

行政院原子能委員會
委託研究計畫研究報告

火災危害分析 (Fire Hazard Analysis)

技術研究

計畫編號：922001INER004

受委託機關(構)：中央警察大學

計畫主持人：沈子勝

報告日期：中華民國九十三年十一月三十日

摘要

核能發電具有許多其他發電方式所沒有的優勢，然而核能安全顧慮卻是全世界人類共同關心的議題，其中尤以火災事故最為人們所關切，先進國家早已投注大量人力與資金進行相關的研究，而我國在核電廠火災危害分析方法與工具方面尚處於起步的階段。由於性能式消防安全評估可有效提昇核電廠的消防安全，並能避免不必要的投資，故已成為世界的趨勢。本研究從國內外核電廠重大火災案例和火災統計資料的探討，分析核電廠之火災危害特性，從而確立核電廠之主要火災類型與其相關的火災情境；從國外先進國家核電廠相關消防安全法規與標準，探討核電廠火災防護之理念以及核電廠火災危害分析架構和方法，並針對常用於火災危害分析的火災模擬工具進行比較與探討。

在核電廠中，大量集中的電纜為火災時主要燃料來源之一，一旦引燃極易形成延燒之勢，進而可能造成重要設備之失效，而美國 Browns Ferry 核能電廠火災即為最明顯的例子，本研究並基於火災模擬軟體 FDS 的多項特殊功能，而使用該模式針對電纜托網火災進行模擬評估，本研究透過電腦火災模擬分析探討兩條電纜托網間不同距離、空間通風狀況、排煙設備、自動撒水設備對火勢發展以及受熱目標所產生的影響，可以提供未來國內相關單位改善國內核電廠消防安全設計及進行消防安全評估之參考。

關鍵詞：核電廠、火災危害分析、核能安全

ABSTRACT

Nuclear power has much more advantages than other methods, but nuclear safety is always the important issue around the world. In the issue of nuclear safety, fire incidents have drawn much attention. Though the developed countries have invested much capital and human resource to the area of fire safety evaluation for nuclear power plants, relative studies in Taiwan are still at the beginning. The performance-based fire safety evaluation method has become a worldwide trend since it can effectively promote the fire safety of nuclear power plants and reduce lots of needless investments. This research develops nuclear power plants' main fire types and relative fire scenarios based upon several serious NPP fires and fire statistics in Taiwan and U.S.A. This research also develops the basic structure and procedures of fire hazard analysis for nuclear power plants through the discussion of the fire protection standard for NPP in advanced country, and the comparisons of fire models

Intensely concentrated cables are one of the main combustibles in NPP, often leading to serious fires and damaging other safety related systems, just like the Browns Ferry NPP fire occurred in U.S.A. In order to provide references to the authorities in Taiwan, this research uses the field model FDS to simulate cable tray fires to analyze the effects of various distances between the two cable trays, at different ventilation conditions and fire safety system operation to the target.

Key words : Nuclear Power Plants(NPP), Fire Hazard Analysis,
Nuclear Safety

目錄

第一章 緒論

第一節 研究動機與目的-----	1
第二節 研究範圍與限制-----	4
第三節 研究方法與流程-----	6

第二章 核電廠火災危害特性分析

第一節 核電廠簡介-----	8
第二節 國內外重大災例探討分析-----	16
第三節 美國核電廠火災統計分析-----	23
第四節 小節-----	27

第三章 核電廠消防安全評估法規與方法之探討

第一節 美國核電廠消防安全法規與標準之演進-----	33
第二節 NFPA805 性能式消防安全評估方法-----	37
第三節 NFPA805 確認核能安全系統之原則-----	46
第四節 火災模擬工具之比較與探討-----	54
第五節 小結-----	62

第四章 核電廠火災危害分析實例探討

-----以 Cable Tray 火災為例

第一節 場模式火災模擬軟體 FDS 簡介-----	65
第二節 設計火源與格點設定之探討-----	75
第三節 火災情境之建立-----	82
第四節 模擬結果分析與探討-----	86

第五章 結論

結論-----	100
附件一核電廠火災危害分析審查導則草案-----	107

圖目錄

圖 1-1 研究流程圖	7
圖 2-1 沸水式核能發電廠示意圖	9
圖 2-2 壓水式核能發電原理示意圖	10
圖 2-3 核電廠構造示意圖	13
圖 2-4 汽輪發電機外觀	14
圖 2-5 電纜分配室	14
圖 2-6 核電廠控制室	15
圖 2-7 變壓器實體	15
圖 2-8 相隔離母線匯流排燒毀情形	17
圖 2-9 電纜悶燒情形	18
圖 2-10 匯流排之盤面損壞情形	19
圖 3-1 NFPA805 所使用之方法步驟	44
圖 3-2 決定式和性能式途徑之選擇	45
圖 4-1 FDS 功能架構圖	66
圖 4-2(a) 紊流模式示意圖	69
圖 4-2(b) 紊流模式示意圖	69
圖 4-3(a) 最高熱釋率 1MW 之設計火源圖	76
圖 4-3(b) 最高熱釋率 2MW 之設計火源圖	76
圖 4-4(a) 距火源水平 1.65 公尺處垂直溫度比較	79
圖 4-4(b) 火源處垂直溫度分布比較	79
圖 4-4(c) 距火源水平 5.6 公尺處垂直溫度比較	80
圖 4-5(a) 不同格點之時間平均軸心速度 (熱釋放率 24kW)	80
圖 4-5(b) 不同格點之時間平均軸心溫度 (熱釋放率 24kW)	81
圖 4-6 格點劃分示意圖	81
圖 4-7 空間架構示意圖	83

圖 4-8(a) case1 動作圖-----	89
圖 4-8(b) case2 動作圖-----	89
圖 4-8(c) case3 動作圖-----	90
圖 4-8(d) case3a 動作圖-----	90
圖 4-8(e) case4 動作圖-----	91
圖 4-8(f) case5 動作圖-----	91
圖 4-8(g) case6 動作圖-----	92
圖 4-8(h) case7 動作圖-----	92
圖 4-8(i) case8 動作圖(撒水頭動作情形) -----	93
圖 4-8(j) case8 動作圖(切面正視) -----	93
圖 4-8(k) case8 動作圖(切面側視) -----	94
圖 4-9 受熱目標時間溫度變化比較圖-----	94
圖 4-10 熱通量隨時間變化比較圖-----	95
圖 4-11 氧氣量隨時間變化比較圖-----	95
圖 4-12 熱空氣層溫度隨時間變化比較圖-----	96
圖 4-13 case1 熱釋率變化圖-----	96
圖 4-14 case2 熱釋率變化圖-----	97
圖 4-15 case3 熱釋率變化圖-----	97
圖 4-16 case3a 熱釋率變化圖-----	98
圖 4-17 case4 熱釋率變化圖-----	98

表目錄

表 1-1 火災造成爐心熔毀機率一覽表-----	2
表 2-1 國內核電廠火災事故一覽表-----	22
表 2-2 美國核電廠火災統計-以火災類型分-----	24
表 2-3 美國核電廠火災統計-以火災地點分-----	24
表 2-4 美國核電廠火災統計：以火災原因分-----	25

表 2-5	美國核電廠火災統計-以起燃部件分-----	26
表 2-6	核電廠基本火災情境分類表-----	30
表 3-1	NFPA805 的 Goals 和 Performance objective 對照表-	39
表 3-2	區域模式模擬軟體比較表-----	56
表 3-3	場模式模擬軟體比較表-----	61
表 4-1	空間特性參數-----	84
表 4-2	電纜表面材質特性參數-----	84
表 4-3	FDS 電腦模擬火災情境-----	84
表 4-4	模擬結果一覽表-----	88

第一章 緒論

第一節 研究動機與目的

一、研究動機

電力為所有工業之母，亦是日常生活須臾不可或離的能源，台灣自產能源極為匱乏，無論煤炭與石油，大部份均依賴進口，水力資源有限，復受季節影響，更不足以應付全面性的需求，先後兩次能源危機(1973年10月及1978年12月)，雖然均能化險為夷，但也凸顯了我國發電能源多元化的必要性，並促使我國大力邁向核能發電的行列。目前全世界約有32個國家的480座商用核子反應爐運轉，提供人類電力需求的百分之十七，而我國目前運轉中之核能電廠共有三座，全部六部機組，提供我國約總電量百分之二十的電力，對我國的經濟民生具有非常重要的地位。

核能電廠雖然為人類帶來了福祉與便利，但因為有輻射外洩造成危害人員及污染環境之風險，隨著時代的進步與民眾危機意識的提高，人們亦較以往更為關切核能安全的相關議題。而由表1-1之分析顯示，火災造成反應爐心熔毀之機率（CDF：Core Damage Frequency）仍佔有相當大的比例，火災危險仍為核能電廠安全之重要課題。在國內民國九十年三月十八日發發生之核三廠三A事件，雖然火勢被CO₂自動滅火設備撲滅，但因排煙設備未發揮應有的功能，使得現場濃煙造成一片混亂，對我國核電廠安全性的形象造成莫大的損傷。而國外，1975年美國之Browns Ferry核能電廠火災事故更充分顯示了火災事件實為核能安全不可忽視的項目，因此，如何針對國內核電廠消防安全評估，進而提升核能電廠之整體消防安全設計，減少我國核能電廠火災事故的發生，實是一項非常

迫切的議題。

表 1-1 火災造成爐心熔毀機率一覽表¹

Plant	Sponsor	Date	Fire CDF (/yr)	Total CDF (/yr)
HTGR (design)	USDOE	1979	1.1×10^{-5}	4.1×10^{-5}
Zion 1/2	Utility	1981	4.6×10^{-6}	4.9×10^{-5}
Big Rock Point	Utility	1981	2.3×10^{-4}	9.8×10^{-4}
Indian Point 2	Utility	1982	2.0×10^{-4}	4.7×10^{-4}
Indian Point 3	Utility	1982	6.3×10^{-5}	2.3×10^{-4}
Limerick	Utility	1983	2.3×10^{-5}	1.5×10^{-5}
Millstone 3	Utility	1983	4.8×10^{-6}	7.2×10^{-5}
Seabrook	Utility	1983	1.7×10^{-5}	2.3×10^{-4}
Midland	Utility	1984	2.0×10^{-5}	3.1×10^{-4}
Oconee	Utility	1984	1.0×10^{-5}	2.5×10^{-4}
TMI-1	Utility	1987	8.6×10^{-5}	5.5×10^{-4}
S. Texas Project	Utility	1989	$< 1.2 \times 10^{-6}$	1.7×10^{-4}
Diablo Canyon 1/2	Utility	1990	2.9×10^{-5}	2.0×10^{-4}
Peach Bottom 2	USNRC	1990	2.0×10^{-5}	2.8×10^{-5}
Surry 1	USNRC	1990	1.1×10^{-5}	7.6×10^{-5}
La Salle 2	USNRC	1993	3.2×10^{-5}	1.0×10^{-4}
Grand Gulf 1	USNRC	1994	$< 1.0 \times 10^{-6}$	6.7×10^{-5}
Surry 1	USNRC	1994	2.7×10^{-4}	4.3×10^{-4}

註：CDF: Core Damage Frequency，指造成反應器爐心熔毀之機率

二、研究目的

- (一) 由於核能電廠內設備與空間之複雜性，使得其火災類型種類亦不勝枚舉，本研究即嘗試從國內外重大火災災例和火災統計資料中找出其火災危害之特性，提供國內未來進行核能電廠消防安全評估之參考。
- (二) 由於大量人力與資金的投入，世界各先進國家核能電廠之消防安全防護理念，以及相關技術規範上已逐漸完備，而國內在此一領域之起步較晚，因此本研究希望透過對國外法規標準的搜集與整理，提供國內未來進行核能電廠消防安全評估之參考。

¹資料來源：摘錄自 Nathan Siu, Fire Risk Assessment for Nuclear Power Plants, the SFPE Hand book of Fire Protection Engineering, National Fire Protection Association, 2002, p.5-214-5-226

- (三) 近年來由於性能式法規的應用以及電腦計算速度的倍增，經由電腦火災模擬工具來驗證較複雜、特殊空間之消防安全已成為世界性趨勢，而由於場模式火災模擬軟體 FDS 本身之多項特點，目前已廠廣泛應用於地下車站、機場等特殊種建築，本研究則首次嘗試使用 FDS 模擬核能電廠內之電纜托網火災，透過本研究過程操作程所得之經驗與心得，可提供國內相關單位在設計及進行核能電廠消防安全評估之參考。
- (四) 在核電廠中，大量集中的電纜為火災時主要燃料來源之一，且一旦引燃極易形成延燒之勢，進而可能造成重要設備之失效，而美國 Browns Ferry 核能電廠火災即為最明顯的例子，因此本研究希望透過對電纜托網火災的模擬分析，可以提供未來國內相關單位對電纜托網火災防護的參考。

第二節 研究範圍與限制

基於核能發電之需要，廠房種類包括反應器廠房、輔助廠房、核燃料廠房、廢料廠房、控制廠房、緊急柴油發電機廠房、汽機廠房等多個空間，各廠房內又有各種系統、設備與組件，由於控制廠房為核能電廠之神經中樞，而各種指令之傳達均透過電纜托網(Cable Tray)，加上電纜絕緣物質的高火載量特性，電纜托網之防護便成為核能電廠消防安全的重點，且限於時間、人力與物力的限制，亦不可能對所有核電廠火災類型一一加以量化評估，因此本研究將量化評估的重點集中於電纜托網火災，其他部份則僅做質化的探討分析。

另外，本研究尚有以下之限制：

- 一、受限於時間、人力與物力等因素，本研究將模擬評估之焦點集中在單一火災情境之火災危害量化評估，而非整體機率性的火災危險度評估。
- 二、在火災模擬部分本研究主要以 FDS 為工具，並針對模擬結果進行分析探討，至於其他火災模擬工具，受限於時間、人力與物力，在本論文中僅做扼要簡介與探討，而不做實際模擬比較。
- 三、由於 FDS 為一場模式火災模擬軟體，模擬所需時間較長，本研究由於研究時間有限，僅探討火災初期之各種情境，並設定模擬時間為 20 分鐘。
- 四、在核電廠火災模擬評估的過程中，第一步為選擇分析目標，即選擇與核能安全有關之重要系統、設備及其電纜，本研究受限於時間、人力與物力等因素，僅探討其進行方法與考量事項，而本研究之火災模擬分析對象(電纜托網)為假定之重要設備，亦即是在假設已完成上述分析之前題下進行的。
- 五、由於核能電廠為一較特殊、複雜之場所，某些圖面資料較不易取得，且由於時間、物力、人力等之限制，本研究模

擬分析所建立之空間為一假設狀況，本研究著重在核電廠消防安全評估之過程、方法與模式，而非提供任何具有實際判斷性質之結果。

第三節 研究方法與流程

一、研究方法

(一)文獻探討法 (Literature Survey Method)

蒐集並整理分析有關核能電廠火災災例之相關調查研究及文獻資料，俾掌握核能電廠火災時之火場境況(Scenario)，以作為核能電廠火災危害評估之依據。

(二)實地調查法(Investigation Method)

為取得接近於真實之火災情境，至國內核能電廠調查實體空間尺寸、空間物體擺放、通風狀況、可燃物之分布等事項。

(三)工程分析法(Engineering Analysis Method)

用工程分析方法分析核能電廠可能之火災情境，並以實證經驗公式建立可能之火災成長模式，以利火災電腦模擬之進行。

(四)電腦模擬驗證法(Computer Simulation Examination Method)

