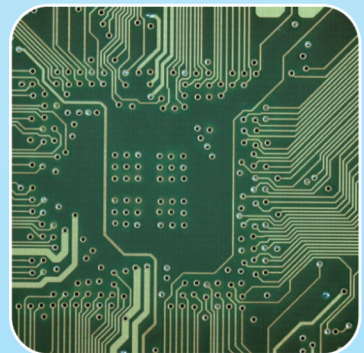
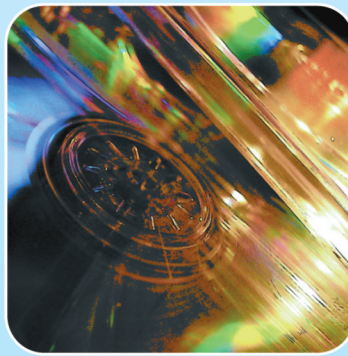


全球核能發電  
現況與發展趨勢

CTCI FOUNDATION



財團法人中技社(CTCI Foundation)創立於 1959 年 10 月 12 日，以「引進科技新知，培育科技人才，協助國內外經濟建設及增進我國生產事業之生產能力」為宗旨。初期著力於石化廠之設計與監建，1979 年將工程業務外移轉投資成立中鼎工程後，業務轉型朝向裨益產業發展之觸媒研究、污染防治與清潔生產、節能、及環保技術服務與專業諮詢。2006 年本社因應社會環境變遷的需求，在環境與能源業務方面再次轉型為智庫的型態，藉由專題研究、研討會、論壇、座談會等，以及發行相關推廣刊物與科技新知叢書，朝知識創新服務的里程碑邁進，建構資訊交流與政策研議的平台；協助公共政策之規劃研擬，間接促成產業之升級，達成環保節能與經濟繁榮兼籌並顧之目標。

本著創社初衷，為求對我們所處的環境能有更多的貢獻，本社就國內前瞻性與急迫性的能源、環境、產業、社會及經濟等不同議題，邀集國內外專家進行全面的研究探討，為廣為周知，特將各議題研究成果發行專題報告，提供產官學研各界參考。

本專題報告在台灣電力企業聯合會林德福秘書長召集下，邀請廖識鴻顧問擔任主筆，與國內電力與工程專家共同研討完成，探討核能之過去、現在與未來，核能安全、核廢料、核能之建廠與發電成本等議題，以及小型模組化反應器(SMR)、第四代核反應器、核融合發電之發展，均為全球當前核能發展最為關鍵的議題，俾供全國各界參考，盼能達成能源轉型，邁向 2050 淨零排放目標。

發行人：潘文炎  
作者：台灣電力企業聯合會、廖識鴻  
主編：陳綠蔚、林德福  
執行編輯：楊顯整、郭華軒  
發行單位：財團法人中技社

地址 / 106 臺北市敦化南路二段 97 號 8 樓  
電話 / 886-2-2704-9805  
傳真 / 886-2-2705-5044  
網址 / [www.ctci.org.tw](http://www.ctci.org.tw)

本社專題報告內容已同步發行於網站中，歡迎下載參考

發行日期：中華民國 113 年 2 月

ISBN：978-626-98214-6-4

# 序

近二、三十年來，因全球暖化、氣候變遷，致使減少碳排放成為顯學，而極端天氣造成暴風雨、水災、熱浪等天災強度逐年加劇，2015 法國巴黎 COP21 會議上通過「巴黎協定」(Paris Agreement)，首次提出 2050 年應達到淨零排放(Net-Zero Emissions)的概念。於此期間台灣也努力推動減碳，2000 年開始推動太陽光電，2009 年通過再生能源發展條例，後續還有「陽光屋頂百萬座、千架海陸風力機」等推動計畫，並於 2021 年世界地球日正式宣布加入 2050 淨零排放行列，行政院國家發展委員會也在 2022 年 3 月 30 日提出《臺灣 2050 淨零排放路徑》，持續致力於打造零碳能源系統。

本社自 2012 年起持續關注電力議題，從電業自由化、最適能源配比、再生能源管理、鋰電池儲能之產業機會，一直到 2022 年探討穩定台灣電網之最適策略，主要係鑑於電力議題於能源轉型過程居關鍵地位。台灣進口能源依存度高、能源安全脆弱，近年來能源轉型也朝向能源多元化發展，故 2023 年度本社根據《臺灣 2050 淨零排放路徑》針對低碳電力技術發展潛力進行探究，除了成熟的太陽光電以及風力發電之外，亦評估快速穩定電壓所需的電池儲能、飛輪儲能，以及放電時間更長的液流電池、製氫儲能等技術。火力發電低碳化，如氫、氨混燒、專燒或搭配碳捕捉與再利用來降低天然氣發電之碳排放，也是重要的減碳工具。

除了上述再生能源與低碳電力技術，近年來受到減碳目標壓力以及俄烏戰爭引發的能源安全問題，歐盟討論是否重新接納核電為綠色能源，核能成了許多國家為達到碳排減量的選擇之一。台灣已使用核電逾 40 年且各電廠逐步走向除役，未來核能之角色以及既有核廢料如何處理，成為 2024 年初總統大選三組候選人能源議題辯論之焦點，雖各方立場不同，但皆認可核能議題應回歸科學論證，須探討核能安全、核廢料處理、社會共識等基本前提。賴副總統並指出應密切注意

國際間核能技術的發展，尤其是不會產生核廢料的核融合技術。爰此本社與台灣電力企業聯合會 TEPA 合作以「全球核能發電現況與發展趨勢」為專題，藉由蒐集國內外最新相關資訊與文獻、舉辦座談會廣納國內電力與工程專家意見之方式進行整理、彙編，盼可助台灣各界清楚認識全球核能發電現況與發展趨勢。本報告各章節分別論述核能之過去、現在與未來，核能安全、核廢料、核能之建廠與發電成本等議題，以及小型模組化反應器(SMR)、第四代核反應器、核融合發電之發展，均為全球當前核能發展最為關鍵的議題，俾供全國各界參考，盼能達成能源轉型，邁向 2050 淨零排放目標。

本專題報告特別感謝台灣電力企業聯合會黃重球理事長、林德福秘書長、李清山顧問、主筆廖識鴻顧問以及 TEPA 團隊對本議題的支持與協助，同時對於出席各場座談會共同討論，提供寶貴實務經驗與建言的專家們，包括前原能會副主委邱賜聰先生、前泰興工程顧問公司副總經理陳條宗先生、前美國 Terra Power 計劃經理何里賓博士、公元資訊總經理黃建華博士等學者先進，謹此致上敬意與萬分感謝。

財團法人中技社董事長  
潘文炎  
2024 年 2 月

# 目 錄

序.....	I
目 錄.....	III
圖目錄.....	V
表目錄.....	VII
執行摘要.....	1
第一章 前言.....	5
第二章 核能之過去、現在與未來.....	9
第三章 核能發電之議題.....	17
第一節 核能安全.....	17
第二節 核廢料(放射性廢棄物).....	20
第三節 核能之建廠與發電成本.....	24
第四章 小型模組化與新型反應器之發展.....	25
第一節 小型模組化核反應器之發展.....	25
第二節 第四代(新型)核反應器(Gen. IV)之發展.....	35
第三節 小型模組化與第四代核反應器面臨之挑戰.....	43
第五章 核融合發電之發展.....	47
第一節 核融合之特色.....	47
第二節 核融合之發展現況.....	48
第三節 核融合面臨之挑戰.....	56
第六章 結論與建議.....	57
第一節 結論.....	57
第二節 建議.....	58

附 件.....	61
附件 1-1 General Fusion 融合原理：氘-氚(D-T)融合 .....	61
附件 1-2 Helion Energy 融合原理：氘-氦(D- <sup>3</sup> He)融合 .....	61
附件 1-3 HB-11 Energy 融合原理：氘-硼(H- <sup>11</sup> B)融合.....	62
附件 1-4 TAE Technology 融合構造.....	62
附件 2 氘-氚(D-T)、氘-氦(D- <sup>3</sup> He)與氘-硼(H- <sup>11</sup> B)之優點與挑戰.....	63
參考資料.....	65
縮寫與專有名詞對照表.....	67

## 圖目錄

圖 1.1、壓水式反應器組 .....	7
圖 1.2、沸水式反應器機組 .....	7
圖 2.1、核能機組發展進程 .....	14
圖 3.1、4 家 NGO 調查 8 國公眾對新型核能技術之立場.....	20
圖 3.2、用過核燃料最終處置示意圖 .....	21
圖 3.3、用過核燃料處理流程示意圖 .....	23
圖 3.4、我國用過核燃料最終處置計畫時程 .....	23
圖 4.1、SMR 佈署時間表 .....	34
圖 4.2、超臨界水反應器(SCWR) .....	37
圖 4.3、鈉冷式快中子反應器(SFR).....	38
圖 4.4、鉛冷式快中子反應器(LFR) .....	39
圖 4.5、氣冷式快中子反應器(GFR).....	40
圖 4.6、熔鹽反應器(MSR) .....	41
圖 4.7、超高溫氣冷式反應器(VHTR).....	42
圖 4.8、SMR 與傳統大型反應器成本控制因素比較.....	44
圖 4.9、興建新型核電廠的主要步驟與時間 .....	45
圖 5.1、核分裂與核融合原理 .....	47
圖 5.2、勞森準則(Lawson Criterion)-Fusion triple products .....	49
圖 5.3、托卡馬克(Tokamak)示意圖(ITER Tokamak Fusion Reactor).....	50
圖 5.4、氫-硼融合反應 .....	53
圖 5.5、晶格約束核融合 .....	54
圖 5.6、核融合實行運轉的各階段 .....	55

全球核能發電現況與發展趨勢

圖 A.1、General Fusion 示意圖 ..... 61

圖 A.2、Helion Fusion 構造圖 ..... 62

圖 A.3、HB-11 Fusion 示意圖 ..... 62

圖 A.4、TAE 構造圖 ..... 63



## 表目錄

表 2.1、全世界運轉中核能機組 .....	12
表 2.2、全世界建造中核能機組 .....	12
表 2.3、全世界除役核能機組 .....	13
表 3.1、國際間採用再處理與直接處理(深層掩埋)核廢料規劃時程.....	22
表 4.1、各型 SMR 發展現況(1/3) .....	27
表 4.2、各型 SMR 發展現況(2/3) .....	28
表 4.3、各型 SMR 發展現況(3/3) .....	29
表 4.4、具短期里程碑 SMR(1/3) .....	30
表 4.5、具短期里程碑 SMR(2/3) .....	30
表 4.6、具短期里程碑 SMR(3/3) .....	31
表 4.7、各種新型 SMR 的主要參數特色 .....	35
表 5.1、各種核融合反應燃料截面積及燃燒溫度比較 .....	49
表 5.2、主要核融合特性比較 .....	55



## 執行摘要

### 一、問題及目標

為因應氣候變遷導致全球災害頻繁，世界各國已逐漸形成共識，2050 淨零排放成為各國目標，期望將全球暖化控制在 1.5°C 內。另一方面，為維持經濟發展必須供應穩定、潔淨、無碳排放且可負擔的電力成為各國努力目標，積極建置不排放二氧化碳的再生能源發電已成為各國最普遍的做法。但再生能源的間歇性與局限性，尚未能達成兼顧供電無虞與淨零排放的目標，而目前發電占比最高的火力發電，因其排放二氧化碳，必須逐漸退場。因而核能發電就成為許多國家電力部門減碳與多元化發電的重要選項。核能發電自 1950 年代開始商業化以來，歷經發展期、爆發期、衰退期與復甦期等過程。主要因民眾對核能安全與核廢料處理等存有疑慮，但隨著核能技術的演進，加上全球暖化、淨零排放的需求，核能逐漸被納入能源多元化的選項。以 2023 年 11 至 12 月召開的 COP28 氣候變遷高峰會為例，美、日、英、法等 22 個國家共同發表宣言，呼籲 2050 年核能裝置容量要提升至 2020 年的三倍，顯見國際間部分國家將核能視為減碳的選項之一。台灣自有能源匱乏、能源安全脆弱，近年來能源轉型也朝向能源多元化發展，而核能在過去 40 年來提供台灣安全、穩定、低碳且價廉之電力，國際間仍計劃以核能作為減碳工具之一，故現有核電廠延役、密切注意小型模組化與新型核反應器的發展與適時引進，甚至待核融合商業化後導入應用，都有機會協助台灣強化能源安全、達成能源轉型，為 2050 淨零排放做出貢獻。

### 二、研究範圍及內容

本報告蒐集國內外最新相關資訊與文獻廣納國內外核能專家意見，分別論述核能之過去、現在與未來、包括核能安全、核廢料處理與核能發電成本在內的核能發電之議題與解決方向，被寄以厚望的小型模組化與新型核反應器的機會與挑戰，以及近年來漸有較顯著發展的核融合的機會與待解決問題等，提供各界參考，俾供全國各界了解核能發展與應用，建立共識同心協力達成能源轉型，邁向 2050 淨零排放目標。

### 三、研究結論

本報告歸納結論如下：

#### (一) 核能發電之議題

##### 1. 核能安全

核能發電史上發生的三大核能事故，1979 年美國三哩島核子事故曾短暫影響

核能發展，也促使西方核能機組提升嚴重核子事故的因應能力；1986年蘇聯車諾比核子事故，基本上並未對西方核能工業造成影響；2011年發生應能避免而未避免的日本福島核子事故，對核能發電造成較大的影響，各核能發電國家也因此再加強因應嚴重核子事故的能力。

福島事故發生後，各國紛紛參據美國核管會與國際原子能總署訂定的規範，重新審視及強化核能安全與緊急事故應變準備機制，並執行核能電廠緊急事故應變的壓力測試。台灣核一、二、三、四廠都重新檢視電廠的耐震與防海嘯能力、模擬福島事故、進行全套情境演練，並檢討臨時救災設備與備品、工具之適當性、充足性與配置以及包括燃油、電源、冷卻水源之後續運作資源及備援能力，並建立台電公司外部技術支援協議與建立斷然處置程序等。

## 2. 核廢料處理

世界各國處理核廢料大都基於下列原則：

- 核廢料應適當儲存以避免造成民眾輻射暴露以及環境污染。
- 核廢料隨著時間衰變，因此許多國家傾向在高階核廢料最終處置前先貯存大約 50 年~100 年。
- 低階核廢料處置較明確，幾乎在任何地方都能安全處理。
- 用過核燃料通常都先放置水中至少 5 年，再改為乾式貯存。
- 大多數國家都同意深層地質掩埋是大部分高階核廢料最佳的處置方式。

國際上目前芬蘭和瑞典的用過核燃料最終處置計畫發展最為成熟，瑞典早在 2011 年就提出建照申請，預定 2025 年開始興建；芬蘭於 2016 年便取得興建最終處置場建照，現已取得運轉執照，預定 2024 年開始最終處置場營運；核電大國法國也已獲得主管機關建照許可。「創造良好溝通環境，基於共識制定決策」解決方案，是瑞典與芬蘭尋求最終處置場的做法。台灣也設定 2055 年完成用過核燃料最終處置的設置與營運，當然這需要政府與民眾加強溝通、建立共識，同心協力努力完成最終處置場的設置，畢竟無論未來核能如何發展，台灣過去營運核能 40 年來已累積相當數量的核廢料必須加以處理。

## 3. 核能發電成本

目前國際間運轉核電廠的主力仍為第二代核反應器機組，如台灣的核一、二、三廠，雖多數機組運轉超過 30 或 40 年，因運轉安全穩定、績效良好且立即可續用，故絕大多數國家都在進行延長核電廠的運轉壽命(延役)。因原建廠固定成本都已折舊攤銷完畢，以致發電成本相較於任何發電方式都低，既安全、好用、經濟又不排放碳，這也是絕大多數國家短期優先採取核電廠延役的最主要原因。台

灣核能發電成本僅新台幣 1.0~1.5 元，遠低於其他發電成本，在安全無虞下應可考慮延長運轉壽命，也可為 2050 淨零排放做出貢獻。

## (二) 小型模組化與新型反應器

要達成邁向 2050 淨零排放目標，僅採取現有核電廠延役尚無法滿足能源需求，因此新建核能機組成為許多國家優先考慮的策略，更安全、更經濟、更永續且更具應用彈性的小型模組化反應器與第四代新型反應器便成為諸多國家研究發展與布局興建的電力來源。

第四代新型反應器包括部分小型模組化反應器，除安全、經濟外，尚具有能源永續與核廢料較易管理的優點，當其技術發展成熟時，也是可以考慮引進。當然第四代新型反應器與小型模組化反應器都面臨一些挑戰，除部分反應器技術仍待進一步研發精進與確認外，包括供應鏈、法規與執照審核的配合、燃料與材料、製造與設計配合、施工管理以及人才培養等問題都需積極解決，才有利於未來適當時機需要引進時具備足夠的條件。

SMR 因小型化具有較好的選址條件、較好的併網韌性與多功能的能源應用，未來應可作為缺乏能源的台灣，邁向 2050 淨零排放可考慮的選項。

如未來有機會引進 SMR，建議最好是採用已取得設計認證且獲得國際間法規核准並已建廠成功且順利運轉的機組以降低風險，當然引進 SMR 尚須考慮包括採用何種技術/機型、模組供應鏈是否能配合、SMR 的經濟規模(Economics of Scale)、執照申請與核能法規的配合、財務投資與政策支持、公共認知與民眾支持、核燃料與核廢料處理、防止核擴散以及核能第三責任(Nuclear Third Liability)等議題。

## (三) 核融合發電

拜近十年來電腦運算、人工智慧、材料科學、超導技術與模擬技術等科技的突飛猛進，加上各國政府與民間企業積極投入，核融合技術逐漸有突破性發展，或許在未來 20~30 年，人類有幸等到核融合時代的來臨，徹底解決永續能源的需求。當然，目前各種核融合技術發展都還面臨諸多挑戰，但想想在 40 年前人類就已投入人工智慧的研究，當時人類無法想像人工智慧能有今天的發展如現今的 ChatGPT。核融合技術的發展使得人類比過去任何時刻更接近能利用核融合發電，相信在不久的將來會有實現的一天。我們可以期待，也應密切注意核融合的發展，預做準備，相信時機到來即可應用，以解決我國能源缺乏的困境。

## 四、對策及建言

全球核能發電已運作超過半世紀，雖逾 200 座核電廠已除役，但仍有超過 400 座核電廠運作中。各國使用核能發電除了技術上嚴守安全規範，皆需考量民眾接

受度與國家政策方向。台灣進口能源依存度高，為滿足能源供應安全與 2050 淨零排放目標，除應繼續積極開發再生能源外，未來若經各方商議政策上同意續用核能，則對於核能發電的立場可考慮以下四大面向：

### **(一) 短期策略**

最優先、最有效的做法是將現有核能電廠在安全無虞的條件下延長運轉壽命；另，核能四廠屬於安全等級比核三廠更高的第三代核電廠，已完成試運轉測試，並通過第三方強化安全檢測小組的系統測試複驗。雖經封存數年，將來如需配合淨零排放與國家能源安全需求，經再次進行安全總體檢與運轉測試，確認安全無虞的情形下，或可列為未來基載能源選項之一。

### **(二) 中期策略**

應可考慮在未來國外小型模組化與第四代反應器已建廠完成並運轉順利的條件下，伺機引進國內作為維持穩定可靠，且不排放二氧化碳的電源，以提供國內未來所需的電力供應。

### **(三) 長期策略**

宜密切關注核融合的發展，在未來 2050 年前後或有機會等到核融合的商業化，屆時引進核融合發電可徹底解決永續的能源需求。

### **(四) 專業人才培育**

最重要的是核能人才的培養需要相當時間，台電公司過去數十年來，核一、二、三廠有相當良好的運轉績效，主要歸功於過去台灣三、四十年積極培養出許多核能人才，但近幾年來核能人才逐漸流失，核能發展將受到限制，如將來要配合國際趨勢與淨零排碳再發展核能，將因人才短缺而難以順利執行，因此留住人才，並及時培養人才，才能配合未來適時引進 SMR 或第四代核反應器，甚至核融合應用的需要。

財團法人中技社

## 第一章 前言

近二、三十年來，氣候變遷已影響地球居民生活，也逐漸喚醒各國對氣候變遷之重視，由聯合國氣候變遷組織發起輪流由各國每年召開氣候變遷會議(Conference of Parties, COP)，自 1997 年的京都議定書(COP3)到 2015 年的巴黎協定(COP20)到 2021 年美國召開領袖高峰會，再到 2022 年在埃及沙姆沙伊赫會議，以及 2023 年在杜拜召開的 COP28 高峰會，期間多所討論氣候變遷議題，由氣候緊急、氣候危機、氣候災難甚至到氣候地獄等狀況，各國須想方設法減少溫室氣體排放-其中以二氧化碳(CO<sub>2</sub>)為最大宗排放，才能緩解氣候變遷的惡化。另，2021 年發生的俄烏戰爭，導致全球能源危機，化石燃料價格暴漲，更促使國際間尤其歐盟國家加速能源轉型，發展去碳化電力。

CO<sub>2</sub> 來自電力、工業、運輸、農業與住商等領域，其中電力占比最高，但相對較容易也是最迫切的減碳對象，運輸與工業也是未來優先的減碳目標。電力方面，再生能源必然是世界各國發展的趨勢，但由於主力的太陽光電與風力發電的間歇式發電特性，無法完全解決脫碳的困境，天然氣發電之排碳量雖較燃煤發電少，但發電成本高，其供應受地緣政治影響之風險較高，且必須搭配成本高、尚未能大規模商業化的碳捕捉利用與貯存(Carbon Capture, Utilization and Storage, CCUS)以進一步降低碳排放；地熱與生質能容量有限，未能成為發電主力；核能具有低碳排放甚至零碳排放的特性，尤其小型模組化核反應器(Small Modular Reactor, SMR)機組因具有負載追隨能力，因此若搭配再生能源的間歇性發電，可即時因應電網的需求調節輸出，增進電網穩定，因此將再生能源、火力發電、核能、氫能等均納入發電多元化組合內，成為各國為達成「2050 淨零排放」減碳策略的重要選項。

如上述核能發電除不會排放二氧化碳，也不排放汙染物質到大氣中造成空氣汙染外，核燃料能量密度高，核電廠所使用的核燃料體積小，運輸與儲存方便，且更換一次燃料就可使用 18 個月以上，可視為準自產能源，對於能源極度缺乏的國家如日本、韓國與我國，極有利於國家能源安全，尤其 2022 年發生俄烏戰爭後，俄羅斯化石燃料禁運，導致能源缺乏、價格飆漲，造成能源危機，有些國家如德國被迫調整其能源轉型步調，重新啟用原已停止運轉的燃煤電廠，此舉與其原規劃的能源轉型背道而馳，使得淨零碳排目標的達成更加困難。

此外核能的發電成本中，核燃料的成本占比低，僅占約 5%，相較於化石燃料發電，不易受到燃料價格巨幅波動的影響，可提供穩定的電價，因此核能對於國家能源安全極為重要。

誠如國際原子能總署(IAEA)所強調，如缺乏相當占比的核能發電，就難以達

成淨零排放的目標。目前大部分有核能電廠之國家都採取把即將屆齡的核電廠延役 10~20 年(美國甚至有部分機組延役 40 年)，並規劃興建包括小型模組化核反應器與第四代核反應器以達成 2050 淨零排放目標，部分國家並積極研發核融合以作為未來人類永續能源的新希望。

介紹西方國家最常用的兩種核反應器如下：

### **輕水式核反應器運作原理**

#### **壓水式反應器**

壓水式反應器(Pressurized Water Reactor, PWR)結構如圖 1.1，利用輕水(普通水  $H_2O$ ) 作為冷卻劑和中子緩和劑。其冷卻系統由兩個循環迴路組成。一迴路連接著爐心和二迴路中的蒸汽產生器，迴路內壓力保持在約 153 個大氣壓，在此壓力下可將一迴路水加熱至約  $324^{\circ}C$  高溫而不沸騰。一迴路水在二迴路蒸汽發生器的傳熱管中將壓力約為 70 個大氣壓左右的二迴路水加熱至沸騰(溫度約  $260^{\circ}C$ )，形成的水蒸氣後再通過二迴路送至汽輪機，推動渦輪發動機運轉帶動發電機發電。在傳熱管中釋放熱能的一迴路水以  $290^{\circ}C$  左右的溫度回流至爐心，完成一迴路循環。從汽輪機流出的二迴路水經冷凝器凝結為液態水後，回流至蒸汽發生器，完成二迴路循環。

#### **沸水式反應器**

沸水式反應器(Boiling Water Reactor, BWR)結構如圖 1.2，運作的冷卻水式處於初始沸騰狀態，其蒸氣溫度約  $287^{\circ}C$ ，而運作的壓力也是這溫度的沸騰壓力，約 70 個大氣壓，冷卻水在這樣溫度與壓力下產生水蒸氣，直接用來推動渦輪機，帶動發機發電。沸水式與壓水式反應器最大不同，在於沸水式反應器只有一個迴路循環，而壓水式反應器有二個迴路循環。



