科技」+「太空科技」+「半導體製程」座談會議程	19
表 2-7 第三場「精準放射醫療」+「人工智慧」座談會議程	19
表 2-8 第四場「次世代核能技術」+「人工智慧」座談會議程	20
表 2-9 國內原子能科技民生應用產業盤點	22
表 2-10 摘譯日本原子能民生應用	36
表 2-11 原子能科技民生應用科研布局策略	45
表 2-12 清華大學原子能人才培育	47
表 2-13 114 年啟動的五大信賴產業推動方案	48
表 2-14 各領域跨部會整合資源建議	49
表 3-1 ARC-100 預先審查項目	77
表 3-2 ARC-100 提交預先審查項目	78
表 3-3 預先審查實際案例	78
表 3-4 NuScale SMR 事故劑量標準	79
表 3-5 有望加入美核電供應鏈廠商	79

中文摘要

原子能民生應用科技已廣泛應用於醫療、農業、工業及環境永續相關領域，因此，各國將其列為持續推動之科技發展重點。我國在原子能科技民生應用的發展過程中，針對原子能(含核子、輻射等技術)於醫療、農業、工業與環境永續等領域的技術研發與應用，已建立相當良好的基礎取得具體成果。核能安全委員會(以下簡稱核安會)已訂有民國「111 至 114 年原子能科技民生應用發展的策略藍圖」，本中程計畫於執行期間，參酌此策略藍圖內容，規劃蒐集全球主要單位與國家之原子能科研體系、重要政策及潛在合作管道等資料，以作為後續研析。另近期有關小型模組化反應器(SMR)與核融合等次世代核能技術之訊息，在國內外媒體上廣泛報導，引起國內社會大眾的關注。為因應此趨勢，應及早展開對 SMR 與核融合等次世代核能技術之研析工作，並依據我國產業發展現況與潛力、人才培育情形及國家發展導向等因素，提出我國原子能科技施政決策支援體系之政策建議。為配合核安會之施政目標，自 113 年至 116 年推動為期四年的「我國原子能科技決策支援體系建構」計畫，並分為「原子能科技民生應用趨勢研析」與「次世代核能技術研析及發展策略研析」兩個分項計畫，分年委由法人機構執行。113 年度已依原規劃完成各項工作，本期為 114 年度計畫，主要工作項目包括：延續並更新資料，著重精準醫療應用、氣候變遷相關應用及工業應用等領域之研析；同時盤點國內產業發展現況，以協助研擬「115 至 118 年原子能科技民生應用發展的策略藍圖」，作為後續推動之依據。

關鍵詞：原子能科技、核安會、決策支援系統、小型模組化反應器、核融合

Abstract

Atomic Energy technologies for people's livelihood have been widely utilized in the fields of medicine, agriculture, industry and environmental sustainability. Consequently, many countries regard this area as a key focus for continued technological advancement. In Taiwan, the development and applications of atomic energy (including nuclear, radiation and related technologies) to people's livelihood have established a solid foundation and achievements in the aforementioned fields. The Nuclear Energy Safety Commission (hereinafter referred to as the NSC) has formulated a strategic roadmap entitled “Strategic Blueprint for the Development of Atomic Energy Technologies for People's Livelihood Applications (2022-2025)”. During the implementation of this mid-term project, reference will be made to this roadmap in planning and collecting information from major international institutions and countries regarding nuclear research systems, significant policy developments, and potential avenues for collaboration. Related to the analysis of the atomic energy scientific research system, important policies and possible cooperation channels. Additionally, recent information on next-generation nuclear energy technologies such as small modular reactors (SMR) and nuclear fusion has been widely reported in both domestic and international media, attracting increasing public attention. Therefore, it is necessary to initiate comprehensive studies on SMR and nuclear fusion technologies at an early stage. Considering the current status and potential of domestic industries, talent cultivation, and national development priorities, the project aims to propose policy recommendations for establishing a nuclear science and technology decision-support system in Taiwan. To align with the Nuclear Safety Commissions policy objectives, a four-year project entitled “Establishment of Taiwan’s Atomic Energy Science and Technology Decision Support System” is being implemented from 2024-2027. The project is divided into two subprojects: (1) Research and Analysis on Trends

in People's Livelihood Applications of Atomic Energy Technology ", and (2) "Research and Analysis of Next-Generation Nuclear Energy Technologies". All planned tasks for 2024 have been completed as scheduled. The 2025 project will focus on updating and extending upon the data and research, with particular emphasis on applications in precision medicine, climate change mitigation, and industrial sectors. It will also include an assessment of the current state of domestic industry development to support the formulation of the "Strategic Blueprint for the Development of Atomic Energy Technologies for People's Livelihood Applications 2026-2029".

Keywords: atomic energy technology, Nuclear Safety Commission, decision support system, small modular reactors, nuclear fusion

第一章 前言

有鑒於原子能民生應用科技已廣泛應用於醫療、農業、工業及環境永續相關領域，所以，在各個國家均會將其列為持續科技發展的重點領域。我國在以往原子能科技民生應用的發展過程中，亦針對原子能(含核子、輻射等技術)在醫療、農業、工業與環境永續等領域相關的技術發展與應用，有相當良好的基礎與成果。核能安全委員會(以下簡稱核安會)已訂有民國 111 至 114 年原子能科技民生應用發展的策略藍圖[1-1]，本中程計畫於執行期間，將參酌此策略藍圖，規劃蒐集世界各關鍵單位與國家有關研析原子能科研體系、重要政策及可能之合作管道。另近期有關小型模組化反應器(SMR)與核融合等次世代核能技術之訊息，在國內外媒體上廣為發布，也引起國內社會大眾的注意；故對於 SMR 與核融合次世代核能技術之探討，應及早準備並完善進行研析，依國內相關產業現況及發展潛力、人才培訓情況、國家發展導向等因素，提出我國原子能科技施政決策支援體系之政策建議。為能配合核安會之施政目標，以推動 113-116 年為期四年的「我國原子能科技決策支援體系建構」計畫，並分為「原子能科技民生應用趨勢研析」與「次世代核能技術研析及發展策略研析」兩個分項計畫，分年度由財團法人核能資訊中心(以下簡稱核資中心)與財團法人核能與新能源教育研究協進會(以下簡稱核新協會)分別執行。而目前已進入本計畫的第二年(114 年度)。

有關核資中心 114 年度負責的部分，將列於第二章各節中，包括：於第二章第(一)節，繼續執行各國/組織原子能科研資訊蒐集與研析，涵蓋國際原子能總署(International Atomic Energy Agency, IAEA)、歐盟(Europe Union, EU)、美國、日本、韓國與中國等六個國家/組織的原子能科研資訊，每項資訊再分類為七個技術領域(「精準放射醫療」、「農業與環境」、「量子中子科技」、「太空科技」、「工業應用」、「半導體製程」及「人工智慧」)；第二章第(二)節，將歷年來國內原子能科研相關機構，針對原子能民生應用發展與規劃之計畫與成果進行蒐集、整理與研析，並滾動為對 109-114 年度六年之整理與統計；第二章第(三)節，規劃初步原子能科技發展策略及決策支援平台，將相關原子能科技資訊有系統、有結構的置放於該平台，提供給學者專家及一般民眾運用；第二章第(四)節，將說明舉辦

原子能民生應用各技術支援組織(Technical and Scientific Support Organizations, TSO)之專家座談會之過程、專家學者簡報摘述、討論問與答及結論與建議；第二章第(五)節，針對國內各產業發展現況進行初步盤點，對相關產業之現況加以簡要說明。惟因原子能民生應用技術涵蓋範圍廣泛，本節僅就屬於先進前瞻技術(即距離實際推廣應用尚有段距離)部分，蒐集並整理初步資訊；第二章第(六)節，因應國家發展、產業轉型及社會需求，對於建立我國原子能科技施政決策支援體系提出政策建議，並研擬一份「民國 115 至 118 年原子能科技民生應用發展的策略藍圖」(請參閱附本)。

第三章為核新協會 114 年度執行的內容，包括：次世代核能技術最新資訊更新，蒐集各式小型模組化反應爐的技術進展以及核融合技術進展；相關商用小型模組化發電廠的商轉期程；大型核融合計畫(ITER)發展狀況；各國核能管制單位應對次世代核能技術之作業蒐集研析；最後將國際合作以及各國發展次世代核能技術所更新的資訊作一簡述。

第四章為討論與後續工作規劃；最後，第五章為本報告結論。

第二章 原子能科技民生應用趨勢研析

根據 114 年度的服務建議書所提的各工作項目如下：

1. 繼續國際原子能民生應用科研體系、重要政策及合作管道等資訊之蒐集與研析。
2. 國內原子能民生應用研究計畫資訊蒐集與分析。
3. 初步規劃「原子能科技發展策略及決策支援平台」與資訊更新。
4. 針對原子能民生應用於各技術領域，舉辦 TSO 專家座談會。
5. 國內各產業發展現況盤點。
6. 因應國家發展、產業轉型及社會需求，對於建立我國原子能科技施政決策支援體系提出政策建議與修訂。
7. 完成本年度計畫各項產出質/量化值目標。
 - (1) 探討國際原子能總署、歐盟、美國、亞洲(日本、韓國、中國)等國際原子能科研體系，重要政策及合作管道，並提供施政方案之建議(質化)。
 - (2) 完成四場座談會。為廣納專家學者意見，於本年度上半年舉辦四場座談會，並針對國內各產業發展現況進行盤點。原規劃之四場座談會並未涵蓋「次世代核能技術」議題，惟為使整體策略藍圖更趨完備，因此與核新協會合作，將該議題納入第四場座談會討論範疇(量化)。
 - (3) 完成期中報告撰寫與修改(量化)
 - (4) 提出對於建立我國原子能科技施政決策支援體系之政策建議(質化)。
 - (5) 完成「114 年度國際原子能民生應用研究資訊彙編」(量化)。
 - (6) 草擬完成「我國原子能科技民生應用發展策略藍圖(115 年至 118 年)」之編撰(量化)。
 - (7) 完成期末報告(量化)

(一) 各國/組織原子能科研資訊蒐集與研析

114 年度計畫持續針對國際原子能總署(International Atomic Energy Agency, IAEA)、歐盟(Europe Union, EU)、美國、日本、韓國與中國等六個國家/組織的原子能科研資訊，進行蒐集、整理與研析。每項資訊再次分為七個技術領域：「精準放射醫療」、「農業與環境」、「量子中子科技」、「太空科技」、「工業應用」、「半導體製程」及「人工智慧」，共蒐集 143 篇相關資訊，詳如表 2-1 [1-2~1-144]所示。各領域中，「精準放射醫療」有 25 篇、「農業與環境」有 22 篇、「中子量子科技」有 12 篇、「太空科技」有 19 篇、「工業應用」有 36 篇、「半導體製程」有 12 篇及「人工智慧」有 17 篇，請參閱「2025 年國際原子能科技民生應用研究資訊彙編」。

表 1-1 本計畫所蒐集之主要國家/組織原子能科研資訊清單

1. 精準放射醫療	1.1 放射治療	IAEA	1.1.1 回收放射源用於癌症治療：國際原子能總署倡議持續推動
			1.1.2 IAEA 制定高劑量率近接放射治療劑量學審核方法
		美國	1.1.3 國家標準與技術研究所制定鈾-225 放射性抗癌藥物劑量標準
			1.1.4 測量 DNA 損傷以提升癌症治療與輻射緊急應變能力
		歐盟	1.1.5 歐盟游離輻射於放射治療之調查報告
			1.1.6 歐洲質子治療統計分析
			1.1.7 英國資助計畫擴大放射性廢棄物用於放射治療
		日本	1.1.8 利用輻射誘導水分子化學變化以探索最新的癌症治療方法
			1.1.9 日本粒子治療的醫療機構分布
		韓國	1.1.10 揭示輻射誘發的 DNA 突變以提高放射治療的安全性
			1.1.11 韓國臨床研究證實低劑量放射治療阿茲海默症的潛力
		中國	1.1.12 中國放射治療產業鏈與市場發展前景分析
	1.1.13 中國首台硼中子捕獲治療設備完成臨床首例治療		
	1.2 放射診斷與核子醫學	IAEA	1.2.1 IAEA 舉辦首場區域性診療合一(Theranostics)培訓
			1.2.2 IAEA 發布「透視導引介入性手術品質保證和優化指南」
		美國	1.2.3 美國核子醫學市場預測(2025-2034)
			1.2.4 FDA 擴大鐳-177 的適應症
		歐盟	1.2.5 歐盟游離輻射於醫學影像之調查報告
1.2.6 心臟透視檢查及介入治療與放射治療對兒童的健康影響			

		日本	1.2.7 日本核子醫學市場規模及展望
			1.2.8 日本電腦斷層掃描市場報告
		韓國	1.2.9 韓國推動醫用同位素國產化
			1.2.10 韓國擬定 2030 年放射性同位素全面自主化的策略
		中國	1.2.11 中國開發首台光子計數電腦斷層
			1.2.12 中國核醫藥產業現況研究與發展前景預測報告(2025-2032 年)
2. 農業與環境	2.1 農業	IAEA	2.1.1 以無人機探測天然加馬輻射並測量農業土壤狀況
			2.1.2 核子科學協助模里西斯培育抗病花椰菜新品種
		美國	2.1.3 利用 X 射線幫助控制玉米中的致癌毒素
			2.1.4 全球對輻照食品的認知與接受度比較分析
		歐盟	2.1.5 農業革命：核子科學如何提高奧地利作物產量與糧食安全
			2.1.6 2025 年至 2035 年食品輻照市場展望
		日本	2.1.7 輻射在植物育種、食品照射及害蟲防治中的應用
			2.1.8 利用 X 射線電腦斷層掃描檢測水稻根系
		韓國	2.1.9 韓國開發首個國產「超級食品」蠶豆品種
			2.1.10 加馬輻照可提升杏鮑菇採後的品質
		中國	2.1.11 中國首例湖北櫻花與野菊花太空育種試驗
			2.1.12 太空育種啟航
	2.2 環境	IAEA	2.2.1 氣候變遷的因應策略
			2.2.2 氣候變遷解決方案：國際原子能總署和 COP
			2.2.3 核子技術對氣候變遷的解決方案

			2.2.4 國際原子能總署第一個古巴沿海和海洋衛生合作中心
			2.2.5 以無人機探測天然加馬輻射並測量農業土壤狀況
		美國	2.2.6 以高壓漿料燒蝕技術進行新型鈾礦廢棄物修復
		歐盟	2.2.7 哥白尼大氣監測服務升級增加全球覆蓋範圍
		日本	2.2.8 輻射和熱處理可成功 100%分解特氟龍
		韓國	2.2.9 利用輻射誘發環保微生物菌株進行環保
		中國	2.2.10 電子束應用於水處理
3. 中子量子科技	3.1 中子應用	IAEA	3.1.1 透過宇宙射線中子感測技術提升納米比亞農業生產力
		美國	3.1.2 中子科學對美國工業的經濟價值
		歐盟	3.1.3 歐盟串列加速器快中子源
		日本	3.1.4 日本脈衝中子源達成世界最強運轉的里程碑
		韓國	3.1.5 韓國 HANARO 冷中子研究設施 2024 年發展概況
		中國	3.1.6 中國散裂中子源
	3.2 量子科技	IAEA	3.2.1 離子束誘導材料時空結構演化
		美國	3.2.2 美國量子科學政策
		歐盟	3.2.3 歐盟的量子戰略與創新融資策略
		日本	3.2.4 日本量子束設施研究應用與發展
		韓國	3.2.5 韓國立法奠定量子經濟發展基礎，邁向全球量子強國
		中國	3.2.6 中國量子衛星佈局
4. 太空科技	4.1 核動力	IAEA	4.1.1 核動力工作小組啟動新五年計畫(2024-2028)
		美國	4.1.2 從核電廠到月球：美國啟動核能復興計畫

			4.1.3 新太空核動力系統計畫
		歐盟	4.1.4 歐洲太空總署研究概述 2035 年核動力推進計畫
		中國	4.1.5 中國開發太空核反應爐
			4.1.6 中國和俄羅斯計畫在月球上建造核電廠
	4.2 晶片抗輻射	美國	4.2.1 全球抗輻射電子市場快速成長
		歐盟	4.2.2 歐盟推動太空電子關鍵技術研發
			4.2.3 歐洲抗輻射電子產品市場規模
		日本	4.2.4 日本加速太空合格零件與抗輻射晶片研究
		韓國	4.2.5 韓國成功研發新型抗輻射半導體技術
		中國	4.2.6 中國首個國產高壓抗輻射碳化矽功率器件完成空間驗證
	4.3 太空供電	美國	4.3.1 輕量、柔性、抗輻射：太空用有機太陽能電池的新突破
			4.3.2 美國開發核子鑽石電池
		歐盟	4.3.3 英國成功研製壽命可達數千年的碳-14 鑽石電池
		日本	4.3.4 日本開發銻-241 核電池
		韓國	4.3.5 韓國研發「鈣鈦礦」與「碳同位素」核電池
		中國	4.3.6 中國量產硬幣大小、壽命長達 50 年的核電池
4.3.7 中國開發超長壽命碳-14 核電池「燭龍一號」			
5. 工業應用	5.1 輻射照射設備	IAEA	5.1.1 減少、再利用、輻照：IAEA 推動亞太地區塑料回收新模式
			5.1.2 可移動電子束系統
		美國	5.1.3 低能量電子束
		歐盟	5.1.4 歐洲電子束市場分析

			5.1.5 歐洲加馬輻照市場分析
		日本	5.1.6 移動式加馬輻照系統用於環境輻射監測
		韓國	5.1.7 韓國先進輻射技術研究所加入國際輻照協會
		中國	5.1.8 中國向孟加拉國提供輻照設備
			5.1.9 新的輻照技術有效延長冬棗保鮮期
			5.1.10 中國推出首款國產電子束蝕刻機「羲之」
	5.2 滅菌檢疫	IAEA	5.2.1 IAEA 與 FAO 推動食品與植物檢疫輻照技術
		美國	5.2.2 電子束、X 射線與 γ 射線：2025 年及以後的滅菌趨勢
		歐盟	5.2.3 歐洲輻照滅菌服務市場分析
		日本	5.2.4 加馬射線照射對纖維素奈米纖維的影響
		韓國	5.2.5 韓國滅菌技術市場概況
		中國	5.2.6 元化醫學攜手中廣核推動冰凍自體顱骨照射滅菌
	5.3 鑑定(定年、元素確認、密度、液位、偵測)	IAEA	5.3.1 增強核分析技術以滿足法醫學的需求
		美國	5.3.2 利用水的穩定同位素推斷溪流水源來自高海拔積雪
		歐盟	5.3.3 短壽命天然放射性核種可作為水文地質研究中的示蹤劑
		日本	5.3.4 日本西南部岡山縣與鳥取縣鋰、鋇同位素水文地球化學研究
		韓國	5.3.5 韓國裂隙花崗岩基岩含水層水文地球化學研究
		中國	5.3.6 低濃度微量甲烷富集純化及石墨化製備裝置研究(用於碳定年)
			5.3.7 透過同位素定年證實地球生命可能比已知更早
	5.4 非破壞性檢測	IAEA	5.4.1 非破壞性檢測-從災難復原到拯救文化遺產
美國		5.4.2 2025-2033 年美國非破壞性放射照相設備發展	

		歐盟	5.4.3 放射線照相檢測的未來發展前景	
		日本	5.4.4 透過工業用電腦斷層掃描增強自動化製造的模組運算	
		韓國	5.4.5 數位 X 射線照相檢測在國防非破壞性檢測的應用	
		中國	5.4.6 工業非破壞性檢測技術—揭示材料內部的「火眼金睛」	
	5.5 工業、研究	IAEA	5.5.1 IAEA 推動輻射技術在保健、工業和環境方面的應用	
			5.5.2 IAEA 第 3 屆輻射應用會議：從飛機和塑膠到氣候變遷和文化	
		美國	5.5.3 多通道中子與加馬影像探測技術	
		歐盟	5.5.4 新開發的導熱材料有望在未來的加速器和工業中使用	
		日本	5.5.5 日本放射性同位素的製造方式與應用現況	
		韓國	5.5.6 適當加馬射線劑量率在文物保護處理的應用	
		中國	5.5.7 中核秦同首批碳-14 成功試生產	
	6. 半導體製程	6.1 離子佈植技術	IAEA	6.1.1 IAEA 發布離子對物質的電子阻擋本領資料庫
			歐盟	6.1.2 多種單離子佈植機設備開啟量子技術新時代
日本			6.1.3 離子佈植技術完成「金紅石結構二氧化銻($r\text{-GeO}_2$)」n 型導電性	
韓國			6.1.4 韓國開發離子佈植 4H-SiC 可提升功率半導體摻雜精度	
中國			6.1.5 中國出口半導體或積體電路生產設備：離子佈植機	
			6.1.6 以氫離子佈植藍寶石基板提升 GaN 薄膜品質	
			6.1.7 氫離子植入晶片重大突破	
6.2 電漿物理技術		美國	6.2.1 美國開發的電腦程式可望降低微晶片成本	
		歐盟	6.2.2 歐盟挹注 100 萬歐元發展加速器於雷射電漿與高溫超導體技術	
		日本	6.2.3 日本發布 2050 年電漿科學發展路徑圖	

		韓國	6.2.4 韓國半導體電漿蝕刻機市場規模(2026-2033 年)
		中國	6.2.5 成立四年打造出 28 奈米光刻機擾動全球半導體產業鏈
7. 人工智慧	7.1 核子技術	IAEA	7.1.1 國際原子能總署將於 2025 年 12 月舉辦 AI 與核能國際專題討論
		美國	7.1.2 人工智慧驅動的放射成像檢測創新應用
		歐盟	7.1.3 歐盟啟動「Apply AI」策略以打造歐洲自主人工智慧生態圈
			7.1.4 利用人工智慧支援海上核能發展
		日本	7.1.5 以機器學習分子動力學在核反應器中的應用
		韓國	7.1.6 深度學習模型將核融合電漿預測精度提升 1,000 倍
		中國	7.1.7 中國核電實現跨越發展「核能+人工智慧」開啟新空間
	7.2 醫學影像	IAEA	7.2.1 人工智慧如何輔助頭頸癌治療
		美國	7.2.2 美國人工智慧在醫學影像領域的成長分析報告(2025 年)
			7.2.3 評估深度學習工具在骨折檢測的潛力
		歐盟	7.2.4 歐盟人工智慧研究預示著放射學領域的轉變
			7.2.5 歐洲核子研究中心參與開發以人工智慧進行中風預測模型
			7.2.6 2025 年值得關注的醫學影像發展趨勢
		日本	7.2.7 人工智慧在肝細胞癌立體定位消融放射治療的應用
7.2.8 日本啟動前列腺癌放射治療自動化計畫			
韓國	7.2.9 AI 技術革新放射性藥物分佈評估方式		
中國	7.2.10 人工智慧在醫學影像上是助手而非替代		

(二) 國內原子能科技相關機構歷年發展與規劃計畫與成果蒐集與研析

國內有關原子能科技民生應用之研究與發展，本年度彙整了核安會與國科會的「原子能科技學術合作研究計畫(以下簡稱 MF 計畫)」；以及核安會與國家原子能科技研究院(以下簡稱國原院)的委託研究計畫這兩大項。前者計畫以七大領域分類統計，於 109-114 六個年度共有 121 件委託計畫(表 2-2)，主要委託對象是學術機構及法人；其中仍以精準放射醫療領域 52 件為最多，其次為半導體製程 30 件、農業與環境 16 件；其餘領域則較為零散。而後項計畫如表 2-3 所示，六個年度共有 130 件委託計畫，主要委託對象也是學術機構及法人(也包括國原院)，其中也是以核子醫學領域較多。

表 2-2 109-114 年度原子能科技學術合作研究計畫-MF 統計(委託計畫件數) [1-145~1-148]

年度	精準放射醫療	農業與環境	中子量子科技	太空科技	工業應用	半導體製程	人工智慧	合計
109	7	3	1	1	1	1	0	14
110	7	3	0	2	1	5	0	18
111	11	4	1	3	1	4	1	25
112	6	2	1	1	0	7	0	17
113	9	2	1	1	1	4	1	19
114	12	2	0	3	0	9	2	28
合計	52	16	4	11	4	30	4	121

表 2-3 109-114 年度原子能科技民生應用科技計畫-核安會與國原院統計(計畫件數) [1-149~1-153]

年度	精準放射醫療	農業與環境	中子量子科技	太空科技	工業應用	半導體製程	人工智慧	合計
109	4	1	1	1	2	1	0	10
110	4	1	4	1	1	1	0	12
111	5	1	3	6	2	5	1	23
112	9	1	4	10	2	9	4	39
113	4	1	3	8	2	8	2	28
114	4	1	3	3	2	3	2	18
合計	30	6	18	29	11	27	9	130

(三) 初步原子能科技發展策略及決策支援平台規劃與資訊更新

根據 112 年度先期計畫[1-154]，針對「原子能科技發展策略及決策支援平台架構」初步規劃如圖 2-1。以下分別說明擬規劃的內容。

國際TSO概述	國內TSO概述	研究技術領域	資訊彙編	國內研究成果	聯繫/合作方式
IAEA	精準放射醫療	精準放射醫療	最新消息	原子能科技學術合作研究計畫(MF)	研究計畫規劃方式
歐盟	農業與環境	農業與環境	新聞報導	補助款計畫	合作計畫推行方式
美國	工業應用	工業應用	研討會訊息	委託計畫	聯繫方式
日本	量子中子科技	量子中子科技			
韓國	太空科技	太空科技			
中國	半導體製程	半導體製程			
其他	人工智慧	人工智慧			

圖 2-1 初步原子能科技發展策略及決策支援平台架構

1. 國際 TSO 概述：持續蒐集包括：IAEA、歐盟、美國、日本、韓國及中國等國家或組織於原子能民生應用資訊，並針對其相關技術支援組織(TSO)整理與簡要介紹說明，並與各網頁做連結。
2. 國內 TSO 概述：將已建立的國內執行原子能民生應用研究團隊與各研究小組，依七大領域分類，作為國內各學術機構/法人(TSO)可執行研究計畫名冊。
3. 研究技術領域技術資訊：依據 113 年度前期計畫[1-155]，原子能民生應用研究與技術分為七大領域，針對各領域之定義、範圍、技術要項再次分為 19 類，初步的技術分類如表 2-4 所示。後續亦將依此分類架構彙整年度相關資訊，供到訪者查詢與點選閱讀。
4. 資訊彙編：包括最新消息、新聞報導及國際研討會訊息等三個次方塊，最新消息將參考 IAEA 發布之訊息(Press releases)，擇合適者摘譯整理之；新聞報導則由搜尋國內外最新相關報導，擇重要性發布之；而國際研討會訊息則蒐集國際當年與次年之研討會訊息與連結。
5. 我國相關研究成果：原子能民生應用研究計畫各年度成果，包括有 MF、委託計畫及國原院補助款計畫等三類，其中前二者均有各年度的成果發表會，並彙編有成果報告，這些報告也已置放在核安會網頁上；故在前二者將做連結。至於國原院補助款計畫，將重點放在平台上，並與國原院相關性做連結。

6. 聯繫/合作方式：內容包括研究計畫規劃重點、整合型計畫申請與聯繫方式，其中，研究計畫規劃重點將列出近幾年度 MF 計畫(N1-N4)的重點方向，供學術機構及法人於申請期限前提出計畫申請。整合型計畫申請則是針對核安會特定研究議題有整合執行之需求時，於此發布供學者專家提出整合型計畫。至於聯繫方式則為本中心承辦人的聯繫方式。

表 2-4 初步原子能科技發展策略及決策支援平台規劃與資訊更新

1. 精準放射醫療	1.1 放射治療
	1.2 放射診斷與核子醫學
2. 農業與環境	2.1 農業(植物突變育種、昆蟲不孕)
	2.2 環境(土壤與水管理、海洋酸化、溫室氣體轉化塑膠污染)
3. 中子量子科技	3.1 中子應用
	3.2 量子科技
4. 太空科技	4.1 核動力
	4.2 晶片抗輻射
	4.3 太空供電
5. 工業應用	5.1 輻射照射設備
	5.2 滅菌檢疫
	5.3 鑑定(定年、元素確認、密度、液位、偵測)
	5.4 非破壞性檢測
	5.5 高能雷射
	5.6 廢棄物處理
6. 半導體製程	6.1 離子佈植技術
	6.2 電漿物理技術
7. 人工智慧	7.1 核子技術
	7.2 醫學影像

(四) 舉辦原子能民生應用各技術領域之專家學者座談會

為了能深入了解原子能民生應用各技術領域之研究計畫議題是否合宜，特別安排於本年度 4 月至 6 月間舉辦四場座談會，並按七個技術領域類似性，每一場分配 2 至 3 個技術領域來辦理；包括有：「農業與環境」+「工業應用」、「量子中子科技」+「太空科技」+「半導體製程」、「精準放射醫療」+「人工智慧」及「次世代核能技術」+「人工智慧」等四場座談會。其中，第四場座談會額外安排近期關注的議題，將本計畫第二部分「次世代核能技術研析及發展策略研析」之「次世代核能技術」納入第四場座談會議題。以下分別對於四場座談會之執行過程、各引言人簡報概要、會議討論與紀錄及結論與建議等，分別說明之。

1. 第一場座談會「農業與環境」+「工業應用」：

- (1) 執行過程：於 114 年 4 月 29 日(二)假清華大學李存敏館二樓會議室召開，議程如表 2-5；共有核安會、國原院、學界、業界相關專家學者參加。
- (2) 各引言人簡報概要：本場座談會除了先由核資中心施建樑顧問報告「我國原子能科技決策支援體系建構介紹」[1-156]外，另邀請了四位專家學者做引言說明[1-157~1-160]。
- (3) 會議討論與紀錄，如附件一。

表 2-5 第一場「農業與環境」+「工業應用」座談會議程

預定日期	時間	主持(講)人	議題(講題)	備註
4/29 (二)	09:00-09:30		報到	
	09:30-09:45	施建樑顧問	我國原子能科技決策支援體系建構介紹	
	09:45-10:00	中興大學園藝系 張正教授	輻射誘變技術於農業育種改良	
	10:00-10:15	清大電機工程系 黃衍介教授	高能雷射技術在原子能民生應用之展望	
	10:15-10:30	元培科大醫放系 郭宗德副教授	原子能民生應用技術在工業應用領域研究之展望	
	10:30-10:45	中研院黃國芳博 士	同位素技術於環境永續之應用	
	10:45-11:00		休息	
	11:00-12:00	郭瓊文/施建樑	討論	

2. 第二場座談會「量子中子科技」+「太空科技」+「半導體製程」：

- (1) 執行過程：係於 114 年 5 月 9 日(五)，假清華大學李存敏館二樓會議室召開，議程如表 2-6；共有核安會、國原院、學界、業界相關專家學者參加。

(2) 各引言人簡報概要：本場座談會邀請了四位專家學者作各領域發展現況，做引言說明[1-161~1-164]。

(3) 會議討論與紀錄，如附件二。

表 2-6 第二場「量子中子科技」+「太空科技」+「半導體製程」座談會議程

日期	時間	主持(講)人	議題(講題)
5/9 (五)	09:00-09:30	報到	
	09:30-09:45	施建樑顧問	我國原子能科技決策支援體系建構介紹
	09:45-10:00	清華大學工科系李志浩教授	The complementary tools of synchrotron X-ray and neutron
	10:00-10:15	國原院同位素應用所副所長 杜定賢	國原院「70 Mev 迴旋加速器之設計與研究應用規劃」
	10:15-10:30	國原院物理所葉彥顯博士	原子能民生應用技術在「太空科技」研究之展望
	10:30-10:45	清華大學核工所 梁正宏教授	原子能民生應用技術於「半導體製程」研究之展望
	10:45-11:00	休息	
	11:00-12:00	郭瓊文董事長/施建樑顧問	討論
	12:00-12:30	午餐(餐盒)	

3. 第三場座談會「精準放射醫療」+「人工智慧」：

(1) 執行過程：係於 114 年 5 月 21 日(三)，假台北榮總醫院腫瘤醫學部大會議室召開，議程如表 2-7；共有核安會、國原院、學界、台北榮總、台北國泰醫院、業界等相關專家學者參加。

(2) 各引言人簡報概要：本場座談會邀請了如表 2-7 議程五位專家學者作各領域發展現狀之引言說明[1-165~1-169]。

(3) 會議討論與紀錄，如附件三。

表 2-7 第三場「精準放射醫療」+「人工智慧」座談會議程

日期	時間	主持(講)人	議題(講題)	備註
5/21 (三)	13:00-13:30	報到		
	13:30-13:45	北榮放射腫瘤部 劉裕明主任	重粒子治療在臺北榮總的臨床經驗	
	13:45-14:00	核醫學會 王昱豐理事長	聚焦於癌:核醫精準診療如何重塑癌症照護地圖	
	14:00-14:15	國原院同位素所 張明誠副所長	國原院放射診療藥物開發研究之規劃及 70 MeV 迴旋加速器之研究應用	
	14:15-14:30	國原院輻射防護所 倪于晴副研究員	國原院放射成像之研究現況與未來規劃	
	14:30-14:45	群創公司 李銘忻博士	人工智慧技術在放射診療之應用研究	
	14:45-15:00	休息		
	15:00-16:00	郭瓊文董事長	討論	

4. 第四場座談會「次世代核能技術」+「人工智慧」：

- (1) 執行過程：於 114 年 6 月 3 日(二)，假清華大學李存敏館二樓會議室召開，議程如表 2-8；共有核安會、大學、國原院、業界、核新協會、核資中心與核協會等相關專家學者參加。
- (2) 各引言人簡報概要：本場座談會邀請了五位專家學者作各領域發展現狀，做引言說明[1-170~1-174]。
- (3) 會議討論與紀錄：如附件四。

表 2-8 第四場「次世代核能技術」+「人工智慧」座談會議程

日期	時間	主持(講)人	議題(講題)
6/3 (二)	09:00-09:30	報到	
	09:30-09:45	清華大學工科系 李志浩教授	人工智慧技術在次世代核能技術之應用研究 (SMR)
	09:45-10:00	國原院原能所 陳仲遠副研究員	國原院小型模組化反應器(SMR)研究規劃
	10:00-10:15	中央大學機械系 曾有志副教授	低活化核融合材料發展現況
	10:15-10:30	成功大學太空與電漿所 張博宇所長	台灣首座磁約束高溫電漿設施(Formosa Integrated Research Spherical Tokamak, FIRST)建置之現況
	10:30-10:45	國原院燃材所 董曉明研究員	人工智慧於次世代核能技術之應用
	10:45-11:00	休息	
	11:00-12:00	王仲容董事長	討論
	12:00-12:30	午餐(餐盒)	

(五) 國內各產業發展現況盤點規劃

針對國內原子能科技民生應用之研究發展現況，本計畫盤點之範圍包括 MF 計畫、「原子能系統工程跨域整合發展計畫」、政策額度計畫及科發基金計畫等政府支持之研究計畫，並彙整 112-114 年「國際原子能科技民生應用資訊彙編」以及各主要研究及產業機構之公開資料。經與專家學者訪談後，將國內原子能民生應用技術歸納呈現為「精準放射醫療」、「農業與環境」、「中子量子科技」、「太空科技」、「工業應用」、「半導體製程」、「人工智慧」及「次世代核能技術」等八大領域。國內各產業發展現況初步盤點如表 2-9 所示，表中列出八大技術領域之分項技術、主要應用(或研究計畫)，並對應相關產業(或研發)單位及其投入經費情形。以下將針對本計畫八大領域蒐集到的各產業市場(研發經費)規模，摘述如下：

1. 精準放射醫療

我國在放射治療方面，主要是多家教學醫學中心引進直線加速器、質子治療、重粒子加速器與硼中子捕獲治療(BNCT)。根據衛福部醫事司統計[1-175]，截至 113 年 11 月 30 日，臺灣質子治療設備共有 4 間醫療機構(林口長庚、高雄長庚、北醫附醫、中醫大附醫)營運中；重粒子治療設備共有 1 間醫療機構(台北榮總)。以台北榮總重粒子為例，該中心建設始於 2018 年，自 2023 年 5 月起正式營運，目前每日約有 19 人次。已完成腫瘤治療之病症包括：(1)肝細胞癌(HCC)；(2)胰臟癌；(3)頭頸部腫瘤；(4)脊索瘤等。

另台北榮總與清華大學合作，利用清華大學的水池式研究用反應器(THOR)，以 $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$ 反應破壞腫瘤細胞。自 2010 年 8 月 11 日完成首例治療以來，迄今已累計治療超過 600 位病人，尤其是針對復發性頭頸癌及腦部腫瘤治療成效良好，對於骨肉瘤、脊索瘤及乳癌療效亦佳。2024 年 10 月 22 日，台北榮總、陽明交通大學與禾榮科技三方簽署合作協議，預計於 2027 年「硼中子捕獲治療中心」建置完成，象徵臺灣在癌症放射治療、教學與研究領域達到國際頂尖水準。

核醫造影技術已廣泛地應用於臨床診斷及新藥研發上，不論在內分泌系統、消化及泌尿系統、腦神經造影、腫瘤造影及心臟血管造影等，皆扮演著舉足輕重的角色。根據衛福部統計，臺灣地區以單光子斷層掃描儀(SPECT)

表 2-9 國內原子能科技民生應用產業盤點

技術領域	分項技術	應用	產業(研發)單位	經費(產值)	備註
1.精準放射醫療	1.1 放射治療	1.1.1 放射性治療藥物及其臨床應用之開發	國原院、各教學醫院		
		1.1.2 質子、重粒子加速器治療	林口長庚、高雄長庚、台大醫院、北醫附醫、台北榮總、中醫大附醫	以台北榮總重粒子加速器治療為例：每日總治療人數約 280 人，包含體外照射治療(EBRT)每日約 261 人次與重粒子治療(CIRT)每日約 19 人次。	
		1.1.3 BNCT 多樣性治療及加速器中子源引入	台北榮總、陽明交大、清大禾榮、中醫大附醫		
		1.1.4 AI 個人標靶治療計畫協助			核醫學學會有意願
		1.1.5 診療合一(Radiotheranostics)放射性藥物之開發及其臨床應用			國原院、核醫學學會有意願
	1.2 放射診斷與核子醫學	1.2.1 放射性診斷藥物及其臨床應用之開發	國原院、各教學醫院		
		1.2.2 使用 AI 技術於藥物及放射成像輔助系統開發	國原院		
2.農業與環境	2.1 農業	2.1.1 中草藥輻射照射誘變育種	嘉義大學		
		2.1.2 蘭花輻射照射誘變育種改良	中興大學	文心蘭：國內市場盆花每年 4-5 億元，切花每年 7 億元；蝴蝶蘭：國內外市場合計有 100 億元/年。	
	2.2 環境	2.2.1 環境(海洋、空氣、河川與土壤)示蹤劑應用	中研院地球所		
		2.2.2 海洋塑膠微粒追蹤研究	中山大學		
		2.2.3 碳循環、海洋碳儲存(碳匯)研究	中山大學		
		2.2.4 輻射誘發的持久性有機污染(Persistent Organic Pollutants, POPs)降解技術			
3.1 中子應用	3.1.1 中子輻射散射研究	清大、中央大學			
	3.1.2 熱中子與輻射損傷研究	清大、中央大學			

