



中國核電現狀與未來

工研院能環所前研究員 / 呂錫民

關鍵字：核電 (nuclear power)、中國大陸 (mainland China)、現況 (status)、展望 (perspective)、核反應器 (nuclear reactor)。

摘要

中國約有45座核反應器正在運行，接近15座正在興建，超過30座即將動工。近期目標為：2020年達到58 GWe安裝完成，30 GWe建造當中。由於所有電廠役齡皆約在二十年以內，所以目前沒有停役或停役規劃。燃煤電廠所造成的空氣污染，驅動中國核電持續增長，由於日本2011年福島事故，放緩了中國整體核電的發展。中國核電發展政策在於建立一個封閉核燃料循環，藉由出口技術（包括重要組件）走向全球。也就是說，中國核反應器設計、建設、燃料循環等方面，已基本上實現自給自足，但適應與改進的同時，也充分利用西方技術。相對於世界其他地區，中國主要優勢在於核供應鏈。核廢料處理技術是中國核電永續發展的必要條件，也是核能在中國健康環境中穩定成長的保證。中國核電廠大部分建在東部沿海人口密集地區，有構成潛在核災事故的隱憂。

一、中國核電現況

根據世界核能協會 (World Nuclear Association, WNA) 統計資料，截至2019年6月，在全球446座運行的核反應器中，中國就擁有45座，總容量為43.03 GWe，另有13座在興建當中，容量為12.84 GWe，進入規劃階段的有43座，容量50.90 GWe，至於提議中核反應器則有170座，容量199.61 GWe[1]。中國當初預估2020年總容量可有58 GWe[2]，然而，自從2015年以來，就有很少新核電廠開工，因此目前來看，這一目標不太可能實現。目前全球核反應器共有56座 (60.64 GWe) 正在興建，主要國家 (數量) 為：中國 (13座)、印度 (7座)、俄羅斯 (6座)、南韓 (4座)、美國 (4座)、阿拉伯聯合大公國 (4座)、日本 (2座)。

中國目前核反應器安裝或運行總量世界排名第三，亦即全球約有十分之一的核

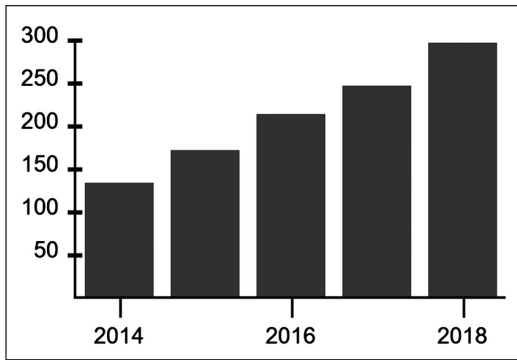


圖 1 中國核電廠的年發電量 (TWh)

資料來源：[4, 5]

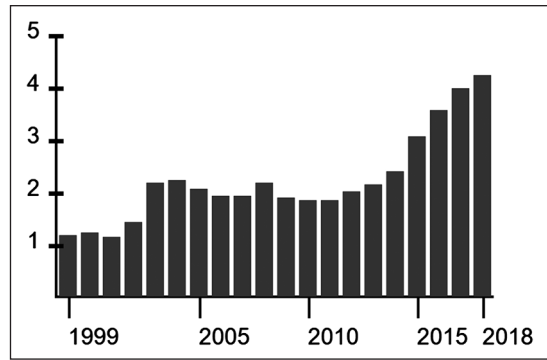


圖 2 中國核電廠的發電占比 (%)

資料來源：[3-5]

電來自中國。如圖1所示，根據國際原子能總署 (International Atomic Energy Agency, IAEA) 資料，核電占2018年中國電力總產量 (67,914億度) 的4.22%，即2,865億度[3]。該數值比2017年的2482億度增長18.6%，每年可節約九千萬公噸標準煤使用，減少二億八千萬公噸二氧化碳排放，去 (2018) 年，中國總共啟用了七座核電機組，增加8.84百萬瓦發電容量[4]。根據WNA資料，2018年全球核電廠發出的電量共計25,630億度，約占有各類型電廠的10.3%[1]。

由於對空氣污染、氣候變化和化石燃料短缺的日益擔憂，核電在中國已被視為燃煤發電的替代品，其他重要發電能源替代方案尚有天然氣 (如頁岩氣與甲烷水合物)，以及再生能源 (如風能、太陽能與地熱)。總括來講，「經濟」、「潔淨」與「安全」是中國主要三大能源政策要素。根據中國官方報告 (CNEA)，從2013年到2017年，火力發電占比已從78.36%緩步降到73.48%，太陽能與風力發電則從2.78%升至5.34%，核能發電也從2.10%提高到3.94%，根據統計資料[6]，燃氣

發電也從2.2%逐漸上升到3.2%。參見圖2。

全球主要國家2018年核電占總發電比例由高至低依序為：法國71.7%，韓國23.7%，美國19.3%，俄羅斯17.9%，英國17.7%，德國11.7%，台灣11.4%，日本6.2%，而中國的4.22%實屬末段班[6]，中國國家發展和改革委員會曾經有意將中國的核電比例從當時的3%提高到2020年的6%以上，中國更長遠的計畫是到2030年之前，將核電產能提高到120-150 GWe[7]。中國核電企業主要有兩大集團，一是經營東北地區的中國核工業集團 (China National Nuclear Corporation, CNNC)，以及主導東南地區營運的中國核電集團 (China General Nuclear Power Group, CGNPG) -前身為中國廣東核電集團 (China Guangdong Nuclear Power Group, CGNPG)。