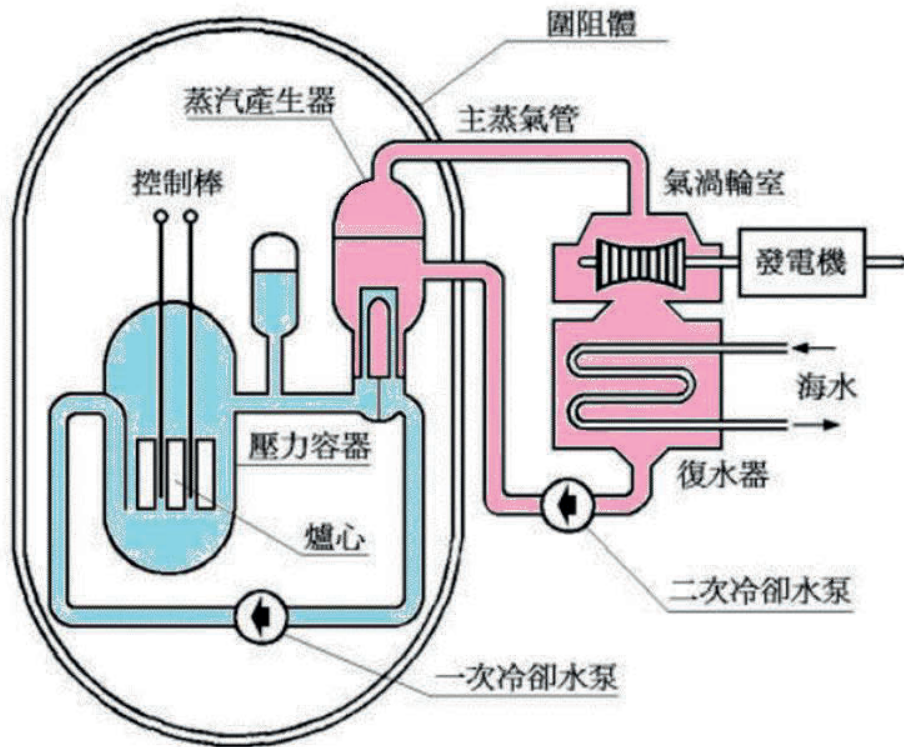


圖 1.1、壓水式反應器組

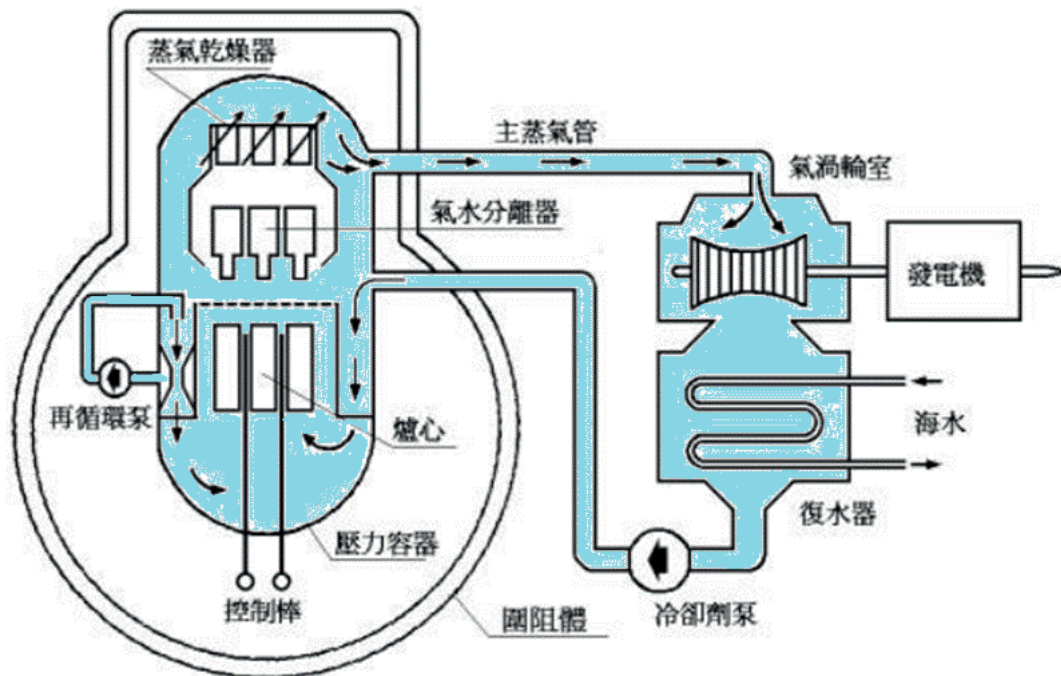


圖 1.2、沸水式反應器機組



## 第二章 核能之過去、現在與未來

1938年，德國科學家 Otto Hahn 和 Fritz Strassmann 發現鈾原子核受中子撞擊後，會分裂產生原子量較輕的核種，參與此研究的德國女科學家 Lise Meitner 稱此現象為「核分裂」。核分裂過程中，依愛因斯坦「質能互換」原理，質量消滅，以能量形式釋出；核分裂過程中，亦會產生數個中子，再度撞擊其他鈾原子核，形成「連鎖反應」，產生巨大能量，這就是目前世界上使用的核能發電工作原理。1939年二戰爆發，德國物理學家 Lise Meitner 及 Otto Frisch 提出核分裂反應的理論，致使美國軍方同年啟動「曼哈頓計畫」，為了早日結束戰爭而在 1945 年製造出人類史上第一顆原子彈。

1954年6月世界第一座民用功率 6,000 瓩(KWe)核能電廠(採用石墨水冷式反應器)於前蘇聯 Obninsk 運轉，同年第一艘核子潛艇「鸚鵡螺號」在美國下水。1957年第一座 60 百萬瓦(MWe)壓水式反應器(Pressurized Water Reactor, PWR)核能電廠於美國賓州西濱堡(Shippingport)商轉；1960年美國奇異公司設計的第一座容量 184 MWe 沸水式反應器(Boiling Water Reactor, BWR)在伊利諾州的 Dresden 核電廠開始運轉發電；1962年第一座重水式反應器(Pressurized Heavy Water Reactor, PHWR)在加拿大誕生，自此國際間開啟核能發電時代，世界各國積極地研發核能相關技術，並進行大規模的合作事宜。

曼哈頓計畫時代發展的石墨反應器，因它體積太大，也不容易控制，所以美國後來發展以輕水式反應器(Light Water Reactor, LWR)為主；英國則發展氣冷式石墨緩和劑反應器(Gas-cooled Reactor, GCR)；加拿大則致力於重水式反應器之發展；蘇俄為軍民兼用及經濟考量而發展獨特的水冷式石墨反應器，兼具商用發電及生產核武原料的雙重功能，例如發生核災的車諾比(Chernobyl)電廠所用的 RBMK(Reactor Bolshoy Moshchnosty Kipyashiy)反應器。

早期核電技術研發成功，加上電力需求、能源危機等，使得 1970 年代的核能電廠興建有如雨後春筍般冒出。以美國為例，1971年就有 41 座核能電廠申請興建。1974年，有鑑於核能電廠的數目漸多，美國基於安全考量，由專家學者進行風險評估，而評估的結果，認為核能電廠的安全程度，大約是當時最安全的工廠的十倍。

我國自 1960 年代因應經濟發展，電力來源已經由火力取代水力發電，鑑於我國缺乏化石燃料，而當時的燃料進口來源地為局勢長期不穩定的中東地區，為了確保能源的穩定供應，同時支撐國內經濟蓬勃發展所需的電力，前經濟部長孫運璿先生在 1970 年左右決定興建核能發電廠來因應需要。核一廠於 1970 年核准興建，1971 年底開始施工，興建期間，1973 年 10 月發生第一次石油危機，火力

發電成本爆增，影響能源的供應，核能發電的迫切性提高，同年政府將核能電廠列入十大建設，核能一廠列入十大建設計畫優先興建工程；核二、三廠為核能發電的延伸計畫，後續列入十二大建設計畫。

1979年發生的美國三哩島(Three Miles Island)事故，雖然民眾沒有受到輻射外釋的威脅，但是電廠爐心卻有部分熔毀。這個事件對於民眾健康無任何影響，卻對核能工業造成嚴重打擊。1986年前蘇聯的車諾比電廠，因為運轉人員的蓄意違法，關閉所有安全系統，釀成史上最嚴重的核能事故，有28位消防人員喪生，大量民眾遷居與大面積土地污染。由於接連兩次事故，加上1980年代全球電力產能過剩、經濟不景氣、油價相對穩定等種種因素，造成許多在建機組被取消或延後，使核電發展陷入空前低潮。此外，反核勢力在三哩島事故與車諾比事故發生後，在全球逐漸蔓延開來，也阻礙核能發展。

核能發電量最大的美國，自1979年三哩島核能事故發生以來至1990年，並沒有任何新核能電廠興建，但為因應其國內電力逐漸成長的需求，考量核能發電具有發電成本較低、不排放溫室氣體、發電量穩定、較適合作為基載電力等特色，從來未曾放棄興建新核能電廠的機會。美國核能管制委員會(U.S. Nuclear Regulatory Commission, NRC)自三哩島核能事故發生後，透過新法規的制定，不斷要求既有運轉中核能電廠必須提出各項因應改善計畫，如同我國核一、二、三廠在同時期也都依據原子能委員會的法規要求，分別進行各項硬、軟體的改善工程，以提升核能電廠安全的標準，NRC更要求新建的核能電廠必須較運轉中電廠提升更高等級的安全標準，使得電力業者質疑美國法規的不確定性，而對新建核能電廠較為遲疑。有鑑於此，美國電力研究院(Electric Power Research Institute, EPRI)在美國能源部(Department of Energy, DOE)的支持下，代表電力業者出面整合核能相關業界的意見，經不斷與NRC溝通，一方面由NRC進行核能法規修訂，由原有核能法規10CFR50規定，建廠執照與運轉執照的兩段式執照申請方式，另新增加10CFR52的立法，將建廠執照與運轉執照兩照合併申請的一段式執照(One-step License)方式。就法規方面而言，當電力業者取得建廠執照的同時也取得運轉執照，可降低核能業界對核能法規不確定性的疑慮。

另一方面，為求穩定確保新建核能電廠能符合更嚴格的核能法規，美國電力研究院領銜發起進步型輕水式反應器(Advanced Light Water Reactor, ALWR)研究發展的國際合作計畫，該計畫在美國能源部與核能工業界支持下，集合美國核反應器供應廠商、相關設計廠商及各電力業者高階主管代表，組成進步型輕水式反應器審查委員會共同合作，主要在發展並完成第三代進步型輕水式反應器的先期設計(First of a Kind Engineering, FOAKE)，並由電力研究院內部專家與國內、外電力業者代表外部專家(loan-ins)共同組成專案小組，完成審查並同時擬定業主要求文件(Utility Requirement Document, URD)，在進步型輕水式反應器先期設計完成後，向美國核能管制委員會申請設計認證(Design Certification)，以作為美國新

建核能電廠時業主設計要求以及廠商設計的基準，徹底解決核能執照不確定性的問題。然而該時期因美國成功開發頁岩油/氣，導致天然氣價格大幅下降，天然氣發電成本相較核能發電更具經濟性，使得美國電力業者不願投資興建核能機組。

我國與法國、韓國、義大利等國獲美國電力研究院邀請，於 1986 年至 1989 年每年各派一名專職核能技術人員，參與前述第三代進步型輕水式反應器國際研發計畫，並於計畫結束後，以完成所擬定之業主要求文件，作為核四計畫工程的設計基準，進行核四廠的興設計畫。

另，考量國際間許多民眾因不了解核能發電而引發誤解甚至恐慌，核能業界建立了一套完整的「核能安全文化」，強調安全重於一切，將核能安全觀念與作為內化於組織與相關工作人員中，形塑安全文化；再者，世界性核能組織如世界核能運轉協會(World Association of Nuclear Operation, WANO)與國際核能發電協會(International Nuclear Power Operation, INPO)透過評鑑、稽核等作為，與各國核能發電之電力業者相互合作，大力提升核能營運績效，促使今日核電工業的工安紀錄是全世界最好的產業，核能機組容量因數也是所有發電種類中最高的。以美國為例，依據美國國家科學院院刊於 2022/12/20 發表 Capacity Factors for electric Power Generation from Renewable and Nonrenewable Sources：統計 2000~2017：容量因數，核能 79~81%，化石 46~48%，風力 22~23%，太陽能 11~12%；另外 DOE 統計 2022 年容量因數，核能平均高達 92.7%，燃煤 48.4%，燃氣 65.4%，風力 35.9%，太陽能 24.4% (DOE, 2022)，核能成為維持供電穩定的重要支柱。

2011 年，日本東京電力公司轄下的福島核能一廠因發生東北大地震引發海嘯，導致電廠失去所有外電，且廠內緊急供電系統柴油發電機也被海嘯淹沒，失去所有電源而無法冷卻因地震自動停機後反應爐中遺留下的衰變熱，導致發生爐心熔毀的核子事故，此乃因該公司在此之前未能主動確實進行核電廠安全評估(Probability of Risk Analysis, PRA)，了解電廠的弱點加以防範，也未能接受日本工業界前曾提醒東北可能發生大地震引發海嘯對核電廠造成安全威脅，加上未備妥因應發生核子事故的緊急應變作為與相關程序，才導致核災發生。此核子事故發生後，包括日本國內與國際原子能總署(IAEA)都積極調查與評估事故發生原因，也都得到主要是人為因素造成事故的結論，使得大部分擁有核能發電的國家除因應核子事故增建部分硬體設備外，又再加強安全文化，以確保核能安全。

截至 2023 年 9 月 30 日止，全世界共有 32 個國家計 411 部核能機組運轉中(如表 2.1)、17 個國家計 58 部機組興建中(如表 2.2)、以及 22 個國家 209 部機組永久除役(如表 2.3)，另有部分機組停止運轉而處於長期冷卻狀態(Long-term Cooling)。其中最值得注意的，美國田納西河谷管理局(TVA)所屬 Watts Bar 1、2 號機組於 1973 年開始施工興建，1985 年因電力過剩而暫停施工。嗣後，1 號機組於 1992 年復工、1996 年完工；2 號機組在 1985 年停工時，施工完成率約 60%，

2007年10月(停工約22年後)TVA核准復工，而於2016年完工。美國Holtec國際公司於2022年5月購入位於密西根州已經停止運轉而進入除役階段的Palisades核電廠，於2023年10月宣布，其已向NRC申請重新啟動核電廠運轉。另，德國最後的三部核能機組原預定於2022年12月停止運轉，因發生俄烏戰爭導致能源短缺，故延長其運轉時間至2023年4月才停機。

表 2.1、全世界運轉中核能機組

國家	機組數	淨裝置容量/MW	國家	機組數	淨裝置容量/MW
美國	93	95,835	匈牙利	4	1,916
法國	56	61,370	瑞士	4	2,973
中國	55	53,181	阿根廷	3	1,641
俄羅斯	37	27,727	阿拉伯聯合大公國	3	4,011
南韓	25	24,489	巴西	2	1,884
印度	19	6,290	保加利亞	2	2,006
加拿大	19	13,624	墨西哥	2	1,552
烏克蘭	15	13,107	羅馬尼亞	2	1,300
日本	11	10,266	南非	2	1,854
英國	9	5,883	白俄羅斯	2	2,220
西班牙	7	7,123	伊朗	1	915
瑞典	6	6,937	尼德蘭(荷蘭)	1	482
捷克	6	3,934	斯洛維尼亞	1	688
巴基斯坦	6	3,262	亞美尼亞	1	416
比利時	5	3,928	中華民國	2	1,874
芬蘭	5	4,394	<b>總計</b>	<b>411</b>	<b>369,390</b>
斯洛伐克	5	2,308			

表 2.2、全世界建造中核能機組

國家	機組數	淨裝置容量/MW	國家	機組數	淨裝置容量/MW
中國	22	22,724	烏克蘭	2	2,070
印度	8	6,028	美國	1	1,117
土耳其	4	4,456	斯洛伐克	1	440
俄羅斯	3	2,700	巴西	1	1,340
南韓	3	4,020	阿根廷	1	25
埃及	3	3,300	法國	1	1,630
孟加拉	2	2,160	伊朗	1	974
日本	2	2,653	阿拉伯聯合大公國	1	1,310
英國	2	3,260	<b>總計</b>	<b>58</b>	<b>60,207</b>

表 2.3、全世界除役核能機組

國家	機組數	淨裝置容量/MW	國家	機組數	淨裝置容量/MW
美國	41	19,976	斯洛維尼亞	3	909
英國	36	7,755	西班牙	3	1,067
德國	33	26,235	比利時	3	2,024
日本	27	17,119	南韓	2	1,237
法國	14	5,549	立陶宛	2	2,370
俄羅斯	10	3,957	瑞士	2	379
瑞典	7	4,054	亞美尼亞	1	376
加拿大	6	2,143	哈薩克	1	52
保加利亞	4	1,632	尼德蘭(荷蘭)	1	55
義大利	4	1,423	巴基斯坦	1	90
烏克蘭	4	3,515	中華民國	4	3,178
			總計	209	105,095

資料來源：表 2.1~3 IAEA/PRIS (2023)

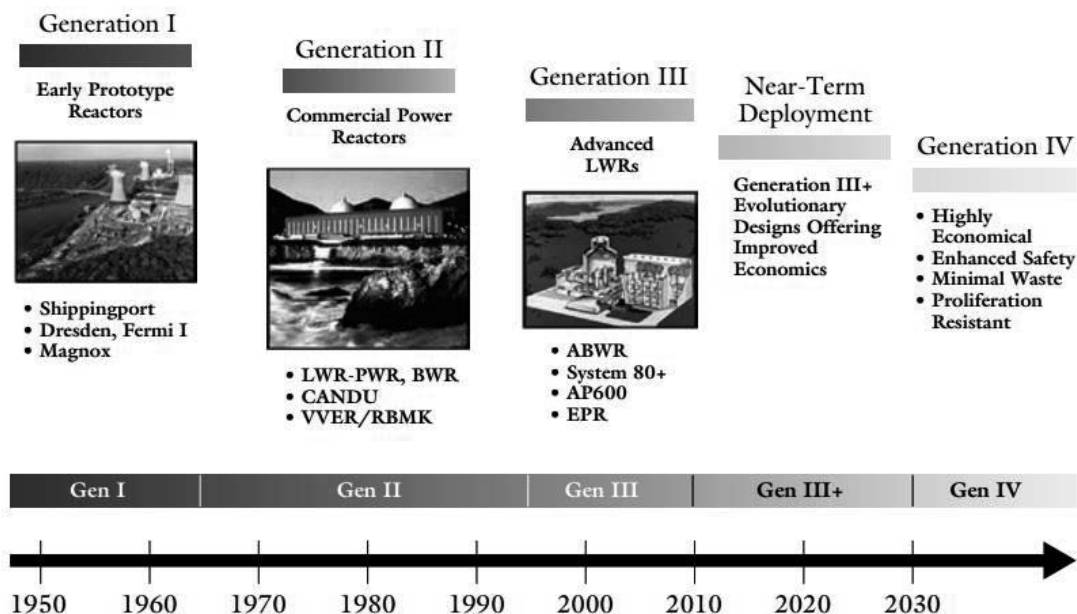
展望未來，世界各國為挽救地球免於氣候變遷導致地球升溫超過 1.5°C，能源轉型成為必須認真面對的問題，如同聯合國核能主管 Mr. Rafael Grossi 所稱，核能必須是解決氣候變遷方程式的一部分，國際能源總署(IEA)在其邁向 2050 淨零排放路徑上，建議 2050 的核能發電裝置容量較目前要加倍(IEA, 2023)。另，2023 年 11 至 12 月於杜拜召開的 COP28 氣候變遷高峰會中，美國、日本、英國、法國等 22 個國家發表聯合聲明，呼籲到 2050 年全球核能裝置容量達 2020 年的三倍，以協助達成 2050 淨零排放目標。因此要達成此目標，即使將現有運轉績效良好且發電成本極低的核能電廠予以延役，仍不足夠，尤其許多老舊、碳排放多且汙染較嚴重的燃煤電廠要逐步退場，新建核能機組必不可免。又考量過去大型核電廠建造經驗，建造時間長、成本高，而導致投資風險較高，因此建造時間短、投資成本低且安全性更高的小型模組化反應器(SMR)，以及更強調能源永續與較方便處理核廢料的第四代(Gen IV)核能機組，便成為許多國家佈署的重點。甚至過去數十年發展緩慢的核融合技術，也拜電腦科技、人工智慧與材料科學的快速進步，近年來有較為實質的進展，也成為人類預期未來的能源選項。

綜觀整個核能發電之技術發展過程，1950~60 年代由軍用發展開始，逐漸擴大至民間建造第一代(Gen I)核反應器，美國、英國、蘇聯、加拿大等國積極開發原型/示範核電廠，此時期具代表性者有美國 Shippingport 壓水式反應器、Dresen-1 沸水式反應器、英國 Calder Hall A 石墨氣冷式反應器、蘇聯 APS-1 壓力管式石墨水冷式(RBMK)反應器以及加拿大 NPD 重水式反應器等。

緊接著 1970~1990 年代由第一代反應器改良並開始商業化-包括標準化、系列化、大量化建造商用核電廠，也提升核能安全度，開啟第二代(Gen II)核反應

器階段，這一代具代表性者有改良型 PWR 如美國西屋(Westinghouse, WH)-PWR 與燃燒公司(Combustion Engineering, CE)-System 80-PWR 及法國系列 P4 與 M310-PWR、奇異(General Electric, GE)-BWR，我國核一廠與核二廠屬於 GE-BWR、核三廠屬於 WH-PWR 的第二代機組。另，還有英國改良第二代進步型氣冷式反應器(Advanced Gas Cooled Reactors, AGCR)、俄羅斯改良 RBMK、VVER 及加拿大改良 CANDU。第二代核反應器仍為目前國際間主力運轉核電廠，因運轉績效良好，且因營運時間長，過去建廠時產生的固定成本都已折舊攤提完畢，發電成本極低，因此絕大部分核能發電國家都在進行延長電廠運轉壽命。

自美國發生三哩島事故後，為防止核子事故再發生必須更加提升核電廠安全性，除要求加強改善現有運轉中第二代核電廠的安全性，並提升新建核電廠更高的安全標準，整合核能產業界開發並經過驗證的技術，設計第三代(Gen III)核電廠以符合核電廠業主需求，主要特色為採取核能事故的預防(Prevention)、保護(Protection)、緩和(Mitigation)並重原則，部分採用重力與自然對流的被動/非能動安全(Passive Safety)系統設計以因應事故。第三代核電廠具代表性者有美國 WH-AP1000、CE-SYSTEM 80+、GE-ABWR、GE-ESBWR、法國 EPR-1400、韓國 APR-1400、俄羅斯 VVER-1000、BN-800(快中子滋生式)及中國-華龍一號(HPR-100)，我國核四廠的 GE-ABWR 即屬於第三代核電廠。第三代核電廠設計採用被動安全系統又歸類為第 3.5 代/第三代+(GenIII+)，具代表性者有 WH/Toshiba-AP-1000、GE-ESBWR、中國/WH-CAP-1400、法國 EPR-1660、韓國 KEPCO-APR1400、俄羅斯 VVER-1200(AES-2006)與印度 IPHWR-700 等。歷代核能機組發展過程如圖 2.1。基本上每一代核能機組發展都在提高核能安全度，第四代核能機組更強調能源永續應用與增加核廢料處理彈性。



資料來源：American Academy of Arts and Sciences

圖 2.1、核能機組發展進程



NRC 為配合核能業者對法規穩定性的要求，並加強對第三代核能機組設計規定更高要求的情況下，啟動了設計認證(Design Certification)制度。核反應器設計者可向 NRC 申請設計認證，以簡化核能電廠建廠執照的法規審查程序。到目前為止，第三代核反應器機組獲得設計認證者計有美國 GE-ABWR、GE-ESBWR、WH-AP1000、WH-600、CE-System 80+、韓國 KEPCO-APR1400 以及 2022 年通過認證的美國 NuScale 小型模組化反應器(Small Modular Reactor, SMR)。

為強化能源可持續性、安全可靠、經濟競爭性與防止核擴散及實體保護等需求，第四代(Gen IV)新型核反應器應運而生，此種包括部分小型模組化反應器在內的第四代反應器成為各國積極發展的機組，以因應 2050 淨零排放的需求。NRC 為配合此新型與小型模組化反應器發展，擬定 2027 年前頒布 10CFR53 以作為對新型反應器設計審查的依循法規。在新調整法規頒布前，對核反應器機組設計則仍維持以現有相關法規作為審查與核准依據。



## 第三章 核能發電之議題

核能發電發展的過程中始終都面臨核能安全、核廢料、建廠與發電成本的質疑與挑戰，本章將針對這三個議題分別說明。

### 第一節 核能安全

談起核能安全，必然聯想到核能發電史上發生的三大核能事故：1979 年美國三哩島核電廠事故、1986 年蘇聯車諾比核電廠事故以及 2011 年日本福島一廠核電廠事故。有關這三次核能事故的發生原因、過程及影響與檢討說明如後：

#### 一、美國三哩島核電廠事故

##### (一)事故發生原因

1979 年 3 月 28 日，美國賓州三哩島核電廠 2 號機(PWR 機組)因人為因素與機械故障的綜合效應，導致發生小型喪失爐心冷卻水事故(Small Loss of Coolant Accident)。該事故雖未對大眾造成明顯的輻射影響，但成為美國與國際核電發展的轉折點。事故發生原因為用以冷卻二次側冷卻系統的設備故障，而之前輔助系統維修後未遵守程序復歸，使得啟動的輔助冷卻泵無法正常運作，而喪失二次側冷卻水。其後，因一次側喪失來自二次側的冷卻造成爐心壓力上升，動力卸壓閥(Power Operated Relieve Valve, PORV)自動開啟釋出壓力，壓力下降後又因故障無法關閉，加上儀器設計不佳與運轉員的錯誤只注意到調壓槽的高水位，未能做出已喪失冷卻水的正確判斷，而關閉爐心自動注水系統，導致爐心冷卻水流失，造成部分爐心燃料熔毀。

##### (二)事故影響與檢討

三哩島核子事故是核能史上第一次發生爐心熔毀事故，此事故對公共安全及周圍居民的健康沒有不良影響。主要原因在於圍阻體(Containment)發揮了功能，避免放射性物質大量外洩，突顯其作為核電廠最後一道安全防線的重要性。在整個事件中，機械故障、儀器設計不佳、人員的操作錯誤以及因應緊急事件的處理能力不足是主要原因，因此核電廠安全設備的加強、儀控系統人性化的設計、運轉與維修人員的培訓、面對緊急事件處理能力的加強以及核電廠安全評估技術的精進等硬、軟體的改善，對核電廠的安全運轉有著重要影響，也成為後來核電廠包括我國核一、二、三廠的三哩島改善行動(TMI Action Plan)的主要改善內容。在改善行動逐次執行後，核能電廠的安全性明顯改善。依據美國電力研究院調查美國核電廠的安全度評估(Probabilistic Risk Assessment, PRA)結果，美國核電廠的平均爐心熔毀率(Industry Average Core Damage Frequency, CDF)由 1980 年代的  $1.0E-4$  降到 1992 年的  $9.0E-5$ 、2000 年的  $3.2E-5$ 、再到 2005 年的  $2.0E-5$ (John Gaertner

& Ken Canavan, 2008)。顯見核電廠在三哩島事故後安全性明顯提升。至於第三代核能機組的 CDF 設計要求則低於  $1.0 \text{ E-}5$ 。

## 二、蘇聯車諾比核電廠事故

### (一)事故發生原因

1986 年 4 月 26 日蘇聯車諾比核電廠 4 號機在執行同時失去外部供電與反應器主冷卻水洩漏的雙重事件的試驗下，利用汽輪發電機支撐緊急冷卻水泵運轉能力的安全測試中，因為運轉員蓄意不遵守安全程序-包括停掉自動停機功能以及反應器設計先天缺陷的雙重影響下，導致了蒸汽爆炸和爐心熔毀。

