

國際核能電廠除役成本與事故風險簡析

2020/01/09

核能研究所綜計組能策室 袁正達 副工程師

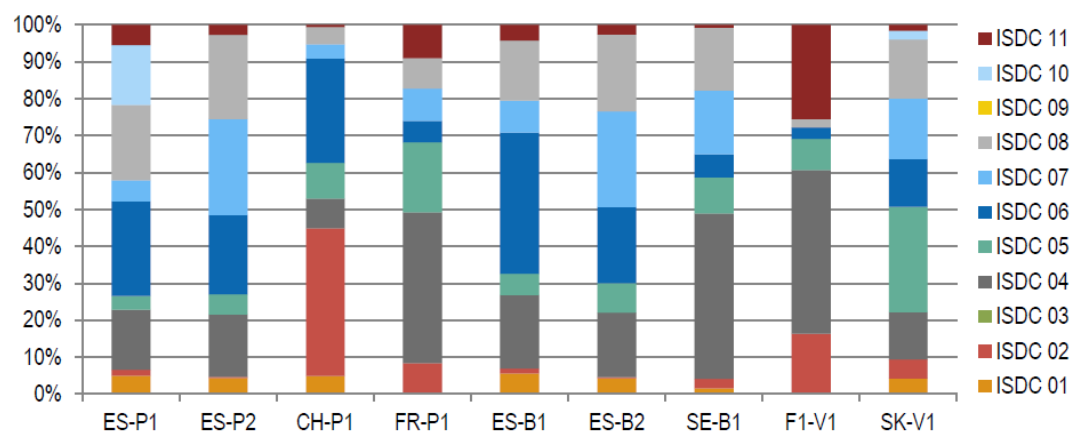
核能研究所綜計組 葛復光 副組長

1. 前言

在非核家園的政策下，我國核一廠目前已在除役中，核二廠的兩部機組將陸續於 2021 年與 2023 年進行除役，而核三廠亦將於 2025 年停止運轉，OECD (2016) 針對核電廠除役成本的報告指出，除役成本的估算必須符合 1.在電廠營運期間能提供除役基金估算所需的各項資訊。2.決策過程中所採取之不同策略其相對應的成本應具可比較的基礎。3.預備長期的預算與現金流。4.能做為專案管理的工具。本文彙整 OECD 透過 International Structure for Decommissioning Costing (ISDC) 為基礎的問卷方式，取得各國最新的核電廠除役成本資料，其中包括 4 座壓水式核電廠，3 座沸水式核電廠；2 座俄式壓水式核電廠，以及 11 座氣冷式核電廠，特別值得注意的是，問卷中目前只有西班牙 José Cabrera 核電廠是正在除役中，因此其他成本數據均是已除役成本或未來除役計畫之估算；此外，該報告亦援引 2011 年西北太平洋國家實驗室 (Pacific Northwest National Laboratories, PNNL) 替美國核管會，針對美國境內核電廠做的除役成本研究進行比較，其中包含 Haddam Neck, Maine Yankee, Trojan, Rancho Seco NPPs 等 4 座已完成除役的核電廠。此外，本文亦彙整 The Full Costs of Electricity Provision (OECD, 2018)、The World Nuclear Industry Status Report (2019) 兩份國際報告針對核能事故風險與成本的數據，並透過彙整比較 ISDC 與 PNNL 所提供的核電廠除役成本資料，並據以提出幾項建議，以供國內相關單位及後續核電廠除役規劃之參考。

2. ISDC 除役成本調查

ISDC 針對不同核電廠處理高放射性(Level 1)的支出包含 1.除役準備 2.關閉設施 3.安全加強 4.管制區內的拆除作業 5.廢棄物處置、儲存與棄置、6.廠址的基礎建設與營運 7.傳統的拆除 8.計畫管理、工程與廠址支援 9.研究開發 10.核燃料與放射性物品 11.其他等多項成本項目進行調查。其中每個項目占除役成本的比重如圖 1 所示。



Notes: ISDC 01 – Pre-decommissioning, ISDC 02 – Shutdown, ISDC 03 – Safe enclosure – not relevant for immediate dismantling, ISDC 04 – RC dismantle, ISDC 05 Waste management, ISDC 06 Site infrastructure and operation, ISDC 07 Conventional dismantling, demolition and site restoration, ISDC 08 – Project management, engineering and site support; ISDC 09 – R&D, ISDC 10 – Fuel and nuclear material, ISDC 11 – Miscellaneous.

