

**核電廠除役期間火災危害暨火災防護方案之管制技術研究**

**Study on fire hazards and fire protection control technologies during  
decommissioning of nuclear power plants**

**計畫編號：NSC11302030L**

**受委託機關(構)：社團法人台灣防火材料協會**

**計畫主持人：黃育祥**

**共同計畫主持人：沈子勝、黃俊能**

**E-mail address：una459@mail.cpu.edu.tw**

**研究期程：中華民國 113 年 4 月至 114 年 12 月**

**報告日期：113 年 12 月 18 日**

# 目錄

壹、計畫緣起與目的.....	1
一、前言.....	1
二、目的.....	1
貳、研究方法與過程.....	2
一、研究步驟.....	2
二、文獻蒐集法.....	2
(一) 國外核電廠除役期間火災防護法規介紹.....	2
(二) 國內文獻.....	29
(三) 國外文獻.....	32
三、案例分析法.....	38
(一) 日本案例-大型核電廠火災 1-玄海核電廠火災.....	38
(二) 日本案例-大型核電廠火災 2-2017 濱岡核電廠空調機房火災.....	40
(三) 日本案例-大型核電廠火災 3-濱岡核電廠 3 號機 4 樓管制區內建物火災.....	41
(四) 國外施工案例-中國施工中大型工廠火災.....	41
(五) 國外案例-歲修期間工廠火災.....	44
(六) 國內案例-施工中工廠火災.....	48
(七) 國內案例-作業中場所火災.....	55
四、核一廠除役除役期間潛在可能發生火災危害之作業工項分析.....	60
(一) 核一廠除役計畫之查閱與分析.....	60
(二) 火災參數與安全影響分析.....	64
(三) 核電廠火災學公式參考.....	65
(四) 核一廠除役期間潛在可能發生火災危害之來源分析.....	68
(五) 核一廠除役階段消防設備維護管理評估.....	69
(六) 管制建議.....	70
五、模擬分析法.....	71
(一) 模擬設備與 Pyrosim 軟體介紹.....	72
(二) 火災情境設定.....	73
(三) 模擬結果分析.....	80
五、專家學者訪談意見分析.....	85
參、主要發現與結論.....	88
一、結論與建議.....	88
(一) 結論.....	88

(二) 建議.....	88
肆、参考文献.....	90

## 中文摘要

核電廠除役期間，消防設備的有效性和完整性對於確保作業安全至關重要，我國核電廠陸續進入除役階段，但除役期間的核電廠將面臨不同以往的火災風險，由於除役期間電廠結構和操作的變化，火災風險和火載量都與運轉中核電廠有所不同。研究中根據國外法規、文獻、災例，探討除役期間核電廠容易發生火災的高風險區域及較容易發生的火災類型，藉由了解除役中核電廠的風險，核電廠須對相關火災風險及施工中的進度，定期評估，制定相因應的消防防護計畫。永久停止運轉後，消防防護目標不再是安全停機而轉變成保護用過燃料池中的用過核燃料，以防止火災造成放射性物質的外釋或擴散。火災風險分析應考慮可能增加的易燃物、使用明火及可能產生火花的施工作業及臨時結構及支持系統的變動。

除了消防防護計畫的制定，當火災發生時也必須依賴消防設備以達成除役期間的消防防護目標：快速偵測、控制和撲滅可能導致放射性危害的火災，本次研究藉由實地探勘核一廠內部的消防設備，對照國外的法規所建議除役中的核電廠應維持火警探測器、滅火器、自動滅火系統、消防栓設備的功能，進行比較，給予結論及建議。同時檢視核一廠除役計畫，分析除役期間潛在可能發生火災之工項、火災參數及相關安全影響，提出相關管制建議。

此次研究也根據檢視核一廠除役計畫暨實地探勘核一廠的經驗進行火災模擬，以火災發生狀況之危險度作為維護管理及相關策略之評估，並納入不同火源（火災危險度）、有無機械式排煙設備之情形比較。藉由模擬了解可燃物控管與消防設備設置對於火災的影響。

**關鍵字：**除役、核電廠、火災危害、火災防護、管制技術

## 英文摘要

During the decommissioning period of a nuclear power plant, the effectiveness and integrity of fire-fighting equipment are crucial to ensuring safe operation. The nuclear power plants in our country are gradually entering the decommissioning stage. However, nuclear power plants during the decommissioning period will face different fire risks than in the past. Due to the structure of nuclear power plant and operational changes, fire risks and fire loads are all different from operating nuclear power plants.

In the study, based on foreign regulations, literatures, and disaster cases, the high-risk areas and more likely types of fires in nuclear power plants during decommissioning were discussed. By understanding the risks of decommissioning nuclear power plants, nuclear power plants must be aware of relevant fire risks and regularly evaluate the progress of construction and formulate corresponding fire protection plans. After a permanent shutdown, the goal of fire protection is no longer to shut down safely but to protect the spent fuel in the spent fuel pool to prevent the release or spread of radioactive materials caused by fire. The fire risk analysis should consider the possible increase in flammable materials, the use of open flames and construction operations that may produce sparks, and changes to temporary structures and support systems.

In addition to the development of a fire protection plan, firefighting equipment must also be relied upon when a fire occurs to achieve the fire protection goals during the decommissioning period: quick detection, control, and suppression of fires that could lead to radioactive hazards. This study, through field investigations of the firefighting equipment inside the No. 1 Nuclear Power Plant, compares the recommended regulations for decommissioned nuclear power plants abroad, which suggest maintaining the functionality of fire detectors, extinguishers, automatic fire suppression systems, and fire hydrants. The study provides conclusions and recommendations. At the same time, the decommissioning plan for the No. 1 Nuclear Power Plant is reviewed, analyzing the potential fire hazards, fire parameters, and related safety impacts during decommissioning, and proposing relevant regulatory recommendations.

This study also conducted fire simulations based on the review of the decommissioning plan for the First Nuclear Power Plant and on-site inspections. The fire risk during incidents was used to evaluate maintenance management and related strategies. The study included comparisons under different scenarios, such as varying fire sources (fire hazards) and the presence or absence of mechanical smoke exhaust equipment. Through the simulations, the impact of combustible material management and the installation of fire protection equipment on fire behavior was analyzed.

**Keyword: Decommissioning, Nuclear power plants, Fire hazards, Protection, Control technologies**

# 壹、計畫緣起與目的

## 一、前言

隨著全球能源政策的調整及環境保護意識的提升，核電廠的除役作業逐漸成為各國面臨的重要課題。核電廠在運轉過程中產生的放射性物質和易燃材料使其在除役期間面臨潛在的火災危害，這些危害不僅可能影響除役工程的進行，還可能對周邊環境和人員安全構成威脅。因此，除役過程中的火災防護方案至關重要。本研究旨在分析核電廠除役期間的火災危害，並探討有效的火災防護方案，以期在安全性與經濟效益間取得平衡，確保除役工作的順利進行。

## 二、目的

本研究的主要目的為評估核電廠除役期間的火災危害特性，並針對其特性制定適合的火災防護方案與管制技術。透過火災動態模擬、文獻蒐集、災例分析及實地踏勘等方法，深入了解除役期間各階段的火災風險來源及防護需求。此外，研究亦探討現行消防法規在核電廠除役期間的適用性，並藉由參考國內外大型工地火災危險因子分析及防範措施，提出相應的改進建議，旨在提升核電廠除役期間的火災安全管理效能。希望藉由本研究成果，為核電廠除役過程中的消防安全維護提供科學依據及參考依據。

## 貳、 研究方法與過程

### 一、研究步驟

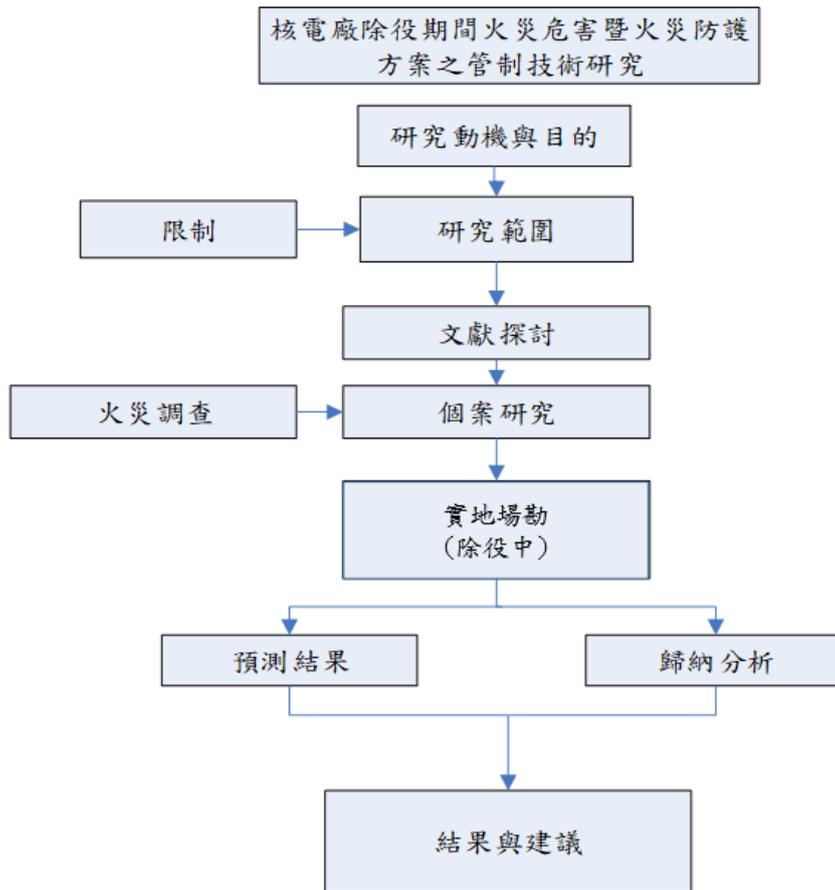


圖 1.本研究流程圖

(本研究整理)

### 二、文獻蒐集法

#### (一)國外核電廠除役期間火災防護法規介紹

10 CFR 50.48 、RG 1.189、 RG 1.191

##### 1. 10 CFR 50.48

10 CFR 50.48 是美國《聯邦法規》第 10 章（Code of Federal Regulations，CFR）第 50 部分的一部分，這部分法規針對核反應爐的設計、運轉和安全管理進行規範，而 50.48 條款專門針對核電廠的消防防護要求。

10 CFR 50.48 概述了民用核反應器設施的消防防護計畫，目的是確保核反應器在火災事件中依然能夠安全停機，並防止放射性物質的外釋。其主要內容包括：

1. 消防防護計畫的設立：要求持照者制定並實施消防防護計畫，以預防、檢測和抑制火災，確保在火災情況下安全停機能力的維持。
2. 符合特定防火標準：10 CFR 50.48(a) 和 (b) 部分分別描述了持照者需要遵守的標準。這包括在 1979 年之前開始運轉的反應爐設施的附加要求，這些設施需遵守 10 CFR Part 50, Appendix R 規定的額外消防防護措施。
3. 性能導向的防火選項：持照者可選擇基於性能的防火策略，例如 NFPA 805 標準，以替代傳統規範方法。這種性能導向的標準允許持照者通過風險分析和設計驗證來達成防火目標，提供了更多靈活性。

10 CFR 50.48 的要求適用於運轉中的核電廠，以及在符合規定下進行除役的核設施。

項目	內容
50.48	<p>(a)(1) 根據本條規定發放的運轉持照者或根據本章第 52 部分發放的綜合持照者必須擁有滿足本部分附錄 A 第 3 準則的消防保護計畫。該消防保護計畫必須：</p> <p>(i) 描述該設施的整體消防保護程序；</p> <p>(ii) 確定持照者組織內負責該計畫的各個職位；</p> <p>(iii) 說明授予這些職位執行其責任的權限；</p> <p>(iv) 概述消防保護、火災檢測和抑制能力以及限制火災損害的計畫。</p> <p>(2) 該計畫還必須描述為實施第(a)(1)段所述計畫而必需的具體特徵，例如：</p> <p>(i) 用於火災預防和手動火災抑制活動的行政控制和人員要求；</p>

項目	內容
	<p>(ii) 自動和手動操作的火災檢測和抑制系統；以及</p> <p>(iii) 限制火災對於安全重要的結構、系統或組件造成損害的手段，以確保安全停機的能力。</p> <p>(3) 持照者應保留消防保護計畫及其每次更改的記錄，直到委員會終止反應器執照。持照者應保留每次被取代的程序的版本，從被取代之日起保存 3 年。</p> <p>(4) 每個根據本章第 52 部分申請設計批准、設計認證或製造執照的申請人必須提供必要的標準廠火災保護設計特徵的描述和分析，以證明符合本部分附錄 A 第 3 準則。</p> <p><b>(b) 本部分附錄 R 規定了為滿足本部分附錄 A 第 3 準則而要求的消防保護特徵，適用於 1979 年 1 月 1 日之前獲准運轉的核電廠的某些通用問題。</b></p> <p>(1) 除了第 III.G、III.J 和 III.O 節的要求外，本部分附錄 R 的條款不適用於 1979 年 1 月 1 日之前獲准運轉的核電廠，只要：</p> <p>(i) 持照者提出或實施的消防保護特徵已被 NRC 工作人員接受為滿足附錄 A 至分支技術立場(BTP) APCSB 9.5-1 的規定，且該報告在 1981 年 2 月 19 日之前發出；或者</p> <p>(ii) 在附錄 A 至分支技術立場(BTP) APCSB 9.5-1 於 1976 年 8 月出版之前，NRC 工作人員在綜合消防保護安全評估報告中接受的消防保護特徵。</p> <p>(2) 關於附錄 R 所涵蓋的所有其他消防保護特徵，所有在 1979 年 1 月 1 日之前獲准運轉的核電廠必須滿足本部分附錄 R 的適用要求，包括特別是第 III.G、III.J 和 III.O 節的要求。</p> <p><b>(c) 美國消防協會標準 NFPA 805。</b></p>

項目	內容
	<p>(1) 授權納入引用。美國消防協會(NFPA)標準 805，"輕水反應爐電力發電廠消防保護的基於性能的標準，2001 年版"(NFPA 805)，在本條中引用，經聯邦登記處主任根據 5 U.S.C. 552(a)和 1 CFR 第 51 部分的要求批准納入引用。NFPA 805 的副本可通過 NFPA 客戶服務部購買，地址為：1 Batterymarch Park, P.O. Box 9101, Quincy, MA 02269-9101，或通過 NFPA 在線目錄 (<a href="http://www.nfpa.org">http://www.nfpa.org</a>) 以 PDF 格式獲取，或撥打 1-800-344-3555 或(617) 770-3000 進行查詢。副本也可在 NRC 圖書館、位於馬里蘭州洛克維爾的 Two White Flint North, 11545 Rockville Pike, Rockville, Maryland 20852-2738 進行查閱，及在 NRC 公共文件室、位於馬里蘭州洛克維爾的 Building One White Flint North, Room O1-F15, 11555 Rockville Pike, Rockville, Maryland 20852-2738 查閱。此外，副本也可在國家檔案和紀錄管理局(NARA)獲取。有關在 NARA 獲取此材料的資訊，可撥打(202) 741-6030，或訪問：<a href="http://www.archives.gov/federal_register/code_of_federal_regulations/ibr_locations.html">http://www.archives.gov/federal_register/code_of_federal_regulations/ibr_locations.html</a>。</p> <p>(2) NFPA 805 的例外、修改和補充。根據本條的使用，對 NFPA 805 的引用是指 2001 年版，並有以下例外、修改和補充：</p> <p>(i) 生命安全目標、目的標準。未採用第 1 章的生命安全目標、目的和標準。</p> <p>(ii) 電廠損壞/業務中斷目標、目的和標準。未採用第 1 章的電廠損壞/業務中斷目標、目標和標準。</p> <p>(iii) 使用充洩操作。在展示滿足第 1.5.1(b)和(c)節性能標準的過程中，壓力容器的高壓充水/注水泵與壓力容器的動力釋壓閥(PORVs)結合，作為維持反應器冷卻水存量、壓力控制和衰變熱移除能力的唯一火災保護安全停機路徑（即，充洩操作），在壓水式反應爐(PWRs)中不允許。</p>

項目	內容
	<p>(iv) 不確定性分析。根據第 2.7.3.5 節進行的不確定性分析不需要支持定論式方法計算。</p> <p>(v) 現有電纜。替代安裝符合第 3.3.5.3 節要求的火焰傳播測試之電纜，可以在電纜上施加阻燃塗層，或者安裝自動固定火災抑制系統以提供等效保護水平。此外，未採用對第 3.3.5.3 節的斜體例外。</p> <p>(vi) 水源和分配。未採用第 3.6.4 節的斜體例外。希望使用第 3.6.4 節例外的持照者必須根據本條第 (c)(2)(vii) 段提交執照修訂請求。</p> <p>(vii) 基於性能的方法。儘管第 3.1 節禁止使用基於性能的方法，但第 3 章的消防保護計畫要素和最低設計要求可以根據標準中其他地方允許的基於性能的方法。希望將這些消防保護計畫要素和最低設計要求採用基於性能的方法的持照者應提交執照修訂請求，格式為根據§ 50.90 的申請。核反應器管制辦公室主任或主任的指定人員可以批准該申請，前提是主任或指定人員確定該基於性能的方法：</p> <p>(A) 滿足 NFPA 805 與核安全和輻射外釋相關的性能目標、性能目標和性能標準；</p> <p>(B) 維持安全餘裕；</p> <p>(C) 維持防火深度防禦（火災預防、火災檢測、火災抑制、緩解和火災後安全停機能力）。</p> <p>(3) 符合 NFPA 805。</p> <p>(i) 允許持執照人可以維持一個符合 NFPA 805 的消防保護計畫，作為 1979 年 1 月 1 日之前獲准運轉的電廠或 1979 年 1 月 1 日之後獲准運轉的電廠的消防保護執照條件的替代方案。持照者應提交以 NFPA 805 為準的請求，格式為根據§ 50.90 的執照修訂請求。該申請必須標識出需要修訂或取代的任何命令和執照條件，並包含對電廠技術規格及其依據的任何必要修訂。</p>

項目	內容
	<p>核反應器管制辦公室主任或主任的指定人員可以批准該申請，前提是主任或指定人員確定持照者已確定需要修訂的計畫以符合 NFPA 805 的適用要求，並在其計畫中整合了滿足本條第(c)(2)(vi)段的要求。</p> <p>(ii) 本條(c)(3)(i)段的條款不適用於隨後獲得的執照。希望要求的持照者應提交根據§ 50.90 的執照修訂請求，並且不允許通過保留與 NFPA 805 不一致的計畫要求來取得執照。由於 NFPA 805 不涉及或不解決的消防保護問題，可能需要基於火災風險的評估；在這種情況下，應在基於風險的方法中保持安全餘裕。該提交內容應提供符合 NFPA 805 所描述的已識別火災風險的補充減輕措施的背景資訊。</p> <p>(4) NFPA 805 的遵循。持執照人必須根據本條(c)(3)(i)段的要求，根據 NFPA 805 的要求提交計畫，且必須根據 NFPA 805 的所有適用要求的評估和計畫的遵循來執行計畫。若持執照人不再遵循 NFPA 805，則應根據本條(c)(3)(i)段的要求將該計畫修訂為遵循第(a)段的要求。</p>

根據 10 CFR 50.48 的規定，核電廠必須制定符合消防保護計劃（FPP）的標準，以確保設施在運轉期間的安全性，並防止火災對公眾和工作人員造成的危害。具體而言，核電廠需要：

1. 建立消防保護計劃：計劃必須描述整體的消防保護計劃，確定負責該計劃的組織結構，以及其責任和授權範圍，並概述消防保護、火災偵測與撲滅能力和限制火災損害的計劃。
2. 包含特定功能：計劃需描述必要的具體特徵，例如火災預防和手動撲滅活動的行政控制與人員要求、自動和手動操作的火災偵測及撲滅系統，以及限制對安全重要的結構、系統或組件造成損害的措施，以確保能安全關閉電廠的能力。
3. 保留計劃記錄：持照者必須保留消防保護計劃及其每次變更的記錄，直到核電廠執照終止。

這些要求確保了核電廠在面對火災風險時具備足夠的防護措施，以保障公眾及環境的安全。

## 2. RG 1.191(2021 年 1 月修訂)

RG 1.191 是美國核能管制委員會 (NRC) 發佈的一份審查導則，完整名稱為「Fire Protection Program for Nuclear Power Plants During Decommissioning and Permanent Shutdown」(核電廠除役和永久停止運轉期間的消防保護計劃)。這份審查導則規範了核電廠除役階段的消防安全措施，幫助確保在除役過程中火災風險能被有效控制。

RG 1.191 的重點內容包括：

1. **消防需求的調整**：在除役進展且用過燃料移到乾貯設施或永久儲置場，消防要求可以視輻射危害消失而降低(scaled down)，但仍應確保關鍵風險受到控制。
2. **消防設備的持續監控**：要求保留足夠的消防監測和滅火系統，以應對潛在的火災風險，特別是在可燃物集中區域。
3. **人員訓練和緊急應變計劃**：針對除役期間的特定需求加強員工的消防知識和應變能力，包括定期演習和實地演練。

此管制審查導則 (RG) 1.191 描述了美國核能管制委員會 (NRC) 工作人員可接受的方式，用於確保核電廠除役期間的消防防護計畫符合規定。此審查導則適用於那些已永久停止運轉、且燃料已從反應爐中移除的核電廠。根據 10 CFR 50、10 CFR 50.82 的除役認證，核電廠除役期間仍需符合某些特定的消防規範。該審查導則適用於受 10 CFR 50 管制的反應器持照者。由於並非所有 NRC 規範都適用於所有電廠，持照者應參考其電廠執照，以確定特定消防法規的適用性。

RG 1.191 明確了在除役期間需保護的重要結構、系統和組件 (SSC)，如燃料貯存包封、用過燃料池及其冷卻與補給系統，但不適用於獨立燃料貯存設施 (ISFSI)。除役初期，停止運轉核電廠可能面臨劑量限制的挑戰，因此消防防護計畫需持續防範事故發生。10 CFR 20 的輻射防護標準適用於火災事故對電廠人員及公眾的劑量控制，並要求劑量保持在合理可達到的最低值。

美國持照者需於停止運轉後 60 年內完成除役作業，並可選擇 DECON (立即拆除) 或 SAFSTOR (延遲拆除)。DECON 方式是核設施永久停止運轉後即

刻清除受污染部分，以達到 NRC 執照終止的標準。而 SAFSTOR 是讓設施在放射性衰變的條件下維護和監控，待適當時機進行拆除和除污。

除役方式的選擇會大幅影響消防需求。與運轉中的反應器相比，永久停止運轉且反應器中無燃料的核電廠對公眾健康和安全的風險大幅降低。這是由於放射性物質的存量減少，以及可能突破屏障的能量密度降低，使得永久停運的核電廠給公眾帶來的風險預期顯著降低。儘管永久停止運轉的核電廠中防止放射性物質外釋的屏障數量和強度較低，但由於除役期間設備和操作的變化，火災風險和火載量可能實際上會增加。因此，消防防護計畫需隨著火災風險的變化進行調整和優化，以有效應對新的挑戰。羅列消防安全防護相關資料如下所示：

項目	內容
RG1.191 C	<p>除役中核電廠之消防防護計畫應每年評估一次。</p> <p><b>1. 消防防護計畫</b></p> <p><b>1.1 訂定消防防護計畫的目標為：</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>a. 避免火災。</li> <li>b. 快速偵測、控制並撲滅可能引發輻射危害的火災。應根據火災危害的程度提供適當的消防保護，包括偵測系統、自動或手動滅火系統、水源及緊急應變能力。</li> <li>c. 將可能導致放射性物質外洩的火災對公眾、環境和電廠人員造成的風險降至最低。</li> </ul> <p><b>1.2 消防防護計劃規範和標準</b></p> <p>消防防護計劃應基於完善的工程實務及既有的行業規範和標準，例如 NFPA（美國國家防火協會）所提供的標準。</p> <p><b>1.4 除役核電廠的消防防護計劃</b></p> <p>除役的初期，隨著燃料從反應器中移出並儲存在用過燃料池中，消防防護計畫應確保將可能影響用過燃料或其他放射性危害的火災發生可能性降至最低，並確保一旦發生火災的後果，能及時處理。隨著除役工作</p>

