

行政院原子能委員會核能研究所
委託研究計畫研究報告

原子能科技國際發展趨勢及我國發展策略之研析

Research on the International Trend of Atomic Energy Technology and
Development Strategy for Taiwan

執行單位：核能研究所

計畫主持人：葛復光

共同主持人：袁正達

期程：109.03.01 –109.12.31

(109 年度)

一、綜合資料

計畫名稱	中 文：原子能科技國際發展趨勢及我國發展策略之研析			
	英 文：Research on the International Trend of Atomic Energy Technology and Development Strategy for Taiwan			
計畫性質	☒ 行政及政策類 ☐ 科學及技術類			
委託單位	原子能委員會綜合計畫處		受委託單位	原子能委員會核能研究所
執行期限	自 109 03 01 起 本年度計畫： 年 月 日 至 109 12 31 止		自 109 03 01 起 全程計畫： 年 月 日 至 109 12 31 止	
主 持 人	姓 名	職 稱	本 年 度 參 與 台 電 計 畫	
			有	否
	葛復光	研究員兼副組長		✓
共 同	袁正達	聘用副工程師		✓
主 持 人				
聯絡人	姓 名：柴蕙質 電話：（公）03-4711400 #3181 （宅）			
	通訊地址：桃園市龍潭區文化路 1000 號核能研究所			

目 錄

一、綜合資料.....	2
二、摘要.....	5
三、研究目的.....	7
四、文獻回顧.....	9
(一) 原子能科技趨勢及發展策略.....	9
(二) 原子能民生應用科學教育推廣.....	11
(三) 國際核能管制架構及核電趨勢.....	12
(四) 國際核子保防資訊及合作拓展.....	13
五、研究方法.....	15
六、研究結果及結論.....	22
(一) 原子能科技趨勢及發展策略.....	22
(二) 原子能民生應用科學教育推廣.....	25
(三) 國際核能管制架構及核電趨勢.....	31
1.加拿大.....	31
2.歐盟.....	33
3.美國.....	34
4.澳洲.....	36
(四) 國際核子保防資訊及合作拓展.....	37
1.日韓與歐盟的法律體系.....	38
2.日韓與歐盟的核子保防權責機關組織架構.....	39
3.我國執行核子保防實施策略建議.....	44
4.參與 IAEA 辦理有關核子保防措施相關會議.....	48
七、參考文獻.....	49
附件一:原子能科普翻譯文宣.....	51
(一)「What is Nuclear Energy?」.....	51
(二)「放射線が“食品の衛生や保存の役に立つ”って知ってる?」.....	57
附件二:核能管制架構、核電使用與民意趨勢.....	73
(一) 加拿大核能管制架構、核電使用與民意趨勢簡析.....	73
(二) 歐盟核能管制架構、核電使用與民意趨勢.....	81

(三) 美國核能管制架構、核電使用與民意趨勢.....	93
(四) 澳洲核能管制架構、核電使用與民意趨勢.....	102
附件三:原子能科技於民生應用發展之策略藍圖	110

二、摘要

(一) 中文摘要

鑑於聯合國對所屬機構資源運用與效率提升的要求，配合推動永續發展目標(Sustainable Development Goals, SDG)的理念，並改變大眾認為只處理核蓄衍(Non-Proliferation Treaty, NPT)議題的刻板印象，近年國際原子能總署(International Atomic Energy Agency, IAEA)積極與聯合國所屬機構推廣原子能科技民生應用，其相關研究議題茲如糧食和農業、醫療、水資源管理、環境及放射性同位素生產與輻射技術等，以延伸其任務涵蓋範疇。我國行政院原子能委員會亦負責推動原子能科技在民生應用的研究發展，以增進民生福祉，然國內原子能在醫療、農業、工業、環境以及生命科學等方面仍有許多值得探索的發展議題，後續視研究資源配置情形，逐步將其它應用之研究納入規劃，進而推動相關科學應用以造福民生。故本計畫藉由探討國際原子能應用發展趨勢，整理逾 50 種民生應用相關之原子能技術群組，並透過專家座談會探討民生應用 8 大領域值得優先投入的技術群組，作為我國未來原子能科技策略規劃之基礎，以推動原子能科技於各類民生用途之應用。

除科技策略基礎研究外，社會接受度也是推動之關鍵，因此本計畫支援原能會辦理 3 場原子能科普業務，並翻譯國際間原子能科普文宣、刊登原子能民生應用簡析等，提供社會大眾多樣的科普資源，讓社會大眾獲取輕鬆有趣的原子能科學知識；在科普文宣翻譯方面，分別無償取得日本原子力產業協會(JAIF) 於 2016 年出版之「放射線が“食品の衛生や保存の役に立つ”って知ってる？」及美國核能管制委員會(US NRC) 於 2017 年更新出版之「What is Nuclear Energy?」，適合國小高年級以上(10 歲以上)至高中生(18 歲以下)的學生閱讀；另外，本研究將中子科技相關應用融入設計概念中，以較具遊戲性的方式，設計科普展具作為科普教材，以推廣大眾原子能民生應用知識。桌上遊戲「中子咻咻咻」的設計，適合 12 歲以上的校園及社會大眾，每次遊玩時間約為 20 至 30 分鐘，可讓使用者獲取輕鬆有趣的中子科技民生應用知識，進而對原子能科學產生好奇與興趣。此外，本計畫亦透過蒐集彙整先進國家如美國、歐盟、加拿大及澳洲等國家之核電的使用狀況、民意趨勢、核能管制架構態樣及運作模式等資訊作為我國之參考。另外，在核子保防方面，目前許多國家均積極建立本土執行保防工作的能力，例如歐盟由歐洲原子能共同體(European Atomic Energy Community, Euratom) 培養境內專家，執行歐盟各國核物料保防任務，日本及韓國也有類似的作法。本研究蒐集國際相關機構作法外，並將比較分析各機構的作法，根據我國環境與條件，提出我國本土執行核子保防實施策略建議。

(二) 英文摘要

Given to the focus shift required by UN in recent years to concentrate more to the Sustainable Development Goals (SDG), IAEA has devoted much effort to share more resource to the application of nuclear technologies. The civilian applications of the atom promoted by IAEA include energy, health, water, food and agriculture, and Industry.

The Atomic Energy Council of the Executive Yuan in Taiwan also actively promotes the civilian application of atomic energy to improve people's livelihood. However, in the domestic the developments associated with that still are worth to explore in terms of medicine, agriculture, industry, environment, and life sciences. Currently, it is scheduled to gradually incorporate other applied research into the plan according to the resource allocation. Therefore, the plan aims to investigate the development trend of the international atomic energy and deliver a strategy for technology development. In this study, we conduct assessments for nearly fifty atomic technology groups for civil purposes, and derive technology strategic priorities for eight fields through the expert panel method. The results of this study could be used in proposing a detailed strategic plan to promote the civilian uses of atomic technology.

Public acceptance of technology is critical for successful strategic implementation. In order to improve public understanding of the atomic energy technology, we support Atomic Energy Council (AEC) in handling three atomic energy popularization works, translate international atomic energy popularization literatures, and provide a variety of popular science resources for the general public (including publish short science articles and develop tabletop game.) Therefore, the general public can acquire interesting atomic energy scientific knowledge and become interested in atomic energy science.

At present, many countries are actively building local capabilities to perform defense work. For example, the European Union established the European Atomic Energy Community (Euratom) to train domestic experts to perform nuclear safeguard tasks in EU countries. Japan and South Korea have similar practices. In addition to reducing the IAEA inspection cost to Taiwan and improve the efficiency of decommissioning of nuclear power plants, it is necessary for Taiwan to establish inspection ability of nuclear material and facility. In addition to collecting the practices of other international agencies, this study will compare and analyze the practices of various agencies. This project proposes a feasibility analysis and local planning implementation strategy based on the status of Taiwan.

三、研究目的

政府規劃與推動科技政策之目的，在於促進科技資源之有效運用與整合，並以科技創新因應國內之發展需求，如醫療與健康、資訊與食品安全、環保與能源、產業生產力等等。但在全球化的時代中，科技策略已不再只是因應國內需求，尚需同時考量產業、民生經濟之發展需求，並協助解決全球化的重大議題，例如：氣候變遷與自然災害、新型病毒與傳染病、能資源稀缺等等。當科技創新的發展已進入後摩爾定律的時代，經濟活動亦朝向全球化、數位化及多元化的方向發展，種種因素都加重了科技創新政策在促進國家經濟發展中之角色。然科技政策涉及基礎科學與技術創新、產業競爭力、社會及經濟發展等複雜的課題與需求，研發策略規劃之重要性也隨之提升。此外，隨著大量的新興科技崛起，先進國家為深化研發能量並推動未知新興領域的突破，多將基礎研究視為主要的研發策略之一，期能在新興科技領域中取得領先地位。因此，先進國家在進行科技策略規劃時，多將應用導向之研發與基礎研究之平衡納入考量，並以政策工具極大化資源分配之效益，以期能透過基礎研究強化科技創新實力與促進國家發展，因此，透過本計畫對原子能科技發展趨勢及我國研發策略規劃，將有助於原能會研擬原子能科技於民生應用的研發策略及推動目標。

本計畫係基於原能會推動原子能科學發展業務所需，透過國際原子能科技發展趨勢及國內產業現況之蒐集研析，提出符合國情之原子能科技政策建議，作為原能會擬訂原子能科技發展策略，推廣原子能科學教育及民眾溝通、促進國際合作交流及建立自主核子保防工作之政策基礎及業務支持。計畫依目標分為「原子能科技趨勢及發展策略」、「原子能民生應用科學教育推廣」、「國際核能管制架構及核電趨勢」、「國際核子保防資訊及合作拓展」四項工作項目。

在原子能科技趨勢及發展策略方面，因應非核家園能源政策，核電廠逐步退場，為推動國家原子能科技轉型，運用原子能及其衍生技術提升產業附加價值，增進社會福祉，鼓勵原子能科技跨領域研究，厚植國家科技能量。原能會委託本計畫團隊蒐集國際原子能科技發展趨勢，探討國內原子能技術產業應用潛力，評析符合國情的原子能科技於民生應用發展方向，做為未來推動國內原子能科技發展之基本方針。原子能業務範圍雖然涵蓋核能安全、輻射防護、核設施除役、原子能應用及相關跨領域系統整合工程分析及應用技術等，但本計畫乃基於科技部 108 至 111 年科技發展策略藍圖，主要針對原子能民生應用技術群組探討，並未涵蓋完整之原子能科技範疇。除科技策略基礎研究外，社會接受度也是策略推動之關鍵，因此本計畫透過支援原能會辦理原子能科普展、翻譯國際間原子能科普文宣、刊登原子能民生應用簡析及開發桌遊等方式，提供社會大眾多樣的科普資源，讓社會大眾獲取輕鬆有趣的原子能科學知識。

關於科普教育的推廣，可以透過網路、展覽、競賽或閱讀等多種方法，而閱讀為國、中小學童最容易接觸方法，2016 年彭采璟在「透過科普讀物閱讀活動對增進國小六年級學童科學家意象之

研究」中提到「科普讀物閱讀活動」能有效減少學童對於科學家之刻板印象，幫助學童建構正向科學家意象，「科普讀物閱讀活動」教學後能顯著提升學童對於未來從事科學活動之意願。另外，為持續推廣大眾原子能科學教育，核研所持續協助原能會辦理原子能科普展覽業務；在原子能民生應用科學教育文宣或教材推廣方面，將蒐集國際原子能組織，如國際原子能總署(IAEA)、美國核能學會(ANS)、世界核能協會(WNA)、全球核能婦女會(WIN Global)、日本原子力產業協會(JAIF)...等，或國際政府組織(如日本文部科學省、經濟產業省)等出版之科普文宣或遊戲書籍資料；藉由搜尋各國國際組織或機構的網站或利用參與國際原子能相關會議的機會進行蒐集，並翻譯編寫成中文科普文宣資料。除了國際原子能科普文宣的蒐集編寫外，另針對 108 年協助原能會辦理原子能科普展的經驗以及本計畫研究成果，規劃相關原子能科技民生應用的技術項目及互動展示內容，讓民眾輕易瞭解原子能相關知識。

此外，本計畫亦透過蒐集彙整先進國家如美國、歐盟等國家之核電的使用狀況、民意趨勢、核能管制架構態樣及運作模式等資訊作為我國之參考。例如加拿大核能安全委員會 (Canadian Nuclear Safety Commission, CNSC) 非常重視與民眾溝通，CNSC 官網即針對加拿大的放射性廢棄物進行說明，例如這些廢棄物從何而來？外觀看起來像什麼？如何被儲存？誰來監督以及放射性會持續多久時間等問題。此外，民眾對於原子能與核電等議題常有爭議，解決的方法就是公開透明並加強與民眾之溝通與獲得信任，在強化公眾信任方面，加拿大採取的作法是採取透明 (Transparency) 的方式，亦即提供公開、負責且易於理解的資訊內容；此外，並堅守對公眾、公民社會、非營利組織、原住民、國內與國際的承諾。本計畫在此架構下，將持續蒐集如美國、加拿大、歐盟、澳洲等先進國家之核能管制機構的架構，以了解其運作體系，並蒐集彙整上述國家的核電使用現況與能源相關民意趨勢，並將正確的相關資訊及時提供我國民眾參考。

在核子保防方面，本計畫主要目的在於蒐集國際組織與鄰近國家實施核子保防的法規與實施方法，以充分掌握建構保防能力的關鍵成功因素，據以制定我國可行策略。目前許多國家均積極建立本土執行保防工作的能力，例如歐盟、日本及韓國都有類似的作法，故本研究蒐集國際相關機構作法外，(日韓與歐盟的法律體系、組織架構)並將比較分析各機構的作法；然而與 Euratom 及日韓專家互動交流以吸取經驗方面，與日本 NRA、韓國 NSSC 等組織聯繫皆有困難，這與年度出國規劃、國家外交政策、可執行任務專家之行程、該組織內部行政規範等有關，需要持續努力。本計畫除加強蒐集、積極與 Euratom 及日韓專家聯繫外，並可透過現有之台日會議、台美會議及與 IAEA 合辦的保防訓練，以了解各國的經驗與做法，由於建構自主能力的實際做法有部分共通性，藉由參考其它國家之經驗，以提升我國核子保防之能力。

四、文獻回顧

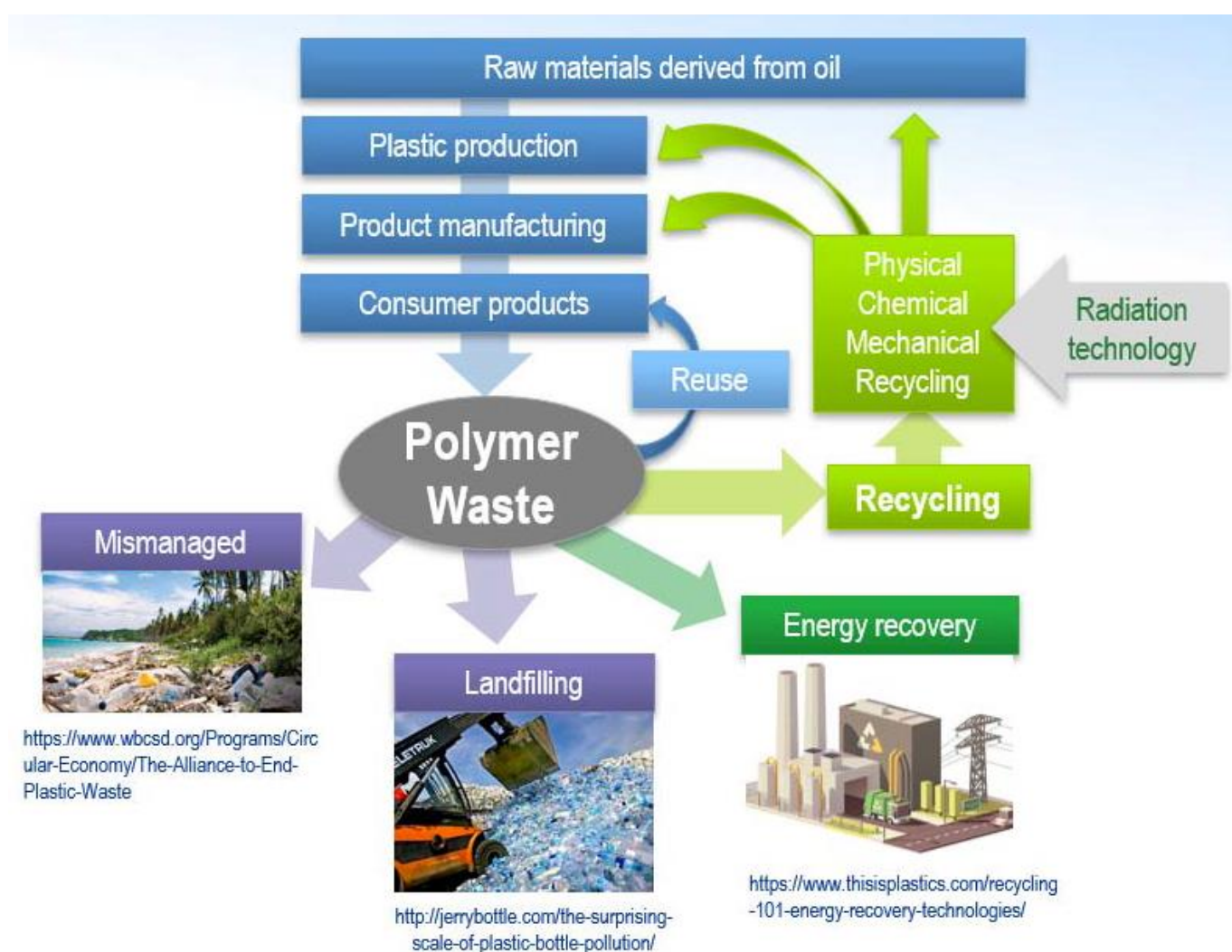
(一) 原子能科技趨勢及發展策略

國際原子能總署(International Atomic Energy Agency, IAEA)近年來積極增加原子能應用之推廣，參與解決人類面臨的問題，也符合聯合國追求永續發展的目標，每年藉由會員國大會的科學論壇宣示並推廣 IAEA 可以擔任的角色與貢獻，並投入更多資源在這些領域，增加 IAEA 在國際議題的參與度與影響力(IAEA, 2018)。根據 IAEA 在 2020 年 9 月出版的「Nuclear Technology Review - 2020」可知，其將原子能在民生的應用上劃分為「糧食和農業」、「人類健康」及「放射性同位素和輻射技術」議題(IAEA, 2020)。有關「糧食和農業」，在 2050 年氣候變遷計畫中，預測節肢物種入侵的發生將平均增加 18%，物種入侵的擴大不僅是植物害蟲，還有蟲媒傳染病(vector-borne diseases)，影響不僅是傳染媒介的時空分布和種群動態，更加速了其生命週期，包括寄生蟲的生命週期、傳播方式和傳播途徑(IAEA, 2020)。IAEA 應用原子能技術加強昆蟲不育技術，以作為蟲害綜合治理的方案；其它如穩定同位素和微量元素分析、磁共振波譜(包括核磁共振(nuclear magnetic resonance, NMR)和電子順磁共振(electron paramagnetic resonance)(或電子自旋共振譜(electron spin resonance spectroscopy)))和質譜分析等技術，可用於驗證食品產地，支援食品追蹤系統的技術建置。

在「人類健康」方面，則可以藉由氘(^2H)和碳-13(^{13}C)的雙同位素示蹤技術，以相對非侵入性的方式量測胺基酸在上腸道的消化性，其本質上是以不同的「同位素標記標準蛋白質」同時供給同位素標記的測試蛋白質，上述標準蛋白質可能是無胺基酸混合物(不需要消化)或完整的蛋白質(如同位素標記的螺旋藻)，其消化性是可預先確定的，故血液中飯後所標記的不同必需胺基酸(indispensable amino acids, IAAs)比率可用於評估測試蛋白質真實的 IAAs 吸收性，該項技術是根據聯合國食品與農業組織(FAO)在 IAEA 支持的 CRP(植物性飲食中蛋白質的生物利用度)要求下所開發的。

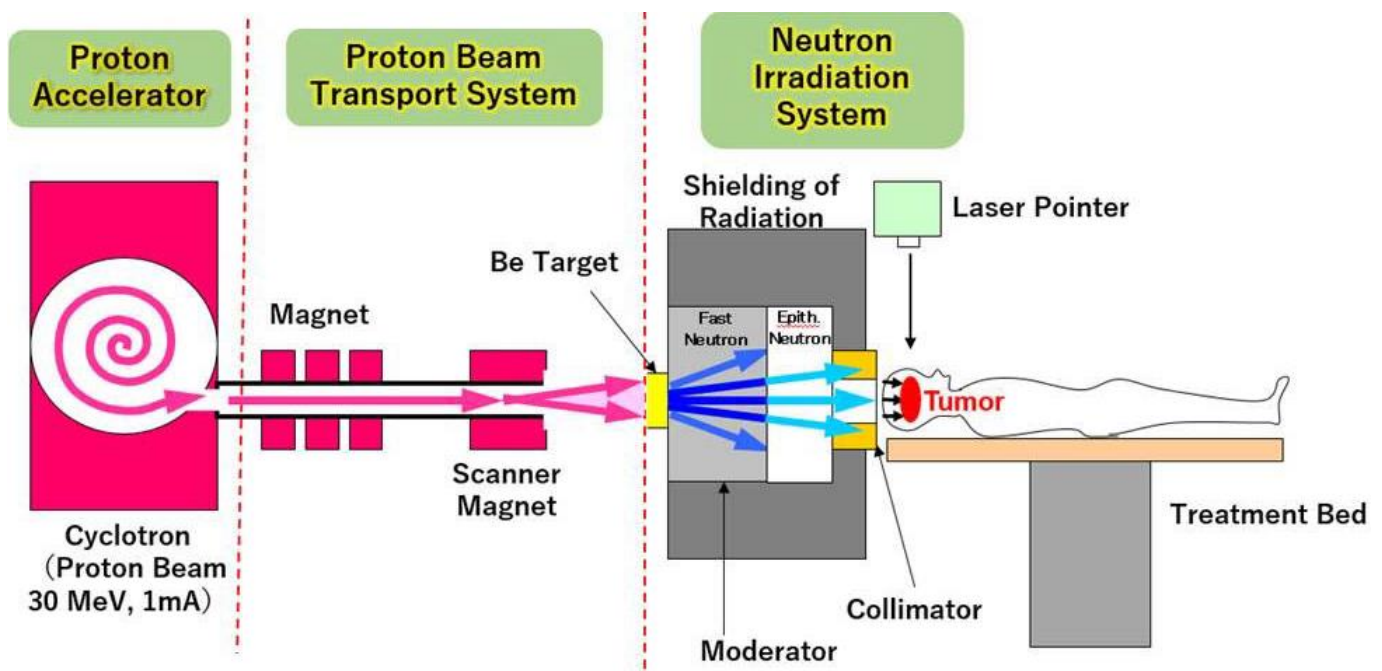
在「放射性同位素和輻射技術」方面，由於輻射技術具有建立塑料循環經濟的潛力，可以作為傳統減少塑料廢棄量的輔助方法，故愈來愈多成員國要求把輻射技術用於全球聚合物廢棄物回收，且輻射技術具有可擴充性，這意味可用於大規模的聚合物廢棄物，藉由化學鍵的可控構造或裂解提供了多種材料可能的加工方法，被視為實現「綠色」化學的重要原理。此輻射過程可用於：修改塑料的結構和特性，或分解塑料以製成原料，在這兩種情況下，改性或功能化新材料或原料都可用於生產商業上可行的再生塑料消費品，從而在減少廢棄物量的同時創造可觀的收益。使用輻射技術還有一個明顯的額外優勢，因為輻射是一種「綠色」技術，可以避免

使用化學聚合物回收所需的溶劑，從而減少對環境的污染和碳排放。當塑膠廢棄物的一次回收不再可行時，就像以傳統技術許多熱塑性塑膠只能回收一次或兩次，使用輻射技術將其回收成新產品特別具吸引力。因此，利用輻射技術回收塑膠廢棄物是一項創新的貢獻(圖 4-1-1)。硼中子捕獲治療(boron neutron capture therapy, BNCT)是輻射技術在「放射性同位素和輻射技術」領域的另一重要應用，圖 4-1-2 所示為以加速器為基礎的 BNCT 不同技術組件，圖中顯示質子被加速到數百萬電子伏特(MeV)至 30MeV 的能量範圍，平均射束電流(beam current)從幾毫安培到幾十毫安培，並與輕元素靶碰撞，如鋰(Li)或鈹(Be)。因此可產生快中子，而該中子又被準直(collimate)、緩和並引導到患者輻照區域。上述「糧食和農業」、「人類健康」及「放射性同位素和輻射技術」領域之議題是新近蒐集彙整，其它茲如「半導體製程」、「太空科技」、「量子科技」、「中子科技」及「工業應用」等領域請參考 IAEA(2019)、Sandia National Laboratories、Karlsruher Institute of Technology、SpaceX Company 及台灣中子科學學會。



Source: IAEA (2020)

圖 4-1-1 塑膠產品的生命週期與塑料廢棄物的產生及處理



Source: IAEA (2020)

圖 4-1-2 以加速器為基礎的 BNCT 架構圖

(二) 原子能民生應用科學教育推廣

在原子能民生應用科學教育推廣方面，我國秉持原子能和平用途為一貫之政策，經多年之發展，原子能在國內醫、農、工業界已有相當普遍之應用，民眾熟悉的核能發電僅是原子能應用其中一部分，實際上原子能的用途甚廣，而為充實民眾對於原子能的知識，許多國家均積極致力於推廣原子能教育。1991 年行政院發布的「原子能應用發展方針」第二條第十項提到，加強各級學校之原子能知識教育，培養學生正確的認識。透過大眾傳播媒體及其他宣導活動，傳播原子能相關知識。而科普教育可作為廣泛推廣原子能知識的方式之一，其中「科普」是指「科學普及」，即通過各種方式，例如文藝、新聞、美術、電影、電視，將科學的技術、知識、思想和方法等，廣泛地傳播到社會的各個階層，以提高人們對科學的認識，進而改善人類的生活（彭采環，2016；章瓊方，2015）。

我國相當重視大眾科學教育的推廣，考量培養科學知識對於國家發展有重大的影響，與人民生活與公共安全息息相關，科技部、教育部、文化部、農委會...等相關部會每年均辦理科普教育推廣計畫。以現況而言，由於原子能應用較著重於核能發電、輻射醫藥、輻射安全防護等領域，其運作原理需要一定程度的理化知識，故多數民眾直到大專以上才有機會接觸原子能科學相關知識，又中、小學層級一般較著重於節約能源及再生能源教育的推廣，目前原子能教育尚未普及向下扎根於中、小學生，間接導致一般民眾在原子能方面的知識較為不足，同時對原子能容易產生誤解，對輻射容易產生疑慮。考量原子能推廣教育涉及許多層面，包含環境、能

源、醫療及安全等，為讓民眾能廣泛接受原子能相關知識，原子能教育需要向下紮根，以科普教育推廣模式有系統有計畫地對青少年教導原子能相關知識。

為推廣民眾對原子能科技與其貢獻的了解，核研所曾經配合原能會於 108 年度協助辦理 3 場「原子能科技科普展覽」，將研發成果轉換為讓民眾能夠了解與親身體驗的活動，總計 108 年的 3 場原子能科普展吸引了 15,040 人次參觀，成功藉由這個活動讓民眾對原子能科技有所認識並產生更大的興趣，也讓原能會規劃將原子能科普展覽定位成例行性的展覽，後續核研所亦接續協助原能會辦理科普展覽相關事項。原子能科技雖已廣泛應用於醫、農、工產業，惟現行原子能科學推廣多侷限核能發電及放射醫學，透過本計畫所蒐集整理之國際原子能科技民生應用資訊，或翻譯國際間原子能科普文宣書籍等資料，將研究成果擴大應用於原能會科學教育推廣，如增設原子能科技展覽攤位、編撰教材或文宣，提供社會大眾多樣的科普資源，不僅讓校園與社會大眾獲取輕鬆有趣的原子能科學知識，同時對原子能科學產生好奇與興趣。而為使一般大眾能不受時間、地域、次數及方式之限制，後續可透過網際網路如能源資訊平台等，分享原子能科普文宣等相關資訊，以提升研究成果效益。

(三) 國際核能管制架構及核電趨勢

關於國際核能管制架構及核電趨勢方面，本計畫亦將蒐集彙整如美國、歐盟、加拿大、澳洲等國家之核能管制架構態樣及其核電的使用概況、公眾溝通等資訊。例如加拿大的核能管制機構為加拿大核能安全委員會 (Canadian Nuclear Safety Commission, CNSC)，CNSC 管制加拿大境內所有核能設施與核能活動，其中包含核燃料循環 (nuclear fuel cycle)。所謂核燃料循環從鈾礦開採、到將鈾礦轉變為核電廠燃料的製程、直到核子反應爐使用過的燃料等一系列過程如圖 4-1，CNSC 亦規範核廢料的安全管理；除此之外，CNSC 進行監督並確保核能物質應用在醫學、研究及其他產業之安全。

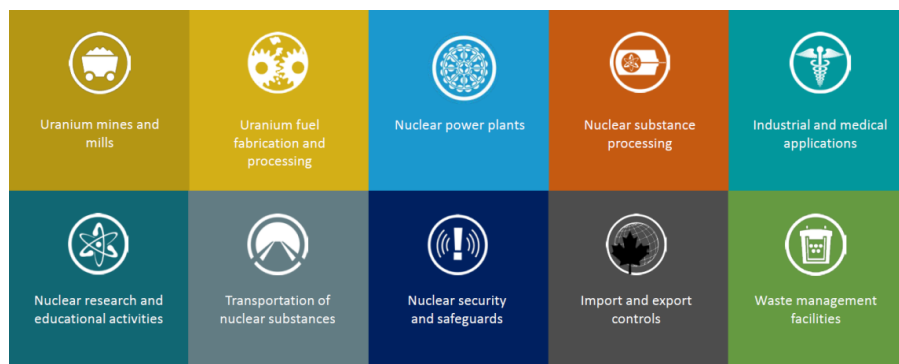


圖 4-1. 受 CNSC 管制之相關核能設施與活動

資料來源：Canadian Nuclear Safety Commission (CNSC) Annual Report 2017-18

(四) 國際核子保防資訊及合作拓展

國際核子保防資訊及合作拓展方面，我國與國際原子能總署(IAEA)依據防止核蓄衍條約(NPT)精神，簽訂核子保防協定，在此協定規範下，我國可進口核物料，以進行核能發電、學術研究及醫農工等和平用途的應用及研究各類型之核能和平用途應用。在該協定下，除了享有持有與利用核子物料的權利，也有接受國際監督的責任以確保核物料作為和平用途的使用，與 IAEA 簽署協定的國家，每年均需接受 IAEA 不定期派遣檢查員執行核設施核物料使用與管理的檢查。IAEA 自 2010 年起，開始推動資訊導向核子保防(Information-Driven Safeguards, IDS)，以提升保防工作之效率與效能，期望可以減少保防檢查員至各會員國實地查訪次數，以降低巨額之旅費支出(余冬帝，2017)。同時，IAEA 也積極協助主要國家提升本身執行核子保防的能力，以分擔 IAEA 執行國際核子保防的壓力，共同承擔保防核物料責任，Euratom 即具有此功能與能力(洪煥仁，2018)。Euratom 成立的目的是為歐洲原子能共同體成立目的在核子能源聯營及分銷共同市場，並可出售剩餘核子能源至境外國家，其後在歐盟執委會(EC)要求下實際負責歐盟國家核物料保防檢查，目前 Euratom 擔負與 IAEA 相同的工作，IAEA 不須派遣檢查員至歐盟地區檢查，Euratom 與 IAEA 為實質的合作關係。

亞洲國家如日本與韓國，近年亦積極建立核子物料的本土管理能力。日本方面，在福島核事故之後，管制單位原子力安全保安院(NISA)改組為原子力規制委員會(NRA)，並將原屬文部科學省(MEXT, Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology)職掌的保防與保安納入其管制權責範圍中(余冬帝，2017)。韓國則與 IAEA 在 1975 年簽署全面保防協定(Comprehensive Safeguards Agreements, CSA)，自 1976 年開始核設施的檢查並建立自己的核物料料帳系統，並於 2006 年成立韓國防止核蓄衍與管理研究所(Korea Institute of Nuclear Nonproliferation and Control, KINAC)(洪煥仁，2018)，專門負責核物料管理與料帳核對之管制責任。凡此，顯示國際間對於核子原物料保防的重視，我國若能提高核子保防能力，除了可以減少 IAEA 至我國視察的次數，也可以提高除役的進度。

本計畫將持續蒐集國際其他機構(如歐盟 Euratom、日本 NRA 及韓國 KINAC 等機構)的資訊，並比較分析各機構的做法，根據我國環境與條件，提出可行性分析及規劃實施策略，供決策與主管機關參考，並同步提升原能會體系核子保防能力。我國與 IAEA 合作已久，IAEA 對我國保防執行報告指出，我國所有核物料均為和平使用。達成非核家園已是我國的能源政策，未來我國三座核電廠及其他核設施將陸續除役，除役工作將會持續進行數十年，參考 OECD 國家如何在法規面藉由立法及實務管理作為，以及用過核燃料與廢棄

物最終處置在核子保防方面的處置，強化原能會暨所屬機關核子保防管理能力並建立原能會自主管制查核能力愈顯重要。建立自主核子保防能力除了可以降低支付 IAEA 執行保防工作費用，更可提升除役工作效率。

五、研究方法

本計畫對於「原子能科技趨勢及發展策略」之研究方法採「專家問卷及座談會技術群組評分」，在問卷設計及專家會議的舉辦上，皆與相關領域的專家討論，以確保研究方法之可行性，俾利結果更符合我國國情。

本計畫專家問卷採下述方法進行，執行方法如圖 5-1 至圖 5-7 所示：(1)蒐集與分析如 IAEA 等國際能源組織有關原子能科技發展和民生應用等資訊；(2)研蒐國內與原子能科技發展及民生應用相關的產業趨勢及發展潛力分析，據以提出在考量我國國情下之原子能民生應用的技術群組，並列於問卷，以太空科技領域為例，分別為建立國內鈷 60 照射場、加速器及質子治療等設施模擬太空游離輻射環境等 4 項技術群組，如圖 5-1。此外也請專家列出其他值得我國發展的技術群組，如圖 5-2；(3)請專家就技術群組的評分要素包含重要性¹、可行性²與產業化可能性³，由高、中高、中、中低、低五個評估層次中勾選評分，如圖 5-3 與圖 5-4；(4)問卷最後部分為專家填寫的信心度，以及對上述評分要素及技術群組產業化潛力做出說明，如圖 5-5。

(一) 重點發展方向

經工作團隊參酌國內外「太空科技領域」的研究走向，初步整理出以下幾個主要技術群組：

1. 建立國內鈷60照射場、加速器及質子治療等設施模擬太空游離輻射環境
2. 晶片輻射效應如：TID(Total Ionizing Dose)、SEE(Single Event Effect)、SET(Single Event Transient)等之研究及測試方法
3. 抗輻射之電子設計自動化(Electronic design automation, EDA)研究
4. 半導體技術中應用在太空的積體電路製造技術，如絕緣體矽(Silicon On Insulator, SOI)

若專家認為尚有其他值得我國發展的技術群組請協助填答以下問題：

圖 5-1 問卷中核研所列出之技術群組

¹ 依國民福祉、國家安全、經濟發展等因素

² 依技術發展、資源投入、國際競爭、專業人才等因素

³ 依國內產業鏈、全球市場規模、關鍵技術掌握等因素

5.1其他：（專家新增重點發展方向，將對應後方重點發展方向的綜合評估專家建議第一項）

請填入文字

5.2 其他：（專家新增重點發展方向，將對應後方重點發展方向的綜合評估專家建議第二項）

請填入文字

5.3 其他：（專家新增重點發展方向，將對應後方重點發展方向的綜合評估專家建議第三項）

請填入文字

圖 5-2 問卷中請專家增列其他技術群組

（二）發展方向的重要性、可行性與產業化可能性評估準則



本調查依領域的**重要性**、**可行性**與**產業化可能性**進行調查，說明如下：

1. **重要性** 包括（但不限於）：依國民福祉、國家安全、經濟發展、...等因素進行綜合判斷。
2. **可行性** 包括（但不限於）：依技術發展、資源投入、國際競爭、專業人才、...等因素進行綜合判斷。
3. **產業化可能性** 包括（但不限於）：依國內產業鏈、全球市場規模、關鍵技術轉掌握、...等因素進行綜合判斷。

圖 5-3 問卷評分要素說明

(三) 重點發展方向的綜合評估

請依以下問卷進行李克特五點量表綜合性的評估。

重要性 包括（但不限於）：請依國民福祉、國家安全、經濟發展、...等因素進行綜合判斷。（此題項請盡量填答）

	低	中低	中	中高	高
1. 建立國內鈷60照射場、加速器及質子治療等設施模擬太空游離輻射環境	☐	☐	☐	☐	☐
2. 晶片輻射效應如：TID(Total Ionizing Dose)、SEE(Single Event Effect)、SET(Single Event Transient)等之研究及測試方法	☐	☐	☐	☐	☐
3. 抗輻射之電子設計自動化(Electronic design automation, EDA)研究	☐	☐	☐	☐	☐
4. 半導體技術中應用在太空的積體電路製造技術，如絕緣體矽(Silicon On Insulator, SOI)	☐	☐	☐	☐	☐

(a)

可行性 包括（但不限於）：請依技術發展、資源投入、國際競爭、專業人才、...等因素進行綜合判斷。（此題項請盡量填答）

	低	中低	中	中高	高
1. 建立國內鈷60照射場、加速器及質子治療等設施模擬太空游離輻射環境	☐	☐	☐	☐	☐
2. 晶片輻射效應如：TID(Total Ionizing Dose)、SEE(Single Event Effect)、SET(Single Event Transient)等之研究及測試方法	☐	☐	☐	☐	☐
3. 抗輻射之電子設計自動化(Electronic design automation, EDA)研究	☐	☐	☐	☐	☐
4. 半導體技術中應用在太空的積體電路製造技術，如絕緣體矽(Silicon On Insulator, SOI)	☐	☐	☐	☐	☐

(b)

產業化可能性 包括（但不限於）：請依國際產業鏈、全球市場規模、關鍵技術轉掌握、...等因素進行綜合判斷。（此題項請盡量填答）

	低	中低	中	中高	高
1. 建立國內鈷60照射場、加速器及質子治療等設施模擬太空游離輻射環境	☐	☐	☐	☐	☐
2. 晶片輻射效應如：TID(Total Ionizing Dose)、SEE(Single Event Effect)、SET(Single Event Transient)等之研究及測試方法	☐	☐	☐	☐	☐
3. 抗輻射之電子設計自動化(Electronic design automation, EDA)研究	☐	☐	☐	☐	☐
4. 半導體技術中應用在太空的積體電路製造技術，如絕緣體矽(Silicon On Insulator, SOI)	☐	☐	☐	☐	☐

(c)

圖 5-4 問卷評估要素(a)重要性、(b)可行性及(c)產業化可能性



謝謝您願意撥冗參加專家會議，煩請填寫以下問題，以利專家會議能順利進行討論。

請問您對此次原子能科技於民生應用之技術群組問卷 - 太空科技領域填表的信心程度？(請填:高、中、低)

請填入文字

請依評分內容，簡略地就整體太空科技領域中的技術群組於民生應用的重要性、可行性及產業化可能性做說明。

請填入文字

請依評分內容，簡略地就整體太空科技領域中的技術群組產業化之潛力做說明。

請填入文字

圖 5-5 問卷信心程度及評分說明

完成回收所有專家問卷後進行結果整理，包含所有技術群組(含原本核研所列出及專家建議新增)、專家技術群組評分及意見說明，而專家填寫的信心度方面幾乎都為中等以上，可見問卷結果極具參考性。

完成問卷整理後舉辦專家座談會議，首先針對各領域的技術群組整併並且進行更精確的命名，並依發展優先順序高、中、低排序，以太空科技領域為例，所有技術群共 7 項如圖 5-6，整併後 5 項技術群組排序結果如圖 5-7。

依上述方法進行所有 8 大領域，除太空科技外還包含環境及水資源、醫療、糧食及農業、量子科技、半導體製程、工業應用、中子科技排序，建構我國原子能科技於民生應用發展的策略藍圖，如圖 5-8 所示，本策略藍圖分為三階層，最內層為產業經濟、前瞻應用科技、能資源與環境、健康與民生 4 面向；第二層為各面向所屬的領域，總共 8 大領域如上述；最外層為各領域標示發展順序高、中、低之技術群組。

- A. 建立國內鈷60照射場、加速器及質子治療等設施模擬太空游離輻射環境
- B. 晶片輻射效應如：TID(Total Ionizing Dose)、SEE(Single Event Effect)等之研究及測試方法
- C. 抗輻射之電子設計自動化(Electronic design automation, EDA)研究
- D. 太空用的積體電路製造技術
- E. 在輻射環境建立時，建議考慮納入半導體元件即時量測系統之安全量測室。
- F. 抗輻射之太陽能電池(solar cell)及衛星電池(battery)製程發展
- G. 寬能隙(Wide Bandgap, WBG)半導體元件及電路在高輻射環境之可靠度

圖 5-6 技術群組盤點彙整

排序高:

- C. 抗輻射之電子電路設計技術(原C)
- D. 太空用的積體電路製造技術(原D)

排序中:

- E. 抗輻射之太陽能電池及衛星電池製程發展(原F)

排序低:

- A. 精進模擬太空游離輻射環境設施和即時量測系統(原A,E)
- B. 半導體元件及晶片於輻射效應下之可靠度研究及測試方法(原B,G)

圖 5-7 技術整併結果及排序

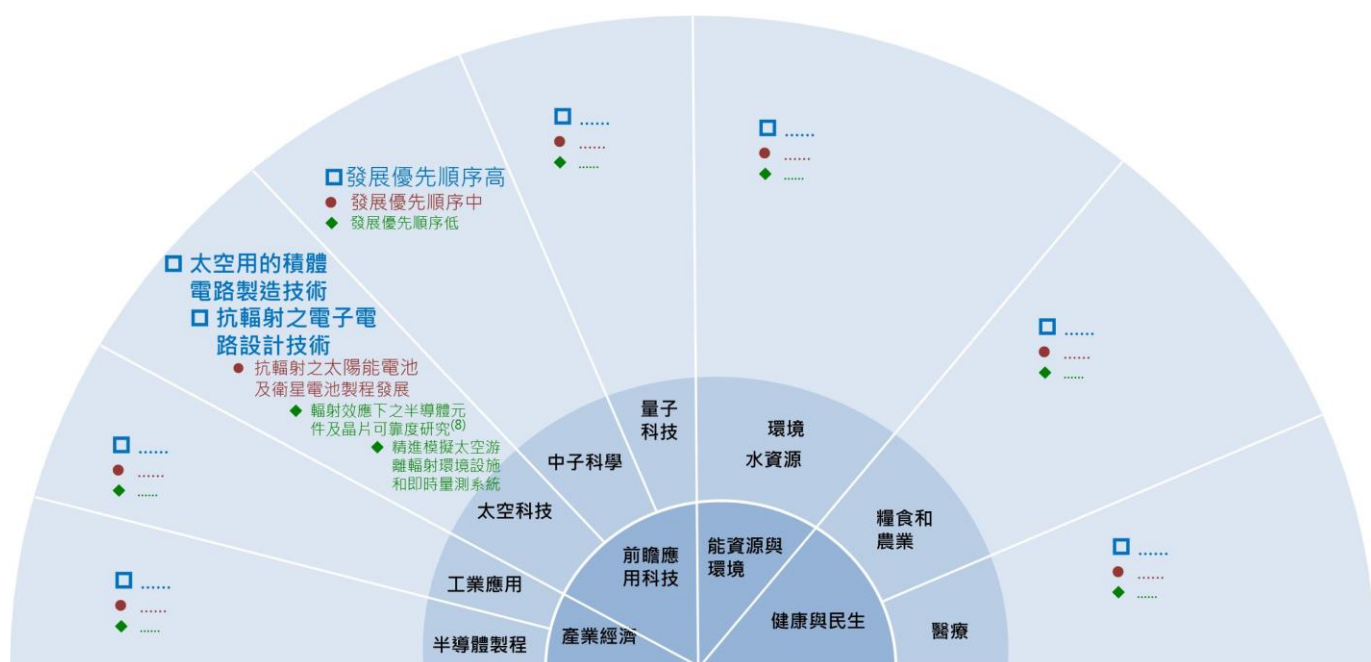


圖 5-8 我國原子能科技於民生應用發展的策略藍圖(以太空科技為例說明)

綜合上述，執行方法可分為三部分如下，並可以圖 5-9 表示：

1. 研析國內外相關資料，列出技術群組並製作問卷；
2. 請各領域專家針對問卷中技術群組的評分要素提出建議與看法，亦可新增技術群組，藉由專家建議的回饋，修正技術群組項目；
3. 舉辦專家會議，確認各領域技術群組之名稱、內容及排序；
4. 完成建構我國環境及水資源、醫療、太空科技、糧食及農業、量子科技、半導體製程、工業應用、中子科技 8 大領域之原子能科技於民生應用發展的策略藍圖。

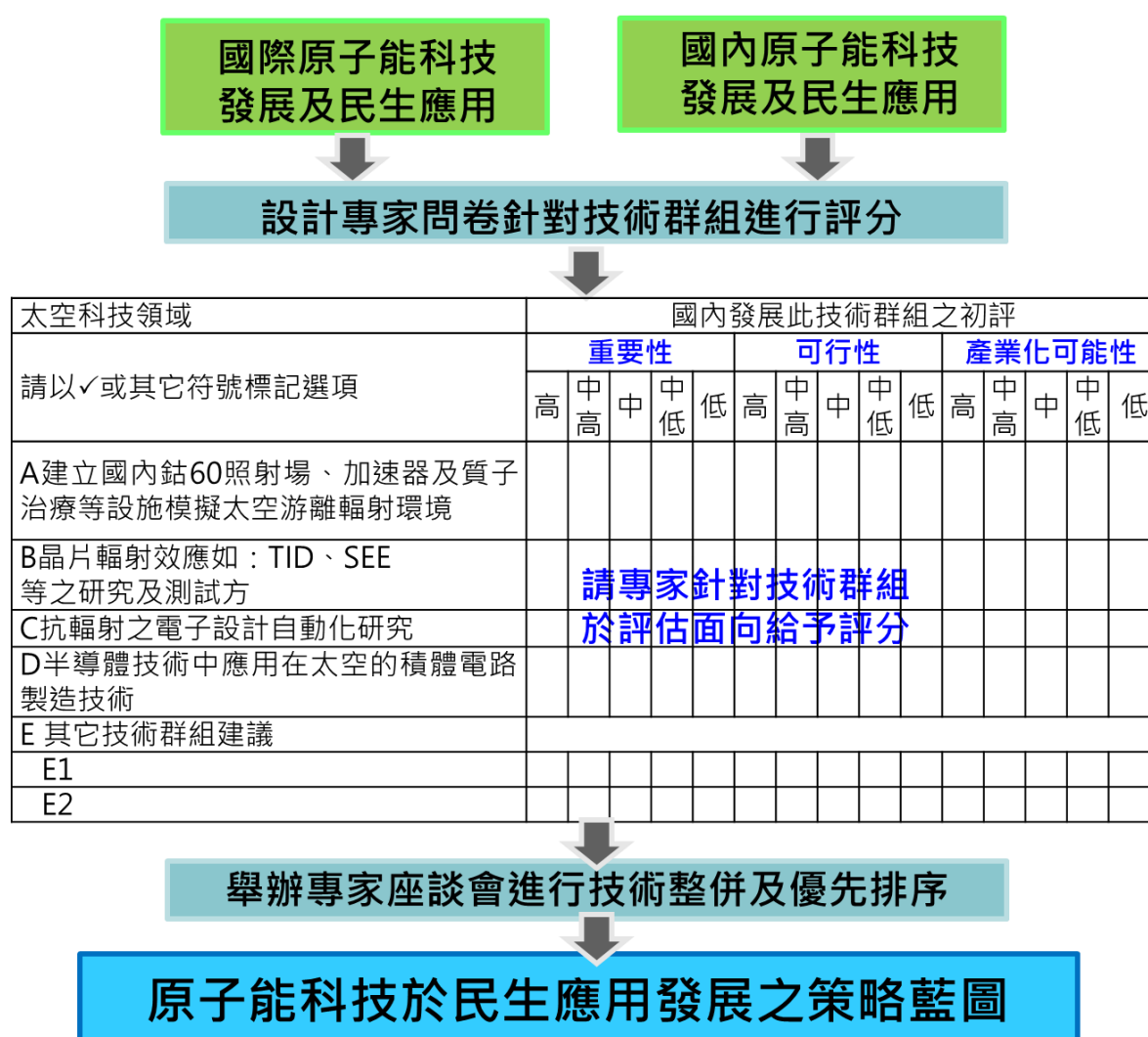


圖 5-9 本研究執行方法示意圖

在關於科普教育的推廣方面，可以透過網路、展覽、競賽或閱讀等多種方法，而閱讀為國、中小學童最容易接觸方法，2016年彭采璟在「透過科普讀物閱讀活動對增進國小六年級學童科學家意象之研究」中提到「科普讀物閱讀活動」能有效減少學童對於科學家之刻板印象，幫助學童建構正向科學家意象，「科普讀物閱讀活動」教學後能顯著提升學童對於未來從事科學活動之意願。而2015年章瓊方在「國小科普讀物適級推薦閱讀之研究」提到根據研究結果，可得到相關結論如後：（一）國內近十年來獲推薦的科普讀物仍以翻譯作品為大宗；但從中亦可發現多位本土創作家的興起，並且頗受肯定；在讀物的文本體裁上以說解體類最多，也就是直接解說科學知識，漫畫類型亦屬於此類，且深受學童喜愛。（二）國小科普讀物在內容呈現上會由淺至深且書中的觀念會跨主題，因此國小科普讀物在直接對應課程單元，會產生一本書對應到多個年級及課程單元的現象。（三）經焦點座談整理出建議教師在課堂上可用來引導學童閱讀科普讀物的重點。由此可知，為落實原子能科普教育向下扎根，提供原子能科普文宣及讀本為簡易可行的方式。另外，為持續推廣大眾原子能科學教育，核研所持續協助原能會辦理原子能科普展覽業務；在原子能民生應用科學教育文宣或教材推廣方面，將蒐集國際原子能組織，如國際原子能總署(IAEA)、美國核能學會(ANS)、世界核能協會(WNA)、全球核能婦女會(WIN Global)、日本原子力產業協會(JAIF)...等，或國際政府組織(如日本文部科學省、經濟產業省)等出版之科普文宣或遊戲書籍資料；藉由搜尋各國國際組織或機構的網站或利用參與國際原子能相關會議的機會進行蒐集，並翻譯編寫成中文科普文宣資料。除了國際原子能科普文宣的蒐集編寫外，另針對108年協助原能會辦理原子能科普展的經驗以及本計畫研究成果，規劃相關原子能科技民生應用的技術項目及互動展示內容，讓民眾輕易瞭解原子能相關知識。