### (二)事故影響與檢討

由於車諾比核電廠的 RBMK 反應爐為最早期的核能反應器，只設計了單一的防護層，沒有西方國家設計的圍阻體，反應爐蒸汽爆炸後，放射性物質立即直接暴露於大氣中，釋放出大量的放射性微粒和氣體物質，隨後空氣中的氧氣與超高溫核心中的可燃性石墨緩和劑(Moderator)接觸，導致石墨燃燒，加速了放射性物質的洩漏，放射性物質隨風跨越了國界。

依據國際衛生組織(WHO)的調查結果，除事故發生初期受重度輻射曝露的救火人員 28 人死亡外，長期追蹤顯示其他人員包括民眾也有受到傷害及增加罹癌的風險。

車諾比核電廠的設計與西方不同，再加上蓄意執行不安全的測試作法，其造成的核能事故在西方國家的核電廠是不可能發生的。

## 三、日本福島一廠核電廠事故

### (一)事故發生原因

2011 年 3 月 11 日日本東北地區太平洋發生大地震，東京電力公司所屬福島一廠運轉中的 1~3 號機的反應爐均自動停機，而地震造成電源故障，導致機組失去了外部供電，緊急柴油發電機自動啟動。地震引發高達 14 公尺的海嘯襲擊僅 5.7 公尺高的電廠，淹沒了位於電廠地下室的緊急柴油發電機以及電氣、電池等設備，電廠失去所有電源，水泵無法運行，無法繼續向爐心和用過燃料池注入冷卻水，導致爐心燃料與用過燃料池的燃料因高溫而熔毀。熔毀的燃料護套鍍金屬因高溫與水發生反應，產生大量氫氣而發生氫氣爆炸，反應器廠房損壞，圍阻體局部受損，部分放射性物質洩漏到周圍環境。

### (二)事故影響與檢討

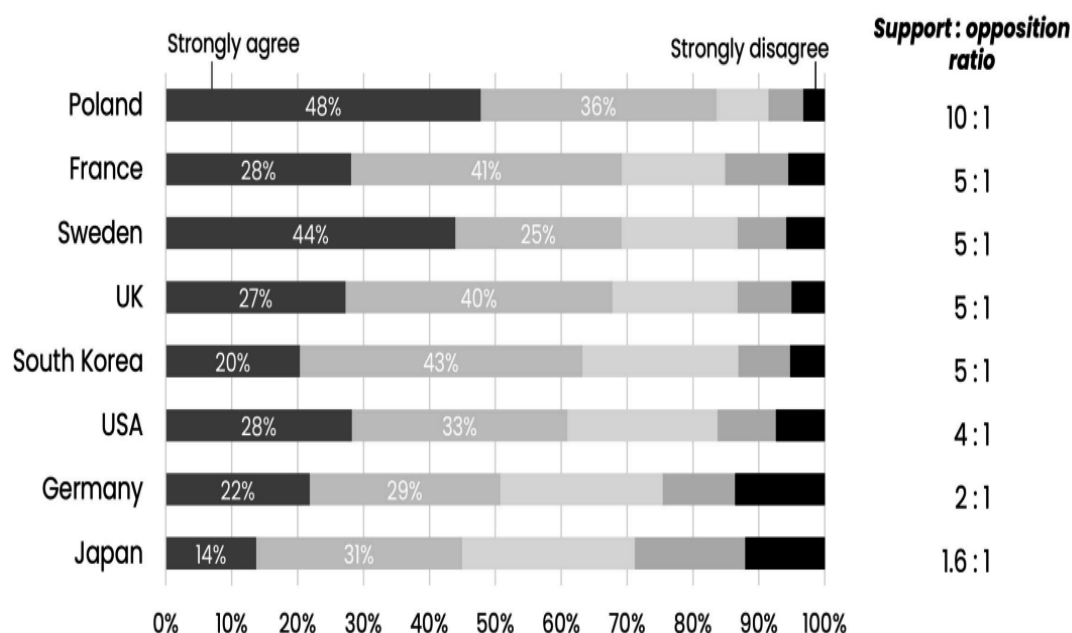
事故發生後，日本政府撤離 10 萬居民，但未有證據顯示民眾因輻射受傷害。依據

日本政府組成的福島事故調查委員會與國際原子能總署調查的結果，都顯示福島事故是可以預測與避免的。日本研究機構與 NRC 都曾警告核電廠有失去緊急電源的風險，但因電力公司與核電廠未採取因應措施，再加上事故發生後，無論東京電力公司本身與日本政府相關單位溝通不良，未能及時採取因應行動等等，導致核子事故的發生。

截至 2023 年，廢爐工作持續進行，預定 2041 年到 2051 年完成。2021 年 4 月日本政府經國際原子能總署審查後，正式決定將約 120 萬噸的核污染水/核廢水經先進液體處理系統(Advanced Liquid Processing System, ALPS，日本又稱為多核種處理系統)處理後，將主要含氚的 ALPS 處理水(ALPS Treated Water)以大量海水稀釋後排入大海。經國際原子能總署於 2013 年至 2023 年長期參與調查與評估，認為就科學與技術評估結果，ALPS 處理水在控制下排放入大海，對人們與環境的輻射影響可以忽略(IAEA, 2023)。

福島事故發生後，各國紛紛參據 NRC 與國際原子能總署訂定的規範，重新審視及強化核能安全與緊急事故應變準備機制(Emergency Preparedness)，並執行核能電廠緊急事故應變的壓力測試。以核四廠為例，重新檢視電廠的耐震與防海嘯能力、模擬福島事故、進行全套情境演練，並檢討臨時救災設備與備品、工具之適當性、充足性與配置以及包括燃油、電源、冷卻水源之後續運作資源及備援能力，並建立台電公司外部技術支援協議與建立斷然處置程序等等。

福島事故後使得全球核能復甦趨緩，後因 2050 淨零排放與俄烏戰爭能源危機的影響下，各國又積極發展核能發電。依據包括 Clear Path、Potential Energy Coalition、RePlanet、Third Way 等 4 家獨立非政府組織(NGOs)於 2023 年 5 月發佈於 2022 年 11 月~2023 年 1 月期間，調查美國、法國、德國、波蘭、瑞典、英國、日本與韓國等 8 國公眾針對新型核能技術的立場調查結果，贊成核能與反對核能的比例如下：波蘭為 10：1、法國 5：1、瑞典 5：1、英國 5：1、韓國 5：1、美國 4：1、德國 2：1 以及日本 1.6：1(如圖 3.1)，顯見核能已成為許多國家支持的能源選項。



資料來源：The World Wants New Nuclear (2023)

圖 3.1、4 家 NGO 調查 8 國公眾對新型核能技術之立場

	支持 (非常支持+支持)	反對 (非常反對+反對)		支持 (非常支持+支持)	反對 (非常反對+反對)
波蘭	84%	9%	法國	69%	15%
瑞典	69%	13%	英國	67%	13%
美國	61%	16%	德國	51%	25%
日本	45%	29%	韓國	63%	13%

另，世界核能新聞(World Nuclear News)於 2023 年 5 月發佈美國 Bisconti 研究公司調查美國公眾意見，支持興建更多核電廠者占 76%、反對者占 24%，再次證明國際間民眾普遍支持核能作為因應 2050 淨零排放的重要選項。

## 第二節 核廢料(放射性廢棄物)

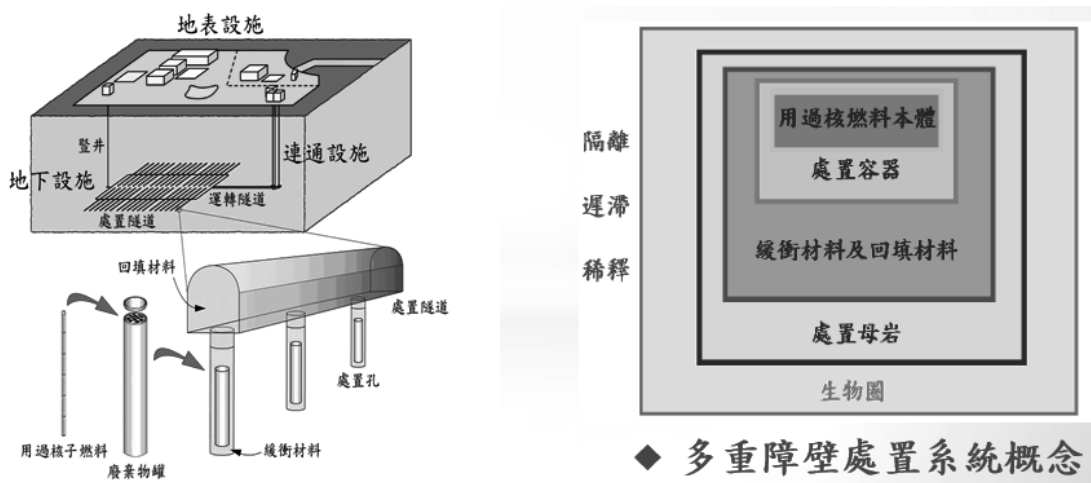
核能電廠產生的廢料分為低階核廢料(低放射性廢棄物)與高階核廢料(高放射性廢棄物)。低階核廢料是核電廠營運時產生的受放射性核種污染的廢棄物，例如用於水處理的樹脂、汙染衣物清洗後的殘餘物、可燃性汙染物燃燒後的殘渣等。低階核廢料的處置方法是在地質較穩定的地方，建造一個淺層地窖，或挖個山洞，做好排水設施，將低階核廢料桶置入，在桶與桶之間加入不透水的充填物後覆土，

因其輻射量低，且放射性核種的半衰期短，故需與生物圈隔離的時間也短。低階核廢料的管理完全沒有技術上的問題，全世界已有超過百座的低階核廢料處置場在運作。即使沒有核能發電，工業、醫療與學術研究部門都會產生低階核廢料。

世界各國處理核廢料大都基於下列原則(WNA, 2023)：

- 核廢料應適當儲存以避免造成民眾輻射暴露以及環境污染。
- 核廢料隨著時間衰變，因此許多國家傾向在高階核廢料最終處置前先貯存大約 50 年~100 年。
- 低階核廢料處置較明確，幾乎在任何地方都能安全處理。
- 用過核燃料通常都先放置水中至少 5 年，再改為乾式貯存。
- 大多數國家都同意深層地質掩埋是大部分高階核廢料最佳的處置方式。

高階核廢料是指用過核燃料(Spent Nuclear Fuel)經處理後，將有用的鈾與鈾回收後剩下的廢棄物，因其放射性強度高，且半衰期長，需要長時間與人類生活圈隔離。用過核燃料再處理技術所分離出高純度的鈾，是製造原子彈的材料，技術的推廣受到防核武擴散的管制，牽涉複雜而敏感，所以部分核能國家持保留態度。有些國家如瑞典、芬蘭、美國、台灣等規劃將用過核燃料視為高階核廢料，直接進行深層地質處置，找一個地質結構合適的地方，在地表下數百公尺深處建造地窖，將用過核燃料先置入銅製或不鏽鋼容器，再置入地窖，地窖與周圍岩體間之空隙填滿不透水的充填物，再將地窖封頂。用過核燃料最終處置示意如圖 3.2。



資料來源：台電月刊(第 468 期)

圖 3.2、用過核燃料最終處置示意圖

國際上目前僅芬蘭和瑞典的”用過核燃料最終處置計畫”發展最為成熟，如瑞典早在 2011 年就提出建照申請，預定 2025 年開始興建；芬蘭於 2016 年便取得

興建最終處置場建照，現已取得運轉執照，預定 2024 年開始最終處置場營運；核電大國法國也已獲得主管機關建照許可。創造良好溝通環境，基於共識制定決策解決方案，是瑞典與芬蘭尋求最終處置場的做法。英國借鏡瑞典，通過一種「建立共識」的方式，找到了一個地點，也得到了當地人的同意。在這項合作中，政府負責機構-核廢料管理局與當地社團形成伙伴關係，將由當地民眾參與最終處置場的建設過程。

有關國際間採用深層掩埋核廢料規劃時程如表 3.1。

表 3.1、國際間採用再處理與直接處理(深層掩埋)核廢料規劃時程

國家	再處理	直接處理	處置時程	備註
中國大陸	✓		2050+年	進行測試適合的建造程序
法國	✓		2035 年	2023/1 申請興建執造
日本	✓		2035 年	2025 年決定場址
俄國	✓		tbc	先建造地下實驗室
英國	✓		2040 年	未來將採取直接處置
美國	早期先導試驗	✓	擱置	2011 年終止雅卡山(Yucca Mountain)處置計畫暫時擱置
德國	至 2005 年止	✓	2050 年	2031 年決定場址
加拿大		✓	2040+年	2024 年決定場址
芬蘭		✓	2024 年	已選定 Olkiluoto 處置場 2016 年動工、2020 年申請運轉執造
瑞典	早期少量再處理	✓	2030-2032 年	已選定 Forsmark 處置場 2022/9 申請興建執造

資料來源：WNA (2023)

美國政府於 1980 年代開始選址工作，當初選定尤卡山(Yucca Mountain)作為高階核廢料最終處置場址，2010 年以前也向 NRC 申請建照，但因地方反彈，隔年計畫喊卡，時任總統歐巴馬並命令能源部成立藍帶委員會(Blue Ribbon Commission, BRC)，重新評估美國用過核燃料處置方案。經重新規劃，最終處置計畫時程延至 2048 年，考量這期間之前用過核燃料棒持續增加，又選定德州規劃建置獨立用過核燃料貯存場(Independent Spent Fuel Storage Installation, ISFSI)，作為中期暫存，目前此案正在 NRC 審查階段。另，一些提供核電廠除役技術服務的民營專業廠商如 Holtec 公司，在處理核電廠除役時，就將用過核燃料暫時貯存於其自行建置的用過核燃料貯存場內。

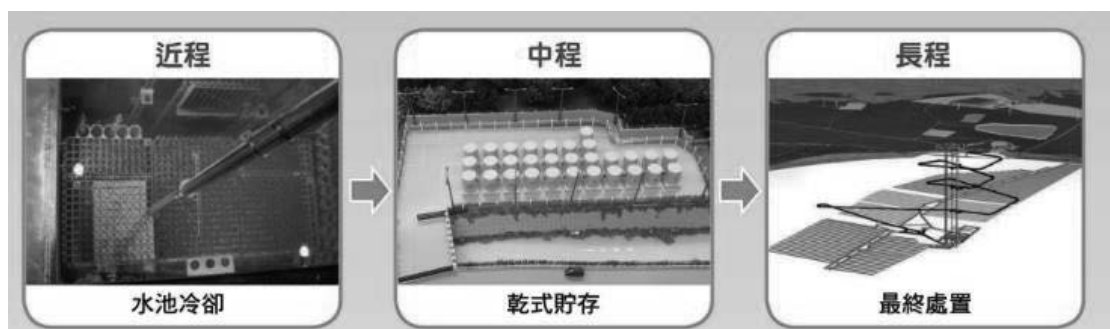
另外，有些國家將用過核燃料視為可再利用燃料，因部分發展中的新型核反應器可燃燒用過核燃料，如此可處理掉部分用過核燃料，且可使核燃料永續使用。



新型反應器中的快中子核反應器(Fast Neutron Reactor)可降低高放射性廢棄物的量體，也有助於解決部分高階核廢料問題。未來高階核廢料也可利用核轉換技術(Transmutation)轉化成半衰期較短(如數百年)的廢料以利處理。

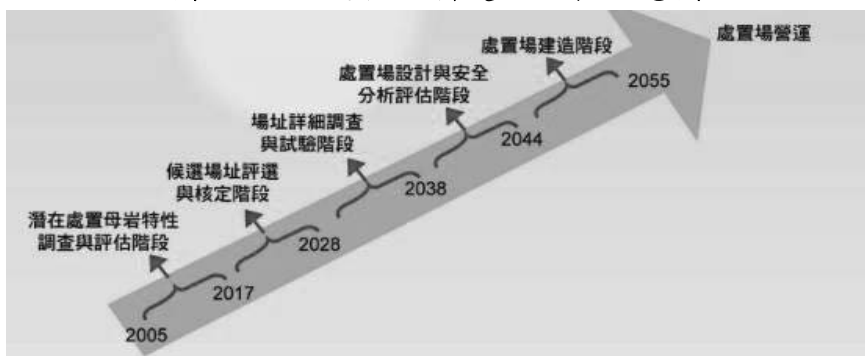
雖然核廢料處理技術上已是成熟，但核廢料處理已演變成公眾關注議題，尋找適當且民眾可接受的地點建造最終高階核廢料處置場，需要費時與公眾充分溝通，因此許多國家採行的策略是先將用過核燃料在核電廠用過核燃料池(Spent Fuel Pool) 貯存 5 年以上，再改以乾式貯存(Dry Storage)方式暫時貯存於核電廠內，或將所有用過核燃料集中存放在中期貯存場，如上述美國規劃的處理方式。除美國外，尼德蘭(荷蘭)、瑞士、比利時等國也是「先經中期暫時貯存後再進行最終處置」，其中尼德蘭規劃將用過核燃料集中存放於中期貯存場 100 年，以利有較充裕時間平行推動最終處置場的建置。

我國處理高階核廢料(用過核燃料)，分成近程、中程與長程等步驟，如圖 3.3。近程將用過核燃料放在核電廠的用過核燃料池(Spent Fuel Pool)；中程等待衰變熱降低，輻射減弱後移出用過燃料池，轉至乾式貯存設施，繼續降溫、減少輻射，或送往國外進行再處理，回收可再利用的核物料後，將殘餘物玻璃固化處理；長程則設置最終處置設施，進行最終處置。用過核燃料最終處置程序分為：潛在處置母岩特性調查與評估階段、候選場址評選與核定階段、場址詳細調查與試驗階段、處置場設計與安全分析評估階段與處置建造階段，最後建造完成後，計畫於 2055 年處置場開始營運，用過核燃料最終處置計畫時程如圖 3.4。



資料來源：台電核能月刊(第 468 期)

圖 3.3、用過核燃料處理流程示意圖



資料來源：台電核能月刊(第 468 期)

圖 3.4、我國用過核燃料最終處置計畫時程

此外，尋求國際合作共同處理的多國處置(Multinational Repositories)核廢料也是一條途徑，惟目前許多國家基於本國法律不接受他國核廢料，且另有核廢料國際公約需要遵循等問題尚須解決，才有可行性(WNA, 2023)。這些都可作為台灣處理核廢料的參考，畢竟台灣使用核能發電已超過 40 年，無論將來是否繼續使用核能，都必須面對既有核廢料的處理問題。

### 第三節 核能之建廠與發電成本

目前國際間運轉核電廠的主力仍為第二代核反應器機組，雖多數機組運轉超過 30 或 40 年，因運轉安全穩定、績效良好且立即可續用，故絕大多數國家都在進行延長第二代核電廠的運轉壽命(延役)。因原建廠固定成本都已折舊攤銷完畢，以致發電成本相對其他發電方式低。依據國際能源總署(IEA)估計，延役所需更新部分設備的固定成本(Capital Cost)約美元\$500~1,100/kW(2030 年價位)，加上燃料的變動成本與營運及維護成本，總計估算的均化發電成本(Levelized Cost of Electricity, LCOE) 約\$40/MWh，較諸任何發電方式的成本都低，既安全、好用、經濟又不排放碳，這也是絕大多數國家短期優先採取核電廠延役的最主要原因。

依過去 20 年來大型核能機組的建造經驗，因都屬首創(First-of-a-kind, FOAK)機組，以第三代輕水式反應器為例，美國西屋-AP1000 與法國-EPR 等機組在施工前設計完成率偏低、專案管理不佳、技術人員缺乏與經驗不足等不良條件下，建造時間遠較預定長，建造成本遠較預定高，但同是第三代在日本建造的進步型沸水式反應器(ABWR)機組，其建造時間短、建造成本也低，顯示基礎建設條件、管理與技術人才影響核能電廠建造至巨。目前發展中的小型模組化核反應器(SMR)與新型核反應器因採用工廠預製模組製造，系統設備簡化與新材料、新施工技術的應用，建造時間可大幅縮短，建造成本也可降低。依美國麻省理工學院(MIT)研究結論，首創機組建造隔夜成本(Construction Overnight Cost)約\$4,600~5,400/kW；非首創(Nth-of-a-kind, NOAK)機組可降低到\$3,000~4,000/kW。依 IEA 蒐集各國建廠經驗估計，首創機組建造隔夜成本\$2,850~7,700/kW，均化發電成本\$58~204/MWh；再依美國能源部(DOE)估計，如能吸取以往核電廠建造經驗，加以良好執行工程管理，首創機組的建造隔夜成本約\$6,000~\$9,000 美元/kW、均化發電成本約\$85~109/MWh，後續機組建造隔夜成本可望降為\$3,600~5,000/kW、均化發電成本\$66~78/MWh。

## 第四章 小型模組化與新型反應器之發展

### 第一節 小型模組化核反應器之發展

綜合近十年來，第三代大型核電廠建造時間較預期為長、成本較預期為高，美國核能界開始把注意力放在小型模組化核反應器的發展。

#### 一、小型模組化核反應器(SMR)是甚麼？

SMR 就是 Small(小型)+Modular(模組化)+Reactors(反應器)，根據國際原子能總署區分，小型模組化反應器，輸出功率 10~300 MWe(百萬瓦)-包括輸出功率 1~10 MWe 的微型模組化反應器(Micro Modular Reactors, MMR)。輸出功率 300~700 MWe 稱為中型反應器，700 MWe 以上稱為大型反應器。小型模組化反應器被認為是核電領域最有前途的新興技術之一，可以幫助各國在尋找可靠和負擔得起的能源、同時削減溫室氣體排放和推動可持續發展、滿足電力需求的反應器設計。SMR 在效率、靈活性和經濟性方面的獨特屬性，使它們在清潔能源轉型中發揮關鍵作用。SMR 可成為各國因應能源價格、氣候變遷(Climate Change)和可持續(Sustainable)發展等挑戰的一種解決方案。

與大型核反應器不同，SMR 是一種小型簡化式核能機組設計，可將主要設備組件由工廠預製與組裝成模組，再運送至工地建造，如此可減少現場工作，確保減少建廠施工時間與成本，並因而並降低施工安全風險。

部分 SMR 如整合型壓水式反應器(Integrated PWR, iPWR)因許多設備組件如反應器冷卻泵(Reactor Coolant Pump)、調壓槽(Pressurizer)與蒸汽產生器(Steam Generator)等整合在單一反應器槽(Reactor Vessel)內使得體積較為精巧。SMR 也能視需要，逐次增加機組/單元(Unit)擴展整廠容量至相當於傳統大型核電廠。

SMR 的模組化設計可提供較少建廠成本的投資、可擴充性及提供於不適合建造大核電廠地區所需的電廠廠址彈性，可靠近電力需求處，如數據中心(Data Center)直接就近供電、因小型模組化使其具有共同選址(Co-siting)的經濟性、執行隨電網負載需要，調整輸出功率的負載追隨(Load Following)功能，提升併網彈性(Flexibility)，並且因模組化可在製造與組裝過程，進行部分系統的功能測試，展開平行工作而降低建廠工期，同時透過序列的工廠製造與設備標準化，更能提升品質與效率，使得工地現場工作較為單純而有更好的施工環境。

SMR 相對傳統大型核能機組建廠工期較短，一般估計，傳統大機組建廠大約需 5~8 年，SMR 首創(FOAK)機組估計約需 4~5 年，接續機組(NOAK)約 3~4 年(Shobeiri, E. et al., 2023)，因此預期 SMR 可減少建廠工期，改善品質與降低建廠投資風險，有利於建廠融資。SMR 也非常適合與風能和太陽能等間歇性再生能源

靈活搭配使用，尤其可與對電網高穿透率(Penetration Rate)的再生能源形成互補，以及作為海水淡化(Seawater Desalination)、區域與工業的熱量供應(District and Industrial Heating)和製氫(Hydrogen Production)等非電力方面的應用。

在核能安全方面，SMR 因機組功率小、精簡設計與被動/非能動或固有安全(Passive or Inherently Safety)特性，減少因失卻冷卻劑(Loss of Coolant)導致燃料破損(Fuel Damage)與大幅降低發生核子事故造成輻射外漏的風險。

另外 SMR 的目標也要做到緊急計畫區域(Emergency Planning Zone, EPZ)縮小到廠區內，如 NuScale 已經 NRC 審核通過，對廠外環境和社區發展的影響減至最低，也可減少當地民眾的反對。

## 二、SMR 的技術特色

以整合式壓水式核反應器(iPWR)為例，其特色包括(NEA, 2021)：

### (一)整合設計(Integral Design)：

由於爐心容積小(Lower Core Inventory)可採用整合設計，將傳統核能蒸氣供應系統(Nuclear Steam Supply System, NSSS)的所有設備整合在單獨反應器槽內，使得整體一次冷卻劑容積相對傳統大型核能機組的外部循環架構較大，增加熱容量與熱慣性而強化固有安全性並簡化設計及運轉維護。

### (二)固有安全(Inherent Safety)：

因爐心小、功率較小，面積體積比(Surface to Volume Rate)相對較大，增加正常運轉與異常情況下的被動/非能動安全系統效率，例如高度依賴被動安全系統的輕水式反應器的 SMR 就具有簡化設計及運轉維護的優勢。

### (三)場址選擇彈性高：

因爐心容積小，輻射隔離限制較少，工作人員輻射暴露較少，意外事故發生機率較低，緊急計畫區域較小，SMR 場址可更接近能源或電力所需之處，增加 SMR 場址選擇彈性。

### (四)可模組化與易製造性：

SMR 的重量與大小使得主要設備組件容易製造、運輸、吊裝與施工，SMR 的小型化有利於採用模組化與新製造技術。

### (五)強化應用彈性：

SMR 因具有固有安全特性與視需要調整運轉模組數的彈性，可增加負載追隨(Load Following)能力，且兼具發電與熱量供應能力。

### 三、SMR 的種類

SMR 設計如採用被動/非能動式安全(Passive Safety)系統的輕水式反應器(LWR)屬於第三代+(GEN.III+)核反應器，也有可歸類屬於第四代(GEN.IV)核反應器者，如高溫氣冷式 SMR、液態金屬冷卻快中子式 SMR 與熔鹽式 SMR(包括熱中子與快中子核反應器)等(第三代+與第四代分類詳見 p.47)。至 2022 年止，國際上共有 18 個國家約 80 種 SMR 在不同的發展階段(Statista, 2022)，其中有 39 種 SMR 處於概念設計(Conceptual Design)、26 種基本設計(Basic Design)、3 種正建造中(Under Construction)以及 3 個(兩種)，中、俄機組運轉中(In Operation)。