圖 1. 各項除役成本項目占比

資料來源: Costs of Decommissioning Nuclear Power Plants (OECD, 2016)

此外，可進一步按重要性將除役過程拆解成四個主要的成本項目，分別為電廠拆除(由 ISDC 的 04 與 07 項目組成)，核廢料處理(ISDC 的 05 項目)、計畫管理(由 ISDC 的 06 與 08 項目組成)及其它等四個部分，能更清楚比較各國核電廠除役成本項目的比重。有關 ISDC 問卷詳細項目請參考附件。表 1 為 ISDC 所調查各國核電廠之拆除、核廢料處理與計畫管理之除役成本。

表 1.各國核電廠除役主要成本項目(in USD2013 million)

Name	ID	Dismantling activities ISDC 04 + 07	Waste management ISDC 05	Project management ISDC 08 + 06
PWR José Cabrera – 160 MWe	ES-P1	75.1	12.8	156.7
PWR Generic P (ES) – 1 066 MWe	ES-P2	178.9	22.6	185.0
PWR Generic (CH) – 1 000 MWe	CH-P1	143.2	116.9	393.9
PWR Generic (FR) – 3 600 MWe	FR-P1	724.4	276.0	205.6
BWR SM Garona – 466 MWe	ES-B1	92.4	18.6	176.4
BWR Generic B (ES) – 1 092 MWe	ES-B2	184.2	34.0	176.0
BWR Oskarshamn – 2 576 MWe	SE-B1	501.0	78.5	188.5
VVER Loviisa – 976 MWe	FI-V1	210.5	39.9	25.2
VVER Bohunice – 880 MWe	SK-V1	439.0	431.0	435.0

資料來源: Costs of Decommissioning Nuclear Power Plants (OECD, 2016)

從圖 2 主要除役成本項目占比的結構來看，不同類型的反應爐各具差異，但多以計畫管理(藍色)的支出占比最高，其中壓水式反應爐 (Pressurized Water Reactor, PWR) 類型，除法國核電廠(4 座機組)裝置容量 3600 MWe，計畫管理費用占 14%，西班牙與瑞士核電廠(均為 1 座機組)計畫管理費用占比介於 33%至 46%之間；在沸水式反應爐 (Boiling Water Reactor, BWR) 方面，西班牙兩座核電廠(均為 1 座機組)的計畫費用管理費用介於 41%至 55%間，瑞典 Oskarshamn 核電廠具三座機組，該占比為 23%。支出占比次高的是拆除費用(紅色)的部分，反之，除法國與斯洛伐克的核廢料處理成本占比分別為 19%與 29%之外，核廢料的處理在整體除役成本中的占比多在 10%以內。此外，計畫管理的成本並非取決電廠的裝置容量大小(NEA, 2003)，該非線性的成本來自於計畫管理的固定成本、廠址調查，安全與機電工程等，因此，對裝置容量小的電廠來說，計畫管理成本可能相對較高，例如西班牙 ES-B1 的裝置容量 466 MWe，該項成本占除役成本的 55%；相反地，在法國核電廠 FR-P1(3600 MWe)的案例中，計畫管理占除役成本的比重只有 14%，相對較低。