		3.1.3 中子反射儀(Neutron Reflectometer)研究	清大、中央大學		
		3.1.4 中子活化分析	清大		
		3.1.5 建立中子源或其他適用輻射平台	國原院、清大		
		3.1.6 赴國外(如澳洲)進行中子相關測試研究	清大、中央大學		
	3.2 量子科技	3.2.1 量子電腦及量子模擬器(硬體)：超導量子位元、矽量子點與量子光電晶片			
		3.2.2 量子演算法與量子計算之應用(軟體)			
		3.2.3 量子通訊			
		3.2.4 量子感測器			
4. 太空科技	4.1 核動力	4.1.1 核電推進			
		4.1.2 核熱推進			
	4.2 晶片抗輻射	4.2.1 輻射測試 SOP (TID, SEE 等)	國原院、長庚大學、陽明交大、太空中心、明新科大		
		4.2.2 元件測試資料庫	國原院、長庚大學、陽明交大、太空中心、明新科大		
		4.2.3 抗輻射太空太陽電池研發	國原院、清大、台大、太空中心		
		4.3.4.以適用任務場景對照策略(如低軌道應用、其他選擇性任務)評估太空環境與地面等效輻射條件對照模型	國原院、長庚大學、陽明交大、太空中心、清大、台大、明新科大		
4.3 太空供電					
5. 工業應用	5.1 輻射照射設備	5.1.1 加馬射束、電子射束及光子射束(X-Ray)輻照應用研究	中國生化、新和科技、國原院		
		5.1.2 輻射交聯	新和科技		
	5.2 滅菌檢疫				
	5.3 鑑定(定年、元素確認、密度、液位、偵測)				
	5.4 非破壞性檢測				技術包括：射線檢測 (RT/X-ray/ γ)，應用產業：半導體與電子製造、石化/

					煉油、電力/風電、航太、鋼鐵/製造、交通基礎設施(橋樑、鐵道)等。
	5.5 高能雷射	5.5.1 雷射粒子加速	清大		
		5.5.2 同位素純化	清大		
		5.2.3 雷射核融合	清大		
		5.2.4 歐洲極光基礎建設核物理研究(Extreme Light Infrastructure Nuclear Physics)計畫	清大		
6.半導體製程	6.1 離子佈植技術	6.1.1 國內薄膜製程設備開發、	儀科中心		
		6.1.2 EUV(極紫外)關鍵組件的檢測與技術平台建置	儀科中心		
		6.1.3 半導體製程設備技術研發	儀科中心		
	6.2 電漿物理技術		國原院、成大		
7.人工智慧	7.1 核子技術	7.1.1 人工智慧輔助災害管理非破壞檢測			
		7.1.2 核子保防核查人工智慧工作小組			
		7.1.3 人工智慧用於核融合			
		7.1.4 人工智慧評估並利用海洋環境放射性			
		7.1.5 水與環境人工智慧工作小組			
		7.1.6 人工智慧評估氣候對全球湖泊的影響			
		7.1.7 人工智慧支持農業放射性污染修復			
	7.2 醫學影像	7.2.1 腦部退化疾病之精準影像平台	國原院		
8.次世代核能技術	8.1 SMR	8.1.1 反應器運轉安全研究	國原院、清大	2026-2030 總計約 NT 9 億元	
		8.1.2 量化風險評估	國原院、清大		
		8.1.3 放廢及事故影響評估	國原院、清大		
		8.1.4 材料結構及系統安全評估	國原院、清大		
		8.1.5 SMR 發展趨勢與實務議題研究 (1)SMR 成本分析 (2)SMR 執照申請分析 (3)離岸式 SMR 核電廠研究 (4)國際 SMR 動態研究	國原院		
	8.2 核融合	8.2.1 核融合材料發展	國原院、中央大學		
		8.2.2 磁約束高溫電漿設施建置	國原院、成大		

及正子斷層掃描儀(PET)檢查次數統計數如圖 3-2 所示，其中，2024 年 SPECT 及 PET 檢查次數，分別為：410,654 與 93,903 [1-176]。

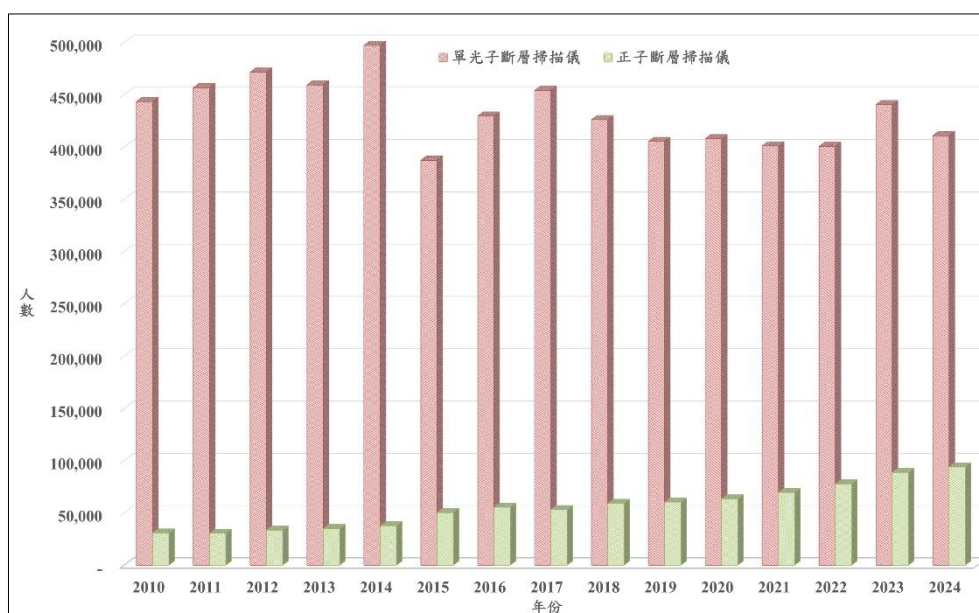


圖 2-2 臺灣 SPECT 及 PET 檢查次數統計(以上 2010 至 2024 年共 15 年度)

2. 農業與環境

國內在「農業」技術領域方面，主要是在滅菌、改質與農作物改良等方面的輻射照射場，國原院早期輔導引進鈷-60 射源成立的「中國生化公司」輻照廠，提供國內若干農作物之輻照服務；近期新設立的「新和生物科技公司」，設置了電子射束(E-beam)與 X 射線射束設備，主要提供食品保鮮殺菌、醫療生技滅菌、半導體晶圓應用、材料改質強化等。另一方面，利用輻照進行植物育種，文心蘭預估國內市場盆花每年 4-5 億元，切花每年 7 億元。蝴蝶蘭預估國內外市場合計有 100 億元/年。

3. 中子與量子

我國目前雖然沒有大型的中子研發基地，但透過符合國家發展需要的選題，引入合適的中子設備，將可利用中子導入民生科技，超前部署我國的未來發展。有鑒於此，我國已規劃於國原院建置 70 MeV 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。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。至於量子科技部份，許多國家意識到量子運算的重要性，積極投入龐大的研發資金，建立支援基礎設施的量子資料中心與量子測試平台。我國若要發展量子科技，亟需政府挹注大量的人力(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。由於量子科技的關鍵零組件製作都與半導體技術有關，為使我國半導體產業持續在全球保有領先地位，優先布局量子科技的各項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三方聯盟，共同發展量子科技。

4. 太空科技

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)，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，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[1-1]。

5. 工業應用

原子能技術於工業應用主要有：醫療產品、實驗室和無塵室消耗品的滅菌、聚合物的改進、包裝滅菌、藥品、化妝品及食品成分、食品輻照、植物檢疫處理、廢水處理、木塑複合材料、微電子學的改進、寶石的顏色、血液成分照射、組織函式庫、昆蟲不孕技術、文化遺產保護、用於植物改良的誘

導突變、廢氣處理、固體廢棄物處理、危險生物廢棄物的處理、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。另一方面，國內產業以輻射進行非破壞性檢測已十分成熟，然而非破壞性檢測方式多元，故要準確評估國內單以輻射照射的產值，實屬困難。

6. 半導體製程

世界半導體貿易統計組織(WSTS)發布了第二季統計數據[1-177]，並確認了 WSTS 春季對 2026 年全球半導體市場的預測(如圖 2-4)。2025 年上半年，全球半導體市場規模達 3,460 億美元，年增 18.9%。成長主要原因在於邏輯元件(成長 37%)和記憶體(成長 20%)的強勁成長，這得益於資料中心基礎設施的需求及初期人工智慧邊緣應用的興起。根據工研院發布「2024 年臺灣半導體業景氣展望」，預估臺灣半導體產值可望首度突破新臺幣 5 兆元大關，成長高達 17.7%，優於全球半導體產業 16.0%的成長水準[1-178]。

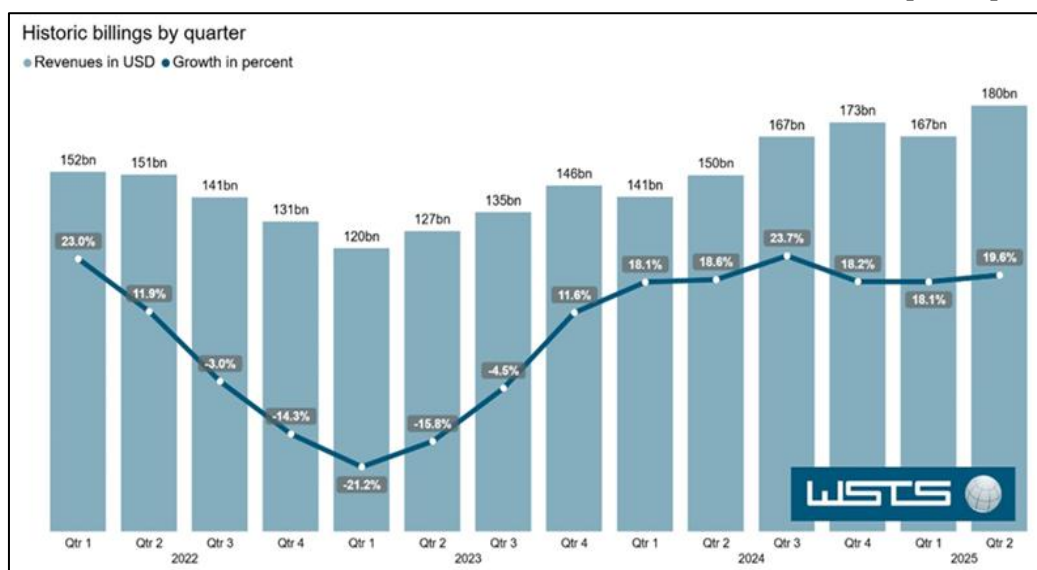


圖 2-3 全球半導體市場成長評估[1-177]

臺灣半導體產業具專業分工模式，包含 IC 設計、IC 製造以及 IC 封測三大次產業，2023 年臺灣半導體產業產值為新臺幣 43,428 億元，其中以 IC 製造占比最高，達 61.3%。感測器也表現良好，成長了 16%。在半導體製程中，離子佈植機(Ion Implanter)是關鍵的前段設備之一，臺灣在地製造與研發的廠商如漢辰科技，透過與國際大廠長期合作及政府計畫支持，持續精進離子佈植機的研發與製造，是臺灣能研發半導體核心製程設備並與國際設備

大廠並駕齊驅的廠商之一。為使技術根留臺灣，可藉由與半導體製造龍頭廠商的合作，將離子佈植機的核心技術深植臺灣。

另一方面，半導體技術飛速進步，從 7 奈米邁向更先進的技術節點，甚至埃米技術也指日可待，其中極紫外光(Extreme ultraviolet, EUV)微影曝光技術是半導體先進製程的核心。工研院以多年累積的光輻射計量經驗，研發 EUV 計量標準，確保輻射計量之正確性，能有效提升半導體先進製程的精度，壯大臺灣半導體產業生態系[1-179]。研發團隊與同步輻射研究中心合作，利用其提供的光源進行測試，再開發專屬演算法，將實驗數據轉化為適合產線應用的計量標準。因此，持續推動 EUV 微影製程及高數值孔徑極紫外光(High-NA EUV)機台製造，未來相關產業鏈如製程、檢測設備、關鍵零組件，以及半導體材料開發，都與 EUV 微影設備的應用息息相關，為此相關 EUV 的研發技術，將擴大臺灣的技術領先地位

7. 人工智慧

人工智慧在我國原子能民生應用上，主要在放射診斷、放射治療及非動力核技術應用兩方面。由於人工智慧屬於一種輔助人們去執行某些研發或工作的工具，故提到的各技術領域，皆可使用人工智慧結合該技術領域的知識，來發展某個技術或在某個範圍的應用。因此，依據 2023 年版「聯合國人工智慧活動報告」中，顯示了聯合國體系所進行的 408 個人工智慧案例和項目，涵蓋了所有 17 個永續發展目標(SDG)，並針對「AI for Good」16 項計畫中，建議適合我國人工智慧在核技術應用發展計畫，共 12 項。這 12 項包括：加速核子技術應用的人工智慧、科學與技術；人工智慧在原子能的應用；人工智慧用於核融合(Project 4: AI for Fusion)；人工智慧評估氣候對全球湖泊的影響；水與環境人工智慧工作小組；人工智慧輔助因災害管理使用的非破壞檢測；人工智慧促進人類健康工作小組；放療中人工智慧輔助勾畫技能；人工智慧評估並利用海洋環境放射性；核子保安人工智慧工作小組；人工智慧輔助核子保防相關資訊處理；核子保防核查人工智慧工作小組。

8. 次世代核能技術

國內在小型模組化反應器(Small Modular Reactor, SMR)的研究，有國原

院的「低碳及高密度能量小型模組化反應器(SMR)研究」，計畫架構如圖 2-4 [1-174]。目前(2025 年 9 月)編列：2026 年 1 億元、2027-2030 年每年 2 億元，共 9 億元。

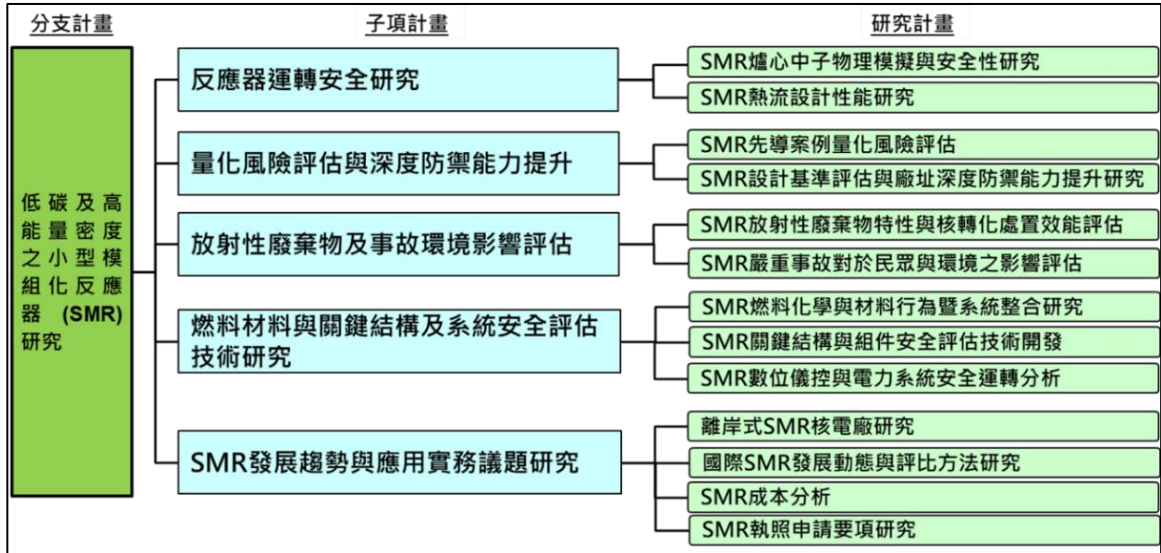


圖 2-4 國原院 115-119 年度 SMR 研究計畫規劃構架[1-174]

目前在核融合研究，有國原院委託中央大學執行的「低活化核融合材料發展現況」，核融合發電作為未來清潔能源的重要方向，對於材料的耐輻射性與低放射性殘留提出極高要求。透過對 JET 與 TEXTOR 等實驗裝置的第一壁材料分析，提供了寶貴的實證資料，推動了低活合金材料的研發。由於低活合金材料研發為下一代核融合能源的核心基礎。未來將持續整合跨領域資源與產業鏈，深化材料特性與應用研究，朝自主生產與國際接軌邁進。另國原院亦委託成功大學執行「臺灣首座磁約束高溫電漿設施(Formosa Integrated Research Spherical Tokamak, FIRST)建置」，臺灣目前正建置其首座磁約束高溫電漿設施—Formosa Integrated Research Spherical Tokamak (FIRST)，為一低縱橫比球形托卡馬克，目標於 2026 年產生穩定電漿，作為核融合相關基礎研究的關鍵平台。

(六) 我國原子能科技施政決策支援體系政策建議與修訂

核安會「民國 111 至 114 年原子能科技民生應用發展的策略藍圖」，係於 111 年初完成初稿，並於 111 年 4 月獲行政院核備頒布實施；而第二版「民國 115 至 118 年原子能科技民生應用發展的策略藍圖」，依規劃於明年(115 年)送行政院核頒。本計畫執行內容之一，為協助研擬「115 至 118 年原子能科技民生應用發展的策略藍圖」草稿(請參閱附本)，供核安會卓參。因此參照 111 至 114 年版本的格式來編撰，其內容摘要說明如下。

第一章 前言：

聯合國一直積極推動全球共同實現「永續發展目標(Sustainable Development Goals, SDGs)」。從這 17 項目標來檢視，不難發現與國際原子能總署(International Atomic Energy Agency, IAEA)的工作具有高度關聯性(圖 2-5)。為拓展與實踐聯合國 2030 年「永續發展目標」，核安會配合國家整體發展策略，盤點各項原子能技術，並借鏡國際原子能科技發展趨勢，同時分別就各技術領域舉辦座談會徵詢專家學者意見，以探討國內原子能技術產業應用潛力，研析符合國情之原子能科技民生應用發展方向。

策略藍圖著重原子能技術於醫療、農業、工業、環境、前瞻科技(如中子、量子、太空科技與半導體製程)及人工智慧應用等民生議題發展；但鑒於近期全球對於次世代核能技術(如核融合、小型模組化反應器(Small Modular Reactor, SMR)與新核能技術(如第四代核反應器)之研發熱度升高，故亦將本技術領域納入本期策略藍圖內。



圖 2-5 IAEA 推動聯合國永續發展目標

策略藍圖將原子能科技民生應用之議題，在兩大核心主軸「產業增值」及「環境永續」下，分為：「健康與民生」、「能資源與環境」、「前瞻應用科技」及「產業經濟」4大面向，共有8大領域：「精準放射醫療」、「農業與環境」、「中子量子科技」、「太空科技」、「工業應用」、「半導體製程」、「人工智慧」及「次世代核能技術」；這8大領域分別對應4大面向。此8大領域共包含47項技術項目，以支持提升政府「五大信賴產業」之價值提升，並落實聯合國9項永續發展目標。

第二章 國際趨勢：

除了整合IAEA、美國、歐盟、日本與中國等相關新聞、其相關研發機構最新資訊外，新增韓國在原子能民生應用之研發狀況。第二章內容簡述如下：

1. IAEA 資訊

IAEA 係聯合國轄下組織，為全球有關原子能民生應用研發資訊最完整的。根據 IAEA 網站之公開訊息，也包括 IAEA 年度大會所出版的報告(如 2024 年度大會 GC-68)、系列或非系列專題研究報告，以及其召開國際專題研討會所出版的會議報告等。

「糧食和農業」方面有：(1) 2023 年 10 月，在羅馬舉行的世界糧食論壇上，IAEA 和糧農組織發起了「原子技術用於糧食(Atom4Food)」聯合倡議；(2)「人畜共患疾病整合行動(The Zoonotic Disease Integrated Action, ZODIAC)」倡議，則旨在加強成員國在人畜共患疾病方面的準備和回應能力；(3)「核技術用於控制塑膠污染(NUclear TEChnology for Controlling Plastic Pollution, NUTEc Plastics)」；(4) IAEA 並在 2022 年「氣候公約」締約方大會第 27 屆會議(COP 27)上，發起的「原子促進淨零排放」倡議。

在「人類健康」方面：(1) IAEA 的「希望之光(Rays of Hope)」倡議旨在藉由成員國努力增加獲得安全可靠的放射治療和診斷成像服務的機會，從而減少全球癌症死亡人數；(2) 同位素示蹤技術也使用在診斷和防治營養不良，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；(3) 硼中子捕獲治療(BNCT)是一種非侵入性放射治療技術，近年來，因緊湊型加速器中子源

(Compacted Accelerator Neutron Source, CANS)的開發，將中子源放置在醫院中，取代了過往讓患者到研究反應爐區接受治療；(4)「全球鐳-226 管理倡議」於 2021 年啟動，旨在協助廢棄鐳射源持有者，與能夠將其轉化為有價值放射性藥物的組織建立合作關係，目前已進行了近 12 次國際轉移。

在「次世代核能技術與人工智慧」方面：(1)2023 年底，俄羅斯有兩座小型模組化反應器示範電廠投入運轉，該擁有兩座 KLT-40S 反應器、每座功率為 35 兆瓦(電)的「羅蒙諾索夫院士號」浮動核電廠，進行了首次換燃料；(2) 2023 年 10 月，由 IAEA 主辦、英國共同承辦的第 29 屆 IAEA 核融合能大會，吸引了來自 80 多個國家和眾多公務和私營核融合計畫的約 2,000 名與會者；(3)許多領域都可以從核子應用領域使用人工智慧中受益。在人類健康領域，包括臨床研究、流行病學、營養、醫學影像、放射治療和醫護專業人員教育。基於人工智慧的工具也被用來促進影像、乳房 X 光攝影和肺癌篩檢計畫中的電腦輔助診斷，以及核子醫學程序中的劑量預測等不同臨床任務；(4)ICTP-IAEA 於 2024 年 4 月 15–18 日，對於「高能雷射與光子之核物理研究」聯合舉辦的國際研討會；主要研究原子核的組成(質子與中子)、相互作用與結構變化；在進入 21 世紀後，超高功率雷射(High Power Laser Systems, HPLS)的出現，使研究者得以利用極高光強度與超短脈衝產生電漿，加速帶電粒子，並進行核轉變與同位素生成。

2. 美國資訊

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、工業應用等。於策略藍圖第二章第二節中，彙整各領域的發展現況，主要參考資料以能源部(DOE)轄下各能源國家實驗室為主。

美國能源部國家實驗室與技術中心，擔負原子能技術應用之主要研發工作；美國能源部監管之下的一系列研究設施和實驗室系統，其目的是促進科學的研究和技術的進步，進而推動完成美國能源部的使命(圖 2-6)。截至 2025 年，美國能源部下屬的實驗室與研究設施一共是十七處。美國能源部在國家實驗室投入的資金占美國國內對物理、化學、材料科學及物理科學的其他領域研究的總投資的 40%以上。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。

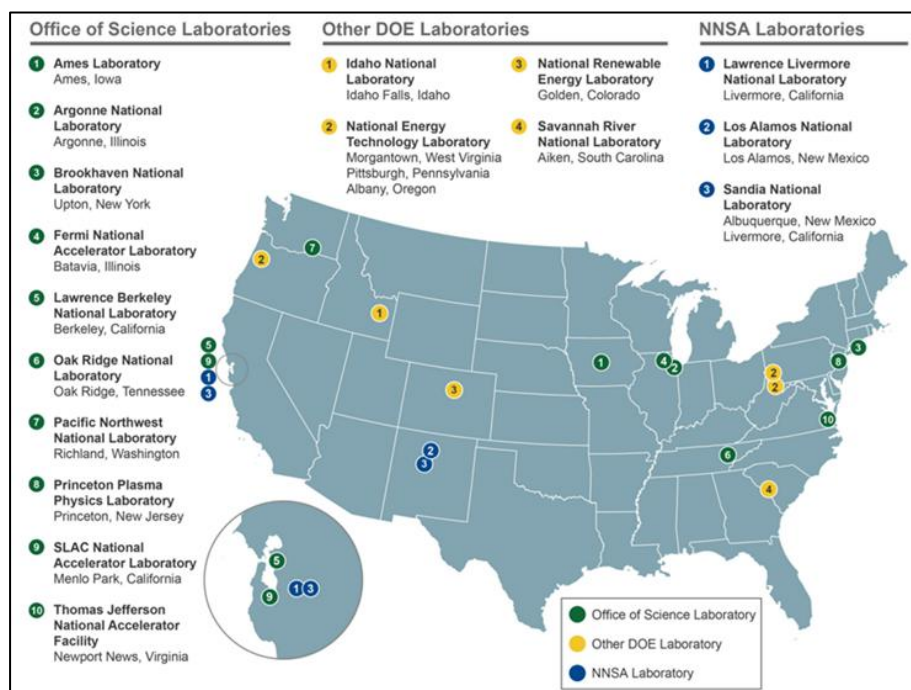


圖 2-6 美國能源部之國家實驗室分布 資料來源：USDOE 網頁

3. 歐盟資訊

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，詳如圖 2-7 所示[1-181]。歐盟在「醫療健康」方面的放射影像診斷、放射治療及核醫藥物之設備與服務總產值約 50 億歐元(全球 283 億歐元) [1-180]；醫用放射性同位素在癌症、心血管疾病和神經系統疾病等嚴重疾病的診斷和治療中至關重要。全球超過 1 萬家醫院使用約 100 種核醫檢查，每年進行近 4,900 萬次治療。在歐盟，超過 1,500 家醫療機構每年治療約 1,000 萬名患者；核子醫學在癌症治療中發揮著至關重要的作用，其中 60%的用於腫瘤學。放射性同位素在該領域的應用正在迅速發展，預計創新放射性藥物的市場將顯著成長

在「工業應用」方面，歐洲各國普遍使用加馬射線、電子束與 X 射線輻照技術，促進產品品質與公共福祉；醫療器材產業創造 1,100 億歐元(約新台幣 3.9 兆)銷售額與 67.5 萬就業機會，電子束輻射加工廣泛用於塑膠改質，且輻照技術亦應用於文化遺產保護，透過輻射消毒取代燻蒸與化學劑以防昆

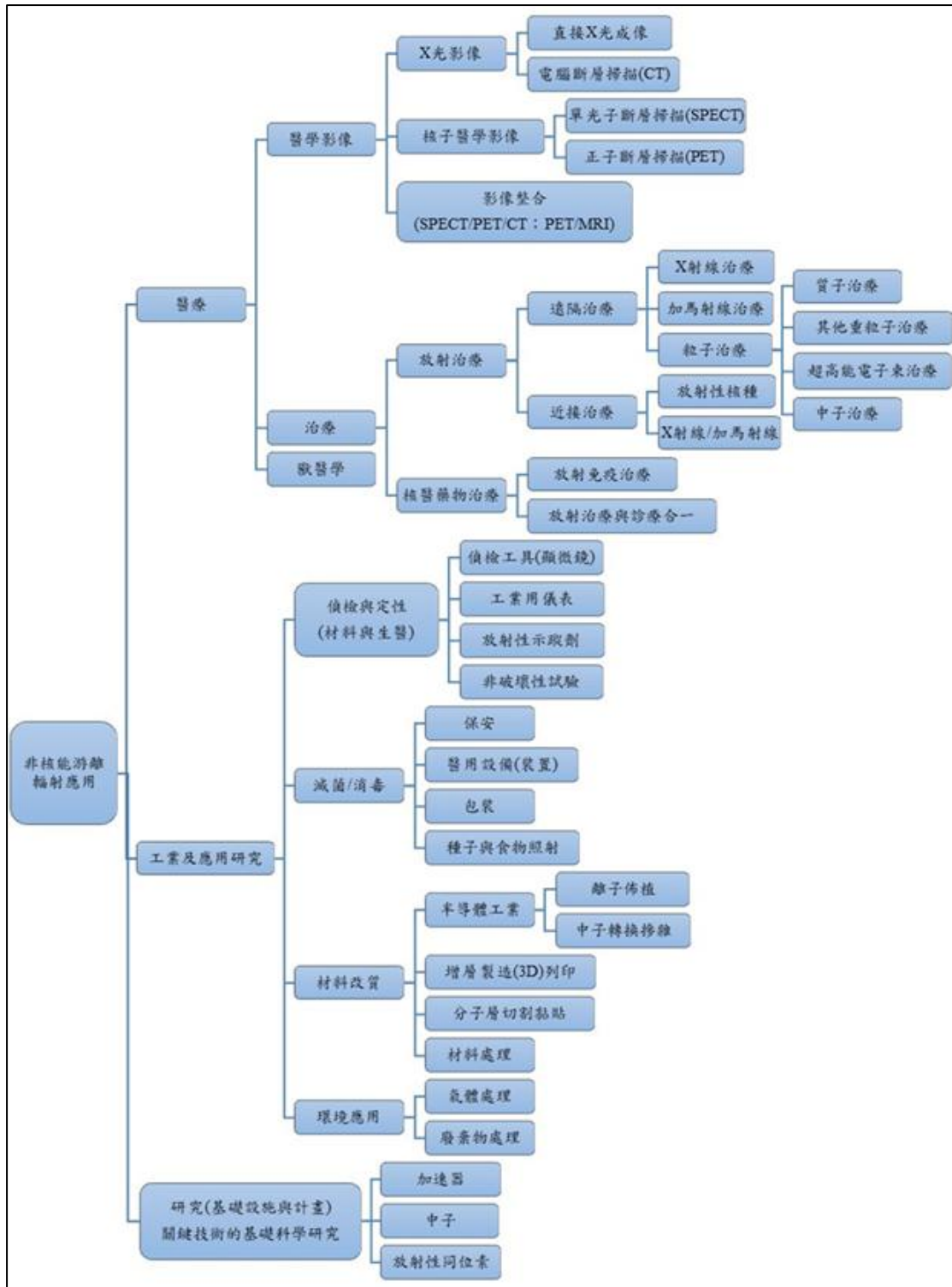


圖 2-7 歐盟原子能民生應用之技術分類架構

資料來源：NucAdvisor / Technopolis Group (2018) 核資中心重新繪製

蟲與微生物侵蝕。

在「前瞻研究方面」，瑞典隆德的歐洲散裂中子源(European Spallation

Source, ESS)為世界最高通量脈衝中子源，支援跨領域科研；量子運算、通訊、模擬及感測等技術在計算、安全通訊、能源、醫療、製造、氣候、保安與太空等領域具全球戰略意義，歐盟自 2019 年推動歐洲量子通訊基礎設施 (EuroQCI)以建立覆蓋全歐的安全量子網路；歐洲太空總署(ESA)自 1985 年起推行長期太空科學與探索計畫，已執行四期規劃任務。

4. 中國大陸資訊

主要參考中國國家原子能機構、中國原子能科學研究院等網站，並查詢其「十四五規劃」或參考「十五五規劃」草案內容。中國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等領域。其中工業領域擁有超過 110 個鈷-60 加馬設施及 600 個電子射束設施，應用涵蓋醫療器械滅菌、年處理逾百萬噸食品(如香料、大蒜、肉類及魚類)、材料改質(特別是電線與電纜)、廢水處理以實現 70%再利用率，以及持續開發環境新應用。

農業領域包含植物誘變育種、農產品輻照加工、同位素示蹤及昆蟲輻射不孕技術等，2022 年「神舟 13 號」太空任務帶回 1.2 萬顆太空誘變實驗種子，涵蓋草料、燕麥、苜蓿及真菌等。

醫療領域涵蓋放射影像醫學、核子醫學與放射治療，中國核子造影市場 2024-2029 年的複合年增長率(CAGR)預計為 4.11% [1-181]，2024 年市場規模估計約為 3.4826 億美元(約新台幣 10.79 億)。

前瞻研究方面，中國研製「九章三號」量子計算原型機，展現後摩爾時代的高效量子運算能力；國產抗輻射晶片已應用於太空站夢天實驗艙核心載重，支援長期在軌營運；2025 年北京貝塔伏特新能源公司宣布核能電池「BV100」進入量產；懷柔 50 MeV 質子迴旋加速器於 2023 年完成試運，支援太空輻射測試；中國散裂中子源(CSNS)為國際先進的脈衝型中子源平台，促進多學科基礎研究；先進超導托卡馬克實驗裝置(EAST)實現 403 秒穩態高約束長電漿運行，展現中國在核融合研究領域的重要突破。

5. 日本資訊

主要參考日本內閣府原子力委員會頒布的最新版「日本原子力白書(令和 6 年度版)」，2024 年」，另外參考原子力研究開發機構(JAEA)、量子科學技

術研究開發機構(QST)、日本農研機構(NARO)、宇宙航空研究開發機構(JAXA)以及高能加速器研究機構(KEK)等。

日本原子能科技民生應用被廣泛應用於工業、醫療、農業、尖端科學技術、環境保護和核安全等各種領域，如圖 2-8 (原稿圖)所示，摘譯如表 2-10 所示。放射線主要利用放射性同位素(Radioisotope, RI)、加速器和核反應爐等。RI 在自然界中存在，但利用時通常透過加速器或核反應爐製造；加速器能加速帶電荷粒子(如質子、粒子等)照射 RI 原料物質。例如，理化學研究所的 RI 束工廠(RI Beam Factory)；反應爐可將 RI 原料物質放入核反應爐中，利用爐內的中子照射進行。目前日本有兩座研究用反應爐(JRR-3 和 KUR)可進行 RI 製造與供給。

<p>【医療】</p> <p>〈放射線による診断〉</p> <ul style="list-style-type: none"> ○レントゲン ○X線CT ○PET ○シンチグラフィ (SPECT)  <p>PET-CT装置</p> <p>〈放射線による治療〉</p> <ul style="list-style-type: none"> ○X線治療 ○ガンマナイフ ○粒子線治療 ○ホウ素中性子捕捉療法 (BNCT) ○核医学治療 (RI内用療法)  <p>CT画像</p>	<p>【工業】</p> <ul style="list-style-type: none"> ○材料の改良・機能性材料の創製 (自動車タイヤ、半導体素子加工プロセス等) ○精密計測 ○非破壊検査 ○滅菌・殺菌等 (医療器具等) <p>半導体の製造</p> <p>微細加工、不純物導入等、放射線による加工技術を利用して半導体を製造</p>  <p>ラジアルタイヤの製造</p> <p>電子線照射により、ゴムの粘性の制御を容易にできることを利用</p>	<p>【農業】</p> <ul style="list-style-type: none"> ○品種改良 ○食品照射 ○害虫防除  <p>耐病ナシ品種の開発</p> <p>黒斑病への耐病性を有するナシ品種「ゴールド二十世紀」</p>  <p>ウリバエの根絶</p> <p>放射線照射により不妊化したオスを大量に放ち、孵化しない卵を産ませ害虫を根絶</p>
<p>【科学技術】</p> <ul style="list-style-type: none"> ○X線・中性子等の量子ビームによる構造解析、材料開発等 ○RIイメージングによる追跡解析  <p>大強度陽子加速器施設 J-PARC</p>  <p>イソトプの RI イメージング</p>	<p>【核セキュリティ】</p> <ul style="list-style-type: none"> ○核鑑識技術 (核物質等の出所 履歴 輸送経路 目的等の分析 解析) ○隠匿された核物質等の検出 <p>【環境保全】</p> <ul style="list-style-type: none"> ○窒素酸化物、硫黄酸化物等の分解、除去 ○ダイオキシンの要因となる揮発性有機化合物の分解等 	

圖 2-8 日本原子能民生應用

表 2-10 摘譯日本原子能民生應用

應用領域	具體應用範例
【醫療】	診斷：X 光檢查、CT、PET、SPECT 治療：直線加速器、加馬刀、粒子治療、BNCT、核醫學治療
【工業】	材料改良/功能性材料創造(汽車輪胎、半導體製程等)、精密測量、非破壞檢查、滅菌/殺菌(醫療器具等)、半導體製造(微細加工、不純物摻雜) 輻射層輪胎製造(電子束照射控制橡膠粘性)
【農業】	品種改良、食品照射、害虫防治(如：黑斑病防治、利用輻射使瓜實蠅雄性不孕後大量釋放，以根除害虫)
【科學技術】	利用 X 光、中子等量子束進行結構分析、材料開發、RI 成像追蹤分析
【環境保全】	分解/去除氮氧化物、硫磺氧化物等、分解戴奧辛致因的揮發性有機化合物等
【核安全】	核鑑識技術(分析核物質來源、歷史、運輸路徑、目的等)、偵測隱藏的核物質等

在科學研究方面，隨著加速器技術的進步，中子束、同步輻射與高功率雷射等量子束技術已成為推動創新之重要工具，各研究機構與大學未來將持續強化量子束及放射性同位素相關技術之研發基礎，並重視設備更新與專業人才培育。日本目前以原子力研究開發機構(JAEA)、量子科學技術研究開發機構(QST)及高能加速器研究機構(KEK)為核心科研體系，分別負責核能安全與系統研究、量子束與放射醫學及核融合應用，以及高能物理與加速器基礎設施支援。日本政府亦積極將核能與量子科技應用拓展至太空與產業領域，2024年設立「太空戰略基金」支持宇宙航空開發研究機構(JAXA)推動衛星、太空運輸與深空探測技術，並於2025年度編列3,000億日圓(約新台幣603億)加速技術實證與商業化。在放射醫學領域，日本已推動AI輔助放射治療品質管理系統，以因應未來癌症治療需求快速上升。國際合作方面，JAEA與法國(CEA)及企業共同推動鈉冷快中子反應器技術研發；同時，日本企業積極參與小型模組化反應器(SMR)之海外商業化計畫，強調無外部電源冷卻以提升安全性。高溫氣冷反應器則被視為未來無碳氫氣及高溫熱源的重要供應來源，目前JAEA已利用HTTR進行氫氣製程測試，並展開與英國合作，以支持工業脫碳與能源轉型。