運轉中機組包括 2019 年 12 月商業運轉的俄羅斯 Akademik Lomonosov 的 KLT-40C 浮動式 SMR 與 2022 年 12 月達成初始全功率、2023 年 12 月宣布商業運轉的中國山東石島灣的 HTR-PM 高溫氣冷式 SMR。SMR 有超過 50 種以上採用不同的冷卻劑、核燃料與中子能譜(Neutron Spectrum)等的反應器技術，基本上大部分強調結合包括模組化(Modularization)、多模組(Modularity/Scalability)、整合或小型化(Integral or compact)，並廣泛應用被動/非能動安全系統等新型設計。依據國際原子能總署(IAEA)分類，SMR 包括陸基型水冷式(Land-based Water-Cooled) SMRs、海上型水冷式(Marine-based Water Cooled) SMRs、高溫氣冷式(High Temperature Gas Cooled) SMRs、快中子式(Fast Neutron Spectrum) SMRs、熔融鹽式(Molten Salt) SMRs 與微型(Micro-sized) MMRs 等 6 類，其發展情形如表 4.1、2、3(ARIS/IAEA, 2022)，較具短期里程碑的 SMR 發展情形如表 4.4、5、6(OECD/NEA, 2022)。

表 4.1、各型 SMR 發展現況(1/3)

Design	Output MW(e)	Type	Designer	Country	Status
<b>PART I.1: WATER COOLED SMALL MODULAR REACTORS (LAND BASED)</b>					
CAREM	30	Integral PWR	CNEA	Argentina	Under construction
ACP100	125	Integral PWR	CNNC/NPIC	China	Under construction
CANDU SMR™	300	PHWR	Candu Energy Inc.	Canada	Conceptual Design
CAP200	> 200	PWR	SPIC/SNERDI	China	Basic Design
DHR400	400 MW(t)	PWR (pool type)	CNNC	China	Basic Design
HAPPY200	200 MW(t)	PWR	SPIC	China	Detailed Design
NHR200-II	200 MW(t)	Integral PWR	Tsinghua University and CGN	China	Basic Design
TEPLATOR™	< 150 MW(t)	HWR	UWB Pilsen & CIIRC CTU	Czech Republic	Conceptual Design
NUWARD™	2 × 170	Integral PWR	EDF	France	Conceptual Design
IMR	350	PWR	MHI	Japan	Conceptual Design Completed
i-SMR	170	Integral PWR	KHNP and KAERI	Republic of Korea	Conceptual design
SMART	107	Integral PWR	KAERI and K.A.CARE	Republic of Korea and Saudi Arabia	Detailed Design

<b>RITM-200N</b>	55	Integral PWR	JSC Afrikantov OKBM, Rosatom	Russian Federation	Detailed Design Completed
<b>VK-300</b>	250	BWR	NIKIET	Russian Federation	Detailed Design
<b>KARAT-45</b>	45 – 50	BWR	NIKIET	Russian Federation	Conceptual Design
<b>KARAT-100</b>	100	BWR	NIKIET	Russian Federation	Conceptual Design

資料來源：ARIS/IAEA (2022)

表 4.2、各型 SMR 發展現況(2/3)

Design	Output MW(e)	Type	Designer	Country	Status
<b>RUTA-70</b>	70 MW(t)	PWR (pool type)	NIKIET	Russian Federation	Conceptual Design
<b>STAR</b>	10	LWR (pressure tube)	STAR ENERGY SA	Switzerland	Basic design
<b>Rolls-Royce SMR</b>	470	PWR	Rolls-Royce SMR Ltd.	UK	Detailed Design
<b>VOYGR™</b>	4/6/12 × 77	Integral PWR	NuScale Power Corporation	USA	Equipment Manufacturing in progress
<b>BWRX-300</b>	270 – 290	BWR	GE-Hitachi Nuclear Energy and Hitachi-GE Nuclear Energy	USA and Japan	Detailed Design
<b>SMR-160</b>	160	PWR	Holtec International	USA	Preliminary Design Completed
<b>Westinghouse SMR</b>	> 225	Integral PWR	Westinghouse Electric Company LLC	USA	Conceptual Design Completed
<b>mPower</b>	2 × 195	Integral PWR	BWX Technologies, Inc	USA	Conceptual Design
<b>OPEN20</b>	22	PWR	Last Energy Inc.	USA	Detailed Design
<b>PART I.2: WATER COOLED SMALL MODULAR REACTORS (MARINE BASED)</b>					
<b>KLT-40S</b>	2 × 35	PWR	JSC Afrikantov OKBM	Russian Federation	In Operation
<b>ACPR50S</b>	50	PWR (loop type)	CGNPC	China	Detailed Design
<b>ACP100S</b>	125	Integral PWR	CNNC/NPIC	China	Basic Design
<b>BANDI-60</b>	60	PWR	KEPCO E&C	Republic of Korea	Conceptual Design
<b>ABV-6E</b>	6 – 9	PWR	JSC Afrikantov OKBM, Rosatom	Russian Federation	Final design
<b>RITM-200M</b>	50	Integral PWR	JSC Afrikantov OKBM, Rosatom	Russian Federation	Basic Design Completed
<b>VBER-300</b>	325	Integral PWR	JSC Afrikantov OKBM, Rosatom	Russian Federation	Licensing Stage
<b>SHELF-M</b>	up to 10	Integral PWR	NIKIET	Russian Federation	Basic Design
<b>PART II: HIGH TEMPERATURE GAS COOLED SMALL MODULAR REACTORS</b>					
<b>HTR-PM</b>	210	HTGR (pebble bed)	INET, Tsinghua University	China	In operation
<b>STARCORE</b>	14/20/60	HTGR (prismatic)	StarCore Nuclear	Canada	Pre-Conceptual Design
<b>JIMMY</b>	10 – 20 MW(t)	HTGR (prismatic)	JIMMY ENERGY SAS	France	Detailed Design
<b>GTHTR300</b>	100 – 300	HTGR (prismatic)	JAEA Consortium	Japan	Basic Design
<b>GT-MHR</b>	288	HTGR (prismatic)	JSC Afrikantov OKBM	Russian Federation	Preliminary Design Completed
<b>MHR-T</b>	4 × 205.5	HTGR	JSC Afrikantov OKBM	Russian Federation	Conceptual Design
<b>MHR-100</b>	25 – 87	HTGR	JSC Afrikantov OKBM	Russian Federation	Conceptual Design
<b>AHTR-100</b>	50	HTGR (pebble bed)	Eskom Holdings SOC Ltd.	South Africa	Conceptual Design Completed
<b>PBMR-400</b>	165	HTGR (pebble bed)	PBMR SOC Ltd.	South Africa	Preliminary Design Completed

<b>HTMR100</b>	35	HTGR (pebble bed)	STL Nuclear (Pty) Ltd.	South Africa	Basic Design
<b>EM<sup>2</sup></b>	265	GFR	General Atomics	USA	Conceptual Design
<b>FMR</b>	50	GFR	General Atomics	USA	Conceptual Design
<b>Xe-100</b>	82.5	HTGR (pebble bed)	X-Energy LLC	USA	Basic Design

資料來源：ARIS/IAEA (2022)

表 4.3、各型 SMR 發展現況(3/3)

Design	Output MW(e)	Type	Designer	Country	Status
<b>SC-HTGR</b>	272	HTGR (prismatic)	Framatome, Inc.	USA	Preliminary Design
<b>PeLUIt / RDE</b>	40 MW(t)	HTGR (pebble bed)	BRIN	Indonesia	Conceptual Design
<b>HTR-10</b>	2.5	HTGR (pebble bed)	INET, Tsinghua University	China	Operable
<b>HTTR</b>	30 MW(t)	HTGR (prismatic)	JAEA	Japan	In operation
<b>PART III: LIQUID METAL COOLED FAST NEUTRON SPECTRUM SMALL MODULAR REACTORS</b>					
<b>BREST-OD-300</b>	300	LMFR (pool type)	NIKIET	Russian Federation	Under Construction
<b>ARC-100</b>	100	LMFR (pool type)	ARC Clean Energy	Canada	Preliminary Design
<b>4S</b>	10	LMFR (pool type)	Toshiba Energy Systems & Solutions Corporation	Japan	Detailed Design
<b>MicroURANUS</b>	20	LBE-cooled Reactor	UNIST	Republic of Korea	Conceptual Design
<b>LFR-AS-200</b>	200	LMFR	<i>newcleo</i> srl	Italy	Conceptual Design
<b>SVBR</b>	100	LMFR	JSC AKME Engineering	Russian Federation	Detailed Design
<b>SEALER-55</b>	55	LMFR	LeadCold	Sweden	Conceptual Design
<b>Westinghouse LFR</b>	450	LMFR (pool type)	Westinghouse Electric Company, LLC.	USA	Conceptual Design
<b>PART IV: MOLTEN SALT SMALL MODULAR REACTORS</b>					
<b>IMSR400</b>	2 × 195	MSR	Terrestrial Energy Inc.	Canada	Detailed Design
<b>SSR-W</b>	300	MSR (static fuelled)	Moltex Energy	Canada	Conceptual Design
<b>smTMSR-400</b>	168	MSR	CAS/SINAP	China	Pre-Conceptual Design
<b>CMSR</b>	100	MSR	Seaborg Technologies ApS	Denmark	Conceptual Design
<b>Copenhagen Atoms Waste Burner</b>	20 MW(t)	MSR	Copenhagen Atomics	Denmark	Detailed Design
<b>FUJI</b>	200	MSR	ITMSF	Japan	Preliminary Design Completed
<b>THORIZON</b>	40 – 120	MSR	THORIZON	Netherlands	Conceptual Design
<b>SSR-U</b>	16	MSR	Moltex Energy	UK	Basic Design
<b>KP-FHR</b>	140	FHR	KAIROS Power, LLC.	USA	Conceptual Design
<b>Mk1 PB-FHR</b>	100	FHR	UC Berkeley	USA	Pre-Conceptual Design
<b>MCSFR</b>	50 / 200 / 400 / 1200	MSR (fast spectrum)	Elysium Industries	USA	Conceptual Design
<b>LFTR</b>	250	MSR	Flibe Energy, Inc.	USA	Conceptual Design
<b>ThorCon</b>	250	MSR	ThorCon International	USA and Indonesia	Preliminary Design Completed
<b>PART V: MICROREACTORS</b>					
<b>Energy Well</b>	8	FHTR	Centrum výzkumu Řež	Czech Republic	Pre-Conceptual Design

<b>MoveluX</b>	3 – 4	Heat Pipe (sodium)	Toshiba Energy Systems & Solutions Corporation	Japan	Conceptual Design
<b>ELENA</b>	0.068	PWR	National Research Centre “Kurchatov Institute”	Russian Federation	Conceptual Design
<b>UNITHERM</b>	6.6	PWR	NIKIET	Russian Federation	Conceptual Design
<b>AMR</b>	3	HTGR (prismatic)	STL Nuclear (Pty) Ltd.	South Africa	Pre-conceptual design
<b>LFTR-TL-30</b>	30	LMFR	<i>newcleo</i> Ltd.	UK	Conceptual Design
<b>U-Battery</b>	4	HTGR	Urenco	UK	Conceptual Design
<b>Aurora</b>	1.5 – 50	LMFR	OKLO, Inc.	USA	Detailed Design
<b>HOLOS-QUAD</b>	10	HTGR	HolosGen LLC	USA	Detailed Design
<b>MARVEL</b>	0.015 – 0.027	LMFR	Idaho National Laboratory	USA	Equipment manufacturing in progress
<b>MMR™</b>	> 5 and > 10	HTGR	Ultra Safe Nuclear Corporation	USA	Basic Design
<b>Westinghouse eVinci™</b>	2 – 3.5	Heat Pipe	Westinghouse Electric Company, LLC.	USA	Conceptual Design Completed

資料來源：ARIS/IAEA (2022)

表 4.4、具短期里程碑 SMR(1/3)

Design	Net Output Per module	Type	Designer	Country	Status	Update
ARC-100	100 MW(e)	Sodium fast reactor	ARC Clean Energy	Canada	Demonstration project planned in New Brunswick	
CAREM	25 MW(e)	Pressurised water reactor	CNEA	Argentina	Under construction (Zarate)	2026 初臨界
BWRX-300	300 MW(e)	Boiling water reactor	GE-Hitachi	USA /Canada	First commercial deployment announced with Ontario Power Generation (Darlington, Canada) and discussion with Tennessee Valley Authority (Clinch River, United States)	建造許可申請中
eVinci	5 MW(e) up to 13 MW(t)	Heat pipe	Westinghouse	USA /Canada	Pre-licensing application submitted in the United States in 2021	
ACP100	100	PWR	CNNC	China	Detailed Design	玲瓏一號 IAEA 認證 2022/12 設備安裝
SMR-160	160	PWR	Holtec	USA	Pre-application	

資料來源：OECD/NEA (2022)

表 4.5、具短期里程碑 SMR(2/3)

Design	Net Output Per module	Type	Designer	Country	Status	Update
Kairos Power FHR	140 MW(e)	Molten salt reactor	Kairos Power	USA	Under licensing with demonstration project planned with Oakridge National Laboratory	建造許可審查中
Micro-Modular Reactor Project	15 MW(t)	High temperature gas-cooled reactor	Global First Power/Ultra Safe Nuclear Corporation	Canada	Under licensing with demonstration project planned at Canada National Laboratories site (Chalk River)	



Stable Salt Reactor-Wasteburner (SSR-W)	300 MW(e)	Molten salt reactor	Moltex	Canada	Demonstratio project planned in NEW Brunswick	
NuScale SMR	50 MW(e) x12	Pressurised water reactor	NuScale Power	USA	Under licensing with demonstration project with Idaho National Laboratories and Utah Associated Municipal Power Systems	淨輸出增為 77MW(e)，NRC 已核准設計認證
Natrium	345 MW(e)	Sodium fest reactor	TerraPower /GE-Hitachi	USA	Demonstration project with preferred site identified at Kemmerer (Wyoming)	設計審查中

資料來源：OECD/NEA (2022)

表 4.6、具短期里程碑 SMR(3/3)

Design	Net Output Per module	Type	Designer	Country	Status	Update
NUW/ARD	170 MW(e) x2	Pressurised water reactor	EDF-led consortium	France	Demonstration project planned for 2030	
RITM-200	55 MW(e)	Pressurised water reactor	OKBM Afrikantov	Russia	First land-based version planned for 2028 in Yakutia	
UK SMR	470 MW(e)	Pressurised water reactor	Rolls-Royce led consortium	United Kingdom	Under licensing with Wylfa and Trawsfynydd identified as potential sites in the licence application	
Xe-100	80 MW(e) x4	High temperature gas-cooled reactor	X-energy	USA	Demonstration project with Energy Northwest (Washington)	2026 開工 2030 發電

資料來源：OECD/NEA(2022)

#### 四、SMR 的發展現況

目前如美國、英國、加拿大、中國、俄羅斯、法國、日本、南韓、印度與阿根廷等國家都積極推動 SMR 計畫，基本上都由國家出資協助發展 SMR 示範電廠，吸取經驗以降低投資風險，並建立引用 SMR 的國家策略。以下說明美國與其他國際的 SMR 發展情形：

##### (一)美國方面

美國能源部於 2016 年啟動加速核能創新途徑(Gateway for Accelerated Innovation in Nuclear, GAIN)專案與提供執照技術支援(Licensing Technical Support)計畫，支持發展新型核反應器，其後又提供財務與法規程序支援，包括提供實驗與測試設備、模型與模擬器工具、重要數據、材料樣品與國家實驗室核能專家人力等支援。能源部並且在 2020 年啟動新型反應器示範計畫(Advanced Reactor Demonstration Program, ARDP)，以成本分享(Cost-sharing)的財務支援方式，在新型反應器示範過程中降低技術、營運與法規程序上的風險，預期選定的示範機組在 7 年內達成預定功能，目前分別選定泰拉能源(Terra Power)/GE-

Hitachi(GEH)的 Natrium(Sodium-cooled Fast Reactor, SFR)與 X-energy 的 Xe-100(High Temperature Gas Cooled Reactor, HTGR)兩種機型，以建廠成本各半的分攤方式，其中 Terra Power 於 2021-2028 年獲得 20 億美元，X-energy 於 2021-2027 年獲得 12 億美元的財務支援。能源部也透過多功能測試反應器(Versatile Test Reactor, VTR)計畫，支援部分非輕水式(Non-LWR)SMR 的核燃料開發計畫，包括 Natrium 與新型反應器所使用的高成分低濃縮鈾(High-Assay Low Enriched Uranium, HALEU)核燃料以及 X-energy 的 Xe-100 使用的三層等向性顆粒燃料(TRi-structural ISotropic particle fuel, TRISO)等新型反應器核燃料的研發工作。另外，能源部也與 Centrus Energy 簽約生產小量 HALEU 原料，預計未來一兩年內會和 Centrus 與 Urenco USA 簽約，生產商業供貨的 HALEU 原料。因發生俄烏戰爭，俄羅斯停止供應料源而影響發展時程，但目前仍續依原規劃配合 Natrium 使用時程努力。另，美國 Holtec 公司研發的 SMR-160 也獲得 DOE-ARDP 的資助，規劃啟動興建計畫。

2023 年 3 月美國第一個獲得 US-NRC 設計認證的 SMR-NuScale，在能源部 10 年內每年提供 1.4 億美元的支持下，與猶他州聯合市政電力系統(UAMPS)為主的多個計畫參與者訂約，啟動零碳電力計畫(Carbon Free Power Project, CFPP)，預定在愛達荷國家實驗室(Idaho National Laboratory)的 Idaho Fall 場址建造美國第一座 SMR，預定 2024 年提送 VOYGR-6 模組(NuScale Power Module, NPM 稱為 VOYGR)的聯合運轉執照申請(Combined Operation Licensing Application, COLA)，原預定在取得執照後，於 2026 年開始施工、2029 年第 1 個模組開始運轉，其餘模組 2030 年運轉。後因 UAMPS 考量 NuScale SMR 建置成本較預定高，影響電價，導致電力用戶預定購電量大幅下降(370 MW 降到 120 MW)，於 2023 年 11 月與 NuScale 公司達成協議，取消 SMR 的建廠計畫。另，標準電力(Standard Power)透過另一能源開發與生產公司 ENTRA1 提供數據處理基礎架構的公司與 NuScale 合作，將建造 SMR 提供其位於俄亥俄州與賓夕法尼亞州兩處數據處理設施所需的電力。此外，NuScale 在亞洲與歐洲也有多項合作興建計畫正進行中。

泰拉能源(Terra Power)與 GEH 合作開發的 Natrium 反應器整合儲能(Natrium Reactor and Integral Energy Storage)機組，結合 GEH-Prism 與 Terra Power 之儲能設計，提供 345MWe 反應器功率結合熱儲能，可供應 500 MWe 5.5 小時的電力，特別適合用於需要負載變化彈性的電網。目前正進行執照申請前活動(Pre-Application Activities)，由 NRC 審查中，預定 2028 年前在懷俄明州 Kemmerer 的除役燃煤電廠廠址建造 Natrium SMR。

X-Energy 與 Grant County Public Utility District 合作，預定在華盛頓州 Hanford 興建 X-100-100 MWe 卵石床(Pebble Bed)高溫氣冷式 SMR 示範機組。

綠能夥伴(Green Power Partners)一家資產與專案發展公司計畫在維吉尼亞州

進行購地，計畫興建 4~6 部 SMR，以供應其 20~30 個資料中心所需的乾淨電力。

2023 年 8 月 14 日 NRC 核准以風險告知、績效基礎(Risk-informed, Performance-based)準則來審查 SMR 與新型核反應器的緊急應變因應(Emergency Preparedness)要求，這是 SMR 與新型核反應器法規審查的重要關鍵。

### (二)其他國際方面

加拿大安大略省發電公司(OPG)及 Synthos 綠色能源公司(SGE) 於 2023 年 3 月共同投資約 4 億美元與 GEH 及美國田納西河流域管理局(TVA)發展 GEH-BWRX-300(BWR)的全球 SMR 部署計畫，重點在發展 BWRX-300 標準設計與關鍵設備詳細設計，預定在美國、加拿大、波蘭及其他歐盟國家申請執照興建 SMR。另，OPG、SNG-Lavalin 及美國 Aecon 工程顧問公司簽約，預定在加拿大達靈頓(Darlington)核能廠址建造 BWRX-300 SMR。

英國勞斯萊斯(Role Royce)獲政府資助發展 SMR，正進行評選興建 SMR 之場址，預定 2031 年商業運轉。另，歐洲 Urenco 公司尋求開發 U-Battery-MMR，一種即插即用(Plug-and-Play)的微型模組化反應器。

瑞典 Uniper 與皇家理工學院及 Blykalla 公司合作，獲歐盟氣候變遷基金資助，研發瑞典模組化反應器(Swedish Modular Reactor)，並計畫興建 10 部 SMR，配合其他再生能源以提供其工業與社會所需的完全無化石電力(100% Fossil-free Electricity)。

日本除陸續重新啟動部分核電廠外，也積極開發 SMR，並投資參與泰拉能源/GEH 的 Natrium SMR 計畫。

韓國尹錫悅總統就任後積極發展核能發電，除將原停工的核電廠繼續施工外，也積極發展自行研發的 SMART-SMR；Doosan Enerbility 與 NuScale 簽約供應 SMR 模組設備。另，韓國也參與泰拉能源/GEH 合作發展 Natrium SMR。依據韓國經濟日報 2023 年 5 月 4 日報導，韓國除 Doosan Enerbility Co.、Samsung C&T Co. 與 GS Energy 共同投資 NuScale 2.5 億美元外，GS Energy 計畫於 Uljin 核能廠址興建 NuScale 6 個 VOYGR 模組 SMR，發展韓國國家核氫綜合工業體，預定 2023 年啟動、2028 年獲核管機關核准後開始施工。尹錫悅總統大力推進該國核能工業發展，打算投入 4,000 億韓元預算開發 SMR，希望在 2030 年前出口 10 部核電機組。

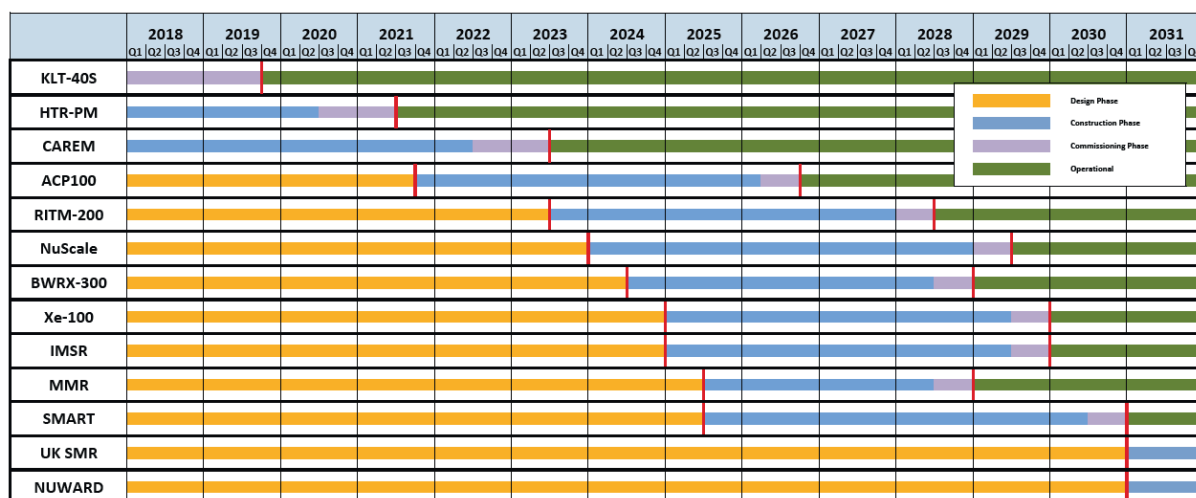
中國除其興建的 HTR-PM 高溫氣冷式示範 SMR，已於 2021 年 12 月順利併網、2022 年 12 月達全功率、2023 年 12 月正式商業運轉外，也是世界第一部開始運轉的第四代核反應器，見證由實驗邁入工程應用。另，中國核能公司(CNNC)開發的 ACP100 玲瓏一號 PWR-SMR 機組設計已獲得國際原子能總署認證，於

2021 年開工，2022 年 12 月開始進行核能島區安裝工作，目前進展順利，預定 2026 年 12 月商轉。

阿根廷 CAREM 25-SMR 正施工中，因工程與供應鏈進行不順，造成工期延宕與成本增加，目前預定 2026 年達初始臨界。

美國與日本、韓國及阿聯等國於 2023 年 5 月召開的 G7 會議中宣布，提供 2 億 7,500 萬美元協助羅馬利亞發展 NuScale SMR 計畫；波蘭礦產公司也與 NuScale 簽約預定建造 SMR。

預估 2030 年初以前可能達成商業運轉的 SMR 發展情形如圖 4.1。



資料來源：IAEA(2021)

圖 4.1、SMR 佈署時間表

還有目前尚無核能發電之國家也在規劃或考慮引進 SMR，如菲律賓透過國際原子能總署協助，評估重新建立核能基礎架構，重啟 1973 年建造、1984 年停建的核電廠，以及考慮引進 SMR。2023 年 11 月並與美國簽訂 123 和平合作協定 (123 Agreements for Peaceful Cooperation)，由美國協助菲律賓發展核能和平用途。

SMR 各種設計中，就技術成熟度(Technology Readiness Level, TRL)與運轉經驗而言，最為成熟的是小型模組化輕水式反應器(Small Modular LWRs)，因參用現有 LWR 的多年豐富運轉經驗，其首創機組(Prototype Plant)預計在 2030 年前就可達商業運轉；其次為小型模組化高溫氣冷式反應器(Small Modular HTGRs)與小型模組化鈉冷式快中子反應器(Small Modular SFRs)，因尚須解決個別系統的法規審查、新型核燃料與設備供應鏈問題，需經示範機組(Demonstration Plant)的運轉績效，其商業運轉時間可能略晚至 2030 年前後；小型模組化熔鹽反應器(Small Modular MSR)則較不成熟，尚需解決反應器特性、材料特性與被動安全系統的適用性等問題，需經過實驗機組(Experimental Plant)階段，其商業化估計應到 2035 年前後(NASEM, 2023)。就技術與經濟可行性綜觀判斷，國際間最後應僅有少數 SMR 之設計型式能發展到各國普遍使用。