中國核電發展政策在於核反應器製造與設計技術的最大自主化，儘管也鼓勵國際合作及技術移轉。華龍一號 (Hualong One) 和AP1000等先進壓水反應器 (Pressurized Water Reactor, PWR) 是近期主流技術，



華龍一號也計劃輸出國外。專家們預期到本世紀中葉，快中子反應器（Fast Neutron Reactor）可望成為核電技術主流，到2100年規劃容量將達到1400 GWe[8][9]。中國同時參加國際熱核融合實驗反應器（International Thermonuclear Experimental Reactor, ITER）計畫，進行核融合（Nuclear Fusion）反應器的開發，並在合肥建立了一個名為EAST的實驗核融合反應器，鈾燃料循環（Thorium Fuel Cycle）同時也在研究和開發，以便作為核融合能源潛在的替代手段。

二、中國核反應器技術的演進

（一）CPR-1000

CPR-1000或CPR1000，全名為中國改進型壓水核電技術（China Pressurized Reactor, CPR），是在「第二代+」PWR基礎上，將1990年代所引進的法國900 MW三冷卻迴路設計，升級為淨輸出功率1000 MWe（1080 MWe總輸出功率），使用壽命為60年的產品。

CPR-1000是中國使用最多的核反應器類型，目前有22個機組在運行，大部分組件都在中國建造。由於Areva保留了智慧財產權，影響中國CPR-1000的海外銷售潛力[10]。

中國第一座CPR-1000核電廠Ling Ao-3於2010年7月15日與電網連接[11]。隨著中國組件水平的增長，該類反應器設計能力逐步到位。在廣東核電計畫中，中國的電廠自建率分別為：嶺澳二期55%，紅沿河70%，寧德80%，陽江站90%[12]。

2010年，CGNPC宣布ACPR1000設計，將CPR-1000進一步設計提升到第三代水平，這也取代了智慧財產權所限制的部件。CGNPC的目標是希望在2013年之前獨立銷售ACPR1000，並進行出口[13]。目前若干ACPR1000正在中國建造，但在出口方面，這個設計被華龍一號取代。

（二）華龍一號（Hualong One，代號 HPR 1000）

自2011年以來，CGNPC和CNNC將ACPR-1000和ACP1000設計逐步合併，成為HPR1000聯合設計，前兩者都是三迴路設計，原先依據法國相同設計，但具有不同的核心，是一種第三代PWR核電技術。單機功率輸出為1150 MWe，設計壽命為60年，並且採用具有雙層安全殼的被動及主動安全系統組合。首批建造機組為福清5號和6號，其次是方家山3號和4號，防城港3號和4號。2015年12月，兩家公司同意創建華龍國際核電技術有限公司合資企業，推廣HPR1000海外市場[14]，該項計畫已於2016年3月正式啟動[15]，除了出口巴基斯坦之外，阿根廷和英國也在計畫當中。

（三）AP1000

AP1000（Advanced Passive PWR簡稱）是西屋公司開發的一種雙迴路PWR 1000 MW核電機組，主要特點在於採用被動式安全系統，使得安全相關系統和部件大幅減少，具有競爭力的發電成本、60年的設計壽命、數位化儀控室、容量因子高、易於建造（工廠模組製造和現場建造同步進行），其設計與



性能特點在於用戶要求文件（URD）易於滿足。

西屋的AP1000是中國核電技術晉升第三代的主要基礎，其中牽涉到一項重要的技術移轉協議。AP1000是一種總容量1250 MWe的核反應器，配有兩個冷卻劑迴路。前四個AP1000核反應器，由CNNC和中國電力投資集團公司（China Power Investment Corporation, CPI）分別在三門和海陽建造。隨後，至少有八個機組確定將在另外四個場址興建[16]。

在2016年，根據新聞報導，該項工程建設將延後三到四年，主要原因在於關鍵部件延誤和計畫管理問題[17][18]。2018年2月，三門2號機完成熱測試，2018年4月，三門1號機開始填充燃料[19][20]，參見圖3。2018年7月，第一座AP1000核反應器與電網完成連接，預計在該年年底進行商業運營[21]。

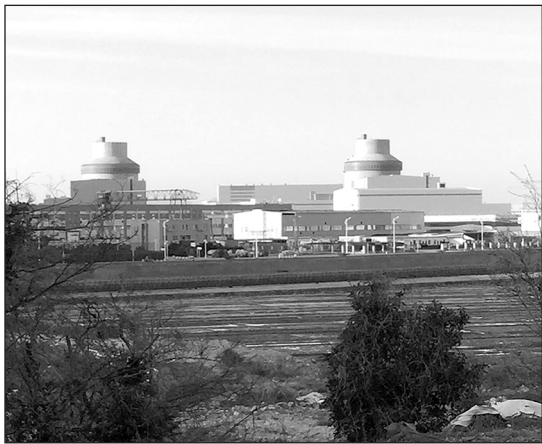


圖3 三門核電廠，浙江，Westinghouse AP1000，2 x 1100MW。

資料來源：[4]

