

## 內容綱要

- 一. 前言
- 二. 除役政府政策的挑戰
  - 2.1. 國家除役政策和制度安排
  - 2.2. 國家除役法律和監管框架制度
  - 2.3. 除役作業執行責任
- 三. 不同類型核電廠除役的技術挑戰
- 四. 除役的技術發展方向
  - 4.1. 拆除前的場址特性描述和調查
  - 4.2. 分割和拆解
  - 4.3. 除污和清理
  - 4.4. 物料和廢棄物管理
  - 4.5. 復原場址特性量測和環境監測
  - 4.6. 新興技術和工具

### 一. 前言

據國際原子能總署(IAEA)統計資料庫顯示,截至2020年底,全球共有686座核反應爐處於其生命週期的不同階段,其中52座正在建設中,442座正在運行,172座已永久關閉,20座已完全除役。而其中大多數被永久關閉的核反應爐位於歐洲西部的地區(51%)。美國北部和亞洲遠東地區的反應爐數量相同(均為17%),其次是歐洲中部和東部地區(14%)。

國際原子能總署是在2019年8月26日舉行一個技術會議,隨之啟動了一項國際合作項目,以收集相關數據並分析全球核設施除役現狀和未來前景。其目的是期望對於除役和相關廢棄物管理作業負有政策責任的人員需要信息,包括政府官員、核設施運營組織的經理、監管機構以及廢棄物管理組織和提供除役和廢棄物管理服務的工業組織的經理。這些信息對公眾、媒體和環保團體也很有用。

本報告內容主要在說明截至2020年全球核除役作業的狀況及其未來發展。內容有以下主要範圍:首先,說明除役的政府政策和制度安排以及法律和監管框架。它提供了政策、策略、機構、實施組織、法律框架、角色和責任的配置。其次,討論影響除役計劃實施的主要技術挑戰因素。同時介紹了對當前除役計劃的優勢、劣勢、機會和威脅(SWOT)的分析。本節還包括對計劃實施中當前主要發展趨勢的討論。最後,對交付除役項目所需的技術挑選和發展方向進行了分析。所涉及的技術是設施污染表徵、淨化、分割和拆除、清理和環境監測,以及材料和廢棄物管理。

### 二. 除役政府政策的挑戰

除役政府政策宣示和相關機關(構)組織在除役項目的實施組織、法律框

架、角色和責任的配置完整性發揮著極為關鍵作用。在除役方案的預先規劃和執行，需要對其挑戰和應對進行盤點。國際上詳細推展要求情形說明如下。

## 2.1. 國家除役政策和制度安排

首先，依據國際原子能總署安全導則 [ *IAEA Nuclear Energy Series Guides No. NW-G-2.1 2011 “Policies and Strategies for the Decommissioning of Nuclear and Radiological Facilities”* ]指稱：除役設施國家需發表政策聲明，必須代表核設施除役過程中有關組織的意見因此，應設立一個委員會，制定政策，或更新現有的策略。國家政策應反應國家優先事項、情節、結構、人力和財政資源的指導方針。這主要原因是核設施的除役最終責任由設施所在的國家承擔。國家政策聲明宣示包含以下內容：

1. 設定管制機關和管理機構；
2. 提供資源；
3. 除役策略設定；
4. 安全和保安目標；
5. 核廢棄物管理要求；
6. 核廢棄物最小化目標；
7. 除役的終結目標；
8. 公共資訊和公眾參與。

## 2.2. 國家除役法律和監管框架制度

國家必要制定立法和條例，規定相關組織的作用和責任。國家立法機關通常負責批准涵蓋核設施安全除役的立法。立法通常包括建立監管機構以及放射性廢棄物管理和其他相關治理的基本要素。

國家法規為管理除役核設施的責任以及在其運行和除役期間產生的核廢料提供了法律框架。需要此類框架以確保政策和戰略得到有效制定和實施，財務和非財務責任得到明確界定，並適當分配給負責履行債務的人。

