

核能安全委員會委託研究期末報告

113 年度我國原子能施政支援體系建構計畫
(NSC11212059L)
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 113 年 12 月

目 錄

	頁次
圖目錄	ii
表目錄	iii
中文摘要	iv
Abstract	v
一、前言	1
二、原子能科技民生應用趨勢研析	3
(一)本年度計畫執行原則	3
(二)國內技術支援機構訪談	4
(三)國內技術支援組織執行原子能民生應用之過去、現在與未來	5
(四)各國/組織原子能科研資訊蒐集與研析	17
(五)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	25
(六)國內各產業發展現況盤點規劃	27
三、次世代核能技術研析及發展策略研析	33
(一)國際核融合計畫與相關技術發展	33
(二)小型模組化反應器(SMR)於各國發展類別	42
(三)各國合作及相關管制單位資料蒐集	57
四、討論	71
(一)原子能科技民生應用趨勢研析	71
(二)次世代核能技術研析及發展策略研析	74
五、結論與建議	77
(一)結論	77
(二)建議	79
參考文獻	81
附件一、原子能科技學術合作研究計畫-MF	88
附件二、原子能科技民生應用科技計畫-核安會科技計畫	94
附件三、次世代核能技術議題及國內人才需求	103

圖目錄

	<u>頁次</u>
圖 2-1 國原院物理所近年核心研發技術	7
圖 2-2 國原院物理所近年核心研發技術	7
圖 2-3 國原院物理所在太空電池之研究現況	7
圖 2-4 國原院同位素應用組所提供之核醫藥物產製與研發功能及特色	8
圖 2-5 國原院核醫製藥中心生產之 6 項核醫製劑	9
圖 2-6 國原院碘-123 MIBG 商品化試驗階段歷程	9
圖 2-7 國原院肝功能造影劑(鎳 68-多蕾克鎳)之開發現況與優勢器	10
圖 2-8 國內各型迴旋加速器之設置與應用	11
圖 2-9 70 MeV 中型迴旋加速器建製里程碑	11
圖 3-1 托卡馬裝置示意圖	39
圖 3-2 天星號環狀磁場配置示意圖	39
圖 3-3 核融合發電電廠之氘/氚燃料循環示意圖	40
圖 3-4 聚界潔能 EESG 教育系統樣品	40
圖 3-5 聚界潔能核融合離子束教育設備	41
圖 3-6 國立臺灣師範大學陽傑冷融合實驗室	41
圖 3-7 Nuscale SMR 電廠示意圖	50
圖 3-8 SMART 螺旋蒸汽發生器模型	50
圖 3-9 SMART 組件與安全系統測試迴路	51
圖 3-10 TRISO 塗層顆粒的球形燃料	51
圖 3-11 TRISO 塗層顆粒的棱柱形燃料	52
圖 3-12 日本 HTTR 高溫氣冷反應器與參數	53
圖 3-13 液態金屬反應器模式圖	53
圖 3-14 日本東芝 4S SMR 電廠示意圖與參數	54
圖 3-15 SEALER 電廠示意圖與參數	54
圖 3-16 MSR 分類	55
圖 3-17 ThorCon 電廠與關鍵組件示意圖	55
圖 3-18 ThorCon 燃料循環流量圖	56
圖 3-19 微型反應器 MMR(MoveluX)	56
圖 3-20 MoveluX 爐心水平橫截面	57

表目錄

	頁次
表 2-1 70 MeV 中型迴旋加速器未來可開發放射性同位素及其臨床應用	12
表 2-2 國內各醫院質子、重粒子與中子捕獲治療設備之引進與申照現況	14
表 2-3 IAEA、歐盟、美國、日本、中國蒐集資料所對應領域(112 年先期計畫)	18
表 2-4 本計畫所蒐集之主要國家/組織原子能科研資訊清單	21
表 2-5 108-113 年度原子能科技學術合作研究計畫-MF 統計(補助計畫件數)	27
表 2-6 108-115 年度原子能科技民生應用科技計畫-核安會+國原院統計(件)	27
表 2-7 國內原子能科技學術合作研究計畫(MF)所對應技術支援機構及其負責	28
表 2-8 原子能民生應用-核安會+國原院委託計畫所對應技術支援機構及其負責 人	32
表 3-1 ARIS 資料庫內 PWR 現行登入模組	47
表 3-2 ARIS 資料庫內 HTGR 現行登入模組	48
表 3-3 ARIS 資料庫內液態金屬反應器現行登入模組	48
表 3-4 ARIS 資料庫內 MSR 現行登入模組	49

中文摘要

原子能民生應用科技已廣泛應用於醫、農、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、農、工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，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，將於 113-116 年為期四年推動「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。

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

The application of atomic energy technology to benefit people's livelihood has been widely used in fields related to medicine, agriculture, industry and environmental sustainability. Therefore, it has been listed as a key area of sustainable scientific and technological development in various countries. In the past development process of the application of atomic energy science and technology to people's livelihood, we also have established a very good national foundation and achievements in the development and application of atomic energy (including nuclear, radiation and other technologies) in the fields of medicine, agriculture, industry and other fields. The Nuclear Energy Safety Commission (hereinafter referred to as the NSC) has formulated a strategic blueprint for the development of atomic energy technology for people's livelihood applications from 2022 to 2025. During the implementation phase, this medium-term plan will refer to this strategic blueprint to plan and analyze information from key organizations and countries worldwide. This information includes the analysis of the atomic energy scientific research system, important policies and possible cooperation channels. Additionally, recent developments in next-generation nuclear energy technologies such as small modular reactors (SMR) and nuclear fusion have been highlighted in domestic and foreign media, and has also attracted the attention of the domestic public. Consequently, discussions, research and analysis on these next-generation nuclear energy technologies such as SMR and nuclear fusion should be prepared and completed as soon as possible. Policy recommendations for the atomic energy science and technology decision-making support system should be developed based on the current status and development potential of relevant domestic industries, talent training conditions, national development orientation and other factors. To align with the NSC's policy goals, the "Establishment of the National Atomic Energy Science and Technology Decision Support System" will be promoted over four years, from 2024 to 2027, and will be divided into sub-

projects: "Research and Analysis of Atomic Energy Technology and Application Trends for People's Livelihood " and "Research and Analysis of Next-Generation Nuclear Energy Technology and Development Strategy". These two sub-projects will be entrusted to legal entities for implementation on an annual basis.

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

一、前言

鑑於原子能民生應用科技已廣泛應用於醫、農、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、農、工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]，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，將利用 113-116 年為期四年，來推動「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。

有關核資中心 113 年度負責的部分，包括：持續 112 年度先期研究，繼續執行各國/組織原子能科研資訊蒐集與研析；並對於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；最後，再對於國內近年執行上述原子能民生應用科研計畫的組織與成員，以其目前相關產業發展之狀況作一簡述。

至於核新協會 113 年度負責的部分，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。

再於第四章就上述第二、三章執行情形作討論；最後，並於第五章對本

年度本計畫上述兩項分別作一結論，並分別提出其建議。

二、原子能科技民生應用趨勢研析

(一)本年度計畫執行原則

本年度計畫之執行方向與範圍原則如下：

1. 先期研究所蒐集五個國家/組織，應另增加韓國；參照 111-114 年的策略藍圖所劃分八大領域，即「精準放射醫療」、「糧食和農業」、「環境與水資源」、「量子科技」、「中子科技」、「太空科技」、「工業應用」及「半導體製程」，另增加「人工智慧」成為九項，進行分類；核資中心亦可參照國內外發展情勢，給予合併或再增加。另應參照行政院最新國家科技發展規劃(希望工程內容)，將人工智慧、軍工與半導體納入，其中之軍工可對應到九大領域的太空科技。
2. 核醫藥物：是國內原子能科技民生應用九大領域中，發展最為蓬勃的領域；這可歸功於過去 30 多年來，國原院與各大學醫學院和醫院之積極參與。建議新藥的研發，可著重臨床前期的部分，再伺機技轉給藥廠做下一步人體試驗與藥證申請；在放射醫材、造影設備方面，建議著重於客製化與小眾市場。可詢問國原院同位素應用所與輻射防護所未來規劃，將之放入政策中；另可舉辦座談會或拜訪國內核醫相關學會或大醫院，以瞭解未來之核醫研發需求。
3. 輻射照射：可請中國生化公司提供國內消毒、抑制發芽等輻照產業現況及未來業務開發之方向。另近來 MF 補助多項研究計畫給中興大學、嘉義大學、屏東科大、澎湖科大與農業試驗所，進行九重葛、玉葉金花、毛豆、大豆、蘭花及日日春誘變育種；建議與國原院同位素應用所討論未來規劃。
4. 半導體：由於國內產業已走在前端，不需政府扶持；應著重於培育人才，如何降低設備對進口的依賴，應加強自主化。重點仍是離子佈植、電漿物理技術、微影，這些都涉及元件供應鏈，可詢問國原院物理組、學界(如清華大學半導體學院、台大電機、電子相關院系等)。
5. 量子技術、中子科技：由於技術屬於前瞻者，MF 計畫亦只要著重於培育人才，可詢問國原院物理組、學界之意見。另中子源國內有清華大學之

水池式反應器從事與陽明交通大學合作的硼中子捕獲治療(BNCT)治療及其他經中子活化之檢測等；國原院近期在其 30 MeV 迴旋加速器新建置的中子射束，將與太空中心合作執行晶片受太空輻射照射造成之損害測試。

6. 人工智慧(AI)：榮總放射影像輔助，可詢問國原院同位素應用所或輻射防護所。另可參考國際原子能總署(IAEA)有關 AI 的報告中，尋找國內相關的原子能民生應用之產業發展方向。
7. 太空科技：以往的人造衛星使用年限為 20-30 年，故注重輻照材料損害與老化；現在低軌道衛星大約 5 年即更換，重點應著重在輻射干擾、輻射效應、訊號反轉(SEE)及輻射硬度品質(Radiation Hardness Quality, RHQ)等。
8. 質子照射：台大醫院質子加速器成立第五實驗室，提供做為元件照射之測試或研發資源。可在期末報告中提出國內可執行質子照射的地點，如林口/高雄長庚醫院、台大醫院；另外，還有台北醫學院亦即將運轉；台北榮總醫院屬重粒子加速器。其中短脈衝雷射照射晶片，可作為初步篩選之用。
9. 115-118 策略藍圖編撰：可沿用 111-114 年的格式，或依照 113-114 年蒐集資訊修改為新內容格式，將數據更新，著重 AI、半導體、太空科技的內容。產業市場調查的資料，可詢問國原院能源經濟團隊，參考其在市場產業蒐集之資訊。
10. 期末報告可自訂內容格式來編撰；在”報告”內說明我國民生應用的現況，後續著重未來的研發，如何提升產值；期末報告亦可參考聯合國 SDG 永續發展目標。

(二)國內技術支援機構訪談

核資中心除了於計畫開始先與核安會進行首次會議外，亦於 113 年 4 月 30 日拜訪清華大學工科系張○○○系主任、原科中心趙○○博士，會議中與兩位討論清華大學原科院近期在太空元件的軟硬體測試/模擬宇宙射線的輻射損傷研究；離子布植機(相當於小型加速器)應用於材料改質、表面材料改質、

材料合成方面之研究；SOI 機板、薄膜層轉移、中子轉化參雜等，以及在 BNCT 治療方面之進展與成果等；會議紀錄如附件一。另於 113 年 5 月 10 日拜訪群 ○ 生物科技公司李 ○ ○ 董事長，請益有關國內外核醫之研發現況，會議紀錄如附件二。另外，為了瞭解國內各大醫科大學及醫院對於國內核醫發展的想法與預期，本中心特別草擬相關問題詢問中華民國核醫學學會(以下簡稱核醫學會)，問題包括有：(1)國科會與核安會 MF 計畫所補助的方向與題目，是否吻合國內外研究趨勢？(2)核醫藥物於腫瘤治療的議題是否有應納入未來亟待研發的？(3)國原院「70 MeV 中型迴旋加速器」案，核醫學會有否其他研究議題或藥物開發等的建議？(4)其他？核醫學會的回覆如附件三。

國原院為國內最具規模且最完整的原子能科技研究機構，故執行本計畫前有必要先拜訪國原院如同位素應用所、輻射防護所及物理所等相關人員[4, 5]；特別於 113 年 6 月 14 日上午拜訪同位素應用所，主要是詢問國原院有關未來核醫藥物之研發現狀與規劃、中子與質子科學應用研究-70 MeV 中型迴旋加速器建置計畫，以及輻射照射之現況與規劃等，會議紀錄如附件四；113 年 6 月 14 日下午拜訪綜合企劃處、輻射防護所與物理所，則是詢問國原院有關原子能民生應用之研發現況與規劃、放射成像、太空科技與太陽電池等，會議紀錄如附件五。

最後，核資中心於 113 年 10 月 11 日拜訪清華大學核工所、工科系與原科中心，並和與會老師們進行座談，由核資中心向老師們說明”我國原子能科技決策支援體系建構計畫緣由與計畫執行現況”。希望能藉由與各位老師之溝通，讓老師們瞭解何謂”原子能安全管理技術支援組織”，以及核安會為了調查與建立國內原子能安全管理技術能力與組織之想法；另在座談前，由核資中心準備問卷調查表並分發給各位老師填寫，計回收 10 位老師的問卷，問卷回饋之意見與建議，包括部分行政管理意見及未來委託研究議題，將於本報告的討論中向核安會反映；會議紀錄如附件六。

(三)國內技術支援組織執行原子能民生應用之過去、現在與未來

另外，在上述幾次訪談中蒐集到的各機構過去/現在研發成果及/或未來規劃、有關政府新近在國家科技發展規劃文件，以及聯合國 17 個永續發展目標

(Sustainable Development Goals, SDGs)，與 IAEA 核技術如何扣合及與本計畫在原子能科技民生應用如何結合，將一一分別說明如下：

1. 有關物理所提供之近年核心研發技術如圖 2-1 [2]所示，物理所過去 10-20 年間，主要集中在高、低溫電漿技術之開發與應用，也因而衍伸出許多周邊相關技術(如圖 2-1 所示)；以本報告所定義之原子能科技民生應用八(或七)大領域來區分的話，可列舉其中之核融合及太空電池兩項分如圖 2-2, 2-3 [2]，前者目前已有一國科會支持的跨機關的「核融合磁約束高溫電漿」整合型研究計畫，由國原院物理所擔任主持人，並由清華大學、成大與國網中心共同參與。後者為太空電池，主要是人造衛星使用的太陽電池，以作為人造衛星的電力管理系統之核心元件，提供人造衛星源源不絕的電力供人造衛星順利執行太空任務；將利用本院自行研發之衛星用砷化鎵太陽電池之最佳轉換效率突破 30%，已臻國際水準，並以國原院既有技術增值應用於衛星太陽電池開發，提升太空產業關鍵組件之自製率，達成技術自主化目標，將依循國際測試標準 ECSS-E-ST-20-08C 進行輻射環境耐久度驗證，以確保電池在衛星使用期程內保有優異之性能。

物理所核心研發技術



圖 2-1 國原院物理所近年核心研發技術[2]

核融合

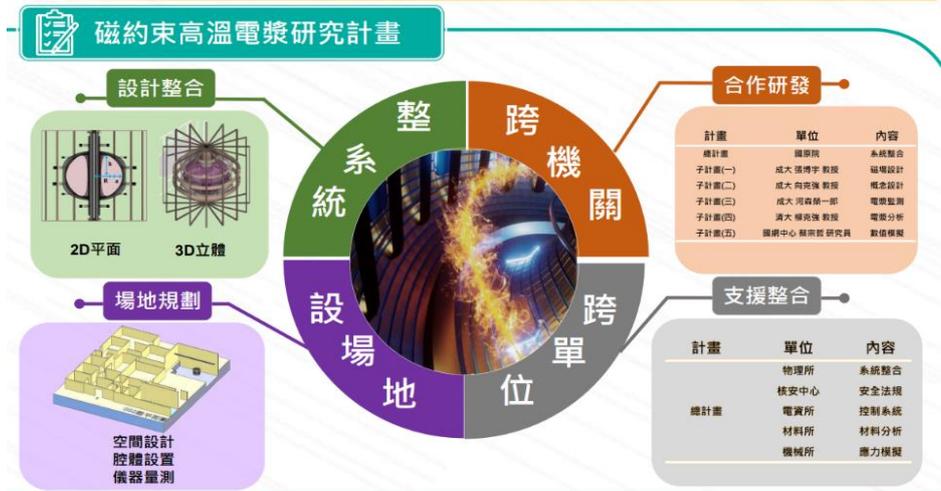


圖 2-2 國原院物理所近年核心研發技術[2]



太空電池

研發目的

- 應用情境**
人造衛星用之太陽電池作為人造衛星的電力管理系統之核心元件，主要為提供人造衛星源源不絕的電力以讓人造衛星順利執行太空任務
- 解決問題**
以既有技術加值應用於衛星太陽電池開發，提升太空產業關鍵組件之自製率，達成技術自主化目標
- 照片示意**

4吋太陽電池晶圓

切割後受光面積
30.18cm²之太陽電池晶片

技術特色

- 本院自行研發之衛星用**砷化鎵太陽電池**之最佳轉換效率突破30%，已臻國際水準
- 自製之電池同步依循國際測試標準ECSS-E-ST-20-08C進行輻射環境耐久度驗證，確保電池在衛星使用期內保有優異之性能

圖 2-3 國原院物理所在太空電池之研究現況[2]

2. 有關同位素應用組所提供之核醫藥物產製與研發功能及特色如圖 2-4 所示[3]，其發展願景為強化迴旋加速器與輻射照射應用研究，提供國內穩定供藥及產業需求；提升精準核醫診療藥物、生技製藥研發與分子影像分析技術，成為我國精準健康戰略產業之重要研究專業場域。目前同位素應用組核醫製藥中心生產的核醫製劑有 6 種如圖 2-5 [3]，包括有：核研雙胱乙酯腦造影劑、核研氯化亞鈾(鈾-201)注射劑、核研美必鎔心臟造影劑、核研心交碘-123 注射劑、核研檸檬酸鎩(鎩-67)注射劑及核研馬格鎔腎功能造影劑；其中，以核研氯化亞鈾(鈾-201)注射劑為最暢銷藥劑。而核研心交碘-123 注射劑則是國原院最新開發上市的藥劑，且其為最被國內各大醫院所關切的藥劑，以下就其臨床試驗與商品化階段，分別說明其開發歷程：其臨床試驗階段如圖 2-6 [4]所示，係在 93 年於台中榮總進行台灣第一位受試者的碘-123 MIBG 臨床試驗；98-101 年在臺大醫院兒醫科，進行 80 例神經母細胞瘤學術臨床試驗；104 年 9 月 25 日衛福部同意免除銜接性試驗；106 年開始申請藥品查驗登記；108 年 9 月 4 日獲得我國藥品許可證；111 年 5 月 20 日衛福部核定有效期至 10 小時。緊接著進入商品化階段如圖 2-7 [4]所示，111 年 5 月 19 日~迄今穩定供藥支持醫界臨床試驗，已供應 26 批次共 57 劑；112 年完成擴量生產線硬體建置，符合 PIC/S GMP 規範的無菌製備；113 年藥品許可證通過展延(有效期至 118 年 9 月 4 日)；預計於 114-115 年間通過 PIC/S GMP 認證。



圖 2-4 國原院同位素應用組所提供之核醫藥物產製與研發功能及特色[3]

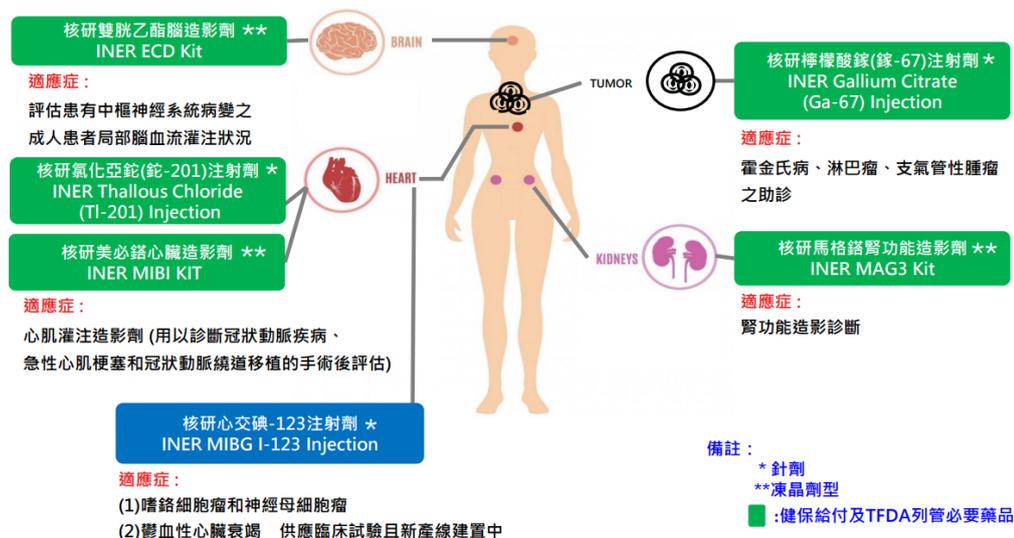


圖 2-5 國原院核醫製藥中心生產之 6 項核醫製劑[3]



圖 2-6 國原院碘-123 MIBG 商品化試驗階段歷程[3]

3. 此外，國原院同位素應用所這幾年來，一直從事於肝功能造影劑(鎳 68-多蕾克鎳)之開發(如圖 2-7 [4]所示)，於林口長庚紀念醫院，完成肝功能造影劑(鎳 68-多蕾克鎳)肝癌切肝族群二期臨床試驗 30 例；並於和信治癌中心醫院，完成 2 例轉移性肝癌學術臨床試驗。「以鎳 68-多蕾克鎳評估肝癌病人接受質子治療前後的肝功能評估」學術臨床試驗：112 年 5 月 31 日獲 TFDA 核准，112 年 9 月 14 日林口長庚醫院 IRB 審核通過，113 年預計完成 6 例造影。

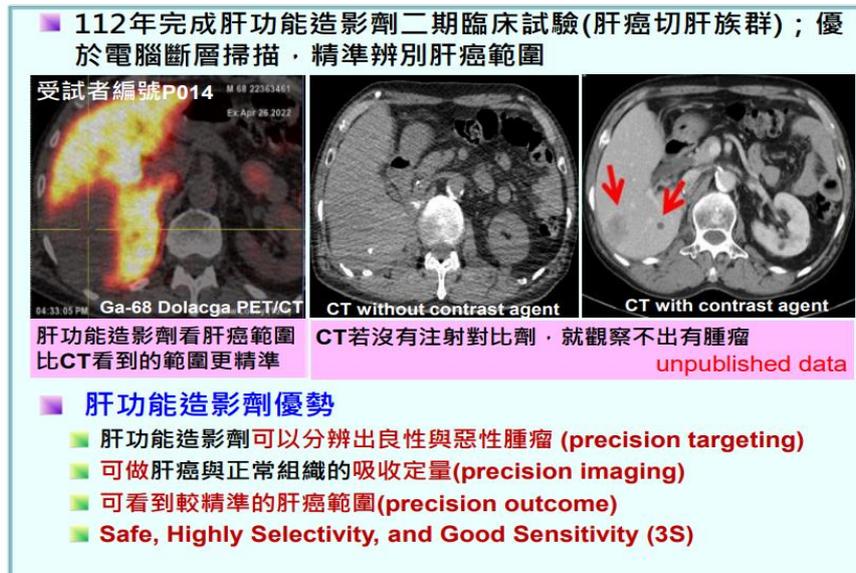


圖 2-7 國原院肝功能造影劑(鎩 68-多蕾克鎩)之開發現況與優勢[4]

4. 國原院近年在原子能民生應用領域最大的研發計畫是：「70 MeV 中型迴旋加速器建置」；如圖 2-8 [4]所示，國內目前在各大醫院共有 12 座 9.6 至 18 MeV 的小型迴旋加速器、國原院早期興建的 15 至 30 MeV 中型迴旋加速以及 3 台建製於林口、高雄長庚醫院與北醫附設醫院的 70-230 高能質子迴旋加速器；其中獨缺 28-70 MeV 的中型迴旋加速器。故於 110 年 10 月 21 日獲得行政院核定，預計 112~115 年間於國原院興建；詳細的里程碑如圖 2-9 [4]所示。其目的包括：提高核醫藥物穩定供藥，造福國人健康；開發癌症精準診療新藥物與新技術；拓展衛星與半導體耐輻射檢測技術；以及擴展質子與中子前瞻材料應用。且該加速器將是多功能性設計，其針對靶室之設計規劃有：(1)固體靶 1(未來可擴充至 2,3)→生產 Tl-201, Ac-225, Cu-67, Sr-82 等核種；(2)氣體靶→生產 I-123；(3)質子照射→衛星電子元件 70 MeV, $1 \mu\text{A}$；(4)熱中子靶站(中子照相、繞射等)→Be/Ta, 28 MeV, 500/1,000 $\mu\text{A}</math>；(5)快中子靶站(軟錯誤率測試)→Li/Be, 70 MeV, <math><10 \mu\text{A}</math>；(6)熱中子應用射束(未來擴充)。所以，其在核醫藥劑研發方面，將可朝如表 2-1 [5]所示之各核種臨床應用逐漸擴進。$



MeV：百萬電子伏特

圖 2-8 國內各型迴旋加速器之設置與應用[4]

推動里程碑

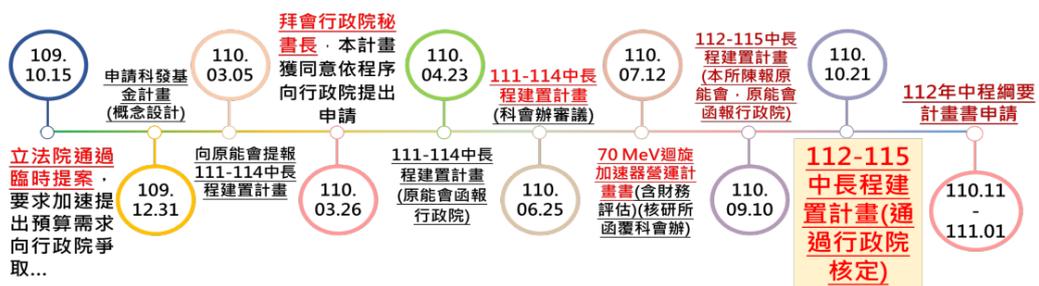


圖 2-9 70 MeV 中型迴旋加速器建製里程碑[4]

表 2-1 70 MeV 中型迴旋加速器未來可開發放射性同位素及其臨床應用[5]

放射性同位素	靶材	產製能量 (半衰期)	臨床應用	預計產製時間	備註
Ac-225	Th-232	70 MeV (10 d)	治療用： 可用於標註多種核醫藥物，治療血癌、肺癌、攝護腺癌、淋巴瘤	117年	α射線； 70 MeV 加速器產製藥物
Cu-67	Zn-68	55 MeV (2.6 d)	治療用： 可用於標註多種核醫藥物，治療神經內分泌腫瘤、抑制腫瘤血管新生	118年	β射線； 70 MeV 加速器產製藥物
Sr-82 /Rb-82	Rb-85	60 MeV (25.4 d)	診斷用： 心肌灌注掃描(PET)	120年	正電子； 70 MeV 加速器產製藥物
Tl-201	Tl-203	28.5 MeV (73.1 hr)	診斷用： 心肌灌注掃描(SPECT)	產製中	γ射線； 30/70 MeV 加速器產製藥物
I-123	Xe-124	30-35 MeV (13.2 hr)	診斷用： 可用於標註多種核醫藥物，應用心臟及神經疾病造影。 I-123 MIBG：神經內分泌腫瘤偵測、心臟交感神經功能評估	產製中	γ射線； 30/70 MeV 加速器產製藥物
Ga-67	Zn-68	24-28 MeV (78.3hr)	診斷用： 用於腫瘤成像與炎症病變定位。	產製中	γ射線； 30/70 MeV 加速器產製藥物
Cu-64	Zn-66 Zn-68 Ni-64	30-70 MeV 20-37 MeV 15 MeV (12.7 hr)	診斷用+治療用 診斷:可用於研究遺傳性疾病 (Wilson's and Menke's diseases)；治療用:用於腫瘤的 PET 成像以及癌症治療。	116年	正電子+β射線； 30/70 MeV 加速器產製藥物