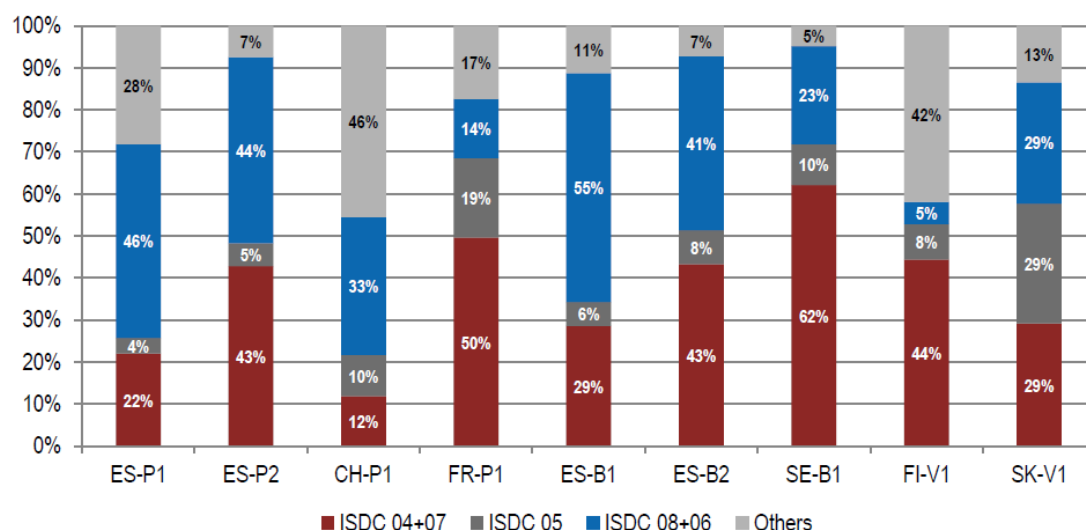


圖 2. 主要除役成本項目占比

資料來源: Costs of Decommissioning Nuclear Power Plants (OECD, 2016)

另外，該份報告也將西北太平洋國家實驗室為美國核管會所做的報告中將相關核能電廠除役之成本項目對應到 ISDC 的拆除成本、計畫管理、核廢料等主要項目，以利二者比較。圖 3 為美國核電廠主要除役成本項目的占比，其中 Haddam Neck, Maine Yankee, Trojan 是已經完成除役的核電廠，其占比為根據實際支出費用所計算；其他核電廠的除役成本占比則是估算而來。在 PNNL 的報告中，以計畫管理的費用占除役成本比重平均約 40%為最高，該現象與 ISDC 的調查結果相同；而在核廢料成本占比方面，除法國(19%)與斯洛伐克(29%)高於 10%之外，其它的占比皆在 10%以內；而美國的估算核廢料占除役成本的比重介於 14%到 29% 之間，明顯較高。拆除的占比介於 23%到 43%，ISDC 的調查則介於 12%到 62%，

