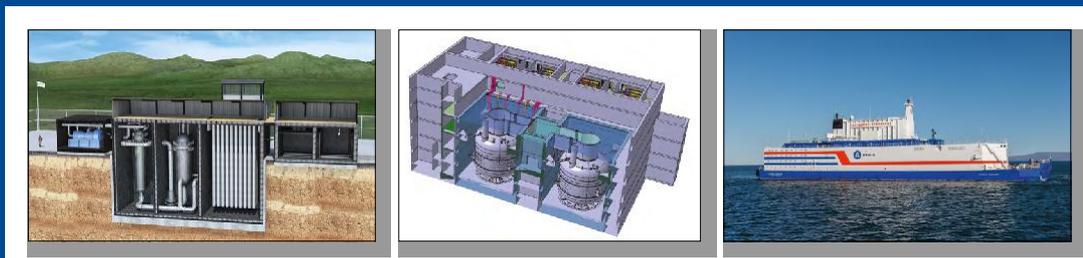


小型模組化的反應器：挑戰和機會

陳勝朗 譯



Nuclear Technology Development and Economics

小型模組化反應器：挑戰和機會

© OECD 2021年
NEA • 7560

NUCLEAR ENERGY AGENCY
ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT

ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT

經合組織是一個獨特的論壇，37 個民主國家的政府在這裡共同努力解決經濟、全球化的社會和環境挑戰。經合組織也處於努力理解和幫助政府應對新的發展和關注，例如公司治理、信息經濟和人口老齡化的挑戰。本組織提供了一個政府可以比較政策經驗，尋找常見問題的答案，確定良好做法並努力協調國內的和國際的政策。

這經合組織成員國家是：澳大利亞，奧地利，比利時，加拿大，智利，哥倫比亞，這捷克語共和國，丹麥，愛沙尼亞、芬蘭、法國、德國、希臘、匈牙利、冰島、愛爾蘭、以色列、意大利、日本、韓國、拉脫維亞、立陶宛、盧森堡、墨西哥、荷蘭、新西蘭、挪威、波蘭、葡萄牙、斯洛伐克共和國、斯洛文尼亞、西班牙、瑞典，瑞士，火雞，這團結的王國和這團結的狀態。這歐洲的委員會需要部分在這工作的這經合組織。

經合組織出版傳播廣泛這結果的這組織的統計數據蒐集和研究在經濟的，社會的和環境的問題，作為出色地作為這公約，準則和標準同意經過它是成員。

This work is published under the responsibility of the Secretary-General of the OECD. The opinions expressed and arguments employed herein do not necessarily reflect the official views of the member countries of the OECD or its Nuclear Energy Agency.

核能機構

經合組織核能機構 (NEA) 成立於 1958 年 2 月 1 日。目前的 NEA 成員包括 34 國家：阿根廷，澳大利亞，奧地利，比利時，保加利亞，加拿大，這捷克語共和國，丹麥，芬蘭，法國，德國、希臘、匈牙利、冰島、愛爾蘭、意大利、日本、韓國、盧森堡、墨西哥、荷蘭、挪威、波蘭，葡萄牙，羅馬尼亞，俄羅斯，斯洛伐克共和國、斯洛文尼亞、西班牙、瑞典、瑞士、土耳其、英國和美國。歐盟委員會和國際原子能機構也拿部分在這工作的這機構。

這使命的這能源局是：

- 到協助它是成員國家在維持和更遠發展，通過國際的合作，安全、環保和經濟所需的科學、技術和法律基礎使用的核活力為了平靜的目的；
- 提供權威評估並就關鍵問題達成共識，作為對政府關於核能政策的決定以及經合組織在能源等領域的更廣泛分析和這可持續的發展的低碳經濟體。

NEA 的具體職權範圍包括核活動的安全和監管、放射性廢物管理和退役、放射性保護，核科學，經濟技術分析核燃料循環、核法律和責任以及公共信息。NEA 數據庫提供核數據和電腦程序服務為了參加國家。

本文件以及其中包含的任何數據和地圖均不影響任何領土的地位或主權，不影響劃界的國際的邊界和界限和到這姓名的任何領土，城市或者區域。

更正到經合組織出版物可能是成立在線的在：www.oecd.org/about/publishing/corrigenda.htm。

© 經合組織 2021年

你能複製，下載或者打印經合組織內容為了你的自己的使用，和你能包括節選從經合組織出版物，數據庫和多媒體產品在你的自己的文件，演示文稿，博客，網站和教學材料，假如那合適的致謝的這經合組織作為來源和版權所有者是給出。全部要求為了民眾或者商業的使用和翻譯權利應該是提交到 neapub@oecd-nea.org。為公共或商業用途影印本材料部分內容的請求應直接發送至版權許可中心 (CCC) 在 info@copyright.com 或者這中心法語剝削社所有權複製 (氫氣化碳) 聯繫方式 cfcopies.com。

覆蓋 相片：日電池 (軸濃縮公司)；紐沃德SM (© 技術原子)；俄語 漂洋的核力量電廠 (俄羅斯國家原子能公司)。

前言

世界各地的政策制定者、核電公司和能源分析師已經表明人們對小型模組化反應器 (SMR) 的潛力越來越感興趣和競爭的，低碳技術成分的未來融合入能源系統。中小型反應器懷有固有安全特性、簡化和標準化的承諾可以使核能力的部署更容易和更經濟，並且具有重要意義。開發人員在部署演示方面取得了重大進展，**但關中小型反應器的商業可行性和效能的重要問題仍有待驗證的。**

2011 年，經合組織核能機構 (NEA) 發布了“*Feasibility and Economics of Small Nuclear Reactors* (NEA, 2011)” ，主要關注影響 SMR 經濟性能的因素。這份報告隨後被出版的 *小型模組化的反應器：核能源市場近期潛力部署* (NEA, 2016 年)。後一項研究首次估計了全球到 2035 年的 SMR 市場，**並得出結論認為未來前景可能會因的許可制度和供應鏈成熟度等因素而成功**。能源市場有繼續到進化於平行線 - 支撐的經過更有野心脫碳政策 - **這包括 SMR 為所有低碳技術帶來了新機遇**。此外，近年來經合組織國家核電項目遇到的困難，基於在傳統的大的一代三+ 核設計，有進一步增強了對更負擔得起和更容易的核技術的渴望。

2017 年 6 月，國家能源局核法律委員會 (NLC) 召開了法律專題會議方面的中小型反應器。會議顯示一些問題會需要更遠討論和看待應用的這核責任制度到浮動/可運輸中小型反應器 (這樣的作為這需要到清楚地包含他們在這定義的“核安裝”和這概念的“操作員”)。這委員會還歡迎更遠評估的這合法的方面的監管的問題在下面這國家在職的在合法的方面的核安全 (WPLAN)。相似地，在這能源局委員會在核監管活動 (CNRA) 局部的會議在六月 2019，這決定曾是製成到考慮舉措有關的中小型反應器之內。

本報告是 NEA 在這方面的最新貢獻，提供對 SMR 技術的全面概述，。它也概述了 SMR 在技術、經濟和市場方面的問題挑戰，同時它也探討了許可，監管、法律和供應鏈問題。再者，SMR 開發的下一步將需要更多廣泛的國際合作和政府的支持，期使這些互聯方面達到建造全球的和強壯的市場。

內 容

列表的縮寫詞和縮寫詞	
總結	
1. 介紹：中小型反應器在未來能源系統	
2. 概述的技術	
歷史和定義	
反應器類型和項目發展	
3. 技術經濟特徵的中小型反應器	
關鍵設計特徵的中小型反應器	
燃料循環考慮	
關鍵 經濟的	
價值 中小型反應器	
市場機會中小型反應器	
4. 許可和監管的方面	
安全考慮因素	
機會到提高許可制度	
精簡許可	
5. 合法的框架	
主要的 國際的 和 地區性的 合法的申請中小型反應器	
第三方責任 中小型反應器	
6. 政策方面	
概述最近關鍵的國家的和國際的倡議	
在政策見解和國際的協作	
7. 主要的挑戰使能夠大規模部署中小型反應器	
技術選擇問題	
訪查和調和許可構架和其他合法的挑戰	
潛在的優點的示威者	
供應鏈和燃料循環 問題	
民眾洞察力和參與	
8. 結論 和 建議：政府角色和支持國際合作部署	
9. 參考文獻	

列表

- 1: 最近估計這潛在的市場為了中小型反應器.....

列表的圖件

- 1: 選中反應器設計為A功能權力的輸出，核出口
溫度和部署配置.....
- 2: 經濟驅動力到補償為了規模不經濟.....
- 3: 估計單核磁共振容量經過地區在2035.....
- 4: 適用性的中小型反應器.....

列表的表格

- 1: 代表樣本的單核磁共振下的設計發展全球.....
- 2: 燃料循環特徵的已選擇中小型反應器設計.....

列表的縮寫詞和縮寫詞

CNL	Canadian National Laboratories
CNSC	Canadian Nuclear Safety Commission
CORDEL	Cooperation in Reactor Design Evaluation and Licensing (WNA working group)
COTS (components)	commercial, off-the-shelf
FOAK	first of a kind
Gen IV	Generation IV
GIF	Generation IV International Forum
GWe	Gigawatt electric
DOE	United States Department of Energy
EPZ	emergency planning zone
HALEU	high-assay low-enriched uranium
HEU	high enriched uranium
HTGR	High-Temperature Gas-Cooled Reactor
IAEA	International Atomic Energy Agency
IEA	International Energy Agency
INL	Idaho National Laboratory (United States)
kWh	kilowatt hour
LCOE	levelised cost of electricity
LOCA	loss-of-coolant accident
LRL	licensing readiness level
LWR	light water reactor
MDEP	Multinational Design Evaluation Programme
MMR	micro modular reactor
MOX	mixed oxide fuel
MWe	megawatt electric
NEA	Nuclear Energy Agency
NNL	National Nuclear Laboratory (United Kingdom)

執行摘要

不同成熟度水平的小型模組化反應器概念

小型模組化反應器 (SMR) 通常被定義為功率輸出在 10 兆瓦電 (MWe) 和 300 MWe 之間的核反應器。SMR 具有多項技術特徵，可增強施工的可預測性，並可能降低施工成本和縮短交付時間。那些功率輸出小於 10 MWe 的設計——通常用於半自主操作——被稱為微型模組化反應器 (MMR)。

據國際原子能總署 (IAEA) 稱，目前大約有 70 個 SMR 概念正在開發中，比 2018 年增加了 40%。雖然“SMR”一詞已在世界範圍內用於所有小型反應器設計，但存在顯著差異在開發的主要類型的 SMR 中。例如，這些 SMR 設計使用多種冷卻劑和燃料形式，並具有不同的技術準備水平 (TRL) 和許可準備水平 (LRL)。SMR 部署還可以採用不同的配置，從單機安裝和多模組工廠到移動動力裝置，例如浮動（即駁船安裝）裝置。模組化程度也因設計而異。

供應商提出的最成熟的 SMR 概念是在全球範圍內運行的第二代輕水反應器和第三代/第三代以上反應器 (LWR-SMR) 的演化變體，這些都得益於數十年的運營和監管經驗。它們約佔正在開發的 SMR 設計的 50%。其他 50% 的 SMR 設計對應於第四代反應器 (Gen IV SMR)，其中包含替代冷卻劑（即液態金屬、氣體或熔鹽）、先進的燃料和創新的系統配置。雖然基於第四代的設計不具備與 LWR 相同水平的運營和監管經驗，並且在某些領域仍需要進行額外的研究，但它們仍然受益於過去廣泛的研發歷史，開發人員和監管機構可能會以此為基礎 畫。

SMR 競爭力核心的新交付模式和價值主張

規模較小的 SMR 意味著它們不會從規模經濟中受益。為了克服這一經濟挑戰，“系列建設”將成為當務之急。因此，與大型核反應器相比，SMR 設計應通過更高程度的模組化、簡化和標準化顯示出加速的學習曲線。設備單元在廠外前置製造還提供了一個增強質量控制的環境，可以降低在現場施工風險、促進學習並能夠引入新的製造技術。其中一些好處已經在其他行業得到證明，但仍需要在 SMR 中得到證明。

同時，與大型反應器相比，更小的尺寸和更短的交付時間預測可以減少 SMR 的前期投資需求。結果是潛在客戶和投資者的財務風險較低，這可能使 SMR 成為更實惠的選擇。增強 SMR 價值主張吸引力的其他特徵與 SMR 靈活性能力（增強負載跟踪和非電力應用）相關，可以帶來系統成本效益和新的市場機會，從而促進地區和地區獲得核能大型核電廠的使用受到更多限制的部門。

需要審查監管和法律框架

由於在起草當前適用的國際核公約 (IAEA) 時並未設想到這些新技術，因此需要對此類公約進行審查，以便在必要時對其進行調整，以適應目前正在評估或採用的創新型 SMR 概念。