（四）EPR

歐洲壓水反應器（EPR）是一種第三代PWR設計，國際化名稱為進化動力反應器（Evolutionary Power Reactor），主要是由在法國的法瑪通（Framatome）、法國電力公司（EDF）和德國西門子公司所聯合設計開發。除了中國台山之外，2016年9月，英國欣克利角核准2座EPR興建，預計2025年完工[22]。

2007年，中國與法國公司Areva就開發EPR第三代核反應器進行談判。目前台山核電廠有兩座Areva EPR核反應器建造，一號機已於2018年6月6日啟動併網發電，2號機預定在2019年啟動併網，單組反應器容量為4590 MWt，淨功率為1660 MWe，另外至少還有兩部機組正在規劃[23]。

2008年10月，Areva和CGNPG宣布成立工程合資企業，作為中國及其後國外發展EPR與其他PWR的技術轉讓工具。合資公司由CGNPG及其他中國股東持股55%，Areva持股45%。公司將進行EPR和CPR-1000相關工程、設計和設備採購。

據2016年報導，台山建設計畫將延宕三年，主要原因出在關鍵部件延誤與計畫管理問題[17, 18]。但是在2018年6月報導中，第一座核反應器達到臨界狀態，預定在年底全面運行[24]。參見圖4。

據2019年9月媒體報導，由東方電氣參與研製的廣東台山核電2號機組，順利完成168小時滿負荷連續運行，具備商業運行條件。這是繼台山核電1號機組後，全球第二台投入



圖4 台山核電廠一號機與二號機，廣東省江門市台山市赤溪鎮，EPR 2 x 1660 MWe

資料來源：新華社

商運的EPR機組，也標誌著台山核電一期工程全面建成[25]。

在台山核電產品製造過程中，東方電氣首次使用中國唯一一台「鼠籠」工裝，使壓力容器整體熱處理一次性合格。也就是說，此一焊接新工藝的採用，造就套管焊接一次性合格，並改造發電機型式試驗站，成功完成全球最大的核電廠發電機型式試驗。同時，該廠還採用不銹鋼材料製造高壓汽缸，對製造工藝進行相應的優化。

台山核電站位於廣東省台山市赤溪鎮，核電1號機組於2009年開工，2號機組於2010年開工建設，分別是全球第三、四台開工建設的EPR三代壓水核電機組。兩台機組建成後，預計每年可減少標準煤消耗約803萬噸，減少溫室氣體排放超過2109萬噸，相當於造林5.85萬公頃。

(五) CAP1400

2008年和2009年，西屋公司與國家核電技術公司（State Nuclear Power Technology

Corporation, SNPTC）及其他機構達成協議，開發規模更大的AP1000，首先是容量1,400 MWe的CAP1400，緊接著可能是1,700 MWe的設計。中國將擁有這些大型設計的智慧財產權，西屋公司則可能配合更大新型機組輸出[10]。此處所謂CAP是China Advanced Passive PWR的簡稱。

2009年12月，中國成立一家合資企業，預備在石島灣HTR-10 廠址附近建造一座初期的CAP1400。2014年9月，經過17個月審查，中國核監管機構批准設計安全分析。2015年5月，CAP1400設計通過IAEA通用反應器安全審查。2015年，開始場地準備工作，年底為批准完成日期。然而，到2017年，建築許可一直沒有下來，主要原因為受到首座AP1000的長期延誤。

(六) CANDU 核反應器

兩座AECL 728MW CANDU-6核反應器坐落中國浙江省秦山核電廠，第一座和第二座機組在2002年和2003年分別上線，參見圖5。CANDU核反應器使用燃料可以來自傳統核反應器的低階再加工鈾，從而減少中國用過核燃料庫存量。

2016年9月，加拿大工程巨擘SNC-Lavalin宣布與CNNC及上海電氣集團簽署原則協議，從事先進CANDU核反應器的設計、營銷和建造等相關合作事宜。

(七) VVER-1000

俄羅斯的Atomstroyexport是田灣AES-



圖5 秦山核電廠，浙江嘉興，第三期2座機組（CANDU-6, 728 MW），分別在2002年和2003年上線。

資料來源：[4]



圖六 興建中的田灣核電廠的一號及二號機組（VVER-1000, 1050MW），江蘇連雲港。

資料來源：[4]

91核電廠的總承包商和設備供應商，使用的V-428機型是經過充分驗證的VVER-1000核反應器，具有1050 MWe容量。俄羅斯的Energoatom負責2009年的維護。另外兩個田灣核電機組將使用相同版本的VVER-1000核反應器。參見圖6。

VVER-1000是前蘇聯在1975年之後開發出來的PWR，具有一個四迴路系統，安裝在帶有噴霧蒸汽抑制系統的安全殼式結構中。VVER系列核反應器經過詳細設計，可配合西方第三代核反應器相關的自動控制、被動安全和圍阻系統。

（八）Generation IV（第四代）

截至2018年5月資訊，HTR-PM預定於2018年完工。基本上，HTR-PM是高溫氣冷（High-temperature Gas-cooled, HTGR）球燃料床反應器第四代設計，部分是基於清華大學早期的HTR-10原型核反應器。同時HTR-PM也是德國AVR核反應器的後代，目前是中

