

# 小型模組化核反應器(SMR)在國際和中國大陸的發展

陳勝朗

核能科技協進會

## 一. 小型模組反應器(SMR) 的定義

小型核反應器的發展按照國際原子能總署(IAEA)的定義, 小型反應器功率為 300MW 以下, 中型反應器為 300~600MW, 目前統稱為“小型和中型反應器”, 簡稱“中小型反應器”。中小型反應器有時被簡稱為小型模組反應器(Small Modular Reactors, SMR)。中小型反應器類型有: 輕水反應器、高溫氣冷反應器、液態金屬反應器和熔鹽反應器, 而輕水反應器是小型反應器的主要反應器型。目前, 由於大型反應器的安全問題考量, 許多國家也積極在開發各種新型 SMR, 全球掀起了研究開發 SMR 的熱潮。

### 小型模組化反應器(SMR)

是先進的核反應爐, 其功率容量高達每台 300 兆瓦(電), 約為傳統核動力反應器發電容量的三分之一。許多小型模組化反應器裝置可以在工廠組裝並運輸到安裝地點, SMR 被設想用於工業應用或電網容量有限的偏遠地區等市場。可以產生大量低碳電力的 SMR 是:

小型——物理上只是常規核動力反應器大小的一小規模。

模組化——使系統和設備組件可在工廠組裝並作為一個單元運輸到安裝地點。

反應器——利用核裂變產生熱量來產生能量。

## 二. SMR 的發展優勢

今天, 部分原因是: 1. 大型動力反應器經由蒸汽循環發電的資本成本很高, 是需要為大約 4 GWe 以下的小型電網提供服務, 2. 正在開發更小的機組, 因此可以獨立建造, 也可以作為更大綜合體中的模塊建造, 並根據需要逐步增加容量, 可以設想其規模經濟。還有一些舉措為偏遠地區開發獨立的小型單元。蓋小型規模被認為比大型規模更易於管理的投資, 大型規模的成本通常與相關公用事業的資本化相媲美。

對 SMR 感興趣的另一個原因是, 它們可以更容易地以代替除役的燃煤電廠, 這些電廠的機組很少超過 90% 的功率低於 500 兆瓦, 有些甚至低於 50 兆瓦。在美國, 2010-12 年除役的燃煤機組平均為 97 兆瓦, 預計將在 2015-25 年除役的平均為 145 兆瓦。

SMR 的許多優點與其設計的性質(小型和模組化)有著內在的關聯。鑒於其佔用地面積較小, SMR 可以安裝在不適合大型核電廠的位置。SMR 的小型機組設備組件可以預先製造, 然後再運送到現場安裝, 這使得它們比大型動力反應器更便宜單純, 大型動力反應器通常是為特定地點定製設計的, 有時會導致施工延誤。SMR 可節省成本和建設時間, 並且可以逐步部署以滿足不斷增長的能源需求。

加快獲取能源的挑戰之一是基礎設施——農村地區有限的電網覆蓋以及農村電氣化的電網連接成本。在缺乏足夠的輸電線路和電網容量的地區, SMR 可以安裝到現有電網或遠端離網的地方, 作為其較小的電力輸出的功能, 為工業和人口提供低碳電力。這與微小反應器特別相關, 微小反應器是 SMR 的一個子集, 旨在產生通常高達 10 MW(e) 的電力。與其他 SMR 相比, 微小反應器的佔地面積更小, 將更適合無法獲得清潔、可靠和負擔得起的能源的地區。

SMR 核電站在效率、經濟性和靈活性方面具有獨特的屬性。雖然核反應器提供可調度的能源——它們可以根據電力需求調整輸出, 但一些可再生能源, 如風能和太陽能, 是取決於天氣和時間的不穩定性能源。SMR 可以與混合能源系統中的可再生能源配對並提高其效率。這些特點使 SMR 在清潔能源轉型中發揮關鍵作用, 同時也幫助各國實現可持續發展目標。