例如，當前的許可框架通常依賴於使用濃縮度低於 5% 的氧化鈾燃料的大型單體 LWR 的廣泛經驗基礎。提議的基於 LWR 的 SMR 具有相似的運行條件和燃料安排，預計這將有助於它們的許可過程。然而，新穎設計的主要困難是經驗基礎更有限，這使得基於更高效的被動安全功能、越來越少的嚴重故障模式和減少的場外應急計劃區 (EPZ) 來證明和批准其安全案例具有挑戰性。此外，燃料和/或冷卻劑的變化將轉化為與先前監

管範式的更大偏差，並且可能需要更靈活的許可方法，以及核安全監管機構內大量新專業知識的發展。

如果國際核責任公約原則上涵蓋 SMR，則需要進一步關注它們在浮動/可運輸核電站中的應用。

NEA 國家在 SMR 開發方面獲得經驗

許多 NEA 成員國現在通過促進國內計劃的開發和/或示範和/或首創 (FOAK, first of a kind) 裝置的建設，通過不同的方法支持 SMR 的開發。例如，美國能源部 (DOE) 正在通過公私合作夥伴關係向選定的 SMR 公司提供成本分攤支持，並允許這些公司使用位於國家實驗室的實驗設施。英國還向 SMR 提供財政支持，作為實現其 2050 年碳中和目標所必需的技術組合的一部分。

加拿大或芬蘭等國家目前也專注於制定政策框架，包括許可制度，以更好地支持新技術的部署。

SMR 部署面臨的挑戰

在評估 SMR 的經濟原理時，市場問題成為核心。一方面，如果 SMR 以類似於商用飛機的大規模生產方式製造，經濟效益可能會非常可觀。然而，這將要求單一外觀設計的市場相對較大，從而凸顯了全球市場的必要性，同時也表明，許多正在開發的外觀設計中只有一小部分最終能夠建立這樣一個全球市場。

為了支持全球市場，以及減少供應商提出的設計數量，需要遵守更高水平的監管協調。此外，SMR 還引入了一系列未經測試的創新，這些創新也可能導致額外的技術風險。然而，隨著第一批演示者上線，SMR 逐漸成熟，其中一些風險應該會得到緩解，從而增加潛在客戶的興趣。供應鏈還應準備好支持 SMR 市場的出現，確保及時提供工廠製造能力、高含量低濃鈾 (HALEU) 和其他創新燃料生產能力，以及必要的技能和研究與開發 (R&D) 基礎設施。

最後，由於其中一些 SMR 試圖盡量減少疏散區並將反應器放置在靠近大型人口中心的地方，因此在公眾參與方面可能會出現額外的挑戰。

政府支持和國際合作：SMR 部署的關鍵推動因素

支持 SMR 選項的國家可能會看到設定前進道路的價值，該道路側重於政府支持和國際合作將發揮關鍵作用的四個主要行動領域：

- **公眾參與**：未來的項目可以受益於國際合作，通過與當地社區的公眾參與交流有關經驗教訓的信息，以及早期採用者發現的困難和最佳實踐。
- **FOAK SMR 示範單位的建設和學習**：政府可以通過多種形式支持 FOAK 示範項目，從具體的長期購電協議到可以最大限度降低建設風險的成本分攤機制，以吸引更多的投資者。支持監管機構努力制定必要的許可制度和能力也很重要。與此同時，應繼續努力通過主辦第一批實驗單位和資助必要的研究基礎設施，將研究轉化為有效部署。
- **許可制度的協調**：可以通過利用大型反應器以及其他高度監管部門的現有協作框架來促進協調。雖然完全協調可能不現實（並且在某些方面是不可取的），但應在可以實現有意義的共同監管立場的領域繼續努力。應考慮 NEA 對多邊許可協調、雙邊合作和聯合安全評估的探索，例如在多國設計評估計劃 (MDEP) 下進

行的探索。在預許可層面也存在重要的協調機會，這可能會促進 SMR 設計的向下選擇過程。

- **製造能力的發展**：通過致力於多個 SMR 單元的國家核計劃，政府可以擴大製造能力。已經參與大型核項目的國家可以利用現有能力和交付過程中的協同作用。還可以探索各國之間的重要夥伴關係和工業合作，以分擔潛在風險。需要預測燃料循環問題，以適當支持市場前景。最後，應努力協調可帶來額外市場利益的規範和標準。

1. 簡介：未來能源系統中的 SMR

如果各國要實現巴黎協定減少溫室氣體排放的目標，核電將需要對整體能源結構做出重要且不可或缺的貢獻。根據國際能源署（IEA）的可持續發展情景（SDS），要實現這些目標，將需要新的核容量和現有核電站雄心勃勃的壽命延長計劃。政府間氣候變化專門委員會（IPCC）也確認需要核電發揮越來越大的作用以實現脫碳目標（IPCC，2018）。

然而，核電在全球發電量中無法達到其所需的份額。事實上，在 2020 年至 2040 年期間，目前額外 5 吉瓦（GW）年產能的速度至少需要翻一番才能滿足 SDS。還需要將壽命延長到 30 至 40 年的初始設計壽命之外，以減輕核建築供應鏈的壓力並控制整體脫碳成本（國際能源署，2019 年，2020 年）。

與 SDS 情景相比，核電新建容量增加不足的原因有很多。影響最大的因素與新核項目的高成本有關，特別是在最近幾十年沒有建造核電站的國家。這些首創（FOAK）第三代項目受到施工延誤和成本上漲的影響，特別是在經合組織國家，這削弱了利益相關者和公眾對核工業建設新項目能力的信心。此外，新核電站項目風險高的看法令投資者望而卻步，並進一步降低了各國為未來項目吸引融資的能力（NEA，2020）。

與此同時，小型模組化反應器（SMR）一直在吸引決策者的注意力，作為一種技術選擇的例子，可以解決最近核項目中觀察到的部分挑戰。SMR 技術還將為擴大核能作為整體能源結構脫碳手段的作用提供機會。在低碳技術選擇更為有限的難以減排的部門的非電力應用中尤其如此。儘管在驗證設計概念方面取得了重大進展，但仍然存在許多挑戰。本報告的目標是：

- 介紹 SMR 概念及其發展現狀；
- 總結中小型反應器的潛在利益及其主要經濟特徵；
- 確定中小型反應器商業開發面臨的主要挑戰，並確定有助於解決這些問題的潛在戰略；
- 為 SMR 的開發和部署提出一條潛在的前進道路。

1. 為實現 SDS 容量增加目標，從 2021 年起，每年需要約 20 GW 的新容量，而無需將現有核電廠的壽命延長至 40 年以上。

二、SMR技術概述

歷史和定義

儘管如今它們被廣泛認為是一項革命性的核能技術，但小型核反應器並不是全球核工業的最新發展。事實上，在 20 世紀 50 年代後期和 60 年代開發和部署的第一批商業反應器——基於輕水反應器（LWR）技術——在很大程度是小型海軍推進反應器的放大版本。在同一時期，政府出於一系列安全和軍事目的建造了各種各樣的小型反應器。使當前的小型反應器成為潛在的遊戲規則改變者的原因不僅在於它們的尺寸，還在於它們的設計有意利用較小的尺寸來帶來變革性的安全功能、交付模型和商業案例。

今天，SMR 被定義為輸出功率在 10 兆瓦（MWe）和 300 MWe 之間的核反應器。他們通過設計整合更高的模組化、標準化和基於工廠的施工，以最大限度地提高系列經濟（或“系列效應”）。然後可以在現場運輸和組裝不同的模組，從而實現可預測性和施工節省。

反應器類型和在建項目

SMR 設計可以按多種方式分類（NEA，2011）。正在開發的 SMR 設計使用具有不同技術準備水平（TRL）和許可準備水平（LRL）的各種冷卻劑和燃料形式（NEA，2018）。大多數 SMR 概念可分為五大類。它們是：

- 單機LWR-SMRs——使用成熟的LWR 技術和燃料提供獨立裝置，可以取代小型化石燃料裝置或部署為分佈式發電。
- 多模組 LWR-SMR——也使用 LWR 技術，可以作為中型基本負載容量的替代品或在分佈式發電框架中運行，具體取決於發電量。
- 移動/可運輸的中小型反應器——目前應用輕水反應器技術，旨在方便地從一個地點移動到另一個地點。浮式反應器屬於此類。

1. As highlighted in this paper on several occasions, the series effect – among other conditions – plays a central role in the economic competitiveness of SMRs. The series effect has two components: i) the benefits of serial production of equipment, reducing the unit costs with an increased number of units; and ii) increased efficiency and cost-effectiveness through learning curves and feedback of experience. In the case of SMRs with smaller modules, the prospect of in-factory construction of reactor units is an important benefit.
2. Note that more than one category may apply to a particular SMR design.

- 第四代（Gen IV）中小型反應器——應用先進的非輕水反應器技術，包括第四代國際論壇（GIF）在過去幾年中研究過的許多概念。
- 微型模組化反應器（MMR）——代表容量小於10 MWe 的設計，通常能夠半自主運行，並且相對於較大的SMR 具有改進的可運輸性。這些技術通常不是基於 LWR，而是應用了廣泛的技術方法，包括 Gen IV 技術。MMR 主要用於偏遠地區的離網運行，預計它們將在這些地區與普遍的電力來源競爭。

雖然每個單獨的設計都會帶來自己的技術和許可挑戰以及潛在的好處，但在未來的分析中考慮這五個類別中的 SMR 更為實際，特別是在監管機

構參與批准使用此類技術的過程中。

一般來說，基於 LWR 的 SMR 概念是最成熟的，具有最高的 TRL 和 LRL，它們可能是最早可用於商業部署的。幾個概念正在建設中（例如阿根廷的 CAREM，中國的 ACPR50S）或商業運營（例如俄羅斯的 KLT-40S 3）。其他設計正在取得重大許可進展，並可能在 2030 年之前構建為初始原型。這些技術是在全球範圍內運行的第二代和第三代/第三代 + 反應器的小型進化變體，並受益於數十年的運營和監管經驗。加壓重水反應器（PHWR）技術也可以得出類似的結論。

與 LWR 相比，第四代技術使用替代冷卻劑（即液態金屬、熔鹽或氣體）和不同的系統配置。雖然基於 Gen IV 的設計不具備與 LWR 相同水平的運營和監管經驗，並且在某些領域仍需要進行額外的研究，但這些設計仍然受益於過去研發的廣泛歷史，開發商和監管者可能會藉鑑。最成熟的 Gen IV 設計是金屬冷卻和氣冷系統，一些裝置目前正在運行或在建。5 由於出口溫度較高，這些設計還可能提供考慮非電力應用的特定機會（見圖 1）以及先進的核燃料循環。

目前，至少有 72 個 SMR 概念處於不同的開發階段（IAEA，2020），比 2018 年增加了 40%（IAEA，2018）。表 1 提供了國際層面正在開發的 SMR 的代表性樣本，列出了大約一半的設計概念基於 LWR 技術，另一半基於 Gen IV 概念。雖然“SMR”一詞已在世界範圍內用於指所有小型反應器設計，但主要類型的 SMR 之間仍存在顯著差異，尤其是在設計模組化程度方面。一代四、（創四）中小型反應器 - 申請先進的，非輕水反應器技術和包括許多的概念。