的推進，且燃料轉移後，核電廠輻射風險下降防火目標可隨之調整，但不可無消防防護計畫。

## **2. 火災危害分析**

火災分析是對設施的火災危害、已識別危險相關的消防對策以及保護燃料和其他放射性物質免受潛在火災引起外釋外洩的能力進行綜合評估。

### **2.1 火災危害**

火災危害應被具體識別，通常是按火災分區進行識別。正在進行除役的電廠其火災危害可能與正在運轉電廠的火災危害有很大不同，並且可能隨著除役的進展而改變。火災危害分析應考慮設備放置區、廢物堆積和儲存區因支持除役期間淨化和拆除活動所需之易燃物及相關材料的增加。除役期間使用明火及可能產生火花的施工作業活動增加。除役期間使用之臨時結構及支持系統（例如：電力、通風）亦可能增加火災危害。

### **2.2 設施配置與狀況**

火災危害分析應描述核電廠火災區域的佈局、配置和狀況，並應隨著除役各階段中的重大變更進行更新。設施結構的拆除或修改以及廠區系統的停用、修改或移除，可能會影響消防保護計畫的要素。

### **2.3 消防防護計畫要素**

火災危害分析應描述管理控制、實體防護特徵（火災探測、滅火系統和防火屏障）、排煙系統、緊急應變能力，以及任何其他相關的管理和實體消防保護計畫要素，以防範已識別的火災危害。

### **2.4 放射性危害和安全重要系統**

火災危害分析應確定火災區域的放射性危害，並適當地確定防止或減輕放射性物質外釋所必需的結構、系統和組件(SSC)，例如電廠通風系統。應考慮在含有放射性物質的地區進行滅火活動時，火流的控制。放射

性危害在除役期間，會隨著廠內除污、受輻射污染材料的移除、用過核燃料儲存位置的改變而產生變化。

### **3.6 消防系統和設備的控制**

#### **3.6.1 消防設備控制**

消防隊個人裝備，包括：裝備和呼吸器及定期清點、檢查、測試和維護，以確保性能正常。

手動滅火設備，包括：滅火器、軟管、噴頭、工具、配件、攜帶式照明設備以及通訊和通風設備，應定期清點、檢查、測試和維護，以確保在火災中正常運轉。

#### **3.6.2 消防系統和功能的檢查、測試和維護**

消防防護功能包括被動防火系統，例如：防火屏障和貫穿處密封。消防系統包括火災報警系統、滅火系統和消防給水系統。

#### **3.6.4 火區邊界或障礙物的控制**

由於施工造成防火屏障或貫穿密封處的破壞，應根據改造後屏障的耐火能力和相關的火災危害進行保護。

### **3.7 結構、包封和外部區域的控制**

#### **3.7.1 臨時包封和結構的控制**

消防防護計畫應能針對臨時包封和結構的建造所造成的火災危害進行應對；同時應評估每個臨時建築內部和外部自動或手動滅火能力的需求。

## **4 物理防火特性**

### **4.1 火災探測和報警系統**

運轉中核電廠其火災偵測設備通常設置於具火災隱患且足以對安全相關設備造成威脅之區域。

在除役期間，火災危害及相關偵測及報警需求可能發生顯著變化。防護重點自達成安全停機的安全相關設備轉成防止放射性物質的外釋或擴散，防護重點的改變可能需要重新評估探測和報警系統的設計，以確保充分解決除役引起的火災危害。

火災警報和監控設備之總機應設置在常時有人值守的地點。火災警報系統應能提供信號以通知電廠人員。可參閱 NFPA 72 “National Fire Alarm and Signaling Code”。火災自動警報系統應符合下列規定：

- a. 自動滅火系統的啟動會引發火災警報。
- b. 使用煙霧、溫度或火焰探測器（視情況而定）以及早發現火災。

警報系統應適當對自動滅火系統控制功能進行監督。

## **4.2 防火屏障**

### **4.2.1 指定防火區分區**

防火分區是為了防止或限制火災從設施的一個區域蔓延到另一個區域、保護人員並限制火災的後果。運轉中的機組，防火區域通常基於分離和保護安全停機系統的需要。除役期間應根據火災危害分析，重新指定防火區域，以解決除役期間不同的危害保護需求。

除役過程的要求。防火分區的設立應考慮存在的危害、特定區域發生火災可能導致放射性物質外釋到不可接受的程度；手動滅火有效遏制、撲救和控制火災的能力及人員安全撤離電廠的能力。

## **4.3 滅火系統**

### **4.3.1 消防供水**

除役期間，應對廠區消防供水系統進行維護，該系統應能夠供給自動滅火系統和手動消防所需的最大水流量並滿足以最大水量放水 2 小時的水流需求。在確定供水充足性時應考慮以下因素：

- a. 水源的可靠性。
- b. 水箱或其他水源、水泵、消防栓和分配系統的可用性。
- c. 足夠的流量和壓力，以滿足自動或手動滅火系統的需求或兩者同時。
- d. 供水水源和配水系統的容量。如果供水系統同時供給生活、工業和消防使用，則該系統應能夠提供最大日用水量或每小時峰值流量（以較高者為準），再加上消防所需的最大流量。  
除役活動可能會導致部分配電系統的隔絕、拆除或廢棄。應審查任何系統變更以確保有足夠的水源流量能為含有放射性物質的電廠區域、有火災暴露危害的放射性物質區域或具緩解放射性物質外釋所必需的系統提供足夠防護。

當溫度無法維持在 4 °C( 40°F )或以上時，應根據 NFPA 13“Standard for the Installation of Sprinkler Systems”保護撤水滅火系統組件免遭凍結。

在除役活動期間，應定期檢查撤水滅火系統組件的防凍保護。除役活動不應影響運轉單位的供水或多單位共享的消防供水和分配系統，並應保持能隔絕單位的能力。供水系統的設計和安裝應參考 NFPA 20 “Standard for the Installation of Stationary Pumps for Fire Protection”；NFPA 22 “Standard for Water Tanks for Private Fire Protection”； NFPA 24 “Standard for the Installation of Private Fire Service Mains and Their Appurtenances”和 NFPA 801。

#### 4.3.2 自動滅火系統

核電廠進入除役階段時存在的自動滅火系統應根據火災危害分析保持可運轉；這些系統應該能夠保護發生火災時電廠人員的疏散路線。

使用或儲存易燃或可燃材料的地方應配備自動滅火系統。為除役所需所建造新的或臨時的建築物可能需要安裝基於建築物的火災和放射性危害的自動滅火系統。選擇要安裝的滅火系統類型所要考慮的因素是火災危害和健康危害、滅火藥劑的清理以及滅火藥劑對重要 SSCs 的影響。自動滅火系統的設計、安裝和運轉應基於 NFPA 11 “Standard for Low-, Medium-, and High-Expansion Foam”； NFPA 12 “Standard on Carbon Dioxide Extinguishing Systems”； NFPA 12A “Standard on Halon 1301 Fire Extinguishing Systems”； NFPA 13； NFPA 15 “Standard for Water Spray Fixed Systems for Fire Protection”； NFPA 16 “Standard for the Installation of Foam-Water Sprinkler, and Foam-Water Spray Systems”； NFPA 17 “Standard for Dry Chemical Extinguishing Systems”； NFPA 17A “Standard for Wet Chemical Extinguishing Systems”； NFPA 75 “Standard for the Fire Protection of Information Technology Equipment”。

在除役期間，廠區對自動滅火系統的需求可能會發生變化，具體取決於一個區域中進行的操作類型、新增或移除可燃材料或放射性材料和污染物的移除。應審查廠區除役期間可能影響自動滅火系統需求的條件變化。

#### 4.3.3 手動滅火系統

電廠內應設置手動滅火系統，以支援自動滅火系統，並為未受自動滅火系統保護的區域提供滅火覆蓋範圍。除役作業可能會改變廠區配置和火災危害，可能需要建造臨時圍牆或結構，且隨著設施的拆除或改造

以及放射性危害的移除，可能需要放棄或拆除自動滅火系統。須根據除役火災危害分析提供或維持足夠的手動滅火能力，以防止火災引起的放射性物質外釋。

在評估手動滅火系統時，以下考慮因素很重要：

- a. 應維護立管和軟管系統，以提供手動滅火功能。包含廠區地上及地下的立管和軟管系統，需要從最近的消防栓鋪設長軟管的區域，或者需要限制空氣中放射性物質的區域。請參閱 NFPA 14 “Standard for the Installation of Standpipe and Hose Systems”。
- b. 提供手動滅火系統來補充自動滅火系統，或者在未安裝自動滅火系統且不需要快速控制火災的區域。是否需要手動滅火系統是基於對存在危害的考慮；特定區域發生火災可能導致放射性物質外釋的可能性；通過手動滅火有效遏制、撲救和控制火災的能力；以及人員安全撤離該地區的能力。
- c. 應維護外部消防栓和軟管房，以支持手動撲滅內部火災並防止含有放射性物質或具防止或減輕放射性物質外釋所必需的 SSCs 的廠區受到外部火災的威脅。請參閱 NFPA 24 了解更多信息和審查導則。

#### **4.3.4 現場消防隊和廠外火災應急響應**

現場消防隊或廠外緊急應變機構或兩者均應提供手動消防能力。制定火災應變計劃，描述對火災警報的處理以及緊急應變人員的任務分配（參見 Regulatory Position C.3.1、C.3.2、C.3.3 和 C.5.2）。有關消防活動、培訓、設備和火災應變計劃的資訊和審查導則，請參閱 NFPA 600、NFPA 801 和 NFPA 1500。在決定手動消防能力時應考慮以下因素：

- a. 存有放射性物質或污染廠區及其周圍潛在火災的規模和複雜性；

- b. 廠內任何時候皆有消防人員；
- c. 廠外緊急應變服務的可用性、人員和設備的能力、應變時間、人員培訓以及進入廠區現場的情況；
- d. 廠內消防系統與廠外應變人員的消防器材及設備的相容性。

手動滅火時應具備消防器材，包括水帶、瞄子、防護服、自給式呼吸器、通訊設備、救援設備、梯子、排煙設備、便攜式照明、便攜式輻射監測設備、滅火器和其他各式工具（參見 Regulatory Position C.3.6.1.）。

廠消防隊和廠外緊急應變機構應定期進行消防演練。有關消防隊和廠外人員培訓的信息，請參閱 Regulatory Position C.3.3.3。

## **5 危害管理**

### **5.1 人員安全**

消防防護計劃應在發生火災時確保人員安全。當電廠廠區發生變化，應明確建立和維護出口和疏散路線。應考慮煙霧對疏散人員的影響。應提供緊急照明和發出警報，並對人員進行適當的火災應變培訓。應制定政策和程序，制定在火災緊急疏散情況下實施的輻射控制和安全措施。NFPA 101 “Life Safety Code”對於確保人員安全提供更多訊息和審查導則。

### **5.2 緊急應變**

對於正在運轉的反應器，早期偵測及早期手動滅火能最大限度地減少火災對安全停機系統的損害，而安全停機系統是為防止反應器爐心損壞及接下來的輻射外釋。當反應器永久停止運轉並且燃料儲存在用過燃料池或乾式儲存容器時，滅火反應時間可能並不那麼緊

急。火災緊急應變能力取決於火災危害以及這些危害影響放射性物質的可能性。

消防防護計劃應明訂在火災緊急情況下持照者組織和廠外應變人員的責任分工。雖然準備充分、訓練有素、裝備齊全的廠內消防隊可以撲滅小規模火災，並對較大火災提供初步攻擊和控制，但人工撲滅大型建築物或廠區火災的主要力量應為裝備齊全的消防隊。如果廠外應變人員具備 Regulatory Positions C.3.1, C.3.2, C.3.3, and C.4.3.4. 中所述的必要資格和能力，可以提供此消防服務。如果持照者設有廠內消防隊，該消防隊的人員分配不應影響廠內員工對事件應變及維持電廠運作（例如安全、輻射控制和運轉）的能力。

應明確建立事件管理和指揮結構，包括廠內消防隊和廠外應變人員的滅火角色和職責。對廠外緊急應變人員的安全控制和輻射劑量測量應明確規定，且不應延誤應變。

## 6 NFPA 805 基於性能的消防防護計劃

本節為擁有經批准的 NFPA 805 消防防護計劃的持照者提供審查導則，以便在電廠運轉期間使用，證明其符合 NFPA 805 第 5 章“Fire Protection During Decommissioning and Permanent Shutdown.”，從而將其計劃轉變為滿足 10 CFR 50.48(f) 要求。隨著除役的進展以及燃料被移至 ISFSI 或永久儲存庫，過去滿足 NFPA 805 第 1 章核安全性能標準的消防程序控制、系統和功能，可以根據火災危害及危險物質和放射性物質向環境外釋的變化而相應地減少。

10 CFR 50.48(c) 中的法規規定了使用 NFPA 805 (2001 年版) 的基於性能的消防防護計劃，該計劃可以在除役過程中修改以解決除役期間的危害。然而，NRC 尚未將 NFPA 805 的後續版本或 NFPA 805 的任何附錄納入該規則。符合 NFPA 805 第 5 章和 NFPA

805 其他適用部分提供了可接受的基於性能的消防防護計劃。

NFPA 805 第 5 章適用於永久停止運轉的核電廠的發電設備廠區。發電設備廠區在被定義在持照者批准的 NFPA 805 消防防護計劃。發電設備廠區由具有核電廠運轉所需設備的結構組成。這些建築物一般包括圍阻體、輔助廠房、服務廠房、控制廠房、燃料廠房、放射性廢棄物、水處理、渦輪機廠房和進水結構。然而，在除役期間構成核電廠發電設備廠區的廠房可能會隨著除役期間滿足核安全性能標準所需的 SSCs 而發生相應的變化。如審查導則 Regulatory Position C.1.4 中所述，發電設備廠區還可能包括含有放射性危害的設施或直接支持除役過程的輔助設施（例如廠內廢棄物儲存）。

## 6.2 消防防護計劃

持照者的 NFPA 805 消防防護計劃應不斷更新，以適應除役過程中火災危害的變化以及放射性物質可能外釋到環境中的情況。消防防護計劃應建立管理控制措施，例如以下內容，如持照者的許可基礎中所述，Regulatory Positions C.2 and C.3 的適用部分對此進行了進一步描述：

- a. 管理控制火災危害的識別以及因除役而導致的火災緩解策略的變化；
- b. 管理控制火區邊界或屏障用於隔離具有重大危害的區域；
- c. 管理控制消防防護系統和其功能的測試、維護和可操作性；
- d. 管理控制一般防火措施，例如：可燃物和火源的管理；

e. 管理控制火災中對生命安全和疏散至關重要的電廠功能；和

f. 管理控制火警偵測、通知、消防和應變的能力。

### **6.3 供水**

除役期間，應對廠區消防供水系統進行維護，該系統應能夠供給自動滅火系統和手動消防能力所需的最大水流量。根據 NFPA 805 第 5.3.1 節，應對現場消防供水和分配系統進行評估以確保合規符合 NFPA 805 第 3.5 節“Water Supply”。本審查導則 Regulatory Position C.4.3.1 描述了決定消防供水是否充足時考慮的因素，包括消防供水、分配和輸送系統（例如撒水器和立管）的防凍措施。

### **6.4 自動和手動滅火系統**

NFPA 805 運轉期間消防防護計劃確定了自動和手動滅火系統，這些系統被認為滿足 NFPA 805 第 1 章的核安全性能標準或縱深防禦。在除役期間，持照者應不斷評估廠區，確定滿足許可中所述核安全性能標準所需的自動和手動滅火系統，並確保消防防護計劃與火災危害以及危險材料和放射性材料潛在向環境外釋的變化相符。自動和手動滅火系統的設計應滿足 NFPA 805 第 3.9 節的要求，氣體滅火系統的設計應滿足 NFPA 805 第 3.10 節的要求。

### **6.5 便攜式滅火器**

如 NFPA 805 第 5.3.3 節所述，便攜式滅火器應保留在除役計劃中描述的廠區內，直至可燃物和火源被移除。應根據 NFPA 805 第 3.4.4 節中討論的火災危害、電廠條件和必要的手動消防活動的變化安裝額外的滅火器。持照者應按照 NFPA 805 第 3.7 節所述維護滅火器。

## **6.6 立管和軟管站**

如 NFPA 805 第 5.3.4 節所述，現有軟管和立管系統應保持功能以支持除役計劃。本審查導則 Regulatory Position C.4.3.3 描述了維護立管和軟管站的其他注意事項。持照者應按照 NFPA 805 第 3.6 節所述維護軟管和立管系統。

## **6.7 廠內和廠外消防應變**

NFPA 805 第 5 章要求配備符合第 3.4 節的廠內消防隊。

持照者應繼續維護符合 NFPA 805 第 3.4.2 和 3.4.4 節的火災預防計劃和廠內消防隊設備。當該區域的佔用情形或火災危害因除役現況和活動而發生重大變化時，持照者應修改火災預防計劃。

如第 3.4.3 和 3.4.5 節所述，持照者應繼續維持廠區消防隊的演習和培訓，包括與廠外消防部門的聯繫。培訓水平、演習類型和廠外消防部門支援水準應持續並與除役活動期間的危害相符。

當 NFPA 805 第 1 章的核安全和放射性外釋標準不再適用於發電設備廠區時，廠區消防隊和 NFPA 805 第 5.3.5.2、5.3.5.3 和 5.3.5.4 節的規定將不再適用。

## **6.8 火警偵測和警報**

持照者應維護經批准的 NFPA 805 執照基礎中所描述的火警偵測和警報系統，以提供可靠的火災偵測方法，向經常有人值班的地點發出通知並向廠區消防隊和電廠人員發出待處理情況的警報。在除役活動期間，持照者應決定是否需要安裝或拆除火災偵測或警報系統，以保護 SSCs 滿足本審查導則 Regulatory Position C.6.1 中所述的核安全性能標準或與火災危害以及危險材料和放射性材料潛在向環境外釋的變化相符。火警偵測和警報系統的設計應符合 NFPA 805 第 3.8 節的規定。

	<p><b>6.9 密閉防火和防火屏障</b></p> <p>由於電廠在除役條件和活動期間發生變化，持照者應評估防火屏障和火區邊界存在的必要性，以隔絕火災危害；幫助有效遏制、撲滅和控制火災的能力；保護廠內人員疏散路線並最大限度地減少放射性污染的擴散。確定要保存的防火屏障應符合 NFPA 805 第 3.11 節以滿足被動防火功能的設計。</p> <p><b>6.10 生命安全</b></p> <p>應建立並維護出口和疏散路線。在確定出口路線和緊急照明是否充足時，應考慮除役活動期間廠區配置的變化。</p>
<p><b>APPENDIX A- LIMITED GUIDANCE ON CONSIDERATIONS OF FIRE PROTECTION FOR SELECTED FIRE AREAS, STRUCTURES, SYSTEMS, AND COMPONENTS</b></p>	<p><b>用過燃料池區及其他廠區</b></p> <p>如果用過燃料池區域和其他廠區的存在火災暴露危害或可能蔓延到用過燃料池區域，則應量化火災危害。應評估影響放射性材料（包括燃料）的潛在火災危害。</p> <p>應評估和保護與保護燃料和減輕任何放射性外釋所必需的結構、系統和組件 (SSC) 相關的電纜和設備免受火災影響。這些系統可能包括廠房通風、用過燃料池冷卻和補給、儀表和 control 以及電力。應保持額定防火屏障，將重大火災危害與對用過燃料池安全運轉重要的 SSCs 分開。NFPA 805 電廠可以在非功率運轉分析中使用先前批准的方法來確定 SSCs 所需的防火保護，以滿足本審查導則 Regulatory Position C.6.1 中所述的核安全性能標準。應盡量減少和控制可燃性材料的使用或儲存，並應限制在該區域內或附近進行動火作業。</p> <p>如果用過燃料池區域或其他廠區發生火災，可能會導致用過燃料池正常冷卻和補水系統喪失或用過燃料池快速損失，應評估維持燃料完整性和盡量減少放射性外釋可能性的能力，並應提供替代冷卻和補水能力。用過燃料池重建冷卻和補水能力的反應時間應根據維</p>

持燃料完整性的需要和緊急反應人員，包含消防員的放射性暴露限值不超標進行量化的情況。

對用過核燃料區域內的廠務管理、臨時可燃物和動火作業應根據既定程序進行管理控制。工作管理控制程序應確保除役期間與用過燃料池運轉和維護相關的活動，包括任何燃料移動或裝卸操作，如桶裝載和運輸，都受到適當的消防審查。

根據持照者的消防防護計劃的評估，應提供用過燃料池區域的煙霧探測和滅火能力。應設有火災警報器和人員疏散緊急照明。至少，手動滅火功能應可由便攜式滅火器和立管或軟管站或兩者提供。手動滅火系統應根據火災危險、疏散路線和火災攻擊策略提供足夠的覆蓋範圍。供水應足以滿足滅火系統的需求。

#### **放射性廢物堆積及儲存區域，包括臨時建築**

除役活動可能涉及產生固體和液體放射性廢物。應提供特定的廠區或單獨的建築物來儲存放射性廢物。電廠內可能需要設立廢棄物堆積區來維持特定除役活動。應每天將可燃性廢棄物從堆積區移至指定儲存區。廢棄物儲存和堆積區域應提供足夠的隔離並保護廢棄物免遭火災危險。用於臨時廢棄物儲存的臨時建築應符合適當的消防規範，並應設計成防止或盡量減少火災中放射性物質外釋的可能性。

應量化放射性廢棄物儲存和堆積區域的火災危害以及鄰近區域可能蔓延到廢棄物儲存和堆積區域的火災暴露危險。應評估影響放射性物質的火災危險的可能性。評估特殊危險，例如受污染的電纜和塑料，一旦點燃，可能難以抑制並可能釋放大量刺激煙霧和有毒氣體，妨礙消防和疏散工作。應根據需要提供抑制措施，以減輕煙霧、氣體和滅火活動中夾帶的放射性物質的外釋。NFPA 805 電廠應保持非功率條件下的放射性外釋評估，並在實施除役活動期間繼續滿足放射性外釋性能標準。

	<p>現有廠區內的放射性廢物儲存區域應提供足夠的防火措施，以盡量減少火災及隨後因煙霧、熱氣和滅火活動的直接影響而外釋的放射性物質。應酌情評估對保護放射性廢物和減輕任何放射性外釋所必需的 SSCs，並保護其免受火災的影響。這些 SSCs 包括提供隔離和限制、廠房通風、儀表和控制以及電力的結構。應保持額定防火屏障，將重大火災危害、廢棄物儲存和堆積區域以及對受污染廢物的安全儲存重要的 SSCs 進行區隔。如果無法提供足夠的隔離，則應盡量減少和控制可燃性材料的使用和儲存，並應限制在該區域內或附近進行動火作業。</p> <p>放射性廢棄物貯存區的臨時建築物應盡可能採用不燃材料建造。放射性廢棄物包裝應採用不燃或耐燃材料製成。廢棄物儲存區內應禁止或嚴格控制可能成為潛在火源的活動和設備。</p> <p>放射性廢物堆積或儲存區域應具備煙霧探測和滅火能力。應設有火災警報器和人員疏散緊急照明。至少應具備手動滅火能力，包括便攜式滅火器。應採取限制措施來控制自動或手動滅火，包括誤動的自動滅火系統可能造成的污染徑流。對於臨時建築，應根據火災危害和為防止或盡量減少由於煙霧、熱氣和滅火活動而可能外釋的放射性物質保持封閉的需要，提供自動或手動滅火或兩者兼有。自動和手動滅火系統應根據火災危害、疏散路線和火災攻擊策略提供足夠的覆蓋範圍。供水量應足以滿足自動（如果適用）和手動滅火系統的要求。</p> <p>應制定放射性廢棄物儲存和堆積區域內務管理、可燃物和動火作業的管理控制程序。</p> <p>應制定程序，關於放射性廢棄物儲存和堆積區域發生火災時的必要行動。例如，通風系統和任何其他建築物開口（例如：出入口）的配置應限制並盡量減少放射性物質外釋到環境中的可能性。應考慮廢棄物儲存區</p>
--	---

	的分布和立管的可用性（即避免軟管穿過門）以進行消防活動並同時保持足夠的密封性。
--	---

## 小結

永久停止運轉的核電廠在除役過程中，防火重點主要是保護用過燃料池中用過核燃料的完整性，並盡量減少火災導致放射性物質外釋的風險。雖然停止運轉後的反應器與運轉中的反應器相比，對公眾健康和安全的風險大幅降低，但由於除役期間電廠配置和除役作業，仍有可能導致火災風險，因此，消防防護計畫需根據除役動態變化調整。因此，消防防護計畫需根據火災隱患的變化動態調整，並確保在除役初期就將燃料及其他放射性物質的火災風險降至最低。火災風險分析應考量設備、廢棄物和儲存區中易燃材料的增加，以及拆除過程中明火和可能產生火花的工作活動。同時，臨時建築及支援系統如電力、通風設備也可能提升火災風險。消防防護計畫需針對這些臨時設施的火災風險進行管理，並評估各臨時建築的自動或手動滅火能力需求。核電廠除役的消防防護計畫應至少每年進行一次評估。