在國際核能管制架構及核電趨勢的研究方面，本計畫主要透過加拿大、歐盟；美國及澳洲之核能管制機構的官方網站，加以彙整相關管制組織之功能與架構，其次並針對各國境內的核能發電使用現況進行說明分析，最後再根據各國近期針對能源議題的相關民意調查結果加以分析，並將相關結果與資料以簡析的方式呈現，並上傳至能源資訊平台，以利國人對於國際主要核能管制架構、核電使用情況與相關民意趨勢等有所掌握。在核子保防方面，本計畫將持續蒐集與更新IAEA、歐盟Euratom、日本NRA、韓國KINAC等組織與國家專責單位之組織型態與運作狀況，比較分析後提出建議供主管機關參考。本計畫亦將努力嘗試與歐盟Euratom、日本NRA與韓國KINAC專家聯繫，藉由與專家之交流互動，供日後就保防議題獲取國際資源之用。

六、研究結果及結論

(一) 原子能科技趨勢及發展策略

綜觀當前國人關注的各項與科技政策相關之社會議題，可以分為「健康與民生」、「能資源與環境」、「前瞻應用科技」與「產業經濟」等面向：「健康與民生」強調完善醫療診斷及治療與農業永續及糧食安全，保障民眾生命安全；「能資源與環境」著重環境衛生及水資源管理，確保環境永續，且所有人都能獲得潔淨的水；「前瞻應用科技」重視新興科技崛起與科技研究及創新能力，以因應未來趨勢挑戰；「產業經濟」關注產業智慧化與製程改善，帶領產業創新轉型，活絡經濟動能。是以，本研究針對上開議題擬定因應策略，以打造國家競爭優勢，維持全球創新領先。

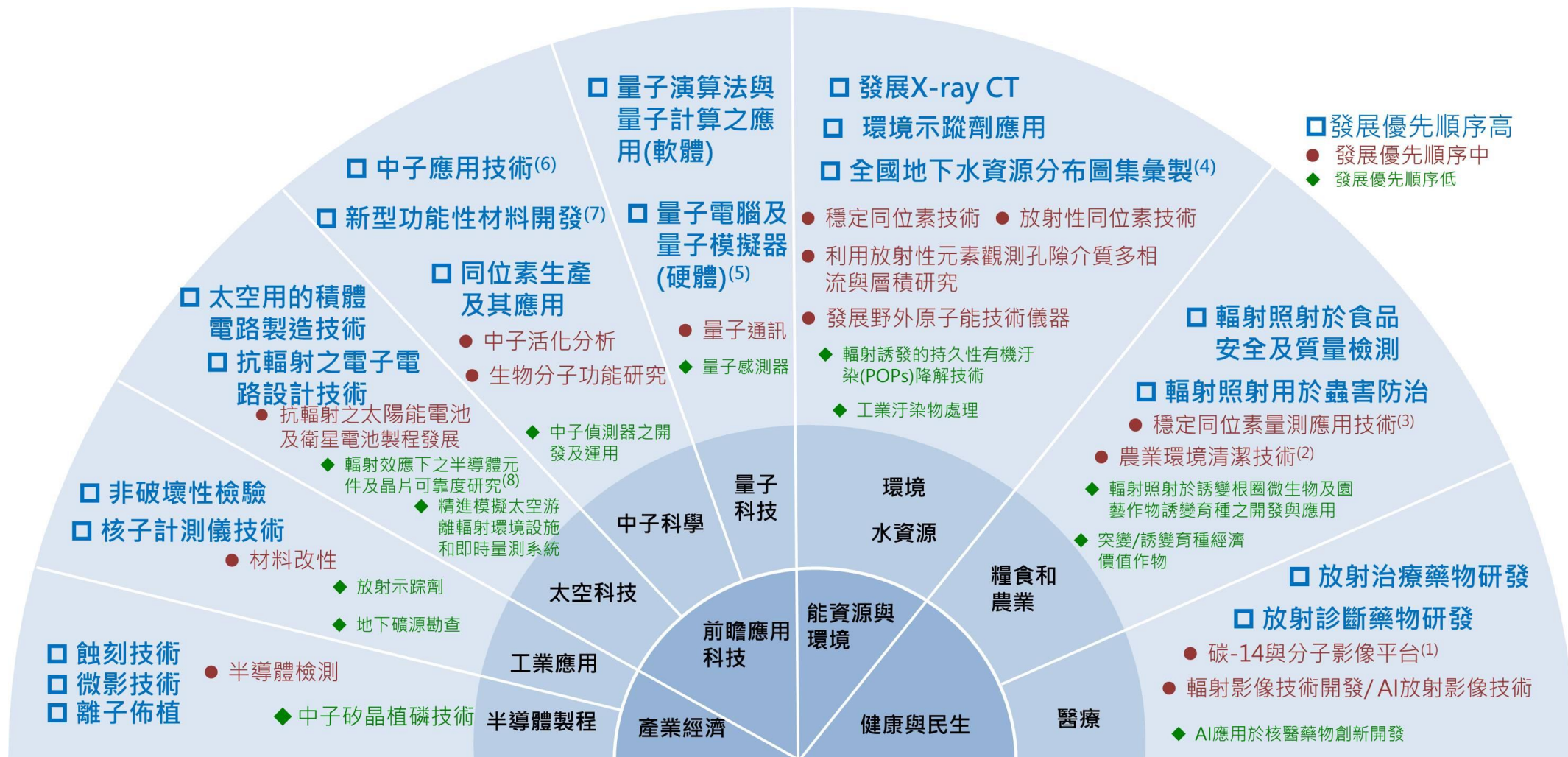
於此，首先進行重要議題的辨識，其後盤點原子能科技於民生應用之技術群組，應用「專家問卷及座談會技術群組評分」方法，邀請各領域專家，針對所蒐集的國內外技術資料，就重要性、可行性及產業化可能性等要素進行評分，收斂結果與製作策略藍圖。藉由本計畫的執行，釐清國內未來在原子能應用發展上的技術需求，結果可作為原能會在推廣原子能科技的施政方針及核研所技術發展策略參考，詳細分析結果如附件。圖 6-1-1 所示為綜整各領域結果所彙製的策略藍圖，由該圖可很清楚明瞭各領域技術群組的發展優先順序，值得一提的是本計畫結果所呈現的技術群組項目優先順序，評分要素考慮了重要性、可行性與產業化可能性，部分技術群組受限國內市場規模及特殊性雖較難產業化，但仍需國家投入穩定資源強化相關基礎設施、人才培育及關鍵技術建立，以因應國際競爭及貿易保護政策下，維持國內相當自主能力。

為因應新冠肺炎(COVID-19)及美中貿易戰下，所導致的全球經濟劇烈變動與供應鏈加速重組，蔡總統在 2020 年就職典禮上宣示，將在五+二產業創新的既有基礎上，打造「六大核心戰略產業」，並透過建立臺灣品牌、提供靈活多元的金融支援、打造安全的產業發展環境與匯聚及培養數位人才等，讓臺灣成為未來全球經濟的關鍵力量(國家發展委員會，2020)。其中原子能科技於民生應用的技術發展於國內已積累相當能量，技術範疇從基礎科學跨足前瞻應用科技，可因應社會經濟變遷需求之跨領域研究，並作為我國未來在面臨各方面趨勢挑戰下之解藥良方。

本計畫所提出之「發展前瞻原子科學技術」已納入今年第 11 次全國科學技術會議「科研與前瞻」議題之措施。本計畫所排序之技術群組幾乎為跨領域的應用(如表 6-1-1 所示)，建議跨部會整合資源以利研發投入，如科技部、衛福部、經濟部、農委會、海委會及環保署等。

表 6-1-1 各領域跨部會整合資源建議

本計畫劃分領域	跨部會整合資源建議
環境及水資源	科技部、經濟部、海委會、環保署
糧食及農業	科技部、衛福部、農委會
醫療	科技部、衛福部、經濟部
量子科技	科技部
中子科技	科技部、經濟部、農委會、交通部
工業應用	科技部、經濟部
半導體製程	科技部、經濟部
太空科技	科技部



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

圖 6-1-1 本計畫所提出之策略藍圖

(二) 原子能民生應用科學教育推廣

為提升國民科學知能，推廣民眾對原子能科技與其貢獻的了解，並促進公眾溝通，核研所於 108 年 2 月 15 日至 17 日假台北華山 1914 文化創意產業園區協助原能會舉辦首次原子能科技科普展覽(環保、生活、酷科學)，將研發成果轉換為讓民眾能夠了解與親身體驗的活動，首次舉辦即吸引 3,551 人次參觀，成功藉由這個活動讓民眾對原子能科技有所認識並產生更大的興趣，因此原能會規劃將原子能科技科普展定位為例行性的展覽，且展覽地點將擴及到台北市以外地區，讓全國民眾都有機會接觸到原子能科普教育。

自 108 年 2 月原能會首次舉辦原子能科技科普展覽以來，至 109 年 10 月已陸續舉辦 6 場次之科普展覽，累積參觀人次達到 3 萬餘人，展覽地點包括台北市、新竹市、台中市、彰化縣等地，並逐步調整各場次之展覽內容，多樣及廣泛的向民眾推廣原子能科普教育及科技研發成果。本計畫於 109 年度協助原能會舉辦 3 場原子能科普展覽，經統計 3 場展覽累積參觀人次達 15,854 人次，有效推廣原子能民生應用科學教育。

表 6-2-1. 109 年協助原能會辦理之科普展覽一覽表

項次	科普展覽名稱	展覽時間及地點	成果
1	109 年原子能科技科普巡迴展(Fun 科學 2.0 原子能科學移動城堡)－新竹場	109.08.01-02 新竹市 Big City 遠東巨城購物中心廣場	核研所 13 項自主研發技術參展，累計 2 天展期共吸引 4,917 人次參觀。
2	109 年原子能科技科普巡迴展(Fun 科學 2.0 原子能科學移動城堡)－彰化場	109.08.22-23 彰化縣立和美高中體育館	核研所 13 項自主研發技術參展，累計 2 天展期共吸引 831 人次參觀。
3	109 年「i 上原子能綠能 e 世界」原子能科技科普展－台北華山場	109.10.09-12 台北華山 1914 文化創意產業園區中 4A 館	核研所 17 項自主研發技術參展，累計 4 天展期共吸引 10,106 人次參觀。



圖 6-2-1. 109 年原子能科技科普巡迴展(Fun 科學 2.0 原子能科學移動城堡)－新竹場 109.08.01-02



圖 6-2-2. 109 年原子能科技科普巡迴展(Fun 科學 2.0 原子能科學移動城堡)－新竹場 109.08.01-02



圖 6-2-3. 109 年原子能科技科普巡迴展(Fun 科學 2.0 原子能科學移動城堡)－彰化場 109.08.22-23



圖 6-2-4. 109 年原子能科技科普巡迴展(Fun 科學 2.0 原子能科學移動城堡)－彰化場 109.08.22-23



圖 6-2-5. 109 年「i 上原子能 綠能 e 世界」原子能科技科普展－台北華山場 109.10.09-12



圖 6-2-6. 109 年「i 上原子能 綠能 e 世界」原子能科技科普展－台北華山場 109.10.09-12



圖 6-2-7. 109 年「i 上原子能 綠能 e 世界」
原子能科技科普展—台北華山場 109.10.09-12



圖 6-2-8. 109 年「i 上原子能 綠能 e 世界」
原子能科技科普展—台北華山場 109.10.09-12



圖 6-2-9. 109 年原子能科技科普巡迴展(Fun
科學 2.0 原子能科學移動城堡)新竹場主視覺



圖 6-2-10. 109 年原子能科技科普巡迴展
(Fun 科學 2.0 原子能科學移動城堡) 彰化場主
視覺



圖 6-2-11. 109 年「i 上原子能 綠能 e 世界」原子能科技科普展主視覺

另外，為持續推廣大眾原子能科學教育，本計畫除協助原能會辦理原子能科普展覽外，在原子能民生應用科學教育文宣或教材推廣方面，分別取得日本原子力產業協會(JAIF)同意無償提供本所翻譯其於 2016 年出版之「放射線が“食品の衛生や保存の役に立つ”って知ってる？」(你知道輻射線可以應用在食品衛生與保存嗎?)及美國核能管制委員會(US NRC)同意無償提供本所翻譯其於 2017 年更新出版之「What is Nuclear Energy?」(什麼是核能呢?)，其中翻譯自 JAIF 出版之「你知道輻射線可以應用在食品衛生與保存嗎?」，主要係介紹日常生活中輻射線的運用，並特別說明輻射線可以運用於食品照射，以及食品輻射照射的優缺點等，並以馬鈴薯進行輻射照射的應用進行案例說明，適合國小高年級以上(10 歲以上)至高中生(18 歲以下)的學生閱讀。而 US NRC 出版之「什麼是核能呢?」，書中介紹了核能發電的原理、核電廠的種類以及輻射醫療應用等，並說明美國核能電廠安全維護機制，以及美國核電廠除役的方式，較適合國中生以上 (12 歲以上) 的校園及社會大眾閱讀；而本計畫藉由蒐集並翻譯編寫完成 2 份國外原子能科普教育文宣，提供校園及社會大眾多樣的科普資源。

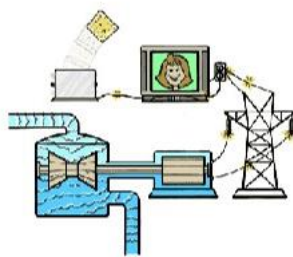


What is Nuclear Energy?



Electricity can be generated in different ways. For example, it can be made using solar panels, by burning coal, or by capturing the heat from atoms that split apart. When the electricity is made from atoms splitting apart, it's called nuclear energy.

"Thermal" power plants convert heat into electricity using steam. At nuclear power plants, the heat to make the steam is created when atoms split apart — called fission. When atoms split apart, they release heat. When the process is repeated over and over, it is called a chain reaction. In a nuclear power plant, uranium is the material used in the fission process.



The heat from fission boils water and creates steam to turn a turbine. As the turbine spins, the generator turns and its magnetic field produces electricity. The electricity can then be carried to your home, so you can work on the computer, watch television or make toast!

About 20 percent of the electricity in the U.S. comes from nuclear energy. That means one out of every five homes in this country can turn on their lights due to the atom!

The U.S. Nuclear Regulatory Commission, also called the NRC, regulates nuclear power plants. We make sure they are safe for people who work there and live nearby, and for the environment.

Nuclear Reactors

Nuclear power plants are very complex. There are many different buildings at the site and many different systems. Some of the systems work directly to make electricity. Some of the systems work to keep the plant working correctly and safely. All nuclear power plants have a "containment structure" that holds the reactor. And all plants have deep pools where the nuclear fuel when it is no longer being used can be cooled and stored.

All nuclear power plants make electricity from the steam created by the heat of splitting atoms. But there are two different ways that steam is used.

Pressurized Water Reactors are known as "PWRs." They keep water under pressure so that it heats but does not boil. Water from the reactor and the water that is turned into steam are in separate pipes and never mix.

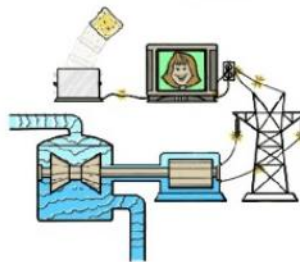


什麼是核能?



產生電能的方式有好幾種，例如：太陽能板吸收太陽光產生電能，或是藉由燃燒煤炭或原子核分裂產生的熱量來轉換成電能。當電能是由原子核分裂所產生的，即稱為核能。

熱功率發電廠利用水蒸氣將熱量轉化為電能。在核能發電廠中，用來產生水蒸氣的熱量來自於原子核分裂，又稱為核分裂(Fission)。原子核分裂的過程中會釋放熱量，當該過程一遍又一遍地重複時，就稱為連鎖反應。在核能發電廠中，鈾(Uranium)是核分裂過程中常使用的材料。



核分裂產生的熱量能使水沸騰並產生水蒸氣，以轉動渦輪，渦輪旋轉帶動發電機旋轉，在磁場中產生電能。然後就可以將電力送至你的家中，讓你可以在電腦上工作、看電視或烤麵包！

美國約有20%的電力來自核能，這意味著該國每5個家庭中，就有1個家庭能夠打開電燈，都是因為原子的功勞！

美國核能管制委員會(以下簡稱核管會，NRC)負責監管核能發電廠，確保在核能發電廠工作人員和附近居民以及環境的安全。

核子反應器

核能發電廠非常複雜，電廠內有許多不同的建築物和系統。一些系統用於發電，另一些系統可以使電廠正常、安全地運作。所有核能發電廠都有一個容納反應爐的「圍阻體」。電廠中設有深水池，用來儲存和冷卻不再使用的核子燃料。

所有核能電廠都利用原子分裂釋出的熱量產生水蒸氣來發電。但是，水蒸氣的使用兩種不同的方式。

壓水式反應器(Pressurized Water Reactor, PWR)將水保持在加壓狀態，以使水在加熱後不會達到沸騰。來自反應爐的水和變成水蒸氣的水各自在不同的管道中，並且永遠不會混合。

圖 6-2-12. 本計畫翻譯之美國核能管制委員會(US NRC)「What is Nuclear Energy?」



私たちの暮らしにはいろいろなところで放射線が使われています。

放射線は目に見えず、色にもにおいもありませんが、私たちの身の回りのものに使われています。放射線を当てて、作物の品種改良をしたり、農薬も使わず殺菌・滅菌することもできます。その技術は食品にも取り入れられています。



我們的日常生活中，在各式各樣的地方，都運用了輻射線。

輻射線是肉眼看不見的，沒有顏色，也沒有氣味，卻應用在我們身邊的事物。輻射線的照射可以用在作物的品種改良，也可以在不加熱、不用藥的情況下，進行殺菌、滅菌。這種技術也應用在食品上。



圖 6-2-13. 本計畫翻譯之日本原子力産業協會(JAIF)「放射線が“食品の衛生や保存の役に立つ”って知ってる？」(你知道輻射線可以應用在食品衛生與保存嗎?)

另外，本研究將中子科技相關應用融入設計概念中，以較具遊戲性的方式，設計科普展具作為科普教材，以推廣大眾原子能民生應用知識。桌上遊戲「中子咻咻咻」的設計，適合 12 歲以上的校園及社會大眾，每次遊玩時間約為 20 至 30 分鐘，可讓使用者獲取輕鬆有趣的中子科技民生應用知識，進而對原子能科學產生好奇與興趣。

(a) 封面



(b) 盒底



(c) 卡牌



圖 6-2-14. 科普桌遊展具「中子喵喵喵」(a)封面；(b)盒底；(c)卡牌

另外，本計畫亦邀請國內專家學者透過撰寫簡析的方式，讓民眾瞭解原子能科技發展現況及原子能科技民生應用趨勢，例如「放射藥物於癌症治療的應用」、「中子科技應用：借鏡國際最新發展以超前部署台灣未來情境」、「核子醫學分子影像應用於阿茲海默症之診斷探討」等多篇由國內專家學者撰寫的科普簡析，以提供社會大眾多樣的科普資源與對原子能科學的參與。更多詳細簡析內容可參考<http://eip.iner.gov.tw/energyAnalysis.aspx>

(三) 國際核能管制架構及核電趨勢

本計畫透過蒐集彙整美國、歐盟、加拿大、澳洲等國家對於核電的發展趨勢與公眾溝通之做法，有助於協助原能會提供資訊以增進人民對於原子能及其應用的理解，同時提升資訊透明度並強化民眾對於政府處理核能事務的信任感，以下分別就不同國家現況進行說明。

1. 加拿大

加拿大的核能管制機構為加拿大核能安全委員會(Canadian Nuclear Safety Commission, CNSC)，以下簡稱核安會，隸屬於自然資源部 (Department of Natural Resources)，透過自然資源部長向加拿大國會報告，其位階如圖 6-3-1 所示。核安會之任務為管制核能以保障健康、安全及環境；實踐加拿大核能和平使用的國際承諾，對大眾傳播科學、技術與管制資訊，管制加拿大的核能產業以確保加拿大及其國民之安全。核安會藉由在政府與核能產業間保持超然中立，以維持委員會之獨立性。核安會的工作內容包含公眾溝通(涵蓋政府、利害關係人、原住民等)並發布管制的行動與相關報告；設定相關法規、澄清特定事項以及尋求回饋等；核照 (Licensing) 與認證 (Certification)，例如審查及評估申請案件以確保符合法規，確保執行人員具備資格且有能力可安全地執行核能相關活動；監督合規(Overseeing Compliance)等。在此架構下，另一與核能相關的機構為加拿大原子能公司(Atomic Energy of Canada Limited, AECL)，其任務是藉由履行加拿大政府在放射性廢棄物及除役的責任，實現核子科學技術及環境保護。

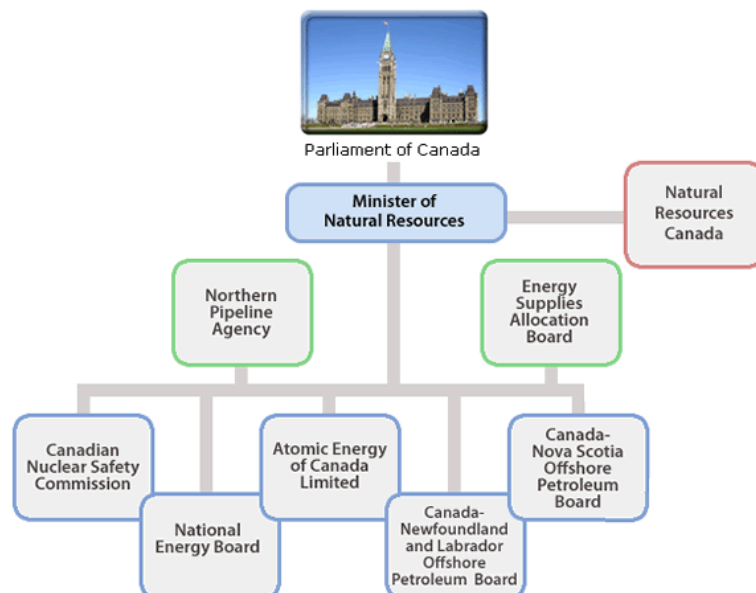


圖 6-3-1、加拿大自然資源部組織架構

資料來源<https://www.nrcan.gc.ca/nrcan/about-us/natural-resources-portfolio/10864>

核安會係於 2000 年根據核能安全與管制法案(Nuclear Safety and Control Act, NSCA)成立，取代於 1946 年所成立的原子能管制委員會(Atomic Energy Control Board)，並透過自然資源部長(Minister of Natural Resources) 向加拿大國會報告。核安會為一透明、以科學為基礎的決策單位，並具有以下性質：準司法裁判所(quasi-judicial tribunal)、具官方代理諮詢責任、透過自然資源部長向國會報告委員會成員為獨立且兼任、委員會聽證會為公開並網路直播、決策可受聯邦法庭所檢視等特性。

目前加拿大境內有 Bruce、Pickering、Darlington、Point Lepreau 4 座核電廠，共 19 個反應器(主要位於安大略省)，總裝置容量為 13.5 GWe，占全國電力供應的 15%。加拿大原先計劃在未來十年內再建造兩個新反應器來擴大其核能力，但這些計畫已被推延。目前營運中的 19 個反應器，共有 7 座機組為延役使用，分別為 (Pickering A1、A4，Bruce A1、A2、A3、A4 以及 Point Lepreau 1) 延役執照時間至 2022~2037 年。因 Pickering A1 及 A4 兩部機組翻新的費用過高，超過原先估計的兩倍，故 A2 及 A3 兩部機組已於 2007~2008 年屆齡停機；目前另有 Bruce A 的兩部機組正在翻新中。加拿大核協會委託加拿大民意調查與市場研究公司「Abacus Data」於 2019 年 2 月 8 日至 12 日進行了一項民意調查，旨在探討核能是否為減少碳排放的能源解方。調查對象為 2,500 名 18 歲以上的加拿大人，抽樣誤差範圍為正負 1.9 百分點。調查結果顯示 87% 的受訪者認同「減少使用化石燃料並增加再生能源和低碳能源的使用」是重要的，且在減少碳排放、可靠供電的前提下，86% 的受訪者對於 SMR 表達支持或開放的態度。調查亦指出只有 38% 的受訪者認知到核能是較燃油低碳的能源，認知程度遠低於太陽能、風能及水力發電，如圖 6-3-2 所示。更多相關資料可參考能源資訊平台 <http://eip.iner.gov.tw/msn.aspx?datatype=YW5hbHlzaXM%3D&id=MTk1>

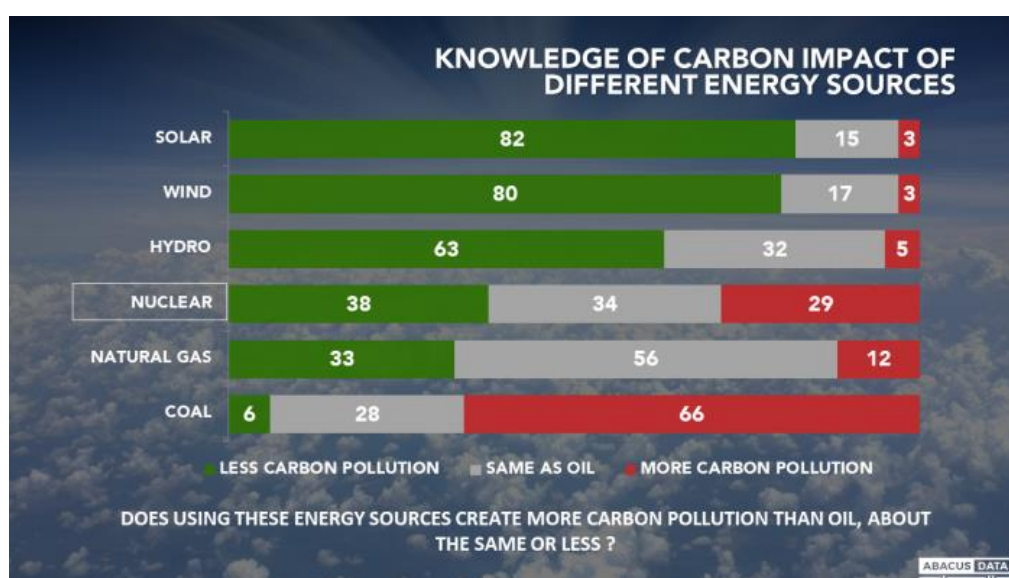


圖 6-3-2、受訪者對各種能源碳排和燃油比較的認知程度

資料來源: <https://abacusdata.ca/climate-change-worries-open-minds-to-modern-nuclear-technology/>

2. 歐盟

歐盟的核能管制架構除了依循國際組織如國際原子能總署(International Atomic Energy Agency, IAEA)與經濟合作暨發展組織 (Organization for Economic Cooperation and Development, OECD) 的核能署(Nuclear Energy Agency, NEA)的相關條約外，歐盟的主要管制單位為歐洲核能安全管制組織(European Nuclear Safety Regulators Group, ENSREG) 為一獨立的專家顧問群，由於歐洲理事會(European Council)希望在歐盟建立一高階群組(high-level group)，以深化並促進歐盟在核能安全、核廢料管理、放射性廢棄物以及核電廠除役融資的共同方法，該提議亦獲歐洲議會支持，2007年在歐盟委員會(European Commission)的決議下所通過創設。ENSREG 由歐盟各會員國的核能管制資深官員、放射性廢棄物安全、輻射防護管制機構等專家以及歐盟委員會代表所共同組成。該組織的目標是持續改善核安與放射性廢棄物的管理，並促進民眾對上述活動的理解；此外，對歐盟委員會與核能設施提供協助與顧問，同時協調各會員國核能管制單位之合作事宜。此外，歐洲理事會、IAEA、NEA、西歐核能管制協會(Western European Nuclear Regulators Association, WENRA)等組織在 ENSREG 也具有觀察員身分(observer status)，對歐盟的核能安全作出貢獻⁴。ENSREG 下設 3 個工作小組，第 1 小組負責促進核能安全與國際合作；第 2 小組負責處理放射性廢棄物管理、核廢料與除役等事務；第 3 小組旨在促進資訊透明化。工作小組每年至少集會兩次，得視需要召開會議並回報 ENSREG，ENSREG 每三年向歐盟提交報告。此外，在核能安全與核廢棄物的管制上，歐盟主要藉由放射性廢棄物與用過核燃料指令(Radioactive Waste and Spent Fuel Directive, RWD)、核能安全指令(Nuclear Safety Directive, NSD)、基本安全標準指令(Basic Safety Standards Directive, BSSD)等三方面對歐盟全體會員國進行規範管制。

歐盟現有 27 個成員國(英國已於 2020 年脫歐)，運轉中的核電機組共有 108 座分屬其中 13 個成員國 (比利時、保加利亞、捷克、德國、西班牙、法國、匈牙利、荷蘭、羅馬尼亞、斯洛維尼亞、斯洛伐克、芬蘭和瑞典)；其中擁有最多核電機組的國家是法國，共有 57 座。目前正在興建的核能機組有 4 座(斯洛伐克 2 座，法國、芬蘭各 1 座)，但都面臨成本預算大幅超支及工程延誤的困境。計劃在 2030 年前興建的有 8 座，提議建造的有 12 座。此外，歐洲社會調查(The European Social Survey，簡稱 ESS)，於 2018 年 11 月公布了另一份歐洲民意調查分析報告，標題為「Public Perceptions on Climate Change and Energy in Europe and Russia: Evidence from Round 8 of the European Social Survey」徵詢民眾對於大量或非常大量電力來源的偏好，如表 6-3-1 所示，整體而言支持太陽能的比率最高，達 78%，其次為風能 72%、水力 69%、生質能 45%，天然氣 31%、核能 19%、燃煤 13%，顯然核能較不受青睞，燃煤則是偏好最低的選項。同意以核能為主要電力

⁴ 相關資料可參考 <http://www.ensreg.eu/members-glance>

來源的支持度在各國間呈現顯著差異，支持度較高者有捷克為 48%，匈牙利為 35%，立陶宛為 32%。燃煤是所有能源選項中支持度最低的，在瑞士、芬蘭、冰島、荷蘭、挪威、瑞典這些國家，僅有 2% 以下的受訪者表示支持，相較之下支持率略高者為波蘭 28%、匈牙利 22%。對於天然氣的支持度較高者，有波蘭為 45%，立陶宛為 38%。更多相關資料可參考能源資訊平台 <http://eip.iner.gov.tw/msn.aspx?datatype=YW5hbHlzaXM%3D&id=MTk1>

表 6-3-1. 受訪者對於不同能源供應來源的偏好(依國家別)

Table 1. Percentage of citizens who think a large or very large amount of electricity in their country should be generated from various energy source

	Coal	Gas	Nuclear	Hydro	Solar	Wind	Biomass
AT	7	16	5	86	89	83	57
BE	4	25	11	67	84	86	47
CH	2	20	9	82	86	69	51
CZ	11	24	48	57	52	48	36
DE	5	18	3	72	87	76	38
EE	7	16	9	43	61	63	42
ES	11	22	9	78	94	93	62
FI	2	15	19	36	61	53	63
FR	5	27	16	74	83	73	58
GB	9	27	17	75	76	72	42
HU	22	31	35	70	93	86	70
IE	6	28	9	77	77	79	42
IL	25	65	28	58	78	67	41
IS	1	5	1	80	61	77	36
IT	9	33	12	70	89	81	57
LT	8	38	32	64	64	73	61
NL	2	8	6	73	90	83	51
NO	2	18	4	88	67	66	36
PL	28	45	23	77	87	82	53
PT	10	24	8	78	92	91	40
RU	28	50	38	57	53	49	26
SE	1	17	18	68	80	71	52
SI	10	23	17	61	88	83	54
Full data	13	31	19	69	78	72	45

資料來源: https://www.europeansocialsurvey.org/docs/findings/ESS8_pawcer_climate_change.pdf

3. 美國

美國的核能管制機構為核能管制委員會(Nuclear Regulatory Commission, NRC；以下簡稱核管會)，核管會係由美國國會於 1974 年所創設的獨立機關，該組織成立的任務係以確保民生用途放射性物質的使用安全並保護人民與環境。同時，核管會亦管制核電廠的商轉與其他核物質的用途，例如核醫藥物、發照、監管以及相關規範的執行等。核管會主要由五位委員組成的委員會(The Commission) 所領導，委員由總統提名並經由參議院通過，任期為五年，其中一位委員由總統指定為主席並擔任核管會的官方發言人。核管會委員會採合議制形成政策，以管制核子反應器與核物質的安全，並可向持照人發出命令與裁決法律事務(adjudicates legal matters)等；以下再設置委員會(Committees and Boards)、委員會職員辦公室(Commission Staff Offices)、運轉執行主任辦公室(Office of the Executive Director for Operations, EDO Offices)、視察長辦公室(Office of the Inspector General)所組成，其中委員會包含反應器保防、同位素醫療用途兩個顧問諮詢委員會及原子能安

全及發照小組；委員會職員辦公室包含上訴裁決、國會事務、總法律顧問、國際計畫、秘書及財務等辦公室；而運轉執行主任辦公室則包含核物料安全與保防、核反應器管制、管制研究、調查、核安與事故應變等辦公室；視查長辦公室主要提供審計與調查的設計指引以促進核管會的效率及有效性等。⁵

核管會的願景為展示優良的管制原則，這些原則包含獨立(independence)、開放(openness)、效率(efficiency)、透明(clarity)、信賴(reliability) 等原則，並透過有效、務實及即時性的管制行動來執行上述原則，以達到組織目標。圖 6-3-3 呈現核管會的整體管制架構與流程。⁶

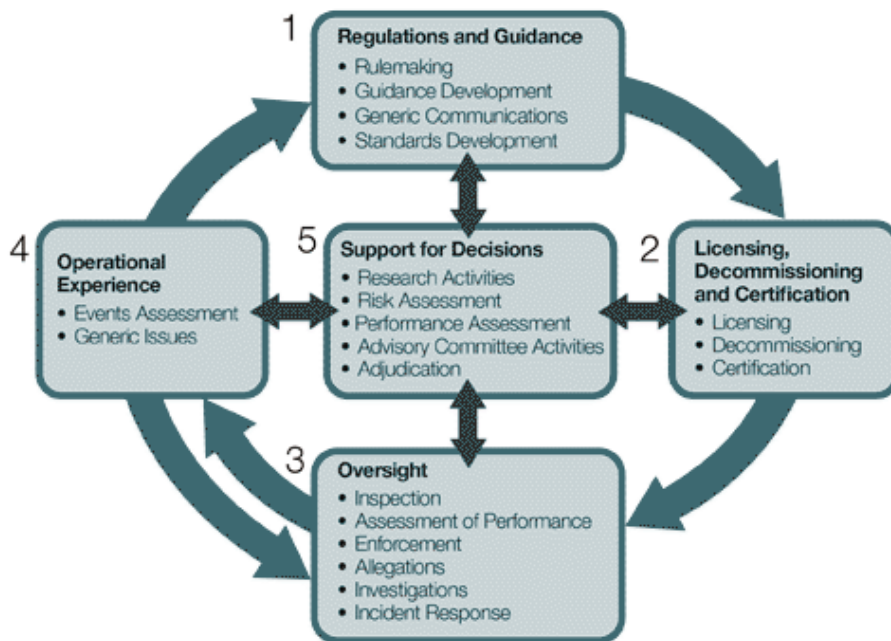


圖 6-3-3. 核管會管制架構

截至 2020 年 9 月，美國擁有 95 座正在運轉中的核能發電機組，是世界最大的核電生產國，法國有 56 座，中國第三有 48 座。美國預計到 2020 年之後將會有另外兩部新機組(Vogtle 3& Vogtle 4) 加入商業運轉。美國的核能發電在 2019 年產生 809 TWh 的電能，約占總電力供給的 19.7%；占全球核能發電量的 30%以上。而根據美國蓋洛普民調公司(Gallup)於 2019 年 3 月 1 至 10 日所實施的年度環境民調結果，在美國賓州三哩島事件發生 40 年後，對於核能作為美國主要的電力來源，美國民眾的意見分歧，強烈支持者占 17%，些許支持者占 32%，反之，強烈反對者占 21%，些許反對者占 28%，也就是說，傾向支持與傾向反對的比例，各為 49%；傾向支持的比例較 2016

⁵ 各辦公室主要業務職掌可參考 <https://www.nrc.gov/about-nrc/organization.html>

⁶ 相關資訊可參考 <https://www.nrc.gov/about-nrc/regulatory.html>

年度的 44%提升了 5 個百分點，但明顯低於 2010 年度的 62%，如圖 6-3-4 所示。更多相關資料可參考能源資訊平台 <http://eip.iner.gov.tw/msn.aspx?datatype=YW5hbHlzaXM%3D&id=MTk1>

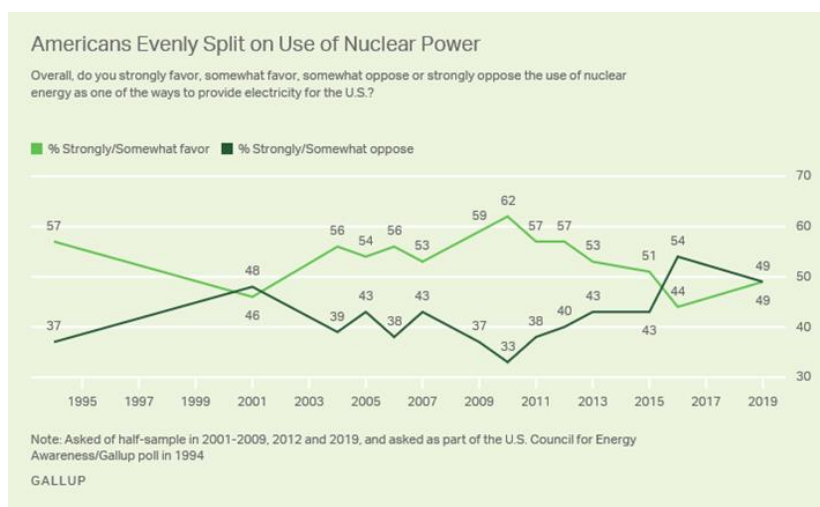


圖 6-3-4、1995 至 2019 年受訪者對於核能發電支持度的趨勢變化

資料來源: <https://news.gallup.com/poll/248048/years-three-mile-island-americans-split-nuclear-power.aspx>

4.澳洲

澳洲的核能管制機構為澳洲輻射防護與核能安全局(Australian Radiation Protection and Nuclear Safety Agency, ARPANSA)，該機構係根據 1998 年「澳大利亞輻射防護和核安全法案」(Australian Radiation Protection and Nuclear Safety Act 1998)所建立，取代既有的核能安全局(Nuclear Safety Bureau)和澳大利亞輻射實驗室(Australian Radiation Laboratory)，ARPANSA 隸屬於衛生部 (Department of Health)，並於 1999 年 2 月開始運作。ARPANSA 管制澳洲境內的放射性物質使用，該組織的任務為確保放射性物質的民生用途使用安全，以保護人類和環境免受輻射的有害影響。

該機構的主要職掌項目，包含 1. 建立並保持輻射測量和健康影響的專業評估，包括評估風險和對輻射緊急情況的反應。2.諮詢：該機構就輻射和影響，輻射防護和核安全等問題向政府和聯邦提供建議。3.管制:透過核發證照，並與聯邦互相合作，採用風險告知(risk-informed)的管制方法，以確保輻射設施的安全。4.最佳實踐：領導制定規範，標準，指南和建議，以支持整個澳洲的輻射防護和核安全，並在相關國際組織中發揮重要作用。5.服務：提供高質量的服務，以防止輻射的有害影響。6.研究：進行相關研發，並與國內外學術和研究組織建立戰略合作夥伴關係。

在相關管制措施方面，ARPANSA 致力於採用一致性的方式並發展出一套有關如何針對放射性物質進行管制的手冊，例如「核發執照和評估手冊」(Licensing and Assessment Manual)，涵蓋了聯邦體制對申請的評估和批准以及這些流程的持續改進。手冊涵蓋的事項包括：申請發照、撤銷、要求批准處置、運輸放射性物質等；「視查手冊」(Inspection Manual)詳細闡述了 ARPANSA 監管活動政策中與檢查相關的政策聲明和原則，該政策與國際原子能總署(International Atomic Energy Agency, IAEA)要求政府，法律和法規安全框架保持一致相符；而「合規與執法手冊」(Compliance and Enforcement Manual)則為監管人員提供風險分級的監控方法。

澳洲擁有世界上已知最大的鈾礦資源，幾乎佔全世界總量的三分之一。根據 2019 年的統計，澳洲是世界第三大鈾生產國，僅次於哈薩克和加拿大。產出的鈾全部用於出口，出售的鈾嚴格限制用於發電，鈾約占澳洲能源出口的四分之一。因為有巨大的煤炭資源和大量的天然氣支撐著能源安全並提供了低成本的電力，澳洲不使用核能，沒有設置核能電廠，澳洲的核能應用僅在生物醫學領域，唯一的核反應爐是用來生產鈾 99。另外，依據市場調查公司 JWS Research 於官方網站發布的新聞稿，澳大利亞礦業協會 (Minerals Council of Australia, MCA)委託該公司於 2019 年 10 月中旬進行一項民調，調查對象包括雪梨與墨爾本的焦點團體，以及 1,500 名澳洲人的定量調查。該調查指出，有 40%的民眾支持解除澳洲的核能禁令，且有 39%的民眾支持澳洲使用核能；調查結果亦顯示，有 54%的民眾並不知道澳洲禁用核能；反對澳洲使用核能且反對解除核能禁令的比例為 33%；對於核能使用持中立態度或表示不確定的比例為 29%，對於解除核能禁令持中立態度或表示不確定的比例為 26%；當受訪者獲悉核能的優劣因素後，支持核能的比例攀升至 47%；假使受訪者得知大多數的澳洲人支持核能，而被問及是否接受解除核能禁令時，表示支持的比例則攀升至 55%。更多相關資料可參考能源資訊平台 <http://eip.iner.gov.tw/msn.aspx?datatype=YW5hbHlzaXM%3D&id=MTk1>

(四) 國際核子保防資訊及合作拓展

由於核武的破壞力十分巨大，如何規範及限制原子能應用在和平的用途成為一個國際性的議題，美國總統艾森豪在 1953 年 12 月 8 日在聯合國發表演說時倡議成立一個為原子能和平用途的國際組織，國際原子能總署(International Atomic Energy Agency, IAEA)之因應而生(陳隆豐，2012)。國際原子能總署設置規約第二條明確揭示其成立宗旨是：「謀求加速和擴大原子能對全世界和平、健康及繁榮的貢獻。機構應盡其所能，確保由其本身、或經其請求、或在其監督或管制下提供的援助不致用於推進任何軍事目的」。前述之「…不致用於推進任何軍事目的」是國際原子能總署最重要的核心工作之一，國際原子能總署的活動都是環繞著 1968 年的防止核武蓄衍條約(Nuclear Non-Proliferation Treaty, NPT)進行，而國家層級之核物料料帳控制系統(State System of Accounting for and Control of Nuclear Materials, SSAC)是 IAEA 掌握核物料異動的重要手段。國家

層級之核物料料帳控制系統需要包含三個部分：(1) 需要有完整的法律架構，需要與 IAEA 簽訂協議，並須有相應國內法支持，例如台、美及總署三邊保防協定(INFCIRC/158)即為國際協議，而放射性物料管理法與核子保防作業辦法為支持之國內法。(2) 國家級的料帳系統作為與 IAEA 溝通的方式。(3)國內各核設施有自己的料帳系統以防止核物料的遺失或非法使用。前述工作十分繁複，各國均有設立主管機關、賦予主管機關權責並訂定法令以作為執行的依據。本研究的目的之一，在透過研究其他國家的核子保防經驗，希望對我國建立自主核子保防能力有所啟發，考慮地緣的關係選擇日本及韓國作為比較。EURATOM 為類似 IAEA 的國際組織，本文也參考其核子保防的作法。

1.日韓與歐盟的法律體系

法律體系是執行核子保防工作的基礎，無論權責機關的設置及具體工作均需有法令的支持。核子保防工作是一個國際性的議題，因此必需要有國際協定與國內法令方能執行相關工作。以韓國為例，韓國與核子保防相關的國際協定與法令為：(1) 防止核蕃衍條約(Nuclear Non-Proliferation Treaty, NPT) (2) 全面核子保防協定(Comprehensive Safeguard Agreement, CSA, INFCIRC/236) (3) 補充議定書(Additional Protocol, AP, INFCIRC/236/Add.1)。(4) 原子能法案(Atomic Energy Act) (5) 核子安全法(Nuclear Safety Act) (6) 核設施核子保防和實體防護法(Act on Safeguards and Physical Protection of Nuclear Installations)。上述的前三項為國際協定，後三項為國內法，其中之原子能法案第二章第 3 條明訂設立主管機關，原子能法案中同時也訂定各部會的權責。核能安全法於 2011 年 7 月 25 日發布之後修訂 15 次，分別為 2013 年修訂 1 次、2014 年修訂 2 次、2015 年修訂 8 次、2017 年修訂 2 次、2018 年修訂 1 次、2019 年修訂 1 次，核能安全法中的第 6 條中明訂設立防止核蕃衍及管制研究所 (Korea Institute of Nuclear Nonproliferation and Control, KINAC)、第 7 條中明確 KINAC 為法人，並且規範了 KINAC 的權責。由韓國核能安全法的修法過程，可以看出韓國對於核能安全的重視。此外，在該法第 98 條中敘明 IAEA 及國家檢查人員可以進入設施中進行檢查及裝設必要之監測檢查設備。

日本與核子保防相關的國際協定與法令為：(1) 防止核蕃衍條約(NPT, INFCIRC/140)，(2) 全面核子保防協定(CSA, INFCIRC/255)，(3) 補充議定書(AP, INFCIRC/255/Add.1) (4) 原子力規制委員會組織法(Nuclear Regulatory Authority Establishment Act)，(5) 原子能基本法(Atomic Energy Basic Act)，(6) 核反應器管制法(Reactor Regulation Act)。上述的前三項為國際協定，後三項為國內法，其中之原子能法案第二章第 4 條至第 6 條明訂在內閣之下設立原子能委員會(Atomic Energy Commission, AEC)及核能安全委員會(Nuclear Safety Commission, NSC)，負責國家原子能政策的制定及執行。

歐盟成員國是根據《里斯本條約》，自願加入歐洲聯盟的國家，遵守歐盟共同制定的統一法律，同時歐盟成員國亦保有獨立性，可自行決定外交政策及國防政策。目前歐盟共有 27 個成員國，包含奧地利、比利時、捷克、丹麥、愛沙尼亞、芬蘭、法國、德國、希臘、匈牙利、愛爾蘭、義大利、盧森堡、荷蘭、波蘭、葡萄牙、斯洛伐克、斯洛維尼亞、西班牙、瑞典、馬爾他、立陶宛、拉托維亞、賽普勒斯、羅馬尼亞、保加利亞及克羅埃西亞等。而英國則於 2020 年 1 月 31 日正式退出歐盟。歐洲原子能共同體條約(EURATOM Treaty) 於 1957 年由比利時、法國、德國、義大利、盧森堡等創始會員國簽署，用以規範歐洲共同體(European Community, EC)會員國核設施及核物料的管理與使用，並執行核子保防與核子保安的工作。歐洲經濟共同體轉變為歐盟之後，EURATOM 仍然維持一個由歐盟管理的獨立的機關。EURATOM 是一個獨立的國際組織(曾雅真，2014)，而我國及日韓是國家政治實體，法規上並不完全相同。歐盟法規主要由三個層級構成：(1) 主要法(Primary Law)，即 EURATOM Treaty Chapter 7，(2) 次要法(Secondary Law)，即 Regulation 302/2005、Article 83 Decisions，(3) 軟法(Soft Law)，如 Recommendations 2005 and 2009 等。EURATOM 法源為歐洲原子能共同體條約(EURATOM Treaty，Chapter VII：Article 77、78、79、82) 及歐盟規章(Commission Regulation 302/2005)。EURATOM Treaty 第七章及 Commission Regulation 302/2005 主要為核物料管制作業之制定，以確保歐盟各國核物料不會不當使用。EURATOM 根據 Article 82b 派遣檢查員至各核設施進行現場訪查，並要求各成員國定期提供核子設施建置與物料管理。由於 EURATOM Treaty 第七章 Article 77b 之核子保防協議同意遵行國際原子能總署 IAEA 的防止核武蓄衍條約(INFCIRC/193)及補充議定書(INFCIRC/193/A8)，EURATOM 本身及 EURATOM 的會員國也因此納入了 IAEA 的國際保防體系之中(洪煥仁，2018；余冬帝，2017)。

2. 日韓與歐盟的核子保防權責機關組織架構

韓國在 2011 年根據核子安全法第 3 條成立獨立的核子安全與保安委員會(Nuclear Safety and Security Commission, NSSC)，NSSC 負責制定與執行韓國核能安全與保安的法規體系，同時也是核子保防與保安事務的主管機關，在該法的第 5 條同時授權 NSSC 得以成立核子安全專門機構以執行核子安全方面的工作。韓國 KINAC (Korea Institute of Nuclear Nonproliferation and Control, KINAC)係根據本法第 6 條成立的機關，負責執行核子保防工作並管制核設施及核材料的進出口，KINAC 的組織架構亦在第 6 條中訂定。依照核子安全法第 7 條，KINAC 主要職掌如下：

- (1) 有關核設施、設備及技術之研發及核物料核子保防等相關事務
- (2) 包括核物料等國際管制物料的進出口管制
- (3) 執行由 NSSC 授權有關核設施核子保防和實體防護法載明有關實體防護的事務。

- (4) 核子管制技術的研發
- (5) 支援與核子管制有關的國際合作
- (6) 核子管制訓練
- (7) 其他有關執行核子管制有關事務

KINAC 得於在 2014 年設立國際防止核蕃衍與保安學院(International Nuclear Nonproliferation and Security Academy, INSA)即是基於上述有關核子管制訓練的職掌，INSA 與 IAEA 合作，提供各國核子保防保安人員訓練課程，藉由此訓練課程，不僅與 IAEA 建立更緊密關係，也與各國核子保防主責人員建立情誼及聯繫管道。在國內核子保防方面，KINAC 於收到各核設施及使用核物料之事業單位提報之核物料料帳(包括 ICR、PIL、MBR)和補充議定書規定之宣告事項資料後呈報給 NSSC，NSSC 於審查後提報至 IAEA。韓國原子能相關體系如圖 6-4-1，其中 NSSC 及 KINAC 與核子保防直接有關，其他的部會則與原子能有關，如韓國科學技術資訊通信部(Ministry of Science and ICT, MSIT)負責原子能科技的研發，產業通商資源部(Ministry of Trade, Industry and Energy, MTIE)負責原子能產業發展等。圖 6-4-2 則說明 IAEA、NSSC 及 KINAC 三者的關係及各自的角色，很明顯的可以看出 NSSC 是政策制定及與 IAEA 的溝通合作，KINAC 則為具體工作的執行。