核監管機關的最終作用是提供充分的監督，以確保核作業以安全的方式並根據現行法律法規進行。監管機關通常負責制定適用於確保除役和放射性廢棄物管理安全以及監督、監測和執行規定。通常有許多不同的監管機構參與對一般核作業（包括除役）的監管監督。例如，可能存在不同的監管核安全和輻射防護、人員的常規健康和安全以及環境保護的安排。

從運營到除役的過渡可能會在技能、招聘、領導、培訓和績效管理，甚至心理社會因素方面帶來一些特定的人力資源管理挑戰。在此背景下，核監管機關強調了系統培訓方案（SYSTEMATIC APPROACH TO TRAINING, SAT）方法在核設施除役人員（包括承包商）培訓中的應用的重要性並提供了指導 [ *IAEA, Training and Human Resource Considerations for Nuclear Facility Decommissioning, IAEA Nuclear Energy Series No. NG-T-2.3 (Rev 1), IAEA, Vienna (2022).* ]。

SAT 方法現在正應用於所有類型的核設施，用於核設施生命週期的各個階段，包括運行階段和除役階段。其中，根據參與的工作職能，管理人員和專業人員等類別，如關於工程專案管理、輻射安全和工業安全課程的培訓要求，以及特別是在數位化和機器人技術的使用方法。

### 2.3. 除役作業執行責任

廢棄核設施的除役是該設施的許可證持有者的責任。這種責任通常由國家立法規定，包括提供資金來支付除役費用。在商業核動力反應爐和其他收入的情況下發電設施、除役和長期廢棄物管理的資金需要在設施的運營階段留出。

為執行國家政策，設施的運營者或所有者必須製定設施除役戰略，這通常是核設施運營商的責任。運營商需負責除役工作的詳細規劃及其執行。一般來說，在核設施永久關閉後，被許可人實施除役，使用從自己的員工中抽調的管理團隊，或聘請專業承包商來監督項目實施。

在某些情況下，有些國家核電廠除役責任被轉移從運營商到專門的國有組織實施除役；例如，西班牙有一國家除役組織（Enresa），使用在運營期間預留的資金，負責實施除役所有核設施。例如，在英國，核除役管理局（NDA）於 2004 年成立。職責包括核設施的除役和清理多個地點。

至於，確保除役和放射性廢棄物管理安全的主要責任在於許可證持有者，通常是設施的運營者或所有者。這反應在國際安全標準 [IAEA Safety Standards Series, *Fundamental Safety Principles, Safety Fundamentals SF-1*, IAEA, 2006.]、國際協議 [IAEA, *Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management*, INFCIRC/546, IAEA, Vienna (1997).] 以及國家法律中。

再者，例如，歐洲原子能聯營廢棄物指令 [EUROPEAN COMMISSION, *Council Directive 2011/70/Euratom of 19 July 2011 Establishing a Community Framework for the Responsible and Safe Management of Spent Fuel and Radioactive Waste*, OJ L 199, EC, Luxembourg (2011).] 要求每個歐盟成員國須準備一項戰略，該戰略表現為管理和處置各種放射性廢棄物的國家計劃，包括產生的放射性廢棄物從除役。

### 三. 不同類型核電廠除役的技術挑戰

在建造核電廠時，並不總是注重未來的除役問題，特別是在老反應爐的情況下。這些設計主要是針對安全運行和可靠發電而不是除役進行了優化。這帶來了挑戰，包括設施的特性、組件的可接近性以及大型組件和混凝土結構的安全拆除。

在反應爐爐心內部和周圍，由於高中子通量，材料被高度激活。高輻射水平禁止人員進入，這意味著必須遠程完成表徵或使用計算機模型進行估計。此外，拆除作業可能需要在水下或其他屏蔽物後面遠程進行。再者，還必須考慮系統和