有關各國發展中新型 SMR 的主要參數特色包括各型 SMR 的出口溫度、壓力、熱效率、燃料燃耗與代表性設計如表 4.7。

表 4.7、各種新型 SMR 的主要參數特色

Reactor Type	Core Outlet Temperature and Pressure	Thermal Efficiency	Fuel Burnup <sup>a</sup>	Example Reactor Designs
Small modular light water reactor	~560–590 K ~70–140 bar	~31–33%	5–6 atom% using shorter length LWR fuel rods	NuScale, Holtec, GEH–BWRX
Liquid metal fast reactor	~750–850 K ~ Few bars	~35–40% <sup>b</sup>	7–10 atom% using metallic fuel with recycle; >40% once-through with fuel shuffling	GE–Prism, TerraPower–GEH–Natrium
High-temperature gas reactor	~1000–1100 K ~ 70–100 bar	~43–50% <sup>b</sup>	10–20 atom% using TRISO fuel	X–Energy–Xe–100,
Gas fast reactor	~1000–1100 K ~ 70–100 bar	~43–50% <sup>b</sup>	14 atom% using UC or UO <sub>2</sub> fuel in SiC clad	GA–EM2, FMR
Fluoride-salt-cooled reactor	~900–950 K ~Few bars	~42% <sup>b</sup>	Similar to HTGR using TRISO fuel with similar burnup	Kairos–Hermes
Molten-salt-fuel-cooled reactor	~900–950 K ~Few bars	~40–42%	High fissile burnup with dissolved fuel in coolant; burnup limits by reactivity issues	Terrestrial Energy–IMSR, Moltex, TerraPower
Heat-pipe-cooled reactor	~750–800 K Low pressures	~30%	5–20 atom% using TRISO fuel	Westinghouse–eVinci, Oklo–Aurora, <sup>c</sup> BWXT–BANR

資料來源：U.S. NASEM (2023)

## 第二節 第四代(新型)核反應器(Gen. IV)之發展

### 一、第四代核反應器(Gen. IV)反應器特色與目標

多年來，第四代國際論壇(Gen. IV International Forum, GIF)一直領導國際合作，致力於開發下一代或第四代核能技術，以協助滿足世界未來的能源需求。第四代反應器設計特色與目標如後(GIF, 2023)：

#### (一)可持續性(Sustainability)：

提供可持續的電力生產，滿足清潔空氣目標，並為全球電力生產提供長期可用的系統，和有效的核燃料利用，最大限度減少和管理核廢料，並顯著減輕長期管理負擔，從而改善對公眾健康和環境的保護。

#### (二)經濟性(Economic)：

與其他能源相比，第四代核能反應器具有明顯的生命週期成本優勢，財務風險水準與其他能源項目相當。

### **(三)安全性和可靠性(Safety and Reliability)：**

第四代核能機組的運轉安全性和可靠性預期有良好表現，有極低的爐心熔毀率與放射性物質外洩程度，如 NuScale 已獲 NRC 審核通過，可消除廠外緊急因應的需求。

### **(四)防核擴散和實體保護(Proliferation Resistance and Physical Protection)：**

第四代核能機組能確保防止轉移或盜竊可用於製造核武器材料的行為，並強化核子設施實體保護，防止恐怖主義行為。

## **二、第四代核反應器種類**

要達成上述目標，GIF 專家評估了約 100 多種核反應器概念設計，從中選擇了六種核反應器技術進行進一步研究和開發，其主要型式分為：

- **熱中子型**-包括超高溫反應器(Very High Temperature Reactor ,VHTR)、超臨界水反應器(Supercritical Water Reactor, SCWR)；
- **快中子型**-包括氣冷式快中子反應器(Gas-Cooled Fast Reactor, GFR)、鈉冷式快中子反應器(Sodium-Cooled Fast Reactor, SFR)與鉛冷式快中子反應器(Lead-Cooled Fast Reactor ,LFR)；
- **熔鹽型**-包括熱中子與快中子熔鹽反應器(Molten Salt Reactor, MSR)、液相氟化鈾反應器(Liquid Fluoride Thorium Reactor, LFTR)等。

其中快中子型與快中子熔鹽型除可使用傳統核燃料外，也可燃燒天然鈾、貧鈾(Depleted Uranium)與用過核燃料等，並具有處理部分用過核燃料的功能。

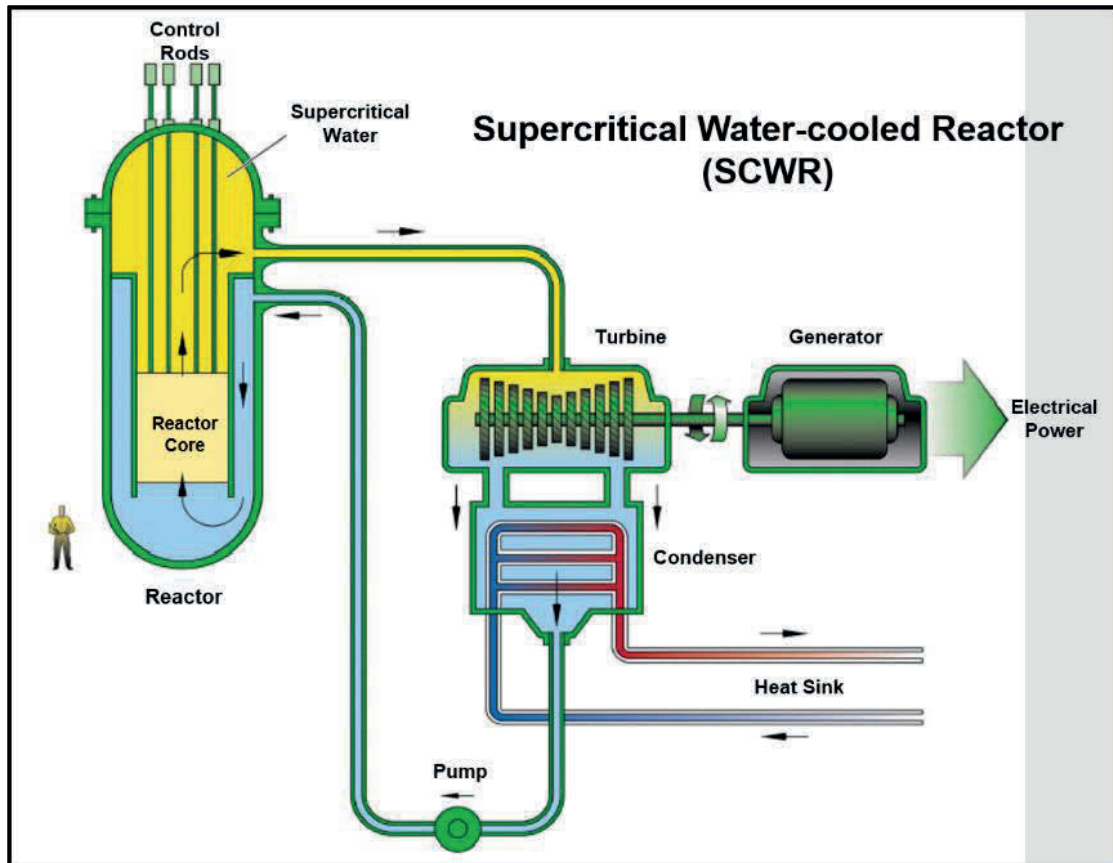
## **三、第四代(新型)核反應器發展現況**

在第四代核反應器發展過程中，高溫氣冷式反應器與鈉冷式快中子反應器相對較成熟，但仍需建立供應鏈、高成分低濃度鈾(HALEU)與三層等向性顆粒(TRISO)等新燃料需要開發，以及解決過去技術問題的運轉可靠性驗證。鉛冷式快中子反應器(LFR)、熔鹽式反應器(MSR)與液相氟化鈾反應爐(LFTR)等尚缺乏包括核燃料與材料特性及反應器固有安全的特性等技術驗證，相對較不成熟，有待進一步解決技術缺口。

各型第四代核反應器發展情形如後(GIF. 2023)：

**(一)超臨界水反應器(Supercritical Water Reactor, SCWR)：**

參與研發超臨界水反應器者，有 Euratom(歐洲原子能團體)、加拿大、中國、日本、俄羅斯等國。SCWR，如圖 4.2，是以輕水式反應器(LWR)為基礎，運作於高溫高壓環境，採取直接、一次循環，以高於氣態、液態、超臨界態臨界點(374 °C、22.1MPa)的水作為工作流體，目前設計以超臨界水(25 MPa 和 510-550°C)直接驅動渦輪機，無需二次蒸汽系統，簡化了設計，故其運作情形如沸水式反應器(BWR)，被動安全功能類似於簡化沸水反應器(Simplified Boiling Water Reactor, SBWR)。燃料使用氧化鈾。反應器可使用輕水或重水為緩和劑的熱中子式反應器，也可使用全鈾系再循環(full actinide recycle)的快中子式反應器。由於 SCWR 運作於高溫環境，具有較高的熱效率(較傳統 LWR 高約 1/3)與簡單的設計結構。SCWR 建立在 BWR 的大量運轉經驗，以及眾多使用超臨界水的火力發電廠的經驗，因此系統開發較容易，成為倍受關注的新式核反應器設計。目前 SCWR 研發重點在材料、熱流(Thermal-hydraulic)與安全性。

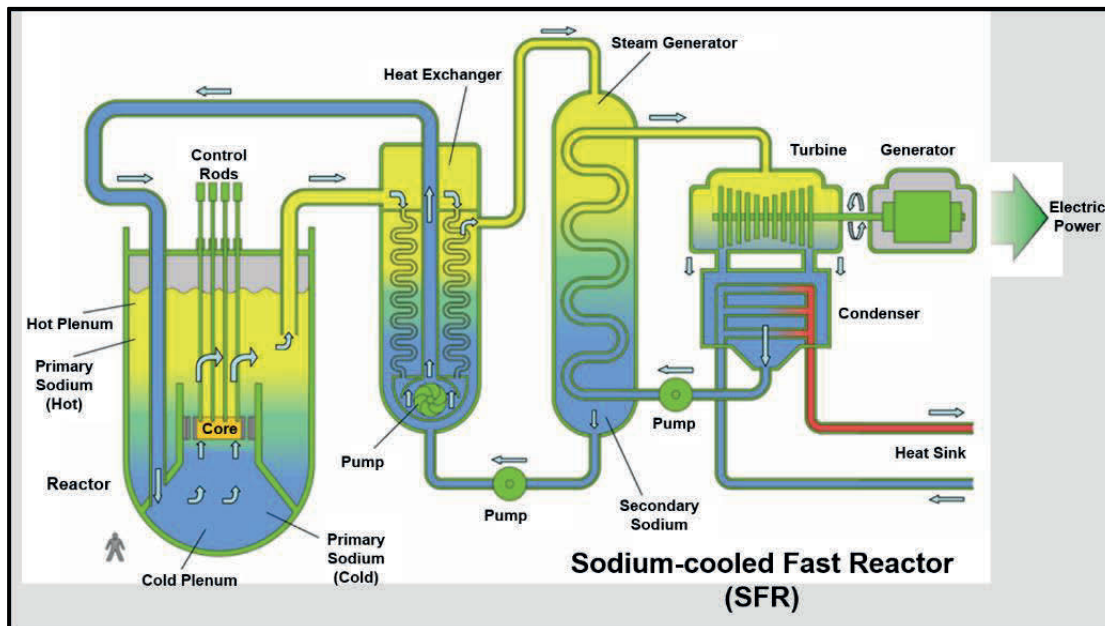


資料來源：GIF(2023)

圖 4.2、超臨界水反應器(SCWR)

## (二)鈉冷式快中子反應器(Sodium-cooled Fast Reactor, SFR)：

參與研發鈉冷快中子反應器者，有 Euratom、法國、美國、日本、韓國、中國、俄羅斯、英國、美國等國。SFR，如圖 4.3，以液態金屬鈉作為冷卻劑，運轉過程雖然會產生大量的熱能，但液態鈉具備優秀的散熱能力，因此在小型反應爐中仍能順利運作，也具被動式安全機制。美國 SFR 的燃料是包裹著鈾和鈳的鋼合金，俄羅斯、法國和日本則使用氧化鈾燃料。另外，SFR 採用封閉式燃料循環(其用過核燃料經再處理以回收使用鈾與鈳)，鈾和鈳為核分裂反應的一部分，能在反應器內循環再利用，補充一次燃料就能使用數十年。由於鈉與水的化學反應具爆炸性，故需密封冷卻系統，運轉維修時須特別注意。SFR 運轉於 500~550°C 的低溫低壓下(一次側迴路 Primary Sodium 接近一大氣壓)，也適合大、中、小型反應器(SMR)之設計。目前 SFR 研發重點在核燃料與新型再循環技術。



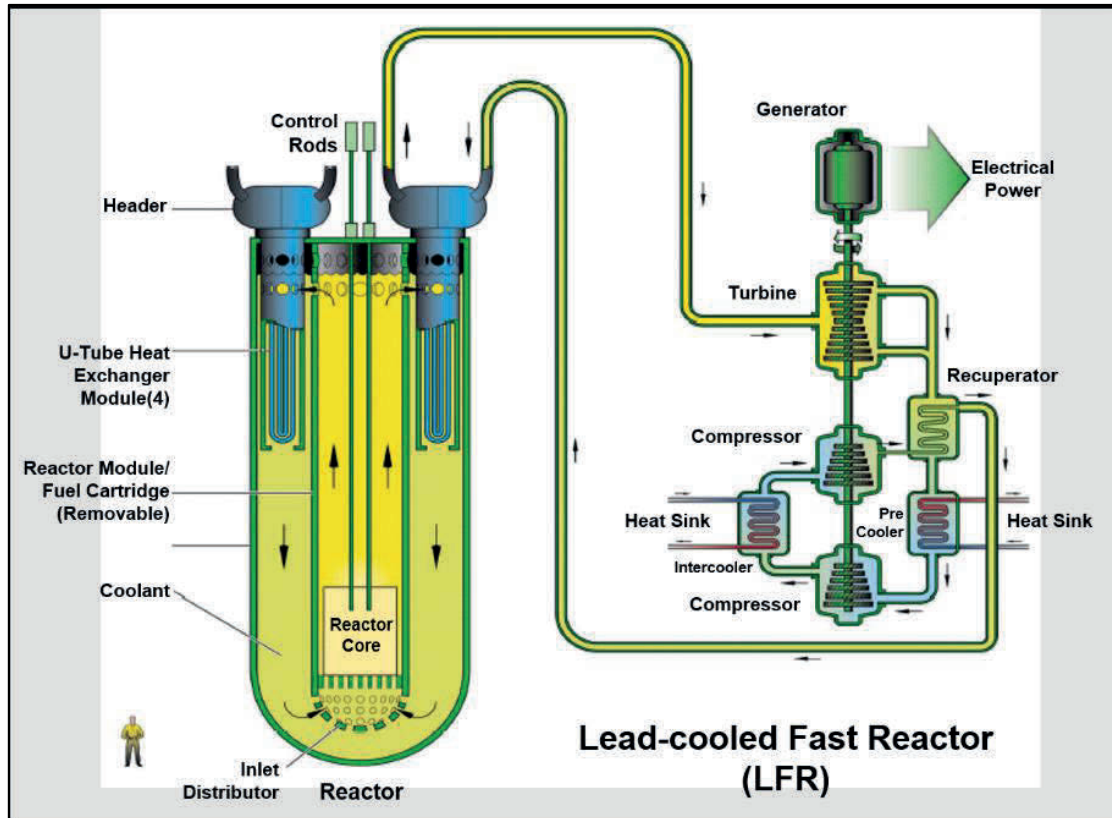
資料來源：GIF(2023)

圖 4.3、鈉冷式快中子反應器(SFR)



(三)鉛冷式快中子反應器(Lead-cooled Fast Reactor, LFR)：

參與研發鉛冷式快中子反應器者，有 Euratom、中國、日本、韓國、俄羅斯、英國、美國等國。LFR，如圖 4.4，使用鉛作為冷卻劑，新型 LFR 採用氮化鈾而不是二氧化鈾燃料，與鈉一樣，鉛作為被動安全系統，如果核反應失控時就會自動調節核反應。LFR 適合大、中、小型反應器(SMR)設計。目前 LFR 研發重點在新核燃料的開發與如何防止材料腐蝕。

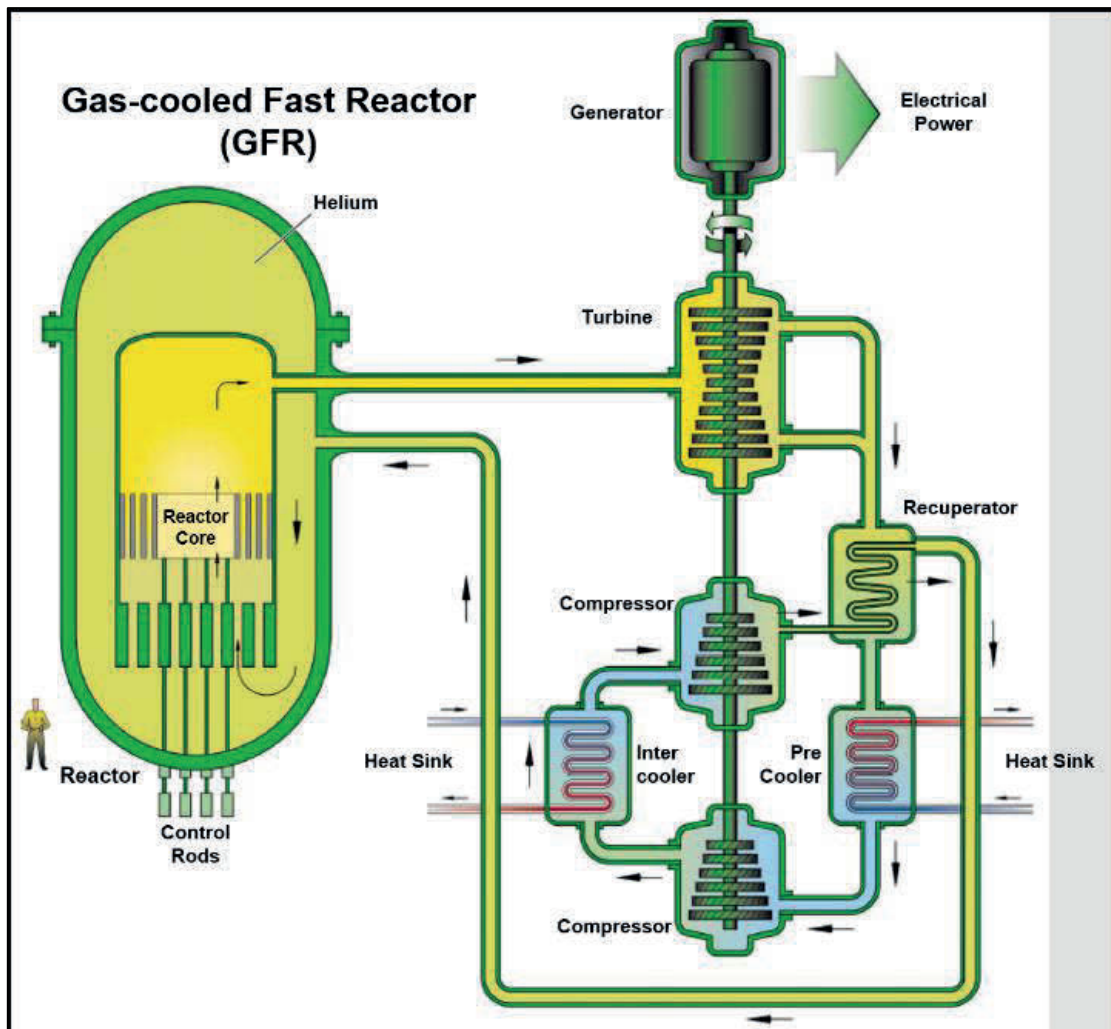


資料來源：GIF(2023)

圖 4.4、鉛冷式快中子反應器(LFR)

(四)氣冷式快中子反應器(Gas-Cooled Fast Reactor, GFR)：

參與研發氣冷式快中子反應器者，有 Euratom、法國、日本等國。GFR，如圖 4.5，是種快中子滋生反應器(Fast Breeder Reactor, FBR) ，利用快中子在封閉式核燃料循環對滋生性材料進行高效核轉換(Transmutation)，並控制錒系元素(Actinide)核分裂產物。GFR 使用惰性且無腐蝕性的氦氣冷卻，能在高溫(850°~1600°C)中運作，並控制核分裂物質之產出。其核燃料使用混合陶瓷、先進燃料微粒或錒系化合物陶瓷作為燃料元件之護套，並以針狀、盤狀集束或六角柱狀分布，功率密度高，效率也較高，可提供工業用熱能。

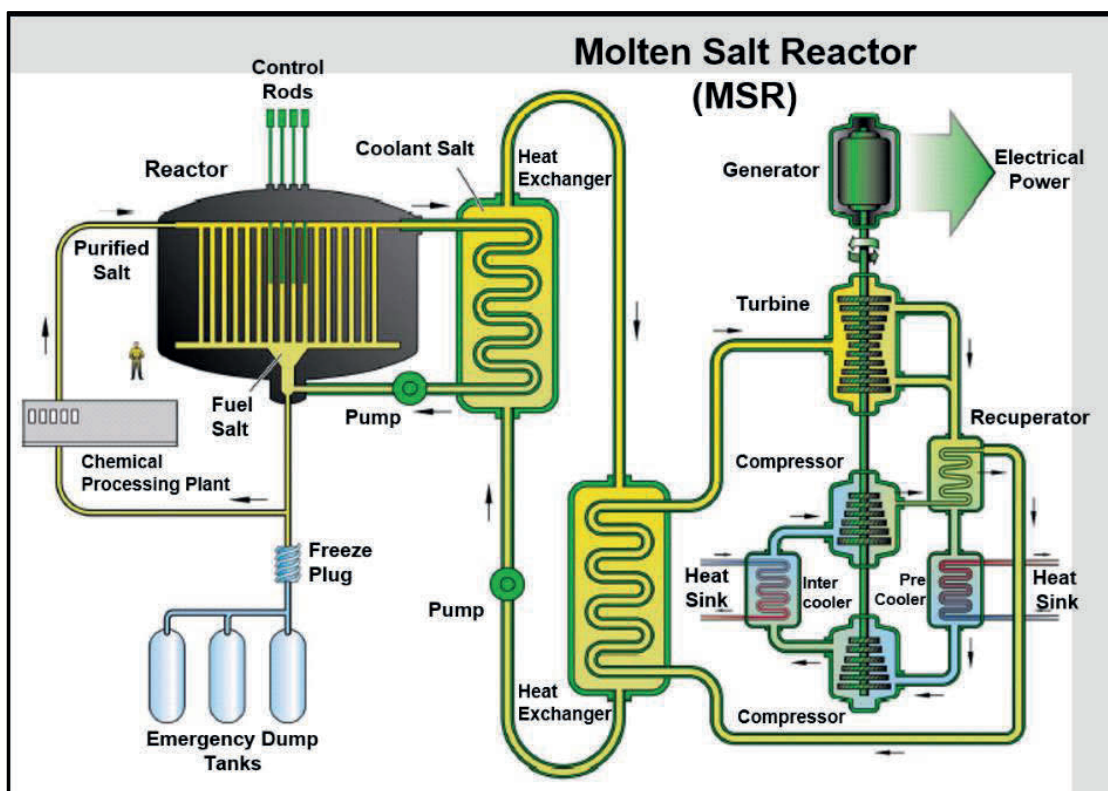


資料來源：GIF(2023)

圖 4.5、氣冷式快中子反應器(GFR)

## (五) 熔鹽反應器(Molten Salt Reactor, MSR)：

參與研發熔鹽反應器(MSR)者，有 Euratom、中國、澳洲，加拿大、俄羅斯、瑞典、美國等國。大體上 MSR，如圖 4.6，分為快中子式與熱中子式，快中子式 MSR 代表有 TerraPower 的熔融氯化物快中子反應器(Molten Chloride Fast Reactor, MCFR)，熱中子式 MSR 代表有 Terrestrial 的整合熔鹽反應器(Integral MSR, IMSR)。MSR 可使用液體和固體核燃料，如使用液體燃料，係將其混合在鹵化鹽(氟化鹽或氯化鹽)中，同時作為燃料與冷卻劑，如使用固體燃料，則熔鹽作為冷卻劑。熔鹽反應器雖然可以在 700~800°C 高溫低壓下運作，但因有腐蝕問題，目前多傾向較低溫(約 300°C)運作，透過冷卻劑和燃料結合，補充燃料與清除核廢料較容易。目前 MSR 研發重點在核燃料處理、材料與可靠性。

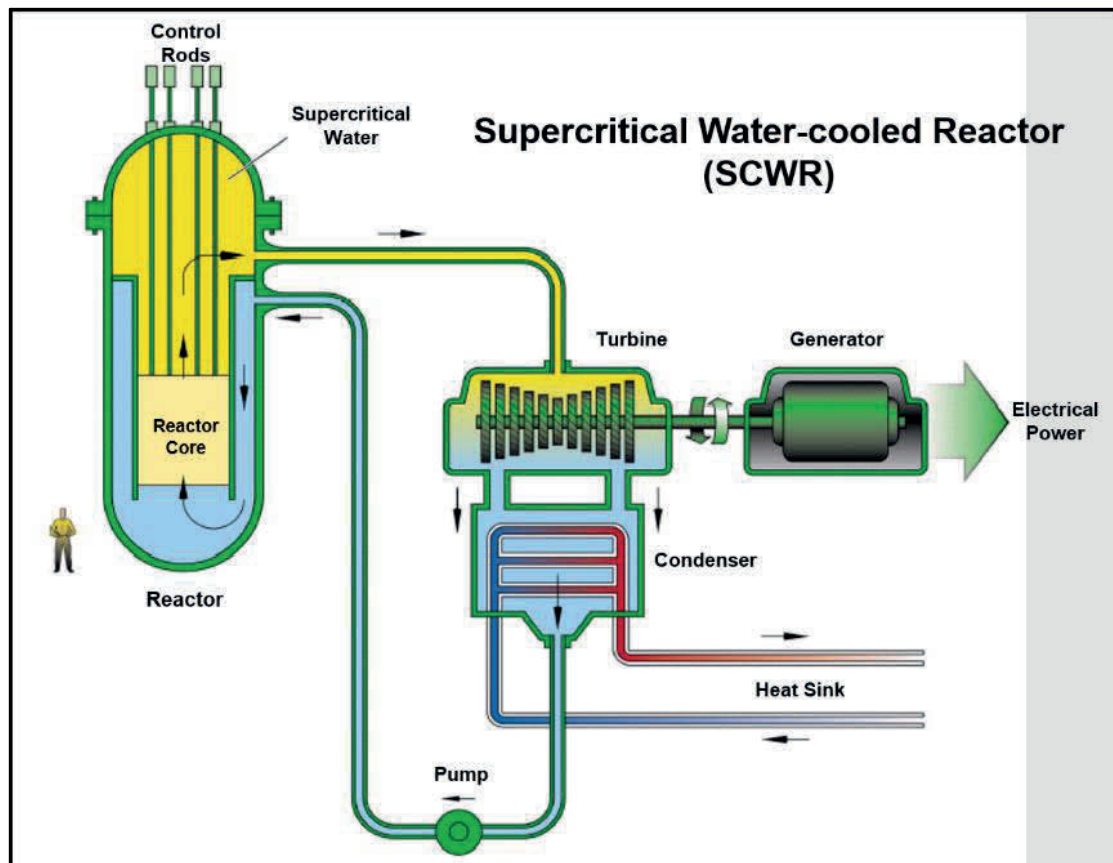


資料來源：GIF(2023)