建立核能電廠實體空間之空間數值資料，加上以相關文獻之推論，建構核能電廠火災特性與火災境況分析，並採用 FDS 模擬軟體進行量化評估。

二、研究流程

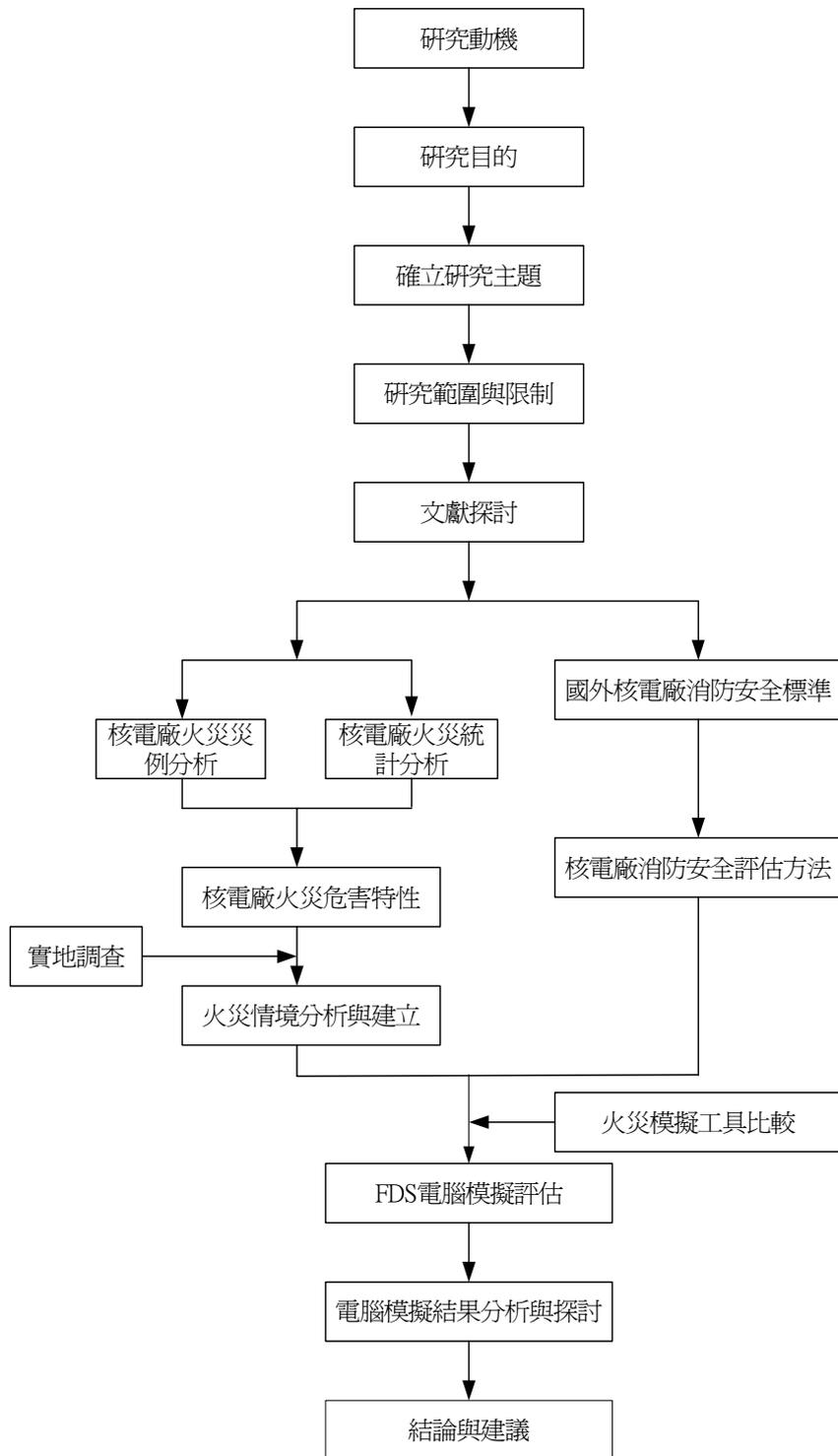


圖 1-1 研究流程圖

第二章 核電廠火災危害特性之探討

第一節 核能發電簡介

核能發電是利用鈾-235 分裂反應所產生的能量，將水加熱使其變成蒸汽，再推動汽輪機與發電機來發電，而核分裂產生的能量則來自分裂後損失的質量。看似很簡單的兩句話，但是真想利用這種原理來發電還須透過很精緻而複雜的工程技術；而在不同地區不同國家的工程師各自努力下，核能發電雖源自相同的物理現象，卻有不同的工程設計。目前世界上數量最多的是輕水式核電廠，即用水作為中子的緩衝劑，依其設計方式又可分為沸水式核電廠和壓水式核電廠，我國第一核能發電廠位於本省東北端台北縣石門鄉，裝置 636 千瓩汽輪發電機兩部，採用美國奇異公司製造之第四代沸水式核反應器，民國 59 年 11 月興工，第一部機於民國 67 年，第二部機於民國 68 年商業運轉；第二核能發電廠位於本省東北端台北縣萬里鄉，裝置 985 千瓩汽輪發電機兩部，採用美國奇異公司製造之第六代沸水式核反應器，民國 63 年 9 月興工，第一部機於民國 70 年，第二部機於民國 72 年商業運轉；第三核能發電廠位於本省南端屏東縣墾丁鎮，裝置 951 千瓩汽輪發電機兩部，採用美國西屋公司製造之壓水式核反應器，民國 67 年 1 月興工，第一部機於民國 73 年，第二部機於民國 74 年商業運轉。有關沸水式與壓水式核能發電原理分別簡介如下：

一、沸水式核能電廠

所謂沸水式核能電廠採直接循環發電方式，即利用核分裂反應在反應爐心產生蒸氣，推動汽輪發電機產生電力，作完功的蒸氣經冷凝、預熱再以飼水泵加壓打入爐心構成循環發電迴路，反應爐底部設有控制棒控制功率升降，以及其他緊急停機系統以備在異常狀時移除爐心所產生衰變熱，使反應爐到達安全停機狀態，如圖2-1所示。

二、壓水式核能電廠

壓水式核反應器流程如圖2-2所示，其分裂反應原理，燃料棒設計，緩和劑功能，壓力槽與圍阻體之作用等都與沸水式核反應器類似；兩者間最大的差別是壓水式反應器在水加熱成蒸汽的過程中採用了兩套迴路，在壓水式反應器中的「主迴路」裏冷水經過爐心加熱後只增加溫度但不變成蒸汽，熱水送至「蒸汽產生器」中把熱量傳給「次迴路」的水後變成冷水再送回爐心；而次迴路的水則會被加熱成蒸汽去推動汽輪機，用過的蒸汽再經海水冷卻後重複使用，這種設計可以確保汽輪機使用的蒸汽絕無核分裂反應所產生的放射性物質，但因系統較為複雜，故運轉與維護也較沸水式反應器費事。此外，壓水式反應器的控制棒設在壓力槽上端，由上向下抽插，比起沸水式反應器由下往上的設計在運作與保養上較為方便。

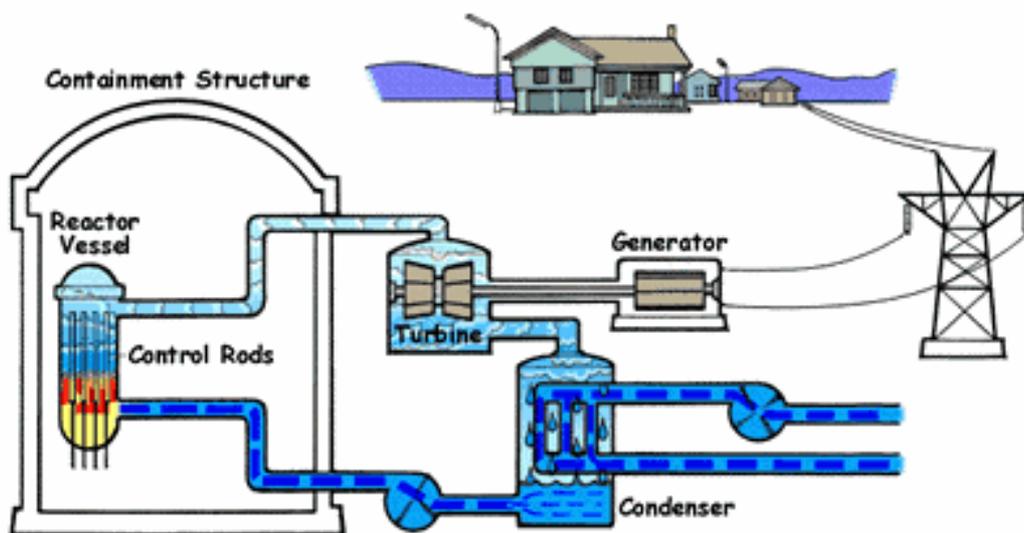


圖2-1 沸水式核能發電廠示意圖²

² 資料來源：<http://vm.nthu.edu.tw/science/shows/nuclear> 清蔚園-核能知識網路展覽

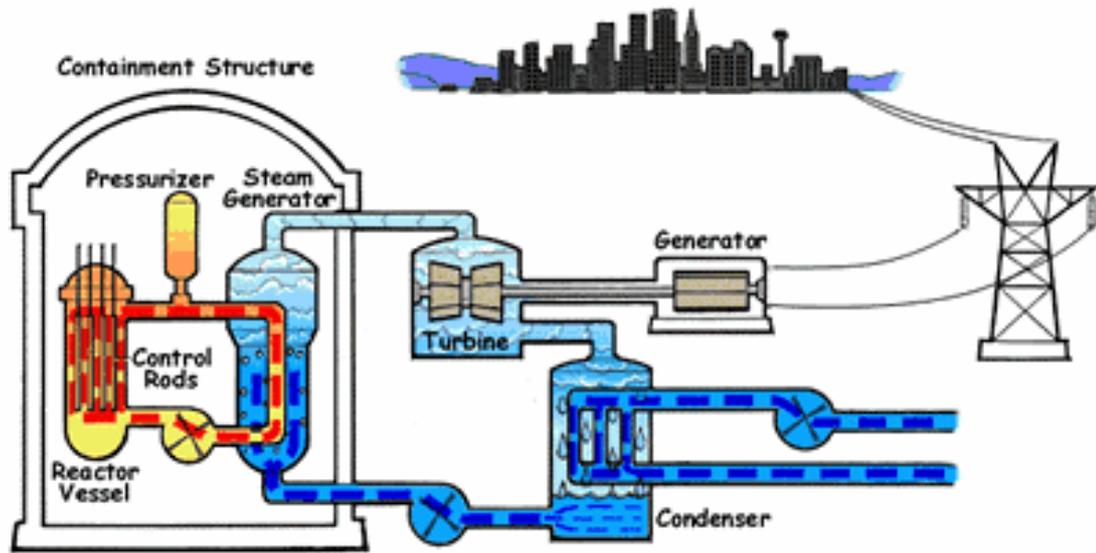


圖2-2 壓水式核能發電原理示意圖³

三、核電廠的潛在火災危害

雖然每一輕水式核能電廠細部設計不盡相同，但由於功能上之需求，一般而言均具有反應器廠房、輔助廠房、控制廠房、汽機廠房等廠房，以沸水式核電廠為例，其構造如圖2-3所示，根據J.H. Talpert的研究⁴，核電廠中擁有大量之機械、電氣、控制等系統，其具有潛在火災危害的地方包括：

(一) 沸水式核電廠廢氣系統

核電廠的廢氣中常會含有氫氣，氫氣來源可能有：1.蒸氣抽氣系統 2.爐水分裂 3.事故後銻與水在高溫下反應 4.蓄電池充電時，若氫氣在空氣中濃度超過4%且接觸到火花、火焰或類似熱源時，可能會發生氫爆現象，而熱源通常是電動馬達中發出的火花。

(二) 潤滑油系統

核電廠中有許多設備、組件需要潤滑油，以便能平穩及有效地運轉，

³ 資料來源：同註2

⁴ 林文興譯，核能電廠火災危險性及其可能造成的損失，原子能委員會核能彙刊第二十四卷第一期，民國七十七年二月。

例如汽輪發電廠和反應爐冷卻水泵均使用大量的潤滑油。

1、汽輪發電機

汽機和發電機都需要大量潤滑油，某些機組使用量甚至達到 150m³，這些潤滑油的燃點約在 250 至 400 之間，而蒸氣的溫度約在 500 至 600 之間，遠超過潤滑油的燃點，汽輪發電廠火災有可能發生在油管破裂或潤滑油油管洩漏至高熱設備上時，沸水式核電廠汽機廠房內蒸氣均具有放射線，發生火災時，消防人員必須注意放射性物質的影響，汽輪發電廠外觀如圖 2-4 所示。

2、反應爐冷卻水泵

反應爐冷卻水泵火災最大的問題是反應器在運轉當中人員無法接近，如果火災不巧在此時發生，電廠消防隊員在反應器安全停機和輻射程度降至安全限值前可能無法採取救火行動。

（三）電纜分配室

電纜分配室中有大量的電纜，造成有大量可燃燒物（電纜絕緣物）集中在一相當小的區域內，燃燒時會釋放大量的濃煙，這些濃煙可能會使電氣設備受損，當兩條重複安全有關電纜通過同一防火區劃時，單一火災事件即有可能造成兩條安全停機路徑同時受損，因此必須採取適當的消防安全措施防護，電纜分配室實體空間如圖2-5所示。

（四）柴油發電機

每座反應器至少具有兩台柴油發電機提供緊急備用電源，由於柴油發電機必須經常進行運轉測試，而在測試時常因潤滑油或燃油洩漏碰到熱引擎引起燃燒，使柴油發電機成為核電廠中發生火災較頻繁的區域。不過，一般而言，每台柴油發電機均位在不同的防火區劃，並有自動滅火系統防護，即使發生火災也較不會影響到安全停機的能力，此種火災的防範可設適當的井欄。

（五）控制室

由於有人員二十四小時監控，控制室內發生火災的機率並不大，但一旦發生火災對安全停機能力或經濟上的損失均極為嚴重，可燃物質包含控制盤內塑膠電纜絕緣、控制盤外面塑膠面板、椅子、紙張等，可

能的引火源包括電氣故障、值班人員違反規定抽煙等，控制室實體空間如圖2-6所示。

（六）輻射管制區

可能的燃料包括電纜群、潤滑油、電氣設備，以及其他臨時性的可燃物，如維護設備、保健物理設備、髒衣物等，輻射管制區發生火災時，必須控制濃煙的蔓延，因為這些濃煙可能已受到放射性物質的污染，被污染的濃煙必需嚴加控制，避免造成人員的曝露。

（七）變壓器

由於大量電氣設備的使用，核電廠中設有許多不同種類的變壓器，一般在室內者屬於乾式變壓器，較大型之變壓器屬於油絕緣式均安裝於室外，其發生火災的原因包括電路過載、閃電、線圈劣化或其他原因導致絕緣油絕緣效應崩潰而發生電弧，引燃變壓器殼或造成變壓器殼破裂，使燃燒的油大量漏出，而可能會波及鄰近設備，變壓器實體如圖2-7所示。

（八）木炭過濾器

木炭過濾器裝於特定之通風系統，可防止放射性物質釋放至廠外環境大氣中，由於外部熱源、通風不良或木炭床吸收核種發熱等原因都可使木炭內部溫度升高形成自然發火(self-ignition)，導致木炭過濾器火災的發生。