**偵測與警報設備：**除役期間防護重點的變化可能需重新檢視火災探測和警報系統的設計，以有效應對新增火災風險。警報主機應設置在有人值守的地點，並確保火災發生時能立即通知電廠人員。火災自動警報系統應符合以下規定：a. 自動滅火系統啟動即引發火災警報；b. 根據需求安裝煙霧、溫度或火焰探測器，以早期發現火災。警報系統應適當監控自動滅火系統的控制功能。持照者需在除役期間決定是否安裝或拆除火災探測和警報系統。

**滅火設備：**核電廠除役期間，需根據火災風險分析確保自動滅火系統的運轉，並提供人員疏散路線的保護。在存放易燃或可燃材料的區域，應配備自動滅火系統。對於新建或臨時建築物，根據火災和放射性危害需求安裝適當的自動滅火系統。滅火系統選擇應考慮火災和健康危害、滅火劑的清理難度及其對重要 SSC 的影響。

**手動滅火設備：**手動滅火系統補充自動滅火系統，並對未被自動滅火系統覆蓋的區域提供保護。除役可能改變廠區配置和火災風險，或需搭建臨時包封和結構，甚至拆除某些自動滅火系統。應根據火災風險分析維持足夠的手動滅火能力，以防止火災引發放射性物質的外釋。手動滅火系統需滿足以下要求：a. 維持立管和軟管系統，確保手動滅火功能；b. 在無自動滅火系統的區域提供手動滅火保護。所有自動和手動滅火系統設計應符合 NFPA 805 第 3.9 節要求，氣體滅火系統則應符合第 3.10 節。然而，根據 10CFR 50.48(c)的規定，NFPA805 僅為選項，並非強制要求，因此美國核電廠存在採用與不採用 NFPA 805 的情形。我國核

電廠則不採用 NFPA 805，而是依據現行的核能安全與消防法規要求進行火災防護設計與管理。對於不採用 NFPA 805 的核電廠，火災防護作法主要考量核電廠特性和廠區火災危害進行調整，包括：針對除役期間廠房內的火災風險進行具體評估，制定適合需求的防火管理措施，例如臨時火災防護設備的佈署，以及針對原有滅火系統（如立管與滅火器等）進行定期檢查與功能測試，必要時採取補充或替代措施以滿足防護要求。

**滅火器：**在除役計畫期間，應根據火災風險及廠區條件保留或新增滅火器，直到所有可燃物及火源被移除為止。

**用過燃料池區及其他廠區：**用過燃料池區需配備煙霧探測和滅火設備，並設置火災警報器及疏散照明。手動滅火可由滅火器、立管或軟管提供。放射性廢棄物存放區需具備煙霧探測及滅火能力，同時配備火災警報和緊急疏散照明，至少應具備手動滅火能力。臨時建築需根據火災風險提供自動或手動滅火系統，並確保供水量滿足需求。

### 3. RG1.189 (2023 年 10 月修訂)

RG 1.189 是美國核能管制委員會 (NRC) 發布的管制審查導則，標題為《火災防護審查導則方針》(Fire Protection for Nuclear Power Plants)。這份審查導則提供了核電廠在運轉期間防火設施的設計和維護標準。它針對核電廠持照者提供了一套符合 NRC 規定的防火措施，以確保在火災發生時能夠有效保護核設施，防止放射性物質的外釋並保障人員和公眾安全。

RG 1.189 提供了設計、安裝和測試防火系統的建議，包括滅火系統、火災探測和警報系統、防火隔間設計等。它還包括對火災風險評估和管理的審查導則，協助核電廠管理火災危，並對火災防護措施進行必要的優化。

本管制審查導則 (RG) 說明了美國核能管制委員會 (NRC) 工作人員可接受的符合《聯邦法規》第 10 章 (10 CFR) 第 50.48(a) 和 (b) 節的合規方法，並包含 10 CFR 第 50 部分附錄 R 的要求，針對 1979 年 1 月 1 日前營運的核設施制定了消防防護計畫 (FPP) 的標準。本審查導則提供了民用核電廠消防防護計畫的必要審查導則。

2023 年版 (RG 1.189 第 5 版) 與 2021 年版 (RG 1.189 第 4 版) 之間的主要差異在於修訂性質，2023 年版主要進行了行政修正，而非技術性更新。此次更新修

正了文字錯誤，特別是在第 5.3.1.1 節「Protection for the Safe-Shutdown Success Path」部分，針對 2021 年版第 79 頁的標號錯誤進行了調整。此外，2023 年版對文件格式進行了微調，以符合最新的 NRC 審查導則文件模板，提升文件的清晰度，但並未對原有的審查導則方針進行實質性修改。此版本也修正了某些參考資料的編號錯誤，以提高文件的可用性，這些改動並不影響審查導則文件的建議或要求。簡言之，2023 年版的更新對技術審查導則及核電廠消防計劃的建議方法沒有影響，核心內容與意圖在兩個版本之間仍一致。

項目	內容
<p><b>RG1.189 C.1</b></p>	<p><b>1. 消防防護計畫</b></p> <p>根據 10 CFR 50.48，每個運轉中的核電廠必須具備消防防護計畫。計畫應建立消防防護政策，保護對安全至關重要的 SSCs，以及實施該計畫所需的程序、設備和人員。美國核電廠消防防護計畫的主要目標是為減少火災的發生和後果。為了實現這些目標，運轉中核電廠的 FPP 旨在通過深度防禦提供合理的保證，確保火災不會妨礙必要的安全停機功能的執行，並且發生火災時外釋到環境中的放射性物質將降至最低。</p> <p>FPP 應將深度防禦的概念擴展到對安全重要的火災區域的消防，以實現以下三個目標：</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>a. 防止火災發生。</li> <li>b. 迅速發現、控制並及時撲滅確實發生的火災。</li> <li>c. 為對安全重要的 SSCs 提供保護，以便火災無法及時被撲滅時，不會妨礙電廠的安全停機。</li> </ol> <p>根據 10 CFR 50.48，消防防護計畫必須做到以下幾點：</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>a. 描述該設施的整體 FPP。</li> <li>b. 確定持照者組織內負責該計畫的各個職位。</li> <li>c. 說明為履行這些職責而授予每個職位的權力。</li> <li>d. 概述防火、火災探測和滅火以及限制火災損失的計畫。</li> <li>e. 描述消防和手動滅火活動的管理控制和人員要求。</li> <li>f. 描述自動和手動操作的火災探測和滅火系統。</li> </ol>

項目	內容
	g. 描述限制對安全重要的 SSC 造成火災損害的方法，以確保能夠安全關閉電廠。

#### 4. NFPA805 (2020 年)

NFPA 805 是《美國國家防火協會第 805 號標準》(Performance-Based Standard for Fire Protection for Light Water Reactor Electric Generating Plants)，為輕水反應器核電廠提供基於性能的防火標準。

NFPA 805 的關鍵特點包括：

1. **性能導向**：NFPA 805 採用了性能導向的方法，允許核電廠持照者通過設計、分析和測試來證明其防火措施的有效性，而不僅依賴傳統的規定方法。
2. **火災風險評估 (FRA)**：標準要求核電廠進行火災風險評估，以識別火災可能的發生地點、影響範圍以及對安全的潛在影響，確保火災風險在可接受範圍內。
3. **設備和系統安全**：採用 NFPA 805 持照者應確保安全關鍵設備和系統（例如安全停機和放射性外釋防護設施）在火災情況下依然可用。此標準的目標是減少火災對核電廠安全的影響，並保護公眾和工作人員的健康與安全。

本標準規範了輕水反應爐核電廠在各運轉階段(如運轉、停機、降級條件及除役)中的最低防火要求，旨在保護反應爐安全運轉，並確保公眾、環境及工作人員免受電廠火災可能帶來的影響。

項目	內容
<b>Chapter 7</b>	<p><b>1.1 目的</b></p> <p>7.1.1 本章適用於已永久停止運轉的核電廠。</p> <p>7.1.2 隨著除役的階段進展及用過核燃料轉移至獨立的儲存場所或永久儲存地點，其消防系統仍應符合第一章性能標準之規定。</p> <p><b>1.2 消防防護計畫</b></p> <p>7.2.1 核電廠應持續依第 5.2 節之規定維持其消防防護計畫。</p> <p>7.2.2 該消防防護計畫應能支持除役計畫。</p>

項目	內容
	<p>7.2.3 消防防護計畫隨著火災風險的變化及危險和放射性物質外釋至環境的潛在風險而變動，內容應包含：</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>(1) 對火災風險的識別以及因除役而導致的火災應變策略的變化。</li> <li>(2) 防火區劃或用於隔離具有重大風險區域的屏障。</li> <li>(3) 消防系統和所需功能的測試、維護和可用性的管理控制措施。</li> <li>(4) 對一般防火活動的管理，例如控制可燃物和火源。</li> <li>(5) 與生命安全和發生火災時核電廠疏散相關的功能。</li> <li>(6) 對火災探測和警報、消防和應變能力的管理。</li> </ol> <p><b>1.3 維持消防防護能力</b></p> <p>7.3.1 供水 應滿足現場消防水量及分配系統需求，且須提供足夠熱量以保護消防給水、分配、輸送系統免於凍結。</p> <p>7.3.2 自動撒水系統 既有已存自動灑水設備之區域應繼續維持作為基礎防護，應維持功能直到對第一章性能標準不再予以依賴，且與除役相關的火災風險已顯著最小化。</p> <p>7.3.3 滅火器 根據 NFPA10 於除役的核電廠中仍應保留直到可燃物及火源移除。</p> <p>7.3.4 立管及軟管 於除役計畫中仍應維持功能。</p> <p>7.3.5 廠內及廠外消防應變 除役期間廠內消防隊及消防設備要求應符合第 5 章規定，當區域占用及火災風險變化時，應變計畫應進行修改，同時消防隊的演習及訓練應與火災風險相符。</p> <p>7.3.6 火災探測及示警 在除役期間仍應有適當設備檢測火災並向值班人員發出示警以通知廠內消防隊及工作人員採取應變。</p> <p>7.3.7 侷限火災 應評估防火屏障及防火區劃以應對除役期間的變化，並根據需要進行維護，以達成以下目的：</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>(1) 隔離火災風險</li> </ol>

項目	內容
	(2) 協助抑制、撲滅及控制火災 (3) 保護人員疏散路線 (4) 盡量減少放射性污染的發生  7.3.8 生命安全 建立並維護出口及疏散路線，當除役期間廠區環境改變時應考慮緊急照明及疏散報警的需求。

## 小結

在核電廠除役過程中，由於結構拆除、設備停用和重新配置等工作增加了火災危害來源，因此對火災防護系統的靈活性和有效性要求更高。

若核電廠不採用 NFPA 805，則應根據其他適用規範並結合場地特性進行調整。同時，針對高風險區域強化火災監測、通風設計與應變處置能力，以減少火災對核能安全的影響。此外，透過火災風險分析精確識別高風險區域，優化消防設備和人力的配置，確保資源有效運用。這些國外法規和實務經驗為核電廠除役期間的火災防護提供了寶貴參考。透過性能導向的設計方法、詳細的防護計劃及全面的風險評估，核電廠可在確保防火安全的同時減少資源浪費，打造穩健的火災防護體系，確保除役階段的安全與順利進行。

## (二)國內文獻

有關除役期間國內核電廠消防面向文獻，彙整如下：

表 1 國內核電廠除役期間消防安全文獻彙整表

(本研究整理)

序號	作者/年度	著作名稱	內容摘要
1	沈子勝/2015	核電廠火災危害分析技術之研究	此研究參照 NFPA 804 及 805 整合評估表，用以評估各場所設置設備的標準，並以電腦模擬軟體進行火災模擬分析。模擬的主要部分集中在電纜分配室的撒水系統在不同條件下的滅火成效。模擬結果顯示，撒水系統的配置

序號	作者/年度	著作名稱	內容摘要
			<p>對滅火成效有顯著影響，適當的噴頭位置和啟動時間可以有效控制火勢，減少火災對電纜和設備的損害。這些模擬數據為電纜分配室的防火設計提供了重要的參考依據，並進一步驗證了性能式設計在核電廠消防安全中的應用價值。</p>
2	莊凱宇/2019	國家關鍵基礎設施風險評估之研究-以核電廠除役風險管控為例	<p>此報告探討了關鍵基礎設施（Critical Infrastructure, CI）在面臨各種災害時對國家的重要性，並以2001年美國911事件、2004年南亞大海嘯及2011年日本311大地震為案例，強調關鍵基礎設施失效對國家經濟和安全的深遠影響。研究重點集中於台灣的核能基礎設施，尤其是核一廠在2018年和2019年除役過程中的風險管控。研究旨在建立一套完整且有效的風險指標和網絡架構，並透過一致性模糊偏好關係法（CFPR）製作問卷，調查實際從事核電廠除役的專業人士。研究結果提出幾項建議，包括確保冷卻系統的穩定性、加強作業場所防護以避免輻射事故、提升實體防護以防止外部破壞、提高人員的安全意識，並注意台灣與國外除役現況的差異。期望這些建議能為核電廠相關單位提供參考，以有效管控風</p>

序號	作者/年度	著作名稱	內容摘要
			險並減少衝擊。
3	黃智鴻/2020	國際核電廠除役成本與事故風險簡析	<p>報告中探討核電廠除役的成本估算及事故風險評估。報告首先介紹了核電廠除役的背景，特別是在我國核能政策轉變的情況下，核一廠已在除役中，核二廠和核三廠也將於未來幾年內停止運轉。</p> <p>報告引用了 OECD 的研究，強調除役成本的估算需考慮多方面因素，包括電廠運轉期間的除役基金、不同策略的成本比較、長期預算與現金流的準備，以及專案管理的工具。透過國際間的問卷調查，報告彙整了多國核電廠除役的最新數據，並分析了各類型反應爐的除役成本結構。</p> <p>此外，報告還探討了核能事故的風險，指出核電廠的事故致死率相對較低，但一旦發生事故，可能造成的最大傷亡人數卻可達上萬人。報告中也提供了瑞士和日本的事務風險成本評估數據，並對未來核電廠除役的規劃提出建議。</p>

### 小結

在除役核電廠的風險管理方面，這 3 篇研究提供了多角度的分析和具體建議。沈子勝（2015）的研究透過火災模擬技術，評估了電纜分配室的消防設施配置，說明了適當配置撒水系統可有效控制火災風險，為電纜分配室的防火設計提供了有力依據。這有助於除役階段更精準的消防安全規劃。

莊凱宇(2019)和黃智鴻(2020)則聚焦於核電廠除役過程中的風險與成本控制。莊凱宇建立了一套風險指標，特別強調安全意識與冷卻系統的重要性，並提供了加強防護的建議，旨在確保除役期間的安全運轉。黃智鴻則從成本視角分析了除役策略，提出精確的成本估算與長期預算規劃方法，強調了除役基金管理和國際參考數據的重要性，以便在風險評估中達成穩定的成本控制。

這些研究為核電廠除役過程中的風險評估、安全管理、成本控制與技術應用等方面提供了實務上的建議與理論支持，並強調了綜合性風險管理在除役過程中的必要性。

### (三)國外文獻

有關除役期間國外核電廠消防面向文獻，彙整如下：

表 2 國外核電廠除役期間消防安全文獻彙整表

(本研究整理)

序號	作者/年度	著作名稱	內容摘要
1	Rebekka Barenbold, Muhammad Maladoh Bah, Rebecca Lordan-Perret , Bjorn Steigerwald , Christian von Hirschhausen , Ben Wealer , Hannes Weigt , Alexander Wimmers /2024	Decommissioning of commercial nuclear power plants: Insights from a multiple-case study	核設施的除役研究在西方國家具有重要性，此研究透過跨國案例探討除役涉及的制度、法規、財務和技術體系。不同國家核設施擁有結構因法律而異，可分為中央化和分散化形式，且放射性廢棄物處置方式包括低、中、高放射性廢棄物的處置選項。除役市場、法規和實踐的發展背景受核工業發展和衰退影響。
2	Kwan-Seong Jeong, Hyeon-Kyo Lim /2009	Factor analysis on hazards for safety assessment in decommissioning workplace of nuclear	根據此篇文獻，人們對某種危害的恐懼程度越高，其感知風險就越高。專家通常將風險與年度死亡率相關聯，可能導致風險上的分歧。語

序號	作者/年度	著作名稱	內容摘要
		facilities using a semantic differential method	<p>意差異法可用於檢測態度，並通過評估概念與一系列對立形容詞對進行判斷。在進行風險評估時，應了解潛在危害的特徵，並深入了解與核設施解除使用相關的因果關係。工作人員在解除使用過程中可能面臨輻射和非輻射危害，需採取措施保護其安全。因此，核設施的解除使用必須根據結構條件和輻射特性進行，並需要開發定量和概率安全評估方法，以有效評估和降低解除使用任務的風險和危害。</p>
3	Kwan-Seong Jeong, Byung-Seon Choi, Jei-Kwon Moon, Dong-Jun Hyun, Jong-Hwan Lee, Geun-Ho Kim, Ho-Sang Hwang, Seong-Young Jeong, Jung-Jun Lee /2014	Risk reduction approach to decommissioning hazards of nuclear facilities	<p>此篇報告提出了核設施除役過程中可能出現的爆炸、有毒物質、電氣和物理危害，並提出了放射性和非放射性危害的風險評估方法以及相應的對策。對於放射性風險，根據嚴重程度和頻率進行模糊推論，而對於非放射性風險，則根據嚴重程度和頻率進行風險計算。建議採取措施如提供個人防護裝備、應用管理控制、源頭減量和系統設計等來應對這些危害。</p>
4	KwanSeong Jeong , DongGyu Lee,KuneWoo Lee,HyeonKyo Lim/2008	A qualitative identification and analysis of hazards, risks and operating procedures for a decommissioning safety assessment of a nuclear research reactor	<p>在拆除反應爐核心的操作中，保健物理人員將全程參與，且只有必要參與項目的人員才能進入受控區域。所有工作人員將穿著適當的防護服，配備輻射劑量計和個人警報器，並需佩戴安全帶。</p>

序號	作者/年度	著作名稱	內容摘要
			<p>操作將提供手動處理評估和適當的提升工具，所有電氣隔離將由經批准的人員執行，並提供隔離證書。所有操作將受工作執照控制，以確保操作的嚴謹性和安全性。此外，應注意火災危害，並採取相應的預防措施以確保操作期間的火災安全。這些操作過程中的安全措施不僅保障了輻射安全，也有助於降低火災風險，同時需要考慮到裝備在高溫環境下的影響。這些因素在火災危害分析評估中將被全面考慮。</p>
5	<p>Kwan-Seong Jeong, Byung-Seon Choi, Jei-Kwon Moon, Dong-Jun Hyun, Jong-Hwan Lee, Geun-Ho Kim, Ho-Sang HwangSeong-Young Jeong, Jung-Jun Lee/2014</p>	<p>Risk reduction approach to decommissioning hazards of nuclear facilities</p>	<p>本文討論了拆除案件中安全的重要性，特別是針對核設施拆除活動中的放射性和非放射性危害進行風險評估和控制。放射性危害包括暴露、臨界性和破壞（失去）遏制等類別，而非放射性危害則包括火災、爆炸、有毒物質、電氣和物理危害等。文章提出了對這些危害的對策，包括系統設計、重新設計、消除危害和風險等方法。通過對韓國研究反應器-2 (KRR-2) 的案例研究，成功應用了相應的方法論。火災危害的部分，主要涉及到拆除過程中可能發生的火災危害風險評估和控制措施。文章中提到了對爆炸、火災和其他危害的風險評估，並強調了在</p>

序號	作者/年度	著作名稱	內容摘要
			<p>拆除過程中需要注意火災危害的重要性。此外，還提到了應該採取的措施，如提供個人防護裝備、應用管理控制措施等，以確保工作人員的安全。</p>
6	Monideep K. D./1992	Evaluation of Fire Models for Nuclear Power Plant Applications: Cable Tray Fires	<p>此報告旨在比較兩種火災模擬軟體（Fire Dynamic Simulator，FDS 和 Consolidated Fire and Smoke Transport, CFAST）在評估電纜與火源之間的水平安全距離方面的效果。研究設置了電纜分配室，並在不同高度和水平距離的電纜上進行測試，以一個熱釋放率為300KW的垃圾桶作為火源，來評估其對電纜的影響及確定最小安全距離。報告中建議在核電廠火災模擬中使用FDS，以提高模擬結果的準確性和可靠性。</p>
7	Rika Hirose, Darren McCauley	The risks and impacts of nuclear decommissioning: Stakeholder reflections on the UK nuclear industry	<p>核電廠受污染的基礎設施必須除役，新產生的廢物必須加以控制，以防止對周圍環境造成破壞。然而，人們對核除役產生的影響和風險缺乏了解。討論必須包括但不限於此過程的技術風險或環境影響。我們需要更全面地檢查社會經濟和其他相關因素，包括管制框架。該過程的技術風險或環境影響。我們需要更全面地檢查社會經濟和其他相關因素，包括管</p>

序號	作者/年度	著作名稱	內容摘要
			制框架。該過程的技術風險或環境影響。我們需要更全面地檢查社會經濟和其他相關因素，包括管制框架。
8	Sue-Ray Lin, Hsoun-Wei Chou, Jien-Jong Chen/2022	International case survey and literature review of maintenance strategy for decommissioning nuclear power plant during transition period	介紹國際上永久停機但燃料還在反應器爐心的案例，也描述了台電對此的應對措施。為了提供管制建議，提出了與 2018 年以來過渡期重要問題相關的維護戰略框架，包括修訂後的老化管理計劃 (AMP)，以保持燃料的安全。從主題相關的知識層次和重要問題，引用現象識別和排序表 (PIRT)，完成過渡期需求的理解層次。
9	Gi-Lim Kim, Hyein Kim, Hyung-Woo Seo, Ji-Hwan Yu, Jin-Won Son	Classification and consideration for the risk management in the planning phase of NPP decommissioning project	研究中，從除役風險管理 (DRiMa) 項目中得出的風險族被重構為適合古里 1 號機組的除役項目風險概況。考慮了不確定性和重要性兩個標準，以便對選定的 26 種風險進行優先排序的除役項目。不確定性根據相關法律和除役計劃編制審查導則進行評分，項目重要性根據其主要影響項目三重約束的程度進行評分。結果風險分為高、中、低。其中，10 項風險被認定為中等風險，16 項風險被認定為低等風險。10 項中等風險分為五類：除役項目的最終狀態、廢物和材料的管理、除役策

序號	作者/年度	著作名稱	內容摘要
			略和技術、法律和管制框架，以及安全。本研究是對除役項目風險的初步評估，可以在準備階段考慮。
10	Yujie Sun, Tengfei Yuan, Xiang Chai, Changzhi Chen/2023	Emergency evacuation time model of nuclear power plant pedestrians	用基於多智能體的建模仿真方法對核電廠內的人流進行模擬，輸入行人疏散空間的長度和寬度以及人流信息來定義模擬環境，得出結論為多智能體人流模擬方法可以很好地應用於核電廠應急疏散。
11	Matthias Siemon, Olaf Riese, Burkhard Forell, Dominic Krönung, Walter Klein-Heßling	Experimental and numerical analysis of the influence of cable tray arrangements on the resulting mass loss rate and fire spreading	核電廠建築物的主要火災風險來自於電氣裝置和電纜托架。為了有效管理這些風險，需要全面評估火災可能帶來的後果，特別是對相鄰空間和設施的影響，並深入了解燃燒行為的關鍵參數。電纜火災的研究指出，測試中選用的電纜材料、電纜托架的安裝方式及電纜容量等方面，與現代標準和法規存在一定差異，而電纜包覆狀況及安裝密度對燃燒行為和火勢傳播有顯著影響。因此，透過數值模擬火勢延燒並優化電纜配置，可以更準確地預測火災擴散情形，進而制定針對性的防火策略，以減少火災對核電廠建築物及相關設施的潛在威脅。

## 小結

這些文獻主要聚焦於核設施的除役及其安全風險管理，涵蓋了從除役規劃、風險評估到應變疏散等多個方面。在核設施除役過程中，不同國家因法規和技術系統的差異，針對放射性廢棄物的處理、財務與技術管理有不同的策略。此外，在進行風險評估時，必須針對輻射和非輻射危害制定風險減少策略，並根據具體的危害特徵採取相應的控制措施。