圖 4.6、熔鹽反應器(MSR)

### (六)超高溫氣冷式反應器(Very High Temperature Reactor, VHTR)：

參與超高溫氣冷式反應器研發者，有 Euratom、法國、日本、中國、韓國、瑞士、美國等國。VHTR，如圖 4.7，使用石墨作為緩和劑、氦氣作為冷卻劑。其蒸氣出口溫度為 1,000°C，反應器爐心燃料可使用稜柱形塊或球床設計。其高溫所產生熱能發電或通過熱化學製氫等應用，美國 Xe-100 與中國 HTR-PM 的 SMR 屬於此型。



資料來源：GIF(2023)

圖 4.7、超高溫氣冷式反應器(VHTR)

談及核能新技術，必須特別提到"加速器驅動次臨界反應器"(Accelerator Driven Subcritical Reactor, ADS)，利用加速器將質子加速成高能量粒子，導入核反應器中心，使其與特殊材料碰撞反應產生較多的中子，能夠在原處於次臨界(如反應器中放置較多的核廢料當燃料，較不具備臨界條件)狀況下，因增加許多高能量中子，促成臨界條件使核分裂能繼續發生，也就是核反應是由外加條件(加速質子撞擊產生中子)來主導，而非其本身具備臨界條件，當外加條件停止導入時，核分裂反應就停止。此種設計稱為"加速器驅動次臨界反應器"，這種反應器除了可用豐富的鈾發電外，也可用來燃燒消耗高階核廢料(WNA, 2023)。

#### 四、小型模組化反應器與第四代反應器之分辨

小型模組化反應器(SMR)是功率輸出低於 300 MWe 的新型反應器設計，其元件和系統大多可在工廠製造和工廠組裝。它們具有固有的安全功能，同時具有便攜性、可擴展性和經濟性。而第四代反應器設計包括大、中、小等不同輸出功率的新型反應器。

SMR 有基於第三代+(Gen. III+)反應器設計，也有基於第四代(Gen. IV)反應器設計。通常，第三代+SMR 使用加壓水作為冷卻劑，而第四代 SMR 設計可以使用不同的冷卻劑，例如氦氣、熔鹽或熔融金屬(鈉、鉛)。因此 SMR 中的輕水式反應器 (LWR-SMR)屬於第三代+SMR，而非輕水式反應器 SMR(non-LWR-SMR)屬於第四代 SMR，因其使用不同的冷卻劑如氦、熔鹽或鈉、鉛等共熔(Eutectic)金屬等，較能耐高溫，運轉溫度較高，效率也較高，除發電外，更適合用於其他如製氫等用途。它使用濃縮度較高的燃料，而且燃料燃耗(Fuel Burnup)較高，核廢料較少等有別於第三代+SMR。因此大體上，SMR 可分為：

第三代+SMR：

- 美國 NuScale 的整合 PWR(IPWR)
- GEH-BWRX-300
- 中國的 ACP100(玲瓏一號)

第四代 SMR：包括

- 高溫氣冷式反應器(HTGR)：如美國 X-energy 的 Xe-100 與中國 HTR-PM
- 快中子式反應器：如美國 TerraPower/GEH 的 Natrium
- 鈉冷式快中子反應器(SFR)：如 OKLO 的 Aurora-LMFR-MMR
- 熔鹽式反應器(MSR)：如美國 Terrestrial 的整合熔鹽式反應器(IMSR)

再依美國能源部的區分(DOE, 2023)，SMR 採用水當冷卻劑與低濃縮燃料的屬第三代+SMR，採用新型燃料如 HALEU、TRISO，以及採用非水冷式的屬第四代 SMR。

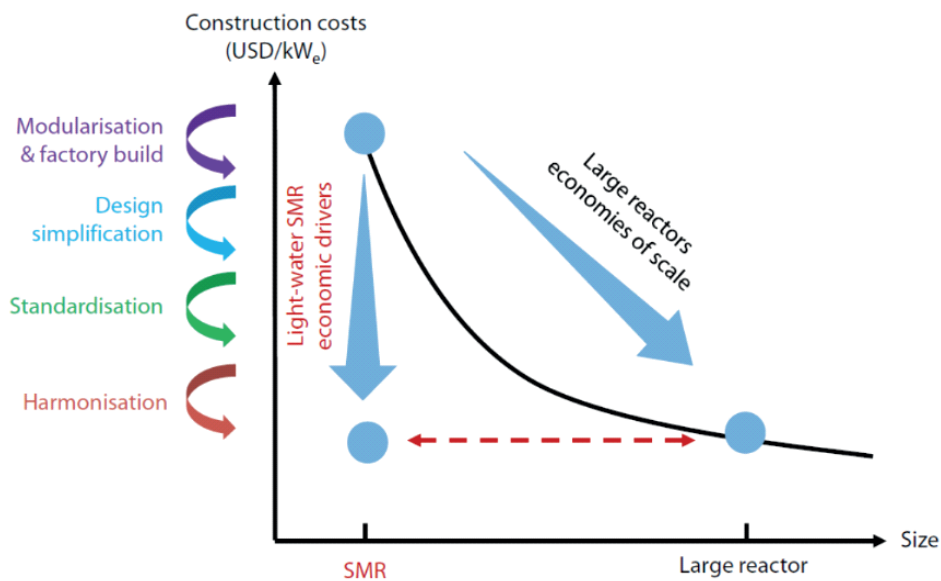
#### 第三節 小型模組化與第四代核反應器面臨之挑戰

雖然預期 SMR 透過模組化工廠製造、設計簡單化、標準化、法規協調與經濟規模等優勢，可降低建造工期與成本，詳如圖 4.8 所示，但 SMR 與新型反應器的發展也面臨一些挑戰。首先是建造工期與經濟效益，SMR 相對傳統大型核能機組建廠工期較短，如前述，SMR 首創(FOAK)機組如 Gen. III+ SMR，估計約需 4~5 年，接續機組(NOAK)約 3~4 年，但在前述俄羅斯的 KLT-40S 與中國 HTR-PM 屬

首創 SMR，其興建期間都遭遇工期延長與建造成本大幅增加的問題。

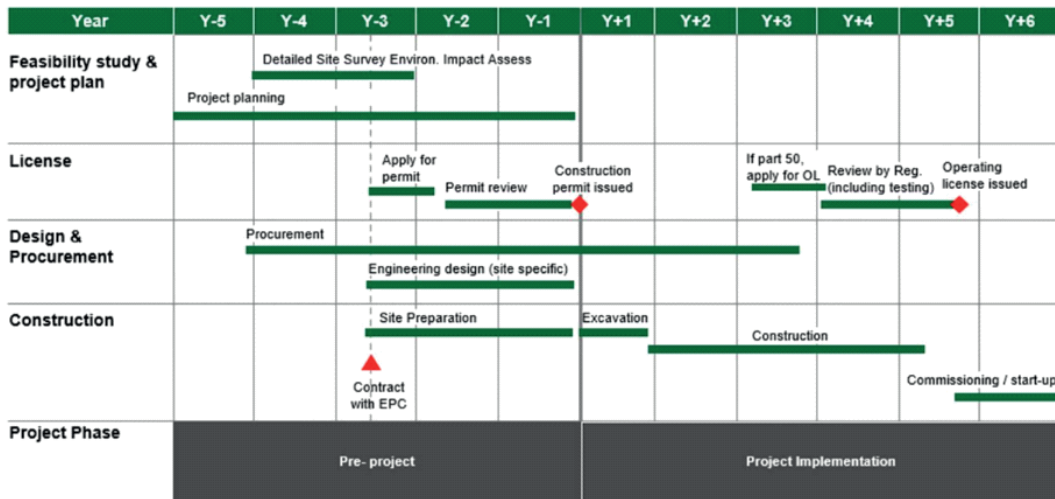
NuScale 2021 年預估建造成本為美元\$53 億，後因受到原物料平均漲幅 55% 及施工期間利率提高 5% 之影響，2023 年預估金額提高至\$93 億，導致發電成本由\$58/MWh 提高至\$119/MWh，嗣後因降低通膨法案 IRA 優惠減少\$30/MWh 而降為\$89/MWh(IEEFA, Community Power Board Meetings 2023)。此外，法規審查與核准工期也仍存在一些不確定性，顯見首創 SMR 之經濟性仍有待提升。

國際原子能總署建議，引進 SMR，最好是採用已取得設計認證且獲得國際間或至少發展 SMR 國家法規核准興建的機組以降低風險，尤其目前尚無核能發電之國家首次引進 SMR，法規核准估計需 5~10 年(興建新型核電廠步驟與時間如圖 4.9)。當然隨著許多新技術的持續開發-包括材料精進(Better-performing Materials)、新型燃料(Advanced Fuel)、高效燃料護套材料(High-performance Fuel Cladding Materials)及新型積層製造(Advanced Additive Manufacturing 即 3D-Printing)等都會提升運轉績效與經濟性，SMR 可望在未來更能降低建造與營運成本(Patrick Champlin, 2018)。



資料來源：ERIA(2023)

圖 4.8、SMR 與傳統大型反應器成本控制因素比較



資料來源：IAEA(2023)

圖 4.9、興建新型核電廠的主要步驟與時間

SMR 另一挑戰是核能法規的調適性，為引進 SMR 新型核能機組新技術，美、英、中、俄、加、日等國已全面檢視核能法規的需要與指引，評估其適用性，尤其對非水冷式(non-Water Cooled Reactor)SMR，因涉及採用不同的核燃料，其燃料操作機制與核廢料處理等技術議題都須重新評估，調整法規適用性。另，美國與加拿大、英國等核管單位也合作尋求建立「協調 SMR 法規(Harmonize SMR Regulation)」機制以因應。國際原子能總署多年來也積極致力於 SMR 相關法規/標準的研究，以提供各會員國法規研擬或調整的參考依據。美國能源部於 2022 年 9 月的調查報告，指出美國許多燃煤電廠可轉型作為興建 SMR 的潛在廠址，如 TerraPower 已選定即將除役的 Naughton 燃煤電廠附近，建造 604 MWe 的 Natrium SMR，顯見其發展性。惟 Natrium 的建廠執照仍在審查中。另，雖然 SMR 如 Natrium 的安全度較現有大型核電廠高出許多，其緊急計畫區(Emergency Planning Zone, EPZ)極有可能縮小至廠址內，但目前除 NuScale 已獲 NRC 審核確認外，其他 SMR 的 EPZ 縮小至廠址內，仍需經 NRC 審核確認。

SMR 的安全性雖依據理論與模型的評估，較現有核能機組高，但尚缺乏足夠運轉經驗，未來的運轉安全仍有待時間加以確認；SMR 因採用模組化工廠組裝，核能管制單位如何配合對模組製造進行監測管制，小型化是否影響電廠的維護保養，尤其對非水冷式 SMR 採用何種檢測工具等等都需進一步研擬。

SMR 如 NuScale 機組預期產生的核廢料，雖然因其小型化導致其表面積與爐心體積比(Surface area to Core Volume ratio)相對傳統大型核反應器略大或會增加一點中子洩漏(Neutron Leakage)，而洩漏中子照射周邊結構金屬會增加一些輻射活化鋼，但基本上核廢料量主要取決於燃料燃耗(Fuel Burn-up)、鈾燃料濃度(Uranium Enrichment)、熱效率(Thermal Efficiency)與 SMR 的反應器設計。美國阿貢國家實驗室(Argonne National Laboratory) 針對 NuScale、Natrium、Xe-100 等三

種 SMR 進行核廢料分析(T.K. Kim et al., 2022)，結論為水冷式(LWR)的 NuScale 產生的高階核廢料(用過核燃料)數量與傳統壓水式(PWR)相當(僅略微增加)；鈉冷式快中子反應器的 Sodium 因其燃耗、鈾燃料濃度與熱效率都較傳統 PWR 為高，因此所產生的高階核廢料的重量與體積都較少，但放射性污染(Radiotoxicity)較高；高溫氣冷式的 Xe-100 也因燃耗、鈾燃料濃度與熱效率較傳統 PWR 為高，產生的高階核廢料重量較少，但因採用大量石墨，所產生的低階核廢料量體亦較大。基本上，不同 SMR 設計產生的核廢料各有其優點與缺點，但對現行核廢料管理方式不致發生重大挑戰。

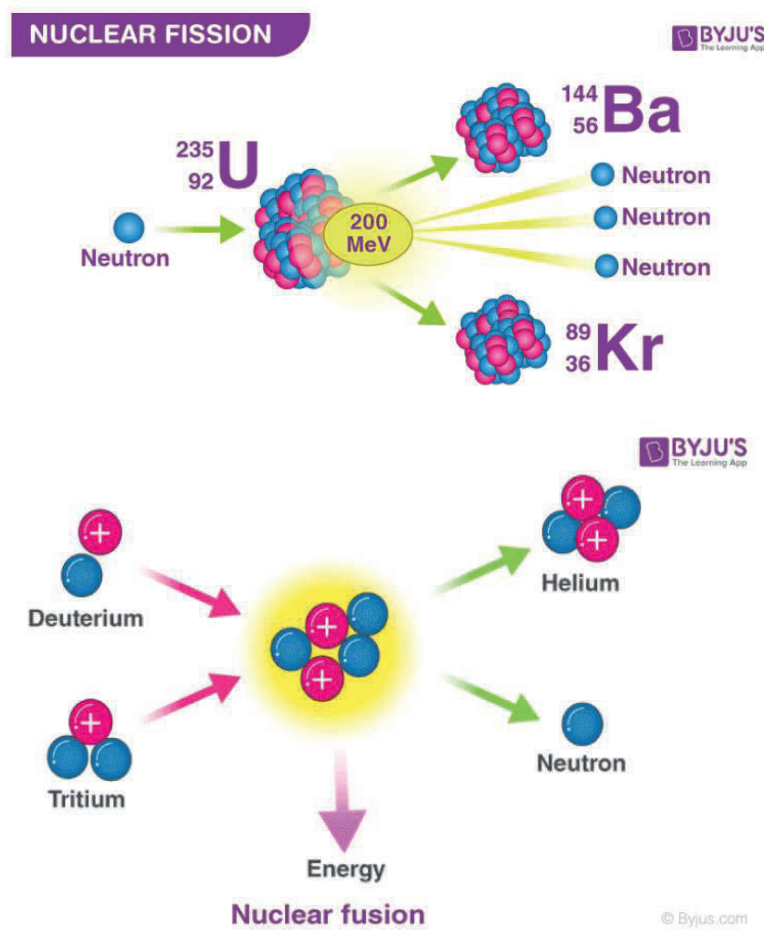
第四代核反應器面臨的挑戰大體上與小型模組化反應器類似，除反應器技術仍待進一步研發精進外，包括供應鏈、法規配合、燃料與材料開發、製造與設計配合、施工管理以及人才培養等問題都需積極解決，才有利於未來 2030 年後邁向商業化。



## 第五章 核融合發電之發展

## 第一節 核融合之特色

不同於核分裂(Nuclear Fission)將一個質量較大的原子核如鈾或鈾原子核，經中子碰撞後分裂成 2 或 3 個質量較小的原子核，過程中因損耗質量而釋出巨大能量。核融合(Nuclear Fusion)則是將兩個較輕的原子核在融合過程中，產生質量耗損而轉換釋放出巨大的能量，核分裂與核融合原理如圖 5.1。當氫氣被加熱到非常高的溫度時變為電漿，帶負電荷的電子與帶正電荷的原子核(離子)分離。通常，核融合極不容易，因為帶正電的原子核之間的強烈排斥靜電力-庫倫力(Coulomb Force/Barrier)阻止它們接近碰撞和發生融合。但是如果條件使得原子核可以克服靜電力，使它們彼此非常接近，那麼原子核內將質子和中子結合在原子核中的束縛力-核力(Binding Energy)超過靜電排斥力時，可使原子核融合在一起。當溫度足夠高時，就會發生這種情況，導致離子移動得更快，最終達到足夠高的速度，使離子足夠接近，原子核可以融合，導致能量釋放。



資料來源：BYJU'S

圖 5.1、核分裂與核融合原理

太陽與恆星的能量就是來自氫原子融合成氦原子而產生巨大的能量，由於太陽有巨大引力與熱量提供核融合反應有利的條件，但在地球缺乏如此巨大的引力，因此在地球進行核融合反應，必需要比太陽更高的溫度才能發生。在地球上，我們需要超過 1 億°C 的溫度來使氘(Deuterium, D)和氚(Tritium, T)融合，同時要控制壓力和磁力，使能發生核融合的原子核被限制在一個小空間內，以增加碰撞的機會，才能穩定地限制電漿，保持融合反應足夠長的時間，且所產生的能量比啟動反應所需的能量更多，當電漿發生核融合產生的能量不必靠外在能量，而能維持核融合所需溫度稱為電漿被點燃(Ignition)。

相較於核分裂發電，核融合發電不會產生高階核廢料，且其低階核廢料量很少、半衰期短，因此其輻射防護與核廢料管理相對單純。核融合發電過程除供應燃料外，還需極為嚴苛的操作條件才能點燃啟動，只要停止供應核融合所需的燃料/核子或停止提供核融合必須的條件，核融合立即終止，不會有反應器爐心熔毀的風險，因此核能安全性極高。核融合的材料如氘可取自海水，來源用之不盡，氚的材料雖然稀少，但可透過核融合過程由中子與鋰核子反應產生/滋生。另外，核融合可用的其他燃料如氦(Helion, He)材料雖然稀少、取得價格高昂，但也可經由氘-氘(D-D)融合產生/滋生，硼(Boron, B)燃料在地球上也很普遍，所以核融合的技術如成熟，就可以提供乾淨、安全、零碳排的永續能源。

### 第二節 核融合之發展現況

人類對核融合的研究已超過 50 年，雖然現在實驗室中有些已達到非常接近核融合反應所需的條件，但仍需要改進電漿的約束特性和穩定性以維持反應，並以持續的方式產生能量。世界各地的科學家和工程師繼續開發和測試新材料，開發新技術，以實現核融合，尤其近 10 多年來，有較多私人企業加入投資發展，也取得更快更多的進展。

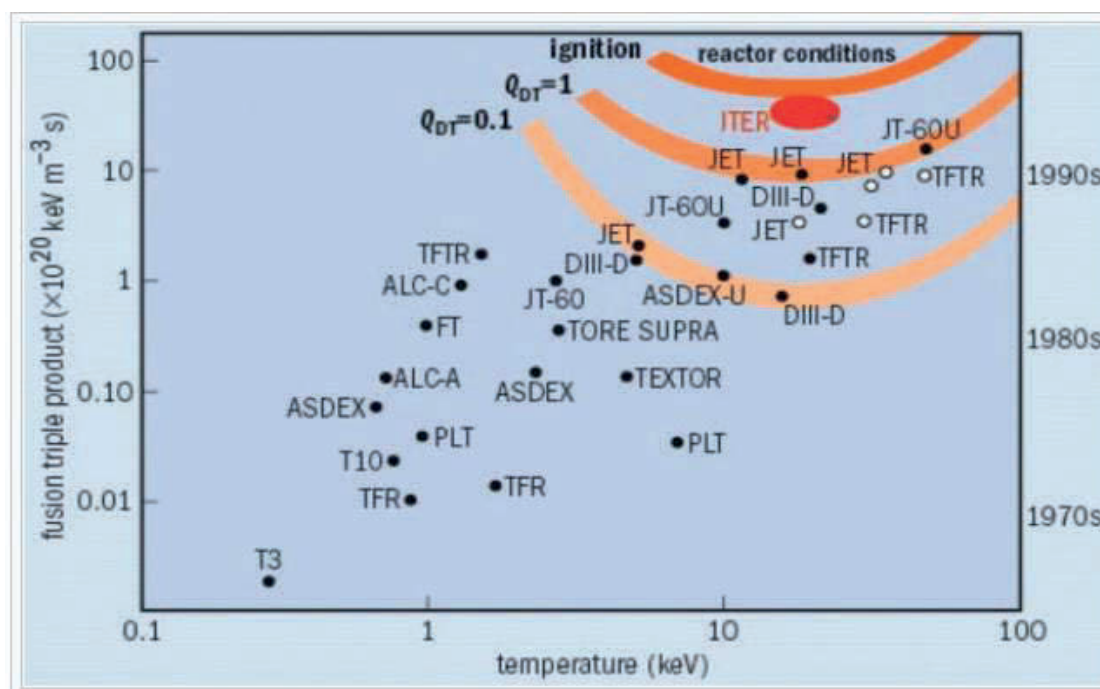
目前發展最積極的核融合是將氘的同位素氘與氚(Deuterium-Tritium, D-T)進行核融合，因為庫倫斥力與欲發生融合的核子的電荷成正比，而氘與氚相對於其他核子的庫倫斥力較小，且氘與氚對核融合的反應截面(Cross Section  $\sigma v/T^2$ ， $\sigma$ ：截面積  $m^2$ 、 $v$ ：速率  $m/s$ 、 $T$ ：離子溫度  $keV$ )較其他核子配對高，代表發生融合機率較大，發生融合所需溫度較低，各種核融合反應燃料的截面積與融合溫度比較如表 5.1。因此氘與氚的核融合較其他燃料容易。其他如氘與氦(D- $^3He$ )、質子與鋰(p- $^6Li$ )、質子與硼(p- $^{11}B$ )/氘-硼(H- $^{11}B$ )的核融合也都在積極研究發展中。

表 5.1、各種核融合反應燃料截面積及燃燒溫度比較

燃料	截面積( $\sigma v/T^2$ )	燃燒溫度(°C)
D-T	$1.24 \times 10^{-24}$	1.5 億
D-D	$1.28 \times 10^{-26}$	4.0 億
D- <sup>3</sup> He	$2.24 \times 10^{-26}$	2.0 億
p- <sup>11</sup> B	$3.01 \times 10^{-27}$	10 億

資料來源：作者彙整

無論採用何種核融合技術，愈多、密度愈高的核子擠壓在一起，與離子電漿溫度愈高以及約束時間愈長，就愈容易產生核融合。密度、溫度與時間這 3 個參數稱為融合三乘積(Fusion triple products)，掌握核融合的發生機率。國際上係以勞森準則(Lawson Criterion)作為判斷核融合反應能量收支平衡的準則，目前各種核融合試驗與勞森準則相關性如圖 5.2。



資料來源： Nuclear Physics-IAEA

圖 5.2、勞森準則(Lawson Criterion)-Fusion triple products

核融合和電漿物理研究在 50 多個國家進行，融合反應在許多實驗中已經成功產生，也有部分實驗有突破性發展，證實核融合可產生超過啟動反應過程所需的能量，當然離商業化還有相當長的路要走。

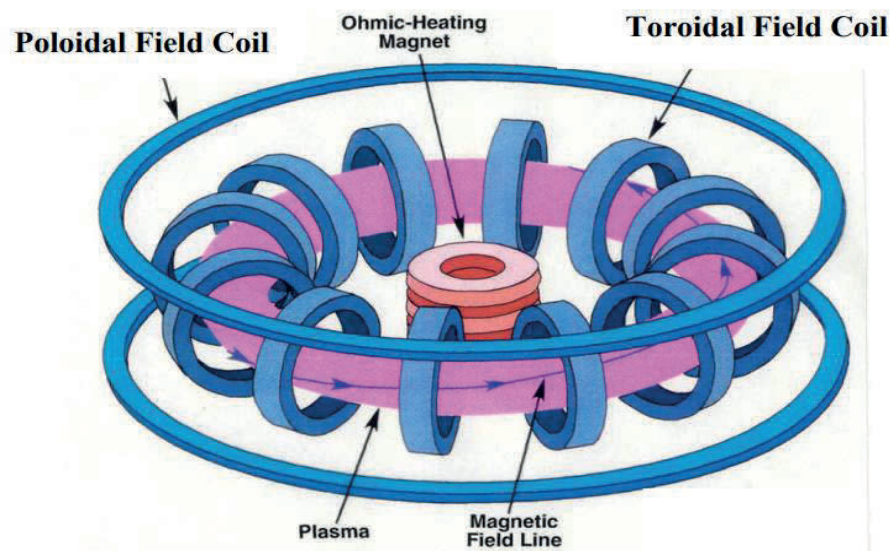
目前發展中的核融合技術，大體上分為磁約束核融合、慣性約束核融合、磁慣性核融合與晶格約束核融合等 4 種。其中科學界一般認為磁約束核融合和慣性

約束核融合兩種方法比較容易實現。該 4 種技術分別說明如後：

### 一、磁約束核融合(Magnetic Confinement Fusion, MCF)：

在磁約束核融合中，要使氘與氚(D-T)融合在一起，需要藉外來的力量把兩者壓縮在一起造成融合，這外來的力量可來自強大的磁場，能夠把氘-氚核子束縛在一起，再利用磁場感應電的方式把能量加在氘核子上，帶電的離子就被磁場控制並擠壓，電漿在幾個大氣壓下被磁場限制，並加熱到核融合的溫度，達到可產生核融合的條件。因此磁場是限制電漿的理想選擇，因為分離的離子和電子帶有電荷，它們會遵循磁力線方向，防止顆粒與反應器內壁接觸，因為這會散發熱量並減慢它們的速度。最有效的磁場配置是環形，形狀像甜甜圈，其中磁場彎曲形成閉環。有幾種類型的環形約束系統，最多應用的是托卡馬克(Tokamak)與恆星器(Stellarator)裝置。