圖 1: 已選反應器設計為核能功能力量輸出，出口溫度和部署配置

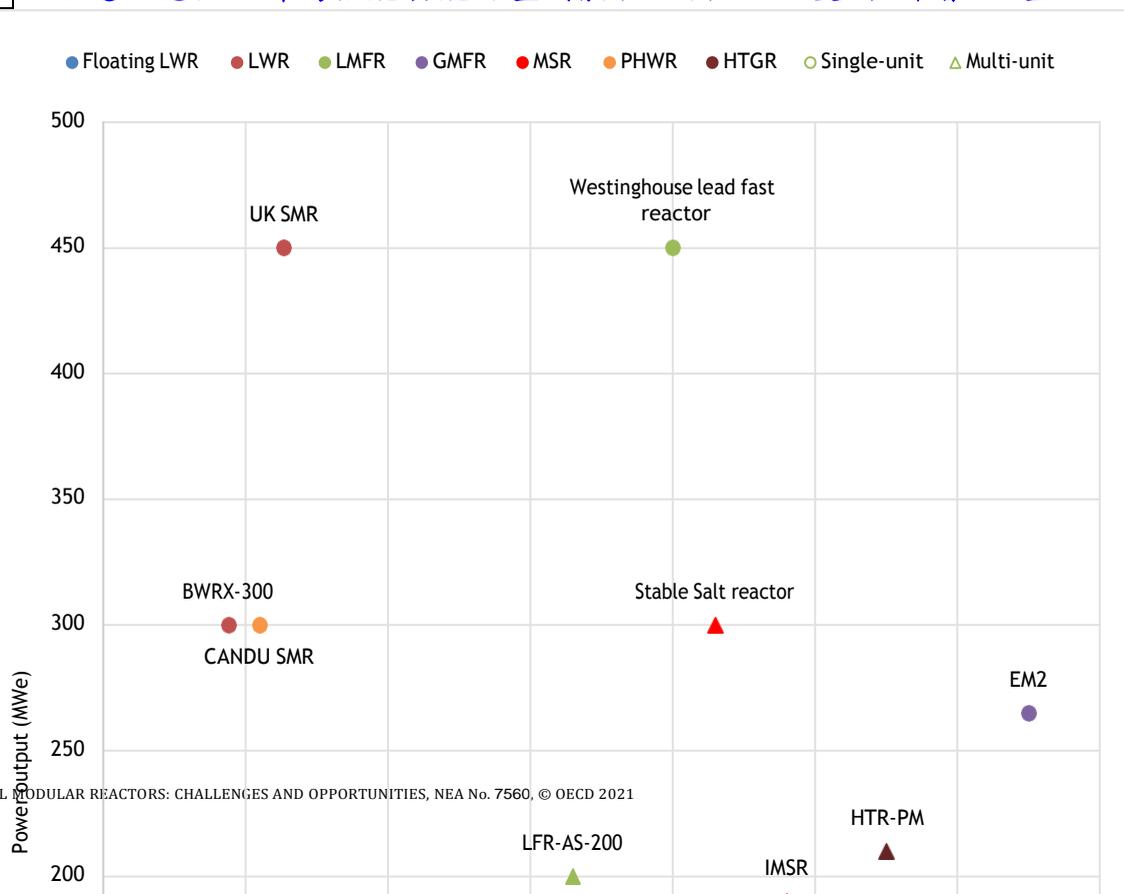


Table 1: Representative sample of SMR designs under development Globally

Design	Net output per module (MWe)	Number of modules (if applicable)	Type	Designer	Country	Status
Single unit LWR-SMRs						
CAREM	30	1	PWR	CNEA	Argentina	Under construction
SMART	100	1	PWR	KAERI	Korea	Certified design
ACP100	125	1	PWR	CNNC	China	Construction began in 2019
SMR-160	160	1	PWR	Holtec International	United States	Conceptual design
BWRX-300	300	1	BWR	GE Hitachi	United States-Japan	First topical reports submitted to the US NRC and to the CNSC as part of the licensing process
CANDU SMR	300	1	PHWR	SNC-Lavalin	Canada	Conceptual design
UK SMR	450	1	PWR	Rolls Royce	United Kingdom	Conceptual design
Multi-module LWR-SMRs						
NuScale	50	12	PWR	NuScale Power	United States	Certified design. US NRC design approval received in August 2020
RITM-200	50	2	PWR	OKBM Afrikantov	Russia	Land-based nuclear power plant - conceptual design
Nuward	170	2 to 4	PWR	CEA/EDF/Naval Group/TechnicAtome	France	Conceptual design
Mobile SMRs						
ACPR50S	60	1	Floating PWR	CGN	China	Under construction
KLT-40S	35	2	Floating PWR	OKBM Afrikantov	Russia	Commercial operation
Gen IV SMRs						
Xe-100	80	1 to 4	HTGR	X-energy LLC	United States	Conceptual design
ARC-100	100	1	LMFR	Advanced Reactor Concepts LLC	Canada	Conceptual design
KP-FHR	140	1	MSR	Kairos Power	United States	Pre-conceptual design
IMSR	190	1	MSR	Terrestrial Energy	Canada	Basic design
HTR-PM	210	2	HTGR	China Huaneng/CNEC/Tsinghua University	China	Under construction
EM2	265	1	GMFR	General Atomics	United States	Conceptual design
Stable Salt Reactor	300	1	MSR	Moltex Energy	United Kingdom	Pre-conceptual design
Sodium	345	1	SFR	Terrapower/GE Hitachi	United States	Conceptual design
Westing-house Lead Fast Reactor	450	1	LMFR	Westinghouse	United States	Conceptual design
MMRs						
eVinci	0.2-5	1	Heat pipe reactor	Westinghouse	United States	Basic design
Aurora	2	1	LMFR	Oklo	United States	Licence application submitted to the US NRC
U-Battery	4	1	HTGR	Urenco and partners	United Kingdom	Basic design
MMR	5-10	1	HTGR	USNC	United States	Basic design

三. 中小型反應器的技術經濟特徵

SMR 的主要設計特點

儘管一些輕水-小型模組化反應器 (LWR-SMR) 設計的熱效率有所損失 (見表 2)，但與傳統大型核反應器相比，SMR 技術的尺寸縮小帶來了大多數核反應器共有的幾個優勢特徵，如表 1 中列出的設計：

- **集成設計**：較小的內核支持使用集成設計。一個完整的系統將核蒸汽供應系統 (NSSS) 的所有組件整合到一個容器中。在這種配置中，主容器中包含的主冷卻劑總存量明顯大於傳統的外部迴路配置，顯著增加了系統的熱容量和熱慣性。這樣的配置因此導致穩固的固有安全外殼和更簡單的系統、操作和維護。
- **固有安全性**：較低的功率輸出和較小芯體提供的較高表面積與體積比將提高被動安全系統在正常和非正常操作條件下的效率。例如，許多基於 LWR 的設計具有非常大的水庫存，即使在極端情況下 (例如失去場外電力) 也可以被動冷卻反應器系統。對被動冷卻系統的更高依賴允許更簡化的設計和簡化的操作和維護。
- **較低的核心庫存**：較小的核心庫存對現場和場外都有好處。在現場，需要較少的屏蔽，因此減少了工人的輻射暴露劑量。在場外，較小的庫存、較低的事務發生概率以及較少的能量驅動潛在的放射性釋放可以減少對應急規劃區 (EPZ) 的需求。這些好處可能意味著一些 SMR 可能位於更靠近需要能源的地方。
- **改進的模組化和可製造性**：重量和尺寸直接決定了各種組件的製造、運輸、吊裝和安裝的難易程度。較小尺寸的 SMR 設計可以採用更雄心勃勃的模組化方案以及新的製造技術 (NEA, 2020)。
- **增強的靈活性**：通過利用現有第二代反應器的機動能力 (NEA, 2012)，SMR 可以通過固有設計特徵以及通過優化多模組單元運行 (Ingersoll 等人, 2012 年) 實現增強的負載跟蹤模式。更一般地說，SMR 的靈活性還包括部署能力 (例如較低的選址限制) 和產品的多樣性 (熱電聯產)。

這些關鍵設計特徵可能對 SMR 的安全方法產生重要影響 (見第 4 章)，同時支持最終決定該技術整體競爭力的幾個關鍵經濟驅動因素。

燃料循環注意事項

正在開發的 SMR 需要與核燃料循環相結合，這意味著要么建立在現有基礎設施上，要么在某些情況下建立在對新工業能力的專門投資上。正在考慮的 SMR 概念的範圍及其技術成熟度的總體水平導致對許多燃料循環方案的考慮。迄今為止，很少有 SMR 開發人員在該領域充分制定或傳達了他們的戰略，特別是與燃料循環後端相關的戰略 (原子能機構, 2020 年)。

LWR-SMR 的燃料循環策略

LWR-SMR 有望開發與現有工業能力兼容的前端燃料循環，特別是在濃縮水平 (低於 5%) 或燃料類型和組裝方面。燃耗和燃料技術的範圍也意味著，在第一種方法中，來自這些反應器的燃料應該與已制定關閉其燃料循環戰略的國家的後處理解決方案兼容。俄羅斯開發的浮式 SMR 是一個例外，它正在考慮接近 20% 的濃縮水平。大多數開發商並

未排除 SMR 使用混合氧化物 (MOX) 燃料的可能性，但很少將其作為這些反應器的優先事項進行討論 (IAEA, 2020)。

在 LWR-SMR 設計中觀察到的較低熱效率意味著每千瓦時 (kWh) 能量產生的鈾需求將更高，並將直接影響燃料循環成本。還應注意的是，燃料加注週期預計比現有 LWR 更長。

第四代 SMR 和微型反應器的燃料循環策略

雖然大多數第四代 SMR 和微型反應器都在考慮使用鈾基燃料，但仍需要開發新的燃料循環設施。這些反應器概念中的幾個共有的一個關鍵特徵是它們將提供更長的燃料補給週期。熱管微型反應器是一個主要的例子，這些反應器的燃料補給期長達 20 年。

Table 2: Fuel cycle features of selected SMR designs

Design	Fuel type/assembly array	Fuel enrichment (%)	Thermal efficiency (%)	Core discharge burnup (GWd/ton)	Refuelling cycle (months)
LWR land-based SMR					
NuScale	Uranium oxide (UO ₂) pellet/17x17 array	<5%	30%	> 30	24
SMART	UO ₂ pellet/17x17 array		30%	< 54	30
SMR-160	UO ₂ pellet/square array		30%	45	24
Nuward	UO ₂ /17x17 array		31%	-	24
BWRX-300	UO ₂ /10x10 array		32%	49.5	12-24
UK SMR	UO ₂ /17x17 array		35%	55-60	18-24
Mobile SMRs					
KLT-40S	UO ₂ pellet in silumin matrix	18.6%	23%	45.4	30-36
RITM-200	UO ₂ pellet/ hexagonal array	<20%	29%	-	72-84
Gen IV and MMRs					
Aurora	Recycled HALEU fuel (EBR-II used fuel)	-	38%	-	240
eVinci	HALEU fuel	5 - 19.75%	29%	-	> 36
Natrium	HALEU fuel	-	-	-	-
ARC-100	U-Zr alloy	13.1%	35%	77	20
Energy Multiplier Module (EM ²)	Uranium carbide/hexagonal array	-14.5%	53%	130	360
Westinghouse Lead Fast Reactor	Uranium oxide, before transitioning to uranium nitrides	≤ 19.7%	47%	≥ 100	≥ 24
Integral Molten Salt Reactor (IMSR)	Circulating molten salt fuel (fluoride) with U	<5%	44%		84
Stable Salt Reactor	Static molten salt fuel (chloride) with Pu	Reactor grade Pu	40%	120 - 200	Online refuelling
KP-FHR	TRISO fuel	19.75%	44%		
U-Battery	TRISO fuel	<20%	40%	80	

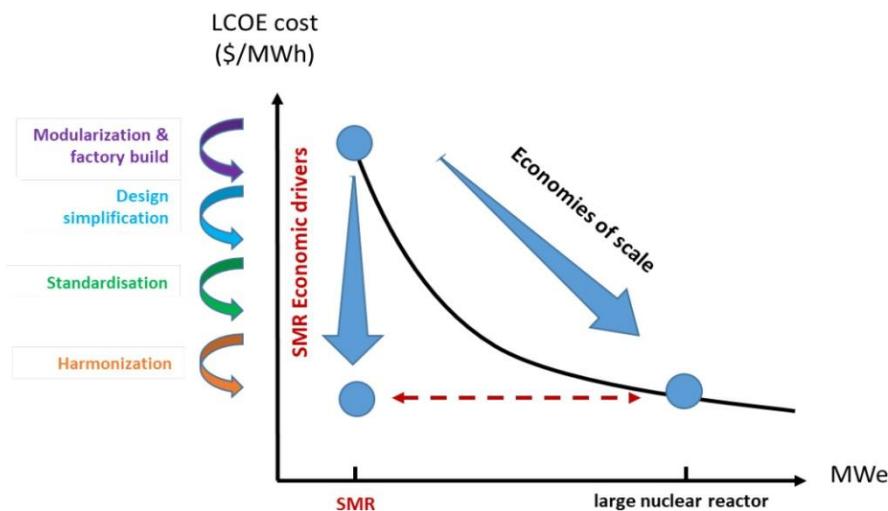
主要經濟驅動力

反應器設計者傳統上將反應器擴大到更大的尺寸，以利用規模經濟（NEA，2011）。為了平衡規模不經濟和提高競爭力，SMR 的商業案例得到了系列生產經濟的支持，這依賴於四個關鍵成本驅動因素：設計簡化、標準化和模組化，同時最大限度地提高工廠製造和最大限度地減少現場施工。

其他行業（包括造船業和航空業）已經充分證明了串行建造的好處，串行製造的學習率在 10% 到 20% 之間（NNL，2014）。對於首批 SMR 機組，批量生產還可能導致攤銷非經常性成本，例如研究、開發和設計認證成本。

為了實現系列工廠製造，單一設計的市場必須足夠大，突出開發這樣一個全球市場的潛在好處，同時表明正在開發的許多設計中只有一小部分可能能夠建立這樣一個市場。核安全監管機構之間為加強許可制度的協調而開展的合作有望在促進這一全球市場的出現方面發揮核心作用（見第 4.3 節）。控制 SMR 競爭力的經濟驅動因素總結在下面的圖 2 中。

圖 2：SMR 彌補規模不經濟的主要經濟驅動因素



來源：能源局（2020）。

：千瓦 = 千瓦電。

設計簡化

在增強的無源機制和更高的設計集成方面，較小核心的獨特物理特性為簡化 SMR 系統提供了新的機會。一些有源部件，例如反應器冷卻泵及其相關的輔助系統，在新型 SMR 設計中可能不再是必需的，與當前的大型 LWR 設計相比，這是一個重要的優勢。