5. 另外，國原院輻射防護所過去在放射成像有許多傑出的表現，其間完成有我國首座 4 能階 PCD-CT 成像模擬器，除了具能量閾值、X 光能譜、造影幾何等達 10 項可調控參數外，並採用美國 FDA 核准虛擬臨床試驗所使用之向量型擬人假體進行模擬驗證，成功獲得 4 組完全獨立能階 PCD 成像結果。另結合 AI 技術加值國原院放射影像實力，利用 1,000 筆胸腔 X 光影像與 726 筆台大醫院臨床 X 光脊椎數據，搭配生成對抗網路技術建立影像解析度提升之 AI 模型，改善影像放大後的斑紋並使骨頭邊緣更銳利；後續將進一步發展成有限角度 CT 成像之 AI 技術，並以高畫質影像同時達大幅降低病患接收輻射劑量之目標；目前在智慧分析方面與醫界合作，包括有：(1)跨年失智前期追蹤研究(高雄長庚、雙和醫院、陽明交大)；(2)阿茲海默症影像異常樣態辨別(亞東、秀傳、耕莘醫院)；(3)腦區和臨床病徵的關聯(高雄醫學大學)；(4)台灣本土資料庫建置與橫向連結(成大、林口長庚)等。應用 Micro-CT 成像技術，對碳封存潛在場址進行非破壞性檢測與地質特性評估；與中央大學、長庚大學合作，進行”高解析度地質樣品造影”；與國原院化工所合作，進行電腦斷層掃描應用於地質材料之微觀構造量測與孔隙率估算；在海關安檢設備開發方面，正與財政部關務署洽談中。在骨科的對外合作方面，與「台○醫院

骨科部」完成「追蹤資料系統智慧分析服務」技術服務案簽署 1 件，透過特徵篩選找尋分析重要特徵，提供給醫師作為疾病危險因子評估之參考。至於有關國內體外放射腫瘤治療方面，除了早期使用的如直線加速器/加馬刀等光子源外；近年來，國內各大醫院均致力於質子、重粒子與中子捕獲治療等之引進與發展。表 2-2 [5]為國內各大醫院針對質子、重粒子與中子捕獲治療(BNCT)引進的設備與申照現況。其中，在質子加速器方面，共有 14 家醫院提出，目前有林口長庚、高雄長庚、北醫附設醫院、中國醫學大學附設醫院等 4 家已開始接收病患治療，臺大醫院於 2024 年開始試運轉，其他 9 家則在規劃中或申請中；在重粒子加速器方面，共有 3 家提出，目前只有北榮總醫院已開始治療，其餘 2 家均仍在規劃中；至於 BNCT 方面，共有 3 家提出，有兩家已開始治療：清華大學係以研究用反應器(THOR)為中子源，中國醫學大學新竹附設醫院則以加速器為中子源；而北榮總醫院則在規劃中。

6. 有關用在滅菌、改質與農作物改良等方面的輻射照射場，目前國內有 3 座，其中原有 100 萬居里射源的國原院 Co-60 照射場，由於經年未補充射源，現已降至 3 萬居里；已不接受外界照射服務，而只做院內之研究用途；國內目前最有規模的輻射照射場是位於台中的「中國生化科技公司」，擁有大於 100 萬居里 Co-60 射源，可提供 $11,347 \text{ Sv/h/m}^2$ 的輻射劑量率。另一家為位於新竹新進申請的「新和生物科技公司」，目前仍在核安會審查中，將會設置有一部 10 MeV 的電子束加速器，其束流功率為 150 mW，束流電流為 15 mA。

表 2-2 國內各醫院質子、重粒子與中子捕獲治療設備之引進與申照現況[5]

醫院名稱	粒子	治療室	衛福部設置許可	核安會許可狀態	設備廠商
台北榮民總醫院	C	2+1(G)	已核准2	2023-開始治療	Hitachi
台北榮民總醫院	BNCT	1/2?	規劃中		
臺大癌醫中心醫院	P	2+1(F)	已核准3	試運轉中-2024	Varian
台北醫學大學附設醫院	P	1	已核准1	2022-開始治療	IBA
馬偕紀念醫院	P	1	已核准1	規劃中	
三軍總醫院	P	1	已核准1	規劃中(招標)	
林口長庚醫院	P	4+1(Lab)	已核准4	2015-開始治療	Sumitomo
新竹清華大學	BNCT	1	取得醫材許可	取得許可證-2023	THOR原子爐
中國醫藥大學新竹附設醫院	BNCT	2	取得醫材許可	取得許可證-2024	禾榮(ACSI)
中國醫藥大學附設醫院	P	1+1(G)	已核准1	2024-開始治療	Varian
中國醫藥大學附設醫院	C	3	已核准	規劃中	
台中榮民總醫院	P	2+1(G)	已核准2	興建中	Sumitomo
中山醫學大學附設醫院	P	1	申請中		
彰化基督教醫院	P	1	已核准1	興建中	IBA
花蓮慈濟醫院	C	3?	已核准	規劃中	
大林慈濟醫院	P	1	已核准1	規劃中	
台南奇美醫院	P	1	已核准1	規劃中	
高雄長庚醫院	P	3+1(G)	已核准3	2018-開始治療	Sumitomo
高雄醫學大學附設醫院	P	1	已核准1	規劃中	
義大醫院	P	2+1?(G)	已核准2	規劃中	

7. 有關 MF 及核安會/國原院委託或執行的各研究計畫，其計畫名稱與承辦機關/主持人，請參下列所述；其成果則請參各年度成果發表會會議論文。

另截列 113 年 9 月 5 日的行政院院會決議事項[6]，如下：

8. 發展半導體、人工智慧(AI)、軍工、安控及次世代通訊等五大信賴產業，是總統所提出的國政願景，具有高度戰略意義，不僅可強化臺灣在全球供應鏈的關鍵地位，有利我國與民主陣營緊密連結，更有助於促進各行各業的競爭力、創造高薪就業及提升國家整體的安全與韌性。

A. 在半導體產業方面，未來須全力維持晶圓代工、IC 設計及封裝測試等三大領域的領先地位，並提高設備與材料自主能力，以壯大臺灣的影響力。請經濟部、國科會加強與企業合作，並協助整合，以爭取國際商機。

B. 在人工智慧方面，應加速主權 AI 的推動與相關法令的完備，請國科會積極掌控進程；在無人機方面，可透過內需帶動成長，並加強技術

的研發及移轉，加速達成發展目標，請經濟部偕同相關部會與法人機構共同努力。

- C. 後續推動，請國發會與相關部會密切合作，納入本院經濟發展委員會顧問會議結論，作為完善政策規劃與執行的重要參考，並定期管考、滾動檢討，積極落實各項措施，儘速展現具體成效，也請副院長協助加強督導。

其中 A 項的**發展半導體、人工智慧(AI)、軍工、安控及次世代通訊**等五大信賴產業…，這與前述本年度計畫之執行方向與範圍原則第 1 項：「另應參照行政院最新國家科技發展規劃(希望工程內容)，將人工智慧、軍工與半導體納入，其中之軍工可對應到七大領域的太空科技…」相同。這三項也已納入本報告新修訂的原子能民生應用七大領域中。

9. 前述本年度計畫之執行方向與範圍原則第 1 項亦要求：「…期末報告亦可參考聯合國 SDG 永續發展目標…」，聯合國 SDG 永續發展目標共有 17 項，而 IAEA 認定其中的 9 項為與原子能科技民生應用相關。聯合國積極協助國際社會實現 17 項永續發展目標(Sustainable Development Goals, SDGs) [7]，從這 17 個目標來檢視，可發覺與 IAEA 的工作有非常密切的重疊。尤其在涵蓋貧窮、飢餓、人類健康、清潔水、負擔得起的潔淨能源、工業和創新及氣候變遷等，這些都是核子科學技術可大有作為的領域。以下介紹 IAEA 如何為各國使用核子技術和同位素技術提供支援：

- A. **SDG 2 Zero hunger**：飢餓和營養不良往往根源於糧食不安全和農業挑戰，導致福祉受損和經濟成長緊張。透過 IAEA 及其與聯合國糧食及農業組織(糧農組織)的夥伴關係，世界上一些國家正在利用核子技術和同位素技術來保護植物免受害蟲侵害並培育新植物品種，從而改善糧食安全和農業作物產量、抗病性和/或耐旱性有所提高。其他人則利用這些技術，來保護牲畜的健康並增強繁殖能力。
- B. **SDG 3 Good health and well-being**：如果健康因衰弱性疾病和健康狀況而受到損害，則不可能實現永續發展。為了幫助實現將非傳染性疾

病死亡人數減少三分之一的目標，IAEA 有能力協助各國應對癌症，幫助它們制定全面的癌症控制計畫，建立核醫學、放射腫瘤學和放射學設施，以及支持衛生專業人員的教育訓練。IAEA 也致力於提高生產救生放射性同位素的設施(包括研究用反應器)的使用率和可靠性，並支持病患減少在醫療過程中過度輻射曝露。

- C. **SDG 6 Clean water and sanitation**：水對於生命至關重要，隨著人口成長和經濟擴張，獲得清潔和安全的水勢在必行。同位素技術揭示了水的年齡和品質。一些國家利用這一點來實施綜合水資源管理計畫，以可持續地利用資源並保護水和與水相關的生態系統，而另一些國家則利用它們來解決水資源短缺問題並改善淡水供應。
- D. **SDG 7 Affordable and clean energy**：獲得潔淨、可靠和負擔得起的能源是永續經濟成長和改善人類福祉的先決條件，並影響著健康、教育和就業機會。IAEA 透過支持世界各地現有和新的核子計畫，促進能源規劃、分析及核子資訊和知識管理方面的創新和能力建設，促進核電的高效和安全利用，同時改善能源安全、減少環境和健康影響及減緩氣候變遷。
- E. **SDG 9 Industry, innovation and infrastructure**：尖端工業技術是已開發國家和發展中國家強大經濟體成功的基礎；核能、科學技術可以對經濟成長做出重大貢獻，在支持永續發展方面發揮重要作用。在 IAEA 的幫助下，一些國家利用這些技術發展了各自的工業，用於廢水處理、醫用同位素生產、聚合物工業、食品和醫療用品輻照和無損檢測，並提高了產品的耐用性。
- F. **SDG 13 Climate action**：包括核電在內的核子科學可以在減緩和適應氣候變遷方面發揮重要作用；IAEA 致力於提高全球對核電在氣候變遷方面的作用的認識，特別是努力確保核電在協助各國減少溫室氣體排放方面，能夠而且確實發揮的作用得到適當認可。
- G. **SDG 14 Life below water**：海洋蘊藏著充滿海洋生物的廣闊生態系統，對於依賴海洋謀生、獲取日常營養或兩者兼具的人來說，是至關重要

的資源。為了永續管理和保護海洋，進而支持沿海社區，許多國家正在 IAEA 的支持下使用核子和同位素技術，以更好地了解 and 監測海洋健康和海洋酸化和有害藻華等海洋現象。

H. **SDG 15 Life on land**：沙漠化、土地退化和土壤侵蝕可能危及人們的生命和生計。同位素技術可以準確評估土壤侵蝕，幫助識別侵蝕熱點，為扭轉土地退化和恢復土壤提供重要工具。IAEA 在這一領域的支持幫助許多國家利用這些技術收集信息，製定農業實踐，以更可持續地利用土地，並最終增加收入；同時改進保護方法以及對資源、生態系統和生物多樣性的保護。

I. **SDG 17 Partnerships for the goals**：與成員國的夥伴關係是 IAEA 活動的核心。IAEA、聯合國組織及其他國際和民間社會組織之間的密切合作，也有助於最大限度地發揮 IAEA 對實現成員國發展優先事項支持的影響。

本計畫在原子能民生應用方面，初步所規劃的七大領域，其中在「精準放射醫療」對應到 **SDG 3 良好的健康與福祉(Good health and well-being)**；「農業與環境」對應到 **SDG 2 零飢餓(Zero hunger)**、**SDG 6 清潔水和衛生設備(Clean water and sanitation)**、**SDG 14 水下生物(Life below water)**與 **SDG 15 陸域生物(Life on land)**；「中子量子科技」、「太空科技」、「工業應用」、「半導體製程」及「人工智慧」則對應到 **SDG 9 工業、創新與基礎設施(Industry, innovation and infrastructure)**。至於 **SDG 17 為實現目標而建立的夥伴關係(Partnerships for the goals)**，則與七大技術領域均相關。

(四)各國/組織原子能科研資訊蒐集與研析

112 年度先期研究主要是分別針對國際原子能總署(International Atomic Energy Agency, IAEA)、歐盟(Europe Union, EU)、美國、日本與中國等五個國家/組織的原子能科研資訊，進行蒐集、整理與研析。再按照核安會 111-114 年度「原子能科技民生應用發展策略藍圖」[1]中，規劃之八大領域，這些資料與其所對應領域，可如表 2-3 [8]所示。

表 2-3 IAEA、歐盟、美國、日本、中國蒐集資料所對應領域(112 年先期計畫)[8]

1. IAEA	資料名稱	對應 8 大領域
1.1 組織與作業方式	1.1.1 核子科學與應用部門	
	1.1.2 國際原子能總署海洋環境實驗室分部	
	1.1.3 糧農組織/國際原子能總署糧食和農業核子技術聯合中心	
	1.1.4 理化科學司	
	1.1.5 塞伯斯多夫實驗室	
	1.1.6 研究合約管理科	
1.2 醫學領域	1.2.1 癌症治療行動計畫	精準放射醫療
	1.2.2 新 CRP：潛在 Lutetium-177 放射性藥物的開發、設計、放射性標記和非臨床評估 (F22078)	精準放射醫療
1.3 農業領域	1.3.1 農業領域	糧食和農業
1.4 工業領域	1.4.1 工業領域	工業應用
1.5 環境永續領域	1.5.1 環境領域	環境與水資源
	1.5.2 使用核子技術對抗塞浦路斯的埃及斑蚊	環境與水資源
1.6 其他應用	1.6.1 核子應用的人工智慧	
	1.6.2 機器人、人工智慧和 3D 模型	
	1.6.3 人工智慧和醫學影像在解決人畜共患病方面的作用	精準放射醫療
	1.6.4 利用加速器進行尖端研究與開發	
1.7 重要政策與合作管道	國際原子能總署--重要政策與合作管道	
2. 歐盟	資料名稱	對應 8 大領域
2.1 組織與作業方式	2.1.1 歐洲原子能共同體	
	2.1.2 歐洲放射醫學會	
	2.1.3 歐洲社會科學和人文領域與游離輻射相關研究平台	
	2.1.4 歐洲醫療輻射防護研究聯盟	
	2.1.5 歐洲聯合研究平臺	
2.2 醫學領域	歐盟放射醫學設備與服務量能	精準放射醫療
2.3 農業領域	歐盟食物輻射照射	糧食和農業
2.4 重要政策與合作管道	歐盟--重要政策與合作管道	
3. 美國	資料名稱	對應 8 大領域
3.1 組織與作業方式	美國能源部之國家實驗室	
3.2 一般與產業價值	輻射應用之全球市場	工業應用
3.3 重要政策與合作管道	美國--重要政策及合作管道	
4. 日本	資料名稱	對應 8 大領域
	4.1.1 量子科學技術開發機構	量子科技

4.1 組織與作業方式	4.1.2 原子能技術合作	
4.2 醫學領域	4.2.1 硼中子捕獲療法(BNCT)	精準放射醫療
	4.2.2 粒子治療(質子治療法和重離子療法)	精準放射醫療
	4.2.3 放射性同位素管理	精準放射醫療
4.3 農業領域	4.3.1 農業輻射領域應用	糧食和農業
4.4 工業領域	4.4.1 工業輻射領域應用	工業應用
4.5 研究領域	4.5.1 日本輻射研究現況	
4.6 重要政策與合作管道	日本--重要政策與合作管道	
5.中國	資料名稱	對應 8 大領域
5.1 組織與作業方式	5.1.1 河南省核學會	
	5.1.2 河南省原子農學會	
	5.1.3 中國核學會	
	5.1.4 中國原子能農學會	
	5.1.5 中國同位素與輻射產業協會	
	5.1.6 中國核儀器產業協會	
	5.1.7 河南省輻射加工工程研究中心	
	5.1.8 河南省核能農學重點實驗室	
	5.1.9 河南省中國科學院科技成果轉移轉化中心 現代農業分中心	
	5.1.10 河南省核子技術農業應用院士工作站	
	5.1.11 中國核能產業協會	
5.2 醫學領域	5.2.1 新的治療診斷學有助於胰臟癌的早期檢測和有效治療	精準放射醫療
	5.2.2 中國研究組提出了醫用同位素 ⁹⁹ Mo 的生產新方法	精準放射醫療
	5.2.3 科學島團隊在核融合中子源生產醫用同位素研究取得進展	精準放射醫療
5.3 農業領域	5.3.1 一種新的輻照技術可有效延長冬棗保鮮期	糧食和農業
	5.3.2 重離子輻射誘變育種效率和質量有望提升	糧食和農業
	5.3.3 科學島團隊在水稻抗草銨磷基因發掘和功能研究方面取得突破性進展	糧食和農業
5.4 工業領域	5.4.1 北京同步輻射裝置助力中國科學家發現首個液氮溫區鎳氧化物高溫超導體	工業應用
	5.4.2 五大領域將成未來產業創新前沿	工業應用
	5.4.3 創新驅動戰略是如何實施的—來自浙江、安徽兩省的調研	工業應用
	5.4.4 CSNS 能量分辨中子成像譜儀成功出束	中子科技
	5.4.5 CSNS 高能非彈譜儀成功出束	工業應用
	5.4.6 國務院：至 2035 年，建成以量子計量為核心的先進測量體系	量子科技
	5.4.7 量子飛躍未來可期	量子科技

	5.4.8 科學家首次實現在原子尺度上研究同位素介面	
5.5 環境永續領域	5.5.1 核環境科學	環境與水資源
5.6 其他應用	5.6.1 中國核子技術應用的兆市場	
	5.6.2 中國核子技術應用產業發展報告(2023)核心報告	
	5.6.3 中國輻射科技之現況與前景摘譯	
5.7 重要政策與合作管道	中國--重要政策與合作管道	

本年度增加韓國，截至 8 月底，針對 IAEA、歐盟、美國、日本、韓國與中國六個國家/組織的原子能科研資訊所蒐集之資料名稱及其對應的領域，計蒐集有共 105 篇文章(包括新聞報導、技術報告、期刊論文、網頁說明、事實說明單(Fact Sheet)等)。由本年度新蒐集各原子能科研領域之資訊時，發現若按照核安會 111-114 年度「原子能科技民生應用發展策略藍圖」中所規劃之八大領域，在實際分類時有困難；不過，又侷限於國家科技發展策略之考量，經與核安會討論，將原八大領域加上人工智慧(為九大領域)，維持「精準放射醫療」，將”糧食和農業”、”環境與水資源”合併為「農業與環境」，將”中子科技”、”量子科技”合併為「中子量子科技」，將”輻射照射”有關工業部份轉為「工業應用」，維持「太空科技」與「半導體製程」，另增加「人工智慧」，變為**七大領域**；針對各大領域，為了較明確了解涵蓋範圍，各領域再進一步細分如表 2-4 所示二階項次。

依此新的七大領域分類，表 2-4 在各領域中「精準放射醫療」有 16 篇、「農業與環境」有 22 篇、「中子量子科技」有 22 篇、「太空科技」有 17 篇、「工業應用」有 13 篇、「半導體製程」有 3 篇及「人工智慧」有 12 篇，各文獻名稱如表 2-4 所示；這些經摘譯的資訊，請參閱「2024 年國際原子能科技民生應用研究資訊彙編」[9]。

表 2-4 本計畫所蒐集之主要國家/組織原子能科研資訊清單[9]

1. 精準放射醫療	1.1 放射治療	IAEA	1.1.1 何謂放射治療	
			1.1.2 將硼中子捕獲治療作為常規癌症治療方案 向前邁出重要一步	
			1.1.3 IAEA 協同合作計畫：開發鎰-177 放射性藥物的標記和非臨床的評估	
		美國	1.1.4 全球硼中子捕獲治療(BNCT)市場規模	
		歐盟	1.1.5 歐洲第一家以院內的 BNCT 設施	
		日本	1.1.6 IAEA 與日本岡山大學合作推進硼中子捕獲治療以幫助對抗癌症	
		中國	1.1.7 中國武威重粒子中心建立隴臺兩岸精準放射治療示範基地	
	1.2 放射診斷與核子醫學	IAEA	1.2.1 醫學影像新時代的病患輻射防護	
			1.2.2 研究用反應器生產的放射性藥物用於診斷與治療癌症	
			1.2.3 IAEA 協同研究計畫將開發用於疾病診斷的新型鎔-99m	
			日本	1.2.4 日本放射性同位素的醫療應用
			韓國	1.2.5 銅-225 和鈹-213 雙同位素成像方法
				1.2.6 韓國開發核數據測量方法以提高放射性同位素的品質
				1.2.7 韓國醫用放射性同位素(鍮 68、鍮 89)首次出口亞洲
			1.2.8 韓國首台 CRISPR 基因剪刀影像	
			中國	1.2.9 中國核子造影市場規模和市占率分析-成長趨勢和預測
			2. 農業與環境	2.1 農業
2.1.2 從太空返回的農作物種子可協助提供糧食				
2.1.3 IAEA 協助巴基斯坦解決土壤鹽鹼化				
2.1.4 IAEA/FAO 啟動開拓性蛋白質質量數據庫的開發				
2.1.5 IAEA/FAO 啟動旗艦「Atoms4Food」倡議，擴大核子技術在全球糧食安全的應用				
2.1.6 IAEA/FAO 討論食品安全與控制				
2.1.7 食品輻照的最新發展有助於使食品更安全、更易於貿易				
2.1.8 改進混合污染物和殘留物測試以增強食品安全				
日本	2.1.9 日本食品輻射應用			
	2.1.10 日本放射線育種			
中國	2.1.11 日本以加馬輻射進行害蟲防治			
中國	2.1.12 中國將種子送上太空 培育超級農作物			

	2.2 環境	IAEA	2.2.1 IAEA 的協同研究計畫：利用輻射減少溫室氣體排放	
			2.2.2 IAEA 的協同研究計畫：利用同位素技術瞭解氣候變遷下冰川流域的水文過程	
			2.2.3 核技術如何幫助測量氣候變化並監測	
			2.2.4 地下水：科學家如何研究其污染和可持續性	
			2.2.5 利用同位素技術研究海洋酸化	
			2.2.6 優化核技術以評估沿海地區的微塑料污染	
			2.2.7 IAEA 與智利簽署南極洲的 NUTEC 塑膠污染計畫	
		歐盟	2.2.8 歐洲核子研究中心使用粒子加速器來保護環境	
		韓國	2.2.9 保護土壤的環保混凝土塊	
		中國	2.2.10 中國加速器運用於環境	
3. 中子量子科技	3.1 中子應用	IAEA	3.1.1 中子束技術應用	
			3.1.2 中子成像	
			3.1.3 中子成像的進步為低功率研究用反應器創造機會	
		美國	3.1.4 美國橡樹嶺國家實驗室中子科學十年策略計畫 2023 年更新版	
		歐盟	3.1.5 國際上主流的白光中子源(白光中子源)裝置	
		日本	3.1.6 日本中子技術領域民生應用	
		韓國	3.1.7 韓國利用中子解決下一代二次電池壽命縮短的難題	
			3.1.8 開發世界一流的高劑量移動中子產生器	
			3.1.9 使用加速器使中子成像檢查成為可能	
		中國	3.1.10 散裂中子源：探索微觀世界的超級顯微鏡	
	3.2 量子科技		IAEA	3.2.1 IAEA 總部專家討論量子技術和離子束加速器
				3.2.2 IAEA 進行離子束技術與應用虛擬培訓
				3.2.3 離子束促進量子技術的發展
			歐盟	3.2.4 聯合國白皮書：量子能源——未來 30 年的主導力量
				3.2.5 歐洲量子技術
				3.2.6 歐盟量子技術旗艦計畫
				3.2.7 歐盟資助的 SPINUS 計畫開創了可擴展的固態量子計算
			日本	3.2.8 日本量子科技領域民生應用
			韓國	3.2.9 利用量子束強化國家科技研究能力
				3.2.10 推動量子束的國家基礎研究
3.2.11 利用量子束開發業界領先的技術				
中國			3.2.12 中國成功研製「九章三號」量子計算原型機	

4. 太空科技	4.1 核動力	IAEA	4.1.1 用於太空探索的核系統
			4.1.2 核動力太空船：為什麼原子火箭的夢想又重新燃起
		歐盟	4.1.3 歐洲太空總署(ESA)的科學計畫
		中國	4.1.4 核動力飛船速度快一倍
	4.2 晶片抗輻射	歐盟	4.2.1 歐洲粒子物理研究中心(CERN)的太空技術與電子輻射(R2E)計畫
		美國	4.2.2 太空微電子裝置
		日本	4.2.3 晶片抗輻射-日本半導體領域民生應用
		韓國	4.2.4 抗輻射半導體核心技術開發合作及聯合研究
			4.2.5 下一代「航空航天半導體」
		中國	4.2.6 中國太空站裡用到的國產抗輻射晶片
			4.2.7 地面上模擬太空輻射環境？在這裡成真
			4.2.8 輻射硬度電子市場按產品類型(商用現貨、客製化)；按應用(航太、航太和國防)；按地區和全球預測期(2024-2032)
	4.3 太空供電	美國	4.2.9 核電子學在太空科學領域的應用
4.3.1 應對基於太空需求電源的挑戰，已徹底改變遙感衛星影像			
		4.3.2 開發微型核電池	
日本		4.3.3 日本衛星太空電池領域民生應用	
	中國	4.3.4 邁入空間站時代的用電	
5. 工業應用	5.1 輻射照射設備	美國	5.1.1 電子束技術
			5.1.2 X射線工業用途
			5.1.3 國際輻照學會「輻射處理的用途與應用」白皮書
		中國	5.1.4 中國工業輻照加速器產業報告：成長率將維持在10%左右
	5.2 滅菌檢疫	IAEA	5.2.1 如何利用輻射控制害蟲
		美國	5.2.2 醫療器材的輻射滅菌
			5.2.3 美國食品檢測
	5.3 鑑定(定年、元素確認、密度、液位、偵測)	IAEA	5.3.1 指紋辨識材料：IAEA 更新中子活化分析電子學習課程
			5.3.2 利用核技術打擊非法販運文化產品的合作平台
			5.3.3 利用核子科學技術研究和保護文化遺產
			5.3.4 透過核子技術保護阿拉伯亞洲國家的文化遺產核子測量
5.4 非破壞性檢測	IAEA	5.4.1 核子測量	
	日本	5.4.2 日本的輻射工業應用	
6. 半導體製程	6.1 離子佈植技術	中國	6.1.1 中國半導體設備現狀，蝕刻機一枝獨秀
	6.2 電漿物理技術	韓國	6.2.1 韓國核融合能源研究所的電漿技術研究