結構的複雜性。

大型設備組件的拆卸和移除是核電站反應爐成功除役的關鍵因素。其中如必須拆除和切割反應爐壓力容器，並對由此產生的廢棄物進行適當管理。為此作業選擇的方法需要特殊機具才能完成任務。而，蒸汽發生器通常作為一個整體拆除。因此由於它們的尺寸、重量和位置帶來了各種工程挑戰，它們通常需要專門的設備來進行技術作業、起重和運輸。

技術在除役項目的交付中發揮著重要作用。在除役方案的預先規劃和評估中，需要對挑戰和應對這些挑戰可能需要的後續技術進行評估。在許多情況下，可能存在可供選擇的現有技術來執行所需的作業。然而，在某些情況下，可能需要開發特定技術來應對特定挑戰。在較大的除役計劃中，會製作技術路線圖或藍圖，定義執行除役計劃所需的主要技術發展。

實施項目的決定取決於這些技術的可用性和成功。法規遵從性和除役項目的成功完成在很大程度上取決於部署適當的技術。如果所選技術失敗，其失敗可能會影響工人的健康、進度、相應組織的財務能力和利益相關者的支持。為了減少這些威脅，一些設施通常更願意選擇市場上可用的成熟技術，而避免應用創新技術。總體而言，技術方法和工具的開發、選擇和可用性是成功執行除役項目的關鍵因素，有助於減輕危害、改進進度和降低成本。

核設施的除役提出了獨特的健康和​​安全挑戰，因為這些項目通常因遇到有毒和有害物質而變得複雜，並因放射性污染和輻射場而變得更加複雜。在大型項目中開發或實施新技術的關鍵驅動因素之一可能是提高工人的安全性。該領域的典型技術包括使用機器人或遙控工具使操作員遠離危險並減少接觸。機器人技術和自動化的使用也可以改善調度和質量。

#### 四. 除役的技術發展方向

在瞭解目前除役技術領域的做法以及需要開發新技術的發展方向。進行以下五個議題領域予以分析：

- (a) 拆除前的場址特性描述和調查；
- (b) 分割和拆解技術；
- (c) 除污和清理技術；
- (d) 材料和廢棄物管理；
- (e) 場址環境監測。

對於這五個主要技術領域中的每一項，本報告概述了技術使用的主要趨勢和當前對不同類型核設施開發新技術的需求。

迄今，國際上在應用一系列除役技術方面有相當多的經驗，儘管這種經驗的確切性質和程度因地區而異。但顯示當前可用的技術可能被認為足以實施相關計劃。在存在此類經驗的情況下，除役組織可能會判斷，與開發新技術相比，依賴現有的和經過驗證的技術可能會帶來更少的項目風險，而新技術的開發可能需要

在部署之前進行額外的開發、測試和批准。

## 4.1. 拆除前的場址特性描述和調查

### 4.1.1. 目前可用的技術

核設施需要在拆除前進行場址特性描述和調查。這涉及對設施和現場放射性物質和其他有害物質的類型、數量、範圍和分佈的測量和估計。場址特性描述和調查包括場址歷史記錄以及現場測量。歷史場址記錄提供信息以確保場地特徵適合預期的危害。該過程總結了對過去和正在進行的操作的調查和測量，包括所有事故/事故報告和與經驗豐富的設施工人的訪談。

場址特性描述和調查的目的是獲取有關設施中放射性和非放射性條件的信息並了解它們。然後，場址特性定義了對材料、系統、結構、土壤和工具進行淨化、去除、包裝、運輸和處置所需過程的範圍和程度。拆除前的物理、放射學和非放射學表徵是所有除役項目的關鍵要素。場址特性表徵可以如下進行：