3. 例如，NuScale 和 BWRX-300 SMR 設計為以自然循環運行。

大型 LWR 堆芯產生的熱量通常由需要電源的主動冷卻系統去除。在一系列條件下確保安全冷卻的需要導致冗余安全和輔助系統的複雜分層，與其他因素一起導致大型 LWR 設計中觀察到的成本增加（Ingersoll，2009 年）。簡化 SMR 設計中的安全系統可以為降低工廠複雜性做出積極貢獻，進而降低總體資本成本。

SMR 的其他簡化機會可能出現在整個工廠架構的層面，從反應器組件到常規土木結構、可施工性和商業現成（COTS）組件的使用。一些多單元 SMR 開發商也在考慮通過開發共享電廠基礎設施（例如共享渦輪機廠房和控制室）來進一步簡化。

這些不同的簡化方法可以轉化為降低 SMR 的建設成本，既可以直接通過減少組件和系統的數量和大小，也可以通過項目管理層面的好處間接實現。例如，設計簡化可以減少與返工相關的風險，並減少施工期間的延誤，這對最近的 Gen III first-of-a-kind (FOAK) 項目產生了重大影響（國家能源局，2020 年）。

標準化

SMR 設計提供了更高水平的標準化。設計標準化及其隨後的複製已被證明是降低大型反應器成本的有效方法，因為它促進了邊做邊學，並通過長期新建項目促進了供應鏈的動員（Lovering 等人，2018 年）。（，2016）。這些好處不僅限於反應器設計，因為它們可以擴展到相關的輸送過程。

實際上，正如世界核協會（WNA）通過其反應器設計評估和許可合作（CORDEL）工作組強調的那樣，“標準化反應器設計的概念並不要求單元完全相同。相反，所有使用標準化設計技術的單位至少應該共享相同的全球架構和相同的核蒸汽供應系統設計和組件規範，以及相關的安全系統”（WNA，2015 年）。

對於整體 SMR 設計，反應器模組和主安全系統被設想為滿足這一定義。附加功能可以促進反應器架構的標準化。例如，在地下建造 SMR 的可能性和使用地震隔離系統將減少根據當地地震條件調整設計的需要。通過在 SMR 設計中最大限度地使用 COTS 組件，可以進一步實現更高的標準化水平。

隨著 SMR 進入示範和部署階段，核供應鏈的早期參與將在支持設計標準化過程中發揮核心作用。

模組化和工廠化建設

模組化是一種通過將工廠分成可以在工廠建造、運輸然後在現場組裝的包（模組）來簡化施工的方法。儘管模組化結構已用於大型核電站，但 SMR 甚至可以進一步利用模組化結構方法的優勢。特別是，在遠離建築工地的專用工廠中建造和/或預組裝模組可以預期通過模組化降低成本，在這些工廠中，勞動生產率和質量控制預計會更高，

項目管理風險會更低。模組化程度可能因設計而異。例如，處於早期開發階段的設計可能具有更大的模組性。大型 LWR 堆芯產生的熱量通常通過主動冷卻去除 需要電源的系統。需要在一系列條件下確保安全冷卻 導致冗余安全和輔助系統的複雜分層，有助於， 沿著 和其他 因素，到成本增加觀察到的在大的輕水反應器設計（英格索爾， 2009）。這簡化的安全系統在這設計的中小型反應器，能製作積極的貢獻向減少電廠複雜，和在轉動，這全面的費用。

SMR 的其他簡化機會可能出現在整個工廠的水平上建築，從反應器組件到常規土木結構，可施工性和使用的商業的，現成的（COTS）成分。一些多單元開發人員還考慮通過開發共電廠基礎設施，這樣的作為共享渦輪建築物和控制房間。

這些不同的簡化方法可以進入降低建造費用，對於 SMR 直接通過減少組件的數量和尺寸以及系統和間接地通過好處在這項目管理等級。設計例如，簡化可以減少與返工相關的風險，以及減少施工期間的延誤，這對 影響最近的同類首創項目（國家能源局，2020 年）。

3.4. SMR 的價值主張

SMR 設計可以通過其價值主張改變核電的**商業**案例。

融資效益

從**財務角度**來看，與對於大型 LWR，尤其是在自由化的電力市場中：

- **負擔能力**：較低的總體資本支出意味著私人投資者將面臨較低的風險資本，這可能使 SMR 成為更實惠的選擇。反過來，這種較低的資本風險可能會吸引新的融資來源（例如私募股權、養老基金），降低資本成本並最終降低平準化成本 SMR 產生的電力 (LCOE)。
- **回報更短**：SMR 開發商提倡縮短建設工期將進一步降低融資成本。
- **可擴展性**：對於多單元 SMR，能夠添加模組並開始生成電力逐漸降低了前期投資和資本風險，這轉化為較低的財務成本。
- **組合策略**：對於多單元 SMR，能夠逐步添加模組還可以讓投資者根據電力需求和現金的變化進行調整流動/融資可用性，從而改善金融風險的管理。

交付模式和上市時間

標準化 SMR 模組的串行構造不僅代表了以下方面的好處平準化成本以及交付模式的轉變。當市場達到一個足夠的成熟度，它可能會導致上市時間的減少（即時間在項目開發和反應器調試之間需要）。

當比較上市時間時，這種好處可能特別有價值具有其他可調度發電替代方案的 SMR，尤其是在新興市場中必須滿足快速增長的電力需求的國家。

系統成本效益

SMR 的靈活性（增強的負載跟踪和非電力應用程序），以及它們為電網提供輔助服務的能力（頻率、慣性、反應能力等）也可以從以下角度帶來一些好處系統成本優化。這些好處將出現在系統級別 SMR 功能將減少對替代品和可能更昂貴的替代品的需求（例如電池、需求側管理）和碳密集型（例如煤炭、石油和天然氣）植物）靈活性和輔助服務的來源。這些好處將在多大程度上從私人投資者的角度來看是否感興趣**將取決於價值（因此價格）**，未來的電力市場將這些屬性。

3.5. SMR 的市場機會

中小型反應器市場前景，現階段仍存在較大不確定性技術開發和許可準備就緒。成本競爭力 SMR 的數量與全球市場的穩健性和規模有著內在的聯繫，也與服務這個新興市場所需的監管和政策支持水平。

SMR 的開發部分是為了擴大核電應用市場超越集中式電力系統中的傳統基本負荷電力供應。在一個戰略層面，這轉化為**三個重疊的市場機會**（見圖 4）：

- 能源系統脫碳；
- 補充可變可再生能源（VRE）的部署；
- 促進核能進入新部門和/或地區。

能源系統脫碳

脫碳政策可能會支持中小型反應器的增長。在電力領域，對於例如，就反應器尺寸而言，SMR 可被視為適合替代退役燃煤電廠的子集。約 60 吉瓦電力 (GWe) 的煤炭發電量 1976 年以前在美國建造，單位容量在 50 到 300 兆瓦之間 (MWe)，這與為 SMR 提議的尺寸非常匹配 (NEA, 2016)。

SMR 還可以支持其他能源部門的脫碳，例如地區加熱應用，這需要 80 和 200°C 之間的輸出溫度，並且可以很容易遇到 LWR-SMR。例如，在芬蘭，SMR 用於區域供熱最近被提議作為一種可行的選擇，將 SMR 選址更接近需求，並充分使供熱部門脫碳 (Partanen, 2019 年)。同樣，英國能源技術公司研究所 (能源技術研究所, 2015 年) 建議 SMR 在熱電聯產中運行模式可以在 2030 年英國能源系統中發揮重要作用，提供低碳住房供熱，同時提高 SMR 的經濟性。

一些第四代 SMR 提供的更高溫度 (即 450-850°C) 可能會提供新通過生產低碳產品使難以減排的工業部門脫碳的機會，高質量的過程熱。潛在應用包括石油精煉、蒸汽天然氣重整和熱化學制氫。

沙特阿拉伯在過去幾年也一直在報告其對 SMR 的興趣以滿足它的海水淡化需求。2015年3月，韓國原子能研究院 (KAERI) 與阿卜杜拉國王市原子能公司簽署諒解備忘錄 (MOU) 和可再生能源 (KA-CARE) 評估建造兩個 SMART 反應器的潛力在沙特阿拉伯。

補充可變可再生能源 (VRE) 的部署 SMR 具有固有的負載跟踪特性，使其能夠運行在具有可變剩餘負載的電力系統中靈活地使用，例如在追求 VRE (風能、太陽能光伏 [PV]) 的大量滲透。支持 VRE 部署可以也可以從集成“混合”能源系統的角度來考慮，這意味著將 SMR 與非電力應用 (氫、合成燃料和海水淡化) 相結合作為支持風能和太陽能光伏一體化的一種手段 (Garcia 等人, 2016 年; Chen 等人, 2016 年)。這些類型的集成系統可以提高整體可靠性和能源系統的彈性，使其成為具有經濟吸引力的選擇。

Box 1: Recent estimates on the potential market for SMRs

In 2016, the NEA investigated the near-term (2035) market potential for SMRs (NEA, 2016) and developed two scenarios that reflected uncertainty in terms of market development:

An optimistic high-deployment scenario that assumed successful licensing of SMRs and the establishment of the factory production and associated supply chain that would lead to cost competitiveness;

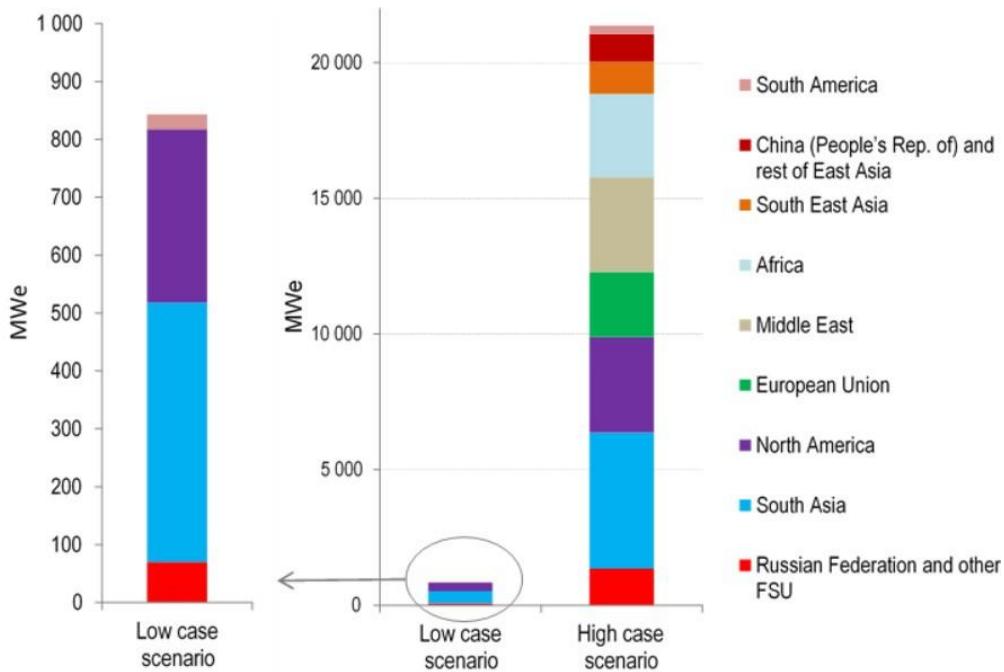
A conservative low-deployment scenario in which SMRs would be considered expensive to build and operate, and thus only a limited number of projects would be completed, including prototypes and plants in remote/isolated areas.

These two scenarios take into account a number of market drivers, such as grid development, expected penetration of intermittent generation, development of new nuclear build in International Energy Agency (IEA) scenarios, and national nuclear policies.

In the high-deployment scenario, up to 21 GWe of SMRs would be deployed by 2035 in several regions of the world, representing about 3% of the total installed nuclear capacity in the world (see Figure 3). Thus, about 9% of the total nuclear new build in 2020-2035 could be SMRs. Conversely, the low-deployment scenario sees a limited deployment of less than 1 GWe, essentially with prototypes in countries with ongoing national SMR programmes.

It could be expected that after 2035 the SMR market will further develop, in line with decarbonisation objectives that will foster the need for low-carbon dispatchable electricity. Understanding the different market opportunities of SMRs is thus important in estimating their long-term market potential.