NSSC 負責管理的核設施中，包括 24 部運轉中機組，5 部建造中機組，1 座研究用反應器、1 座教學用反應器、3 座核燃料製造廠、1 座用過核燃料再處理廠與 1 座中期低階放射性廢棄物貯存場共 35 個主要核設施，還有分佈全國 8,314 個輻射使用單位與機構。依據 KINAC 2019 年出版之”Korea Leads Transparency in Nuclear Energy Use and KINAC is behind That Effect“顯示，KINAC 組織規模逐年增加，正式員工由 2013 年的 66 人，成長到 2019 年的 107 人，其中有 87 位研究人員，年度預算為新台幣 5 億 2 千萬元，監管核子保防的 43 個物料平衡區(MBA)，則每一個 MBA，每年約投入 1.9 人及新台幣 1,200 萬元。KINAC 除了依據與 IAEA 簽署之核子保防協議陪同 IAEA 至韓國國內各核設施執行核子保防檢查外，KINAC 也會對國內核設施進行國家檢查，對於為數眾多的設施外地點 (Location out of Facility, LOF)也會隨機抽取 20%-30%至現場進行料帳檢查。資料顯示 KINAC 在 2019 年輔助 IAEA 對國內 43 個核物料進行 316 人日的檢查，而 KINAC 主動對國內 29 個核設施進行 259 人日的國家檢查，詳見圖 6-4-3。IAEA 對於地主國主動查核的行為一向十分支持，認為此舉可以減輕 IAEA 檢查員的負擔，而減少至地主國檢查的次數也大幅減少地主國需要支應的費用。

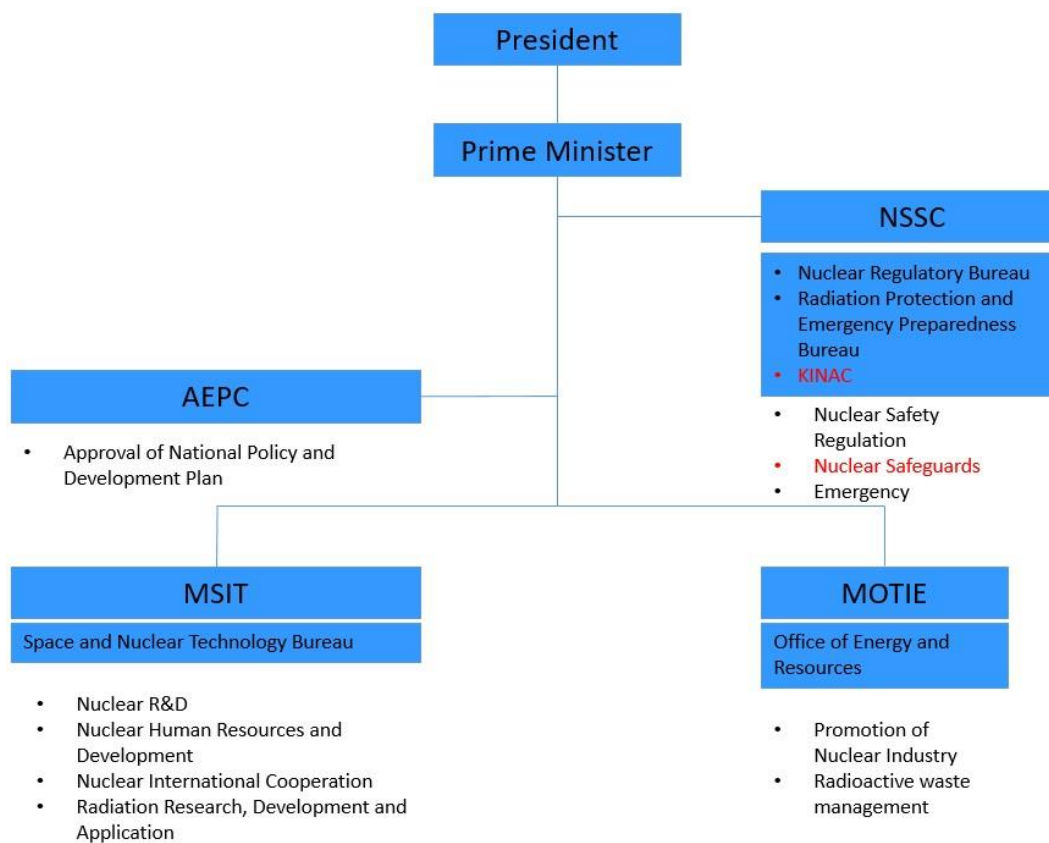


圖 6-4-1. 韓國原子能相關行政組織

資料來源：本研究繪製

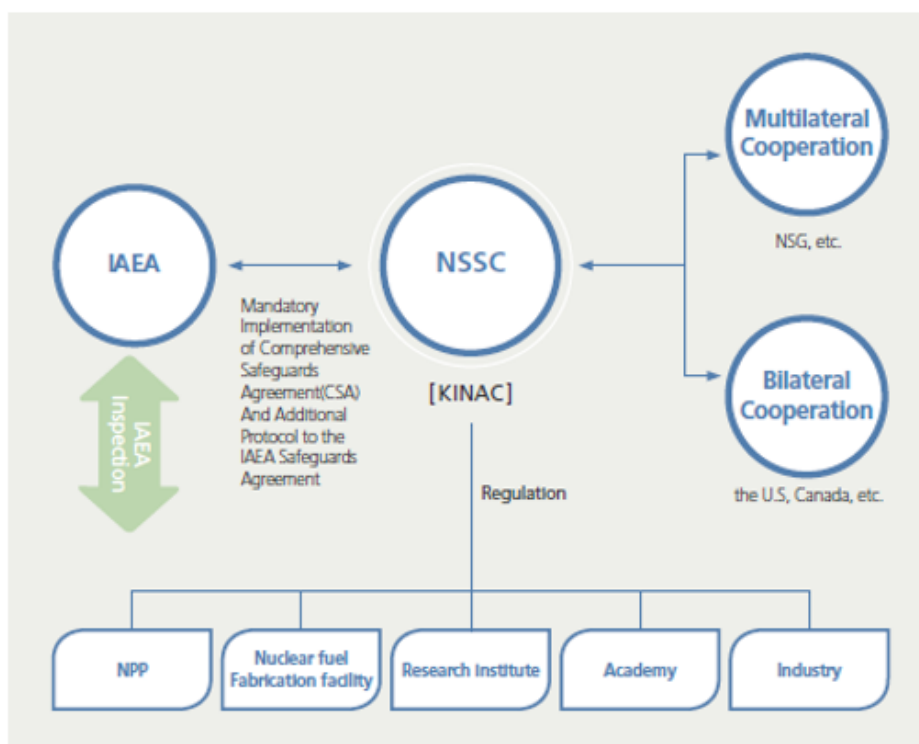


圖 6-4-2. 韓國 NSSC、KINAC 與 IAEA 的關係

資料來源：KINAC2019 年報

Safeguards Implementation in 2019

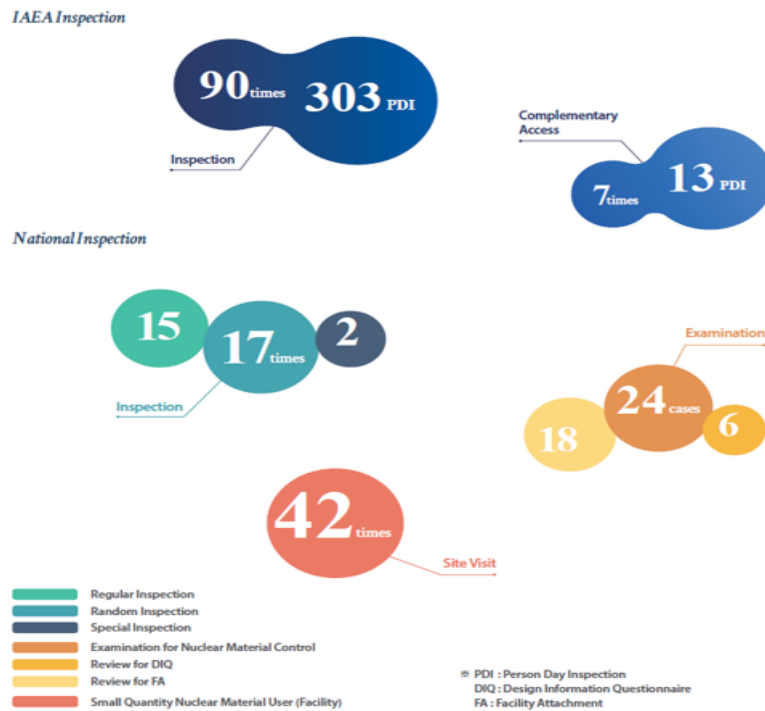


圖 6-4-3. 韓國核子保防檢查人日數

資料來源：KINAC2019 年報

在日本的主管機關方面，日本的原子能法案第二章第 4 條至第 6 條明訂在內閣之下設立原子能委員會(Atomic Energy Commission, AEC)負責國家原子能政策的制定及執行。福島核災之後，日本在 2012 年 9 月成立了原子力規制委員會(Nuclear Regulatory Authority, NRA)，NRA 隸屬於環境省(Ministry of the Environment, MOE)，為日本核子保防和保安事務的主管機關，負責執行核設施及核物料安全管理及管制。NRA 於審查各核設施提報之核物料料帳(包括 ICR、PIL、MBR)和補充議定書規定之宣告事項資料後，將相關資料提報 IAEA。除了依據國際核子保防協議配合 IAEA 至國內各核設施執行核子保防檢查外，NRA 亦主動進行國家檢查。日本在 1972 年成立公益財團法人核物料管制中心(Nuclear Material Control Center, NMCC)，NMCC 接受 NRA 的經費支持，為 NRA 負責核設施及 LOF 的實務檢查與管制工作。NMCC、NRA 及 IAEA 的關係如圖 6-4-4。由 NMCC 網站的資料顯示，NMCC 的總人力為 161 人，合格的檢查人員為 30 位，每年經費約為新合台幣 9 億元，主要負責工作如下：

- (1) 核物料料帳的檢查
- (2) 樣品分析以確認物料成分與料帳是否相符
- (3) 料帳資料處理使得料帳系統與國際一致

(4) 資訊分析以確保核設施操作者資料與核子保防資料一致

以日本所設定之核設施，包括核燃料製造、加工、研究用反應器、核電廠反應器、貯存場、再處理廠、廢棄物處理場、實驗使用等數量 117 處計算，平均每一處主要核設施每年約投入 1.3 人及新台幣 770 萬元。

歐洲原子能共同體 EURATOM 成立的目的是核子能源聯營及分銷共同市場，在組織上隸屬於 DG Energy 之下。由於核燃料可以用在和平及軍事用途，EURATOM 被賦予核子保防的功能，EURATOM 具有獨立國際法律人格 (International Legal Personality)，雇用 160 位核子保防專家擔任檢查員，對於會員國中的核設施進行下列檢查：

- (1) 依設施管理者申報資料，測量核物料の種類及數量
- (2) 運用監視設備確認核物料的運出及接收
- (3) 使用封籤以封存核物料
- (4) 對核設施中的核物料每年盤點

歐盟在核子安全與除役的預算在 2021-2027 年期間為 11.78 億歐元，其中有 1.6 億歐元為核子安全與保防的用途。在其 2012 年的報告中，EURATOM 共有 162 位檢查員，預算 2 千萬歐元，共進行 1275 次檢查，評估超過 160 萬筆紀錄。

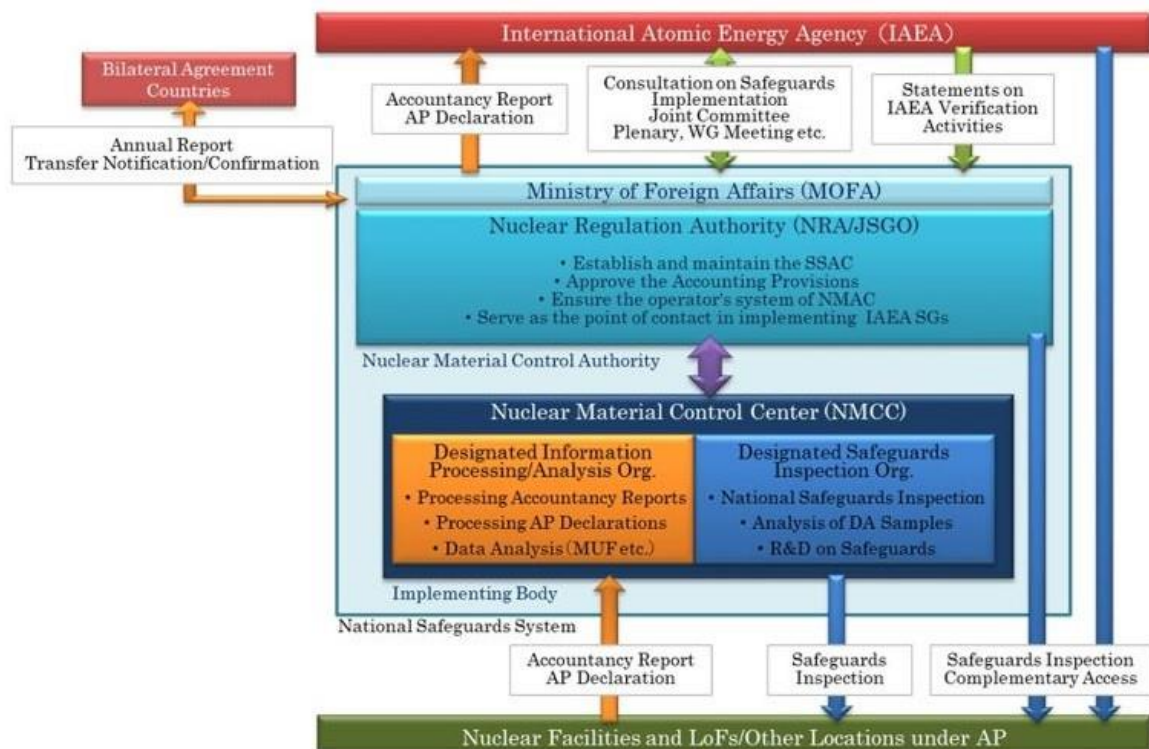


圖 6-4-4. 日本核子保防架構圖

資料來源：NMCC 網站

3.我國執行核子保防實施策略建議

有關核子保防的法律架構上，我國在 1955 年 4 月與美國簽訂「台美民用原子能合作協定」，1964 年與美國及 IAEA 在維也納簽訂「三邊保防協定」，並以附錄文件方式列入「台美民用原子能合作協定」，1965 年美國將供應我國之核設備與核物料及使用情形之歷史清單轉移給 IAEA 後，台灣的核子保防即間接納入國際核子保防體系中。國際協議部分，台灣與 IAEA 簽訂「臺灣研究用反應器保防雙邊協定」(INFCIRC/133)、核燃料保防及轉移的台美及 IAEA 三邊保防協定(INFCIRC/158)及保防協定補充議定書範本(INFCIRC/540，簡稱補充議定書)。國內部分，我國訂定有原子能法、放射性物料管理法及相關法令及核子保防作業辦法等國內法律及規章配合施行，已經有國家層級之核物料料帳控制系統的法律支持。在上述有關日韓執行核子保防業務時可以發現，日本主管機關為 NRA、執行機關為 NMCC，韓國主管機關為 NSSC、執行機關為 KINAC，而我國在原能會之下並無類似的財團法人組織。由於保防工作十分複雜繁瑣，需要有足夠的人力。比較日韓與我國的政府組織架構，日本的 NRA 及韓國的 NSSC 與我國的原能會相似，為日本與韓國核子保防和保安事務的主管機關，負責執行核設施及核物料安全管理及管制，而由日本 NRA 下屬之 NMCC 及韓國 NSSC 下屬之 KINAC 則實際負責執行維護核能安全以及監督、檢查並管理核物料責任，我國並無類似 NMCC 及 KINAC 的架構，建議增設相應組織或由現有法人、協會等組織執行核子保防實務工作。相關法令及作法可做參考：

- (1) 原子能法第 3 條：原子能主管機關為原子能委員會，隸屬行政院，其組織以法律定之。
- (2) 原子能法第 5 條：原子能委員會為推廣原子能和平用途，得報請行政院令有關部會設立原子能事業機構。
- (3) 行政院原子能委員會組織條例第 3 條：本會因應業務需要，得設核能研究所、放射性物料管理局、輻射偵測中心及原子能專業訓練機構；其組織另以法律定之。
- (4) 日本 NMCC 及韓國 KINAC 在其上位法中即明訂其為法人，我國的法令並未有此規範，可以考慮在行政院原子能委員會組織條例第 3 條增加法人組織。關於法人的成立資金，只需初期爭取預算，之後藉由修訂放射性物料管理法由設施經營者負擔。
- (5) 我國放射性物料管理法自民國九十一年十二月二十五日公布施行之後尚未修訂，政府組織改造及 2025 年非核家園在即，在修正法案名稱為「放射性物料管制法」時，其第七條原為：主管機關得依我國與外國或國際原子能組織所簽訂之核子保防相關條約或協定，督同外國或國際原子能組織所派之檢查員執行各項檢查及偵測，並要求經營者檢送指定

之資料；所需繳交國際原子能組織之核子保防檢查費由設施經營者負擔。前項核子保防作業之辦法，由主管機關定之。可以增加「主管機關並得指派檢查員進行國家檢查，其所需檢查費用由設施經營者負擔」。

表 6-3-2. 放射性物料管理法修正草案條文對照表

修正名稱	現行名稱	說明
放射性物料 <u>管制</u> 法	放射性物料管理法	放射性物料之管理與安全管制應分別推動，此為國際發展趨勢，國際原子能總署之「用過核子燃料管理安全與放射性廢棄物管理安全」聯合公約第十九條立法和管制架構，規定應建立並維持一套管轄用過核燃料和放射性廢棄物的立法架構；另立法委員於國會提出「放射性廢棄物管理法草案」，為避免混淆，爰修正本法名為「放射性物料管制法」。
修 正 條 文	現 行 條 文	說 明
第七條 主管機關得依我國與外國或國際原子能組織所簽訂之核子保防相關條約或協定，督同外國或國際原子能組織所派之檢查員執行各項檢查，並要求經營者檢送指定之資料；所需繳交國際原子能組織之核子保防檢查費由經營者負	第七條 主管機關得依我國與外國或國際原子能組織所簽訂之核子保防相關條約或協定，督同外國或國際原子能組織所派之檢查員執行各項檢查 <u>及偵測</u> ，並要求經營者檢送指定之資料；所需繳交國際原子能組織之核子保防檢查費由設	一、修訂第一項，主管機關檢查內容實務上可包括偵測項目，爰刪除「及偵測」文字。增加「主管機關並得指派檢查員進行國家檢查，其所需檢查費用由設施經營者負擔」。 二、茲配合第四條本法用詞定義，將「設施經營者」修

擔。主管機關並得指派檢查員進行國家檢查，其所需檢查費用由設施經營者負擔 前項核子保防作業，<u>其核子保防物料之持有、使用、輸入、輸出、過境、轉口、運送、貯存、廢棄、轉讓、租借、信託或設定質權之運作申請、核子保防設施興建或運轉安全要求及其他應遵行事項之辦法</u>，由主管機關定之。	<u>施</u>經營者負擔。 前項核子保防作業之辦法，由主管機關定之。	正為「經營者」。 三、第二項增列核子保防作業辦法所規範之事項，以符法律授權明確性。
---	---	---

- (6) 本國機構進行自主國家檢查可以減少 IAEA 至本國檢查次數，使得本國繳交之 IAEA 檢查費可能減少，減少之數額可能大於「主管機關並得指派檢查員進行國家檢查，其所需檢查費用由設施經營者負擔」之金額。

在人力及經費方面，比較日本實際執行核子保防工作的 NMCC(不包括 AEC)及韓國 KINAC(不包括 NSSC)，日本在每 1 座核設施至少需配置新台幣 700 萬及 1.3 人執行核子保防工作，韓國在每 1 座核物料平衡區(Material Balance Area, MBA)配置達新台幣 1,100 萬元及 1.9 人，日韓人力與經費平均數為 1 座核設施至少需配置新台幣 900 萬及 1.6 人執行核子保防工作，我國在 2025 年所有核設施將進入停止運轉狀態，核子保防工作仍然無法減輕，以核一廠、核二廠及核三廠僅一座機組估計，若人力經費以日韓平均值計算，則我國目前核設施包括核一廠、核二廠、核三廠、龍門電廠、蘭嶼貯存場、清華大學及核能研究所等 7 座核設施，須新台幣 6300 萬及 11.2 人執行核子保防工作。長遠來看，需要有獨立的法人機關及獨立檢查員，上述之有適當之獨立法人機構屬於長期目標，短期內可以先由其他相關機構或協會代為培養獨立檢查員並執行核子保防檢查工作。

日韓的法人機構的設置有國家級的檢查員對於核子保防的工作十分重要，本國檢查員與 IAEA 檢查員對比而言，本國檢查員對於核設施及核物料更了解，對於問題可以更早發現即時解決，IAEA 可以減少至本國檢查的時間，節省雙方大量的時間及金錢。檢查員的培訓是一個長期的工作，在尚未成立獨立法人機構之前，可以先由其他相關機構或協會代為培養檢查員並執行核子保防檢查工作。可以借助 IAEA 進行檢查員的培訓。IAEA 的培訓課程如圖 6-4-5。IAEA 檢查員的培訓課程

約需四個月，考慮預算及 IAEA 的意願，培訓課程可以精簡為二個月，在遴選具有相關學經歷背景的人員之後，可以安排人員先至國內核子相關機構實習三至六個月學習原子能知識後，再至 IAEA 學習核子保防的法令、實施方法、DIV、PIV、AP 及料帳等。

月曆年	基礎課程	查驗技術	DIV	AP/CA 活動	國家評核活動
1	所有基礎概念課程;核燃料循環;核子保防作為DIV & PIV; 國家評核活動; 補充議定書(AP)概述及CA; 報告撰寫; 輻射防護和工業安全; 案例研習。				
2		非破壞查驗技術(NDA)			
3		用過燃料查驗技術		CA 扮演的角色與責任	核燃料循環及核繁衍的跡象
4	為個別國家的特殊核燃料循環(NFC)設施規劃之訓練課程	實地執行綜合檢查練習(CIE)	核反應器設施DIV	AP 綜合練習課程	基礎國家評核能力建立與資料蒐集及分析技術
5			散置物料設施DIV		
6			特殊檢測活動		
7			特殊保防措施		
					進階的NFC審查指標與進階的國家評核技術訓練

圖 6-4-5. IAEA 培訓課程

有關本國核子保防人員訓練方面，KINAC 的作法值得參考。KINAC 在 2012 年於設立國際防止核繁衍與保安學院(INSIA)，與 IAEA 合作，提供各國核子保防與保安訓練人員訓練課程，我國即曾派員參加其舉辦之國際基礎核子保防訓練課程(International Training Course – Fundamental of Nuclear Safeguards)。由於國際的處境，我國較難與其他國際機構建立交流管道，舉辦具有影響力的訓練課程除了可以強化本國學員的保防與保安能力之外，招訓國際學員可以找到主責人員以建立與其他國家相關機構建立聯繫管道。依照行政院原子能委員會組織條例第 3 條，「本會因應業務需要，得設核能研究所、放射性物料管理局、輻射偵測中心及原子能專業訓練機構；其組織另以法律定之」。若設立原子能專業訓練機構有其困難，可以委由其他相關機構或協會舉辦。由我國舉辦之訓練課程，因為無法提供經費支助，對於其他國家較缺乏吸引力，然而，其他國家有可能基於對於我國核子保防的作法的興趣而派員參加，我國可以在舉辦核子保防人員訓練時邀請鄰近國家相關機構，不需額外舉辦以免增加負擔。此外，核設施的料帳十分複雜，需要較長時間的培訓，如果有人員變動，將使核子保防工作的推動產生困難。由於並非所有人員可至 IAEA 或美國橡樹

嶺國家實驗室(Oak Ridge National Laboratory, ORNL)受訓，建議於國內按照 IAEA 或 ORNL 課程自行辦理培訓，以 ORNL 在 2019 年二週的課程為例，該課程包含 8 個模組，內容主要包括防止核武器擴散與國際核子保防制度和法律背景、全面核子保防協定、IAEA 核物料料帳控制實務、補充議定書原則與宣告事項、核設施設計資料描述、美國執行核子保防實務及幫助新成員國建立該國之國家級核物料料等(吳明哲，2019；羅偉華，2017)，國內訓練課程可以將重點放在 IAEA 核物料料帳控制實務、補充議定書原則與宣告事項、核設施設計資料描述，加強核物料料帳的實際練習而將課程精簡為 5 日。

4.參與 IAEA 辦理有關核子保防措施相關會議

由於 COVID-19 疫情流行，各國政府為了控制疫情嚴格限制出入境，在疫情最嚴峻的階段，大部分的航班都被取消，國內人員的旅行也受到限制。IAEA 檢查員在旅行前在維也納國際中心(Vienna international Centre, VIC)醫療服務下完成 COVID-19 核酸檢測(Polymerase Chain Reaction, PCR)，抵達核設施當地需要隔離 14 天，有些國家限制 IAEA 人員進入核設施及 LOF，上述措施對於 IAEA 必須現場查核的工作產生不利的影響，IAEA 在 2020 年 11 月 3 日公告中也表明其在全球的核子保防活動受到干擾。IAEA 的報告指出，IAEA 需要仰賴各相關國家及政治實體的支持以獲得核設施、核物料通過邊界及機場等資訊，IAEA 除啟動遠程工作使檢查員在遠端能取得相關資訊，並在核子保防部門主管的辦公室建立集中監控能力，以便每日監看預定的實際查核活動。值此困難之際，IAEA 幾乎取消所有會議及非關鍵旅行，相關人員無法來台辦理有關核子保防措施相關會議，我國相關人員今年也無法至 IAEA 參與有關核子保防措施會議，惟核能研究所仍在 IAEA 檢查員至核能研究所檢查時以研討會的方式與 IAEA 技術人員討論 Bottled Plutonium Canister Counter (BPCC) 量測及六氟化鈾運輸等問題。

七、參考文獻

1. 科技部 (2019)，科技發展策略藍圖(民國 108 年至 111 年)。
2. 國家發展委員會 (2020)，台灣經濟論衡，18:3，p.4-9。
3. 原子能應用發展方針，中華民國 80 年 6 月 1 日行政院臺八十科字第 17871 號函發布。
4. 彭采環，2016，透過科普讀物閱讀活動對增進國小六年級學童科學家意象之研究，臺北市立大學應用物理暨化學系碩士論文。
5. 章瓊方，2015，國小科普讀物適級推薦閱讀之研究，國立臺灣師範大學圖書資訊學研究所碩士論文
6. 陳隆豐，2012。國際原子能總署，新世紀智庫論壇，59: 65-75。
7. 原子能法，1971。
8. 曾雅真，2014。歐洲原子能共同體及其會員國權力的競合：以國際用過核燃料及放射性廢物管理建置為例。
9. 余冬帝，2017。強化我國自主核子保防能力方案研究，行政院原子能委員會委辦計畫。
10. 洪煥仁，2018。國家核子保防能力建置策略研究，行政院原子能委員會委辦計畫。
11. 羅偉華，2017。赴美國參加 2017 年 SSAC 核子保防研習出國報告。
12. 吳明哲，2019。參加 2019 年國家級核物料料帳管控系統研習會出國報告。
13. 日本原子力產業協會(JAIF)出版之「放射線が“食品の衛生や保存の役に立つ”って知ってる？」，https://www.jaif.or.jp/about/publication/food-irradiation_pamphlet2016rev
14. 韓國 NSSC 網址：<https://www.nssc.go.kr/en/index.do>
15. 韓國 KINAC 網址：<https://www.kinac.re.kr/eng>
16. 日本 NRA 網址：<https://www.nsr.go.jp/english/>
17. 日本 NMCC 網址：<https://www.jnmcc.or.jp/en/>
18. 歐盟 EURATOM 網址：<https://ec.europa.eu/euratom/index.html>
19. 「What is Nuclear Energy？」
<https://www.nrc.gov/reading-rm/basic-ref/students/what-is-nuclear-energy.html>
20. Atomic Energy Act, 2011, Korea
21. Atomic Energy Basic Act, 1955, Japan
22. Australian Radiation Protection and Nuclear Safety Agency, (ARPANSA)
<https://www.arpansa.gov.au/>
23. Canadian Nuclear Safety Commission (CNSC), <https://nuclearsafety.gc.ca/eng/>

24. Comprehensive Summary of Safeguards in Japan, 2019. Nuclear Regulation Authority
25. European Nuclear Safety Regulators Group (ENSREG),
<http://www.ensreg.eu/nuclear-safety/regulating-safety>
26. IAEA (2018), IAEA Annual Report 2018, IAEA-GC(63)/5.
27. IAEA (2020), Nuclear Technology Review 2020, IAEA-GC(64)/INF/2.
28. Korea Institute of Nuclear Nonproliferation And Control, 2019. Korea Leads Transparency in Nuclear Energy Use and KINAC is behind That Effect
29. Nuclear Regulatory Commission (NRC), <https://www.nrc.gov/>

附件一:原子能科普翻譯文宣

(一)「What is Nuclear Energy?」

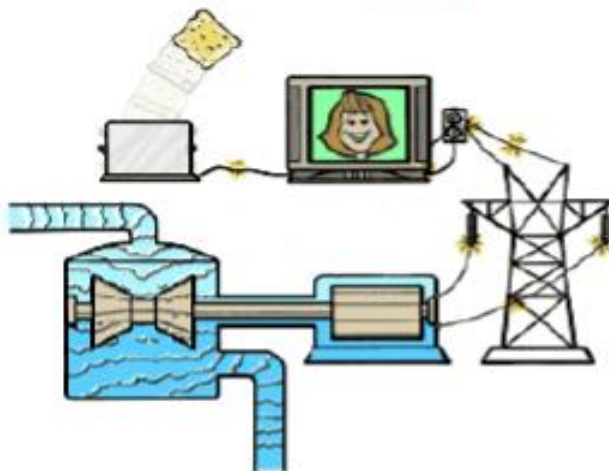


什麼是核能?



產生電能的方式有好幾種。例如，太陽能板吸收太陽光產生電能，或是藉由燃燒煤炭或原子核分裂產生的熱量來轉換成電能。當電能是由原子核分裂所產生的，即稱為核能。

熱功率發電廠利用水蒸氣將熱量轉化為電能。在核能發電廠中，用來產生水蒸氣的熱量來自於原子核分裂，又稱為核分裂(Fission)。原子核分裂的過程中會釋放熱量，當該過程一遍又一遍地重複時，就稱為連鎖反應。在核能發電廠中，鈾(Uranium)是核分裂過程中常使用的材料。



核分裂產生的熱能使水沸騰並產生水蒸氣，以轉動渦輪，渦輪旋轉帶動發電機旋轉，在磁場中產生電能。然後就可以將電力送至你的家中，讓你可以電腦上工作，看電視或烤麵包！

美國約有20%的電力來自核能。這意味著該國每5個家庭中，就有1個家庭能夠打開電燈，都是因為原子的功勞！

美國核能管制委員會(以下簡稱核管會, NRC)負責監管核能發電廠，確保在核能發電廠工作人員和附近居民以及環境的安全。

核子反應器

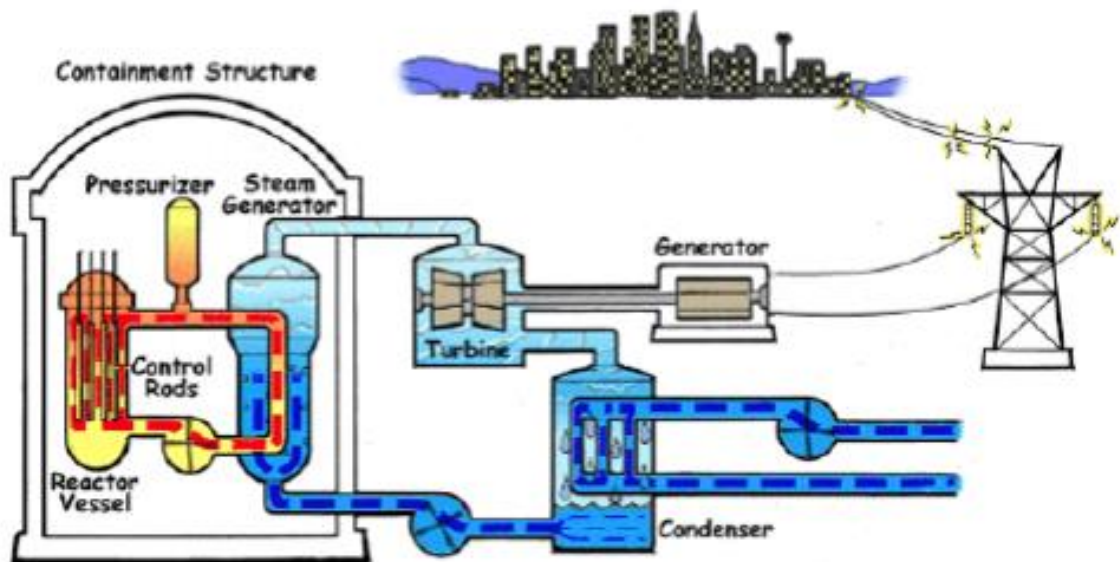
核能發電廠非常複雜，電廠內有許多不同的建築物和系統。一些系統用於發電，另一些系統可以使電廠正常、安全地運作。所有核能發電廠都有一個容納反應爐的「圍阻體」。電廠中設有深水池，用來儲存和冷卻不再使用的核子燃料。

所有核能電廠都利用原子分裂釋出的熱量產生水蒸氣來發電。但是，水蒸氣的使用兩種不同的方式。

壓水式反應器(Pressurized Water Reactor, PWR)將水保持在加壓狀態，以使水在加熱後不會達到沸騰。來自反應爐的水和變成水蒸氣的水各自在不同的管道中，並且永遠不會混合。

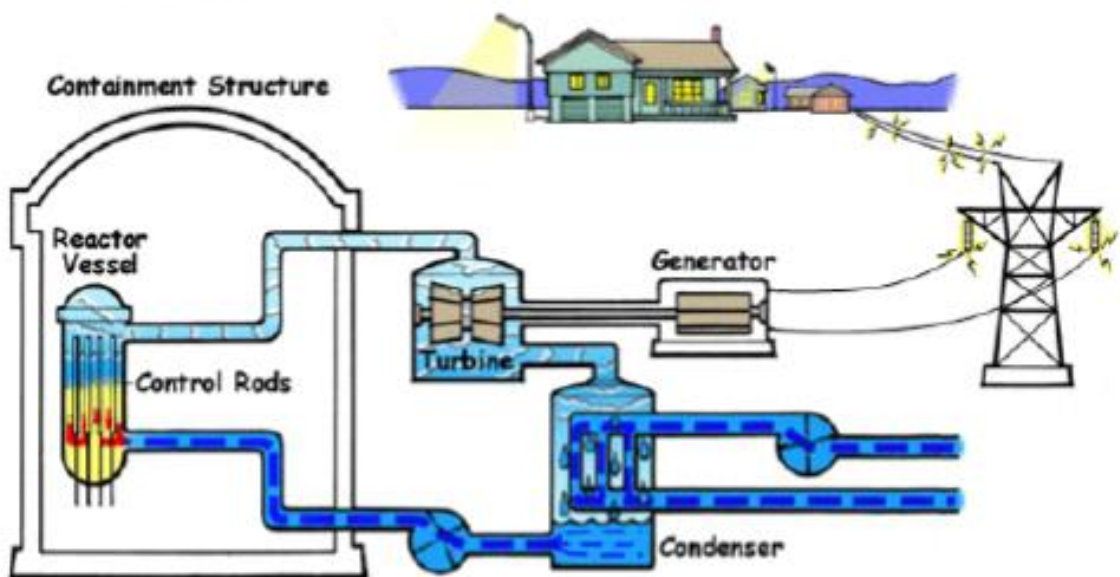


壓水式反應器(PWR)



在沸水式反應器(Boiling Water Reactor, BWR)中，經過核分裂加熱的水都會沸騰並產生水蒸氣，進一步帶動發電機轉動。在這兩種類型的核能電廠中，水蒸氣都會變回水，並且可以在此過程中再次使用。

沸水式反應器(BWR)





在所有核能電廠中，發電過程都會產生放射性物質。放射性物質來自於原子核分裂，必須小心管理，因為如果處理不當可能會有危險。長時間曝露可能會破壞人體細胞或引起癌症。因此，所有核能電廠都有許多保護員工、民眾和環境的安全系統。

例如，安全系統能停止核分裂反應並且迅速關閉反應器，冷卻系統能冷卻反應爐並帶走熱量，屏蔽結構可防止放射性物質洩漏到環境中。

在反應器中，放射性物質被包覆在小陶瓷顆粒中，其大小與成人的指尖差不多。它們被放置在反應爐槽內的長金屬棒裡面，然後再將反應爐槽封閉在鋼筋與混凝土構成的安全建築內，這些建築物的牆壁厚達100公分到150公分！





輻射

輻射天然存在於我們的環境中，它可以來自太陽和某些岩石。核能電廠的用過核子燃料和發電過程中也會產生輻射，必須謹慎管理，因為曝露過多會造成人體和環境的傷害。

核能電廠產生的輻射以多種方式被捕獲和圍阻：

- 在長金屬棒內的小陶瓷顆粒內；
- 在發生核分裂反應的「反應爐槽」內；
- 在包住反應爐槽的「圍阻體」內，它的厚度為三到五英尺！

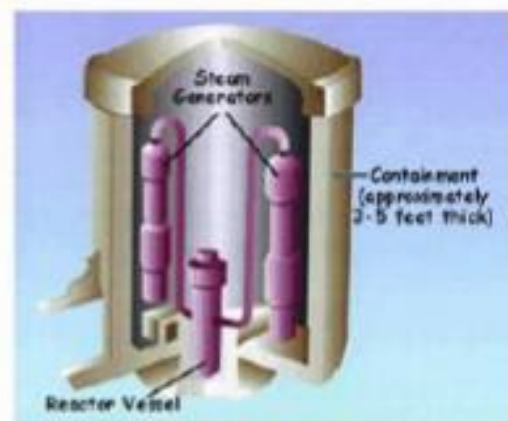
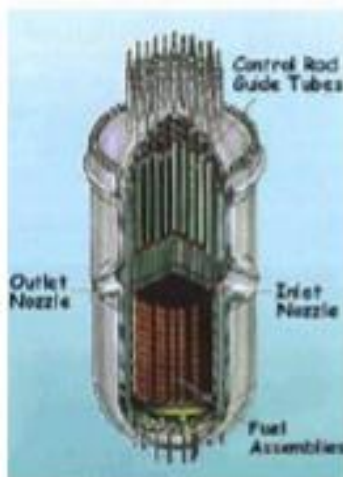
少量的輻射可能會釋放到環境中，但只能在受控制和監視的條件下進行。

美國的核能電廠僅發生過一次重大事故，該事故發生在1979年3月，在賓夕法尼亞州的哈里斯堡附近的三哩島。事故中一些放射性物質被釋放到大氣中，但不足以對環境或人們的健康造成損害。

在1986年，前蘇聯的車諾比發生更嚴重的核能事故，那場事故向環境釋放了大量的放射性物質。發生事故的反應器與美國的反应器有很大不同，該反應器在設計建造時沒有任何圍阻體，相對的，美國的反应器在任何事故時，都必須避免輻射進入到環境中。

在核能反應器中，輻射通過多種方式被捕獲和圍阻：

Inside small ceramic pellets encased in long metal rods



Inside a reactor vessel, enclosed in a concrete and steel containment building, with walls 3-5 feet thick

EPA's Radtown USA



放射性物質

放射性物質天然存在於我們的環境中，也會由核分裂反應產生。

雖然過多的輻射對人類是有害的，但是正確地使用輻射也可讓人們受惠。



使用在工業界

一種稱為輻照器的大型設備可以用來消毒醫療器材，甚至可以用來消毒捐獻的血液。輻射曝露可以殺死細菌並防止疾病傳播。輻照器也能用來消毒您吃的某些東西，以維持新鮮更久或更安全。它是如何工作的呢？輻照器內的放射性物質會發出足以殺死細菌但不會使物品具有放射性的輻射束，所以物品照射之後還是可以安全使用。而且輻照器裡的放射性物質被屏蔽隔絕，不會傷害到人們。

一些測量儀器也會使用放射性物質。測量儀器可能使用放射性物質在築路期間測量土壤中的水分，或是測量報紙或塑料等產品的厚度，甚至可以使用放射性物質測量攪入冰淇淋中的空氣量！

放射線照相機可以使用放射性物質拍攝牆壁或管道內的照片，不過，拍起來的照片比起普通照相機，看起來更像X光拍起來的照片。這種特殊的照相機可以在不損壞物體的情況下，檢查物品是否含有缺陷。

Moisture Density Gauge



A moisture density gauge indicates whether a foundation is suitable for constructing a building or roadway.

一些設備則使用放射性物質來幫助尋找石油，天然氣和礦物質。這些測井設備被放入深井中，有助於建立地下區域的地圖。



煙霧探測器亦使用極少量的放射性物質。這些物質會與空氣發生反應，如果有煙霧，就可以觸發警報。





使用在醫學和獸醫上的用途

醫院、醫生、牙醫甚至獸醫會使用放射性物質，來協助診斷和治療疾病，例如癌症，以及疾病的研究。在美國，每年有成千上萬的患者接受放射性物質治療。

如果您曾經進行過電腦斷層造影(CT)掃描或正子斷層造影(PET)掃描，您可能得喝下一種液體，然後坐或躺在大型機器下(或內部)。這種液體含有少量的放射性物質，當它穿過您的身體時，機器就能為您的內部器官拍照。然後，您的醫生查看拍出來的照片，就能知道是否有任何問題。

在美國，每年大約有1千萬次核醫藥物的療程，使醫生可以查看患者的病情並找出問題所在。



有時，放射性物質甚至可以用來對抗疾病。它可以殺死癌細胞或減輕疼痛。可以將微小的放射性種粒放入患者體內來殺死癌性腫瘤，也可以藉由吞下放射性物質，或者使用強大的輻射束來縮小腫瘤。

而且不僅只有為人類提供幫助，獸醫可能也會使用放射性物質來診斷、治療和研究寵物和其他動物的疾病。

使用在科學和教學上的用途

一些高中、大學以及其他學術和科學機構會在實驗室實驗和研究中可能會使用放射性物質，或作為課堂演示的一部分。如果您曾經在化學實驗課中進行過氣相層析實驗，那麼您所使用的設備就有包含放射性物質！



(二)「放射線が“食品の衛生や保存の役に立つ”って知ってる？」

讀懂輻射線與食品應用

你知道輻射線可以應用在
「食品衛生與保存」嗎？



我們的日常生活中，在各式各樣的地方， 都運用了輻射線。

輻射線是肉眼看不見的，沒有顏色，也沒有氣味，
卻應用在我們周遭的事物。

輻射線的照射可以用在作物的品種改良，
也可以在不加熱、不用藥的情況下，進行殺菌、滅菌。
這種技術也應用在食品上。



午餐：今天的便當是什麼？
輻射線讓包飯糰的保鮮膜更耐用



上學：衝向公車站
輻射線也應用在輪胎、
坐墊等汽車的組件製造。



團體健檢：

心跳撲通撲通的健康檢查
輻射線也應用在 X 光、
CT 斷層掃描等影像診斷



上課：來！加油吧！
教科書、筆記本的紙張厚度能夠一致，
就是運用了輻射線的厚度計。



早餐：早飯的香味
利用輻射線進行品種改良，
能種出可口的米飯





戶外教學：去博物館
藉由檢驗出土物所釋出的
輻射線的碳含量比例，
可以鑑定出土物的年代。

沒有輻射線的生活，
真是無法想像。



哇！
好厲害呀！

小薯



社團活動：
今天也去打籃球，全身是汗！
確實做好水分補給！
飲料的寶特瓶是經過
輻射線殺菌的唷！

去醫院探病①：手術加油！

除了手術用的剪刀、手套之外，
注射器等各式各樣器具的滅菌，
都運用了輻射線。



去醫院探病②：爺爺的狀況好像不錯

住院接受癌症治療的爺爺。
輻射線有助於癌症的早期發現、減痛治療。



「每週一次的插花藝術」研習
使用以輻射線改良的新品種康乃馨，
來進行插花研習。



晚餐：肚子餓了唷！

北海道的爺爺寄來的士悅農會的馬鈴薯。
輻射線可用來抑制馬鈴薯發芽。

15:00
16:00
18:00
19:00
23:00

※以上只是舉例，不一定全都運用輻射線。

2

輻射線是什麼？

輻射線是肉眼看不見、像光一樣的東西。
雖然是 19 世紀末才偶然被發現的，
但早從宇宙誕生時就一直存在。



在空氣中也有
約 0.5 毫西弗／年

輻射線是能量的流動

輻射線是指在空間中自由奔跑的能量流動。
輻射線在穿越物質的同時，偶爾會對物質的極小部分釋出能量。

宇宙的初始是能量的集合體，說起來這一切都是輻射線。像原子一樣的物质從中生成，太陽和地球誕生，至今在自然界中，仍透過輻射線的傳輸，持續進行能量的轉換。

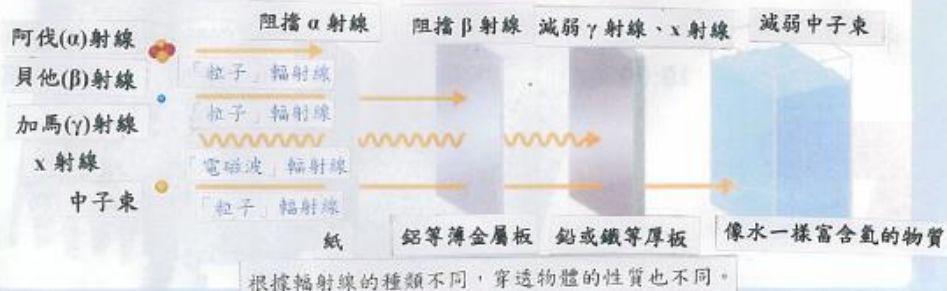
多餘的能量以輻射線的形式釋出的物質，就叫做「放射性物質」。



輻射線的種類

輻射線有電波與光的好朋友「電磁波」，以及速度極快的「粒子」輻射線。它有各式各樣的種類，包含「阿伐射線(氦原子核的流動)」、「貝他射線(電子束)」、「加馬射線、x 射線」、「中子束」等。

輻射線可透過各種物質阻擋



根據輻射線的種類不同，穿透物體的性質也不同。



**根據地區的不同，
接收到的輻射劑量也有差異**

比方說，就如同花崗岩較多的地區有較高的輻射劑量一樣，大自然的輻射劑量會隨著地區的不同有所差異。印度的喀拉拉(Kerala，9.2 毫西弗／年)，伊朗的拉姆薩(Ramsar，4.7 毫西弗／年)等地區，以高自然輻射劑量聞名，但一般認為輻射線並未對這些地區的居民造成影響。

**肉眼看不見的輻射線
是可以量測的。**

量測單位有 3 種

- 貝克【Bq】**
物體的放射性活度強度
- 戈雷【Gy】**
物體從輻射線接收到的能量
- 西弗【Sv】**
對人體的影響(風險)的標準

輻射偵檢儀器 食品監測儀器

[註 1]台灣約為 1.6 毫西弗／年。各地區的自然背景輻射值隨地質結構、緯度不同而略有差異。

輻射線可以應用於 食品衛生或保存

用適當的輻射劑量照射食品，
進行殺菌或防止發芽，稱為「食品照射」。
食品照射也可以用在香辛料、
冷凍肉品或冷凍海鮮等食品，
進行非加熱殺菌。



日本的
食品照射
只用在馬鈴薯的
發芽抑制！

世界上，食品照射應用在各種食品。

根據不同的輻射照射目的，必要的劑量也有所不同。

抑制發芽

~約150Gy (~約0.15kGy)

- 馬鈴薯
- 蒜頭
- 洋蔥



※在日本，目前只有馬鈴薯的發芽抑制獲得許可並實際運用。
依據食品衛生法規定，照射馬鈴薯的劑量上限是150Gy。

殺蟲

0.1~1kGy

- 熱帶果實
- 穀類
- 食用肉、海鮮類



殺菌

1~10kGy

- 香辛料、香草
- 脫水蔬菜
- (生鮮、冷凍)
- 食用肉品、海鮮類



滅菌

20~50kGy

- 太空食物
- 治療餐



5

※殺菌...僅減少微生物數，或僅去除特定微生物
滅菌...減少微生物數至無菌狀態

食品照射的優點和缺點

優點

- 由於溫度幾乎不會上升，可以處理生鮮食品或冷凍食品，也能保有色澤、香味及高品質的營養素。
- 不會因為使用藥劑而殘留毒性，也不會產生環境污染的問題。
- 可深入食品內部均一處理，處理效果信賴度高。
- 可在密封包裝後處理，能防止微生物或害蟲引起的二次污染。

缺點

- 成本高。實用化僅限於商品價值高、利潤大的情形，或沒有其他有效手段的情形。
- 核可程序的費用負擔重。
- 有的食品適合照射，有的則不適合。根據食材及照射條件的不同，風味及加工適性也會有所差異。
- 很多人覺得輻射線是可怕的，輻射線可能會被誤解或躲避。



輻射線也廣泛運用於工業、農業及醫療領域



不耐熱的塑膠製醫療器具或醫藥用品、衛生用品、實驗動物用的飼料、食品容器、飲料無菌填充用寶特瓶等，也都使用輻射線滅菌。

殺菌



生藥(朝鮮人蔘等)
1~10kGy

滅菌



實驗動物飼料
20~50kGy

滅菌



醫療器材
20~50kGy

全世界有這麼多地方利用輻射線

全世界的食品照射資訊，收錄在聯合國糧食及農業組織(FAO)及國際原子能總署(IAEA)的資料庫，2006 年登錄許可品項清單，2007 年登錄照射設施清單。2013 年全世界食品照射的處理量推估約 100 萬噸。舉例來說，美國有進口、販售在東南亞照射過的熱帶水果。



參照：IAEA 資料庫(<http://nucleus.iaea.org/fitf>)

約有 40 個國家、地區實用化(2013 年)