國正在開發的小型模組化核反應器，單個反應器機組熱容量為250 MWth，兩個反應器連接到一個蒸汽渦輪機，產生210 MWe電力。

2012年12月，石島灣核電廠開始第一座示範性HTR-PM營運作業，該發電廠由兩座核反應器組成，各別驅動一個蒸汽渦輪機。兩座核反應器的壓力容器安裝於2016年，預計在2019年開始發電。HTR-PM可望成為第一座進入實際運行的第四代核反應器。

中國另一座第四代鈉冷卻快速核反應器CFR-600正在興建當中，CFR-600位於福建省霞浦縣是CNNC第四代示範項目，又稱霞浦快速核反應器試點項目，反應器建設始於2017年底，輸出功率1500 MWth，電力功率600 MWe。

CFR-600是中國實現封閉核燃料循環計畫的一部分，快中子反應器被認為是中國未來核電技術的主流。另外還有一個更大的商業運轉CFR-1000大型核反應器正在規劃。



在霞浦同一地點，未來將有第二座600 MWe快速核反應器建造，建議的機組群除了一台HTR-PM600，尚有4台CAP1000。

(九) 小結

截至目前為止，中國營運中、建造中與規劃中的核反應器詳細資料，包括電廠名稱、機組數量、機型、容量摘錄在表1當中。

三、中國核電廠分布

中國核電廠大部分位於沿海地區（圖七），一般使用海水來冷卻核反應器，是一種直接單程循環（Once-through Cycle）。據「紐約時報」報導，中國將大部分核電站安置在大城市附近，有人擔心在發生事故時會有數千萬人受到輻射災難。例如，位於廣東省的嶺澳核電廠在半徑75公里範圍內住有約

表1 中國營運中、建造中與規劃中的核反應器

電廠名稱	運行中核反應器			建造中核反應器			規劃中核反應器			小計	
	機組	機型	淨容量 (MW)	機組	機型	淨容量 (MW)	機組	機型	淨容量 (MW)	機組	淨容量 (MW)
昌江	2	CNP-600	1220	N/A			2	CNP-600	1220	4	2440
大亞灣	2	M-310	1888	N/A			N/A			2	1888
防城港	2	CPR-1000	2000	2	Hualong-1	2100	2	Hualong-1	2100	6	6200
方家山	2	CPR-1000	2000	N/A			N/A			2	2000
福清	4	CPR-1000	4000	2	Hualong-1	2100	N/A			6	6100
海陽	2	CAP1000	2200	N/A			6	CAP1000	6600	8	8000
紅沿河	4	CPR-1000	4244	2	ACPR-1000	2000	N/A			6	6244
惠州 / 太平嶺	N/A			N/A			2	Hualong-1	2100	2	2100
嶺澳	2	M-310	1900	N/A			N/A			4	3914
	2	CPR-1000	2014								
陸豐(汕尾)	N/A			N/A			2	CAP1000	2200	2	2200
寧德	4	CPR-1000	4072	N/A			2	Hualong-1	2100	6	6172
彭澤	N/A			N/A			2	AP-1000	2200	2	2200
泰山	1	CNP-300	298	N/A			N/A			7	4110
	4	CNP-600	2458								
	2	CANDU-6	1354								
三門	2	AP-1000	2314	N/A			N/A			2	2314
石島灣	N/A			1	CAP-1400	1400	1	CAP-1400	1400	3	3000
				1	HTR-PM	200					
台山	1	EPR-1750	1660	1	EPR-1750	1660	N/A			2	3320
桃花江	N/A			N/A			4	CAP1000	4400	4	4400
田灣	2	VVER V-428	3960	2	ACPR-1000	2000	2	VVER-1200	2200	8	8230
	2	VVER V-428M									
咸寧	N/A			N/A			2	AP-1000	2200	2	2200
霞浦	N/A			1	CFR-600	600	1	CFR-600	600	2	1200
徐大堡	N/A			N/A			2	CAP1000	2200	4	4400
							2	VVER-1200	2200		
陽江	4	CPR-1000	4080	1	ACPR-1000	1000	N/A			6	6090
	1	ACPR-1000	1010								
漳州	N/A			N/A			2	Hualong-1	2100	2	2100
總計	45		42,672	13		13,020	34		35,300	92	90,992

資料來源：[5]；本研究綜整



註：● 營運中 ■ 興建中 ▲ 已規劃

圖 7 中國核電廠分布

資料來源：[4]；本研究綜整。

2800萬人口，並且直接覆蓋到香港地區。

四、中國核電的未來

2011年日本福島事故發生，隨著新核電廠的暫停批准，2012年10月中國國務院改採新的核電發展目標，2020年完成60 GWe，30 GWe興建中。在2015年制訂目標中，150 GWe將在2030年完成上線，供給全國近10%

電力，2050年完成240 GWe，提供15%電力。然而福島後的放緩可能意味著2030年僅剩120 GWe左右[7][26]。這些目標已經比福島事故之前減少許多，如2006年3月22日中國政府曾經達成「2005年至2020年核電產業長期發展規劃」協議[27]，2020年裝機容量超過80 GWe（6%），2030年進一步增加到超過200 GW（16%）[28]。中國國務院研究辦公室（State Council Research Office, SCRO）