6. 韓國資訊

主要參考原子能研究機構如：韓國原子力研究院(Korea Atomic Energy Research Institute, KAERI)、韓國基礎科學支援研究院(KBSI)、韓國水電與核能公司(KHNP)等公開資訊，以分析韓國原子能民生應用之布局。

韓國原子能科技民生應用主要分為工業、醫療、農業/環境及前瞻應用研究等領域。在工業應用領域方面：自20世紀70年代引入電子加速器後，已由研究拓展至電線電纜製造及電子束滅菌商業化，並取得ISO 13485認證，廣泛應用於高附加價值醫材與生物材料。醫療方面，韓國已建立完整之醫用同位素生產、核醫藥物開發與臨床應用鏈結，KAERI負責同位素供應，KHNP推動臨床研究，核醫藥企業(OuChemlio)則進行藥物製造；同時積極發展AI輔助放射診斷與診療合一(Radiotheranostics)的核醫治療模式，並引進質子與重離子治療設備，其中延世癌症中心導入東芝重離子系統，每年預估治療約

320 名患者。前瞻科技方面，韓國政府於 2023 年發布「國家量子科學技術戰略計畫」，2025 年量子科技投資提升至 1,980 億韓元(約新台幣 41.9 億)，並由 KAERI 與美國德州大學達拉斯分校合作開發抗輻射半導體技術，推動量子與輻射科技在國防、太空及高可靠度電子元件領域之應用，顯示其持續強化原子能科技於產業與戰略科技之國家布局。

第三章 民生應用重要議題及分析

配合國家科技整體發展政策，在 112 至 115 年「科學技術白皮書」的基礎上，以「前瞻創新、民主包容、韌性永續」作為邁向 2035 的科技遠景。另外，也綜合國際原子能科技發展趨勢、國內民生需求與既有產業基礎，當前社會關注之科技政策議題，歸納為「健康與民生」、「能資源與環境」、「前瞻應用科技」及「產業經濟」四大面向。其中，「健康與民生」著重提升醫療診斷與治療品質，確保民眾生命健康；「能資源與環境」關切環境永續、水資源與農糧安全管理，並支援低碳能源發展；「前瞻應用科技」聚焦新興科技之研究與創新，以因應長期科技競爭與趨勢挑戰；「產業經濟」則強調產業製程優化與價值鏈提升，以促進產業轉型升級並強化經濟動能。

針對前述議題擬定因應策略，透過重要議題之辨識，盤點國內原子能科技在民生應用上的技術群組，並辦理相關技術領域座談會，邀請各領域專家學者進行簡報與交流討論。後續將四場座談內容加以彙整(會議紀錄如附件一至附件四)，並參酌與會專家對我國原子能科技民生應用之研究現況與發展建議，作為研擬策略與具體措施之依據，以強化國家競爭優勢，維持全球創新領先地位。

在「健康與民生」面向而言，包括有「精準放射醫療」與「農業」；其中，我國近期在精準放射治療方面，主要是多家教學醫學中心引進質子、重粒子加速器，包括有長庚、北醫、台大醫院、台北榮總及中國醫學大學等，均有顯著的治療成效。而 BNCT 過去多年，在台北榮總、陽明交通大學與清華大學合作，已有多例成功的治療案例；此外，禾榮科技在新竹竹北生醫園區設立之「加速器硼中子捕獲癌症治療(AB-BNCT)研發中心」，與中國醫學大學新竹附設醫院合作，以加速器為中子源的 BNCT。

參照國外(IAEA、歐盟、美國、日本、韓國、中國等)近年之研發方向與關切項目，加上上述國內研發機構之未來規劃；我國「精準放射醫療」未來之研發議題，建議可包括有：(1)放射性診斷藥物及其臨床應用之開發；(2)放射性治療藥物及其臨床應用之開發；(3)BNCT 多樣性治療及加速器中子源引入；(4)使用 AI 技術於藥物開發及個人標靶治療計畫協助；(5)「診療合一(Radiotheranostics)」核醫藥物之開發及其臨床應用；(6)掌握各類放射性同位素之國內需求(藉由進口或本地產製)。

國內在「農業」技術領域方面，過去主要是在滅菌、改質與農作物改良等方面的輻射照射場，國原院早期輔導引進鈷-60 射源成立的「中國生化公司」輻照廠，提供國內多項農產品之輻照服務；近期新設立的「新和生物科技公司」，設置了電子束(E-beam)與 X 射線射束設備，主要提供食品保鮮殺菌、醫療與生技滅菌、半導體晶圓應用及材料改質強化等。

在育種研究方面，中興大學於蘭花育種改良具有顯著成果，經多次試驗篩選出 M104 與 M115 兩株具優異性狀之品系；嘉義大學則積極推動中草藥相關研究，期望由基礎學術研究擴展至中草藥產業鏈之建構，包括栽培、生產及品種選育。未來將持續朝上述方向深化發展與應用。

在「能資源與環境」面向中，主要涵蓋「環境」與「次世代核能技術」兩大領域。其中，核子技術在環境領域之應用相當多元。中研院地球科學研究所利用同位素技術於環境永續研究，應用範圍包括重金屬污染來源追蹤、氣候變遷研究探討及地球化學分析等。另中研院國內研究團隊亦關注於微塑膠與金屬污染物之交互作用，探索微塑膠在環境中吸附的重金屬種類與濃度。海洋大學針對海洋微塑膠進行調查與監測；中央研究院環境變遷研究中心也針對淡水河與其他河川中的微塑膠來源與組成，進行追蹤與分析；中山大學海洋科學系在塑膠微粒方面的研究，已取得較具系統性的成果，並回歸其對整體地球系統之研究架構，同時長期關注碳循環與海洋碳儲存等議題。

故在原子能技術在「環境」領域方面，按世界之潮流與我國之需求，建議有下列研究議題：(1)海洋碳匯「(藍碳(blue carbon))研究計畫；(2)核技術在空氣、土壤與水污染檢測應用；(3)海洋「優化核技術以評估與控制沿海地區的微塑料污染」

核技術(NUTEK Plastics)研究。

在「次世代核能技術」方面，近一年多(2024-2025)來，國內外公私營機構逐漸提高對該議題之重視，媒體亦多有討論，使其成為社會關注焦點。目前我國在「次世代核能技術」中之核融合領域的研發，受限於人力與資源，多為個別研究團隊進行。較具代表性的成果為成功大學與國原院合作建置之「臺灣首座磁約束高溫電漿設施(Formosa Integrated Research Spherical Tokamak, FIRST)」，為我國在核融合研究的重要基礎。

國原院所提「低碳及高密度能量小型模組化反應器(SMR)研究」，係因應臺灣能源安全、產業發展與淨零排放需求，SMR 具備低碳、被動式安全設計與高部署彈性等優勢，是次世代能源的重要選項。計畫旨在針對 SMR 部署面臨之挑戰(如核安、核廢棄物、法規、廠址與成本等)提供解決方案，並協助政府建構審查與法制依據。同時，計畫也將帶動本土 SMR 產業鏈發展，協助發電業者執照申請與運行及維護，推動放射性廢棄物妥善處理與再利用技術。重點問題與對應策略涵蓋：安全性、核廢棄物、法規審查、廠址選擇、EPZ 規模、興建成本、人才等議題。計畫涵蓋不同類型之 SMR 技術(如輕水式、鈉冷式、熔鹽式)，進行安全性、核廢、法規、廠址與緊急應變等多面向評估。並整合核能技術、工程與產業資源，建立完整研發團隊與資訊平台，支援國內 SMR 申請執照及部署做準備。

在「前瞻應用科技」面向而言，包括：「量子科技」、「中子科技」、「太空科技」與「人工智慧」；其中，以「量子科技」方面，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，量子研究正在快速擴展，許多國家意識到量子運算的重要性，積極投入龐大的研發資金，建立支援基礎設施的量子資料中心、量子測試平台，以實現對量子生態系統發展的快速追蹤。另在政府與企業之間的合作關係不斷增加下，正進一步加速量子運算的發展。國際量子科技目前著重硬體發展，但因為所需研究設備昂貴，故我國仍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。

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，如此才能讓大眾、其他領域的人才也能參與撰寫程式及應用量子電腦解決各領域的問題。

針對「中子科技」方面，中子輻射源有引自核反應器射束及利用加速器引輻射源束打擊靶兩種方式產生：全球三大中子源(中子散裂源, neutron spallation)為：(1) SNS (USA, 1.4 MW)；(2) JAPAC (Japan, 1 MW)；(3) ESS (EU, 5 MW)。而臺灣曾有國原院 TRR (40 MW)的加拿大 CANDU 型研究用反應器，但現已除役中，預計 2029 年 3 月前完成；另原規劃有 TRR-II (20 MW)研究用反應器，但在建造中因故被取消。目前僅有在清華大學的 THOR (2 MW)水池式研究用反應器、30 MeV 迴旋加速器中子射束，以及興建中的 70 MeV 迴旋加速器，預計於 2026 年 5 月完工，將會有熱中子與快中子射束各兩條。

中子應用研究實例有：(1) LiFePO₄鋰電池材料中摻雜 V 元素，使用中子繞射可偵測出 V 取代 Li 位置，推論提升電池壽命與擴散速率；(2) Ni₃Fe 合金之有序程度，可由中子繞射與異常 X 光繞射共同解析；(3) CoFeB 薄膜之硼分布深度，以中子反射與 X 光反射同時研究；(4)銀摻雜 CuZnSnSe 太陽能材料之反位缺陷，可由中子散射精準鑑定。至於中子成像與影像技術，因其穿透力強、對氫敏感、可極化與同位素對比，適合磁性結構成像。未來國內中子技術應用研究，可包括：(1)中子輻射散射；(2)熱中子與輻射損傷研究；(3)中子反射儀(Neutron Reflectometer)研究；(4)中子活化分析；(5)建立中子源或其他適用輻射平台及(6)赴國外(如澳洲)進行中子相關測試研究。

在「太空科技」方面，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 月國家太空中心與長庚醫院、長庚大學、國原院、宜特科技公司、中研院物理所及清華大學原科中心，共同簽署合作備忘錄組成「臺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。

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, 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。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。另外，國原院輻射專業與20年以上III-V族材料/元件研發能量，且臺灣擁有強大且完整光電半導體與精密製造產業鏈，目前國科會已委由國原院、臺灣大學及清華大學共同合作，發展抗輻射太空太陽電池。

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。

有鑒於此，在「太空計畫中半導體晶片抗輻射測試」這個領域，我國應集中在下列研究議題：(1)輻射測試SOP(TID, SEE等)，(2)元件測試資料庫，(3)抗輻射太空太陽電池研發，以及(4)以適用任務場景對照策略(如低軌道應用、其他選

擇性任務)評估太空環境與地面等效輻射條件對照模型。

在「人工智慧」方面，主要將參考聯合國出版的 2023 年版《聯合國人工智慧活動報告》，它涵蓋了所有 17 個永續發展目標(SDG)；這些項目涵蓋了預測糧食危機、監測水資源生產力、透過衛星影像繪製學校地圖、優化通訊網路效能等諸多應用。

在「人工智慧」於我國原子能民生應用上，主要分為放射診斷治療、非動力核技術及新核能技術應用三方面；其中，在放射診斷治療有：(1)放射治療中人工智慧輔助繪製技能；(2)人工智慧促進人類健康工作小組。在非動力核技術應用包括：(1)人工智慧輔助災害管理非破壞檢測；(2)人工智慧評估並利用海洋環境放射性；(3)水與環境人工智慧工作小組；(4)人工智慧評估氣候對全球湖泊的影響；(5)人工智慧支持農業放射性污染修復。在新核能技術應用有：(1)核子保防核查人工智慧工作小組；(2)人工智慧輔助核子保防相關資訊處理；(3)核子保安人工智慧工作小組；(4)人工智慧用於核融合。

在「產業經濟」面向而言，可分為工業應用與半導體製程。其中，工業應用主要有：醫療產品、實驗室和無塵室消耗品的滅菌、聚合物的改進、包裝滅菌、藥品、化妝品及食品成分、食品輻照、植物檢疫處理、廢水處理、木塑複合材料、微電子學的改進、寶石的顏色、血液成分照射、組織函式庫、昆蟲不孕技術、文化遺產保護、用於植物改良的誘導突變、廢氣處理、固體廢棄物處理、危險生物廢棄物的處理、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。這些大致已在國內由輻照服務業者建立相關技術與產業，若干專業的檢測服務，則由大學、研究單位建立相關儀具設備。若還有其他未建立的技術程序，應該可由業者依據需求提供服務。

在「半導體製程」方面，針對原子能民生應用技術於先進半導體製程中所展現的研究，內容涵蓋離子佈植、材料改質、微結構分析與輻照效應等多項技術。臺灣擁有全球最完整的半導體產業聚落及專業分工，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、化學品等產業，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)、IC 模組、IC 通路等行業。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、輻射照射及非破壞性檢測等，惟國內重要半導體製程設備多被少數的國際大廠壟斷。故未來在半導體製程方面，應專注在(1)國內薄膜製程設備開發；(2) EUV(極紫外光)關鍵組件的檢測與技術平台建置及(3)半導體製程設備技術研發等。

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「產業增值」及「環境永續」為兩大核心主軸，如表 2-11「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；另共有 8 大領域：「精準放射醫療」、「農業與環境」、「量子中子科技」、「太空科技」、「工業應用」、「半導體製程」、「人工智慧」及「次世代核能技術」，其對應分配到 4 大面向上。

人才為國家之根本，尤其在原子能未來的民生、產業、能資源、環境與永續議題上，教育或基礎研究皆需向下扎根，特別是 SMR、新核能技術(第四代核反應器)與核融合次世代核技術、高能雷射、人工智慧及量子科技等領域。清華大學原子科學院(原科院)係我國獨一的原子能科技人才培育園地，原科院目前有工科系、醫環系、核工所與分環所等，每年定期招收學士、碩士與博士班學生，歷年招收入學及畢業人數如表 2-12 所示。未來，因視國內、外原子能民生應用(特別是核能)發展之狀況，來適當增加或縮減原子能科技人才。

原子能技術在推動聯合國永續發展目標(SDGs)中具關鍵作用。從國際經驗觀之，我國在以原子能科技實踐永續發展方面，可自多面向推動：在能資源與環境議題上，可運用同位素技術追蹤環境污染來源、評估海洋酸化與溫室氣體排放之影響，作為因應永續海洋(目標 14)、永續生態(目標 15)、氣候變遷(目標 13)及碳中和策略之科學依據，並配合水資源監測與管理(目標 6)。同時，可強化輻照技術於環境與工業污染物處理之應用，包括海洋微塑膠污染偵測、輻射交聯廢水處理程序開發等，並建置海水與海洋環境輻射監測站，以因應境外輻射事件可能帶

表 2-11 原子能科技民生應用科研布局策略

核心主軸	產業加值					環境永續			
四大面向	產業經濟		前瞻應用科技			能資源與環境		健康與民生	
八大領域	半導體製程	工業應用	太空科技	中子科技	量子科技	次世代核能技術	環境	精準放射醫療	農業
技術項目	A.國內薄膜製程設備開發、 B. EUV(極紫外)關鍵組件的檢測與技術平台建置 C.半導體製程設備技術研發	高能雷射 A.雷射粒子加速 B.同位素純化 C.雷射核融合 D.歐洲極光基礎建設核物理研究((Extreme Light Infrastructure-Nuclear Physics)計畫	太空計畫中半導體晶片抗輻射測試 A.輻射測試 SOP (TID, SEE 等) B.元件測試資料庫 C.抗輻射太空太陽電池研發 D.以適用任務場景對照策略(如低軌道應用、其他選擇性任務)評估太空環境與地面等效輻射條件對照模型	中子技術應用 A.中子輻射散射研究 B.熱中子與輻射損傷研究 C.中子反射儀(Neutron Reflectometer)研究 D.中子活化分析 E.建立中子源或其他適用輻射平台 F.赴國外(如澳洲)進行中子相關測試研究	量子運算、模擬、通訊及感測和計量： A.量子電腦及量子模擬器(硬體)：超導量子位元、矽量子點與量子光電晶片 B.量子演算法與量子計算之應用(軟體) C.量子通訊 D.量子感測器	低碳及高密度之小型模組化反應器(SMR)研究 A.反應器運轉安全研究 B.量化風險評估 C.放廢及事故影響評估 D.材料結構及系統安全評估 E.SMR 發展趨勢與實務議題研究 1.SMR 成本分析 2.SMR 執照申請分析 3.離岸式 SMR 核電廠研究 4.國際 SMR 動態研究	A.海洋破匯」(藍碳(blue carbon))研究計畫 B.核技術在空氣、土壤與水污染檢測應用 C.海洋「優化核技術以評估與控制沿海地區的微塑料污染」核技術(NUTEC Plastics)研究	核醫藥物創新開發，應用範圍涵蓋： A.攝護腺癌標靶治療藥物(Lu-177-INER-PSMA)； B.肝功能評估造影劑(Dolacga Kit)； C.卵巢癌診療(Ga-68/Lu-177-CH13L1)； D.腫瘤血管新生與神經內分泌腫瘤治療(Lu-177-FAPI-X)。 E.診療用放射性同位素研發，包括 Tl-201、Ga-67、I-123、Cu-64、Cu-67、Mo-99 等，涵蓋心臟、腫瘤、神經系統等應用領域。	A.蘭花改良品質後續規劃 B.中草藥輻射照射誘變育種之發展構想
		輻射照射 A.輻射交聯 B.電子射速及光	核動力推進器 A.核電推進 B.核熱推進	中子與同步光源相關研究的資訊管理、資		核融合研究 A.核融合材料發展 B.磁約束高溫電漿		核醫產業之三項策略方向： A.臨床應用方	

		子射速(X-Ray)輻照應用研究 C.非破壞檢測(NDT)		料整合及產業實務應用		設施建置		面：推動 AI 模型於 PET 診斷影像的自動重建、病灶自動分割與劑量預測 B.Theranostics 方面：開發結合 AI 與治療影像之劑量預測與療效分析模型，支援病患篩選與個人化治療規劃 C.藥物開發方面：著重於標靶 α 粒子治療(TAT) 相關藥物研發，並透過 AI 協助進行高專利性結構設計與模擬	
			核能電池						
人工智慧						核子保防核查人工智慧工作小組			
						人工智慧輔助核子保防相關資訊處理	人工智慧評估並利用海洋環境放射性		
						核子保安人工智慧工作小組	水與環境人工智慧工作小組	放療中人工智慧輔助勾畫技能	
		人工智慧輔助災害管理非破壞檢測				人工智慧用於核融合	人工智慧評估氣候對全球湖泊的影響	人工智慧促進人類健康工作小組	人工智慧支持農業放射性污染修復
	人工智慧在原子能的應用 加速核子技術應用的人工智慧、科學與技術、非系列 IAEA 出版物 人 工 智 慧								

表 2-12 清華大學原子能人才培育

清華大學原子能人才培育統計																				
年度		115		114		113		112		111		110		109		108		107		
入學與畢業		9月 預估入學	6月 預估畢業	9月 入學	6月 畢業	9月 入學	6月 畢業	9月 入學	6月 畢業	9月 入學	6月 畢業	9月 入學	6月 畢業	9月 入學	6月 畢業	9月 入學	6月 畢業	9月 入學	6月 畢業	
工科系	學士班	100	90	101	93	99	100	101	91	103	100	101	90	105	84	110	100	107	92	
	碩士班	90	80	88	78	78	82	84	80	84	65	88	64	78	80	84	75	81	73	
	博士班	9	10	17	12	17	15	17	13	14	13	14	10	19	16	13	7	12	13	
醫環系	碩士班	甲組(分子生醫工程與材料組)	18	19	16	18	20	16	13	13	17	23	17	14	16	13	19	18	14	19
		乙組(生醫影像工程組)	14	7	13	11	13	12	11	8	8	19	11	11	13	19	14	15	23	11
		丙組(應用化學組)	4	3	5	4	5	1	6	1	6	5	4	5	5	4	5	4	11	4
	博士班	甲組(分子生醫工程與材料組)	2	2	3	0	4	1	3	2	1	2	2	1	2	1	2	5	2	2
		乙組(生醫影像工程組)	2	2	1	0	3	1	2	2	1	2	1	2	3	2	2	2	1	2
		丙組(醫師博士學程組)	1	1	0	0	1	0	1	1	1	2	1	2	0	2	0	2	0	2
		生醫工程產業組	2	0	0	0	0	1	2	0	1	1	2	0	1	0	2	0	0	0
核工所	碩士班	22	22	24	22	23	20	21	18	22	11	22	16	16	22	17	16	23	16	
	博士班	2	1	5	1	3	1	2	1	6	1	2	2	3	5	3	4	4	8	
環境科技博士學位學程	博士班			1	0	2	2	1	0	3	1	5	0	0	0	0	0	0	0	
分環所	碩士班	20		19	0	19	16	20	10	17	8	17	16	16	8	15	0	108成立		
	博士班			1	0	1	0	1	0	112學年度起招生										
原科院學士班		30	28	29	23	27	15	30	19	27	22	30	17	26	12	21	19	20	17	

來之風險。此外，運用非破壞檢測技術可提升離岸風電結構安全維運效率，並支援能源材料研發；推動小型模組化反應爐(SMR)、第四代核反應器及核融合等次世代核能技術，將有助於提升能源自主與供應安全，支持可負擔且永續能源(目標 7)。在健康與民生議題上，可利用輻射照射技術推動食品保鮮、安全監管及農作物蟲害控制，並透過同位素追蹤改善作物營養管理與育種流程，以強化糧食供應韌性(目標 2)。於醫療體系中，放射診斷、放射治療、核醫學診療合一(Radiotheranostics)及人工智慧輔助放射診療可提升癌症、心血管等重大疾病之診斷精準性與治療效率，進而提升國民健康福祉(目標 3)。在產業經濟與前瞻科技方面，原子能相關技術可支援材料改質、半導體製程關鍵步驟、產線品管非破壞檢測、智慧化系統與人工智慧整合等應用，提升工業創新能量與產業附加價值(目標 9)。在國際合作方面，可積極運用國內原子能科研與應用成果作為科技外交資產，深化與歐、美、日、韓等國既有科技交流，並積極爭取跨國合作研究與國際計畫參與，形成策略性夥伴聯盟，強化國際能見度與影響力(目標 17)。

賴總統「五大信賴產業」推動方案如表 2-13 [1-182]，執行單位包括國發會、經濟部、數位發展部、國科會、教育部、國發基金等，113 至 117 年各單位提出之預算需求為 1,377.9 億元，預算來源包含科技計畫、公務預算、公建計畫、前瞻基礎建設計畫特別預算等經費。其分項計畫為半導體、AI、軍事工業、安全監控及次世代通訊產業。

表 2-13 114 年啟動的五大信賴產業推動方案

單位：億元

	113	114	115	116	117	小計
半導體產業	102.6	128.2	221.8	194.4	177.8	824.8
人工智慧產業	19.5	67.8	92.6	116.1	126.7	422.7
軍工產業	7.0	6.2	2.8	2.8	0.0	18.8
安控產業	4.3	3.3	7.0	6.7	5.0	26.3
次世代通訊產業	12.0	13.0	18.3	20.8	21.2	85.3
小計	145.4	218.5	342.5	340.8	330.7	1,377.9

原子能科技民生應用的技術發展在我國已累積深厚能量，其技術範疇從核子科學基礎研究，逐漸跨足先進材料、能源科技、環境監測、生醫放射診療、食品安全及工業製程等前瞻應用領域，具備支援國家在能源轉型、健康照護、產業升級及環境永續等面向之關鍵能力。面對全球社會與經濟環境快速變動，例如氣候變遷帶來之能源穩定供應課題、人口老化導致醫療負擔增加、以及產業鏈面臨高精度與低碳轉型需求，原子能相關技術之跨域整合將可提供具體解決方式。

在國內科研布局上，原子能科技由於其涵蓋領域廣泛，涉及能源、科學、經濟、衛福、環保、農政、科技研發等多個面向，因此更需採行「政府跨部會整合資源」的策略架構如表 2-14 所示。因此，資源整合與跨界合作，將使原子能科技成為推動國家競爭力、社會福祉與永續環境的關鍵驅動力。

表 2-14 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
精準放射醫療	國科會、衛福部、經濟部
農業及環境	國科會、農委會、海委會、環保署
量子科技	國科會、教育部
中子科技	國科會、經濟部、農委會、交通部
工業應用	國科會、經濟部
半導體製程	國科會、經濟部
太空科技	國科會
人工智慧	國科會、衛福部、經濟部、農委會、海委會、環保署
次世代核能技術	國科會、經濟部

第三章 次世代核能技術研析及發展策略研析

(一) 國際核融合計畫與相關技術發展

核融合技術目前仍有三大挑戰，第一是原子核太小，需要外力進行催化提升反應速率；第二是原子核都帶正電，彼此會互相排斥，聚合再一起需要極高且持續的溫度(10 億度電漿)；第三是原子核周邊有許多電子會消耗掉反應的能量，因此，當碰撞反應發生時是否還有足夠能量進行融合，尚待克服。

截至 2024 年 7 月，全球與核融合研究發展相關的廠家數目與投資額度雖然有放緩的跡象，但仍在持續上升中，廠家數量已達 45 家，總投資金額達 71 億美元；其中有 20 家公司成立未滿 5 年，顯見整個行業對未來市場的發展非常樂觀。然而隨著發展進程推進，核融合發展也遭遇不少困難尚待克服，例如在電漿狀態下的持久性、抗輻射的先進材料研發、大型反應器的建造難度及最重要的成本管控；因此，公私合作越趨重要，如美國的「基於里程碑的核融合開發計畫」(Milestone-Based Fusion Development Program)、德國的「核融合 2040 計畫」(Fusion 2040)、日本的「核融合登月計畫」(Fusion Moonshot)、英國的「核融合未來計畫」(Fusion Futures)等，目前大多數公司都預期能在 2030 年代初實現核融合發電。技術發展方面，使用磁約束技術路線的有 23 家、磁慣性約束 5 家、慣性約束 9 家、混合磁/靜電約束 3 家、磁慣性約束 3 家、介子催化核融合 1 家和其他非傳統概念/未說明 3 家等[2-1]。

1. 國際熱核融合實驗反應爐(ITER)[2-2]

計畫原先預計於 114 年啟動，儘管擁有 35 個國家的資金與技術支持，但由於遭遇新冠疫情與各項技術問題拖累，原啟動計畫將要推遲到 2034 年，參考圖 3-1；而 Q 值>1 的目標，即輸出大於輸入，更是要延後到 2039 年，預算更是由原先的 50 億美元膨脹至 220 億美元，且可能還需要再追加約 54 億美元。不過，由中國大陸負責製造的最後一組托卡馬克環形線圈已在 2025 年全部運抵南法，可望能有效控制反應爐內的高溫電漿；因此，即便核融合前景困難重重，全美仍有 40 多家盼望實現核融合技術的民間企業。根據美國核融合產業協會(Fusion Industry Association, FIA)的最新估計，這些新創公司已募集到超過 71 億美元資金，其中來自麻省理工 MIT 的美國新創「聯邦核融合系統」(Commonwealth Fusion Systems, CFS)推出的 SPARC

核融合反應器[2-3]，因為設計上比傳統托卡馬克反應爐更小，可被視為一個緊湊型托卡馬克核融合裝置，建造與營運成本預期能夠更低，且反應爐效率更高；預期將有可能在 2026 年先達成 $Q>1$ 目標，2030 年代初建成第一座商業核融合發電廠，並產出 140 MW(千瓩)左右的電力。國內聚界潔能則認為核融合尚在實驗階段，要能夠大規模應用可能還需要十年以上，但若是世界各國加大力道投入研發，吸引更多企業與人才投入的話，或許有機會縮短商轉應用的時間。聚界公司已經和明年 COP 30 主辦國巴西政府簽署 MOU(第三十屆聯合國氣候變遷大會)，將教育用核融合設備 Alpha E 導入聖保羅大學，如圖 3-2，將是台灣第一個和他國政府合作開發核融合的民間企業[2-4]。

2. 2024 年 1 月 9 日，中國成立了由中核集團主導的國家工業複合體，推動核融合技術的發展與進步，也加入了國際熱核融合 ITER，中國設定目標到 2035 年建成首個工業原型核融合反應器，2050 年開始大規模商業化生產。
3. 中國的先進實驗超導托卡馬克實驗裝置 (Experimental Advanced Superconducting Tokamak, EAST) 在 2025 年初取得重大進展，參考圖 3-3；採用全超導磁體來產生強大的磁場約束高溫電漿體，維持穩態高約束電漿運行長達 1,066 秒(逾 17 分鐘)，刷新舊有 403 秒成績，創下新世界紀錄，這次突破證明透過熱和壓力將 2 個輕原子融合成 1 個較重原子的人造太陽裝置，是可以進行長時間運行的；並被認為是核融合穩態運行的基本模式，表明科學家們在控制和維持高約束電漿方面已取得了長足的進展，實現長脈衝的穩定運行，後續會將實驗結果分享與 ITER 來使用[2-5]。在核融合反應過程中，會有大量粒子噴射飛濺，尤其在邊緣區域的溫度和密度突變可能導致設備損壞，因此，尋求能夠承受的核融合反應爐材料十分重要。繼荷蘭之後，中國也成功開發出名為”赤霄”的強流直線電漿體裝置，每平方米每秒鐘可極速噴射出 10^{24} 次方個粒子；因其如同光劍一般而得名，此裝置可連續運行 24 小時以上，可望在核融合材料研究領域取得重要突破，為「人造太陽」的研製提供有力支持[2-6]。
4. 2025 年 2 月法國原子能委員會(CEA)宣布，在南法卡達拉舍的托克馬克裝置(W (Tungstene) Environnement in Steady-state Tokamak, WEST)成功將電漿

狀態維持長達 1,337 秒(超過 22 分鐘),打破上個月中國大陸裝置的 17 分鐘紀錄;這種高溫的帶電氣體是核融合反應發生的必要條件,裝置原理是利用強大的磁場,將高溫電漿約束在一個環形空間內,避免電漿與裝置內壁接觸,從而實現長時間的核融合反應;法國的突破表明科學家對電漿的理解和控制技術,正在持續進步當中[2-7]。

5. ITER 建造進度

南韓為國際熱核融合實驗反應爐製造的(International Thermonuclear Experimental Reactor, ITER)巨型真空容器組件已於 2024 年 11 月底運抵法國卡達拉什(Cadarache)建設基地,總重達 5,000 噸,由 9 個扇形區段組成,設有 44 個接口,內部容積達 1,400 立方公尺,未來將用於測試氙增殖等關鍵技術。因自然界中的氙極其稀少,做為放射性氫的同位素,氙的半衰期僅約 12.3 年,但在核融合過程中,需要持續產出氙做為新的核融合燃料再投入反應爐內,才能形成一個自給自足的循環系統,所以,若要實現商業化的核融合發電,首先必須要能夠自行生產氙[2-8]。

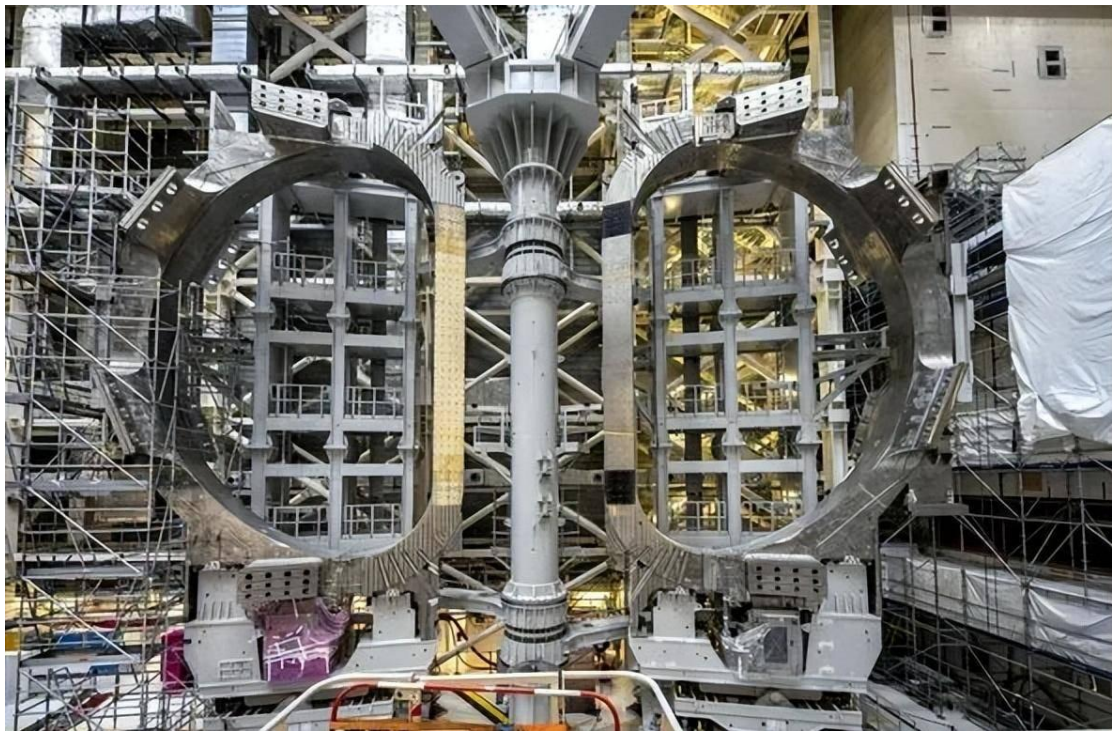


圖 3-1 ITER 巨型超導磁體[2-2]

6. 透過核廢棄物生產核融合燃料氙

美國物理學家 Terence Tarnowsky 在 2025 年美國化學年會 (ACS) 秋

季會議上提出的一項構想，利用回收核廢棄物製造氙，以加速器驅動次臨界系統(Accelerator-Driven Systems, ADS)來驅動核廢棄物中的原子分裂反應(atom-splitting reaction)，並在核躍遷(nuclear transition)作用之後產出氙，目前地球上約有 55 ± 31 磅(25 ± 14 公斤)的氙庫存，主要依賴加拿大的CANDU重水反應爐生產，市價估計約為1500萬美元/磅(每公斤約3,300萬美元)，根據Tarnowsky的計算，若回收系統能夠以1GW能量運行，估計每年將可產出4.4磅(2公斤)的氙，是現階段核融核反應器設計上在相同熱功率條件下自產氙量的十倍[2-9]，而且反應過程都處於次臨界狀態，只要關閉便能停止核反應，相較現有電廠的核分裂來說安全性較高。

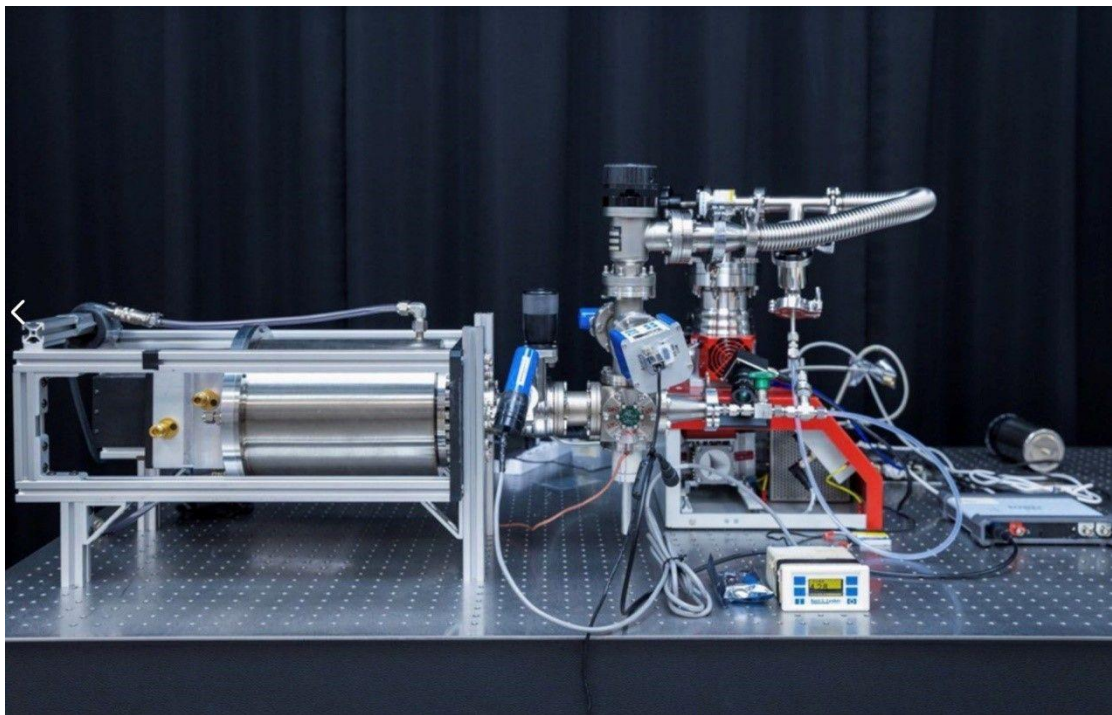


圖 3-2 聚界潔能 Alpha E 桌上型教育系統[2-4]



圖 3-3 EAST 核融合裝置[2-5]

(二) 小型模組化反應器(SMR)於各國發展類別

SMR 依其反應器的設計方式不同，對中子的利用率也各不相同，因此，所產出的放射性廢棄物多寡也有所差異；如以 NuScale 為首的輕水式反應器，其反應爐尺寸較小，中子逸散數量較多，若要維持一定比例的發電量，則需要使用濃度較高的核燃料、增加更換頻率或建造多個機組串聯使用。而液態熔鹽冷卻的反應器或微型反應器，則因採用一次性燃料，在運行壽命結束後整體更換，亦可能會產生較多的用過核燃料與其他放射性廢棄物。不過以泰拉能源為首的滋生式反應器，可以透過回收轉化鈾 238 為鈾 239，再重新投入使用，數十年內都不必更換燃料，大幅降低用過核子燃料的產生，但由於鈾元素同時可用於軍事用途上，受限國際核子保防與處理技術的關係，台灣未必能夠順利引進使用[2-10]。以下參考 International Conference on Small Modular Reactors and their Applications 2024 報告[2-11]，如圖 3-4，並蒐集國內外相關時事新聞與研討會論壇資訊，以六個類別說明 SMR 與核電技術目前的發展現況，包括陸基水冷型、艦載水冷型、高溫氣冷型、液態金屬冷卻型、熔鹽冷卻型與微型反應器，另有其他非供發電使用的機組，如製氫、供暖或工業蒸氣供給等，以及廢棄物回收處理與國際上次世代的核電發展議題。