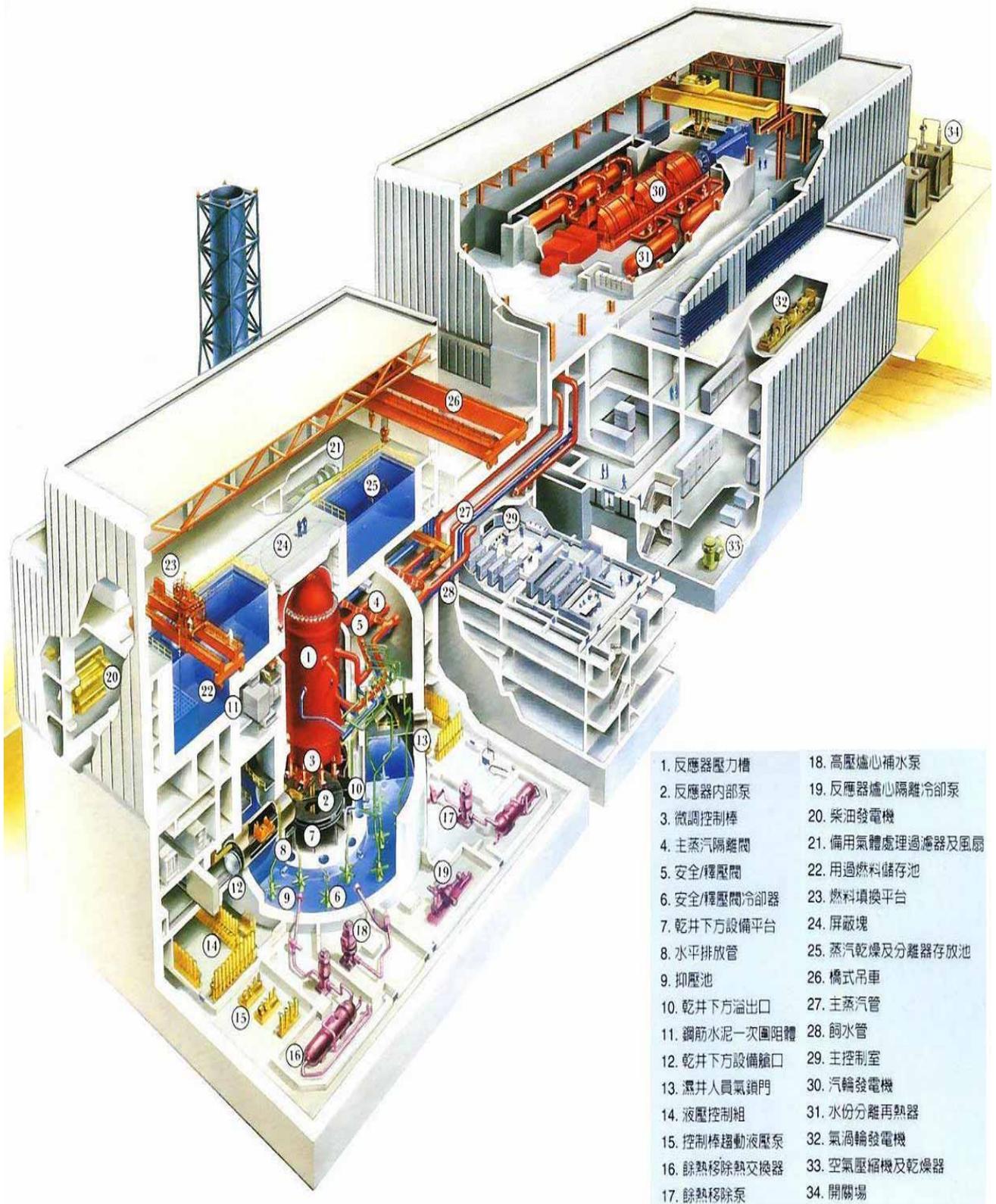


圖 2-3 核電廠構造示意圖⁵

⁵資料來源：臺灣核能史話，行政院原子能委員會，p176。



圖 2-4 汽輪發電機外觀⁶



圖 2-5 電纜分配室⁷

⁶ 資料來源：本研究自行拍攝
⁷ 同註 6。



圖 2-6 核電廠控制室⁸



圖 2-7 變壓器實體⁹

⁸ 同註 6。

⁹ 同註 6。

第二節 國內外重大災例探討分析

由於核電廠廠房空間以及設備的複雜性，再加上有大量可燃物和引火源，使得核電廠發生火災的機會較一般場所高，且其所造成的危害特性亦與一般場所不同，而從歷年來的火災災例中分析核電廠火災危害特性正是最直接的途徑。在核電廠過去的運轉歷史中，無論國內外均曾發生過重大的火災案例，這些災例對於核電廠的消防安全防護理念亦產生相當深遠的影響，因此，本研究將國內過去曾發生過的火災災例整理如表 2-1，並針對國內外核電廠較典型之火災災例，概略敘述如下：

一、國內部分¹⁰

(一)核三廠一號機汽機失火事件

1、發生時間：74年7月7日

2、事件概述：

事件發生前一號機正常運轉中，下午5時21分40秒汽機突然跳脫，反應器亦跟著安全跳脫。電廠值班人員隨即發現汽機廠房內之發電設備失火，遂立即展開滅火工作，於下午6時50分左右將火勢撲滅。事件係發生在汽機廠房內，使汽輪發電機設備受到嚴重損壞，但未波及電廠其他廠房設施，亦未造成輻射外洩，其相隔離母線匯流排燒毀情形如圖2-8所示。

3、事件肇因：

- (1)事件原因為汽機主軸偏心移位及劇烈振動，使發電機靠勵磁機端之外護罩鬆脫並破壞氫氣油封結構，導致高壓氫氣大量外洩。
- (2)氫氣外洩後，引發氫氣燃燒之可能原因為發電機與勵磁機間之軸承劇烈磨擦所產生之火花或發電機軸承外罩間接合處金屬間發生電擊之火花。

¹⁰ 資料來源：核設施之消防設計技術與應用研討會書面資料，核能研究所，2003年10月。

(3)氫氣引燃後，汽輪發電機之潤滑油則助長燃燒，使火勢漫延至其他設備組件。火災延燒約1小時30分之主因，並非電廠消防系統設備不足，而係汽機潤滑油泵未及時停掉，及滅火人員顧慮發電機之設備而未適時使用消防水滅火所致。



圖2-8 相隔離母線匯流排燒毀情形

(二)核二廠一號機汽機廠房電纜悶燒事件

1、發生時間：86年4月21日

2、事件概述：

4月21日機組於歲修期間，工作人員在汽機廠房三樓執行電纜托架焊接補強工程，並鋪設防火布。11:30焊接工作人員離開工作現場休息。12:30消防班巡視人員現場巡視，未發現任何異狀。13:00工作人員午休後回到現場，發現防火布鋪設處有悶燒現象，乃迅速撲滅。本次事件造成位於焊接處約一公尺下方電纜托網內98條電纜，長度各約30公分的範圍悶燒受損，其電纜悶燒情形如圖2-9所示。

3、事件肇因：

- (1)防火布鋪設不當，造成焊渣掉落且累積於兩層防火布之間，因散熱不佳以致焊渣熔毀防火布，致使電纜托網內之電纜悶燒。
- (2)工安人員及監工於焊接工作前後之工安檢查不夠確實。



圖2-9 電纜悶燒情形

(三)核三廠一號機開關箱燒毀事件

1、發生時間：90年3月18日

2、事件概述：

(1)3月18日凌晨00時46分，楓港、恆春地區季節性的鹽霧害導致超高壓345KV及高壓161KV輸電線路跳脫，引發台電公司核三廠喪失廠外電源，繼而造成廠內安全交流電源系統故障，一號機兩台緊急柴油發電機亦無法供電，造成一號機兩串緊要電源匯流排同時失電，機組進入緊急3A事故。由於現場工作人員及時審慎處理，並未造成輻射外洩的核子事故，整個事故於當日凌晨02時54分第五台柴油發電機成功供電後解除，其匯流排之盤面損壞情形如圖2-10所示。

(2)核三廠一號機的核反應器在本次事故中並沒有受到影響，但是兩串安全系統有二個小時又八分鐘的時間時喪失功能，可以說是國內使用核能發電廠二十多年來，最值得重視的一次緊急事故。

3、事件肇因：

- (1)核三廠一號機緊要電源匯流排A串的第17號斷路器故障，為本次事件之主因。該斷路器故障後，導致A串匯流排接地，使得A串匯流排無法受電，另外也造成斷路器3510與1670跳脫，造成廠外161KV和354KV交流電源都無法送至B串緊要電源匯流排。
- (2)廠外 345KV 輸電系統長期以來因不穩定以及鐵磁共振之因素，應為第 17 號斷路器絕緣劣化之重要原因。根據分析，每當 345KV 線路發生暫態，對 17 號斷路器受電端會造成電壓突波的現象，這種長時間累積的電壓突波效應，可能便是絕緣劣化之主因。



圖 2-10 匯流排之盤面損壞情形

二、國外部分

(一)美國Browns Ferry核能電廠火災¹¹

美國Browns Ferry核能電廠座落於阿拉巴馬州，為一沸水式核能電廠，於1975年3月22日發生火災，事故原因為工作人員使用蠟燭測試電纜室與反應器廠房間之電纜穿越器是否漏氣時，因反應器廠房為防止輻射外洩而維持負壓，由於

¹¹林文興，「核能電廠防火安全評估模式」，明志工專學報第十七期，民國七十四年。

壓力差原因使火焰被吸入反應器廠房，點燃電纜穿越器之填縫劑並延燒至電纜，由於電廠運轉人員擔心用水可能會損害運轉能力，堅持使用二氧化碳系統和滅火器滅火，直到最後運轉人員才同意實施用水灌救，但由於消防隊之水瞄與核電廠螺紋不合，使得火勢延燒七小時之後火災才得到控制，造成一千六百條以上電纜受損，電源系統、控制系統、正常及備用爐心冷卻系統失效，此為震撼核能發電界最嚴重之火災事故，本次事件促使美國重新檢討二氧化碳滅火系統對電纜托網火災的效能，以及其他的核能電廠消防安全之設計與要求，並再次顯示各安全停機系統間防火間距與阻隔之重要性。

(二)美國 Waterford 核能電廠火災¹²

1995年6月10日美國 Waterford 核能電廠三號機因廠外變壓器故障，導致4.16KV A2緊要匯流排之斷路器（Circuit Breaker）快速切換時發生電氣故障引發火災，造成反應爐緊急停機並喪失外來電源，經過消防人員三小時搶救後，才以水將火災撲滅。

(三)美國 San Onofre 核能電廠火災¹³

2001年2月2日美國 San Onofre 核能電廠在大修後起動增加負載過程中，4.16KV斷路器切換時因故障造成電弧過大引起火災，火勢延燒3小時才被完成撲滅，燒毀一個匯流排及六個電力櫃，並損及汽輪發電機。這事件亦造成失去外電，反應爐急停及汽機軸承嚴重受損，雖然未影響安全停機能力，但卻導致117天的停機檢修。延燒兩小時後由消防人員使用消防水將火撲滅，其間因

¹²蔡清雄，火災後果模擬運用於核能電廠防火設計案例研究，國立交通大學機械工程系，2003年10月。

¹³同註7。

喪失正常冷卻水，而靠緊急爐心冷卻系統（ECCS: Emergency Core Cooling System）降低反應爐心之溫度，避免爐心熔毀。

三、綜合分析

由以上之災例可綜合歸納出核電廠火災具有以下幾點特性：

- (一)核電廠在發生火災時，最重要的是必須確保重要設備免受火災之損害，避免爐心熔毀事件之發生以及放射性物質外洩造成環境污染。
- (二)核電廠之重要設備必須具有備餘系統之設計，唯即使有備餘系統，仍不能保證完全不會發生所有備餘系統同時失效之事件，如我國核三廠一號機開關箱燒毀事件(即所謂的三一八事件)即為多個備餘系統同時發生故障，因此，核電廠的消防安全必須落實深度防禦之理念，以適當的消防安全系統防護每一串重要系統設備。
- (三)在眾多之火災發生原因中，人為錯誤往往是造成重大火災的因素，如美國 Browns Ferry 核能電廠火災和我國核二廠一號機汽機廠房電纜悶燒事件均是人為不當維修和測試方式所造成。
- (四)在核電廠中，大量集中的電纜為火災時主要燃料來源之一，且一旦引燃極易形成延燒之勢，進而可能造成重要設備之失效，例如美國 Browns Ferry 核能電廠火災，即由於電纜之延燒造成電源系統、控制系統、正常及備用爐心冷卻系統失效。
- (五)由於核電廠內有眾多的高壓電通過，因此極易發生電氣火災亦為核電廠火災之主要特性之一，例如美國 Waterford 和 San Onofre 核能電廠火災，以及我國核三廠一號機開關箱燒毀事件(即所謂的三一八事件)均為開關設備快速切換時發生電氣故障而引發火災。
- (六)由以上案例亦顯示，在發生火災後，現場人員的正確應變再配合消防安全系統適時發揮探測、自動滅火等功能，方可減緩火災損害，確保核能安全，在各種滅火系

統中，水系統往往是壓制火災的主要力量，例如美國 Waterford 和 San Onofre 核能電廠火災均是由消防人員以水系統控制火勢。

表 2-1 國內核電廠火災事故一覽表¹⁴

發生日期	內容摘要
1985/7/7	核三廠一號機汽機房發生大火，原因為汽機設計不當，低壓汽機運轉發生劇烈共振現象，汽機葉片脫落，引爆氫氣造成大火，經一年兩個月停機修復，始恢復正常運轉，損失慘重。
1986/6/17	核二廠一號機的保險絲焚毀。
1987/8/29	核三廠模擬中心模板失火。
1989/10/23	核二廠一號機大修中，因包商人員及工安人員執行電焊工作疏忽，導致一場火災。
1990/1/3	核二廠二號機因軸承漏油，飼水泵 A 台處保溫棉冒煙。
1990/1/26	核二廠二號機因汽水分離再熱器洩漏導致加熱器房內蒸汽洩漏使汽機廠房之主蒸汽管路溫度上升。
1990/3/3	核二廠一號機因數位電子液壓控制系統之一保險絲燒斷造成主機調速閘門突然關閉，使反應器壓力上升，爐心中子通量上升，使偵測器測到過高而急停。
1997/4/21	核二廠 1 號機「汽機廠房」進行電纜托架焊接補強時，焊渣掉入「防火布」引起燃燒，總共 94 條電纜嚴重燒燬。
2001/3/18	核三廠因 4160 伏特斷路器絕緣被打穿，造成電氣火災。
2001/12/18	核一廠儲存重機械之獨立倉庫發生火警，由廠內消防班與台北縣石門消防分隊合力撲滅，所有機組均正常運轉，不影響核能安全，初步判斷可能為冷氣機電線走火。

¹⁴ 資料來源：本研究自行整理。

第三節 美國核電廠火災統計分析

從 1960 年到 1978 年年底為止，美國核設施共發生火災事故 214 起，其中 158 起是在商用核電廠發生的，56 起是在其他核設施發生的，這些火災事故所造成的總損失據估計超過三千萬美元，詳細統計資料如表 2-2、表 2-3、表 2-4 以及表 2-5 所示，雖然所統計之火災為較早期之資料，但透過該統計表，仍可以了解核電廠火災之基本特性、發生原因、發生地點等重要訊息。

由表 2-2、表 2-3、表 2-4 以及表 2-5 之統計資料顯示，核電廠火災事故均以 A 類、B 類、C 類為主，D 類較不多見；就發生地點而言，以輔助建築物、渦輪機廠房、施工中建築物、臨時建築物、反應器廠房、柴油發電機廠房等居多；就發生原因而言，人為錯誤是最大的原因，其他主要起火原因尚有電器故障、部件故障、焊接切割、材料過熱以及技術程序不良等；就起燃部件而言，次數較多者有加熱器、斷電器、發電機、變壓器等設備。