		中國	6.2.2 中國核融合新紀錄：人造太陽電漿 7,000 萬度維持 17 分鐘
7. 人工智慧	7.1 核子技術	IAEA	7.1.1 人工智慧改變核子科學技術的七種方式
			7.1.2 人工智慧將如何改變核子世界的資訊和電腦安全
			7.1.3 人工智慧用於加速核子應用、科學和技術
	7.2 醫學影像	IAEA	7.2.1 培養醫學物理師在放射醫學應用中使用人工智慧
			7.2.2 虛擬實境在癌症照護的應用
		歐盟	7.2.3 AI 對放射學的影響：EuroAIM/EuSoMII 2024 年針對歐洲放射學會成員的調查
		美國	7.2.4 核子醫學中的人工智慧：建構值得信賴的生態系統的機會、挑戰與責任
		日本	7.2.5 放射醫學-日本人工智慧領域民生應用
			7.2.6 日本 AI 醫療專利趨勢與現況
		中國	7.2.7 放射科人工智慧應用
			7.2.8 中國碳-14 供應將全面國產化
			7.2.9 中國 AI 醫學影像市場規模分析

(五)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

國內有關原子能科技民生應用之研究與發展，主要有核安會與國科會的「原子能科技學術合作研究計畫(以下簡稱 MF 計畫) [10, 11, 12, 13, 14, 15]、國家原子能科技研究院(以下簡稱國原院)的「原子能系統工程跨域整合發展計畫」[16, 17]、政策額度計畫與科發基金計畫，以及教育部與國科會補助學研機構的研究計畫等。其中，MF 計畫分為 N1-N4 四個分項，其中，N3 為「輻射防護與放射醫學科技」，N4 為「政策推動與風險溝通」；原子能系統工程跨域整合發展計畫亦有四個分項，其中第三分項為「核子醫藥及醫材與儀器之應用研究」，第四分項為「電漿在綠色節能環境之開發與應用」；而國原院亦於 108 年度向國科會申請四年期「核醫藥物與醫材之開發及市場連結」[18]；於 109 年度向國科會申請四年期「原子能衍生技術於復健醫療領域之應用計畫」[19]等政策額度計畫；於 112 年度向國科會申請四年期「核醫精準醫學之應用研究與推廣(112/115)」[20]；以及於 112 年度向國科會申請四年期「國家中子與質子科學應用研究-70 MeV 中型迴旋加速器建置計畫(112/115)」[21]；最後，有關學研機構(如各大學、中研院物理所、太空中心與同步輻射中心等)向國科會/教育部申請的科研計畫等。

本年度截至 5 月底，所蒐集的國內原子能科研相關機構 108-113 年度發展與規劃計畫與成果，主要分為「原子能科技學術合作研究計畫」與「核安會與國原院執行的科技計畫」兩大類，其餘資料將在下半年繼續蒐集，需要核安會持續協助。前者計畫清單及補助、委託機構與主持人，如附件七所示；以九大領域分類，統計如表 2-5，計六個年度共有 114 件委託計畫，主要是學術機構及法人；其中以精準放射醫療領域 45 件為最多，其次為半導體製程 29 件、農業與環境 16 件、中子量子科技及太空科技各均為 8 件，其餘領域則較為零散。而從 108 年至 113 年之計畫件數，分別為 14, 14, 19, 24, 20, 23 件。

而後者則統計 108-115 年度的計畫清單及補助機構與主持人，如附件八所示；這部分計畫延伸至 115 年度，是部分國原院補助計畫的四年期計畫，已跨越至 115 年，故將這些計畫亦列在附件八內供參考，但不進行後續之討論；由於後者均屬政府補助國原院或核安會委託國原院研發的科技計畫，由

於這些計畫經費額度較高，如補助款計畫之分支計畫可達 2 億元以上(如「原子能系統工程跨域整合發展計畫」)，其分項計畫如第三分項「核子醫藥及醫材與儀器之應用研究」、第四分項「電漿在綠色節能環境之開發與應用」，二者之經費額度均約在 3-4 仟萬元之間；而自 112 年度開始的四年期「國家中子與質子科學應用研究-70 MeV 中型迴旋加速器建置計畫(112/115)」，其總經費在 16 億元以上。”原子能系統工程跨域整合發展計畫”第三分項「核子醫藥及醫材與儀器之應用研究」，過去 20-30 年之研發領域，主要在精準放射醫療，以及與農業和環境、工業應用相關的輻射應用等領域方面；而隨著近年人工智慧逐漸熱門，自 111 年度開始有人工智慧領域之研究計畫。至於第四分項「電漿在綠色節能環境之開發與應用」，原先是以電漿領域之全方位研發，並也在過去 20-30 年間有多方面之技轉成果。近年亦隨著國家政策需求轉向中子量子科技、太空科技、工業應用及半導體製程等領域之研發；另由於國原院研究人員眾多且穩定，研發體量較學術機構龐大，故某個分項計畫在內部實際運作時，實則涵蓋有幾個領域細項計畫之研發與執行，詳細劃分請參考附件八之備註欄所示。至於國原院 112 年度開始的四年期「國家中子與質子科學應用研究-70 MeV 中型迴旋加速器建置計畫(112/115)」，主要是為了興建 70 MeV 中型迴旋加速器及其周邊核醫及中子與質子照射生產設備；其各分項計畫中若屬於設施設計與興建部分者，將不列入相關研究領域計畫內。

除了國原院在各原子能民生應用研究計畫外，還有核安會委託給各學術機構或法人之研究計畫，其中在太空科技與半導體製程兩個領域方面，因二者於晶片應用有許多重複性，故遇到這類研究計畫通常會兩者均列；詳亦請參考附件八。

附件八有關 108-115 年度的計畫清單及補助機構與主持人等資訊，按研發領域與年度進行統計，如表 2-6 所示，總計共有 162 件；其中以精準放射醫療較多有 39 件，太空科技與半導體製程分別有 34、32 件，其餘工業應用、人工智慧、中子量子科技與農業與環境分別有 16、10、23、8 件。而從 108 年至 115 年之計畫件數，分別為 10、10、12、23、39、28、18、22 件。

表 2-5 108-113 年度原子能科技學術合作研究計畫-MF 統計(補助計畫件數)

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
108	5	2	1	0	1	4	1	14
109	7	3	1	1	1	1	0	14
110	8	3	0	2	1	5	0	19
111	10	4	1	3	1	4	1	24
112	6	2	3	1	0	7	1	20
113	9	2	2	1	1	8	0	23
合計	45	16	8	8	5	29	3	114

表 2-6 108-115 年度原子能科技民生應用科技計畫-核安會+國原院統計(件數)

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
108	4	1	1	1	2	1	0	10
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
115	5	1	4	4	3	4	1	22
合計	39	8	23	34	16	32	10	162

(六)國內各產業發展現況盤點規劃

由上述附件七國內原子能科技學術合作研究計畫(MF)及其委託承辦單位相關資訊，對其相因應的七大領域，整理如表 2-7 所示：各原子能科技民生應用領域，國內對應技術支援機構及其負責人；其中精準放射醫療領域方面，計有陽明交通大學(包括劉○○教授等 7 個研究小組)、臺北(中)榮總(張○○教授等 7 個研究小組)、淡江化學系(潘○○教授等 1 個研究小組)、秀傳醫院(邱○○教授等 2 個研究小組)、臺大醫院(顏○○等 2 個研究小組)、馬偕放射腫瘤科(陳○○教授 1 個研究小組)、國防醫學院生物及解剖學所(馬○○教授

1 個研究小組)、長庚(林口、大學)(林○○教授等 5 個研究小組)、成大醫學系神經科(白○○教授 1 個研究小組)、中臺醫學影像暨放射科學系(黃○○教授 1 個研究小組)、清華大學核工所(陳○○教授 1 個研究小組)、振興醫院核子醫學科(劉○○教授 1 個研究小組);總計在精準放射醫療領域共有 12 個研究支援團隊、30 個研究小組。在農業與環境領域方面,計有農委會農業試驗所(謝○○1 個研究小組)、中興大學(張○教授等 3 個研究小組)、嘉義大學(王○○教授 1 個研究小組)、澎湖科大(劉○○教授 1 個研究小組)、中山大學(黃○○教授 1 個研究小組)、中研院地科所(黃○○教授 1 個研究小組);總計在農業與環境領域共有 6 個研究支援團隊、8 個研究小組。在中子量子科技領域方面,計有臺灣科大化工系(江○○教授 1 個研究小組)、清華大學(李○○教授等 2 個研究小組);總計在中子量子科技領域共有 2 個研究支援團隊、3 個研究小組。在太空科技領域方面,計有臺灣大學(陳○○教授 2 個研究小組)、清華大學(張○○○教授 1 個研究小組);總計在太空科技領域共有 2 個研究支援團隊、3 個研究小組。在工業應用領域方面,計有故宮(陳○○研究員 1 個研究小組)、清華大學(林○○教授 1 個研究小組);總計在工業應用領域共有 2 個研究支援團隊、2 個研究小組。在半導體製程領域方面,計有清華大學(張○○○教授等 7 個研究小組)、台灣大學(蔡○○教授 1 個研究小組)、臺灣科大(江○○教授 1 個研究小組)、成功大學太空與電漿科學研究所(張○○教授 1 個研究小組)、陽明交通大學(陳○○教授 1 個研究小組)、元智大學電機系(劉○○教授 1 個研究小組)、義守大學材料系(劉○○教授 1 個研究小組)、明新科大(李○○教授 1 個研究小組)、國研院儀科中心(李○○1 個研究小組);總計在半導體製程領域共有 9 個研究支援團隊、15 個研究小組。在人工智慧領域方面,計有臺灣大學機械系(陳○○教授 1 個研究小組)、臺大醫院(陳○○教授 1 個研究小組)、長庚(林口,大學)核子醫學科(林○○教授 1 個研究小組);總計在人工智慧領域共有 3 個研究支援團隊、3 個研究小組。

表 2-7 國內原子能科技學術合作研究計畫(MF)所對應技術支援機構及其負責

領域	執行機構	備註
精準放射醫療	陽明大學	共同主持人：歐○○○、翁○○○、張○○○
	陽明大學	
	陽明交通大學	
	陽明交通大學	

	陽明交通大學	
	陽明交通大學	共同主持人：李○○、陳○○、張○○、劉○○
	陽明交通大學	
	臺北榮總	參與人員：黃○○
	臺北榮總	參與人員：黃○○
	臺北榮總	
	台中榮總	
	淡江化學系	
	秀傳醫院神經科	
	秀傳核子醫學科	
	臺大醫學院婦產科	
	臺大醫學院放射線科	
	馬偕放射腫瘤科	參與人員：張○○、陳○○、吳○○
	國防醫學院生物及解剖學所	
	長庚核子醫學科	共同主持人：蕭○○、邱○○、洪○○、白○○、曾○○、陳○○
	長庚醫學影像暨放射科學系	
	林口長庚醫院	
	長庚大學醫學影像暨放射科學系	共同主持人：林○○、邱○○、洪○○、白○○、曾○○、陳○○
	長庚大學生物醫學研究所	
	成大醫學系神經科	共同主持人：鄭○○、曾○○、邱○○、林○○
	中臺醫學影像暨放射科學系	
	清華大學核工所	
	振興醫院核子醫學科	
	12 研究支援團隊	
農業與環境	農委會農業試驗所植物病理組	
	中興園藝系	
	中興園藝系	參與人員：廖○○、洪○○
	中興大學昆蟲學系	共同主持人：羅○○ 參與人員：蘇○○、林○○、路○○、陳○○
	嘉大微生物免疫與生物藥學系	

	澎湖科大食品科學系	
	中山大學海洋科學系	
	中研院地科所	1,200,000
	6 研究支援團隊	
中子量子科技	臺科大化工系	
	清華大學原科中心	
	清華大學工科系	
	2 研究支援團隊	
太空科技	臺大電子工程所	共同主持人：蔡○○
	臺大工科及海洋系、電子所/ 中央物理系	共同主持人：陳○○、朱○○
	清華大學工科系	
	2 研究支援團隊	
工業應用	故宮登錄保存處	
	清華大學核工所	
	2 研究支援團隊	
半導體製程	清華大學原科所	共同主持人：梁○○
	清華大學工科系	
	清華大學工科系	
	清華大學工科系	共同主持人：趙○○
	清華大學工科系	
	清華大學原科中心	
	清華大學工科系	
	臺大電機系	
	臺科大化工系	
	成大太空與電漿科學研究所	
	陽明交通大學	
	元智電機系	
	義守材料系	
	明新科大半導體與光電科技系	
	國研院儀科中心	
	9 研究支援團隊	
人工智慧	臺大機械系	
	台大醫院	共同主持人：曾○○
	長庚核子醫學科	
	3 研究支援團隊	

附件八包括有國原院補助款計畫(如”原子能系統工程跨域整合發展計畫

第三(核醫)、四(電漿)分項；”核醫藥物與醫材之開發及市場連結”；”原子能衍生技術於復健醫療領域之應用(1/4)”；”核醫精準醫學之應用研究與推廣(1/4)”；”國家中子與質子科學應用研究-70 MeV 中型迴旋加速器建置計畫(112/115)”等)；主要是以國原院之研發團隊為主要負責機構，核醫方面主要有同位素應用所及輻射防護所；電漿方面及近年轉向至原子能民生應用研發，則由物理所、材料所等負責；詳細的進一步分析其涵蓋領域如前所述。

以下只將針對經由核安會與國原院轉委託給學術機構或法人等計畫，統計各領域在各國內技術研究支援小組之現況，可如表 2-8 所示。其中”農業與環境”、”工業應用”兩個領域並沒有委託計畫，但增加”民生應用”這個領域；因核安會自 109 年開始注意到非核政策後，我國原子能研發方向從核能轉向民生應用之可行性研析，”民生應用”領域之研究計畫就是這方面之分析。表 2-8 中精準放射醫療領域方面，計有陽明交通大學(包括楊○○教授等 3 個研究小組)、高雄醫學院(田○○教授 1 個研究小組)、中華民國核醫學會(顏○○教授 1 個研究小組)、成功大學(賴○○教授 1 個研究小組)、長庚大學(翁○○教授 1 個研究小組)、臺北醫學大學(張○○博士 1 個研究小組)、和信治癌中心醫院(黃○○教授 1 個研究小組)；總計在精準放射醫療領域共有 7 個研究支援團隊、10 個研究小組。在中子量子科技領域方面，計有清華大學原科中心(裴○○博士 1 個研究小組)、中山大學(蔡○○教授 1 個研究小組)、中原大學(院○○教授 1 個研究小組)、陽明交通大學(黃○○教授 1 個研究小組)；總計在中子量子科技領域共有 4 個研究支援團隊、4 個研究小組。在太空科技領域方面，計有台慶科技教育發展基金會(李○○教授 1 個研究小組)、清華大學(巫○○教授等 4 個研究小組)、國原院(葉○○博士 1 個研究小組)、長庚大學(趙○○教授等 2 個研究小組)、台灣大學(2 個研究小組)、太空中心(1 個研究小組)；總計在太空科技領域共有 6 個研究支援團隊、11 個研究小組。在半導體製程領域方面，計有台慶科技教育發展基金會(李○○教授 1 個研究小組)、清華大學(巫○○教授等 3 個研究小組)、國原院(葉○○博士 1 個研究小組)、長庚大學(陳○○教授 1 個研究小組)、台灣大學(1 個研究小組)、太空中心(1 個研究小組)；總計在半導體製程領域共有 6 個研究支援團隊、8 個研究

小組。在人工智慧領域方面，計有陽明交通大學(楊○○教授等 2 個研究小組)、致理科技大學(鄭○○教授 1 個研究小組)；總計在人工智慧領域共有 2 個研究支援團隊、3 個研究小組。在民生應用領域方面，計有國原院(葛○○等 3 個研究小組)、秀傳彰濱醫院(洪○○醫師 1 個研究小組)、虎尾科大(蔡○教授 1 個研究小組)、核資中心(郭○○博士 1 個研究小組)；總計在民生應用領域共有 4 個研究支援團隊、6 個研究小組。

表 2-8 原子能民生應用-核安會+國原院委託計畫所對應技術支援機構及其負責人

領域	執行機構	主持人(E-mail)	備註
精準放射醫療	陽明大學	康○○	
	陽明交通大學	楊○○	
	陽明交通大學	陳○○	
	高雄醫學院	田○○	
	高雄醫學院	楊○○	
	中華民國核醫學會	顏○○	
	成功大學	賴○○	
	長庚大學	翁○○	
臺北醫學大學	張○○		
	和信治癌中心醫院	黃○○	
	7 個研究支援團隊	10 個研究小組	
農業與環境			
中子量子科技	清華大學原科中心	裴○○	
	中山大學	蔡○○	
	中原大學	院○○	
	陽明交通大學	黃○○	
	4 個研究支援團隊	4 個研究小組	
太空科技	台慶科技教育發展基金會	李○○	
	清華大學	巫○○	
	清華大學	趙○○	
	核研所	葉○○	
	長庚大學	趙○○	
	長庚大學	陳○○	

	國原院/太空中心、產業界/臺灣大學、清華大學	葉○○	係由國原院主持的聯合計畫
	清華大學/太空中心、產業界/臺灣大學、國原院		係由清華大學主持的聯合計畫
	臺灣大學/太空中心、產業界/清華大學、國原院		係由臺灣大學主持的聯合計畫
	6 個研究支援團隊	11 個研究小組	
工業應用			
半導體製程	台慶科技教育發展基金會	李○○	
	清華大學	巫○○	
	清華大學	趙○○	
	核研所	葉○○	
	長庚大學	陳○○	
	國原院/太空中心、產業界/臺灣大學、清華大學		係由國原院主持的聯合計畫
	清華大學/太空中心、產業界/臺灣大學、國原院		係由清華大學主持的聯合計畫
臺灣大學/太空中心、產業界/清華大學、國原院		係由臺灣大學主持的聯合計畫	
	6 個研究支援團隊	8 個研究小組	
人工智慧	陽明交通大學	楊○○	
	陽明交通大學	簡○○	
	致理科技大學	鄭○○	
	2 個研究支援團隊	3 個研究小組	
民生應用	核研所	林○○	
	核研所	葛○○	
	核研所	蕭○○	
	秀傳彰濱醫院	洪○○	
	虎尾科大	蔡○	
	核資中心	郭○○	
	4 個研究支援團隊	6 個研究小組	

三、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

核融合即輕原子核間相互融合之反應中，其組成原子核重行組合，而形

成較原反應核重之產品核，過程中並釋放出基本粒子和能量，剩餘的質量變成能量，根據愛因斯坦方程式($E=mc^2$)部分顯示質量和能量可以相互轉化，使總質量減少而轉變為能量，為此各國投入研究，希望在地球上實現此能源生產的方法，最常見的即為氘-氚(DT)核融合反應，其產物為一個氦原子，包含兩個質子兩個中子，其中一個高能中子會成為核融合產生能量的基礎，本章節將對目前世界上的兩大核融合模式進行簡述，蒐集之國際發展計畫現況，以及相關技術發展做說明：

透過磁力約束電漿(Plasma)在裝置內持續加速達到融合條件之核融合稱之為磁拘限核融合，最常見之兩個裝置分別為托卡馬(Tokamak)及天星號環狀磁場配置(Stellarator)，其示意圖依序為圖 3-1 [22]以及圖 3-2 [23]，托卡馬裝置的核心是其環形真空室，在裝置內部極端高溫和高壓的影響下，氣態氫燃料變成電漿使氫原子可以在此環境中融合產生能量[24]。關於托卡馬裝置現在全世界有 35 個國家合作建造世界上最大的托卡馬裝置，此項目即稱為國際熱核融合實驗反應爐(International Thermonuclear Experimental Reactor, ITER)，主要目標是研究和展示燃燒電漿核融合反應產生的氦核能量足以維持電漿溫度，從而減少或消除對外部加熱的需求，ITER 將測試核融合反應器所必需的技術的可用性和整合(例如超導磁鐵、遠端維護和從電漿中排出能量的系統)，以及氘增殖模組概念的有效性，該概念將在未來的反應器中產生氚，而這些概念將會引領 DEMO (示範型核融合電廠原型)融合反應器的後續實施，繼而實現商業核融合發電廠，ITER 的首次釋放電漿預計於 2025 年底進行，而在天星號環狀磁場配置中，為實現所需的磁場線螺旋扭曲以進行約束，主要依賴於外部線圈(External Coils)，導致了電漿和磁場線圈呈現複雜三維幾何結構，天星號環狀磁場配置可以通過一個或多個連續螺旋線圈或多個離散線圈實現，相對於托卡馬，天星號環狀磁場配置具有的優勢，主要包括穩態能力和不存在電流驅動的不穩定性，這都與不需要內部電漿的電流來維持磁場幾何形狀有關，由於需要優化三維磁場結構以減輕經典環流器在快速粒子和能量約束方面的不足，環流器實驗至少落後於托卡馬裝置一代，因此，在歐洲實現核融合能源路線圖考慮的時間範圍內，環流器配置不適合用於 DEMO，但環流

器可以克服托卡馬發展路線中可能出現的困難，反之亦然，因此，平行發展這兩條磁拘限核融合路線是一個重要的整體風險緩解措施。

1. 線性拘限核融合簡介

線性拘限核融合(Inertial Fusion Energy, IFE)與磁拘限核融合有許多共同基礎[25]，包括電漿拘限、加熱、和能量生產過程，其基本原理為壓縮和點火(Ignition)包含氘與氚的小型燃料丸(Fuel Pellets)，發展線性拘限核融合能源相關重要的技術問題系統組成和設計問題分為四類，分類如下：

- 啟動器(Driver): 效率、脈衝重複率、成本、壽命、激光或重離子束選項等。
- 燃料丸的製造、注射和追蹤：所需的均勻性、注入的測量和控制系統。
- 反應室：第一壁保護、恢復室內條件、中子屏蔽、終端光學保護。
- 系統問題：系統優化、經濟性和安全性分析(直接/間接驅動、激光/離子束、模組化電廠設計)。

各國在此之發展計畫，以中國為例，位於北京中國原子能科學研究院的氟化氪(KrF)準分子雷射(Heaven-1, H-1)是中國線性拘限核融合能源啟動器的候選之一，目前正在運行和開發中，此外，短脈衝技術和快速點火啟動器也在進行中，拘限核融合能源的物理研究目標強調理論和實驗研究、判斷技術、目標製造，反應器設計主要由北京的清華大學和應用物理與計算數學研究所(IAPCM)進行。韓國有幾個與拘限核融合研究相關的活躍團隊，韓國高等科學技術研究院(Korea Advanced Institute of Science and Technology, KAIST)於1994年完成了一個高功率釷:玻璃(Nd:glass)雷射系統(Sinmyung Laser, 2 TW, 40 ps)，這是為了拘限核融合的基礎研究和教育工作而進行的國家項目的一部分，KAIST還開發了一個超短高功率雷射系統(2 TW, 30 fs Ti)和幾個高功率雷射系統(碘雷射器和 CO₂ 雷射器)以進行雷射與電漿相互作用的研究，韓國原子能研究所(Korea Atomic Energy Research Institute, KAERI)是韓國最大的雷射及其應用研究團隊之一，進行了與拘限核融合能相關的多項活動，主要活動之一是開發高功率雷射器及其相關技術，他們開發了多種類型的燈泵釷雅克雷射器(Nd:YAG Laser)，並正在研究使用激光二極管的各種光泵浦方法，同時也在開發高電流穩定電源供應器以供雷射二極管使用，KAERI的原子、

分子與光學數據庫系統(AMODS)包含許多與核融合科學相關的數據 [26]，包括原子和離子間的電荷轉移數據、輕離子從固體反射的背散射係數、濺射產量等。KAERI 的 AMODS 現已成為由 IAEA 監督的核融合研究數據中心網路的成員。

2. 核融合技術進展[27]

1993 年，美國普林斯頓電漿物理實驗室的托卡馬核融合試驗反應器 (Tokamak Fusion Test Reactor, TFTR) 成為全球首個進行大量 50/50 氘/氚混合物電漿實驗的磁約束融合裝置，當時的氚庫存量為 5 克，到 1994 年，它以創造出超過 10 兆瓦核融合功率輸出的世界紀錄，該紀錄在 1997 年被歐洲聯合環形反應器 (Joint European Torus, JET) 以 16 兆瓦的氘-氚核融合輸出功率所超越，TFTR 已於 1997 年停止運行，而 JET 至今仍在進行專門的氘-氚運行實驗，因此，位於英國卡勒姆的 JET 實驗性托卡馬，目前是唯一能夠使用氚運行的核融合裝置；JET 在 2021 年創造了持續產生 59 兆焦耳熱核融合能量的紀錄，自 1991 年首次展示熱核融合能量產生以來，1997 年、2004 年及最近在 2022 年進行了更多的實驗，ITER 將推動燃料循環的規模提升到一個新水平，因為它的設計標準通量為 $200 \text{ Pa}\cdot\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ 的氘-氚混合物，並將運行總氚庫存量約 4 公斤，研究計畫目前仍在持續修訂中，預計 ITER 燃料循環將在十多年後全面運行。ITER 燃料循環架構反映出了處理大量氚的需求，以供應中性束系統使用，根據目前的知識，具有完整增殖系統的 FPP 燃料循環設計尚不能簡單地從 ITER 進行等比例規模放大，而是需要考慮進一步減少氚庫存量作為主要設計驅動因素。圖 3-3 [28] 為與 FPP 相關的 D-T 燃料循環的通用示意圖，燃料循環系統包括三個不同的循環迴路，最內層為直接內部回收 (DIR) 循環，提供一條快速的未燃燃料捷徑，無需分離到純同位素的水平，有助於減少氚庫存，而第二個迴路主要提供氘 (Protium) 的除去，第三個迴路提供氚回收並從剩餘氣體中去除氘，在 D-T 連續運行條件下，還要能滿足 FPP 所需的規模(庫存達到多公斤級)，這樣一個完整的燃料循環系統雖尚未被驗證，但 ITER 燃料循環系統展示出許多外部迴路技術，並包括自排氣中完整分離所有的氘同位素。

3. 聚界潔能

聚界潔能主要以質子(氫原子核)與硼-11 進行反應技術來實現核融合反應，過程中以質子高速撞擊硼-11 原子核來產生三個氦-4 原子核(即 α 粒子)，從而釋放出大量能量，由於不涉及中子照射，因此，不會像核分裂那樣產生大量放射性物質，沒有熔毀或連鎖反應的風險，目前已經實現了「淨能量增益率」超過 100% 的突破(2021 年)，正計劃在 2027 年推出其商業化的核融合系統，以此來能產生能源。

聚界潔能 2024 年 7 月與國立陽明交通大學攜手於陽明交大台南歸仁校區成立「聚界潔能台南實驗室」，為該公司在全球的第四間實驗室，專注於核融合生態系的發展，並開啟國內外頂尖大學等的研究合作計畫交流計畫，包括台清交成、UCLA、MIT 和英國的劍橋及牛津大學等。

目前聚界已開發出兩項產品線，參考圖 3-4 [29]與圖 3-5 [30]分別為核融合教育設備 Education for ESG (EESG)，主要是以 Ion Beam (離子束)製造不同的粒子，如中子、質子、高能電子及氦氣等供教學使用，或將粒子收集用於醫療方面，如癌症治療，初步估計售價為 5 萬美元，目標客群為國內外各大專院校及研究單位，另一項產品為 Linear Reactor (線性反應器)，用來加速帶電粒子產生核融合反應，已可實現 Q 值淨能量增益比輸出大於輸入的條件，未將可開發成小型氫能機(Hydrogen On Demand)，但穩定性和效率問題還有改善進步的空間存在。

4. 冷核融合

目前仍為一種假說，尚未得到廣泛認可，其系指常溫、常壓下發生的核融合反應，因不同於恆星內部、熱核武器和實驗性融合反應器中高溫、高壓的「熱」核融合而稱其微「冷」融合。

電化學家馬丁·弗萊施曼和斯坦利·龐斯在 1989 年提出報告，稱其以鈹金屬電極進行重水電解實驗時，裝置出現反常放熱(餘熱)現象，其數量等級無法依靠化學反應解釋，推論為是核反應產生，然僅少數實驗者能成功複製該實驗，未有研究者為其實驗成果背書。