什麼是「抑制發芽的馬鈴薯」？

抑制發芽的馬鈴薯，指的是為了不讓馬鈴薯發芽，用伽馬射線照射過的馬鈴薯。

既不會造成營養流失，也能夠長期保存，因此在馬鈴薯出貨淡季的時期也能保持新鮮。

在日本，輻射線被用來抑制馬鈴薯發芽。

1974年，位於日本北海道的「士幌同位素照射中心」正式啟用，這是全世界第一座食品照射廠。

在這座照射廠裡，針對部分出貨用的馬鈴薯進行輻射照射，以抑制發芽。



「抑制發芽的馬鈴薯」的商品外層會貼上貼紙，讓消費者明白馬鈴薯已完成輻射照射。

另外，出貨時馬鈴薯的紙箱也會印上照射完成的字樣。貼紙附有行動條碼(QR Code)，讓消費者可以連結到網址，了解那是抑制發芽的馬鈴薯。



裝在貨櫃裡的馬鈴薯



馬鈴薯問與答

為什麼馬鈴薯會停止發芽呢？

用「加馬」這種輻射線照射馬鈴薯，可以抑制芽眼處細胞增生。

因為加馬射線會穿透馬鈴薯，所以輻射不會殘留在馬鈴薯中。

為什麼要抑制發芽呢？

由於馬鈴薯在收成後，經過2至3個月的休眠期後會發芽，通常會進行低溫貯藏(2℃左右)。

然而，在氣溫逐漸上升的初春，擺在超市架上還是會發芽，因此用加馬射線照射馬鈴薯來抑制發芽。

發芽或表皮綠化的馬鈴薯會增生「茄鹼」(Solanine)這種有害物質，可能會引起食物中毒。

輻射線會對照射設施的工作人員或周圍居民造成影響嗎？

不會造成影響。

輻射線可藉由厚實的水泥與鉛完全遮蔽。



士幌同位素照射中心

照過輻射線的食品，吃了沒問題嗎？

沒問題的。
輻射線不會殘留在食物。
也不會釋放出有害物質。
安全性獲得國際上的認證。



食品照射和加熱、乾燥、冷凍等，同樣都是一種物理性的食品加工方法。輻射線不會殘留於食品，也沒有報告指出依規定條件進行照射處理的食品，會另外釋出輻射線，或另外產生輻射物質。

1960 年代以後，世界各國的研究機構和國際機構進行了許多輻射線照射的食品安全實驗研究。食品照射這種技術，可說是徹底講求安全性的食品處理法。

從龐大的實驗結果中，世界衛生組織(WHO)於 1980 年做出以下結論：「如果依照規定的方法使用輻射線的話，不論是新生成的化學物質所造成的負面影響，或是營養成分的增減，都和以往的加工方法沒有差別。」

食品就算照射了輻射線，不見得能從食品去除雜質或髒污，也不見得會使腐敗或不潔的食品獲得改善。照射過輻射線的食品，當然也和其他食品一樣，必須經過衛生處理。

針對這一點，國際食品法典委員會[※]的國際食品規格中，規定「照射過輻射線的食品，也應該依循食品衛生的一般原則，以合乎衛生的方式調理、加工、流通。」

※國際食品法典委員會(英語: Codex Alimentarius Commission，簡稱 CAC)是聯合國糧食及農業組織(FAO)和世界衛生組織(WHO)於 1963 年聯合設立的政府間國際組織。

植物檢疫也有利用輻射線嗎？



有。
使用輻射線的植物檢疫是國際上
認可的技術之一。

以植物檢疫為目的、
經輻射線照射的果實
(由 Steritech 提供)



所謂植物檢疫，是為了防範寄生在從國外進口的植物的害蟲擴散而引起的損害，以保護國內植物的機制。從有害蟲檢疫的國家或地區，進口可能有害蟲寄生的植物，是被許多國家所禁止的。不過在有些國家，若害蟲在出口的國家或地區經過消毒，是允許進口的。

以往害蟲的消毒多使用溴甲烷(Bromomethane) 但由於溴甲烷會破壞臭氧層，因此國際上禁止使用。輻射線照射是溴甲烷的替代檢疫處理措施，受到矚目。

紐西蘭是很少遭受農作物蟲害的國家，為了守護國內的環境，採行嚴格的植物檢疫。澳洲與紐西蘭兩國政府，認可輻射食品的安全性，並推動用於植物檢疫的輻射線照射。目前在紐西蘭的超市，售有在澳洲以輻射線照射過的芒果和木瓜等熱帶水果，以及番茄等蔬菜。藉由輻射線照射，紐西蘭的民眾也可以品嚐到以往很難取得的熱帶水果。

美國也有採行植物檢疫的輻射線照射，從墨西哥及印度等地進口的水果、從夏威夷運送到美國本土的水果及蔬菜等等，都是市售的輻射照射食品。

然而，在日本，依據食品衛生法的規定，抑制馬鈴薯發芽以外的食品照射是被禁止的，生鮮食品的食物檢疫也沒有使用輻射線照射。

出處：國際原能總署-亞洲及太平洋區域合作協定(IAEA/RCA)

"Strengthening Adaptive Climate Change Strategies for Food Security through the use of Food Irradiation(RAS5071)", HoChiMinh, Viet Nam, 16-20 November 2015 Yves Henon
發表

預防食物中毒是大家的期望



食品照射是對病原微生物進行殺菌，以預防食物中毒的技術之一。在美國，為了抑制病原菌，用輻射線照射香辛料、調味料，食用肉品、蛋、豆芽菜種子、萵苣、蝦蟹等是被許可的，香辛料約有三分之一的消費量有使用輻射滅菌。

在日本，鑑於 2011 年發生了肉脛(蛋拌生牛肉)的集體食物中毒事件，政府訂定了生食用肉的成分規格及加工基準，也禁止販賣或提供生食的牛肝臟。今後，日本的輻射線照射利用也將受到矚目。



不孕蟲的釋放與滅蟲

有一個「不用農藥撲滅害蟲」的例子，是比較特別的輻射線利用案例。

沖繩及奄美地區在大正時代(西元 1912 至 1926 年)飽受「瓜實蠅」的蟲害所苦，那是一種從南方入侵橫行，損壞苦瓜等作物的害蟲。1971 年當地開始利用「不孕蟲釋放法」推動瓜實蠅的根除措施，透過輻射線使瓜實蠅不孕，並將其釋放到野外，減少野生蟲之間的交配機會，到了 1993 年，終於達成了全島根除的目標。

這也使得苦瓜等作物可以在日本本土流通。

為了防範蟲害再度入侵，目前仍持續推動瓜實蠅大量飼養與不孕性蟲蛹的「釋放」措施。



「黃金二十世紀梨」的故事



早期的青梨品種「二十世紀梨」對於梨黑斑病欠缺抵抗力，人們認為以加馬射線加速自然界發生的「芽變」(突變)，有助於改良品種，於是從 1962 年開始進行試驗，在 1981 年發現了一株沒有染上黑斑病的。此後，經過反覆的抗體檢測及交配試驗，終於在 1990 年推出對黑斑病具有抵抗力的品種，並將其命名登錄為「黃金二十世紀梨」。



後序

近年來飲食生活越來越豐富，然而食物中毒的情形尚未根除，是一大社會課題。因此，食品產業在檢查與預防方面投入了許多經費。以輻射線照射食品，確實能夠殺菌、滅蟲，不但可以預防食物中毒，也能降低成本。食品照射是可解決社會問題的對策。

照射食品在長年的國際共同研究的基礎下，其安全及效用已獲聯合國糧食及農業組織(FAO)及世界衛生組織(WHO)確認，廣泛地運用於全世界。

日本早於世界各國率先認可馬鈴薯的實用照射與市場流通。當時依據食品衛生法規定，原則上禁止食品的輻射照射，例外視必要訂定照射目的、照射品項、照射劑量等條件而准予照射。然而到目前為止，對於馬鈴薯抑制發芽以外的輻射線照射仍一律禁止，對於食品的輻射照射、照射食品的進口仍未核准。檢查進口食品的檢疫所，對於經照射處理的衛生食品，以違反食品衛生法為由加以取締。

目前國際原子能總署(IAEA)因應地球暖化這個迫切的課題，將食品照射視為糧食安全保障的最佳對策。有鑑於此，輻射線與食品的專業研究者共同編輯了這本新的手冊。大家要不要一起重新學習食品照射的知識呢？

2016 年 3 月

編輯委員會

北海道教育大學 鶴飼光子

日本原子力研究開發機構 小林泰彥

農業食品產業技術綜合研究機構 龜谷宏美

東京中央區保健所 小暮實

(無特定排序)



與身邊的能源互相比較

原始人學會用火，現代人發明電燈光照，並善用瓦斯與微波爐過生活。由於瓦斯和微波爐是將食品加熱，因此會破壞食物的組織與基因。

輻射線雖然穿透食品，但那是在不加熱的情況下，改變食品部分組織的技術，比起加熱調理，更能活用素材的特性。

輻射線只是穿透食品，並不會殘留在食品中。

一起了解輻射線食品照射的優點，讓我們的生活更加便利吧！



本教材日文原題名：「放射線が“食品の衛生や保存の役に立つ”って知ってる？」，由日本原子力産業協會(JAPAN ATOMIC INDUSTRIAL FORUM, JAIF)於2016年3月發行，版權歸日本原子力産業協會所有，網址：<https://www.jaif.or.jp/>。行政院原子能委員會核能研究所於2020年取得授權編譯中文版並獲得散佈許可。

附件二:核能管制架構、核電使用與民意趨勢

(一) 加拿大核能管制架構、核電使用與民意趨勢簡析

1. 核能管制架構

加拿大的核能管制機構為加拿大核能安全委員會(Canadian Nuclear Safety Commission, CNSC)，以下簡稱核安會，隸屬於自然資源部 (Department of Natural Resources)，透過自然資源部長向加拿大國會報告，其位階如圖 1 所示。核安會之任務為管制核能以保障健康、安全及環境；實踐加拿大核能和平使用的國際承諾，對大眾傳播科學、技術與管制資訊，管制加拿大的核能產業以確保加拿大及其國民之安全。核安會藉由在政府與核能產業間保持超然中立，以維持委員會之獨立性。核安會的工作內容包含公眾溝通(涵蓋政府、利害關係人、原住民等)並發布管制的行動與相關報告；設定相關法規、澄清特定事項以及尋求回饋等；核照 (Licensing) 與認證 (Certification)，例如審查及評估申請案件以確保符合法規，確保執行人員具備資格且有能力可安全地執行核能相關活動；監督合規(Overseeing Compliance)等。在此架構下，另一與核能相關的機構為加拿大原子能公司(Atomic Energy of Canada Limited, AECL)，其任務是藉由履行加拿大政府在放射性廢棄物及除役的責任，實現核子科學技術及環境保護。

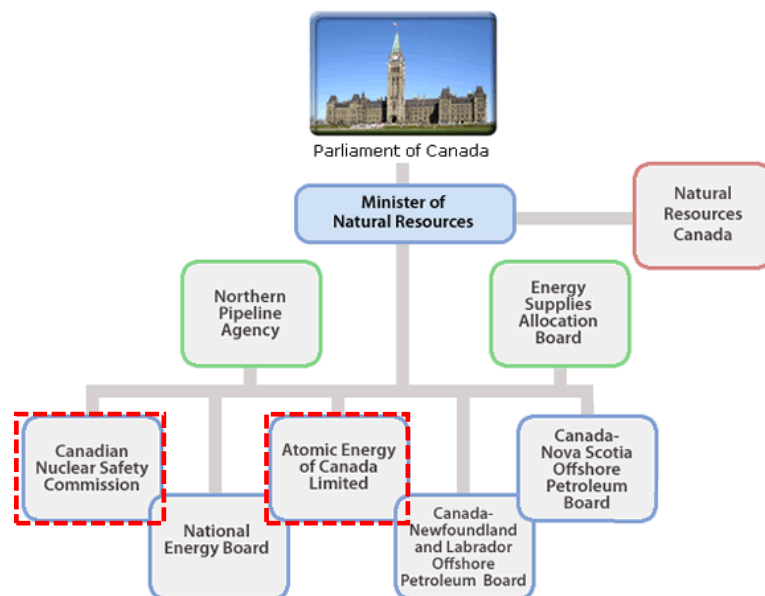


圖 1、加拿大自然資源部組織架構

資料來源<https://www.nrcan.gc.ca/nrcan/about-us/natural-resources-portfolio/10864>

核安會係於 2000 年根據核能安全與管制法案(Nuclear Safety and Control Act, NSCA)成立，取代於 1946 年所成立的原子能管制委員會(Atomic Energy Control Board)，並透過自然資源部長(Minister of Natural Resources) 向加拿大國會報告。核安會為一透明、以科學為基礎的決策單位，並具有以下性質：

- 準司法裁判所(quasi-judicial tribunal)
- 具官方代理諮詢責任
- 透過自然資源部長向國會報告委員會成員為獨立且兼任
- 委員會聽證會為公開並網路直播
- 決策可受聯邦法庭所檢視

核安會管制範圍涵蓋加拿大境內所有核能設施、核能活動以及核燃料循環等項目。所謂核燃料循環從鈾礦開採到將鈾礦轉變為核電廠燃料的製程，直到核子反應器的用過燃料等一系列過程，核安會亦規範核廢料的安全管理；除此之外，核安會進行監督並確保核物質應用在醫學、研究及其他產業之安全。

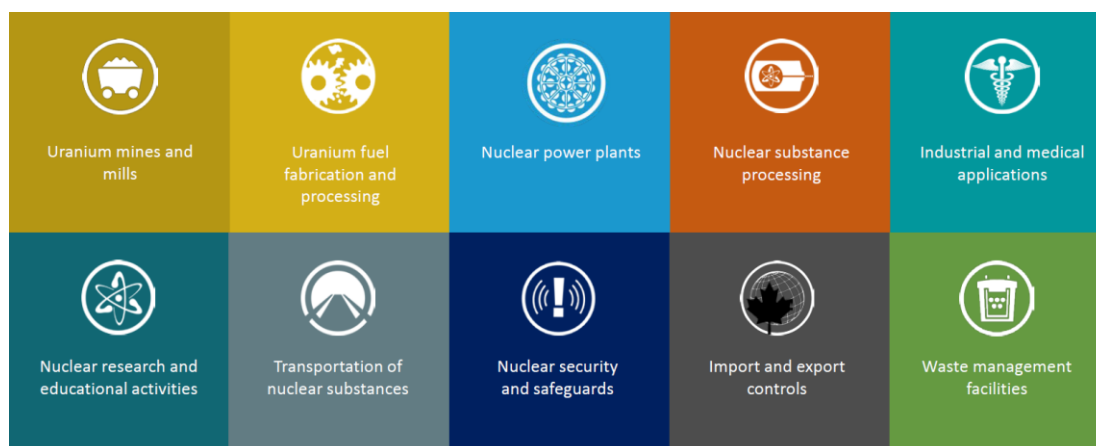


圖 2、受 CNSC 管制之相關核設施與活動

資料來源: Canadian Nuclear Safety Commission (CNSC) Annual Report 2017-18

<http://www.cnscc.gc.ca/eng/resources/publications/reports/annual-reports/index.cfm>

核安會的管制目標為確保核能安全及和平使用，並讓民眾充分了解加拿大核能管制法規的有效性。核安會主要透過以下五個管制計畫來達成上述目標。

- 核燃料循環計畫
- 核反應器計畫
- 核物質與規定設備計畫
- 防止核蓄衍計畫
- 科學、管制與公眾資訊計畫

另外，核安會對核能產業之規範文件與計畫係根據圖 3 的架構來進行分類。

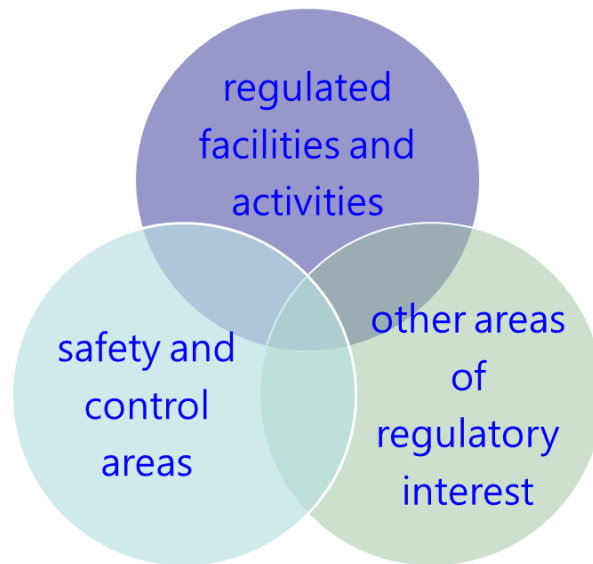


圖 3、管制架構分類

資料來源:

<http://www.nuclearsafety.gc.ca/eng/acts-and-regulations/regulatory-framework/regulatory-framework-plan.cfm#sec1>

2.核電使用現況

目前加拿大境內有 Bruce、Pickering、Darlington、Point Lepreau 4 座核電廠，共 19 個反應器(主要位於安大略省)，總裝置容量為 13.5 GWe，占全國電力供應的 15%。加拿大原先計劃在未來十年內再建造兩個新反應器來擴大其核能力，但這些計畫已被推延。目前營運中的 19 個反應器，共有 7 座機組為延役使用，分別為 (Pickering A1、A4，Bruce A1、A2、A3、A4 以及 Point Lepreau 1) 延役執照時間至 2022~2037 年。因 Pickering A1 及 A4 兩部機組翻新的費用過高，超過原先估計的兩倍，故 A2 及 A3 兩部機組已於 2007~2008 年屆齡停機；目前另有 Bruce A 的兩部機組正在翻新中。



圖 4、Darlington 核能發電廠

依據加拿大自然資源部電力來源統計顯示，加拿大 67%電力來自於可再生能源(包含水力、風力及太陽能發電)，82%非溫室氣體排放源，也是世界第二大水力發電國家。2017 年加拿大總發電量約為 652 TWh (如圖 5 所示)，其中水力發電 393 TWh (60%) 占比最高，其次是核能發電 101 TWh (15%)，燃煤發電 60 TWh (9%)，天然氣/燃油/其他發電 (10%)，非水力之再生能源如風力、太陽能等發電約占 7%。

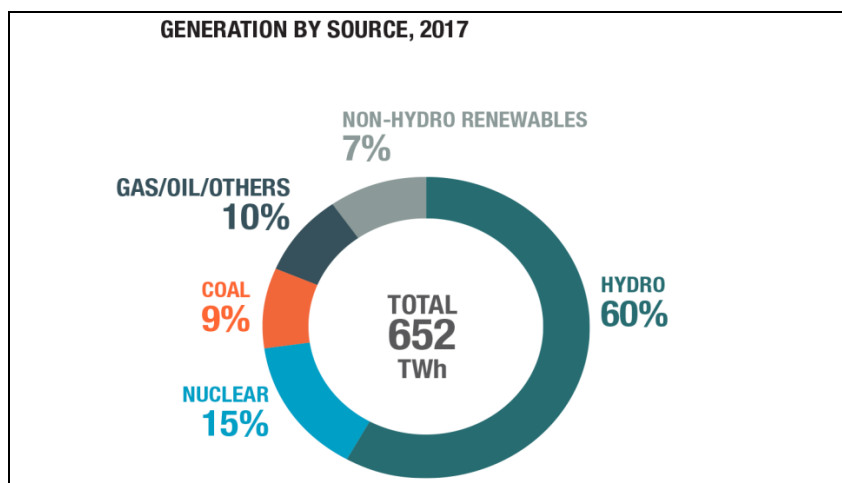


圖 5、2017 年加拿大電力來源占比

資料來源:

<https://www.nrcan.gc.ca/science-data/data-analysis/energy-data-analysis/energy-facts/electricity-facts/20068>

加拿大政府為減少發電所產生的溫室氣體排放，逐年增加天然氣(natural gas)使用，依據圖 6，國際能源總署(International Energy Agency, IEA) 2019 年統計，加拿大燃煤及燃油發電近年來逐漸下滑，風力、太陽能等非水力再生能源微幅增長，核能發電則是持平。

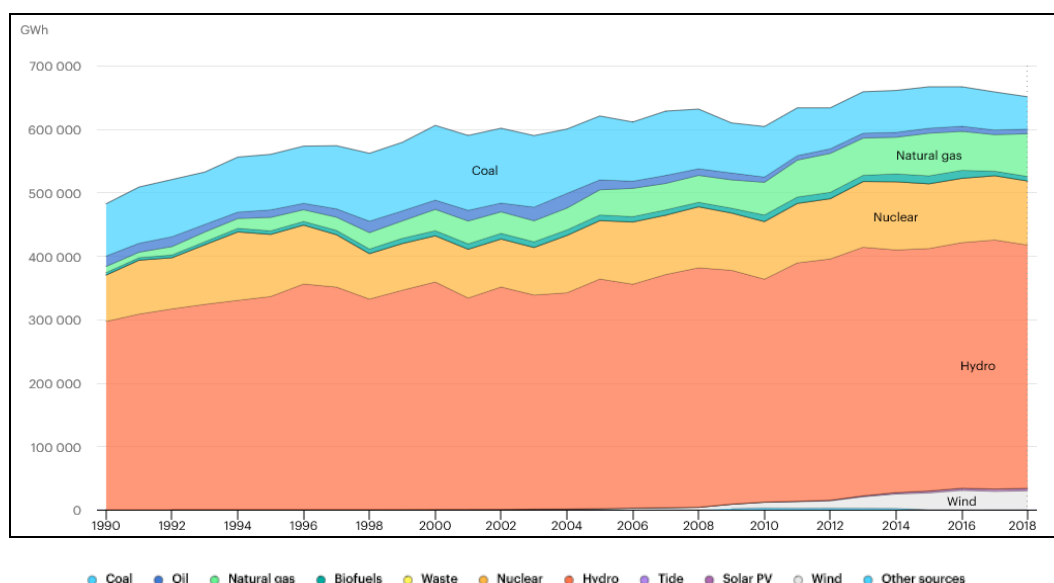


圖 6、1990-2018 年加拿大發電結構

資料來源: <https://www.iea.org/countries/canada#data-browser>

加拿大原子能公司(AECL)認為小型模組化反應器 (Small Modular Reactors, SMR) 在加拿大可成為安全、乾淨、取代煤炭、綠化採礦業(green mining)及解決偏遠社區和工廠之能源需求的解方。為維持 SMR 方面的國際領導地位並履行減碳等氣候變化承諾，加拿大自然資源部於 2018 年建立了 SMR 的路線圖 (Roadmap)。內容為：在加拿大境內適當的地點設置 SMR 示範；需要政府、公用事業、工業和國家實驗室技術的支持；建置初期應由政府、公用事業、工業透過適當的財務與資金機制分擔風險；立法並建立合宜的法規保障政府與合作夥伴等。2019 年 10 月加拿大核安會已經通過第一階段 ARC Nuclear Canada 的 ARC-100 小型模組化反應器的供應商設計審查。根據加拿大核協會(Canadian Nuclear Association, CNA)資料，加拿大開發的重水式反應器系統 (CANDU) 已出口到中國、印度、巴基斯坦、韓國、阿根廷和羅馬尼亞，全球現有 31 個 CANDU 反應器在運行。加拿大一直是核能研究與技術的領導者，對於醫學診斷和癌症治療的放射性同位素也是世界上最主要的供應國。

3. 核電民意趨勢

加拿大核協會委託加拿大民意調查與市場研究公司「Abacus Data」於 2019 年 2 月 8 日至 12 日進行了一項民意調查，旨在探討核能是否為減少碳排放的能源解方。調查對象為 2,500 名 18 歲以上的加拿大人，抽樣誤差範圍為正負 1.9 百分點。調查結果顯示 87% 的受訪者認同「減少使用化石燃料並增加再生能源和低碳能源的使用」是重要的，且在減少碳排放、可靠供電的前提下，86% 的受訪者對於 SMR 表達支持或開放的態度。調查亦指出只有 38% 的受訪者認知到核能是較燃油低碳的能源，認知程度遠低於太陽能、風能及水力發電，如圖 7 所示。

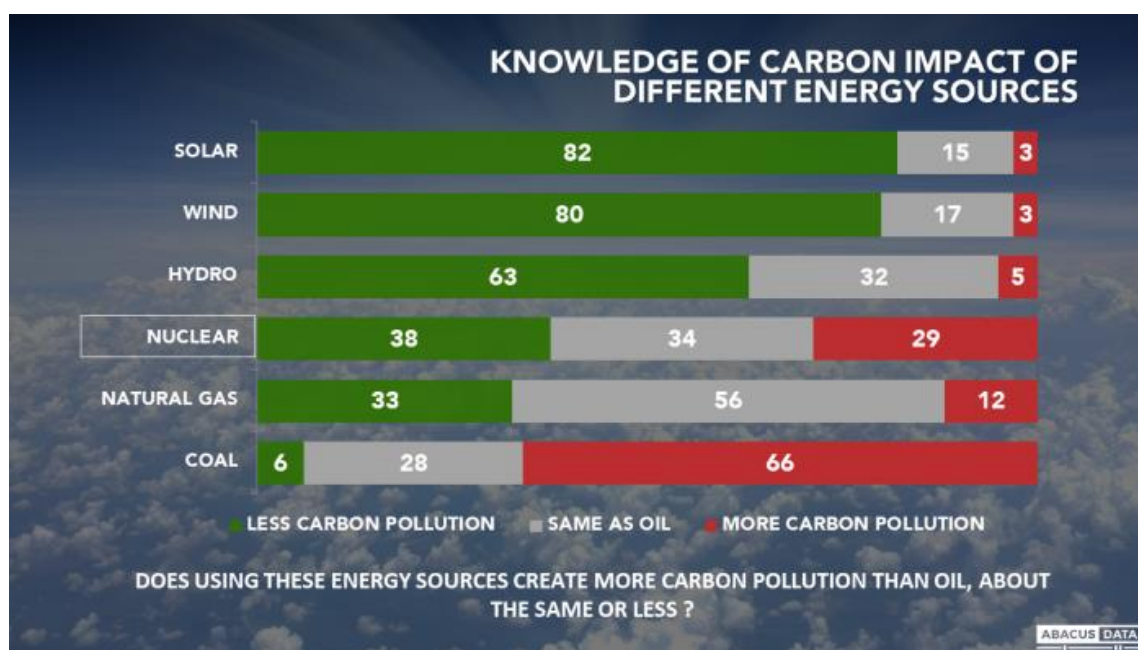


圖 7、受訪者對各種能源碳排和燃油比較的認知程度

資料來源: <https://abacusdata.ca/climate-change-worries-open-minds-to-modern-nuclear-technology/>

然而當受訪者得知核電的碳排放類似於太陽能、風能及水力發電時，對於核能作為高排碳燃料的替代能源，有 35% 的受訪者表達開放的態度，49% 的受訪者則表達支持，如圖 8 所示。本調查亦呈現受訪者支持 SMR 試運轉的理由，如圖 9 所示。本調查亦發現，有 82% 的受訪者認為，相較於核能，繼續使用化石燃料對地球的威脅更大；有 81% 的受訪者認為，因應氣候變遷，大眾需要對核電持開放的態度。

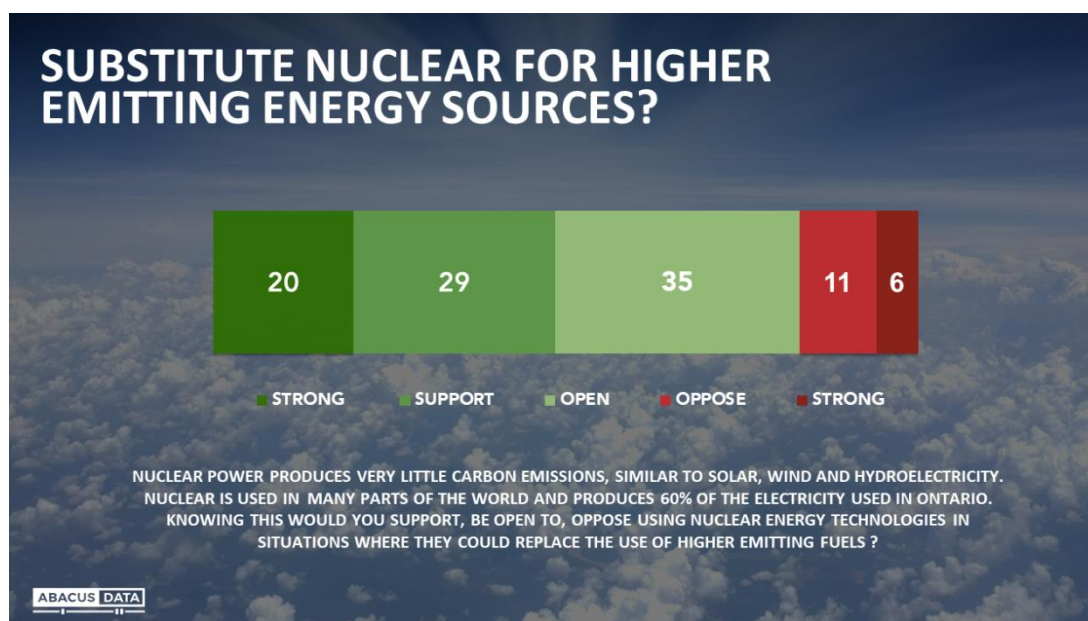


圖 8、受訪者對於核能作為高排碳燃料替代能源的認同程度

資料來源: <https://abacusdata.ca/climate-change-worries-open-minds-to-modern-nuclear-technology/>

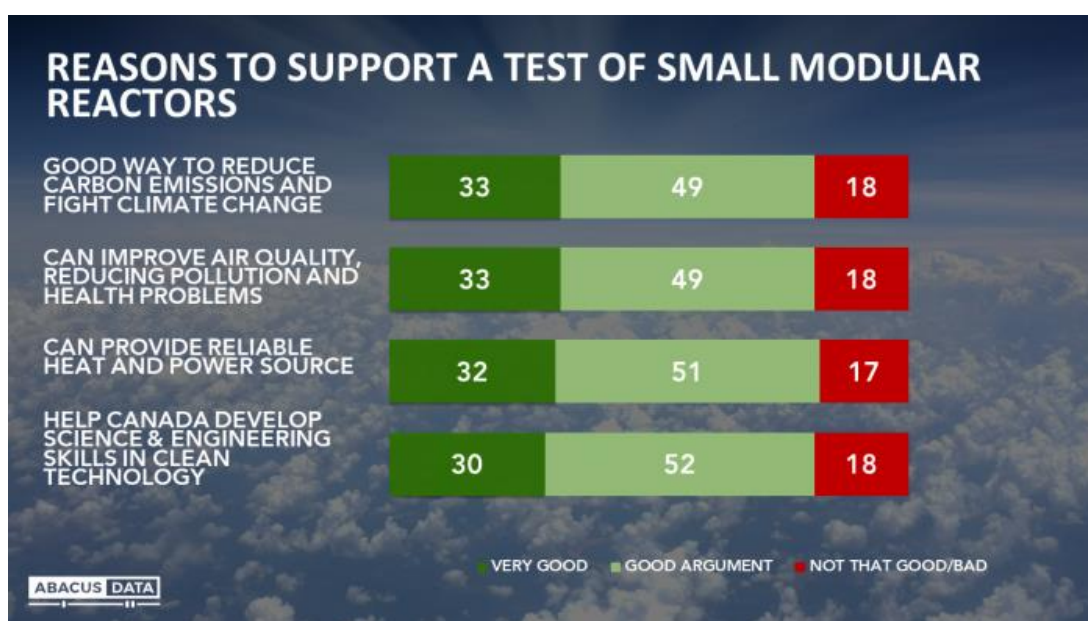


圖 9、受訪者支持 SMR 試運轉的理由

資料來源: <https://abacusdata.ca/climate-change-worries-open-minds-to-modern-nuclear-technology/>

此外，「加拿大地球之友」(Friends of the Earth Canada)委託加拿大民意調查研究公司「Oracle Poll Research」於2020年1月2日至12日代表進行了一項全國性的電話調查。「加拿大地球之友」為環保組織網絡「國際地球之友」(Friends of the Earth International, FOEI)的成員，長年致力於推動環境保護與永續發展教育、保護生物多樣性及減緩氣候變遷的活動。調查對象為2,094名18歲以上的加拿大人，抽樣誤差範圍為正負2.1百分點。訪談時，首先向受訪者說明安大略省(Ontario)，薩斯喀徹溫省(Saskatchewan)和新不倫瑞克省(New Brunswick)發展SMR計畫相關背景⁷——安大略省最近提撥2.37億加幣用以關閉758個再生能源專案、薩斯喀徹溫省拒絕允許更多的住戶安裝太陽能板，以及安大略省、薩斯喀徹溫省和新不倫瑞克省的省長最近宣布支持一項270億加幣的計畫，該計畫擬投入生產數百個以鈾為燃料的SMR，並進一步詢問「政府在能源生產及因應氣候變遷政策上，走的是正確或是錯誤的道路？」調查結果顯示，62%的受訪者認為政府走的是錯誤的道路，如圖10所示；次就年齡層而言，18至34歲受訪者認為錯誤的達70%，35至64歲受訪者認為錯誤的達65%，65歲以上受訪者認為錯誤的則有49%。調查結果亦指出，68%的受訪者擔心投注大量資金於SMR，可能導致延遲採用立即可行的再生能源技術。

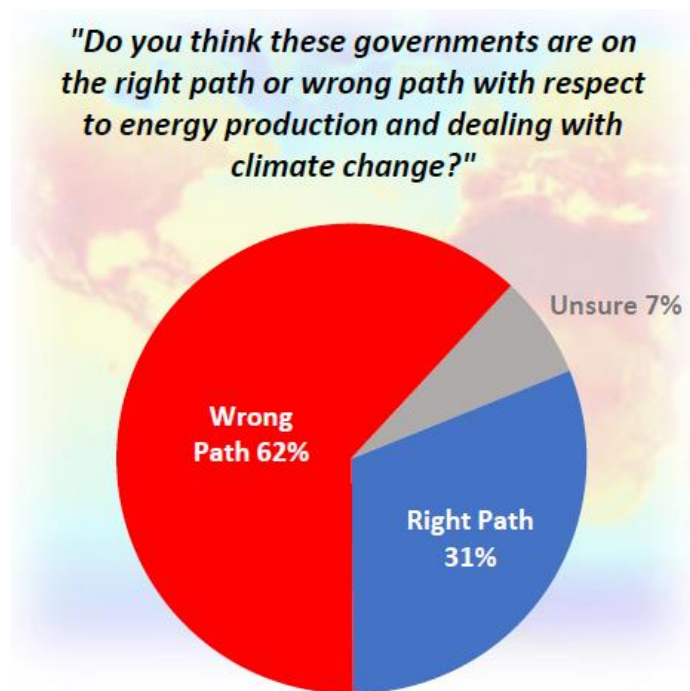


圖10、受訪者對SMR相關政策的認同程度

資料來源: <https://foecanada.org/2020/01/new-poll-finds-canadians-do-not-trust-nuclear-energy-and-reactors/>

⁷受訪者被告知的背景資訊原文如下：「Ontario has recently paid \$237 million to shut down 758 renewable energy projects, while Saskatchewan is refusing to allow any more homeowners to install solar panels. Recently, Ontario, Saskatchewan and the New Brunswick Premiers announced support for a \$27 billion plan to produce hundreds of uranium fueled Small Modular Nuclear Reactors.」更多調查結果可參考

https://foecanada.org/wp-content/uploads/2020/01/FOE-Omnibus-Report_Jan13.pdf

4. 結語

本篇簡析除說明加拿大之核能管制機構架構，以了解其運作體系外，並蒐集彙整加拿大的核電使用現況與民意趨勢供各界參考。近年加拿大政府持續發展及部署 SMR 計畫，而上述兩份民意調查均徵詢受訪者對於發展 SMR 計畫的看法。Abacus Data 的調查結果顯示在減少碳排放、可靠供電的前提下，民眾對發展 SMR 表達支持或開放的態度。另一方面，Oracle Poll Research 的調查結果指出有高比例的民眾，尤其是年輕族群並不支持政府以發展 SMR 作為氣候變遷對策，然而在問卷的設計上，提問者預先向受訪者告知：政府有哪些支持發展 SMR 計畫的作為？又有哪些看似凍結再生能源計畫的作為？無形中，受訪者的回答可能會受到提問者的引導。儘管如此，如何說服更多民眾認同發展 SMR 因應氣候變遷的策略，仍是加拿大政府在推動核能政策上尚待解決的議題。

(二) 歐盟核能管制架構、核電使用與民意趨勢

1. 核能管制架構

歐盟的核能管制架構除了依循國際組織如國際原子能總署(International Atomic Energy Agency, IAEA)與經濟合作暨發展組織(Organization for Economic Cooperation and Development, OECD)的核能署(Nuclear Energy Agency, NEA)的相關條約外，歐盟的主要管制單位為歐洲核能安全管制組織(European Nuclear Safety Regulators Group, ENSREG)為一獨立的專家顧問群，由於歐洲理事會(European Council)希望在歐盟建立一高階群組(high-level group)，以深化並促進歐盟在核能安全、核廢料管理、放射性廢棄物以及核電廠除役融資的共同方法，該提議亦獲歐洲議會支持，2007年在歐盟委員會(European Commission)的決議下所通過創設。ENSREG由歐盟各會員國的核能管制資深官員、放射性廢棄物安全、輻射防護管制機構等專家以及歐盟委員會代表所共同組成。該組織的目標是持續改善核安與放射性廢棄物的管理，並促進民眾對上述活動的理解；此外，對歐盟委員會與核能設施提供協助與顧問，同時協調各會員國核能管制單位之合作事宜。此外，歐洲理事會、IAEA、NEA、西歐核能管制協會(Western European Nuclear Regulators Association, WENRA)等組織在ENSREG也具有觀察員身分(observer status)，對歐盟的核能安全作出貢獻⁸。ENSREG下設3個工作小組，第1小組負責促進核能安全與國際合作；第2小組負責處理放射性廢棄物管理、核廢料與除役等事務；第3小組旨在促進資訊透明化。工作小組每年至少集會兩次，得視需要召開會議並回報ENSREG，ENSREG每三年向歐盟提交報告。此外，在核能安全與核廢棄物的管制上，歐盟主要藉由放射性廢棄物與用過核燃料指令(Radioactive Waste and Spent Fuel Directive, RWD)、核能安全指令(Nuclear Safety Directive, NSD)、基本安全標準指令(Basic Safety Standards Directive, BSSD)等三方面對歐盟全體會員國進行規範管制，以下分別針對各項管制指令進行說明。

首先，在放射性廢棄物與用過核燃料指令(RWD)方面，透過2011/70/EURATOM指令建立用過核燃料與放射性廢棄物的責任與安全管理，用以確保高標準的安全，避免對未來世代產生不當的負擔，並加強資訊透明。會員國有義務定期(至少每10年)針對國家計畫、管制單位、進行國際同儕審查(international peer reviews)以確保高安全標準，審查結果必須向歐盟委員會與其他會員國報告，會員國有義務適時將技術與科學上的進展、同儕審查的建議納入考量，並定期檢視更新各國的核廢料與放射性廢棄物國家計畫。該指令於2011年通過，會員國在2013年前必須完成立法並予以遵守。該指令重申會員國對於本身所產生的用過核燃料與放射性廢棄物負有最終責任，要求各會員國有義務針對如何管理放射性廢棄物與用過核燃料制定國家政策，會員

⁸ 相關資料可參考 <http://www.ensreg.eu/members-glance>

國必須進一步制定國家計畫，確保所需資源與透明度，具體將政策轉化為行動計畫，同時必須訂定相關法律規定，以及建立足以勝任且獨立的國家級管制組織。此外，會員國也被要求必須有義務對從事管理放射性廢棄物與用過核燃料的人員與民眾揭露必要資訊，並允許民眾依據國家法律與國際義務下，能夠有機會並有效地參與放射性廢棄物處理的決策過程。

在核能安全指令(NSD)方面，歐盟於 2009 年 6 月通過 2009/71/EURATOM 指令，建立核電廠安全標準的共同架構，以作為歐盟核能安全法規遵守的原則。所有會員國並應在 2011 年以前完成立法與行政規定以遵守該指令，並於 2014 年向歐盟委員會提交第一次施行報告。由於 2011 年發生福島事故，歐洲理事會要求歐盟委員會檢視既有的核電廠安全法規架構，並提出相關改善措施，2013 年在歐盟委員會的要求下，ENSREG 設立專門工作小組針對歐盟委員會提出的修正草案進行檢視，在納入福島事故與歐盟境內核電廠壓力測試(stress tests)的結果後該指令於 2014 年通過，各會員國必須於 2017 年前根據該指令完成國內立法，其中包含強化會員國之核能管制機構的權力與獨立性、提升工作場域的核能安全文化等規定。該指令導入高標準的全歐盟(high-level EU-wide)安全目標，以避免核能意外或降低其所帶來的後果。

在基本安全指令(BSSD)方面，先前歐盟以 96/29/EURATOM 指令為基礎，透過一系列的指令規範以確保游離輻射安全，來維護員工與一般大眾的健康。89/618/Euratom 指令管制公眾資訊，例如一般社會大眾在放射性事故中的保護措施；90/641/Euratom 指令管制戶外工作者，例如在具有氡氣(radon)的室內工作或從事核電廠建造的工人；97/43/Euratom 指令管制醫療曝露(medical exposure)如醫護人員、進行放射性診斷與醫療的病人以及 2003/122/Euratom 指令管制高活性密封放射源及不明射源(control of high-activity sealed radioactive sources and orphan sources)等活動。歐盟議會於 2013 年整合更新上述指令並通過新的基本安全指令，設定新的安全標準以保護曝露在放射性照射下所引起的危險，並加入從 2011 年福島事故所學習到的緊急預備(emergency preparedness)與反應(response)。歐盟會員國必須於 2018 年 2 月前強制立法管制，同時行政機構必須遵循該指令下的新安全標準，舊有指令並於同年廢除。

2. 歐盟核電使用現況

歐盟現有 27 個成員國(英國已於 2020 年脫歐)，運轉中的核電機組共有 108 座分屬其中 13 個成員國(比利時、保加利亞、捷克、德國、西班牙、法國、匈牙利、荷蘭、羅馬尼亞、斯洛維尼亞、斯洛伐克、芬蘭和瑞典)；其中擁有最多核電機組的國家是法國，共有 57 座。目前正在興建的核能機組有 4 座(斯洛伐克 2 座，法國、芬蘭各 1 座)，但都面臨成本預算大幅超支及工程延誤的困境。計劃在 2030 年前興建的有 8 座，提議建造的有 12 座。

根據 Agora Energiewende 網站資料顯示，2019 年歐盟四分之一的電力和高比率的基載電力是來自於核能發電，占比約為 25.5%，燃煤及燃油發電占比為 18.2%，天然氣為 21.7%，再生能源（風能、太陽能、生質能及水力）為 34.6%，如圖 1。

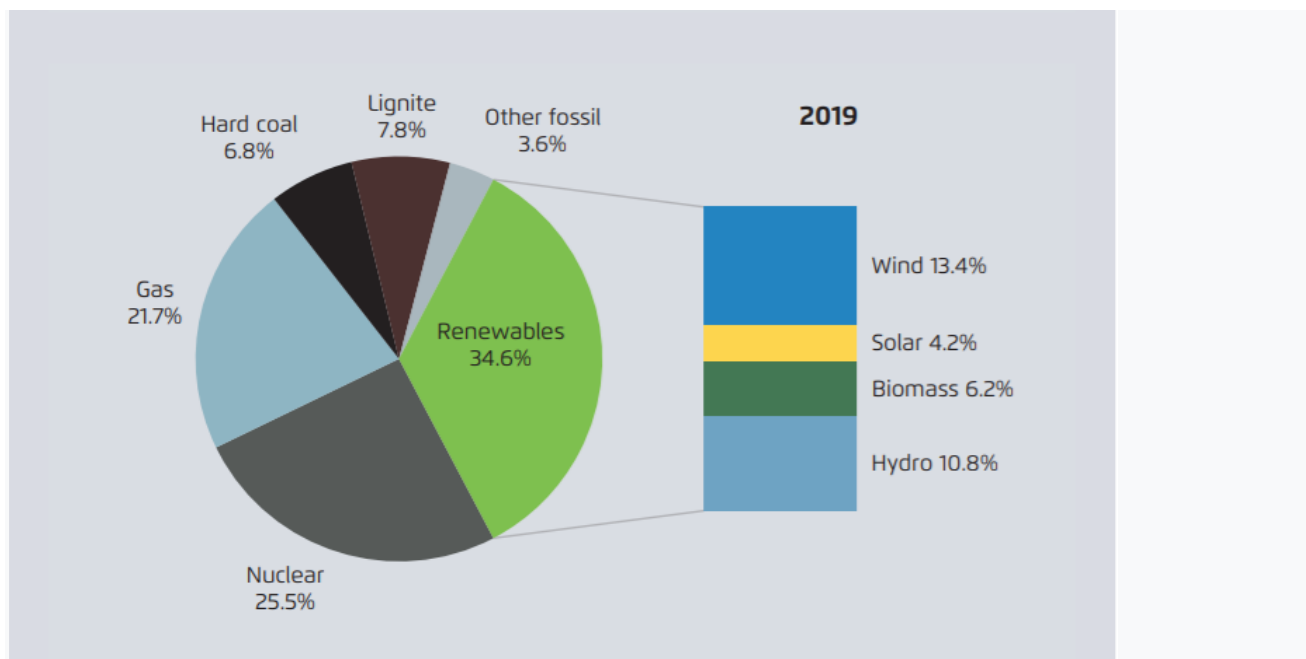


圖 1. 2019 年歐盟發電占比

資料來源: <https://www.agora-energiewende.de/en/publications/the-european-power-sector-in-2019/>

為應對氣候變遷，歐盟自 2005 年開始運作全球第一個，也是全球規模最大的溫室氣體排放交易系統(Emissions Trading System, ETS)，ETS 的目標是到 2030 年將歐洲的溫室氣體排放量減少到 1990 年標準的 40% 以下。為了達到 2030 年目標，歐盟針對電力部門有三大策略：1. 效率第一：綜合考量效率提升及電氣化(含綠電產氫等間接電氣化)，至 2030 年年均用電 $\leq 0.4\%$ ；2. 增加再生能源發電占比：至 2030 年時，歐洲再生能源發電將占總電力需求量之 57%，其中以風電(陸域風電為主)，占約 26%，太陽光電、生質能及水力發電則各約占 10%；3. 減少火力發電：燃煤發電從 26% 減至 8%。燃氣發電從 17% 減至 14%。為了保證繼續維持供電安全，風能，太陽能和其他低碳資源（如生質能、沼氣、水力發電、核電、需量反應、儲能及互聯）需要用來填補火力發電減少所導致的差距。而核電則從 27% 減至 22%，再加上大幅增加再生能源，使得電力部門可減碳 53%。比較近十年（2010~2019）歐盟電力來源，核能發電 2010 年仍有 917TWh，到 2019 年則降為 821TWh。如圖 2，自 2013 年起再生能源發電已超越核能、燃煤、燃油、燃氣各項發電來源，並呈現逐年穩定增長的趨勢。

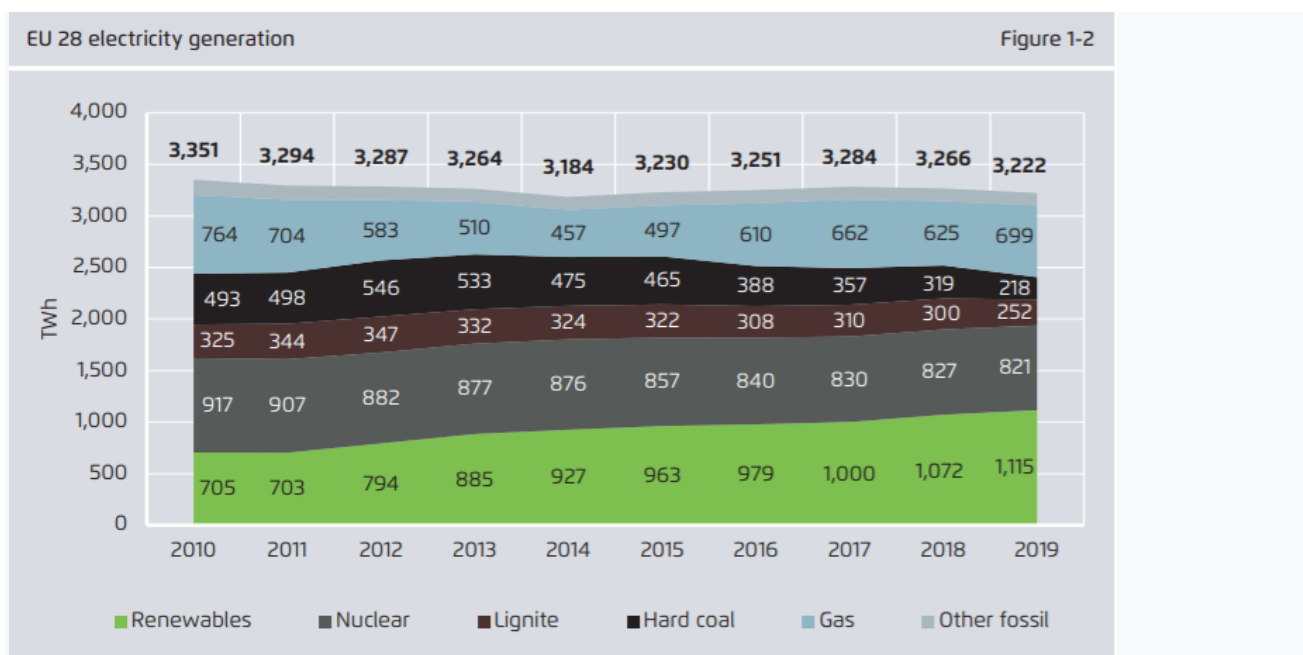


圖 2. 2010~2019 年歐盟電力結構

資料來源: <https://www.agora-energiawende.de/en/publications/the-european-power-sector-in-2019/>

依據世界核能協會網站資料顯示，整個歐洲大陸甚至歐盟內部有著非常不同的能源政策，由於歐盟各國之間存在大量的電力交易，任何國家的能源政策都會對鄰國產生重大影響。近十年德國減少核能發電的比率最高，減少約 50% 的核能發電量，德國的輿論仍然廣泛反對核電，幾乎不支持建造新的核電機組，德國 40% 的電力是來自於煤炭尤其是褐煤（lignite）。此外較支持核能發電的匈牙利有 4 部核能機組其使用壽命原至 2012-2017 年，匈牙利原子能管理局已批准延長 4 部機組的使用壽命至 2032-2037 年；並於 2014 年獲歐盟批准建造 2 部 1.2GW 核能機組，預定於 2025/2026 年開始運營。基於能源安全政策，法國 75% 的電力來自於核能，擁有 57 座核能機組總容量為 62.3 GWe，其核能發電占比全世界最高。歐盟一半的核電都由法國生產，在過去的十年中，法國每年淨出口量達 70 TWh 的核電。2017 年主要出口到西班牙，義大利，英國，瑞士和德國。法國是世界上最大的電力淨出口國，由於發電成本非常低，每年從中獲利超過 30 億歐元。近十年歐盟各國核能發電如圖 3 所示。