為實現普遍獲得能源的目標, 有關國家所做的努力已取得明顯進展; 然而,

差距仍然普遍存在，主要集中在偏遠和農村地區。隨著全球努力尋求實施清潔和創新的解決方案，可再生能源的增加使用以及 SMR 的引入有可能填補這些空白。

與現有傳統反應器相比，SMR 設計通常更簡單，並且 SMR 的安全特性通常更多地依賴於無電源系統和反應器的固有安全特性，例如低功率和低運行壓力。這意味著在這種情況下，不需要人為干預或外部力量來關閉系統，因為被動系統依賴於物理現象，例如自然循環、對流、重力和自我加壓。在某些情況下，這些增加的安全裕度消除或顯著降低了在發生事故時不安全因素向環境和公眾釋放放射性的可能性。

SMR 降低了燃料需求。與傳統發電廠 1 到 2 年換料週期相比，基於 SMR 的發電廠可需要較少的換料頻率，即約為每 3 到 7 年一次。一些 SMR 設計可在不添換加料的情況下運行長達 30 年。

### 三. 國際上 SMR 的發展現狀

世界上的公私機構都在積極參與努力，使 SMR 技術在這十年內取得成果。俄羅斯的 Akademik Lomonosov 是世界上第一座浮式核電站，於 2020 年 5 月開始商業運營，正在從兩台 35 MW(e) 的 SMR 生產能源。其他 SMR 正在阿根廷、加拿大、中國、俄羅斯、韓國和美國建造或處於許可階段。分別介紹如下：

1. **美國**在 2012 年 3 月，能源部(DOE)與有興趣在南卡羅來納州薩凡納河場址建造示范小型反應器的**三家公司**簽署了協議。這三家公司和反應器是：**Hyperion**（現為 Gen 4 Energy）擁有 25 MWe 快堆，**Holtec** 擁有 160 MWe PWR，以及 **NuScale** 擁有 45 MWe PWR（後來增加到 60 MWe，然後增加到 77 MWe）。這些協議涉及提供土地，但不涉及資金。美國能源部並與另外四個小型反應器開發商討論類似的安排，目標是在 10-15 年內擁有一套小型反應器，為美國能源部綜合體提供電力。（在 1953-1991 年間，薩凡納河是許多用於製造和運行武器鈾和鈾的生產反應器的地方。）

2013 年 12 月，美國能源部宣布將以 50-50 的成本分攤方式向 NuScale 提供進一步的撥款，在五年內高達 2.17 億美元，以支持其最初 45 MWe 小型反應器的設計開發和 NRC 認證和許可設計，隨後增加到 60 MWe，然後增加到 77 MWe。2013 年年中，NuScale 啟動了西部核計劃 (WIN)——一項廣泛的、多西部州的合作——研究美國西部多模塊 NuScale SMR 工廠的示範和部署。WIN 包括位於華盛頓的西北能源公司 (ENW) 和猶他州聯合市政電力系統 (UAMPS)。它現在被稱為無碳電力項目。作為 Project WIN 的一部分而建造的 **NuScale SMR 演示**預計將於 **2024 年**在美國能源部的**愛達荷國家實驗室 (INL)** 投入使用，UAMPS 為所有者，ENW 為運營商。隨後是 UAMPS 擁有的、由 Energy Northwest 運營的全尺寸（最初為 12 個但現在為 6 個模塊）工廠，成本為 5000 美元/千瓦，因此約為 30 億美元，預計成本從 2030 年開始，電力成本 (LCOE) 為 58 美元/兆瓦時。

**美國 Holtec International** 表示，它已“顯著增加”其清潔能源研發預算，現在的目標是最早在 **2029 年**將**第一台 SMR-160** 投入使用，比之前的計劃提前一年。它計劃將 SMR-160 與被稱為綠色鍋爐的清潔能源存儲和發電系統配對。

這家美國公司表示，它對美國政府的“支持姿態”感到鼓舞，包括最近通過的《降低通脹法案》，該法案稱該法案將“推動美國核能的崛起”。它設想將其 SMR-160 先進反應器與其清潔能源儲存和發電 (CESG) 技術相結合，成為“分佈式清潔能源生態系統”的核心。