許多國外文獻之研究重點放在核電廠火災危害，其中指明電氣裝置及電纜托架被認為核電廠建築物的主要火災風險來源。然而在我國核電廠除役期間要執行拆除作業前，現行系統、組件已不運轉，電氣裝置和電纜都會斷電，相較營運中之核電廠，較無電器火災之風險，然而仍須注意施工現場之用電安全、注意臨時電盤及其臨時供電設備。針對拆除階段的火災風險管理，還需要針對防護裝備、系統設計等方面採取嚴格的措施，確保拆除過程的安全性。這些研究提出了核設施除役過程中多方面的安全考量和必要的防護策略，對於核電廠除役和火災風險的辨識具有一定的參考價值。

### 三、案例分析法

#### (一) 日本案例-大型核電廠火災 1-玄海核電廠火災

在 2022 年玄海核電廠的除役工程報告中(2022，九州電力株式會社)中核電廠發生了以下事件

1. プラギングデバイス(Plugging Device)歪斜
2. 起重機吊勾落下
3. 因斷路器裝置錯誤導致玄海變電所火災
4. 起重機鋼絲斷裂
5. 臨時電盤電線短路起火
6. 壓路車壓傷人員
7. 空調裝置變壓器起火
8. 大型工程現場臨時電盤支撐架脫落電線走火
9. 鋼筋掉落砸傷鄰棟施工工人

針對 3、5、7、8 項，為本次研究中可參考所需要防範的對象主體之一。本次報告一觀念指出土木建築施工者，會對於電力工程的概念就會較為薄弱，因此若使其架設臨時電盤、電線時，其出錯的可能性就會比較高。因此拆除對象物主體若非電機專業出身時，就必須要加強其用電安全的相關知識，或使拆除承包公司配置具有電力安全防範背景之工程師或施工人員，大幅強化用電之安全，防範電線過載、短路走火、過熱的可能性。同時應使用「點檢表」的概念，定時對於電線、電盤進行盤查，檢視其安全使用狀況才行。若出現電線外露，插頭鬆脫等情況出現，應依照其專業判斷，停止進行作業，待改善後方可繼續動工。

因此對於：

- 3.因斷路器裝置錯誤導致玄海變電所火災
- 5.臨時電盤電線短路起火
- 8.大型工程現場臨時電盤支撐架脫落電線走火

皆可以透過配置專業技術之電工安全人員來防止火災發生。

針對第 7 項:空調裝置變壓器起火的部分，雖然非因施工因素所引起的，但也是可能會致成重大火災的原因之一。根據調查報告中指出，其火災發生的原因是變壓器設置不良的原因所導致，其未考慮足夠之內部熱效應，產生過熱的情況發生。核電廠中，因場域密閉性甚高，其空間內部就很仰賴空調、通風系統的運作。因此在該系統的設計使用上需要格外注意。玄海核電廠之變壓器的設置和保溫泡棉十分接近，過熱之變壓器造成保溫泡棉的燒焦、過熱，並造成待有溫度的黑煙(SOOT)，影響造成警報系統作動。保溫棉的主要材質為 PE，雖為隔熱材質，但其耐熱溫度為-40 度至 80 度，當材質到達 80 度時，雖然不會立即起火，但會在表面形成無焰燃燒，當煙和熱不斷的提高，仍有可能造成 PE 泡棉的點燃。

本案例的熱源在於變壓器，變壓器的設備，應該要檢查受到檢查其功能性，必要時要將其換新，做好保養和維修。並且其裝設位置要盡可能地遠離管線、泡棉以及可燃物。

本次報告中歸結了以下三個重點

- 1.安全意識必要具體化
- 2.工地危險辨識能力不足
- 3.施工人員對核能設施之與特殊性理解不足

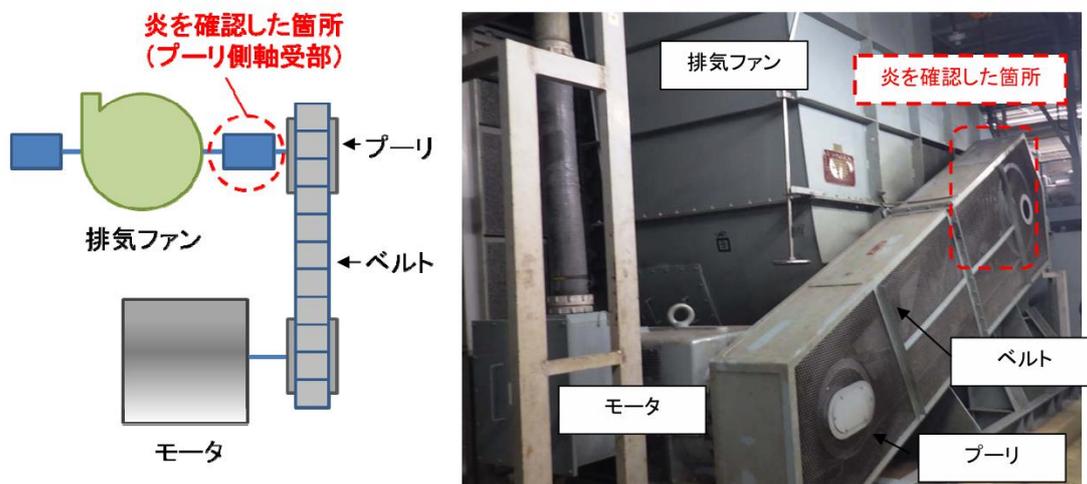
其中第一點，安全意識需要具體化，需要具體告知施工人員哪些物品可能致成火災的發生。如斷路器的裝設不可以裝反、電線的隨意過度纏繞會提高短路的風險。

其二，工地危險的辨識。若發現臨時電盤的電線產生拉扯、鬆脫時，或是電線發生短路、過熱狀況時，就必須要有自覺要停止使用，首先要改善可能引發之潛在危險狀況才是。

最後一點，須要讓全體施工人員重視核能設施之特殊性及獨特性，雖說核電廠的除役過程和大型工地現場類似，但要讓施工人員理解可能會造成的嚴重性，並會附以相應的附加責任，那會讓施工人員更加重視核電廠除役的施工。

## (二)日本案例-大型核電廠火災 2- 2017 濱岡核電廠空調機房火災

濱岡核電廠 2 號機建物 3 樓空調機房其中一座風機帶動軸承馬達，其運轉時起火燃燒並被該室之火警探測器偵測到，消防部門趕往現場後立即關閉排氣設備，並迅速於一小時內控制火勢。如下報告示意圖



火災発生現場

圖 2.空調機房火災起火點示意圖

(資料來源:中部電力株式會社)

馬達於通電運轉中，皆具有起火的風險。因為核電廠廠房的高密閉性，其室內空間的通風仰賴風機長時間的運轉，軸承和線圈是非常大的起火風險因子。因此在設置時需要選用檢驗合格的馬達廠家並聘請具有專業經驗之安裝師傅施工之，同時建議於核電廠除役期間仍要定時進行該系統檢修作業，以降低火災發生的風險。

### (三)日本案例-大型核電廠火災 3-濱岡核電廠 3 號機廠房 4 樓管制區內火災

該工程因為在管制區建築物內，具有比較高的火災防制要求。在進行電銲作業，儘管在火源四周地面、牆面等處已經鋪上防火布等處，但仍有部分高溫金屬碎屑，掉入防火布的間隙處，並燒穿用來防髒用的塑膠布，差一點點就燒到易燃被堆放保溫材中了。塑膠布因燃燒而燃起之煙霧，並及時進行滅火作業，方才控制火勢。因其地點之特殊性，在事件發生當下也有向消防機關通報，待消防機關到達現場，蒐集起火物證並確保再無再燃之時，方才解除警戒，耗時約 2.5 小時。本次火災成因是受電銲之高溫金屬碎屑引起，同時因防火布的鋪設不完全，產生間隙，才會引燃不耐燃之防塵用塑膠布。在此事件後，該核電廠已全面禁止使用可燃之防塵塑膠布，改為耐燃等級。

#### 在事件中之消防對策

- 1.進行電銲作業時，防火毯的鋪設需要全面涵蓋
- 2.須設有防火監督人從旁警戒，隨時注意現場火星掉落情況。
- 3.電銲作業時，務必要將可燃物移走。

### (四) 國外施工案例-中國施工中大型工廠火災

#### 1.中國大陸福建省晉江市工廠火災

- (1) 時間：109 年 8 月 8 日
- (2) 地點：中國福建省晉江市工廠
- (3) 事故概要：該廠樓高 7 層，建築物內有 6 家不同的生產商。火勢在電梯井道內迅速蔓延，造成 8 人死亡，損失約 3,700 餘萬台幣。
- (4) 事故主因：施工過程中違規焊割導致火災且未清除周邊易燃物品、未落實相關防護措施，以及違規加蓋。
- (5) 間接原因：包括管理混亂和未進行火災應變演練。

(6) 管制要向與建議

A. 管制要項：

(A) **施工安全管理**：在進行電銲等高危險作業時，必須嚴格遵守安全操作規範，尤其是焊割作業必須事先檢查並清除周邊的易燃物品，確保作業環境的安全性。

(B) **消防安全設備**：確保工廠內的防火設備如滅火器、消防水管等設施處於可用狀態，並且消防通道暢通無阻，避免因設備故障或防火措施不足而加劇火勢蔓延。

(C) **違章建築**：禁止非法加蓋或擴建，尤其是工業建築物應嚴格遵循設計規範，確保建築的耐火等級符合要求，避免火災發生時因結構不穩而加速火勢蔓延。

B. 管制建議：

(A) **施工前的風險評估**：在任何施工項目開始前，應要求進行全面的火災風險評估，並制定針對性的安全計劃，防止因施工而引發的火災事故。

(B) **定期消防演練和教育**：工廠應定期進行消防應變演練，確保員工熟悉火災發生時的應對措施。此外，應加強員工的消防安全意識培訓，讓所有人都能快速應變。

(C) **強化緊急應變效率**：建議工廠與當地消防機關保持密切聯繫，並確保消防設備符合標準。

2. 中國大陸福建省晉江市工廠火災

(1) 時間：111 年 11 月 21 日

(2) 地點：中國河南省安陽縣工廠

(3) 事故概要：凱信達商貿有限公司廠房為兩層鋼架結構建築，建築面積 14592 平方公尺。

(4) 事故主因：非法進行電焊作業，高溫焊渣點燃包裝紙箱，箱內裝有瓶裝泡沫填縫劑，受熱後爆炸引起火災。

(5) 間接原因：沒有按要求進行防火區隔、倉儲區堆放大量易燃可燃物品、人員未受培訓、未獲焊工證。

## (6) 管制要項與建議

### A. 管制要項：

(A) **施工安全管理**：在進行電銲等高危險作業時，必須嚴格遵守安全操作規範，尤其是焊割作業必須事先檢查並清除周邊的易燃物品，確保作業環境的安全性。

(B) **消防安全設備**：確保工廠內的防火設備如滅火器、消防水管等設施處於可用狀態，並且消防通道暢通無阻，避免因設備故障或防火措施不足而加劇火勢蔓延。

(C) **違章建築**：禁止非法加蓋或擴建，尤其是工業建築物應嚴格遵循設計規範，確保建築的耐火等級符合要求，避免火災發生時因結構不穩而加速火勢蔓延。

### (D) 電焊作業：

a. 確保所有從事電焊作業的人員擁有合格的焊工證書，並且接受定期的專業培訓。

b. 電焊作業前需進行安全評估，防止焊渣飛濺點燃可燃物。

c. 嚴禁未經許可或未合格人員進行電焊等高危險作業。

(E) **防火區劃**：在倉儲區域和電銲作業區域之間必須設置有效的防火區劃，防止火災蔓延。應設置防火門、防火牆等結構來阻擋火源擴散，並確保其符合相關標準。

(F) **防火區劃**：在倉儲區域和電銲作業區域之間必須設置有效的防火區劃，防止火災蔓延。應設置防火門、防火牆等結構來阻擋火源擴散，並確保其符合相關標準。

(G) **易燃物品**：倉儲區內應嚴格管理易燃物品，定期檢查是否有危險物品堆積，並根據相關規定將其妥善儲存。避免將大量易燃品如泡沫填縫劑、紙箱等放置於同一區域，且應設置足夠的防火距離。

(H) **消防安全設備**：工廠應有足夠的滅火設備，確保消防器材（如滅火器、消防水管）隨時可用。施工區域內的消防設備應隨時保持良好狀態，並進行定期檢修。

(I) **消防安全教育及演練**：工廠內部所有員工，尤其是涉及高危險作業的工人，必須定期接受消防安全培訓，學習如何正確使用滅火器材、應對火災事故，以及在火災發生時進行有效的疏散。

B. 管制要項：

(A) **施工許可審核機制**：應強化工廠施工過程中的審核機制，特別是涉及高危險性的電焊作業。施工許可應包括風險評估、可燃物清理計劃以及電銲防火措施，只有在確認所有安全條件滿足後才能批准施工。

(B) **緊急應變計劃的完善**：每個工廠應制定具體的緊急應變計劃，包括各部門的疏散路線和緊急應變審查導則。定期進行演練，確保所有員工熟悉火災時的應變措施，減少人員傷亡及財產損失。

(C) **強化法律責任與懲處機制**：對於未遵守安全規範、進行非法操作導致火災事故的人，應加大法律責任的追究力度，強化懲處機制。此舉有助於增強企業對於安全管理的重視，杜絕僥倖心理。

(D) **消防安全的持續改進**：工廠應定期回顧並更新其消防安全計劃，根據最新的標準和消防法規持續改善。這不僅包括設施的升級，還應該涵蓋管理流程和應急應變計畫的改進。

(五) 國外案例-歲修期間工廠火災

1. 美國北卡羅萊納州坎頓長榮包裝紙廠火災

- (1) 時間：109 年 09 月 21 日
- (2) 地點：美國北卡羅萊納州坎頓
- (3) 事故概要：在歲修期間，修復單元時上流塔(密閉空間)發生火災。兩名承包商因該事件而受重傷。
- (4) 事故主因：未能有效評估其在上流塔工作時所面臨的可燃材料危險，並未實施防範點火源進入工作區域等措施。
- (5) 間接原因：未辨識熱風槍為一種可能點燃可燃材料的工具、Evergreen 對承包商關於熱作業形式的培訓存在漏洞、作業前規劃不當、承包商間溝通不足。
- (6) 管制要項與建議

A. 管制要項：

(A) 熱作業安全管理：

- a. 明確定義和標示所有熱作業，包括使用熱風槍等加熱工具。
- b. 制定並執行熱作業的標準操作程序和培訓，確保所有員工了解可能的火災風險。

(B) 密閉空間進入管理

- a. 確保所有密閉空間進入都需經過風險評估，並擁有有效的進入許可。
- b. 若發現危害，立即終止密閉空間的作業。

(C) 同時作業管理 (SIMOPs)

- a. 開發全面的同時作業計劃，確保不同作業之間的協調與安全溝通。
- b. 定期檢查潛在的同時作業風險，並實施必要的安全防護措施。

(D) 可燃材料管理

- a. 確保使用的材料具有可燃性時，對其進行專業的危害控制和管理。
- b. 在設計和施工階段考慮可燃材料的影響，並實施防火措施。

B. 管制建議：

(A) 強化培訓和意識提升：

- a. 定期進行安全培訓，增強員工對熱作業、密閉空間及可燃材料危害的認識。
- b. 推行安全文化，鼓勵員工主動報告潛在危害和不安全行為。

(B) 改進溝通機制：

- a. 在各部門間建立有效的溝通機制，確保信息透明，尤其是在進行同時作業時。

- b. 加強承包商和主承包公司之間的合作與溝通，確保所有參與者都了解工作計劃和潛在危害。

(C) 定期審核和改善：

- a. 定期檢查和審核安全政策和程序，根據最新的法規標準和事故調查結果進行改進。
- b. 實施事故後的調查和學習機制，確保從過去的事故中吸取教訓以防未來發生類似事件。

(D) 加強設備和資源管理：

- a. 確保所有設備和應急裝備均符合安全標準並保持良好狀態。
- b. 為工人提供必要的安全裝備和工具，確保其在危險環境中的安全。

- (E) 每個工廠應制定具體的緊急應變計劃，包括各部門的疏散路線和緊急應變審查導則。定期進行演練，確保所有員工熟悉火災時的應變措施，減少人員傷亡及財產損失。

2. 美國德克薩斯州台塑火災

- (1) 時間：105 年 07 月 20 日
- (2) 地點：美國德克薩斯州
- (3) 事故概要：在歲修期間，一輛由承攬商駕駛的堆高機拖拉車在搬運壓縮空氣鋼瓶進入場區時，不慎撞破輸送液態丙烯計量站接近地面的排液管線(drain line)閥，造成液態丙烯外洩引起爆炸火災。
- (4) 事故主因：拖拉車撞擊閥門。
- (5) 間接原因：外包廠商之教育訓練不足、閥門位置突出、碰撞和釋放發生的地方缺乏保護、工作者未穿著防火服、工廠之設計未使用當前標準管制要項與建議。
- (6) 管制要項與建議

A. 管制要項：

**(A) 安全設計：**

- a. 重新評估工廠設計，特別是液態丙烯計量站的布局，確保所有閥門和管線不會因拖拉車或其他設備的運轉而遭受碰撞。
- b. 考慮將閥門和管線安裝在不易被碰撞的安全位置，並設置防撞裝置或護欄來提供額外的保護。

**(B) 教育訓練：**

- a. 為所有外包廠商和內部員工提供定期的安全教育訓練，重點涵蓋液態丙烯的危害、應急處理程序以及正確的工作裝備使用（如防火服）。
- b. 確保培訓內容包括使用堆高機和其他設備的安全操作審查導則，並進行考核以驗證學習效果。

**(C) 防火服：**嚴格要求所有在涉及液態丙烯操作或附近工作的員工穿著適當的防火服，並進行定期檢查以確保服裝的完整性。

**(D) 保護設施：**

- a. 在所有關鍵設備周圍設置防護設施，特別是易受碰撞的閥門和管線，以降低事故發生的風險。
- b. 定期檢查和維護這些防護設施，確保其有效性。

**B. 管制建議：**

**(A) 風險評估與管控：**

- a. 定期進行風險評估，以識別可能的危險並制定相應的控制措施，特別是在工作繁忙的區域。
- b. 建立標準操作程序，審查導則員工在搬運重物和操作設備時的安全行為。

**(B) 緊急應變計畫**

- a. 制定和完善緊急應變計畫，確保在液態丙烯洩漏或其他事故發生時，能迅速有效地反應，並包含緊急撤離程序和通知系統。

- b. 定期辦理演練，確保所有員工熟悉程序。
- (C) **提升溝通機制：**
  - a. 加強內部和外部承包商之間的溝通，確保所有相關人員對於安全要求和操作程序有清晰的了解。
  - b. 設置安全通報系統，鼓勵員工及承包商即時報告潛在危險和不安全行為。
- (D) **持續監控與改進：**
  - a. 設立安全監控小組，定期檢查和評估工作環境的安全性，並蒐集事故的數據以進行分析，從中學習改進。
  - b. 根據事故調查結果及時更新安全標準和操作程序，確保符合當前最佳實踐。

## (六)國內案例-施工中工廠火災

### 1. 台北 101 大樓施工中火災

- (1) 時間：92 年 01 月 16 日
- (2) 地點：台北市信義區台北 101 大樓
- (3) 事故概要：火災發生在即將完工的 10 層購物中心綜合體的頂部，大約 100 平方米的裙樓屋頂被大火燒毀。
- (4) 事故主因：鐸槍的火花點燃了屋頂材料而引起。
- (5) 間接原因：包括安全管理不足、應急預案不完善、消防設施不完備、工人培訓不足。
- (6) 管制要項與建議
  - A. 管制要項：
    - (A) **高危險作業的審查與管理：**電鐸作業等高危險工作必須由具備相關資格證書的專業人員操作。
    - (B) **建築材料的防火性：**應選擇具有良好防火性能的建築材料，特別是在屋頂等可能被高溫或火花點燃的區域。所有材料應符合相關防火標準，並定期進行檢查和更換。

- (C) **消防安全設備**：確保施工現場的消防設施配備充足，包括滅火器、消防水帶等設備。施工區域內需安裝自動滅火系統，並確保這些設備能夠及時應對突發火災。
- (D) **工人安全教育與訓練**：施工現場的工人應定期接受安全教育與消防訓練，尤其是如何正確使用消防器材和應對火災事故。未經培訓的工人不得從事高危險作業。

B. 管制建議：

- (A) **施工現場的即時監控與管制**：在施工過程中，應在關鍵區域（如電銲操作點和存放易燃物的區域）設置即時影像監控，或由專人適時監控，確保發現火災隱患能及時處置。
- (B) **施工現場定期安全檢查**：應定期對工地進行安全檢查，檢查項目應包括施工材料的防火性、消防設備的有效性、工人的安全操作規範等。每次檢查後，應提交報告並立即處理任何發現的隱患。
- (C) **加裝火警探測系統**：如偵煙式探測器，在火災初期發現火源，並自動觸發滅火系統或發出警報。
- (D) **強化法律責任與違規懲罰機制**：對於施工過程中的安全違規行為（如無證操作、忽視消防安全措施等），設立更加嚴格的法律責任追究機制。加重違規施工單位的罰款或停止施工的懲罰，以提高施工單位的安全意識。

2. 高雄市新興區建築工地火災

- (1) 時間：112 年 12 月 04 日
- (2) 地點：高雄新興區大同一路和瑞源路的交叉路口一處建築工地
- (3) 事故概要：7 樓以上樓層出現火煙燃燒，消防局獲報派遣 8 個分隊共 12 車 20 人前往搶救。
- (4) 事故主因：熱煤油洩漏引起電路起火。
- (5) 間接原因：包括管理制度不足、現場存在易燃物品和電焊機、未能有效管控施工區域。
- (6) 管制要項與建議

C. 管制要項：

(A) 施工安全管理：

- a. 針對施工現場建立嚴格的管理制度，包括材料存放、設備使用規範及危險區域的明確劃分，尤其是對涉及高危險材料（如熱媒油）的使用及處理需制定具體操作規範。
- b. 確保所有涉及施工的工作人員定期接受管理培訓，並持有合格證書，避免人員疏忽或違規操作導致安全問題。

(B) 易燃物品和高危險設備：

- a. 嚴格管控易燃物品和危險設備的存放和使用，尤其是電焊機等高溫操作設備應遠離可燃物，防止因疏忽或操作不當引發火災。
- b. 劃分專門的儲存區域來存放易燃品，並設置防火牆或其他隔離措施來減少危險。

(C) 電路與設備：

- a. 對所有涉及電路的設備應進行定期檢查，確保沒有過載、老化或接觸不良的情況。這些隱患容易引發火災，特別是在高危險材料如熱媒油洩漏的情況下。
- b. 設備的安裝和維護應由專業的電工人員操作，並定期檢測現場所有電氣設備是否符合安全標準。

(D) 施工過程的監控與安全審查：

- a. 在施工現場部署監控系統，特別是在進行電銲或使用高危險材料的區域，對施工過程進行實時監控，並記錄所有的作業過程以備查。
- b. 在施工過程中，應有專職的安全員現場督導，並定期進行安全審查，確保各項安全措施的落實。

D. 管制建議：

(A) 引進智能安全技術：

- a. 施工現場應考慮引進智能火災探測系統，如偵煙式探測器，在火災初期發現火源，並自動觸發滅火系統或發出警報，讓現場人員能在火災初期迅速反應。
  - b. 此外，無人機巡視技術可以用於大範圍建築工地的監測，從高空視角檢查潛在的安全隱患。
- (B) **建立危險區域標識與隔離區域：**在施工現場，特別是涉及熱媒油或其他危險材料的區域，應設立明顯的標識，並劃定專門的隔離區域。禁止無關人員進入危險區域，並確保工作人員在進入前已經進行風險評估和安全措施。
- (C) **加強施工現場的火災監控：**根據樓層和空間佈局，制定不同的火災應急預案，確保各樓層的救援路徑與消防設備能夠應對火災事故。

### 3. 臺東縣臺東市新建工地火災

- (1) 時間：112 年 12 月 2 日
- (2) 地點：臺東縣臺東市中興路六段新建工地
- (3) 事故概要：火現場為 3 層 RC 建物，燃燒面積為 160 平方公尺，消防局出動 13 車 24 人，無傷亡。
- (4) 事故主因：燒毀工地板模與雜物。
- (5) 間接原因：安全管理不足、材料管理不當。
- (6) 管制要項與建議