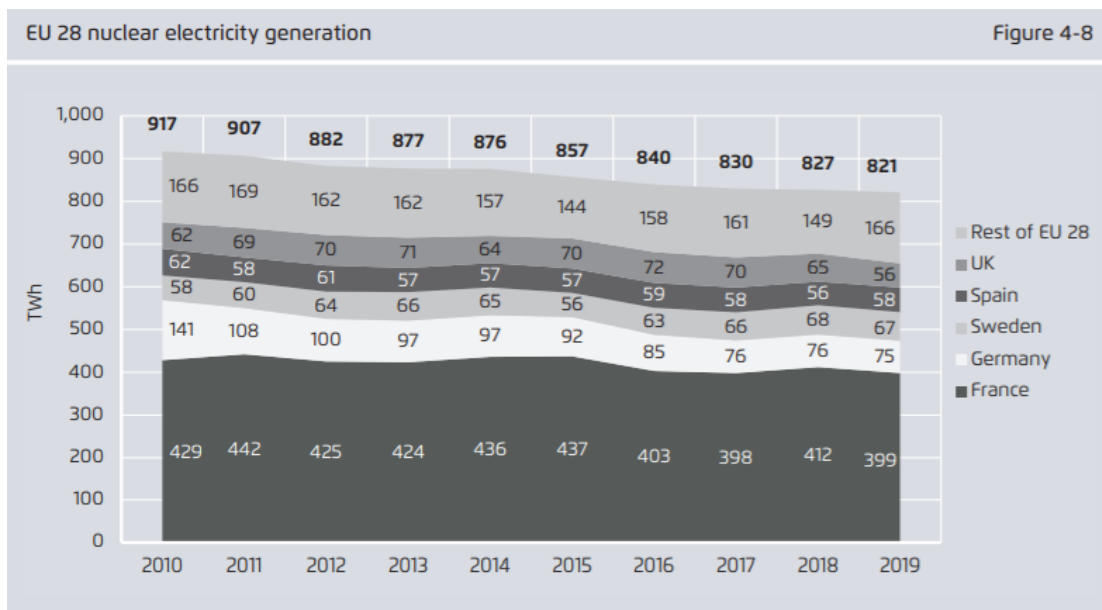


圖 3. 2010~2019 年歐盟各國核能發電

資料來源：

https://www.agora-energiawende.de/fileadmin2/Projekte/2019/Jahresauswertung_EU_2019/172_A-EW_EU-Annual-Report-2019_Web.pdf

歐盟是世界上最大的能源進口國，55%的能源仰賴進口，每年花費約 3000-3500 億歐元。在能源效率和能源安全的考量下設立了歐洲能源聯盟，預計在 2020-2030 年期間每年需要投資約 3790 億歐元（約 4000 億美元），用以改善目前再生能源發電設備老舊、能源相關基礎設施老化造成能源效率低落，以及補貼政策無法反應歐洲真實電價等困境。為此，能源聯盟設定五個優先達成的目標：1. 增強能源供應的安全性；2. 建立單一的綜合能源市場；3. 提高能源效率；4. 去碳經濟（decarbonise the economy）；5. 促進研究和創新。根據世界核能協會有關歐盟的資料顯示，歐盟的能源政策需建立在可持續性，競爭力和供應安全的三大支柱之上，而核能發電是具有競爭性，可靠和基載電力的能源。如果沒有核能發電，歐盟到 2050 年減碳 80% 以上的目標是無法實現的。然而儘管核電是公認的低碳、可調度的電力來源，且具有高度的能源安全性，並提供了歐盟一半的無碳電力，但如今核能領域仍面臨歐盟內部的重大挑戰。一些成員國強烈反對核電，預計到 2030 年，將關閉多個反應器（無論是否達到壽年，還是由於政治干預）而導致的核電裝置容量減少將超過新建的核電裝置容量。因此，預計短期內的歐盟核能發電將會略有下降⁹。

⁹英國於 2020 年脫歐，本次計算歐盟成員國不計入英國，因此 2020 年之前之統計資料及圖表，均包含英國相關統計資料。

3. 核電民意趨勢

歐盟委員會能源總署(Directorate-General for Energy)委託 Kantar network 市場研究集團，依據歐盟委員會傳播署(Directorate-General for Communication)所實行的標準「歐洲晴雨表」調查法(Eurobarometer)，以「歐洲人對於歐洲能源政策的看法」為主題，於 2019 年 5 月 9 日至 25 日間，針對歐盟 28 個會員國¹⁰的民眾進行面訪調查，受訪者 27,438 人。調查首先徵詢：「什麼樣的歐盟能源政策是你所重視的？」有 41%的受訪者回答「從化石燃料轉換到再生能源，以對抗氣候變遷」，比例最高；其次，有 28%回答「減少全歐洲的能源消費」，有 27%回答「為消費者提供更具競爭力的價格」，另有 18%回答「確保核能是安全、可靠的」，如圖 4 所示。

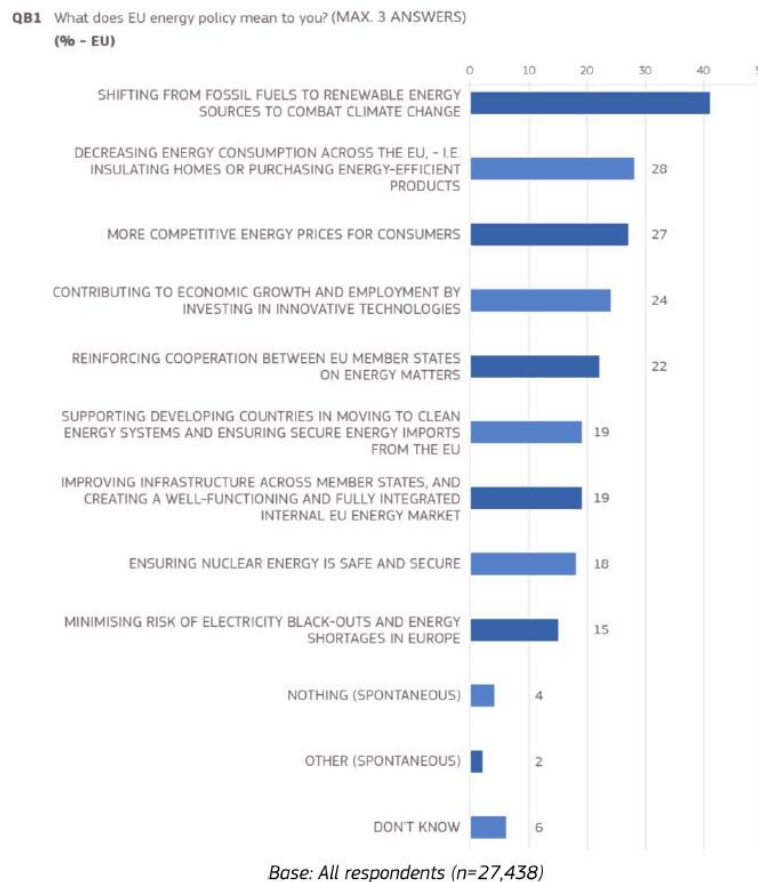


圖 4. 受訪者所重視的歐盟能源政策議題(歐盟整體)

資料來源: Special Eurobarometer Report 492: Europeans' attitudes on EU energy policy (Summary)

¹⁰受訪國家名稱(代號)：比利時/Belgium (BE)、保加利亞/ Bulgaria (BG)、捷克/Czechia(CZ)、丹麥/ Denmark (DK)、德國/Germany(DE)、愛沙尼亞/Estonia(EE)、愛爾蘭/Ireland(IE)、希臘/Greece(EL)、西班牙/Spain(ES)、法國/France(FR)、克羅埃西亞/Croatia(HR)、義大利/Italy (IT)、賽普勒斯/Republic of Cyprus(CY)、拉脫維亞/Latvia(LV)、立陶宛/Lithuania (LT)、盧森堡/Luxembourg(LU)、匈牙利/Hungary(HU)、馬爾他/Malta(MT)、荷蘭/The Netherlands(NL)、奧地利/Austria(AT)、波蘭/Poland(PL)、葡萄牙/Portugal(PT)、羅馬尼亞/Romania(RO)、斯洛維尼亞/Slovenia(SI)、斯洛伐克 Slovakia (SK)、芬蘭/Finland(FI)、瑞典/Sweden(SE)、英國/United Kingdom(UK)。調查進行當時，英國尚未脫歐。

再從國家別來看，在 28 個歐盟國家中，有 17 個國家，回答比例最高的選項均是「從化石燃料轉換到再生能源，以對抗氣候變遷」，包含瑞典(62%)、荷蘭(61%)、芬蘭(60%)、德國(54%)、丹麥(52%)、葡萄牙(48%)、西班牙(45%)、奧地利(43%)、比利時(42%)、盧森堡(42%)、歐盟28(41%)、愛爾蘭(41%)、法國(41%)、斯洛伐克(40%)、義大利(37%)、匈牙利(36%)、捷克(35%)、英國(33%)、波蘭(31%)、希臘(51%)、塞浦路斯(48%)、保加利亞(43%)、馬爾他(39%)、立陶宛(37%)、烏克蘭(37%)、羅馬尼亞(35%)、拉脫維亞(33%)、斯洛文尼亞(36%)、捷克(33%)。

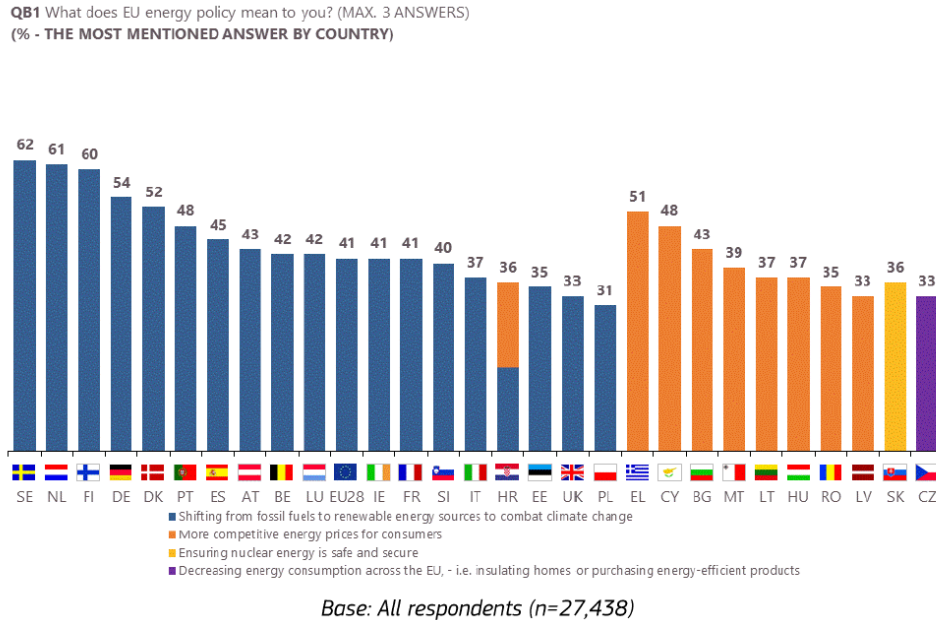


圖 5. 受訪者所重視的歐盟能源政策議題(依國家別)

資料來源: Special Eurobarometer Report 492: Europeans' attitudes on EU energy policy (Summary)

本調查亦徵詢受訪者：「為了確保能源安全，何者必要？」，根據調查結果，對於「確保歐洲的核能是安全且可靠的」此一選項，有 55%的受訪者回答完全同意，30%回答同意，如圖 6 所示。

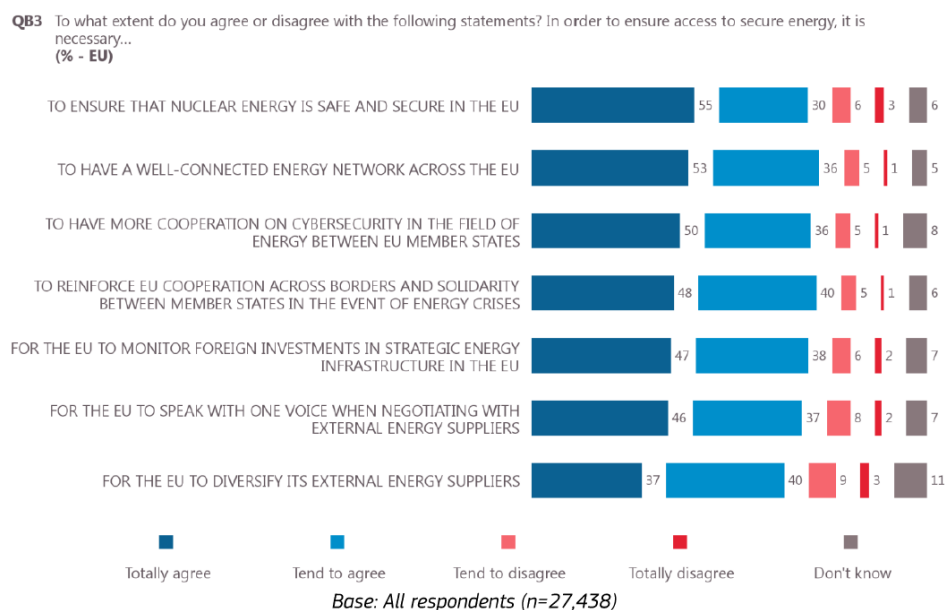


圖 6. 受訪者對於確保能源安全應有措施的看法(歐盟整體)

資料來源: Special Eurobarometer Report 492: Europeans' attitudes on EU energy policy (Summary)

再從國家別來看，關於「確保歐洲的核能是安全且可靠的」此一選項，立陶宛有 98% 的受訪者傾向同意；在其他 12 個國家中，亦有 9 成以上傾向同意；羅馬尼亞、丹麥、荷蘭、德國等國傾向同意的比例亦達 7 成以上，如圖 7 所示。

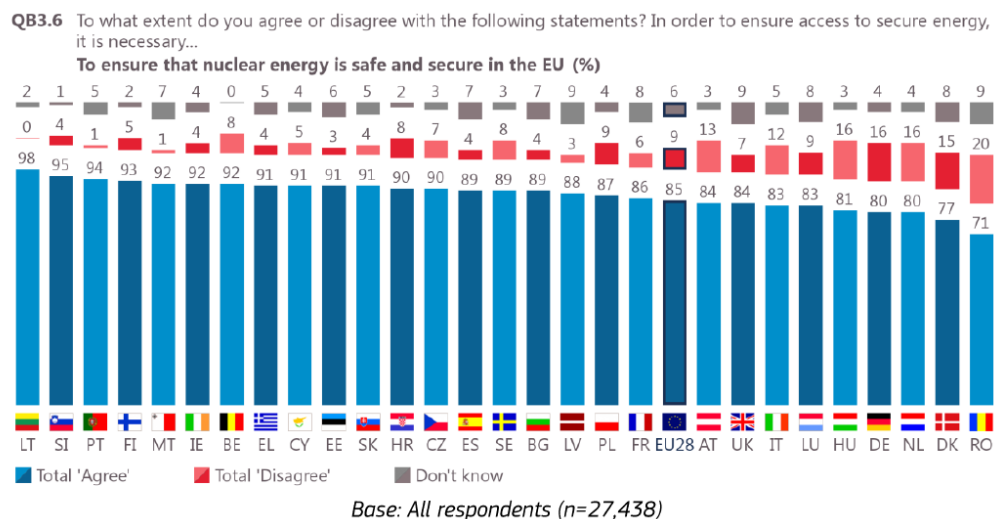


圖 7. 受訪者對於確保歐洲核能安全的看法(依國家別)

資料來源: Special Eurobarometer Report 492: Europeans' attitudes on EU energy policy (Summary)

在「確保歐盟取得潔淨能源」的議題方面，本調查徵詢受訪者：「歐盟的責任為何？」關於「鼓勵對再生能源，例如風能、太陽能挹注更多投資」此一選項，有 60% 的受訪者回答完全同意，30% 回答同意，如圖 8 所示。

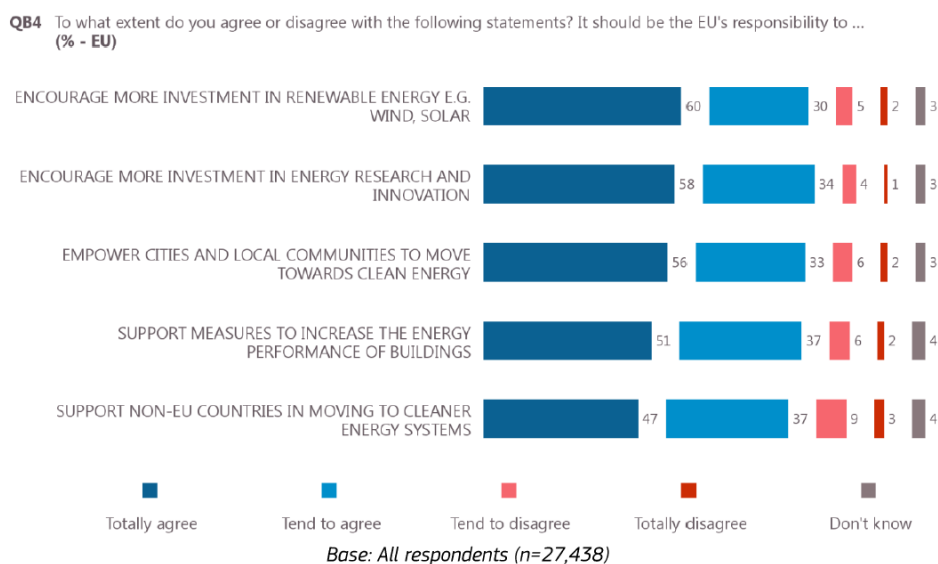


圖 8. 受訪者對於確保歐盟取得潔淨能源的相關看法(歐盟整體)

資料來源: Special Eurobarometer Report 492: Europeans' attitudes on EU energy policy (Summary)

再從國家別來看，關於「鼓勵對再生能源，例如風能、太陽能給予更多投資」此一選項，葡萄牙及西班牙各有高達 98% 的受訪者傾向同意，羅馬尼亞(77%)、捷克(82%)等國的受訪者傾向同意的比例亦達 7 成 5 以上，如圖 9 所示。

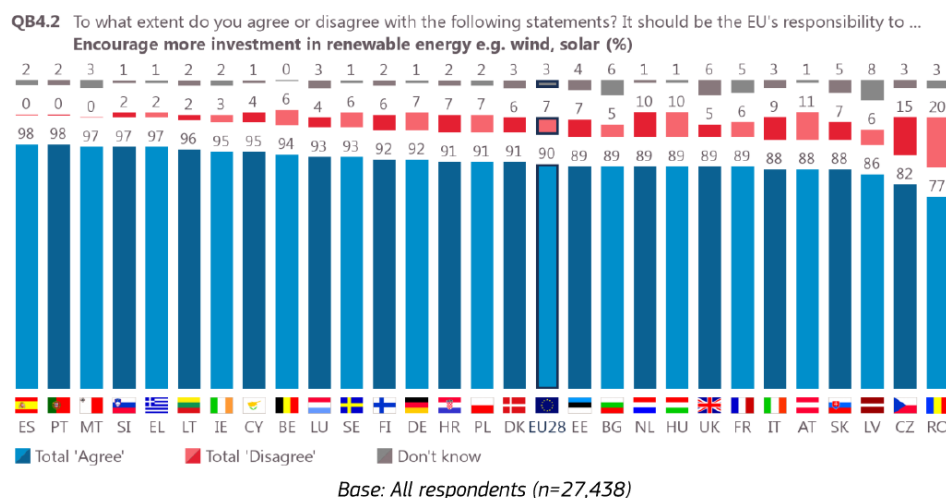


圖 9. 受訪者對於鼓勵對再生能源挹注更多投資的支持度(依國家別)

資料來源: Special Eurobarometer Report 492: Europeans' attitudes on EU energy policy (Summary)

此外，歐洲社會調查(The European Social Survey，簡稱 ESS)¹¹於 2018 年 9 月公布了一份民意調查報告，標題為「European Attitudes to Climate Change and Energy: Topline Results from Round 8 of the European Social Survey」。ESS 於 2016 年 8 月至 2017 年 12 月間實施了第 8 回合調查，共收集了來自歐洲 23 個國家(包含非歐盟國家俄羅斯及以色列)的 44,387 名受訪者資料。調查首先詢問各國受訪者幾個氣候變遷相關議題，多數受訪者同意氣候可能或確實在變化，且認為氣候變遷將產生不好的影響，如表 1 所示。

¹¹ 跨國學術調查 ESS 成立於 2001 年，總部設於倫敦大學城市學院，於 2013 年被授予歐洲研究基礎設施聯盟(European Research Infrastructure Consortium, ERIC)地位(ERIC 為歐盟委員會核准設立的法律實體)。ESS 調查對象遍及 30 多個歐洲國家，自 2002 年起至 2018 年，共進行了 9 回合的調查，議題包含媒體與社會信任，政治、經濟、社會福利等，第 8 回合調查則首度針對氣候變遷、能源安全與能源偏好等議題，徵詢歐洲民眾的看法。

Table 1: Beliefs in the reality, causes and impacts of climate change

COUNTRY	COUNTRY CODE	CLIMATE IS PROBABLY OR DEFINITELY CHANGING (%)	CLIMATE CHANGE AT LEAST PARTLY CAUSED BY HUMAN ACTIVITY (%)	CLIMATE CHANGE IMPACTS WILL BE BAD (%)
Austria	AT	92.5	91.8	74.0
Belgium	BE	96.4	94.0	66.3
Czech Republic	CZ	88.9	89.5	68.0
Estonia	EE	91.3	88.8	59.7
Finland	FI	94.0	93.9	67.2
France	FR	96.3	93.8	73.7
Germany	DE	95.4	94.8	77.4
Hungary	HU	91.4	92.7	77.0
Iceland	IS	97.7	94.6	81.6
Ireland	IE	96.1	91.1	63.2
Israel	IL	86.3	85.4	58.1
Italy	IT	94.8	93.6	69.0
Lithuania	LT	88.7	82.7	73.7
Netherlands	NL	96.2	91.8	61.6
Norway	NO	92.9	87.8	71.9
Poland	PL	92.6	89.6	70.4
Portugal	PT	97.0	93.6	81.1
Russia	RU	82.2	83.8	61.8
Slovenia	SI	96.5	93.0	71.4
Spain	ES	95.8	95.7	87.9
Sweden	SE	96.8	92.4	81.2
Switzerland	CH	96.4	94.4	74.0
United Kingdom	GB	93.6	91.0	66.0

表 1. 受訪者對於氣候變遷議題的看法(依國家別)

資料來源: https://www.europeansocialsurvey.org/docs/findings/ESS8_toplines_issue_9_climatechange.pdf

ESS 調查亦徵詢受訪者「對於補助再生能源的偏好程度」，約有 7 成 5 的比例表示有些支持或強烈支持，僅有約 1 成表示有些反對或強烈反對，如圖 10 所示。

Figure 5: Preferences to subsidise renewable energy in EU/EFTA countries

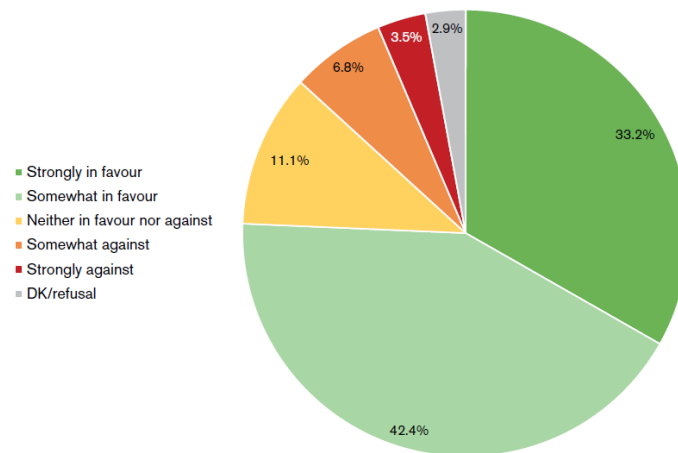


圖 10. 受訪者對於補助再生能源的偏好程度(歐盟整體)

資料來源:

https://www.europeansocialsurvey.org/docs/findings/ESS8_toplines_issue_9_climatechange.pdf

ESS 於 2018 年 11 月公布了另一份歐洲民意調查分析報告，標題為「Public Perceptions on Climate Change and Energy in Europe and Russia: Evidence from Round 8 of the European Social Survey」，同樣引用前述第 8 回合調查的統計數據。依據調查結果，整體而言受訪者相當擔憂所屬國家依賴化石燃料的問題，在葡萄牙、芬蘭、西班牙及法國等國，超過 80% 表示有些、非常或極度擔憂所屬國家依賴化石燃料的問題，在德國、比利時、斯洛維尼亞、英國等國，亦有超過 7 成 5 的比例，冰島的比例則相對低，約僅占 29%，如圖 11 所示。

Figure 3. Concern over dependence on fossil fuels (%)

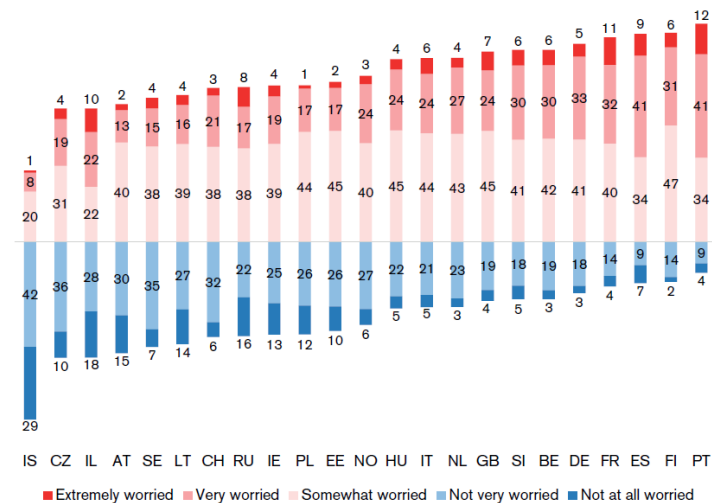


圖 11. 受訪者對於依賴化石燃料問題的相關看法(依國家別)

資料來源: https://www.europeansocialsurvey.org/docs/findings/ESS8_pawcer_climate_change.pdf

ESS 調查亦徵詢民眾對於大量或非常大量電力來源的偏好，如表 2 所示，整體而言支持太陽能的比率最高，達 78%，其次為風能 72%、水力 69%、生質能 45%，天然氣 31%、核能 19%、燃煤 13%，顯然核能較不受青睞，燃煤則是偏好最低的選項。同意以核能為主要電力來源的支持度在各國間呈現顯著差異，支持度較高者有捷克為 48%，匈牙利為 35%，立陶宛為 32%。燃煤是所有能源選項中支持度最低的，在瑞士、芬蘭、冰島、荷蘭、挪威、瑞典這些國家，僅有 2%以下的受訪者表示支持，相較之下支持率略高者為波蘭 28%、匈牙利 22%。對於天然氣的支持度較高者，有波蘭為 45%，立陶宛為 38%。

Table 1. Percentage of citizens who think a large or very large amount of electricity in their country should be generated from various energy source

	Coal	Gas	Nuclear	Hydro	Solar	Wind	Biomass
AT	7	16	5	86	89	83	57
BE	4	25	11	67	84	86	47
CH	2	20	9	82	86	69	51
CZ	11	24	48	57	52	48	36
DE	5	18	3	72	87	76	38
EE	7	16	9	43	61	63	42
ES	11	22	9	78	94	93	62
FI	2	15	19	36	61	53	63
FR	5	27	16	74	83	73	58
GB	9	27	17	75	76	72	42
HU	22	31	35	70	93	86	70
IE	6	28	9	77	77	79	42
IL	25	65	28	58	78	67	41
IS	1	5	1	80	61	77	36
IT	9	33	12	70	89	81	57
LT	8	38	32	64	64	73	61
NL	2	8	6	73	90	83	51
NO	2	18	4	88	67	66	36
PL	28	45	23	77	87	82	53
PT	10	24	8	78	92	91	40
RU	28	50	38	57	53	49	26
SE	1	17	18	68	80	71	52
SI	10	23	17	61	88	83	54
Full data	13	31	19	69	78	72	45

表 2. 受訪者對於不同能源供應來源的偏好(依國家別)

資料來源: https://www.europeansocialsurvey.org/docs/findings/ESS8_pawcer_climate_change.pdf

4. 結語

歐盟的核能管制架構是基於國際組織如 IAEA、NEA 等國際條約與歐洲原子能條約 (Euratom Treaty)，以法案(actions)與指令的形式，對其會員國要求完成之目標具有拘束力，但其完成的形式和方法之選擇則由各會員國決定，歐盟所訂定的各項指令仍需要各會員國政府將其轉換成為國內法，才能直接在該國進行管制並發生法律效力。此外，從歐盟委員會實施的調查結果來看，歐洲受訪者重視從化石燃料轉換成潔淨能源來源，而為了確保獲得潔淨能源，大多數受訪者贊成對風能、太陽能等再生能源挹注更多投資，並可察知核能安全是歐洲民眾關注的焦點之一。其次，從 ESS 的調查分析報告來看，整體而言太陽能、風能以及水力發電較受歡迎，之後依序為天然氣、核能及燃煤；對於發電來源的選擇，受訪國家間有明顯差異，例如燃煤在波蘭和匈牙利的支持度相對略高，天然氣在波蘭和立陶宛的支持度相對略高，核能在捷克、匈牙利和立陶宛的支持度相對略高，水力發電在芬蘭及愛沙尼亞的支持度相對略低；進一步比較核能與燃煤的整體支持率，核能為 19%，高於燃煤的 13%，這可能意味著民眾對於氣候變遷及依賴化石燃料的擔憂，也反映在能源偏好的選擇上；各國民眾對於能源來源偏好的差異，可能也反映出受訪國家的能源供應優劣勢，惟要了解國與國間的差異背景，以及社會、經濟因素如何形塑大眾對於能源選擇的見解，仍待進一步考察。

(三) 美國核能管制架構、核電使用與民意趨勢

1. 核能管制架構

美國的核能管制機構為核能管制委員會(Nuclear Regulatory Commission, NRC；以下簡稱核管會)，核管會係由美國國會於 1974 年所創設的獨立機關，該組織成立的任務係以確保民生用途放射性物質的使用安全並保護人民與環境。同時，核管會亦管制核電廠的商轉與其他核物質的用途，例如核醫藥物、發照、監管以及相關規範的執行等。核管會主要由五位委員組成的委員會(The Commission) 所領導，委員由總統提名並經由參議院通過，任期為五年，其中一位委員由總統指定為主席並擔任核管會的官方發言人。核管會委員會採合議制形成政策，以管制核子反應器與核物質的安全，並可向持照人發出命令與裁決法律事務(adjudicates legal matters)等；以下再設置委員會(Committees and Boards)、委員會職員辦公室(Commission Staff Offices)、運轉執行主任辦公室(Office of the Executive Director for Operations, EDO Offices)、視察長辦公室(Office of the Inspector General)所組成，其中委員會包含反應器保防、同位素醫療用途兩個顧問諮詢委員會及原子能安全及發照小組；委員會職員辦公室包含上訴裁決、國會事務、總法律顧問、國際計畫、秘書及財務等辦公室；而運轉執行主任辦公室則包含核物料安全與保防、核反應器管制、管制研究、調查、核安與事故應變等辦公室；視查長辦公室主要提供審計與調查的設計指引以促進核管會的效率及有效性等。¹²

核管會的願景為展示優良的管制原則，這些原則包含獨立(independence)、開放(openness)、效率(efficiency)、透明(clarity)、信賴(reliability) 等原則，並透過有效、務實及即時性的管制行動來執行上述原則，以達到組織目標。圖 1 呈現核管會的整體管制架構與流程，主要可分為(1)管制與指導、(2)核發執照、除役與認證、(3)監督、(4)營運經驗以及(5)決策支援等 5 個部分，以下針對個別項目分別說明。¹³

¹² 各辦公室主要業務職掌可參考 <https://www.nrc.gov/about-nrc/organization.html>

¹³ 相關資訊可參考 <https://www.nrc.gov/about-nrc/regulatory.html>

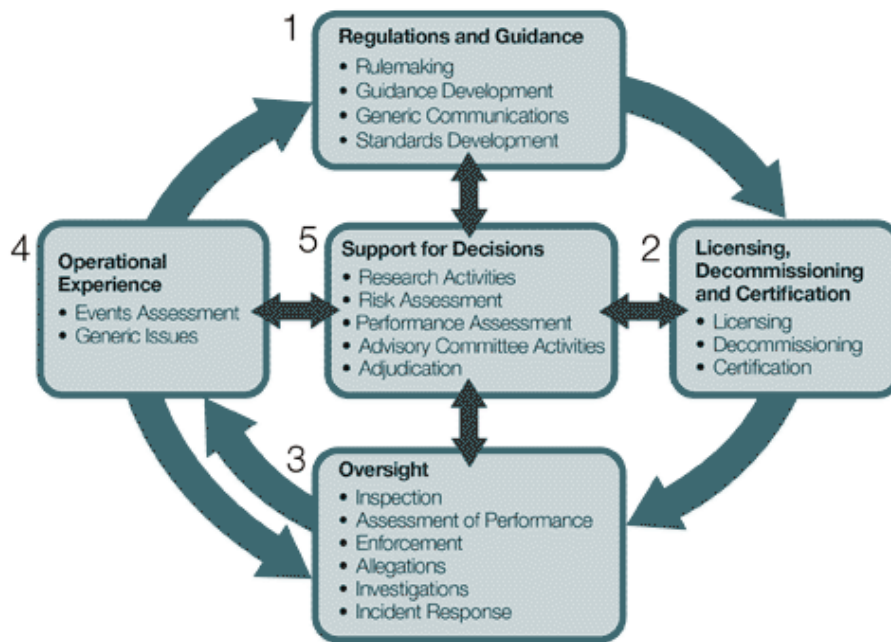


圖 1. 核管會管制架構

首先，在(1)管制與指導方面，包含制定持照者必須遵守的法規，以維持執照的繼續持有或能夠使用核物質、核設施等；修訂相關指導文件與標準，例如核管會的檢查手冊以協助持照者符合安全規範；與工業標準組織(industry standards organizations)合作，針對用於核子設施的系統、設備、材料制定具有共識的標準，並可作為核管會制定相關規定的參考。(2)核發執照、除役與認證，核發執照包含授權以運輸核物質或營運核設施等；除役係指安全地移除到達使用年限的核設施，並降低殘餘的放射性以符合終止執照的許可；認證則包含授權申請人製造貯存用過核子燃料的燃料桶，核物質的運輸包裝及密封等項目(3)監督，涵蓋檢查持照者的作業安全並符合核管會的規範、對營運中設施的性能評估、違反核管會管制的執法、對於持照者瀆職的調查；同時肩負災害應變能力，例如維持核管會總部營運中心與區域事故應變中心對於事故發生時的協調、監督及資訊掌握等能力以確保核設施的安全。(4)營運經驗，採取事件評估法(Events Assessment)，透過日常的審核檢視以及長期趨勢分析來決定相對應且適當的監管方式；針對超過一項設備以上的共同安全問題，則透過識別與解決的程序以維護安全。最後，(5)決策支援部分，主要是由研究活動、風險評估、性能評估以及顧問活動所組成。研究活動包含實驗、技術研發、分析以協助核管會於潛在相關技術議題能做出務實的安全決策；風險評估係採取風險分析的方法以支持管制過程的決策；性能評估主要是針對用過核子燃料與除役，衡量潛在輻射釋放到環境或評估除役後核設施的輻射劑量是否符合規定。顧問活動指審閱並評估由核管會委員會所特許的獨立顧問公司所提供的管制計畫。

2. 美國核電現況

截至 2020 年 9 月，美國擁有 95 座正在運轉中的核能發電機組，是世界最大的核電生產國，法國有 56 座，中國第三有 48 座。美國預計到 2020 年之後將會有另外兩部新機組（Vogtle 3 & Vogtle 4）加入商業運轉。美國的核能發電在 2019 年產生 809 TWh 的電能，約占總電力供給的 19.7%；占全球核能發電量的 30% 以上。

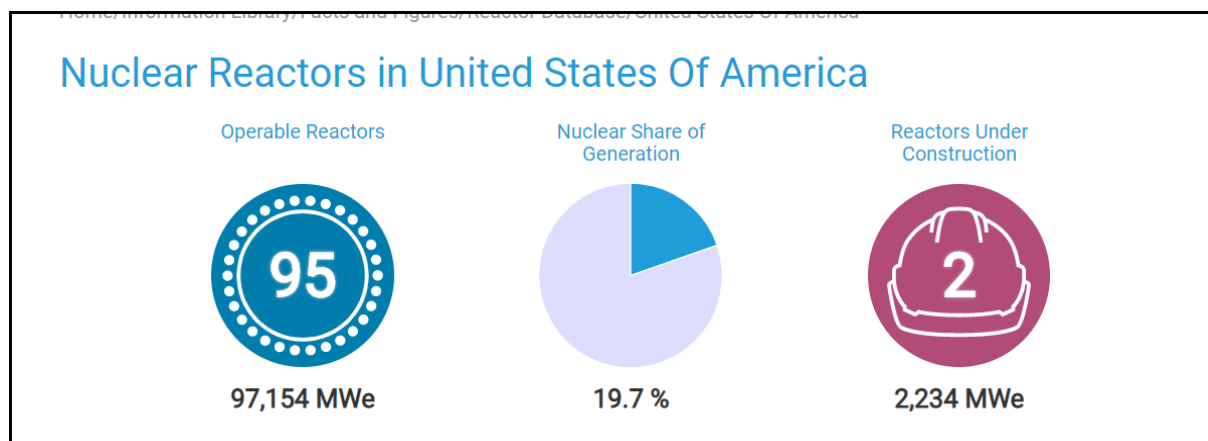


圖 2、2020 年美國核能發電統計

資料來源：<https://www.world-nuclear.org/country/default.aspx/United%20States%20Of%20America>

2018 年美國的總發電量為 4178 TWh，其中天然氣 1468 TWh (35%)，煤電 1146 TWh (27%)，核電 807 TWh (19%)，水力發電 292 TWh (7.4%)，風能 275 TWh (6.6%)，太陽能 67 TWh (1.6%)，生質能 63 TWh 以及地熱和其他來源 60 TWh 共 3.4%（美國能源資訊管理局 EIA）。

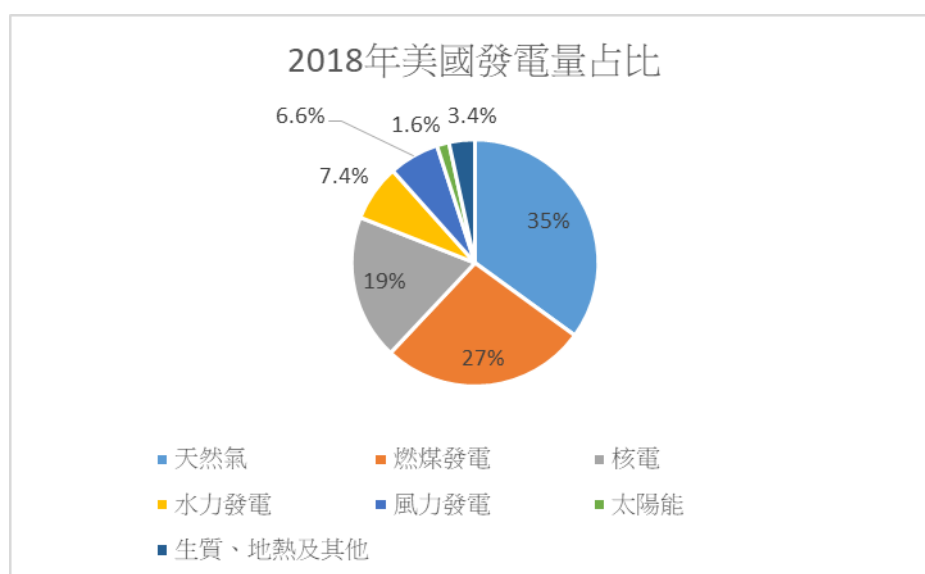


圖 3、2018 年美國發電量占比

資料來源：<https://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-t-z/usa-nuclear-power.aspx>

美國是世界上最大的商用核電生產國，在 30 個州有 95 座許可的核反應器在運行，由 30 個不同的電力公司營運。幾乎所有的核電廠都是在 1967 年至 1990 年之間建造的。自 1977 年至 2013 年為止都沒有新建施工，主要是多年來人們一直認為天然氣發電在經濟上更具吸引力，而 1979 年的三哩島事件更加深了人們對核電安全的擔憂。

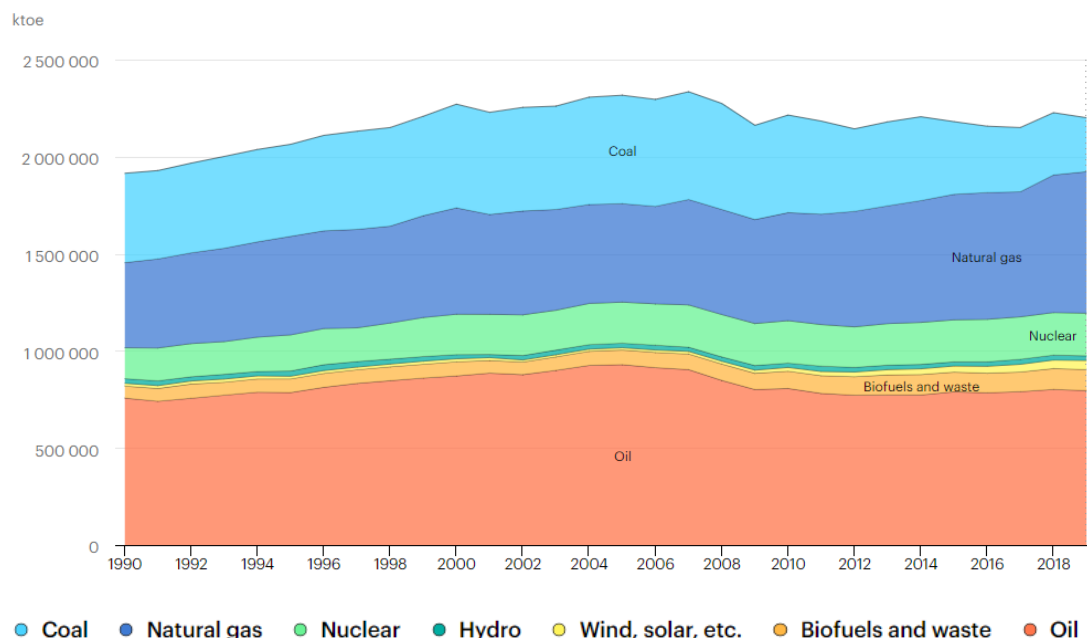


圖 4、1990～2019 年美國能源總供應量

資料來源：<https://www.iea.org/countries/united-states#data-browser>

過去二十年核能在經濟上貢獻了美國近 20% 的發電量。它仍然是美國非溫室氣體排放發電的最大貢獻者（超過 70%）。美國能源部計畫於 2021 年在愛達荷州國家實驗室（Idaho National Laboratory, INL）建立先導工廠，發展下一代核能電廠（the Next Generation Nuclear Plant, NGNP）。第四代高溫氣冷式反應器(High-temperature Gas-cooled Reactor, HTGR)將會是大規模生產電力和氫氣系統的一部分，總開發成本預估為 20 億美元。另一項發展重點則是小型模組化核反應器（Small Modular Reactor, SMR），這種小型反應器與以往核反應器不同之處在於，它可以批次在工廠大量生產，經由卡車載送到現場組裝起來就可以形成一個小型的核電廠，且單一反應器可產生約 60 百萬瓦的能源，足以提供 5 萬戶家庭的電力所需。SMR 被認為比過往的大型反應器來得更加安全，大型核反應器需要大量水作為冷卻劑，而 SMR 因為體積小不需要複雜的幫浦或水管設備，且因為小型反應器使用的燃料較大型機組少許多，即便機組處於故障狀態，需要移除的熱能較小，較能確保核反應器不會產生過熱的情況發生。2020 年 9 月美國核管會正式批准了位於波特蘭 NuScale Power 公司的 SMR 申請案，同時猶他州聯合市政電力系統公司，計劃採用 NuScale

Power 的反應器，在愛達荷州東部的偏遠地區，建造 12 座反應器，以提供當地廉價與低碳的電力。

3. 核電民意趨勢

根據美國蓋洛普民調公司(Gallup)於 2019 年 3 月 1 至 10 日所實施的年度環境民調結果，在美國賓州三哩島事件發生 40 年後，對於核能作為美國主要的電力來源，美國民眾的意見分歧，強烈支持者占 17%，些許支持者占 32%，反之，強烈反對者占 21%，些許反對者占 28%，也就是說，傾向支持與傾向反對的比例，各為 49%；傾向支持的比例較 2016 年度的 44%提升了 5 個百分點，但明顯低於 2010 年度的 62%，如圖 5 所示。

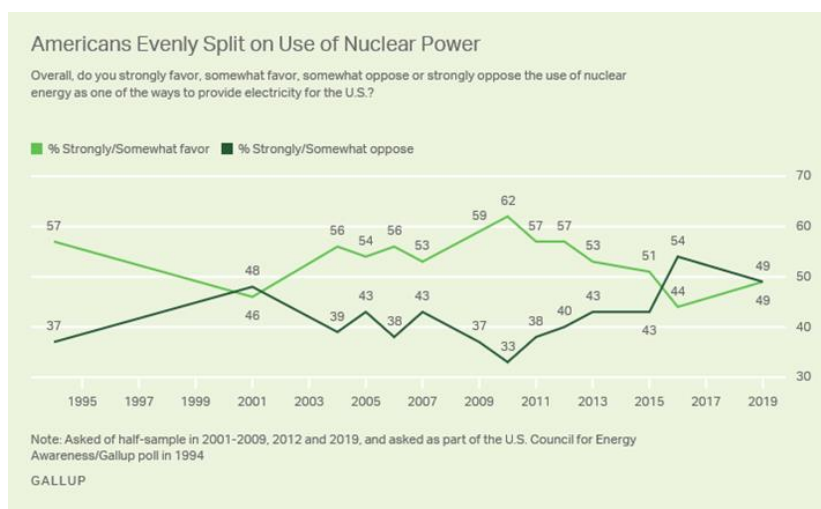


圖 5、1995 至 2019 年受訪者對於核能發電支持度的趨勢變化

資料來源: <https://news.gallup.com/poll/248048/years-three-mile-island-americans-split-nuclear-power.aspx>

根據蓋洛普公司的分析，2010 年當時油價飆升，核電的選項受到美國民眾青睞，惟在此之後美國國內原油及天然氣產量增加，帶動能源成本下降，美國民眾對於核電的支持也隨之滑落，2016 年更是創下新低。其次，以受訪者的政黨傾向來看，共和黨員(65%)支持核電的比例高於民主黨員(42%)；以受訪者的性別來看，男性(56%)支持核電的比例高於女性(39%)；以受訪者的教育程度來看，教育程度越高者，支持核電的比例也越高，大學畢業者的支持比例達 60%，如圖 6 所示。

Americans' Views on Use of Nuclear Power, by Subgroup		
Overall, do you strongly favor, somewhat favor, somewhat oppose or strongly oppose the use of nuclear energy as one of the ways to provide electricity for the U.S.?		
	Strongly/Somewhat favor	Strongly/Somewhat oppose
	%	%
U.S. adults	49	49
Gender		
Men	56	42
Women	39	58
Education		
College graduates	60	39
Some college	51	48
High school or less	37	59
Party ID		
Republicans	65	34
Independents	42	54
Democrats	42	57
GALLUP, MARCH 1-10, 2019		

圖 6、受訪者對於核能作為高排碳燃料替代能源的認同程度

資料來源: <https://news.gallup.com/poll/248048/years-three-mile-island-americans-split-nuclear-power.aspx>

再者，針對核電廠是否安全的提問，47%的受訪者認為是安全的，49%的民眾認為不安全，這是蓋洛普民調近 10 年來首見不安全的回答比例高於安全，即便在福島第一核電廠事故發生的 2011 年，當時大多數的受訪者仍認為核電廠是安全的，如圖 7 所示。

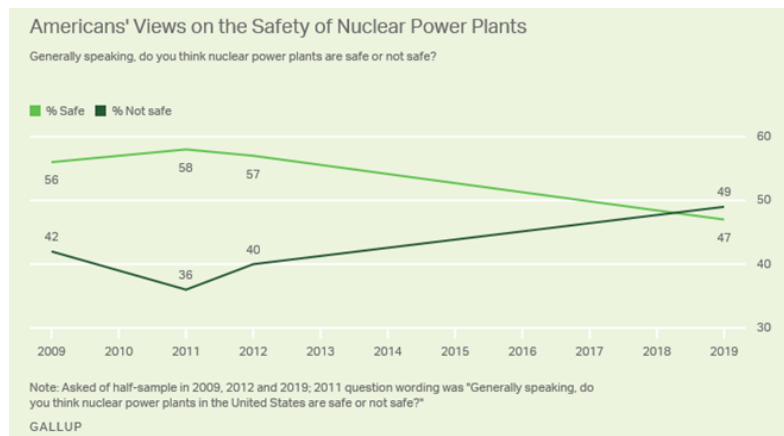


圖 7、受訪者對於核電廠是否安全的看法

資料來源: <https://news.gallup.com/poll/248048/years-three-mile-island-americans-split-nuclear-power.aspx>

蓋洛普的民調並指出，美國民眾對於核電廠是否安全的看法，隨著政黨傾向、教育程度、性別的不同，有著顯著的差異，共和黨員認為安全的比例為 69%，遠高於民主黨員的 33%；大學畢業者認為安全的比例為 57%，高中以下學歷者則為 38%；男性認為安全的比例為 59%，女性則為 37%。

另外，美國智庫皮尤研究中心(Pew Research Center)於 2019 年 10 月 1 至 13 日實施「美國大眾對於氣候與能源的看法」相關民意調查，共有 3,627 名美國成年人受訪，民調結果顯示，有 77%的受訪者認為較重要的能源優先政策，應是發展風力、太陽能、水力等替代能源，而非增加美國的化石能源，進一步就政黨傾向來看，對於是否應發展替代能源的提問，民主黨員有

高達 90% 的受訪者表示同意，共和黨員表示同意者為 62%。在共和黨員之中，對於是否應發展替代能源的提問，保守派表示同意的比例為 49%，溫和派及自由派表示同意的比例則為 82%，此外，該調查亦針對不同的性別及世代進行提問，如圖 8 所示。

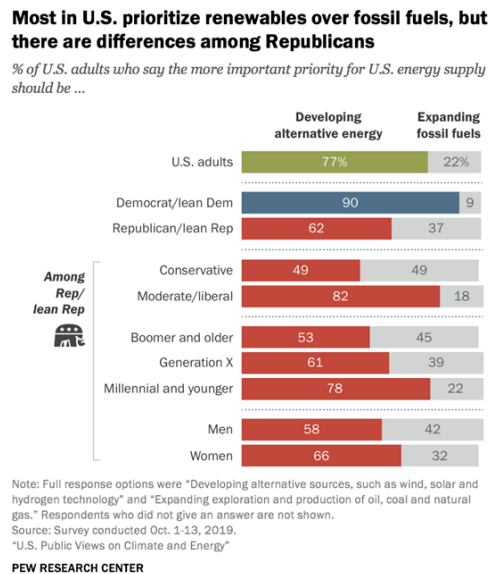


圖 8、受訪者對發展替代能源或增加化石燃料的看法

資料來源: <https://www.pewresearch.org/science/2019/11/25/u-s-public-views-on-climate-and-energy/>

皮尤研究中心的民調，亦針對受訪者對於擴增各種能源的偏好提問，調查結果顯示，關於太陽能發電，支持的比例為 92%，反對的比例為 8%；關於風力發電，支持的比例為 85%，反對的比例為 14%；關於核能發電，支持及反對的比例各為 49%；關於海洋石油及天然氣鑽探，支持的比例為 42%，反對的比例為 56%；關於水力壓裂，支持的比例為 38%，反對的比例為 60%；關於煤礦採掘，支持的比例為 35%，反對的比例為 63%，如圖 9 所示。