- 直接測量：這種方法是通過將檢測器放置在或靠近表面或被研究的介質中進行的。這種方法可以直接獲得輻射水平的讀數，並指示存在哪些放射性核元素。
- 掃描：這種方法是通過在距離表面指定距離處以恆定速度移動便攜式輻射探測器來評估劑量率來執行的。當必須覆蓋大面積時，應用此技術。
- 抽樣：這種方法是通過收集被調查材料的代表性部分來進行的。然後在受控條件下在實驗室中分析收集到的材料。用這種方法，可以確定放射性核種以及比活度。
- 充氣檢測器、閃爍檢測器和固態檢測器可用於測量。這些檢測器開發完善、經過驗證且可靠。來自測量的數據被收集並成為統計評估的一部分。分析信息可用於了解有關數據結構的更多信息，並識別模式和關係或潛在異常。

此外，可以進行計算機計算，尤其是在核反應爐區內和周圍。反應爐中產生的中子通量和能譜被納入計算機代碼，然後模擬中子與周圍材料的相互作用。有多種模型、代碼和蒙特卡羅方法可用於估算材料中的中子誘發活度。

### 4.1.2. 技術發展方向需要

在本議題領域需要進一步發展方向：開發利用原位測量表徵系統、結構和組件 (SSC) 的技術；開發代碼或模型，以及提高潛在激活和污染預測準確性的流程。其中，例如需要開發改進的技術來檢測和識別  $\alpha$  和  $\beta$  發射體。同時，期限開發表徵複雜和/或難以接近的結構的技術的類似需求，例如管道、容器內部構件、分析和採樣單元以及裝有液體放射性廢棄物的地下儲罐。在這方面，機器人、遙控潛水器 (ROV) 和無人機的進一步開發和使用也被提及，它們可以提供新的選擇，特別是在高輻射區域。對於場地特性描述——以及隨後的監測——遙感、遙測和衛星技術的應用越來越有可能。

由於除役項目還必須處理非放射性有害物質，例如石棉、多氯聯苯 (PCB) 和

多環芳烴 (PAH)，因此需要改進和開發現場識別這些物質的技術。土壤和地下水的表徵相對昂貴，因此似乎有進一步發展的潛力。

## 4.2. 分割和拆解

### 4.2.1. 目前可用的技術

分割和拆解技術的選擇取決於操作的設備規模和複雜性、涉及材料以及要實現的目標。

用於減小大型 SSC 的尺寸分段，以便對其進行淨化或更好地運輸、儲存和處置或回收它們。金屬物品的分割，如反應爐壓力容器、蒸汽發生器、管道和大型活性混凝土結構被認為是需要拆除，同時拆除包括建築結構和固體表面的破壞。拆除通常被認為是除役的關鍵階段。總體而言，可用的拆解技術可分為以下幾類：

- (a) 機械切割技術，包括剪刀、鋸、軌道切割機和磨料切割；
- (b) 熱切割技術，包括火焰切割和等離子弧切割；
- (c) 磨料水射流切割，包括磨料水射流切割和磨料水懸浮射流切割；
- (d) 電切割技術，包括電火花機和電弧鋸切割；
- (e) 新興技術，包括液化氣切割和激光切割；
- (f) 機械拆除技術，包括破壞工具、線鋸、液壓剪、破壞球、膨脹灌漿和岩石劈裂。

### 4.2.2. 技術發展需要

儘管目前已存在各種各樣經過驗證的拆解技術，但多數認為需要進一步開發。其中如，機械水下切割通常是首選的分割技術，因為與熱切割技術相比，這減少了煙霧和灰塵的數量。然而，歐洲地區除役項目的最新趨勢——指向另一個方向；對於一些利益攸關方來說，在早期階段實現無水狀態似乎比在水下切割反應爐壓力容器更為重要。因此，熱切割技術在該地區具有更大的意義。此外，已成功開發出專門用於縮小尺寸的定制遙控工具。

本拆解領域進行發展方向，特別是對於仍在運行的 LWR 的拆解。儘管有各種各樣的分割技術可用，但仍需要進一步開發。以進一步減少二次廢棄物的產生，並提高效率。

下列為需要進一步發展方向要項：

- (a) 處理和拆除大型設備（例如反應爐壓力容器）；
- (b) 遙控技術；
- (c) 高劑量率狹窄環境中的移動和/或遙控技術；
- (d) 切割厚混凝土結構。