#### A. 管制要項：

- (A) **施工安全管理：**
- a. 現場需建立全面的安全管理制度，包括定期進行消防安全檢查和培訓。所有進行中的工地應設置專職的安全管制員，負責每日巡查火災隱患，如電線、易燃材料的堆放和機械操作等。
  - b. 工地的所有作業應遵循相關的消防安全規定，尤其在涉及高溫作業或易燃材料的工作中，應制定詳細的操作規範。

**(B) 材料的分類與存放：**

- a. 設立專門的材料存放區域，根據材料的危險等級進行分類存放。對於可燃材料（如木板、紙皮等）應遠離施工現場的火源區域，並設置防火措施，例如使用不燃防火布覆蓋可燃材料。
- b. 建立材料的領用與回收機制，避免工地內堆放過多的雜物和廢棄材料，減少火災風險。

**(C) 消防安全設備：**

- a. 每個施工現場應配備足夠的滅火器材和消防水源，並保證這些設備在任何時候都能夠快速使用。滅火器材應根據施工場地的規模進行合理分配，並確保工作人員熟悉這些設備的使用方法。
- b. 在施工現場應設立多個明顯的緊急出口，確保一旦發生火災，工人能夠迅速安全撤離。

**(D) 工人消防培訓與應急演練：**

- a. 工地的所有工人和相關工作人員必須定期參加消防培訓，了解基本的火災預防知識，並能在火災發生時迅速進行應對。
- b. 同時，施工單位應定期舉辦火災應急演練，模擬火災事故發生後的逃生、滅火和緊急疏散過程，以提高工人的應急處置能力。

**(E) 嚴格落實施工現場防火措施：**

- a. 工地在進行電銲或其他易產生火花的操作時，必須事先清理周圍的可燃物，並在作業區域內設置防火隔離屏障，以防止火花四濺引發火災。
- b. 必須要求所有高危操作工作人員（如焊工）持有合法操作證書，並接受定期的安全技術考核。

**B. 管制建議：**

**(A) 引入現場消防監控技術：**

- a. 施工現場可以引入視頻監控系統，用來實時監控可能存在的火災隱患，如易燃材料堆放點、電線老化區域等。這將有助於及時發現和處理潛在的火災風險。
- b. 使用熱成像技術來檢測施工現場的異常溫度變化，特別是在容易過熱的設備周圍，可以及早預防火災事故。

**(B) 制定更嚴格的材料管理政策：**

- a. 針對工地中的可燃材料，應制定更嚴格的管理政策，限制材料的隨意堆放，並要求對廢棄物進行及時清理。材料管理應包括對每一批進場材料的質量檢測，確保不使用低劣、易燃的材料。
- b. 要求工地管理方在施工過程中，定期對材料存放區進行檢查，防止出現材料過度堆積的現象。

**(C) 提高施工人員的消防意識：**

- a. 施工單位應定期組織消防知識講座，讓工人了解火災風險的嚴重性，並掌握必要的預防措施。這不僅可以提高工人的安全意識，還能有效減少因疏忽導致的事故發生。
- b. 加強現場管制，尤其是在下班後，應有專人負責巡查，檢查所有設備是否已關閉，並確認現場無火災隱患。

**(D) 完善應急預案和防火標識設置：**

- a. 針對不同工地的特點，制定詳細的應急預案，確保發生火災時，現場人員能快速按照預案進行疏散和自救。這包括明確的責任分工和逃生路線的設置。
- b. 在工地內設立明顯的防火標識和緊急出口指示，並定期檢查所有標識是否清晰可見、出口是否暢通無阻。

**4. 臺北市大同區新建工地火災**

- (1) 時間：112 年 11 月 05 日
- (2) 地點：臺北市大同區民權西路一處新建工地
- (3) 事故概要：該建案為地上 15 層樓，地下 4 層樓，主建物已完成，地下室部分尚未完工。

(4) 事故主因：工人混合油漆時抽菸不慎點燃甲苯導致火災。

(5) 間接原因：安全管理不足、材料管理不當。

(6) 管制要項與建議

A. 管制要項：

(A) **易燃材料：**甲苯等易燃材料應在專門的儲存區進行存放，且該區域必須遠離火源和高溫操作場所。儲存區需配備符合規範的防火設備（如滅火器、防火門等），並有明確的標示，禁止無關人員靠近。

(B) **現場安全管理：**

a. 每個施工區域應設有明顯的禁煙標誌，並由專人負責巡視，確保工人不會在危險區域吸菸。

b. 在每個班次前，管理層需進行現場檢查，確保所有施工人員了解當日的風險點及其預防措施。所有工人必須在進入工作區域前佩戴適當的安全防護裝備，並熟悉逃生路線。

(C) **消防安全培訓：**

a. 所有工人應定期參加消防安全培訓，培訓內容包括：正確的化學品使用與處置方法、火災風險的辨識、基本的滅火操作以及火災中的逃生技巧。

b. 在施工過程中，管理者應不定期辦理消防演練，讓工人掌握緊急情況下的反應流程。

(D) **消防安全設備：**

a. 施工現場應配有足夠的滅火器等滅火設備，並確保這些設施在易於取用的位置。滅火設備應按照易燃材料的使用情況分布於各個區域，並定期檢查其狀態。

b. 在地下室和其他封閉空間，應設置強制排煙系統，以確保在火災發生時能有效排除煙霧，減少人員窒息風險。

B. 管制建議：

- (A) **建立全面的施工現場安全管理制度：**
  - a. 制定具體的消防安全管理手冊，涵蓋所有與火災風險有關的事項，並要求所有施工人員遵守該手冊。
  - b. 現場安全管理者應定期檢視工人的操作情況，尤其是在易燃材料使用過程中，確保其按照規範進行操作。
- (B) **加強現場的動火作業管制：**
  - a. 針對所有涉及明火的作業（如電銲、切割等），應設置專門的工作區域，並要求工作人員在作業期間佩戴防火防護裝備。對於臨時動火作業，應先進行現場風險評估，並由專人監督操作過程，確保現場安全。
  - b. 工地內應嚴格禁煙，並在危險區域設置明顯的禁煙和禁火標示，違反規定者應予以處罰。
- (C) **實施更多的緊急應變措施：**
  - a. 在工地內設置更多的緊急出口和逃生通道，尤其是在地下施工場地，確保所有人員在緊急情況下能夠迅速撤離。
  - b. 現場的應急措施應包括詳細的疏散計畫和事故報告流程，確保一旦發生火災，相關部門能及時獲取信息並展開救援。
- (D) **提高施工單位的責任意識：**管理者需對每一次的安全隱患進行詳細記錄，並制定改善方案，確保問題不再重複出現。

## (七)國內案例-作業中場所火災

### 1. 桃園市楊梅區中興紡織廠火災

- (1) 時間：112 年 07 月 2 日
- (2) 地點：桃園市楊梅區中興紡織廠的脂聚合場
- (3) 事故概要：該廠樓高 5 層，脂化反應製成處為停工歲修期間。上午 4 名維修外包廠商人員進行作業時，突然發生火災，造成 2 人死亡。

- (4) 事故主因：熱煤油洩漏引起電路起火。
- (5) 間接原因：包括管理制度不足、現場存在易燃物品和電焊機、未能有效管控施工區域。
- (6) 管制要項與建議

C. 管制要項：

(A) 熱媒油：

- a. 對熱媒油系統進行嚴格的定期檢查，確保管路、接頭、閥門等處沒有洩漏或老化的跡象。應根據操作指引進行預防性維護，並在每次檢修後進行壓力測試，以防止洩漏。
- b. 熱媒油管線安裝洩漏偵測器和緊急關閉裝置，當發生洩漏時系統能立即停止運作並啟動警報系統，將危險降至最低。

(B) 安全監控：

- a. 施工區域應設置專門的隔離措施，並安排安全管理人員全天候監督，確保不會發生不安全的行為。所有作業區域應張貼清晰的禁煙、禁火標誌，並對進入該區域的工作人員進行嚴格的安全檢查。
- b. 特別是在涉及到電焊作業時，必須提前清理周邊易燃物，並設置防火板等阻隔措施，防止火花飛濺引燃可燃材料

(C) 火災風險評估：

- a. 在維修或歲修期間，須進行詳細的火災風險評估，確認維修環境中的危險源。施工單位需與工廠安全管理部門密切合作，評估施工過程中的火災風險，並實施風險降低措施。
- b. 對於涉及動火作業的維修項目，應提前申請動火作業許可，並設置專人監督。維修作業結束後，應進行現場巡檢，確保不存在任何潛在的火災隱患。

(D) 工人和外包廠商的消防安全培訓：

- a. 所有進行維修的工人和外包廠商必須參加專業的消防安全培訓，特別是針對使用電焊機和處理易燃物品的培訓，確保工人能夠識別和處理危險源。
- b. 培訓應包括火災初期的應對措施、滅火器材的正確使用、逃生路線等內容，並進行定期演練。

(E) **材料和設備管理標準：**

- a. 易燃物品的存放和使用應進行嚴格管制，特別是在停工期間，應將易燃材料妥善存放於遠離動火作業的安全區域，並確保所有設備如電焊機符合安全標準，具備良好的防火性能。
- b. 施工過程中所使用的設備應進行定期檢修和維護，確保其運轉狀態良好且符合安全規範，防止因設備故障導致火災事故。

D. **管制建議：**

(A) **建立動火作業監控系統：**在所有進行動火作業的區域，應設置監控攝影鏡頭，並由專職人員監控施工過程，確保施工規範符合安全要求。對於高風險區域，應額外配備火災偵測系統，能夠及時發現和應對突發火災。

(B) **完善停工期間的維修管理制度：**

- a. 應制定和實施更完善的維修管理制度，要求外包廠商在進行維修作業前提交完整的施工計畫，並與工廠方共同進行風險評估。針對高風險作業，必須提前進行應急預案的演練，以便在事故發生時能迅速應對。
- b. 同時，對於涉及易燃物和高溫作業的維修項目，應加強審核並要求作業人員佩戴防火防護裝備。

(C) **定期進行演練：**工廠內的所有人員，包括外包廠商，應定期參加演練，以確保每個人都能迅速反應並正確應對火災事故。演練內容應包括火災警報響起後的逃生程序、緊急疏散路線以及救援器材的使用方法。

- (D) **強化外包廠商的選擇與管理**：工廠應制定外包廠商的選擇標準，確保選擇具有相關消防安全認證和豐富施工經驗的廠商。同時，在施工過程中，應對外包廠商的安全操作進行不定期抽查，並對違規行為進行嚴厲處罰。如表 3、表 4、表 5 所示：

表 3 日本核電廠除役期間災例火災管制要項及建議

(本研究整理)

	管制要項	管制建議
玄海核電廠火災	施工安全管理、熱作業安全風險管理能力、消防安全教育訓練、火災風險辨識能力	安全意識必要具體化、增強工地危險辨識能力、施工人員對核能設施之特殊性理解需加強
2017濱岡核電廠空調機房火災	通風設備安全管理	安排通風系統之檢查與維護
濱岡核電廠3號機廠房4樓管制區內火災	施工安全管理、熱作業安全管理、可燃材料	防火毯須全面涵蓋、現場監督人員於動火作業時須做好安全管理、移除動火作業時所有可能之可燃物。

資料來源:本研究自行整理

表 4 國內施工災例火災管制要項及建議

(本研究整理)

	管制要項	管制建議
台北101大樓施工中火災	高危險作業的審查與管理、建築材料、消防安全設備、工人安全教育與訓練	施工現場的即時監控與監管、施工現場定期安全檢查、加裝火警探測系統、強化法律責任與違規懲罰機制
高雄市新興區建築工地火災	施工安全管理、易燃物品和高危險設備、電路與設備、施工過程的監控與安全審查	引進智能安全技術、建立危險區域標識與隔離區域、加強施工現場的火災監控
臺東縣臺東市新建工地火災	施工安全管理、材料的分類與存放、消防安全設備、工人消防培訓與演練、施工現場防火措施	建立動火作業監控系統、制定更嚴格的材料管理政策、提高施工人員的消防意識
臺北市大同區新建工地火災	易燃材料、現場安全管理、消防安全培訓、消防安全設備	建立全面的施工現場安全管理制度、加強現場的動火作業監管、設置更多的緊急出口、提高施工單位的責任意識
桃園市楊梅區中興紡織廠火災	熱煤油、安全監控、火災風險評估、工人和外包廠商的消防安全培訓、材料和設備	建立動火作業監控系統、完善停工期間的維修管理制度、定期進行演練、強化外包廠商的選擇與管理

資料來源:本研究自行整理

表 5 國外施工災例火災管制要項及建議

	管制要項	管制建議
中國大陸福建省晉江市工廠火災	施工安全管理、消防安全設備、違章建築	施工前的風險評估、定期消防演練和教育、強化緊急應變效率
中國大陸河南省安陽縣工廠火災	電焊作業、防火區劃、易燃物品、消防安全設備、消防安全教育及演練	施工許可審核機制、緊急應變計劃的完善、強化法律責任與懲處機制、消防安全的持續改進
美國北卡羅萊納州坎頓長榮包裝紙廠火災	熱作業安全、密閉空間進入同時作業、可燃材料	強化培訓和意識提升、改進溝通機制、定期審核和改善、加強設備和資源管理
美國德克薩斯州台塑火災	安全設計、教育訓練、防火服、保護設施	風險評估與管控、緊急應變計畫、提升溝通機制、持續監控與改進

資料來源:本研究自行整理

## 四、核一廠除役期間潛在可能發生火災危害之作業工項分析

### (一)核一廠除役計畫之查閱與分析

核一廠除役作業包括多項複雜的拆除、切割和處理工項，其中部分工項涉及高溫火焰、易燃材料和可燃氣體等，具潛在火災風險。因此，在除役期間，必須對這些工項進行全面的火災安全評估，並採取適當的防護措施。本文將從潛在火災工項、火災參數及其對安全的影響出發，深入分析並提出切實的管制建議，以保障除役工作順利、安全地進行。

#### 1.除役計畫潛在火災工項分析

根據核一廠除役計畫之圖 6-1、6-2 中各工項的分解表，在設備切割、建築結構拆除(如圖四、圖五所示)、電銲、燃料處理等作業中，存在多種潛在火災風險的工項。以下為其中主要的高風險工項描述：

##### (1)電焊切割和氧燃料切割

這些切割工項在金屬切割和混凝土切割中廣泛應用，尤其是拆除大型設備(如反應器壓力槽、受放射性污染的結構部件)時，通常需要用到電漿切割(Plasma Cutting)和氧燃料切割(Oxy-fuel Cutting)。此類切割技術的溫度可達 3000°C 以上，在切割過程中會產生大量高溫火花，並可能產生氣體燃燒的放熱反應，使周邊物質暴露於火災風險中。若周圍存在可燃性物質，極易引發火災事故，對施工人員和場地安全構成威脅。

##### (2)接觸式電弧切割與電弧金屬研磨

此工法基於電弧技術，透過石墨電極將切割過程所需的高溫傳遞至金屬工件，達到切割效果。此類工項所產生的熱量、火花及金屬屑可能造成周邊結構受損，並引發火災。特別是在狹小的切割區域，若沒有足夠的通風或隔離措施，火災風險將大幅增加。

##### (3)高溫電銲作業

電銲是各類工項中的基礎作業，應用於各項建築和設備的聯接、修補等操作。電銲作業中的火焰或電弧溫度較高，產生的大量火花若落於易燃物上將極易引發火災。電銲工項在除役期間會頻繁出現，需特別加強防火管理。

##### (4)燃料及有機材料的搬運和處理

在核一廠除役過程中，存在對殘留燃料、可燃氣體(如乙炔)以及輔助用油等

的搬運和處理工項。這些物質若存放或操作不當，在高溫或火花的作用下可能引起燃燒甚至爆炸，從而導致火災事故，對周邊設施及人員安全構成極大威脅。

2.5	拆解與拆除
2.5.1	除役需求系統調整
2.5.2	放射性廢棄物處理區域準備
2.5.3	汽機廠房設備拆解第一期
2.5.3.1	汽輪機組
2.5.4	聯合結構廠房設備拆解第一期
2.5.4.1	反應器內部組件
2.5.4.2	反應器壓力槽
2.5.4.3	爐水淨化系統之水與樹脂移除
2.5.4.4	五樓水池清空
2.5.5	聯合結構廠房設備拆解第二期
2.5.5.1	拆解作業工作包準備
2.5.5.2	聯合結構廠房各樓層設備拆解與拆除
2.5.6	聯合結構廠房活化或污染混凝土拆解
2.5.6.1	反應器生物屏蔽
2.5.6.2	反應器圍阻體
2.5.6.3	其他受污染混凝土
2.5.7	汽機廠房設備拆解第二期
2.5.7.1	拆解作業工作包準備
2.5.7.2	汽機廠房各樓層設備拆解與拆除

圖 5:除役拆廠階段作業排程

(資料來源：核能安全委員會網站)

3.1.1	聯合結構廠房建築物拆除
3.1.1.1	反應器圍阻體
3.1.1.2	反應器生物屏蔽
3.1.1.3	其他混凝土
3.1.2	汽機廠房建築物拆除
3.1.2.1	汽機基座
3.1.2.2	其他混凝土
3.1.3	其他建築物拆除
3.1.3.1	二號機汽機寒水機房拆除
3.1.3.2	一號機液態氦儲存槽拆除
3.1.3.3	五號柴油發電機拆除
3.1.3.4	緊急泵室拆除
3.1.3.5	主警衛室拆除
3.1.3.6	修配大樓拆除

圖 6:廠址最終狀態偵測階段作業排程

(資料來源：核能安全委員會網站)

## 2.核一廠現場訪視

核電廠除役期間的消防防護計畫除依據前述法規規範之要求外，亦可參考大型建築工地的防火管理措施。這兩者在防火需求上的共通之處有：

1. 除役過程中可能會產生大量可燃物質，增加火災風險；
2. 某些消防安全設備可能被拆除或停止使用；
3. 需要使用高溫切割設備，增加火源引發火災的可能性。

根據日本火災預防審議會與東京消防廳令和五年的報告顯示，新建大型工地的火災發生總數達到 1031 件，這進一步強化了大型施工場域火災風險的嚴重性。在核電廠除役期間，為防止火災擴大以致用過燃料棒引發核輻射擴散，火災防護顯得尤為重要。根據 NFPA921 (2023) 提出的燃燒四面體理論，引發火災的四個重要要素分別為可燃物、助燃物、能量和連鎖反應。

從防火策略的角度來看，移除可燃物和控制能量來源（火源）是最有效的方式。由於大部分助燃物為氧氣，不易控制，而連鎖反應則涉及燃燒過程中的化學反應，難以在該場域實現。因此，核電廠除役的防火管理策略應著重於管理可燃物和限制火源。

沈子勝在 2019 年報告中指出，火災危害分析 (Fire Hazard Analysis, FHA) 應全盤評估設備的火災風險及防火能力。除評估廠區環境外，重點在於正確辨識及管理可燃物，並且辨識火災危害因子。根據 RG1.191 的火災危害分析，FHA 能提供設備火災風險的全面評估，包括與辨識危險相關的消防能力及針對保護燃料和放射性物質的防護措施。此類分析可作為火災危害評估的基準，並需根據除役期間的不同需求進行調整，應對除役相關的特殊消防問題和策略。

經查閱核一廠除役計畫除役期間規劃工項並訪視核電廠後，更加瞭解了核電廠除役的現況、作業工項及潛在可能作業風險。進入除役的核電廠無論參訪或執行作業，仍要預先向電廠申請輻射佩章，方能進入輻射管制區，以評估及確保人員進入輻射作業場所受體外劑量在可接受標準範圍內。本次主要參訪汽機廠房除役作業現場，汽機廠房為一大型空間，其內正進行發電機拆除作業中，拆除下來的設

備材料，需要經過嚴格的分類與編號，同時進行輻射檢測的作業，經過除污、暫時存放等處理後，確認污染程度在標準以內，才可以運出廠區。

作為風險辨識的一環，可進行以下火災風險因子的辨識及火源辨識，如表 6、表 7 所示：

表 6 火災風險因子辨識

名稱	組成
防護服	棉布
一般可燃垃圾	各式施工垃圾
拆解金屬設備所用之潤滑油	如:切削油
臨時電盤	集成電線
電線	銅線、塑膠外皮
Cable tray	電線、金屬盤
小型施工器械	鋰電池、電池、燈具、電線、各式金屬及塑膠
無線電	塑膠、銅鐵鎳金屬
電銲用具	乙炔瓶及氧氣瓶
保溫材	玻璃棉
工業粉塵	金屬或灰塵

資料來源：本研究自行整理

表 7 火源辨識

名稱	風險危害敘述
電銲火花	數千攝氏度之金屬火花
乙炔火焰	可放出 3300 攝氏度之火焰
電線短路火焰	短時間內造成高溫高熱，並有電線延燒之風險
燈具高溫	長時間的照射可能另可燃物質起火。

冷氣壓縮機	壓縮機起火可能會延燒管線
微小火源（菸蒂）	若遇施工工人私自夾帶香菸、打火機入內，可能會引發重度危險，進行管制時應嚴格執行。

資料來源：本研究自行整理

對於本次核電廠除役拆除作業訪視，以消防的觀點來看，發現以下潛藏問題：

1. 防護用具等可燃物放置堆積於現場
2. 切割作業用乙炔鋼瓶及氧氣瓶相鄰且未詳實固定
3. 汽機廠房一個無設備之通道房間堆放可燃物，且該空間未有警報系統探測器等設備

現場堆置棉質防護服，雖無隨意棄置，但將其集中堆置會致使增加了火災發生的可能性。

## (二)火災參數與安全影響分析

不同工項所涉及之火災參數及其潛在的安全影響，主要可從以下幾個方面進行分析：

### 1. 高溫與火焰溫度

切割和電銲工藝中常見的火焰溫度通常超過 3000°C，電漿切割更是高達約 10,000°C。這些高溫火焰若直接接觸可燃物，極易引發火災。此外，周圍設備在高溫環境中也會受到影響，可能發生變形或功能失效，從而導致設備損壞或火災擴散風險。

### 2. 火花與金屬屑

切割作業和電弧作業中常伴隨高溫火花和金屬屑飛濺，這些火花飛濺物若接觸到周圍可燃物（如油漆或其他可燃材料）將引發火災，且火勢蔓延速度快。金屬屑落於通風不良的空間中，更容易引起火源蔓延。

### 3. 氣體燃燒和有毒氣體排放

部分切割和電銲技術涉及氣體燃燒，例如氧燃料切割和電漿切割。這些燃燒過程可能產生一氧化碳、氮氧化物等有毒氣體，對施工人員的呼吸安全

構成威脅，並進一步增加火災風險。此外，在燃燒發生時，若通風不良，這些氣體可能迅速在空間中聚集，增加窒息和火災蔓延風險。

#### 4. 結構性損壞與微量放射性粉塵防護

在拆除受放射性污染的結構部件時，設備會先進行除污，因此並不會因火災導致結構損壞而影響輻射屏蔽效果或擴大輻射污染範圍。然而，拆除過程中因切割作業可能產生略帶微量放射性的粉塵漂浮，這對工作環境和人員安全構成潛在風險。因此，拆除作業須在特定的負壓作業帳篷內進行，結合有效的通風與過濾系統，防止粉塵擴散並保障人員安全。同時需加強火災防護措施，以避免切割作業因高溫或火花引發火災，進一步確保作業安全性。

### (三)核電廠火災學公式參考

火場中直接影響消防防護之主要的危害分為三類

1. 火(Fire)—火及生成之熱氣會使人員燒灼傷、同時擴散的火會引燃更多的可燃物，並生成大量的濃煙，引起更嚴重的災害。

通常火和火災因子有關連，火災因子之燃燒分成三種狀態，三種狀態分別因危險度會被不同溫度之熱源給點燃。其可燃物之種類可分成固態、液態、氣態三種，相關熱參數如表 8、表 9 所示：

#### (1) 固態物質

表 8 常見之固態可燃物之燃點

名稱	組成	燃點
防護服	棉布	依材質組成溫度約 200~420°C
一般可燃垃圾	各式施工垃圾	視可燃物種類而定，如紙張 130-230°C 木材 250-300°C
電線	銅線、塑膠外皮	240°C-340°C
保溫材	玻璃棉、保溫泡棉等	PU 泡棉約 240°C
工業粉塵	金屬或灰塵	達爆炸下限並遇熱量則易爆炸