核電廠 A 類火災大部分是由於電廠內部臨時性可燃物起燃所造成，而其起燃的原因則以人為疏忽為主，例如煙蒂、焊接、切割火花等，因此，若加強施工中的防火管理工作，降低可燃物與火源接觸的機率，即可減少此類火災的發生；B 類火災與 C 類火災是核電廠火災的特徵，其中 B 類火災是由於核電廠內之設備必須使用大量的潤滑油，而各種緊急發電設備則必須使用燃料油，一旦這些輸油管路破裂接觸火源便形油類火災；而 C 類火災則最容易損害核能安全設備功能，進而影響到核能安全緊急停機功能，C 類火災主要是由電線燃燒引起，電纜線一旦引燃，便可能因悶燒形成大量濃煙，或沿著電纜通道擴大延燒至另一防火區劃。而絕緣線之所會燃燒，約有四種原因：1、電流過大心線過熱，2、短路而產生火花，3、接線處接觸不良局部過熱，4、由其他類型火災引燃。由於核電廠內使用大量電子與電器設備，任何一個程序不良或人為疏失便極易造成電氣火災的發生。

表 2-2：美國核電廠火災統計-以火災類型分¹⁵

類 型	次 數	發生次數
A 類火災		105
B 類火災		40
C 類火災		27
D 類火災		0
共計		172

表 2-3：美國核電廠火災統計-以火災地點分¹⁶

項 目	次 數	發生次數
輔助建築		19
電纜分配室		2
施工建築		18
反應器圍阻體		14
控制室		2
冷卻塔		1
柴油發電機房		10
場外		4
外部設備		12
發射性廢物廠房		2

¹⁵ 資料來源：中國大陸公安部上海消防科學研究所，「國外核電站消防隊伍技術資料選編」，1989年5月，p1-8。

¹⁶ 同註10。

反應器廠房	17
繼電器間	1
轉換站	5
臨時建築物	18
渦輪機廠房	19
倉庫	4
停車場	14
共計	172

表 2-4：美國核電廠火災統計：以火災原因分¹⁷

原因	發生次數
部件故障	42
電器故障	42
焊接和切割	37
技術程序不良	25
設計/製造錯誤	7
人為錯誤	56
自燃	5
可疑火源	5
爆炸	5
材料過熱	38
未知	8
共計	270

¹⁷ 同註 10。

表 2-5：美國核電廠火災統計-以起燃部件分¹⁸

原因	發生次數
部件故障	42
電器故障	42
焊接和切割	37
技術程序不良	25
設計/製造錯誤	7
人為錯誤	56
自燃	5
可疑火源	5
爆炸	5
材料過熱	38
未知	8
共計	270

第四節 小結

¹⁸ 同註 10。

由於核電廠火災區劃空間眾多，各種管線設備及電纜，交錯設置，佈滿複雜通道。主要之可燃物包括潤滑油、電纜絕緣披覆（如聚乙稀 PE、聚氯乙稀 PVC 等）、馬達線圈及一般可燃物等，根據 NFPA 805 Performance-Based Standard for Fire Protection for Light Water Reactor Electric Generating Plants 的分析，歸納出核電廠基本之火災情境，如表 2-6 所示。

由於核電廠核能安全系統的設計準則，衍生自深度防禦 (defense-in-depth) 哲學，目的在即使萬一發生事故時，核能發電廠之安全系統能發揮其既定功能，保障反應器安全，阻止事故惡化並減輕事故後果。核能安全系統設計準則共有五項，即多重性、多樣性、分散布置、可測試性以及失靈安全五項準則。以多重性而言，核能電廠中與安全有關之重要的閥、幫浦、熱交換器等設備皆備有兩套以上，因此即使其中一套在使用時，發生故障，尚有另外一套以上的設備可供使用；以多樣性而言，核電廠之緊急電源即有柴油發電機、氣渦輪發電機及備用電池等三種以上；核能電廠中，將重要設備分別安置在不同場所，稱作分散佈置。此一措施可以避免火災或其它意外事故，同時毀壞重要設備，危害反應器的安全。以緊急柴油發電機為例，所謂的分散佈置，是指將兩台柴油發電機，以及所有與發電機有關之附屬設備，例如起動，起動所需之電池等安裝在不同區域；在設計上要求所有的安全系統在不影響機組正常運轉的條件下，必須可以進行功能測試，而所謂的失靈安全是指系統的組件發生故障時，只會影響到核能電廠的持續運轉，但不會威脅到核電廠反應器的安全，由此可知，核能安全完全依賴這些核能安全系統與設備的正常運作。

因此，核電廠消防安全評估的關鍵即是分析造成這些與安全有關系統功能喪失之火災事故。所謂核能安全相關之系統即是指會影響安全停機功能之系統（如反應度控制系統、餘熱移除系統 RHR：Residual Heat Removal System 等），這些系統均會有二組以上之備用系統。一般而言，這些系統之主要機械構件均會以防火阻隔或開

放空間與其輔助設施相隔，以防止同一場火災同時造成二組系統失效。而由於在核電廠中，控制室與核能安全系統設備之間必須要透過電纜線以及相關電器設備相連，大量之電纜線通常裝載於電纜托網(cable tray)內，電纜分配室(cable spreading room)則容納眾多之電纜托網，由於一旦這些電纜線損害即會造成整個核能安全系統功能喪失，因此，電纜托網火災的防護便往往成為核電廠消防安全設計與評估的重點之一。

總而言之，透過對核電廠重大火災災例和統計資料的探討分析，我們可將核電廠火災危害之特性歸納如下：

- 一、核電廠內之燃料種類：一般而言，核電廠內之燃料大部分均為 A 類(一般燃料如木材、紙類等)、B 類(燃料油、潤滑油等)、C 類(電纜托網內之電纜線、電子設備、控制室等)之燃料。除了考慮廠內固有燃料，還必須考量電廠正常維修和運轉作業時帶進廠內之臨時性燃料。
- 二、核電廠內燃料之位置：由於核電廠內之電纜托網常呈垂直的走向，使得火災有沿著電纜托網向上延燒的可能，另外，亦需考量區劃空間內燃料源與重要設備(含電纜線)之相對位置和距離。
- 三、核電廠火災引火源的位置和種類：由於電廠內含有大量電子設備和各種配管，故核電廠火災點火源常和電路故障、配管表面高溫等有關，另外，人為疏失(如煙蒂)亦有可能。
- 四、障礙物的考量：核電廠內之建築結構、防火阻隔、大型金屬設備、和電纜托網等，均會影響火災的成長，增加火災對環境的熱損並會對重要設備產生熱輻射。
- 五、通風狀態：核電廠內大部份的空間均具有強制通風空調系統，隨著通風口的位置和通風量之不同，物質燃燒強度、熱釋率和火焰傳播均會受到影響。
- 六、密閉空間：核電廠大部份空間均為密閉空間，相較於一般建築物，其室內防火隔間眾多且缺乏自然採光及自然通風，當強制通風系統未啟動時，由於外氣供給受限，不完全燃燒

可能產生大量濃煙，內部空間易被煙、熱急速充滿。

七、區劃空間的幾何形狀：核電廠內有些空間是樓地板面積相對較大、天花板相對較低(例如走廊)，有些空間卻是挑高空間(例如沸水式反應器之反應器廠房)。

八、消防安全設備：核電廠內之重要設備均以探測系統、滅火系統防護，在進行消防安全評估時，應選擇具有這種功能之軟體，以能了解其對整個火災過程的影響。

表 2-6：核電廠基本火災情境分類表¹⁹

¹⁹參照 National Fire Protection Association 805, 「Performance-based Standard for Fire Protection for Light Water Reactor Electric Generating Plants」, 2001 Edition, Appendix C，並重新整理而成。

火災種類	燃料	引火源	起火處所
A 類	一般 A 類可燃物	吸煙、焊接切割、施工不慎等	工具間(停工更換燃料期間)
	一般 A 類燃料	吸煙、焊接切割、施工不慎等	臨時辦公處所
	平常施工或維修時之臨時性可燃物	吸煙、焊接切割、施工不慎等	任何施工或維修之處所
	油布	自燃	任何施工或維修之處所
B 類	氫	電弧	渦輪機房或室外氫氣儲存槽
	過濾器中之焦炭 ¹	潮濕後受熱而引起自燃	主安全過濾區
	潤滑油	與高溫配管接觸	蒸氣驅動幫浦處
	潤滑油	焊接切割等	渦輪機房儲存室
	變壓器用油	內部電路故障造成變壓器外殼破裂，並引燃洩漏之變壓油	室外變壓器
	燃料油	與高溫金屬表面接觸	柴油引擎幫浦間
	潤滑油 ²	與高溫配管表面接觸	主圍阻體內
	燃料油	與高溫配管表面接觸	緊急發電機房
	渦輪機潤滑油 ³	與高溫配管表面接觸	渦輪發電機房
C 類	氫、電纜絕緣物、電池塑膠箱	電弧	蓄電池間
	辦公室用具、傢俱、內部電線	吸煙或電路故障	控制室旁之電腦室
	馬達線圈	過熱	具有馬達之區域
	電纜線絕緣被覆	開關箱內電路故障	含電路開關設備之房間
	電纜線絕緣被覆 ⁴	電纜內部短路	電纜分配室、電纜管道間、電纜貫穿處
	電纜線、電路板 ⁵	電纜箱內發生短路	控制室

可能發生之狀況說明：

- 1、由於過濾器正在過濾通風系統中之放射性物質，內部之焦炭已含有大量放射性物質，因此其燃燒產物中亦含有大量之放射性物質。
- 2、反應器冷卻劑幫浦潤滑油系統配管或連接處失效導致漏油。
- 3、與潤滑油配管相連接的機器因重心不穩滑動，導致潤滑油配管失效，沿著機器及配管有多處漏油，

潤滑油從高處噴撒形成三度空間的火災，並在下方地板逐漸累積擴散形成二度空間的油池火災。

4、裝滿電纜線的垂直電纜托網內部有一條高壓電纜線內部發生短路，引燃電纜絕緣被覆，並波及旁邊的電纜托網。

5、火災產生大量濃煙和毒性氣體，對敏感性的電腦和電子元件造成損害，並形成人員無法生存的環境。

第三章 核電廠消防安全評估法規與方法之探討

我國目前共有六部核能機組，四部位於北部地區，兩部位於南部地區，所有機組均為輕水式，核能反應器(reactor)、蒸氣供應系統(NSSS)和顧問公司均來自美國，因此我國核電廠設計、施工和廠外輻射計量等除了行政院原子能委會有特殊規定外，一概引用美聯邦法規和美國核能管制委員會(U.S.NRC)之相關規定。因此本章所介紹之性能式方法即為最近公佈的 2001 年版 NFPA805,Performance-based Standard for Fire Protection for Light Water Reactor Electric Generating Plants 中所規範的方法與相關考量事項。另外，由於美國對核電廠消防安全法規體系並非一朝一夕所形成的，而是在累積了無數的經驗與教訓，經過長期的演進與不斷的研究、實驗才有目前的成果，因此，對於此一演進過程必須有相當的認識才能透徹了解美國核電廠性能式消防安全評估方法之內涵，故對於其變革之過程在本章中將做一簡略之回顧。同時，在性能式消防安全評估方法中，火災模擬軟體是一項重要的評估工具，在本章中亦將對目前可運用於核電廠消防安全評估的火災模擬軟體做一比較與介紹。

第一節 美國核電廠消防安全法規與標準之演進

1975年3月22日美國Browns Ferry核能電廠發生大火，事故原因為工作人員使用蠟燭測試電纜室與反應器廠房間之電纜穿越器是否漏氣，大火共造成一千六百條以上電纜受損以及備用爐心冷卻系統之失效，本次事件促使美國重新檢討核能電廠消防安全之設計與要求，因此，美國核電廠消防安全法規與標準之演進以Browns Ferry核能電廠事件為界，可蓋分為1974年以前、1975~1977年以及1977年以後，三個主要之演進時期，同時，由於採用性能式設計方法，更合理經濟的達到消防安全的目標已是世界性的趨勢，美國核能界亦逐漸將性能式設計方法納入核電廠消防安全防護體系中，茲分別將各階段演進之重點簡述如下：

一、1974年以前

這段時間內，防火規定只有兩項：

(一)美國聯辦法規第十篇附錄 A 之一般設計準則 3 (10CFR50 APP.A, General Design Criteria 3)，其要求為：

1. 與安全停機有關的系統、結構物、設備組件，在設計、配置時須考慮不受火災或爆炸而損壞。
2. 使用非可燃物或防火材料。
3. 提供火災偵測系統與消防滅火系統。
4. 消防系統設計時，須考慮萬一系統破管斷裂或誤動作時，確保不會損壞安全系統、設備而妨礙安全停機功能。

(二)法規指引 1.70.4(RG1.70.4)

規定核能電廠安全分析報告中應有防火方面之敘述，如消防系統之佈置，施工和運轉中消防系統之設計和狀態等。

二、1975~1977 年

因 1975 年 3 月 22 日美國 Browns Ferry 核能電廠發生大火，超過 1600 條電纜燒毀，而引起「爐心冷卻系統」短暫失效，大量增加消防相關要求，故出版了一系列有關防火方面之要求如下：

(一) 1975 年 11 月美國核能管制委員會採消防系統列入標準審查計畫 (Standard Review Plan)，出版標準審查計劃 9.5-1(Standard Review Plan9.5-1)，要求各核能電廠遵循。

(二) 1976 年 5 月美國核能管制委員會發布 BTP APCSB 9.5-1「核能電廠消防系統指引」，適用 1976 年 7 月 1 日以後取得建造許可之核能電廠，其要求各核能電廠若要取得建廠或運轉執照必先將火災危害分析報告送審，審查各電廠之防火措施是否符合「深度防禦」之理念，亦即：

1. 採取各種預防措施防止火災發生。
2. 即使火災發生，亦能於初期即迅速偵測及撲滅火災。
3. 即使消防滅火系統失效，亦有足夠之防火阻隔阻止火勢漫延至與核能安全停機有關之備餘設備。

(三) 1977 年 2 月美國核能管制委員會出版 BTP APCSB 9.5-1「核能電廠消防系統指引」之附錄 A，規範於 1976 年 7 月 1 日以前取得運轉執照核能電廠之火災防護措施。

三、1981 年 2 月，美國核管會正式立法公佈 10CFR50.48，「火災防護」，正式將核能電廠消防安全納入聯想法規體系中；同時並訂定 10CFR50 附錄 R(Fire Protection Program)，規範 1979 年 1 月以前運轉核能設施之消防安全方案，主要包括滅火設備方案、火警自動警報系統方案、安全停機能力、廠內消防隊訓練等方案，有關電纜線的消防安全規範為：同一防火區劃含有兩串與核能安全有關之電纜線，其中一串須有 3 小時等級之防火被覆，或空間分隔在 20 呎以上，且中間不可含有可燃物，並裝設自動滅火系統，或其中一串電纜線有 1 小時之防火被覆，且裝設自動滅火設備。

四、1981 年 7 月，美國核管會出版 NUREG-0800，標準審查計劃 9.5.1，「核能電廠火災防護方案」，內容大致函蓋 10CFR50、BTP APCSB 9.5-1 之全部規定，是當時較為完整之消防法規。

五、2001 年 1 月美國國家防火協會標準 (NFPA) 正式發佈 NFPA804

及 NFPA805，成為核能電廠消防安全最完整的標準，且兩者均將火災危害分析明定於條文內容中。

(一) NFPA804，Standard For Fire Protection For Advanced Light Water Reactor Electric Generating Plants

係 NFPA 針對進步型輕水式核能電廠所發展出之規格式消防安全標準，該標準從電廠之設計、建造、運行和維修等各方面建立核能電廠消防安全之最基本之標準，從功能方面而言，基於深度防禦之原則，該標準提供確保安全停機、限制放射性物質外洩、保障人命安全、限制財產損失以及防止運轉中斷等功能之最基本之消防安全標準。