變異性較大。

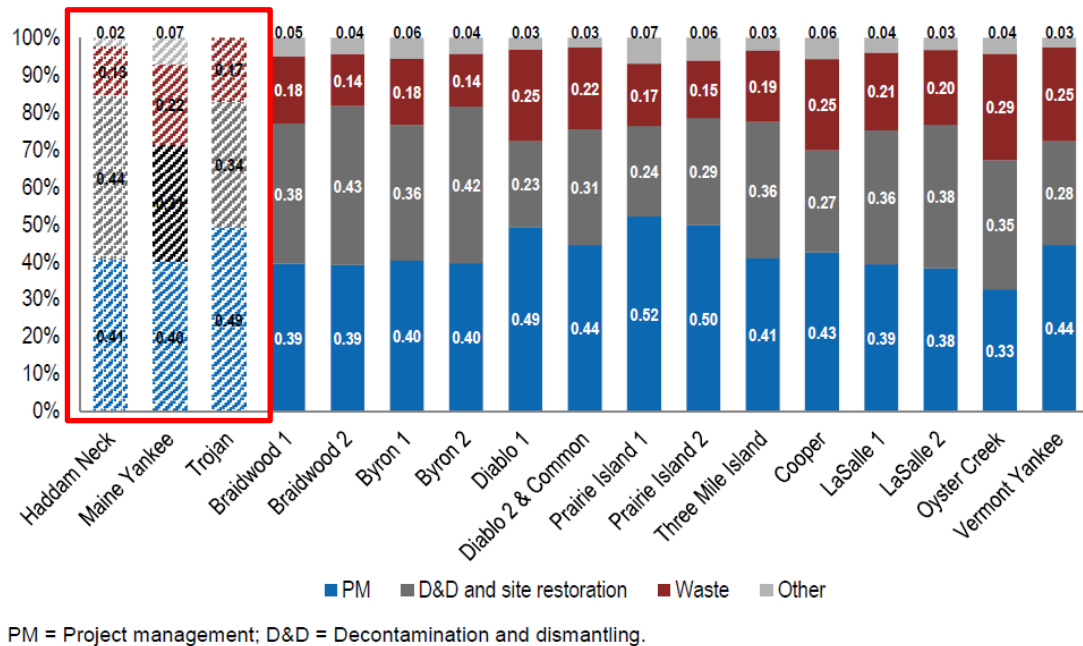


圖 3. 美國各核能電廠主要除役成本項目占比

資料來源: Costs of Decommissioning Nuclear Power Plants (OECD, 2016)

3. 核電廠除役過程的不確定性

一份妥善的核電廠除役計畫必須定期檢視且更新，包含除役的方式、可行性並確保除役的財務穩健，同時確認除役的類別與項目、除役過程中預計產生的核廢料數量等，除役計畫必須從電廠營運直到除役完成期間定期檢視。由於核能電廠的除役計畫早在真正除役前數十年就開始規劃，因此相關成本估算不免會受到數量、輻射、除役過程與經濟參數的影響。該份報告列舉 6 個國家對於估算除役成本不確定性的做法如表 2 所示，例如英國與捷克是結合電腦模型及過去經驗的專家判斷來評估準則；而芬蘭則透過經驗概估總費用的 10% 來做為非預期成本 (unexpected cost) 的支出。

表 2.評估成本不確定性之方法

Country	Contingency – method	Average	Range % ²
Czech Republic	Using computational models and partially based on experience	Not provided	
Finland	Based on experience. 10% reservation is used to cover unexpected costs	~9%	9.08-9.1
Slovak Republic	Using risk analysis and risk assessment. Based on costing methodology	8%	0.2-16.5
Spain	Contingency factors are considered for the different phases of the project taking into account uncertainties related to specific activities	Not provided	
Switzerland	30% ¹ required in the new ordinance. Numbers presented in this study are without this general contingency	30%	
United Kingdom	Combination of computational modelling (Monte Carlo simulation using 3-point estimates) and management judgement based on experience of previous projects	17%	1-24 ³

表 3 為芬蘭 Loviisa 核電廠在不同期間針對除役成本的估算值，除役成本自 1983 年起每 5~6 年必須重新檢視，最近一次是 2012 年完成更新。除役成本於 1993~1998 年間成本略有變動的原因是決定分別將 1977 年與 1980 年建置完畢的發電機組從 30 年的耐用年限延長為 45 年，在 2003 年估算時再進一步延長為 50 年，但對於整體除役成本沒有太大影響；2008 年則是因為法規的改變，導致拆除與核廢料管理的成本增加；而最近一次 2012 年估算除役成本的增加，則是因為更新核廢料的儲存成本。

表 3.芬蘭 Loviisa 核電廠除役成本估算 (歐元)

	In “2012 EUR” without contingency	In “2012 EUR” with 10% contingency
1987	EUR 278 793 k	EUR 306 672 k
1993	EUR 261 752 k	EUR 287 928 k
1998	EUR 258 801 k	EUR 284 681 k
2003	EUR 263 131 k	EUR 289 444 k
2008	EUR 312 424 k	EUR 343 666 k
2012	EUR 326 437 k	EUR 359 081 k

Source: Finland case study.