建議，中國的核電發展目標是在2020年之前（完成建造和正在建造）不超過100 GWe，以避免燃料、設備和合格工廠工人短缺。這讓中國正在建造的數十個二代核反應器產生憂慮，並建議更快地轉向第三代設計機組，如AP1000。

基本上，在日本2011年福島第一核電站災難之後，中國凍結了新核電廠興建的批准，隨後整體核電發展計劃放緩，2014年沒有新廠批准。據報導，在2015年EPR和AP1000建設延遲兩年運行，主要因為關鍵部件延誤和計畫管理問題。然而，這些延誤並不一定會使整個計畫在2030年之前完成受到質疑。

不可諱言的，從2016年到2018年之間，新建計畫更進一步中斷，至少這兩年以來沒有新的批准下來，造成整體規劃進度急劇減緩。中國建造的AP1000和EPR核反應器的延誤，以及AP1000設計者（西屋公司）在美國的破產，已經為未來的發展方向帶來了不確定性。此外，中國某些地區目前擁有過多的發電容量，而且在中國政府逐步放開發電行業的同時，電力價格能以多大經濟程度維持新核電廠的持續興建已成問號。

這導致中國核協會質疑中國是否有望實現2020年預定目標。2018年核工程國際期刊更進一步分析，2030年計劃產能低於90 GWe是一項合理的追求目標。

2011年1月，中國科學院啟動TMSR（Thorium Molten Salt Reactor）研發計畫，除其他進展外，將以創建氣冷式反應器為主

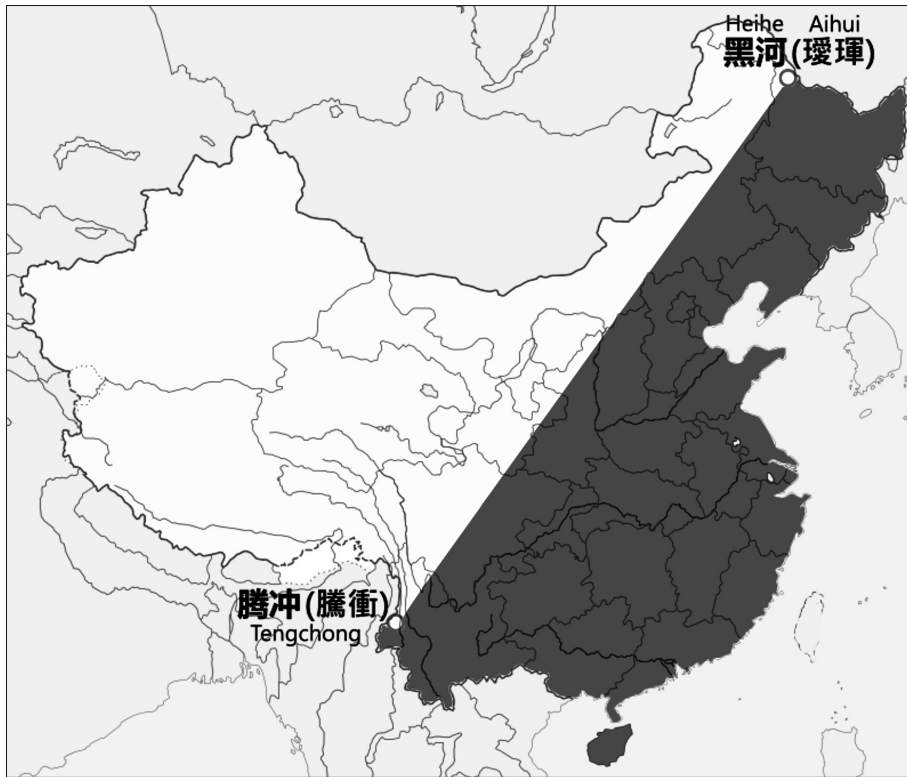
要目標。預計在2020年建造出一座小規模的原型反應器，位置選在甘肅省民勤縣的一個工業園區。

2019年2月，中國國家電力投資公司（SPIC）與吉林省白山市政府簽署一項合作協議，將使用中國核電公司DHR-400（區域供熱反應器400 MWt）執行所謂的「白山核能供熱示範計畫」。

如圖8所示，「黑河-騰衝」分界線以西地區需要冷卻核反應器的水資源相對缺乏（黃色區域），被視為中國內陸發展傳統核電的限制因素。

中國目前核電廠營運執造期限30-40年，定期安全檢查（PSR）間隔10年。中國因應核電廠運轉維護需要，於2012年發布「核動力廠老化管理」，另外核安全導則（HAD 103/12）也擬定「核電廠運行許可證有效期限延續政策」，在老化之過時管理上，中國大陸主要是通過定期安全審查（PSR），以提供老化管理所需技術支援。

中國第一座核電廠（秦山）於1995年竣工商轉，接連的二期與三期擴增計畫，使得浙江秦山電廠已成一處大型核電基地。1991年開始，商轉之秦山核電機組（320 MWe），設計壽期為30年，在上海核工院、核動力運行研究所支持下，於2014年完成「秦山機組運行許可證延續可行性研究報告」，經中核集團批准後，運行許可證延續（Operation License Extension, OLE）項目正式立項。預計於2017年提交OLE申請，希望於2021年獲得批准。



圖八 中國大陸“黑河-騰衝”缺水分界線

資料來源：[4]