1. 陸基水冷型

設計採用輕水反應器(Light Water Reactor, LWR)和重水反應器(Heavy Water Reactor, HWR)技術，利用當前大型反應器中普遍採用的成熟技術，因此，通常使用 U-235 濃縮度低於 5%的現有 LWR 燃料設計即可；換料週期則與傳統電廠相當，在 18-24 個月之間，也可以沿用傳統電廠的供應鏈與監管法規制度。目前有來自 9 個國家的約 14 種陸基水冷 SMR 設計，包括整體式壓水反應器(Integral Pressurized Water Reactor, iPWR)、緊湊型壓水式(主迴路與幫浦完全整合反應器壓力槽內)、環路型壓水式(loop-type PWR)、沸水式(BWR)和用於區域供熱的水池式—水冷反應器(WCR)。中國大陸的 ACP100 已於 2021 年開工建造，預計 2026 年開始商業運作，而整體壓水器 CAREM 正在阿根廷建造，目標是在 2028 年達到首次臨界狀態。其他近期部署的設計包括 RITM-200N(俄羅斯聯邦)、NuScale VOYGR、Westinghouse AP300、GEHitachi BWRX-300(美國)、勞斯萊斯 SMR(英國)和 EDF-NUWARD(法國)。

2. 艦載水冷型

目前有六種艦載 SMR 概念可供部署，皆源自於船舶使用的核動力裝置，設計使用 U-235 濃縮含量較高(接近 20%)，理論上換燃料週期可長達 120 個月(RITM-200M)，其中值得注意的是兩台 KLT-40S 型機組；自 2020 年以來一直在俄羅斯聯邦佩韋克的羅蒙諾索夫院士浮動核電廠(NPP)上運作(換燃料週期 30-36 個月)。另有國家計畫開發浮動式核電廠，如丹麥的 Seaborg Technologies 公司正在設計一款緊湊型熔鹽反應器，發電量為 100 MW(e)，其他還包括中國 ACP100S 與韓國 BANDI。

3. 高溫氣冷型

以高溫氣冷(Gas-cooled reactor, GCR 或 Hightemperature gas-cooled reactor, HTGR)為主流，採用卵石床或棱柱形核心設計，理論上較傳統電廠的束狀設計更為安全；目前共 14 個項目開發或運作中，進度較快的包括位於中國的高溫反應器-球床模組(HTR-PM)，換燃料週期估計在 25-60 個月之間，於 2021 年 12 月併網，並自 2022 年起滿功率運行至今。由於高溫氣冷式產生的單位高階放射性廢物較少(High-level waste, HLW)，因此，美國通用原子電磁系統公司設計的 EM2 高溫氣冷反應器，預計可以使用 30

年以上無需更換燃料。

4. 液態金屬冷卻型

此種設計採用快中子和液態金屬冷卻劑，包括鈉、純鉛和鉛鉍合金，使用較高濃縮水平的燃料(14%至 20% U-235)，目前進度較為超前的是 BREST-OD-300，這是一種鉛冷快中子反應器(Lead-cooled Fast Reactor, LFR)，正在俄羅斯聯邦謝韋爾斯克建造；其他正在開發的設計包括法國 Newcleo LFR-AS-200、瑞典布萊卡拉 SEALER-55 和西屋公司的鉛冷快中子反應器，還有美國 Oklo 的鈉冷快中子反應器(Sodium-cooled Fast Reactor, SFR)。設計上液態金屬冷卻的反應器，普遍採用高濃縮燃料和長壽命核心設計，換燃料週期都在 30 年左右。此外，液態金屬冷卻還可透過透過燃燒長壽命鈾和鈾系元素，大幅降低未來深層地質處置場(Deep Geological Repository, DGR)中高放射性廢棄物的放射毒性，減少廢棄物的產量與未來的除役復原時間。

5. 熔鹽冷卻型

使用熔鹽燃料和冷卻劑技術，屬於六種第四代反應器設計之一，主打增強安全性、低壓單相冷卻劑系統、高效率和靈活的燃料循環，加上使用熔融狀態的燃料，消除了與燃料護套故障相關的風險，具有長達 150 個月的長換燃料週期。美國 Terrestrial Energy (USA)公司設計的 IMSR400 反應器換燃料週期為 7 年一次，熔鹽反應器可以主動去除和儲存氣態分裂產物，並在後處理設施中分離鈾系元素回收利用，將廢物的處理期程縮短到幾百年內。

6. 微型模組化反應器。

屬於小型 SMR，發電量通常不高於 30 MW(th)，並不限定使用何種冷卻方式，包括輕水、氬氣、熔鹽和液態金屬(也有提出熱管冷卻系統)，微型反應器的目標群體是偏遠地區、災難復原和關鍵服務復原等利基市場，目前正在開發設計的有 13 個項目。

7. 廢棄物回收[2-12]

全球目前已有超過 43 萬噸的用過核子燃料，且每年以約 10,000 噸的數量增加中；當中有 30%已進行再處理或回收，其餘則貯存在濕式或乾式儲存系統中，等待最終處置或供將來回收。因此，2024 年 6 月舉行的核子

反應器用過核燃料管理國際會議，特別針對 SMR 與先進反應器未來的廢棄物處理的議題進行討論；多數 SMR 在設計階段就已考慮用過核子燃料與放射性廢棄物的管理，包含減少、重複使用和回收等，以解決燃料循環去化的不確定性，增加大眾的接受程度；更有 SMR 在設計上延長換料週期，並沿用現有的處理設施來處理核廢棄物。

8. 韓國核電參訪與 SMR 發展進程

2025 年 6 月 2 日 KAERI 以 Beyond Phase-out 為名接待由國立清華大學與中華民國核能學會組成的參訪團，參訪包括實驗型反應器 HANARO，參考圖 3-5、SMART-ITL，參考圖 3-6 與 KURT，參考圖 3-7 三項重要設備與場所，HANARO 是一座實驗型反應器，主要應用在材料、同位素與核醫藥物生產方面，除支援韓國本地研發外，也吸引許多國際合作計劃；SMART-ITL 則是一套高擬真的熱水流模擬系統，以 1:49 比例模擬正常運轉時可能會遭遇的異常事件，是韓國研發次世代技術的重要實驗數據來源；KURT 是專為處理放射性廢棄物的地下研究用隧道，以實際地質環境進行用過核燃料的隔離效果試驗、包材質量測試與地下水實驗，為將來高階核廢棄物的去化做準備，最後是核電廠重啟的議題討論，期盼雙方在核能領域能更緊密的合作[2-13][2-14]。韓國在核電產業的研發量能十分充足，已接連獲得阿聯酋與捷克等國的電廠訂單，同時也積極研發鈉冷快中子 (SFR)、熔鹽式 (MSR) 和高溫氣冷器 (HTGR) 等 SMR 反應器，其 SMART-100 小型反應器更已在 2024 年獲得標準設計批准，未來我國若考慮引進次世代技術，合作或借鑑韓國經驗也不失為一個務實的選項。

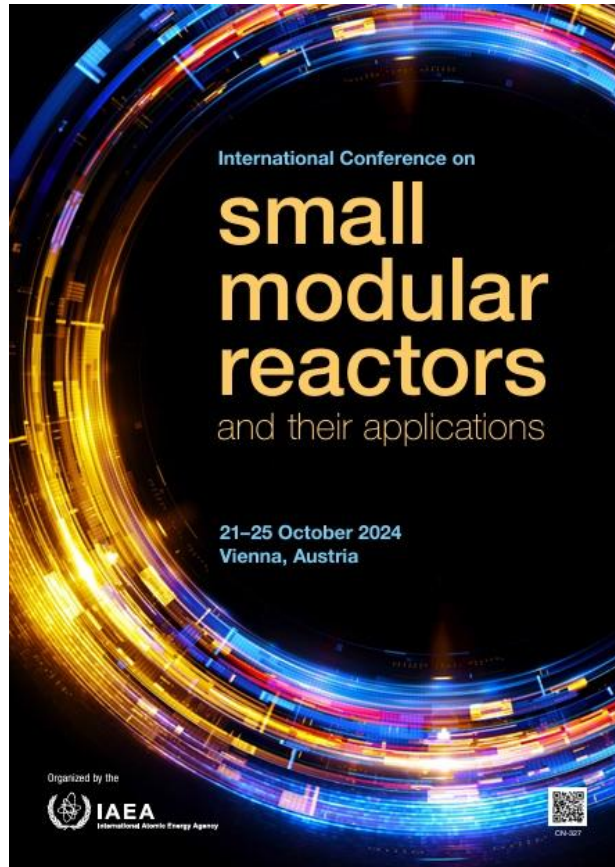


圖 3-4 International Conference on Small Modular Reactors and their Applications 封面 [2-11]



圖 3-5 KAERI HANARO 實驗型反應器 [2-13]



圖 3-6 KAERI SMART-ITL [2-13]



圖 3-7 KAERI KURT 試驗用隧道 [2-13]

(三) 各國合作及相關管制單位資料蒐集

隨著資料中心、人工智慧和加密貨幣的發展，推升電力需求不斷增加，加上淨零碳排需求與俄烏衝突，導致國際能源價格波動劇烈，使得發電成本也不斷上漲，國際能源總署(IEA)估計到 2026 年的需求會較 2022 年翻倍。美國能源部在《通往商業起飛之路：先進核能》報告中指出，為滿足未來預期的電力需求，美

國將需要同時部署 SMRs 與大型第三代+(Gen III+)反應爐，如西屋電氣公司 (Westinghouse Electric) 功率為 1,117 MW 的 AP1000 反應爐，並建議採用「聯盟模式」(consortium approach)，以促進相同設計的 5 至 10 座反應爐的連續部署。因為光是亞馬遜、微軟、谷歌和 Meta 這四家公司的總耗電量，在 2017 年至 2021 年間就增加了一倍多，達到約 72 十億千瓦時(TWh)；而中國大陸的需求總量在 2030 年估計將達到 400 十億千瓦時(TWh)，為了應對快速增長的大量需求，許多能耗大戶不得不先轉用化石燃料發電。以 ChatGPT 的 OpenAI 模型為例，每天約有數億次的查詢，其伺服器模組所耗電力約是美國一般普通家庭的 17,000 倍以上，且持續增加中；Google 自 2019 年至 2023 年間的溫室氣體排放量更激增了 48%，才能滿足數據中心與其供應鏈的需求；至於台積電最新的 2 奈米製程，預估每小時生產約需消耗 20 萬度電力，等於是一個小家庭 50 年的用電量；另根據麥肯錫顧問公司的報告估計，到 2030 年，為支應新一代大型 AI 模型與數據中心的運算需求，將消耗美國電力約 11%~12%，遠高於目前的 3%~4%左右[2-15]。

核電是現今僅次於水力發電的第二大低碳電力來源，約佔全球清潔電力的 25%，目前在 31 個國家共有 400 多個核反應器運轉中；還有另約 30 個國家有興趣將核能引入其能源結構，甚至包括從未運轉過核電機組的東協國家，如泰國、菲律賓與印尼。而 SMR 的小型化與模組化特點，將有助於核電推廣發展，截止至 2024 年 10 月，已有 2 座 SMR 核電廠投入運作，包括俄羅斯聯邦羅蒙諾索夫院士號浮動核電廠擁有兩台各 35 MW(e)的 KLT-40S 反應器，以及 2 座高溫氣冷示範機組(High Temperature Gas-Cooled Reactor - Pebble-bed Module, HTR-PM)，2021 年已在中國山東的石島灣基地開始商業運作。

已經動工開始興建的則有阿根廷的 CAREM-25 原型反應器，預計 2028 併網，但由於財政與供應鏈問題而存在變數；中國海南的 ACP100 示範電廠，已於 2021 年 7 月開工建造，適用於分散式發電場景，如船舶或海上平台作業等，預計 2026 年可以商轉；俄羅斯聯邦的 BRESTOD-300 屬於第四代鉛冷快中子式反應爐電廠，於 2024 年安裝反應器底板，標示著主要設備將開始進駐，預計在 2028 年開始發電；另有美國核管會 50 年來首次允許建造的非輕水反應器 Hermes，已在 2023 年底獲得 NRC 的建設許可並開工興建，屬於低功率的氫鹽冷卻高溫示範反應器 FHR，完工後預計將不會用於發電，而是用於研究資料收集與工業製程產熱等，來推動

建造 35 MWt 的 Hermes 2。

也有 SMR 在設計上考量以高含量低濃縮鈾(high-assay low enriched uranium, HALEU)作為燃料，濃縮程度可達到 20%，遠高於現有主流美式反應器所使用的 5%；但這些燃料主要都在俄羅斯聯邦進行商業生產，因此，俄烏衝突後不少 SMR 計畫都被迫暫緩；許多國家都在設法提高 HALEU 的供應，Terra Power 更因此要延後兩年投產。歐洲原子能共同體供應機構估計，到 2035 年，不包括用於發電的先進反應器與任何未來需求，歐盟(EU) 每年仍將需要 700 公斤到 1 噸的 HALEU 來維持其研究型反應器的運作；而美國能源部(DOE)的預測表明，到 2030 年，美國將需要超過 40,000 公斤的 HALEU。並且隨著新的先進反應器陸續投入運行逐年增加需求量，因此，能源部資助了位於俄亥俄州皮克頓的示範生產工廠，利用政府庫存的高濃縮鈾混合生產 HALEU 燃料。

1. SMR 應用；非電力需求

不同的 SMR 技術可滿足不同的工業需求，例如輕水反應器在較低溫度下運行，是區域供熱、海水淡化和氫氣生產的理想選擇；而較高溫度的反應器，如液態金屬、熔鹽和氣冷反應器，更適合需要高熱的工業，如煉油、煉鋼、合成燃料生產或是需要高溫生產氫氣的廠家。

美國陶氏化學公司(Dow Chemical Company, DOW)等其他行業的公司，也在尋求部署 SMR，因 SMR 具有減少緊急計劃區域的潛力，適合直接由工業用戶託管，並以熱電聯產方式使用低碳電力；同時應用高溫熱量為其營運提供動力，例如提供零碳氫化合物和熱量來生產鋼鐵和化肥，將工廠運營效率提高到 80%以上，而傳統單純發電的機組運用效率僅約 33%。

SMR 可以透過提供清潔電力和熱量發揮關鍵作用，以兩種主要類型的電解來生產氫氣，例如直接以低溫電解(Low-Temperature Electrolysis, LTE)產氫，通常工作溫度在 100°C 以下，且其技術成熟、操作相對簡單，或者改用高溫電解(High-Temperature Electrolysis, HTSE)方法，以 700 - 1,000°C 之間的電熱方式提高製造效率，並將小型反應器與氫氣用戶放在同一地點降低運輸成本，以提高氫氣生產的整體經濟性。

2. COP29

COP 29 的結論是繼續執行上屆會議的承諾，到 2030 年將全球可再生

能源發電能力增加兩倍，從每年 2%增加到每年 4%以上；這將會需要多種辦法同步進行，包括 2050 年前將核電裝機容量增加兩倍。自上屆會議 COP28 美、英、法首次發表【核能三倍宣言】，吸引 25 國響應之後，此次峰會後又加入以薩爾瓦多為首的 6 國簽署宣言表示支持，使締約國總數達到 31 國[2-16]；還有 14 家全球主要銀行與金融機構表示認同核能三倍宣言[2-17][2-18]，共同認為核能是清潔能源，對確保地球宜居具有重要的作用。除了目前正在建的約 60 座大型壓水式反應器以外，若要實現上述宣言成果，小型模組化和微型反應器等新興技術，以及使用創新燃料和非輕水冷卻劑的新型設計，也必須要大力推動。

IAEA 認為核能除了能提供電網基載電力外，還可用於快速脫碳和減輕工業部門帶來的影響，因為工業部門的溫室氣體排放量幾乎占全球排放量的 40%以上，且未來資料中心和人工智慧行業的電力需求將激增，這也是谷歌、微軟等公司正積極將先進核技術作為清潔、可靠和靈活的電力來源，以滿足日益增長的能源需求。

為了支持有意願將核能納入實現淨零排放的國家，IAEA 持續在推動”核協調與標準化倡議”(Nuclear Harmonization and Standardization Initiative, NHSI)，幫助各國制定協調一致的監管辦法和工業標準化，確保核能的長期可持續性，以促進小型模組反應器和其他先進反應器的安全可靠部署。

3. 義大利邁向重啟核電

義大利國家電力公司(Enel)宣布與兩家義國頂尖企業安薩爾多能源與李奧納多公司達成協議，共同生產第三代小型模組化反應爐 SMR 和第四代核電廠。義大利在車諾比事故後，於 1987 年公投放棄使用核電，但俄烏戰爭爆發後，能源供應不穩定性和價格波動加劇，促使義大利尋求多元化的能源來源，以應對能源安全與氣候變遷。義大利政府預估重啟核電有助於降低減碳的經濟成本，目標於 2027 年底前完成相關的修法計畫，包括推動 SMR 發展，因此，義國政府規劃的「國家能源與氣候計畫案」(PNIEC) 以將核能作為再生能源的補充，希望在 2050 年時核電佔能比能達到 11%，甚至 22%。[2-19]

4. 西門子能源商業合作計畫

西門子能源股份有限公司於 2025 年 2 月底宣布，與 Rolls-Royce SMR

達成合作協議，提供蒸汽渦輪機、發電機及其他輔助系統，雙方將在數位化控制系統、儀表和控制技術方面展開合作，提高 SMR 的效率和安全性，並將技術用於 Rolls-Royce SMR 計劃建設的第三代模組化核電廠 (Generation III+)，共同參與競標英國的 SMR 開發計畫，期盼能從與 Westinghouse、Holtec Britain 和 GE-Hitachi Nuclear Energy 的競爭中，脫穎而出。[2-20]

5. 東協國家規劃

為因應季成長所帶來的電力需求，不少東協國家改將發電量較低的小型核反應爐(SMR)視為能源轉型過程的方式之一，如印尼、菲律賓與越南都有計畫重起或開發 SMR 技術，但由於東協國家過往大多沒有發展過完整的核電產業；因此，成本變動、安全風險及缺乏人才將是立即要面對的課題，依照越南官方估計，若全面重啟核電相關產業，將會出現 2,400 人以上專業工程師及科學家的缺口，急需生態系和技術鏈的重新建立。[2-21]

6. 2024 小型模組化反應器最新發展國際論壇[2-22]

中華核能學會 2024 年 12 月 16 日於張榮發基金會國際會議中心舉行”小型模組化反應器最新發展國際論壇”，從經濟、安全、法規制度與實際應用等各方面說明目前國際上 SMR 發展情況。會議開場邀請立法委員翁曉玲分享國內核電立法實務現況與挑戰，說明國內目前排碳能源占比居高不下的問題與困境，以及修法提案的版本和方向，並考慮提案開放企業經營 30 萬千瓦以下的小型核電來應對淨零探排。後續則有美、日、韓三國共 5 位專家學者介紹 SMR 的最新發展現況，包括來自韓國 KAERI 的 Dr. Chae Young Lim、來自日本日揮株式會社(JGC Corporation)的 Mr. Hiromasa YANAGISAWA、來自日本石川島播磨重工業(IHI Corporation)的 Mr. Daisuke Koike、來自日立奇異的 Dr. Kazuaki Kito 與西屋公司的 Mr. Tim Meyers。

論壇首先由清華大學葉宗洸教授引言，介紹了自 1970 年代以來全球核電產業的發展狀況，包含 SMR、MMR 小型/微型反應器的定義標準，以及這些次世代機組的優勢與應用方向。

韓國 KAERI 的 Dr. Lim (林采暎)展示了韓國目前的核電產業現況，韓國自 1972 年起持續不斷發展核電產業，陸續有核電機組接力加入營運，至

今已有 4 個廠址，運轉共 26 座反應器；由於海水溫度較低有利冷卻，因此，將大部分機組都設置在東南岸區域。韓國最早於 1997 年開始發展 SMART (System Integrated Modular Advanced Reactor) 構想，2012 年獲得監管單位的 SDA(Standard design approval) 許可，同時也正在設計開發多個第四代與小型化反應器，包含最近獲得許可的 SMART100 與其他設計中審查中的 SMR；他認為 SMR 在容量、安全性與成本方面都以能與燃煤電廠相比較。此外，其他非輕水式電廠，如鈉冷卻與熔鹽反應器也是韓方積極開發的項目，期盼能實現核能利用多樣化，像是工業製程的產熱需求、製氫與海水淡化等，應對未來不同市場需求的考驗；而 SMR 規模經濟較低的情況韓方也有考量到，現在的解決辦法是傾向在同一場址內設置多個機組來提升整體發電量，兼顧安全性與經濟性達到一個平衡。韓國政府已決定在 2034 年前興建一座 iSMR 示範電廠，來協助推動 SMR 技術，同時考慮設置 SFR 電廠來協助去消化用過核子燃料；產業界則有興趣利用 HTGR 來製氫與產生熱能，或將熔鹽反應器應用在船舶推進，因為其換料週期正好與船舶壽期相近，理想情況下可一併進行除役。

JGC 代表介紹 2019 年起在經濟產業省(Ministry of International Trade and Industry, METI)的支持下，日本開始進行能源創新促進計劃(Next Energy Innovation promotion, NExIP)，並在 2020 年代末開始海外計畫的合作，包括與 NuScale (JGC & IHI)，合作、參與 BWRX-300(日立 GE)計畫以及與阿布達比、英國的合作；另規劃發展其他各種類型的核反應器技術和廢棄物回收再處理技術，目標是透過國際合作，例如與 NuScale 共同參與亞洲和世界各地的 SMR 部署，提升核子工程與相關供應鏈的產品質量。日本自福島事故後大幅升高核電廠監管標準，尤其是耐震能力，現 VOYGRM 的設計必須承受相當於美國標準兩倍的地震力。JGC 也繼續觀察美國、歐洲、亞洲及非洲等市場需求狀況來推動 SMR 的發展。

日立奇異公司代表介紹透過過去多年的核電產業實務經驗，在穩定能源與碳中和的需求下，開發出 BWRX-300 SMR 反應器，其使用濃度 3~5% 的鈾 235 作為燃料，屬於 ESBWR 的一種，是基於傳統沸水式電廠原理進行系統簡化與安全性提升而來；移除了傳統沸水式反應器設計中對多個系統和組件的需求，包括再循環泵、抑制池、安全洩壓閥及減壓閥等，極大

程度的簡化了反應器設計；並將隔離閥整合進反應器壓力槽內，盡可能減少發生喪失冷卻劑(LOCA)事故的後果，再透過減少組建的數量與優化建造程序，預期可以減少體積與使用材料 50%以上，有效提升運轉可靠度並降低成本。BWRX-300 整體採半掩埋式設計，所需廠址佔地面積較小，場址選擇上更有靈活性，而安全性方面另備有三套冷凝器隔離系統(Isolation Condenser System, ICS)系統，透過蒸汽供應和冷凝水回流管道連接到 RPV，在過壓情況下可以作為 ECCS 使用，每套至少可獨立運作 7 天，無須交流電源供應；且僅需一套運作便可應對設計基準故狀況，相對應的緊急應變區域 Emergency Planning Zone, EPZ)可望大幅縮小。BWRX-300 目前已在美國、英國與波蘭提交審查計畫，並已在加拿大安大略省開工建造，預計 2028 年竣工，2029 年商轉。

日立奇異代表介紹 VOYGR 是由美國 NuScale Power 公司基於技術成熟的輕水式反應器開發而來的創新 SMR，但縮小了尺寸和設計簡化，目前規劃以單個 77 MWe 模組串聯使用，可串接 4 組、6 組與 12 組等形式，最大總發電量 924 MWe，容量係數可達 95%；但在極端情況如基礎設施遭遇嚴重打擊後，能夠在不更換燃料的情況下以 154MWe 的發電量持續運轉 12 年。依據 NuScale 官網資料，以最多 12 個模組串接形式的 VOYGR-12 所需的用地面積約為 0.15 平方公里，利用退役的火力電廠改建即可。對比同等發電量的太陽能發電需要面積 44 平方公里，風力發電更是需要面積 243 平方公里。VOYGR 在安全上不需要任何動態設備，依靠衰變熱移除系統(Decay Heat Removal System, DHRS)與爐心緊急冷卻系統(Emergency Core Cooling System, ECCS)，即可達成自然對流 30 天以上，後續依靠空氣冷卻即可持續移除衰變熱，極大程度的提高了安全性。也可依照客戶需求串接獲減少多個機組(4~12)來提升或降低發電量來達到經濟效益(308~924 MWe)，由於自動化程度提高，可以大幅減少人力需求，NRC 認可僅須 3 位運轉員便能操作 VOYGR-12 電廠，因此，除了電力公司以外，VOYGR 也相當適合化學公司和礦產資源公司等急需脫碳能源的公司或計畫。

西屋公司代表介紹 AP300TM 是該公司 70 多年核電經驗的集成體，如：佔地面積僅需約半個標準足球場，設計發電量 330 MWe，利用已在世界多國穩定運轉多年的 AP1000 PWR 簡化而來；AP1000 已有 2 台在喬治亞州

沃格特爾工廠運作，2 台已在中國商轉，並有 6 台在興建中，顯見 AP1000 具有足夠的運轉效率與可靠度。而 AP300 是在 AP1000 的基礎下改造，將發電功率降低至 330 MWe，因此，僅需保留一組冷卻迴路系統，有效減少體積與土地佔用，並有效控制建造與維護成本。AP300 也繼承了 AP1000 的被動安全設計，透過重力自然循環冷卻方式，自動完成停機洩壓等流程，在事故發生 72 小時內都無需運轉員介入操作，後續則可依靠空氣對流持續保持冷卻狀態。預期 AP300 將能在 2027 年獲得設計許可，燃料替換週期為 4 年，設計使用壽命為 80 年。AP300 已被波蘭、烏克蘭和保加利亞納入該國未來的核能計畫，並且被中歐和東歐、英國、印度和北美等其他多個地區列入未來能源供給的考慮選項。西屋公司另有微型反應器設計 eVinci，功率僅 5 MW，設計概念類似一個大型熱管，可透過鐵路、駁船和卡車裝在貨櫃中運輸到任何位置，僅需 2 英畝土地即可設置，不需要水來冷卻或運行；eVinci 預計使用濃縮度 19.75% 的 TRISO 燃料，可以串接並聯使用，燃料替換週期為 8 年，由於幾乎不須需要時刻監管，因此，只需要 1 位運轉員即可運作，主要面向偏遠地區或局部高耗能產業，如採礦、工業製程熱能、製氫、供暖、研究機構或資料中心等。

總結此次與會的 5 位代表一致同意，現階段 SMR 在單位成本與規模經濟方面，會有高於傳統電廠的情況，但未來技術越趨成熟後，這一狀況將可望獲得大幅度的改善。日立奇異公司的代表 Dr. Kazuaki Kito 表明他們的目標是將成本費用降至與傳統電廠一樣，甚至更低；其他代表們則表示市場的需求不一樣，並非每個地方都需要大型傳統電廠，電力公司會根據市場需求作出相對應的調整，例如考慮碳稅、電價與能源配比等，不會將資源重押在單一選項上面；若 SMR 未來費用如果無法有感降低，市場自然會作出抉擇。

SMR 儘管擁有眾多優勢，但不可避免的仍要面對核廢棄物處理消化的問題，依照設計類型的不同，產出的核廢棄物多寡不一，韓國代表說明該國情況與台灣相似，可供運用的土地資源有限，這也是促使韓國計畫發展 SMR 技術來協助去消化用過核子燃料的重要因素之一。

由於此次與會的日、韓都尚未有實際商轉的 SMR 機組，加上目前設計的反應器在反應度控制上還是以硼酸的使用為主，所以，監管法規方面都還是

暫時沿用傳統電廠的標準，尚未有實際修改的動作，待日後確定要引進 SMR 機組或是不考慮使用硼酸時，監管單位才會開始啟動調整程序修改法規制度，因此，目前也僅止於討論 EAB 與 LPZ 的調整，按照 NuScale 的申請書資料，其規劃的禁制區(Exclusion Area Boundary, EAB)到低密度人口區(Low Population Zone, LPZ)區域已從傳統電廠的 800 至 6,000 公尺縮減至 80 至 400 公尺。

有與會來賓提問到核廢棄物與高濃縮燃料的相關問題，5 位代表的回應大致相同，確實 SMR 有概率產生的核廢棄物較多，其中一項關鍵原因是為了達到規模經濟，通常會在同一場址設置多部機組，因此，多機組受到照射活化的設備也會較多，加上換料週期與傳統電廠相近導致廢棄物增加。韓國代表估計 SMR 會比傳統電廠多出約 30%，但 SMR 在設計之初便已有考慮到用過核子燃料的再利用可能性，實際的廢棄物數量並不會達到多出 30%那麼高，SMR 最終設置與否的考量的點將會是在需求和應用層面，像是某些不適合建造大型傳統電廠的地點，或是有特殊需求的項目如製熱、製氫或海水淡化等；而另一項受到關注的高濃縮低豐度鈾 HALEU 核燃料，參加此次會議的代表們所屬的開發商，目前都還沒有計畫直接使用 HALEU 核燃料來降低換料週期，所以，除非是西屋代表提到的 MMR 機組可以達到 8 年換料週期以外，目前 SMR 的估計換料週期都會與傳統電廠相當，在 18~24 個月之間，或者略多一些而已。

7. 碳 14 核能電池[2-23]

無錫貝塔醫藥科技有限公司聯合西北師範大學於 2025 年 3 月，發表一款碳-14 (C-14)核電池「燭龍一號」，參考圖 3-8；利用碳-14 同位素的長半衰期特性，將衰變過程中釋放的能量轉換為電能，可持續放電上千年；具有-100 度至 200 度極端溫度適應性，其能量密度高達 2,200 mWh/g，比商用鋰離子電池高 10 倍，預期 50 年設計壽命內衰減率低於 5%，短路電流 282 nA、開路電壓 2.1 V、最大輸出功率 433 nW，能量轉換效率突破 8%。預期燭龍一號可以做為醫療器材等植入式設備使用，如心臟起搏器、腦機介面等，為其提供穩定且永久的電源支持，減少更換電池的需求，降低手術風險，或者需要長時間穩定運行的網路設備；以及極端環境探測，如海洋深處、南北極與太空探索等，但由於碳-14 會發射低能量 β 粒子，需要被

包覆在鑽石或類鑽石的外殼內。

8. 貧化鈾核廢棄物電池[2-24]

核子燃料生產過程中會產生副產品「貧鈾」，其化學性質與濃縮鈾高度相似，卻無法在核反應器(輕水式)中用作燃料，又因帶有微量放射性特點不能隨便棄置，光是日本就擁有大約 1.6 公噸的貧化鈾，而全球各地儲存的貧化鈾，估計達到 160 萬噸，若能以鈾作為充電電池並成功擴大規模並商業化，那麼將為消化此一放射性物質提供一條可行途徑。因此，日本 JAEA 利用鈾燃料濃縮過程的剩餘物貧化鈾(DU)，開發製作出鈾基充電電池，參考圖 3-9，稱為鈾基氧化還原流電池(URF 電池)；正極為鐵，負極為貧化鈾，原型機尺寸寬度 10 公分、高度 5 公分，通過兩種電解質的氧化還原反應，輸出電壓可達到 1.3 V，非常接近標準鹼性電池的 1.5 V，適合作為再生能源的儲電裝置，且電池經過 10 次充放電後的性能幾乎沒有變化，表現出相對穩定的循環特性，不過此類電池因帶有放射性，僅能用於輻射控制環境，例如核電廠或其他核設施內，目前估算約 650 噸貧化鈾 URF 電池可儲存約 30,000 千瓦時的電能，足以供應約 3,000 戶家庭一天的用電需求。JAEA 團隊正在改善電解質循環系統，期望開發出更高容量、更高效能的電池，盡早實現商業化使用。

9. 中國核電創新能力[2-25]

儘管中國核電產業是在國外技術的基礎上發展起來的，但現今它已成為世界核能的主要支持者，在政府全覆蓋策略的支持下，中國企業得到了廣泛融資和系統協調的支持，中國約 70% 的反應爐建造成本由國有銀行的貸款支付，利率僅 1.4%，遠遠領先西方企業；省級政府也經常提供免費或折扣土地，進一步降低在中國的營運成本，使得中國核電價格可低至每兆瓦時約 70 美元，而美國為 105 美元，歐盟為 160 美元。

- (1) 中國計劃在 2020 年至 2035 年期間建造 150 座新核反應器，目前正在建的核反應器有 27 座，每座反應器的平均建設時間約為 7 年，比大多數其他國家都要快得多。
- (2) 中國已開始運行世界上第一座第四代核反應器，中國聲稱自己開發了該反應器約 90% 的技術。
- (3) 中國在具有成本競爭力的小型模組化反應器(SMR)的研發和投入使用

方面處於領先地位。

- (4) 總體而言，分析人士評估，中國在大規模部署第四代核反應器的能力上可能比美國領先 10 至 15 年。
- (5) 中國核電創新優勢主要體現在組織創新、系統創新和漸進創新，許多第四代核技術多年來一直為人所知，但中國政府支持的方式在應用這些技術方面表現出色。
- (6) 分析師評估，在開發核融合技術方面，美國和中國可能不相上下，但他們警告稱，中國已證明有能力大規模部署分裂反應器，這將使其在核融合投入使用時佔據優勢。
- (7) 從核能領域的科學出版物來看，中國在 H 指數(常用的衡量期刊出版物學術影響力的指標)中排名第一。
- (8) 2008 年至 2023 年，中國在所有核專利中的份額從 1.3%增長至 13.4%，並且在核融合專利申請數量上處於領先地位。

麻省理工學院核子科學與工程教授 Jacopo Buongiorno 表示：中國已是事實上的世界核技術領導者，尤其指部署第四代核反應器的能力可能比美國領先 10 到 15 年，歸因於中國政府高度重視國內核反應器建設；截至 2024 年 5 月，美國雖然仍是全球核能生產領導者，擁有 94 座運作核反應器，佔美國能源產量的五分之一和清潔能源產量的一半，是世界核能產量最大的國家，達全球核能發電量的三分之一；然而，美國在過去十年中僅啟動了兩座新的核反應器，反觀中國國內已有 56 座核反應爐，正在建造的有 27 座(比其他國家多 2.5 倍)，參考圖 3-10 與圖 3-11；預計未來每年將建造 6 到 8 座新核電廠，到 2030 年，中國的核能發電量將超過美國，2023 年 12 月中國在北部山東省開始營運世界上第一座第四代核電廠，即發電量為 200 兆瓦 (MW)的氣冷式石島灣核電廠，並持續開發部署具有成本競爭力的新型小型模組化反應器，如玲瓏一號。

中國現有的核反應器大部分都是美國西屋電氣公司在 20 世紀 90 年代末開發設計的 AP1000，屬於「第三代」反應器，在 2008 年透過技術和設計轉讓取得，儘管中國的第四代核反應器技術早在幾十年前就已為世界所知；但中國核電創新的蓬勃發展仍是事實，更多的體制創新、組織創新與政策支持，規劃到 2035 年實現核能生產能力達到 200 吉瓦(GW)的目標，

可以防止每年約 15 億噸的碳排放，超過英國、西班牙、法國和德國的總和，中國大陸希望到 2050 年，核能提供至少 15% 的發電量。

中國也主導了世界上第一個多用途小型核電機組示範計畫—「玲瓏一號」，其每台機組的發電容量達 300 兆瓦(電)，採模組化設計、標準化生產，有效縮短建設工期，降低成本，其設計是由中廣核集團經過 10 多年的自主研發而來的多用途壓水反應器 ACP100；玲瓏一號也是第一個獲得國際原子能總署(IAEA)批准的小型核反應器，預計每年將發電 10 億千瓦時，足以為超過 525,000 戶家庭提供服務。另有上海應用物理研究所計畫於 2024 年下半年，在中國甘肅省啟用世界上第一座熔鹽鈾核反應器 TMSR-LF1，以及開發 60 兆瓦等級的浮動核反應器 ACPR50S，為石油鑽井平台和島嶼提供電力。

中國也正在建造快中子反應器，可以使用 U-238 及大多數反應器中的可分裂同位素 U-235；中廣核集團於 2023 年將一座 600 兆瓦的 FBR 接入電網，2026 年將投入第二座。但 FBR 代表著軍民兩用技術，每座 FBR 反應器每年可生產多達 200 公斤武器級鈾，足夠製造 50 枚核彈頭。

10. 鈾反應器

中國大陸 2025 年 4 月，在戈壁灘開始運行一個可產生 2 兆瓦熱電的鈾反應器，標示著在清潔能源領域的重大突破，因為據估算鈾礦在地殼中的含量比鈾礦更為豐富，光是內蒙古的鈾礦理論上可以滿足中國數萬年的能源需求；而且產生的放射性廢棄物比目前的鈾反應器少得多，尤其是長半衰期的核種也較少，再著鈾反應器的副產品也不太適合武器化，從而降低了安全風險。與熔鹽技術結合時，反應器可以在大氣壓力下運行，自然限制過熱，提高整體安全性，研究團隊正在建造更大型的鈾熔鹽反應器，預計 2030 年達到臨界狀態，發電量為 10 兆瓦。[2-26]

11. 已向 NRC 提交 SMR 預先設計檢查的公司[2-27]

前期報告中有提及 NRC 接受 SMR 開發商預先提供設計資料，尤其是涉及新穎方法或具有挑戰性的案例，讓申請人(開發商)與 NRC 之間提早建立聯繫管道，協調技術標準和法律要求，提前排定審查會議期程，加快設計認證(Design Certification, DC)或建造與營運許可(Combined License, COL)階段的流程；當中分為介紹概念與技術的白皮書(White Papers, WP)，以及