Figure 3: Estimated SMR capacity by region in 2035



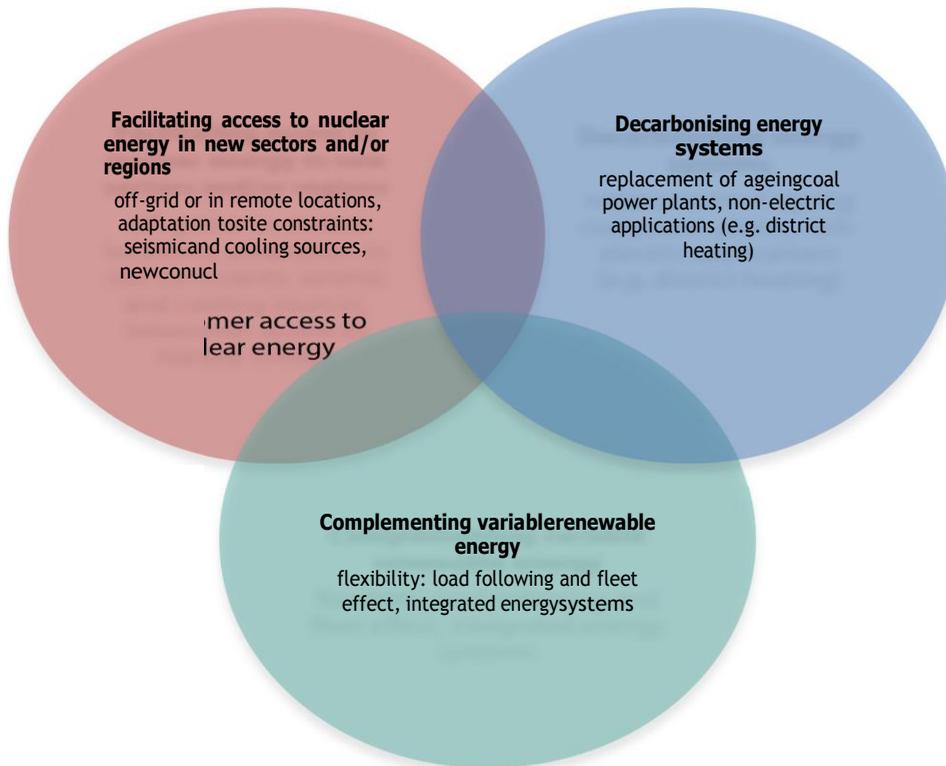
Source: NEA (2016)

Note: This market outlook is in line with estimates from UxC (2013), which also foresee up to 20 GWe of installed capacity globally by 2035. The National Nuclear Laboratory (NNL, 2014) in the United Kingdom anticipates a larger market potential, with up to 65 GWe of installed capacity by 2035.

促進新部門和/或地區獲得核能

如今，大型核電站主要為基荷發電做出貢獻在集中式和互連的電力系統中。然而，核能在經濟、地理和/或與電網有關的限制使建造大型核電站變得更加困難。SMR 能夠部署在未連接到電網的偏遠地區，在電網較小的地區或大型核電站合適地點有限的地區發電廠。在 2018 年加拿大 SMR 路線圖（加拿大政府，2018 年）中，對於例如，確定了一些離網偏遠社區和採礦作業其中 SMR——尤其是 MMR——作為一種手段可能具有成本競爭力取代柴油發電機。SMR 的模組化、靈活性和低電網要求有助於他們的吸引力。然而，這樣的利基市場在國內很少見核計劃發達的國家（加拿大、俄羅斯和美國）是明顯的例外）。

因此，核市場的擴展可以更普遍地包括新來者目前不使用核能的國家。SMR 可以在以下方面帶來具體好處特別是那些已經擁有的國家的負擔能力和上市時間來自核研究相關活動的完善的核基礎設施。

圖 4 : Applicability of SMRs

四. 許可和監管方面

4.1. 安全考慮

3.1 節中描述的小型反應器堆芯的設計特點也導致固有的改善小型模組化反應器 (SMR) 整體安全案例的**安全特性**：

- **被動安全功能的效率**：對被動安全的更高依賴機制減少了對主動系統的需求，潛在簡化了安全評估和減少故障模式。此外，較高的比表面積小反應器堆芯的比例有利於增強衰變熱去除模式，例如通過自然循環導致更長的應對時間。
- **更少和更不嚴重的故障模式**：更高級別設計的組合簡化和集成導致更少的故障模式。例如，較少數量的反應器容器穿透減少了可能的洩漏點，並且因此，該設計更能抵抗冷卻液流失事故 (LOCA)。這將控制棒集成到容器中也抑制了控制棒脫落的風險彈射事故。此外，更高的熱慣性和更低的功率密度整體設計導致溫度瞬變時響應變慢，從而增加安全邊際。
- **減少場外應急規劃區 (EPZ)**：較小的好處庫存與非常高的被動安全特性相結合可能會導致減少屏蔽要求並減少異地應急規劃區 (出口加工區)。隨著多個 SMR 設計趨於成熟，有機會進一步減少出口加工區可能出現。

SMR 功能還使地下選址成為可能，從而提供更多保護來自自然 (例如地震或強風事件，具體取決於位置) 或人為 (例如飛機撞擊) 危險。

以上所有安全特性均適用於輕水反應器 (LWR) 和第四代 (Gen IV) SMR 設計。然而，後者的設計可能會引入額外的安全方面的改進。

4.2. 加強許可制度的機會

當前的許可框架通常依賴於大量的廣泛經驗基礎使用濃縮度低於 5% 的氧化鈾燃料的單體輕水反應器。基於 LWR 正在開發的 SMR 具有相似的運行條件和燃料安排，這預計將促進他們的許可過程。更簡單的設計和工程這些概念所需的預計將減少需要的故障模式的數量需要考慮的因素，以及確定後果的複雜性。但是，那這些新穎設計的有限經驗基礎在展示方面提出了挑戰並批准他們的安全案例。為有效部署 SMR，必須考慮一些監管方面的考慮；例如，引入固有的安全特性和多模組部署配置都會導致特定的監管機構相對較新的故障模式和後果，這些應該被仔細調查。

此外，燃料和/或冷卻劑的變化將轉化為更大的偏差與以前的監管範式不同，可能需要更靈活的許可方法，以及在核安全領域開發大量新專業知識監管機構。同時，設計師要證明這一點仍然是一個挑戰所有可能的故障模式都已得到適當考慮和緩解。

基於績效的監管方法似乎更有利於 SMR 發展，因為它已被證明在考慮新反應器時更靈活設計 (Sainati 等人，2015 年)。加拿大對 SMR 供應商的吸引力可以部分通過採用靈活的監管理念來解釋，並允許設計師提出他們的概念將如何滿足每個性能要求。如果固有的 SMR 概念的安全性被認為是可以合理實現的，設計者應該能夠證明減少出口加工區和/或減少現場認證員工數量會仍能達到安全目標，並會產生高度的公眾信心。

一些 SMR 功能可能在滿足一般安全要求方面面臨挑戰。這對反應器的大部分 (包括用於反應器堆芯) 例如可能對當前的國家和國際核材料運輸框架。監管參與程度製造過程，以及模組的跨國許可問題和個別組件，也是新出現的問題。多模組 SMR 設計可能由於使用共享系統，需要對核安全進行具體考慮，並且到製造和施工從現場轉移到工廠。這些變化與傳統相比，可能會影響初始工廠測試的方式和核電廠地點。這些變化可能會影響 SMR 許可的潛在階段和對許可方法的傳統觀點提出挑戰 (原子能機構，2019)。

國際合作有助於為國家和社會解決這些挑戰

國際監管框架，例如通過建立一個國際論壇協調——針對積極考慮中小型反應器的國家——制定對中小型反應器類別進行許可的具體方法。

4.3. 簡化許可和監管

就水平而言，不同國家/地區的監管制度可能存在顯著差異監管指導的規定。每個國家都確保安全要求是符合國家利益和當前監管實踐，同時保護公眾對監管機構的決定充滿信心。監管還是可以的世界各地的組織就特定設計的許可進行合作。一個好的例如，許多國家已經實現了多國趨同的程度。

通過多國設計評估計劃 (MDEP) 框架對區域進行評估。存在一些實現更高程度協調的機會，特別是在三個級別的監管協調 (NEA, 2020)：

- 法律框架（政府）；
- 許可和監管指南（核監管機構）；
- 規範和實踐標準（行業）。

每個級別都會出現一些挑戰，即使完全協調是不太可能（尤其是在政府層面），通常可以確定特定區域可以實現精簡的地方。為此，國際合作是必要的。

實際上，下一步可能是一群志同道合的感興趣的人，各國考慮與特定 SMR 設計或系列設計。例如，國際原子能機構（IAEA）SMR監管機構論壇得出結論，縱深防禦（DiD）概念對 SMR 有效並應成為中小型反應器設計和安全論證的基礎。此外，現有的 IAEA 安全標準已經涉及 EPZ 和 DiD，並且適用於新反應器設計（包括 SMR）。儘管如此，該小組還得出結論 SMR 的部署可能需要一個靈活的監管框架來解決與擬議設計的新穎方面相關的具體安全挑戰，例如使用被動系統；多模組、多單元或設計擴展條件；和實際消除可能導致大量放射性釋放的情況（原子能機構，2020）。

協調 LWR-SMR 的許可要求和許可流程可以促進這些 SMR 設計在不同國家的部署，而無需顯著適應國家法規。設計更改將由特定站點驅動特徵。在當地市場採購不同的部件將也得到促進，這將反過來促進全球市場和全球的創建供應鏈。因此，協調將在支持經濟方面發揮核心作用系列，對於這項技術的競爭力和商業可行性不可或缺。

五. 法律框架

有許多與小型模組化部署相關的法律問題反應器 (SMR) 技術，儘管這些問題都不是不可逾越的障礙。這些問題更具體地涉及所選 SMR 技術的類型，特別是在微型模組化反應器 (MMR) 的情況，因為 MMR 的性質不同於多模組 SMR 發電廠。因此，只有這些問題的一般概述下面介紹。

5.1. 適用於中小型反應器的主要國際和區域法律

安全

the Convention on Nuclear Safety¹ (CNS) 和 the 2009 Euratom Safety Directive² 作為 2014³ 年修訂適用於 “nuclear installations, 核裝置”。CNS 定義了 “核裝置” 作為 “其管轄下的任何陸基民用核電站” [第 2(i) 條]。在確定 CNS 是否適用於 SMR 時，會出現與術語 “陸基” 和 “核電廠” 的解釋。第一個問題是因此正在討論哪種類型的 SMR 技術。由於上面的定義只是適用於 “陸基” 核電站，浮動 SMR 大概不會涵蓋，但問題仍然在於其他類型的移動 SMR 是否會被覆蓋。雖然有人可能會爭辯說微型 SMR 不會包含在定義中，CNS 下的核電廠，問題仍然是什麼和不符合核電站的條件。

1. 核安全公約 (1994), IAEA Doc. INFCIRC/449, 1963 UNTS 293, 生效 1996 年 10 月 24 日 (中新社)。CNS 是一個有 89 個締約方 (包括 EURATOM) 的激勵公約，除其他外，旨在通過加強國家措施和國際合作，包括適當的、與安全相關的技術合作。

2. 2009 年 6 月 25 日理事會指令 2009/71/Euratom 建立共同體框架核裝置的核安全，歐盟官方公報 (OJ) L 172 (7 月 2 日) 2009 (2009 年安全指令)。2009 年安全指令對歐盟 (EU) 成員具有約束力聲明並旨在維護和不斷改進核安全，並確保歐盟成員國為高水平的核安全做出適當的國家安排保護工人和公眾免受電離輻射引起的危險核設施。許多條款反映了 CNS，但它還要求每十年一次同行評審。

3. 2014 年 7 月 8 日理事會指令 2014/87/Euratom 修訂指令 2009/71/Euratom 建立核裝置核安全共同體框架，OJ L 219 (2014 年 7 月 25 日) (2014 年修訂安全指令)。2009 年安全指令於 2014 年修訂為考慮到福島第一核電站事故的教訓，與國家核監管機構的權力和獨立性相關的附加要求當局、更頻繁的針對特定安全問題的同行評審系統、更高的透明度促進有效的核安全文化。

4. CNS 對核裝置的定義不包括研究堆。原子能機構 (2006)，守則研究堆安全行為準則，國際原子能機構文件。IAEA/CODEC/RR/2006, p. 1. 建立在核電國家。然而，新人可能會面臨挑戰國家建立法律、監管、組織和技術基礎

在 SMR 部署之前根據 CNS 要求。例如，其中一些義務是：建立和維護管理安全的立法和監管框架核裝置 (第 7 條)；建立監管機構並為其提供 “足夠的權力、能力以及財政和人力資源來完成其分配的任務責任” (第 8 條)；並確保充足的財政資源 [第 11(1) 條] 和足夠的合格工作人員 [第 11(2) 條]。

在歐盟內部，同樣的範圍界定問題適用於安全指令，它定義了 “核裝置” 除其他外，作為 “核電廠” [第 3(1)(a) 條]。雖然非陸不排除以核電站為基礎的核電站，問題仍然是什麼中小型反應器的類型將歸入該定義。可以這樣說所有 SMR 都將包含在安全指令中，因為 “核安裝” 包括 “研究反應器設施”，並且可以合理地得出結論，一個 SMR 介於傳統的大型核電站和研究堆之間，因此被包含在這個範圍內。已經就其中一項進行了討論 SMR 的類型，輕水 SMR，在安全指令的範圍內。