## 4.3. 除污和清理

### 4.3.1. 目前可用的技術

從廣義上講，除污是從不需要的物料後區域去除放射性或其他有害物質。除污技術類似於清潔污垢、油或腐蝕產物，只是放射性核素與受污染的材料相關。

放射性污染可能是鬆散的和固定的。鬆散的污染物通常通過清洗或擦拭表面來去除，而固定的污染物則緊緊地固定在材料的表面基質上，甚至已經擴散到其中。固定污染物的去除通常需要嚴格的除污技術來去除固定污染物，但這也可能產生大量的二次廢棄物。

除污技術不僅在除役過程中應用，而且在作為常規過程的運行過程中應用，以減少放射性廢棄物的數量。因此，存在各種各樣的除污技術，包括：

- 化學除污，包括化學溶液、泡沫、凝膠、多相處理；
- 機械除污，包括用水沖洗、吸塵、擦拭、擦洗、噴砂、蒸汽清洗、高壓和超高壓水刀、研磨、銑削和發芽；
- 新興技術，包括光燒蝕、微波結垢、熱降解和電遷移；
- 其他技術，如電解拋光、超聲清洗和熔化。

相應除污技術的選擇取決於組件的材料和尺寸、要除污的表面類型、污染的性质和組件的可及性，以及組件的安全性和劑量率。還是涉及的工人。

儘管目前已有大量可用的除污技術經驗，但可能需要清理核設施現場的地下設施、土壤和水，以消除現場周圍環境中放射性和有害物質造成的污染。雖然氫極易揮發，但不溶性放射性污染物往往會被困在局部地區的土壤中。因此，主要策略是破壞或改變污染物、從環境中提取或分離污染物以及固定污染物。建築物下方土壤的清理工作可能會推遲到稍後拆除建築結構本身及其地基時進行。同樣，地下水污染可能在設施除役項目的單獨項目/許可證下解決。

清理技術包括：

- (a) 土壤清理：
  - (i) 挖掘和處置；
  - (ii) 土壤蒸汽提取；
  - (iii) 現場空氣剝離；
  - (iv) 原位生物修復；
  - (v) 原位土壤沖洗。
- (b) 土壤固化。
- (c) 地下水清理：
  - (i) 泵送和處理；
  - (ii) 生物反應器；
  - (iii) 自然衰減過程。

#### 4.3.2. 技術發展需要

這些技術通常是根據特定情況和需要專門開發的。目前可用的技術，如化學除污過程可能會顯著降低輻射水平，但需要進一步改進，包括提供這些技術的供應商的可用性。經常提到的是無法使用遠程控制技術來淨化高度污染的材料，以及開發用於燃料碎片和高活性材料的遠程處理技術。在這種情況下，機器人

和自動化、模組化除污過程的潛在使用提供了發展機會。

各種拆解和淨化過程產生的廢棄物是另一個挑戰，已確定需要進一步發展，特別是廢棄物減容和除污技術和相應的方法。

#### 4.4. 物料和廢棄物管理

##### 4.4.1. 目前可用的技術

除役過程中，除污、拆除和場地清理會產生廢棄物，需要安全管理、搬運、處理、儲存和處置。根據監管要求和國際安全標準，放射性廢棄物管理的一般原則是：盡量減少廢棄物(回收再利用處理)。

廢棄物管理的要素是：

- (a) 放射性廢棄物分類和庫存；
- (b) 放射性廢棄物的處理和整備；
- (c) 運輸和儲存或臨時儲存；
- (d) 處置。

放射性廢棄物分為不同的類別。分類各不相同，包括(非常)低水平和中水平廢棄物、高水平廢棄物和乏燃料(法規認為是廢棄物)。

廢棄物處理方法的選擇取決於物理狀態(固態、液態、氣態)、數量、放射性水平、半衰期、最終處置途徑、放射毒性和要實現的目標等因素。必須以符合長期儲存或處置驗收標準的方式處理廢棄物。