紀錄研究過程、實驗結果、分析方法等細節的技術報告(Technical Reports, TCR)兩類別，表 3-1 為預先審查的主要項目內容，表 3-2 則為 ARC 公司實際已提交給 NRC 的預先審查項目，預先審查該流程大致可分為 4 個階段，第一步是啟動階段，由申請者提出預審請求，NRC 受理後安排啟動會議，第二步是進行白皮書討論，主要是討論設計議題或分析方法，第三步是技術審查，NRC 會前往設計機構進行實體訪查與問答，第四步是若在核心議題上取得共識便可進行結案，最後確認申請內容即可讓項目正式立案。

NRC 會根據設計方提交的資料與預估資金數目進行評估，審查設計中的技術問題或法規適應性，回應是否需要補足資金、提供初步的改進技術意見或再進一步審議，而 NuScale Power 在設計階段便多次與 NRC 進行預先審查，旗下正在執行的 SMR-160 設計認證也通過預先審查，也獲得了 NRC 的技術意見回饋，但同樣也有因資料不足與未能取得共識而被拒絕的案例，如 2020 年 Oklo Aurora 因為在燃料性能與安全分析方法的議題上沒有提供完整資料而被 NRC 拒絕審查，參考表 3-3。

(1) NuScale [2-28]

NuScale 於 2007 年成立，目標是開發出更安全、更靈活、更具成本效益的小型核反應爐 VOYGR，參考圖 3-12；2022 年，NuScale Power 在紐交證交所上市，期望透過持續提升 SMR 的性能和安全性，拓展市場與更多的研究領域。按照 NuScale 提交 NRC 的申請書資料，其規劃的 EAB 到 LPZ 區域，預計能由傳統電廠的 800 至 6,000 公尺縮減至 80 至 400 公尺；而 EPZ 區域雖然尚未有實際廠址暫無定論，不過根據 NRC 的 ML22287A155 報告確定認可 NuScale 的設計與安全應變能力；因此，不需要沿用 250 MW 的 10 哩標準，大幅縮減管制區域，使 SMR 能適配更多過去無法建造核反應器的地點。關於事故後的劑量標準方面則可以符合 10 CFR 50.34 的規範，第一，在假定的放射性物質釋放開始後的 2 小時內，位於禁區邊界上任何一點的個人所接受的總有效劑量(TEDE)不會超過 0.25 Sv；第二，位於 LPZ 邊界任何一點的個人，如果曝露於放射性物質釋放所產生的放射性雲(通過的整個期間)，總有效劑量(TEDE)不會超過 0.25 Sv，依照個別事故的輕重程度，劑量標準參考表 3-4。

(2) ARC 清潔能源公司[2-29]

ARC (ARC Clean Energy Canada)是一家開發和商業化量子核融合能源公司，以氫硼進行核融合反應，搭配鈉冷卻的快中子反應器的 ARC-100，參考圖 3-13；輸出功率為 100 至 150 兆瓦，適用於電力和工業熱能的供應；燃料更換周期預計為 20 年，採小型化設計，可以更容易部署在不同的地點，表 3-2 為 ARC 提交的預先審查項目列表，讓 NRC 可以提前進行審核與討論。ARC 另與韓國核電公司(KHNP)及 NB Power 簽署三方諒解備忘錄，\$ 探索全球小型模組化反應爐(SMR)的潛在合作機會。

(3) 泰拉能源有限責任公司 TerraPower [2-30]

是一家美國核能公司，位於美國華盛頓州貝爾維尤，由微軟創辦人比爾·蓋茨與內森·梅爾沃德(Nathan Myhrvold)共同創立，致力於開發鈉冷快中子反應爐(Sodium-cooled fast reactor)，提供具有高效率、良好的燃料利用率和核廢棄物處理能力，公司的核心技術與產品是行波反應爐(Traveling Wave Reactor, TWR)，將不可分裂材料轉變為可分裂核材料，如鈾 238 轉為鈾 239，以及與通用電氣日立核能公司(GE Hitachi Nuclear Energy)合作開發的 Natrium 快中子計畫，屬於第四代反應器的代表之一，參考圖 3-14；也與中國核工業集團公司(CNNC)合作，在中國福建省霞浦縣建設 600 兆瓦的行波反應爐示範項目。

(4) Kairos Power [2-31]

也是一家美國新創核能公司，位於美國加州奧克蘭，專注於開發氟化鹽反應器(Fluoride-salt-cooled reactor)，參考圖 3-15；特色是固有的安全性，即使發生故障反應爐也能自動關閉，該公司已與獲得許可，將在 2027 年啟用田納西州的示範性反應器，也與 Google 達成合作協議，計畫在美國建造六至七座小型模組化反應爐，總發電量達 500 兆瓦，為 Google 的資料中心和人工智慧運算需求，提供無碳電力，並在 2030 年將第一座 SMR 反應器投入運轉。

(5) GE Hitachi Nuclear Energy (GEH) [2-32]

SMR 帶來的商機吸引眾多能源機構爭相投入研發，目前發展進度較為領先的除 NuScale Power 以外，就屬由通用電氣(GE)和日立公司

共同投資成立的 GEH 公司，GEH 結合了兩家公司在核能領域的豐富經驗和技術優勢，在 SMR 領域的標誌性產品為 BWRX-300 小型模組化反應器[2-30]，屬於第三代+核反應器，改良自全球使用經驗豐富的沸水式反應，其工作原理相似，但較為簡單、安全與經濟性，即使發生事故也能依靠重力等自然力，保持爐心的冷卻。

(6) Terrestrial Energy USA (TEUSA) [2-33]

原是一家加拿大核能技術公司，後遷至美國北卡羅來納州夏洛特，主要產品為熔鹽反應器(Integral Molten Salt Reactor, IMSR)，參考圖 3-16；採用了熔鹽作為冷卻劑和燃料溶劑，因熔鹽的物理特性使其具有極高的熱容量，對比傳統輕水式電廠的熱電轉換效率提高約 50%，有效提高燃料利用率，並且能夠在發生故障時迅速吸收熱量，降低核事故的風險，反應器使用低濃縮鈾(LEU)作為燃料，供應鏈風險較低，產生的核廢棄物也相對較少，且處理相對容易。

(7) X Energy [2-34]

是一家美國私人新興核反應器和燃料設計工程公司，總部位於馬里蘭州羅克維爾(Rockville)，目前正在開發第四代高溫氣冷球型核反應器(HTGR)，參考圖 3-17；輸出功率為 80 兆瓦(MWe)，可模組化擴展至 320 MWe，燃料採用 TRISO (TRIStructural - ISotropic fuel)顆粒狀設計，將核燃料包裹在多層碳化矽塗層中，具有極高的耐熱性和耐腐蝕性。X-energy 已獲得美國能源部先進反應爐示範計畫(ARDP)的資金支持，並與 Amazon 達成合作協議，共同推廣 Xe-100 技術的開發部署。

(8) 通用原子電磁系統公司(General Atomics-Electromagnetic Systems, GA-EMS) [2-35]

為通用原子公司(General Atomics)旗下子公司，是商業核能領域的先驅公司之一，現正利用公司 50 多年的 TRIGA (Training, Research, Isotopes, General Atomics)經驗，開發下一代氣冷設計的先進反應器(Fast Modular Reactor, FMR)，參考圖 3-18；設計功率為 50 兆瓦，採高溫運行方式，核心出口溫度可達 850°C，提高熱效率，並適用於工業過程熱應用，並希望能以用過核燃料提供動力，無需再補充燃料運作 30 年以上。FMR 項目已被美國能源部(DOE)選中，作為先進反應器

示範計畫(ARDP)下的概念-20(ARC-20)專案的一部分，旨在推進下一代核反應爐技術的發展。

(9) Kaleidos [2-36]

由美國加州 El Segundo 的 Radiant Industries, Inc. (Radiant)公司所開發設計的萬花筒(譯名)模組，是可移動微反應器設計，旨在取代傳統柴油發電機，參考圖 3-19；可完全容納在一個運輸貨櫃中，熱值與功率分別為 3 MWth 和大約 1MWe，足以支援約 1,000 個家庭的用電需求，採用 TRISO 燃料、氬氣冷卻劑和棱柱形石墨塊的高溫氣冷反應器 (HTGR)，避免水冷系統可能產生的腐蝕與污染問題。Kaleidos 整體採模組化設計，無需現場挖掘，從運輸卡車卸載後便可快速部署，次日即可達到滿功率運行，每次加注燃料可持續運行 5 年，整體壽命可達 20 年。

(10) University of Illinois at Urbana-Champaign, UIUC [2-37]

伊利諾大學厄巴納-香檳分校(譯名)於 2021 年 5 月，向 NRC 提交一份意向書，計畫在校內設立一座高溫氣冷反應器(HTGR)的微型模組化反應器(MMR)，參考圖 3-20；設計熱值為 15 MW，功率 5 MW，採用 TRISO 顆粒燃料、氬氣冷卻劑和石墨減速劑，搭配熔鹽二次迴路，為校園提供區域供熱與低碳電力。

(11) 美陸軍主導微型反應器研發

美國川普總統 2025/5/23 發布行政命令，以「部署先進的核反應器技術，以確保國家安全」為名，要求美國陸軍加入微型反應器的研發，加速推動實用化進程，供應偏遠基地所需電力，該命令規定在 2028/9/30 前至少要有一台反應器在美國國內軍事基地內運轉，五角大廈因此以 2022 年行動代號「佩蕾計畫」(Project Pele)所設計的 SMR 機組為構想，與 BWX 公司簽訂一份 3 億美元的開發合約[2-38]。美國空軍則與 OKLO 公司簽約，計劃在阿拉斯加基地建造 5 兆瓦 (MW) 的微型核子反應爐，確保於基地能在零下 50 度的酷寒環境穩定供電(供暖)。由於極地地區因永久凍土退化、地震活動頻繁、施工週期短以及昂貴的物流成本，為發電機提供燃料的供應鏈可能中斷，電網也可能遭到外部駭客攻擊而癱瘓，促使美空軍開始探索微型反應爐的發電量

佔比，以尋求提升能源韌性[2-39]。

(12) 三哩島重啟計劃提前

由於 AI 對能源強勁的需求，美國民營核電業者星座能源於 2025/6/25 宣布重啟三哩島的計劃將提前一年至 2027 年完成，而軟體巨頭微軟也已完成與該公司的 20 年購電合約，收購其未來產出的全部電力，因此東岸電力調度中心 PJM 為此開放快速專案，加快接入電網流程，再者重要零部件的維護狀況比預期的良好，無需額外的作業，目前星座能源已訂購了重啟所需的重要零部件，包括主變壓器與核燃料，並已恢復電廠運作需要的供水系統，以及基礎設備的檢查，廠址現已有 400 名員工進駐，其中 30 人具有控制室工作資格，且正積極培訓更多專業人員中[2-40]。

(13) CAMP Spring meeting 2025 [2-41]

隨著小型輕水式模組化反應爐 (LWSMRs) 的預期部署及其隨之而來的許可需求，如何應用分析研究程式(RELAP5, TRACE, MELCOR 等) 對 LWSMRs 設計進行適用性評估，以提高電廠的固有安全性有其必要性，因此美國 NRC 原先為傳統核電廠舉行的國際熱水流合作會議 CAMP 上，也在本年度議程中增加不少篇幅來討論關於 SMR 設計與安全模擬分析的議題，出發點是因為 SMR 在設計上主打利用冷凝導熱和自然循環的被動安全系統實現長期冷卻，與過往的強制冷卻類型不同，尤其是硼濃度的變化，如圖 3-21；另也有多個國外單位開始應用傳統電廠使用的安全分析程式應用到 SMR 上，以滿足在嚴重事故 (SA) 和應急計劃區(EPZ)許可分析方面的需求，例如德國 KIT 以 TRACE 建立 NuScale 模式，模擬 MSLB 事故後餘熱移除系統的運作情況，探討何種方式能更有效的模擬自然對流，如圖 3-22，還有以 RELAP5 程式建立鉛冷快中子 LFR 分析模式，如圖 3-23，強調鉛的低中子慢化作用與高沸點低分壓優勢，並假設案例所有主冷泵斷電失效後的情況，即便是在最嚴苛的無法停機狀況，自然循環散熱的能力依然能使電廠保有足夠的安全餘裕。

(14) 台廠有望打入美國先進核能供應鏈

小型模組化反應器 SMR 與微型反應器 MMR 近年受到國際社會

極大的關注，相較於 SMR 單機 300MW 的發電量，微型反應器的功率約在 10 至 20MW 之間，成本更低、體積更小、所佔用的土地資源也更少，特別適合偏遠地區、軍事基地等，目前有 eVinci 及 Radiant 2 款機型已進入測試階段，若順利通過預計將能在 2030 年商轉，清大原子科學院的「小型模組化反應器」(SMR) 研發小組也前往拜會西屋公司 eVinci 團隊，希望未來在校內建置一部 5MW 的 MMR 反應器，並交由台灣廠商協助施工安裝，以提升台廠的技術能力，此行也讓西屋公司對同行台灣廠商的製造認證能力展現高度興趣，因為該公司旗下第三代反應器 AP1000 得到川普政府的支持而受到市場端極大的需求，若日後與西屋公司洽談順利，甚至有機會推動台灣廠商，參考表 3-5，打入西屋供應鏈[2-42]。

表 3-1 ARC-100 預先審查項目

項目類別	說明	參考依據
技術設計簡介	反應爐類型、熱功率、冷卻系統配置、安全系統概述。	NRC SRP Chapter 4、5、6、7
設計及分析方法	熱流分析、核設計、事故分析、機械結構設計的方法與程式 (code validation)。	Regulatory Guide 1.203、NUREG/CR-7006
安全分析範圍	預定考慮的設計基準事故 (DBA)、超越設計基準事故 (BDBA)、及嚴重事故分析。	10 CFR 50 Appendix A & B
新技術議題討論	對於創新技術 (例如自然循環、被動安全系統、非輻射冷卻、液態金屬冷卻等) 與現行法規的一致性。	NRC Policy on Advanced Reactors
法規架構與授權策略	申請人選擇的途徑 (Part 50 或 Part 52)，以及是否擬採用新的規範 (如 Part 53)。	10 CFR Part 50 / 52 / 53
研發與測試計畫	驗證設計分析的實驗資料與測試計畫，確保模型與假設可驗證。	RG 1.203、NUREG-0800 Chapter 15
品質保證 QA 與組織準備	申請人 QA 項目的建立狀態。	10 CFR 50 Appendix B
環境議題初步討論	預期需準備的環境影響報告範圍 (Environmental Report, ER)。	10 CFR 51
申請文件架構	FSAR、PSAR、或 DCA 章節編排與格式。	RG 1.206 附錄 A
審查時程與溝通程序	規劃會議、技術工作坊、資訊交換頻率。	NRC-Applicant Protocols
●參考 NUREG-0800、RG1.206 與 NEI 程序		

表 3-2 ARC-100 提交預先審查項目

類別	項目
白皮書	非安全系統的監管處理分類 RTNSS Classification
白皮書	主反應器容器中用過燃料儲存(安全、安保與保障優勢)
白皮書	FOAK 新創燃料設計資格程序確認
技術報告	變頻驅動器和主水泵安全停機程序
技術報告	以功率反應度衰退預測爐心潛在異常和形變
技術報告	圍阻體機能檢測
白皮書	第二套停機系統
技術報告	安全評估和反應器保護系統簡化
技術報告	流動阻塞後果評估
技術報告	減震器安裝評估
技術報告	以 200 MWe 平穩運行
技術報告	研究與發展計劃

表 3-3 預先審查實際案例

廠家	反應器類型	補充說明
Kairos Power	Hermes (FHR)	已獲得 Construction Permit。
NuScale	iPWR	已獲得 pre-application / early engagement。
Oklo	Aurora (MMR)	2020 年因資料不完整遭拒審查，2025 年補充後已通過預審。
TerraPower	鈉冷快中子	審查進度由 26 個月縮短至 19 個月，包括建設許可 CPA。
X-energy	高溫氣冷	已獲得 pre-application / early engagement，耗時 18 個月。

表 3-4 NuScale SMR 事故劑量標準

Accident or Case	EAB & LPZ	Analysis Release Duration
Loss-of-coolant accident (LOCA)	25 rem TED	30 days for all leakage path
Small line break accident	2.5 rem TEDE	Unaffected SG(s): until cold shutdown is established
Steam generator tube rupture Fuel damage or pre-incident spike Coincident iodine spike	25 rem TEDE 2.5 rem TEDE	Affected SG: time to isolate;
Main steam line break Fuel damage or pre-incident spike Coincident iodine spike	25 rem TEDE 2.5 rem TEDE	Until cold shutdown is established
Rod ejection accident	6.3 rem TEDE	30 days for containment leakage pathway; until cold shutdown is established for secondary pathway
Fuel handling accident or cask drop	6.3 rem TEDE	2 hours

表 3-5 有望加入美核電供應鏈廠商

廠家名稱	業務範圍
華新麗華	不鏽鋼、電線電纜等
銘榮元	大型壓力容器
良聯工業	重機設備製作與安裝
盈聯通科技	無刷直流馬達變頻驅動控制板設計



圖 3-8 燭龍一號工程樣機[2-23]

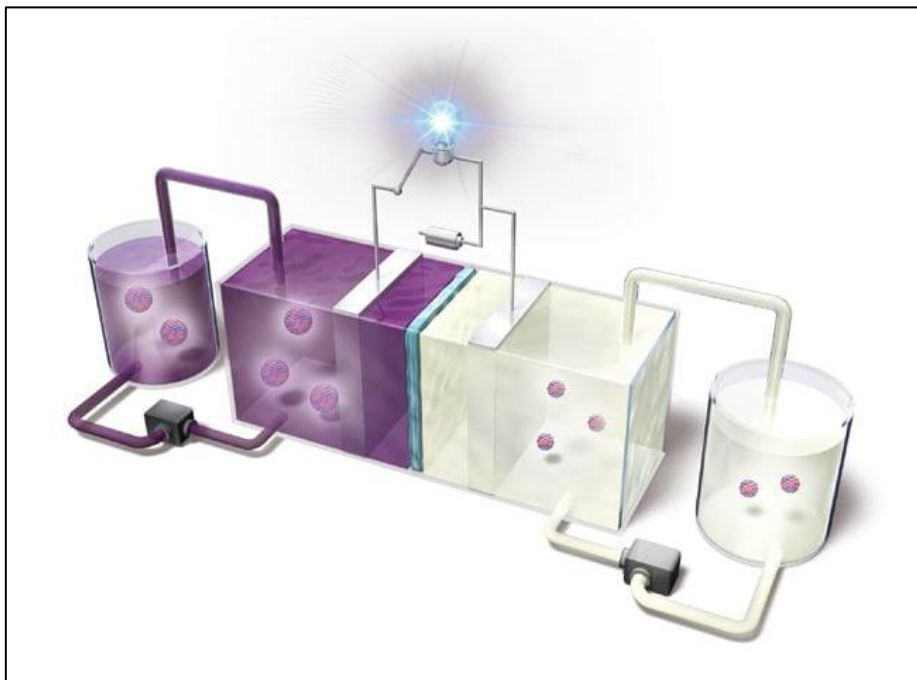


圖 3-9 銻化鈷電池示意圖[2-24]

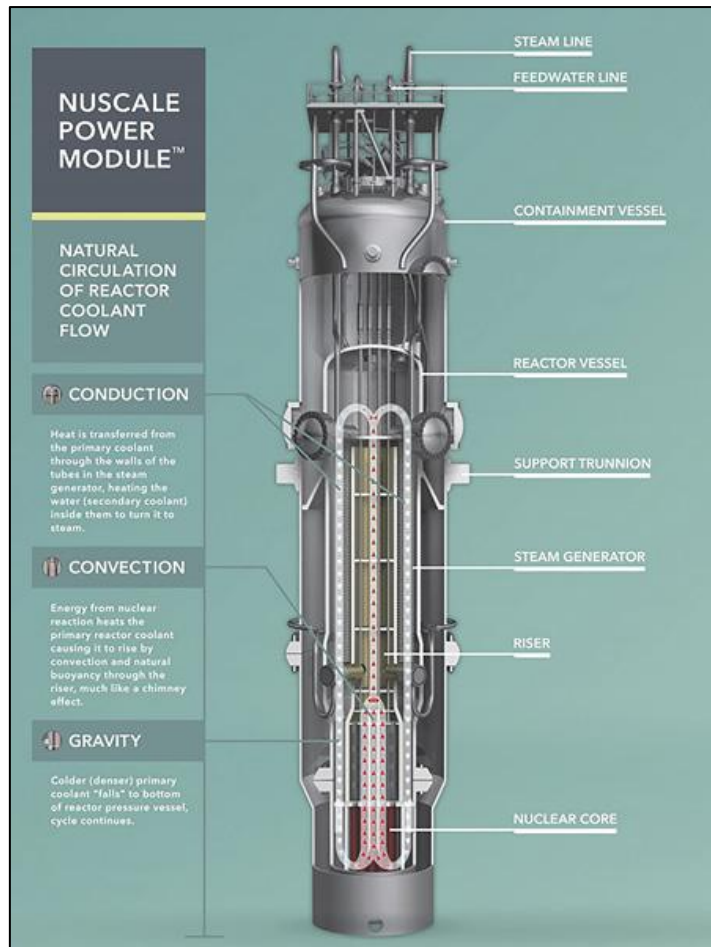


圖 3-12 NuScale 小型模組化反應器的剖面圖[2-28]

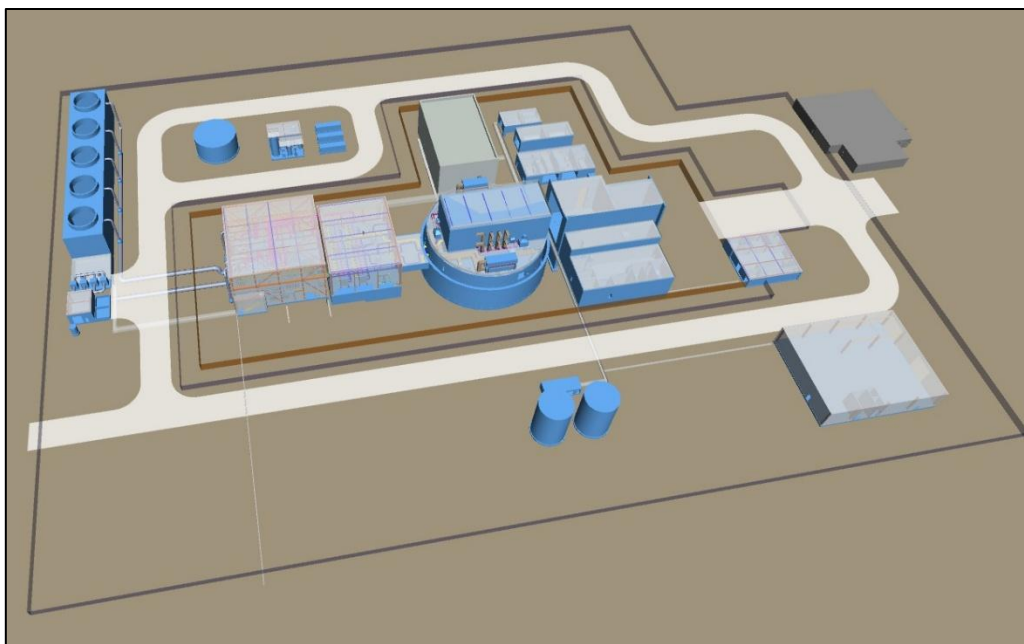


圖 3-13 ARC-100 示意圖[2-29]

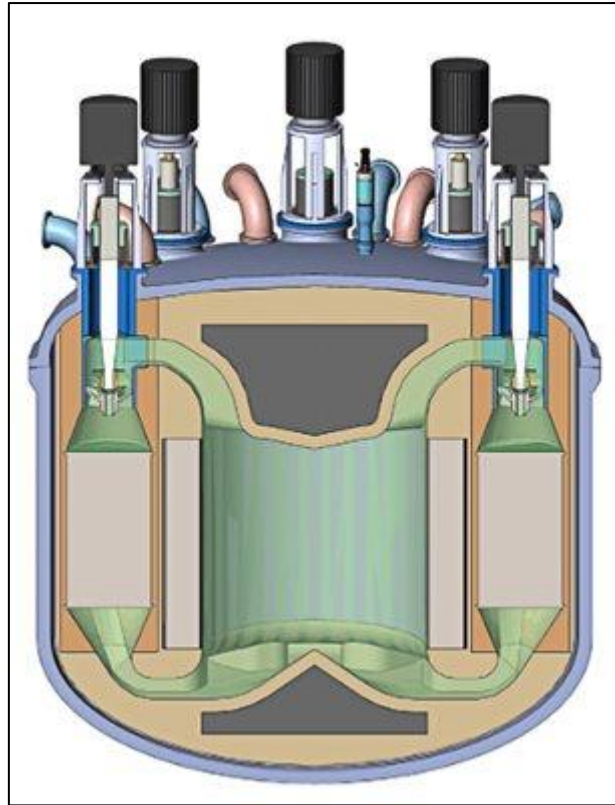


圖 3-14 泰拉能源熔融氯化物快中子反應器 Molten Chloride Fast Reactor (MCFR) 示意圖[2-30]

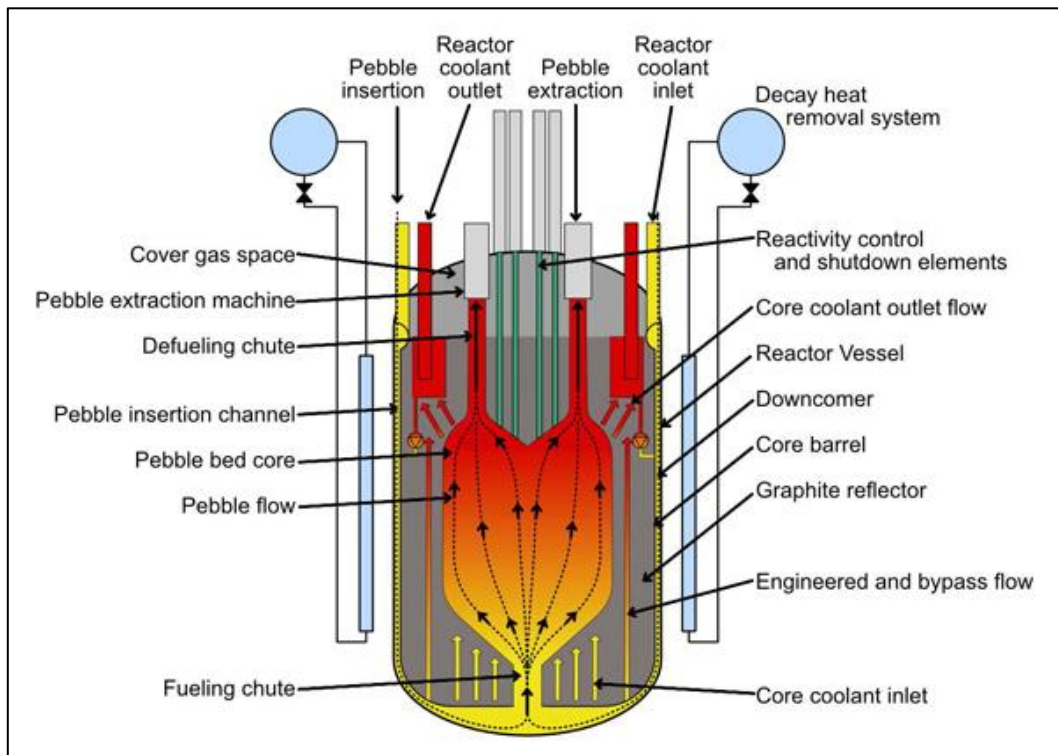


圖 3-15 Kairos 氟化鹽反應器 Fluoride Salt-Cooled High Temperature Reactor (FHR) 示意圖[2-31]



圖 3-16 整體式熔鹽反應器 Integral Molten Salt Reactor (IMSR)示意圖[2-33]

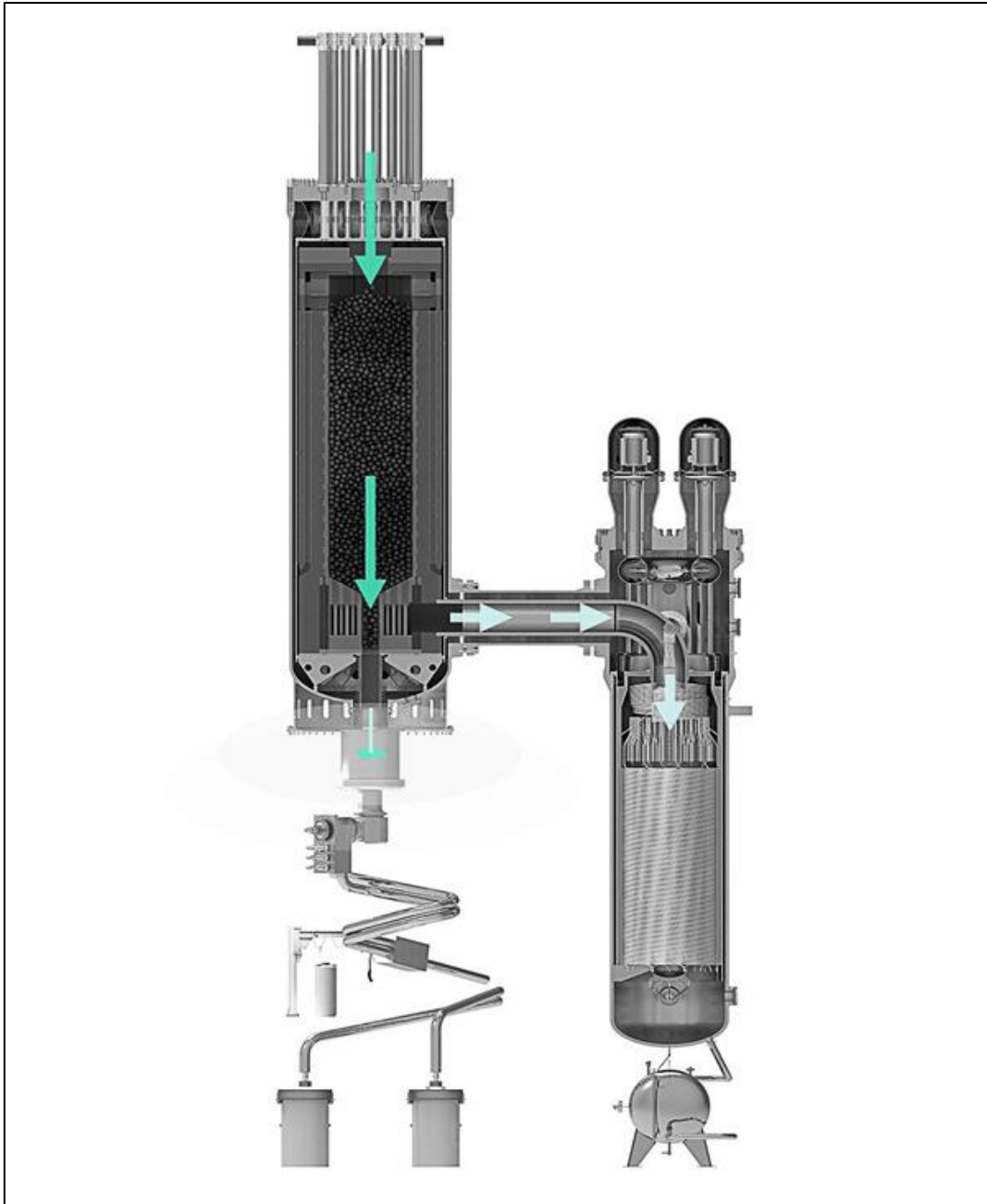


圖 3-17X Energy 公司 Xe-100 示意圖[2-34]

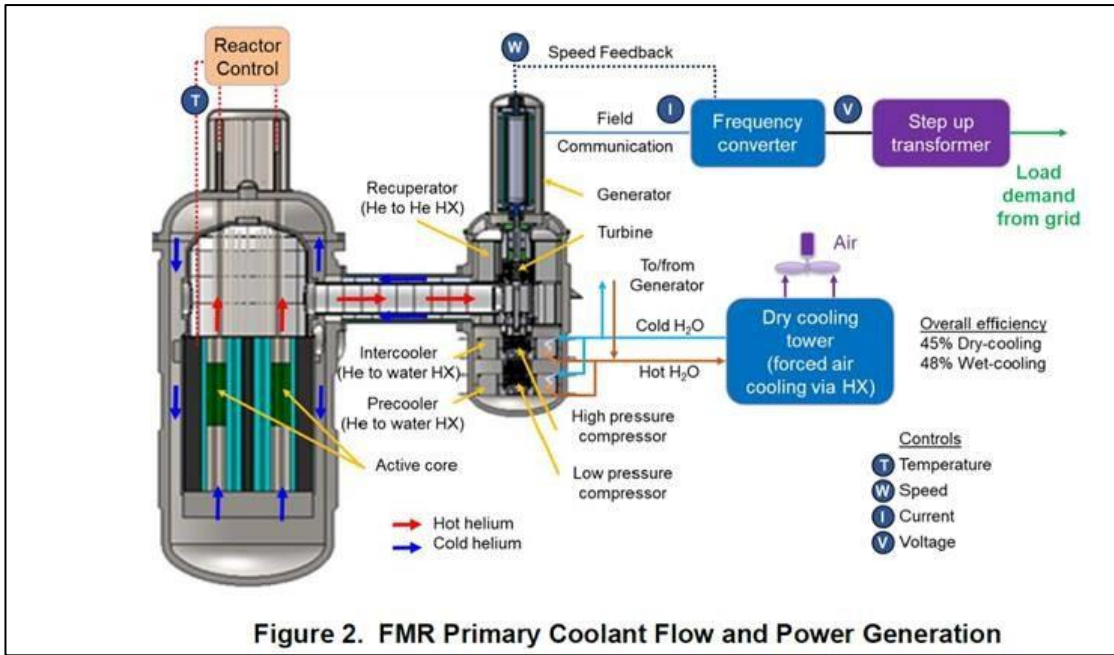


圖 3-18 通用原子公司快速模組化反應器 Fast Modular Reactor 示意圖[2-35]

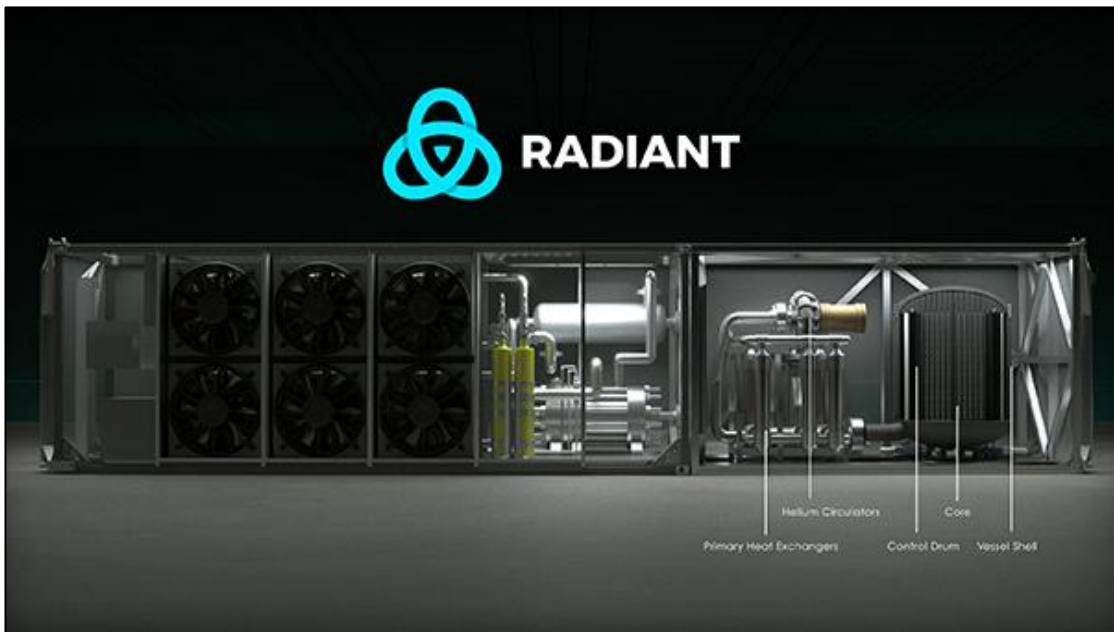


圖 3-19 Radiant 公司微型反應器 Kaleidos [2-36]



圖 3-20 伊利諾大學 HTGR 反應器示意圖[2-37]


Overview

- Thermal-Hydraulics Knowledge Gaps for Light Water Small Modular Reactors (SMRs)
- SMR designs achieve long-term cooling using passive safety systems that rely on condensation heat transfer and natural circulation
- Containment/Reactor Coolant System coupling and long-term fluid transport are important aspects of SMR safety

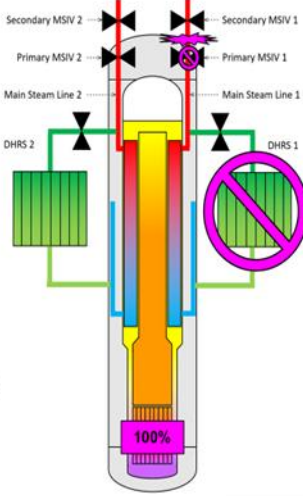
May 14, 2025 CAMP Spring 2025 2 U.S. NRC
United States Nuclear Regulatory Commission
Protecting People and the Environment

圖 3-21 Spring CAMP meeting 2025 NRC [2-41]

NuScale Main Steam Line Break Description



- Double Ended Guillotine Break (DEGB) in the Main Steam Line 1 (MSL1).
- Hot Full Power (HFP) initial conditions.
- Failure of the primary Main Steam Isolation Valve 1 (MSIV).
- Decay Heat Removal System (DHRS) train 1 does not connect.