1994年開始商轉之大亞灣一號機（900 MWe），設計役期為40年，也在開展OLE相關工作，預計於2019年提交OLE申請，希望於2022年獲准。

在核電廠延長運轉期限方面，中國認為核電廠運轉有效期限的延續並不是一種「延役運行」，而是在核電廠具有可接受的技術性能和安全水準條件下，於核電廠「實際役期」內的運行為。

中國除了延續核電廠之運行許可證外，另外也著重電廠自設計至退役之全役期老化

管理，重點在於經濟因素考量，在台灣則不考慮經濟因素。由於當今中國核電廠役齡皆在約二十年以內，因此截至目前為止並沒有停役或規劃停役核電廠的情況。

五、中國的核廢料處理政策

核廢料，也稱放射性廢棄物，是指含有放射性核種或受其污染的任何物質。根據不同的放射性水平，核廢料可分為高階核廢料（High Level Wastes, HLW），中階核廢料（Intermediate Level Wastes, ILW）和低階核廢料（Low Level Wastes, LLW）。



目前，國際上處理用過燃料方式主要有兩種：一是將用過燃料冷卻並封存在深層地底；或者是使用後處理與再循環方式。由於大部分用過燃料具有回收價值，經過後處理，可從中提取鈾、鈾和其他元素等，繼續用來製造核燃料。後處理的主要程序基本上是各種化學反應操作的組合，回收大部分有用物質之後，產生的大量ILW、LLW以及少量HLW被固化，這些不可回收廢棄物送入地底深層儲存。目前世界上發展核電國家大多數採用此種方法，包括中國。

根據中國污染防治法規定，當提出新的核反應器興建計畫時，並須包括未來核廢料處理措施，這意味著核電營運商只有兩項選擇：一是自己建造配套的核廢料處理場，另一個是與願意接收核廢料的地區簽署處置協議。

根據「中長期核電發展規劃（2011-2020年）」所述目標，到2020年，中國核電裝機容量將達到58 GWe。國際原子能總署（IAEA）評估輕水式反應器（Light Water Reactor）的放射性固體廢物產生量約為550 m³/GW，中國核電廠每年產生的核廢料在2020年將達到約32,000立方公尺，2025年約為48,500立方公尺，根據美國核廢料處理費標準，每單位處理費用約需要30,000-50,000美元（200,000-350,000人民幣），2020年和2025年中國核廢料處理市場規模將達到每年65-95億及100-145億人民幣[29]。上述數據未涵蓋後處理場和廢棄物處理場相關建設與運營費用。

六、中國核電廠的核廢料處理狀況

隨著中國核電的大規模發展，核電容量

的快速增長，與核燃料循環後端的核廢料處理處置之間的矛盾目前已經逐漸浮現。

（一）核電廠中的核廢料儲存

1. 用過燃料儲存池已滿

對於用過核燃料的現場存儲，我們以大亞灣核電廠（中國最早的1000 MWe核電廠投入商業運營）為例。大亞灣核電廠自1994年投入商業運營以來已經運行20多年。用於儲存用過核燃料的大亞灣核電廠液池，經過20多年使用目前已滿，因此，新產生的用過核燃料只好存儲在同一站點的其他液池中。田灣核電廠是另一個1000 MWe核電基地，該核電基地很早就投入運營，現在也面臨同樣問題。田灣核電廠1號和2號機組的用過核燃料池已於2007年投入運行，預計2016年第9次擴建中斷後達到存儲上限。

雖然，目前在大亞灣和田灣核電基地中，用過核燃料池的容量仍然可以滿足當前需求，並且這些池可以繼續存儲新產生的用過核燃料，但最早的用過核燃料的存儲時間已超過預期，從長遠來看，在大規模的商業後處理場投入運行之前，仍然存在新用過核燃料無處可去的風險。

2. ILW、LLW臨時存儲已滿（但仍可長期使用）

以中國第一座300 MWe商業核電廠秦山為例，該廠的核廢料臨時存儲在核電廠中。根據秦山核電合資公司2000年初估算，2015年將是中、低階固體廢物臨時存儲滿負荷商產的「最後一天」。廢物將超過1,000立方公尺。但是，環境保護部核能與輻射安全中心對2010年數據評估之後，將滿負荷生產時間



提前到2012年。這對於核電廠而言，一旦它們沒有足夠空間來放置放射性廢物，機組只能被迫關閉。隨著中國大亞灣、秦山、田灣等早日投入運行的核電基地的累計運行時間，中、低階固體廢物的產生及積累與核電廠發電能力產生矛盾。現場臨時存儲問題變得越來越突出，一些ILW和LLW已經超過國務院規定的5年臨時期限，但由於沒有其他地方可以去，所以繼續存儲在核電廠存儲池中。

(二) 核廢料處置場建設

1. ILW和LLW處置場的選址已暫停多年

與臨時儲存池相比，中國國內低放射廢物和中放射廢物處置場的處境更加困難。中國在《放射性廢物管理條例》中規定，必須按照「區域處置」政策處置ILW和LLW。在這方面，中國最初計劃在中國西南、西北、華東、華南、華北建立5個區域處置場，核電廠產生的ILW和LLW會在暫時存放在核電廠5年，之後轉移到區域處置場進行最終處置。