資料來源：本研究自行整理

$$q = -K A \frac{\Delta T}{\Delta d}$$

$q$  = 熱傳導量 (W) ;  $K$  = 熱傳導係數 (W/mk) ;  $A$  = 受傳導截面積( $m^2$ ) ;  
 $\Delta d$  = 受傳導物體之傳導長度(m) ;  $\Delta T$  接觸面與傳導點之溫度差(k)。

當某一固定熱源在供應熱量，使物體升溫時，易傳導的物體，實際上將熱透過熱傳導出去的速度也快，散熱也快：如金屬類物質，因此金屬類物質較不容易點燃起。相反塑膠、橡膠類物質，因其傳導性差，則較造成「表面起火」的狀況，如堆疊起來的保溫棉，因其導熱性差，因此在接觸如熔接時的火星時，容易於接觸之表面因超過其燃點而造成起火，若此時大量泡棉堆疊時，則可能發展成為火災。

表 9 塑膠產品的熱傳導係數表

PU 泡棉(保溫材)	0.18~0.25W/mk
TPE 彈性塑膠	0.14~0.44W/mk
PC 聚碳酸酯	0.08~0.25W/mk
尼龍聚酯纖維	0.07~0.2W/mk

資料來源:本研究自行整理

核電廠中也常見諸如此類的塑膠物質，如 PU 泡棉類物質可見於冷氣空調、消防風管之保溫材；TPE 彈性塑膠為各式塑膠墊材、皮筋、鞋等簡易製品之原料；PC 為高透光材質如延長線插座、護目鏡等塑膠類物質；聚酯纖維用途廣泛如塑膠防護衣塑膠墊等。因此在對待此類塑膠物質時，需要特別注意火災之風險問題。除此之外，一般常見易識別之可燃物質如紙張等工業廢棄物，亦需要妥善保護，防止與熱源接觸，造成接觸熱源而起火。

## (2) 液態物質

液態物質需要注意其閃點之特性。閃點（或稱閃火點）是指物質在特定條件下被加熱至能夠引發閃火的最低溫度。閃點的高低主要取決於物質的蒸發特性；蒸發越容易，閃點就越低。因此，閃點較低的物質更容易被火苗點燃，從而增加了火災的風險，這使得閃點成為衡量防火安全的重要指標。

在防火安全中，不同液體的易燃性和可燃性通常依靠其閃點來分類。蒸發性較高的輕質餾分會有更低的閃點，增加了著火的可能性；而閃點較高的液體相對安全，不易被點燃，相關熱參數如表 10、表 11 所示：

表 10 液態物質閃點表

名稱	組成	閃點
潤滑油	如:切削油	約 130-140°C
發電機汽柴油	C <sub>5</sub> -C <sub>12</sub> 有機混合物 C <sub>9</sub> -C <sub>18</sub> 有機混合物	約 55°C 以上
強力膠	氰基丙烯酸酯與甲苯溶劑	90°C
去漬油、甲苯	芳香族碳氫化合物	0 - (-20°C)
乙醇	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH	13°C

資料來源:本研究自行整理

有上表中可見，如除膠用之去漬油、甲苯或消毒用之酒精—乙醇等物質之閃點皆非常低。如平時氣溫若為 25 度，則常溫下，若液體物質夠高，蒸發率夠大，一些熱源接觸到時便可能引起火災。此類熱源不單是指火、熱氣流，而是探照燈具等，皆有可能讓此類物質點燃，並進而引發火災。

其他如潤滑油、汽柴油皆有可能會大量存放於桶內，具有極高的濃度含量以及火載量。因此在這些潤滑油及汽柴油之儲存空間必須獨立且遠離火源，並在取用時注意防火安全，切勿接近任何熱源。最好是能夠獨立防火區劃出來，防止其蒸氣點燃之風險。

### (3) 氣態物質

表 11 氣態物質爆炸限度表

名稱	組成	最小/最大爆炸限度
乙炔	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	2.5%/82%
氧氣	O <sub>2</sub>	為良好助燃氣體

資料來源:本研究自行整理

由表中可見乙炔氣體的最小及最大爆炸限度跨度最高。因此危險度最高，只要發生洩漏、鋼瓶傾倒、和火源接近、鋼瓶品質不佳，皆有可能會有爆炸的風險與可能。因此在核電廠拆除的過程中，乙炔是首要防護的對象。在氧氣中燃燒之乙炔，可以產生大量熱量，能讓鋼鐵物質產生電鐸的現象。是在核電廠拆除過程中不可或缺之氣體。

2. 煙(Smoke)－煙會遮蔽視線，影響人員逃生品質，以及嚴重影響消防隊的救災安全。特別於核電廠高密閉性的空間，其空間特性會致使燃燒不完全，產生「悶燒」的現象
3. 氧化碳－大量未完全燃燒之有機物會產生一氧化碳。

#### (四)核一廠除役期間潛在可能發生火災危害之來源分析

項目	考量
<b>A.電纜</b>	<p>在核一廠廠區內，電纜為火災危害來源之一。雖然在核電廠除役期間，許多系統已停止運轉，電氣裝置和電纜通常已斷電，電纜不再是主要的火災危害來源。然而，拆除作業期間仍需注意其他與電纜相關的危險。例如，電纜在拆除或搬運過程中可能因摩擦導致殘餘的絕緣材料燃燒。此外，若電纜周圍堆積可燃物，切割作業的火花可能引燃這些物品，進而引發火災。為此，應加強拆除過程中的防火措施，包括清除可燃物、避免高溫作業與電纜材料接觸，以及在必要時提供適當的防火隔離裝置。定期檢查和培訓作業人員，確保正確處置電纜和相關材料，亦是降低火災危害的重要手段。</p>
<b>B.易燃液體</b>	<p>易燃液體的儲存和處理不當可能導致洩漏，這些洩漏液體在空氣中蒸發後形成可燃蒸氣，遇到火源時容易引發爆炸或火災。其次，易燃液體的運輸過程中，如管道老化、接頭不良或操作不當，均可能造成液體洩漏，進一步增加火災風險。此外，若儲存易燃液體的區域通風不良，蒸氣無法有效散逸，也會在一定濃度下形成爆炸性環境。廠區內許多系統管路的油體已在拆除前完成洩除，例如潤滑油等。因此易燃液體的數量顯著減少，相關火災風險也隨之降低。然而，仍需關注一些特定區域的火災隱患，如柴油發電機相關的油料儲存區。雖然這些區域已設有火警警報和消防設備，但仍需確保這些裝置功能正常，並加強相關的維護和測試。此外，在拆除過程中，管路操作或遺留的殘餘液體可能產生潛在風險，特別是在高溫作業或切割作業時，應加強現場的防火管理。</p>

<p><b>C.可燃物</b></p>	<p>廠區內之可燃物（如集中堆置的棉質防護服）會增加火災風險。首先，棉質材料屬於易燃物，若大量集中堆置，將使燃燒速度加快，火勢更難以控制。當這些可燃物接觸到高溫或火花等潛在火源時，易迅速引燃並蔓延，進一步威脅廠區的安全。而堆積可燃物不僅增加火災負荷，還可能造成火勢延燒至其他設備區域，進一步影響廠區內的關鍵設施。因此，對廠區內的可燃物進行適當分散儲存、確保有足夠的防火間距，以及配備必要的滅火器材，是降低火災風險的重要措施。</p>
---------------------	--

### (五)核一廠除役階段消防設備維護管理評估

維護管理策略涉及須要保護對象的價值，本處為核電廠，一般民眾會擔心核能輻射洩漏的疑慮，若發生事故可能會有負面的外部效益，造成生命、財產的極大損害；然而，核電廠的經營單位也有經費限制，必須在安全及成本兩者間取得平衡，此時需要有第三方的監督及評估，以達最大總體效益。

在核一廠除役階段，消防設備的維護管理評估十分重要，需針對特殊的火災風險和防護需求制定專門方案。隨著廠區拆除作業的進行，設備的運轉、配置和區域功能均會有所改變，因此必須特別考量下列幾方面的風險管理與消防措施：

在核電廠除役期間，儘管現行系統和組件已經停止運轉，電氣裝置與電纜也都處於斷電狀態，但電纜仍可能因拆除作業過程中的外力作用或老化情況而受到損壞，進而增加火災風險。為降低風險，建議在執行拆除作業前，全面確認電纜隔離邊界及斷電情形，確保拆除作業的安全性。同時，需特別留意施工過程中可能對電纜造成的機械損害，施工人員應遵守相關操作規範，避免在切割或搬運其他部件時損壞電纜。此外，應對可能老化的電纜進行詳細檢查，及早識別存在潛在風險的電纜，並在必要時予以更換或妥善處理，尤其是在存放可燃物的區域，進一步降低火災隱患。

易燃液體的管理在除役階段尤為關鍵。廠區內的易燃液體（如柴油、潤滑油等）因拆除及搬運而可能產生洩漏或意外洩出，從而導致火災或爆炸風險。因此，需強化對易燃液體儲存區域的管理，確保有效的通風設施和良好的防火分隔。並對相關人員進行操作規範和緊急應變的培訓，以確保在發生洩漏時能迅速控制和消除風險。

最後，針對可燃物的堆置，除役階段的拆除作業會產生大量廢棄物，如棉質防護服等易燃物質，如果未妥善管理，可能造成火災隱患。須將這些可燃物適當分散儲存並建立臨時儲存區，避免過度集中。此外，應在高風險區域配置手提式滅火器、加裝連動式火警探測器，以確保在火災發生時能有效防止火勢擴大。

核一廠除役階段的消防設備維護管理應注重檢查、更新和安全監控，並結合針對性的消防設備配置和人員訓練，才能保障除役過程的安全性與有效性。

## (六)管制建議

針對核一廠除役期間的潛在火災風險，仍應注意以下火災防護措施，包括區域隔離、火災監測、滅火裝置設置及操作人員培訓等，以最大限度地降低火災風險。具體建議如下：

### 1. 強化高風險區域的隔離與防火措施

- (1) 在進行高溫切割或電銲作業前，應在工作區域設置隔離屏障，以防止火花及高溫輻射對周邊結構的影響。
- (2) 高風險工項區域應裝配冷卻系統，並確保切割區域內沒有易燃物，通風系統正常運作，避免火花接觸可燃物而引起火災。
- (3) 對於使用電漿切割、氧燃料切割等技術的操作，建議引入無火花切割技術，如冷切割技術，在特定區域避免火花生成。

### 2. 完善火災監測和自動撒水設備

- (1) 在除役工地的關鍵位置安裝火災監測器、煙霧探測器和溫度感應器等設備，並與應急反應系統聯動，確保火災第一時間即能被監測並進行滅火處置。
- (2) 高溫切割及電銲區域應配置自動撒水設備，並定期測試滅火設備的功能，以確保其在火災發生時能夠迅速啟動。
- (3) 在操作範圍外周圍設置移動式滅火設備，並對滅火設備進行定期檢查和維護，確保所有人員可在火災初期進行迅速撲救。

### 3. 加強人員安全培訓與演練

- (1) 對施工人員進行火災風險教育和防火培訓，尤其是針對高風險作業，如電銲、切割及燃料處理等工項，讓操作人員熟悉火災風險控制措施。
- (2) 定期進行火災演練，確保每位工作人員熟知火災應急疏散路線，掌握基本的滅火技能，並能在火災發生時快速反應以降低人員傷亡。

- (3) 在切割和電銲等高風險作業期間，安排專人負責現場火災安全監督，確保每一步操作符合防火安全規範。

#### 4. 燃料及易燃材料的管理和處理

- (1) 對於除役期間需處理的可燃物品（如殘留燃料、乙炔等燃料氣體），應設置專用存儲區，並加強防火管理，避免高溫切割和電銲處所附近出現可燃物品。
- (2) 對於燃料或其他化學品搬運和處理過程，應由專業人員負責並使用安全防護設備，同時保持操作現場的通風，防止燃燒或爆炸事故發生。
- (3) 針對可燃材料的堆放與使用，應設立明確的規範，並定期檢查，確保這些物質不會成為火災的觸發點。

#### 5. 針對放射性區域進行特別防火規劃

- (1) 在涉及輻射污染的拆除作業中，應考慮火災可能帶來可燃物，為輻射區域內部的防火設施制定專項計畫。
- (2) 高輻射區域的防火措施應包括防火隔牆的設置、隔離區域的通風以及冷卻設備的優化，以減少火災對輻射污染的影響。
- (3) 火災應變計畫應包括輻射區域的安全疏散措施，並提前制定輻射防護策略，防止火災期間輻射物質的擴散。

核一廠除役期間，由於各類高溫切割、電銲及燃料處理工項的頻繁進行，火災風險顯著上升。因此，必須採取全面的防災監控措施，包括高風險作業區域的隔離、完善的火災監測與滅火系統、加強員工培訓及火災演練等。同時，針對放射性區域的火災防護需求進行專項設計，以保障除役工作人員及場地安全。這些措施的有效實施將極大地減少火災風險，有助於確保核電廠除役工作能夠安全、順利地完成。

## 五、模擬分析法

模擬分析法為透過使用火災模擬軟體並參照文獻之參數設定，進行火災情境模擬的一種方法。比起全尺寸之火災模擬，他能符合經濟且快速的情境模擬需求，且能以電腦動畫的形式呈現出來，讓人瞭解到火災的危害性。於核電廠除役的背景中，本研究使用文獻 NUREG-2178 (EPRI 3002005578)，該文獻亦提供了契合本研究的研究背景，為針對核電廠除役所使用之火災參數值文獻，對各項可燃物的火災因子有深入的研究，符合核電廠除役的火災參數值設定，因此本研究使用模擬分析法來分析核電廠於退役過程中的火災情境，所會造成的危害。

### (一) 模擬設備與 Pyrosim 軟體介紹

Pyrosim 是由 Thunderhead Engineering 公司所研發，基於火災模擬軟體 FDS 所研發，其提供了圖形化的介面進行建模與模擬，操作上會比起使用介面之 FDS 軟體還要直觀。其參數設定介面如圖 3 所示：

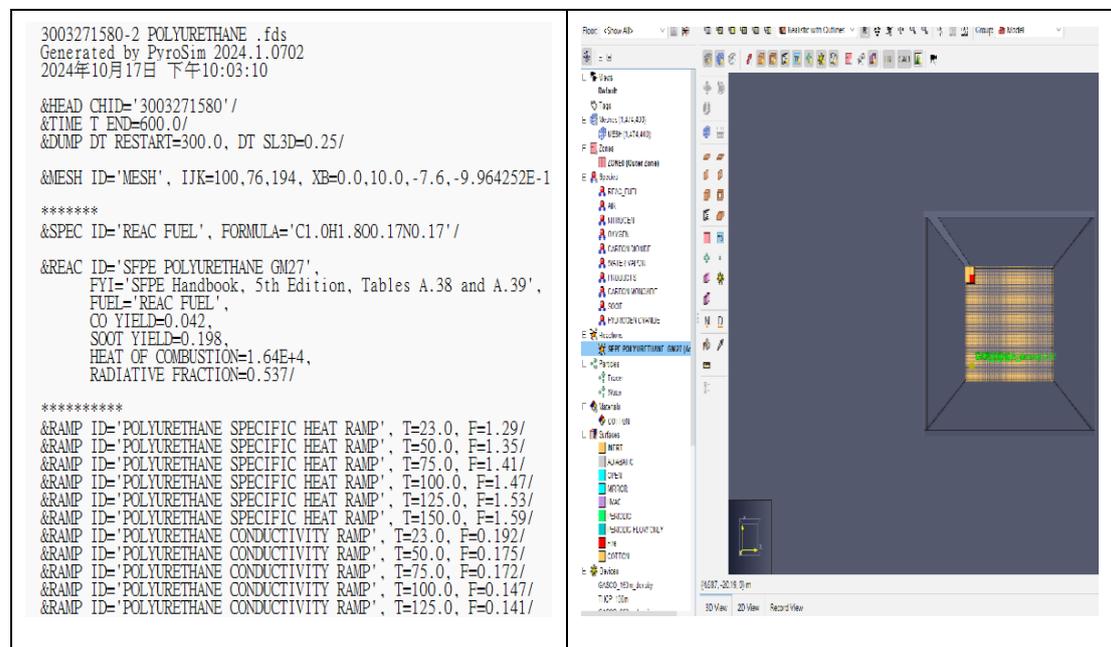


圖 3: FDS 與 Pyrosim 參數設定介面比較

由圖一可見 Pyrosim 之設定上因為多了圖像化的介面，比起 FDS 使用介面指令碼於文字編輯器中編纂 FDS 程式語言，再透過 Smokeview 將其編纂結果與各參數值給呈現出來。Pyrosim 使用鍵盤與滑鼠並搭配圖像化的邏輯思考模式，即可針對火災情境進行調整。

火災模擬 FDS(Fire Dynamic Simulation)的發展是基於美國國家標準與技術研究院 NIST(National Institute of Standards Technology)所開發的一套軟體，用以模擬各式火災情境、檢視火煙流動模式、測量火災溫度、觀察有毒氣體分布等一系列與火災相關之物理量。本次使用之軟體資訊與電腦資訊如表 12 所示：

表 12:Pyrosim 設備系統使用建議

名稱	本研究使用	官方建議使用
中央處理器(CPU)	AMD Ryzen 9 9900X	Core i7 8700 以上 Ryzen 7 1700 以上
圖形處理器(GPU)	NVIDIA GeForce RTX4070 SUPER	NVIDIA GeForce GTX570
快閃記憶體(RAM)	DDR5 32GB	16GB
硬碟空間	2TB SSD	無要求
使用設備系統/版本	Windows 11 家用版 23H2	Windows 10 以上版本

本次研究使用後發現，Pyrosim 的使用多數是仰賴「中央處理器」之運算，相反的，跟預期此類圖像化之模擬軟體之仰賴圖形處理器之使用情況略有不同。在進行複雜圖形之參數運算時，本研究電腦所使用之 CPU 使用率占比約為 25%，GPU 則是約 1%；在運算結果完成後進行 Smokeview 的結果呈現時，CPU 使用占比約為 34%，GPU 之使用略同於 CPU。由此可知，火災模擬軟體之設備選用重點仍在於中央處理器(CPU)。另本研究記憶體之使用狀況皆落在 11GB，若再開其他網頁使用或參考電子文獻，16GB 之建議值可能會略有不足，因此建議進行 Pyrosim 火災模擬時，記憶體的使用至少需要使用高於 16GB 的容量大小。硬碟空間則並無太大要求，本研究所使用之硬碟空間大約落於 2-3GB，在現今存儲科技發展的當下，幾乎所有電腦皆能符合要求。

## (二)火災情境設定

本次 Pyrosim 建模空間選定為核電廠鄰近通風設備機房之一小房間，訂定其空間室溫為 20 攝氏度，其空間用途為一過道空間。通風設備機房在風機運轉時所產生負壓，若人進入通風換氣設備機房時，會產生人體較難以負荷之負壓，引發頭暈、頭痛、耳鳴等不適感，其原因是由內外壓力不平衡所導致的。人員進出時須抵抗如此之大的負壓，會較難進行開關門動作。核電廠因其特殊性，較無法於反應爐所屬建物內建置多個窗戶、通風口...等開口，造成建築物內密閉性偏高，因此建物皆十分仰賴通風換氣設備與濾網同外界交換新鮮空氣，並須檢測其空氣

中之輻射狀況。因此通風設備機房的設計由數台排風機與風管系統串聯而成，並非僅設立於唯一空間，而是由複數通風設備機房負責全建物之通風換氣系統。設有運作中之風機較難以進入與久待，但過道空間則是人員較易進入且較無人會逗留之區域，其空間可能會進行施工又或是有人會在此地堆置可燃物且較難被管理人員所察覺，因此特選擇此區域做建模。模型建置為高屋頂之四方型鋼筋混凝土結構，模擬核電廠建物內高屋頂的建築物特性。選擇小空間之原因在於小型空間巡檢不易，更是增加管理人員巡檢上的難度。本研究設計排除開口及防火門的建置，其用因在於核電廠密閉性高，且四周皆嚴格遵循防火時效之建置，因此本研究重心並不在延燒情況，僅以消防防護的角度去檢視之。

可燃物設計部分:核電廠區建物量體巨大，內部隔間錯綜複雜，火載量高，適逢核電廠除役階段，人員進出複雜，其拆卸下來之建材、可燃物組成之垃圾、堆積暫放之防護服...等，若堆置不慎，倘若火源接觸，即會快速演變成嚴重的火災事故。本次所使用之燃燒對象物為受堆積之棉製防護服，設定情境為施工人員為求方便，隨意將施工後完之防護服堆積在無人空間並未及時做清運的動作。受堆積之防護服其正上方恰逢施工，因施工人員未注意而掉落施工之火星並未注意其已經引燃；火災情境設定結果如圖 4 所示：

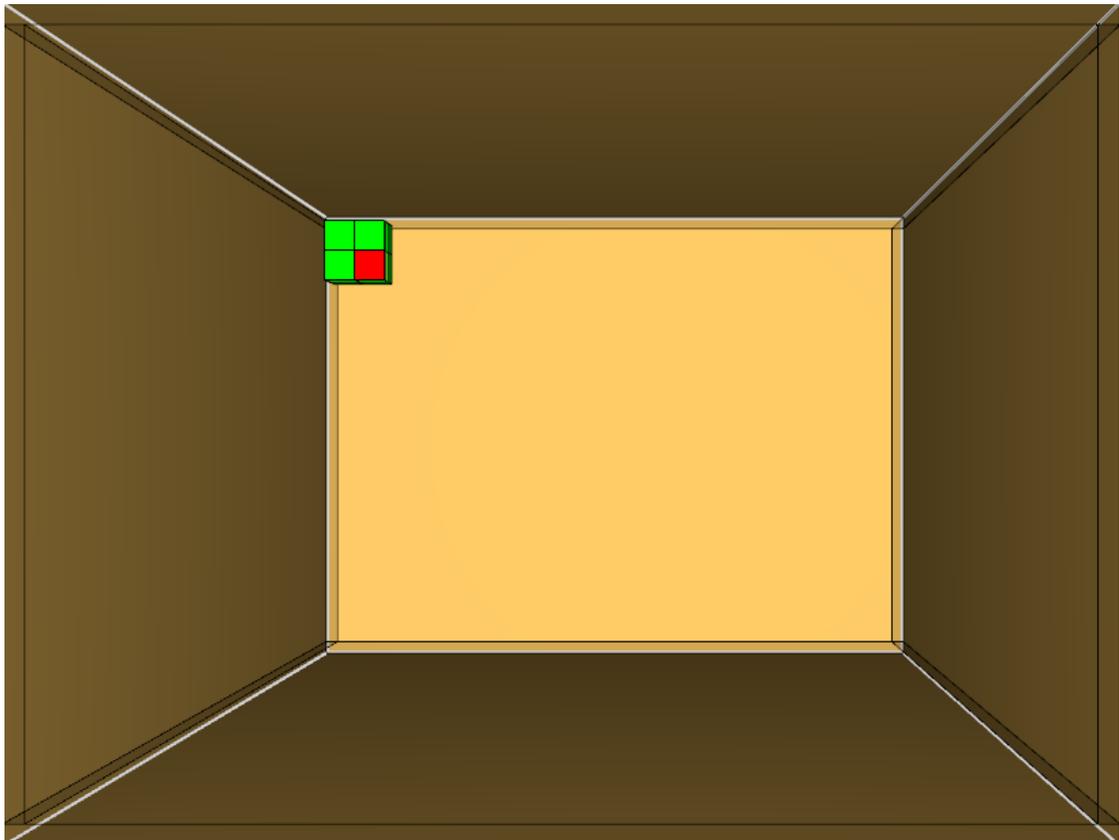


圖 4 本次研究實驗建模為 10m\*7.2m\*19.2m 之混凝土結構房間 紅色區域為起火火源處 綠色為可燃物質

可燃物設計為了符合電腦格點(Meshes)，並不以常見之用之袋裝之圓形可燃物或受堆疊山丘型可燃物為設定目標，如此設定上會過於複雜，而是以 50cm\*50cm 之綠色方塊堆疊起來做為表示，並將起火表面設定為發火源(Fire)，營造出因外部因素而致使表面起火的狀態。