5 取決於在其報導中，歐洲國家首次著手核電與 SMR 的計劃仍然需要足夠的時間來確保遵守安全指令。

環境保護與公眾參與

與 CNS 的情況一樣，需要額外的法律程序來處理公約範圍內活動定義的解釋越境環境中的環境影響評估 (埃斯波公約)⁶ 和獲取信息、公眾參與決策和在環境問題上訴諸司法 (奧胡斯公約)，⁷ 兩者在很大程度上關注歐洲國家。此外，在安全的情況下，額外的考慮適用於歐盟環境影響評估 (EIA) 下的歐盟成員國指令⁸ 和各種與奧胡斯公約相關的指令⁹ 和法規。

除其他措施外，《埃斯波公約》要求締約方執行一項環境影響評估 (EIA) 程序，其中包括來自發起方和受影響方¹⁰ 的公眾以及為公約中列出的擬議活動準備環境影響評估 [第 2(2) 條]

5. See Euratom Work Programme 2018, “NFRP-2018-3: Research on the safety of Light Water Small Modular Reactors”, p. 9.
6. Convention on Environmental Impact Assessment in a Transboundary Context (1991), 1989 UNTS 310, entered into force 10 September 1997 (Espoo Convention).
7. Convention on Access to Information, Public Participation in Decision-Making and Access to Justice in Environmental Matters (1998), 2161 UNTS 450, entered into force 30 October 2001 (Aarhus Convention).
8. Directive 2014/52/EU of the European Parliament and of the Council of 16 April 2014 amending Directive 2011/92/EU on the assessment of the effects of certain public and private projects on the environment, Official Journal of the European Union (OJ) L 124 (25 Apr. 2014).
9. Directive 2003/4/EC of the European Parliament and of the Council of 28 January 2003 on public access to environmental information and repealing Council Directive 90/313/EEC, OJ L 41, pp. 26-32 (14 Feb. 2003); Directive 2003/35/EC of the European Parliament and of the Council of 26 May 2003 providing for public participation in respect of the drawing up of certain plans and programmes relating to the environment and amending with regard to public participation and access to justice Council Directives 85/337/EEC and 96/61/EC, OJ L 156, pp. 17-25 (26 June 2003).
10. Article 1(iii) of the Espoo Convention defines “party of origin” as “the Contracting Party or Parties to [the] Convention under whose jurisdiction a proposed activity is envisaged to take place” and “affected party” as “the Contracting Party or Parties to [the] Convention likely to be affected by the transboundary impact of a proposed activity”.

“可能造成重大不利的跨界影響”。原文下《the Espoo Convention, 埃斯波公約》附錄 I 第 2 款，包括在主題列表中活動：“核電站和其他核反應器（研究裝置除外用於生產和轉化可裂變和可增殖材料，其最大功率不超過 1 千瓦的連續熱負荷）。這個定義擴大了略低於《埃斯波公約》第二修正案（但僅適用於那些已批准、核准或接受該修正案）也包括“拆除或此類發電站或反應器的退役”，但要注意“為了為本公約的目的，核電站和其他核反應器不再是這樣的裝置，當所有核燃料和其他放射性污染元素已從安裝站點永久移除。”埃斯波公約定義與 CNS 和安全指令的定義略有不同，因為埃斯波公約定義涵蓋“其他核反應器”。

即使 SMR 包含在《埃斯波公約》附錄 I 中，第二步篩選過程是為了確定它們是否可能造成重大不利影響跨界影響。有人可能會爭辯說，SMR 設計的增強安全特性保證不會產生重大不利的跨界影響，特別是如果距離邊界足夠遠。然而，這種決心將須按個別情況作出。與此問題相關的不確定性可能導致向埃斯波執行委員會提出問題，該委員會審查各方的遵守公約規定的義務，或之前的調查程序埃斯波公約調查委員會 [第 3(7) 條和附錄 IV]。

《The Aarhus Convention, 奧胡斯公約》具有三大支柱：1) 獲取信息；2) 公眾參與在決策中；3) 訴諸司法。每個支柱都提供某些權利並適用於不同的活動。需要注意的是，對“公眾”和“公眾”的解釋《奧胡斯公約》中規定的權利所涉及的“有關”非常廣泛，並且作為第 3 條第 9 款規定，“在本公約有關規定的範圍內，公眾應有權獲得信息，有可能參與決策並在環境問題上不受公民歧視地訴諸司法，國籍或住所，如果是法人，則不受任何歧視它有其註冊席位或其活動的有效中心。”第一支柱，要求根據要求提供環境信息主動收集和傳播環境信息，適用無論所涉及的活動類型如何。對於第二個支柱，與第二個埃斯波公約修正案，附錄 I 列出了“核電站和其他核反應器”，在所包括的活動中有同樣的警告。然而，在這裡沒有關於該活動是否可能造成重大影響的二次篩選不利的跨界影響。是否應涵蓋所有或部分 SMR 技術定義，必須向有關公眾提供有關擬議的信息活動，並被允許提供評論。此外，公開的結果最終決定中必須考慮參與（第 6 條）。應會員的公眾認為他們在第一和第二支柱下的權利受到侵犯，第三支柱將確保訴諸司法，為公眾提供程序行使他們在《奧胡斯公約》下的權利。

5.2. 核第三方責任和 SMR

管轄核第三方責任的國際公約是：

- 關於核能領域第三方責任的巴黎公約（“巴黎公約”或 PC），¹¹ 很快將由尚未進入的 2004 年議定書修正生效（“經修訂的巴黎公約”或 RPC）；¹²
- 維也納核損害民事責任公約（“維也納公約”）或風險投資；¹³
- 經 1997 年議定書修正的維也納公約（“修訂的維也納公約公約”或 RVC）；¹⁴
- 《核損害補充賠償公約》（CSC）。¹⁵

中小型反應器包含在“核裝置”的定義中公約，其中涵蓋“除以任何方式包含的反應器之外的反應器運輸”。¹⁶ 考慮到所涉及的核裝置的性質和源於此的核事件的可能後果，公約（除維也納公約）允許各國為此建立較低的責任數額安裝，但在任何情況下，如此建立的任何數量不得少於公約中為低風險裝置提供的數量。¹⁷ 該選項的目的是

避免給核運營商帶來不合理的保險或財務負擔安全成本。¹⁸ 因此，SMR 可被視為低風險設施，如果安裝國的適用公約和國家法律允許這種情況。

11. Convention on Third Party Liability in the Field of Nuclear Energy of 29 July 1960, as amended by the Additional Protocol of 28 January 1964 and by the Protocol of 16 November 1982 (1960), available at: www.oecd-nea.org/law/paris-convention.html.
12. Protocol to Amend the Convention on Third Party Liability in the Field of Nuclear Energy of 29 July 1960, as amended by the Additional Protocol of 28 January 1964 and by the Protocol of 16 November 1982 (2004) (not yet in force), available at: www.oecd-nea.org/law/paris-convention-protocol.html.
13. Vienna Convention on Civil Liability for Nuclear Damage (1963), IAEA Doc. INFCIRC/500, 1063 UNTS 266.
- 14 Protocol to Amend the 1963 Vienna Convention on Civil Liability for Nuclear Damage (1997), IAEA Doc. INFCIRC/566, 2241 UNTS 302.
- 15 Convention on Supplementary Compensation for Nuclear Damage (1997), IAEA Doc. INFCIRC/567, 36 ILM 1473.
- 16 Extract of the definition of “nuclear installation” under the Paris Convention, which is similar to the one provided under other nuclear third party liability conventions. The Revised Explanatory Texts of the Vienna Convention and the CSC stated in the past that the Vienna Convention relates exclusively to land-based nuclear installations; however, this has been rectified in its 2020 version [IAEA International Law Series No. 3 (Rev. 2)].
- 17 For more information on low-risk installations under the nuclear liability conventions, see paragraph 43 of the Exposé des Motifs of the Paris Convention, paragraphs 68 and 69 of the Exposé des Motifs of the revised Paris Convention [NEA/NLC/DOC(2020)1/FINAL] and pages 43 and 46 of the Explanatory Texts of the revised Vienna Convention and the CSC [IAEA International Law Series No. 3 (Rev. 2)].
- 18 The NEA has made a table publicly available that aims to gather information on the amounts available to compensate potential victims of a nuclear incident in countries and economies having nuclear power plants and/or having ratified at least one of the international conventions on nuclear third party liability. The table is available at: www.oecd-nea.org/law/tableliability-coverage-limits.pdf; www.oecd-nea.org/upload/docs/application/pdf/2020-10_operators_liability_amount_table_general_final_clean_v2_2020-11-10_09-

但是，如果證明核事故造成的損失超過“較低”金額，安裝州必須確保公共資金應最多可提供適用的核能公約中規定的最低數量一般安裝。然而，公約不包括用作船舶動力源的反應器，動力是否用於推進或與該動力相關的任何其他目的船舶的操作。19 大多數專家同時同意這樣的觀點，即公約確實涵蓋了位於錨定或以其他方式固定在特定場所，專門用於發電供外用，如只要這些反應器不是為了推動平台，而是要運行一次船停泊在岸上並固定不動。在這種情況下，船舶將被視為作為反應器所在的浮動平台，而不是作為核船排除在公約的適用範圍之外。

為了避免國家法院的不同解釋，這將是有益的，因為國際責任公約的締約方仍需澄清上述內容理解，以及“運營商”的概念。根據慣例，“運營商”核裝置的代表是“主管公眾指定或認可的人作為該設施的運營商的權威”。重要的是要確保一個共同的了解什麼是“主管公共當局”關於浮動核發電廠。

如果大多數專家都同意，一個漂浮的核電站錨定在岸上並且固定化應被視為國際公約涵蓋的核裝置第三方核責任公約，關於應用的問題仍然存在當浮動核電站移動並可能在不同的海域和公海航行。目前，公約僅提及核物質的運輸，即核燃料（除天然鈾和貧鈾除外）以及放射性產品和廢物。A 有必要對運輸過程中適用的責任制度進行討論；特別是促進此類設施的保險範圍並保護潛在的受害者，以防萬一旅途中發生核事故。

總之，SMR 的商業化和部署需要解決關於國際和與 SMR 設計相關的區域安全和責任公約。雖然這些都不是問題是無法克服的，但仍應在啟動之前解決任何重要的部署計劃。這些問題的解決正成為鑑於在商業部署方面取得的重大進展至關重要新的 SMR 技術。

六、政策方面

6.1. 近期主要國家和國際舉措概述

加拿大

2018年，加拿大決定促進小型模組化反應器（SMR）的發展通過專門的路線圖，以積極參與地方、國家和國際利益攸關方。

該路線圖旨在促進創新並為核能建立長期願景行業，以及評估不同 SMR 設計的特點及其一致性符合加拿大的要求和優先事項。路線圖的目標是構建一個全國性的就該國的需求和優先事項進行對話，從而達成共識SMR 的潛在價值，確定圍繞其使用的一些關鍵問題，以及它們的潛在的風險和挑戰，並確定一些可能影響的政策SMR 的可行性。

此外，2016年加拿大核安全委員會（CNSC）推出了一項新的、可選的預許可框架，以促進對創新 SMR 的參與開發人員，包括那些開發先進反應器概念的人員。這個新牌照框架導致十個 SMR 供應商目前正在參與預許可過程，與一家先進的 SMR 供應商（Global First Power，1 及其 5 兆瓦電力[MWe] 高溫氣冷微型模組反應器 [HTGR MMR] 概念）在加拿大建造、擁有和運營第一個示範裝置的許可程序到 2026 年，國家實驗室（CNL）將位於喬克河。

此外，2019年7月，CNL 啟動了加拿大核研究計劃（CNRI），一項支持與第三方合作的 SMR 研究項目的計劃加拿大的支持者。該項目旨在通過啟用加速 SMR 部署研究和開發，並通過連接 SMR 技術的全球供應商與加拿大國家核實驗室的設施和專業知識。加利福尼亞州 Kairos Power、Moltex Canada、Terrestrial Energy Inc.（在安大略、紐約和英國）以及位於西雅圖和華盛頓的 USNC，在 2019 年 11 月成為首批獲得 CNRI 計劃支持的公司。這些預計公司將以貨幣或實物形式與 CNL 的捐助相匹配。

中華人民共和國

在實施大型核電廠國家計劃的同時，中國正在實現多元化其技術組合包括許多輕水和先進的 SMR 設計發展。LWR-SMR 包括中國廣核（CGN）的 ACP50S（60 MWe）針對海上應用和中國核工業的 ACP100（125 MWe）更專注於內陸應用的公司。其他 LWR-SMR 設計也正在開發，目標是在北部提供區域供熱應用中國。最後，自 2012 年以來，CNNC 一直在監督 HTR-PM 的建設演示器，一個 210 MWe HTGR，具有電力和工業熱應用。