但是，目前在中國只有兩座已完工的ILW和LLW處置場：廣東大亞灣附近的北龍處置場和甘肅404工廠的西北處置場。此外，四川飛鳳山處置場（西南處置場）正在建設中。其中，北龍處置場毗鄰大亞灣核電廠，距大亞灣核電廠僅5公里。目前，它僅接受和處置從大亞灣和嶺澳核電廠產生的ILW和LLW。換句話說，北龍廠址實際上不是上述中國南方的處置場。

在中國，選擇ILW和LLW處置場址不一定是核電廠最集中的地區，因此地方政府僅有義務，卻沒有利益，從而導致區域處置陷入僵局。對於已經完工的處置場，擁有

處置場的省份不願意接受其他省份的ILW和LLW。404工廠的西北處置場目前僅接受由軍事設施產生的部分ILW和LLW，不接受商業核電廠的ILW和LLW。至於正在建設中的四川飛鳳山處置場，其所在地已經有軍事設施，因此對新處置場的抵抗力很小。但是，它也只計劃接受該省內已經存在或將來可能會發展的核電廠的ILW和LLW。

2. HLW處置場預見不可預測的未來

由於HLW的高風險，一旦不當選擇高放射廢物處置地點，將造成不可彌補的損失。因此，必須根據國家經濟發展安排仔細選擇處置地點，並考慮人口分佈，運輸以及地質，水文和氣候條件。通常，世界各地的HLW處置場都建置在經濟落後和人煙稀少的地區。

根據國際經驗，HLW處置場的建設既昂貴又費時。根據中國國家國防科學技術工業局的計劃，中國的HLW地質處置已確定三個步驟目標：（1）實驗室研發階段和處置場址選擇（2006-2020年）；（2）地下測試階段（2021-2040）；以及，（3）原型處置場示範和處置場建設階段（2041-2050）。中國國務院於2012年10月發布「十二五」規劃，並在2020年《核安全與放射性污染防治的遠景規劃》，提出到2020年建成地下HLW處置實驗室目標。

目前，甘肅北山廠是中國HLW處置的首選區域，也是研究和工程水平最高的地區。自從2000年首次鑽探以來，目前共有19個鑽孔，其中有8個是淺孔。但是，與世界上其他處置場相比，北山數據收集還遠遠不夠。一些國外處置場已鑽了數千個孔。顯然，按照目前的進展，在2020年之前完成地下實驗室



的規劃目標幾乎是不可能。

此外，業界仍在爭論是否盡快在北山啟動實驗室建設，並將其確定為最終處置場。然而，反對者認為，北山遺址有花崗岩岩石，應該重新選擇具有粘土岩石的場址，以便與之進行比較，然後再做出決定，結論不宜下的過早，另外，處置場將用於玻璃體（vitreous）的儲存，但是，從後端核循環鏈角度來看，在後處理廠和玻璃化項目完成之前，是不會有大量玻璃體產生，因此處置場建設並不急著進行，應該慢慢仔細考慮。但是，支持者認為，如果按照2020年完成地下實驗室的目標，同時考慮實驗室建設所需時間，實驗室應盡快在北山基地進行施工，即便未來有更合適場所選擇，最終處置場所也是可以建在其他地點，兩者不相衝突。

七、結論

截至2019年6月，中國有45座核反應器運行，13座建造當中，規劃階段則有43座，安裝總量世界排名第三，全球約有十分之一的核電來自中國。2018年，中國核電廠總發電量為2,865億度，占全國電力總產量4.22%。

經濟、潔淨與安全構成中國核電發展三大動力，短中長期最低安裝目標（核電占比）分別是：2020年58 GWe（6%）、2030年120 GWe（10%）、以及2050年240 GWe（15%）。目前中國核電占比4.22%，與全球平均核電占比10.3%相比，實有很大成長空間。然而，不可諱言地，自從2011年日本311福島事故發生之後，全球對核電廠安全產生警戒，先進國家不像以前那般熱衷核電，中國核電發展因此受到影響而放緩腳步，

回顧自1980年以來的三、四十年歷史，中國核電產業在兩大巨擘-CNNC與CGNPC引領下，核電技術已從早期的國外引進類型（如第二代的法國CPR-1000），逐步改良為第三代水平（如ACPR1000、HPT1000），除了自建於國內之外，並且輸出國外，其他成功案例尚包括美國西屋公司引進AP1000，然後技術合作改良成CAP1400，另外尚有從歐洲引進的EPR，加拿大的CANDU核反應器，甚至俄羅斯的VVER-1000。目前中國核電研究項目聚焦第四代核反應器雛型建立，如高溫氣冷式球燃料床反應器HTR-PM以及鈉冷卻快速核反應器CFR-600。

從更長遠角度來看，專家們預期到本世紀中葉，快中子反應器可望成為核電技術主流，到2100年規劃容量將達到1400 GWe。中國同時參加國際熱核融合實驗反應器（ITER）計畫，進行核融合反應器的開發，並在合肥建立實驗核融合反應器（EAST），鈦燃料循環同時也在研究和開發，以便作為核融合能源潛在的替代手段。

在能源轉型與節能減碳政策下，中國提出龐大核電發展計劃，建設中的核電廠規模居世界第一。核燃料循環的後端處理與中國核電發展密切相關，加快核廢料處理產業發展符合中國核電發展政策，未來核廢料處理將有巨大需求與廣大市場，核廢料處理是中國核電產業發展關鍵因素。