台師大團隊近期在冷融合研究上有所突破[31]，並已投稿至相關國際期刊[32]，團隊認為水沸騰會產生空化(Cavitation)及聲致發光現象(Sonoluminescence)；因此，利用 CIF 技術(Cavitation-induced Fusion，水的沸騰空化融合現象)，以水為介質(燃料)，在低溫下進行(低於 200°C)流體動力學與空化技術激發核反應，並在其中觀察到在冷融合發生時，反應器會產出的不凝結氣體(Non-condensable Gas)，後經檢驗其含有氖同位素(^{22}Ne)、二氧化碳(CO_2)、同位素 ^{17}O 重水(H_2^{17}O)、同位素 CO_2 ($^{12}\text{C}-^{16}\text{O}-^{17}\text{O}$)與同位素 O_2 ($^{16}\text{O}-^{17}\text{O}$)，性能係數 COP 目前已可達到(輸出能量與輸入能量比) 1.2 至 4.3，若能改良到穩定 5.0 以上，才具有商業發展的價值，參考圖 3-6 [33]。

若冷融合實驗能發展成功，初步將可用於預熱鍋爐水源，協助降低鍋爐設備碳排量，提升發電效率，再者可以利用附屬產出的同位素 ^{17}O 重水於核磁共振造影 MRI 與正子攝影 PET，輔助抑制癌細胞增長、癌症的標靶或放射治療等。

由於台師大團隊的冷融合實驗過程基本學理仍有待釐清，因此，研究團隊是採取設計製造了數十種各式反應器進行交叉實測分析，所以，在歸納出設計與操作原理甚至新的物理學理論前，應保守謹慎看待其研究結果。

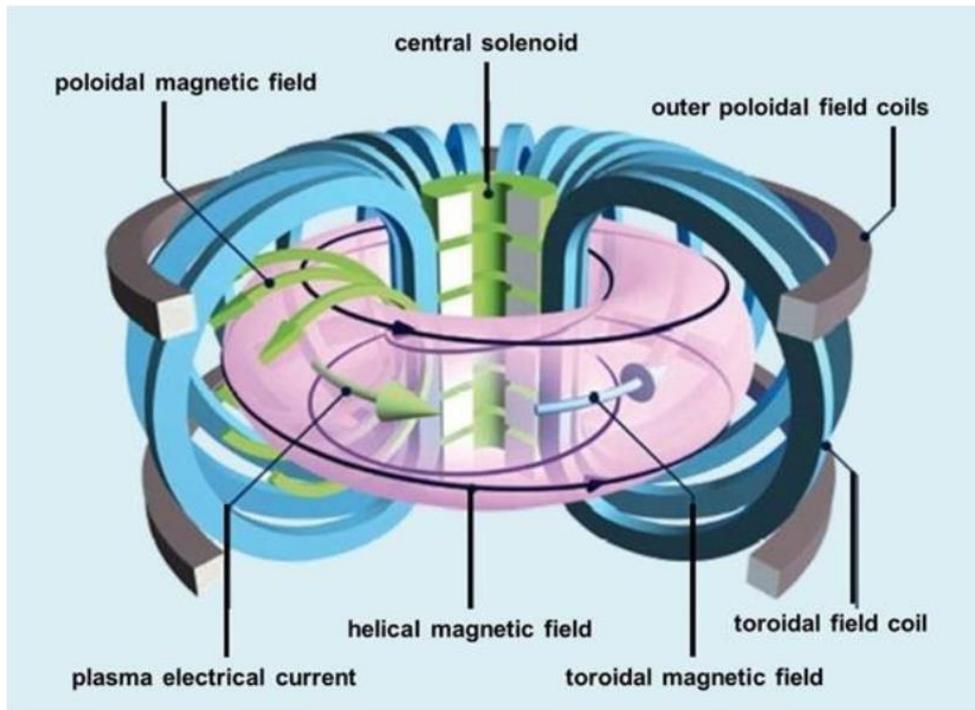


圖 3-1 托卡馬裝置示意圖[22]

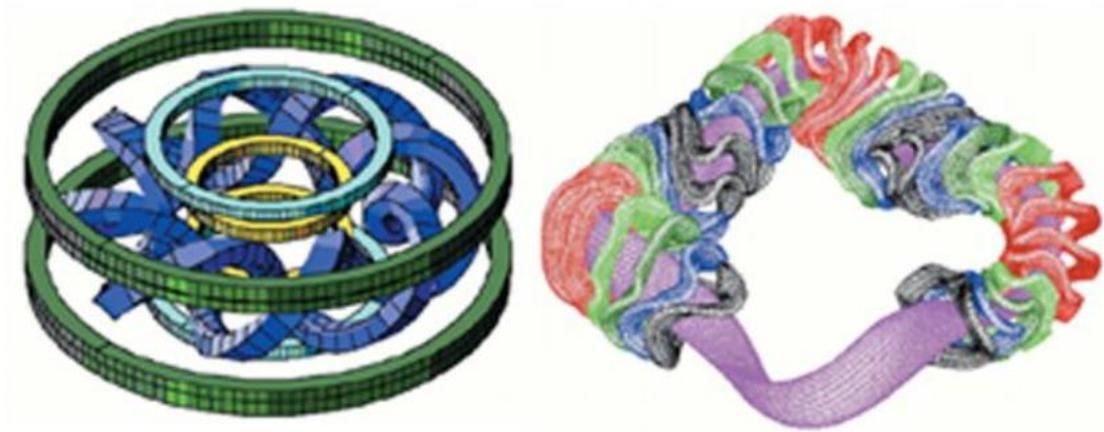


圖 3-2 天星號環狀磁場配置示意圖[23]

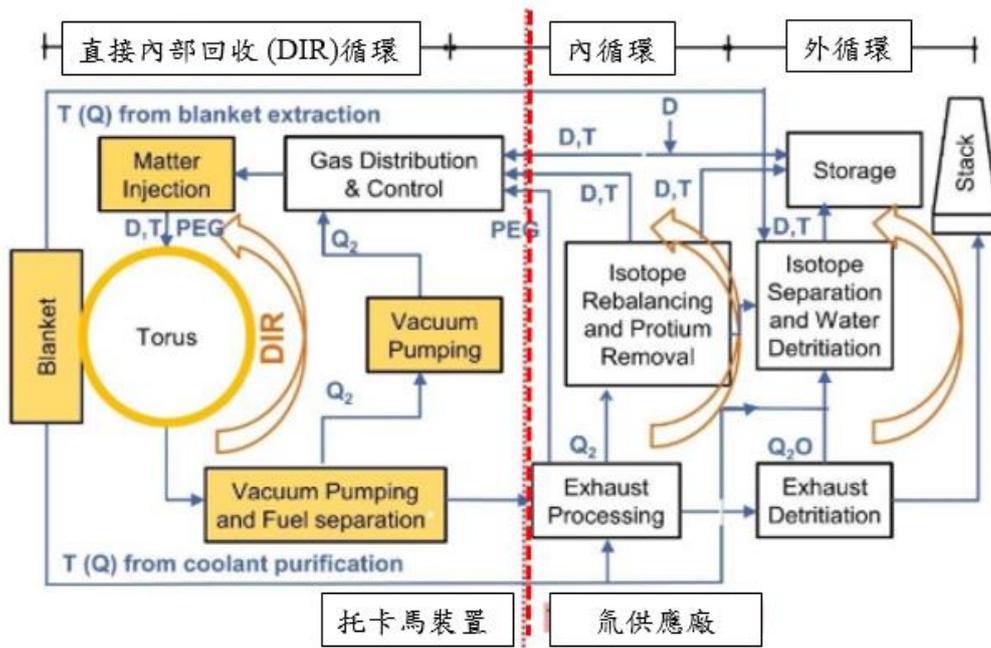


圖 3-3 核融合發電電廠之氘/氚燃料循環示意圖[28]

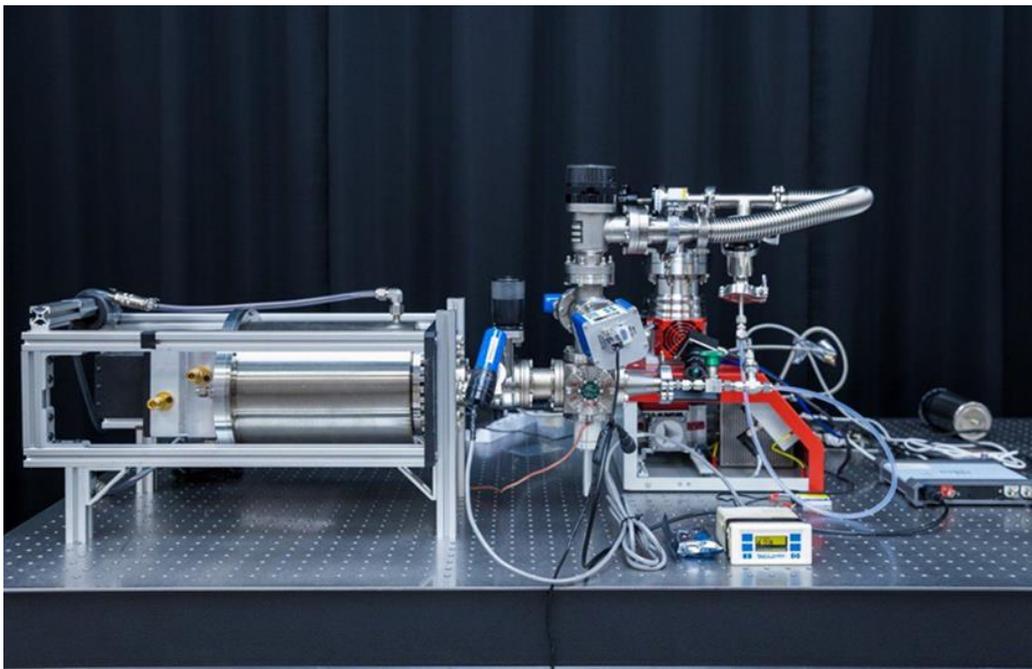


圖 3-4 聚界潔能 EESG 教育系統樣品[29]



圖 3-5 聚界潔能核融合離子束教育設備[30]



圖 3-6 國立臺灣師範大學陽傑冷融合實驗室[33]

(二)小型模組化反應器(SMR)於各國發展類別

在第 28 屆聯合國氣候變遷大會(Conference of the Parties, COP28)的最終協議裡，與會世界各國達成一項結論，希望能夠擺脫對石油、天然氣與煤炭等化石燃料的依賴，達到巴黎協定的目標，將全球平均升溫控制在攝氏 1.5 度，另附帶協議文本呼籲“加速”發展核電作為低碳電力的來源，歐盟理事會更以此將核電視為戰略技術以期望能早一步實現碳中和，這項決議得到了法國為首的歐洲核聯盟，甚至是 COP28 主辦國阿拉伯聯合大公國的認可，並聯合英、美與南韓共同發布加速發展核能的聯合宣言，希望更多國家能夠一起參與響應，計劃到 2050 年實現全球核能裝機容量較 2020 年增加 2 倍，也就是要將現行 33 國 422 台核電機組，總裝機容量 3.78 億千瓦推升到 11 億千瓦以上，因此除了建造或延役傳統大型核電廠外，新一代 SMR 核能技術也是會議上被提及的議題，期盼以加速 SMR 實現淨零排放[34]。

進入 21 世紀以來，核能提供了世界四分之一的清潔電力，幫助全球減少了約 300 億噸溫室氣體排放，因此即使核電存在風險，仍有國家看中其低碳與基載的能力而大力推崇。COP28 會議首次提出 3 倍再生能源議題，並且將核能與碳捕集、利用和封存並列，被視為將核電納入清潔能源選項，而會議上所討論的核能議題主要集中在核工產業的創新上，包括進步型反應器技術的開發與小型模組化反應器(SMR)，由核能安全總署(NUCLEAR ENERGY AGENCY, NEA) 倡議的加速 SMR 實現淨零排放，希望利用全球專家和領導者的影響力，建立一個以實用與解決方案為導向的平台，製定出明確的協作和知識交流工作計劃，以加快安全、高效和經濟的 SMR 的開發、部署和運轉，最大限度地發揮 SMR 的全部潛力[35]。

SMR 每單位的功率容量通常高達 300 兆瓦電(MW(e))，約為傳統核反應器發電容量的三分之一，其組件和系統可以在工廠內製造，然後作為模組運輸到現場進行安裝。根據 IAEA 的定義，進步型反應器設計包括進步型和創新型反應器技術，進步型反應器設計通過小幅或中度修改現有設計，著重於保持經過驗證的設計特徵，以最大限度地減少技術風險，而創新型反應器設計則在材料或燃料的使用、操作環境和條件以及系統配置上進行根本性的變

革。進步型反應器資訊系統(Advanced Reactors Information System, ARIS) [36] 資料庫包含了由相關設計機構或反應器營運商提供的關於進步型反應器設計的技術信息，可以根據冷卻劑、溫度或用途進行分類[37]，就用途而言，反應器可分為實驗性、示範或原型及商業用途，以目前在 18 個 IAEA 會員國中，有超過 80 個 SMR 設計正在不同階段的開發和部署中，將會藉由各國發展的經驗進行蒐集研析，來作為我國安全管制的一個經驗來源，以下資料收集共分為五個部分，第一部分至第四部分按不同冷卻劑類型排序，第五部分專門介紹微型反應器，其輸出容量相對較小(通常小於 10 兆瓦電)或具有特定應用，例如為偏遠地區供電。

1. 水冷式小型模組化反應器

此 SMR 為我國較為熟悉之領域，屬於壓水式反應器(PWR)及沸水式反應器(BWR)的技術衍生而來[38]，使用輕水作為冷卻劑，其設計特徵與安全考量像是整體加壓水反應器(iPWR)設計採用自然循環進行爐心的主要熱移除手段，因此，可以消除對反應器冷卻劑主泵的需求，降低了設備複雜性，從而消除由泵故障引起的主冷卻劑流失事件，且幾乎所有的 iPWR 設計都採用了容器內蒸汽發生器(Steam Generators)，例如通過螺旋盤管(Helical Coil)蒸汽發生器將反應器冷卻系統中的組件，例如蒸汽發生器和抑壓槽(Pressurizer)與爐心一起安裝在反應器壓力槽內，在緊湊的幾何空間中提供了更大的傳熱面積，消除了外部冷卻劑循環管道，將發生大破口喪失冷卻水事件(LBLOCA)的發生機率降至零。根據 ARIS 系統，表 3-1 [36]為現行資料庫內之 PWR 模組，許多國家都有投入研發，而第一個通過美國核管會(NRC)的設計認證 SMR，其電廠示意圖如圖 3-7 [39]所示，由單一的 NuScale Power Module™ (NPM)整體設計將核反應器爐芯、兩個交織的螺旋管蒸汽發生器(SG)和一個抑壓槽(PZR)置於反應器壓力槽(RPV)內，並被安裝在鋼製圍阻容器(CNV)中，反應器壓力槽(Reactor Pressure Vessel, RPV)大約長 17.8 公尺，直徑 3.0 公尺，預計於 2027 年作為首個商業核電廠運作，而韓國的 SMART 是一種熱功率為 330 MWt 的 PWR，屬於進步型 SMR 中的一種，透過引入被動餘熱排除系統和先進的冷卻劑喪失事故(LOCA)緩解系統，顯著的增強了安全餘裕空間，而前面有提到

會將蒸汽產生器(SG)採用螺旋的方式來增加導熱面積，圖 3-8 [40]即為 SMART 螺旋蒸氣產生器模型，搭配圖 3-9 [41]為整個 SMART 之組件以及測試迴路示意圖，經安全測試分析後，在所有設計事故後，最終都能處於安全的停機狀態，爐心損壞頻率約為常規核電廠的 1/10 [42]。

2. 高溫氣冷式小型模組化反應器

HTG-SMR(高溫氣冷式小型模組化反應器)的主要設計特徵在於使用氦氣作為冷卻劑，導入石墨作為調節材料，以及採用全陶瓷塗層顆粒燃料，HTG-SMR 有兩種主要技術分支，一種是球形燃料(Pebble Bed)元件(卵石床型反應器)，如圖 3-10 [43]所示，另一種是採用棱柱狀(Prismatic)石墨燃料(石墨塊型反應器)，如圖 3-11 [43]所示，為了使 HTG-SMR 能夠成為安全、可靠和經濟的能源及相應利用，燃料採用三重結構等向性(TRISO)塗層燃料顆粒燃料顆粒被整合到棱柱塊(棱柱型核心)或球形燃料元件中，燃料顆粒 TRISO 塗層燃料顆粒的整體直徑在 500 到 1,000 微米範圍內，燃料的最高溫度保持在可接受的數值以下(約為 1,600°C)。HTG-SMR 的安全特性主要由陶瓷塗層顆粒燃料的質量定義，該燃料預計能將絕大部分核分裂產物在很高的溫度下持續足夠長的時間，對於 HTG-SMR 來說，TRISO 燃料被認為是約束功能的主要貢獻者，除了提高發電效率外，HTG-SMR 的出口溫度(約 700-950 攝氏度)還促進了反應器在高溫過程的餘熱再利用，例如為工業應用、氫氣生產提供熱能，但有些情形可能會導致對石墨的化學侵蝕，例如涉及水或空氣進入的情況。表 3-2 [36]為 ARIS 資料庫內高溫氣冷反應器(HTGR)現行登入模組，目前登入在資料庫內的資訊較少，特別要注意日本大洗研究開發研究所的 HTTR，如圖 3-12 [44]所示，在今年三月底達成全功率運轉時發生喪失強制冷卻系統狀況，透過被動冷卻效果保持穩定，且日本與英國政府持續在這個領域進行推動，英國國家原子能研究室(National Nuclear Laboratory, NNL)與日本原子能研究開發機構(Japan Atomic Energy Agency, JAEA)簽署高溫氣冷燃料合作專案，共同推展其顆粒燃料製造與放大，預計將於 2025 年完成。

3. 液態金屬小型模組化反應器

使用液態金屬做為冷卻劑的技術[45]，現階段採用鈉的反應器(Sodium-cooled Fast Reactor, SFR)及採用重液態金屬(Heavy Liquid Metal, HLM)如純鉛以及鉛鈹共晶合金的(Lead-Bismuth Eutectic, LBE)，這些技術採用快中子反應器(Fast Neutron Spectrum, FNS)的創新技術，其優點例如更高的天然鈾利用率、減少高度放射性的次鈾系元素及在閉合燃料循環中運行的能力，尤其鈉(Sodium)因其具有高熱導率和相對高沸點等物理特性，以及作為中子的弱緩和劑和弱吸收劑，一直被用於核反應器中，但要特別注意鈉與水和空氣中的氧氣反應劇烈，因此，需要特殊措施和設計來避免鈉與水接觸並防止鈉燃燒，因此，為了克服這些挑戰，開發商也考慮以其他冷卻劑作為替代選擇。由重液態金屬(HLM)如鉛或鉛鈹共晶合金(LBE)冷卻的快中子反應器，同樣改進了安全性和可靠性，這些冷卻劑不會與水和空氣發生化學反應，因而具有高沸點的物理特性，使反應器容器的尺寸更小，且不需要中間迴路，減少了整體電廠的大小。表 3-3 [36]為 ARIS 資料庫內液態金屬 SMR 現行登入模組，特別提到在資料庫內表上的反應器皆是採用無緩和劑，並且分為兩類，一類是 SFR 池水式，另一類是 LFR 一般循環式的部分，日本東芝的 4S 鈉冷快中子反應器於 1988 年開始設計，並於 2008 年首次與美國核管會(Nuclear Regulatory Commission, NRC)進行申請討論，提供兩種輸出功率，分別為 30 MWth 或 10 MWe 和 135 MWth 或 50 Mwe，透過圖 3-13 [46]可看出池水式以及一般循環式的差異就在熱交換器的位置，圖 3-14 [46]可以看出其採用的為池水式其針對緊急事故如斷電事件(SBO)等證明，被動除熱系統可以在無緊急電源供應的情形下透過自然循環帶走衰變熱，也因為建在地底下，可以大幅減少因飛機失事墜落撞擊的危險，而鉛冷快中子(Lead-cooled Fast Reactor, LFR)方面要看到的是瑞典的 SEALER，如圖 3-15 [47]所示，同樣也是採用池水式的設計，反應器的被動安全性通過鉛冷卻劑的自然對流來移除爐心的衰變熱，由主系統傳輸衰變熱通過池式冷卻器來實現，在發生爐心破壞事故的情況下，揮發性核分裂產物會被保留在鉛冷卻劑中，因此，無需撤離居住在場地邊界的居民[48]。

4. 融鹽小型模組化反應器

大多數概念使用液體形式的燃料(即熔鹽包含燃料並作為冷卻劑)或固體燃料，由熔鹽進行熱交換，因此，與傳統的水冷式反應器相比，這類核反應器具有非常不同的特點，相對於傳統水冷式反應器的重要優勢在其運行壓力在接近大氣壓，帶來了操作、安全和經濟方面的幾個優勢，由於結構材料的機械應力減少，潛在事故情景風險低於典型的水冷反應器，且成本更低，再者熔鹽具有低的化學反應性，不與附近材料、空氣或水發生放熱反應更是一大優勢，因為這不存在氫爆炸或鈉起火的潛在風險。另外 MSR 設計上能夠在極高溫(> 600°C)下運行，由此產生非常高的熱力學效率(高達 50%)，根據圖 3-16 [49]可以得知，MSR 技術中分為四大類，常見應用於 MSR 的元素包含(氟化物鹽形式、氯化物鹽形式、鈷...)，其中又透過均質及異質進行再次分類，表 3-4 [36]為 ARIS 資料庫內 MSR 現行模組，特別要提及 ThroCon，其示意圖，如圖 3-17 [49]所示，ThorCon 建造在船體中，海洋提供整個核電廠的運輸、燃料以及冷凝器的水，參考圖 3-18 [49]所示，ThorCon 初始的燃料充電主要是鈷，在八年的燃料週期中，部分可燃鈷轉化為可裂性 U-233，然後成為燃料的一部分，每個 ThorCon 工廠平均每天需要 5.3 公斤的 19.7%濃縮鈷和 9.0 公斤的鈷，每年需要 1,930 公斤的 19.7%濃縮鈷，源自 72,500 公斤天然開採鈷，相當於每滿功率 GW 年約 145 噸的天然鈷，而標準輕水反應器(LWR)約為 250 噸，8 年後，ThorCon 將被輸入 3 噸的可裂性 U-235 燃料，但其用過的燃料仍包含 1 噸的可裂性燃料 U-233(408 公斤)和 U-235(624 公斤)，這歸因於具備更高的熱效率、去除 Xe-135 和從鈷中生產 U-233，ThorCon 對可裂性鈷的淨消耗量不到 LWR 的一半。

5. 微型模組化反應器

針對發電能力通常達 10 MW(e)的非常小型的 SMR，稱為微型反應器(MMR)，採用了不同類型的冷卻劑，包括輕水、氦氣、熔鹽和液態金屬，由於發熱量較低，因此，熱管(Heat Pipe)僅是建議的冷卻系統選項而已，MMR 的設計理念是替微電網和偏遠離網地區供電，快速恢復受自然災害影響的社區的電力，以及支持更快恢復關鍵服務(如醫院、供水)和海水淡化，至今為止登入在 ARIS 系統的 MMR 僅為日本東芝(Toshiba Energy)的 Mobile-Very-small

reactor for Local Utility in X-mark (MoveluX)，其反應器系統的選址要求較少，因為它設計是針對在偏遠地區且不需大面積土地，依照目前的設計，通過拖車可達到的地點是施工 MoveluX 的少數要求之一。MoveluX 反應器系統包括地面和地下設施，如圖 3-19 [50]所示，地面設施包括發電機和其他應用(熱能利用、氫氣生產等)，地下設施包含反應器的主要系統(爐心、熱管和熱交換器)，反應器系統的主要迴路使用熱管，這是一種被動冷卻裝置，主要是迴路上沒有循環泵，並選擇鈉作為熱管的工作流體，爐心包括燃料、緩和劑、熱管和控制裝置，在核心中使用矽化鈾(Uranium Silicide)和氫化鈣(Calcium-hydride)作為燃料的緩和材料，最大燃料濃縮度設定為 4.99 wt%。在緊急情況下，爐心通過氫化鈣作為緩和劑的材料特性進行關閉，圖 3-20 [50]為爐心水平橫截面，藍色部分為氫化鈣，會在高溫環境下會分解，當核心溫度因異常情況而升高時，緩和劑中的氫氣會由材料特性釋放，氫化鈣在溫度升高時會失去中子緩和的能力，因為氫在高於 800°C 的高溫環境中會解離，爐心關閉後，衰變熱通過空氣的自然循環從反應器容器表面被動移除，該反應器能夠生產 10 MW 熱功率，若用於發電，則產生 3-4 Mwe 的電力，就此而言，MoveluX 反應器系統適合與小型和微型電網連接。

表 3-1 ARIS 資料庫內 PWR 現行登入模組[36]

全名	縮寫	研發廠商(國家)	種類
Integrated Modular Water Reactor	IMR	三菱(日本)	iPWR
NuScale SMR	NuScale	NuScale(美國)	iPWR
System-Integrated Modular Advanced Reactor	SMART	KAERI(韓國)	iPWR
NUWARD	NUWARD	CEA-EDF(法國)	PWR
Fixed Bed Nuclear Reactor	FBNR	FURGS(巴西)	PWR
Advanced low-Pressurized and Passive SafetY system – 200 MWth	HAPPY200	SPIC(中國)	PWR
UK Small Modular Reactor	UK-SMR	Rolls Royce & Partners(英國)	PWR
VBER-300		OKBM(俄羅斯)	PWR
VVER-600 (V-498)		Gidropress(俄羅斯)	PWR
VVER-640 (V-407)		Gidropress(俄羅斯)	PWR

BWRX-300	奇異日立核能公司(美/日)	BWR
----------	---------------	-----

表 3-2 ARIS 資料庫內 HTGR 現行登入模組[36]

全名	縮寫	研發廠商(國家)	種類
High Temperature GCR - Pebble-Bed Module	HTR-PM	北京清華(中國)	HTGR
Steam Cycle High Temperature Gas-cooled Reactor	SC-HTGR	Framatome(美國)	HTGR
Pebble Bed Modular Reactor	PBMR	Pebble Bed Modular Reactor (Pty) Limited (南非)	HTGR

表 3-3 ARIS 資料庫內液態金屬反應器現行登入模組[36]

全名	縮寫	研發廠商(國家)	種類
super-safe, small and simple	4S	東芝(日本)	SFR
Advanced Sodium Technological Reactor for Industrial Demonstration	ASTRID	CEA(法國)	SFR
BN-1200		JSC "Afrikantov OKBM"(俄羅斯)	SFR
China Fast Reactor 600	CFR-600	China Institute of Atomic Energy(中國)	SFR
Japan Sodium-cooled Fast Reactor	JSFR	JAEA(日本)	SFR
Multipurpose fast-neutron research reactor	MBIR	NIKIET(俄羅斯)	SFR
Prototype Gen-IV Sodium-cooled Fast Reactor	PGSFR	KAERI(韓國)	SFR
Advanced Lead Fast Reactor European Demonstrator	ALFRED	Ansaldo Nucleare(歐盟)	LFR
China LEAd-based Research Reactor	CLEAR-1	中國科學院大學(中國)	LFR
Gen4 Module	G4M	Gen4 Energy Inc.(美國)	LFR
Swedish Advanced Lead Reactor	SEALER	LeadCold(瑞典)	LFR

表 3-4 ARIS 資料庫內 MSR 現行登入模組[36]

全名	縮寫	研發廠商(國家)	種類
Mark 1 Pebble-Bed Fluoride-Salt-Cooled High Temperature Reactor	MK1 PB- FHR	University of California, Berkeley(美國)	MSR
ThorCon	ThorCon	ThorCon US, Inc.(美國)	MSR
Liquid Fluoride Thorium Reactor	LFTR	Flibe Energy(美國)	MSR
Integral Molten Salt Reactor-400	IMSR-400	Terrestrial Energy(加拿大)	MSR
Molten Salt Thermal Wasteburner	MSTW	Denmark(丹麥)	MSR
Molten Salt Reactor-FUJI	MSR-FUJI	International Thorium Molten-Salt Forum: ITMSF(日本)	MSR