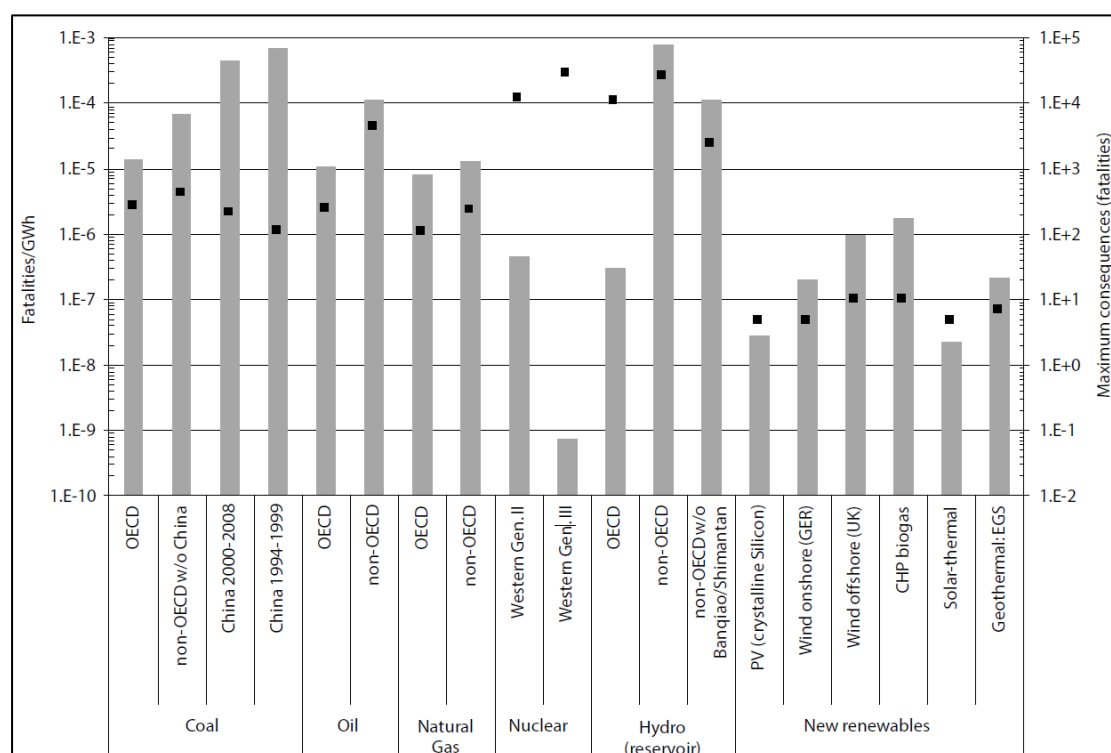
另外，瑞士的核能法案 (Nuclear Energy Act) 與核能條例 (Nuclear Energy Ordinance) 規定相關核電廠除役計畫應每 10 年定期更新，同時應將設備、法規與技術發展所帶來的改變予以考量；此外，依照除役與廢棄物基金管理條例 (The Ordinance on the Decommissioning and Waste Management Funds) 的規定，必須每 5 年針對核電廠除役成本進行估算，在成本納入當下的物價與成本的基礎上，據以計算當前最可能採用的拆除技術及核廢處置方法等成本，並包含估算上產生的不確定性等成本。表 4 為瑞士在 2006 年與 2011 年所估算的除役成本，顯示各機組都是追加 10%~28% 的除役經費。

表 4.瑞士核電廠除役成本估算 (瑞郎)

Decommissioning costs	PWR1	BWR1	PWR2	BWR2	(Temporary H/LLW storage)	Total
Cost Study 2011, price basis 2011	809	487	663	920	95	2 974
Cost Study 2006, price basis 2011	631	440	605	835	31	2 541
Difference absolute	178	47	59	86	64	433
Difference (%)	28%	11%	10%	10%	204%	17%

Source: Swiss case study.

此外，The Full Costs of Electricity Provision (OECD, 2018) 報告透過 1970 至 2008 的歷史資料與核電廠的機率安全評估 (Probabilistic Safety Assessment, PSA)，針對不同發電技術所產生之嚴重事故致死率以及最大傷亡數量，提出具比較基礎的指標如圖 4。核電廠每 GWh 的嚴重事故致死率介於 $10^{-7} \sim 10^{-6}$ 之間，第三代反應爐甚至可降低至 10^{-9} 以下，相較於 OECD 國家燃煤電廠每 GWh 的事故致死率介於 $10^{-5} \sim 10^{-4}$ (中國介於 $10^{-4} \sim 10^{-3}$) 之間明顯較低；雖核電廠事故致死率相對低很多，惟一旦發生事故核電廠的最大傷亡人數可達上萬人(為機率安全評估結果，並非曾發生事故之死亡人數)，而燃煤電廠發生事故的最大可能傷亡人數約在數百人之間。該份報告並提供瑞士以機率安全評估推估核能事故成本為 0.01 EUR/MWh。另外，根據 The World Nuclear Industry Status Report (2019)，日本政府於 2015 年評估核能事故風險的成本為 300 JPY/MWh (相當於 2.5 USD/MWh)。