5
Spring 2025 CAMP Meeting, May 13th-15th
A. Campos-Muñoz / INR-RPD

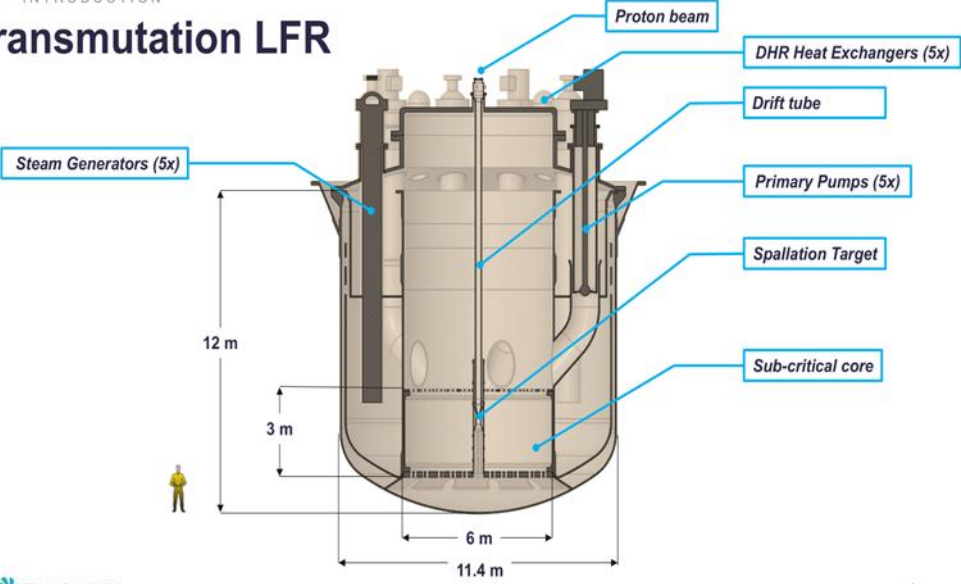
圖 3-22 Spring CAMP meeting 2025 KIT [2-41]

INTRODUCTION
Proton beam

Transmutation LFR

Steam Generators (5x)

DHR Heat Exchangers (5x)



TRANSMUTEX
Transmutex (C) Confidential
4

圖 3-23 Spring CAMP meeting 2025 LFR [2-41]

第四章 討論

(一) 討論

1. 本年度計畫執行時間較 113 年略晚，惟仍積極廣泛蒐集相關資料。為不影響整體工作推動，已先於上半年完成四場技術領域座談會，以利後續進行大量資料之彙整與分析。
2. 關於國內各產業發展現況之盤點，如前所述，本計畫涵蓋之領域範疇廣泛，且與其他技術或產業領域之界定存在重疊情形；此外，就「原子能民生應用技術」之實際使用程度亦難以明確界定。因此，相關內容仍需借助各領域專家學者之專業意見，進一步釐清範疇與定位。
3. 於盤點各領域原子能民生應用技術之產值時，部分市場規模亦存在著估算困難之處。例如非破壞檢測技術方式多元，輻射檢測僅為其中之一，若單獨估算輻射相關部分之市場貢獻，易產生偏差，較難精準反映其實際經濟效益。後續仍需依據更明確之技術使用比例、產業鏈角色及應用深度進行細部分析。
4. 在過去一年多之計畫執行過程中，曾於 113 年針對原子能民生應用技術領域進行增修、整併，並最終訂定為七大領域。然而，本年度於規劃與辦理四場座談會時，在安排性質相近領域合併討論之過程中，以及在 113 年進行 MF 與委託計畫之領域歸屬時，皆曾面臨分類界定上的困難。例如，經與專家學者討論後研判，人工智慧較類似於核子技術本身，相屬可跨領域之通用技術或工具。而太空科技領域中的抗輻射晶片，亦可能更適合歸納至半導體製程相關領域。上述領域界定與分類仍有待進一步釐清。
5. 因應國家發展、產業轉型及社會需求，對於建立我國原子能科技施政決策支援體系提出政策建議與修訂。本年度已完成「民國 115 至 118 年原子能科技民生應用發展的策略藍圖」之草擬，供核安會卓參。
6. 原子能民生應用技術涵蓋範圍廣泛，然而國內相關技術能量與設備資源尚未形成完整整合體系，導致研究能量分散、資源重複投入，亦使許多研發或產業機構無法即時掌握可使用之國內設備與技術。例如，部分單位因未得知國內已有可支援之輻照設施、核分析儀器或輻射檢測與量測平台，而轉以高成本向國外租借設備或尋求技術協助，造成時間成本、經費成本與自主研發能

量之流失。因此，建置「原子能科技發展策略及決策支援平台」，並推動跨部會、跨研究機構與產業鏈之資源共享與合作機制，已屬刻不容緩。

7. 已初步完成建置「原子能科技發展策略及決策支援平台」架構，建置後應可具備各項功能：(1)盤點並公開國內現有輻照設施、核分析與輻射量測設備、育種與材料改質平台等資源；(2)提供設備使用、共享、維運與技術人員支援資訊；(3)建立跨機構合作媒合與研究需求對接模式，提升技術應用效率與研究效益；(4)提供作為推動國內原子能民生應用技術策略布局與產業鏈強化之決策之參考工具；(5)增加一般民眾對原子能科技的認知。透過上述整合與平台建置，不僅促進資源有效利用，更能強化研發能量連結，並提升我國原子能技術在民生應用領域之整體競爭力。

(二) 後續工作規劃

1. 原子能科技民生應用趨勢研析
 - (1) 本年度共蒐集 143 篇相關資訊，內容涵蓋各技術領域及多個國家與國際組織，整體分布相對均衡。惟在前瞻科技面向仍有加強空間，後續將持續擴充包括高能雷射應用、太空科技與量子科技部分，並分析各國或國際組織的相關政策動向，以及國際合作管道等資料來源。同時，也將針對具策略性的新興技術及跨領域整合趨勢進行更深入追蹤與分析，以作為未來推動原子能民生應用與前瞻技術布局之參考依據。
 - (2) 對於所舉辦的原子能民生應用各技術領域之 TSO 專家座談會，若有必要時，將特別向專家學者請益，以了解此方面技術領域未來之發展建議。
 - (3) 為使「原子能科技發展策略及決策支援平台」建置內容更為完整，本年度已透過座談會與多次專家諮詢，蒐集各領域對平台功能架構之需求與建議。未來平台規劃除了著重技術資料之盤點外，亦須審閱資訊正確性、更新機制與協助使用端(如醫療、農業、環境監測、材料製程等業界或學研單位)與供應端(設備/技術人才)有聯繫對接的平台，以確保資源整合能切實發揮效益。

2. 次世代核能技術研析及發展策略研析

(1) 繼續執行各國家次世代核能技術管制資訊蒐集與研析

(2) 對於次世代核能技術發展與相關國際計畫，繼續尋找與各國合作之可能管道，包括各研討會成果發表論文摘要等等進行蒐集、整理與研析，由於 SMR 的發展已超過 80 種類型，其設計與能力各不相同，成本差異巨大，因此下期將重點關注於技術需求、法規研改與可行性評估，特別是建造成本管控的議題。

第五章 結論

1. 原子能科技民生應用趨勢研析

本年度以 113 年度計畫為基礎，持續對 IAEA、歐盟、美國、日本、韓國與中國，依照七大領域進行資訊蒐集與研析，共整理出 143 篇重點資訊並彙編成冊(請參閱附本：「2025 年國際原子能科技民生應用研究國際資訊彙編」)，將做為未來決策系統的原子能民生應用知識集。

有關建立我國原子能科技施政決策支援體系提出政策建議與修訂，已完成「民國 115 至 118 年原子能科技民生應用發展的策略藍圖」之初步規劃(請參閱附本：「原子能科技民生應用發展策略藍圖(115 年至 118 年)」)。此策略藍圖的擬定，不僅盤點近年來國內原子能科研相關機構發展與計畫成果，也匯集相關領域的專家學者與業界代表之建議。後續工作仍將持續進行研析，並向專家學者及業界代表請益，透過深入訪談，滾動式修正當前我國原子能科技民生應用的策略。

114 年度計畫已完成「原子能科技發展策略及決策支援平台」初步規劃方向，2026 年將建置平台，匯集各領域資訊與臺灣相關研究，更重要的是統整研究資源，強化臺灣的研發能量。

2. 次世代核能技術研析及發展策略研析

在次世代核電技術發展方面，本研究期中報告蒐集國際小型模組化反應器(SMR)及核融合等次世代核電技術發展現況，2023 年國際能源總署 IEA 統計，全球太陽能發電佔比 5.5%，風力發電佔比 7.8%；而台灣在過去 8 年大力發展再生能源，在特定時段已能供應 23% 的電力需求。可是考量陰雨天與夜間等無法發電的因素，全年度的佔比分別是太陽能 4.6% 與風力 2.2%，要達到政府現行推動 RE30 要求的低碳電力還有一段差距。儘管綠能有資源再生與排碳量低的優點，但間歇性條件使其無法成為基載能源是一大硬傷，儲能是一種解方，可是要考慮到電池充放時的耗損與額外的設備建置成本、因而或許思考應用不受天候因素影響的核電，穩定地來協助彌補調度上的困難，來避免必須過度依賴價格極易受到國際情勢影響而波動的天然氣發電能源結構。

目前的再生能源發電成本在售賣價格上仍然遠高於核能與化石燃料，對比核

能發電的土地占用面積也較多，相對上威脅自然生態的程度也較高，核電在使用過程也不排碳，價格上又比容易受到國際因素影響的天然氣實惠，一次燃料更換便能運行 18 個月，有助於台灣加強能源韌性與達成淨零減碳的目標，因此，儘管核電在台灣仍有所爭議，但站在能源多樣化的立場上應該要慎重考慮繼續(延役)或積極引進發展次世代核能技術，不應偏廢哪一種能源供應方式。依據台電公司統計資料顯示，台灣夏季用電量在夜間時，仍會高達尖峰時的 60%~70%；這是經濟蓬勃發展必然的象徵，可是此時的綠能卻可能因為天候因素無法持續穩定的提供電力，勢必又得走回火力全開的道路上。[2-43][2-44]

從 IAEA 2024 年出版的發展報告來看，SMR 已有超過 80 種以上的形式，包含陸基水冷型、艦載型、高溫氣冷型、液態金屬冷卻型、熔鹽冷卻型與微型反應器等，另有其他因應特殊需求的款式，如製氫、供暖和特殊研究用，但多數都仍在開發設計階段；因此，在資料中心、人工智慧、加密貨幣與晶圓產業的需求不斷增加下，許多國家或組織不得已只能持續使用高碳排的火力發電來穩定電力供應，像是 Open AI、Google、Microsoft 等大廠的溫室氣體排放量都節節高升，而台積電 5 奈米新廠的 72 萬瓩耗電量，甚至比整個東台灣 50 萬瓩還要多出不少；在 2050 淨零碳排的壓力下，投資 SMR 或重新啟用既有核電廠來擴充低碳能源佔比便成為顯學，其中不乏原先反核或原本沒有發展核電的國家地區，如義大利、英國，以及東協國家的印尼、菲律賓、越南等。

國際合作方面，我國過去使用的核電技術都源自於美國，不論是核一、核二的沸水式或核三的壓水式，但在 SMR 的國際發展情況美國未必是絕對領先的一方，考量國情與地緣關係，或許可以多關注韓國的核電發展狀況，該國已從由美國技術輸入轉變為能夠以國產技術輸出的國家，更得到了中東國家的電廠訂單，也擁有研發次世代反應器的能力，值得我方借鑑甚至是共同合作。至於美國方面因為能源需求與政策導向，核電產業發展有積極復甦的跡象，包括舊電廠延役、退役電廠重啟等，急需大量人才與供應商，如清大團隊便成功與西屋公司團隊接觸，若政府能協助推動本土產業加入美國核電供應鏈，相信對經濟、人才教育或研發設計等層面都能有所助益。

我國擁有核一、核二及核三廠 40 年以上的傳統核電廠運營經驗，建廠成本

早已攤提完畢，無論是延役或再重啟現有機組相對是最經濟實惠的方式，這也是台電少數能實現獲利的發電方式之一；其次是挑選合適的 SMR 類型，學習曲線不必推倒重來，對現行法規略作調整修改即可適應，例如沸水式的 BWRX-300 與壓水式 AP300 等，與台電公司曾經操作使用過的電廠原理相似，且高度集成自動化和安全性提升，相信實務上並沒有太大的技術難題存在。不過核三廠二號機將已於 2025 年 5 月 17 日停機除役，邁入非核家園後；若政府沒有其他積極作為，未來的核工產業人必然會逐漸稀缺，將不利於國內原子能技術的持續發展，即便未來不再使用核電，電廠除役與高階放射性廢棄物的去化仍需要專業人員處理，因此，建議政府保留足夠的科研計畫，維持人才培育以備日後所需。

雖然我國目前沒有商業運轉中的 SMR 機組，核管法規也都是為大型傳統機組所制定，未來若打算引進次世代機組，可以參考美國 NRC 的預先審查制度，尤其是表 3-1 所提前三項目，分別是設計簡介、分析方法與安全分析，先行規劃出一套可行的規則草案，讓台電或其他未來有意願投入的廠商評估能夠引進的機組，待未來國際上有 SMR 機組正式開始商轉後，便可加快引進審查的流程與步驟，減少曠日費時的公文往返。

參考文獻

一、原子能科技民生應用趨勢研析

1. 核安會，”111 至 114 年原子能科技民生應用發展的策略藍圖”，院臺科字第 1110003185 號備查，行政院，111 年 4 月 7 日
2. 1.1.1 回收放射源用於癌症治療：國際原子能總署倡議持續推動
<https://www.iaea.org/newscenter/news/recycling-radioactive-sources-for-cancer-care-iaea-initiative-continues-to-deliver>
3. 1.1.2 IAEA 制定高劑量率近接放射治療劑量學審核方法
<https://www.iaea.org/newscenter/news/iaea-develops-brachytherapy-dosimetry-audit-methodology>
4. 1.1.3 國家標準與技術研究所制定銨-225 放射性抗癌藥物劑量標準
<https://www.nist.gov/news-events/news/2025/06/new-nist-standard-helps-deliver-right-dosage-cancer-fighting-drugs>
5. 1.1.4 測量 DNA 損傷以提升癌症治療與輻射緊急應變能力
<https://www.nist.gov/news-events/news/2025/08/new-technique-measuring-dna-damage-could-improve-cancer-therapy-and>
6. 1.1.5 歐盟游離輻射於放射治療之調查報告
Analysis on workforce availability, education and training needs for the quality and safety of medical applications involving ionising radiation in the EU Status and recommendations. EU Commission, 2025.1. P215-217.
7. 1.1.6 歐洲質子治療統計分析
<https://www.cognitivemarketresearch.com/proton-therapy-systems-market-report>
8. 1.1.7 英國資助計畫擴大放射性廢棄物用於放射治療
<https://www.world-nuclear-news.org/articles/funding-aims-to-scale-up-medical-use-of-uk-nuclear-waste>
9. 1.1.8 利用輻射誘導水分子化學變化以探索最新的癌症治療方法
<https://www.qst.go.jp/site/press/20250424.html>

10. 1.1.9 日本粒子治療的醫療機構分布
令和 6 年度版原子力白書第 200-201 頁
11. 1.1.10 揭示輻射誘發的 DNA 突變以提高放射治療的安全性
<https://m.dongascience.com/news.php?idx=63787>
12. 1.1.11 韓國臨床研究證實低劑量放射治療阿茲海默症的潛力
[https://www.koreaittimes.com/news/articleView.html?idxno=143999#:~:text=Korea%20Hydro%20&%20Nuclear%20Power%20\(KHNP\)%20announced,and%20largest%20clinical%20trial%20applying%20radiation%20therapy%2C](https://www.koreaittimes.com/news/articleView.html?idxno=143999#:~:text=Korea%20Hydro%20&%20Nuclear%20Power%20(KHNP)%20announced,and%20largest%20clinical%20trial%20applying%20radiation%20therapy%2C)
13. 1.1.12 中國放射治療產業鏈與市場發展前景分析
<https://www.chyxx.com/industry/1214061.html>
14. 1.1.13 中國首台硼中子捕獲治療設備完成臨床首例治療
<https://www.ccnta.cn/article/21626.html>
15. 1.2.1 IAEA 舉辦首場區域性診療合一(Theranostics)培訓
<https://www.iaea.org/newscenter/news/iaea-conducts-first-regional-training-on-personalized-cancer-management-tool-theranostics>
16. 1.2.2 IAEA 發布「透視導引介入性手術品質保證和優化指南」
<https://www.iaea.org/newscenter/news/new-iaea-safety-guide-for-x-ray-guided-intervention-technique>
17. 1.2.3 美國核子醫學市場預測(2025-2034)
https://www.gminsights.com/industry-analysis/us-nuclear-medicine-market?utm_source
18. 1.2.4 FDA 擴大鎰-177 的適應症
https://www.fda.gov/drugs/resources-information-approved-drugs/fda-expands-pluvictos-metastatic-castration-resistant-prostate-cancer-indication?utm_source=
19. 1.2.5 歐盟游離輻射於醫學影像之調查報告
Analysis on workforce availability, education and training needs for the quality and safety of medical applications involving ionising radiation in the EU Status and recommendations. EU Commission, 2025.1. P209-215.

20. 1.2.6 心臟透視檢查及介入治療與放射治療對兒童的健康影響
<https://harmonicproject.eu/>
21. 1.2.7 日本核子醫學市場規模及展望
https://www.grandviewresearch.com/horizon/outlook/nuclear-medicine-market/japan?utm_source
22. 1.2.8 日本電腦斷層掃描市場報告
https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/japan-computed-tomography-ct-market?utm_source=
23. 1.2.9 韓國推動醫用同位素國產化
<https://biz.chosun.com/en/en-science/2025/05/22/S7URZGXXJFDNJFYFNJWPVATOV4/>
24. 1.2.10 韓國擬定 2030 年放射性同位素全面自主化的策略
<https://m.dongascience.com/news.php?idx=68353>
25. 1.2.11 中國開發首台光子計數電腦斷層
https://www.cnr.cn/ln/zxst/20250830/t20250830_527346503.shtml
26. 1.2.12 中國核醫藥產業現況研究與發展前景預測報告(2025-2032 年)
<https://www.chinabaogao.com/detail/748073.html>
27. 2.1.1 以無人機探測天然加馬輻射並測量農業土壤狀況
<https://www.ans.org/news/2025-07-08/article-7176/drones-detect-natural-gamma-radiation-to-measure-agricultural-soil-health/>
28. 2.1.2 核子科學協助模里西斯培育抗病花椰菜新品種
https://www.iaea.org/newscenter/news/nuclear-science-delivers-disease-resistant-cauliflower-in-mauritius?utm_source=chatgpt.com
29. 2.1.3 利用 X 射線幫助控制玉米中的致癌毒素
Glesener H, Abdollahzadeh D, Muse C, Krajmalnik-Brown R, Weaver MA, Voth-Gaeddert LE. X-ray Irradiation Reduces Live *Aspergillus flavus* Viability but Not Aflatoxin B1 in Naturally Contaminated Maize. *Toxins*, 2024; 16 (8) : 329
30. 2.1.4 全球對輻照食品的認知與接受度比較分析

- <https://www.foodsafetynews.com/2025/09/review-reveals-growing-support-for-food-irradiation/>
31. 2.1.5 農業革命：核子科學如何提高奧地利作物產量與糧食安全
<https://farmonaut.com/europe/revolutionizing-agriculture-how-nuclear-science-boosts-crop-productivity-and-food-security-in-austria>
32. 2.1.6 2025 年至 2035 年食品輻照市場展望
<https://www.futuremarketinsights.com/reports/food-irradiation-market>
33. 2.1.7 輻射在植物育種、食品照射及害蟲防治中的應用
原子力白皮書，原子力委員會，令和 6 年，第 203-204 頁
34. 2.1.8 利用 X 射線電腦斷層掃描檢測水稻根系
<https://www.naro.go.jp/english/topics/laboratory/nics/171774.html>
35. 2.1.9 韓國開發首個國產「超級食品」蠶豆品種
<https://www.yna.co.kr/view/AKR20240806061300063>
36. 2.1.10 加馬輻照可提升杏鮑菇採後的品質
Kim, H. J., Lee, S. H., Park, J. Y., & Kwon, S. J. (2023). Effect of gamma irradiation on post-harvest quality of king oyster mushrooms (*Pleurotus eryngii*). *Food Science and Preservation*, 30(5), 729 – 742.
37. 2.1.11 中國首例湖北櫻花與野菊花太空育種試驗
<https://www.ccnta.cn/article/18556.html>
38. 2.1.12 太空育種啟航
<https://www.ccnta.cn/article/18753.html>
39. 2.2.1 氣候變遷的因應策略
<https://www.iaea.org/topics/climate-change>
40. 2.2.2 氣候變遷解決方案：國際原子能總署和 COP
<https://www.iaea.org/topics/climate-change/the-iaea-and-cop>
41. 2.2.3 核子技術對氣候變遷的解決方案
<https://www.iaea.org/newscenter/news/iaea-at-cop29-nuclear-solutions-for-climate-change>

42. 2.2.4 國際原子能總署第一個古巴沿海和海洋衛生合作中心
<https://www.iaea.org/newscenter/news/iaeas-first-cuban-collaborating-centre-for-coastal-and-marine-health>
43. 2.2.5 以無人機探測天然加馬輻射並測量農業土壤狀況
<https://www.ans.org/news/2025-07-08/article-7176/drones-detect-natural-gamma-radiation-to-measure-agricultural-soil-health/>
44. 2.2.6 以高壓漿料燒蝕技術進行新型鈾礦廢棄物修復
<https://www.ans.org/news/2025-10-07/article-7433/nrc-grants-disa-license-for-novel-environmental-remediation-tech/>
45. 2.2.7 哥白尼大氣監測服務升級增加全球覆蓋範圍
<https://atmosphere.copernicus.eu/cams-solar-radiation-service-upgrade-increases-global-coverage>
46. 2.2.8 輻射和熱處理可成功 100%分解特氟龍
<https://www.qst.go.jp/site/press/20250716.html>
47. 2.2.9 利用輻射誘發環保微生物菌株進行環保
<https://pubs.kist.re.kr/handle/201004/152009#:~:text=Bacillus%20velezensis%20MBLB0692%2C%20a%20laccase%20producing%20bacterium%2C%20was,that%20exhibited%20severe%20sensitivity%20under%2010%20mM%20copper.>
48. 2.2.10 電子束應用於水處理
<https://www.ccnta.cn/article/13862.html>
49. 3.1.1 透過宇宙射線中子感測技術提升納米比亞農業生產力
<https://www.iaea.org/zh/bulletin/chong-xin-si-kao-guan-gai>
50. 3.1.2 中子科學對美國工業的經濟價值
https://www.nist.gov/news-events/news/2024/09/new-report-highlights-economic-value-neutron-science-us-industry?utm_source=chatgpt.com
51. 3.1.3 歐盟串列加速器快中子源
<https://joint-research-centre.ec.europa.eu/calls-proposals/monnet-tandem->

accelerator-based-fast-neutron-source-eufrat-2025-1-rd-eufrat-monnet_en#description

52. 3.1.4 日本脈衝中子源達成世界最強運轉的里程碑
<https://j-parc.jp/c/en/press-release/2024/05/31001348.html>
53. 3.1.5 韓國 HANARO 冷中子研究設施 2024 年發展概況
Korea Atomic Energy Research Institute (KAERI), Update on Utilization of HANARO Neutron Scattering and Imaging Instruments in 2024. P13-14, March 2025.
54. 3.1.6 中國散裂中子源
<https://www.bhkaec.org.hk/a/129287-cht>
55. 3.2.1 離子束誘導材料時空結構演化
<https://www.iaea.org/ru/node/284375>
56. 3.2.2 美國量子科學政策
National Quantum Initiative Supplement to The President' S Fy 2025 Budget. National Science & Technology Council December 2024, P6-7.
57. 3.2.3 歐盟的量子戰略與創新融資策略
https://www.notitiaplatform.com/posts/012_eu_wants_to_bridge_finance_gap_for_quantum_computi/
58. 3.2.4 日本量子束設施研究應用與發展
原子力白皮書，原子力委員會，令和 6 年，第 204-206 頁
59. 3.2.5 韓國立法奠定量子經濟發展基礎，邁向全球量子強國
<https://www.msit.go.kr/eng/bbs/view.do?sCode=eng&mId=4&mPid=2&pageIndex=9&bbsSeqNo=42&nttSeqNo=1053&searchOpt=ALL&searchTxt=>
60. 3.2.6 中國量子衛星佈局
<https://spacenews.com/china-to-launch-new-quantum-communications-satellites-in-2025/>
61. 4.1.1 核動力工作小組啟動新五年計畫(2024 – 2028)
United Nations Office for Outer Space Affairs (UNOOSA), A/AC.105/1338

Annex III & Appendix (2025).

62. 4.1.2 從核電廠到月球：美國啟動核能復興計畫
<https://natlawreview.com/article/power-plants-moon-us-nuclear-revival-2025>
63. 4.1.3 新太空核動力系統計畫
<https://world-nuclear-news.org/articles/x-energy-sister-company-contracted-for-in-space-nuclear-technology>
64. 4.1.4 歐洲太空總署研究概述 2035 年核動力推進計畫
<https://europeanspaceflight.com/esa-study-outlines-2035-launch-of-nuclear-propulsion-demonstrator/>
65. 4.1.5 中國開發太空核反應爐
<https://www.cnnpn.cn/article/35792.html>
66. 4.1.6 中國和俄羅斯計畫在月球上建造核電廠
https://www.reuters.com/business/energy/china-led-lunar-base-include-nuclear-power-plant-moons-surface-space-official-2025-04-23/?utm_source
67. 4.2.1 全球抗輻射電子市場快速成長
<https://www.einpresswire.com/article/719360441/global-radiation-hardened-electronics-market-report-2024-2034-booming-space-research-exploration-sector-driving-the-market-at-5-05-cagr-reaching>
68. 4.2.2 歐盟推動太空電子關鍵技術研發
<https://spacenews.com/the-european-unions-push-for-next-generation-space-electronics-and-critical-technologies/>
69. 4.2.3 歐洲抗輻射電子產品市場規模
<https://www.imarcgroup.com/radiation-hardened-electronics-market-europe>
70. 4.2.4 日本加速太空合格零件與抗輻射晶片研究
https://www.kenkai.jaxa.jp/eng/research/parts/parts.html?utm_source=
71. 4.2.5 韓國成功研發新型抗輻射半導體技術
<https://m.dongascience.com/news.php?idx=70390>
72. 4.2.6 中國首個國產高壓抗輻射碳化矽功率器件完成空間驗證

https://english.cas.cn/newsroom/cas_media/202501/t20250126_899365.shtml?utm_source

73. 4.3.1 輕量、柔性、抗輻射：太空用有機太陽能電池的新突破
Li Y, Kamaraj K, Silori Y, Zhao H, Arneson, C, Liu B, Ogilvie J, Forrest S.R.
Radiation hardness of organic photovoltaics. Joule 2025, 9, 101800.
74. 4.3.2 美國開發核子鑽石電池
<https://www.neimagazine.com/news/nusano-atomiq-partner-to-advance-nuclear-diamond-batteries/>
75. 4.3.3 英國成功研製壽命可達數千年的碳-14 鑽石電池
<https://www.gov.uk/government/news/diamonds-are-forever-world-first-carbon-14-diamond-battery-made>
76. 4.3.4 日本開發銻-241 核電池
https://sj.jst.go.jp/news/202505/n0521-01k.html?utm_source=
77. 4.3.5 韓國研發「鈣鈦礦」與「碳同位素」核電池
<https://scitechdaily.com/worlds-first-hybrid-betavoltaic-cell-promises-decades-of-power-without-charging/>
78. 4.3.6 中國量產硬幣大小、壽命長達 50 年的核電池
<https://unwire.hk/2025/04/05/nuclear-battery-breakthrough/fun-tech/>
79. 4.3.7 中國開發超長壽命碳-14 核電池「燭龍一號」
<https://min.news/tech/b186e5a481ffa266bbe33e3b79fceed4.html>
80. 5.1.1 減少、再利用、輻照：IAEA 推動亞太地區塑料回收新模式
https://www.iaea.org/newscenter/news/reduce-reuse-irradiate-iaea-supports-partnerships-in-asia-and-the-pacific-to-recycle-plastic-waste?utm_source=
81. 5.1.2 可移動電子束系統
https://www.iaea.org/about/radioisotope-products-and-radiation-technology-section/transportable-electron-beam-system?utm_source=
82. 5.1.3 低能量電子束
<https://www.tetralaval.com/>

83. 5.1.4 歐洲電子束市場分析
https://www.intelmarketresearch.com/electron-beam-accelerators-2025-2032-879-988?utm_source
84. 5.1.5 歐洲加馬輻照市場分析
<https://www.linkedin.com/pulse/europe-gamma-irradiation-market-size-trends-forecast-drmdf/>
85. 5.1.6 移動式加馬輻照系統用於環境輻射監測
https://jrpr.org/journal/view.php?number=1176&utm_source
86. 5.1.7 韓國先進輻射技術研究所加入國際輻照協會
https://iiaglobal.com/iaa-news/kaeri-joins-iaa/?utm_source
87. 5.1.8 中國向孟加拉國提供輻照設備
<https://www.ccnta.cn/article/17197.html>
88. 5.1.9 新的輻照技術有效延長冬棗保鮮期
<https://www.ccnta.cn/article/13326.html>
89. 5.1.10 中國推出首款國產電子束蝕刻機「羲之」
<https://finance.technews.tw/2025/08/16/china-first-e-beam-lithography-machine/>
90. 5.2.1 IAEA 與 FAO 推動食品與植物檢疫輻照技術
<https://www.iaea.org/newscenter/news/latest-developments-in-food-irradiation-help-to-make-food-safer-and-easier-to-trade-worldwide#:~:text=The%20IAEA%20and%20the%20FAO%20aim%20to,adapt%20to%20the%20challenges%20of%20climate%20change.>
91. 5.2.2 電子束、X 射線與 γ 射線：2025 年及以後的滅菌趨勢
https://nextbeam.com/irradiation-illuminated/e-beam-x-ray-and-gamma-sterilization-trends-in-2024-beyond/?utm_source
92. 5.2.3 歐洲輻照滅菌服務市場分析
<https://www.grandviewresearch.com/horizon/outlook/irradiation-sterilization-services-market/europe>

93. 5.2.4 加馬射線照射對纖維素奈米纖維的影響
Ogura I, Moriyama A, Iizumi Y, Endoh S, Fujita K, Horie M et al. Effect of gamma irradiation on cellulose nanofibers. *Journal of Wood Science* (2025) 71:37
94. 5.2.5 韓國滅菌技術市場概況
https://www.marketresearchfuture.com/reports/south-korea-sterilization-technologies-market-49389?utm_source
95. 5.2.6 元化醫學攜手中廣核推動冰凍自體顱骨照射滅菌
<https://www.ccnta.cn/article/18738.html>
96. 5.3.1 增強核分析技術以滿足法醫學的需求
<https://www.iaea.org/ru/node/285965>
97. 5.3.2 利用水的穩定同位素推斷溪流水源來自高海拔積雪
https://hess.copernicus.org/articles/28/1711/2024/?utm_source
98. 5.3.3 短壽命天然放射性核種可作為水文地質研究中的示蹤劑
<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/38342445/>
99. 5.3.4 日本西南部岡山縣與鳥取縣鋰、鋇同位素水文地球化學研究
https://progearthplanetsci.springeropen.com/articles/10.1186/s40645-024-00679-y?utm_source
100. 5.3.5 韓國裂隙花崗岩基岩含水層水文地球化學研究
<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/40304809/>
101. 5.3.6 低濃度微量甲烷富集純化及石墨化製備裝置研究(用於碳定年)
<https://www.ccnta.cn/article/18614.html>
102. 5.3.7 透過同位素定年證實地球生命可能比已知更早
<https://www.ccnta.cn/article/9727.html>
103. 5.4.1 非破壞性檢測-從災難復原到拯救文化遺產
<https://www.iaea.org/newscenter/news/from-disaster-recovery-to-saving-cultural-heritage-iaea-boosts-assistance-to-countries-in-non-destructive-testing>
104. 5.4.2 2025-2033 年美國非破壞性放射照相設備發展
<https://www.datainsightsmarket.com/reports/non-destructive-testing->

[radiography-equipment-55557?utm_source=chatgpt.com#summary](https://www.onestopndt.com/ndt-articles/innovations-in-radiographic-testing?utm_source=chatgpt.com#summary)

105. 5.4.3 放射線照相檢測的未來發展前景

https://www.onestopndt.com/ndt-articles/innovations-in-radiographic-testing?utm_source

106. 5.4.4 透過工業用電腦斷層掃描增強自動化製造的模組運算

https://www.fujipress.jp/main/wp-content/themes/Fujipress/pdf_subscribed.php

107. 5.4.5 數位 X 射線照相檢測在國防非破壞性檢測的應用

https://www.kci.go.kr/kciportal/ci/sereArticleSearch/ciSereArtiView.kci?sereArticleSearchBean.artiId=ART003018776&utm_source

108. 5.4.6 工業非破壞性檢測技術—揭示材料內部的「火眼金睛」

<https://www.ccnta.cn/article/20278.html>

109. 5.5.1 IAEA 推動輻射技術在保健、工業和環境方面的應用

國際原子能總署 2024—2025 年計畫和預算，2023 年 7 月，第 107-108 頁

110. 5.5.2 IAEA 第 3 屆輻射應用會議：從飛機和塑膠到氣候變遷和文化

<https://www.iaea.org/newscenter/news/conference-on-radiation-applications-from-planes-and-plastics-to-climate-change-and-culture>

111. 5.5.3 多通道中子與加馬影像探測技術

<https://arxiv.org/pdf/2503.09862>

112. 5.5.4 新開發的導熱材料有望在未來的加速器和工業中使用

<https://ifast-project.eu/news/news/horizon-2020/newly-developed-thermal-conducting-material-holds-promise-use-future>

113. 5.5.5 日本放射性同位素的製造方式與應用現況

原子力白皮書，原子力委員會，令和 6 年度，第 194-195 頁

114. 5.5.6 適當加馬射線劑量率在文物保護處理的應用

https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=5344524&utm_source

115. 5.5.7 中核秦同首批碳-14 成功試生產

<https://www.ccnta.cn/article/18766.html>

116. IAEA 發布離子對物質的電子阻擋本領資料庫

- https://www.nds.iaea.org/stopping/?utm_source
117. 多種單離子佈植機設備開啟量子技術新時代
<https://gtr.ukri.org/projects?ref=EP%2FN015215%2F1>
118. 6.1.3 離子佈植技術完成「金紅石結構二氧化鋯(r-GeO2)」n型導電性
https://monoist.itmedia.co.jp/mn/articles/2508/05/news026.html?utm_source
119. 6.1.4 韓國開發離子佈植 4H-SiC 可提升功率半導體摻雜精度
Jang T, Byeon M, Kang M, Lee SG et al. Investigating Structural and Surface Modifications in Ion-Implanted 4H-SiC for Enhanced Dopant Distribution Analysis in Power Semiconductors. *Materials* 2024, 17(23), 5734.
120. 6.1.5 中國出口半導體或積體電路生產設備：離子佈植機
<https://www.ceicdata.com/en/china/electronic-export-quantity/cn-export-machine-for-producing-semiconductor-or-ic-ion-implantation-machine>
121. 6.1.6 以氫離子佈植藍寶石基板提升 GaN 薄膜品質
安瑕、許晟瑞、陶鴻昌等，Ar 離子注入藍寶石襯底誘導成核的高品質 GaN 外延，無機材料學報第 40 卷第 1 期，91-96 頁。
122. 6.1.7 氫離子植入晶片重大突破
<https://hao.cnyes.com/post/108930>
123. 6.2.1 美國開發的電腦程式可望降低微晶片成本
https://www.pppl.gov/news/2024/plasma-scientists-develop-computer-programs-could-reduce-cost-microchips-and-stimulate?utm_source
124. 6.2.2 歐盟投入 100 萬歐元推動「綠色加速器」技術
<https://ifast-project.eu/news/news/horizon-2020/eu1m-innovation-fund-sustainable-accelerators>
125. 6.2.3 日本發布 2050 年電漿科學發展路徑圖
https://annex.jsap.or.jp/plasma/PE_files/roadmap2024
126. 6.2.4 韓國半導體電漿蝕刻機市場規模(2026-2033 年)
<https://www.linkedin.com/pulse/south-korea-semiconductor-plasma-etcher-market-size-key-guy1f/>

127. 6.2.5 成立四年打造出 28 奈米光刻機擾動全球半導體產業鏈
<https://news.cnyes.com/news/id/5914707>
128. 7.1.1 國際原子能總署將於 2025 年 12 月舉辦 AI 與核能國際專題討論
<https://www.iaea.org/newscenter/news/iaea-to-host-international-symposium-on-ai-and-nuclear-energy-in-december>
129. 7.1.2 人工智慧驅動的放射成像檢測創新應用
https://www.onestopndt.com/ndt-articles/innovations-in-radiographic-testing?utm_source
130. 7.1.3 歐盟啟動「Apply AI」策略以打造歐洲自主人工智慧生態圈
1. https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_25_2299
 2. <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/apply-ai>
131. 7.1.4 利用人工智慧支援海上核能發展
<https://www.neimagazine.com/news/lloyds-register-harnesses-ai-to-support-nuclear-in-maritime/?cf-view>
132. 7.1.5 以機器學習分子動力學在核反應器中的應用
<https://pubs.aip.org/aip/jcp/article-abstract/162/24/244508/3350913/Specific-heat-anomalies-and-local-symmetry?redirectedFrom=fulltext>
133. 7.1.6 深度學習模型將核融合電漿預測精度提升 1,000 倍
https://news.unist.ac.kr/36220-2/?utm_source
134. 7.1.7 中國核電實現跨越發展「核能+人工智慧」開啟新空間
<http://www.news.cn/20250331/1f4e67d0be584f69a2566da97b5475ea/c.html>
135. 7.2.1 人工智慧如何輔助頭頸癌治療
https://www.iaea.org/newscenter/news/how-can-artificial-intelligence-support-head-and-neck-cancer-treatment?utm_source
136. 7.2.2 美國人工智慧在醫學影像領域的成長分析報告(2025 年)
<https://www.globenewswire.com/news-release/2025/11/03/3178947/0/en/United-States-AI-in-Medical-Imaging-Growth-Analysis-Report-2025-A-6-76-Billion-Market-by-2033-Growing-at-a-CAGR-of-32-8-Driven-by-Deep-Learning->

Advances-Rising-Data-Volumes-and-Dis.html?utm_source

137. 7.2.3 評估深度學習工具在骨折檢測的潛力

Fu T, Viswanathan V, Attia A, et al. Assessing the Potential of a Deep Learning Tool to Improve Fracture Detection by Radiologists and Emergency Physicians on Extremity Radiographs. Acad Radiol. 2024;31(5):1989-1999