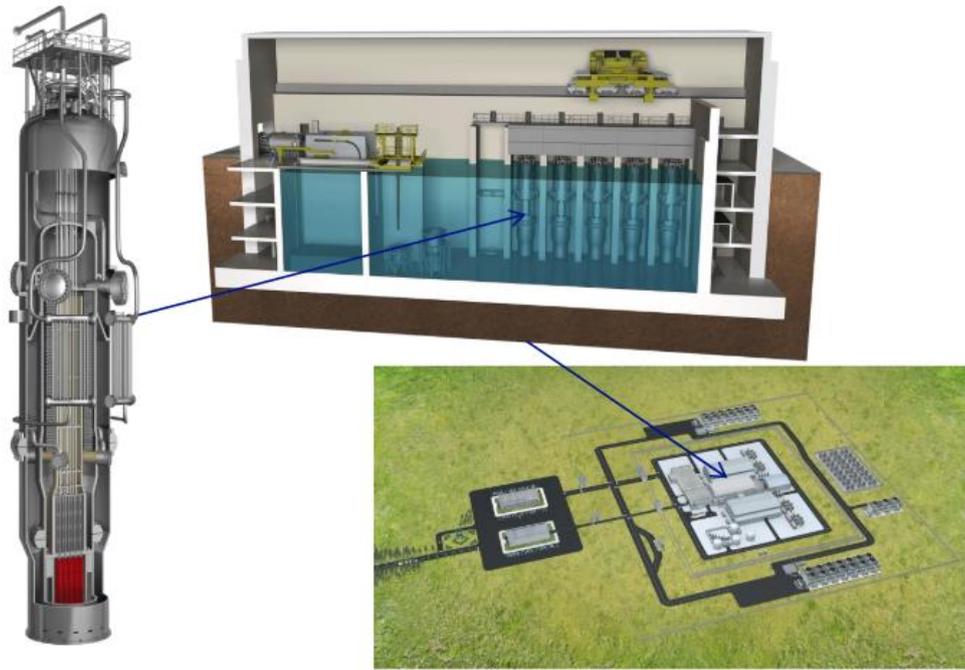


圖 3-7 Nuscale SMR 電廠示意圖[39]

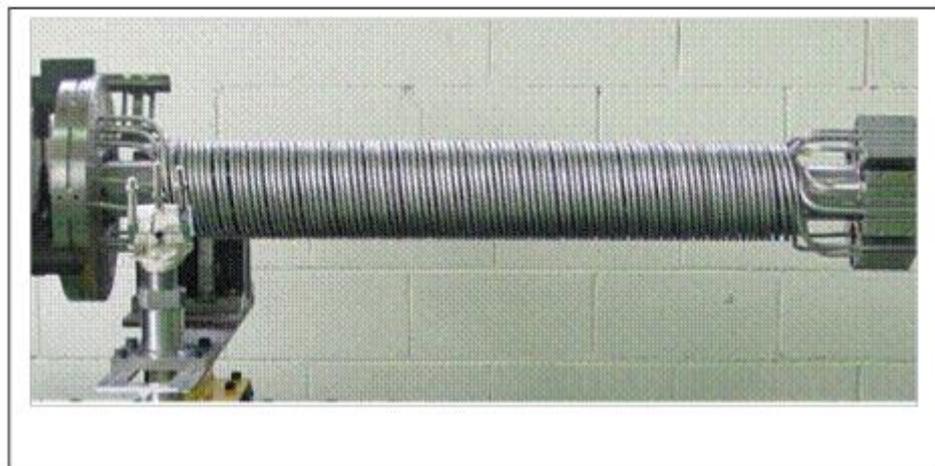


圖 3-8 SMART 螺旋蒸汽發生器模型[40]

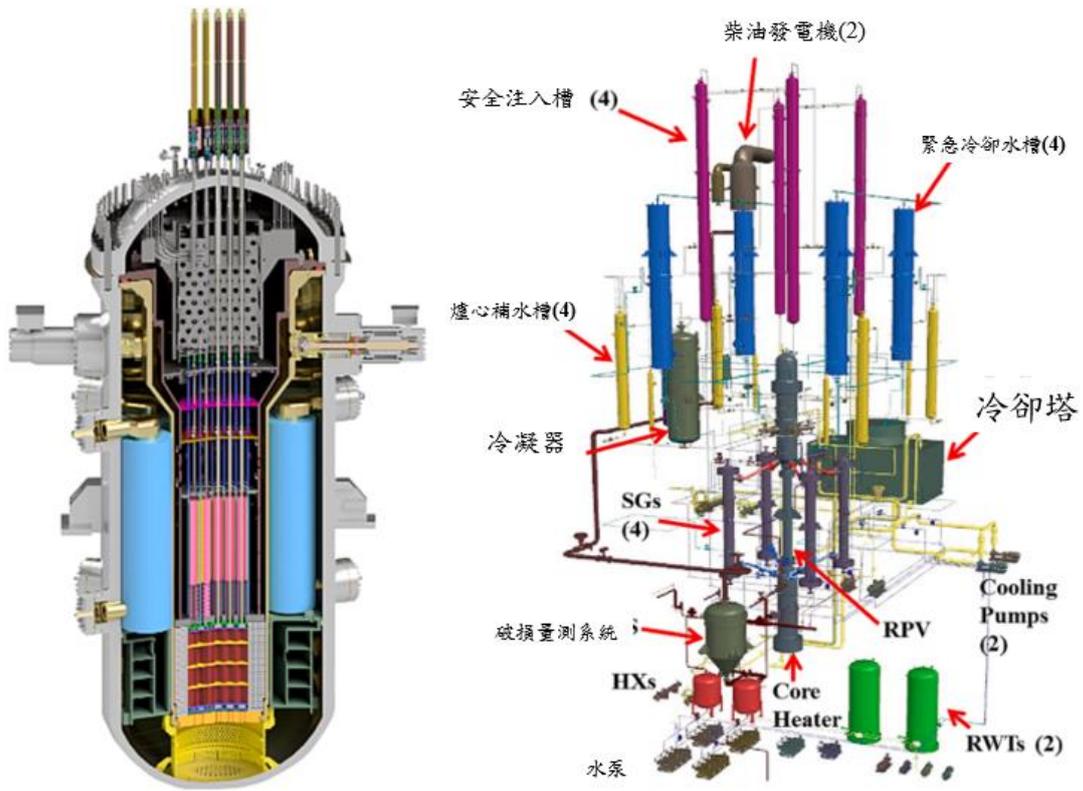


圖 3-9 SMART 組件與安全系統測試迴路[41]

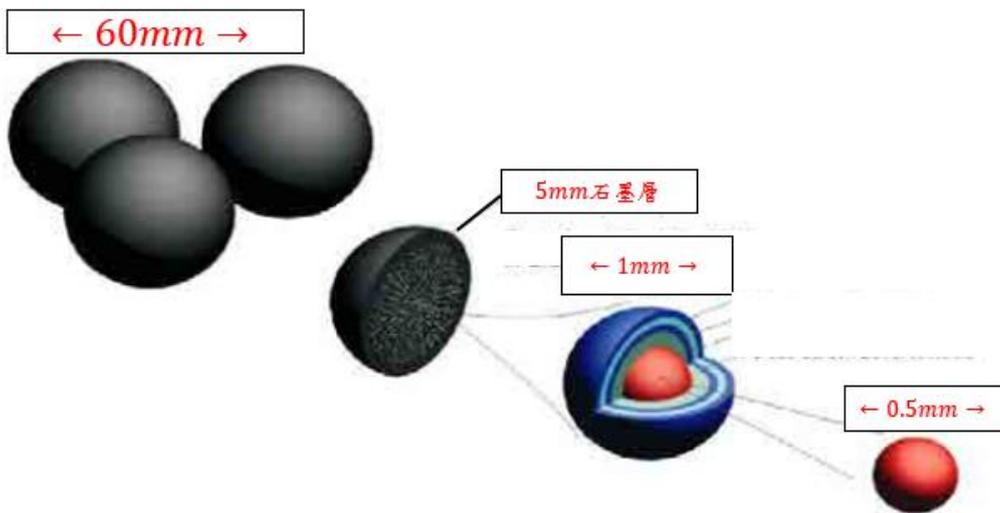


圖 3-10 TRISO 塗層顆粒的球形燃料[43]



圖 3-11 TRISO 塗層顆粒的棱柱形燃料[43]



熱功率	30MW
出口溫度	950 °C(最大)
冷卻劑	氦氣
工作壓力	4.0MPa
功率密度	2.5W/cc
鈾濃度	6%(平均)

圖 3-12 日本 HTTR 高溫氣冷反應器與參數[44]

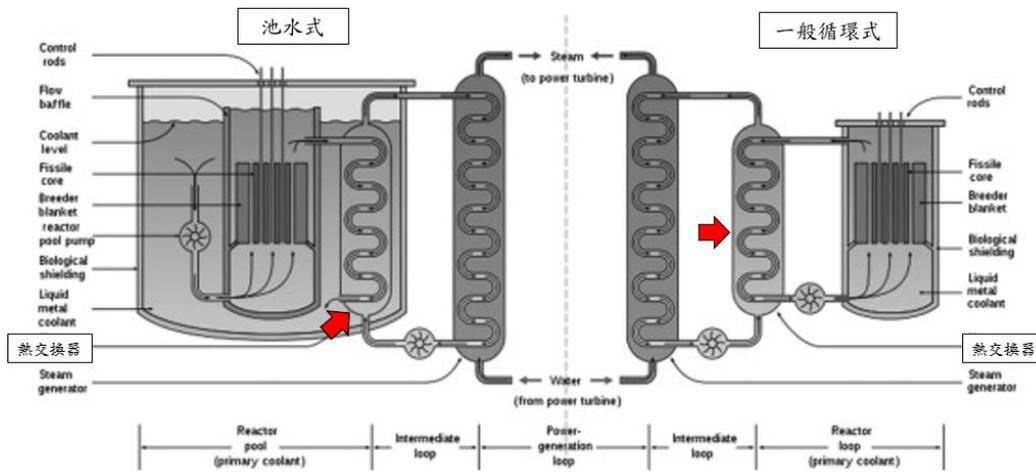
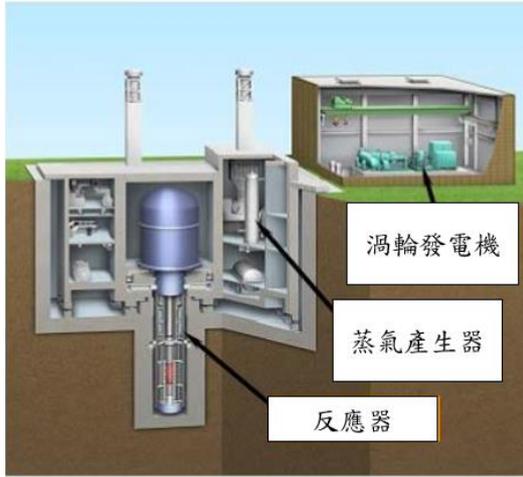
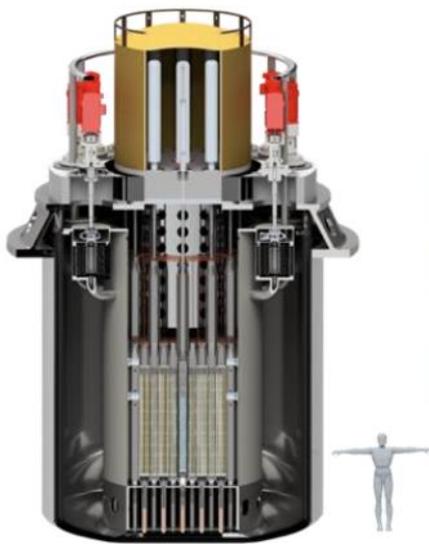


圖 3-13 液態金屬反應器模式圖[46]



熱功率	30MWth
出口溫度	510 °C
冷卻劑	Na
工作壓力	0.2 / 0.55 Mpa (主要/二次側)
U-10Zr 濃度	17%(平均)
類型	Pool type

圖 3-14 日本東芝 4S SMR 電廠示意圖與參數[46]



功率	55MWe
出口溫度	550 °C
冷卻劑	<u>Pb</u>
工作壓力	0.1 / 16.5 Mpa (主要/二次側)
鈾濃度	11.8%
類型	Pool type

圖 3-15 SEALER 電廠示意圖與參數[47]

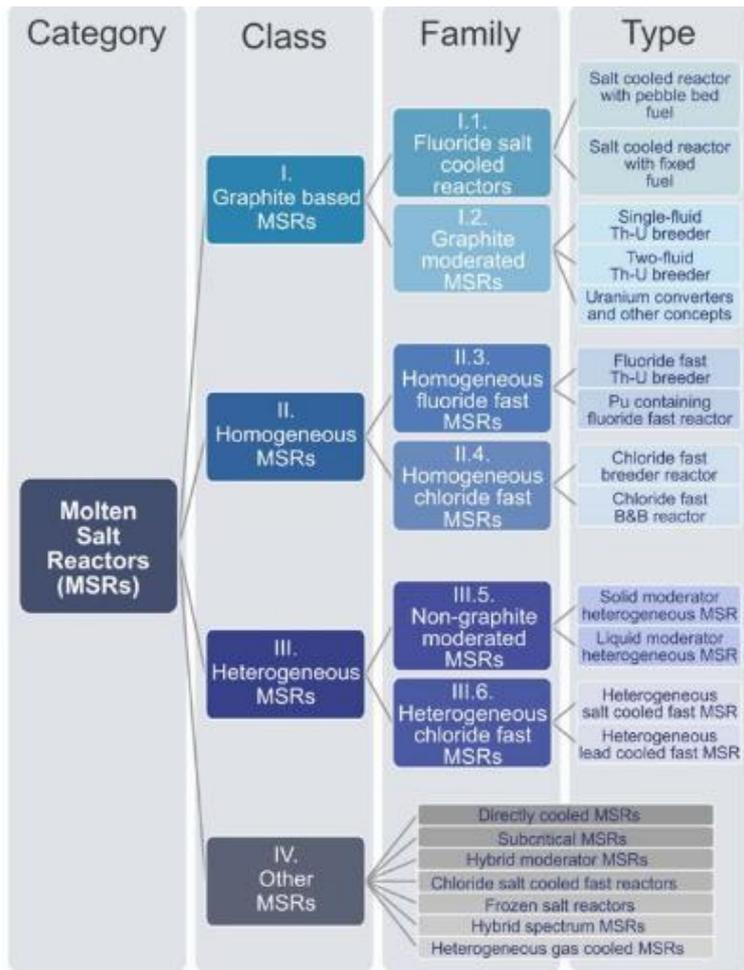


圖 3-16 MSR 分類[49]

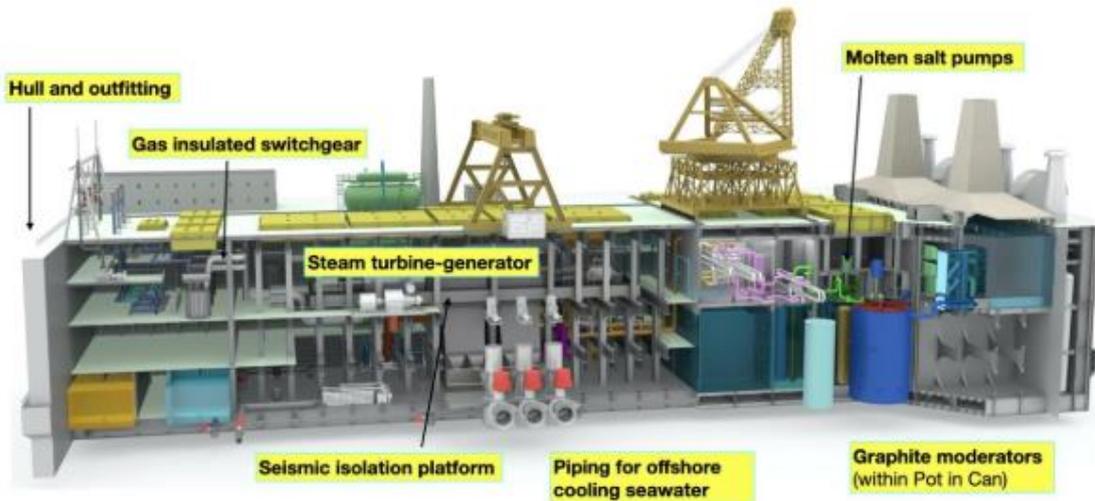


圖 3-17 ThorCon 電廠與關鍵組件示意圖[49]

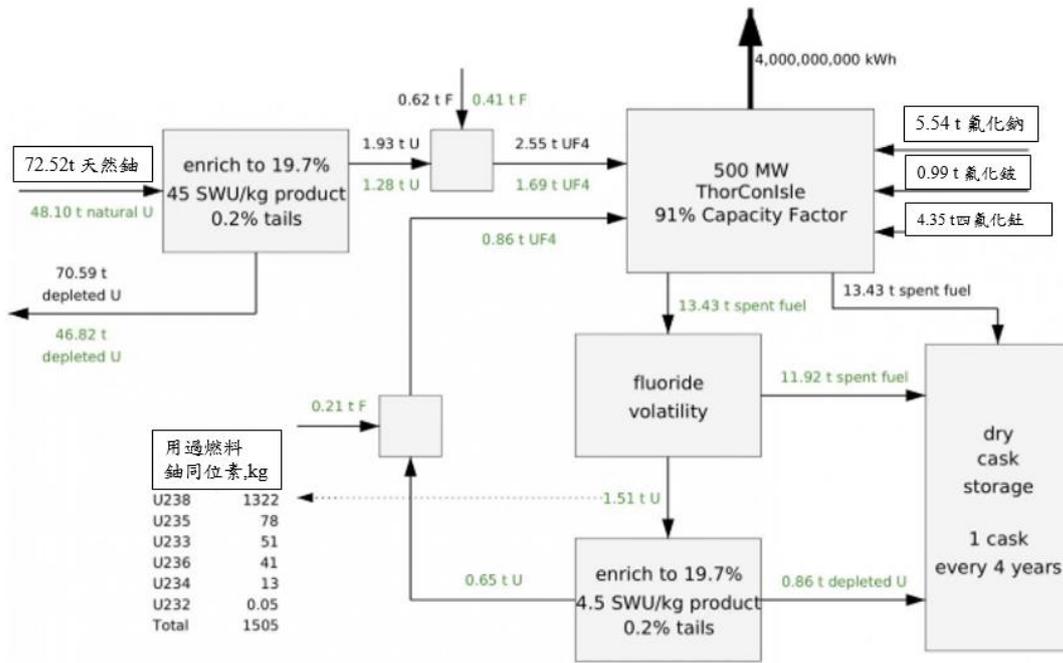


圖 3-18 ThorCon 燃料循環流量圖[49]



圖 3-19 微型反應器 MMR(MoveluX) [50]

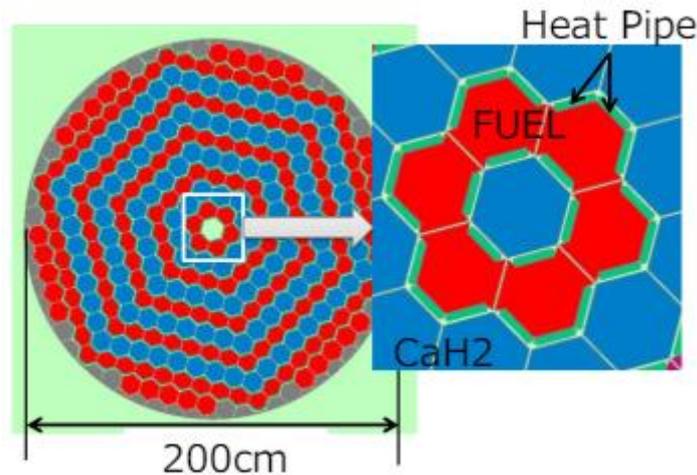


圖 3-20 MoveLuX 爐心水平橫截面[50]

(三) 各國合作及相關管制單位資料蒐集

根據核安會的世界相關國家核安管制單位之組織層級與首長任命方式彙整表，內有 11 國，除了相關國家外，亦會從 IAEA 等國際組織蒐集相關次世代核能管制技術條例，依序會根據各國管制單位對於次世代核能技術管制相關做為進行條列。

韓國原子能安全委員會(Nuclear Safety and Security Commission, NSSC)於 2023 年舉行制定 SMR 法規專家研討會[51]，包括 NSSC 秘書長、來自貿易、能源和工業部、科學和信息通信技術部以及其他政府機構的官員，供應商(i-SMR 技術開發團隊負責人、韓國水電與核能公司、韓國原子能研究所、韓國電力公社(Korea Electric Power Corp, KEPCO)工程與建設公司和 KEPCO 核燃料)及核能領域的學者。i-SMR 開發計畫：2023 年開始開發，2028 年獲得標準設計批准，預計在 2030 年代進入出口市場，從 2022 年 9 月起，監管機構和供應商之間共舉行了 14 次技術審查會議、研討會等，NSSC 的預算相比 2023 年大幅增加，2024 年的 SMR 法規研究項目預算達 67.8 億韓元(1.6 億台幣)，將從 2024 年開始根據技術細節進行法規研究，如能在無電力的情況下維持所有安全設備功能的完全被動安全系統，以及不使用硼酸的反應器爐心 Reactivity 控制等等，2024 年將成立並運轉「SMR 法規研究推進小組」[52]。

中國在核能安全管制條例並未釋出相關資訊，或是其計畫期程，但就國

際發表會上，其舉辦北京展覽館第十七屆中國國際核工業展覽會(簡稱核能工展)，於 2024 年 3 月為期 4 天，共有 110 多家企業參展，美國西屋電氣等全球知名企業展示了其在核電、核燃料、核子技術等領域的最新科技成果。中國主要核能領域集團公司悉數參展，「華龍一號」自主三代核電、高溫氣冷器示範工程、「玲瓏一號」小型模組化反應器示範工程、可控核融合技術“中國環流三號”，以及新一代核燃料元件、放射性廢棄物處理處置、數位化儀控系統等自主創新科研成果在展會發表。另外中國於 2024 年 2 月透過外吊裝技術，在玲瓏一號外使用 3,200 噸吊車緩緩將重約 550 噸的反應建築物屋頂吊離地面，落鉤位在反應器廠房外層圍阻體上，驗證了整體模組吊裝的可行性，為後續小型模組化核電廠建設發展提供寶貴經驗。

美國核管會近期對於核能安全管制等條例沒有發佈新的規定消息，目前還是依照 2018 年所發佈的 Performance-Based Emergency Preparedness for Small Modular Reactors, Non-Light-Water Reactors, and NonPower Production or Utilization Facilities 制定一個新的監管指引(regulatory guides, RG) [53]，描述 SMR 持有者實施建議規則中應急準備(EP)要求的可被接受方法。這份 RG 將作為獨立的指導文件，使用現有指導文件中的概念。此指引提供了關於實施 SMR、非輕水反應器(非 LWR)的緊急應變計畫 Emergency Response Plan, EP) 計畫的指導，NRC 的應急準備法規最初是為大型輕水反應器(LWR)，但未考慮到設計和安全研究的進展及其對未來 SMRs 和非 LWRs 運行的應用。NUREG-0654/FEMA-REP-1 中的現有指南解決了在 10 CFR 50.47 和 10 CFR 第 50 部分附錄 E 下實施應急計畫的問題。

日本原子力規制委員會原子力規制廳(Nuclear Regulation Authority, NRA)在今年三月的報告僅有出席國際原子能總署(IAEA)和經濟合作暨發展組織/核能安全總署(OECD/NEA)的各種會議交換意見，根據其他國家的相關知識進行討論，為國際標準的製定和共同的形成做出了貢獻。小型模組化反應器監管中的安全、保全和保障措施，為了找出問題並增進對核電廠的瞭解，日本有指派專家參加了 SMR 監管者論壇(SMR-RF)，並參與了 SMR 核能協調與標準化倡議(NHSI)，交換了意見。

IAEA 是相關資訊最多的，首先是每年，都會舉辦為期兩週的核能法規密集訓練課程。這項活動被稱為 Nuclear Law Institute [54]，開放最多 60 名參與者，其中主要是來自 IAEA 成員國的律師。協助其成員國制定各自和平利用核能的國家法律。2011 年，為了滿足成員國對核法領域能力建構日益增長的需求。在培訓課程結束時，學員預計將對核法的各個方面有深入的瞭解，並能夠起草、修訂或審查國家核子立法。培訓結束後，參與者將獲得出席證書。2024 年屆會將於 2024 年 9 月 29 日至 10 月 11 日在奧地利維也納舉行。另外，還有用過核子燃料管理國際會議(SFM24) [55]，於 2024 年 6 月 10 日至 2024 年 6 月 14 日在維也納舉辦，SMR 和微型反應器的開發和即將部署越來越受到關注，但用過核子燃料的管理，似乎考慮有限，因此，會議中特別評估部署進步型反應器(例如小型反應器)的潛在影響，使用新的燃料類型，考慮技術發展、監理要求、安全、保障、經濟等，而最近結束的國際核能安全會議(ICON2024) [56]，四年一次，今年在 5 月 20 到 5 月 24 號，會議包含兩部分，除各國高級官員進行政策討論外，另外，有為期四天的技術會議，會議的主題包括：核安政策法規與國際核安框架，包括具有法律約束力和不具約束力的文書、法規的制定和實施方式、監管方法(規定性、績效、技術中立)是否能滿足新興技術，以及新威脅所帶來不斷變化的挑戰；因此，監管機構評估政策和法規的工具和方法，以及跨領域核能安全主題，包含了資訊交流和區域與國際合作，其後續發佈的刊物將會是本計畫的重點研析對象。

統計目前全球已有超過 70 種以上 SMR 設計方案[57]，以美國計畫或在建的數量最多，歸因於科技業的龐大需求刺激與政府能源政策的轉變，設計方案由改良傳統 PWR 壓水式電廠而來的水冷式佔大宗，監管法規大致上也沿用，這部分共有 31 種方案，其次是高溫氣冷式，有 14 套方案，以中國大陸的發展較為領先，如已商轉的石島灣核電廠，然而 SMR 仍是一項非常新穎的技術，除了傳統核電廠的選址、環評與證照許可標準大致上可以沿用以外，模組化的可分拆組裝與非輕水式的設計，在法規上勢必要有所調整，才能面對新式反應器帶來的設計修改、被動安全評估與公眾議題透明度等，以下針對美、中、日、韓、歐盟及俄羅斯等核電大國，收集整理各國家對於核設施

以及 SMR 技術管制發展的現況：

1. 美國

美國的小型模組化反應器(SMR)的監管主要由 NRC 負責，制定專用的法規和審查程序，其他聯邦機構以及任何州或地方政府單位均無權對核設施的安全進行監管，僅少數聯邦機構(例如聯邦應急管理局 FEMA)有權力可以協助核管制委員會執行監管任務，2021 年 NRC 發布了小型反應器許可策略草案白皮書(Micro-reactors Licensing Strategies) [58]，在符合聯邦法規 CFR10 (10 CFR Part 50)的要求下，視情況允許簡化申請流程或延長許可期限，因為傳統電廠的監管法規框架可能會對規模較小的 SMR 造成額外的負擔，NRC 還特別要求設施要能應對物理上的安全需求，確保這些新型態反應器的安全性、經濟性和可持續性。

● 設計認證(Design Certification)

反應器製造商需要提交反應器的設計，並通過 NRC 的認證流程，包括核能安全、輻射防護、物理安全等方面，此外，允許 SMR 設計採用模組化方式提交，每個模組可以獨立獲得設計認證。

● 廠址許可證(Site Permit)

在選擇和建設 SMR 廠址之前，運轉商需要申請廠址許可證(Early Site Permit, ESP)，ESP 評估該地點的適合性，包括環境影響、地震活動、氣候變化、人口密度等因素。