法國

自 2019 年以來，法國政府一直支持一個行業財團開發集成 SMR Nuward 的基本設計。這種 300-400 MWe 雙 SMR 設計是主要用於滿足國際市場需求的部署，同時正在考慮建造示範/首創（FOAK）裝置法國。該計劃還積極促進國際合作，包括與西屋公司合作。最近，作為其經濟復甦計劃的一部分（“Plan de Relance”），法國政府撥款 1 億歐元支持 Nuward 基本設計的開發。

俄羅斯聯邦

首個浮動核電站商業運營後“Akademik Lomonosov”，Rosatom 計劃在波羅的海造船廠建造更多浮動 SMR 聖彼得堡。與此同時，這家國有公司一直在開發下一代 SMR，即 RITM-200 反應器，用於浮動和陸基部署。系列建設可能會在 2030 年開始，第一批機組將安裝在俄羅斯最大的礦場。

美國

2012年起，美國能源部（DOE）SMR授權技術支持（LTS）為NuScale提供支持，政府配套2.17億美元資金。2015年，政府對NuScale的支持增加了1660萬美元，用於合作準備施工和運營許可證申請（COLA）與其第一個潛在客戶：猶他州聯合市政電力系統（UAMPS）。這美國能源部還在促進第一個NuScale示範裝置的建設，該裝置可以位於愛達荷國家實驗室（INL）的聯邦站點。2020年8月，NuScale概念成為第一個獲得美國核能設計批准的SMR設計監管委員會（NRC）。由於公眾對NuScale的持續支持，美國能源部授予14億美元的額外費用分攤獎勵，以支持建設第一個示範工廠。美國國際開發金融公司（DFC）10月16日進一步宣布簽署意向書，幫助NuScale發展為獨立電力生產商（IPP）在南非生產2500MWe的核能。

與此同時，美國能源部正在為創新的 SMR 概念提供支持由私人供應商開發，包括初創公司。2015 年，能源部啟動了加速核能創新門戶 (GAIN) 計劃，旨在促進 SMR 供應商訪問美國國家實驗室的研發基礎設施。這贈款計劃通常取決於私人融資以匹配 DOE 資金。

2019 年，DOE 宣布啟動國家反應器創新中心 (NRIC) 在 INL，一項協助私營部門發展的新舉措通過為技術開發人員提供測試支持來推進核能技術並展示他們的反應器概念並評估其性能。這項倡議是隨後在 2020 年啟動了先進反應器示範計劃 (ARDP)。這項新舉措對 SMR 和大型反應器均開放，旨在支持預計將全面部署的近期先進設計的演示在授予日期後七年內，以及預計將為 2030 年及以後的全面部署做好準備。總預算撥款該計劃為 2.3 億美元。第一批被選中的設計是 Xe-100 和 Sodium，兩者都在 2020 年 10 月獲得了 8000 萬美元。

DOE 還通過 Advanced 支持更先進的 SMR 概念能源研究計劃署 (ARPA-E)。該計劃特別側重於微型模組化反應器 (MMR)。

此外，美國政府正在通過立法改革支持 SMR 框架。例如，2018 年核能創新和現代化法案 (NEIMA) 促進進入國家研發基礎設施並支持美國 NRC 的作用使認證過程適應 SMR 設計的特殊性。此外，美國 NRC 發布了一份關於其審查策略的白皮書草案先進非輕水反應器技術的許可申請 (NRC, 2019)。經過 2019 年年中，六位反應器設計者通知 NRC，他們打算尋求設計批准。其中包括三個熔鹽反應器 (MSR)、一個 HTR、一個鈉冷反應器快堆 (SFR) 和西屋 eVinci 熱管反應器。2019 年 12 月，加拿大核安全委員會 (CNSC) 和美國 NRC 選擇了地面 Energy 的一體化熔鹽反應器 (IMSR) 進行首次聯合技術審查先進的非輕水核反應器。

英國

2015 年，英國啟動了國家支持計劃的第一步 SMR 和先進反應器設計通過公開競爭，邀請供應商提交滿足國家能源需求和工業潛力的提案。一英國政府推動的應用涉及燃料循環問題（即使用其分離的鈾庫存作為一種能源）。2019 年 7 月，英國政府承諾提供 1800 萬英鎊作為工業戰略挑戰基金的一部分，以支持由勞斯萊斯領導的財團提議的英國 SMR 的開發。在其十點英國政府 2020 年 11 月發布的綠色工業革命計劃宣布額外撥款 2.15 億英鎊用於開發這個國內項目 SMR 設計 (S&P Global Platts, 2020)。

英國商業、能源和工業戰略部 (BEIS) 也承諾在先進模組化反應器可行性和開發項目下高達 4400 萬英鎊項目。八個第四代 (Gen IV) 中小型反應器的可行性研究已經完成在第 1 階段。已經為第 2 階段選擇了三個設計，這些設計將接受每個額外的 1000 萬英鎊。還提供了另一個可能的 500 萬英鎊監管機構支持這一舉措。最近的國家基礎設施戰略已經為該計劃的預算額外分配了 1.7 億英鎊 (S&P Global Platts, 2020)。

6.2. 對政策制定和國際合作的見解

前幾節中介紹的全球政策趨勢表明，當前政府對 SMR 部署的支持包括四個關鍵領域：

- 提供促進討論和動員的長期政策支持在政府、私營和社區各級的相關利益攸關方之間。
- 在設計和開發階段促進國內項目（來自基礎到詳細設計）。這些計劃可以包括獲得國家研發支持發展努力的基礎設施和其他機制。
- 審查許可框架以啟用 SMR。
- 為示範和/或 FOAK 單位的建設提供財政支持。

這些舉措可以通過現有或專門的立法框架實施以便將 SMR 開發工作納入國家能源政策框架。除了當前的國家努力之外，SMR 市場的國際性質提供了國際一級協調方法的理由。的發展和 SMR 的初始部署將需要政府和政府之間的共同努力行業。在已決定部署 SMR 的國家中，政府的作用是預計涵蓋這兩個階段，並包括國家層面的政策支持並作為國際層面協調舉措的一部分——特別是在為中小型反應器制定國際許可框架。

最近已經在進行的努力的例子，可以在監管機構注意到和工業水平是：

- 雙邊層面：2019 年 8 月，美國和加拿大監管機構 (NRC 和 CNSC) 宣布合作計劃以加強監管通過先進反應器和小型反應器技術審查工作的有效性模組化反應器技術。2019 年 9 月，法國電力公司 EDF 和總部位於美國的供應商西屋公司宣布正在進行聯合討論 SMR 技術的發展。
- 多邊層面：NEA 繼續探索特定設計的潛力許可協調以及更大程度協調的潛力工業規範和標準。此外，國際原子能機構繼續其 SMR 監管機構論壇它提供了國家和相關利益攸關方之間關於常見的 SMR 監管問題。

七. 大規模設置小型反應器的主要挑戰

中小型反應器的經濟競爭力將在很大程度上取決於是否存在足夠支持平衡不經濟所需的系列經濟的大市場規模。本章概述了需要解決的挑戰，以實現SMR建設。

7.1. 技術選擇問題

目前正在開發的 SMR 設計種類繁多（見表 1 和圖 1）在 NEA 成員國中既有機遇也有挑戰。儘管似乎普遍認為這些技術中只有少數最終會商業化，關於何時、如何以及由誰做出決定的觀點不一，關於哪些技術應該進一步開發或商業化。

一些 NEA 成員國的政策話語似乎表明傾向於至少在早期階段採用多種技術——即同時追求它們開發到示範裝置的設計、建造和運行階段——直到某項技術在競爭一項技術後脫穎而出持續時間。然而，國家基線研發支出似乎與這些目標不一致。有時會產生大量支出針對創造額外的技術選擇，而不是針對產生可能最終促進以市場為基礎的示範工作技術選擇決定。此外，核安全監管機構將沒有評估大量設計的資源；不清楚哪些概念將最終被選中可能會影響所有 SMR 設計的前景。

此類技術選擇決策很重要，因為大規模且真正全球化的需要市場來投資大型工廠製造設施。只要幾個相互競爭的 SMR 設計繼續存在，很可能沒有單一的設計或供應商將能夠佔據很大的市場份額。

7.2. 重新審視和協調許可框架以及其他法律挑戰

協調不同的許可方法可能是一個基本的決定因素SMR 技術的部署。然而，如表 1 所示，進展引入 SMR 技術可能會偏離當前的許可制度。有限的核安全監管組織內新穎設計的經驗基礎構成了在審查和批准安全案例方面面臨重大挑戰。

此外，從法律角度來看，確定當前許可的充分性支持 SMR 部署的框架將取決於這些框架是否足夠靈活以適應 SMR，而無需對其進行重大修改設計。具有技術中立許可框架、基於性能的國家監管系統和廣泛使用的分級方法可能會發現這樣的系統更容易適應中小型反應器的國家比具有特定技術許可框架或主要的挑戰到使能夠大規模部署的中小型反應器正如 NEA 核創新 2050 (NI2050) 顧問小組強調的那樣倡議，考慮到早期階段的“可許可性”和經濟層面創新過程增加了達到更高技術準備水平的機會(TRL) 更快、更具成本效益。這樣的 TRL 也可以通過各種國際層面的合作形式。然而，在高 TRL 上的合作是困難，因為可能會出現潛在的知識產權 (IP) 問題。調焦在技術資格方面的合作努力可能會遇到更少的障礙，特別是對於高 TRL。它還可以導致更高程度的協調和增加成功商業部署的機會 (NEA, 2018)。

根據 NI2050 倡議的結論，SMR 可被視為早期開發國際合作方法的機會協調許可框架以及規範和標準。這些話題有已經在大型反應器和經驗的背景下進行了廣泛討論獲得的成果可以應用於 SMR。在工業規範和標準層面協調，例如世界核協會 (WNA) 在反應器方面的合作設計評估和許可 (CORDEL) 工作組取得了重大進展，受到航空工業的啟發。

在國際監管層面，多國設計評估計劃 (MDEP) 表明，可以在不同的設計許可方面進行合作監管制度，同時確保監管主權在足夠的水平全國水平。有可能在 MDEP 的成功基礎上進一步發展走向多國許可方式。一個例子是專用的適用於不同站點的 SMR 模組的許可，這些模組在不同的地方獲得批准互惠協議下的國家。這種方法將有助於獲取收益標準化，無論是從批量生產中邊做邊學還是在減少與許可相關的固定（非經常性）成本的條款。

7.3. SMR FOAK演示器的潛在優勢

即使有適當的條件來保證只有最好的技術才能達到在開發管道的最後階段，一些技術不確定性可能仍然存在。作為一個由於其創新性質，SMR可能會引入額外的技術風險當前的的大型LWR設計不一定存在。例如，基於LWR的SMR結合非傳統組件，例如螺旋盤管蒸汽發生器，內部控制棒驅動機構（CRDM）或新的船內儀器，其中有限積累了操作經驗。第四代SMR將包括具有的功能以前從未測試過。試點設施可以幫助展示這些功能並幫助向市場開放新技術，與歷史經驗一致。

建造一個示範站也將有助於吸引更多資金來擴大製造規模能力。從投資者的角度來看，在提供性能證明之前建造模組製造設施這些模組似乎不太可能。根據芝加哥能源政策研究所（Rosner, Goldberg, 2011年），示範裝置是戰略性SMR商業計劃的一部分走向商業化，這些示範單位將先於發展SMR模組製造廠。

對於FOAK SMR，因此很難確保採購、製造和交付系統針對按時和按預算生產進行了優化。儘管如此，首先示範單位應為供應鏈優化提供依據，在某種程度上產生模組化的預期好處。例如，一個FOAK SMR可能比最近建造的大型LWR結構經歷更少的延遲。

最後，重要的是要藉鑑從最近的核新建項目中汲取的經驗教訓。未來的SMR項目應該在施工開始前進行完整的詳細設計，因為以及與監管機構和供應鏈的早期接觸。也會很重要使用協作合同實踐以協調利益相關者的利益（NEA, 2020）。

7.4. 供應鏈和燃料循環問題

與大型LWR的情況一樣，供應鏈仍將是SMR的核心組成部分競爭力。1980年代NEA國家核建設中斷1990年代導致核工業能力受到侵蝕。即使最近新建設項目在一定程度上幫助重建了全球供應鏈，進一步努力是需要的。因此，關鍵組成部分的戰略夥伴關係對於分享與第一個SMR項目相關的風險並加速其部署。

幾個模組交付後，SMR供應鏈可能會向更多方向發展整合（即更少的供應商）以利用規模經濟，類似於飛機行業。然而，這些預測將以進化為條件推動競爭的市場前景和協調趨勢。未來供應連鎖店管理戰略還可以通過更高的整合度來提高效率。

加強規範和標準協調的合作可能會增加本地化機會，以及供應商庫，並導致更具競爭力供應鏈，從而降低成本。商業現貨（COTS）的引入SMR設計的解決方案可以在供應鏈中帶來類似的好處。

SMR可能還需要對燃料循環進行調整或進行新的開發。例如，一些SMR供應商提議在中使用高含量低濃鈾（HALEU）他們的設計。HALEU的濃縮水平在5%到19%之間。使用HALEU的影響在全球核燃料供應鏈和整個燃料循環中可能需要進一步評估。同樣，對於追求封閉核燃料循環的國家而言，使用混合燃料的能力氧化物（MOX）燃料也可能是某些SMR設計的重要屬性。