138. 7.2.4 歐盟人工智慧研究預示著放射學領域的轉變

歐盟委員會，「人工智慧在醫療保健領域的部署研究-最終報告(Study on the Deployment of AI in Healthcare. Final Report)」，2025 年 6 月，21-25 頁。
<https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/ew-01-25-076-en-n>

139. 7.2.5 歐洲核子研究中心參與開發以人工智慧進行中風預測模型

<https://home.cern/news/news/knowledge-sharing/ai-treatments-stroke-survivors>

140. 7.2.6 2025 年值得關注的醫學影像發展趨勢

https://radiologybusiness.com/topics/healthcare-management/business-intelligence/medical-imaging-trends-watch-2025?utm_source

141. 7.2.7 人工智慧在肝細胞癌立體定位消融放射治療的應用

<https://www.frontiersin.org/journals/medicine/articles/10.3389/fmed.2025.1576494/full>

142. 7.2.8 日本啟動前列腺癌放射治療自動化計畫

https://airato.jp/en/en-husm-2025/?utm_source

143. 7.2.9 AI 技術革新放射性藥物分佈評估方式

<https://m.dongascience.com/news.php?idx=70103>

144. 7.2.10 人工智慧在醫學影像上是助手而非替代

<https://www.stcn.com/article/detail/1532301.html>

145. 109 年度原子能科技學術合作研究計畫成果發表論文集，行政院原子能委員會/科技部/逢甲大學，110 年 9 月 22 日

146. 110 年度成果發表論文集原子能科技學術合作研究計畫，行政院原子能委員會，111 年

147. 111 年度成果發表論文集原子能科技學術合作研究計畫，行政院原子能委員

- 會，112 年
148. 112 年度成果發表論文集原子能科技學術合作研究計畫，行政院原子能委員會，113 年 6 月 4 日
 149. 109 年度行政院原子能委員會委託研究計畫成果發表會摘要彙編，核能研究所，110 年 5 月
 150. 110 年度行政院原子能委員會委託研究計畫成果發表會摘要彙編，核能研究所，111 年 5 月
 151. 111 年度行政院原子能委員會委託研究計畫成果發表會摘要彙編，核能研究所，112 年 5 月
 152. 112 年度核能安全委員會委託研究計畫成果發表會摘要彙編，核能安全委員會，113 年 5 月
 153. 113 年度核能安全委員會委託研究計畫成果發表會摘要彙編，核能安全委員會，114 年 6 月
 154. 郭瓊文、尹學禮，我國原子能科技決策支援體系建構期末報告，財團法人核能資訊中心，112 年 12 月
 155. 郭瓊文、施建樑，我國原子能科技決策支援體系建構期末報告，財團法人核能資訊中心，113 年 12 月
 156. 施建樑，「我國原子能科技決策支援體系建構介紹」簡報，”原子能民生應用各技術領域之技術支援組織專家「農業與環境」+「工業應用」座談會”，核資中心，清華大學李存敏館二樓會議室，114 年 4 月 29 日
 157. 張正，「輻射誘變技術於蘭花育種改良」簡報，”原子能民生應用各技術領域之技術支援組織專家「農業與環境」+「工業應用」座談會”，中興大學園藝系，清華大學李存敏館二樓會議室，114 年 4 月 29 日
 158. 黃衍介，「高能雷射技術在原子能民生應用之展望」簡報，”原子能民生應用各技術領域之技術支援組織專家「農業與環境」+「工業應用」座談會”，清華大學電機系，清華大學李存敏館二樓會議室，114 年 4 月 29 日
 159. 郭宗德，「原子能民生應用技術在工業應用領域研究之展望」簡報，”原子能民生應用各技術領域之技術支援組織專家「農業與環境」+「工業應用」座

- 談會”，元培醫科技大學，清華大學李存敏館二樓會議室，114年4月29日
160. 黃國芳，「同位素技術於環境永續之應用--以重金屬污染示蹤及海洋環境變遷研究為例」簡報，”原子能民生應用各技術領域之技術支援組織專家「農業與環境」+「工業應用」座談會”，中研院地科所，清華大學李存敏館二樓會議室，114年4月29日
161. 李志浩，「The complementary tools of synchrotron X ray and neutron」簡報，”原子能民生應用各技術領域之技術支援組織專家「量子中子科技」+「太空科技」+「半導體製程」座談會”，清華大學工科系，清華大學李存敏館二樓會議室，114年5月9日
162. 杜定賢，「國原院 70 MeV 迴旋加速器之設計與研究應用規劃」簡報，”原子能民生應用各技術領域之技術支援組織專家「量子中子科技」+「太空科技」+「半導體製程」座談會”，國原院同位素應用所，清華大學李存敏館二樓會議室，114年5月9日
163. 葉彥顯，「原子能民生應用技術於「太空科技」研究之展望」簡報，”原子能民生應用各技術領域之技術支援組織專家「量子中子科技」+「太空科技」+「半導體製程」座談會”，國原院物理所，清華大學李存敏館二樓會議室，114年5月9日
164. 梁正宏，「原子能民生應用技術於「半導體製程」研究之展望」簡報，”原子能民生應用各技術領域之技術支援組織專家「量子中子科技」+「太空科技」+「半導體製程」座談會”，清華大學核工所，清華大學李存敏館二樓會議室，114年5月9日
165. 劉裕明，「重粒子治療在臺北榮總的臨床經驗」簡報，”原子能民生應用各技術領域之技術支援組織專家「精準放射醫療」+「人工智慧」座談會”，北榮醫院放射腫瘤部，台北榮總腫瘤醫學部大會議室，114年5月21日
166. 王昱豐，「聚焦於癌：核醫精準診療如何重塑癌症照護地圖」簡報，”原子能民生應用各技術領域之技術支援組織專家「精準放射醫療」+「人工智慧」座談會”，核醫學會，台北榮總腫瘤醫學部大會議室，114年5月21日
167. 張明誠，「國原院放射診療藥物開發研究之規劃及 70 MeV 迴旋加速器之研

- 究應用」簡報，”原子能民生應用各技術領域之技術支援組織專家「精準放射醫療」+「人工智慧」座談會”，國原院同位素所，台北榮總腫瘤醫學部大會議室，114年5月21日
168. 倪于晴，「國原院放射成像之研究現況與未來規劃」簡報，”原子能民生應用各技術領域之技術支援組織專家「精準放射醫療」+「人工智慧」座談會”，國原院輻射防護所，台北榮總腫瘤醫學部大會議室，114年5月21日
169. 李銘忻，「人工智慧技術在放射診療之應用研究」簡報，”原子能民生應用各技術領域之技術支援組織專家「精準放射醫療」+「人工智慧」座談會”，群創科技公司，台北榮總腫瘤醫學部大會議室，114年5月21日
170. 李志浩，「人工智慧技術在次世代核能技術之應用研究(SMR)」簡報，”原子能民生應用各技術領域之技術支援組織專家「次世代核能技術」+「人工智慧」座談會”，清華大學工科系，清華大學李存敏館二樓會議室，114年6月3日
171. 陳仲遠，「國原院小型模組化反應器(SMR)研究規劃」簡報，”原子能民生應用各技術領域之技術支援組織專家「次世代核能技術」+「人工智慧」座談會”，國原院原能所，清華大學李存敏館二樓會議室，114年6月3日
172. 曾有志，「低活化核融合材料發展現況」簡報，”原子能民生應用各技術領域之技術支援組織專家「次世代核能技術」+「人工智慧」座談會”，中央大學機械系，清華大學李存敏館二樓會議室，114年6月3日
173. 張博宇，「台灣首座磁約束高溫電漿設施(Formosa Integrated Research Spherical Tokamak, FIRST)建置之現況」簡報，”原子能民生應用各技術領域之技術支援組織專家「次世代核能技術」+「人工智慧」座談會”，成功大學太空與電漿所，清華大學李存敏館二樓會議室，114年6月3日
174. 董曉明，「人工智慧技術在核能技術領域之應用研究國原院燃材所」簡報，”原子能民生應用各技術領域之技術支援組織專家「次世代核能技術」+「人工智慧」座談會”，國原院材料所，清華大學李存敏館二樓會議室，114年6月3日
175. 衛生福利部醫事司，全國醫用粒子治療設備設置現況

<https://dep.mohw.gov.tw/DOMA/fp-3132-80794-106.html>

176. 113 年醫事機構服務量統計年報，衛生福利部統計處

<https://dep.mohw.gov.tw/DOS/cp-5099-83224-113.html>

177. Global Semiconductor Market show continued growth in Q2 2025

<https://www.wsts.org/76/103/WSTS-Semiconductor-Market-Forecast-Spring-2025>

178. 臺灣半導體產值挑戰 5 兆元大關，工業技術與資訊月刊 386 期 2024 年 07 月號

179. EUV 計量標準 壯大檢測產業鏈，工業技術與資訊月刊 390 期 2024 年 11 月號

180. 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

181. 中國核成像市場規模和份額分析-增長趨勢和預測(2024 - 2029)

<https://www.mordorintelligence-com.translate.goog/zh-CN/industry-reports/china-nuclear-imaging-market?>

182. 五大信賴產業推動方案(核定本)，114 年 7 月，第 116 頁

二、次世代核能技術研析及發展策略研析

1. FIA 發布 2024 年全球融合產業報告

<https://www.fusionindustryassociation.org/fia-launches-2024-global-fusion-industry-report/>

2. 國際熱核融合實驗反應爐 (ITER) 成員國:奧地利、比利時、保加利亞、中國、克羅埃西亞、賽普勒斯、捷克、丹麥、愛沙尼亞、芬蘭、法國、德國、希臘、匈牙利、印度、愛爾蘭、義大利、日本、拉脫維亞、立陶宛、盧森堡、馬爾他、荷蘭、波蘭、葡萄牙、羅馬尼亞、俄羅斯、斯洛伐克、斯洛維尼亞、南韓、西班牙、瑞典、瑞士、英國、美國

3. 2025 就能實現「核融合」商轉？美國核能新創的突破
<https://www.cw.com.tw/article/5133090>
4. 聚界潔能搶當台灣核融合領頭羊，商轉之路至少還有兩大問題待解
<https://www.wealth.com.tw/articles/605cadcd-be5a-48c1-b136-7771d4ed559f>
5. 中國人造太陽核融合實驗再破紀錄，維持高約束電漿運作逾 17 分鐘
<https://technews.tw/2025/01/23/china-fusion-tokamak-east-plasma-loop-artificial-sun/>
6. 人造太陽」再迎重大突破！中國「赤霄光劍」來了 性能指標國際領先
<https://news.cnyes.com/news/id/5836609>
7. 法國核融合實驗新紀錄，電漿維持超過 22 分鐘
<https://technews.tw/2025/02/19/nuclear-fusion-west-tokamak-breaks-world-record-for-plasma-duration/>
8. 全球最大核融合計畫！重達 5000 噸反應爐組件運抵法國
<https://www.inside.com.tw/article/36875-biggest-nuclear%20fusion>
9. 美科學家透過核廢棄物產生氫，為核融合發電廠提供燃料
<https://reurl.cc/9nn5vX>
10. 小型模組化核能電廠安全嗎？
https://www.youtube.com/live/O_zgSFgzqio?si=jOb94cVY1t5Q1WhK
11. International Conference on Small Modular Reactors and their Applications 2024.
12. 用過核燃料管理國際會議 <https://hps-tw.org.tw/zh/recommended-reading-2/2024-08-19-08-58-58.html>
13. Beyond Phase-out: Taiwan's NTHU Explores Collaboration with KAERI
<https://www.kaeri.re.kr/board?menuId=MENU00331&siteId=null>
14. 不能沒有核電！獨家開箱南韓核能研究院 KAERI，揭示核能強國的養成計畫 <https://www.gvm.com.tw/article/122101>
15. AI 技術不斷進步，其對於電網的渴望正轉向 SMR，核能需求的大爆發
<https://iknow.stpi.narl.org.tw/Post/Read.aspx?PostID=21337>

16. 核能三倍宣言簽署國: 亞美尼亞、保加利亞、加拿大、克羅地亞、捷克共和國、芬蘭、法國、加納、匈牙利、牙買加、日本、韓國、摩爾多瓦、蒙古、摩洛哥、荷蘭、波蘭、羅馬尼亞、斯洛伐克、斯洛文尼亞、瑞典、烏克蘭、阿拉伯聯合大公國、英國、美國、薩爾瓦多、哈薩克、肯亞、科索沃、奈及利亞和土耳其
17. 14 家全球主要銀行和金融機構表示支持到 2050 年將核能提升三倍
<https://money.udn.com/money/story/123828/8248743>
18. 支持核能三倍金融機構: Abu Dhabi Commercial Bank、Ares Management、Bank of America、Barclays、BNP Paribas、Brookfield、Citi、Credit Agricole CIB、Goldman Sachs、Guggenheim Securities LLC、Morgan Stanley、Rothschild & Co.、Segra Capital Management 及 Societe Generale.
19. 義大利邁向重啟核電，公私部門簽約合建小型反應爐
<https://technews.tw/2025/02/07/italy-smr/>
20. 全球核能的復甦 | Siemens Energy 將為 Rolls-Royce 供應小型核反應爐設備
<https://uanalyze.com.tw/articles/8829010944>
21. 印尼引領東南亞 SMR 進程！低碳小型核電廠成淨零解方？分析 3 大發展障礙
<https://www.recessary.com/zh-tw/news/asean-market/smr-seen-as-transitional-energy-in-asean-with-3-major-barriers>
22. 中華民國核能學會 <https://www.chns.org/>
23. 大陸研發碳 -14 核電池放電壽命長達「數千年」
<https://www.ettoday.net/news/20250319/2927942.htm>
24. 日本原子能研究所開發世界首款「核廢棄物充電電池」
<https://www.chinatimes.com/realtimenews/20250327005464-260408?chdtv>
25. 中國核電新創能力 <https://itif.org/publications/2024/06/17/how-innovative-is-china-in-nuclear-power/>
26. 中國利用解密的美國文件建造了世界上第一個可運行的鈾反應器
<https://interestingengineering.com/energy/china-builds-world-first-thorium-reactor>

27. 美國核管會 U.S. NRC <https://www.nrc.gov>
28. NuScale Power 公司 <https://www.nuscalepower.com/>
29. ARC 清潔能源公司 <https://www.cnn.cn/article/26110.html>
30. 泰拉能源 <https://www.terrapower.com/>
31. Kairos Power 公司 <https://tw.news.yahoo.com/google-strikes-a-deal-with-a-nuclear-startup-to-power-its-ai-data-centers-020029203.html>
32. GE Hitachi Nuclear Energy (GEH) 日經中文網
<https://zh.cn.nikkei.com/industry/ienvironment/49638-2022-08-26-05-54-33.html?start=1>
33. Terrestrial Energy USA 公司 <https://www.terrestrialenergy.com/>
34. X Energy 公司 <https://x-energy.com/>
35. GA-EMS 公司 <https://www.ga.com/nuclear-fission/>
36. Radiant Nuclear 公司 <https://www.radiantnuclear.com/>
37. 伊利諾大學 HTGR 反應器 <https://reurl.cc/Rk0v8n>
38. 川普下令陸軍主導微型核反應器研發 為偏遠基地提供電力
<https://share.google/AfqurYClpxfu7WqZD>
39. 阿拉斯加好冷 美空軍直接投資微型核電站
<https://def.ltn.com.tw/article/breakingnews/5077391>
40. 三哩島核電廠重啟計劃提前至 2027 年
<https://www.reuters.com/sustainability/climate-energy/shut-three-mile-island-nuclear-plant-may-restart-2027-owner-says-2025-06-25/>
41. Spring CAMP Meeting 2025, Pisa, Italy.
42. 台廠可望打入美國先進核能供應鏈 清大擬設微型反應器
<https://vip.udn.com/vip/story/121940/8978625>
43. 瑞典瑞士核能占比 40% 美中競爭快中子反應爐 台灣會重返核能嗎？
https://youtu.be/XHxVI-2jDJU?si=vxtN9tWbb_B9D-o7
44. 全球再掀「返核」風潮 台灣若成非核家園 綠能缺口如何解決？
https://youtu.be/2dN_VoA3OZo?si=S3K2euLk7aZQraHw

附件一、第一場「農業與環境+工業應用」座談會 會議紀錄

我國原子能科技決策支援體系建構計畫

時間：114 年 4 月 29 日 9:30-12:30

地點：清華大學綠能館 204 室

主持人：郭瓊文董事長

參加人員：核安會綜規組 李采芬、黃立元

國原院同位素應用所蘇敏彰、林威廷、王庭燕

清華大學 黃衍介、原科中心 許芳裕；中興大學 張正

元培科大 郭宗德；中山大學 黃蔚人；嘉義大學 王紹鴻

中研院地球科學所 黃國芳

國家儀科中心 翁俊仁

新和科技 蔡維達

核資中心 施建樑

簡報：

1. 我國原子能科技決策支援體系建構介紹 施建樑顧問
2. 輻射誘變技術於蘭花育種改良 張正教授
3. 高能雷射技術在原子能民生應用之展望 黃衍介教授
4. 原子能民生應用技術在工業應用領域研究之展望 郭宗德副教授
5. 同位素技術於環境永續之應用--以重金屬污染示蹤及海洋環境變遷研究為例黃國芳副研究員

綜合討論(重點紀要)

1. Q(國儀科中心翁俊仁)：請問雷射加速的方法與「冷融合」(cold fusion)的優缺點及未來發展？

A(清華大學黃衍介)：

(1)「冷融合」(cold fusion)在學術界已經蒙上一層爭議性的陰影，相關研究往往會被質疑其科學性。然而，從許多實驗跡象來看，偶爾的確會量測到中子。當能量密度高到某個臨界程度時，某些核反應過程可能會被激發，雖然這些機制目前尚不清楚。他們嘗試將高能雷射與傳統核融合機制相結合，這樣的組合或許有可能觸發新的核反應。我曾與研究團隊的討論，他們認為真正具有極高能量密度的，可能是固態材料(solid materials)中的能量密度極高，遠超過我們日常所見。當這些固態材料受到來自外部的高能雷射刺激時，有可能激發出某些核反應，進一步提升反應活性。他們目前的實驗方法，是以電場刺激的方式，在固態材料中產生高密度電漿。我個人認為，若能有效產生這種高能量密度電漿，其本身就是一個非常好的能量來源。透過這種方式產生高能量密度之後，系統內會在十幾公分範圍內產生強電場，進而產生 GeV 等級的電子束。反之，在同步輻射中心這類大型設施中，產生 GeV 電子束所需的設施規模通常是數百公尺級；若能在 10 幾公分的尺度內達成這種輸出，無疑是非常突破性的技術。

(2)談到核融合這個領域，即使在學術界裡，有些專家也會坦言，這項技術可能在 15 年、20 年，甚至 30 年內都未必能有實質成果。然而，與此同時，我們也看到各國無論是政府還是民間企業，都持續投入大量資金在相關研究與開發上。特別是在過去 5 到 8 年之間，來自產業界、尤其是新創企業的投入明顯增加，逐漸形成一股推動核融合技術突破的新動能。臺灣的產業界經常著眼於短期獲利，例如是否能在明年、後年，甚至三到五年內看到回報。但相較之下，許多投入未來技術的新創企業，即使尚未有實際產品問世，仍然具備獲利能力。以加州的一家核

融合新創公司為例，雖然至今仍沒有任何一座融合反應爐正式商轉，但該公司每年都能獲利，因為他們持續在開發與電漿技術相關的應用。核融合代表著一個人類共同追求的宏大願景。事實上，沒有人能準確預測核融合反應何時能實現真正的商業化運轉。但正因如此，它始終是一個極具吸引力且具戰略意義的研究與創業領域。在我看來，這種投入幾乎沒有「失敗」可言，因為它對人類未來至關重要。目前在歐洲、日本及中國大陸，也有許多民間創業團隊不斷投入相關技術發展。當然，若問起是否能在 15 年內實現商轉，沒有人能給出確切答案。但也正因這股推動力，說不定在未來三到五年內，就會出現一間具有突破性的公司，帶來令人意想不到的進展。

2. Q(新和科技蔡維達)：以電子束轉換成 X 光的轉換效率低，請問用雷射加上電子束誘發加馬輻射，其轉換效率或誘發阿伐輻射的能量大約是多少？

A(清華大學黃衍介)：

雷射加上電子束誘發加馬輻射目前仍處於研究階段，其轉換效率與產生能量仍須視激發條件與設計而定。我們長期以來的研究目標之一，是為了台積電的極紫外光(EUV)應用，特別是用於晶圓光罩(wafer mask)的檢測。我們的設計目標，是產生每秒約 10^{12} 顆質子量級以產生 EUV 光源。使用方法是透過電子束與雷射對撞，產生數百 keV 能量的電子束，這樣的能量對應的輻射就足以應用於 EUV 系統。至於 X 光雷射，通常用於基礎科研，其設施規模龐大，例如 X 光自由電子雷射(XFEL)設施往往長達一公里，並非工業端可輕易部署的技術。此外，瑞典有一家公司開發了以電子束直接撞擊液態金屬靶產生 X 光的方式，這種系統的靶材為液態電極，因此，不會像傳統固態靶材因持續撞擊而損壞。這類設備的能量與輸出功率都相當高，熱能亦可持續維持金屬處於液態狀態。這種「液態電極 X 光機」具有很大的發展潛力。目前 X 光與 EUV 的實際應用案例來看，針對不同需求(如科研、工業、半導體)，對應的技術策略與轉換效率皆有所不同。

3. Q(核資中心郭瓊文)：IAEA 有 NUSTEC 聯合研究計畫，請問臺灣是否也有利用同位素技術追蹤海洋污染物來源的相關研究？

A(中研院黃國芳)：

目前臺灣確實已有越來越多單位投入相關研究，不僅有學術界的老師參與，研究議題也逐漸擴展。例如，有研究團隊關注微塑膠與金屬污染物的結合關係，嘗試了解微塑膠在環境中所吸附的重金屬種類與濃度。大多數研究者目前的做法，會先進行定量分析，了解污染物中微塑膠的含量，再進一步進行塑膠種類的鑑別。在學術機構方面，國立臺灣海洋大學有進行相關海洋微塑膠的調查研究；中央研究院環境變遷研究中心也針對淡水河與其他河川中的微塑膠來源與組成，進行追蹤與分析。此外，生物多樣性研究中心也有觀察到微塑膠出現在珊瑚體內的現象，顯示微塑膠污染在海洋生態系中已廣泛存在，甚至進入生物體內部。

A(中山大學黃蔚人)：目前在塑膠微粒方面的研究已逐漸取得較具信心的成果，但這些議題最終仍回到原本所關注的整體地球系統的研究架構。當我們思考如何有效封存碳時，必須面對一個基本問題：如果真的要從大氣中移除數千萬噸的二氧化碳，那這些碳最後應該被儲存在哪裡？地球只有一個，這些碳不是儲存在陸地上，就是進入海洋之中。因此，這牽涉到我們對地球表層環境空間與容量的整體理解，也回到海洋學與地球科學的研究範疇。此外，也必須關注這些封存的碳是否會再次釋放或轉化，這正是我們目前持續追蹤與調查的方向。以中山海洋科學系為例，就有許多專家長期關注碳循環、海洋碳儲存等議題。當討論人為排放的二氧化碳是否已進入海洋時，目前常用的分析方法之一是利用碳的穩定同位素

來追蹤來源。來自化石燃料的二氧化碳，其碳-13 同位素比自然來源的碳更輕，因此，透過分析海水中碳同位素的變化，可判斷是否有大氣中來自化石燃料的 CO₂ 溶入海洋。

類似地，銻-137 這類放射性核種也能作為海水來源的指標，用來追蹤污染物或放射性物質的擴散。我們在 2024 年 4 月 3 日地震發生後，研究船第一時間出海進行海底地形與地貌的觀測，以了解地震對近海環境的影響。當我們與過去資料進行比較時，卻發現許多區域根本缺乏細緻的基礎資料，難以量化地震帶來的改變。這段經驗提醒我們，即使具備快速應變能力，若沒有長期且系統性的基礎資料作為比對基準，災後調查將受到極大限制。因此，類似災難的研究，不應只是事後反應，而需要在平時就建立足夠且細緻的環境基準資料，才能在關鍵時刻做出科學的判斷與決策。

4. Q(國儀科中心翁俊仁)：國家儀器發展中心目前正進行極紫外光(EUV)相機的開發，並嘗試使用鑽石材料將 EUV 轉換為可見光以進行成像。在高能 X 光與光學元件開發方面已有較成熟的技術，但針對 soft X-ray 到 EUV 可見光轉換這一領域，能否提出一些技術見解？

A(元培科大郭宗德)：

目前的 EUV 技術應用於蝕刻機的光源發展，未來可能會走向 X 光的應用。不過，X 光的技術難點主要在於「聚焦」，如果要讓 X 光具備聚焦能力，可以考慮像同步輻射(synchrotron)這樣的設施來產生聚焦效應，或甚至進一步發展成類似雷射的特性，使其在特定方向(如 90 度)形成相干性高的光束，進而應用於像是積體電路(IC)製程中的精密聚焦與曝光。中國大陸在 EUV 光源方面近年似乎已有一些進展，但未來若要邁向 X 光光源並實現聚焦與可見訊號轉換，仍需突破許多技術門檻。若要提升光產生的效率，鈣鈦礦材料(perovskite)可能是一個具潛力的選項。至於產生 X 光之後，若希望具有明確方向性或聚焦能力，就會遇到一些挑戰。因為 X 光本身具有較強的穿透性，其輻射分布相對發散，不容易直接聚焦。若要達到良好的聚焦效果，往往需要更高能量的電子束，或特定的光學系統輔助。在醫療放射治療領域所使用的高能電子束，其撞擊產生的光束方向性就較為集中，有利於向前投射。但在工業或科研用途中，如何平衡能量輸出、聚焦需求與材料耐受性，仍是一個值得深入探討的課題。

5. Q(新和科技蔡維達)：臺灣目前的花卉出口主要採用燻蒸處理。然而，輻照技術在檢疫方面其實也具有一定角色。就農產品與花卉(包括水果)出口而言，請問燻蒸與輻照各自有哪些優點與限制？

A(中興大學張正)：

在農業應用方面，輻照技術除了可用於育種，也常應用於農產品採收後的保存，以及出口過程中的檢疫處理，例如殺菌與殺蟲。我認為輻照在這方面具備前瞻性。燻蒸主要針對昆蟲處理較有效，而輻照則在控制微生物方面較具優勢。以蝴蝶蘭出口為例，從臺灣運至歐洲或美洲需時約四至五週，即便是文心蘭出口至日本也需約七天。在這段運輸期間，產品容易出現腐爛、蛆蟲等問題，輻照便可在防止病蟲害與延長保存方面發揮作用。此外，對於糧食作物及某些根莖類蔬菜作物，若能透過輻照有效抑制微生物增生，將有助於延長保存期限。對於球莖類花卉，過去曾有研究顯示，經輻照處理後可控制其高度生長，使其變得較為矮化，進而提升觀賞性。因此，除了育種之外，輻照技術在出口農產品的保存與檢疫處理方面，確實具有可開發與應用的空間。

6. (國原院蘇敏彰建議)：

國原院輻射照射廠已於今年 4 月重新恢復運轉，歡迎各位先進多加利用。針對輻照在檢疫方面的應用，雖然技術上已可達到病蟲害控制的目的，但實際操作時常面臨一個挑戰：花卉或水果在經過輻照處理後，可能會出現品質受損的情形。因此，如何在達到檢疫效果與維持農產品品質之間取得平衡，仍是一項重要課題。目前國內相關應用仍多處於研發階段，尚未有明確的出口實例。相較之下，美國農業部已針對不同類型水果訂定對應的輻照劑量標準，作為檢疫處理的依據。臺灣目前似乎尚未建立完整的作物品項與劑量指引。例如鳳梨經輻照後可能會出現輕微輻射傷害，顯示在推動實務應用前，仍需進一步進行劑量反應與品質影響的系統性研究。因此，未來在推動輻照應用於農產品出口時，建議加強對於「最小有效劑量」與「品質維持」之間的實驗與評估，逐步建立適合國內作物的標準與操作指引。

7. (清華大學許芳裕建議)：

在游離輻射領域的發展重點，已逐漸擴展至新興加速技術，尤其與雷射相關的應用。雖然雷射屬於非游離輻射，但透過雷射與帶電粒子的互動，可將粒子加速至游離輻射等級。就醫療應用而言，重點聚焦於腫瘤治療的技術發展，特別是在粒子治療(質子或重粒子治療)方面。然而，這類粒子加速設備體積龐大、成本高，且對場地有嚴格要求，對於醫療院所而言，導入仍有不少挑戰。清華大學原科中心核反應器提供中子源與台北榮總進行硼中子捕獲治療(BNCT)，一項很實務的臨床合作應用。目前發展趨勢，轉向使用可緊湊化的加速器，例如雷射離子體加速器(laser-plasma accelerator)，這種技術具備前瞻性，未來若能進一步實現臨床化與系統整合，將可能大幅縮小粒子治療設備的體積，使其真正走進一般醫院，成為可行的解決方案。對於輻射應用另提出幾項發展挑戰：

(1)農產品與食品照射應用：高強度輻射照射在全球僅有約 40 餘國通過法規，可應用於農產品殺蟲、殺菌與保鮮。照射的主要目的不外乎防止米蟲、抑制腐敗、延長保存期限。對於消費者健康而言，推廣輻照技術可作為減少農藥殘留的可行替代方式。

(2)誘變育種的技術挑戰：輻射育種雖具潛力，但具備高度不確定性，突變為隨機性事件。實務上需要大量樣本、長時間觀察及統計驗證。劑量控制、對照組設計、突變性狀選擇皆為技術難點。

(3)中藥材與工業製品的照射滅菌：中藥進口常因儲運環節發霉或帶菌，照射成為一個有效的滅菌手段，特別是對於外形不規則的藥材；工業製品如塑膠管件、電子元件、或非破壞檢測(Ir-192)射源或手持式 X 光機進行管線照相檢測。

(4)負離子商品的輻射安全問題：臺灣市場存在大量聲稱可產生負離子的商品，其中部分實際上是摻入天然放射性物質(如負離子粉)。臺灣以每年劑量限值(1 毫西弗)為管理基準，未超標可上架，但仍存潛在健康疑慮。目前由國原院負責全國唯一通過 TAF 認證的檢測實驗室進行抽查。

(5)環境與健康議題中的輻射與同位素應用：同位素可作為追蹤污染來源的工具，例如利用 Pb-206 / Pb-207 的比值分析重金屬來源。氡、銫-137 等放射性同位素亦可用於追蹤水體或大氣中污染傳播路徑。可應用於台中火力發電廠空氣污染爭議之溯源，提供更科學的依據判斷污染是否來自境外。

(6)量測儀器的技術選擇與發展：質譜儀常用於重金屬分析，但成本高昂。可探索如 XRF(X-ray fluorescence)等光學儀器，以相對低成本進行固體或液態樣品分析，作為替代技術。

8. (中興大學張正建議)：針對農業領域輻射應用與誘變育種建議：

(1)輻射在農業加工與檢疫處理的應用挑戰

農產品是「活體生物」，無論是殺蟲還是殺菌，都是在處理仍具有生理活性的生物體，因此，處理過程必須在達成防治目的的同時，又不影響其品質與外觀，這本身就是一項困難的技術挑戰。以鳳梨為例，目前臺灣已有十多個品種，而其主要病害如「黑心病」是生理性疾病。不同品種、不同成熟度、採收季節皆會影響對輻射劑量的反應，這種差異性意味著我們無法單靠使用者自行判斷處理劑量，否則一旦處理失敗造成損失，對外銷產業將是沉重打擊。因此，我建議：對於國內重要的外銷農產品，應建立劑量與品種、成熟度等變項之間的對應資料，透過限期實驗、模組化試驗方法建立一套處理準則，協助未來的使用者。

(2)誘變育種的特性與方法學建議

輻射育種的最大挑戰在於其「不可預測性」，成果取決於機率。因此，我在參與本計畫時，並非一開始就設定要育成新品種，而是將目標放在建立一套可重複使用的「方法學」——即低階、中階與高階的篩選與培育流程。若方法學成功，未來將可擴展應用於其他作物。以我目前的經驗來看，我們從4,000株初代變異中成功篩選出兩株具潛力的個體，在後續計畫中又進行6萬株的處理，目前仍在篩選中，看來亦有機會再篩選出具商品化潛力的育種材料。在這個歷程中體認到：輻射育種需要長期的投入、耐心與經驗。若沒有一種與推廣的實戰經驗，即便篩選出潛力株種，也可能停留在實驗室階段，無法進入產業端。因此，我建議：應選擇具「實務育種與推廣經驗」之人員負責相關研究；制定明確可行的篩選標準與方法學，供未來參與者遵循；一種不應僅以統計方法判定結果，因為在4萬~6萬株中選出2株「極端表現」的個體，靠的並非平均性，而是眼光與經驗；可針對觀賞植物、糧食作物、蔬菜、水果、林木等類別，逐步建立針對性的操作指引與輻射處理標準。

(3)展望：誘變育種雖具高度不確定性，但也是一個潛力極大的領域。即使不一定每次都成功，只要持續投入，機會便存在。因此，我建議計畫管考單位應針對一種部分採用長期觀察與彈性管理模式，並審慎選擇執行者與研究對象，以提高成功機率，並累積國內自主育種能量。

9. (嘉義大學王紹鴻建議)：中草藥輻射誘變育種之發展構想與合作建議：

嘉義大學團隊也長期從事育種工作，因此，對於經濟作物與觀賞植物在育種上的困難度深有同感。自108年起承接相關研究計畫，至今已培育至第六代大豆，但即便如此，若要進一步申請品種權，仍面臨極大挑戰，近年來，嘉義大學積極推動中草藥領域的發展，期望未來能不僅止於學術研究，更能建立完整的中草藥產業鏈，從栽培、生產到品種選育。在此方向下，初期的策略是聚焦於兼具食用與藥用價值的植物品系，作為優先開發對象。例如：薑黃、枸杞、當歸等。我們觀察到臺灣的枸杞普遍不結果，主要僅能食用葉片，推測與氣候(高溫)有關。因此，未來篩選耐熱、耐濕品種，將成為一項關鍵目標。我們也已在大豆研究中，運用複合輻射誘變技術，成功篩選出具有耐濕特性的植株。這項經驗促使我們思考：是否能將此技術應用至中草藥，進行誘變與種原改良？因此，我們希望藉由與農業部種苗場合作，有機會選育出更適應臺灣氣候的耐熱、耐濕中草藥品種，進一步建構本土中草藥種原資源庫。隨著輻射技術在農業、醫藥、環境等領域的多元應用，相信未來將有更多創新成果問世。

10. (中山大學黃蔚人建議)：海洋科學中輻射應用的潛力與產業連結建議：

海洋科學中，輻射技術的應用其實有許多潛力尚待開發。其中一個非常重要的方向是「海洋碳匯」。目前許多國際會議與研究計畫皆強調藍碳(blue carbon)的重要

性，而海洋植物如浮游植物同樣會吸收大氣中的二氧化碳。因此，如何量化這些植物的「基礎生產力」，也就是其碳吸收能力，就成為關鍵指標。目前在量測基礎生產力方面，最可靠的方法仍然是使用碳-14 標記法(Carbon-14 tracer method)。這種方法透過添加放射性同位素碳-14，觀察其在光合作用中的吸收與固定過程，進而計算碳的吸收量。目前在臺灣，這類技術僅有一家實驗室具備相關能力，且各研究單位皆仰賴其協助。除了碳-14 的應用，另一個可進一步思考的創新方向是：在保存水樣時，是否能以游離輻射取代傳統的化學藥劑進行滅菌處理。目前我們慣常使用氯化銅等藥劑來抑制微生物生長，但這可能改變樣本成分或污染分析結果。若能導入輻射滅菌處理，不僅更為潔淨，亦可能提升樣品保存的穩定性。在海洋與地球科學領域中，例如微化石、浮游動植物、底棲生物等微小生物的成分分析，亦常常使用其他成像輻射技術來進行結構觀察與分析。然而，這類需求多為小規模、基礎研究導向，受限於高昂的檢測與設備成本，長期難以擴大應用或形成市場。因此，若能與企業界攜手，透過 ESG 計畫支持科學研究，將可彌補目前科學界與產業界之間的「成本鴻溝」。企業常見的 ESG 行動如淨灘、碳足跡計算固然重要，但若能進一步與海洋科學的輻射應用、碳匯研究進行結合，將能達到「環境教育」與「科學貢獻」雙重效益，開創更具深度與永續價值的合作模式。

11. (新和科技蔡維達分享)：與筆電機殼廠商洽談輻射交聯應用：目前新和科技與筆電機殼製造商展開合作討論，針對其產品開發提出以下技術需求：

由於筆記型電腦機身日益輕薄，螢幕與外殼結構的抗彎曲與抗壓強度成為重要課題。過去多仰賴鋁鎂合金材料來確保結構強度，但由於鋁鎂材料成本高昂，廠商希望尋求替代方案。廠商提出是否可採用塑膠機殼材料，並透過「輻射交聯」技術進行改質處理，以提升其結構強度與韌性。此技術應用可望達到降低成本、兼顧機械性能的雙重目標。此外，該廠商也關注環保與永續議題，計畫導入環保材料(如再生塑膠、海洋回收微粒)作為塑膠原料的部分取代來源。為因應這類原料在物性上的不穩定性，希望藉由輻射交聯方式，改善其結構性能，開發出具市場潛力的新型綠色複合材料。特別值得一提的是，由於原始塑膠粒的價格已降至極低，若能導入環保元素並透過輻射改質提升產品附加價值，將更符合現代消費者願意為環保付費的市場趨勢。這項構想目前正進一步評估材料配方、輻射劑量設定與強度測試等可行性。

附件二、第二場「量子中子科技+太空科技+半導體製程」會議紀錄

我國原子能科技決策支援體系建構計畫

時間：114年5月9日 9:30-12:30

地點：清華大學綠能館 204 室

主持人：核資中心郭瓊文

參加人員：核安會 綜規組 林歲士、賴弘志、何承軒、蔡宜宏、李采芬

國原院 徐耀東、鄭勝隆、陳柏聞、杜定賢、葉彥顯、蔡雨利

施圳豪

清華大學 李志浩、陳建旭；臺灣大學 蔡坤諭；陽明交通大學黃爾文

成功大學 張博宇；長庚大學 趙自強、陳始明；明新科大 李億興

儀科中心 柯志忠、翁俊仁、李昭德

新和科技 蔡維達；核資中心 施建樑

一、簡報內容(略)