● 聯合許可證(Combined License, COL)

聯合許可證允許在一個案件申請中同時進行反應器設計批准和廠址的建設許可，COL 的申請需要涵蓋安全分析、環境影響報告和緊急計畫，如果 NRC 批准了 COL，運轉商就可以在該地點開始建設反應器。

● 預先許可(Pre-Application Process)

NRC 為新型反應器開發商提供預許可流程，允許開發商在提交正式申請之前，與 NRC 進行早期的技術討論和回饋，協助提早判斷出潛在的設計問題並簡化後續審批過程。

- 安全分析與評估

SMR 必須通過詳細的安全評估，以證明其在各種假設事故情況下的表現，由於 SMR 通常規模較小且具有被動安全特性，NRC 在安全要求上會有所調整，不會完全依照傳統大型電廠的安全標準進行審查，但仍要求設計在關鍵安全系統上冗餘設計，確保防止嚴重事故的發生。

- 環境影響評估(Environmental Impact Statement, EIS)

在頒發任何許可證之前，NRC 必須進行環境影響評估，包括評估反應器對空氣、水資源、土壤以及當地生態系統的影響，並確定如何減輕潛在的負面影響。

- 長期運轉和廢棄物管理

NRC 對 SMR 的長期運轉有嚴格的監管要求，確保反應器在全生命週期內符合安全標準，此外，放射性廢棄物的管理(包括用過核子燃料的處理和儲存)必須符合聯邦和州的核廢棄物處理規定。

- 緊急應對與公眾參與

SMR 廠址的緊急應對計畫必須經過 NRC 的批准，確保在緊急情況下有能夠應對的反應措施，公眾可以通過公聽會等形式參與到審批流程中，對反應器的安全性、環境影響等問題發表意見。

- 物理安全與防護

反應器的物理安全也是監管的重要組成部分，NRC 要求反應器必須具備防止恐怖襲擊或破壞的能力，特別是在設計上考慮如何減輕惡意攻擊對反應器安全的影響。

- 創新反應器政策聲明(Advanced Reactor Policy Statement)

此項聲明表示 NRC 對新技術的支持，並說明了對新反應器技術採用“性能為基礎”的監管方式，意味著 SMR 的某些設計可以得到靈活處理，增加審查效率，但對於核心安全標準不會降低。

2. 中國大陸

中國大陸 SMR 的監管法規是由國家核安全局和國家能源局制定和實施，

基本原則與傳統大型核電廠一致，但考量 SMR 特性允許變更部分安全要求，如選址、設計與建造等[59]。

● 核安全法

《中華人民共和國核安全法》(2017 年通過)是中國核能監管的核心法律框架，明文要求所有核設施(包括 SMR)在設計、建造、運行、除役等各階段都必須符合國家核安全標準，核設施運轉單位需確保在核設施整個生命週期中符合核安全法規的要求，並接受國家核安全局(National Nuclear Safety Administration, NNSA)的嚴格監督。

● 核設施許可證制度

SMR 的建設和運轉需要遵守嚴格的許可證制度，類似於常規核電廠，運轉商需要向國家核安全局申請並獲得多個階段的許可，包括廠址選擇許可證、建造許可證與運轉許可證，運轉商必須證明所選廠址在地質、氣象、地震和人口密度等方面的適合性，在獲得設計批准後，才能開展反應器建設，而建成後，必須進行試運行和全面的安全檢查，才能正式投入運轉。

● 核設施安全法規

中國在 2011 年制定了廣泛的核安全法規體系，包括《核電廠安全規定》和《核安全管理條例》，適用於包括 SMR 在內的所有核設施，涉及安全設計、緊急應變管理、輻射防護和廢棄物管理等方面的權利與義務如何界定劃分。

● 環境影響評估

根據 2019 年制訂的《中華人民共和國環境影響評價法》，所有核設施，包括 SMR，必須進行環境影響評估(Environmental Impact Assessment, EIA)，重點是評估核設施對環境、生態系統和公眾健康的影響，審查和批准過程由生態環境部(MEP)領導。

● 小型和進步型反應器的特別管理措施

為了支持先進核能技術的發展，國家核安全局和國家能源局對小型模組化反應器和其他進步型反應器採取了分類管理，在某些情況下簡化審批程式，具體措施包括允許模組化設計而帶來的分階段建設和投運，而被動安全設計

評估則著重在依賴靠自然物理現象(如重力、自然對流)來冷卻反應器，在監管中需要特別評估和驗證。

● 核廢棄物管理與除役

SMR 的核廢棄物管理與大型核反應器類似，運轉方在核反應器運轉效期屆滿終止後，需提出詳細的除役計畫，必須遵守中國核廢棄物處理的相關規定，如《放射性廢棄物安全管理條例》，這包括用過核子燃料的處理、放射性廢棄物的安全儲存，以及除役後的核設施拆除和環境復原計畫。

● 安全責任與應急預案

依照《核電廠品質保證條例》規定，反應器的運轉方在建造和運行階段的品質保證必須達到要求，確保核電設施的材料、設備和操作符合最高安全標準，且運轉方對核設施的安全性負全責，需要預先建立詳細的應急預案，以符合《核應急條例》要求核設施運轉方在事故發生時迅速做出反應，與地方政府和國家核應急辦公室協作的規定。

● 國際合作與技術標準對接

中國政府積極參與 IAEA 等國際組織的核安全合作，並在制定國內 SMR 監管標準時參考了國際標準，確保中國 SMR 在全球核能市場的競爭力和合規性。

● 國家能源發展規劃

中國政府的能源政策文件，如《能源發展“十三五”規劃》和《核電中長期發展規劃》，明確了核能(包括 SMR)在中國能源結構轉型中的關鍵角色，國家能源局以此進行對 SMR 的支援，包括政策引導、資金支援和技術創新激勵。

3. 日本

由於要降低高達 73% 的火力發電占比(2021 年)至 41%，以實現 2050 淨零碳排，日本政府已出台新能源政策，除提升再生能源比例以外，便是將現有核電廠運轉年限延長或新建核電機組，現主要監管框架由原子力規制委員會(NRA)負責。

自 2011 年福島核事故以後，日本對核能監管的要求大幅提升，尤其是設

施的抗震和防海嘯要求，SMR 同樣面臨嚴格的安全標準和審核流程，甚至比照傳統大型核電廠標準，NRA 對地震動的設定基準(稱為 Ss 級地震動，歷史紀錄中可能發生的最大地震)，核電廠必須要能夠承受 Ss 級地震動，即設施所在區域預期的最大地震，而在遭遇設計基準地震 S1 級地震動時，設施需能維持正常運行，因此，日本政府期望 SMR 的安全性高、規模小和模組化設計上的優勢，能夠成為日本未來核能政策的重要組成部分。

日本原子力機構(JAEA)在 2021-2024 年成立“核系統技術審查委員會”，專案審查期間召開了 3 次會議[60]，討論日本 SMR 潛在商業部署的監管框架提案，認為日本的核能監管框架與大多數其他擁有現有商業核電廠的國家雷同，只重點關注在大型輕水反應器，較為缺乏對小型化 SMR 的資料收集[61]，因此，在監管方面應該要減少一些硬性規定、降低對技術的過度依賴，轉而重視執行效率，並加強評估對美國在中小型反應器和其他進步型反應器部署方面發展狀況。

● 設計和安全標準

日本對核電廠的設計安全標準由 NRA 通過《核安全規制法》(Nuclear Safety Regulation Law, 2012)作為法源依據，是日本福島核事故後強化核設施安全管理的新法規，適用於所有核反應器，包括 SMR，核電廠必須滿足的關鍵安全要求包括地震與海嘯防護，因日本是地震活躍國家，福島事故後對 SMR 設計追加要求，必須考慮強大的抗震和抗海嘯能力，而被動安全系統在日本核安全標準中被高度重視，確保在外部電力中斷情況下反應器仍能保持安全，最後是多重防護設計，日本要求核設施必須採取多重防護(Defense-in-depth)設計，以防止放射性物質釋放和核心損傷事故。

● 應急管理與公眾安全

根據《核應急回應法》，日本的核電廠運轉商必須制定詳盡的應急回應計畫，包括緊急事故情況下的疏散方案、公眾通知機制和輻射監測系統，應急計畫也需考慮其較小規模和潛在事故場景，確保其能夠快速回應任何安全事件。

● 公眾參與與透明度

日本政府自福島核事故後，極為重視核能專案的透明度和公眾參與，在 SMR 的開發和審批過程中，公眾可以通過聽證會和公示等形式表達意見，NRA 還要求核電運轉商公開其安全措施和事故應急計畫，以增強公眾信任。

● 核能發展政策

日本的核能政策由經濟產業省(Ministry of International Trade and Industry, METI)負責制定，核能被視為實現能源結構轉型、降低碳排放的關鍵技術，雖然福島事故後日本一度停止了新核電項目的推進，但在能源戰略調整中，SMR 因其安全性高、規模小和模組化設計的優勢，成為日本未來核能政策的重要組成部分。

● 新技術研發支援

日本政府正在推動包括 SMR 在內的先進核能技術開發，尤其在與國內外企業和科研機構的合作方面有較多政策支援，例如，日立、東芝等企業都在積極研發適合日本國情的 SMR 技術，並希望通過出口拓展國際市場，同時政府也通過技術補貼和科研支援，鼓勵企業開發更安全、更高效的核能技術。

4. 韓國

韓國與台灣相似，能源高度仰賴進口，且都擁有高密度能源產業，若要達成 2030 減碳 40% (2018 年標準)，以及 2050 淨零碳排，核能占比勢必要有所提升[62]，因此過去 20 年間韓國政府對於對小型模組化反應器(SMR)的發展也相當積極[63]，並在 2012 年發展出首個進步型反應器 SMART，透過簡化系統、模組化組件、減少施工時間並確保工廠的可用性以提高經濟性，加強了固有安全功能和被動安全系統，在全球核電小型化浪潮中也努力開發自己的創新小型模組化反應器 (i-SMR)，並且積極堆動核工業的出口[64]。

目前監管法規是由韓國核子安全與保防委員會(NSSC)負責，其規範準則係參考 2008 年美國核子管理委員會(NRC)發布的《進步型反應器監管政策聲明》，並由其下屬的韓國核子安全技術院 (Korea Institute of Nuclear Safety, KINS)進行技術支援與審核，其監管方向與傳統核電廠相似，包括選址、應急

計畫等，雖然 SMR 相對傳統核反應器規模較小，但韓國依然對其設計、建設、運轉等環節實施嚴格監管，要求 SMR 設計需遵守適用於所有核安全法規的基本安全原則與法規，並從三個面向落實監管政策。其一，中小型反應器必須符合國際原子能總署基本安全原則、《核安公約》等國際標準與原則，以及基於客觀科學技術的合理安全法規；其二，中小型反應器必須確保至少與現有大型反應器相當的安全水準；其三，允許現有的監管體系採取靈活的方法對 SMR 實施監察管理。

● 核設施許可制度

韓國對核設施的許可制度分為多個階段，每個階段都需滿足嚴格的安全和技術標準，依序為廠址評估→建造許可證→運轉許可證。

● 進步型反應器技術特別規定

NSSC 為 SMR 制定了一系列特別規定，以適應 SMR 的模組化設計和被動安全特性，包含被動安全系統的評估，因 SMR 通常依靠被動安全系統(如自然對流和重力驅動冷卻系統)，NSSC 對此類設計有專門的評估標準，要求這些系統在電力中斷或極端情況下仍能可靠運行，另針對模組化設計加快許可流程，由 SMR 的模組化設計，允許分階段建造和許可能夠加快開發進程，但每個模組都必須單獨通過安全審核。

● 核電廠及核設施的安全管理標準

是由韓國核子安全技術院(KINS)發佈的一系列技術標準，定義設計、運轉和除役階段的技術要求，KINS/GT-N10 準則適用於小型反應器的設計，規定反應器的抗震設計、防洪設計、事故管理系統等方面的要求，KINS/GT-N20 準則規定 SMR 的日常運轉安全標準，包括如何監測反應器的關鍵參數，如何處理運行中的異常情況，KINS/GT-N30 準則針對核設施的除役程序和廢棄物管理，確保 SMR 除役時不會對環境和公眾產生長期影響。

5. 歐盟

歐盟委員會在 2023 年 3 月通過了《歐洲淨零工業法案》(NZIA)，將 SMR 技術歸類為淨零技術，並且透過碳稅的調整[65]，期盼能夠幫助加速歐洲的

SMR 發展，使其能夠與間歇性的再生能源搭配。

SMR 的監管項目由歐洲原子能共同體(Euratom)和歐洲核安全監管小組(ENSREG)主導，成立歐洲原子能共同體研究和培訓計畫(2021-2025) [66]，以支持中小型反應器的研究和開發活動，計畫涵蓋包括核安、保全、保障、輻射防護和放射性廢棄物管理，並高度重視發展核子相關技能。

歐盟委員會另於 2024 年 2 月成立了歐洲 SMR 產業聯盟[67]，期望能在 2030 年代初期成功部署首批 SMR，但歐盟委員會尊重各會員國決定自己的能源結構，因此在技術審查上保持中立，僅要求設計形式符合歐盟制定的安全與環保標準即可，若新建設施靠近邊界，則需要遵守跨境環境影響評估公約與鄰國協商。

- 歐洲原子能共同體條約(Euratom Treaty)

《歐洲原子能共同體條約》(1957 年)為歐盟的核能監管奠定了法律基礎，Euratom 負責制定和監督歐盟範圍內的核安全、輻射防護和核材料管理標準，所有成員國的核設施，包括 SMR，皆必須遵循 Euratom 的規定。

- 核安全指令(Nuclear Safety Directive)

歐盟通過了《核安全指令》(2014 年修訂版)，要求成員國對核設施進行嚴格的安全監管，並保證其與國際標準接軌，SMR 必須符合該指令中的核心安全要求，包括防止重大事故，確保核設施設計能夠防範重大事故的發生，特別是在極端外部事件(如地震、洪水)情況下依然具備足夠的安全保障，事故後果限制則是規範 SMR 設計需具備快速回應能力，確保即使在事故發生時也能有效限制放射性物質的釋放，此外，歐盟將持續更新安全性規範，各成員國的監管機構必須確保核設施運轉商定期對設施的安全性能進行評估，並根據新技術或風險評估結果進行改進。

- 核廢棄物管理指令

SMR 在運轉中仍會產生用過核子燃料和放射性廢棄物，因此，也必須遵循《放射性廢棄物和用過核子燃料管理指令》(2011 年通過)，該指令要求所有成員國制定和實施國家級的核廢棄物管理計畫，防止非法交易並確保廢棄

物的安全處理和長期儲存。

- 環境影響評估指令(EIA Directive)

根據歐盟《環境影響評估指令》(2014 年修訂)，所有核設施的建設，包括 SMR，必須進行環境影響評估(EIA)，EIA 重點評估核設施對環境、生態系統和公眾健康的潛在影響。SMR 項目在開工建設前，必須向國家和歐盟層級提交環境影響報告，並通過公眾參與機制確保透明度。

- 跨境核安全合作

SMR 專案如果位於歐盟成員國邊境附近，還需遵守《跨境環境影響評估公約》(Espoo Convention)，在鄰近成員國發生跨境核事故時合作，包括資訊共享與應急回應協調，確保與周邊國家的環境和安全。

- 核能安全和監管小組(ENSREG)

ENSREG 的作用是推動歐盟統一的核安全文化，並確保新技術的安全應用，ENSREG 主要負責協調歐盟範圍內的核安全監管，並確保各成員國監管機構之間的資訊共用與合作，也通過定期的同行評審和核安全審查，確保核設施(包括 SMR)符合最高安全標準。

- 放射性廢棄物跨境運輸

SMR 產生的放射性廢棄物跨境運輸需遵循歐盟的《放射性物質安全運輸法規》，該法規規定了嚴格的運輸標準，確保在運輸過程中不會發生放射性洩漏或事故，特別是在跨國界的運輸情況下，需與相關國家進行協調。

- 國家監管機構

在歐盟內部，儘管 Euratom 和 ENSREG 提供了整體監管框架，但每個成員國仍需要有自己的國家級核安全監管機構負責具體的審批和監管工作，例如法國由法國核安全局(ASN)監管其核設施，德國由各聯邦州的核監管機構監管，而瑞典由瑞典輻射安全局(SSM)負責核能安全。

- 公眾參與與透明度

歐盟在核能專案中高度重視公眾參與，根據《公眾參與環境決策指令》(Aarhus Convention)，歐盟要求成員國在核設施的許可和運轉過程中提供充分

的公眾參與機會，SMR 專案在環境影響評估和安全審查期間，必須公開相關資訊並收集公眾意見。

● 創新技術和政策支持

歐盟委員會鼓勵通過研究和創新專案推動 SMR 等先進核能技術的發展，通過“地平線歐洲”計畫，歐盟為 SMR 相關技術的研發提供資金支持，以推動低碳能源轉型，同時，歐盟也積極支持與國際合作，尤其是在 SMR 安全標準、設計優化和廢棄物管理方面的研究。

● 國際合作與 IAEA 標準對接

歐盟積極與國際原子能總署(IAEA)合作，並參與國際核安全標準的制定，參考 IAEA 的《核安全公約》為 SMR 的安全設計、運轉和除役提供了重要的國際框架，要求歐盟成員國的 SMR 專案必須符合 IAEA 的安全建議和導責。

6. 俄羅斯

俄羅斯由於國土廣袤，約 60%–70% 的領土受到永久凍土的影響，偏遠地區難以大規模建設及維護，因此，對能源的基本要求是能夠在不需要大量輸送燃料的情況下，還能保有長期運行的能力，以及能夠以熱電聯產模式運行，產生熱能和電力，這種特殊需求推升民用小型反應器的設計開發活動於 20 世紀 80 年代在俄羅斯開始展開，並廣泛借鑒了前蘇聯海軍與核動力破冰船隊的船用推進反應器的設計和操作經驗，配合陸上的 VVER 型反應器來發展自身的 SMR 技術，特別是在遠東和偏遠地區推進了多個 SMR 專案(如浮動核電廠“羅蒙諾索夫院士號”)。

俄羅斯的民用核能監管機構在過去十年間經歷了數次的組織變革，在多個聯邦部門和部會之間轉移，負責核許可的主要監管機構是聯邦環境、工業和核監督局(Rostechndzor)，並授權自然資源和環境部發布國家核設施安全要求和監管規定，目前俄羅斯的《核電廠選址》NP 031-01 規定 EPZ 半徑距廠址不得超過 25 公里(用僅用於加熱的反應器，則半徑不得超過 5 公里)，而對於正在開發的中小型反應器，EPZ 半徑要小得多：KLT-40S、VBER-300 和 ABV 僅為 1 公里。

與西方主流發展不同的，俄羅斯的 SMR 反應器模組是基於過往船用型式發展而來，具備可以移動的特點，因此並沒有特別強調必需要將裝置設置於地面下來保證安全性，因此儘管俄羅斯擁有大量移動式 SMR 的建造與使用經驗，但由於大量針對固定核設施的要求，浮動式 SNPP 的監管法律架構並不適用於陸上小型核電廠，尚在研議修改中，目前進度最為超前的是採用 RITM-200 反應器系統的電廠，正於雅庫特建造中，預計 2027 年推出第一座機組。

- 核能法

俄羅斯核能開發的主要法律框架是《核能法》(1995 年修訂)，該法為核設施的設計、建造、運轉、除役及放射性廢棄物管理等，提供了法律依據。

- 國家原子能公司(Rosatom)

Rosatom 是俄羅斯的國有核能企業，負責國內外核能項目的開發、建設和運轉，包括 SMR。

- 浮動式 SMR 與北極開發

俄羅斯是全球首個成功部署浮動核電廠的國家，其代表項目為“羅蒙諾索夫院士號”，這一 SMR 專案主要為偏遠地區和北極地區供電。這類浮動 SMR 的設計和運轉需要特別的監管框架，尤其在環境保護、海上安全以及核廢棄物管理方面。

四、討論

(一) 原子能科技民生應用趨勢研析

1. 本報告在「原子能科技民生應用」方面所蒐集國家/組織，已另增加韓國成為 6 個；而在相關技術領域，則已按照國家之科技施政方向與聯合國/IAEA 之定義，重新劃分為七個領域，即「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」及「人工智慧」。另為更清楚了解每個領域之細部內容，在蒐集資訊的分類時，再進一步訂定下一階的子領域，請參表 2-4。
2. 在「精準放射醫療」領域方面：針對國內核醫藥物之未來發展，根據本年度計畫對於國原院、業界及核醫學會之訪談調查，國原院已開始進行「70 MeV 中型迴旋加速器」之興建，預計建成後其固體靶 1，將用來生產 Tl-201, Ac-225, Cu-67, Sr-82 等核種；氣體靶則用來生產 I-123；這些核種將被標誌在合適的化合藥物上，以開發如表 2-1 所示各類放射性診療藥物。業界對於國內「核醫藥物開發的未來方向」建議，包括「...使用放射性標記抗體治療實體腫瘤、胜肽受體放射性核素治療腫瘤，以及骨轉移的複雜治療」；並「...展望放射性藥物的未來發展軌跡，預計前瞻性診斷和治療放射性核種(例如 α 、 β 、和 Auger electron)與人工智慧將會融合應用」。至於核資中心與核醫學會之電子郵件問答，核醫學會建議「...未來核子醫學走向精準診療領域，近幾年來放射核種越來越多應用於癌症治療，如 Ra-223、Lu-177、Ac-225 等。未來急需要開發具有造影與治療相結合配體的核醫藥物，邁向世界潮流」；並「...針對國原院 70 MeV 中型迴旋加速器，建議可以成立諮詢委員會，聘請核醫專家醫師、放射師、藥師背景的博士級臨床業師，方能雙向回饋溝通，創造核子應用大未來...」。故對於國內核醫藥物的發展，國內各行專家可考慮透過核安會未來準備建立的決策機制，經由討論、商議與合作來訂定未來之研發方向。
3. 在「農業與環境」、「工業應用」領域方面：係指採用加馬射源(Co-60)、X 光機、電子束與密封/非密封放射性同位素等輻射照射設備或裝置，

進行消毒滅菌、抑制發芽、材料改質、示蹤、基因改造、定年、液位/密度/水含量偵測、微塑膠/海水酸化/廢棄物處理等；這兩個領域的上述項目研發應用，在 1980-2000 年代的核研所是重要的研發推廣計畫；惟之後，隨著核研所內部研發方向的改變，輻射應用的研究議題逐漸式微。但近年來，在核安會與國原院合作下，利用 MF 研究計畫委託補助多項研究計畫給中興大學、嘉義大學、屏東科大、澎湖科大與農業試驗所，進行九重葛、玉葉金花、毛豆、大豆、蘭花及日日春誘變育種；另也有少數幾項計畫給故宮做古文物之鑑定，或中山大學進行海水酸化的研究；建議來年(114-115 年度)，可由本中心偕同國原院同位素應用所，聯繫國內對此二領域有意願/有能力的技術支援組織，討論未來規劃成立數個聯合研究計畫，以便有效的推廣此方面的研發應用。

4. 在「太空科技」、「半導體製程」兩個領域方面：前者以表 2-4 所列其子領域，包括有推動太空船的核動力、太空船使用之晶片抗輻射，以及太空船上所需核電池；其中國原院物理所於 111 年度開始，與台灣大學、清華大學、太空中心和業界，獲得國科會補助聯合研究計畫，進行「衛星元件開發及輻射驗證環境建構」；另國原院近年來針對 30 MeV 迴旋加速器增設一條中子束，主要是用來執行太空晶片抗輻射測試，這也是上述聯合研究計畫得以展開之原因。後者目前重點仍是離子佈植、電漿物理技術、微影，惟半導體國內業者無論技術/產業均走在世界的前端；故這裡的半導體製程領域，應暫時著重在輻射干擾、輻射效應和訊號反轉(SEE)等技術之建立。建議來年(114-115 年度)，可由本中心偕同太空中心、國原院物理所和同位素應用所，聯繫國內對此二領域有意願/有能力的技術支援組織(如清華大學半導體學院、台大電機、電子相關院系等)，討論未來規劃成立聯合研究計畫，以便有效的推廣此方面的研發應用。
5. 在「中子量子科技」領域方面：國原院的「70 MeV 中型迴旋加速器」將設置有(1)質子照射→衛星電子元件 70 MeV, < 1 μ A；(2)熱中子靶站

(中子照相、繞射等)→Be/Ta, 28 MeV, 500/1,000 μ A；(3)快中子靶站(軟錯誤率測試)→Li/Be, 70 MeV, <10 μ A；(4)熱中子應用射束(未來擴充)等四條射束。國內在中子方面之研發應用，包括有國原院燃材所的「中子照相」、中央大學物理系與清華大學工科系的「中子與 X 光小角度散射與表面繞射研究」。同樣的，建議來年(114-115 年度)，可由本中心偕同國原院燃材所和同位素應用所，聯繫國內對此二領域有意願/有能力的技術支援組織(如清華大學工科系/原科中心、中央大學物理系等)，討論未來規劃成立聯合研究計畫，以便有效的推廣此方面的研發應用。後者量子科技由於技術屬於前瞻性，目前將只著重於人才培育。

6. 在「人工智慧」領域方面：國原院輻射防護所以過去在放射成像所建立之技術與能力，結合 AI 技術加值，與台大醫院、高雄長庚、雙和醫院、陽明交大、亞東、秀傳、耕莘醫院、高雄醫學大學、成大、林口長庚等醫院，在「胸腔 X 光影像」、「臨床 X 光脊椎數據」、「跨年失智前期追蹤」、「阿茲海默症影像異常樣態辨別」、「腦區和臨床病徵的關聯」等方面進行合作。另外，國原院同位素應用所曾執行 109 年度科發基金計畫「應用人工智慧加速原子能科技應用之模式建立與數據開發」，利用人工智慧技術大幅減少化學藥物合成實驗次數。最後，建議來年(114-115 年度)，可由本中心偕同國原院輻射防護所和同位素應用所，聯繫國內對此二領域有意願/有能力的技術支援組織(如清華大學工科系等)，討論未來規劃成立聯合研究計畫，以便有效的推廣此方面的研發應用。
7. 國原院的「70 MeV 中型迴旋加速器」將於 116 年前後興建完工，經 1-2 年試運轉後，可望於 117-118 年正式運轉。此一設施將是原子能科技民生應用的一公用利器，若可能的話，建議能成立使用者群組(User's Group)，接受國內其他研究學術機構申請射束時間(beam time)，進行相關領域(如中子量子科技、太空科技、半導體製程)之實驗研究。也建議本中心可於 115-116 年間，偕同核安會與國原院同位素應用所，討論未來規劃成立聯合研究計畫，以便有效的推動本項業務。

8. 113 年 10 月 11 日，清華大學與原科中心、核工所、工科系老師和研究人員們座談，討論議題有「原子能科技決策支援體系建構計畫」與技術支援組織等；根據現場老師們的發言及問卷調查回覆，大致有下列：(1)當前委託計畫之題目應先集中在原子能科技民生應用、小型模組化反應器(SMR)與核融合之研究；(2)由於 MF 計畫項目較多，但經費費用不大，不容易做較深入或廣度的研究，建議是否將計畫項目減少，以提高單一計畫項目之預算費用；(3)建議「建立太空輻射驗證標準流程及發展元件的 critical charge 的量測技術」，將可以用來預測元件 SEE 的機率，提升國內對半導體元件的設計量能；(4)建議「中子/質子對衛星元件鍍膜材料性質的影響」研究議題；(5)共有 10 位老師填寫問卷，有 9 位願意成為核安會外部原子能科技民生應用技術研究支援體系的成員，有 1 位未表示意見。

(二)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，並依核安會建將次世代核能技術議題及國內人才需求加入未來蒐集範圍及目標(如附件九)。
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，如各研討會成果發表論文摘要等等進行蒐集、整理與研析，以下針對幾個國際知名案例條列簡介：