(二) NFPA805，Performance-based Standard for Fire Protection for Light Water Reactor Electric Generating Plants

屬功能性基礎之標準，適用於輕水式核能電廠，內容不僅包括功能性設計方法論、基本火災防護方案的設計與要素、防火系統與防火性能的規劃等，亦提供除役階段及永久停機時的火災防護規範。對於如何應用工程分析以實際支援功能性設計，並進而滿足核能電廠的防火安全終極目標、性能目標以及性能基準，NFPA 805 提供一套完整的火災危害評估方法。根據該標準設計法以及性能基準，核能電廠設計人員或核能管制人員可不再受限於傳統條列式法規的規定，對於核能電廠的防火評估工作將更具有彈性。

六、2001 年 4 月美國核能管制委員會公布「運轉中核能電廠防火指引」(R.G. 1.189)，內容上大致引用一般設計準則 3 (GDC 3)、核能電廠消防指引 (APCSB 9.5-1)、核能電廠防火方案 (APP.R) 及美國國家防火協會標準 (NFPA) 等彙整而成，提供火災防範之範圍及防禦深度，廠方可根據本指引做自我評估，亦可當做決定性法規的基礎，同時，該指引亦表達美國核管會(NRC)接受風險告知和功能式基礎替代方案的立場。在消防設施上，亦引用新

類的消防設備與管理如：

- (一)細水霧滅火系統（Water Mist Systems）的採用。
- (二)安全電纜托架用線型熱感式火警偵測（Continuous Line-Type Heat Detectors）。
- (三)管輪式二氧化碳不能當作安全設備上主要滅火設備。
- (四)電氣開關設備室要用自動滅火設備。
- (五)電纜室、電氣開關設備室高濃煙區提供排煙及排熱。
- (六)防火材料的試驗和品質。
- (七)可燃性氣體的儲存、送氣之安全裝置及測試。
- (八)廠外消防隊支援協定。

七、未來美國核能管制委員會也將接受「運轉中核能電廠防火指引」（R.G. 1.189）所提出的「風險告知和功能性基礎」的替代方案。亦再次強化火災危害分析的重要性，並依據詳細的火災危害分析之基礎，也將接受替代性火災防護的配置，其條件為：

- A. 有詳細之火災危害分析或消防改善，並證明此替代案之效果與 10CFR50 附錄 R 相同。
- B. 替代方案確能在遠端停機控制盤達到熱停機。
- C. 冷停機僅造成有限的損傷，在合理時間內可以修護。
- D. 防火塗料不可以做為防火屏蔽。
- E. 符合 APP.R 所必須的改善，並不會比現行或建議的替代方案更能提高防火安全等級。

第二節 NFPA805 性能式消防安全評估方法

NFPA 805 於 2001 年正式被核定為輕水式核能電廠消防安全標準，取代了原先規範輕水式核能發電廠的 NFPA 803，NFPA 805 屬於性能式標準，它的內容包括功能性設計方法論、基本火災防護方案的設計要求、防火系統與防火性能的規劃等，亦提供除役階段及永久停機時的火災防護規範。對於如何應用工程分析以實際支援功能性設計，並進而滿足核能電廠的防火安全終極目標、性能目標以及性能基準，NFPA 805 提供一套完整消防安全設計方法，使核能電廠設計人員或核能管制人員之核電廠的防火評估工作將更具有彈性。

一、NFPA805 基本消防安全防護理念—深度防禦(Defense-in-Depth)

本標準之宗旨為保護公眾、環境和電廠工作人員在電廠發生火災時之安全，以及在核電廠發生火災時確保反應器安全操作，消防安全之標準乃以「深度防禦」為本，並須分別由以下三個途徑達到「深度防禦」之目標：

- (一)預防火災的發生
- (二)萬一發生火災，能夠快速、及時的偵測、控制和撲滅，以限制火災造成的損失。
- (三)提供有關核能安全的構造、系統和組件適當的消防防護，使得即使火災沒有即時撲滅，也不會造成重要核能安全功能喪失。

二、NFPA805 的 Goals 和 Performance objective

Goals 是指性能式消防安全標準中的最終防護目標，由此再衍生性能目標(Performance objective)，Performance objective 為達到最終防護目標的具體方法，NFPA805 的 Goals 和 Performance objective 如表 3-1 所示。但 Goals 和 Performance objective 皆為文字性的敘述，無法直接做為性能評估之基準，在性能式法規體系中，必須再根據 Performance objective 製訂具體的性能基準，亦即 Performance Criteria，做為評估核電廠消防安全之具體評估準則，NFPA805 的性

能基準(Performance Criteria)為：

在發生火災的狀況下，電廠應達到下列基準：

(一)核能安全功能基準

- 1、反應控制：能夠迅速將控制棒插入，使反應器內之狀況在臨界點以內。
- 2、冷卻水存量與壓力控制：當核燃料置入反應爐中，對於壓水式反應器而言，應能維持冷卻水平在安全狀態，對於沸水式反應器而言，應有能夠維持或迅速回復反應器水平在燃料頂端以上之能力。
- 3、衰變熱移除：應有足夠的能力將反應器核心或核廢料儲存池之衰變熱移除，以維持其處在安全穩定的狀態。
- 4、重要輔助設施：應能提供必要的輔助支援設備和系統，以確保滿足上述第 1、2、3 和 5 項之各項要求。
- 5、程序監督：應能提供必要的儀器顯示以確保符合上述各項功能要求。

(二)放射性物質外洩功能基準

滅火行動所造成之非限制區域之放射性物質外洩應在合理的標準下且不超過 10CFR Part20 限度以下。

(三)生命安全基準

- 1、提供安全出口和避難區給緊急應變人員以外之廠人員
- 2、提供緊急應變人員執行火災緊急應變適當的防護措施，包括緊急照明燈等。
- 3、在火災時，提供緊急應變人員必要的保護，和必要緊急服務措施。

(四)電廠營業中斷基準

- 1、最大可能損失應在業者所決定之水平以下。
- 2、最大可能損失火災事件所造成之營業中斷應在業者決定之水平以下。

表 3-1 NFPA805 的 Goals 和 Performance objective 對照表²⁰

Goals	Performance objective
<p>核能安全</p> <p>在任何狀況下均能合理的保證火災不會影響核燃料處於穩定安全的狀態</p>	<p>1、反應度控制：能夠迅速使反應達到並維持在次界點狀態</p> <p>2、燃料冷卻：能夠迅速移除衰變熱並維持重要控制設備之功能</p> <p>3、核分裂物圍體：能夠防止燃料護套損害，主圍體不會受到火災的威脅</p>
<p>放射性物質外洩</p> <p>在任何狀況下均能合理的保證火災不會造成放射性物質的外洩，影響到廠內工作人員和大眾的健康、環境等。</p>	<p>1、維持圍體完整性</p> <p>2、限制放射源</p>
<p>人命安全</p> <p>在任何狀況下均能合理的保證火災不會造成廠內人員的生命安全</p>	<p>1、保護廠內非火災現場人員不受火災危害，增進火災現場人員之生存能力。</p> <p>2、提供緊急應變人員適當的保護</p>
<p>電廠營業中斷</p> <p>提供合理的保證火災的風險在可以接受的範圍內</p>	<p>1、潛在之火災損害限制在廠方可以接受的範圍內</p> <p>2、潛在火災所造成之產業中斷限制在廠方可接受之範圍內</p>

²⁰參照 National Fire Protection Association 805, 「Performance-based Standard for Fire Protection for Light Water Reactor Electric Generating Plants」, 2001 Edition, Appendix C, 並由本研究重新整理而成。

三、NFPA805 核電廠消防安全評估體系

在 NFPA805 核電廠消防安全評估體系中，功能基準是衡量其設計方案是否符合法規的依據，而至於達到功能基準的途徑可為決定式途徑，亦可為性能式途徑，NFPA805 所使用之總體方法步驟(如圖 3-1 所示)如下：

A. 建立基本之消防防護方案。

基本消防防護方案與設計要件規範於該標準第三章，所規範之內容包括日常防火管理、火災預防措施、核電廠消防隊與各種消防安全系統和設施之基本設計要求，無論採用決定式途徑或性能式途徑，當一旦決定設置某一項消防安全系統或設施時，它們的設計與安裝必須符合這些基本消防防護方案之設計要求。

B. 確認防火區劃和其相關之火災危害。

核電廠的消防安全第一道防線為防火區劃，因此首先必須確認防火區劃邊界和其火災危害之特性。

C. 確認應用於每一防火區劃之功能基準。

以防火區劃為基礎逐一檢視核能安全、輻射外洩、人命安全、營業中斷等功能基準，檢視該防火區劃可能必須滿足的功能基準。

D. 確認每一防火區劃中功能基準所指涉之系統、構造和組件。

以防火區劃為基礎加以確認達到功能基準所需之系統、結構和組件(SSC)，亦即找出當火災發生時，必須要確保不能受火災損害的重要組件。

E. 選擇達到功能基準之途徑(決定式途徑或性能式途徑)。

決定式途徑和性能式途徑之流程如圖 3-2 所示。

如果使用決定式的途徑，則必須符合決定式途徑的相關要求。當使用性能式基礎的途徑時，運用工程分析的方法驗證達到功能性基礎的相關要求，可使用的評估方法包括工程評估、機率安全評估以及火災電腦模擬計算等，本研究則主要以火災電腦模擬計算作為評估的工具。

F. 執行電廠變更評估

驗證核電廠變更對風險、深度防禦和安全邊際上所造成的影響是可以接受的。如果不能接受，則需提供更多的消防安全措施或採用其他替代性的解決方案。

G. 建立監視系統監視電廠的功能。

H. 將最後的結果建立成為正式文件，以確保分析的品質，使電廠的設計運轉確實符合文件之內容。

核電廠之消防安全評估是以防火區劃為基礎，逐一驗證是否達到各項基準，在深度防禦為原則之下，核電廠必須確保核能安全、放射性物質外洩、人命安全和營業中斷等四項功能基準，而其中核能安全為首要確保達到之功能基準，如圖 3-2 所示，達到核能安全功能基準之途徑可分為決定式途徑和性能式途徑。

根據 NFPA805，決定式途徑採用 10CFR50 附錄 R 之規定，其相關規定如下：

一、至少有一串達到和維持核能安全性能基準所必需之電纜、設備(核能安全成功路徑)，必須用以下第 2、3、4 各點適當的方法防護(無需使用人員恢復行動)。如果透過人員恢復行動才能維持核能安全成功路徑，則必須選擇性能式的途徑。

二、至少須有一串所必需電纜和設備之成功路徑必須位於分離的區域，至少以三小時等級的防火屏蔽相區隔，組成區域邊界之防火屏蔽，其上之開口必須以被動式的防火設施防護，其防火等級須與邊界防火等級相同。

(例外：必須透過火災危害分析認定外牆之防火等級。)

三、具有達到和維持核能安全性能基準之系統，當其備餘成功路徑所必須電纜或設備位於主圍阻體外且在同一防火區域時，必須確保至少一串成功路徑受到防護，並由下列任一方式防護：

A. 備餘成功路徑之電纜和設備，以三小時防火等級的防火被覆

相區隔。備餘核能安全設備電纜、相關之非安全必需電路等，其防火阻隔或 ERFBS 必須具有三小時的防火時效。

- B. 備餘成功路徑之電纜、設備，以 20ft(6.1m)以上相區隔，其間不可有可燃物或火災危害，此外，整個防火區劃亦必須裝設探測器和自動滅火系統。
- C. 至少一串備餘核能安全設備電纜、相關之非安全必需電路等，其防火阻隔或 ERFBS 必須具有一小時的防火時效，此外，個防火區劃亦必須裝設探測器和自動滅火系統。

四、在非惰化處理之圍阻體內，可用下列任一方式加以防護：

- A. 備餘成功路徑之電纜、設備，以 20ft(6.1m)以上相區隔，其間不可有可燃物或火災危害。
- B. 備餘成功路徑之電纜、設備，以不可燃之輻射屏蔽相區隔，其裝置至少必須具有防阻 1/2 小時火災曝露之能力，並符合 NFPA251,Standard Methods of Tests of Fire Endurance of Building Construction and Materials。
- C. 整個防火區劃亦必須裝設探測器和自動滅火系統。

有關性能式途徑之規定如下：

一、確認防護之目標

依照第二章所規定的方法，確認所考量之防火區劃內之重要設備與電路，亦即達到核能安全性能基準所必需之電路與設備。

二、建立損害基準

在所考量之防火區劃內，必須建立重要設備與電路之損害基準，其方法如第二章第五節所規定。

三、決定極限狀況

極限狀況是指在任何火災環境下，電纜或設備最高敏感度

(susceptibility)下之狀況(如最小的損害基準)。

四、建立火災情境

火災情境必須建立所考量防火區劃可能發生的火災狀況，並依照第二章所有關之規定。

五、所必需核能安全成功路徑之防護

消防安全系統和設施之效能必須能確保重要組件、電路(即與核能安全有關之組件、電路)免受火災之損害，並且在最可能發生火災情境和極限火災情境之間有充分之安全餘裕，消防滅火活動不可妨礙達到核能安全性能基準之能力。

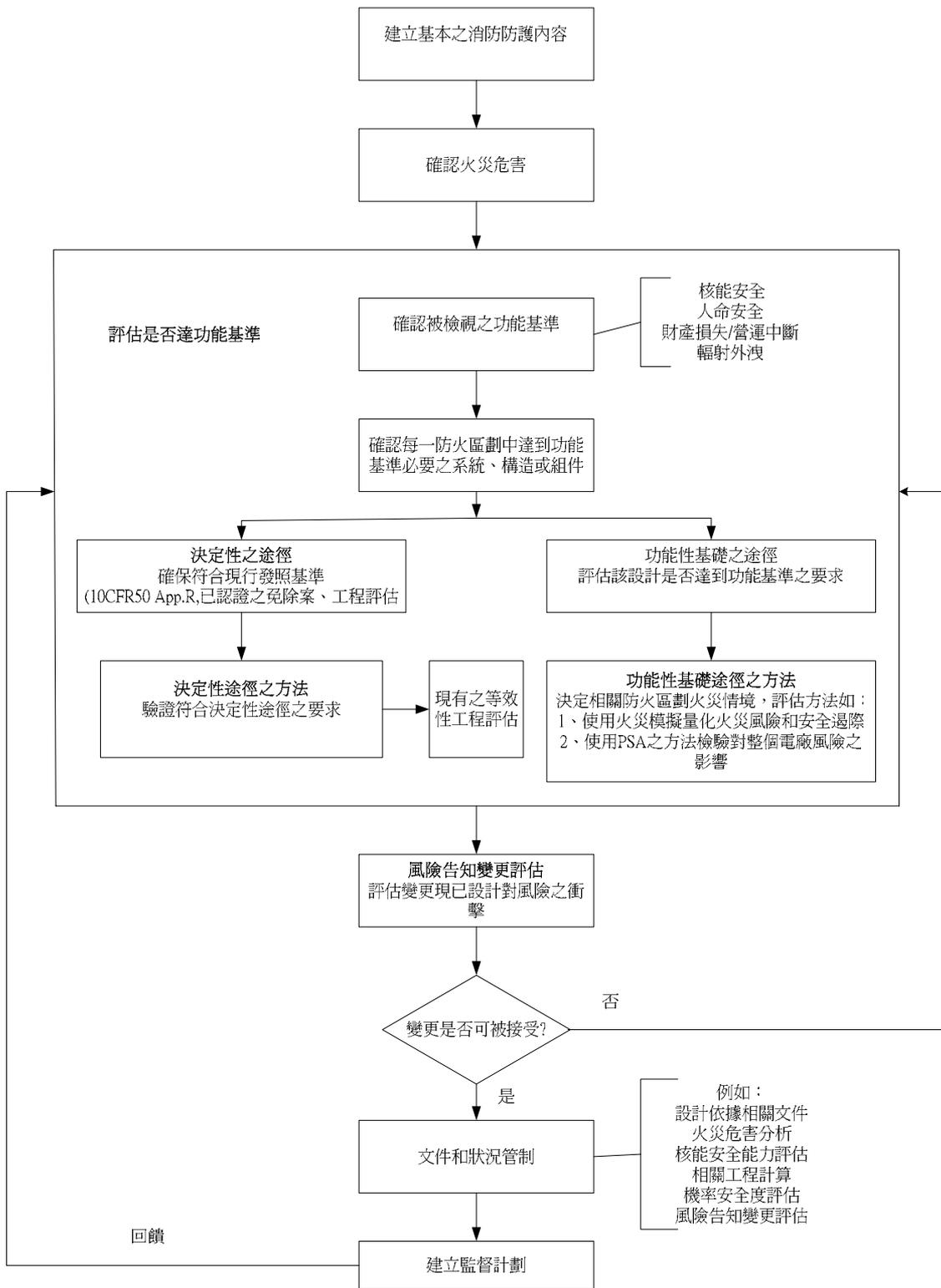


圖 3-1 NFPA805 所使用之方法步驟²¹

²¹ National Fire Protection Association, NFPA805, Performance-based Standard for Fire Protection for Light Water Reactor Electric Generating Plants, 2001 Edition.