自20世紀80年代初核電發展以來，中國已確定了「封閉燃料循環」政策。封閉燃料循環具有提高鈾資源利用與環境保護的雙重意義。核廢料處理和最終處置是封閉式核燃



料循環系統的關鍵步驟，也是確保核能安全重要基礎。因此，核廢物處置和核電建設應該同步均衡發展，中國建立完整、先進、自主的核燃料循環系統是實現核電可持續發展的實際需要和重要保證。

參考文獻

1. World Nuclear Association. "World Nuclear Power Reactors & Uranium Requirements," June 2019, Accessed on 25 June 2019.
2. World Nuclear News. "Start-up nearing for Chinese units," 25 March 2014, Accessed on 25 June 2019.
3. Xinhuanet. "China's nuclear power generation rises in 2018," 24 January 2019, Accessed on June 22, 2019, http://www.xinhuanet.com/english/2019-01/24/c_137771695.htm
4. Wikipedia. "Nuclear power in China", 12 June 2019, Accessed on 22 June 2019, https://en.wikipedia.org/wiki/Nuclear_power_in_China
5. IAEA. PRIS, 24 June 2019, Accessed on 22 June 2019, <https://pris.iaea.org/PRIS/CountryStatistics/CountryDetails.aspx?current=CN>
6. 中國電力工業統計快報數據一覽，Updated on June 2018, Accessed on 22 June 2018, 108 年，<https://chinaenergyportal.org/en/2017-electricity-other-energy-statistics-update-of-june-2018/>
7. D. Stanway. "China's total nuclear capacity seen at 120-150 GW by 2030 – CGN", Reuters, 14 March 2016, Accessed on 22 June 2019.
8. B. Brook. "Summary of China's fast reactor programme," Brave New Climate, 9 December 2011, Accessed on 25 June 2019.
9. X.U. MI. "Fast Reactor Technology Development for Sustainable Supply of Nuclear Energy in China", China Institute of Atomic Energy, China International Nuclear Symposium November 23-25, 2010, Beijing, (PDF) .
10. World Nuclear Association. "Nuclear Power in China", 2 July 2010, Accessed on 24 June 2019.
11. Nuclear Engineering International. "First power at China's Ling Ao", 16 July 2010, Archived from the original on 13 June 2011, Accessed on 25 June 2019.
12. China Central Television. "China aims to build its own nuclear power stations", 24 July 2009, Accessed on June 23, 2019.
13. World Nuclear News. "China prepares to export reactors", 25 November 2010, Accessed on 24 June 2019.
14. World Nuclear News, "Chinese firms join forces to market Hualong One abroad", 31 December 2015, Accessed on 24 June 2019.
15. World Nuclear News. "Hualong One joint venture officially launched", 17 March 2016, Accessed on 24 June 2019.
16. D. Lu. "The Current Status of Chinese Nuclear Power Industry and Its Future," E-Journal of Advanced Maintenance, Japan Society of Maintenance, 2(1), 2010, Accessed on 24 June, 2019, <http://www.jsm.or.jp/ejam/Vol.2.No.1/GA/12/article.html>
17. S. Thomas. "China's Nuclear Power Plans Melting Down", The Diplomat, 29 October 2016, Accessed on 24 June 2019.
18. S. Kidd. "How serious are the delays in China's nuclear programme?" Nuclear Engineering International, 23 February 2015, Accessed on 24 June 2019.
19. World Nuclear News. "Hot testing of Sanmen 2 AP1000 completed," 01 February 2018, Accessed on 25 June 2019.
20. World Nuclear News. "Fuel loading under way at Chinese AP1000," 20 April 2018, Accessed on June 24, 2019.
21. World Nuclear News. "First AP1000 unit begins generating power", 02 July 2018, Accessed on 24 June 2019, <http://www.world-nuclear-news.org/NN-First-AP1000-unit-begins-generating-power-0207184.html>.
22. Rowena Mason and Simon Goodley. "Hinkley Point C nuclear power station gets government green light", The Guardian, 15 September 2016, Accessed on 24 June 2019.
23. World Nuclear News. "Taishan schedule factors in commissioning tests", 2 January 2018, Accessed 24 June 2019.
24. World Nuclear News. "First criticality achieved at Chinese EPR", 07 June 2018, Accessed on 24 June 2019, <http://www.world-nuclear-news.org/NN-First-criticality-achieved-at-Chinese-EPR-0706184.html>
25. UDN. 「台山核電2號機 投入商運」, 23 September 2018, Accessed on 28 September 2019, <https://udn.com/news/story/7333/4062444>
26. World Nuclear Association. "Nuclear Power in China," 20 September 2016, Accessed on 25 June 2019.
27. D. Lu. "The Current Status of Chinese Nuclear Power Industry and Its Future", E-Journal of Advanced Maintenance, Japan Society of Maintenance, 2(1), May 2010, Accessed on 24 June 2019.
28. Xinhua News Agency. "China ups targeted nuclear power share from 4% to 5% for 2020", 5 August 2008, Accessed on 25 June 2019.
29. S.H.U. Yue, Z.-M. Liu, X.-J. Lin and R.-Z. Wang. "A Review of the Development of Nuclear Waste Treatment for China's Nuclear Power Industry", Advances in Engineering Research, 94, pp. 322-326.