SMR 小型模組化反應器是一種小型且靈活的核反應器設計，適合分佈式發電和偏遠地區使用，理論上 SMRs 比傳統的大型核電廠更具經濟性，能夠由工廠直接生產零部建後直接運送到廠區安裝，SMR 的發展歷程大致可歸納五個階段，最早期可追溯到 1950 年代，部分國家就已開始進行設計，但主要是用於軍事用途，如船艦所用的核反應器以實現長續航能力，90 年代開始隨著環保意識興起及能源需求的變化，能源機構與核能技術公司開始提出早期的 SMR 概念構想，希望能滿足偏遠地區、小城鎮及工業園區的能源需求，但直到 2000 年以後才開始有較多國家機構與相關企業投入資料研發技術，並提出

許多不同設計版本，如高溫氣冷與金屬冷卻反應器等，2010 年以後逐漸有少數示範型電廠投入商業運轉，代表為俄羅斯的「羅蒙諾索夫院士號」浮動式小型核電廠，最後在 2050 淨零碳排的需求下又開啟一波能源轉型的浪潮，促使 SMR 技術進入全面商業化推廣階段，生產成本和運作效率進也在逐漸的優化當中。

- 美國與加拿大合作：美國和加拿大在 SMR 的研究與監管方面有密切合作，兩國於 2021 年重新訂立《美加聯合清潔能源對話》，強化可再生能源、能源效率和核能技術上的合作，SMR 是這項合作的重點之一，旨在共同開發標準化的 SMR 法規，促進在北美地區的跨境合作，由於美國和加拿大在核能監管上皆擁有完善的制度，預期 SMR 的設計在兩國的審核和認證過程中能取得一致，此外美國西屋公司也與加拿大 Seaspan 公司簽署合作意向書，有助於加速技術的審批和商業化進程，甚至推廣至全球其他國家地區。
- 義大利重返核電：車諾比事件發生後，義大利於 1987 年公投全面禁止核能發電，然自俄烏戰爭以來，能源安全成為一項重大議題，義大利政府被迫放棄對俄羅斯天然氣的依賴，加上 2050 淨零碳排的迫切需求，因此希望能夠減少鋼鐵、玻璃和瓷磚等高污染行業的碳排放，而計畫修法允許先進核能技術，如 SMR 或新式第三代、第四代反應器，倘若核能在能源占比能達到 11%，預期將能節省 170 億歐元碳稅成本。
- 歐洲新創公司合作：法國 Naarea、英國 Newcleo 及荷蘭 Thorizon 等歐洲新創企業正合作開發第 4 代小型模組化核能反應器，並與法國歐安諾集團(Orano)合作投入核廢棄物處理回收技術研發，確保必要燃料之取得及回收作業能力，合作將界定共同核心技術 (Technology Building Blocks, TBB)與零組件標準化，以實現大規模生產，打破傳統核電廠商的壟斷。
- 美國科技業：美國政府於 2024 年通過一項名為先進核電法案 (Advanced Nuclear for Clean Energy Act, ADVANCE Act) [68]，

是《消防撥款和安全法案》(S.870) 的一部分，目的是要加快對下一代核反應爐技術核發許可，改善開發和部署核能新技術的能力，推動核燃料循環與相關供應鏈強化，同時改革美國核管會的審查流程以提高運作效率，並且讓 NRC 與高等教育或職業學校合作開發專門的培訓項目，為核能產業培育人才。該法案期望能提高現有與下一代進步型反應器的安全性與經濟競爭力，因此附帶加快進程相關的獎勵措施制定，希望能降低對下一代核反應器的監管成本，改善出口國際市場的繁瑣流程，重新建立美國的核能領導地位，因而由此催生該國科技產業紛紛宣布與能源公司合作開發核電工業，最知名的案例便是微軟創辦人、前董事長比爾·蓋茲所支持的泰拉能源(TerraPower)，將在懷俄明州的一處舊燃煤電廠改建新型鈉冷卻反應爐(Natrium)，預期將能因此受惠[69]。Google 宣布與核能新創公司 Kairos Power 合作，預計將於 2027 年在田納西州建成啟用示範反應器，並在美國境內建造 7 座小型模組化反應器(SMR)，期望本世紀末前能夠產出 500 MW 電力，以滿足耗費大量電力的資料中心需求，而亞馬遜為推廣旗下 AWS 雲端運算服務，將和 X-energy 公司合作設計 SMR 反應器，為西北能源公司(Energy Northwest)提供 4 座進步型 SMR 的開發和建設提供資金，西北能源公司則可選擇構建 8 個額外的 SMR 機組用以出售電力給普羅大眾，另與 Dominion Energy 合作調查東岸現有核電廠周邊附近適合開發 SMR 的地區，最後，微軟公司也宣布與美國星座能源(Constellation Energy)合作，計畫在 2028 年前重新啟用三哩島核電廠一號機組(非 1979 年事故的機組)，以提供未來 20 年內人工智慧運算所需電力，反應出科技公司在人工智慧和雲端運算技術的迅速發展下，對可靠與清潔能源的迫切需求已遠超再生能源所能供應的額度。

五、結論與建議

(一) 結論

A. 原子能科技民生應用趨勢研析

1. 本期計畫(113年)已按照計畫建議書完成包括：
 - (1) 繼續研析 IAEA、歐、美、日、韓和中國等國際原子能科研體系、重要政策及合作管道，並更新原子能科研各方面資訊。共摘譯各領域各國家/組織資訊計 100 篇。
 - (2) 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。已初步完成原子能科技民生應用各領域之國內外資訊蒐集與研析，並透過國內技術支援組織之訪談與問卷調查，了解各 TSO 對於研究計畫的建議與/或意見；蒐集過去核安會委託相關研究計畫之資訊，進行分類、統計與分析，以作為核安會近期委託計畫對應各領域之基礎數據；並據以分析各研究計畫之技術支援組織的執行能力與成效。
 - (3) 本期計畫之 KPI：除了期中報告與期末報告外，亦彙整編輯了「2024 年國際原子能科技民生應用研究資訊彙編」一份。
2. 有關各國家/組織原子能科技民生應用資訊蒐集，共摘譯與彙編有 105 篇，以領域計「精準放射醫療」有 16 篇、「農業與環境」有 22 篇、「中子量子科技」有 22 篇、「太空科技」有 17 篇、「工業應用」有 13 篇、「半導體製程」有 3 篇及「人工智慧」有 12 篇；而以國家/組織計的話，IAEA、美國、歐盟、日本、韓國與中國，分別為 40、11、10、12、14、18。建議下一期計畫應增加美國與歐盟資訊之蒐集。
3. 有關 MF 與核安會+國原院委託或執行研究計畫兩類，第一類 108-113 年度計共有 114 件，第二類則有 162 件；惟兩類計畫無法類比，前者屬技術培育養成計畫，每個計畫年度經費約 80 萬元；後者則屬有特定達成目標之研究計畫，每個計畫年度經費約在數百萬到數千萬元。透過對這些計畫目標、內容及成果之研析，可得知核安會/國原院在原子能科技民生應用之研究發展方向，是否符合「原子能法」與「111-114 年度原子能

科技民生應用發展策略藍圖」。

4. 有關 MF 與核安會+國原院委託或執行研究計畫兩類，第一類 108-113 年度計共有 114 件，第二類則有 162 件；惟兩類計畫無法類比，前者屬技術培育養成計畫，每個計畫年度經費約 80 萬元；後者則屬有特定達成目標之研究計畫，每個計畫年度經費約在數百萬到數千萬元。透過對這些計畫目標、內容及成果之研析，可得知核安會/國原院在原子能科技民生應用之研究發展方向，是否符合「原子能法」與「111-114 年度原子能科技民生應用發展策略藍圖」。
5. 有關近年來透過委託研究計畫，所建立的核安會外部技術支援組織，在第一類 MF 計畫，七類領域共計有建立 30 個技術研究團隊，內共有 64 個研究小組；而在第二分類研究計畫中，則共有 21 個技術研究團隊、30 個研究小組。將於下期計畫先與核安會討論出一遴選方法，以在各領域能維持一組足夠能力/人力的技術支援組織群。
6. 有關本期計畫於 113 年 10 月 11 日，與清華大學各位技術支援組織計畫主持人舉行座談會，經由當面與各位老師討論；除了獲得許多未來研究方向或議題外，並能深入了解每個技術支援組織的技術專長、能力範圍與團隊人力，應於未來計畫期間經常舉行。

B. 次世代核能技術研析及發展策略研析

至於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，包含法規管制體系其相關發展，國際間重要政策及合作管道，藉由國際經驗來做為我國管制單位提供法條建立參考之借鏡。

截至目前尋找相關管制條例的經驗，趨勢為修訂現有標準，而不是重新製訂新管制標準，如韓國 NSSC 等每年規劃不同的面向，並在當年度邀請學者，製造商共同討論，同時的在管制方與執行方討論下修訂管制標準，減少制訂管制條例的時間，是我國日後可參考的借鏡對象。

IAEA 的 Advanced Reactors Information System (ARIS)提供了重要的 SMR 相關資料查詢介面，其出版之 Advances in SMR Technology Developments 兩

年更新一次，內容相當齊全，今年預計會出版該刊物之 2024 版，將會是未來本計畫重點研析對象之一。

人才需求方面，可大略規劃為五個需求項目，第一、需要物理學研究人員，由於基礎研究主要依賴於電漿物理學和高能物理學，持續優化設定條件以保障穩定性和提高能源輸出效率；第二、現行核融合裝置(如托卡馬克、雷射慣性約束系統)等地建設維護都需要大量的工程人員，包括材料、控制系統、機械與電氣類別；第三、計算機與數據處理在核融合反應過程至關重要，需要高效的資料處理演算法使機器優化學習與應用處理；第四、核融合項目通常涉及大量資金與國際駱學術團隊，因此，也需要專案管理能力和政策制定人才；第五、儘管核融合號稱安全係數高與無廢棄物等優勢，但不能免除其仍舊需要專業管理人員來確保符合法規要求、環境安全、輻射控制及風險評估等，預期未來隨技術發展越趨成熟，工程、資料處理和跨學科領域的研究人才需求將會更多。

(二) 建議

A. 原子能科技民生應用趨勢研析

1. 建議下年度計畫剛開始，由本中心先與核安會/國原院共同討論，如何利用 MF 與補助款研究計畫等有限資源，建立技術支援組織遴選/支助/共享等機制，推動我國原子能科技民生應用之研發/應用/推廣。
2. 建議於下年度(114 年)分別邀集各領域中有潛力的技術支援組織舉行座談，就該領域討論未來規劃成立聯合研究計畫，以便有效的推廣此方面的研發應用。
3. 有關新版「115-118 年度原子能科技民生應用發展策略藍圖」之編撰，為下年度(114 年)最重要工作，由於策略藍圖應有各領域的國內外產業規模(含未來估計)等資訊；在此，亦建議應於下年度展開工作初期，即應儘速與核安會討論解決。
4. 有關本中心承接的「我國原子能科技決策支援體系建構」計畫，在核安會係涵蓋在「我國原子能施政支援體系建構計畫」上位計畫內，經與核安會技術支援組織之座談中，與會代表們均希望能有一單位擔任緩衝者

(moderator)，以便居中協調；並應規劃有一「原子能科技發展策略及決策支援平台」，作為各技術支援組織互通訊息的平台；而該工作項目係於 115 年才開始規劃設計，並交給核安會另案委託給資訊公司，於 116 年底完成該平台。建議本項工作應提前執行。

B. 次世代核能技術研析及發展策略研析

至於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，包含法規管制體系其相關發展，國際間重要政策及合作管道，藉由國際經驗來做為我國管制單位提供法條建立參考之借鏡。

台灣地狹人稠，土地資源稀缺，對比屬於低密度的再生能源，較為穩定的 SMR 系統明顯更有吸引力，若確定將 SMR 納入能源政策，以台灣目前較為保守的核電環境，可先關注國際上目前進度較為超前的案例，如 Google、微軟與亞馬遜與各大能源公司的合作案，待國際上有已建成完工的機組後，再評估引進的可能性，但前提是政府必須有準備，先行配合修訂部分指引或管制法規，才能有效減少 SMR 上線服役的時程。

SMR 系統到底適不適合台灣，其實取決於政府的態度與政策，比較國情相近的韓國為例，其核電產業起步較我國晚，現如今已可自製並外銷技術至中東地區，還擁有 15 個核工相關的系所，顯示其政府在人才培育與技術發展的積極程度，反觀我國隨著核三廠二號機將於 2025 除役，即將正式邁向非核家園，政府政策也不再支持擴大核能發展，這將會使相關專業的學生面臨就業機會減少，甚至必須前往海外發展或轉投其他產業的情況，將來不可避免會面臨人才斷流的可能，不利於台灣未來新式核能技術的發展。

考量未來 AI 人工智慧、雲端運算以及晶圓產業蓬勃的發展，能源需求勢必會持續增長，美國微軟公司甚至已簽約委託電力公司評估重啟三哩島核電廠，以應對未來 20 年的能源需求，或許政府可以開放讓高耗能企業自行培育人才，由事業單位直接引進外國 SMR 技術，再以第三方具公信力的安全機構進行嚴格的審查評估，來兼顧淨零減碳與能源需求增長的未來。

參考文獻

一、原子能科技民生應用趨勢研析

1. ”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. 郭瓊文、尹學禮、鍾玉娟、翁明琪、胡紹薇，”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
3. 郭瓊文、施建樑，”我國原子能科技決策支援體系建構服務建議書”，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，113 年 1 月
4. “108 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，109 年 9 月 29 日
5. “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
6. “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
7. “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
8. “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
9. “113 年度原子能科技學術合作研究計畫清單”，核能安全委員會，112 年 12 月
10. 106-109 年度「原子能系統工程跨域整合發展計畫建議書」，核能研究所，105 年
11. 110-113 年度「原子能系統工程跨域整合發展計畫第二期建議書」，核能研究所，109 年
12. 108-111 年度「核醫藥物與醫材之開發及市場連結」，行政院原子能委員會，107 年
13. 109-112 年度「原子能衍生技術於復健醫療領域之應用計畫」，行政院原

- 子能委員會，108 年
14. 郭瓊文等，「2024 年國際原子能科技民生應用研究資訊彙編」，核安會/核能資訊中心，113 年
 15. 陳皇龍，「台灣輻射源應用現況與發展」，量子輻射科技有限公司，美洲保健物理年會，113 年 8 月 9 日
 16. 106-109 年度「原子能系統工程跨域整合發展計畫建議書」，核能研究所，105
 17. 110-113 年度「原子能系統工程跨域整合發展計畫第二期建議書」，核能研究所，109 年
 18. 108-111 年度「核醫藥物與醫材之開發及市場連結」，行政院原子能委員會，107 年
 19. 109-112 年度「原子能衍生技術於復健醫療領域之應用計畫」，行政院原子能委員會，108 年
 20. 112-115 年度「核醫精準醫學之應用研究與推廣」，行政院原子能委員會，112 年
 21. 112-115 年度「國家中子與質子科學應用研究-70 MeV 中型迴旋加速器建置計畫」，行政院原子能委員會，112 年

二、次世代核能技術研析及發展策略研析

22. DOE. DOE explain Tokamak. [cited 2024 May 22]; Available from: <https://www.energy.gov/science/doe-explainstokamaks>
23. DOE. DOE Explains Stellarators. [cited 2024 May 22]; Available from: <https://www.energy.gov/science/doe-explainsstellarators>.
24. IAEA-PUB-1945, Fundamentals of Magnetic Fusion Technology. 2023, Vienna: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. <https://www.iaea.org/publications/14898/fundamentals-of-magnetic-fusion-technology>
25. PUB-944, I.-. Energy from Inertial Fusion. Vienna: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY.

- <https://www.iaea.org/publications/4746/energy-from-inertial-fusion>
26. Zhang, C.-B., et al., KINETIC MODEL FOR SPACE NONUNIFORM PUMP IN A KrF LASER. Acta Physica Sinica, 2001. 50(4): p. 693-696.
https://www.researchgate.net/publication/288637964_Kinetic_model_for_space_nonuniform_pump_in_a_KrF_laser
 27. IAEA-TECDOC-1136, Inertial Fusion Energy Research. 2000, Vienna: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY.
<https://www.iaea.org/publications/5289/inertial-fusion-energy-research>
 28. IAEA-TECDOC-2049, Plasma Physics and Technology Aspects of the Deuterium–Tritium Fuel Cycle for Fusion Energy. <https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TE-2049web.pdf>
 29. 2024, Vienna: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. ESG 遠見
<https://esg.gvm.com.tw/article/39354>
 30. 經濟日報 <https://money.udn.com/money/story/5612/7792314>.
 31. 環境資訊中心 <https://e-info.org.tw/node/239852>
 32. Water can trigger nuclear reaction to produce energy and isotope gases, 02 January 2024. <https://www.nature.com/articles/s41598-023-50824-8>
 33. 國立臺灣師範大學
<https://pr.ntnu.edu.tw/ntnunews/index.php?mode=data&id=22788>
 34. Accelerating SMRs for Net Zero" initiative launched at COP28
https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_88887/-accelerating-smrs-for-net-zero-initiative-launched-at-cop28
 35. Cop28 將核能發電列入低碳能源選項 <https://reurl.cc/Y40d5D>
 36. IAEA-ARIS. Advanced Reactors Information System. Advanced Designs [cited 2024 May 27]; Available from: <https://aris.iaea.org/>.
 37. IAEA-ARIS, Advances in Small Modular Reactor Technology Developments. 2022: p. 424. https://aris.iaea.org/publications/smr_book_2020.pdf
 38. IAEA-TECDOC-1936, Applicability of Design Safety Requirements to

- Small Modular Reactor Technologies Intended for Near Term Deployment. 2020, Vienna: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. <https://www.iaea.org/publications/14737/applicability-of-design-safety-requirements-to-small-modular-reactor-technologies-intended-for-near-term-deployment>
39. Nuclear Reactors Don't Need to Be So Thirsty
<https://thebreakthrough.org/blog/nuclear-reactors-dont-need-to-be-so-thirsty>
40. IAEA. Status report 77 - System-Integrated Modular Advanced Reactor (SMART). 2011 [cited 2024 May 28]; Available from: <https://aris.iaea.org/PDF/SMART.pdf>.
41. Kang, H.O., B.J. Lee, and S.G. Lim, Light water SMR development status in Korea. Nuclear Engineering and Design, 2024. 419: p. 112966. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0029549324000682>
42. IAEA-TECDOC-1761, Performance Analysis Review of Thorium TRISO Coated Particles during Manufacture, Irradiation and Accident Condition Heating Tests. <https://www.iaea.org/publications/10844/performance-analysis-review-of-thorium-triso-coated-particles-during-manufacture-irradiation-and-accident-condition-heating-tests>
43. HTTR (高温工学試験研究炉) Attachment2
<https://www.jaea.go.jp/english/news/press/2024/032801/att2.pdf>
44. JAEA. Accelerating deployment of Japanese HTGR technologies in collaboration with the UK. 2024 [cited 2024 May 28]; Available from: <https://www.jaea.go.jp/english/news/press/2024/042301/>.
45. IAEA-TECDOC-1978, Structural Materials for Heavy Liquid Metal Cooled Fast Reactors. 2021, Vienna: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. <https://www.iaea.org/publications/14875/structural-materials-for-heavy-liquid-metal-cooled-fast-reactors>
46. Toshiba-4S_2020. 2020 [cited 2024 May 29]; Available from:

- https://aris.iaea.org/PDF/Toshiba-4S_2020.pdf.
47. SEALER-UK_2020. Status Report – SEALER-UK (LeadCold). 2019
[cited 2024 May 29]; Available from: https://aris.iaea.org/PDF/SEALER-UK_2020.pdf.
48. Nuclear Energy: Metal-cooled reactors
<https://www.fortuitouslyfailingforward.com/p/nuclear-energy-metal-cooled-reactors>
49. ThorCon_2020. Status Report – ThorCon (Thorcon US, Inc.)
USA/Indonesia. 2020 [cited 2024 May 29]; Available from:
https://aris.iaea.org/PDF/ThorCon_2020.pdf.
50. IAEA-MMR. Status Report – MoveluX (Toshiba Energy Systems &
Solutions) Japan 2019 [cited 2024 May 29]; Available from:
https://aris.iaea.org/PDF/MoveluX_2020.pdf.
51. Ensuring Criticality Safety of vSMR Core During Transport Based on Its
Temperature Reactivity.
<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/00295639.2019.1685352#d1e273>.
52. KOREA-NSSC. Korea Announces its Policy Statement on the Regulation of
SMRs to Ensure the Highest Level of Safety. 2023; Available from:
[https://www.nssc.go.kr/en/cms/FR_BBS_CON/BoardView.do?SITE_NO=3
&BOARD_SEQ=1&BBS_SEQ=46200&MENU_ID=90&CONTENTS_NO
=1](https://www.nssc.go.kr/en/cms/FR_BBS_CON/BoardView.do?SITE_NO=3&BOARD_SEQ=1&BBS_SEQ=46200&MENU_ID=90&CONTENTS_NO=1).
53. NRC. 2018 [cited 2024 May 29]; Available from: <https://www.nrc.gov/site-help/search.html?site=RegGuide&searchtext=SMR&searchmode=allwords>.
54. IAEA-LAW. Nuclear Law Institute - Admission. 2024
<https://www.iaea.org/services/education-and-training/schools/nuclear-law-institute/admission>.
55. IAEA-SFM24. International Conference on the Management of Spent Fuel

- from Nuclear Power Reactors: Meeting the Moment. 2024
<https://www.iaea.org/events/sfm24>
56. IAEA-ICON2024. International Conference on Nuclear Security: Shaping the Future. [cited 2024 May 29]; Available from:
<https://www.iaea.org/events/icons2024>.
57. Review of Small Modular Reactors: Challenges in Safety and Economy to Success, 17 June 2024. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11814-024-00207-0>
58. Micro-reactors Licensing Strategies
<https://adamswebsearch2.nrc.gov/webSearch2/main.jsp?AccessionNumber=ML21235A418>.
59. 中國先進壓水堆用戶要求檔 1-08 CUR Chinese Utility Requirement Documents for Advanced Pressurized Water Reactors. <https://pse.is/6uemzh>
60. A Proposed Regulatory Framework for Small Modular Reactors, JAEA-Review, 2024. <https://jopss.jaea.go.jp/pdfdata/JAEA-Review-2024-018.pdf>
61. Small modular reactors (SMRs): The case of Japan, Tsutomu Okubo, 2014. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780128239162000175>
62. Proposing a Draft Small Modular Reactor Regulatory Policy Direction for Korea, May 18-19, 2023. https://www.kns.org/files/pre_paper/49/23S-199-%EC%84%9C%EC%98%81%EC%95%84.pdf
63. Social acceptance of small modular reactor (SMR): Evidence from a contingent valuation study in South Korea, 30 July 2024.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1738573324003759>
64. The Feasibility of Small Modular Reactors (SMRs) in the Energy Mix of Saudi Arabia, March 2024.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0029549323007458>
65. Economic potential and barriers of small modular reactors in Europe, October

2024. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032124004696>
66. Small Modular Reactors (LW-SMRs and AMRs) European projects, 19-09-2024. https://research-and-innovation.ec.europa.eu/system/files/2023-02/ec_rtd_smr-projects.pdf
67. 歐洲中小型反應器工業聯盟 <https://reurl.cc/E6eNLg>.
68. 先進核電法案 <https://vocus.cc/article/6672d0abfd897800010c834f>
69. 美國核能 ADVANCE 法案概述 <https://www.cnnpn.cn/article/42323.html>

附件一、原子能科技學術合作研究計畫-MF

領域	年度	計畫名稱	執行機構	備註
精準 放射 醫療	108	運鐵蛋白受體蛋白(TfR)表現型癌腫正子斷層造影劑銨-89-運鐵蛋白之臨床前動物研究	陽明大學	共同主持人：歐○○○、翁○○
		以新穎前驅物開發硼中子捕獲治療造影劑[18F]FBPA	臺北榮總	參與人員：黃○○
		123I-MIBG 造影與臨床心肌灌注/心肌血流量定量檢查結合在預測心衰患者發生致命性心律不整或心因猝死的臨床價值	臺北榮總	參與人員：黃○○
		用於硼中子捕獲治療之多重含硼寡肽之設計與合成	淡江化學系	
		I-123 MIBG 在極早期路易氏體失智症之診斷價值與運用	秀傳醫院	
	109	探討以卵巢癌特異性抗體 CHI3L1 及其抗原辨識區作為卵巢癌診斷藥物之可行性	臺大醫學院婦產科	
		18F-PSMA-1007 之製造與於攝護腺癌之臨床應用	臺大醫學院放射線科	
		結合光-免疫-微脂體與氫-18 去氧葡萄糖車倫可夫輻射之卵巢癌光動力免疫治療研究	陽明大學	共同主持人：張○○
		開發腫瘤微環境特異性放射性標記抗體及蛋白質	陽明大學	
		攝護腺癌造影劑 18F-PSMA-1007 的研製	臺北榮總	共同主持人：黃○○
		開發可用於乳癌之硼中子捕獲治療含硼試劑	淡江化學系	
	110	研究免疫檢查點療法合併受體放射核種治療對前列腺腫瘤微環境之調控機制	馬偕放射腫瘤科	參與人員：張○○、陳○○、吳○○
		建立探討放射治療與免疫調節成份對腫瘤免疫微環境調控機轉之轉譯平台：從分子生物到分子生物影像	陽明交通大學	
		開發用於頭頸癌硼中子捕獲治療之環狀 RGD 胜肽修飾含硼奈米金微粒	陽明交通大學	
		標靶趨化因子受體 CXCR4 之胜肽類正子診斷治療藥物開發	國防醫學院生物及解剖學所	
		利用影像生物指標區辨路易氏體失智症前驅期與老年重度憂鬱症	臺北榮總	
		開發適用於頭頸癌之含硼 RGD 環狀胜肽 BNCT 試劑	淡江化學系	
	蒐集國際大腦解剖標準化軟體之技術、版權、與專利資訊暨評估核醫影像學檢查之最佳使用時機	長庚核子醫學科	共同主持人：蕭○○、邱○○、洪○○、白○○、曾○○、陳○○	

		碘-123 MIBG 心肌造影程序與其心臟/縱膈定量比值之標準化與教育訓練	秀傳核子醫學科	
111		失智診斷友善模式	成大醫學系 神經科	共同主持人：鄭○○、曾○○、邱○○、林○○
		優化卵巢癌特異性抗體 CHI3L1 作為診療示蹤劑的應用性	臺大醫學院婦產科	
		利用影像生物指標區辨路易氏體失智症前驅期與老年重度憂鬱症(第二年)	臺北榮總	
		標靶 α -突觸核蛋白的正子斷層造影藥物開發	國防醫學院生物及解剖學所	
		專一性放射標誌 89Zr-DFO*-ImmunoPET 造影劑於腫瘤 PD-L1 表現之偵測	中臺醫學影像暨放射科學系	
		利用新穎鎵 68 標定纖維母細胞活化蛋白抑制劑正子掃描來評估已知或疑似肺癌之病人：與標準氟 18 葡萄糖正子掃描之比較	林口長庚醫院	
		蒐集國際大腦解剖標準化軟體之技術、版權、與專利資訊暨評估核醫影像學檢查之最佳使用時機(II)	長庚大學醫學影像暨放射科學系	共同主持人：林○○、邱○○、洪○○、白○○、曾○○、陳○○
		分析 F-18 α -syn-3 於神經毒劑誘發之 PD 動物腦中之分佈	長庚醫學影像暨放射科學系	
		放射治療與 CRISPR 基因編輯活化免疫並應用於腫瘤核醫造影研究	長庚大學生物醫學研究所	
112		發展三氫雜環壬烷螯合放射性氟化鋁之成纖維細胞活化蛋白正子造影劑	陽明交通大學	
		建立 Zr-89 專一性位置標誌抗體影像平台以動態觀測人類神經母細胞瘤經 Temozolomide 治療後程式死亡配體-1 之表現量	陽明交通大學	共同主持人：李○○、陳○○、張○○、劉○○
		發展嶄新卵巢癌治療模式:同位素標誌特異性抗體藥物合併化學治療與標靶藥物	臺大醫學院婦產科	
		真實世界的失智診療：核子醫學的角色	成大醫學系 神經科	
		標靶 α -突觸核蛋白的正子斷層造影藥物開發(II)	國防醫學院生物及解剖學所	
	分析 F-18 α -syn-3 於神經毒劑及 PFFs 誘發之 PD 動物腦中之分佈	長庚醫學影像暨放射		