Holtec 最近提交了一份 74 億美元的聯邦貸款申請，以使其能夠提高其現有製造設施的 SMR 生產能力，在美國建造和運營四台 SMR-160，並建造一個新的 Holtec 重工 (HHI) 用於 SMR-160 組件和模塊的更高容量製造的複合體。它仍在評估 HHI 的位置，但表示擬議中的大型工廠可能靠近其第一台美國 SMR-160 的所在地。

Holtec 說，許多候選地點正在考慮用於第一台 SMR-160。其中包括前 Oyster Creek 核電站場址，該場址的特定工廠佈局和環境監測工作已經在進行中，以支持申請施工許可證。在 Exelon 去年關閉了單機組沸水反應堆裝置後，Holtec 於 2019 年接管了新澤西工廠的除役。

Holtec 表示，該公司擁有的其他核除役場地以及“核、煤和綠地場地”也在考慮之中。

SMR-160 是一種加壓輕水反應器，使用市售的低濃縮鈾燃料發電 160 MWe (525 MWt)，具有為工業應用和製氫產生工藝熱的靈活性。Holtec 於 2021 年與韓國現代公司就 SMR-160 在全球的設備供應達成協議。該公司設想將 SMR-160 電廠與其 Green Boiler CESG 系統配對，以存儲電廠本身和總電網的剩餘能量，然後可用於發電不足時期。CESG 系統的一種變體稱為 HI-HEAT 已被設計用於提供區域供熱系統。

2. 美國、**日本**與**加納**合作部署 SMR。美國、日本和加納宣布了一項戰略合作，以支持在這個西非國家部署小型模塊化反應堆。通過這種夥伴關係，加納可以成為一個先進的核技術中心。

3. Holtec 在**捷克**共和國的團隊不斷壯大 Škoda Praha 已同意進行成本估算，併計劃與 Holtec 的合作夥伴現代工程和建築公司在捷克共和國建造 Holtec SMR-160 裝置。

4. 美國 Holtec International 和**韓國**現代工程建設公司已同意加快該計劃，以完成 SMR-160 先進小型模塊化反應器剩餘系統和結構的工廠設計平衡。

5. **英國** Urenco 呼籲歐洲開發基於石墨慢化 HTR 概念的非常小型 (4 MWe) 的“即插即用”固有安全反應器。它正在尋求政府對原型“U-Battery”的支持，該原型將在需要加油或維修之前運行 5-10 年。比利比諾熱電聯產廠的四個小型機組已經在西伯利亞的偏遠角落運行。這四個 62 MWt (熱) 裝置是一種不尋常的石墨慢化沸水設計，水/蒸汽通道通過慢化劑。它們產生用於區域供暖的蒸汽和 11 MWe (淨) 電力，遠離任何電網。它們是世界上最小的商業動力反應器，自 1976 年以來一直表現良好，在北極地區惡劣的氣候條件下比化石燃料替代品便宜得多，但將於 2023 年除役。

勞斯萊斯 SMR 的**英國**工廠候選名單中增加了兩個站點。勞斯萊斯 SMR 正在對目前正在運行的八個地點進行實地考察，以主辦其第一家小型模塊化反應器工廠。

6. **加拿大**基礎設施銀行宣布向安大略發電公司的達靈頓新核項目承諾投資 9.7 億加元 (7.13 億美元)，這是該銀行迄今為止對清潔能源的最大投資。OPG 申請達靈頓 SMR 安大略發電公司的建設許可證已提交申請 獲得在達靈頓工地建造小型模塊化反應器的許可證，併計劃在那裡建造加拿大第一座商業電網規模的 SMR。