註 1:灰色長條圖對應左軸，為各項發電技術每 GWh 的事故致死率。

註 2:黑點對應右軸，為最大傷亡人數。

圖 4. 嚴重事故致死率與最大傷亡人數

資料來源: The Full Costs of Electricity Provision (OECD, 2018)

4. 國際趨勢對我國核電廠除役之啟示

核電廠除役成本的估算十分重要並具有以下目的。1.在電廠營運期間為未來除役計畫提供資金挹注，2.為決策者提供不同策略下的除役成本比較分析 3.預備長期的預算與現金流。4.作為除役計畫管控的工具等目的。核能電廠除役的範圍廣且耗時，我國亦尚未有相關實際參與核電廠除役的經驗，因此，透過了解各國在除役成本的估算與經驗，對於後續我國規劃相關時程具有極大助益。綜合上述國際經驗，在此提出幾點建議做為我國核能電廠除役之參考。

(1)定期重新估算相關除役成本

除役計畫與相關成本的估算早在電廠營運之前就開始規劃，因期限很長相關參數與估算必須時常檢視更新，才能適時反映成本與做好除役的預算規畫；此外，除役成本的估算並非同質線性，透過多場址的規劃與共同營運、互相支援可以降低計畫管理的成本，從法國的案例可以看出，當台灣面臨核電廠除役時，若有整體性的思考與規劃，可有效降低計畫管理成本。由於目前的除役成本估算多採取first-of-a-kind¹的基礎來計算，當未來累積更多除役經驗時，相關放射性物質的處置、系統的維護及拆除等工作在特定區域可能更具成本優勢。

(2)明確的核廢料管理

一份明確的核廢料管理程序，對於除役計畫的執行、成本的估算與控制有極大的助益，事實上核廢料的處置成本取決於所選擇的處置策略或方法；此外，由於臨時儲存的成本會隨時間而增加，若缺乏核廢料最終處置的場址，將導致除役成本估算的不確定。

(3)制定除役政策與法規

除役政策與相關法規架構若不夠明確或時常變動，將導致除役計畫與相關成本產生極大的不確定性；此外主管機關即使對於核安的要求比照核電廠營運期間的標準，但在移除燃料後(defueling)仍可能發生風險，對於除役計畫的管制與規範的實施也會產生額外的成本。

參考文獻

NEA (2016), Costs of Decommissioning Nuclear Power Plants,OECD,Paris,
<https://www1.oecd.org/publications/costs-of-decommissioning-nuclear-power-plants-9789264255555-en.htm>

NEA (2012b), International Structure for Decommissioning Costing (ISDC) of Nuclear Installations, OECD, Paris, www.oecd-neo.org/rwm/reports/2012/ISDC-nuclear-installations.pdf.

PNNL (2011), Assessment of the Adequacy of the 10 CFR 50.75(c) Minimum Decommissioning Fund Formula, Pacific Northwest National Laboratory, Richland, <http://pbadupws.nrc.gov/docs/ML1306/ML13063A190.pdf>.

The Full Costs of Electricity Provision (OECD, 2018)
<http://www.oecd.org/publications/the-full-costs-of-electricity-provision-9789264303119-en.htm>

The World Nuclear Industry Status Report (2019)

¹ First of a Kind (FOAK) 指的是使用新技術興建核電廠第一次商轉時的成本，通常會比較高；而 Nth of a kind (NOAK) 通常指的是第五座以上的核電機組，且建廠的經驗效益已不再增加時，此時穩定的成本結構稱之。

<https://www.worldnuclearreport.org/-World-Nuclear-Industry-Status-Report-2019-.html>