		佈	科學系	
		建立非侵入性影像平台以評估人類神經母細胞瘤經硼中子捕獲治療後細胞程式死亡配體-1 之表現量	陽明交通大學	
		建置 70MeV 中型迴旋加速器之產業應用評估及核醫資料分析與趨勢研究	陽明交通大學	
	113	硼中子捕獲療法於胰臟癌治療反應及腹腔組織副作用之研究	清華大學核工所	
		標靶 α -突觸核蛋白的正子斷層造影藥物開發(III)	國防醫學院生物及解剖學所	
		評估硼中子捕獲療法治療腹腔瀰漫性大腸直腸癌之可行性	臺北榮總	
		評估 alpha-synuclein 病理學相關影像指標在老年憂鬱症認知功能障礙中的角色	臺北榮總	
		建立多同位素製劑影像收集模式以及 3D SPECT 影像分析區辨路易氏體失智症前驅期與老年重度憂鬱症	臺北榮總	
		利用功能性連結來評估 alphasynuclein 病理學相關影像指標在老年憂鬱症之效應	台中榮總	
		利用新穎鎵 68 標定纖維母細胞活化蛋白抑制劑正子掃描來評估已知或疑似肺癌之病人：與標準氟 18 葡萄糖正子掃描之比較	長庚核子醫學科	
		建立三維 I-123 MIBG 單光子斷層掃描造影及定量分析方法應用於老年重度憂鬱症發生失智之研究	振興醫院核子醫學科	
		利用 I-123 MIBG 偵測糖尿病患合併心房顫動是否與心臟的交感神經損傷程度有關並且探討膽固醇在此扮演之角色	秀傳醫院神經科	
農業 與 環境	108	放射線處理在九重葛、玉葉金花及日日春誘變育種上之應用	中興園藝系	
		輻射照射處理於農業之應用	嘉大微生物免疫與生物藥學系	
	109	放射線誘變在經濟蘭花品種改良之研究	中興園藝系	參與人員：廖○○、洪○○
		以伽瑪輻射誘變進行大豆育種並改良發酵益生菌與食用麴菌(2)	嘉大微生物免疫與生物藥學系	
		以碳酸鹽動力學評估硼同位素在海洋酸化之角色	中山大學海洋科學系	

	110	輻射照射在農產品與農業資材的應用研究	農委會農業試驗所植物病理組		
		放射線誘變在經濟蘭花品種改良之研究(二)	中興園藝系	共同主持人：杜○○	
	111	輻射誘變選育耐逆境高蛋白質及機能性大豆與根圈益生菌與高附加值機能性產品開發	嘉大微生物免疫與生物藥學系		
		輻射照射在農產品與農業資材消毒的應用研究	農委會農業試驗所植物病理組		
		112	應用輻射照射於台灣外銷鳳梨之檢疫處理技術開發	中興大學昆蟲學系	共同主持人：羅○○ 參與人員：蘇○○、林○○、路○○、陳○○
			輻射誘變選育耐逆境高蛋白質及機能性大豆與根圈益生菌與高附加值機能性產品開發(2)	嘉大微生物免疫與生物藥學系	
113		輻照對紅龍果果乾品質提升與保鮮之研究	澎湖科大食品科學系		
		放射誘變在毛豆適應極端氣候育種之研究	中興園藝系		
以珊瑚骨骼礫及鉛同位素探討台灣海域之海洋酸化及鉛汙染史		中研院地科所	1,200,000		
伽瑪射線育成文心蘭新品種(一) 放射誘變在毛豆適應極端氣候育種之研究 II	中興園藝系 中興園藝系				
中子量子科技	108	大氣常壓微電漿技術合成矽量子點(I)	臺科大化工系		
	109	大氣常壓微電漿技術合成矽量子點(II)	臺科大化工系		
	111	微電漿輔助發光特性可調控量子點合成技術(1/3)	臺科大化工系		
	112	中子轉化摻雜技術於氫化鎳晶式異質基板之應用可行性評估	清華大學原科中心		
	113	加速器中子散射及反射儀建置與同步輻射 X 光互補技術之研究	清華大學工科系		
太空科技	109	應用於低軌道衛星之抗輻射類比/數位混合晶片電子設計自動化開發(I)	臺大電子工程所	共同主持人：蔡○○	
	110	應用於低軌道衛星之抗輻射類比/數位混合晶片電子設計自動化開發(II)	臺大電子工程所	共同主持人：蔡○○	
		太空環境之積體電路與記憶體元件的輻射效應與製程研究	清華大學工科系		
	111	應用於低軌道衛星之抗輻射類比/數位混合晶片電子設計自動化	臺大電子工程所	共同主持人：蔡○○	

		開發(III)			
		使用太空環境下之半導體元件及相關電路輻射驗證平台培育前瞻原子科學人才	臺大工科及海洋系、電子所/中央物理系	共同主持人：陳○○、朱○○	
		應用於衛星之積體電路與記憶體元件的輻射效應與製程研究	清華大學工科系		
	112	使用太空環境下之半導體元件及相關電路輻射驗證平台培育前瞻原子科學人才(II-III)	臺大工科及海洋系、電子所/中央物理系		
	113	使用太空環境下之半導體元件及相關電路輻射驗證平台培育前瞻原子科學人才(III)	臺大工科及海洋系、電子所/中央物理系		
工業應用	108	文物檢測用之 X 光 CBCT 電腦斷層掃描系統之優化及其應用(I)	故宮登錄保存處		
	109	文物檢測用之 X 光 CBCT 電腦斷層掃描系統之優化及其應用(II)	故宮登錄保存處		
	110	X 光分析技術應用於東方書畫之研究	故宮登錄保存處		
	111	X 光分析技術應用於東方書畫之研究(II)	故宮登錄保存處		
	113	以氬-氬混合氣體之次毫米氣靶提升數兆瓦雷射尾流場電子加速特性之研究	清華大學核工所		
半導體製程	108	離子佈植技術合成金屬奈米粒子之新穎製程開發與機制探討	清華大學原科所	共同主持人：梁○○	
		以電漿處理提升 HfO ₂ 為基礎鐵電記憶體之可靠度與抗輻射性	清華大學工科系		
		半導體元件輻射效應與抗輻射製程研究	清華大學工科系		
		109	X-ray 微影鄰近效應修正技術與高精度高深寬比元件製作應用(I)	臺大電機系	
		109	X-ray 微影鄰近效應修正技術與高精度高深寬比元件製作應用(II)	臺大電機系	
		110	X-ray 微影鄰近效應修正技術與高精度高深寬比元件製作應用(III)	臺大電機系	
	以高介電介面層與磊晶矽鍺層提升鐵電記憶體之可靠度與抗輻射性		清華大學工科系		
		大氣常壓微電漿技術合成矽量子點(III)	臺科大化工系		

		以多重混和電漿製程研製高性能 IGZO 薄膜電晶體元件	元智電機系	
		使用放電產生電漿開發之極紫外光光源	成大太空與電漿科學研究所	
	111	以電漿濺鍍製程進行透明氧化物薄膜太陽能電池之研製	元智電機系	
		X 光、電子等量子束於氧化亞銅異質奈米結構光電化學產氫膜層之材料分析研究與人才培育	義守/材料系	
		以電漿輔助製程與磊晶鍍層提升鐵電記憶體之多位元操作可靠度與抗輻射能力	清華大學工科系	
		高溫離子佈植及氮電漿製程應用於氮化鎵功率元件特性改善研究	清華大學工科系	共同主持人：趙○○
	112	以磊晶鍍層整合種子層、應力層與新穎結晶回火技術實現抗輻射之鐵電記憶體元件	清華大學工科系	
		發展極紫外光干涉儀與精密複數折射率量測之應用	清華大學工科系	
		先進矽鍍場效電晶體元件之製程與抗輻射特性研究	清華大學工科系	
		具有高靈敏度與高可靠度雙閘極氧化銦鎵鋅光電感測薄膜電晶體元件製程開發	明新科大半導體與光電科技系	
		X 光、電子等量子束於氧化亞銅異質奈米結構光電化學產氫膜層之材料分析研究與人才培育(第二年)	義守/材料系	
		極紫外光及以下波段光學元件之保護膜材料開發與微影製像應用	國研院儀科中心	
		具半導體準線上整合能力之 X 光技術開發	陽明交通大學	
	113	應用於次 3 奈米節點平行無光罩直寫微影之電子光學系統設計	臺大電機系	
		奈米製程半導體低能量質子照射研究	清華大學原科中心	
		應用閘極界面製程於矽鍍場效電晶體以增進抗輻射特性研究	清華大學工科系	
		極紫外光及以下波段光學元件之保護膜材料開發與微影製像應用(2/3)	國研院儀科中心	
人工智慧應用	108	利用實境技術增進人類與機器人之互動以輔助輻射作業之應用(II)	臺大機械系	
	111	人工智慧深度學習輔助診斷脊椎壓迫性骨折	台大醫院	共同主持人：曾○○

	113	使用自動分子影像分析及機器學習來進行類澱粉生物標記暨失智轉化預測	長庚核子醫學科	

附件二、原子能科技民生應用科技計畫-核安會科技計畫

分支計畫	年度	分項計畫	執行機構	備註(領域)
原子能系統工程跨域整合發展計畫(3/4)	108	子項三： 發展腦神經退化診斷藥物、腫瘤或癌症診斷或治療藥物、放射影像醫材，以及同步應用中型迴旋加速器產製同位素或開發相關技術以及相關醫療器材為目標。	核研所同位素組、保健物理組	精準放射醫療
		子項四： 研發實用及前瞻工程技術，發展先進之工業級大型量產電弧電漿鍍膜設備，具備低成本製造優勢。並建置高密度電漿聚焦(DPF)實驗室。	核研所物理組	中子量子科技 太空科技 半導體製程 工業應用
		四、核醫藥物與醫材之開發及市場連結	核研所同位素組、保健物理組	精準放射醫療 農業與環境 工業應用
		頭部專用核醫造影系統之衰減校正方法研究與效能驗證	高雄醫學院	精準放射醫療
新穎性腫瘤微環境及國人重大疾病標靶藥物與醫材暨組織修復工程開發計畫(108-111)		亞太核醫醫藥法規與藥政制度研究	陽明	精準放射醫療
原子能系統工程跨域整合發展計畫(4/4)	109	3.核子醫藥及醫材與儀器之應用研究	核研所同位素組、保健物理組	精準放射醫療
		4.電漿技術之節能應用開發與前瞻研究	核研所物理組	中子量子科技 太空科技 半導體製程 工業應用
		四、核醫藥物與醫材之開發及市場連結	核研所同位素組、保健物理	精準放射醫療
新穎性腫瘤微環境及國人重				

大疾病標靶藥物與醫材暨組織修復工程開發計畫(108-111)			組	農業與環境 工業應用
原子能衍生技術於復健醫療領域之應用(1/4)		亞太核醫醫藥法規與藥政制度研究	陽明 核研所物理組	精準放射醫療 精準放射醫療
原子能民生應用與新南向政策願景規劃			核研所	民生應用
原子能科技國際發展趨勢及我國發展策略之研析			核研所	民生應用
原子能科技醫學農業工業等應用之資料研析			秀傳彰濱醫院	民生應用
原子能系統工程跨域整合發展計畫第二期(1/4)	110	【O3】精進放射診療藥物製程及臨床試驗進程，並建立高階放射成像與醫材關鍵技術(1/4)	核研所同位素組、保健物理組	精準放射醫療
		【O4】開發原子物理新穎科技，拓展中子、量子與衍生光電技術之民生應用，促成產業共同投入關鍵技術發展(1/4)	核研所物理組	中子量子科技 太空科技 半導體製程
新穎性腫瘤微環境及國人重大疾病標靶藥物與醫材暨組織修復工程開發計畫(108-111)		四、核醫藥物與醫材之開發及市場連結	核研所同位素組、保健物理組	精準放射醫療 農業與環境 工業應用
原子能衍生技術於復健醫療領域之應用(2/4)			核研所物理組	精準放射醫療
中子動態影像技術開發			清華大學	中子量子科技
甘胺酸甲基轉移酶基因剔除鼠作為肝病診療轉譯研究用動物模式診斷參數之建置			高雄醫學院	精準放射醫療
低溫量子薄膜特性分析			中山大學	中子量子科技
原子能科技民生應用於我國發展策略之研析			核研所	民生應用
國際原子能科研機構發展趨勢及技術布局研究			虎尾科大	民生應用
量子感測元件特性分析研究			中原	中子量子科技

原子能系統工程跨域整合發展計畫第二期(2/4)	111	【O3】精進放射診療藥物製程及臨床試驗進程，並建立高階放射成像與醫材關鍵技術(2/4)	核研所同位素組、保健物理組	精準放射醫療 農業與環境 工業應用
		【O4】開發原子物理新穎科技，拓展中子、量子與衍生光電技術之民生應用，促成產業共同投入關鍵技術發展(2/4)	核研所物理組	中子量子科技 太空科技 半導體製程 工業應用
原子能衍生技術於復健醫療領域之應用(3/4)			核研所物理組	精準放射醫療
抗輻射晶片技術開發與輻射驗證平台			台慶科技教育發展基金會	太空科技 半導體製程
抗輻射電子元件開發與輻射效應評估			清華大學	太空科技 半導體製程
衛星元件太空輻射效應評估及先期技術			核研所	太空科技 半導體製程
核醫藥物產業與趨勢分析			中華民國核醫學學會	精準放射醫療
核醫醫療資料庫及市場分析研究			國立成功大學	精準放射醫療
建立輕度認知功能障礙診斷與評估的核醫影像人工智慧模型			國立陽明交通大學	精準放射醫療 人工智慧
衛星定位系統之可靠度測試研究			長庚大學	太空科技
先進合金系統的中子暨影像技術研			國立陽明交通大學	中子量子科技
量子電容薄膜材料及儲電特性分析			國立中山大學	中子量子科技
抗輻射電子元件開發與輻射效應評估			國立清華大學	太空科技 半導體製程
原子能系統工程跨域整合發展計畫第二期(3/4)	112	O3 精進核醫製藥系統，降低加速器當機率小於13%，完成原料藥主檔案1份、年度藥物技服		精準放射醫療 人工智慧

		37,000 千元、服務 3.7 萬人次、中子源 SOP 3 份，及新藥臨床前試驗 2 件、CMC 20 份、自動合成盒技術 1 件，及應用 AI 提高 ECD 前驅物產率 10% 與標準品達 1 公克/批次，並利用 CT 影像重建 AI 模型與 4 能階 PCD-CT 演算法，使骨科影像相似性達 80%與訊雜比(SNR)提升 20%，並完成小尺寸 PCD 開發驗證。(3/4)		
		O4 完成移動式中子源、量子材料能帶結構組成及生物檢測晶片原型製作，促成產業共同投入平台整合技術研發，完成至少 3 項技術開發，並簽訂外委計畫 3 件，簽約金達 300 千元。(3/4)		中子量子科技 太空科技 半導體製程 工業應用
核醫精準醫學之應用研究與推廣(1/4)		子項一、多聚醣技術於精準醫學之應用研究		精準放射醫療
		子項二、腦部退化疾病之精準影像平台開發		精準放射醫療
		子項三、輻射應用之推廣與研究		農業與環境 工業應用 人工智慧
原子能衍生技術於復健醫療領域之應用(4/4)			核研所物理組	精準放射醫療
國家中子與質子科學應用研究-70 MeV 中型迴旋加速器建置計畫(1/4)	112	O1 70 MeV 迴旋加速器及 1 個氣體靶站與 2 個固體靶站之採購案合約簽訂		精準放射醫療
		O2 質子照射模擬分析平台與射束定位系統設備組裝與測試，監測質子束電流範圍達 1 nA~100 nA，以及射束穩定性監測系統量測範圍大於 3 cm 直徑與訊雜比大於 50 倍。		中子量子科技 太空科技 半導體製程
		O3 1 個快中子靶站、1 個熱中子靶站 (中子產率 10^{14} n/s)及熱中子繞射儀器的整體規劃及基礎設計。		中子量子科技 太空科技 半導體製程
		O4 建立加速器本體室及各靶室之射源項及主屏蔽分析計算模型與參數，蒐集加速器廠商運轉維護資料，建立數據分析模擬基礎。		
		O5 委託工程顧問公司簽約執行地質調查以及迴旋加速器廠館土木工程與廠用系統細部規劃設計、完成建造工程採購發包，以及取得開工前建造執照 (占總工程之 20%)。(公共建設)		

衛星元件開發及輻射驗證環境建構		國原院	太空科技 半導體製程
元件製程抗輻射技術發展		清華大學	太空科技 半導體製程
我國原子能科技決策支援體系先期評估		核資中心	民生應用
半導體元件耐輻射可靠度之關聯性研究		長庚大學	太空科技 半導體製程
放射性碘-131 標幟 PARP 抑制劑於三陰 性乳癌治療效益評估		長庚大學	精準放射醫療
中子斷層影像技術開發		清華大學原科中心	中子量子科技
TSPO 3 rd generation 放射性藥品(I123-ER176)於腦部創傷動物模式(Traumatic brain injury, TBI)影像分析		臺北醫學大學	精準放射醫療
MIBG 類似物及 ER-176 類似物之氟或碘標誌比對研究案		國立陽明交通大學	精準放射醫療
轉移性肝病灶切除前的肝功能評估開放性學術臨床試驗，與電腦斷層掃描體積測量或核磁共振術比較，評估術前殘餘肝功能評估方法：鎩 68-多蕾克鎩正子造影之準確度		和信治癌中心醫院	精準放射醫療
運用人工智慧探討及預測動脈粥狀硬化之形成		國立陽明交通大學	人工智慧
固體靶站設備操作虛擬實境之使用者互動介面優使性評估		致理科技大學	人工智慧
原子能科技基礎研究及環境建構計畫(112)	細部計畫 3：衛星元件開發及輻射驗證環境建構	國原院 物理所	太空科技
	一、太陽電池抗輻射技術發展	國原院/太空中心、產業界/臺灣大學、清華大學	太空科技 半導體製程

		二、元件製程抗輻射技術發展	清華大學/太空中心、產業界/ 臺灣大學、國原院	太空科技 半導體製程
		三、晶片系統抗輻射技術發展	臺灣大學/太空中心、產業界/ 清華大學、國原院	太空科技 半導體製程
原子能系統工程跨域整合發展計畫第二期(4/4)	113	O3 精進放射診療藥物製程及臨床試驗進程，並建立高階放射成像與醫材關鍵技術(4/4)		精準放射醫療 人工智慧
		O4 開發原子物理新穎科技，拓展中子、量子與衍生光電技術之民生應用，促成產業共同投入關鍵技術發展(4/4)		中子量子科技 太空科技 半導體製程 工業應用
核醫精準醫學之應用研究與推廣(2/4)		子項一、多聚醣技術於精準醫學之應用研究		精準放射醫療
		子項二、腦部退化疾病之精準影像平台開發		精準放射醫療
		子項三、輻射應用之推廣與研究		農業與環境 工業應用 人工智慧
國家中子與質子科學應用研究-70 MeV 中型迴旋加速器建置計畫(2/4)		O1 70 MeV 迴旋加速器、1 個氣體靶站與 2 個固體靶站原廠製造進度與品質掌控；Ac-225 同位素先期研究。		精準放射醫療
		O2 電子元件質子照射模擬技術可達 90%均勻照射劑量與質子能量解析度小於 1.5 MeV。		中子量子科技 太空科技 半導體製程
		O3 1 個快中子(> 1 MeV)靶站結構 與工程設計與採購以及熱中子繞射之基礎測試設備建立與功能設計驗證。		中子量子科技 太空科技 半導體製程
		O4 加速器本體室及各靶室之射源項計算與屏蔽分析，導入 PRA 技術，建立迴旋加速器各系統組件關聯性，識別關鍵失效組合。		
		O5 建築基地之地盤改良、地基開挖、基礎工程與屏蔽地基施作，以及地下室空間整建(占總工程之 25%)。(公共建設)		
原子能科技基礎研究及環境建構計畫(113)		細部計畫 3：衛星元件開發及輻射驗證環境建構	國原院 物理所	太空科技 半導體製程

		一、太陽電池抗輻射技術發展	國原院/太空中心、產業界/臺灣大學、清華大學	太空科技 半導體製程
		二、元件製程抗輻射技術發展、	清華大學/太空中心、產業界/臺灣大學、國原院	太空科技 半導體製程
		三、晶片系統抗輻射技術發展	臺灣大學/太空中心、產業界/清華大學、國原院	太空科技 半導體製程
太陽電池抗輻射技術發展			國原院 物理所 光電/半導體技術分組	太空科技 半導體製程
我國原子能施政支援體系建構計畫(113)			核資中心	民生應用
原子能系統工程跨域整合發展計畫第三期(1/4)	114	O3 精進放射診療藥物製程及臨床試驗進程，並建立高階放射成像與醫材關鍵技術(4/4)		精準放射醫療 人工智慧
		O4 開發原子物理新穎科技，拓展中子、量子與衍生光電技術之民生應用，促成產業共同投入關鍵技術發展(4/4)		中子量子科技 太空科技 半導體製程 工業應用
核醫精準醫學之應用研究與推廣(3/4)		子項一、多聚醣技術於精準醫學之應用研究		精準放射醫療
		子項二、腦部退化疾病之精準影像平台開發		精準放射醫療
		子項三、輻射應用之推廣與研究		農業與環境 工業應用 人工智慧
國家中子與質子科學應用研究-70 MeV 中型迴旋加速器建置計畫(3/4)		O1 70 MeV 迴旋加速器及 1 個氣體靶站與 2 個固體靶站交運；符合 GMP 鉛室購置與 Cu-67 同位素先期研究		精準放射醫療
		O2 建立質子束量化分析技術與劑量分布量測系統之量測範圍可達水平面大於 5 cm 直徑與軸向大於 10 cm 深度。		中子量子科技 太空科技 半導體製程
		O3 1 個熱中子繞射平台與 1 個熱中子靶站(中子產率大於 1014 n/s)之細部及工程設計與採購。		中子量子科技 太空科技 半導體製程
		O4 完成細部屏蔽分析計算與各設施與設備活化分析計算，以及輻安評估報告相關章節之撰寫，輻安評估報告通過原能會審查，取得加速器安裝許可；		

		參考迴旋加速器廠商運維策略，解析系統潛在弱點。		
		O5 迴旋加速器支撐基座施工、屏蔽牆、屏蔽樓板與屏蔽屋頂施工(占總工程之 35%)。(公共建設)		
我國原子能施政支援體系建構計畫(114)			核資中心	民生應用
原子能系統工程跨域整合發展計畫第三期(4/2)	115	O3 精進放射診療藥物製程及臨床試驗進程，並建立高階放射成像與醫材關鍵技術(4/4)		精準放射醫療 人工智慧
		O4 開發原子物理新穎科技，拓展中子、量子與衍生光電技術之民生應用，促成產業共同投入關鍵技術發展(4/4)		中子量子科技 太空科技 半導體製程 工業應用
核醫精準醫學之應用研究與推廣(4/4)		子項一、多聚醣技術於精準醫學之應用研究		精準放射醫療
		子項二、腦部退化疾病之精準影像平台開發		精準放射醫療
		子項三、輻射應用之推廣與研究		農業與環境 工業應用 人工智慧
國家中子與質子科學應用研究-70 MeV 中型迴旋加速器建置計畫(4/4)		O1 完成迴旋加速器與放射性同位素實驗室建立，包括 70 MeV 迴旋加速器(含 4 條射束線)、1 個氣體靶站與 2 個固體靶站及 1 個鉛室現場安裝測試與驗收；Tl-201 與 I-123 放射性同位素製程準備。		精準放射醫療
		O2 完成質子照射驗證分析實驗室建立，包括質子束建置與整合運轉測試，可量測質子束能量 30~70 MeV、通率 $10^8 \sim 10^{12}$ p/(cm ² /s)，符合驗證規範。射束調控組件模擬結果與量測差異小於 5%。		中子量子科技 太空科技 半導體製程
		O3 完成中子應用研究實驗室建立，包括 1 個熱中子繞射平台及 1 個熱中子靶站之製造、現地組裝與功能測試。		中子量子科技 太空科技 半導體製程
		O4 建立 70 MeV 迴旋加速器運維策略。		精準放射醫療 中子量子科技 太空科技 半導體製程
		O5 完成屏蔽門及公共設施興建、廠用系統建置、試運轉作業與驗收，以及館舍使用執照、綠建築標		

		章，與智慧建築標章申請取得(占總工程之 20%)。 (公共建設)		
我國原子能施政支援體系建 構計畫(115)			核資中心	民生應用

附件三、次世代核能技術議題及國內人才需求

核融合反應器根據類型分為使用氘(D)與氚(T)作為燃料的磁拘限(MCF)與線性拘限(ICF)，以及現在國內近期關注的聚界能源桌上型核融合，其所使用的是質子與硼(B)撞擊產生熱能之碰撞束融合(CBF)的方式，而非加熱燃料。核融合能量增益因子(Fusion Energy Gain Factor, Q)將為初步評斷其效益之指標，其定義為：

$$Q = \text{核融合產生能量} / \text{外加能量}$$

Q 值越大，核融合產生的能量多於所投入之外加能量，目前 ITER 之 Q 值為 10，而聚界能源目前掌握資訊是能穩定大於 1。

項目	核融合類型	燃料	增益因子 Q
ITER	磁拘限(Magnetic Confinement Fusion, MCF)	D + T	10
JET	磁拘限(Magnetic Confinement Fusion, MCF)	D + T	1.25
NIF	線性拘限(Inertial Confinement Fusion, ICF)	D + T	1.54
聚界能源	碰撞束融合(Colliding Beam Fusion, CBF)	質子(p)+硼(B)	大於 1

為配合國內產業需求，根據研析結果初步判斷其技術可由我國單位進行，研究次世代核能技術國際上如應用高溫超導體(稀土鋇銅氧化物 REBCO)來製造反應器的磁鐵，可縮小反應器體積，提高能源轉換效率，或是 TAE 與 Helion 採用磁場反轉配置技術，結合磁性約束與線性約束優點，並嘗試用無中子的氘-氦三或氘-硼為燃料。能源轉換模式採感應電漿帶電粒子直接取出電流，轉換效率可以達到百分之九十五，下面列出我國可於次世代核能技術產業進行之單位。

單位	應用技術領域
國原院	電漿應用，小型托卡馬裝置研究、迴旋加速器
國家太空中心	機電整合測試能力
工業技術研究院	空間磁場量測技術
中科院	應用脈衝功率系統
成大太空與電漿研究所	研發探針驗證電漿擾流
清華大學核工所	BNCT 技術以及與國家同步輻射中心建立合作，發展 X 光散射圖譜與 X 光吸收譜線技術以執行能源材料、磁性薄膜

未來我國若要投入相關研發，為參加國際研究合作做準備，可考量由電漿技術或機電整合技術著手。電漿技術上，我國的工業技術研究院、清華大學、成功大學、具有較多電漿技術專利申請之學研單位，台灣大學為具有較多中子束技術專利申請之學研單位，國原院在中子束相關的技術涉及領域較廣，且研發成果包含中子產生技術，可應用於核融合反應器中。依照國外發展遇到之挑戰，可考慮國內設備建置技術，以及材料方面的機電整合技術去做切入，目前遭遇較多為物理方面的挑戰，包括反應器材料等，將我國相關產業技術融入於次世代核能技術產業，藉由人才推廣參與國際合作。