二、綜合討論

1. (長庚趙自強建議):

A. 輻射測試的兩大面向：Y 軸與 X 軸。Y 軸(輻射損傷)：目前輻射損傷效應如總游離劑量(Total Ionizing Dose, TID)、位移損傷效應(Displacement Damage, DD)、單一事件效應(Single Event Effects, SEE)研究已具基礎。X 軸(照射條件)：輻射能量、粒子種類、劑量標定等「輸入條件」研究相對薄弱，測試成果若無明確 X 軸參數，即使研究設計完善，量化結果亦不具可比較性或實用價值。

B. 標準劑量的重要性與 TLD-400 的角色：傳統輻射標準多基於水等效(人體模型)，但半導體為矽等效材料。專家們提供的劑量(如水劑量)常與半導體實際接受劑量不符，導致誤判。TLD-400 為矽等效材料，可作為建立國家輻射標準的核心，提供客觀、可量測的實際輻射條件。因此，目標為建立實驗中可置於樣品旁的劑量參考標準，由數據佐證，不單靠專家判斷。

C. 粒子與重粒子的測試挑戰與建議：光子的輻射測試已有 TLD 標準，但重粒子、中子測試缺乏明確標準。目前測試多仰賴國外(如美、日、加)資料，或需手動轉換能譜與等效性，準確性待加強。因此，建議建立臺灣本地可用的重粒子/中子輻射標準參考，提升測試信心與數據一致性。

D. 台積電與中子測試需求：台積電雖未直接參與太空應用，但其高階製程商用元件實際上曝露於地面宇宙射線二次粒子環境(主要是中子)。國際標準如 LANSE (800 MeV)模擬紐約海平面中子能譜，為商用電子測試的黃金標準。臺灣即將啟用的 70 MeV 中子源雖未達國際頂規(400/800 MeV)，但為一重要突破。如果後續進行 70 MeV 中子 vs. 400/800 MeV 中子等效性研究，可建立國際的參數轉換基準，提供台積電與其他商用元件產業參考。

E. 對產業應用的戰略建議：臺灣商用電子(2-4 奈米)先進製程具潛力應用於太空或軍規任務，但目前缺乏系統性測試與標準。應建立：

1. 輻射測試 SOP (TID, SEE 等)

2. 元件測試資料庫

3. 適用任務場景對照策略(如低軌道應用、其他選擇性任務)評估太空環境與地面等效輻射條件對照模型，支援任務匹配與風險評估。如能整合國原院中子源、標準劑量計、產學合作體系，將有潛力建立具國際接軌能力的測試體系，服務本地產業與太空任務。

2. (成大張博宇):介紹成大太空與電漿科學研究所相關研究與 EUV 光源。
3. (國原院 TSO 徐耀東副所長、鄭勝隆副所長)回覆：對於 TID(總劑量效應)輻射測試的標準與追溯性非常重視。過去雖使用與 TID 類似的輻射源(如 Co-60)進行測試，目前正著手推進符合太空試驗驗證標準的測試體系與可追溯性(traceability)，並與國際標準接軌。國原院設有專門的輻射量測實驗平台，重視基礎輻射量測技術與國家校正標準。強化劑量、電流與能量等轉換測量能力，例如：量電流的轉換程式開發、能量計量與轉換模型。此外，基礎模型建置與跨部門協作的必要性與軍方單位合作建構不同深度的模擬模型與較準資料。因為各自領域不同(如生物、半導體、結構設計等)，須透過跨領域合作整合資源與技術。期望透過分工協作推動複雜實驗與基礎研發的進展。

另外，有關商規元件應用於特殊場域的經驗，國原院已有成功經驗將商用元件(COTS)導入核能電廠設備認證程序：透過嚴謹驗證流程與制度，驗證其穩定性與可用性後發給認證。商用元件應用於核能、太空等高可靠領域的制度驗證模式已具雛型，可作為太空應用參考。

4. (新和科技)蔡維達：新和科技是臺灣比較新的輻射照射場，輻射設備採用比利時 IBA 公司製造的電子加速器，屬於花瓣型加速器(非傳統迴旋加速器)，具備特殊加速軌道設計，可產生高強度電子束(10 MeV)。設有兩條產線：電子產線，可直接輸出固定能量的電子束，電子束最大電流為 6 mA，高強度電子束(10 MeV)；光子產線，透過靶材轉換產生 5~7 MeV 的光子(X 射線、 γ 射線)輻照，光子產線考慮轉換效率後，最大可達 30 mA，可提供高強度輻射照射服務。目前主要服務三大類客戶：醫療耗材與一次性器具的滅菌處理(如注射器、導管等產品的無菌處理)、食品與植物類產品的乾燥與滅菌(包括農產品殺菌、延長保存期限等)、材料改質與工業應用(如塑膠材料強度提升、交聯處理。部分應用已拓展至半導體材料輻照改質，經過輻射處理後性能可優化。
5. (國原院施圳豪)：有關太空太陽電池技術研發與飛行測試挑戰，國原院專注於太空用太陽電池的技術研發，從事與太空任務相關的工程開發與性能驗證。對於地面測試(如效率老化、加速老化模擬)雖符合標準規範，但與實際外太空環境仍存在差異。實際應用上，「飛行體測試」(in-orbit flight test)是不可或缺的最終驗證手段：現今僅有經過太空實測(飛行履歷)的太陽電池或電子元件，才能在市場上獲得信賴與應用。然而地面測試通過不等同實際可用，仍需飛行驗證。臺灣目前發射衛星的頻率有限、管道稀缺，多數任務由太空中心主導，自有任務有限開放搭載空間。再者，學術合作資源有限，可合作的老師或學校不多，部分業界廠商需將產品送至國外，尋求搭載機會進行飛行履歷測試。因此，建議應建立「國內飛行履歷測試平台」，讓國內研發團隊能更容易獲得飛行測試機會。加速研發週期，提高工程驗證效率，有助於推動國內太空科技自立與產業發展。
6. (國原院蔡雨利)：國原院專注於三五族(III-V)磊晶技術，包含：太陽電池(尤其是太空用太陽電池)功率元件、氮化鎵(GaN)與四元材料的磊晶製程，設有兩部有機金屬化合物化學氣相沉積法(MOCVD)機台：一台用於四元磊晶材料；另一台用於氮化鎵製程。現階段研究應用拓展至淨零與氫能應用(產氫相關結構)。雖然 MOCVD 設備昂貴且維護不易，但若學研或業界有合作需求，可提供相應磊晶製程服務。目前技術資源與設備資訊過於分散，多數研究者或業界人士「不知道哪裡可以取得所需設備或照射服務」。建議：如核資中心能協助建立「統一聯絡服務平台」，協助整合下列資訊與高能質子、中子照射服務，降低研發人員尋找設備或技術資源的門檻。

7. (儀科中心柯志忠): 國儀中心專注於薄膜製程設備開發, 也參與 EUV(極紫外)關鍵組件的檢測與技術平台建置及半導體製程設備技術研發, 並與台積電及其供應商有密切互動。台積電為全球使用 EUV 最多的公司, 對其供應鏈自製化具強烈誘因, 尤其在面對國際貿易風險, 提升本地供應自主性成為關鍵課題。期望能成功將部分薄膜製程設備技轉給國內廠商, 促成「量產化的國產設備」落地。國儀中心自今年起已建立 EUV 關鍵組件檢測平台, 可進行光罩、光阻等材料的性能測試。歡迎各界合作與投入 EUV 材料技術研發。建議未來相關計畫可著重鼓勵國內 EUV 關鍵材料與檢測設備的開發。未來當平台更成熟後, 將持續推動「EUV 檢測設備國產化」, 進一步強化臺灣的整體供應鏈能量。
8. (臺大蔡坤諭): 國原院對半導體跟太空這兩個很關鍵的產業, 投入相當資源。
- A. 背景與組織介紹: 臺大成立了「輻射應用及抗輻射技術研究中心」, 由四個學院的老師(醫學院、電資學院、工學院與農學院)組成。
- B. 對半導體人才與供應鏈的觀察: 台大因地緣關係, 早期學生對半導體產業參與度不高, 對台積電等企業連結感較低。然而, 隨國際化與外商進駐台北, 愈來愈多學生畢業後直接進入外商, 顯示國際鏈結與人才外流現象。建議各界對學生選擇及產業導向保持開放態度, 尊重世代思維差異; 並強調: 人才是可以被引導的, 只要方向堅定、理念清晰, 仍可推動基礎科研發展。
- C. 太空科技領域建議與平台建置: 台大輻射中心已向太空中心提出太空酬載提案, 參與「6U 立方衛星」任務: 中心不自製衛星, 由太空中心負責衛星總體任務。台大將搭載一顆 2U 酬載空間, 作為開放平台, 提供輻射感測器、自研製程/設計晶片、協助業界/學界完成地面測試的電子元件與材料, 進行實飛測試。
- D. 使用雷射模擬太空環境輻射前測試設備, 台大癌醫中心有重設備, 除了醫療用途, 也能協助進行雷射模擬驗證數據建構。台大願以輻射應用中心為平台, 協助整合各界資源。鼓勵更多大學與研究機構在實飛驗證、雷射模擬測試、資料建構與人才養成等方向共同努力。
9. (清大陳建旭): 原科中心的加速器實驗室主要是離子佈植或是離子照射。有關太陽能板的照射(電子束照射), 面臨問題就是電子元件不知道照射條件, 才能通過認證, 因此, 系統化的計畫將照射的規範建立, 非常重要。
- 10.(國原院葉彥顯): 對於太空科技中太陽電池的飛行驗證與電子照射測試瓶頸, 台大能提供開放式飛行驗證管道, 應可協助進行太陽電池等組件的實飛測試。太陽電池需模擬太空中受到的電子輻射環境, 常需低能量、高通量的電子照射條件。過去國內缺乏合適電子加速器, 導致測試效率極低。目前清華大學建置新電子照射系統, 應能對應此一需求。對於未來能進行更精準與完整的太陽電池輻射模擬測試可高度期待。
11. (國原院杜定賢): 有關中子能量等效性建立部分, 國外已有高能中子源(800 MeV、400 MeV 等高能中子加速器); 國內目前僅有 70 MeV 的中子能量。為了與國際接軌、提高模擬真實性, 建立中子照射的等效性模型非常關鍵。除了熱中子外還有快中子, 未來希望最高 60 MeV 的快中子。
12. (清大李志浩): 中子技術於半導體與太空計畫中的應用潛力方面
- A. 熱中子與輻射損傷研究的重要性: 在輻射損傷的研究中, 熱中子長期以來都是重要的研究對象。然而, 將此技術實際導入半導體產業中應用, 仍需具體場域與對接需求。
- B. 快中子應用與樣本需求通常需用大量樣本, 限制較多, 小樣本數的研究計畫難以通過審核, 中子反射儀(Neutron Reflectometer)對樣本厚度要求低(<100 nm),

非常適合薄膜製程相關應用。此外，成本相對低、裝置簡單、應用靈活的優勢，與繞射儀、小角度散射儀相比，反射儀更貼近產業應用需求。國原院可以考慮一下，中子反射儀。

C. 中子活化分析可用於材料元素分析，與半導體材料驗證有關。中子轉化摻雜 (Neutron Transmutation Doping, NTD) 對晶體材料(如 Si) 也具應用價值。可考慮未來納入國原院的中子實驗規劃與平台建設中。

13. 國原院回覆：現階段面臨問題：近年來補助經費逐年減少，限制學界使用國外中子源。此外國際 beam time 審核以前瞻基礎科學為主，國內產業導向研究較難申請成功。再者，藥品與關鍵樣品無法輕易運送至國外(含專利/機密性考量)，造成使用中子照射與影像分析困難。照射樣品若無法回收，將影響後續觀察與結構分析。因此，國內如有設施可提供就地服務，將大幅便利電子、電池與材料業者。會後與長官討論，是否進行設備增設或服務範圍擴展。

14. (陽明交大黃爾文)：中子與同步光源相關研究的資訊管理、資料整合及產業實務應用潛力：

A. 實驗數據管理與 Meta Data 整合推動：美國已積極推動 Meta Data (MTA) 管理體系，用以統整實驗背景、條件、樣品歷程等元數據。商業應用數據可上雲端管理。臺灣同步輻射光源(TLS)也將展開 Mini Workshop，邀請美國先進光源實驗室(ALS)數據科學家分享 Meta Data 系統實作經驗與管理機制。

B. 用戶養成與國際合作：將邀請美國 ORNL INS (SNS) 設備推動者於 6 月 10 日拜訪國原院並分享 SNS 建置經驗、Proposal 申請制度、用戶社群如何逐步養成的制度經驗。目標為臺灣未來設立中子設施，建立健全的用戶發展模式與申請機制做準備。

C. 資料管理差異化與示範機：相較於同步光源已有完整的資料與處理鏈，中子實驗在臺灣尚屬起步，可打造成為示範單位，建立完整數據管理體系，供後續科學與產業參考。

15. (長庚陳始明)：過去曾參與美國可靠度測試標準的撰寫工作，臺灣目前在制定可靠度量測標準方面仍有待補足，特別在中子輻射影響的測試標準與驗證設備上。由於中子輻射來自於地表宇宙射線中的次級輻射，因此，在半導體與車用電子部分，面臨極大挑戰。隨 IC 製程愈做愈小，其抗輻射能力反而下降，更敏感。汽車電子的 IC 也需面對嚴苛環境條件下的高可靠度要求，ISO 26262 是目前車用電子安全標準，明確要求半導體元件需通過中子輻射造成的瞬時錯誤(Single Event, SE)測試。現今台積電須赴美國進行 SE 測試，對產業形成瓶頸。臺灣若能建置中子源，可直接支援半導體廠商滿足 ISO 26262 測試需求，減少成本與測試時間並鞏固高可靠度車用電子市場布局。另一方面，鋰電池應用於電動車、儲能系統等領域，其安全與壽命問題高度仰賴結構與離子移動的觀測。中子在觀察鋰離子移動方面具有獨特優勢，臺灣若規劃中子源建置，可靠度測試應列為優先應用主軸之一。

16. (明新科大李憶興)：過去研究氧化物半導體薄膜電晶體(TFT)的元件製作與可靠度分析。元件應用目標為 X 光偵測器，屬於影像感測器中極為重要的光電轉換元件。濺鍍製程設備於「明新科技大學」，主要半導體元件製程於「陽明交大」。初期曾嘗試透過同步輻射設施進行輻射檢測，但遭遇幾個問題：(1)光束為單點、能量集中、面積小 → 無法覆蓋整個元件面積進行完整檢測，(2)不適合用於較大尺寸的薄膜電晶體元件的輻射反應研究。隨後至清大原科中心趙得勝博士獲得實驗資訊→開始展開更符合需求的輻射測試。建議：(1)建立快速資訊共享與

連結平台，強化研究社群的合作與應用能力；(2)建立具元件尺寸對應能力的輻射檢測資源，完成氧化物半導體薄膜電晶體元件在輻射環境下的可靠度檢測；(3)建立中子源或其他適用輻射平台，具備元件尺度匹配的照射區域與劑量控制能力。

17. (清大李志浩)補充回應：(1)目前臺灣中子相關測試需赴國外(如澳洲)進行，但 MF 計畫無法編列出國補助，改由研究人員自行以個人計畫申請出國經費，因而造成研究瓶頸。(2)國內「中子計畫」目前歸屬於同步輻射中心，但其預算逐年減少。(3)國外合作實例與成本問題：以澳洲為例，進行中子實驗的費用約每小時新台幣 3~4 萬元，澳洲政府雖有研究合作「補助性質」，但國內 MF 計畫有限制。建議開放 MF 等大型計畫對關鍵性國外測試的彈性經費支持，推動研究人員與國外大型設施之合作，提升實驗可行性與臺灣科學影響力。

18. 核安會林科長回覆：謝謝李教授的建議，MF 中子的計畫是這幾年才開始，淡江大學也有反應這個問題。經費限制主因來自於國科會，針對這一部份我們會反應這個問題，看後續有沒有解決方式。

19. (國原院陳柏聞)：國原院物理所專注於電漿物理，包括核融合、材料鍍膜技術、鋰電池材料(正負極製作)、氫能源開發(海水分解產氫與電催化產氫)。對於氫能源與電池可靠度研究中的技術挑戰：(1)嚴苛環境下的材料可靠度(如太空抗輻射或腐蝕性環境)；(2)核融合或高能粒子環境中，材料劣化機制成為關鍵因素；(3)鋰電池可靠度問題，固態電池於高速充放電時，表面會產生膨脹變形。中子束可望觀察鋰離子遷移與材料內部變化；(4)產氫過程中的材料應力問題，包括觸媒多採用磁性材料(如鐵鎳合金)，具產氫催化性、氣泡產生過程會瞬間造成電堆壓力上升與局部損壞。目前已與中研院、清大、中子計畫有初步合作與資源支援(如氣體分析)。建議未來中子照射設備開放線上排程與預約功能，讓研究人員能排程與預約，提前準備樣品安排測試以提升效率。

20. (儀科中心翁俊仁)：儀科中心研究主軸聚焦於 EUV 平台開發、偵測技術研發、奈米螢光鑽石作為 EUV 偵測器件。過去螢光鑽石送到西班牙照射費用高昂，一次送件成本約 50 萬元。國原院未來將有 70 MeV 迴旋加速器，若在臺灣完成輻照測試，大幅降低成本與提升效率。對於 EUV 偵測與人才培育推廣建議：(1)提前佈局人才培訓與平台宣傳；(2)舉辦說明會、與學術年會(物理年會)合作，擴大影響力；(3)邀請國原院擔任引言人或演講貴賓。

21. (儀科中心李昭德)：目前 MF 計畫聚焦於金屬多層膜機制與外光反射膜之研究。對國原院 70 MeV 加速器的建議：(1)增強精準醫療應用潛力，在醫療影像、癌症治療等方面發揮關鍵作用；(2)中子照射平台的申請使用的方式與流程與收費資訊透明化；人才培育與推廣方面，建議國原院可主動參與各學會年會(物理年會、光電年會、材料年會等)，透過年會加強人才培育與對外能見度。

附件三、第三場「精準放射醫療+人工智慧」座談會 會議紀錄 我國原子能科技決策支援體系建構計畫

時間：114 年 5 月 21 日 13:30-16:30

地點：台北榮民總醫院中正樓地下一樓腫瘤醫學部大會議室

主持人：核資中心郭瓊文

參加人員：核安會 綜規組 何承軒、陳文亮

國原院 李振弘、張明誠、倪于晴、彭正良、陳亮丞

台北榮總 劉裕明、邱宏仁、王昱豐、陳一璋

陽明交通大學 許世明、吳駿一；清華大學 陳芳馨

國泰醫院 侯貴圓；群創科技公司 李銘忻；量子科技公司 陳皇龍

核資中心 施建樑

報告：(參閱簡報資料)

1. 重粒子治療在臺北榮總的臨床經驗 劉裕明部長
2. 聚焦於癌：核醫精準診療核醫如何重塑癌症照護地圖 王昱豐理事長
3. 國原院放射診療藥物開發研究之規劃及 70 MeV 迴旋加速器之研究應用 張明誠副所長
4. 國原院放射成像之研究現況與未來規劃 倪于晴博士
5. 人工智慧技術在放射診療之應用研究 李銘忻博士

討論：

1. (核資中心施建樑)：核安會委託核資中心執行本計畫，主要是要檢討、規劃未來 MF 計畫之設定與分配等；而本座談會是由郭老師與本人構思，主要是要邀集各核醫藥物研究學研機構專家學者，提供幾份最新發展資訊的引言簡報外，告知國原院興建中 70 MeV 迴旋加速器之未來核醫藥物研發規劃，以共同討論因應全球趨勢與國內需求，在未來精準放射醫療研發的方向。也希望各位學者專家協助填寫以寄給各位的問卷並寄回，以便進行統計整理。
2. (陽明交大許世明)：感覺國內輻射教育很失敗，一般民眾對於輻射了解不足，將輻射等比於核電廠；而未能知道醫院內的 X 光照相、核醫藥物等，均屬於輻射應用的範疇。對於今天簡報有關 70 MeV 迴旋加速器興建、核醫藥物研發及人工智慧等議題，均感到十分有興趣，希望未來能有所參與。
3. (北榮邱宏仁)：的確國內對於輻射沒有完整了解，如各醫院廣設電腦斷層設備(CT)，導致增加國民輻射劑量。另十分贊同王昱豐理事長提到的 AI 在放射影像、治療與診斷等，可減少醫師判別負擔(loading)與診療一致性、提高工作效率及降低經費等優勢。建議未來可朝向 AI 的廣泛應用研發。
4. (北榮王昱豐)：國內核醫藥物之研發、申請臨床試驗與製造等，受到核安會與 TFDA 兩個主管機關之管制，以核醫學會理事長的身分呼籲，希望對於相關管制法規能給予鬆綁。
5. (國原院張明誠)：核安會與國科會的 MF 在核醫藥物研發應用方面，國原院由於從事這方面的研發，在核醫藥物臨床試驗之需求，而與醫院有所連結，今後仍希望繼續與各醫院合作。另有關與醫院之臨床試驗研究，又因為經費的限縮與藥物採購昂貴，經常每個計畫所能執行的病人數有限；希望在 MF 委託經費編列方面能有所寬鬆。此外，在輻射照射應用之推廣方面，如蘭陽博物館有此方面之需求，惟因為機構特性需透過宜蘭大學轉為委託，希望核安會能協助解決。

6. (國原院倪于晴)：做一些有關 MF 執行的心得分享。國原院放射成像團隊開發放射影像技術，並著重在利用本題跨領域合作；如與台大、中央及長庚大學有關岩石力學、水文與流體分析建模專家學者，在地質方面需要高解析度影像需求，相互結合串接一起，有了初步成果；但因沒有後續研究計畫支持而暫停，希望核安會能協助。另外，在失智症成像判斷，與各醫院之合作研究，也似乎是與核安會規劃重點不一而暫停，也希望核安會協助。
7. (群創科技李銘忻)：核安會歷年 MF 報告均置於官網，某些醫院 N3 報告題目與實驗內容，可能涉及第三方(國外大藥廠)衝突利益。建議類似 MF 計畫宜簽訂利益衝突條款，避免捲入利益衝突糾紛。從國家創新體系(National Innovation System)角度，重新思維 MF 的資源投入產出之效益，是否符合國家整體利益與策略規劃。雖體制上是由國科會公告與核定研發題目與經費，但實務上卻是 bottom up，由國原院 PI 與申請計畫之研究單位共同擬定題目與方向。因此，國原院提出 MF 題目名單清冊前，宜由單位主管說明整體研發布局方向，所產出成果與國原院整體目標互補程度。有些綁定多年期計畫，更應有明確階段目標，而非重複做第二次，或因標的不成熟，進度嚴重遲緩。更要注意避免主題不明確之酬庸性質 MF 題目。
8. (國原院陳亮丞)：對於 MF 每年的研究題目，近年來由於數量多相對經費少，導致品質下降；建議 MF 與其在精準放射醫療方面研究的廣度大，不如量少集中。
9. (國原院李振弘)：國原院同位素應用所過去利用 30 MeV 迴旋加速器，在 MF N3 計畫提供研究議題，並與各學會與醫院/大學連結合作；由於未來將朝向 Theranostics，但治療用核醫藥物研究經費更高，故建議不如集中幾個 500-600 萬元研究經費的計畫；另外，除了核醫藥物外，其他原子能民生應用研究亦應加強，以符合國家非核電家園的政策。
10. (國泰侯貴圓)：精準放射醫療之研究需要相當多人才，故應與學校有許多連結；在學會端，可以協助做新知識的推廣；AI 方面，可配合建置放射影像平台，如胰臟癌影像平台、個人精準治療計畫與生存期望期預測等。另利用大型模型在醫院端協助支持輻防檢查(參考美國 guidelines)、擷取病人臨床資料、接受輻射劑量估計、CT 診斷指標資訊等，提供給年輕醫生做為開檢查單的參考。
11. (北榮劉裕明)：台北榮總的重粒子加速器亦有提供給太空中心有關太空材料之抗輻射照射試驗研究，是屬於高能物理研究範疇；另外，北榮與清華大學合作之 BNCT 屬於綜合性研究與臨床實用；最後，未來亦希望與國原院合作。
12. (北榮陳一璋)：個人曾於 2001 年奉派前往日本京都大學學習 BNCT 臨床技術，日本在核能發電、核醫診療教育方面十分重視，並從小、中學即已深入紮根，有關輻射觀念知識十人普及化，可避免因恐懼而產生排斥。建議核安會參考。
13. (國原院彭正良)：個人負責協助核安會執行 MF 有關精準放射診療計畫之期中查訪，另說明 MF 之核定係由國科會最後決定的。請教李銘忻博士：繼 PSMA-11/PSMA-617 之後，下一個重磅核醫藥物為何?方向是甚麼?
14. (群創科技李銘忻)回覆：核研所當時停止發展 PSMA-56 治療用核醫藥物，決策過程太過粗糙。原先是設計母雞帶小雞的策略，先推展 Lu-177-PSMA-617 以每位病患 12.5 萬元新台幣的藥物成本，臺灣各大醫院進行多中心臨床

試驗，優先提供高品質藥物給臺灣民眾使用。藉由臨床案進展與經驗累積，順勢推展本土發展的更高品質與價格 1/3 之攝護腺癌治療藥物。可惜諾華今年(2025)已經取得 Lu-177-PSMA-617 TFDA 藥證(R00106)，已經喪失先機。下一個重磅藥物，國際研發進展迅速，FAPI-46 適合診斷藥物之態勢幾乎確定，治療用應該是諾華的 FAPI-2286。另外，CXCR4 的進展也相當優秀。由於環境與競爭變化太大，喪失先機的臺灣核藥研發，不應只是思考藥物單一變數，需要以提供市場 total solution 角度及前瞻布局與紮根，如同 AI 在 Drug Discovery 計畫之執行經驗與成果。最後，Ac-225 為下一代核醫藥物關鍵核種，不管使何種產製關鍵技術或是藥物標誌技術，均應提出完整技術佈局與時程表，包含進度的佐證資料。

15. (清大陳芳馨)：個人在清華大學核工系，參加清大利用 THOR 與陽明交通大學合作的 BNCT 臨床計畫。目前，已朝向以加速器為 base 來提供熱中源。但是 THOR 仍有其不可取代性，如 Lu-177 放射性核種，只能利用研究用反應器製產，目前已在進行 THOR 之設計修改中。另目前在 BNCT 使用的核醫藥物為腦瘤的 BTA，清大也在進行如胰臟癌、肺癌、乳癌的新藥物開發，希望核安會能給予支持。
16. (陽明交大吳駿一)：今天了解到最新的知識，也看到國原院規劃 70 MeV 迴旋加速器，未來將研發產製新的放射性核種；目前有分成 α 與 β 兩派，以 BNCT 使用 α 粒子，個人期許朝 α 方向研究，利用 70 MeV 迴旋加速器做出以學術基礎研究的核種。
17. (量子科技陳皇龍)：今天是來學習的，個人從事有關輻防之評估與實務工作，希望未來能透過媒合將學研機構之研發成果(如 X 光機開發)轉介給產業使用。
18. (核安會何承軒)：說明 MF(略)
19. 參觀重粒子中心

會議結束：17：30

附件四、第四場「次世代核能技術+人工智慧」座談會 會議紀錄

我國原子能科技決策支援體系建構計畫

時間：114 年 6 月 3 日 09:30-12:30

地點：清華大學李存敏館 204 室

主持人：核新協會 王仲容

參加人員：核安會 簡郁珊、張禕庭、何承軒、莊方慈、陳文亮

國原院 馬維揚、董曉明、陳仲遠

清華大學 李志浩、蔡惠予、劉千田；成功大學 張博宇；

中央大學 曾有志

核資中心 郭瓊文 施建樑；核協會 廖識鴻、陳條宗、宋大崙

簡報報告：

1. 人工智慧技術在次世代核能技術之應用研究(SMR) 李志浩教授
2. 國原院小型模組化反應器(SMR)研究規劃 陳仲遠副研究員
3. 低活化核融合材料發展現況 曾有志副教授
4. 核融合電漿控制及在人工智慧應用 張博宇所長
5. 人工智慧於次世代核能技術之應用 董曉明研究員

討論：

1. 國原院馬維揚所長：本人也是清華核工系畢業，過去主要在核能、太陽能及核融合等領域均有涉獵。針對李志浩教授的簡報，其中之微型反應器(Micro Reactor)，可追溯到於 1972 年在西非發現的 OKLO 天然核反應場；目前之微型反應器之設計已達 50-60 MWe 的功率，並稱 2027-28 年可望完成；然是否符合 IAEA 或美國之法規，廢棄物如何處理是關鍵因素之一。至於曾有志教授的簡報，由於快中子的破壞性很大，可能 6-10 個月就必須更換周遭關鍵材料，故該計畫十分重要；中國的快中子反應器於 2030 年要完工；核融合產生的核廢棄物可利用乾貯系統來處理，且核融合不需要有傳統商業型電廠圍阻體。國原院董曉明簡報中的利用 AI 技術執行核電運轉監測，可預測電廠之行為等。
2. 清華大學李志浩教授：SMR 的研究以人才最為重要，故只要薪資夠高並具有中子源設施，就可吸引並留下人才。以臺灣與韓國來比較，臺灣有關 SMR 之研究經費據國原院簡報每年約有 1 億元 NT\$，而韓國則亦為 1 億元 USD；而在 AI 與核融合之研究經費臺灣有逐年增加之趨勢；國原院物理所曾有從事在 DT 核融合之研究，但隨著人員退休亦已中斷。
3. 核資中心施建樑顧問：建議在 SMR 之研究計畫中，應加入產業建立之調查與研析等工作，以健全未來之國內核能工業體系。
4. 核協會廖識鴻顧問：個人於「次世代核能技術+人工智慧」提供之意見如下：
(1)有關次世代核能使用之高成分低濃縮鈾(HALEU)過去原尋求俄羅斯廠商 Rosatom 之子公司 TENEX 來供應，但俄烏戰爭後就不再供應，美國能源部規劃構建完整的 HALEU 供應鏈，將尋求由 BWXT(Nuclear Fuel Services)、Centrus Energy、Framatom、GE Vernova、Orano、Westinghouse、Urenco 與 General Matter 等廠商製造供應。
(2)所製造 HALEU 第一輪供應對象選定 X-Energy、TerraPower、Kairos Power、Radiant 與 Westinghouse 等 5 家發展先進核反應器廠商，顯見這 5 家的 SMR/MMR 很可能是 DOE 認為較早能完成核反器的機組。

(3)有關慣性拘束核融合(Inertial Confinement Fusion, ICF)反應器在美國國家點燃設施(National Ignition Facility, NIF)完成數次 $Q>1$ 試驗，但未計入雷射消耗 300 MJ 能量，目前重點除繼續提高 Q 值外，在加強提升 Laser 效能，減少能量消耗，DOE 已另尋求 2 家核融合專業廠商研究提升 Laser 效能。

(4)有關 AI 於核能之應用，SMR 已有一些實際導入 AI 案例，如 NuScale、BWRX-300 等都已建置 Digital Twin，但目前仍著重在設計優化、智慧監測與預測式維護(Predicted Maintenance)。

(5)考量 AI 使用於核能有其侷限性，要兼顧各廠商資訊隱密性與共通性，尤其核能監管疑慮，IAEA 於 2024 年啟動核能 AI 轉型倡議(AI for Nuclear Transformation Initiative)，值得密切注意其發展。

5. 核新協會黃慶村顧問：由今天的各簡報，大致了解國內次世代核能之發展情形，但與韓國比較是失敗的，無論在政策目標或是要保留實力，對產業發展是失敗的；故核能界第一線的人應走那些路線，要有共識；況且我們國小人力少，更應相互多合作。國原院領導 SMR 計畫，應注重人才培養，另應有大氣魄與外界合作共同發展。熔鹽式反應爐可一起解決核廢棄物問題，適合我國發展；鈦基反應器不需要有濃縮核物料，燃料不受限制，亦為另一選擇。

6. 核協會陳條宗顧問：次世代核能技術應可分三個階段：1)近程技術 - 慢中子核分裂，2)中程技術-快中子核分裂，3)遠程技術-核融合。詳說明如下：

(1)近程技術以輕水式慢中子核分裂目前最成熟之技術。其中個人推薦小型模組化 iPWR，而不推薦第三代大型核反應器。理由是：

A. 第三代大型核反應器設計主要目標為降低核心熔毀機率和使用被動式安全系統。導致單一圍阻體變成雙重圍阻體；兩串安全等級交流電源變成三串安全等級交流電源；安全等級直流電源要求由 8 或 24 小時容量變成 72 小時容量；冷卻水貯存槽由室外改到圍阻體室內；甚至於為達被動式安全，將水槽安置在高處以期在事故時借重力灌入爐心，但卻忘了需先啟動安全隔離閥，水才能由高處借重力灌入爐心，所謂被動式仍需主動式開啟隔離閥，只不過由馬達驅動式隔離閥改為氣壓驅動式隔離閥；另水槽安置在高處增加地震之危險度。造價也因此不斷增加。

B. 而 iPWR(例如 NuScale)之發展來自核潛艇。因核潛艇空間狹小，將蒸氣產生器和調壓器併入反應器內，並取消一次側冷卻水泵，採用冷卻水自然循環。一次側冷卻水在反應器內自然循環，沒有大口徑管路，所以，沒有傳統式最大設計基準事故 Large Pipe Break LOCA。因為作戰需求，事故時無法以抽取海水當最終熱沉，而改將反應器置於水池中以反應器水池為最終熱沉，發展出 30 天內以反應器水池中水之自然循環和蒸發冷卻爐心，30 天後以空氣自然循環冷卻爐心，即達到安全狀態。另反應器水池中水亦可提供屏蔽和減震效果。也因核潛艇空間狹小，設計儘量須考慮採用固有安全設計概念，而非增加昂貴之安全系統。結果由第三代大型核反應器需要 28 個安全系統，降低到僅需要 8 個安全系統。另因核潛艇需長期潛入水中，不可設置柴油發電機，而發展出事故時不需要使用交流或直流電來確保安全。使用柴油發電機需燃燒大量氧氣，造成核潛艇需浮出水面補充氧氣。

(2)放射性廢棄物可分為低放射性廢棄物和用過核子燃料。低放射性廢棄物又可分為運轉廢棄物和除役廢棄物。運轉廢棄物因一次側冷卻水集中反應器內水量和污染範圍均減少，故運轉廢棄物必然減少。除役廢棄物因中子洩漏率可能增加，而造成活化輻射強度增加。但因中子穿透率相似，除役廢棄物體積增加有限。而將來低放射性廢棄物最終處置若採坑道處置，最重要因素為體積而非輻射量。用

過核子燃料雖然也因中子洩漏率增加，可能產量增加，但目前 NuScale 安全分析報告顯示平均燃耗和最大燃耗卻和傳統式大型反應器相似，所以，除非廠商數據有誤，用過燃料產量增加應相當有限。

(3)有關小型模組化反應器地震設計，目前似乎仍維持傳統大型核電廠方式建立地震設計頻譜，而不是採用建基規則產生之頻譜。如此，若想在工業區或火力電廠場區建小型模組化反應器，依過去經驗建立地震設計頻譜需約 3 至 5 年才能達到共識。另傳統大型核電廠要求反應器必須直接安裝在岩盤上，個人目前尚未找到法規是否修改，如果沒有修改則許多工業區或火力電廠場區，則均無法興建小型模組化反應器。

(4)BWRX 和 Terra Power 均公告已經開始動工，據我所知，其設計尚未完成，執照尚未取得，請問如何取得開工許可？若將來被要求修改設計，請問已製造或興建之設備或設施如何因應？

(5)有關 SMR 認證與執照現況，除 NuScale 已獲 NRC 認證外，BWRX-300 已通過加拿大核管會第二階段審核通過，預定 2025 開工、2029 完工。另 TVA 已向 NRC 提出建造 BWRX-300 的施工建造申請(Construction Permit Application, CPA)。

(6)有關美國 SMR 耐震設計，BWRX-300 的 SSE=0.3 g、NuScale=0.5 g，均為標準設計值，應未考慮 SSHAC Level 耐震要求，為日本 IHI 與 NuScale 合作之耐震設計=1.1 g。

(7)目前各國發展 SMR，因考量初創(First-of-a-kind)成本極高，絕大部分都由國家資助發展，建議國原院極力向政府爭較高額預算來建置 SMR 國家隊。

7. 清華大學蔡惠予教授：請教曾有志教授所提的低活合金材料，要落實到量產有何方法？成功大學張博宇所長提到的 energy gain 是否已達到平衡？有哪些研究議題？董曉明研究員簡報內的 NDT 渦流檢測為何？國原院的對外合作朝哪些具體方向？

8. 成功大學張博宇所長：國原院在核融合研究，其人才與設施是重要的；但國原院法人化後會有其風險存在，因為科研需要有政府支持才行；另核融合何時才能成功，一般說法，time frame 仍需要 20-30 年才行。

9. 中央大學曾有志教授：合金材料是”不打不成器”，高溫塑形。而 $0 \times \text{任何數} = 0$ ，故 0 至 1 才有希望；核融合仍有 30 年要走，人才經費是重要的。

10. 國原院董曉明研究員：AI 運用在渦流檢測，因為其圖像較易辨認，且實務上有其需要，故先從 NDT 進入。AI 辨認，數據最為重要；故能應用在除役、視覺性、乾式密封鋼筒檢查。

11. 國原院陳仲遠副研員：國原院 SMR 四年期新計畫，在 2-3 年前即開始蘊量，並獲得陳主委的支持，一開始以保守謹慎態度，執行基礎研究並與學校合作方式來推動。國原院原能所在爐心專長人員已有十多年未進新人。後續仍有規劃計畫，在產業規劃與外界產業鏈將由台塑重工主導；另將擴展國際與美國的聯繫，以相互協助。

12. 核資中心郭瓊文董事長：核資中心出版「核後端雙月刊」，請惠予指導。計畫部分，本計畫是核安會共同委託給核資中心與核新協會來執行。計畫內容包括：「原子能民生應用研究」及「次世代核能技術研究」。另本計畫未來將協助建置資訊網頁平台，提供各界研究人才、資訊之查詢與分享。

13. 核安會簡郁珊科長：本計畫有提供新知識的交流，將進一步了解。

會議結束：13：40