火源設計參考核電廠典型瞬態燃燒火災 Transient Combustion Calorimetry (TCC)代表燃料熱釋率與火災特性文獻 NUREG-2178 (EPRI 3002005578)之火源設計，由於瞬態火災佔核電廠火災風險的很大一部分，同時亦能契合本研究設定消防防護計畫對應之火災情境理論，因此以採取瞬態燃燒量熱的模擬模式來進行模擬。瞬態燃燒量熱法之設計情境在於：於核電廠工程進行中時，時常會堆置工程用可燃物質、廢棄物...等。因此在進行火災模擬時，會直接考慮其最大可能產生之火災特性。如：峰值熱釋放率(PHRR)、釋放總熱量(THR)、氧氣消耗量、CO<sub>2</sub>產生量、CO產量...等，並有不同之火災因子當作參考標的，以此設立最符合研究情境之火災模擬參數。在 NUREG-2178 文獻中有提到，於 EPRI&FEDB1990 年至 2015 所發生之 682 件火災中，因熱作業(動火作業)造成的火災數有 65%，且其中的 9.0%為受堆置之碎布、衣服所造成的。

本次的可燃物為「防護服」、火源為「焊接時掉落之火花」。經過參訪後得知防護服主要材質為棉，棉的化學式為(C<sub>6</sub>H<sub>10</sub>O<sub>5</sub>)<sub>n</sub>之聚合物結構。但如今使用純棉製成防護服並不符合需求，推測仍為非石化製化學纖維之人造纖維為主，或可能是使用合成纖維。如此一來會增加實驗之複雜性。因此選定手冊中可能出現之碎布料(Rags)參考標的物。

以下表 13 為整理出可能為本研究參照之火源設計表：

表 13:火源設計參考表

Test ID	Item	Max HRR (kW)	TER (MJ)	Max D (m)	Lf (m)	ΔHC (kJ/kg)	Soot Yield (kg/kg)	CO Yield (kg/kg)	Q*

Test003	Five Rags w/Heptane	42.3	5.78	0.23	0.80	24.4	0.009	0.031	1.5
Test005	Five Rags w/Heptane	46.4	6.70	0.25	1.05	22.4	0.007	0.042	1.3
Test006	Five Rags w/Heptane	50.6	5.79	0.18	1.11	26.9	0.010	0.039	3.4
07_16_004	Single Rag w/Heptane	9.6	1.80	0.13	0.54	26.5	0.015	0.015	1.5
07_16_005	Single Rag w/Heptane	10.5	1.76	0.13	0.58	25.9	0.016	0.018	1.6
07_16_006	Single Rag w/Heptane	9.1	1.62	0.10	0.56	23.8	0.015	0.018	2.5
07_23_001	Single Rag w/Heptane	11.8	1.75	0.15	0.40	28.4	0.006	0.016	1.2
07_17_004	5 Rags w/Heptane	34.0	8.15	0.20	0.87	25.7	0.007	0.025	1.6
07_17_005	5 Rags w/Heptane	41.0	7.96	0.25	0.86	27.0	0.013	0.019	1.1
07_17_006	5 Rags w/Heptane	30.5	8.58	0.25	0.79	27.0	0.014	0.024	0.8
Test064	Rags w/Oil	11.3	9.50	0.20	0.47	26.2	0.042	0.030	0.5
Test066	Rags w/Oil	10.5	6.93	0.20	0.35	22.9	0.026	0.032	0.5

07_16_001	5 Rags	7.5	3.97	0.24	0.26	19.4	0.011	0.061	0.2
07_16_002	5 Rags	8.3	3.05	0.30	0.28	14.9	0.008	0.038	0.1
07_16_003	5 Rags	14.0	4.14	0.25	0.44	20.3	0.006	0.026	0.4
07_16_004	5 Rags	10.4	3.91	0.23	0.34	17.5	0.007	0.034	0.4
07_17_001	Bag of Rags	4.0	3.27	0.23	0.19	24.0	0.018	0.080	0.1
07_17_002	Bag of Rags	6.0	2.86	0.23	0.25	12.6	0.005	0.052	0.2
07_17_003	Bag of Rags	2.2	2.87	0.23	0.23	15.8	0.006	0.044	0.1

資料來源: *Heat Release Rate and Fire Characteristics of Fuels Representative of Typical Transient Fire Events in Nuclear Power Plants, 2020*

Test ID: 實驗測驗編號; Item: 燃燒對象物; Max HRR (kW): 最大熱釋放率(千瓦); TER (MJ): 總能量釋放(兆焦耳); Lf(m): 火焰高度(公尺);  $\Delta H_C$  (kJ/kg): 燃燒熱(千焦耳/公斤); Soot Yield (kg/kg): 產生之黑煙(公斤/公斤); CO Yield (kg/kg): 產生之一氧化碳(公斤/公斤);  $Q^*$ : 火源強度之量測值福祿數。

在 Fire dynamics simulator (version 6), user's guide 9.1 節中有提到, 燃燒為複雜反應, 要同時, 理論上當一物體產生燃燒時, 其燃燒表面會熱裂解(pyrolysis)產生多種物質與氣體。因此燃燒時理論分為固體的熱分解以及其分解出來之氣體與 O<sub>2</sub> 混合產生之物質。然而如此多方面去考慮會讓其模擬成本大大提高。因此在進行火災模擬時可以用兩個方法解方, 其一是視其分解之物質核算並分類出不同的燃燒反應再去模擬, 另一種則是混和分數模型。以本研究來說, 我們會去透過實驗數據, 去得其各項「混和分數」值, 推估出最符合該情境之實驗數據則較為理想。根據 Fire Dynamics Simulator (Version 6) Technical Reference Guide 3.4.3 節提到, 火災模擬之目的僅是預測特定火災的煙霧與熱量傳遞, 換句話說熱釋放率之數值僅為使用者所訂定的, 因此僅需選定合適之火災參數即可。

## 2-1.可燃物設計

表 14:可燃物參數設計表

參數名稱	情境 A	單位
Density 密度	80	kg/m <sup>3</sup>
Volume 體積	1	m <sup>3</sup>
Mass 質量	80	kg
Specific Heat 比熱	0.13	kJ/(kg·K)
Conductivity 傳導性	0.06	W/(m·K)
Emissivity 輻射率	0.77	無因次
Heat of Combustion 燃燒熱值	24.0	kJ/Kg

資料來源:本研究自行整理

表 14 中在知道密度的情況下，以方塊的算法核算 8 塊 50\*50\*50 的立方體結構，得出質量為 80kg。Absorption Coefficient 吸收係數。Emissivity 輻射率則為 OMEGA 公司所發行之 OMEGA handbooks，以攝氏 20 度之溫度測驗之，台灣氣候平均氣溫接近於此溫度，因此能合用此數據。燃燒熱之值以火源設計參考表各實驗同類型可燃物比較之最高值用之，本研究的參數選擇上採用最壞情境「Worst Case」的預設方法。在參考文獻的火災學的實驗中，因受很多不可控變因的影響（如樣本含水量、熱通量小、測試當下的室溫...），同樣的實驗會造成其值的差異（特別其文獻又將其可燃物質換算至公斤），原因是此種瞬態燃燒的模式是要模擬核電廠施工時現場可能發生之參數情況。而我們在進行火災模擬時，有兩種參數選擇方式，一是選定一種實驗的設計模式去適用於本研究情況、二則是不選擇特定實驗，而是取用自己所需要的參數。在核電廠的火災情境中，我們要去假設其可能遇到最壞的情況，因此本研究參數採用同性質實驗中，危險性最高之參數值去選擇之。

## 2-2.反應設計

情境中之火源設定不盡相同，關於情境火源之設計，參考 NUREG-2178 (EPRI 3002005578) 中 3.1 節提到，無論是丙烷火焰或尼龍燈芯點火源基於熱通量通量公式，熔融金屬與可燃物（鋸渣或電弧）接觸所預期的。根據熱通量公式得知：

$$q'' = -K \cdot \frac{\Delta T}{\Delta d}$$

$q''$  =熱通量( $W \cdot m^{-2}$ ),  $K$  熱通量係數( $W \cdot K^{-1}m^{-1}$ ),  $\Delta T$  為溫度差(K)

因其熱通量公式是可被接受的，並不需要特別針對其傳導量做出預期與驗算，而是直接以實驗的參數值來做判斷。因此其熱通量係數值  $K$  可以直接參考 NUREG-2178 (EPRI 3002005578)中提到之 Heat Flux 公式的 FDTs 值約為情境為 6.6, ( $kW/m^2$ )。意即每平方公尺之接觸面上每秒約會產生 6.6kW 之熱量。參考中提到棉布之受點燃溫度約為 200~420°C。焊接、熔接所產生金屬火花為微火源，微火源於火災學中之定義為指沒有明顯發焰現象或是微弱之火源，例如：菸蒂或火花，像打火機或是噴槍等能製造明火的器具，就非屬微火源。微火源意思為無明顯發焰，卻不代表火源溫度低，且具有溫度集中、易受空氣流動而被四處吹動等特性，較為難以控制。況且微火源之熱量密度集中較高，最低僅須(200-20)\*6.6=1188kW 之能量傳遞僅可引發火焰。文獻中所敘述之實驗熱通量值定為參考表 15:

表 15:火源參數設計

參數名稱	情境參數	單位
$\Delta H_C$ 燃燒熱變化率	24	(kJ/kg)
Mass 質量	80	kg
總熱量	1920	kJ
Surface area 面積	0.25	$m^2$
單位面積燃燒熱釋率 HRRPUA	7680	$kW/ m^2$
$t^2$	494	s

資料來源:本研究自行整理

由此可見其參數設定值，遠超過點燃(Ignition)所須知最小熱通量傳遞值。點燃就火災學定義，為確定該火災因子進入燃燒狀態，並若無外在因素所干擾，會開始發展成為火災。因此本研究設定為接觸後於 1 秒內立即發生點燃現象，並逐漸發展成火災的模擬型式。

### 2-3.格點設計

以火災模擬的角度來說，理論上格點越密則模擬的結果會越準確，因此設定上要以小格點為最主要的設計方式。然而越密的格點會造成在進行模擬時耗時過長，並有可能使得電腦效能無法負荷發生過度超載的壯抗。因此在進行實驗設計時，必須要考量研究所需時間及電腦效能。依照本研究之實際操作經驗，整理出如下表 16 格點設計之時間表格。

表 16：格點大小參考表與所費時間

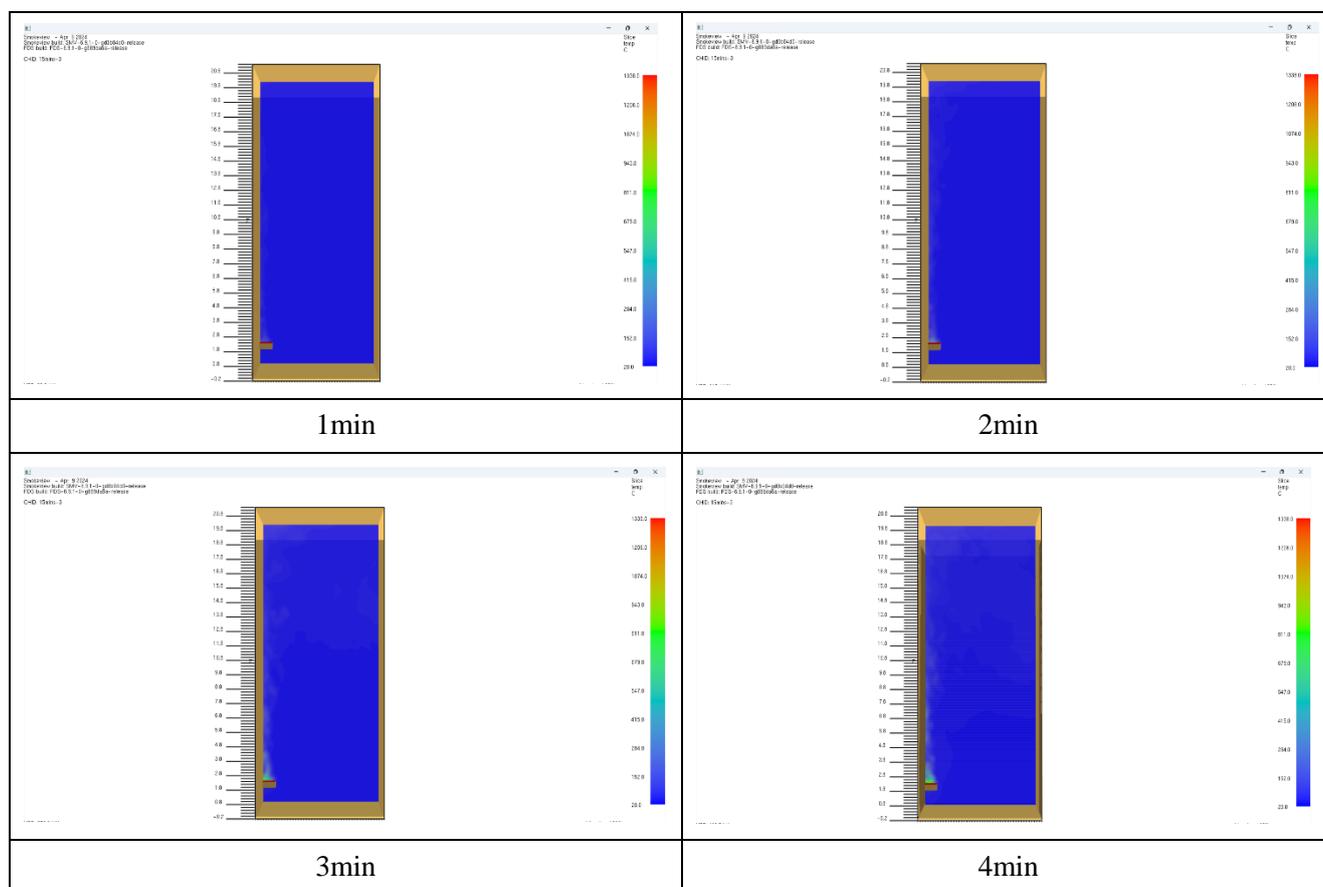
格點大小	格點總數	模擬所須計算時間
0.1m*0.1m	1340928	>44hr
0.15m*0.15m	396288	>17hr
0.2m*0.2m	167610	>8hr

資料來源:本研究自行整理

本次實驗採用 0.15m\*0.15m 之格點設置。並設置 15 分鐘之模擬時間，結果如下表 17、表 18 所示。

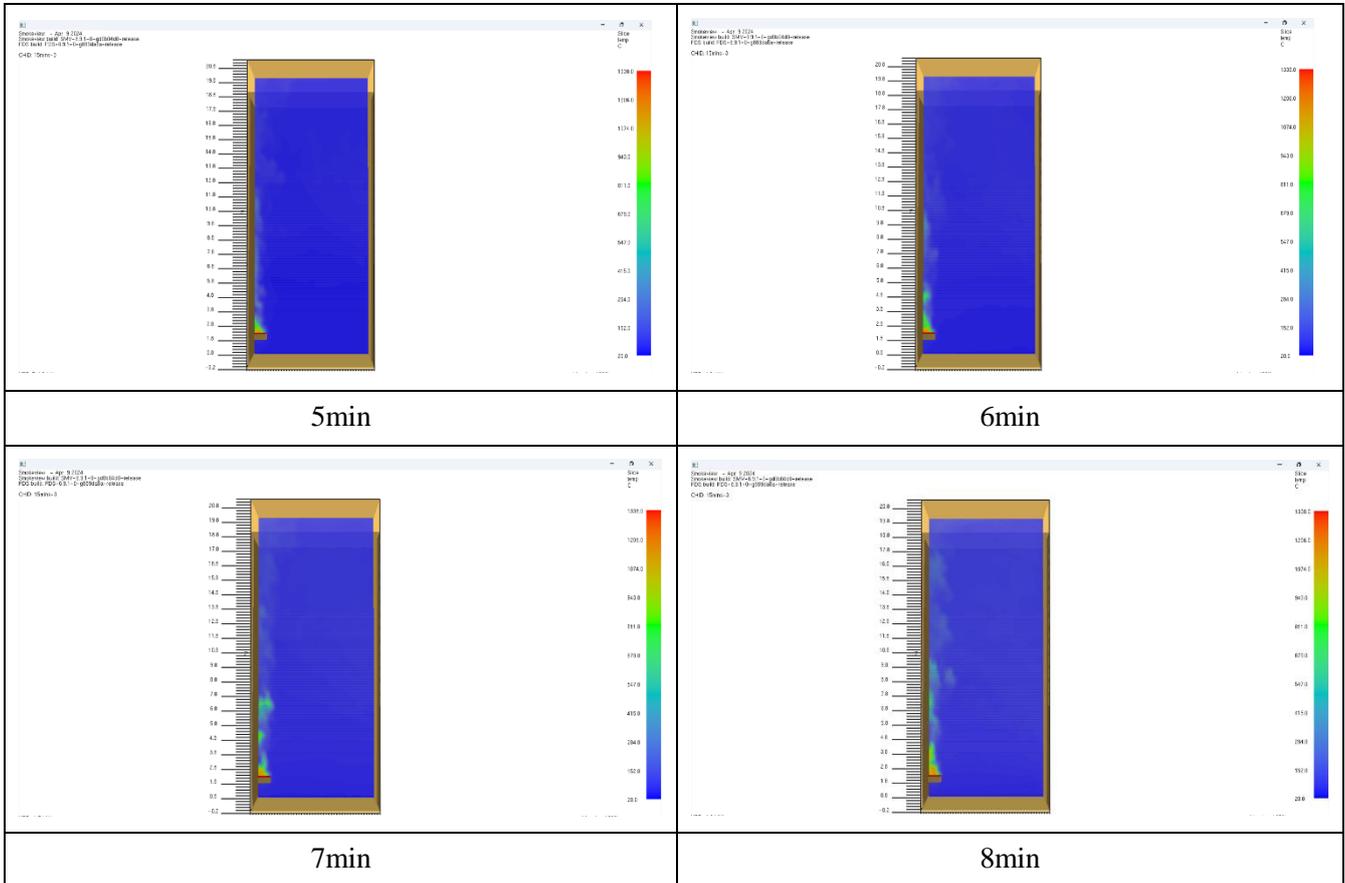
### (三)模擬結果分析

表 17:前四分鐘模擬示意圖



資料來源:本實驗模擬結果

表 18:五至八分鐘模擬示意圖

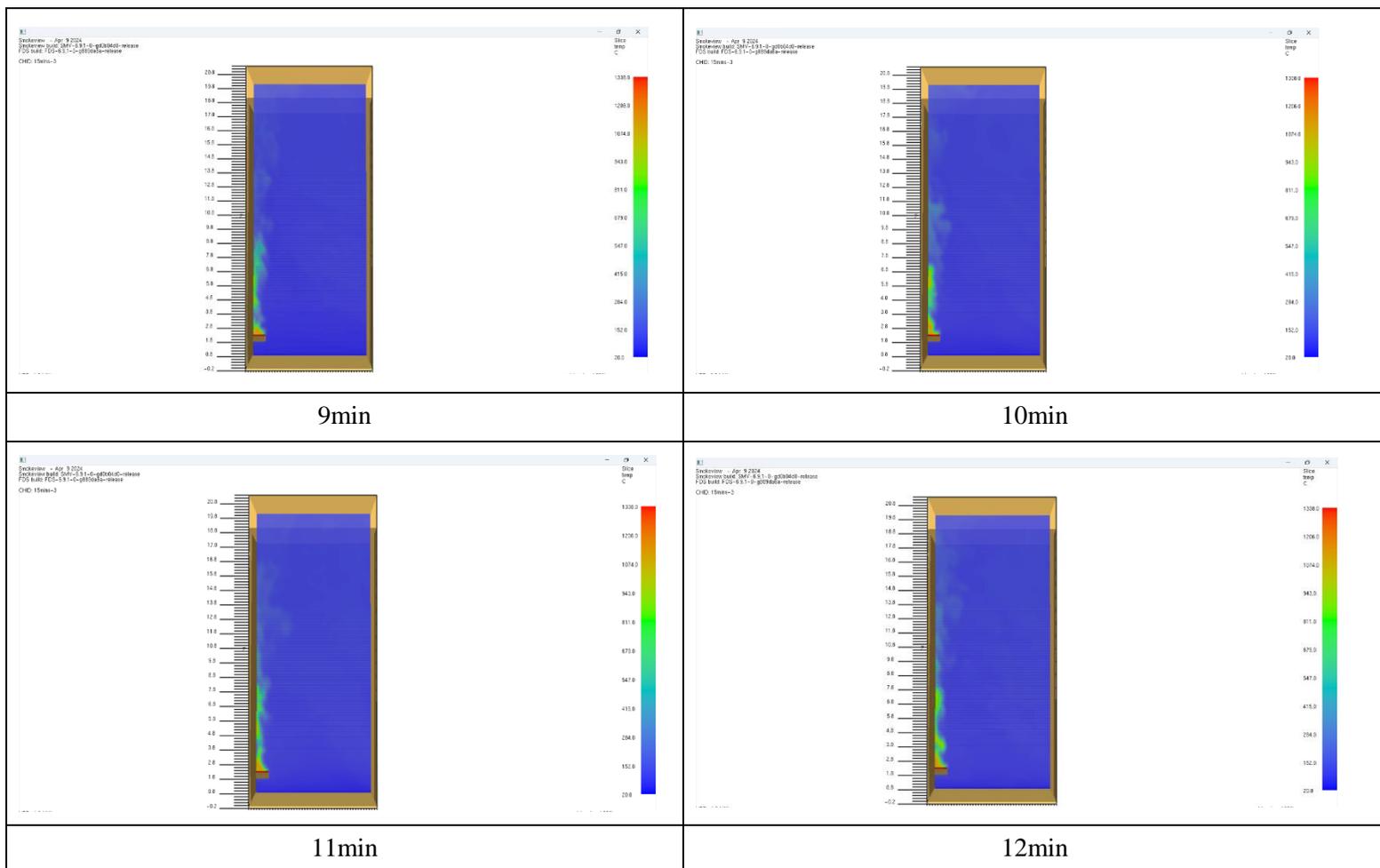


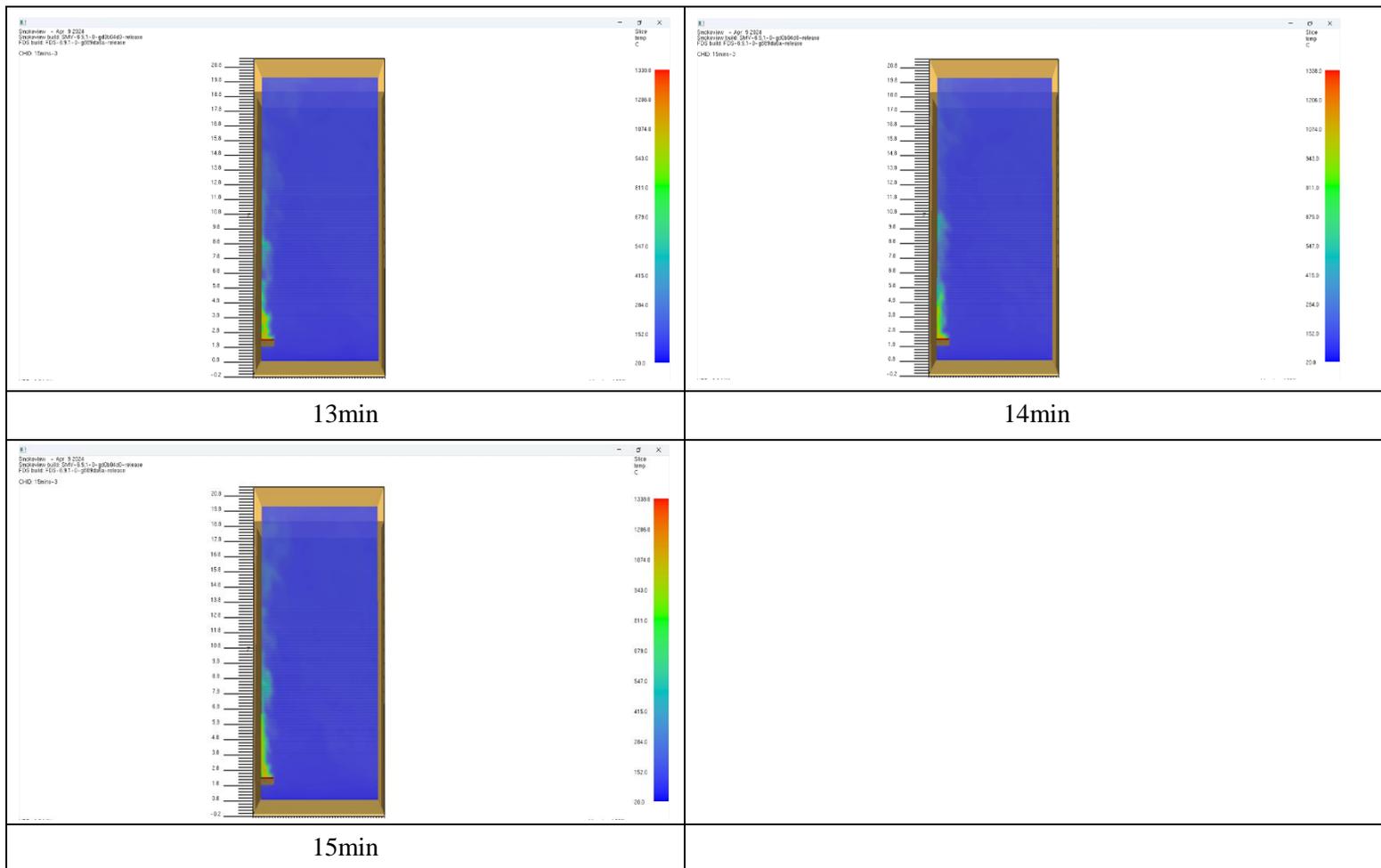
資料來源:本實驗模擬結果

於本模擬結果中，可見到雖然於火星接觸防護服的 1 秒內，即發生點燃的動作，開始發展成為火災。自 2 分鐘起，開始發展出明顯可見之微小火光，並開始冒出陣陣煙霧(Smoke)，且有逐漸變大的趨勢。一般正常之成長火災，其熱釋率會逐漸擴大，。直到參考文獻提供之實驗設定值 484 秒為止。4 分鐘起，火焰逐漸擴大並發展出溫度明顯超過 600 攝氏度之火焰，6 分鐘起超過 1000 攝氏度，讓其他可燃物也開始發展火災。煙霧及熱氣流逐漸向上並蓄積於天花板。而於這些時間區間內，多數核電廠、大型施工現場之火災事故在此時可以透過人為於現場監管，發現火勢並透過初期滅火的方式進行撲滅，如滅火器、消防栓...等等。8 分鐘起，達到最大熱釋率，並持續以最大熱釋率放熱自火災開始後 9 至 15 分鐘模擬結束，火焰與熱氣流成長趨勢越來越大，火焰的樣態也越來越高。一般的狀況來說當火焰愈高的狀況，火焰則是愈危險，撲滅難度也愈高。至 8 分鐘發展成了較初期明顯的火羽流(Plume)的狀況，火羽流能帶動空氣對流產生一明顯的