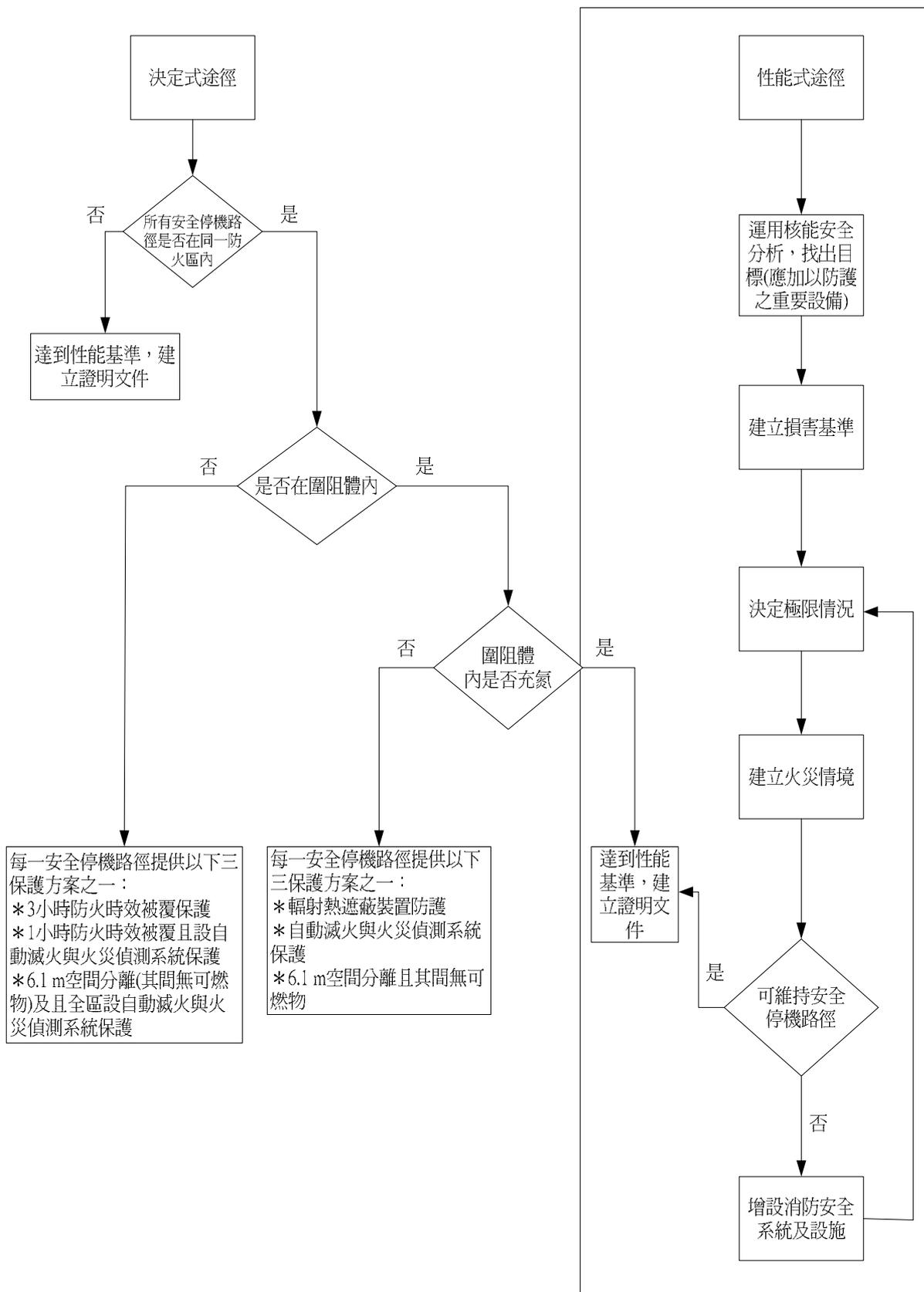


圖 3-2 決定式和性能式途徑之選擇²²

²² 同註 21。

第三節 NFPA805 確認核能安全系統之原則

依據上節中圖 3-2 所示，在性能式途徑中之第一個步驟即是確認我們所要分析的目標，亦即必須加以防護的重要設備，而就核電廠消防安全而言，最重要的便是核能安全系統。

所謂核能安全系統，即達到核能安全功能基準所必須的系統、設備與電纜，亦是當核電廠發生火災時消防安全系統首要確保免於火災損害的重要防護對象，亦為核電廠消防安全性能評估的首要對象，因此，從核電廠眾多系統、設備中，找出這些與核能安全有關之重要系統、設備與電纜，對於確保核能安全具有重大意義，本節即介紹 NFPA805 中所提供的一套確認核能安全系統、設備與電纜之方法。

核能安全系統基本上具有下列二種要件：

- A、當核電廠處於發電狀態、維持熱待機或熱停機狀態發生火災時，使核電廠保持穩定及安全狀態的必要之系統與設備，例如主圍阻體及反應器壓力槽隔離控制系統(Primary Containment and Reactor Vessel Isolation Control System)及其相關設備、反應器保護系統(Reactor Protection System (RPS))及其相關設備等，火災也有可能導致失去外部電源，而必須使用廠內的緊急交流電源，如緊急柴油發電機組等。
- B、當核電廠處於停機冷卻狀態發生火災時，使核電廠維持冷卻功能的必要系統與設備，例如反應器中子監視系統(Neutron Monitoring System)及其相關設備、反應器手動操作系統(Reactor Manual Control System)及其相關設備等。

而 NFPA805 中所提供之方法包含三個層次，分別為 1、確認核能安全系統和設備，2、確認核能安全電路，3、確認核能安全電纜之位置，依據此三個步驟，即可找出重要電纜所在之電纜托網(cable tray)，並可進一步評估其在各種火災情境時的安全性，現將上述三個步驟分別敘述如下：

一、確認核能安全系統和設備

確認核能安全系統和設備共包含五個步驟：系統之確認、系統間關係之確認、設備之確認、設備間關係之確認和建立檔案。

(一)系統之確認

由有關電廠設計、危險管理和運作之文件資料中，即可以確認使電廠到核能安全基準之必要系統。

(二)系統間關係之確認

這些系統達到核能安全功能基準的方式，可運用系統層次的邏輯關係圖、失誤樹或其他可以表示設備互相依賴關係的方法加以描述。不僅要考慮有關程序的系統，亦應包括支援這些系統的基本的機械或環境。

(三)設備確認之相關注意事項

1. 配管和儀器操作圖(Piping and Instrumentation Diagrams 簡稱 P&IDs)/流程圖)，可以用來確認位於系統內流程中的設備以及系統之邊界設備。
2. 設備並沒有位於系統的流程中，但其誤動作會妨礙核能安全功能者亦應加以確認(例如邊界閥組件的誤開啟可能導致重要設備之流失)。當決定邊界閥和選擇設備時，使設備誤動作之潛在性亦應加以考慮。系統內的主管路或側管路，如其誤動作不會影響到核能安全成功路徑(Nuclear Safety Success Paths)，則不需要加以考慮。

對於儲存槽(Tanks)而言，所有流出管線均應考慮它們的功能要求，對於不需發揮功能的管線，必要時可以採行隔離的方法以防止不必要的流失，而儲存槽之充填管線亦應加以考慮。

舉例而言，如果兩個同系列常閉閥的誤啟動會導致無可復原的情況，那麼這兩個閥應同時列入核能安全設備清單(NSEL)中。如果用積極的方法排除非高低壓界面組件其中之一閥/組件誤動作之可能性時，那麼其他的閥/組件就

不必予以考慮了。例如，在正常運行期間，把兩個電動閥之一之電源拔除，以防止誤啟動。

3. 發生火災時可能引發電廠不穩定之設備必須加以審慎考慮，所謂火災引發電廠不穩定之定義是，由於火災感應之電路故障，而造成電廠可預見的運轉事件，如廠外電力的喪失、過冷、蒸氣產生器過度充填、主圍阻體隔離閥誤關閉、安全系統之大量損失、停電、急速冷卻等。分為下列數種情形：
 - a、重要系統的喪失：在反應器冷卻劑高壓邊界層發生由於火災引發之誤啟動，可能造成反應器冷卻劑存量無法控制的損失，其發生之潛在性應加以考慮，例如，位於反應器頂部通風口、壓水式反應器的正常和餘壓釋放口和沸水式反應器的主蒸氣釋放閥的這些一次冷卻劑界面的誤動作。
 - b、急速冷卻：由於邊界閥的誤動作造成的不穩而導致無法控制的電廠冷卻應加以考慮。電廠系統間的交互作用諸如蒸氣產生器(壓水式反應器)大氣壓力洩放閥、電動釋放閥、安全釋放閥(沸水式反應器)注入水、反應器啟動裝置、渦輪機啟動裝置和主蒸氣隔離裝置等，亦應加以考慮。
 - c、失控性的注入：會造成反應器冷卻系統無法控制的注入的潛在性應加以評估，這包括高壓注入源的誤動作。
 - d、供電不穩：會造成任何交流電源供給的不穩應加以考慮，這包括斷電器的誤動作、廠內緊急發電機的故障，或者由於火災感應電路故障所導致的交流電源不當的並連。
4. 需要諸如冷卻水、儀器流體、HVAC、啟動電力和控制電力支援的設備應以考慮，以了解組件與系統間關係和相關設備喪失時所可能造成的影響。

5. 廠外電力也可能是核能安全設備力電源之一，所有支援這些賴以達到核能安全功能基準的電力之設備都要加以確認。當場外電力的提供可能反而影響到核能安全時，也應保守性地考量場外電力是存在的。
6. 當儀器感應線路暴露於火災和逐漸昇高的溫度下時，應考量其造成潛在不正確之儀器顯示或設備誤動作之可能性。任何可能妨礙達到核能安全功能基準之儀器感應線路及其可能影響之設備均應加以確認。
7. 儀器空氣管線和組件(如蓄電池)應該考慮其在火災過程中或火災後是否仍有能力提供動力給所依賴的組件。
8. 供應核能安全設備之電源(包括替代電源)及其相互間的關係，應予以確認，這些資訊在決定由於失去電源而造成核能安全設備之喪失時是非常重要的。

(四)設備間關係的確認：個別核能安全設備和系統間必要之關係應該予以了解並建立文件。

(五)建立文件

選擇和排除核能安全系統和設備的基礎應建立起文件並予以保存，使核能安全設備清單(NSEL)能前後一致並且保持最新狀態，應考量下列事項：

1. 構成系統邊界之閥或閘門應列入清單中。常閉式的人力開關閥和認定為系統邊界的適當導向查驗閥不必列入。
2. 位於流程中的閥或閘門，其誤動作可能會影響到系統運轉者，應該要列入清單中。人力開關閥或閘門，在發生火災後執行停機時需要再定位者，亦應列入清單中；人力開關/閘門/查驗閥，在發生火災後執行停機時不需復原行動者，不用列入。
3. 提供設備和配管保護功能之安全閥/釋放閥不用列入，但是，提供主動性核能安全功能之安全閥/釋放閥例外，例如蒸氣產生器安全閥。

4. 導向電磁閥應以分離組件的名目列入清單中。與電磁閥相連的電線應列在電磁管閥或相連的程序閥(如空氣啟動閥)下，由計劃實施程序指定之。
5. 幫浦、風機、渦輪、儲存槽、熱交換器和其他設備應列入清單中。
6. 核能安全系統程序監控所需之儀器應予以確認。

二、確認核能安全電路

(一)基本原則：

為要求之核能安全設備所做的電路分析應該要予以執行並建立文件，電路選擇基準如下：

- 1、確認所有會影響核能安全的電路，包括核能安全設備控制電路與輔助設施相連接的電路。
- 2、排除不會妨礙核能安全設備發揮其核能安全功能之電路。

列入核能安全設備清單(NSEL)中的設備均應加以檢視，以決定所有會影響核能安全設備發揮核能安全功能之電路，包括直接與組件功能有關之電路或組件與輔助設施間之電路。

除了直接與組件功能有關之電路或組件與輔助設施間電路之外，尚需考慮其他由於火災損害造成故障而會影響到核能安全的電纜線。共有三種型態：

- 1、誤動作：指的是一條電纜線，如果受到火災損害，其損害會導致核能安全設備的誤動作或功能喪失。
- 2、共同之電源供應器：指的是一條電纜線，如果受到火災損害，其故障會導致核能安全設備電源的喪失。這種情形常發生在當核能安全設備電源供應器上游的斷電器/保險絲與受到火災侵襲電纜線的斷電器/保險絲配合不良時。
- 3、共同之圍阻體：指的是一條電纜線，如果受到火災損

害，會延燒至同一圍阻體內之其他核能安全電纜線，可能是由於電路沒有受到隔離設施(斷電器/保險絲)的適當保護或火災有時會沿著電纜線蔓延進而危害到核能安全設備。

(二)執行核能安全電路分析考量事項：

執行核能安全電路分析之程序分為考量設備輸入參數、檢視電路圖、電路確認以及建立文件四個步驟，分別說明如下：

- 1、考量設備之輸入參數：所有需要電路分析的設備和其功能參數都要在核能安全設清單(NSEL)中一一確認。功能參數包括設備正常時的狀態和失去電源/空氣(如果有用到的話)的狀態，這些功能參數提供了電路分析的基本架構。
- 2、檢視電路圖：對於每一個分析的組件，其合用的基本電路圖、單線概略圖、連接圖、儀器管路圖和使用說明圖皆應予以檢視，以確認與此組件相連接的電路，包括透過輔助設施與組件之控制電路相連接的電纜線。
- 3、電路確認之考量事項：必須針對每一個電路逐一評估，以選出維持核能安全的重要電纜線，如果電纜線受到火災之損害後會妨礙組件之核能安全功能，則此電纜線即認定為核能安全電路；反之，則不認定為核能安全電路。其相關考慮事項如下：

(1)所有的故障模式和其可能之後果均應加以評估，這是因為火災可能造成多個電路損害(熱短路、接地短路或開放電路)，電路故障可能會使設備組件通電，亦有可能使其斷電。因此，電路故障後有可能會導致閥打開或關閉、幫浦運轉或停止、斷電器打開或關閉等。而在受火災侵襲的防火區劃內，亦有可能由於火災引發電路故障導致多個誤動作發生。