世界已在各地開發的 70 多種商業 SMR 設計和建造，在國際原子能總署的新手冊《SMR 技術發展進展》中進行了描述。詳細情形示如下列各表。針對不同的輸出和不同的應用，例如電力、混合能源系統、供暖、海水淡化和工業應用的蒸汽。儘管 SMR 機組前期資本成本較低，但一旦部署，其經濟競爭力仍有待實踐證明。

表一. 運轉中的小型反應器 (迄 2022 年 5 月)

Name	Capacity	Type	Developer
CNP-300	300 MWe	PWR	SNERDI/CNNC, Pakistan & China
PHWR-220	220 MWe	PHWR	NPCIL, India
EGP-6	11 MWe	LWGR	at Bilibino, Siberia (cogen)
KLT-40S	35 MWe	PWR	OKBM, Russia
RITM-200	50 MWe	Integral PWR, civil marine	OKBM, Russia

表二. 建設中小型反應器

Name	Capacity	Type	Developer
CAREM25	27 MWe	Integral PWR	CNEA & INVAP, Argentina
HTR-PM	210 MWe	Twin HTR	INET, CNEC & Huaneng, China
ACP100/Linglong One	125 MWe	Integral PWR	CNNC, China
BREST	300 MWe	Lead FNR	RDIPE, Russia

表三. 近期開發設計部署的小型反應器

Name	Capacity	Type	Developer
VBER-300	300 MWe	PWR	OKBM, Russia
NuScale Power Module	77 MWe	Integral PWR	NuScale Power + Fluor, USA
SMR-160	160 MWe	PWR	Holtec, USA + SNC-Lavalin, Canada
SMART	100 MWe	Integral PWR	KAERI, South Korea
BWRX-300	300 MWe	BWR	GE Hitachi, USA
PRISM	311 MWe	Sodium FNR	GE Hitachi, USA
Natrium	345 MWe	Sodium FNR	TerraPower + GE Hitachi, USA
ARC-100	100 MWe	Sodium FNR	ARC with GE Hitachi, USA
Integral MSR	192 MWe	MSR	Terrestrial Energy, Canada
Seaborg CMSR	100 MWe	MSR	Seaborg, Denmark
Hermes prototype	35 MWt	MSR-Triso	Kairos, USA
RITM-200M	50 MWe	Integral PWR	OKBM, Russia
RITM-200N	55 MWe	Integral PWR	OKBM, Russia
BANDI-60S	60 MWe	PWR	Kepeco, South Korea
Xe-100	80 MWe	HTR	X-energy, USA
ACPR50S	60 MWe	PWR	CGN, China
Moltex SSR-W	300 MWe	MSR	Moltex, UK

表四. 擱置設計的小型反應器

Name	Capacity	Type	Developer
EM2	240 MWe	HTR, FNR	General Atomics (USA)
FMR	50 MWe	HTR, FNR	General Atomics + Framatome
VK-300	300 MWe	BWR	NIKIET, Russia
AHWR-300 LEU	300 MWe	PHWR	BARC, India
CAP200 LandStar-V	220 MWe	PWR	SNERDI/SPIC, China
SNP350	350 MWe	PWR	SNERDI, China
ACPR100	140 MWe	Integral PWR	CGN, China

Name	Capacity	Type	Developer
IMR	350 MWe	Integral PWR	Mitsubishi Heavy Ind, Japan*
Westinghouse SMR	225 MWe	Integral PWR	Westinghouse, USA*
mPower	195 MWe	Integral PWR	BWXT, USA*
UK SMR	470 MWe	PWR	Rolls-Royce SMR, UK
PBMR	165 MWe	HTR	PBMR, South Africa*
HTMR-100	35 MWe	HTR	HTMR Ltd, South Africa
MCFR	large?	MSR/FNR	Southern Co, TerraPower, USA
SVBR-100	100 MWe	Lead-Bi FNR	AKME-Engineering, Russia*
Westinghouse LFR	300 MWe	Lead FNR	Westinghouse, USA
TMSR-SF	100 MWt	MSR	SINAP, China
PB-FHR	100 MWe	MSR	UC Berkeley, USA
Moltex SSR-U	150 MWe	MSR/FNR	Moltex, UK
Thorcon TMSR	250 MWe	MSR	Martingale, USA
Leadir-PS100	36 MWe	Lead-cooled	Northern Nuclear, Canada