研發領域的合作也必不可少。通過與研究機構和大學，SMR供應鏈將確保可用性熟練的勞動力和研發基礎設施。這種合作也將有助於加速部署有前途的新技術，例如先進和添加劑製造和其他數字應用程序。

最後，討論了與SMR部署相關的監管考慮以上將受益於密集的國際合作和共識。也是一些NEA成員國迄今在該領域獲得的經驗很重要共享，以加速SMR商業化。

7.5. 公眾認知和參與

從歷史上看，對核電的反對源於可能造成的損害由核事故引起，儘管此類事故發生的可能性很低。一些對公眾風險認知的最早研究發現，公眾可能會認為非自願活動的風險明顯高於自願活動。更多近期研究描述這種現象，其中個人強調後果而不是概率作為概率忽略（Sunstein, 2001）。這些研究提出了兩種可能的替代方案對公眾風險認知的回應。

- 就冒險活動可能帶來的好處對公眾進行教育；
- 回應公眾的恐懼並降低活動或技術的風險（斯塔爾，1969年）。

SMR設計者提出的固有安全特性可被視為採用這種方法的機會——設計一種技

基於 SMR 的工廠的**成功選址**將需要密切關注接待社區。為當地和區域創造就業機會創造機會，以便 SMR 對當地社區具有吸引力，因為大型反應器也將至關重要。

總體而言，SMR 可能會面臨一系列不同的挑戰與傳統的大型輕水反應器相比，公眾參與度更高。結果，這很關鍵考慮部署 SMR 的國家決定公眾參與的方式中小型反應器的努力可能需要不同於大型反應器的努力。這些努力及早啟動，它們可以作為雙向的機會以這樣一種方式進行對話，即未來中小型反應器的物質和體制基礎設施是與公眾合作開發。

八、結論和建議：政府的作用 SMR 部署的支持和國際合作

小型模組化反應器 (SMR) 正在取得商業上可行的進展到 2030 年代初期的核產品。他們的技術經濟特徵——其中一些已經在其他行業得到證明——不僅可以幫助克服交付挑戰在最近的大型核項目中遇到，但也擴大了價值主張核技術，以提供靈活、可調度的低碳電力和多個行業的熱度。

在評估 SMR 的經濟原理時，市場問題仍然存在中央。一方面，如果 SMR 以大規模生產的方式製造，類似的對於商用飛機來說，經濟效益可能是巨大的。這需要，然而，單一設計的市場相對較大，這強調了需要面向全球市場，同時表明只有眾多市場中的一小部分正在開發的設計最終將能夠建立這樣一個全球市場。

實現全球市場無論如何都需要更高水平的監管協調和市場整合。另一方面，大多數 SMR 設計尚未達到成熟的高級階段他們的屬性仍然需要測試和證明。輕水 (LW) SMR 更接近商業可行性高於第四代 (Gen IV) 系統，為此需要額外研究和發展努力是必要的。

因此存在一定程度的不確定性，這直接影響風險認知，從而有助於限制潛在規模市場。隨著 SMR 逐漸成熟，首批演示者預計將在 2020 年代後期投入使用，其中一些風險應該會隨著時間的推移而減弱，因此增加潛在客戶的興趣。這種增加的興趣反過來會支持建立穩健的供應鍊和可持續的建築專業知識，將導致更具競爭力的資本成本。

因此，潛在的 SMR 市場不僅限於經濟考慮，而且將需要政府、監管機構、供應商、供應商和未來之間的共同努力。業主同時應對第 7 章中概述的不同挑戰。更多具體而言，那些支持 SMR 選項的國家可能會看到設置路徑的價值前瞻性的重點是政府支持和支持的四個主要行動領域國際合作將發揮關鍵作用：

- **公眾參與**：未來的項目可以受益於國際合作，交流有關經驗教訓、困難和最佳做法的信息由早期採用者通過與當地社區的公眾參與確定。
- **建設 SMR 首創 (FOAK) 示範單位和學習**：政府可以多種形式支持 FOAK 示範項目，包括從具體的長期購電協議到成本分攤機制可以最大限度地降低建設風險，從而吸引更多的投資者。配套監管機構為制定必要的許可制度和能力所做的努力是也是必不可少的。與此同時，應繼續努力將研究轉化為通過主辦第一批實驗單位並為必要的資金提供資金進行有效部署研究基礎設施。
- **許可制度的統一**：可以在統一方面取得進展通過利用大型反應器以及其他領域的現有合作框架高度監管的行業。雖然完全協調可能是不現實的（並且在某些方面，不可取），應在有意義的領域繼續努力可以實現共同的監管立場。NEA 探索多邊許可協調、雙邊合作和聯合安全評估，例如正如在 MDEP 下進行的那樣，應予以考慮。重大機遇許可前級別的協調也存在，這可能會促進下調選擇 SMR 設計過程
- **發展製造能力**：通過致力於國家核能多個 SMR 單元的計劃，政府可以擴大製造規模能力。已經從事大型核項目的國家可以採取利用現有能力和交付流程中的協

同作用。鑰匙還可以探討各國之間的伙伴關係和工業合作從而分擔潛在的風險。需要預見燃料循環問題，以便適當支撐市場前景。最後，應努力協調可帶來額外市場利益的規範和標準。

10. References

11.

1. Chen, J., et al. (2016). “Operations optimization of nuclear hybrid energy systems”, *Nuclear Technology*, No. 195(2), pp. 143-156.
2. Euratom Supply Agency (2019), *Securing the European Supply of 19.75% enriched Uranium Fuel – A Revised Assessment*, European Commission, Brussels, https://ec.europa.eu/euratom/docs/ESA_HALEU_report_2019.pdf.
4. Energy Technologies Institute (2015), *The Role for Nuclear within a Low Carbon Energy System*, ETI, Loughborough, <https://d2umxnkyjne36n.cloudfront.net/insightReports/Nuclear-Insights-%E2%80%93Midres-AW.pdf?mtime=20160908152349>.
5. ETI (2018), *The ETI Nuclear Cost Drivers Project: Summary Report*, ETI, Loughborough, https://d2umxnkyjne36n.cloudfront.net/documents/D7.3-ETI-Nuclear-Cost-Drivers-Summary-Report_April-20.pdf?mtime=20180426151016.
6. Financial Times (2020), *Downing St Considers £2bn Support for Mini Nuclear Reactor*, FT, London, www.ft.com/content/d7016b80-e0c4-4444-a059-2daf32b9a4ab.
7. Garcia, H.E., et al. (2016), “Dynamic performance analysis of two regional nuclear hybrid energy systems”, *Energy*, Vol. 107, pp. 234-258.
8. Government of Canada (2018), *Canadian Small Modular Reactor: SMR Roadmap*, Canadian Nuclear Association, Ottawa, <https://smrroadmap.ca>.
9. IAEA (2020), *Advances in Small Modular Reactor Technology Developments, A supplement to: IAEA Advances Reactors Information System (ARIS)*, 2020 Edition, IAEA, Vienna https://aris.iaea.org/Publications/SMR_Book_2020.pdf.
10. IAEA (2019), *Interim Report on Multi-unit/Multi-module Aspects Specific to SMRs*, IAEA, Vienna, www.iaea.org/sites/default/files/19/12/smr_rf_dsa_interim_report.pdf.
11. IAEA (2018), *Advances in Small Modular Reactor Technology Developments, A supplement to: IAEA Advances Reactors Information System (ARIS)*, 2018 Edition, IAEA, Vienna, https://aris.iaea.org/Publications/SMR-Book_2018.pdf.
12. IEA (2020), *Tracking Clean Energy Progress: Nuclear Power*, OECD Publishing, Paris, www.iea.org/reports/nuclear-power.
13. IEA (2019), *Nuclear Power in a Clean Energy System*, OECD Publishing, Paris, <https://webstore.iea.org/nuclear-power-in-a-clean-energy-system>.
14. Ingersoll, D.T. (2009), “Deliberately small reactors and the second nuclear era”, *Progress in Nuclear Energy*, Vol. 51, Issues 4-5, pp. 589-603.
15. Ingersoll, D.T., et al. (2015), “Can Nuclear Power and Renewables be Friends?”, *Proceedings of ICAPP 2015*, Nice.
16. IPCC (2018), *Special Report: Global Warming of 1.5°C*, October 2018, IPCC, Geneva, www.ipcc.ch/sr15.
17. Lloyd, C.A. (2019), “Modular Manufacture and Construction of Small Nuclear Power Generation Systems,” PhD thesis, University of Cambridge, Cambridge.
18. Lovering, J.R., A. Yip and T. Nordhaus (2016), “Historical construction costs of global nuclear power reactors”, *Energy Policy*, No. 91, pp. 371-382.
19. NEA (2020), *Unlocking Reductions in the Construction Costs of Nuclear: A Practical Guide for Stakeholders*, OECD Publishing, Paris, www.oecd-nea.org/jcms/pl_30653.
20. NEA (2019a), *Nuclear Law Bulletin No. 103*, Volume 2019/2, OECD Publishing, Paris www.oecd-nea.org/jcms/pl_24785/nuclear-law-bulletin-no-103-volume-2019/2.
21. NEA (2019b), *The Cost of Decarbonisation: System Costs with High Shares of Nuclear and Renewables*, OECD Publishing, Paris, www.oecd-nea.org/ndd/pubs/2019/7299-systemcosts.

pdf.

- 22.NEA (2018), *Nuclear Innovation 2050: An NEA initiative to accelerate R&D and market deployment of innovative nuclear fission technologies to contribute to a sustainable energy future*, OECD Publishing, Paris, www.oecd-nea.org/ndd/ni2050/ni2050_%20brochure.pdf.
- 23.NEA (2016), *Small Modular Reactors: Nuclear Energy Market Potential for Near-term Deployment*, OECD Publishing, Paris, www.oecd-nea.org/ndd/pubs/2016/7213-smrs.pdf.
- 24.NEA (2012), *Nuclear Energy and Renewables – System Effects in Low-carbon Electricity Systems*, OECD Publishing, Paris, www.oecd-nea.org/ndd/pubs/2012/7056-system-effects.
- 25.NEA (2011), *Current Status, Technical Feasibility and Economics of Small Nuclear Reactors*, OECD Publishing, Paris, www.oecd-nea.org/ndd/reports/2011/current-status-small-reactors.pdf.
- NNL (2014), *Small Modular Reactors (SMR) – Feasibility Study*, NNL report, <https://namrc.co.uk/wp-content/uploads/2015/01/smr-feasibility-study-december-2014.pdf>.
- Partanen, R. (2019), *Nuclear District Heating in Finland: The Demand, Supply and Emissions Reduction Potential of Heating Finland with Small Nuclear Reactors*, ThinkAtom, <https://thinkatomnet.files.wordpress.com/2020/03/rauli-partanen-think-atomnuclear-district-heating-in-finland.pdf>
- 26.Rosatom (2020), *World’s only floating nuclear power plant enters full commercial exploitation*, Rosatom, Moscow, <https://rosatom-europe.com/press-centre/news/rosatom-world-only-floating-nuclear-power-plant-enters-full-commercial-exploitation>.
- Rosatom (2019), *Rosatom’s First-of-a-Kind Floating Power Unit Connects to Isolated Electricity Grid in Pevek, Russia’s Far East*, Rosatom, Moscow, www.rusatom-overseas.com/media/news/rosatom-s-first-of-a-kind-floating-power-unit-connects-to-isolated-electricity-grid-in-anadyr-russia.html
- 27.Sainati, T., G. Locatelli and N. Brookes (2015), “Small Modular Reactors: Licensing constraints and the way forward”, *Energy*, Vol. 82, pp. 1092-1095.
- 28.S&P Global Platts (2020), “UK funding for nuclear plant construction focused on smaller units”, *Nucleonics Week*, Vol. 61, No. 48.
- 29.Starr, C. (1969), “Social Benefit versus Technological Risk”, *Science*, Vol. 165, Issue 3899, pp. 1232-1238.
- 30.Sunstein, C.R. (2001). “Probability Neglect: Emotions, Worst Cases, and Law”, The Law School, The University of Chicago, Chicago, https://chicagounbound.uchicago.edu/cgi/viewcontent.cgi?referer=https://www.google.co.uk/&httpsredir=1&article=1384&context=law_and_economics.
- 31.Rosner, R., and S. Goldberg (2011), “Small Modular Reactors – Key to Future Nuclear Power Generation in the U.S.”, Energy Policy Institute at Chicago, University of Chicago, Chicago, www.energy.gov/sites/prod/files/2015/12/f27/ECON-SMRKeytoNuclearPowerDec2011.pdf.
- 32.NRC (2019), “*Non-Light Water Review Strategy*, Staff White paper”, NRC, Rockville, www.nrc.gov/docs/ML1927/ML19275F299.pdf.

•