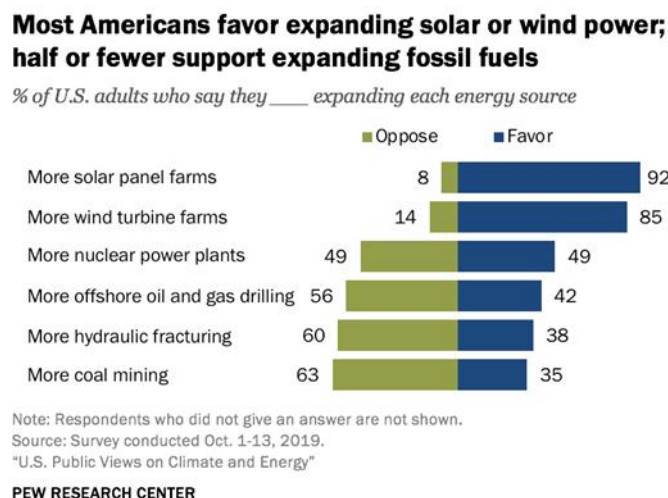


圖 9、受訪者對於擴增各種能源的偏好

資料來源: <https://www.pewresearch.org/science/2019/11/25/u-s-public-views-on-climate-and-energy/>

其次，以政黨傾向而言，關於太陽能發電，自由派民主黨的支持比例高達 98%，保守派共和黨的支持比例也有 81%；關於風力發電，自由派民主黨的支持比例高達 94%，保守派共和黨的支持比例有 71%；關於核能發電，自由派民主黨的支持比例為 39%，保守派共和黨的支持比例有 63%；關於海洋石油及天然氣鑽探，自由派民主黨的支持比例為 12%，保守派共和黨的支持比例有 76%；關於水力壓裂，自由派民主黨的支持比例為 13%，保守派共和黨的支持比例有 66%；關於煤礦採掘，自由派民主黨的支持比例為 9%，保守派共和黨的支持比例有 66%，如圖 10 所示。

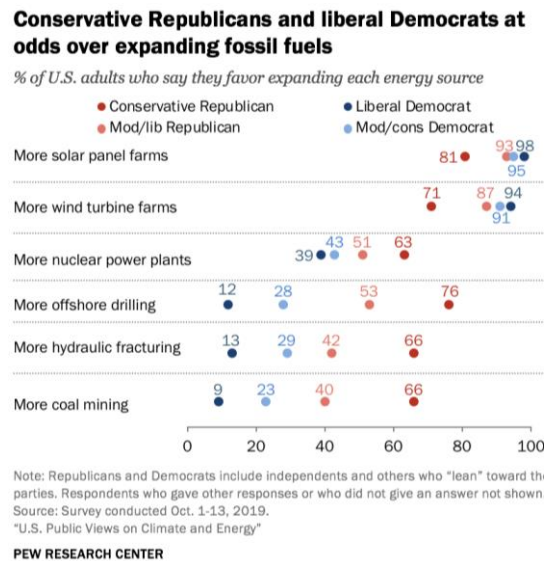


圖 10、不同政黨傾向的受訪者對於擴增各種能源的偏好

資料來源: <https://www.pewresearch.org/science/2019/11/25/u-s-public-views-on-climate-and-energy/>

4. 結語

本篇簡析除說明美國之核能管制機構架構，以了解其運作體系外，並蒐集彙整美國的核電使用現況與民意趨勢供各界參考。過去二十年，核電為美國經濟貢獻了近 20%的發電量，且核電迄今仍是美國非溫室氣體排放發電的最主要來源，比重超過 70%。根據蓋洛普民調的數據分析，2019 年度核電的支持度回升，或許可歸因於當年度的油價回升，也可能反映出美國民眾認同核能有助於減少化石燃料所產生的溫室氣體排放現象。如前所述，依據蓋洛普的民調結果所示，對於核能作為美國主要的電力來源，傾向支持與傾向反對的比例，各為 49%，另一方面，皮尤研究中心的民調中對受訪者對於擴增各種能源的偏好提問，亦是支持與反對核能的比例各為 49%的結果，亦即兩份民調不約而同地呈現出美國民眾意見分歧的現象。再者，受訪者的政黨屬性，在這兩份民調中均是重要的分析標的，且就政黨傾向與核能支持度的關聯性來看，不論是蓋洛普或是皮尤研究中心的民調，均可看出共和黨派支持者對於核電的接受度高於民主黨

支持者的趨勢，而美國總統及國會選舉預定於 2020 年 11 月舉行，兩大黨的政策對於美國能源走向的影響，值得持續關注。

(四) 澳洲核能管制架構、核電使用與民意趨勢

1. 核能管制架構

澳洲的核能管制機構為澳洲輻射防護與核能安全局(Australian Radiation Protection and Nuclear Safety Agency, ARPANSA)，該機構係根據 1998 年「澳大利亞輻射防護和核安全法案」(Australian Radiation Protection and Nuclear Safety Act 1998) 所建立，取代既有的核能安全局(Nuclear Safety Bureau)和澳大利亞輻射實驗室(Australian Radiation Laboratory)，ARPANSA 隸屬於衛生部 (Department of Health)，並於 1999 年 2 月開始運作。ARPANSA 管制澳洲境內的放射性物質使用，該組織的任務為確保放射性物質的民生用途使用安全，以保護人類和環境免受輻射的有害影響。ARPANSA 的戰略目標如下：

1. 識別，評估和傳達輻射對健康，安全和環境的風險
2. 強化核能安全、核子保安及緊急整備
3. 確保醫學領域安全、有效地使用游離輻射
4. 確保風險通報和有效監管
5. 強化利害關係人的參與
6. 增強組織的創新和應變能力。

該機構的主要職掌項目，包含 1. 建立並保持輻射測量和健康影響的專業評估，包括評估風險和對輻射緊急情況的反應。2. 諮詢：該機構就輻射和影響，輻射防護和核安全等問題向政府和聯邦提供建議。3. 管制：透過核發證照，並與聯邦互相合作，採用風險告知(risk-informed)的管制方法，以確保輻射設施的安全。4. 最佳實踐：領導制定規範，標準，指南和建議，以支持整個澳洲的輻射防護和核安全，並在相關國際組織中發揮重要作用。5. 服務：提供高質量的服務，以防止輻射的有害影響。6. 研究：進行相關研發，並與國內外學術和研究組織建立戰略合作夥伴關係。

此外，並根據 1998 年「澳大利亞輻射防護和核安全法案」，分別設立輻射健康與安全諮詢委員會(Radiation Health and Safety Advisory Council, RHSAC)、輻射健康委員會(Radiation Health Committee, RHC) 及核安全委員會(Nuclear Safety Committee, NSC) 等三個重要諮詢單位，以向 ARPANSA 的執行長提供專業建議與諮詢支援。輻射健康與安全諮詢委員會主席由衛生部部長所任命，諮詢委員會其中一名成員必須由北方領地首席部長(Representative of the Chief Minister of the Northern Territory)提名，而其中兩名成員必須為輻射管制官員(Radiation Control Officers)，其他成員則由相關部會首長指派任命；而兩個委員會的主席與成員則由 ARPANSA 執行長所任命。其中，輻射健康與安全顧問諮詢委員會主要職掌輻射防護與核能安全，包含辨識緊急事故，具有決定是否採取相關政策、法規的權力，並在執行長要求下或委員

會認為有需要時，向執行長提出諮詢與報告；輻射健康委員會主要執掌輻射防護，對諮詢委員會與執行長提供諮詢服務，在考慮聯邦、各州以及領地的框架下，針對國家政策、法規與標準等形成相關草案並進行審查，以確保相關政策與法規能夠持續滿足世界級的標準；核安全委員會就與核安全和受管制設施的安全相關事項向執行長和輻射健康與安全諮詢委員會提供諮詢建議，並包括相關安全標準，法規和程序的制定和有效性評估。

在相關管制措施方面，ARPANSA 致力於採用一致性的方式並發展出一套有關如何針對放射性物質進行管制的手冊，例如「核發執照和評估手冊」(Licensing and Assessment Manual)，涵蓋了聯邦體制對申請的評估和批准以及這些流程的持續改進。手冊涵蓋的事項包括：申請發照、撤銷、要求批准處置、運輸放射性物質等；「視查手冊」(Inspection Manual)詳細闡述了 ARPANSA 監管活動政策中與檢查相關的政策聲明和原則，該政策與國際原子能總署 (International Atomic Energy Agency, IAEA) 要求政府，法律和法規安全框架保持一致相符；而「合規與執法手冊」(Compliance and Enforcement Manual)則為監管人員提供風險分級的監控方法。

2. 澳洲核電現況

2019 年澳洲的總發電量約為 265 TWh。該數字包括發電廠的發電量以及企業和家庭自用的發電量。如圖 1 所示化石燃料占 2019 年總發電量的 79%，其中包括煤炭(56%)，天然氣(21%)和燃油(2%)；再生能源占 21%，分別為水力發電(5%)，風能(7%)和太陽能(7%)，1993~2019 年澳洲電力占比趨勢如圖 2 所示。

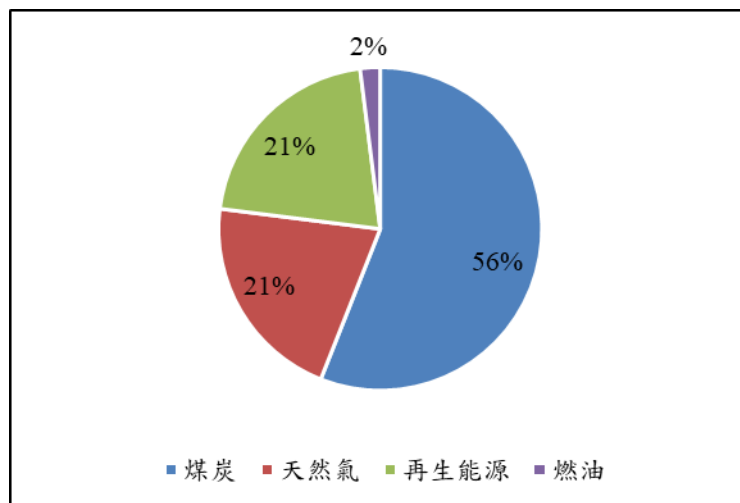


圖 1、2019 年澳洲電力占比

資料來源：<https://www.energy.gov.au/data/electricity-generation>

澳洲擁有世界上已知最大的鈾礦資源，幾乎佔全世界總量的三分之一。根據 2019 年的統計，澳洲是世界第三大鈾生產國，僅次於哈薩克和加拿大。產出的鈾全部用於出口，出售的鈾

嚴格限制用於發電，鈾約占澳洲能源出口的四分之一。因為有巨大的煤炭資源和大量的天然氣支撐著能源安全並提供了低成本的電力，澳洲不使用核能，沒有設置核能電廠，澳洲的核能應用僅在生物醫學領域，唯一的核反應爐是用來生產鈾 99。

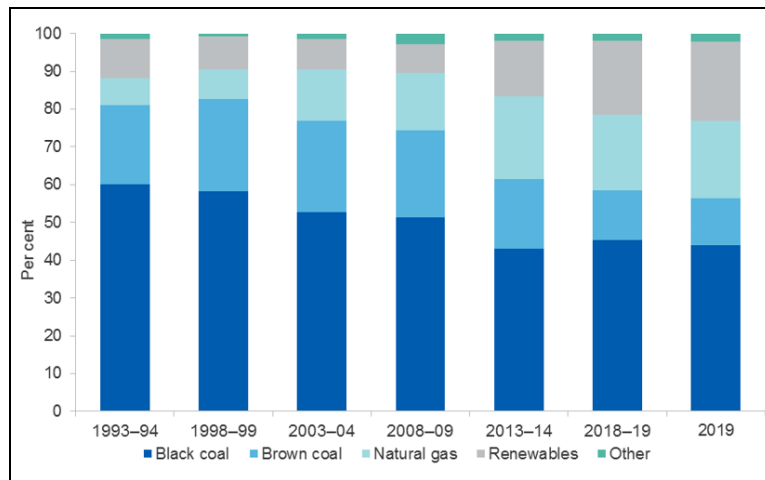


圖 2、1993~2019 年澳洲電力占比

資料來源：<https://www.energy.gov.au/data/electricity-generation>

澳洲未來推動核電發展的唯一因素是減少二氧化碳排放。澳洲核能科學與技術組織(the Australian Nuclear Science & Technology Organization, ANSTO)擁有並運營 20 MWt 的水池式輕水研究用反應器(The Open-pool Australian Lightwater, OPAL)，澳洲還有世界一流的澳洲輻射防護與核能安全局(ARPANSA)以及發達的鈾礦開採業等重要基礎設施，可以支持未來任何的核能發電計畫。

阻礙澳洲發展核電的因素，除了新南威爾士州 1986 年的《鈾礦開採和核設施(禁止)法》，以及維多利亞州 1983 年的《核活動(禁止)法》，降低了對核能發電的計畫與想像。就聯邦而言，若發展核電需要修改《1999 年環境保護和生物多樣性保護法》以及《1988 年澳洲輻射與核安全法》。對於核電廠而言，冷卻將會是另一個主要問題；目前，由於淡水的普遍短缺，將需要以海水對核反應爐進行冷卻，因此核電廠將會設置在沿海地區，並在一定程度上需要用到大量的淡水。

根據澳洲聯邦科學與工業研究組織(Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization, CSIRO)與澳洲能源市場調度中心(Australian Energy Market Operator, AEMO)發表最新研究，不計算任何碳稅風險成本的情況下，採用燃煤發電，均化成本最低為每度電 0.085 元澳幣。未來加入碳捕捉技術與碳稅政策的風險因素，預估 2020 年燃煤發電均化成本每度電為澳幣 0.15 元。而發展中的第四代小型模組化核電廠，因建廠與土地取得等成本因素，

預估每度電均化成本可達澳幣 0.25 元；因此，雖然擁有豐富的鈾礦，澳洲目前核能發電仍無法與燃煤電廠競爭。

3. 核電民意趨勢

澳洲市場研究公司羅伊摩根 (Roy Morgan)於 2019 年 9 月 11 至 15 日進行了一項線上民調，調查主題為澳洲人對於全球暖化的看法，受訪對象為 1,006 名 18 至 64 歲成年人。對於「你是否支持澳洲發展核電以減少碳排放？」的提問，有過半數(51%)受訪者回答支持，較 2011 年 7 月當時大幅上升了 16%；就受訪者的性別來看，男性(65%)支持的比例高於女性(38%)；就受訪者的年齡分布來看，50 至 64 歲的支持比例最高，達 55%，如圖 3 所示。

Question 6:

"If the worries about carbon dioxide are a real problem. Many suggest that the cleanest energy source Australia can use is nuclear power. Do you support Australia developing nuclear power to reduce Australia's carbon dioxide emissions or not?"

	All Australians			Gender		Age			
	June '11	July '11	Sep 11-15, 2019	Female	Male	18-24	25-34	35-49	50-64
	%	%	%						
Yes, develop nuclear power	36	35	51	38	65	52	51	47	55
No, don't develop nuclear power	59	58	34	40	28	26	33	39	33
Can't say	5	7	15	22	7	22	16	14	12
TOTAL	100	100	100	100	100	100	100	100	100

	All Australians			City/Country		States					
	Sep 11-15, 2019	Capital Cities	Country Areas	NSW	VIC	QLD	WA	SA	TAS#		
Yes, develop nuclear power	51	51	51	55	47	49	56	55	40		
No, don't develop nuclear power	34	34	34	28	38	38	34	27	55		
Can't say	15	15	15	17	15	13	10	18	5		
TOTAL	100	100	100	100	100	100	100	100	100		

#Sample sizes with fewer than 50 respondents should be treated with caution.

圖 3、受訪者對於澳洲發展核能以減少碳排放的看法

資料來源: <http://www.roymorgan.com/findings/8144-nuclear-power-in-australia-september-2019-201910070349>

對於「你是否認為澳洲應該發展核電以供應澳洲電力？」這項提問，受訪者回答支持的比例為 45%，較 2011 年 3 月當時上升了 11%；男性(59%)支持的比例高於女性(31%)；就受訪者的年齡分布來看，50 至 64 歲的支持比例最高，達 55%，如圖 4 所示。

Question 3:

"Do you believe Australia should develop nuclear power plants to supply electricity to Australia?"

	All Australians			Gender		Age			
	Sep '19	Mar '11	Sep 11-15, 2019	Female	Male	18-24	25-34	35-49	50-64
	%	%	%						
Yes, develop nuclear plants	52	34	45	31	59	37	43	41	55
No, don't develop nuclear plants	35	61	40	49	31	47	36	45	34
Can't say	13	5	15	20	10	16	21	14	11
TOTAL	100	100	100	100	100	100	100	100	100

	All Australians			City/Country		States					
	Sep 11-15, 2019	Capital Cities	Country Areas	NSW	VIC	QLD	WA	SA	TAS#		
Yes, develop nuclear plants	45	44	47	51	43	42	46	46	14		
No, don't develop nuclear plants	40	42	36	34	45	44	35	30	81		
Can't say	15	14	17	15	12	14	19	24	5		
TOTAL	100	100	100	100	100	100	100	100	100		

#Sample sizes with fewer than 50 respondents should be treated with caution.

圖 4、受訪者對於澳洲建造核電廠以供應電力的看法

資料來源: <http://www.roymorgan.com/findings/8144-nuclear-power-in-australia-september-2019-201910070349>

對於「如果澳洲建造核電廠，你是否同意建在你的居住區域？你是否感到不安但不會反對？或者你反對核電廠建在你的居住區域？」這項提問，受訪者回答反對的比例為 58%，較 2011 年 3 月當時下降了 17%；受訪者回答完全不會反對的比例為 42%，較 2011 年 3 月當時上升了 17%，如圖 5 所示。

Question 4:

"If Australia were to develop nuclear power plants, would you agree to a nuclear power plant being built in your area, would you feel anxious about it but not oppose it, or oppose a nuclear power plant being built in your area?"

	All Australians			Gender		Age			
	Sep '79	Mar '11	Sep 11-15, 2019	Female	Male	18-24	25-34	35-49	50-64
	%	%	%	%	%	%	%	%	%
Would agree to it being built in my area	20	12	19	8	29	17	17	19	21
Anxious, but would not oppose it	24	13	23	20	26	26	26	19	23
TOTAL Would not oppose it	44	25	42	28	55	43	43	38	44
Would oppose it being built in my area	56	75	58	72	45	58	57	62	56
TOTAL	100	100	100	100	100	100	100	100	100

	All Australians			City/Country		States					
	Sep 11-15, 2019	Capital Cities	Country Areas	NSW	VIC	QLD	WA	SA	TAS#		
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
Would agree to it being built in my area	19	17	22	21	17	16	16	20	10		
Anxious, but would not oppose it	23	23	22	24	21	21	26	35	4		
TOTAL Would not oppose it	42	40	44	45	38	37	42	55	14		
Would oppose it being built in my area	58	60	56	55	62	63	58	45	86		
TOTAL	100	100	100	100	100	100	100	100	100		

#Sample sizes with fewer than 50 respondents should be treated with caution.

圖 5、受訪者對於核電廠建造於自身居住區域的看法

資料來源:

<http://www.roymorgan.com/findings/8144-nuclear-power-in-australia-september-2019-201910070349>

關於「澳洲是否應該出口鈾礦至其他國家供核電使用」這項提問，有 41%的受訪者認為應該出口，認為不應該出口的比例亦為 41%，呈現支持與反對意見分歧的情形；有 18%的受訪者無法回答，較 2011 年 3 月當時上升了 12%，如圖 6 所示。

Question 2:

"Should Australia export Uranium to other countries for their Nuclear Power needs?"

	All Australians		Gender		Age				
	Mar '11	Sep 11-15, 2019	Female	Male	18-24	25-34	35-49	50-64	
	%	%	%	%	%	%	%	%	%
Yes, export uranium	44	41	22	61	35	42	39	47	
No, don't export	50	41	52	30	38	39	44	41	
Can't say	6	18	26	9	27	19	17	12	
TOTAL	100	100	100	100	100	100	100	100	

	All Australians		City/Country		States					
	Sep 11-15, 2019	Capital Cities	Country Areas	NSW	VIC	QLD	WA	SA	TAS#	
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
Yes, export uranium	41	40	45	42	37	40	49	47	29	
No, don't export uranium	41	42	39	42	45	44	31	26	61	
Can't say	18	18	16	16	18	16	20	27	10	
TOTAL	100	100	100	100	100	100	100	100	100	

#Sample sizes with fewer than 50 respondents should be treated with caution.

圖 6、受訪者對澳洲出口鈾礦至其他國家供核電使用的看法

資料來源:

<http://www.roymorgan.com/findings/8144-nuclear-power-in-australia-september-2019-201910070349>

其次，根據澳洲智庫澳大利亞研究所(The Australia Institute)發表的 2020 年度氣候國家報告 (Climate of the Nation 2020)，其以「澳洲民眾對於氣候變遷與能源的看法」為主題，於 2020 年 7 月 14 至 22 日實施了量化調查，訪問了 1,998 名 18 歲以上的澳洲人，並於同年 8 月 31 日

至 9 月 1 日間，以 4 個焦點團體(共 21 名參加者)為對象，透過線上訪談進行質性研究。調查結果顯示，高達 79%的受訪者認為氣候變遷正在發生，如圖 7 所示；另一方面，對於氣候行動議題，有 71%的受訪者認為澳洲應該是找出氣候變遷解決之道的世界領導者，另有 77%的受訪者認為處理氣候變遷問題可以為潔淨能源(例如：太陽能、風能、地熱)創造新的就業與投資機會，如圖 8 所示。

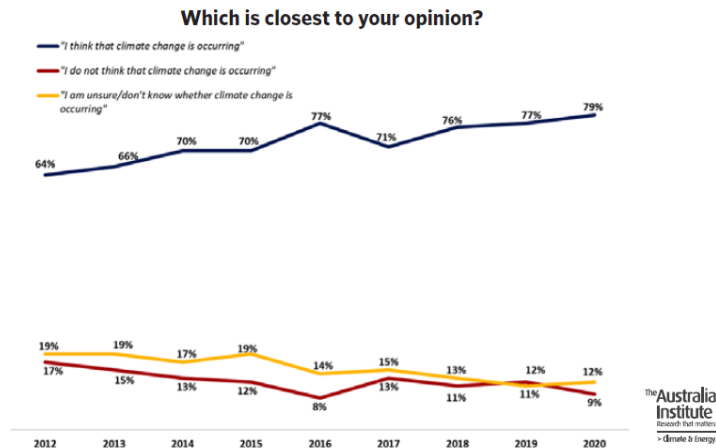


圖 7、受訪者對於氣候變遷是否正在發生的看法

資料來源: <https://www.tai.org.au/content/climate-nation-climate-change-concern-hits-82>

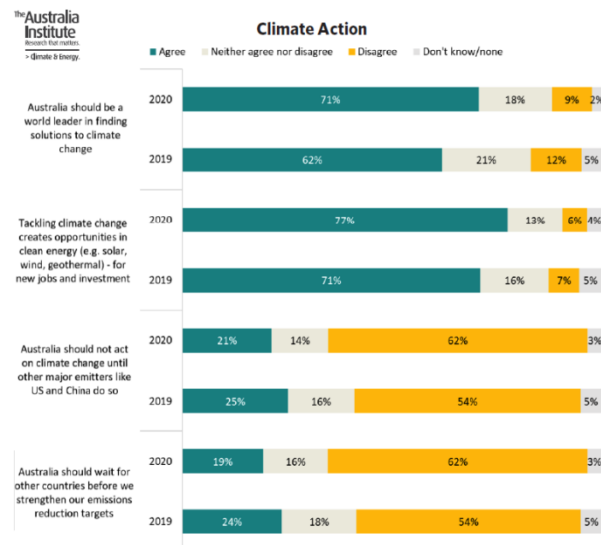


圖 8、受訪者對於氣候行動的相關看法

資料來源: <https://www.tai.org.au/content/climate-nation-climate-change-concern-hits-82>

至於在因應氣候變遷的能源選擇議題方面，對於受訪者偏好的能源來源前 3 名的調查結果，排名由高至低依序為：太陽能占 79%，風能占 62%，水力占 39%，儲能占 29%，潮汐／波浪占 22%，核能占 21%，天然氣占 19%，地熱占 16%，燃煤占 14%，如圖 9 所示。

TABLE 2.1: PREFERRED ENERGY SOURCES WHICH RANKED IN RESPONDENTS' TOP 3 PREFERENCES*

	2019	2020
Solar	76%	79%
Wind	58%	62%
Hydro	39%	39%
Power Storage	29%	29%
Tidal/Wave	21%	22%
Nuclear	22%	21%
Gas	20%	19%
Geothermal	17%	16%
Coal	18%	14%

* excludes 6% who did not answer

圖 9、受訪者偏好的能源來源前 3 名列表

資料來源: <https://www.tai.org.au/content/climate-nation-climate-change-concern-hits-82>

承上所述，此調查進一步詢問受訪者對於「澳洲的燃煤發電廠應關閉，且以潔淨能源替代」的看法，結果顯示有 32% 表示非常同意，31% 表示同意，如圖 10 所示。

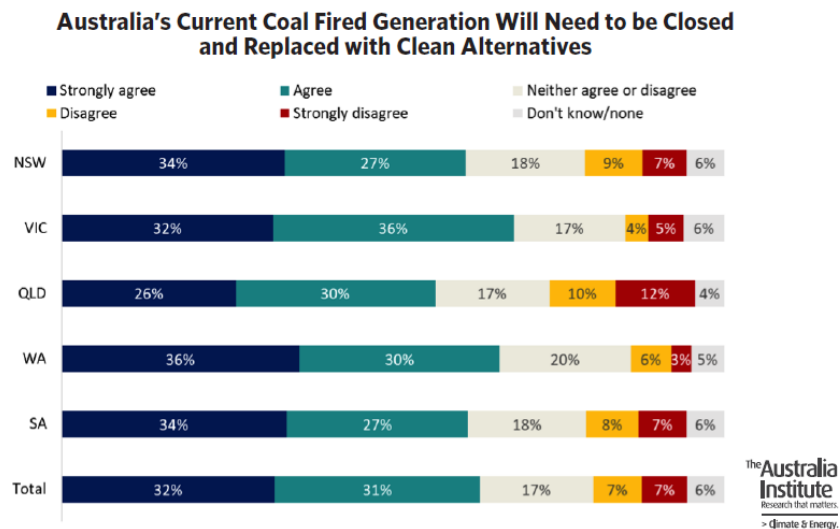


圖 10、受訪者對於「澳洲的燃煤發電廠應關閉，且以潔淨能源替代」的看法

資料來源: <https://www.tai.org.au/content/climate-nation-climate-change-concern-hits-82>

另外，依據市場調查公司 JWS Research 於官方網站發布的新聞稿，澳大利亞礦業協會 (Minerals Council of Australia, MCA) 委託該公司於 2019 年 10 月中旬進行一項民調，調查對象包括雪梨與墨爾本的焦點團體，以及 1,500 名澳洲人的定量調查。該調查指出，有 40% 的民眾支持解除澳洲的核能禁令，且有 39% 的民眾支持澳洲使用核能；調查結果亦顯示，有 54% 的民眾並不知道澳洲禁用核能；反對澳洲使用核能且反對解除核能禁令的比例為 33%；對於核能使用持中立態度或表示不確定的比例為 29%，對於解除核能禁令持中立態度或表示不確定的比例

為 26%；當受訪者獲悉核能的優劣因素後，支持核能的比例攀升至 47%；假使受訪者得知大多數的澳洲人支持核能，而被問及是否接受解除核能禁令時，表示支持的比例則攀升至 55%。¹⁴

4. 結語

本篇簡析除說明澳洲之核能管制機構架構，以了解其運作體系外，並蒐集彙整澳洲的能源現況與民意趨勢供各界參考。羅伊摩根公司長年以澳洲民眾對於核能的想法為主題，進行相關民意調查並分析趨勢變化，從其 2019 年 9 月的調查可得知，不論就減少碳排放或供應澳洲電力的角度而言，受訪者支持發展核能的比例達 4 成 5 以上，且相較於 2011 年 7 月(福島事故發生後不久)的調查結果，受訪者對於發展核能的支持度的上升幅度均逾 10%，有顯著的成長；此外，從 JWS Research 於 2019 年 10 月發布的民調結果來看，有 4 成的受訪者支持解除澳洲的核能禁令，同時有近 4 成的受訪者支持澳洲使用核能，且當受訪者獲悉核能的優劣因素後，支持核能的比例更進一步攀升至近 5 成的比例；也就是說，羅伊摩根公司及 JWS Research 的調查結果均顯示澳洲在核能發展方面，同時具有不容忽視的民意支持與反對基礎。另一方面，根據智庫澳大利亞研究所實施的 2020 年度民意調查結果，在因應氣候變遷的能源選擇議題方面，受訪者偏好的能源來源中，支持核能的比例為 21%，受青睞的程度不如太陽能、風能、水力等選項，亦即在多數受訪者的心目中，並未將核能列為氣候行動或氣候變遷的對策。因此，若今後澳洲政府擬推動核能發電，如何在前述的民意支持基礎下，進一步向大眾闡述核能與減少碳排放或延緩氣候變遷的關聯性，是值得探討的一個課題。

¹⁴資料來源：<https://www.jwsresearch.com/2019/12/04/support-grows-for-nuclear-energy/>

附件三:原子能科技於民生應用發展之策略藍圖

目錄

一、前言.....	111
二、國際趨勢.....	111
三、民生應用重要議題及技術布局分析.....	117
3.1 健康與民生.....	117
3.1.1 醫療.....	117
3.1.2 糧食及農業.....	122
3.2 能資源與環境.....	125
3.3 前瞻應用科技.....	127
3.3.1 量子科技.....	127
3.3.2 中子科技.....	132
3.3.3 太空科技.....	136
3.4 產業經濟.....	139
3.4.1 工業領域.....	139
3.4.2 半導體製程.....	141
四、技術布局策略.....	145
五、參考文獻.....	147
附錄：研究方法.....	150

一、前言

因應非核家園能源政策，核電廠逐步退場，為推動國家原子能科技轉型，運用原子能及其衍生技術提升產業附加價值，增進社會福祉，鼓勵原子能科技跨領域研究，厚植國家科技能量。原能會委託核研所蒐集國際原子能科技發展趨勢，探討國內原子能技術產業應用潛力，評析符合國情的原子能科技於民生應用發展方向，做為未來推動國內原子能科技發展之基本方針。

原子能業務範圍雖然涵蓋核能安全、輻射防護、核設施除役、原子能應用及相關跨領域系統整合工程分析及應用技術等，但本策略藍圖乃基於科技部 108 至 111 年科技發展策略藍圖，主要針對原子能民生應用技術群組探討，並未涵蓋完整之原子能科技範疇。

本策略藍圖研究方法採「專家問卷及座談會技術群組評分」，在問卷設計及專家會議的舉辦上，皆與相關領域的專家討論，以確保研究方法之可行性，俾利結果更符合我國國情。而本策略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」四大面向，共有八大領域：「醫療」、「糧食和農業」、「環境與水資源」、「量子科技」、「中子科學」、「太空科技」、「工業應用」及「半導體製程」，評分要素包含重要性、可行性與產業化可能性，部分技術群組受限國內市場規模及特殊性雖較難產業化，但仍需國家投入穩定資源強化相關基礎設施、人才培育及關鍵技術建立，以因應國際競爭及貿易保護政策下，維持國內相當自主能力。

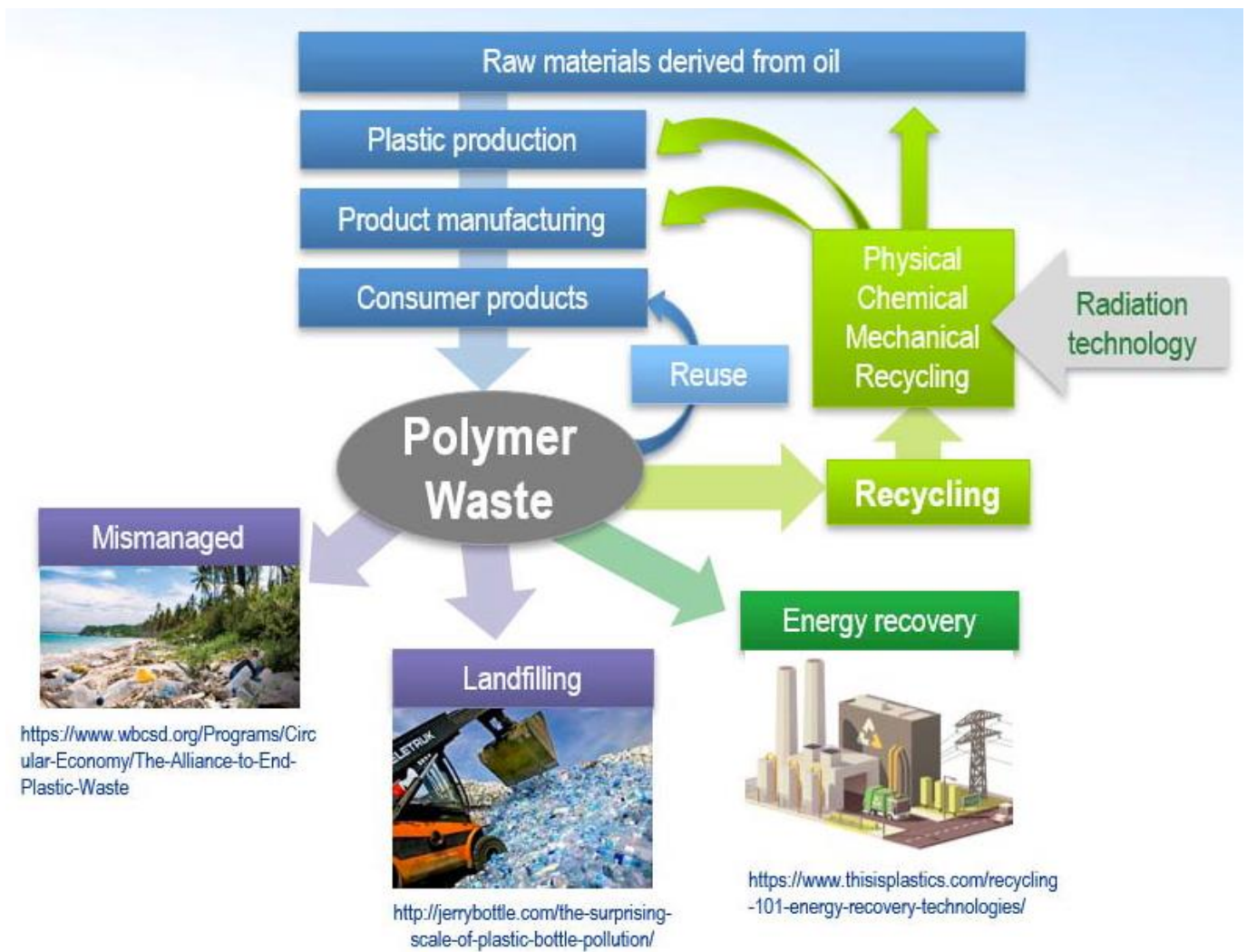
二、國際趨勢

國際原子能總署(International Atomic Energy Agency, IAEA)近年來積極增加原子能應用之推廣，參與解決人類面臨的問題，也符合聯合國追求永續發展的目標，每年藉由會員國大會的科學論壇宣示並推廣 IAEA 可以擔任的角色與貢獻，並投入更多資源在這些領域，增加 IAEA 在國際議題的參與度與影響力(IAEA, 2018)。根據 IAEA 在 2020 年 9 月出版的「Nuclear Technology Review – 2020」可知，其將原子能在民生的應用上劃分為「糧食和農業」、「人類健康」及「放射性同位素和輻射技術」議題(IAEA, 2020)。有關「糧食和農業」，在 2050 年氣候變遷計畫中，預測節肢物種入侵的發生將平均增加 18%，物種入侵的擴大不僅是植物害蟲，還有蟲媒傳染病(vector-borne diseases)，影響不僅是傳染媒介的時空分布和種群動態，更加速了其生命週期，包括寄生蟲的生命週期、傳播方式和傳播途徑(IAEA, 2020)。IAEA 應用原子能技術加強昆蟲不育技術，以作為蟲害綜合治理的方案；其它如穩定同位素和微量元素分析、磁共振波譜(包括核磁共振(nuclear magnetic resonance, NMR)和電子順磁共振(electron

paramagnetic resonance)(或電子自旋共振譜(electron spin resonance spectroscopy)))和質譜分析等技術，可用於驗證食品產地，支援食品追蹤系統的技術建置。

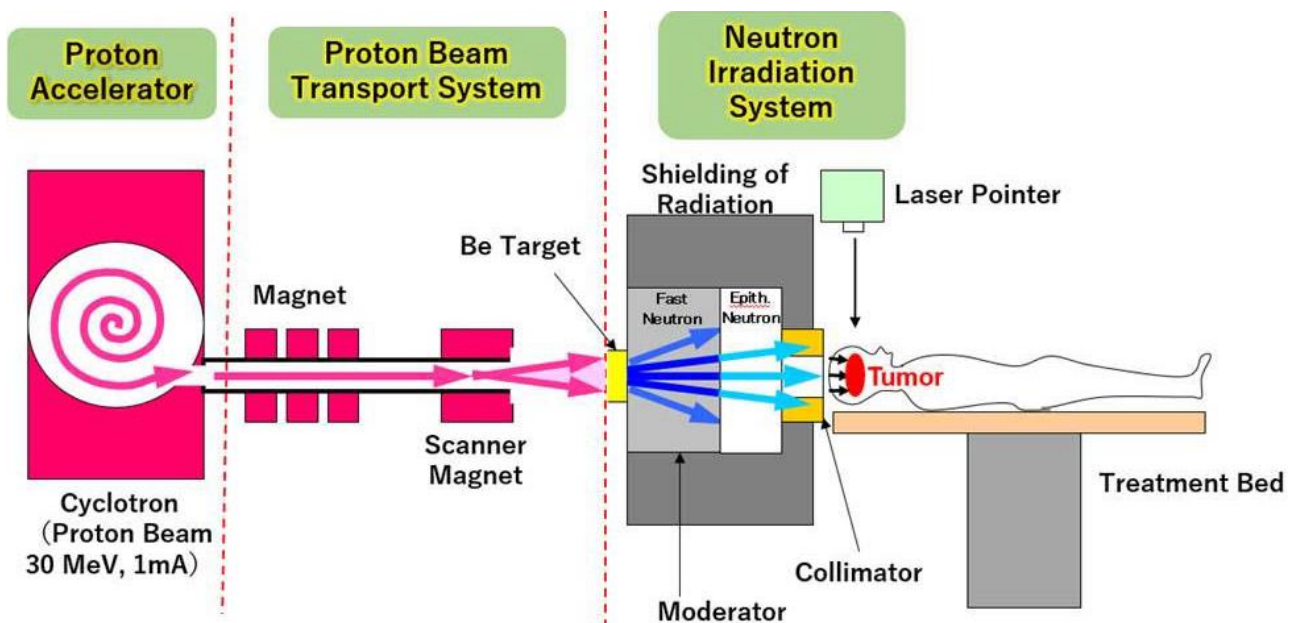
在「人類健康」方面，則可以藉由氘(^2H)和碳-13(^{13}C)的雙同位素示蹤技術，以相對非侵入性的方式量測胺基酸在上腸道的消化性，其本質上是以不同的「同位素標記標準蛋白質」同時供給同位素標記的測試蛋白質，上述標準蛋白質可能是無胺基酸混合物(不需要消化)或完整的蛋白質(如同位素標記的螺旋藻)，其消化性是可預先確定的，故血液中飯後所標記的不同必需胺基酸(indispensable amino acids, IAAs)比率可用於評估測試蛋白質真實的 IAAs 吸收性，該項技術是根據聯合國食品與農業組織(FAO)在 IAEA 支持的 CRP(植物性飲食中蛋白質的生物利用度)要求下所開發的。

在「放射性同位素和輻射技術」方面，由於輻射技術具有建立塑料循環經濟的潛力，可以作為傳統減少塑料廢棄量的輔助方法，故愈來愈多成員國要求把輻射技術用於全球聚合物廢棄物回收，且輻射技術具有可擴充性，這意味可用於大規模的聚合物廢棄物，藉由化學鍵的可控構造或裂解提供了多種材料可能的加工方法，被視為實現「綠色」化學的重要原理。此輻射過程可用於：修改塑料的結構和特性，或分解塑料以製成原料，在這兩種情況下，改性或功能化新材料或原料都可用於生產商業上可行的再生塑料消費品，從而在減少廢棄物量的同時創造可觀的收益。使用輻射技術還有一個明顯的額外優勢，因為輻射是一種「綠色」技術，可以避免使用化學聚合物回收所需的溶劑，從而減少對環境的污染和碳排放。當塑膠廢棄物的一次回收不再可行時，就像以傳統技術許多熱塑性塑膠只能回收一次或兩次，使用輻射技術將其回收成新產品特別具吸引力。因此，利用輻射技術回收塑膠廢棄物是一項創新的貢獻(圖 2-1)。硼中子捕獲治療(boron neutron capture therapy, BNCT)是輻射技術在「放射性同位素和輻射技術」領域的另一重要應用，圖 2-2 所示為以加速器為基礎的 BNCT 不同技術組件，圖中顯示質子被加速到數百萬電子伏特(MeV)至 30MeV 的能量範圍，平均射束電流(beam current)從幾毫安培到幾十毫安培，並與輕元素靶碰撞，如鋰(Li)或鈹(Be)。因此可產生快中子，而該中子又被準直(collimate)、緩和並引導到患者輻照區域。上述「糧食和農業」、「人類健康」及「放射性同位素和輻射技術」領域之議題是新近蒐集彙整，其它茲如「半導體製程」、「太空科技」、「量子科技」、「中子科技」及「工業應用」等領域請參考 IAEA(2019)、Sandia National Laboratories、Karlsruher Institute of Technology、SpaceX Company 及台灣中子科學學會。



Source: IAEA (2020)

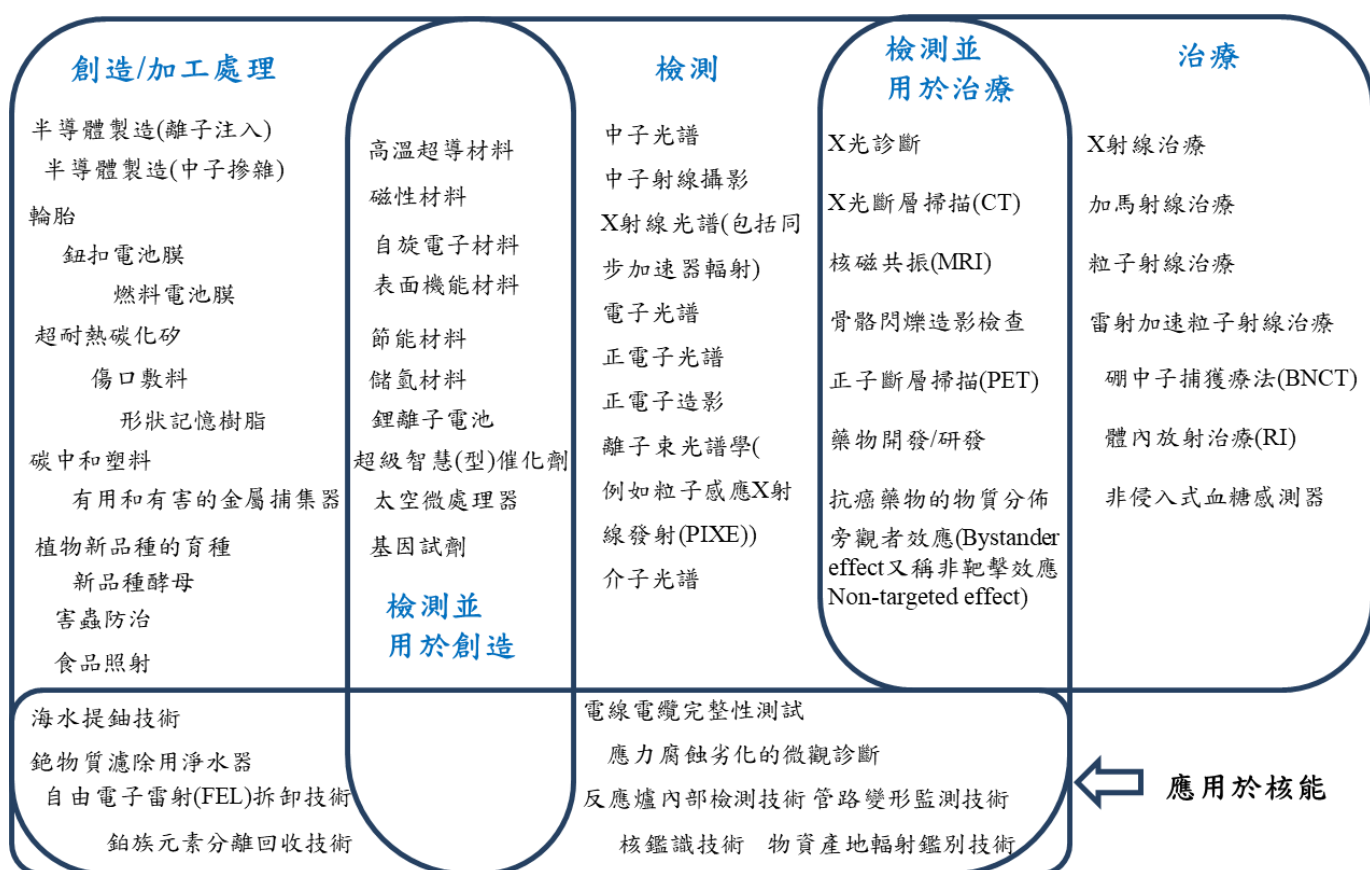
圖 2-1 塑膠產品的生命週期與塑料廢棄物的產生及處理



Source: IAEA (2020)

圖 2-2 以加速器為基礎的 BNCT 架構圖

在日本，放射性同位素技術廣泛用於先進科學、工業、醫學、農業、環境保護以及核子保
防等領域，目前已經產生了可與核能技術相媲美的經濟規模，並且隨著加速器技術的顯著進
步，量子束(如中子束、同步輻射以及雷射等)技術已經成為創新的有力工具。未來，研發機構
和大學將有計畫地運用既有成果，同時，為了進一步活用量子束等輻射線及放射性同位素相關
技術，研發基礎的強化(解決設備老舊的問題和適當的人力運用)亦備受重視。日本輻射應用協
會於 2017 年 8 月發布輻射運用的經濟規模調查(岡田淑平，2017)，其將原子能於民生的應用領
域劃分為發電、工業、醫學與醫療和農業，其中核能發電佔了 54%、工業應用 26%、醫學與醫
療 17%、農業 3%，上述工業應用中，以半導體為大宗，其次依序為高分子、設備、殺菌及計
測/檢查，在醫學與醫療領域中，以診斷影像為主，其次依序為乳腺癌測試及正子斷層掃描儀
(positron emission tomography, PET)檢查；在農業領域中，則有害蟲防治、食物輻照及變異育種
等。而日本輻射應用協會亦希望各技術領域能有創新的研究，包括以前從未設想的技術，盤點
結果如圖 2-3 所示。

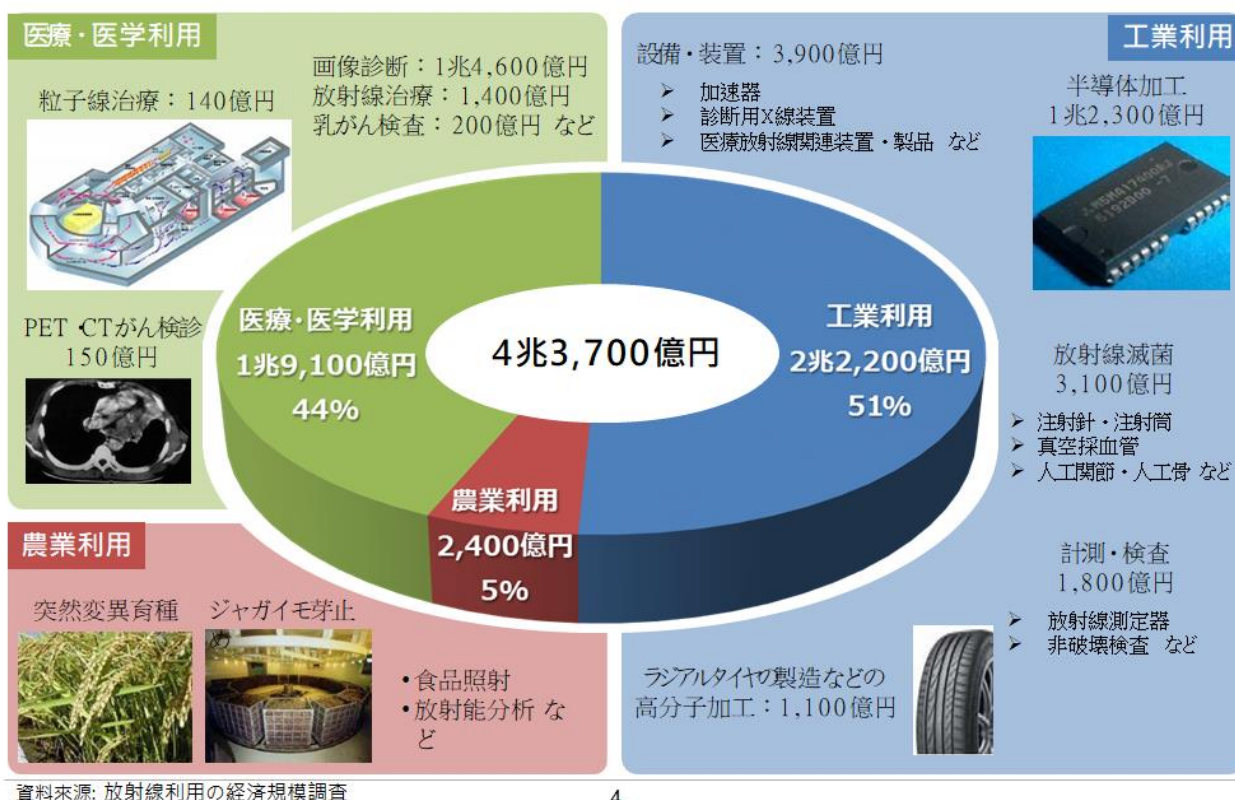


CT: computed tomography, MRI: magnetic resonance imaging, PET: positron emission tomography,
BNCT: boron neutron capture therapy