- (2) 在評估核能安全電路的過程中，對於某些重要位置的導線而言，應保守性的假設熱短路會導致設備誤動作，如此可以確保電廠符合核能安全功能基準。
- (3) 在火災過程中，電纜線如果有損害的話，在相關人員採取必要應變措施之前，應假設損害狀況會一直持續，不能假設會變成開放電路或接地而不會造成誤動作。
- (4) 當評估一個組件的損害情形時，所有與此組件運作有關的電路均應加以確認。
- (5) 電纜線內的一條導線與外部導體發生熱短路，即可能會影響到電纜內所有的導線。除了評估在一條電纜線上發生單一熱短路的危害外，也要考量在其他的導線上可能同時有多個由火災造成的電路損害發生。
- (6) 對於多導線電纜線而言，其內之帶電導線可能會與其他的一個或多個導線發生短路。
- (7) 電廠的特殊設計防護措施可以防止某些故障的發生，例如使用接地線、金屬保護、護套電纜或專用導管均可以防止與外部電源發生熱短路，然而，如果這些導線與未接地電路相連接的話，多重接地故障也會使接地導管內的導線通電。

4、建立檔案：針對每一組件所進行的電路分析，應清楚記述指定的電纜線，並敘明其為重要電纜線之原因，另外，亦應敘明排除其他電纜線的原因。

三、確認核能安全電路與設備位置

在確認與核能安全相關之設備與電路之後，為進行火災危害之分析，應進一步確定它們的位置在那裡。透過既有的資料庫、電廠配置圖和現場了解(有必要時)即可以標定它們的位置，為便於分析，應使用最小的單位(房間或防火區劃)來標定其位置。電

纜線與電纜管道資料庫建立了電纜線與其路徑的關係，以此資料為準，必要時輔以現場了解，即可確認每一所要求之電路，需要以下之程序：

- (一)電纜線與電纜管道之關係(電纜線通過那些導管、電纜托網、連接盒、分線盒等)。
- (二)電纜管道與防火區劃/房間之關係(電纜管道通過那些防火區劃、房間或火警分區)。
- (三)電纜線終點(電纜線終止之防火區劃或房間；了解電纜線終點是有必要的，因為有時電纜線終點可能沒有電纜管道，例如電纜線由電纜分配室穿過樓地板終止於控制室)。
- (四)火警分區/房間與防火區劃之關係(由哪些區劃空間組成防火區劃)。

第四節 火災模擬工具之比較與探討

所謂火災模擬，即是預測當建築物內發生火災時，火災對建築物會產生那些影響之技術。火災是一非常複雜的現象，火災模擬技術是基於能量守恒、動量守恒、質量守恒和物種守恒原理把火災現象簡化為數學模式，再配合由實際火災實驗所得之半經驗公式，來預測火場環境的變化。每一種模擬工具都有其必要的假設條件和簡化條件以執行必要的演算，因此，在應用某一種火災模擬工具時，必須精確的了解其應用上的限制以及相關使用注意事項。並且所有的模擬結果亦須加以驗證、判斷是否符合真實現象，以免有不正常的物理現象發生而誤判火災之產生。火災模擬軟體大致上可分為區域模式(Zone Model)和場模式(Field Model)。

一、區域模式(Zone Model)

所謂區域模式乃是把區劃空間劃分為若干分區，即控制容積(Control Volume)，一般為二至三個，例如將火場區分為上、下兩層，上層為高溫濃煙層(hot gas layer)，下層為冷空氣層，假設每一分區內有相同的物理特性，例如有相同的溫度、氣體濃度等，利用能量守恒、質量守恒、動量守恒和物種守恒原理，計算各控制容積間能量進出之情形，即可求得各區域內各項參數隨時間變化的狀況，預測火災的成長，由於區域模式引用較多的假設，簡化了許多參數，故一般個人電腦即可操作，常被應用於核電廠消防安全評估的區域模式電腦模擬軟體有 COMPBRN e、CFAST 和 FIVE 等，其相關特性比較如表 3-2 所示，並分別分析說明如下：

(一)COMPBRN e

區模擬軟體 COMPBRN e 程式主要應用於核電廠火災危險度評估的相關需求，因此，它的關鍵模擬結果之一就是設備損害的預測時間，可以與火災壓制時間相比較。此外，由於認識到在模擬參數之中存在著相當大的不確定因子，該程式研發出時間對損害的分配，並使用這種分配量化了不確定因子。

COMPBRN e 精確的模擬了經由燃料擺放蔓延的火災成長模式(包括沿著電纜托架的側延燒)，也可以模擬經由非連接燃料蔓延的成長模式，而產生多個互相作用的火災。它模擬火羽柱與熱氣層內外的輻射、對流熱傳。火災對象物的加熱是使用單維非穩態的熱傳導模式。而熱氣層是使用半穩態的模型，如果火災改變，熱氣層也會隨著改變。但該軟體不處理跨區劃空間之間的火災蔓延。COMPBRN e 可精確模擬核電廠中多種火災類型，包括正庚烷油池火災、木材堆架火災、及垂直電纜托架火災等。

(二) CFAST

CFAST(consolidated model of fire growth and smoke transport) 是由 FORTRAN 語言寫成，該軟體可設定水平與垂直口，其水平開口可設定隨時間打開或關上，可當做門、窗開關情形，其天花板、地板、牆等材質可隨著不同區域而改變，室內空調、抽風、消防設備等軟體內均有提供設定模擬計算，內建主火源有 31 種材質，可燃物有 22 種材質可供選擇，目前可模擬的區劃空間數最多可達到 30 個，可自行建立火場可燃物資料庫，來補內建易燃材質之不足。另外，軟體尚有提供一些方便快速的預測工具，如撒水頭、探測器的反應時間、天花板下方熱氣流溫度等，對於外界環境可設定溫度、壓力、濕度等，可計算之參數有上下層溫度、氣層高度、壓力、毒性氣體(如 CO、CO₂、O₂、HCL 等)濃度，開口處的質量流率等。

(三) FIVE

FIVE 的模擬軟體主要的設計目的是針對火災中受損害狀況的模擬，模擬的結果較保守。提出一個明確的火災及一些火災對象物，就可以模擬出該火災是否會造成損害，該軟體考慮起火室內三個重要的區域：火羽柱、天花板下熱氣流和熱氣層。而且也模擬起火室內任一物體所受的輻熱傳。但本軟體並不精確的模擬火災的成長，使用者必須明確的指出火災的物理特性(例如位置、猛烈度等)。

表 3-2：區域模式模擬軟體比較表²³

特徵 \ 模式		FIVE	COMPBRN e	CFAST
一般 特徵	模式類型	半穩態區域模式	半穩態區域模式	非穩態區域模式
	氣層層數	1	1-2	2
	區劃空間數	1	1	30
	樓層	1	1	30
	通風	1 個牆壁開口	1 個牆壁開口	牆壁(每房間 4 個) 地板(1 個) 天花板(1 個)
	可模擬火災數	多個	多個	多個
	第二次引燃	無	有	有
	火羽柱/天花板 下方熱氣流內部 分層	有	有(僅火羽柱部 分)	有
	機械通風	有	有	有
	受熱目標	有	有	有
火源	類型	氣體	氣態、油池、固 體	氣態
	影響燃燒因子	1、氧氣限制(可選 擇) 2、明定燃燒產物	氧氣限制	1、氧氣限制(可選 擇) 2、明定燃燒產物
	其他因子	未考量	1、第二次引燃 2、輻射熱影響	第二次引燃
火羽 柱	類型	軸心對稱 (Heskestad)	軸心對稱 (Zukoski)	軸心對稱 (McCaffrey)
	修正因子	靠牆/靠角落	1、靠牆/靠角落 2、通道之傾斜	靠牆/靠角落
天花 板下 方熱 氣流	型態	1、不限定(使用 Alpert 模式) 2、限定(使用 Delichatsios 模 式)	未考量	未限定
通風	型態	牆壁	牆壁	牆壁

²³資料來源：National Fire Protection Association 805,「Performance-based Standard for Fire Protection for Light Water Reactor Electric Generating Plants」,2001 Edition, Appendix C。

	方法	白努力/通風口口徑	白努力/通風口口徑	白努力/通風口口徑
	修正因子	流量係數	流量係數、剪力效應	流量係數、剪力效應、堆積效應、風力效應
機械通風	型態	抽送風	抽送風	抽送風
	方法	體積流率	體積流率	風扇/管路網路法(三向連接)
邊界熱損	方法	熱損係數	單維熱傳	單維熱傳
	邊界狀況	未考量	輻射、對流	輻射、對流(地板、天花板)
	設備熱損	未考量	有	有
受熱目標	型態	1、熱厚性材質 2、熱薄性材質	1、厚性材質 2、熱薄性材質 3、空間內任何物體	1、熱厚性材質 2、熱薄性材質
	加熱方式	輻射熱、對流熱	輻射熱、對流熱	輻射熱、對流熱
	損害基準	溫度	溫度	溫度
有效驗證範圍	通風	強制、自然	自然通風	強制、自然
	火勢強度	500kW、800 kW、1MW、2MW	32 kW、63 kW、105 kW、158 kW	<800 kW、4-36 MW、2.9 MW、7 MW、100 kW、1MW、3MW
	火災成長類型	穩態、非穩態	穩態	穩態、非穩態
	燃料	丙烯氣體火災、正庚烷油池火災、甲醇油池火災、PMMA 固體火災、電纜線火災	甲烷氣體、電纜線、正庚烷油池火災	家具、天然瓦斯、加熱器

二、場模式(Field Model)

場模式又稱為計算流體力學模式(Computational Fluid Dynamics, CFD)，則把空間劃分為大量的小格點，利用數值方法將動量、質量、物種、紊流參數等之非線性偏微分方程式離散化成代數方程式，代入輸入條件重複疊代計算出模擬間中各格點之物理特性，

預測出火場中之速度、壓力、溫度、濃度等參數值。由於場模式所需假設條件較少，因此對火災現象有更詳細、正確的描述，能預測複雜形狀建築物內煙的流動、煙層溫度與濃度等，但場模式模擬所花費時間較長，且需要計算功能較強的電腦。此類計算軟體主要有 FDS、SMARTFIRE、JASMINE、CFX 等，其主要特色比較如表 3-3²⁴，並分別介紹如下：

(一)FDS

FDS 模擬軟體是由美國 NIST(National Institute of Standards and Technology)所發表的免付費軟體，目前持續改進中。FDS 是一套計算流體力學(CFD Computational Fluid Dynamics)軟體，軟體的核心是 Navier-Stokes 方程組，用於解析熱驅動的低速流場，著重在煙流及熱傳遞的現象，同時也可模擬撒水頭作動，計算撒水後火場的變化，目前國內使用者漸多，也有學者利用 FDS 進行火場重建，模擬推估火場火災成長的方式。

(二)SMARTFIRE²⁵

SMARTFIRE是由英國GREENWICH大學的消防工程小組(Fire Safety Engineering Group, FSEG) 在英國政府的支持下開發而成，軟體遵循計算流體力學的方式撰寫，SMARTFIRE 通常忽略火災模式中的化學反應模式、燃燒模式，只採用熱輻射熱模式，其特色包括：

- 1、 SMARTFIRE的設計理念是希望這套軟體對非計算流體力學的專家也能很容易的使用，軟體中內建智慧型的計算流體力學程式碼和智慧型的知識資料庫。
- 2、 SMARTFIRE是一開放式的平台架構，可撰寫其他功能程式與其相結合。
- 3、 SMARTFIRE可使用結構型或非結構型網格，因此可處理複雜的火場形狀。

²⁴ 參考黃德清，警專學報第三卷第三期，消防模擬軟體之分析比較，並略加修改而成

²⁵ 徐一量等，「火場模擬技行手冊」，財團法人人工安衛技術發展中心，2001年12月。

4、SMARTFIRE有和善的使用者介面(Graphical User Interface, GUI)，方便使用者輸入火場資料。

5、SMARTFIRE 有自己的繪圖引擎(CADEngine)，可讀取 AutoCad的DXF檔，可以很容易的讓使用者建立模擬火場的形狀，節省使用者的時間與精力。

(三)JASMINE²⁶

JASMINE(Analysis of Smoke Movement In Enclosures)是由英國 BRE (Building Research Establishment Ltd.)的火災及風險科學部門所發展(Fire and Risk Sciences, FRS)，JASMINE 同樣遵循計算流體力學的方程式撰寫，並著重於煙的流動、浮力、熱對流、伴隨空氣、紊流、燃燒、熱輻射及邊界熱傳導等的模式。由於長時間的投入，JASMINE 成功的被利用到各種建築案中，如醫院、運動場、隧道、捷運、核電廠、飛機和船艦等場所。

(四)CFX²⁷

CFX 是由英國 AEA(Aerospace Engineering Department)公司從 CFDS FLOW 3D 發展而來的泛用型三維計算流體力學軟體，此軟體已被化工和製程工業應用於解決流體流動、傳熱、多相流、化學反應、燃燒等問題，其主要功能在於計算可壓縮及不可壓縮流場、層流與擾流問題、暫態與穩態、化學變化、多相流問題、熱傳和熱輻射等問題。然而，因其並非專為火災之燃燒流場所設計，因此，用以來作為模擬建築物火災之分析工具時常會有耗費大量記憶體資源、計算時間太久等之缺點。

三、區域模式與場模式之比較分析

區域模式與場模式火災模式模擬軟體事實上並無絕對的優劣之分，兩者均為近代各個學術領域無數先驅辛勤耕耘的成果，亦為今消防工程界不可或缺的工具，但是由於所採用假設條件與計算模式的不同，而有其各自不同的特性和適用範圍。由於區域模式的發展已有相

²⁶徐一量等，「火場模擬技行手冊」，財團法人工安衛技術發展中心，2001年12月。

²⁷黃德清，警專學報第三卷第三期，消防模擬軟體之分析比較，2003年6月。

當長的一段時間，因此已接受過許多研究單位的認證，並有相當友善的操作界面與後處理圖形界面，而其模式多半採用經驗公式 (Empirical Formula)，與全場模式相較起來，區域模式比較容易使用，對電腦系統的需求等級也較低，非常適於個人電腦來進行模擬，因此深得許多消防工程設計人員的推薦使用。但由於區域模式假設每個分區內有相同之物理、化學性質(如溫度、煙、濃度等)，因此只能預測平均的場分佈，且由於區域模式比全場模式採用較多的實驗公式和較多的假設條件，因此往往會有高度、面積比例的限制，必須謹慎使用才能確實提供有用的各項火災現象預測參數。

相較於區域模式，場模式所需要的假設條件較少，因此對火災現象則可提供相當細部的預測，可協助相關人員進行相關的消防安全設計，例如完整的速度場、溫度場、壓力場和濃度場等，而場模式所計算出來的垂直方向溫度梯度將可做為設計灑水頭的主要參考依據。另外由於場模式把空間劃分為大量的格點，對於空間亦可有更詳細的描述，因此可適用於模擬構造配置複雜、大空間以及障礙物眾多的特殊建築空間火災；然而，場模式也因此需要較高的電腦運算能力與較長的模擬時間。目前場模式仍無法進一步模擬燃燒過程中複雜的化學反應與火焰延燒的現象，因此無法將燃燒過程完整真實的模擬，但目前世界上各先進國家的消防實驗室及研究機構正努力解決此部分的缺陷，隨著電腦運算速度和記憶容量之不斷擴增，希望能在不久的將來能有所突破。