火柱，火焰燃燒時，形成倒圓錐型煙氣層，並從兩旁不斷吸取空氣，致使該火羽流能夠不斷的成長，稱為火羽流。根據本實驗之火災成長趨勢，於494秒時，會達到此火災成長模型達到最大熱釋率（Heat Release Rate and Fire Characteristics of Fuels Representative of Typical Transient Fire Events in Nuclear Power Plants,2020）。本次的火災情境為「慢速成長火災」，在無助燃劑的情況(如人為使用汽油惡意縱火)下，此類型火災曲線並不會過於快速發展，如表 18 所示。

表 19:九至十五分鐘模擬示意圖





資料來源:本實驗模擬結果

9 分鐘起發生蓄積之煙層下降的狀況，煙層會於屋頂處蓄積，並隨著火災的發展，含有高熱會蓄積煙量的累積而逐步下降。在這種火災情境下火災的成長模式會根據燃燒的物質與鄰近火源周圍之火災因子，火災並持續以核心溫度 1000 至 1300 攝氏度燃燒，若此時該火源附近也堆放大量助燃物、可燃物質，則必然會進一步的擴散火災情況。

在本模擬的最後階段，該火羽流會不斷的加熱內部空間。煙層也下降至充斥整個空間，全部空間充滿了約 160 攝氏度之熱空氣。此為理想之火災情境，預設之火災因子僅有防護服堆置，且無助燃劑的使用，在實際除役工程作業進行之現場則可能會有 Cable Tray、PVC 電線、現場照明燈具、通風風管通過、或其他可能受堆置之可燃物質，只要熱通量達到了一定的程度，致使物體之表面溫度達到其燃點，便會發生熱裂解的反應，產生可燃氣體並在表面發生燃燒現象。屆時則可能會有擴大火災態勢，並且透過通風管、電線、電盤延燒的狀況。模擬到了最後階段 15 分鐘的時候，仍然可以透過消防防護計畫進行搶救，而不至完全使現場失去控制。現場完全失控的情況比如說受大量黑煙瀰漫並有閃燃 Flashover

的狀況發生等...。閃燃之定義為由於現場堆積了大量可燃物質，在密封環境中燃燒時，會產生大量煙霧，煙霧會向其他空間對流，將煙霧中的熱輻射傳遞至周圍。受熱輻射影響，其他區域的物體逐漸開始熱裂解，並釋放出可燃性氣體（主要為一氧化碳）。當火場溫度不斷升高並超過攝氏 650 度時，頂部積聚的煙霧中的一氧化碳會達到自燃點（約 609°C），在極短時間內被高溫引燃，從而導致整個火場瞬間燃燒起來。此種狀況以消防角度來說為現場的完全失控，現場將再無可燃物質也再無可存活之生命，那建議只能進行防禦性的消防戰術，不可以貿然進入現場進行消防搶救。另外於密閉空間中，亦有可能發生復燃(Backdraft)的狀態指火災在缺氧環境燃燒時，當打開開口(門、窗...等)會有大量的新鮮空氣衝入現場，而導致爆發式的劇烈燃燒現象，從而導致現場火災復燃，而位於開口處之搶救人員，則可能會受到大量火熱之侵襲。因此欲對於密閉空間進行火災搶救作業時，務必要十分注意開口的狀況，不可貿然開門、進入。而火災的燒穿也是該空間火災失控的一環，通常來說一個完整的防火區劃會有能承受 1 小時至 2 小時之能力。但若遇到火載量過高，火災持續時間過久發生失控情況，火焰會燒穿開口部(如風管通過處或電纜托架 Cable Tray)，核電廠的防火要求極高，於 9/27 參訪中能看到，除了於開口貫穿部有塗上防火填塞塗料外，亦有使用不銹鋼材對防火填塞部進行封板的動作，提高防火填塞的耐用性與防火功能，這對於開口部與整體的防火安全性有極高的幫助。儘管如此，如果沒有妥善地進行控制手段，超過了防火區劃的防火時效時，則可能會擴散至鄰近房間，造成延燒與火災失控。因此，透過本研究，進行火災防護及防火管制的作業可說是很重要的。

## 六、專家學者訪談意見分析

本研究案第一次專家座談會

表 20: 專家學者座談會資料表

編號	姓名	服務單位	職務	學歷
A	許 OO	清華大學	研究員	博士
B	林 OO	台灣科技大學	教授	博士
C	潘 OO	臺灣警察專科學校	副教授	博士
D	郭 OO	臺灣警察專科學校退休	前資訊室主任	碩士

### 1. 林 OO：

剛剛有提到施工中除役就是拆除，拆除會使用之使用切除的方式，就建築部分來看，第一個就是火源的管制:從其他國家案例來看，火源的管制，只要火源的管理可燃物的放置方式就是集中堆置在某個地方，有沒有可能變成是一種對於來施作廠商的要求，這些拆除下來的可燃物，是否能收納進去「太空包」內。太空包可大可小，且上面且需要有覆蓋的太空包，拆卸下來的東西放置入太空包內，或者有準備防火布，能夠將可燃物給覆蓋住，那就可以減少可燃物起火的可能。或者使用如同砂石車那種帆布去覆蓋，或使用收納車體的方式。→目的是要可以形成小區劃，就可以減少火災的發生。老師的研究室中就有學生做要在倉儲內，使用太空包將其裝起來並互相延燒，那我們使用太空包若是有蓋著的狀況，外面起火也不容易會燒到裡面，因此使用有覆蓋的太空包。

本研究分析：在核電廠除役的拆除作業中，火源管制與可燃物管理是防火安全的核心。建議參考國外案例，對拆除過程中的可燃物進行集中堆置和有效覆蓋，減少火災風險。可燃物拆除後可存放在上方有覆蓋的「太空包」內，這些太空包的大小可依現場需求選擇，並可使用防火布、砂石車帆布或其他防火覆蓋物加以隔絕，這樣即使外部發生火源，火勢也不易蔓延至內部。火源管制上，應將所有火源集中管理，避免接觸可燃物，並隨時準備防火覆蓋裝置，以確保現場安全。此管理方式不僅可降低可燃物暴露在火源中的風險，還能將工地分為多個小區劃，有助於延緩火災的蔓延速度。根據研究顯示，這些防火覆蓋物在火勢蔓延防控中效果顯著，建議在除役拆除工地中廣泛應用，以提升防火管理的整體安全性。

## 2. 潘 OO：

在整個計畫是非常完整，但針對核電廠除役，相關火災的科技可說是十分複雜，關於可燃物的種類要掌握可說是非常不容易，對於現場勘查的部分對於核電廠也是有幫助的，可以協助分類核電廠的可燃物。核電廠除役最重要的因素為「堆積」這種是最有可能造成風險的存在。還有重要因素是「引火源」其位置及種類，可以針對核電廠多做些瞭解。核電廠在除役的過程中，其空間區劃落差非常大，因此做相關防護會非常困難，在「空間區劃」部分也可以做些探討。在先行的核一廠，其燃料池還有相關輻射物質，在發生火災時也很容易發生重大危害，在逃生時會受到挑戰。在現場除了可燃物是否可能會產生一些氣體如「氫氣」等，若會產生這種氣體，那產生爆炸的可能性也是有的，在除役階段也可以針對這些爆炸氣體做探討。「電纜」也是要注重探討的部分，在 480 度以上之電纜相關防護、藥劑有特殊考量。除此之外還有「發電機」的拆除，是否需要使用公共危險物品辦法的使用，以上都可以做為考量。

最主要還是要回歸防火管理，重點就是消防防護計畫，其中重點就是案例的探討研究中也有看到。防禦的部分，針對建築物起火，或是能夠快速偵測的能力，也是要提供給核電廠做為參考。未來是否能夠啟用也使大家在關注的議題，因此針對這些火災風險的探討和 FDS 的模擬，以上供參考。

本研究分析：在核電廠除役過程中，火災防護管理至關重要。核電廠除役涉及多種可燃物，且種類繁多，需加強現場勘查和分類，尤其是堆積的可燃物及引火源的位置和種類，這些是火災風險的主要因素。由於空間劃分差異大，防火措施在特定區域（如核一廠的用過燃料池）應有專屬於該區域的特定考量。以燃料池區域而言，一旦發生火災且廠房空調輻射過濾系統失效，則可能外釋至環境。為防止爆炸，還需考慮是否會發生氫氣等易燃氣體累積問題，以及針對高溫電纜的特殊防護需求。發電機拆除作業亦應評估是否需要公共危險物品的管理。總體而言，防火管理是除役階段的核心，應參考國內外的案例經驗，並加強對建築火災的快速偵測與防護建議。

## 3. 許 OO：

本次簡報蒐集了很多資料，有各式建築案例的蒐集也是相當寶貴的。有一點是可以再進一步整理的部分是：「哪些可燃物是國內的核電廠會出現的？」如一般工地中拆除過程中可能會拆下很多木材，但在核電廠中可能會比較少木材的產生，建議能夠在有限的時間底下，針對核電廠的可燃物分析能再有更多著墨。

針對拆除的部分，有些狀況在國內的核電廠應該不會發生的，比如說工人亂丟菸蒂，因為在核電廠的管制是非常非常嚴格的，因此在國內是比較少見的。因此可能性發生比較低的情況，較不應跟其他引火源放在同一個比重來看，這情況會較難符合國內現況。根據國內核電廠，當其核燃料仍在壓力槽內，因此所有的安全措施應該要比照「運轉中的核電廠」去保護他。若廠內僅有用過燃料池，就會視除役的進程調整相關措施。

本研究分析：本次簡報蒐集了許多寶貴的建築案例資料，特別是在核電廠除役的火災風險分析方面，建議更聚焦於核電廠特有的可燃物種類。與一般工地拆除不同，核電廠中的木材較少，應優先考慮核電廠內常見的可燃物，以提高資料的實用性。此外，核電廠內某些在普通工地常見的引火風險（如亂丟菸蒂）發生的可能性極低，因其安全管控極為嚴格，因此這類風險與其他引火源相比可能權重較低，更符合核電廠的實際情況。目前國內核電廠除役時，部分核燃料仍在壓力槽內，要求安全防護措施依照「運轉中的核電廠」規格進行；若核燃料位於用過燃料池內，則再次臨界的可能性較低，可適用除役計畫的規範。最後，建議確認熱傳導公式的引用是否正確，以確保計算符合核電廠除役的安全標準。

#### 4. 郭 OO：

因為我的專長是 FDS 火災模擬，所以只分享模擬這部分。FFD 在電腦的模擬運算要很長，但本研究只模擬一個空間而已。像剛才 100 多萬格點，若能探討後續有延燒問題，可能會更加真實？那這樣格點，建議可以用多台電腦去處理「延燒」的狀況，才會比較快。

本研究分析：專家的建議主要圍繞著如何更真實地進行火災模擬。在模擬中，格點數量的增加能更精確地呈現延燒情境，但對於計算資源的需求也會大幅增加。專家建議若要模擬百萬格點以上的延燒情況，可使用多台電腦協同處理，以縮短運算時間並提升模擬效果，讓火災模擬更加真實且有效。

## 參、 主要發現與結論

### 一、 結論與建議

#### (一) 結論

本研究針對核電廠除役期間的消防防護問題，結合現場參訪及文獻資料進行了深入分析。除役期間，由於設備拆除和場區配置的變動(如臨時存放區的設置、人員及設備活動動線調整)，可能產生部分可燃物，同時因高溫切割設備的使用及部分消防設施被拆除或停用，火災風險顯著提高。此外，現場集中堆放棉質防護服和其他可燃物、切割作業用乙炔鋼瓶及氧氣瓶相鄰且未詳實固定等問題，在火災發生時可能加劇火勢並影響疏散安全。

本研究認為，核電廠除役的防火管理應重點參考大型工地的防火措施，並根據NFPA921燃燒四面體理論，透過減少可燃物及控制能量來源來降低火災風險。通過全盤的火災危害分析 (Fire Hazard Analysis, FHA)，能有效評估設備與現場的防火能力，以及時調整防護策略，保障人員及場區的消防安全。

#### (二) 建議

##### 1.可燃物管理和分區存放

在拆除作業中產生的大量可燃物應妥善管理，建議將不同類型的可燃物分區存放並積極管理，例如：棉質防護服堆放箱，以防火布覆蓋。此外，可設定清理和檢查的頻率，定期清理不必要的可燃物，並持續檢查其堆放區的火災隱患。

##### 2.強化火源管理與設備固定措施

建議對高溫作業區域加強火源管理，尤其是高溫切割設備的使用應配備移動式滅火器，並設置防火屏障，以隔離火花飛濺。對乙炔鋼瓶和氧氣瓶等易燃物資應設置固定措施，避免意外倒置或損壞造成火災。此外，可引入高靈敏度的火焰及煙霧探測器，減少對人員巡邏的依賴，確保火災初期能及時發現。

##### 3.增設臨時性消防系統與應急方案

建議針對拆除階段的火災高風險區域增設臨時性消防系統，如滅火器、移動式消防水帶及緊急噴淋系統，以在原有消防系統部分停用的情況下，依然能提供足夠的火災防護。根據現場人員作業範圍設計疏散計劃，並加強人員的火災應急訓練，

確保在火災發生時工作人員能迅速、安全地撤離。在動火及明火拆解過程中，建議核電廠內的消防人員協助監控並提供火災撤離支援。

#### **4.定期進行火災危害分析**

建議依據 RG1.191 和 FHA 進行定期的火災危害分析，對現場的設備與環境風險進行評估。通過辨識各區域的火災危害因子，及時調整防火方案，並針對特殊的除役風險設計合適的防護策略，確保防火能力隨環境變化而動態更新。FHA 分析結果亦可作為管理策略的基準，並在除役過程中的各個階段予以應用，進一步提高除役期間的消防安全水平。

#### **5.參考大型工地防火管理的經驗**

由於除役場域與大型工地在火災風險上的相似性，建議參考大型建築工地防火管理的措施，例如嚴格控制現場的可燃物，增加高風險區的監控設備，並加強施工人員的防火教育與訓練。此外，定期與消防單位聯繫，進行聯合演練，以確保遇到火災時，各單位能有效合作並迅速處置火災情況。

## 肆、 參考文獻

- 【1】 綠色和平法國辦公室 (2019 年 1 月)。全球核廢料危機報告。  
<https://www.greenpeace.org/static/planet4-taiwan-stateless/2020/02/18633934-%E5%85%A8%E7%90%83%E6%A0%B8%E5%BB%A2%E6%96%99%E5%8D%B1%E6%A9%9F%E5%A0%B1%E5%91%8A.pdf>
- 【2】 許榮鈞(2017)。除役核電廠用過核燃料室內乾式貯存安全管制技術 (105FCMA009)。行政院原子能委員會。
- 【3】 曾佑皓、黃育祥，核電廠除役期間用過核子燃料貯放消防安全之研究，*災害防救學報*第 22 卷，2021 年 12 月。
- 【4】 經濟部核能發電後端營運基金管理會。核一／二／三乾貯計畫。核能發電後端營運基金管理會。  
[https://www.nbef.org.tw/page.php?level1\\_id=6&level2\\_id=49](https://www.nbef.org.tw/page.php?level1_id=6&level2_id=49)
- 【5】 行政院原子能委員會放射性物料管理局(2019)。美國用過核子燃料乾式貯存設施異常事件彙整手冊。行政院原子能委員會放射性物料管理局。  
[http://www.aec.gov.tw/webpage/dry/files/index\\_03\\_7.pdf](http://www.aec.gov.tw/webpage/dry/files/index_03_7.pdf)
- 【6】 Jones, S. J., Averill, A. F., Ingram, J. M., Holborn, P. G., Battersby, P., Nolan, P. F., ... & Wakem, M. J. (2006, March). Mitigation of hydrogen-air explosion using fine water mist sprays. *Institution of Chemical Engineers Symposium Series, 151*, 440.
- 【7】 台灣電力公司。第一核能發電廠乾貯計畫安全分析。台電核能後端營運。  
<https://nbmi.taipower.com.tw/%E4%B9%BE%E8%B2%AF%E8%B3%87%E6%96%99%E4%B8%8B%E8%BC%89/>
- 【8】 經濟部核能發電後端營運基金管理會。核一／二／三乾貯計畫。台電核能後端營運。[https://www.nbef.org.tw/page.php?level1\\_id=6&level2\\_id=49](https://www.nbef.org.tw/page.php?level1_id=6&level2_id=49)
- 【9】 Jee, M. H., Moon, C. K., & Kim, H. T. (2013). Performance-based fire fighting strategies for confined fire zones in nuclear power plants. *Progress in Nuclear Energy, 62*, 16-2.

- 【10】 NRC, U. (2004). Fire Dynamics Tools (FDTs) Quantitative Fire Hazard Analysis Methods for the US Nuclear Regulatory Commission Fire Protection Inspection Program. *NUREG-1805*.
- 【11】 NEI(2022).*Decommissioning Status for Shutdown U.S. Nuclear Plants*.NEI.<https://www.nei.org/resources/statistics/decommissioning-status-for-shutdown-us-plants>
- 【12】 Brendebach, B. (2016). Decommissioning of nuclear facilities: Germany's experience. *IAEA Bulletin (Online)*, 57(1), 24-25.
- 【13】 World Nuclear Association.*Japan Power Demonstration Reactor (JPDR)*. Japan. <https://www.world-nuclear.org/reactor/default.aspx/JPDR>
- 【14】 Steven McKenzie (2014, November 21).*Fire at Dounreay led to release of radioactivity*.BBC NEWS.<https://www.bbc.com/news/uk-scotland-highlands-islands-30143655>
- 【15】 Reuters (2016, January 7).*Fire at Japan nuclear plant put out; no danger to public - operator*. REUTERS.<https://www.reuters.com/article/uk-japan-nuclear-fire-idUKKBN0UL0GF20160107/>
- 【16】 Online News Editor (2021, August 17).*Operator confirms smoke at Japanese nuclear power plant, no leaks detected*. LAPRENSALATINA.<https://www.laprensalatina.com/operator-confirms-smoke-at-japanese-nuclear-power-plant-no-leaks-detected/>
- 【17】 Shizuoka (2021, August 17).*Smoke confirmed at Hamaoka nuclear plant, 2nd reporting within week*. KYODO NEWS.<https://english.kyodonews.net/news/2021/08/9561e5837ec9-breaking-news-fire-alarm-goes-off-at-hamaoka-nuclear-plant-in-shizuoka-operator.html>
- 【18】 TOKYO(Xinhua) (2017, February23).*TEPCO unaware of cause of smoke at Niigata nuclear plant in latest blunder*.[http://www.xinhuanet.com/english/2017-02/23/c\\_136080119.htm](http://www.xinhuanet.com/english/2017-02/23/c_136080119.htm)
- 【19】 自由時報 (2018 年 11 月 1 日)。日本柏崎刈羽核電廠驚傳火警官方：無放射物質外洩。 <https://news.ltn.com.tw/news/world/breakingnews/2598465>

- 【20】 環球網 (2021 年 10 月 26 日)。日柏崎刈羽核電廠火災。澳門日報。  
[www.macaodaily.com/html/2021-10/27/content\\_1552703.htm](http://www.macaodaily.com/html/2021-10/27/content_1552703.htm)
- 【21】 YASUO TOMATSU (2023, January 17). *Laptop catches fire at idle nuclear power plant in Niigata*. The Asahi Shimbun.  
<https://www.asahi.com/ajw/articles/14816471>
- 【22】 TOKYO(IANS) (2023, April11) .*Fire erupts in Japan nuke plant*.SAKSHIPOST. <https://www.sakshipost.com/news/fire-erupts-japan-nuke-plant-179133>
- 【23】 王佩翊 (2022 年 12 月 9 日)。日核電廠驚傳火警！電解室「濃煙密布」 起火原因仍待調查。ETtoday 新聞雲。  
<https://www.ettoday.net/news/20221209/2397982.htm>
- 【24】 The Lithuania Tribune (2016, August3).*Fire incident reported at decommissioned Ingalina nuclear plant*.The Lithuania Tribune.  
<https://lithuaniatribune.com/fire-incident-reported-at-decommissioned-ingalina-nuclear-plant/>
- 【25】 IFW Staff (2020, May21).*Fire Breaks Out at Closed Nuclear Plant in The Netherlands*.IFW. <https://www.industrialfireworld.com/555992/fire-breaks-out-at-closed-nuclear-plant-in-the-netherlands>
- 【26】 Charles Digges (2014, March17).*Monday fire at Nerpa naval shipyard reveals pattern of neglect in delicate nuclear decommissioning practices*.BELLONA. <https://bellona.org/news/nuclear-issues/2014-03-monday-fire-nerpa-naval-shipyard-reveals-pattern-neglect-delicate-nuclear-decommissioning-practices>
- 【27】 Taylor, R.E., Groot, H., and Ferrier, J. (2003), *Thermophysical Properties of PVC, PE and Marinite*, Report TPRL 2958.
- 【28】 Pathfinder (2023, February).*Pathfinder User Manual*. THUNDERHEAD ENGINEERING.<https://support.thunderheadeng.com/docs/pathfinder/2023-2/user-manual/>
- 【29】 Pheasant, S., &Haslegrave, C. M. (2005). Ergonomics in the home. S. Pheasant, *Bodyspace: Anthropometry, Ergonomics and the Design of Work*, 105-109.

- 【30】 Galea, E. (2003). *SFPE Engineering Guide to Human Behavior in Fire*. Soc Of Fire Protection
- 【31】 Society of Fire Protection Engineers(2019). *SFPE Guide to Human Behavior in Fire*.Springer International Publishing AG
- 【32】 IMO. (2007). Guidelines for Evacuation Analysis for New and Existing Passenger Ships. *MSC. 1/Circ. 1238*.
- 【33】 Pathfinder (2023, February). *Pathfinder User Manual*. THUNDERHEAD ENGINEERING.<https://support.thunderheadeng.com/docs/pathfinder/2023-2/user-manual/>
- 【34】 Pathfinder (2023, February). *Pathfinder User Manual*.<https://support.thunderheadeng.com/docs/pathfinder/2023-2/user-manual/>
- 【35】 Marchant, E. W. (1980). Modelling fire safety and risk. In D. Canter (ed.), *Fires and Human Behaviour*.
- 【36】 Olsson, P. Å., & Regan, M. A. (2001). A comparison between actual and predicted evacuation times. *Safety science*, 38(2).