##### 4.4.2. 技術發展需要

對於那些正在除役的設施，大多數人稱目前已有足夠的技術來處理產生的廢棄物。

在實施用過核燃料長期貯置策略之前，除役核設施現場需要臨時儲存設施。因此，開發用於臨時儲存該類燃料的安全容器是另一個需要進一步開發的領域。

#### 4.5. 復原場址特性量測和環境監測

##### 4.5.1. 目前可用的技術

在拆除作業完成後，在對剩餘建築物進行常規拆除以及將場地從核監管控制中釋放之前，必須對場地進行場址特性量測，以確認已達到批准的最終狀態。除役完成後，也需要在一段時間內實施環境監測計劃。

場地表徵和監測技術可能包括三維建模和非侵入式表徵取樣。該領域還包括使用複雜模型來了解潛在的土壤和地下水污染以及污染源，例如混泥土地下結構或水箱。已經開發了用於場地表徵的統計方法，以補充所有表面都需要直接測量的非統計方法。

##### 4.5.2. 技術發展需要

在這方面沒有發現特別的需求。

促進環境監測領域的發展。如果場地有條件放行，則可能必須實施包括定期測量和採樣在內的環境監測計劃。需要進一步發展表徵和監測技術領域，



包括：

- 開發非破壞性和非侵入性技術，以在拆除前評估建築物或構築物中的放射性物質水平；
- 用於證明符合土壤和地下水以及剩餘地下結構的自由排放要求的方法；
- 統計方法的發展。

#### 4.6. 新興技術和工具

據除役作業技術經驗回饋可知，除役方面的技術突破通常出現緩慢，合作有限，該行業在很大程度上依賴於採用最初在其他行業開發和完善的技術。為了獲取其他行業已有的技術或已在其他除役專案中成功實施的技術的知識和經驗至關重要。

新興技術和工具支持建立涵蓋核設施整個生命週期的知識管理流程，此外還根據 ISO 9001 標準實施持續改進流程。知識管理流程必須成為管理系統不可或缺的一部分，因為知識管理直接影響安全和人力資源。可用的知識必須被收集和/或生成，並且必須被開發，傳遞給其他利益相關者並保存。

新興的數字技術涵蓋了從具有模擬和監控設施狀況的數字的完全數字化管理系統到最常見的數字化形式、激光掃描和 3-D 建模的範圍。

有許多案例有效地使用 3-D 掃描和建模來構建除役挑戰的準確 3-D 表示。此信息可以支持與現有工廠和設備的接口設計或用於除役規劃目的。此外，還利用 3-D 模型和自動輻射劑量分布量測虛擬現實(AR/VR) 工具為技術基礎提供核電廠除役廠區場景及環境輻射特性視覺化與輻射劑量和放射性廢棄物數量之資訊，同時也可增強現實等技術在安全環境中查看此信息，以支持熟悉、培訓和利益相關者管理。還有例子顯示，伽馬（或最近甚至是阿爾法）相機已被用於識別 3-D 環境中的劑量分佈或劑量圖。此外，劑量信息可以放入 3-D 空間模型中，並用於進一步支持除役計劃和劑量管理。技術也被用於設施，以在數字環境中提供實時信息並以數字模型顯示。

BIM 允許根據場地或設施的 3-D 模型組織和跟踪數據和信息。這允許將位置數據標記為坐標，並能夠在整個除役項目中跟踪設施的當前物理狀態、設備、人員、特徵數據和材料處理包。BIM 可以與工具一起用於特性描述、規劃和不確定性分析。將 BIM 與全球定位系統 (GPS) 或位置感知 Wi-Fi 網絡相結合，可以部署半自主或全自動機器人系統和無人機。

(參考文獻： IAEA NUCLEAR ENERGY SERIES NW-T-2.16 ,  
“Global Status of Decommissioning of Nuclear Installations” ,  
March 2023 )