托卡馬克磁場的建立是利用三組磁線圈如圖 5.3，第一組磁線圈是一串環形，產生托卡馬克沿主體主軸方向的磁場，第二組磁線圈位於環狀主體的中心，一個圓桶形直立的螺線圈磁鐵，形成極體磁場圍繞主體，構建主體截面積沿圓周方向的磁力線，這兩組磁線圈的綜合磁場限制主體內的磁力線呈現螺旋路徑，作為束縛氘離子趨向主體內的中心，並保持穩定而不致快速消散，第三組磁線為極體磁線圈，形狀像兩個平躺的大線圈，產生的磁場用來控制氘離子在主體內位置與形狀。



資料來源：Princeton Plasma Physics Laboratory

圖 5.3、托卡馬克(Tokamak)示意圖(ITER Tokamak Fusion Reactor)

國際間已建造了多種托卡馬克，包括英國的歐洲聯合環面(Joint European Torus, JET)和百萬安培球型托卡馬克(Mega Amp Spherical Tokamak, MAST)以及美國普林斯頓的托卡馬克融合試驗反應器(Tokamak Fusion Test Reactor, TFTR)。

目前由 35 個國家參與，主要包括歐盟、美國、中國、日本、韓國、印度與俄羅斯等 7 國整合資源，正在法國卡達拉什建設的國際熱核實驗反應器(International Thermonuclear Experimental Reactor, ITER)，成為 2020 年代最大的托卡馬克，預定 2025 年完成系統整合，並開始進行電漿測試，2035 年開始氘-氚核融合運轉。惟其後因發生部分設備組件瑕疵，建造計畫延後，預定 2024 年 6 月提出調整的新計畫時程。ITER 目標在融合中產生十倍的功率回報  $Q=10(Q_{out}/Q_{in}=10)$ ，亦即由 50 MW 的輸入加熱功率中獲得 500 MW 的融合功率。ITER 不會將其產生的加熱功率轉換為電能，但作為歷史上第一個在融合中產生淨能量增益的融合實驗，能夠在類似於未來發電廠預期的條件下研究電漿，並測試加熱、控制、診斷、低溫及遠端維護等技術，並為能夠實現核融合發電鋪路。

歐盟的歐洲聯合環形加速器(Joint European Torus, JET)於 2022 年 2 月在 EUROfusion 試驗中產生 11 百萬瓦(GW)運轉 5 秒的紀錄。

中國融合工程試驗反應器(Chinese Fusion Engineering Test Reactor, CFETR)也是托卡馬克，據報導比 ITER 大，將於 2030 年完工，另目前正在運作的實驗先進超導托卡馬克(Experimental Advanced Superconducting Tokamak, EAST)，又稱為人工太陽，進行時間長達幾百秒到上千秒的燃燒電漿實驗。

在英國，托卡馬克能源公司已經委託，並正在進一步開發其 ST40 托卡馬克。

在日本，2023 年 12 月日本與歐盟共同研發的 JT-60SA 首次點火，總重量達到 370 公噸，成為世界上最大、最先進的超導托卡馬克核融合實驗反應器。

2022 年 5 月美國能源部宣佈提供 5,000 萬美元的聯邦資金，以支援美國科學家進行融合能源科學的實驗研究。其中 2,000 萬美元將支援托卡馬克設施，而另外 3,000 萬美元支援研究提高電漿性能和增長電漿燃燒的持續時間。

至於恆星器，其螺旋力線由一系列線圈產生，這些線圈本身是螺旋形的，不需要在電漿中感應環形電流，電漿穩定度較好，但設備構造比托卡馬克複雜，因此大多數國家以托卡馬克做實驗，來突破核融合技術。惟近年來因人工智慧與建模(Modeling)技術突飛猛進，已有較多國家投入恆星器的研究發展。

### 二、慣性約束核融合(Inertial Confinement Fusion, ICF)：

在慣性約束核融合中，雷射或離子束(Ion Beam)非常精確地聚焦到目標的表面上，目標是直徑幾毫米的氘-氚(D-T)燃料顆粒。這會加熱材料的外層，使其向外爆炸，並產生向內移動的壓縮前沿或內爆(Impllosion)，壓縮和加熱內層材料，使燃料的核心可能被壓縮到其液體密度的一千倍，造成發生融合的條件，而融合釋放的能量會加熱周圍的燃料，當反應通過燃料向外擴散時，燃料也可能發生融合，導致連鎖反應(稱為點火)。這些反應發生所需的時間受到燃料慣性的限制(因

此稱為慣性融合)，維持較長，但時間小於一微秒。目前較多數慣性約束作業都採用雷射，但因雷射需要耗費較高能量，因此其他加熱方式也在發展中。

美國國家點火設施(National Ignition Facility, NIF)是加州勞倫斯利弗莫爾國家實驗室(Lawrence Livermore National Laboratory, LLNL)的大型基於雷射的慣性約束融合研究設備。它在幾奈秒(Nanosecond,十億分之一秒)內將 192 束強大的雷射束聚焦到一個小目標中，提供超過 2 MJ 的紫外線能量和 500 TW 的峰值功率。2022 年 12 月 LLNL 完成歷史性里程碑，以雷射產生足夠熱能與壓力將氘與氚融合，輸入 2.1 MJ 產生 3.15 MJ 的能量，提供人們核融合是可能實現的希望。2023 年 7 月 LLNL 又進行第二次點燃(Ignition)，再次打破能量平衡(Break-even)，同樣情況下產生 3.5 MJ 的能量。但這些並未計入點燃雷射本身所消耗約 300 MJ 能量，且這個實驗只點燃 1 次-幾奈秒，必須待數小時冷卻後才能再啟動，因此這種核融合實驗結果離商業發電還有相當長的路要走。2023 年 5 月美國能源部資助 Xcimer Energy 與 Focused Energy 兩家公司研究開發較 LLNL 低耗能的雷射與較有效率的燃料，使慣性約束融合有機會邁向商業化。

### 三、磁慣性融合(Magneto-Inertial Fusion, MIF)

磁慣性融合 MIF 或稱為磁化目標融合(Magnetized Target Fusion, MTF)，是一種結合磁約束與慣性約束的融合技術，使用磁場來限制初始較低溫度的低密度電漿，然後使用機械、電磁、脈衝或低功率雷射等驅動器將電漿壓縮到高溫的融合條件，也就是使用磁場來限制電漿，通過機械、電磁、脈衝或雷射來提供壓縮加熱達成融合條件，如此可降低輸入能量，並可降低電漿約束時間要求(100 ns→1 ms)與壓縮速度要求，因此可降低成本。美國 Los Alamos 與 Sandia 國家實驗室以及私人企業如加拿大 General Fusion 以及美國的 Helion Energy 採用此種技術。

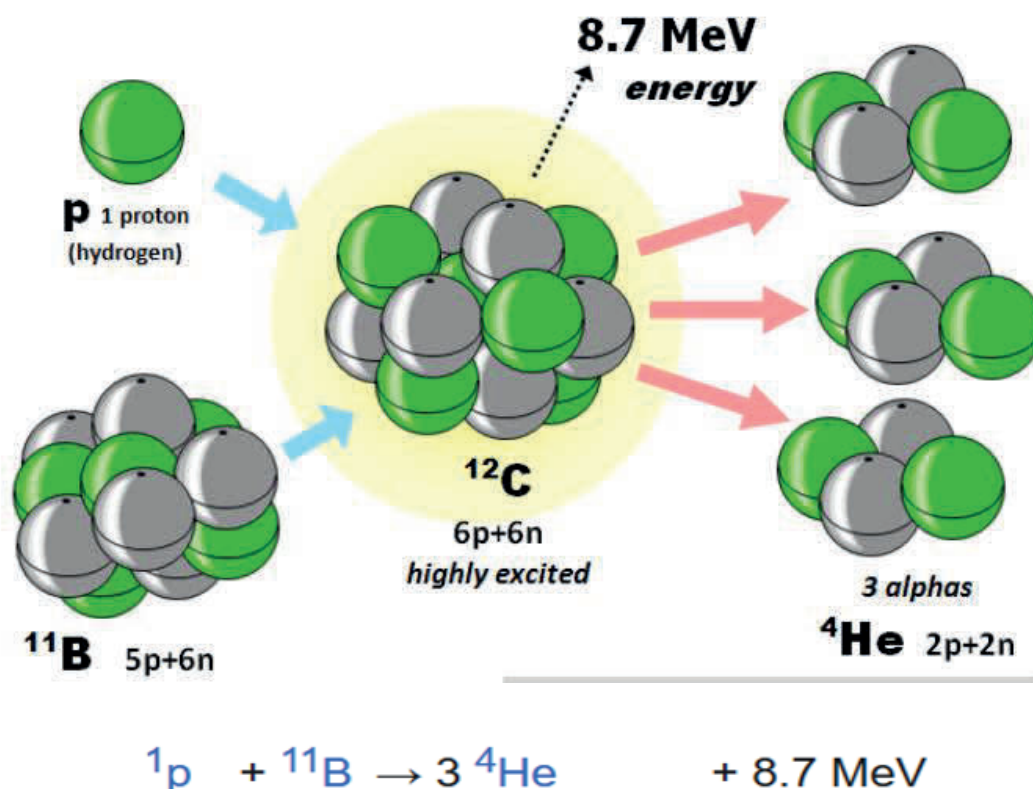
General Fusion 自 2005 年首次建構磁化目標融合，採用氘-氚融合，其融合原理如附件 1-1。預計在英國 Oxfordshire 建造的 LM26(Lawrence Machine 26)首創示範計畫，目標在達成能量平衡，並於 2030 年在英國 Oxfordshire 完成 40 MWe 的核融合商業運轉，當然目前還面臨許多技術挑戰。

Helion Energy 自 2005 年開始氘與氦-3(D-<sup>3</sup>He)融合試驗，因商業化的氦較稀少、且價格昂貴，故其以氘與氘(D-D)的副反應來產生氦，再利用氦衰變為氦-3，作為其核融合的燃料，進行氘與氦-3(D-<sup>3</sup>He)的核融合，其融合原理如附件 1-2。

2020 第 6 代 Trenta 試驗結果，磁壓縮場超過 10 Tesla，離子溫度超過 8 keV，電子溫度超過 1 keV，離子密度高達  $3 \times 10^{22}$  離子/m<sup>3</sup>，約束時間長達 0.5 毫秒，已超過發生核融合條件的勞森準則(Lawson Criterion)。目前正開發第 7 代 Polaris (2021~2024 年)，目標為脈衝率要由 1 脈衝/10 分加快到 1 脈衝/秒。2023 年 5 月 Helion Energy 與微軟訂約，預定 2028 年提供微軟 50 MWe 電力。Helion 也與 Nucor

公司合作，預定 2030 年提供 Nucor 大製鋼廠所需 500 MWe 電力。

除上述核融合採用氘-氘以及氘與氦燃料外，因考量氘-氘融合中產生高能量中子，除高能量中子撞擊反應器內壁，會影響反應器壽命外，利用中子能量發電需透過熱循環而影響效率，近年來數家民營企業積極發展其他融合材料，如氫-硼 ( $H-^{11}B$ )。氫-硼融合反應如圖 5.4，過程中幾乎不產生中子，稱為非中子核融合 (Aneutronic Fusion)，融合產生的帶電粒子( $\alpha$ -Particle)可透過電磁感應直接轉換成電力輸出，可提升效率並簡化設備。氫-硼融合反應開發廠商如澳洲 HB11 能源 (HB11 Energy)、美國 TAE Technology 與 Alpha Ring 等公司。



資料來源：TAE Technologies

圖 5.4、氫-硼融合反應

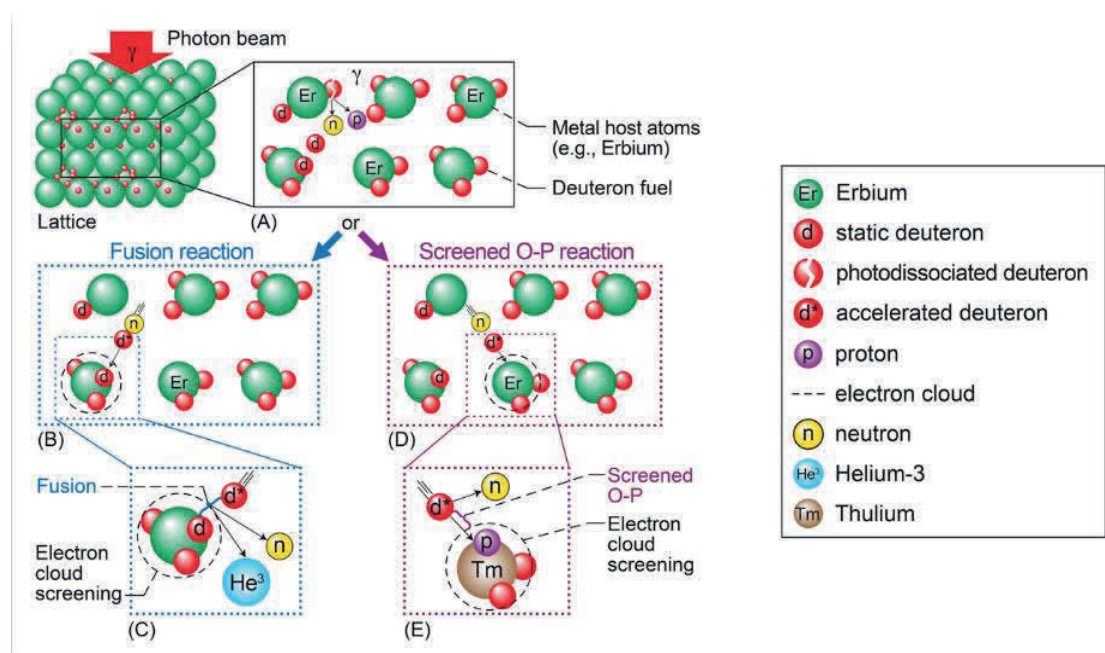
HB11 能源公司使用高功率雷射器與磁約束相結合來產生融合，而無需將燃料加熱到極高溫度，屬於非熱雷射融合(Non-Thermal Laser Fusion)，其融合反應如附件 1-3，因其不需融合的極高溫，因此消耗能量較少，故其稱較有可能早日達成核融合發電商業化，惟其邁向商業化仍面臨雷射工程、目標燃料製造與反應器工程等方面的重要挑戰。

TAE Technology 採用先進的光束驅動場反轉配置 (Field-Reversed Configuration, FRC)，結合加速器物理與核融合物理，來控制與解決電漿約束問題，其原理如附件 1-4。TAE 已經開發了第五代原始融合平台，第六代設施目前正在開發中，目標 2030 年製造一個原型商業核融合反應器。

Alpha Ring 在中性粒子密度較高的條件下，利用強離子中性耦合(Ion-neutral Coupling)原理，以電流元件上的高磁力造成高旋轉能量，使得離子和中性原子在圓柱形腔室中一起旋轉並頻繁碰撞發生核融合。Alpha Ring 聲稱其預定 2027 年建置 10 kWe 的微型核融合反應器。

#### 四、晶格約束核融合(Lattice Confinement Fusion, LCF)：

以電化學設備於電解溶液中將氘原子吸附填滿在金屬排列的間隙，所用金屬為鉕 (Erbium, Er)或鈦(Titanium, Ti)，使用燃料氘-氘(D-D)以高能 X or  $\gamma$ -Ray 將金屬中的氘原子光分解成具高能的中子與質子，高能中子將動能傳至氘原子，形成加速高動能氘原子(Accelerated Deuteron)，氘原子在電子雲屏蔽(Electron Cloud Screening)效應中與靜態氘原子產生融合反應，形成整體冷局部熱(Globally Cold and Locally Hot)狀態，在實驗中產生氦同位素，證明核融合發生，其融合原理如圖 5.5。美國國家太空總署(NASA)與勞倫斯柏克萊國家實驗室(Lawrence Berkeley National Laboratory)投入研發 LCF，也獲得 Google 資助，惟其實驗可行到工程可行再到商業可行還有長路要走。



資料來源：NASA 葛蘭研究中心(2023)

圖 5.5、晶格約束核融合

前述發展中的 3 種燃料循環(Fuel Cycle)，氘-氘(D-T)、氘-氦(D-<sup>3</sup>He)與氘-硼(H-<sup>11</sup>B)之優劣點比較如附件 2。

依國際間發展核融合的現況看來，由於各國積極投入研發，尤其 2000 年前後有較多民營公司加入發展行列，加上一些大型企業資助，核融合或有機會在未來 20~30 年邁入商業運轉。美國國家科學工程與醫學學會(National Academy of Science, Engineering and Medicine, NASEM)在其出版的 Bring Fusion to the



U.S ,Grid(NASEM, 2023)中提出達成上述目標的各階段步驟如圖 5.6。

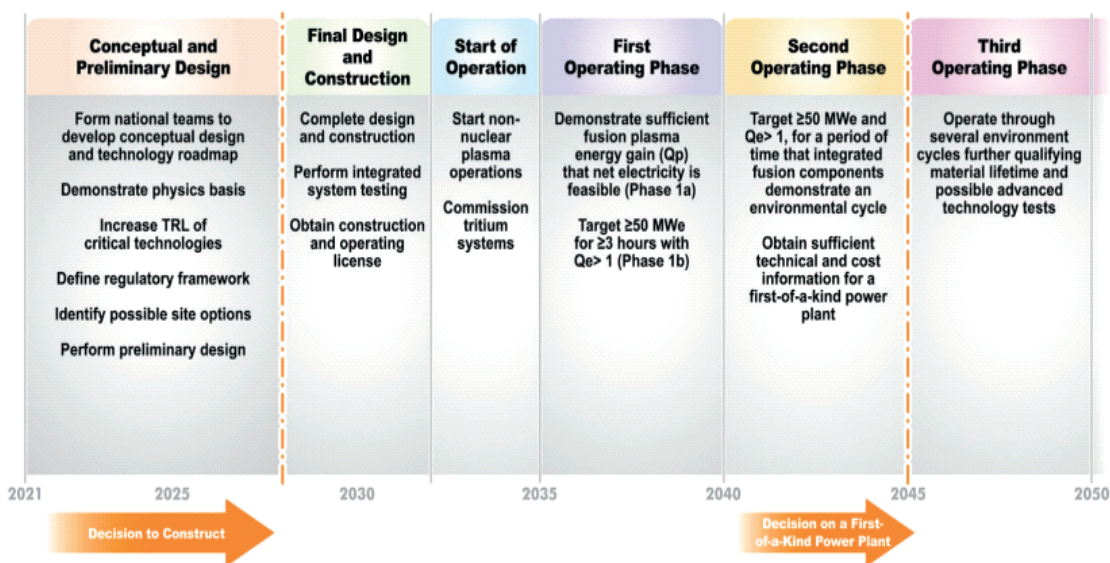


FIGURE 5.1 The phases of operation are illustrated. Chapter 3 defines the key technical goals for the phases in detail. The major goals are shown here and described below.

資料來源：NASEM (2023)

### 圖 5.6、核融合實行運轉的各階段

本節所述各種核融合方法之特性比較彙整於表 5.2：

表 5.2、主要核融合特性比較

核融合方法	核融合反應器	融合燃料	融合溫度
磁約束融合	ITER、恆星器	氘-氘	1~1.5 億 °C
慣性約束融合	NIF、Z-pinch	氘-氘	數億 °C
磁化目標融合	General Fusion Helion Energy	氘-氘 氘-氦	1~1.5 億 °C
其他氘-硼融合	H-B11(Non-thermal Laser Technology) TAE Technology Alpha Ring	氘-硼 氘-硼 氘-硼	10 億 °C
晶格約束融合	NASA	氘-氘	整體冷局部熱

資料來源：作者彙整

### 第三節 核融合面臨之挑戰

使用核融合發電可以大大減少因世界電力的需求增加對環境的影響，因為與核分裂發電一樣，它們不會造成空汙與溫室效應。鑒於燃料的現成可用性，核融合可以很容易地滿足持續經濟增長所需的能源需求，且不會有融合反應失控的風險，因為這本質上是不可能發生的，任何故障都可以迅速關閉電廠。

儘管核融合不會產生長半衰期的放射性產物，並且未燃燒的氣體可以在現場處理，但由於核融合反應過程中高能中子的撞擊，一些結構材料在反應器的生命週期內會變得具有放射性，最終也會變成放射性廢料。這種廢料的體積與融合反應器的相對體積相當。然而，核融合廢料的長期放射性強度，遠低於核分裂用過核燃料中的放射性強度，核融合廢料的處理方式也與核分裂反應器的低階核廢料大致相同。至於核能法規管制方面，美國核管會將在 2027 年前制訂"核能創新與現代化法案(Nuclear Energy Innovation and Modernization Act, NEIMA)"，其中包括對核融合的管制規定。由於核融合不像核分裂會產生連鎖反應與其他長半衰期放射性物質，所產生的氬與短半衰期中子照射產物可視為副產品(Byproduct)，因此不宜採用核分裂設施的管制規定。可能以"副產品材料國內許可的一般適用規則(10CFR-30: Rules of Applicability to Domestic Licensing of Byproduct Materials)"以及"輻射防護標準(10CFR-20: Standard for Protection Against Radiation)"來作為管制基準，以放寬核融合管制規定。

另外，還有關於氬可能釋放到環境中的問題。它具有放射性，較難控制，因為它可以穿透混凝土、橡膠和某些等級的鋼材。作為氫的同位素，它很容易摻入水中，使水本身具有弱放射性。氬的半衰期約為 12.3 年，無論是氣體還是水中，它可能被吸入或通過皮膚吸收，吸入的氬擴散到整個軟組織，氬化水迅速與體內所有水混合。儘管核融合反應只產生少量的氬，但在運轉中仍有洩漏釋放較大量氬的風險，這就是為什麼長期希望採用氬-氬的核融合過程來取代氬-氬的核融合。

雖然商用的核融合反應器尚未建成，但電漿和隔熱的必要條件已經基本實現，顯示用於電力生產的核融合現在已成為可能。商用核融合反應器有望為世界各國提供取之不盡用之不竭的電力來源。然而，從實際的角度來看，在電漿中引發核融合只是將融合能轉化為電能所需的一系列步驟中的第一步，也就是達到物理可行。但要克服許多工程問題，達到工程可行，最後還要發電成本夠低，達到經濟可行。再者，成功的核融合發電系統必須能夠安全，同時盡量減少放射性廢料和對環境影響，對商用核融合的追求仍然是人類面臨的巨大科學和工程的挑戰。

## 第六章 結論與建議

### 第一節 結論

自 1950 年代人類開啟核能商業化發電以來，經歷過 70~80 年代的興盛期，1979 年美國三哩島核子事故曾短暫影響核能發展，也促使西方核能機組提升嚴重核子事故的因應能力；1986 年蘇聯車諾比核子事故，基本上並未對西方核能工業造成影響；2011 年發生應能避免而未避免的日本福島核子事故，對核能發電造成較大的影響，各核能發電國家也因此再加強因應嚴重核子事故的能力。

近 20 年來，因氣候變遷、氣候危機、氣候災難到氣候地獄，使得減少碳排放成為顯學，2050 淨零排放目標於焉產生。在達成目標的路上，國際能源署訂定淨零排放路徑，兼顧能源安全與淨零排放，強調能源多元化，除積極開發再生能源外，不排放二氧化碳而被歸類為準綠能的核能與氫能成為必要的選項，且核能裝置容量需加倍，才能滿足淨零排放的需求。更甚者，世界核能協會(World Nuclear Association, WNA)在其”Net Zero Nuclear”需求中，強調 2050 年核能裝置容量目標應為現有的三倍。2023 年 11~12 月於杜拜召開的 COP28 氣候變遷高峰會，討論主要議題之一”Atom4NetZero”，由國際原子能總署執行長 Rafael Mariano Grossi 在會中說明核能成長的重要性，世界需要核電來應對氣候變化，應該採取行動來擴大這種清潔能源的使用，以協助建設通往未來的「低碳橋梁」，並由包括美、日、法、韓、英、加與歐盟、非洲及中東等 22 個國家共同簽署宣言，將合作達成 2050 年的核能裝置容量增為 2020 年三倍的目標。

過去數十年來，絕大部分核能機組都有相當良好的運轉績效，且大部分運轉時間甚久，過去建廠的固定費用都已折舊攤提完畢，因此目前核能發電成本遠較其他發電方式低，在安全無虞的條件下，延長核能電廠運轉壽命，成為絕大部分核能發電國家維持能源供應安全的優先政策。當然要達成邁向 2050 淨零排放目標，僅採取現有核電廠延役尚無法滿足能源需求，因此新建核能機組成為許多國家優先考慮的策略，更安全、更經濟、更永續且更具應用彈性的小型模組化反應器與第四代新型反應器便成為諸多國家研究發展與布局興建的電力來源。

第四代新型反應器包括部分小型模組化反應器，除安全、經濟外，尚具有能源永續與核廢料較易管理的優點，當其技術發展成熟時，也是可以考慮引進。當然第四代新型反應器與小型模組化反應器都面臨一些挑戰，除部分反應器技術仍待進一步研發精進與確認外，包括供應鏈、法規與執照審核的配合、燃料與材料、製造與設計配合、施工管理以及人才培養等問題都需積極解決，才有利於未來適當時機需要引進時具備足夠的條件。

SMR 因小型化具有較好的選址條件、較好的併網韌性與多功能的能源應用，

未來應可作為缺乏能源的台灣，邁向 2050 淨零排放可考慮的選項。

如未來有機會引進 SMR，建議最好是採用已取得設計認證且獲得國際間法規核准並已建廠成功且順利運轉的機組以降低風險，當然引進 SMR 尚須考慮包括採用何種技術/機型、模組供應鏈是否能配合、SMR 的經濟規模(Economics of Scale)、執照申請與核能法規的配合、財務投資與政策支持、公共認知與民眾支持、核燃料與核廢料處理、防止核擴散以及核能第三責任(Nuclear Third Liability)等議題。

拜近十年來電腦運算、人工智慧、材料科學、超導技術與模擬技術等科技的突飛猛進，加上各國政府與民間企業積極投入，核融合技術逐漸有突破性發展，或許在未來 20~30 年，人類有幸等到核融合時代的來臨，徹底解決永續能源的需求。當然，目前各種核融合技術發展都還面臨諸多挑戰，但想想在 40 年前人類就已投入人工智慧的研究，當時人類無法想像人工智慧能有今天的發展如現今的 ChatGPT。核融合技術的發展使得人類比過去任何時刻更接近能利用核融合發電，相信在不久的將來會有實現的一天。我們可以期待，也應密切注意核融合的發展，預做準備，相信時機到來即可應用，以解決我國能源缺乏的困境。