資料來源：岡田淑平(2017)，本研究翻譯

圖 2-3 日本輻射應用協會所盤點之原子能於民生應用之技術

值得一提的是，日本內閣府原子力委員會在 2017 年曾以 2015 年之資料估算日本輻射利用之市場經濟規模，其調查之基礎為以應用輻射所衍生的產品價值，如核子醫學診斷及治療之醫療支出、工業半導體、醫材利用輻射改質、滅菌等產品之出貨金額。調查結果如圖 2-4，根據該報告，工業占 51%、醫療 44%、農業 5%，各領域使用輻射計算的產品及服務總市場規模 43,700 億日元，約 11,580 億新台幣(以 2015 年匯率 0.265 計算)，工業領域較重要的產業包含半導體(占工業應用之 5 成以上)、醫材、醫療照射設備、輪胎、電線等。而相較 2005 年之結果，工業應用因半導體出貨額減少而略有縮減，而醫療應用則因核醫診斷及治療更普及而明顯成長，年複合成長率約 4%。



資料來源：內閣府原子力委員會(2017)

圖 2-4 日本 2015 年原子能技術民生應用及市場規模案例

在歐盟方面，為穩定放射性同位素藥物的供應，歐洲藥品管理局和歐盟委員會採取了許多策略，以找出可能的中長期解決方案。因此，歐洲委員會和利益相關者於 2012 年 6 月成立了歐洲醫用放射性同位素供應觀察站，旨在將所有相關信息匯整到歐盟機構和國家政府的決策者中，以協助制定策略和計畫。該觀察站遵循由醫學放射性同位素高階小組所建立的 OECD/NEA 原則，並在歐盟中著重於實現的具體性。歐洲觀察站有四個總體戰略目標：支援整個歐盟的 Mo-99/Tc-99m 安全供應、確保 Mo-99/Tc-99m 的供應議題能有很高的政治能見度、鼓勵建立永續經濟結構的供應鏈，以及建立對供應鏈和產能的定期審查(EU, 2017a)。

歐盟(EU, 2017b)則使用穩定金屬同位素來識別微粒污染的來源。多接收器感應耦合電漿質譜儀(multi-collector inductively-coupled-plasma mass spectrometer, MC-ICP-MS)使用穩定同位素檢測金屬濃度，使科學家能夠研究銅和鋅等污染金屬的環境化學，該技術可用於識別和了解微粒污染在大氣中的運輸過程。ISOTRACE(金屬穩定同位素作為大氣環境中的污染物示蹤劑)計畫使用穩定同位素比率來追蹤影響城市空氣品質的污染物金屬來源，目的是能對歐洲主要城市中，原始材料的同位素分離和大氣微粒中的同位素變化所隱藏機制能有更好理解。研究人員還收集了倫敦和巴塞隆納在不同時期和不同高度的微顆粒物，結果說明了在不同的城市之間以及一年中的不同時間，主要鋅源會有所不同；因此，每個城市都需要考慮特定時段內獨特的來源評估和減排策略。

三、民生應用重要議題及技術布局分析

為因應非核家園能源政策，並推動國家原子能科技轉型，運用原子能及其衍生技術提升產業附加價值，增進社會福祉，鼓勵原子能科技跨領域研究，厚植國家科技能量。原能會委託核研所蒐集國際原子能科技發展趨勢，探討國內原子能技術產業應用潛力，評析符合國情的原子能科技於民生應用發展方向，做為未來推動國內原子能科技發展之參考依據。

綜觀當前國人關注的各項與科技政策相關之社會議題，可以分為「健康與民生」、「能資源與環境」、「前瞻應用科技」與「產業經濟」等面向：「健康與民生」強調完善醫療診斷及治療與農業永續及糧食安全，保障民眾生命安全；「能資源與環境」著重環境衛生及水資源管理，確保環境永續，且所有人都能獲得潔淨的水；「前瞻應用科技」重視新興科技崛起與科技研究及創新能力，以因應未來趨勢挑戰；「產業經濟」關注產業智慧化與製程改善，帶領產業創新轉型，活絡經濟動能。是以，本章針對上開議題擬定因應策略，以打造國家競爭優勢，維持全球創新領先。

於此，首先進行重要議題的辨識，其後盤點原子能科技於民生應用之技術群組，綜整會議結論，匯集各領域專家學者建言，研擬因應策略與措施。

3.1 健康與民生

3.1.1 醫療

表 3-1 所列为「醫療」領域之技術群組項目及排序。由於國內在放射診斷藥物及放射治療藥物的研發上，已累積一定能量，普遍認為未來應持續發展，故發展優先排序最高，且由於診斷重於治療，故應以放射診斷藥物研發為先，其次為放射治療藥物。由於藥物研製後，需經食品藥物管理署查驗登記，才能臨床試驗，其中需具藥物法規背景的專業人力協助，然相關人材較為缺乏。另外，有關 AI 應用在放射醫療影像，國內已有實際案例¹⁵，但由於 AI 影像技術可用來評估劑量(dosimetry)的需求，或是結合機器學習或深度學習辨別出特定的腫瘤紋理，以對病患癒後提供相關資訊，但目前應用在臨床判讀的價值較低。

根據行政院第十一次全國科學技術會議中的「議題二：科研與前瞻」，因應科技跳躍性發展，需要跨部會與跨域協作的科研布局，提出許多前瞻技術，其中在精準醫療(Precision Medicine)方面，原能會核研所在放射診斷/治療藥物研發上，已積累相當能量，茲如在今年疫情核研所在穩定國內供藥上就發揮很大作用，且配合第二台迴旋加速器的規畫建置，未來在藥物供給上

¹⁵ 於 2019 年臺北榮總開始用 AI 來輔助醫生進行複雜的醫療影像診斷，協助判讀腦轉移瘤的核磁共振造影(Magnetic Resonance Imaging, MRI)(臺北榮總，2019)。

勢必扮演更重要的角色。故配合我國未來科技政策的跨部會與跨域布局，精準醫療亦可視為值得發展的技術群組。

表 3-1 「醫療」領域之技術群組排序結果

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

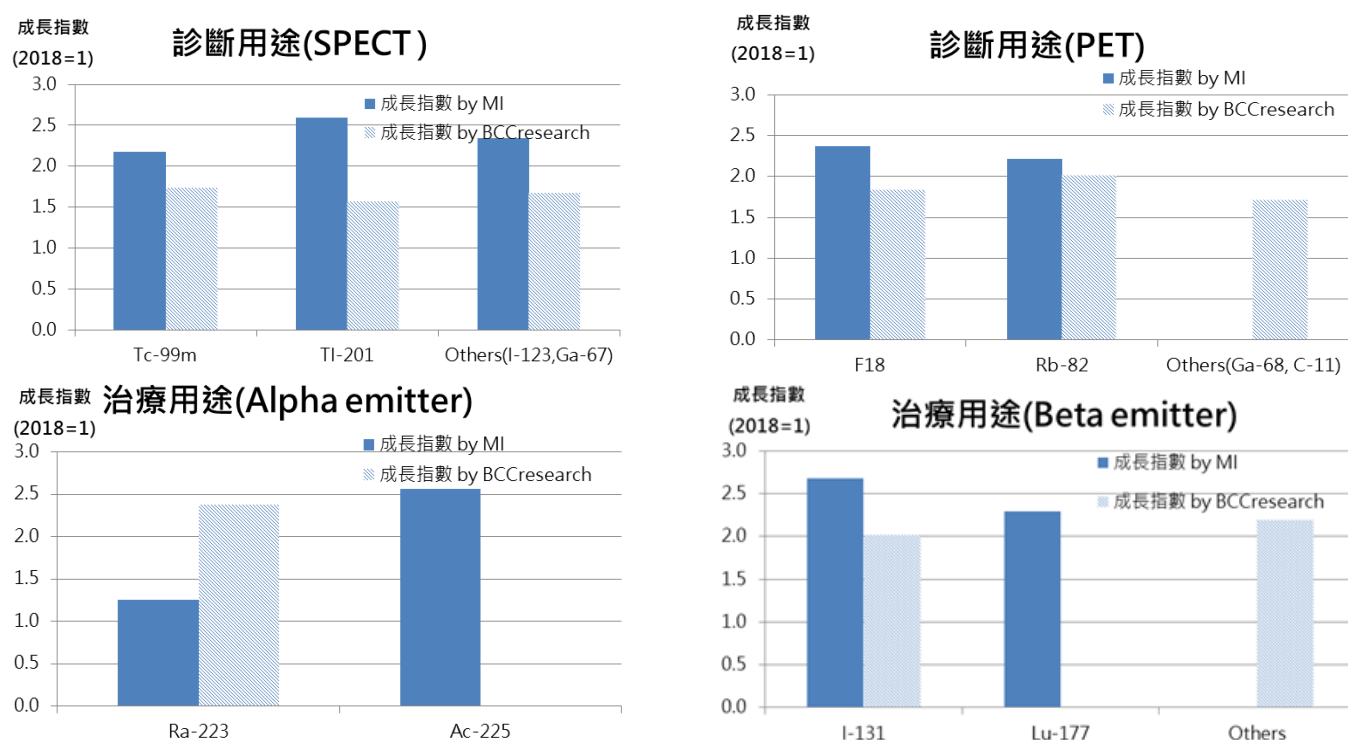
註：(1) FAPI: Fibroblast activation protein inhibitor (纖維母細胞活化蛋白抑制劑)

(2) Alpha-synuclein： α -突觸核蛋白(腦神經退化造影劑)

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

根據日本內閣府原子力委員會(2017)的研究，其 2015 年原子能於醫療應用的市場規模約 1.9 兆日元，若以日本 2015 年投入產出統計資料中估算(Statistics of Japan, 2020)，醫療相關產業(醫藥品及醫療保健)之總產值約 55.8 兆日元(約新台幣 15 兆元)，比例約占 3.5%，其中影像診斷(含牙科)、PET 及電腦斷層造影(computed tomography, CT)用於癌症檢查及乳癌檢查占醫療應用經濟規模的近 8 成。

由本研究來看，不論是診斷及治療，所需要相應的核醫放射藥物/同位素開發及自產是值得我國優先投入的方向。參考 Mordor Intelligence 及 BCCresearch 等國際報告分析之放射性同位素需求規模，大致分為下面 4 類(如圖 3-1) (Mordor Intelligence (2019), BCC Research (2019))，其中診斷用途方面含單光子斷層掃描儀(single photo emission computed tomography, SPECT)和 PET 所需搭配之同位素，SPECT 使用的放射性醫用同位素占市場最大宗，PET 使用的放射性醫用同位素則次之，不過未來的成長速度也較快。而治療用途方面， α 粒子(emitters)治療藥物或 β 粒子治療藥物市場規模雖然較診斷用途之市場小，但成長性都很高，2023 年 PET 使用之放射性同位素藥物之市場規模約是 2018 年的 1.8 至 2.3 倍之間，而治療用途的藥物也都在 2 倍左右。



資料來源：Mordor Intelligence (2019) and BCC Research (2019)，本研究推算及繪製。

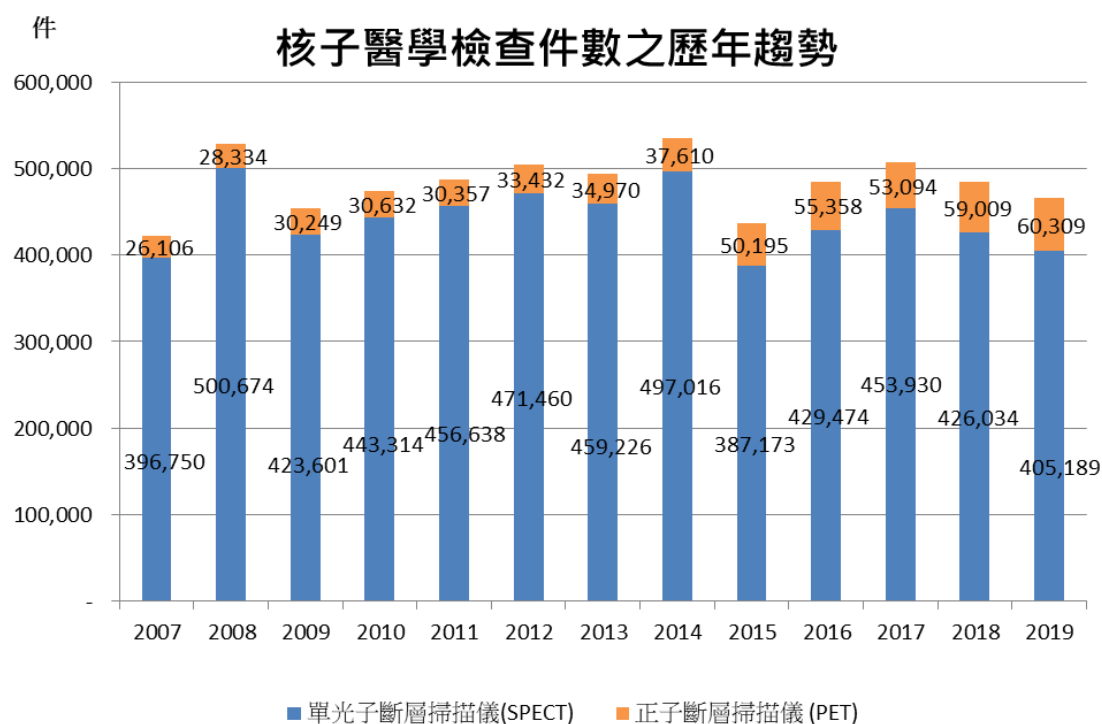
圖 3-1 全球診斷及治療用途之同位素需求

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

從診斷的成長趨勢來看，日本 2007 年 SPECT 檢查次數占 7 成以上，但 PET 檢查件數則成長快速，10 年間約成長了 0.7 倍，至 2017 年有近 4 成是採 PET 檢查，因此 PET 使用的同位素造影劑需求隨之增加。另外從治療來看，日本的密封型放射性同位素用於治療攝護腺癌的需求最多，子宮頸癌、子宮內膜癌、腦血管疾病等也都有需求(JRIA, 2018)。而非密封型放射性同位素，則用於治療甲狀腺機能亢進及甲狀腺癌為主，占約 8 成，不過近年則有大量應用於攝護腺癌的骨轉移，占了約 3 成(JRIA, 2020)，主要原因可能在於攝護腺癌位居日本男性癌症第二高，國內需求明確。

若比較日本與我國 PET 及 SPECT 之年使用次數(如圖 3-2) (衛福部, 2019)，日本人口約是我國的 5 倍，日本 PET 使用次數則高於我國許多，是我國的 10 倍，顯示日本使用 PET 已形成趨勢，我國 PET 檢查次數較 10 年前成長了近 1 倍之多，但仍以 SPECT 為主流，而由日本之經驗可知，PET 未來之需求及所需的同位素成長相當可期。另外，我國前 10 大癌症也包含乳癌(女性)、肺癌、攝護腺癌、甲狀腺癌等，和日本核醫應用相近，且約有一半的癌症患者會接受放射性治療。不同於日本，我國肝癌人數在前五大之列，因此針對肝癌所需之核醫藥物(如氟-18 去氧葡萄糖是肝癌 PET 造影最廣泛使用的核醫藥物(曾玉琴、王美惠，2019)對國內相對重要。

除了癌症檢測，臺灣地區老年人的比例已迅速上升，依據衛生福利部(民國 100 年)委託台灣失智症協會進行之失智症流行病學調查結果(Sandia National Laboratories, 2020)，以及內政部 108 年 12 月底人口統計資料估算：台灣 65 歲以上老人約 360 萬人，其中輕微認知障礙(mild cognitive impairment, MCI)有 65 萬人，失智症有 28 萬人，占 7.78%，也就是說 65 歲以上的老人約 13 人即有 1 位失智者。由日本 JRIA 的分析及我國之需求(張剛瑋，2020)，診斷失智症所需的診斷技術及同位素(如 F-18)具有市場潛力。及早佈局 PET 診斷所需之放射診斷藥物，以及目前市場需求大但國際尚未成熟、獨占之放射性治療藥物所需之同位素，因應未來之需求並使我國減少對進口核醫藥物的依賴程度，甚至可進一步供應鄰近亞洲國家之需求。



資料來源：衛福部(2019)

圖 3-2 台灣 SPECT 及 PET 檢查次數統計

3.1.2 糧食及農業

有關「糧食及農業」領域的技術群組項目及排序如表 3-2 所列。由於我國精緻農業相當仰賴出口，而利用輻射照射控制蟲害防治已成功應用於高價水果，且產業鏈有一定規模及技術可行，故技術群組「輻射照射用於蟲害防治」的發展優先排序最高；「輻射照射於食品安全及品質檢測」由於技術相對成熟，若有高單價食品之標的產品進行開發相關流程，可延長儲架壽命與提升產品品質與增加實際價格，故應受到重視。在國際上，IAEA 與聯合國糧食和農業組織合作，利用昆蟲不育技術作為蟲害綜合治理方案的一部分，於 2018 年為塞內加爾(Senegal)的尼亞伊(Niayes)地區抑制采采蠅(tsetse fly)的工作提供了有益支助；同年，IAEA 在防治作為登革熱(dengue)、基孔肯雅熱(chikungunya)、寨卡病毒(Zika virus)和黃熱病(yellow fever)傳播媒介的埃及斑蚊和白線斑蚊等傳播疾病蚊蟲的昆蟲不育技術方面取得了重要的研發進展，有助於抑制病媒蚊(IAEA, 2018)。

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

要原理為利用輻射照射害蟲，干擾其正常細胞功能，使其發生延緩或停滯新陳代謝作用，無法發育及羽化，達到殺蟲目的(陳素琴、許雅真，2016)。

在發展優先排序高的另一項技術群組「輻射照射於食品安全及品質檢測」，早在 1900 年代就有食品輻照相關研究，初期應用於抑制農產品內的微生物、殺滅食品中的有害生物、延遲蔬果的熟化、抑制馬鈴薯及洋蔥發芽以及降低新鮮蔬果貯運過程中腐爛率(陳素琴、許雅真，2016)，其技術相對成熟，若能針對高單價食品之標的產品進行開發相關流程，可延長儲架壽命與提升產品品質與增加實際價格。

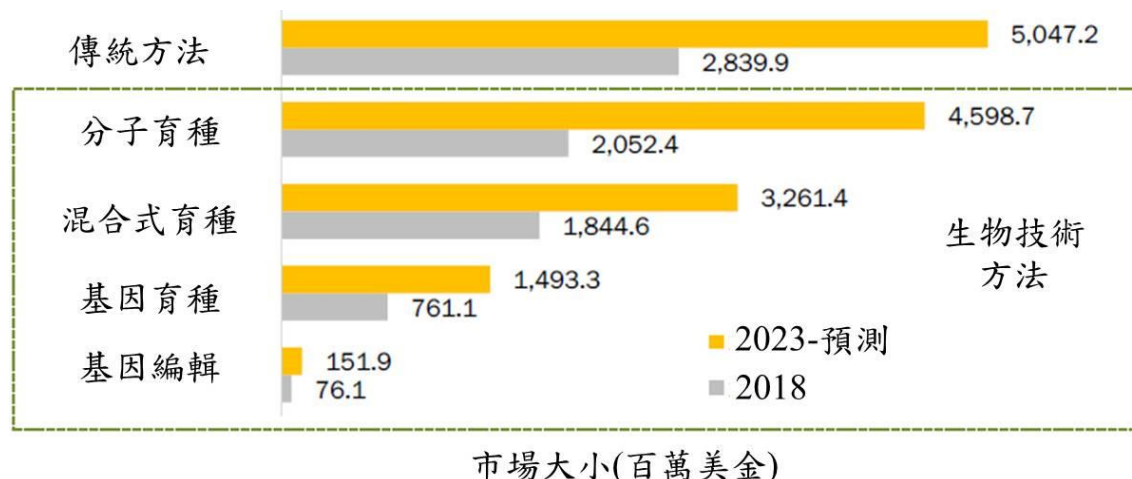
表 3-2 「糧食及農業」領域之技術群組排序結果

發展優先排序	技術群組項目	綜合建議
高	□ 輻射照射用於蟲害防治 □ 輻射照射於食品安全及品質檢測	1.輻射照射用於蟲害防治對於相當倚賴經濟作物出口的本國精緻農業而言，利用輻射照射控制蟲害防治已成功應用於高價水果，整體產業鏈已有一定規模，具有可行技術層面，相關投入之技術開發應有立即性的回饋，另於飼養前後場域之環境病蟲害卵及孢子的清除或消毒亦可有相當廣泛的應用。 2.輻射照射於食品安全及品質檢測技術相對成熟，若有高單價食品之標的產品進行開發相關流程，可延長儲架壽命與提升產品品質與增加實際價格。
中	● 農業環境清潔，例如有害氣體(如甲烷、硫化氫)的消除 ● 穩定同位素量測應用於產品溯源、產區識別、真偽鑑定	1.農業環境清潔可透過原子能科技打斷有害分子的化學鏈結，有效達到消毒滅菌的功用。 2.穩定同位素檢測於糧食與農業領域，可作為同位素溯源(貿易)、產區識別、真偽鑑定，具民生應用的重要性、可行性及產業化可能性之潛力，另可用於作物於逆境生長的觀察及量測，進而找出改良方式。
低	◆ 突變/誘變育種經濟價值作物 ◆ 輻射照射於誘變根圈微生物及園藝作物誘變育種之開發與應用	現今的基因都已可解碼，特殊基因的基因轉植技術於作物改良上已經相當成熟且廣泛利用，而透過突變/誘變的方式為傳統品種改良，其缺點為機率小且無方向性。

另於「醫療」領域中的同位素示蹤劑在農業領域亦相當重要，可用來追蹤某種植物的生長(如在逆境情況下的生長)，對植物產量及產值具有效益。而原子能科技於農業上應用，可與生物產業機電等系所長期合作，以達技術深根，且如何從學術研究至實際應用，亦需具機電整合

背景的專業人力，才可達產業化目標。最後，建議可加強輻照技術可提升安全但不會汙染食品的科普教育。

在核研所方面，農業部分一直有在進行食品和照射的相關研究，而在 2020 年也有以鈷-60 進行花卉介質滅菌及殺蟲，有些民眾對於食品在照射後會有疑慮¹⁶，但國內在此部分一直沒投入較多資源研究，僅對於大蒜有明顯探討，且亦可以採用基因編輯等其它方法，此部分未來仍需配合所內發展調整。有關農作物不同生物技術方法至 2023 年的市場規模大小如圖 3-3 所示 (Marketsandmarkerts, 2018b)。



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

Source: MarketsandMarkets (2018b)

圖 3-3 植物育種市場(2018 至 2023 年)

3.2 能資源與環境

在能資源與環境方面，本策略藍圖著重於「環境及水資源」領域。以穩定國內發展永續精緻農業為前提下，開發整合性穩定同位素分析、地球化學、地下水水流與傳輸模擬等技術及應用，能提供研究開發抗旱作物機制及用水量管理、國土土質及水源監測、地下水或土壤鹽化評估等監控平台，以作為解決方案決策參考及增加國土永續發展應用契機。表 3-3 為與「環境及水資源」相關之技術群組項目及排序，目前水利署重視的是以穩定同位素探討河川地下水補注量及使用量問題，因此以「全國地下水資源穩定同位素與水文地質分布圖集繪製」及「環境示蹤劑應用」為發展順序最高的技術群組，原能會可與水利署、環保署等單位溝通，在委託計畫

¹⁶ 應用輻射能量照射食品，大眾對於處理食品中殘存輻射物質，及其安全性有所疑慮，甚而擔心有致癌性，或認為輻射照射食品中的成分被破壞殆盡而失去其營養價值，這所有疑問，只能藉由食品化學之研究分析，方能解開這疑惑。因此，全世界的食品安全專家，進行許多食品安全測試外，另一方面進行輻射照射化學研究，得知輻射可以產生活潑自由基和游離產物，然這些物質在短時間內即轉變成穩定產物，並藉由相關試驗結果證明應用低輻射劑量照射的食品安全性高(陳素琴、許雅真，2016)。目前輻射照射食品已是許多國家簽訂農產品進出

上要求民間單位使用穩定同位素等相關技術，以帶動產業需求。而「發展 X-ray CT」主要是 CT 在台灣很有發展潛力，可應用於工程細部結構上的檢測。在研究及可行性評估階段，政府可先挑選重要技術並投入資源培植，待技術成熟後，再進入市場以帶動產業化，例如在離岸風電建置上，目前遭遇的是海床的地質結構問題，此與海床地下水有關，其在飽和情況下可能造成土壤液化，而導致風機倒塌，此議題目前於國內並無單位可解決；另外在風場開發上，還需要能對鑽取的岩心進行破壞性檢測的儀器，這些工作在國外海事工程、石油工程界已逐步成為標準工作程序及全球趨勢。國內未來若能投入相關軟、硬體開發及推展實務應用，在我國各項電子產業供應鏈完整的狀況下，是下一步能投入的高階理論及技術工作。

另外，在碳-14 直線加速質譜儀方面，由於其相當昂貴，全球(美國除外)每個國家最多 1 至 2 台。目前國內學術使用的碳-14 直線加速質譜儀建置於台大，但是否能商業化至地下水定年，仍值得探討。目前國際文獻中，穩定同位素比值質譜儀(stable isotope ratio mass spectrometer, IRMS)之鑑識利器已廣泛被運用於地質、海洋、環境變遷、環境汙染、醫藥及藥檢、農業、生態及鑑識科學等領域。穩定同位素的分析與鑑定技術(例如：氫、氧、碳、氮和硫等穩定同位素)可增加對於這些元素在自然生態系統中的瞭解、分布，並加以廣泛應用於農業及相關生態環境上的各項研究工作中，同時 IAEA 亦早已將此方面技術的發展，列為原子能科技於和平用途應用之重點，顯現此領域已是國際發展的必然趨勢。

表 3-3 「環境及水資源」領域之技術群組排序結果

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

3.3 前瞻應用科技

3.3.1 量子科技

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

中國

推動量子資訊科學是中國 2006 - 2020 年國家中長期科學和技術發展的第一優先要務，在這 15 年計畫中就有 4 項重大科技專案與量子科技有關，並指定量子通訊為 2030 年前六大科學

與技術開發專案之一，尤其特別關注量子金鑰傳輸，每年投資在量子技術約 2.44 億美元，並推動世界上最大的國家量子計算倡議，導致中國研究人員發表量子計算相關的科學論文是量子通訊論文數量的兩倍多，此外中國也建設合肥國家綜合科學中心及其量子資訊和量子科技創新研究院，它被認為是安徽省科技創新的“第一號工程”以推動量子力學和量子資訊基礎研究、量子資訊技術應用以及關鍵設備的研發，各大企業也創立自己的量子研究實驗室或是合資開創新量子公司。

美國

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

國防高等研究計畫署(Defense Advanced Research Projects Agency) 則是進行了三個量子技術專案包括量子通訊系統的發展、量子輔助的感測及成像計畫，以及量子軌道共振光譜項目，希望利用量子光子學更好地評估創傷性腦損傷和創傷後壓力症候群。情報高等研究計畫署(Intelligence Advanced Research Projects Agency) 的量子增強優化項目涉及多年的研究努力，以開發特殊用途的量子演算法和硬體，專注於解決困難的優化問題。洛斯阿拉莫斯國家實驗室(Los Alamos National Laboratory)量子研究所成立於 2002 年，專注於量子計算和量子密碼學。量子人工智慧實驗室是一個由美國國家航空暨太空總署(NASA)、大學空間研究協會和谷歌聯合組建的，旨在探索量子電腦解決傳統超級電腦難以或不可能解決的問題的潛力。國家安全局則是專注於量子密碼分析並確保政府重要系統的安全。

美國海軍研究辦公室量子計畫支持研究海洋環境對量子金鑰傳輸的安全影響和量子電腦演算法，以直接支援海軍。桑迪亞國家實驗室在過去的 11 年裡已經在內部研究基金上投資了大約 7600 萬美元，以資助在各種項目下的量子感測、量子通訊和量子計算的研究。市場上，大量量子新創公司也紛紛成立，而大企業包括谷歌、微軟、IBM、英特爾、洛克希德·馬丁在內的主要科技公司都在資助量子計算研究。

歐盟

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

日本

日本政府於 2016 年成立國立研究開發法人量子科學技術研究開發機構(National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology; QST)，以推動量子科學與技術的進步，每年投資約 4.87 億美元。此外日本教育、文化、體育和科技部也計畫建立一個專門關注光學和量子科學的研發中心，企業的部分，東芝公司在量子密碼學和量子計算方面也有一定程度的投資，並在劍橋研究實驗室成立了量子資訊集團。

南韓

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

新加坡

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

表 3-4 所列為「量子科技」領域之技術群組項目及排序：量子科技屬於曼哈頓計畫，需大量的人力(至少數百人至千人在某特定技術群組)及經費(一年至少數億至數十億在某特定技術群組)才能成功發展，台灣身為小型經濟體，無大量資源拚全球領先，建議至少保留穩定經費投資在教育、基礎研究或量子演算法上，以持續培養人才，維持基本能量，待量子科技有某全球領導者勝出後，台灣再利用既有人才，專攻其中的關鍵零組件製作或運用量子科技以解決各種應用問題。以臺灣目前的狀況來說，量子科技領域最重要且最有效的投資還是教育，無論要培養量子科技的老師或是學生都是必須的，有了充裕的人才庫，未來發展任何子領域才有成功的可能。若要坚持培養量子科技人才，建議仿照國際主流趨勢，將量子科技納入高中課綱，提前佈署下一量子世代的人才庫。

表 3-4 「量子科技」領域之技術群組排序結果

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

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，建議先專攻編譯器(compiler)演算法，這樣才能讓普羅大眾、其他領域的人才也能進來撰寫程式及應用量子電腦解決各領域的問題。若要發展量子科技，除了倚靠政府經費，更要想辦法得到產業的支持，才有可能有足夠的經費與人力，尤其是目前量子科技的關鍵零組件製作都與半導體技術有關，而台灣未來的半導體產業要在全球持續領先，優先布局量子科技的各項候選技術及培養人才是無法避免的趨勢，建議政府可協助促成政府、半導體產業及學界形成三方聯盟，共同發展量子科技。而台灣現在量子科技所投資的量子硬體技術太發散了，針對

量子電腦及量子模擬器(硬體)所列三項技術：超導量子位元、矽量子點以及量子光電晶片，是科技部目前認可的三項技術發展，但不代表這三項技術就是目前硬體領域最應優先發展技術，未來可就硬體領域再做更詳細的規畫。以目前台灣的人才及經費，還是建議專注於某一特定量子硬體技術，否則不易有成果出現。

量子目前之重心在發展硬體，但設備昂貴，故建議我國以培養人才優先，後續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。國際市調報告顯示量子計算較量子通訊以及量子感測之市場大 (占總體市場約 8 成)，目前量子計算中，硬體市場規模又占整體近 8 成，未來硬體部分的年複合成長率達 32%，占市場規模的 5 成左右，而未來應用軟體的年複合成長率更高達 59%，占市場規模的 3 成以上(圖 3-4) (Mind Commerce, 2019)。量子計算應用所觸及的產業分佈很廣，包含：保健及製藥、金融業、政府及公共安全、國防及航空航太等合計占 5 成以上(圖 3-5) (Mind Commerce, 2019)。

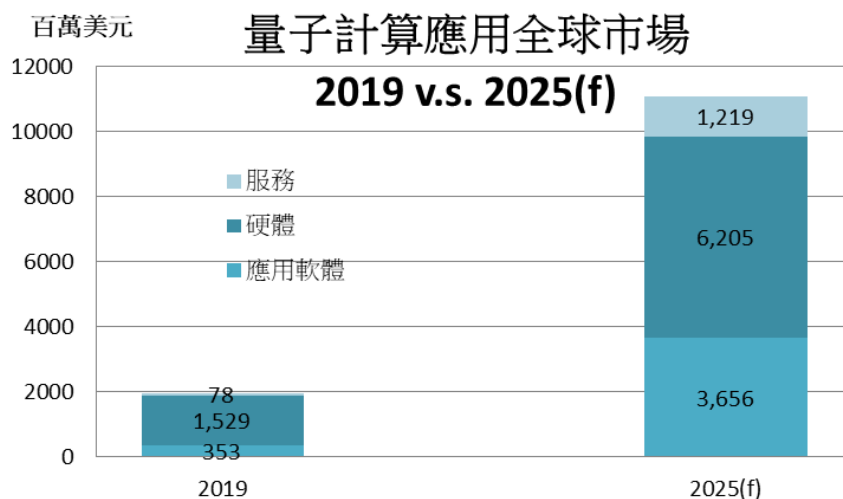
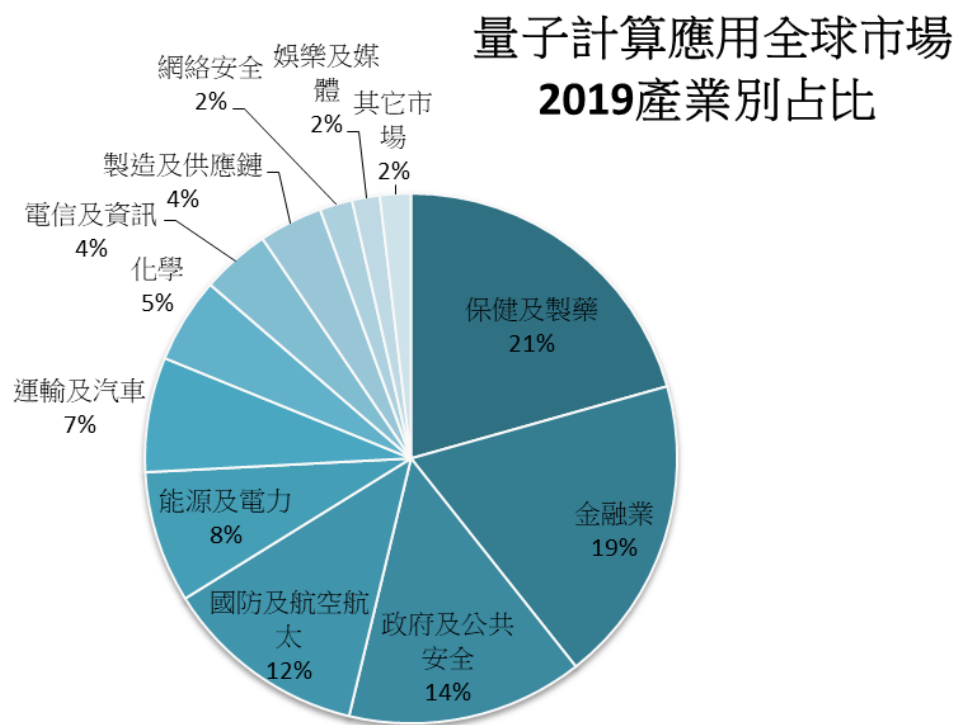


圖 3-4 量子計算應用全球市場推估



Source: Mind Commerce(2019)

圖 3-5 量子計算應用全球市場 2019 產業別占比

3.3.2 中子科技

在「中子科技」領域中，國際上如美國、歐盟、中國、日本、澳洲、韓國、印度及印尼等先進與新興國家，都先後積極投資中子設施的建設與開發。我國目前並沒有大型的中子研發基地，但透過切合國家發展需要的選題，引入合適的中子設備，與篩選合適積累的方向，將可用上中子這項各國已經導入民生科技，超前部署我國的未來情境(黃爾文，2020)。以澳洲為例，澳洲核子科技組織(Australian Nuclear Science and Technology Organisation, ANSTO)定位中子應用的新方向為新興工業的研發，以助澳洲擺脫太過倚重礦業出口的產業困境，藉由中子非破壞的研究優勢，結合大學與研發單位，選定智慧機械中的新興主題 3D 列印，以研發優勢，從原料到製程、再到產品的全套產線 know-how，其它的新興領域還包含了超導電纜的研發、與波音公司合作的航太元件開發、雪梨大橋的防蝕與除垢、大型金屬管線焊接、電廠使用扇葉危安檢測與交通基礎建設中的鐵軌及飛航安全。

表 3-5 所列為「中子科技」領域之技術群組項目及排序。目前國內之同位素生產及其應用已在進行，應持續並繼續精進，而可用於生產同位素如迴旋加速器中子源設施各國皆積極投入資源建設，如日本住友 ATEX 株式會社(SHI-ATEX)的加速器中子源(杜定賢，2019)。SHI-ATEX 的中子源是屬於加速器中子源，是利用 18MeV 質子束撞擊靶材而產生中子，而日本中子源規模從大到小皆有且數量不少，中子源類型包括反應器中子源(JRR-3, KUR)、散裂中子源(J-PARC)及加速器中子源(RANS、KUANS、HUNS、SHI-ATEX 及 IBNCT 等)，其中加速器中子源數量

最多，分佈如圖 3-6 所示(Yoshiaki Kiyanagi, 2019)。日本中子源除了傳統的中子散射、中子繞射及中子照相應用外，也致力於發展醫療應用，尤其用於中子捕獲治療(BNCT)。中子照相是中子源的基本應用，圖 3-7 所示為日本兼具中子照相用途的中子源分佈(Yoshiaki Kiyanagi, 2018)，圖中的數值是指該中子源位於樣品處的熱中子通率。

表 3-5 「中子科技」領域之技術群組排序結果

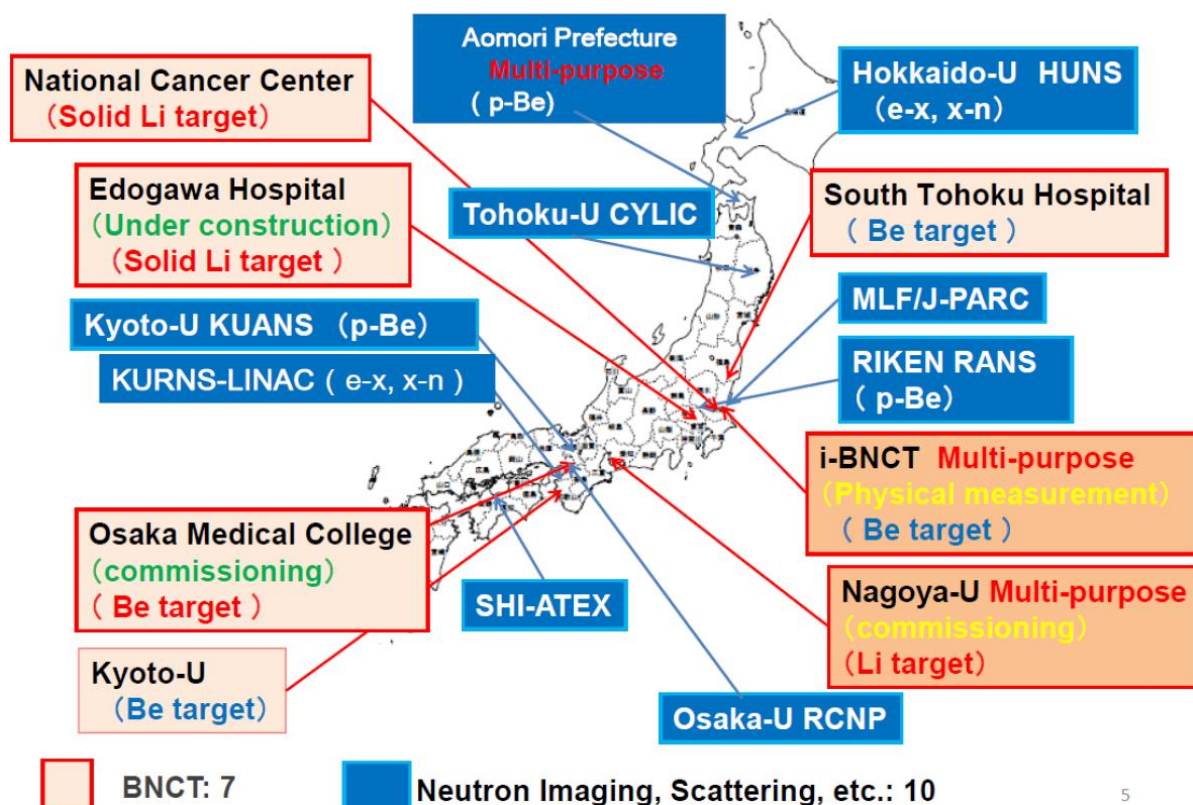
發展優先排序	技術群組項目	綜合建議
高	▣ 同位素生產及其應用 ▣ 新型功能性材料開發(能源材料、生醫材料) ▣ 中子斷層影像、殘餘應力分析(包含醫學、非破壞性檢測、國防及航空檢測)	1.同位素生產及其應用目前已在進行，應持續並繼續精進。 2.在材料研究及開發的應用中，中子技術是唯一能有效檢測微量摻雜、磁特性、輕原子的工具。 3.中子斷層影像、殘餘應力分析值得國內積極推展，其應用範疇相當大，在醫學為異質細胞早期偵測，工業則為非破壞性檢測。
中	● 生物分子功能(如蛋白質酵素、糧食改質)研究 ● 中子活化分析	1.糧食改質研究時間較長，短期不易見成效。 2.中子活化分析已可以用其它方法取代。
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

其它茲如中國在 2017 完工的散裂中子源(China Spallation Neutron Source, CSNS)，是繼英、美、日後的世界第四個散裂中子源，預期具中子核(neutron nuclear)資料量測、中子檢測器校準及中子輻射等效益(中國散裂中子源工程，2020)；歐洲散裂中子源(European Spallation Source, ESS)位於瑞典隆德，是一所正在建設中的跨領域科研機構，其迄今世界上通量最高的脈衝散裂中子源，來自歐洲的 17 個國家攜手建設和共同運營這，散裂過程產生的中子束能夠為材料科學、化學、醫學、生物工程和地球物理學等科學實驗提供幫助。實驗設施建置在隆德，數據管理和軟體中心坐落於丹麥的哥本哈根(ESS, 2013)。

有鑑於上述各國積極建置中子源設備，核研所亦規劃建置第二台迴旋加速器，其重要性除了作為中子源，以回復核研所以往的中子應用研究外，亦可進行質子應用研究如國家太空科技

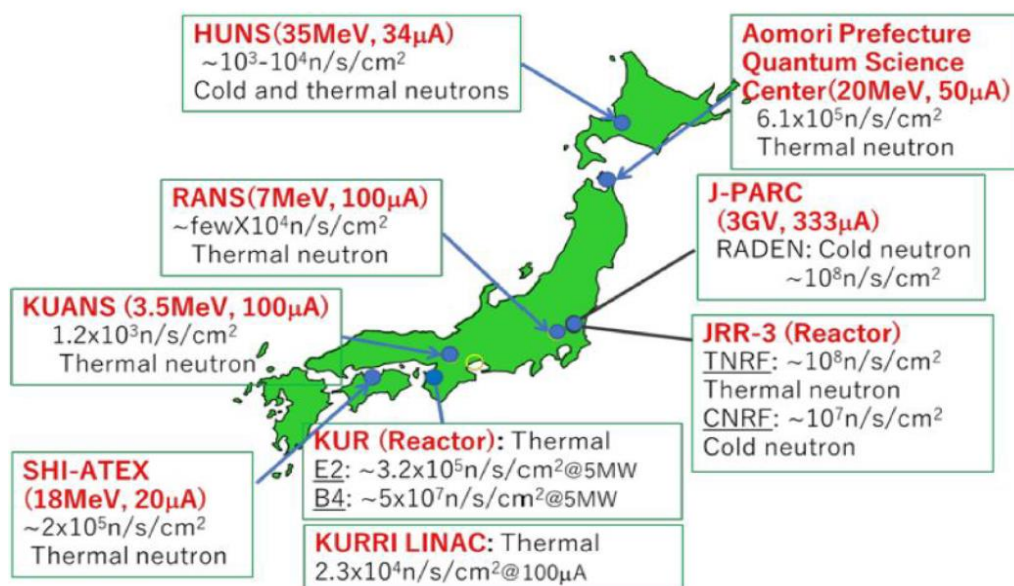
抗輻射檢測平台，並提供開發新醫用同位素及核醫藥物所需的同位素，與備援現有核醫藥物生產，未來還可進行銅系元素核轉換研究(杜定賢，2020)。故可知核研所第二台迴旋加速器的建置，對我國未來科技、醫療、經濟，乃至國防自主能力的提升都相當重要。

小型中子源一般是指可和交通運輸工具結合的可攜式中子源；中型中子源在國內除可作為教育目的，亦可提供國內核醫所需的同位素(例如今年疫情核研所的迴旋加速器在穩定國內供藥上就發揮很大作用)；大型加速器散裂中子源建造耗資太大，台灣必須加強尋求國際合作，運用於新型材料分析與開發。此外，政府應重視人才培育，以避免在完成相關儀器建置後，無相關專業人力可運作。



Source: Yoshiaki Kiyonagi(2019)

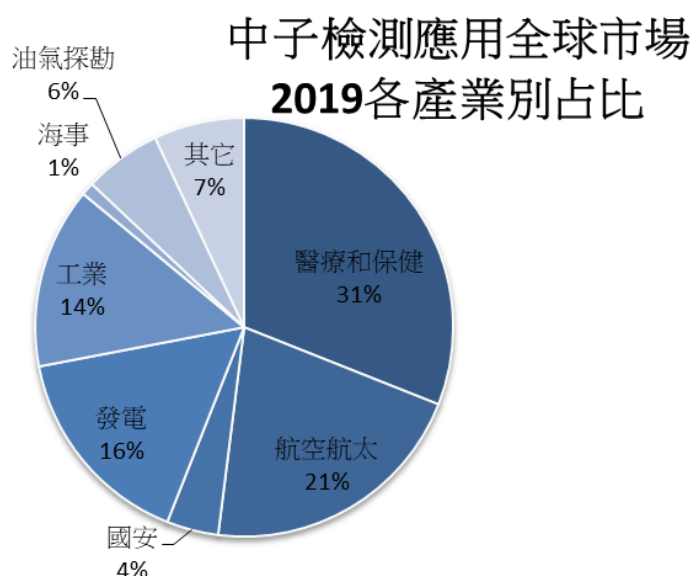
圖 3-6 日本中子源設施分佈



Source: Yoshiaki Kiyanagi(2019)

圖 3-7 日本兼具照相用途的中子源設施分佈

值得我國開發的中子應用包含同位素生產及應用、新型功能性材料開發以及中子斷層影像及殘餘應力分析等。由於中子源設施之運維有一定的成本壓力，我國同步輻射中心，運作以科學研究為主，提供國內科研學者使用，如果國內另有資源投入中子的應用，可定位為互補的、朝民生科技、應用經濟相關的議題發展，如前面醫療相關應用所提同位素之市場需求，新型功能性材料開發市場包含我國所需之能源材料(如電池)、生醫材料等。從全球市場中子檢測之使用端角度來看(如圖 3-8 所示) (Industry ARC, 2020)，醫療保健占了 1/3，航空航太及工業占比亦超過 1/3。中子對於大型物件的穿透力，可以幫助風機渦輪等關鍵零組件的殘餘應力分析等疲勞壽命的研究。對於特殊原子的中子截面積可以有助於偵檢傳統研究設施不易量到的特殊元素，進而應用於儲氫、鋰電池、鈉電池、先進觸媒材料技術的研發(黃爾文，2020)。



Source: Industry ARC (2020)

圖 3-8 中子檢測應用全球市場 2019 各產業別占比

3.3.3 太空科技

近年來美國及歐洲正快速大規模發展體積小、重量輕的低軌道(Low Earth Orbits, LEO)衛星，預估在 2027 年前，還會有 20,000 顆 LEO 衛星升空。衛星使用的半導體元件在太空中會受到游離輻射環境影響，造成總游離劑量效應(Total Ionizing Dose, TID)、單事件效應(Single Event Effect, SEE)等而無法正常運作，因此為了研發抗輻射晶片，輻射效應對半導體元件所造成的傷害與防治是非常重要的課題，而研發抗輻射晶片需要建立可以模擬太空游離輻射環境的平台，以進行相關元件對於高輻射環境的可靠度測試。有關太空輻射對衛星各個次系統的影響可參閱文獻(黃楓台、林俊良，2020)。

行政院已核定國家太空科技長程計畫第 3 期，自 2019 年至 2028 年，投入總預算 259 億元，十年內要建造九顆自主衛星，以帶動國內太空產業。我國在電子元件及半導體領域有很好的優勢及完整供應鏈，把一般電子元件升級成為太空規格，有助提升國內電子元件及半導體產業附加價值。2020 年 7 月 21 日，國研院太空中心與長庚醫院、長庚大學、核研所、宜特科技、中研院物理所及清大原科中心，共同組成「台灣太空輻射環境驗測聯盟」，透過聯盟成員各自具備的輻射測試、驗證與分析能量，經由專業分工與策略合作，建立國內完整的輻射測試環境、測試規範與驗證機制。

表 3-6 所列為「太空科技」領域之技術群組項目及排序。原子能科技應用於太空科技屬於總統所提 6 大核心戰略產業第 4 項「軍民整合的國防及戰略產業」中的航空及太空產業，政府應會大力支持。而台灣基於完整的半導體產業鏈，包括製程、IC 設計、電子設計技術等，若可結合抗輻射技術，可生產適用於 6G 世代所需微型低軌道衛星；另外，商業化太空科技為未來 10 年國際上之發展重點方向，台灣應掌握良機，適時切入國際市場，帶動產業升級。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，可使用超過 10 年才具可行性。

表 3-6 「太空科技」領域之技術群組排序結果

發展優先排序	技術群組項目	綜合建議
高	▣ 抗輻射之電子電路設計技術 ▣ 太空用的積體電路製造技術	半導體元件設計原本就為我國強項，只要加強抗輻射之設計經驗和技術，可生產出因應未來大量發展低軌道衛星所需要的抗輻射半導體原件，是最重要且極具有產業化可能性的技術。
中	● 抗輻射之太陽能電池及衛星電池製程發展	由於國內電池需求量小因此廠商目前並無太大意願投入，但隨著未來低軌道衛星將大量發展，抗輻射電池將具有廣大市場，台灣目前電池製造業已經有技術成熟且成本低的優勢，只要加強抗輻射技術，未來在太空科技領域極具產業價值。
低	◆ 精進模擬太空游離輻射環境設施和即時量測系統⁽¹⁾ ◆ 半導體元件及晶片於輻射效應下之可靠度研究及測試方法⁽¹⁾	目前國內已經具有模擬太空游離輻射環境設施，對於高能輻射研究與測試相當重要，須要再精進。通常須由特定單位如核能研究所等提供服務，因此本身無法形成產業。

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

低軌道衛星因為發射成本低、研發週期短等，近年來用於地球觀測、氣象、科學研究探索、通訊、導航與國防監視等，可實現衛星網路覆蓋全球之目標，2017 年開始大幅度成長，年複合成長率達 44%，如圖 3-9 所示(呂珮如，2020)。由於衛星上使用的電子元件體積越做越小，使得元件每一次狀態改變所需的能量和電荷越來越小，這導致太空輻射造成的單一事件效應變得嚴重(黃楓台、林俊良，2020)。因此如何提升在太空使用的電子元件抗單一事件效應的能力，是太空科技特別關注的議題，也是原子能技術重要的前瞻性民生應用。抗輻射之電子電路設計技術、太空用的積體電路製造技術有高度國內需求，因我國具有 IC 全球優勢，在太空科學領

域也具有相對影響力(如圖 3-10 所示)(科技部，2019)，可能對規格具有引導力，因此值得優先投入。而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，可與現行利潤偏低的太陽能電池及鋰電池作市場區隔，另外國內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，可模擬太空環境中的輻射量)，供各種應用層面之零組件進行測試及驗證，作跨產業的應用，擴大產業衍生效益。