表五. 正在開發的很小的反應設計 (小於 25 MWe)

Name	Capacity	Type	Developer
U-battery	4 MWe	HTR	Urenco-led consortium, UK
Starcore	10-20 MWe	HTR	Starcore, Quebec
MMR-5/-10	5 or 10 MWe	HTR	UltraSafe Nuclear, USA
Holos Quad	3-13 MWe	HTR	HolosGen, USA
Gen4 module	25 MWe	Lead-bismuth FNR	Gen4 (Hyperion), USA
Xe-Mobile	1-5 MWe	HTR	X-energy, USA
BANR	50 MWt	HTR	BWXT, USA
Sealer	3-10 MWe	Lead FNR	LeadCold, Sweden
eVinci	0.2-5 MWe	Heatpipe FNR	Westinghouse, USA
Aurora	1.5 MWe	Heatpipe FNR	Oklo, USA
NuScale micro	1-10 MWe	Heatpipe	NuScale, USA

#### 四. 中國大陸小型核反應器的發展

大陸就部署準備而言，高溫反應器(HTR)技術緊隨水冷反應器之後，自力研創的高溫氣冷反應器已於 2022/2/6 發電上網，其具有多項技術優勢，包括更高的發電效率，固有的安全特性(如耐事故燃料)，提供圍護的覆層和反應器器芯，其設計方式使得即使在大多數假設的情況下，發生熔化的可能性也極低。高溫氣冷反應器在為生產氫氣提供核熱方面也非常有效。

1. [石島灣高溫氣冷反應器核電站並網](#)，Plant electrical power, MWe: 211，Core thermal power, MWt: 250。

該廠是全球首座具有第四代核電技術主要特徵的球床模組式高溫氣冷反應器核電站。由華能集團牽頭，於 2012 年開工建設的石島灣高溫氣冷反應器示範工程因具有第四代核電技術安全特徵受到世界矚目。未來將在降低燃煤發電比例、儘早達成“雙碳”目標方面作出重要貢獻。“如果說從二代核電技術到三代核電技術，大陸實現了從‘跟跑’到‘並跑’，那麼第四代核電技術則實現了彎道超車。與常規壓水反應器核電工程相比不同的是，石島灣高溫氣冷反應器有兩

座反應器，是兩台蒸汽發生器帶動一台汽輪機發電。石島灣核電站滿功率運行每年可發電 14 億度，為 200 萬居民提供生活用電，相對於燃煤發電，可減少超 150 萬噸的二氧化碳和其它污染物排放。

上海電氣作為重要參建單位之一，提供了核島和常規島多項核心設備。歷經十餘年攻關，自主研發製造，上海電氣先後攻克了多項世界性、行業性“卡脖子”的關鍵技術，助力整個工程設備國產化率達到 93.4%。

一機床公司承制的高溫氣冷反應器示範工程金屬反應器內構件設備，是世界上尺寸最大的薄壁型金屬反應器內構件。設備逐一攻克了鍛件和鋼板落錘試驗、低合金無縫鋼管製造、大型金屬波紋管製造等難關，並填補了國內相關領域的空白。

石島灣示範工程的建設過程是一段前人沒有走過的路，尚無成熟經驗可以借鑒，面臨諸多挑戰。在艱難地探索攻堅下，上核公司承制的高溫氣冷反應器示範工程反應壓力容器，高約 30 米，相當於 10 層樓高，重約 650 噸，相當於 300 輛普通轎車的重量，是世界上製造難度最大、尺寸最大、重量最重的核電站壓力容器，首次實現了超大型反應器壓力容器設備的國產化製造。