## 第二節 建議

全球核能發電已運作超過半世紀，雖逾 200 座核電廠已除役，但仍有超過 400 座核電廠運作中。各國使用核能發電除了技術上嚴守安全規範，皆需考量民眾接受度與國家政策方向。台灣對進口能源依存度高，為滿足能源供應安全與 2050 淨零排放目標，除應繼續積極開發再生能源外，若經各方商議政策上同意續用核能，則對於核能發電的立場可考慮以下四大面向：

- 一、短期的核能策略，最優先、最有效的做法是將現有核能電廠在安全無虞的條件下延長運轉壽命；另，核能四廠屬於安全等級比核三廠更高的第三代核電廠，已完成試運轉測試，並通過第三方強化安全檢測小組的系統測試複驗。雖經封存數年，將來如需配合淨零排放與國家能源安全需求，經再次進行安全總體檢與運轉測試，確認安全無虞的情形下，或可列為未來基載能源選項之一。
- 二、中期的核能策略，可考慮在未來國外小型模組化與第四代反應器已建廠完成並運轉順利的條件下，伺機引進國內作為維持穩定可靠，且不排放二氧化碳的電源，以提供國內未來所需的電力供應。
- 三、長期的核能策略，密切關注核融合的發展，在 2050 年前後或有機會等到核融合的商業化，屆時引進核融合發電可滿足永續能源的需求。
- 四、最重要的是核能人才的培養需要相當時間，台電公司過去數十年來，核

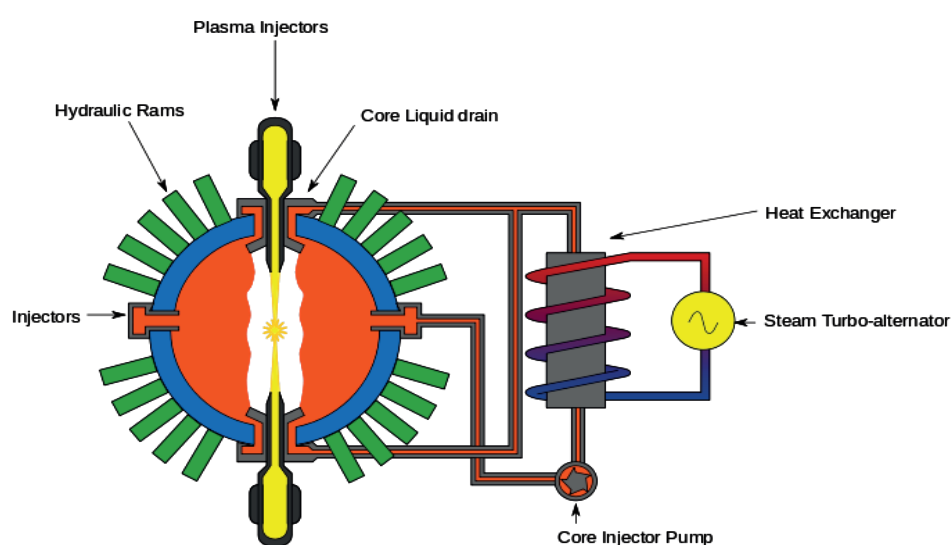
一、二、三廠有相當良好的運轉績效，主要歸功於過去三、四十年積極培養出許多核能人才，但近幾年來核能人才逐漸流失，核能發展將受到限制，如將來配合國際趨勢與淨零排放需求而需引進核能新技術，將因人才短缺而難以順利執行，因此留住人才，並及時培養人才，才能配合未來適時引進 SMR 或第四代核反應器，甚至核融合的需要。歐盟配合發展 SMR，提出”歐盟 2030 SMR 宣言(Declaration on EU SMR 2030)”，研擬研究創新教育與培訓計畫，積極培訓核能人才是為明證。



## 附件

## 附件 1-1 General Fusion 融合原理：氘-氚(D-T)融合

General Fusion 採用磁化目標融合(MTF)，將燃料注入外圍襯毯(Liner)充滿旋轉的液態鋰(Liquid Lithium)的腔室中，旋轉的液態鋰產生圓柱型空洞，燃料形成電漿並在高壓氣體機械(Steam Driven Piston)壓縮(~40 ms)下穩定加熱高溫產生核融合，液態鋰可穩定吸收中子直接反應滋生融合所需氘，此設計可避免使用超導體或高功率雷射。

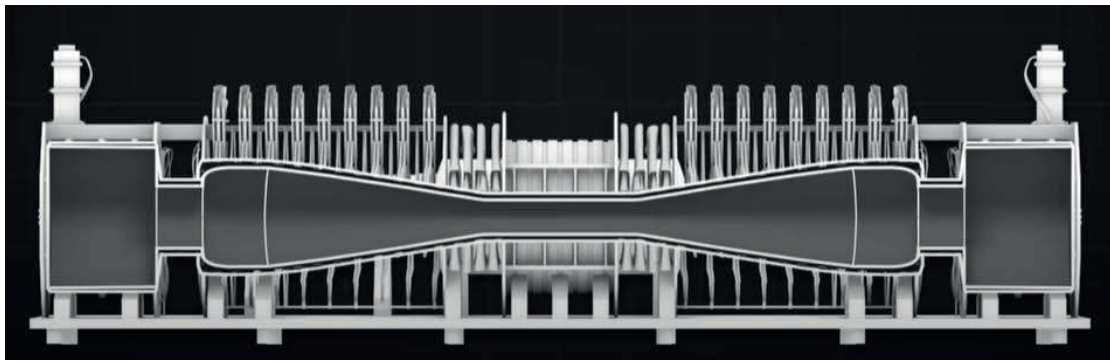


資料來源：General Fusion

圖 A.1、General Fusion 示意圖

附件 1-2 Helion Energy 融合原理：氘-氦(D-<sup>3</sup>He)融合

Helion Energy 採用磁慣性核融合(MIF)，以場反轉配置(Field Reverse Configuration, FRC)磁場產生並約束電漿，經 40 呎長的加速器(Accelerator)由兩端將電漿加速至百萬 mph，使其在融合腔室(Fusion Chamber)中央處碰撞，並受高強力磁場壓縮至高密度高溫，使 D-<sup>3</sup>He 產生核融合，使電漿膨脹而改變電漿磁場再經磁場交互作用而產生電力，其核融合過程不須點燃(Ignition)。另，FRC 電漿具高  $\beta$  值，可回收所有未使用的和新的電磁能量，不須能量轉換；它使用燃料氘與氦-3(D-<sup>3</sup>He)，氦-3 由燃料循環中產生。2020 年第 6 代 Trenta 試驗結果磁壓縮場超過 10 Tesla，離子溫度超過 8 keV，電子溫度超過 1 keV，離子密度高達  $3 \times 10^{22}$  離子/m<sup>3</sup>，約束時間高達 0.5 毫秒，已超過發生核融合條件的勞森準則(Lawson Criterion)。

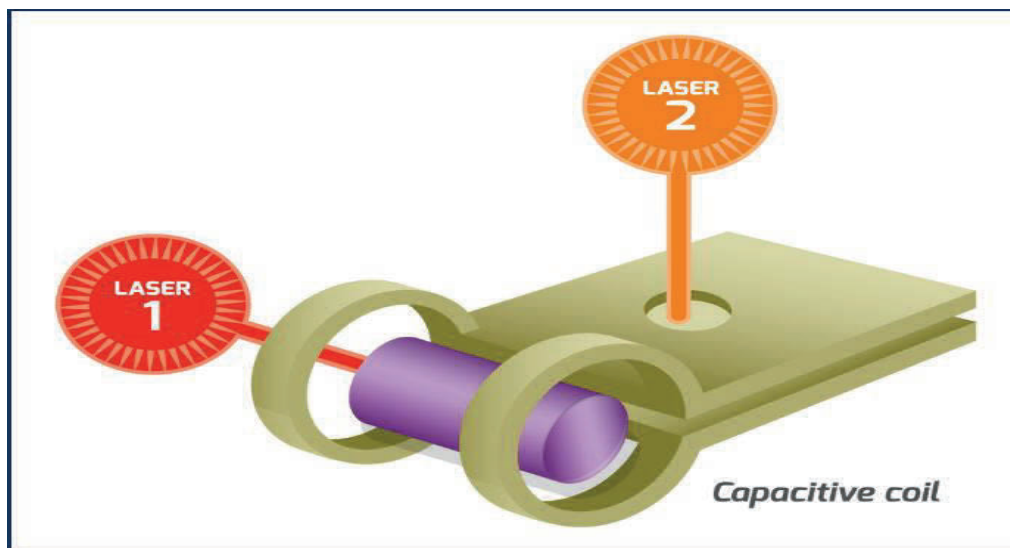


資料來源：Helion Fusion

圖 A.2、Helion Fusion 構造圖

### 附件 1-3 HB-11 Energy 融合原理：氫-硼(H-<sup>11</sup>B)融合

HB-11 Energy 主要利用兩組優化的雷射、一個電容線圈及一個半徑 1 米數毫米厚的球體，燃料 H-<sup>11</sup>B 座落在反應球體內的電容線圈中。利用第一組 kJ-皮秒 (Picosecond) 的雷射脈衝提供電漿所需的超高加速度以製造 H-<sup>11</sup>B 非熱核融合所需條件，第二組十億分之一秒雷射脈衝產生千特斯拉(Kilo-tesla)磁場，實驗發現 H-<sup>11</sup>B 發生非熱核融合，且有雪崩反應(Avalanche Reaction)產生遠高於球形壓縮預測的增益(Gains)。反應器球體以接近 1.4 兆伏的電位充電，使帶電  $\alpha$  粒子在接觸球體前減速，接觸球體後中和，使電荷被捕獲而成為電源，不需要再經熱循環換成電力。



資料來源：HB-11 Fusion

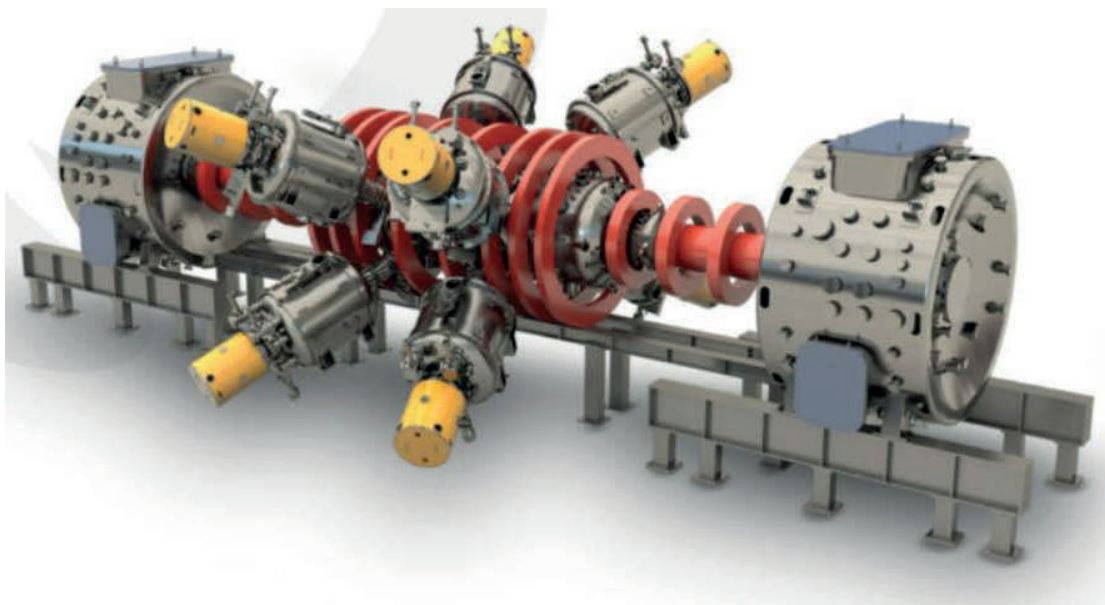
圖 A.3、HB-11 Fusion 示意圖

### 附件 1-4 TAE Technology 融合構造

TAE Technology 採用先進的光束驅動場反轉配置 (Field-Reversed Configuration, FRC)，結合加速器物理與核融合物理，來控制與解決電漿約束問題，



使用加速器將高能粒子束注入電漿中，這些粒子增加電漿密度，使其更易於管理控制發生融合，可減少能量損失，產生更多的能量輸出電力。



資料來源：TAE

圖 A.4、TAE 構造圖

## 附件 2 氘-氚(D-T)、氘-氦(D-<sup>3</sup>He)與氘-硼(H-<sup>11</sup>B)之優點與挑戰

### 一、氘-氚(D-T)融合

優點：反應截面積最大，融合溫度最低(1~1.5 億 °C)、每反應輸出能量最大

挑戰：氚具有放射性、氚自然界缺乏，必須繁殖產生，其反應產生之中子會加速材料老化，所產生能量必須經熱循環轉換成電力

### 二、氘-氦(D-<sup>3</sup>He)融合

優點：反應截面積較小，需要較高溫度產生融合(數億 °C)、放射性較氘-氚小、反應產生大部分質子，可延長反應器壽命、每反應輸出能量較大、所產生能量可能直接轉換成電力

挑戰：仍有較少放射性、融合反應較慢、氦元素較缺乏。

### 三、氘-硼(H-<sup>11</sup>B)融合

優點：反應幾乎不產生中子、沒有游離輻射，較乾淨環保、燃料充足、產生能量能直接轉換成電力

挑戰：反應截面積較小，需要優越的約束與操作條件以達成較高溫度(10 億 °C)，融合反應最慢、每次反應輸出能量最少。



## 參考資料

- DOE(2022).Energy Capacity Factors in the U.S.,2022, Washinton, D.C. : U.S. Department of Energy
- DOE(2023).Pathways to Commercial Liftoff: Advanced Nuclear, Washinton, D.C. :U.S. Department of Energy
- GIF(2023).GEN IV International Forum-Annual Report: Generation IV International Forum
- IAEA(2022).Advances in Small Modular Reactors Technology Developments-A Supplement to 2022 Edition, Vienna : Advanced Reactors Information System (ARIS)/IAEA
- IAEA(2021).Technology Roadmap for Small Modular Reactor Deployment. IAEA Nuclear Energy Series No. NR-T-1.18. Vienna : International Atomic Energy Agency (IAEA)
- IAEA(2022).Advances in Small Modular Reactors Technology Developments-A Supplement to 2022 Edition, Vienna : Advanced Reactors Information System (ARIS)/IAEA
- IAEA(2023).Comprehensive Report on the Safety Review of the ALPS Treated Water at the Fukushima Diichi Nuclear Power Plant, Vienna : International Atomic Energy Agency (IAEA)
- IAEA/PRIS (2023). Reactor Status Report (last update on 2023-9-30).
- IEA(2023).Net Zero Roadmap-A Global Pathway to Keep the 1.5°C Goal in Reach, Paris :International Energy Agency
- IEEFA(2023).Community Power Board Meeting : Institute of Energy Economics and Financial Analysis
- John Gaertner, Ken Canavan. (2008). Safety and Operational Benefits on Risk-Informed Initiatives-An EPRI White Paper. Palo Alto, California : Electric Power Research Institute (EPRI)
- NASEM(2023).Bring Fusion to the U.S. Grids, Washinton, D.C. : NASEM
- NASEM(2023).Laying the Foundation for New and Advanced Nuclear Reactors in the United States, Washinton, D.C. : National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine (NASEM)

- NEA(2021).Nuclear Power and Secure Energy Transitions-From today's challenges to tomorrow's clean energy systems, Paris: Nuclear Energy Agency, OECD
- NEA(2021).Small Modular Reactors : Challenges and Opportunities, Paris : Nuclear Energy Agency, OECD
- Patrick Champlin (2018).Techno-Economic Evaluation of Cross-cutting Technologies for Cost Reduction in Nuclear Power Plants, Boston: Massachusetts Institute of Technology
- Shobeiri, E.; Genco, F.; Hoornweg, D.; Tokuhira, A. (2023). Small Modular Reactor Deployment and Obstacles to Be Overcome. *Energies* 2023, 16(8), 3468. <https://doi.org/10.3390/en16083468>
- Statista(2022).Global Number of Small Modular Reactor Projects in 2022,Paris : Energy &Environment, IEA
- T.K. Kim, L. Boing, W. Halsey & B. Dixon, (2022). Nuclear Waste Attributes of SMRs Scheduled for Near-Term Deployment, *ANL/NSE-22/98, Revision 1*, Chicago: Argonne National Laboratory
- WNA(2023).Accelerator-driven Nuclear Energy, London: World Nuclear Association
- WNA(2023).Storage and Disposal of Radioactive Waste. London : World Nuclear Association

## 縮寫與專有名詞對照表

英文	中文及解說
Accelerator Driven Subcritical Reactor, ADS	加速器驅動次臨界反應器
Actinide	錒系元素，鈾、鈾等高放射性元素
Advanced Additive Manufacturing	新型積層製造
Advanced Fuel	新型燃料
Advanced Light Water Reactor, ALWR	進步型輕水式反應器
Advanced Liquid Processing System, ALPS	先進液體處理系統
Advanced Reactor Demonstration Program, ARDP	新型反應器示範計畫
ALPS Treated Water	含氫的 ALPS 處理水
Aneutronic Fusion	非中子核融合
Binding Energy	束縛力-核力 / 束縛能
Boiling Water Reactor, BWR	沸水式反應器
Boron, B	硼
Capacity Factor	容量因數
Capital Cost	建造成本
Carbon Capture, Utilization and Storage, CCUS	碳捕捉利用與儲存
Carbon Free Power Project, CFPP	零碳電力計畫
Chinese Fusion Engineering Test Reactor, CFETR	中國融合工程試驗反應器
Combined Operation Licensing Application, COLA	聯合運轉執照申請
Conference of parties, COP	聯合國氣候變化綱要公約締約方會議
Construction Overnight Cost	建造隔夜成本
Containment	圍阻體，環繞反應器的氣密(鋼質)殼或其他包封結構體
Core Damage Frequency, CDF	爐心熔毀率
Co-siting	共同選址
Coulomb Force/Barrier	庫侖力
Cross Section	反應截面積，表示核反應發生率
Data Center	數據中心

Department of Energy, DOE	美國能源部
Depleted Uranium	貧鈾
Design Certification	設計認證
Deuterium, D or $^2\text{H}$	氘，氫的非放射性同位素，核融合的燃料
District and Industrial Heating	區域與工業熱量供應
Dry Storage	乾式儲存
Electric Power Research Institute, EPRI	美國電力研究院
Electron Cloud Screening	電子雲屏蔽
Emergency Planning Zone, EPZ	緊急計畫區域，核災發生時之預防疏散區，傳統核電廠需數公里至數十公里
Emergency Preparedness	緊急事故應變準備
Erbium, Er	鉕
European Atomic Energy Community, Euratom	歐洲原子能共同體，成員為歐盟全體 27 國加上瑞士、英國
Experimental Advanced Superconducting Tokamak, EAST	實驗先進超導托卡馬克
Fast Breeder Reactor, FBR	快中子滋生反應器
Fast neutron	快中子，高能量、高速度的中子(1-20 MeV, >14,000 km/s)
Fast Neutron Spectrum	快中子式
Field-Reversed Configuration, FRC	磁場反轉配置
First of a Kind Engineering, FOAKE	先期設計
First-of-a-kind, FOAK	首創機組
Fuel Burnup	燃料燃耗
Full actinide recycle	全錒系再循環，可縮短放射性元素半衰期
Gas-Cooled Fast Reactor, GFR	氣冷式快中子反應器
Gen. IV International Forum, GIF	第四代核能國際論壇
General Electric, GE	奇異
Helion, He	氦
High Temperature Gas Cooled	高溫氣冷式
High-Assay Low Enriched Uranium, HALEU	高成分低濃縮鈾
High-performance Fuel Cladding Materials	高效燃料護套材料
Hydrogen Production	製氫
Ignition	點燃，啟動核融合反應
Implosion	內爆，壓縮和加熱核融合燃料的一種方法

Independent Spent Fuel Storage Installation, ISFSI	獨立用過核燃料貯存場
Industry Average Core Damage Frequency, CDF	平均爐心熔毀率
Inherent Safety	固有安全
Integrated PWR, iPWR	整合型壓水式反應器
International Atomic Energy Agency, IAEA	國際原子能總署
International Energy Agent, IEA	國際能源署
International Nuclear Power Operation, INPO	國際核能發電協會
International Thermonuclear Experimental Reactor, ITER	國際熱核實驗反應器
Ion Beam	離子束
Ion-neutral Coupling	離子中性耦合
Joint European Torus, JET	歐洲聯合環面
Land-based Water-Cooled	陸基型水冷式
Lattice Confinement Fusion, LCF	晶格約束核融合
Lawrence Berkeley National Laboratory	美國勞倫斯柏克萊國家實驗室
Lawrence Livermore National Laboratory, LLNL	美國加州勞倫斯利弗莫爾國家實驗室
Lawson Criterion	勞森準則
Lead-Cooled Fast Reactor ,LFR	鉛冷式快中子反應器
Levelized Cost of Electricity, LCOE	均化發電成本
Light Water Reactor, LWR	輕水式反應器
Liquid Fluoride Thorium Reactor, LFTR	液相氟化鈾反應器
Load Following	負載追隨
Long term Cooling	長期冷卻狀態
Lower Core Inventory	爐心容積小
Magnetic Confinement Fusion, MCF	磁約束核融合
Magnetized Target Fusion, MTF	磁化目標融合
Magneto-Inertial Fusion, MIF	磁慣性融合
Marine-based Water Cooled	海上型水冷式
Mega Amp Spherical Tokamak, MAST	百萬安培球型托卡馬克
Micro Modular Reactors, MMR	微型模組化反應器
Moderator	緩和劑

Molten Salt Reactor, MSR	熔鹽反應器
MW(e)	百萬瓦 (電力)
MW(t)	百萬瓦 (熱能)
National Academy of Science, Engineering and Medicine, NASEM	國家科學工程與醫學學會
National Ignition Facility, NIF	美國國家點火設施
Sodium Reactor and Integral Energy Storage	鈉反應器整合儲能
Neutron Spectrum	中子能譜
Non-LWR	非輕水式
Non-Thermal Laser Fusion	非熱雷射融合
Nth-of-a-kind, NOAK	非首創機組
Nuclear Fission	核分裂
Nuclear Fusion	核融合
Nuclear Steam Supply System, NSSS	核能蒸氣供應系統
Passive Safety	被動(非能動)式安全
Penetration Rate	穿透率
Power Operated Relieve Valve, PORV	動力卸壓閥
Pressurized Water Reactor, PWR	壓水反應器
Pressurizer	調壓槽
Probabilistic Risk Assessment, PRA	安全度評估
Proliferation Resistance and Physical Protection	防核擴散和實體保護
Radiotoxicity	放射性汙染
Reactor Coolant Pump	反應器冷卻泵
Seawater Desalination	海水淡化
Simplified Boiling Water Reactor, SBWR	簡化沸水反應器
Small Loss of Coolant Accident	小型喪失爐心冷卻水事故
Small Modular Reactor, SMR	小型模組化反應器
Sodium-cooled Fast Reactor, SFR	鈉冷式快中子反應器
Spent Fuel / Spent Nuclear Fuel, SNF	用過核燃料
Spent Fuel Pool	用過核燃料池
Steam Generator	蒸汽產生器
Stellarator	恆星器，核融合反應器
Supercritical Water Reactor, SCWR	超臨界水反應器
Surface to Volume Rate	面積體積比



Technology Readiness Level, TRL	技術成熟度
Thermal neutron	熱中子，能量低、速度慢的中子(0.025 eV, 2.19 km/s)
Thermal-hydraulic	熱流
Titanium, Ti	鈦
TMI Action Plan	三哩島改善行動
Tokamak	托卡馬克，核融合反應器
Tokamak Fusion Test Reactor, TFTR	托卡馬克融合試驗反應器
Transmutation	核轉換，亦稱核嬗變，用於核廢料處理，降低放射性、縮短半衰期
TRi-structural ISOtropic particle fuel, TRISO	三層等向性顆粒燃料
Tritium, T or $^3\text{H}$	氚，氫的放射性同位素，核融合的燃料
U.S. Nuclear Regulatory Commission, NRC	美國核能管制委員會
Uranium Enrichment	鈾燃料濃度
USS Nautilus SSN-571	美國鸚鵡螺號核子動力潛艇
Utility Requirement Document, URD	業主要求文件
Very High Temperature Reactor, VHTR	超高溫反應器
Westinghouse, WH	西屋
World Association of Nuclear Operation, WANO	世界核能運轉協會
World Nuclear Association, WNA	世界核能協會





國家圖書館出版品預行編目(CIP)資料

全球核能發電現況與發展趨勢/台灣電力企業聯合會、  
廖識鴻 作. -- 初版. -- 臺北市：財團法人中技社，民 113.2  
79 面；21×29.7 公分 -- (專題報告；2024-01)  
ISBN 978-626-98214-6-4 (平裝)

1. CST: 核能    2. CST: 核能發電    3. CST: 能源技術  
4. CST: 碳排放

448.169

113002679

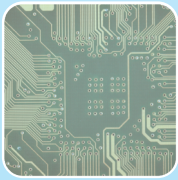
**著作權聲明©財團法人中技社**

本出版品的著作權屬於財團法人中技社(或其授權人)所享有，您得依著作權法規定引用本出版品內容，或於教育或非營利目的之範圍內利用本出版品全部或部分內容，惟須註明出處、作者。財團法人中技社感謝您提供給我們任何以本出版品作為資料來源出版的相關出版品。

未取得財團法人中技社書面同意，禁止改作、使用或轉售本手冊於任何其他商業用途。

**免責聲明**

本出版品並不代表財團法人中技社之立場、觀點或政策，僅為智庫研究成果之發表。財團法人中技社並不擔保本出版品內容之正確性、完整性、及時性或其他任何具體效益，您同意如因本出版品內容而為任何決策，相關風險及責任由您自行承擔，並不對財團法人中技社為任何主張。



財團  
法人 **中技社**

**CTCI FOUNDATION**

106 台北市敦化南路2段97號8樓

Tel : 02-2704-9805~7 Fax : 02-2705-5044

<http://www.ctci.org.tw>



ISBN 978-626-98214-6-4



9 786269 821464



使用再生紙印製