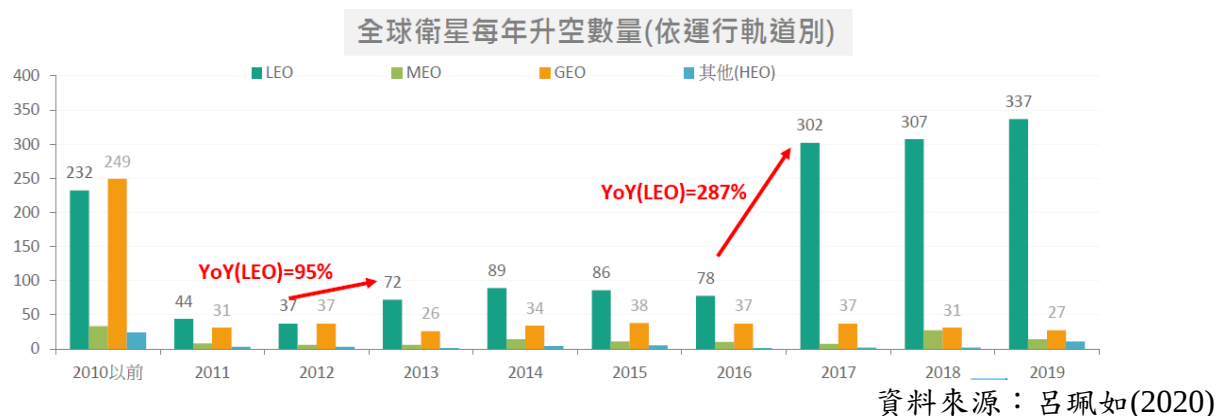


圖 3-9 低軌衛星之應用及成長態勢

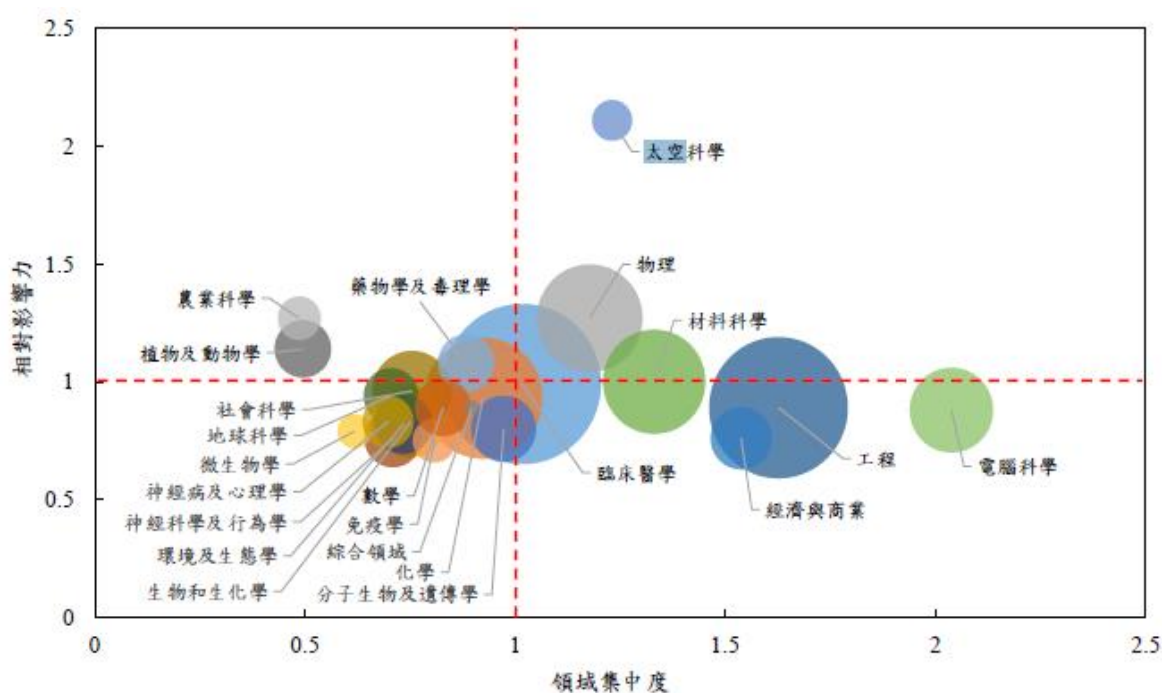
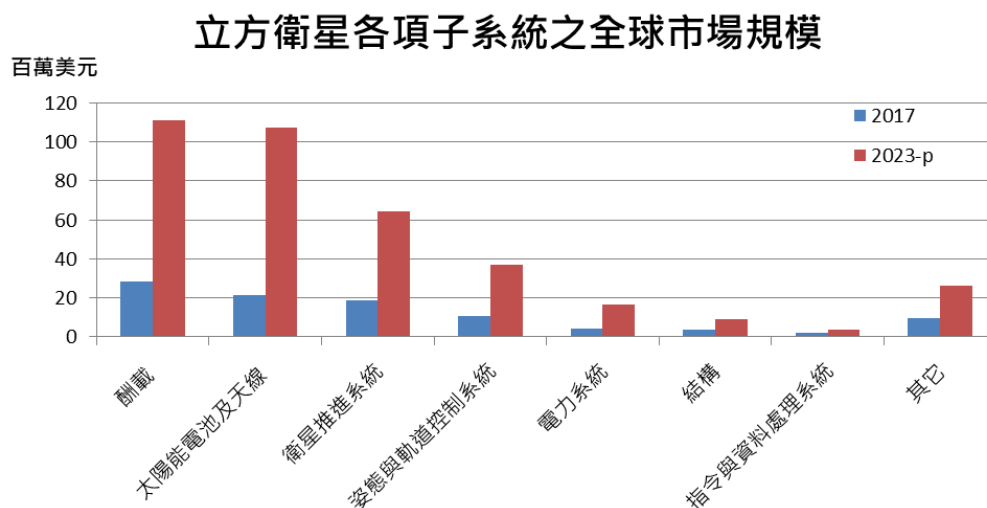


圖 3-10 台灣各學科領域的競爭力分析

ITIS 陳靖惠(2020)分析中引用經濟部航太小組的估算，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)，根據 IEK 呂珮如(2020)分析台灣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(呂珮如(2020)、蘇明勇(2019))。

MarketsandMarkets(2018a)顯示，未來立方衛星所需之太陽能設備及天線之全球市場規模僅次於衛星酬載(如科學實驗的儀器、通訊設備等)，如圖 3-11 所示，太陽能設備及天線市場將占立方衛星製造市場的 30%，年複合成長率達 25%，是成長率最高的項目。而各項子系統都必須用到抗輻射之晶片，因此太空環境驗證之跨產業共同平台的應用層面很廣，衍生之產業效益不可小覷。MarketsandMarkets(2018a)估計 2023 年全球衛星製造產值高達 375 億美元，以 2019 年我國衛星製造占全球產值之比例估計國際市場滲入率，我國衛星製造約占全球衛星製造產值的 0.6%(呂珮如，2020)；但若台灣未來積極發展衛星製造，以目前我國目前衛星地面設備之國際市場滲入率約 4%估算(呂珮如，2020)，則未來衛星製造產值將更樂觀。



資料來源：Marketsandmarkerts (2018a)

圖 3-11 立方衛星各項子系統之全球市場規模

3.4 產業經濟

3.4.1 工業領域

原子能技術於「工業領域」之應用主要有：材料改性(material modification)、工業輻射照相(industrial radiography)、核子計測儀技術、放射示踪劑及地下礦源勘查等。材料改性是利用高強度放射性同位素源、各種能量的電子加速器以及由它們衍生的 X 射線，進行聚合物的交聯、斷鍊、接枝，以製造特殊之醫療用品等；工業輻射照相為一種利用短 X 射線、 γ 射線和中子穿透各種材料的能力來檢查材料以偵測不易發現之缺陷的方法，例如天然氣和輸水管道，儲罐和結構元件中的焊縫；由於不同物質對放射性同位素(如鈷-60、銫-137、銥-90、鉬-241 與鉍-252 等)所放出 X 射線、 γ 射線與中子射線的吸收、穿透與散射程度均不相同，可利用核子儀器計測放射線強度的變化，從而偵知物質之厚度、密度、均勻度、液位、界面、觸媒床高度與

溼度等(只需計測儀，不需呈現影像)；放射示踪劑是具有原子或核子、物理、化學或生物特性的物質，廣泛用於偵測工業用反應爐之液體、氣體和固體的流速。還可應用於探索化學反應之反應機制；地下礦源勘查方面，同位素可應用在石油與礦產的探採包括中子技術用於測量煤的熱值及含灰量，另外天然 γ 射線光譜可被廣泛運用在石油、天然氣、鈾礦的探勘，此外放射線同位素激發 X 射線螢光法則被用於鋅礦漿含鋅量的測定，同位素也可用在鋁、銅、鈷、鎳、鉛、鐵、鎂等傳統礦產及海底錳核及磷礦的探測。

表 3-7 所列為「工業應用」領域之技術群組項目及排序，「非破壞性檢驗」及「核子計測儀技術」技術群組可用於材料之性質檢測，其應用可行性亦高，故發展優先投序要高。「材料改性」技術群組可直接應用於產品之製程改善，例如可以修改塑料的結構和特性，或是分解塑料以製成原料，而改性或功能化新材料或原料都可用於生產商業上可行的再生塑料消費品，具有建立塑料循環經濟的潛力。因此，該技術對於民生應用無論就重要性、可行性及產業化可能性，應均俱高信心度，但技術突破後縱深淺，導致利潤降低。加速器為各種工業技術發展之源頭，若能先釐清表中所列的技術群組所需之加速器科技發展，將更有利於發展。另外，大數據的應用，在產業發展中越來越重要，若能整合核子計測等其他感測器與 5G 物聯網的多重感測器技術，將可高值化數據，提升品質，包含透過物聯網對機器、裝置、人員進行管理，亦可搜尋物件位置、軌跡追蹤，防止失竊以及輻射劑量監測，因此未來應可能應用於近年社會關切之非破壞檢測業輻射安全管理。

表 3-7 「工業應用」領域之技術群組排序結果

發展優先排序	技術群組項目	綜合建議
高	☐ 非破壞性檢驗 ☐ 核子計測儀技術	可用於材料之性質檢測，其應用可行性亦高。
中	☒ 材料改性(包含建立塑料循環經濟)	材料改性技術直接應用於產品之製程改善，其對於民生應用無論就重要性、可行性及產業化可能性，應均俱高信心度。 可能的困難： 較難掌握。技術突破後縱深淺，導致利潤降低。
低	☒ 放射示踪劑 ☒ 地下礦源勘查	1.需考量國內人才、市場需求性等因素。 2.地下礦源勘查技術在台灣較為敏感，容易遭到環保團體抗議，未來要發展恐不易。

由日本之分析顯示可知，工業用途中約 55%以上用於半導體相關產業，製造醫療用的造影設備產值，占了約 18%，屬於較高的項目(如圖 2-4)，主要源於其國內對醫療診斷的需求。其

它則以非破壞性檢測占 8%左右，材料改性約 8%(如子午線輪胎)，以及醫療器材及材料之滅菌等用途占 5%，如人工關節、透析器(人工腎臟)等為大宗(如圖 3-12)(柳澤和章，2011)。

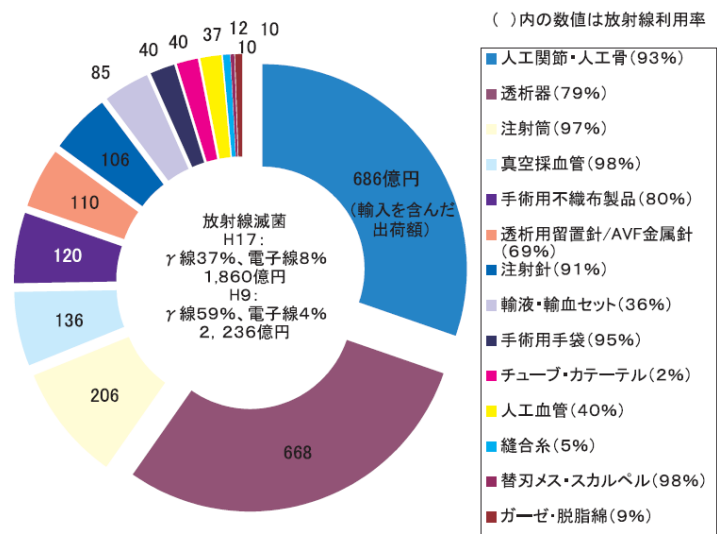


表 2 放射線を利用した高分子加工とその経済規模

(1)放射線架橋

・ 電線、ケーブル	219億円
・ ラジアルタイヤ、ゴム	1,678億円
・ 発泡プラスチック	176億円
・ 熱収縮チューブ、フィルム	165億円
・ 超耐熱性SiC繊維	0.9億円
・ ハイドロゲル	0.5億円

(2)放射線分解

・ PTFE (ポリテトラフルオロエチレン)	5億円
------------------------	-----

(3)放射線グラフト重合

・ 電池隔膜	25億円
--------	------

(4)放射線硬化

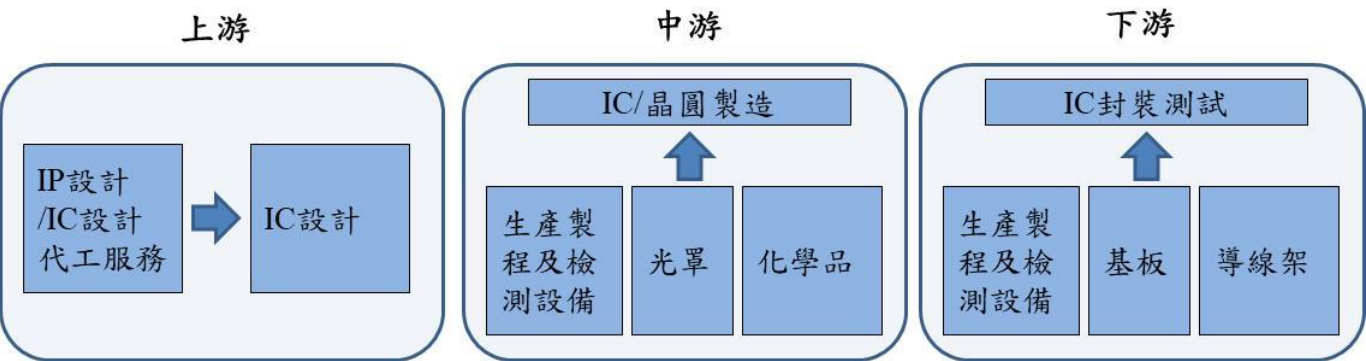
・	30億円
---	------

資料來源：柳澤和章(2011)

圖 3-12 日本將放射線利用於醫療器材滅菌及高分子加工之項目及比例

3.4.2 半導體製程

在「半導體製程」領域方面，我國擁有全球最完整的半導體產業聚落及專業分工(如圖 3-13 所示)(產業價值鏈資訊平台，2020)，惟半導體設備技術如微影、離子佈植設備技術仍多為國際大廠壟斷，且自從荷商 ASML 併購漢微科(電子束檢測設備)後，國內尚無生產關鍵半導體設備之廠商，除中子矽晶植磷受限需有中子源較難推廣，其餘尚待投入光源及電漿源相關科研建立自主關鍵技術。

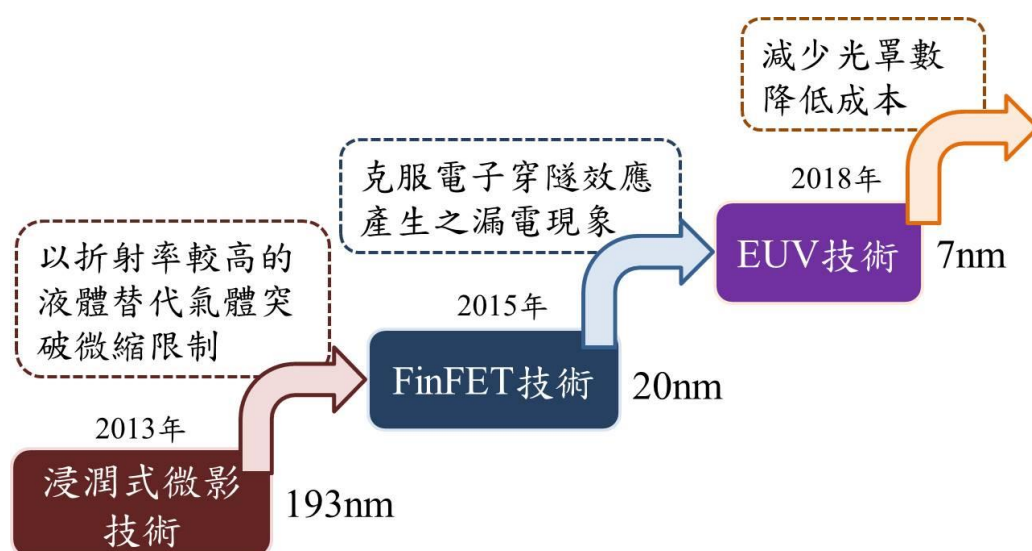


資料來源：產業價值鏈資訊平台(2020)

圖 3-13 我國半導體產業鏈

基於原子能技術已廣泛應用於半導體製程，如先進微影光源、離子束摻雜、電漿蝕刻及輔助化學氣相沉積等，其中現行半導體微影光源以 EUV 光源(13.5 奈米，源自美國能源部 Sandia 國家實驗室雷射電漿技術)(Sandia National Laboratories)、X 光光源(源自德國 Karlsruhe 理工學院開發鈾濃縮技術)(Karlsruher Institute of Technology)以及無繞射問題之離子束、電子束直寫技

術等較具潛力。有關微影技術之發展進程如圖 3-14 所示(楊正瑀、劉智文，2019)，在 2013 年，為浸潤式微影技術，其以折射率較高的液體替代氣體突破微縮限制；2015 年為鰭式場效應電晶體(fin field-effect transistor, FinFET)技術，製程從 193nm 進步至 20nm，並克服電子穿隧效應產生之漏電現象；在 2018 年，採取極紫外光(extreme ultraviolet, EUV)技術，有助於減少光罩數降低成本，製程從 20nm 進步至 7nm，但 EUV 製程的高能耗將使得用電費用升高，此外照射保護膜等材料激化的粒子使得晶片受汙染的可能性提升，將導致良率降低以及成本上升(劉美君，2018)。在製程達 7nm 以後的 IC 製造技術可能方向，應跳脫原本以矽為基礎的互補式金氧半導體(complementary metal-oxide-semiconductor, CMOS)元件製程，以新材料、新技術來創新更高性能、低能耗、相容於現有製程同時具備成本優勢的製造形態，例如量子計算晶片(quantum computing chip)、石墨烯 FET、以 III-V 族材料為基礎，整合光學元件所實現的光學計算(劉美君，2018)。



資料來源：楊正瑀、劉智文(2019)

圖 3-14 微影技術發展歷程

由表 3-8 所列的技術群組項目及排序可知，微影技術除現已量產的 EUV 與深紫外光(deep ultraviolet, DUV)¹⁷，亦包含次世代更短波長的 BEUV (beyond EUV)及 X-ray 波段。在人力培育方面，微影技術在國內目前很紮實，但和國際相比相差仍大，且微影技術相較於其它技術的門檻更高。中子矽晶植磷是一相當成熟的技術，在功率元件(power device)製造中具獨特性，但市場規模很小。

¹⁷ EUV(10 nm 以上)現在已量產，波長更短的則稱為 BEUV(10 nm 以下)，而在科學上 10nm 以下傳統上可稱為 soft X-ray。

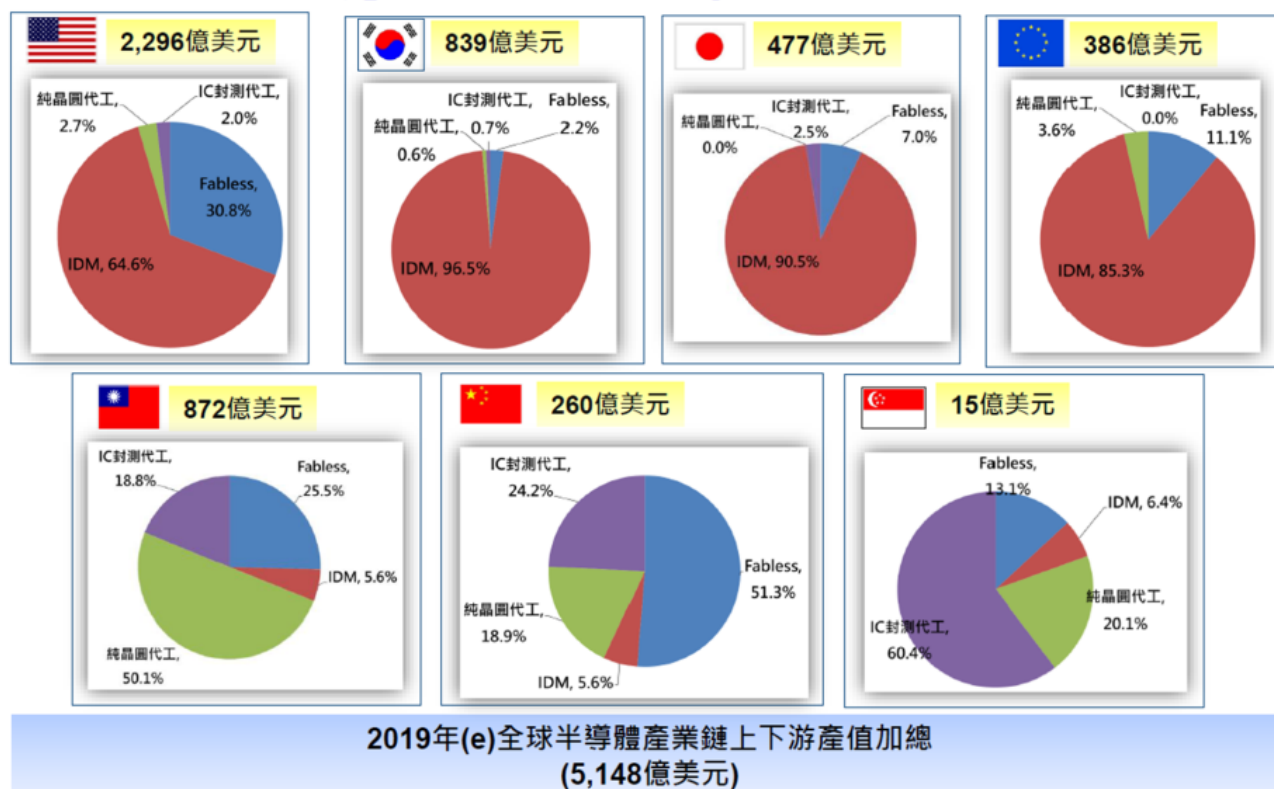
表 3-8 「半導體製程」領域之技術群組排序結果

發展優先排序	技術群組項目	綜合建議
高	☐ 蝕刻技術 ☐ 微影技術 (如 EUV 及 DUV)* ☐ 離子佈植	1. 半導體製程缺一不可，很難評估哪個技術群組重要、哪個不重要。根據 GRB 系統，國內目前在半導體製程中，以蝕刻技術的研究最多，其次為微影技術及離子佈植，故將微影技術從次推薦領域移至最推薦領域。
中	☒ 半導體檢測	2. 參考 GRB 系統，國內目前以蝕刻技術、微影技術及離子佈植為主要研究方向，故將半導體檢測技術從最推薦領域移至次推薦領域。
低	☒ 中子矽晶植磷技術	在問卷回覆中，該技術群組已在再推薦領域。

註：* EUV：極紫外光；DUV：深紫外線

我國半導體整體產值之趨勢如下，台灣 2016 年產值約 23,240 億元新台幣，若和日本相比是日本產值的 2 倍之多，2019 年亦高於日本(如圖 3-15)(彭茂榮，2020)，且台灣半導體產值趨勢逐年緩步成長，資策會預估台灣 2020 年產值為新台幣 24,500 億元，台灣半導體協會(TSIA)引用工研院預估之 2020 年台灣 IC 產業產值達 30,019 億元(TSIA, 2020)，我國半導體製造利用輻射的經濟規模應呈現成長之態勢。

2019年(e)各國IC產業鏈結構比較 台灣以產業鏈上下游專業分工為特色



資料來源：彭茂榮(2020)

圖 3-15 台灣 IC 產業產值國際比較

IC 製造的流程是將晶圓廠所做好的晶圓，以光罩印上電路基本圖樣，再以氧化、擴散、化學氣相沉積法(chemical vapor deposition, CVD)、蝕刻、離子植入等方法，將電路及電路上的元件，在晶圓上製作出來。建議可優先投入的微影技術和光罩有關，蝕刻、離子佈植則和晶圓製造有關。有關我國半導體設計及製造於 2020 年的產值預估如表 3-9 所列(TSIA, 2020)。

表 3-9 台灣 IC 產業營運成果

IC 產業產值(億元新台幣)	2016 年產值占比	2020 預估產值占比
IC 設計業	27%	26%
IC 製造業	54%	57%
晶元代工	47%	51%
記憶體與其他製造	8%	6%
IC 封裝業	13%	12%
IC 測試業	6%	6%
總計	24,493	30,018

資料來源：TSIA (2020)

四、技術布局策略

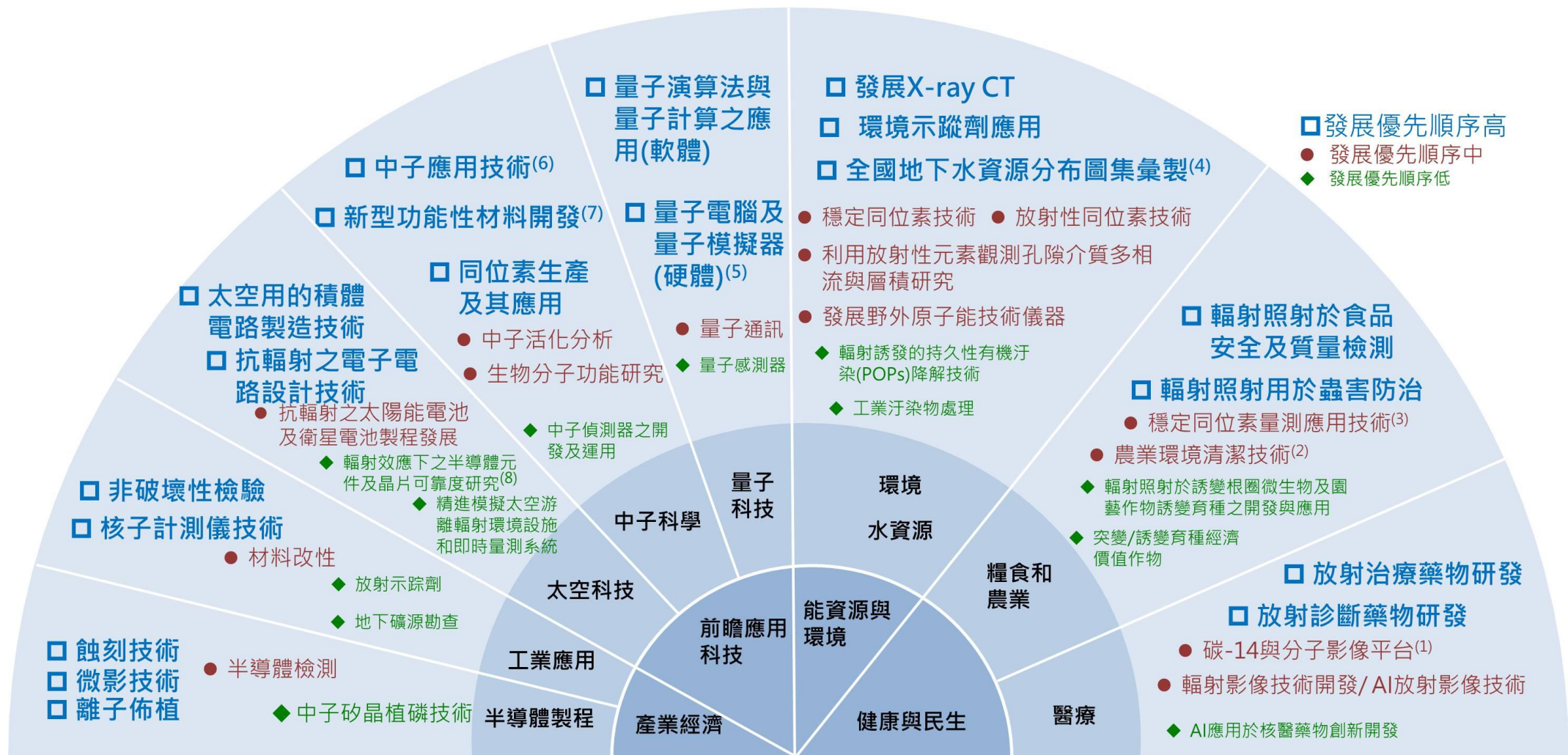
藉由「專家問卷及座談會技術群組評分」方法，邀請各領域專家，針對所蒐集的國內外技術資料，就重要性、可行性及產業化可能性等要素進行評分，收斂結果與製作策略藍圖。藉此釐清國內未來在原子能應用發展上的技術需求，結果可作為原能會在推廣原子能科技的施政方針及核研所技術發展策略參考。圖 4-1 所示為綜整各領域結果所彙製的策略藍圖，由該圖可很清楚明瞭各領域技術群組的發展優先順序，值得一提的是本策略藍圖結果所呈現的技術群組項目優先順序，係以產業價值作為主要考量之一，部分技術項目受限國內市場規模及特殊性雖較難產業化，但仍需國家投入穩定資源強化相關基礎設施、人才培育及關鍵技術建立，以因應國際競爭及貿易保護政策下，維持國內相當自主能力。

為因應新冠肺炎(COVID-19)及美中貿易戰下，所導致的全球經濟劇烈變動與供應鏈加速重組，蔡總統在 2020 年就職典禮上宣示，將在五+二產業創新的既有基礎上，打造「六大核心戰略產業」，並透過建立臺灣品牌、提供靈活多元的金融支援、打造安全的產業發展環境與匯聚及培養數位人才等，讓臺灣成為未來全球經濟的關鍵力量(國家發展委員會，2020)。其中原子能科技於民生應用的技術發展於國內已積累相當能量，技術範疇從基礎科學跨足前瞻應用科技，可因應社會經濟變遷需求之跨領域研究，並作為我國未來在面臨各方面趨勢挑戰下之解藥良方。

本策略藍圖所提出之「發展前瞻原子科學技術」已納入今年第 11 次全國科學技術會議「科研與前瞻」議題之措施。本策略藍圖所排序之技術群組幾乎為跨領域的應用(如表 4-1 所示)，建議跨部會整合資源以利研發投入，如科技部、衛福部、經濟部、農委會、海委會及環保署等。

表 4-1 各領域跨部會整合資源建議

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



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

圖 4-1 原子能科技於民生應用發展之策略藍圖

五、參考文獻

- BCC Research (2019) Radiotherapy, Radiopharmaceuticals and Nuclear Medicine: Global Markets.
- EU (2017a). European observatory of the supply of medical radioisotopes. EU.
https://ec.europa.eu/euratom/observatory_radioisotopes.html
- EU (2017b). Stable Isotopes of Metals as Pollutant Tracers in the Atmospheric Environment. EU.
<https://cordis.europa.eu/article/id/182928-stable-metal-isotopes-trace-atmospheric-particulates>
- IAEA (2018). IAEA Annual Report 2018, IAEA-GC(63)/5.
- IAEA (2019), The Future of Tech: Building Quantum Technology With Ion Beam Accelerators,
<https://www.iaea.org/newscenter/news/the-future-of-tech-building-quantum-technology-with-ion-beam-accelerators>
- IAEA (2020). Nuclear Technology Review 2020, IAEA-GC(64)/INF/2.
- IAEA, Material modification, <https://www.iaea.org/zh/zhu-ti/cai-liao-gai-xing>
- SpaceX Company, <https://www.spacex.com/>
- 台灣中子科學學會，<http://www.twncs.org.tw/>
- JRIA (2018) 。アイソトープ利用の現状と課題。
<http://www.aec.go.jp/jicst/NC/iinkai/teirei/siryo2018/siryo43/2.pdf>
- JRIA (2020) 。第8回全国核医学診療実態調査報告書
- Karlsruher Institute of Technology, <http://www.kit.edu/english/index.php>
- MarketsandMarkets (2018a). Cubesat Markt – Global Forecast to 2023.
- MarketsandMarkets (2018b) Plant Breeding and Crispr Plants Market (Global Forecast to 2023).
- Mind Commerce (2019). Quantum Technology Market: Computing, Communications, Imaging, Security, Sensing, Modeling and Simulation 2019-2025,
- Mordor Intelligence (2020) Global Nuclear Medicine Radioisotopes Market (2020-2025), Mordor Intelligence.
- Neutron Detection Market (2020), Industry ARC.
- Sandia National Laboratories , <https://www.sandia.gov/>

Statistics of Japan (2020)。平成 27 年(2015 年)産業連関表取引基本表(生産者価格評価)
<https://www.e-stat.go.jp/stat-search/files?page=1&layout=datalist&toukei=00200603&tstat=000001130583&cycle=0&tclass1val=0>。

TSIA (2020)。2020 年第二季台灣 IC 產業營運成果。

Yoshiaki Kiyonagi (2018). “Neutron Imaging at Compact Accelerator-Driven Neutron Sources in Japan”, Journal of Imaging.

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

內閣府原子力委員會 (2015)。放射線利用の経済規模調査(平成 27 年度)。
<http://www.aec.go.jp/jicst/NC/iinkai/teirei/siryo2017/siryo29/siryo1-1.pdf>

王若樸 (2019 年 4 月 17 日)。【醫療影像 AI 實例：臺北榮總】AI 只花 30 秒就能自動從數百張 MRI 影像找出腫瘤！準確率達 95%。iThome。<https://www.ithome.com.tw/news/129883>。

行政院原子能委員會 107 年第 5 次委員會議紀錄，2018 年。

呂珮如 (2020)。低軌衛星通訊發展趨勢與台灣商機，IEK 產業報告。

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

杜定賢 (2020)。核研所第二台迴旋加速器可行性評估，110 年科發基金簡報會議。

岡田漱平 (2017)。量子ビーム科学・放射線利用の過去・現在・未来。放射線利用振興協会。

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

科技部 (2019)。科技發展策略藍圖(民國 108 年至 111 年)，科技部。

國家發展委員會 (2020)。台灣經濟論衡，國家發展委員會，18(3)。

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

產業價值鏈資訊平台 (2020)，<https://ic.tpex.org.tw/introduce.php?ic=D000>。

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

陳靖惠 (2020)。太空產業現況與未來發展之初探，ITIS 產業報告。

彭茂榮 (2019)。全球半導體產業發展概況，IEK 產業報告。

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

黃楓台、林俊良 (2020)。太空輻射對衛星任務影響及因應之道，能源資訊平台。

黃爾文 (2020)。中子科技應用：借鏡國際最新發展以超前部署台灣未來情境，能源資訊平台。

楊正瑤、劉智文(2019)。後摩爾時代半導體技術發展趨勢，MIC 產業報告。

中國散裂中子源工程 (2020)。 <http://csns.ihep.cas.cn/>

ESS Technical Design Report (2013)。

劉美君 (2018)。從新興應用看半導體製造技術的變革新趨勢，IEK 產業報告。

衛生福利部 (2019)。108 年醫療機構現況及醫院醫療服務量統計。

<http://www.tada2002.org.tw/About/IsntDementia>

蘇明勇 (2019)。新太空時代下衛星產業發展挑戰與契機。IEK 產業報告。

附錄：研究方法

本計畫研究方法採「專家問卷及座談會技術群組評分」，在問卷設計及專家會議的舉辦上，皆與相關領域的專家討論，以確保研究方法之可行性，俾利結果更符合我國國情。

本計畫專家問卷採下述方法進行，執行方法如圖 1 至圖 7 所示：(1)蒐集與分析如 IAEA 等國際能源組織有關原子能科技發展和民生應用等資訊；(2)研蒐國內與原子能科技發展及民生應用相關的產業趨勢及發展潛力分析，據以提出在考量我國國情下之原子能民生應用的技術群組，並列於問卷，以太空科技領域為例，分別為建立國內鈷 60 照射場、加速器及質子治療等設施模擬太空游離輻射環境等 4 項技術群組，如圖 1。此外也請專家列出其他值得我國發展的技術群組，如圖 2；(3)請專家就技術群組的評分要素包含重要性¹⁸、可行性¹⁹與產業化可能性²⁰，由高、中高、中、中低、低五個評估層次中勾選評分，如圖 3 與圖 4；(4)問卷最後部分為專家填寫的信心度，以及對上述評分要素及技術群組產業化潛力做出說明，如圖 5。

(一) 重點發展方向

經工作團隊參酌國內外「太空科技領域」的研究走向，初步整理出以下幾個主要技術群組：

- 1.建立國內鈷60照射場、加速器及質子治療等設施模擬太空游離輻射環境
- 2.晶片輻射效應如：TID(Total Ionizing Dose)、SEE(Single Event Effect)、SET(Single Event Transient)等之研究及測試方法
- 3.抗輻射之電子設計自動化(Electronic design automation, EDA)研究
- 4.半導體技術中應用在太空的積體電路製造技術，如絕緣體矽(Silicon On Insulator, SOI)

若專家認為尚有其他值得我國發展的技術群組請協助填答以下問題：

圖 1 問卷中核研所列出之技術群組

¹⁸ 依國民福祉、國家安全、經濟發展等因素

¹⁹ 依技術發展、資源投入、國際競爭、專業人才等因素

²⁰ 依國內產業鏈、全球市場規模、關鍵技術掌握等因素

5.1其他：（專家新增重點發展方向，將對應後方重點發展方向的綜合評估專家建議第一項）

請填入文字

5.2 其他：（專家新增重點發展方向，將對應後方重點發展方向的綜合評估專家建議第二項）

請填入文字

5.3 其他：（專家新增重點發展方向，將對應後方重點發展方向的綜合評估專家建議第三項）

請填入文字

圖 2 問卷中請專家增列其他技術群組

（二）發展方向的重要性、可行性與產業化可能性評估準則

”

本調查依領域的**重要性、可行性與產業化可能性**進行調查，說明如下：

1. **重要性** 包括（但不限於）：依國民福祉、國家安全、經濟發展、...等因素進行綜合判斷。
2. **可行性** 包括（但不限於）：依技術發展、資源投入、國際競爭、專業人才、...等因素進行綜合判斷。
3. **產業化可能性** 包括（但不限於）：依國內產業鏈、全球市場規模、關鍵技術轉掌握、...等因素進行綜合判斷。

圖 3 問卷評分要素說明

(三) 重點發展方向的綜合評估

請依以下問卷進行李克特五點量表綜合性的評估。

重要性 包括（但不限於）：請依國民福祉、國家安全、經濟發展、...等因素進行綜合判斷。（此題項請盡量填答）

	低	中低	中	中高	高
1. 建立國內鈷60照射場、加速器及質子治療等設施模擬太空游離輻射環境	☐	☐	☐	☐	☐
2. 晶片輻射效應如：TID(Total Ionizing Dose)、SEE(Single Event Effect)、SET(Single Event Transient)等之研究及測試方法	☐	☐	☐	☐	☐
3. 抗輻射之電子設計自動化(Electronic design automation, EDA)研究	☐	☐	☐	☐	☐
4. 半導體技術中應用在太空的積體電路製造技術，如絕緣體矽(Silicon On Insulator, SOI)	☐	☐	☐	☐	☐

(a)

可行性 包括（但不限於）：請依技術發展、資源投入、國際競爭、專業人才、...等因素進行綜合判斷。（此題項請盡量填答）

	低	中低	中	中高	高
1. 建立國內鈷60照射場、加速器及質子治療等設施模擬太空游離輻射環境	☐	☐	☐	☐	☐
2. 晶片輻射效應如：TID(Total Ionizing Dose)、SEE(Single Event Effect)、SET(Single Event Transient)等之研究及測試方法	☐	☐	☐	☐	☐
3. 抗輻射之電子設計自動化(Electronic design automation, EDA)研究	☐	☐	☐	☐	☐
4. 半導體技術中應用在太空的積體電路製造技術，如絕緣體矽(Silicon On Insulator, SOI)	☐	☐	☐	☐	☐

(b)

產業化可能性 包括（但不限於）：請依國際產業鏈、全球市場規模、關鍵技術轉掌握、...等因素進行綜合判斷。（此題項請盡量填答）

	低	中低	中	中高	高
1. 建立國內鈷60照射場、加速器及質子治療等設施模擬太空游離輻射環境	☐	☐	☐	☐	☐
2. 晶片輻射效應如：TID(Total Ionizing Dose)、SEE(Single Event Effect)、SET(Single Event Transient)等之研究及測試方法	☐	☐	☐	☐	☐
3. 抗輻射之電子設計自動化(Electronic design automation, EDA)研究	☐	☐	☐	☐	☐
4. 半導體技術中應用在太空的積體電路製造技術，如絕緣體矽(Silicon On Insulator, SOI)	☐	☐	☐	☐	☐

(c)

圖 4 問卷評估要素(a)重要性、(b)可行性及(c)產業化可能性

謝謝您願意撥冗參加專家會議，煩請填寫以下問題，以利專家會議能順利進行討論。

請問您對此次原子能科技於民生應用之技術群組問卷 - 太空科技領域填表的信心程度？(請填:高、中、低)

請填入文字

請依評分內容，簡略地就整體太空科技領域中的技術群組於民生應用的重要性、可行性及產業化可能性做說明。

請填入文字

請依評分內容，簡略地就整體太空科技領域中的技術群組產業化之潛力做說明。

請填入文字

圖 5 問卷信心程度及評分說明

完成回收所有專家問卷後進行結果整理，包含所有技術群組(含原本核研所列出及專家建議新增)、專家技術群組評分及意見說明，而專家填寫的信心度方面幾乎都為中等以上，可見問卷結果極具參考性。

完成問卷整理後舉辦專家座談會議，首先針對各領域的技術群組整併並且進行更精確的命名，並依發展優先順序高、中、低排序，以太空科技領域為例，所有技術群共 7 項如-6，整併後 5 項技術群組排序結果如圖 7。

依上述方法進行所有 8 大領域，除太空科技外還包含環境及水資源、醫療、糧食及農業、量子科技、半導體製程、工業應用、中子科技排序，建構我國原子能科技於民生應用發展的策略藍圖，如圖 8 所示，本策略藍圖分為三階層，最內層為產業經濟、前瞻應用科技、能資源與環境、健康與民生 4 面向；第二層為各面向所屬的領域，總共 8 大領域如上述；最外層為各領域標示發展順序高、中、低之技術群組。

- A. 建立國內鈷60照射場、加速器及質子治療等設施模擬太空游離輻射環境
- B. 晶片輻射效應如：TID(Total Ionizing Dose)、SEE(Single Event Effect)等之研究及測試方法
- C. 抗輻射之電子設計自動化(Electronic design automation, EDA)研究
- D. 太空用的積體電路製造技術
- E. 在輻射環境建立時，建議考慮納入半導體元件即時量測系統之安全量測室。
- F. 抗輻射之太陽能電池(solar cell)及衛星電池(battery)製程發展
- G. 寬能隙(Wide Bandgap, WBG)半導體元件及電路在高輻射環境之可靠度

圖 6 技術群組盤點彙整

排序高:

- C. 抗輻射之電子電路設計技術(原C)
- D. 太空用的積體電路製造技術(原D)

排序中:

- E. 抗輻射之太陽能電池及衛星電池製程發展(原F)

排序低:

- A. 精進模擬太空游離輻射環境設施和即時量測系統(原A,E)
- B. 半導體元件及晶片於輻射效應下之可靠度研究及測試方法(原B,G)

圖 7 技術整併結果及排序

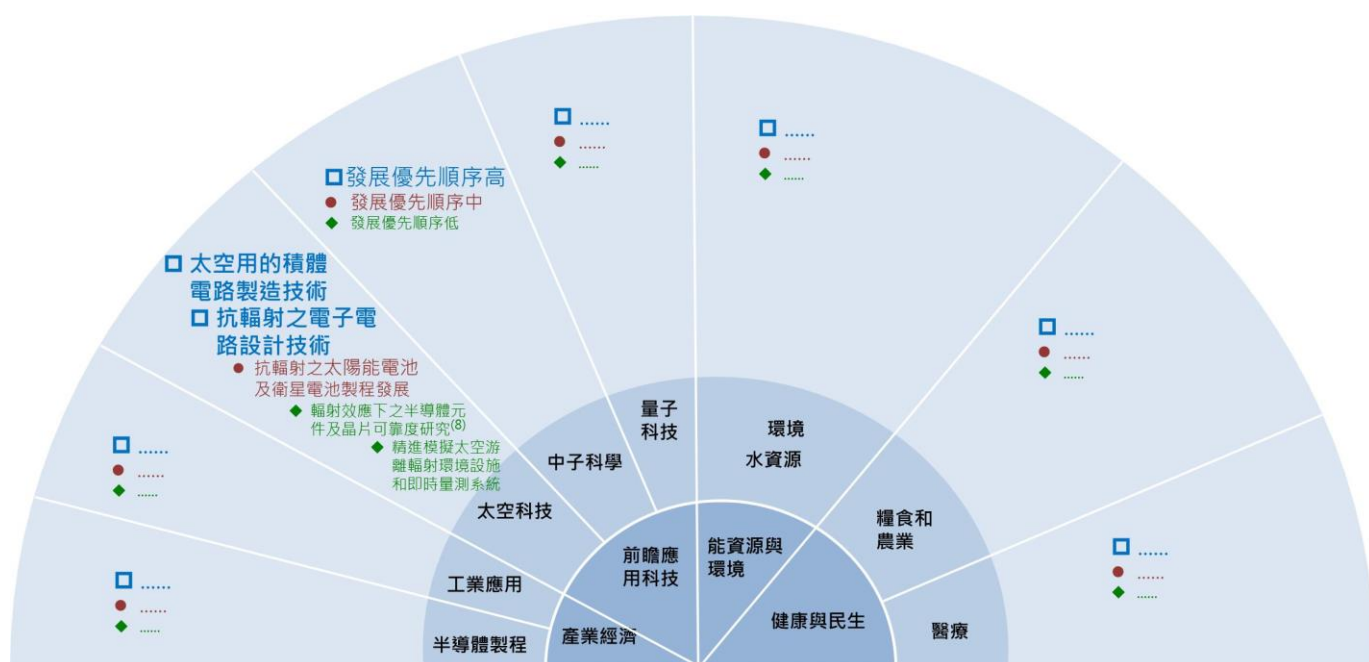


圖 8 我國原子能科技於民生應用發展的策略藍圖(以太空科技為例說明)

綜合上述，本策略藍圖執行方法可分為三部分如下，並可以圖 9 表示：

5. 研析國內外相關資料，列出技術群組並製作問卷；
6. 請各領域專家針對問卷中技術群組的評分要素提出建議與看法，亦可新增技術群組，藉由專家建議的回饋，修正技術群組項目；
7. 舉辦專家會議，確認各領域技術群組之名稱、內容及排序；
8. 完成建構我國環境及水資源、醫療、太空科技、糧食及農業、量子科技、半導體製程、工業應用、中子科技 8 大領域之原子能科技於民生應用發展的策略藍圖。

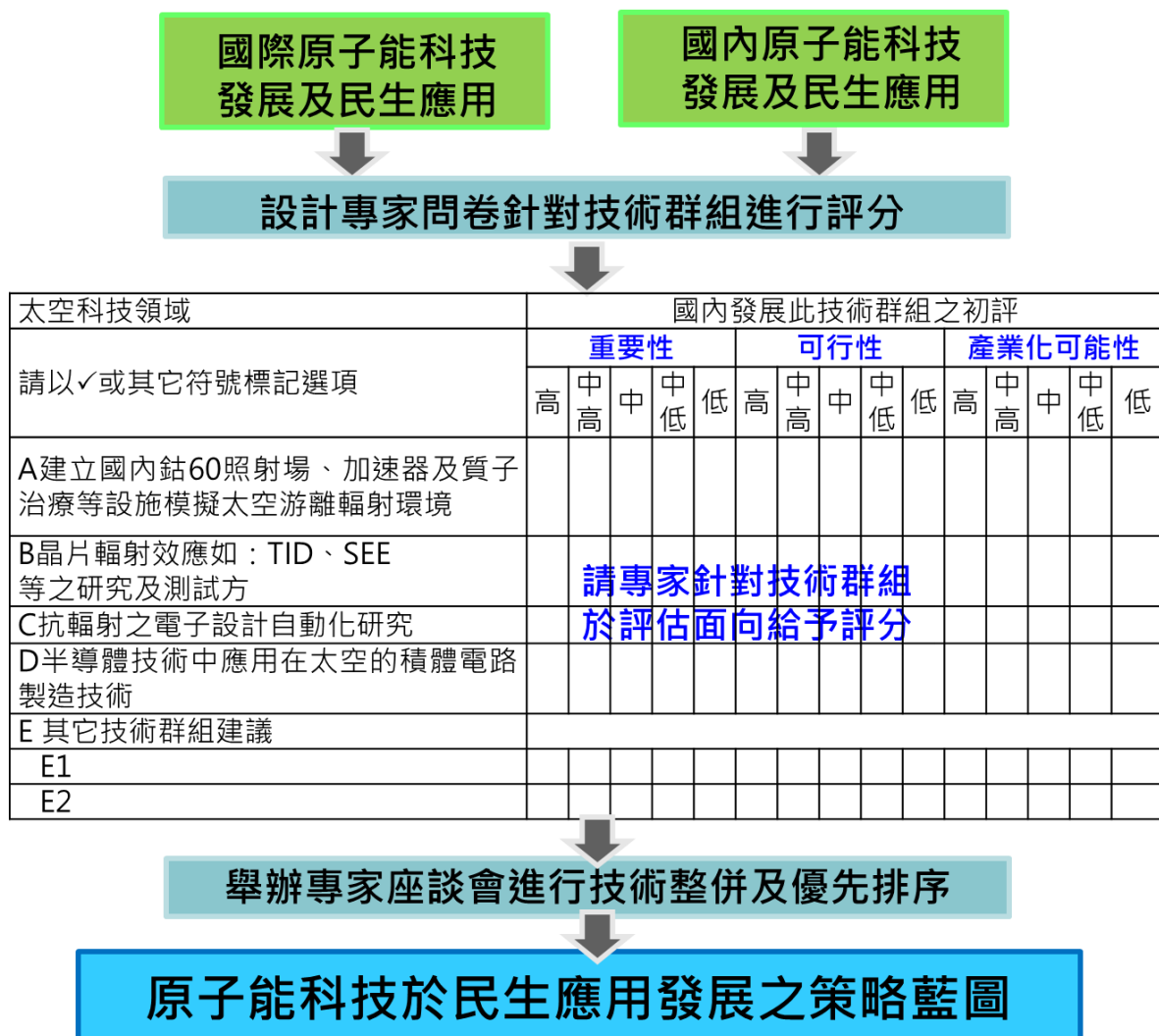


圖 9 本策略藍圖執行方法示意圖