## 2. 建設示範 ACP100 小型模組化反應器 (SMR)，反應器熱功率，MWt 385 機組電功率，MWe 125

在海南省長江建設示範 ACP100 小型模組化反應器 (SMR) 已獲得中國國家發展和改革委員會的批准。多用途 125 MWe 壓水反應器 (PWR)，也稱為玲瓏一號。設計用於發電、供暖、蒸汽生產或海水淡化。

玲瓏一號 (ACP100)，是全球首個陸上商用模組化小反應器，是中國核工業集團有限公司自主研發並具有自主智慧財產權的多功能模組化小型壓水式反應器型，是繼“華龍一號”後的又一自主創新重大成果。

“玲瓏一號”具有一體化反應器技術、高效直流蒸汽發生器技術、遮罩主泵技術、固有安全加非能動安全技術、模組化技術等特徵；具有技術先進及成熟、多用途、部署靈活、設備成熟度高、工程可實施性好等突出優勢。適用於海島、礦區、高耗能企業等多種場景的能源供應，具有大型核電機組無法取代的功能。

“玲瓏一號”示範工程是商業性示範工程，用以驗證設計、製造、建造和運行技術，積累小型核電站的寶貴經驗。“玲瓏一號”（以下簡稱：昌江核電小反應器示範專案）於 2021 年 7 月 13 日在海南昌江核電開工建設，建造工期為 58 個月。

中核集團是於 2019 年 7 月宣佈啟動在長江建設 ACP100 核反應器專案。自 2010 年開始開發的 ACP100 集成壓水反應器的初步設計於 2014 年完成。其主冷卻劑回路的主要部件安裝在反應器壓力容器內。2016 年，該設計成為首個通過國際原子能總署安全審查的 SMR。

ACP100 被確定為中國“十二五”規劃的“重點工程”，是在更大的 ACP1000 壓水反應器的基礎上發展起來的。該設計具有 57 個燃料元件和整體蒸汽發生器，包含被動安全功能，將安裝在地下。2016 年，中國宣佈計畫建造一座基於中核設計的 ACP100S 變體的示範浮動核電站。

中國核工業集團公司 (CNNC) 的子公司中國核工業集團 (CNNP) 在 2021 年 6 月 4 日宣佈了該批准。海南長江多用途小型模組化反應器技術示範專案計劃由中核集團全資子公司中核海南核電公司所有，採用玲瓏一號小型核反應爐技術。中核新能源有限公司的經營範圍：小反應器研發、建設；運營和管理；負責中核集團小反應器產業化發展。

核海南電小反應器項目團隊已於 2022 年 2 月 26 日，已完成全球首個陸上商用模塊化小反應器的鋼制安全下殼部筒體（高度 15 米，結構重量 450 噸，吊裝總重約 665 噸，由 4 層共 32 片拼裝而成，是反應器重要安全屏障，承載著反應器廠房的完整性與密封性功能）吊裝就位，過程安全，質量受控，為高水準穩步推進小反應器工程建設奠定了堅實基礎。

根據中國環境部 2019 年 3 月的公告，示範 ACP100 電站將位於現有長江核電站的西北側。該網站已經擁有兩台運行中的 CNP600 壓水反應器，而兩台華龍一號機組中的第一台已於今年 3 月開始建設。這兩個裝置都將於 2026 年底進入商業運營。

#### 參考資料

1. <https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/small-nuclear-power-reactors.aspx>
2. World Nuclear News, 2022/08/24 “Holtec ramps up SMR programme, eyes 2029 startup”
3. 李富, 清华大学核研院, HTR-PM 固有安全特性, 第四届海峡两岸核能合作研讨会, 山东威海, 2016.9. 26-27
4. 華能山東石島灣核電有限公司, 高溫氣冷堆廠介紹與发展历程, 2022.3
5. 李雲迪, 中國核電工程公司, “小核反應器及浮動式核反應器--技術及安全特點”
6. 中國中原對外工程有限公司, 中国示范 ACP100 小型模块化(玲珑一号)反应堆 (SMR) 簡介與工程進展, 2022.3
7. 陳勝朗, “玲龙一号工程推展情形” 2022.11.4.