由以上的探討分析可知，無論是那一種火災模擬工具，只要根據火災情境的需要和其本身的特性，在其有效範圍內適當的應用，均可對消防安全設計與評估提供極大的參考價值。

表 3-3：場模式模擬軟體比較表²⁸

軟體	開發者	開發背景	軟體特色	免費與否
FDS	美國 NIST	火災模擬專用軟體	1、採用 LES 法，以空間平均解 Navier-Stokes 方程組 2、有專為火災設計的後處理工具(SmokeView) 3、有其他軟體所沒有的撒水頭模式	免費
SMARTFIRE	英國 GREENWICH 大學	火災模擬專用軟體	1、有自己的繪圖引擎，可很容易建立火場形狀 2、以火災成長模式來作為火源輸入模式	付費
JASMINE	英國 BRE	火災模擬專用軟體	著重於煙的流動、浮力、熱對流及邊界熱傳導等的模式	付費
CFX	英國 AEA 公司	泛用型三維計算流體力學軟體	為化工和製程工業領域中解決流體流動、傳熱、多相流、化學反應、燃燒等問題之首選工程模擬軟體	付費

²⁸ 資料來源：本研究自行整理。

第五節 小結

經過以上各節的探討與分析可知，核電廠之消防安全是以深度防禦為原則，確保核能安全、放射性物質外洩、人命安全和營業中斷等四項功能基準，而其中核能安全為首要確保達到之功能基準。核電廠之設備，基本上可分為二大類，即與核能安全相關之系統和非核能安全相關之系統，所謂核能安全相關之系統即是指會影響安全停機功能之系統，這些系統均會有二組以上之備用系統。由圖 3-2 可知，依據 NFPA805 之要求，決定式途徑的防護方式首先為限制此組系統必須完全位於不同的防火區劃，若當同一防火區劃內有二組核能安全系統時，則以一定時效之防火阻隔或一定距離之開放空間防止同一場火災同時造成二組系統失效，以確保核能安全，若二組核能安全停機路徑位於圍阻體內之同一防火區劃，其規定為下列方法任選一個：

- A. 輻射熱遮蔽裝置。
- B. 6.1m 之間隔(中間不得有可燃物)。
- C. 全區設滅火與火警自動警報系統。
- D. 圍阻體內惰化處理。

若二組核能安全停機路徑位於圍阻體外之同一防火區劃，其規定為下列方法任選一個：

- A. 任一成功路徑以三小時防火被覆保護。
- B. 任一成功路徑以一小時防火被覆且設滅火與火警自動警報系統。
- C. 6.1m 之間隔(中間不得有可燃物)且全區設滅火與火警自動警報系統。

而基於電廠設計與成本等因素之限制，這些決定式途徑之規定對於相當多核電廠來說是相當嚴苛，且亦不符合「安全有效、經濟合理」的設計原則，因此 NFPA805 便提供核電廠消防安全評估之性能式途徑。性能式途徑則是找出該區域可能發生的火災情境，再使用適當地火災模擬工具驗證所要求之核能安全路徑是否存活。而在核電廠內，這些核能安全相關設備與設備之間必須要透過電纜相連，一旦這些電

纜線或電器設備故障即會造成整個系統功能喪失，因此，核電廠消防安全評估的重點即是嘗試找出可能發生的火災情境，並分析它們對這些重要電纜線或電纜托網(cable tray)可能產生的危害。本研究限於時間、人力、物力等因素，乃在假設已確定核能安全有關電纜托網(cable tray)之條件下，評估其在所本研究所建立之火災情境下是否存活，並達到核能安全之功能基準。

而在眾多之區域模擬式與場模式火災模擬工具中，本研究選用FDS軟體為模擬工具，理由如下：

- 一、FDS為一場模式火災模擬軟體，相較於分區模式，對火災現場有更精確的模擬，而隨著電腦科技的不斷進步，亦逐漸解決了FDS對電腦運算能力的要求。
- 二、FDS具有強大的後處理程式SMOKEVIEW，對火場內之溫度場、速度場、熱傳導、熱輻射、熱對流、CO濃度、CO₂濃度、能見度等吾人極欲獲得之參數均能以優越的3D立體視覺效果呈現，甚至即使非消防專業人員亦可一目了然。
- 三、軟體取得容易，且更新快速，FDS可直接至NIST 網站免費下載 (<http://www.nist.org>)，可省下不少費用，因此使用者眾多，有機會成為強勢的火場模擬軟體。
- 四、程式撰寫者與使用者間的溝通管道暢通，可為使用者遭遇的問題作迅速的回應，也常常接受使用者的建議進程式修改，因此功能愈來愈齊全。
- 五、NIST建有廣泛的火場實驗資料庫，FDS可與這些實驗進行比對，因此程式的可靠度、準確度頗佳，足供工程使用。
- 六、FDS是至目前為止，較為完整且專門為火場模擬所撰寫的軟體，在火場的模擬設定上會比較簡單、迅速，可輕易建構複雜的空間，面對複雜的火場資訊，FDS常常可用簡單的程式即可完成描述。
- 七、FDS具有其他軟體所沒有的撒水頭模式 (Sprinkler Mode)，可以模擬裝設撒水設備對火災發展的影響。

八、FDS 符合現今軟體的潮流，為一開放原始程式(open source)軟體，整個程式都可為大眾所檢視，集大眾之力可加速程式碼的正確性。

九、FDS 程式附有免費的 database，其中包括多種常用材質的熱物理特性參數、化學反應參數、灑水頭等，使用者可省去不少尋找特性參數的困擾。

第四章 核電廠消防安全評估實例探討 -以 Cable Tray 火災為例

第一節 場模式火災模擬軟體 FDS 簡介

FDS模擬軟體是由美國NIST(National Institute of Standards and Technology)所開發，於西元2000年2月公開發表第一版，2001年12月發表第二版，2002年11月發表第三版，而於2003年9月發表3.1版，平均約一年即會更會版本，目前持續改進中，本研究則採用FDS3.1版做為評估工具。FDS是一計算流體力學軟體(the computational fluid dynamics, CFD)，亦即所謂的場模式(Field Model)，採用大渦流模擬LES(Large Eddy Simulation)以及直接數值模擬DNS(Direct Numerical Simulation)解控制方程式，這些方程式基本上是由Navier-Stokes推導簡化而來，是符合質量守恆、動量守恆、物種守恆以及能量守恆的流體力學方程式，適用的範圍為低馬赫數(low mach number)的流場分析，亦即火場中由熱驅動的低速流場。在燃燒理論方面採用混合分率模式(mixture fraction model)，解出計算區域中之各物理量變化情形，可預測室內外之多種火災問題、建築物之排煙系統、撒水頭動作、火災探測以及其他非壓縮流體之熱對流現象，在消防工程領域，FDS早已經證明它有能力模擬多種不同的火災情境，其架構如圖4-1所示。

首先針對欲模擬之對象物及所須輸出(Output)之結果建立一輸入檔(Input) *.data，經FDS程式之計算後，製造輸出計算結果檔*.smv、*.sf、*.bf、*.part、*.iso、*.q、*.ini，再經由瀏覽程式smokeveiw觀看整個模擬計算過程，其功能包括：模擬火場中煙層(氣流)流動方向、煙層溫度、煙層下降速度、火場能見度、燃燒釋熱率(HRR)、可燃物燃燒速度、自動灑水頭灑水動作及灑水分佈、感熱式探測器動作、火場溫度分佈、壓力、O₂、CO₂及CO濃度、排煙設備動作等。

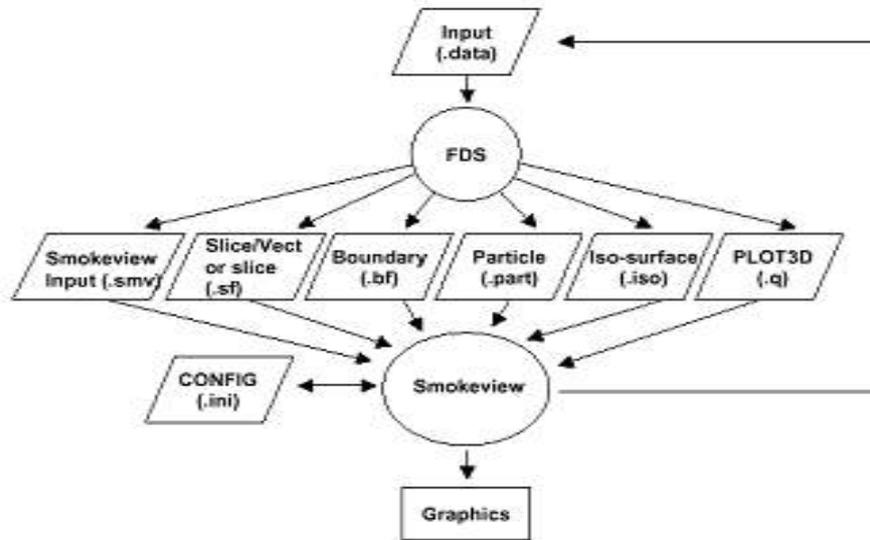


圖 4-1 FDS 功能架構圖

茲將 FDS 之相關模式分述如下：

一、控制方程式

質量方程式

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (4-1)$$

化學種方程式

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho Y_i) + \nabla \cdot \rho Y_i \mathbf{u} = \nabla \cdot (\rho D)_i \nabla Y_i + \dot{W}_i''' \quad (4-2)$$

動量方程式

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} \right) + \nabla p = \rho \mathbf{g} + \mathbf{f} + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} \quad (4-3)$$

能量方程式

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho h) + \nabla \cdot \rho h \mathbf{u} - \frac{Dp}{Dt} = \dot{q}''' - \nabla \cdot \mathbf{q}_r + \nabla \cdot k \nabla T + \nabla \cdot \sum_l h_l (\rho D)_l \nabla Y_l \quad (4-4)$$

其中

ρ = 流體密度 (kg/m³)

\mathbf{u} =流體速度(m/s)

Y_l =化學種 l 的質量分率(kg/kg)

h =流體熱焓(kJ/kg)

D =擴散係數

\dot{W}_l''' =單位體積內化學種 l 的產生率(kg/m³s)

\mathbf{g} =重力向量(m/s²)

\mathbf{f} =外力向量（重力向量除外）(Nt)

$\boldsymbol{\tau}$ =黏性應力張量(Nt)

\dot{q}''' =單位體積內的釋熱率(kW/m³)

\mathbf{q}_r =輻射熱通率向量(kW/m²)

k =流體熱導度(W/mK)

T =流體溫度(K)

t =時間(s)

二、紊流模式

CFD 在運算的過程中，最大的挑戰是如何適當的處理紊流問題，所謂紊流即是流體運動時所伴隨的漩渦現象，一般常發生在數公尺的尺度，尤其是在火場中，在沒有外力干擾的情況下，這些漩渦會愈來愈小，直到它們的能量被黏滯力完全消散為止，而火災的燃燒現象和化學反應即在這麼小的尺度內進行，因此，妥善處理紊流問題是 CFD 火災模擬的關鍵。目前處理的技術共有三種，它們分別是：直接數值模擬法 DNS (Direct Numerical Simulation)、雷諾時間平均法 RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes) 以及大尺度渦流模擬法 LES (Large Eddy Simulation)，有關此三種紊流模式之基本概念如圖 4-2 所示。

DNS 是直接求解高可信度的 Navier-Stokes 方程式，並非以近似解來模擬紊流，亦即用足夠小的網格涵蓋整個流場，只使用動粘滯係數(Dynamic Viscosity)，而不使用任何紊流模式，直接計算流場內所有的大小旋渦動態變化，然而為了呈現出所有的渦流—最大大到到邊界尺寸，最小小到消散運動，其所需的格點解析度必須精細到克氏尺

度(Kolmogorov micro-scale)，若對一實際建築物條件(雷諾數約為 10^6)加以計算，則所需的格點數將達 5×10^{13} ，此外，其計算時間間隔必須小到得以解析最快速的變動量，如此遠遠超過現今超級電腦的運算能力，因此，雖然 DNS 是處理此問題的最理想技術，但實務運用場合上並不適用。

而 RANS 技術是利用時間平均 Navier-Stokes 方程式加上紊流預測模式來計算流體的流動，克服了 DNS 在時間與設備上的問題，可以解釋在複雜幾何空間中的多種物理過程，包括火災現象。可運用於如自動化設計、渦輪氣體燃燒、火焰預測、煙層擴展以及太空、生物醫學與化學上的設計等，然而由於火災現象是瞬時變化的，利用時間平均為基礎 RANS 法通常無法精確地預測複雜熱傳與渦流的發展，造成其運用於火災問題上之諸多限制。

大渦流模擬(LES)則是另一個常用的技術，在 NIST 已開發 20 年，所謂大渦流乃是描述在火源附近氣體燃料和燃燒產物與空氣混合時的紊流，這個過程決定了大部分火災的燃燒率，並控制煙氣的蔓延，實是極難正確的預測的，這不僅僅存在於火災領域，所有具有渦流運動的現象皆是如此。運用大渦流模擬技術的基本想法是造成混合現象之渦流足夠大到以流體力學方程式計算可以得到相當合理精確的結果，至於小尺度(small-scale)渦流運動則可以粗略處理或加以忽略。此技術採用空間平均的方式求解 Navier-Stokes 方程式，將流體物理量區分為大尺度(grid scale)和次格點尺度(sub-grid scale)，對於大尺度的物理量直接由 Navier-Stokes 方程式求解，而對於次格點尺度的物理量則使用子模式的方式加以處理。LES 可以適當地解決建築物火災過程中的紊流問題與流體現象，這種計算模型對於消防工程界來說比 DNS 及 RANS 更具經濟性與實用性。

在 FDS 模擬軟體中提供 DNS 及 LES 兩種數值運算方法供使用者選擇，在空間不大且有足夠細密的網格的條件，可進行 DNS 運算，例如可運用於模擬預混合燃燒現象，而 LES 可應用於大多數火災現象的模擬，因此 FDS 模擬軟體把 LES 模式設定為內定值，本研究即

採用此模式，以降低計算域格點密度的需求。

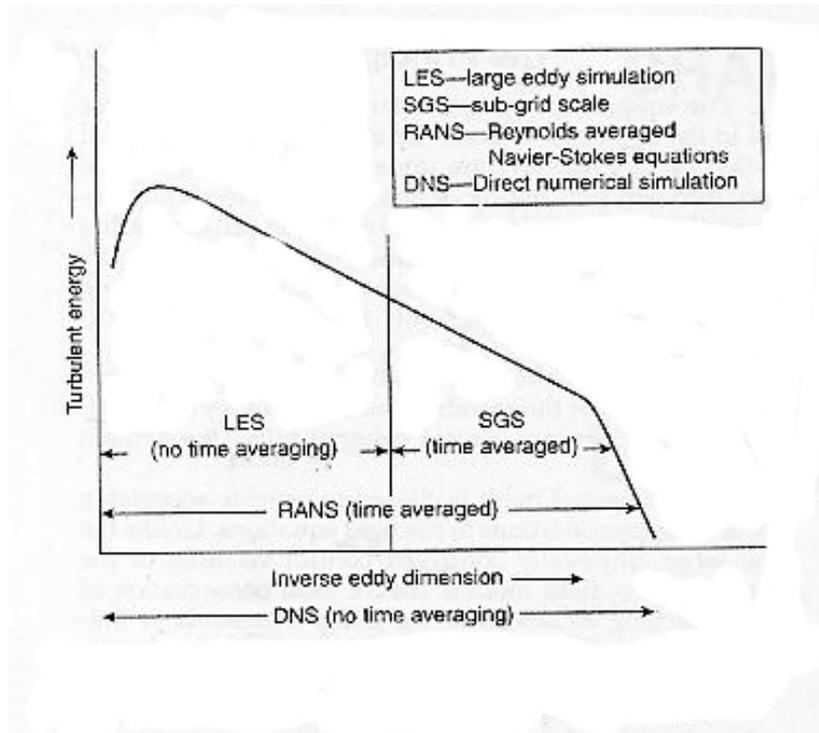


圖 4-2(a) 紊流模式示意圖²⁹

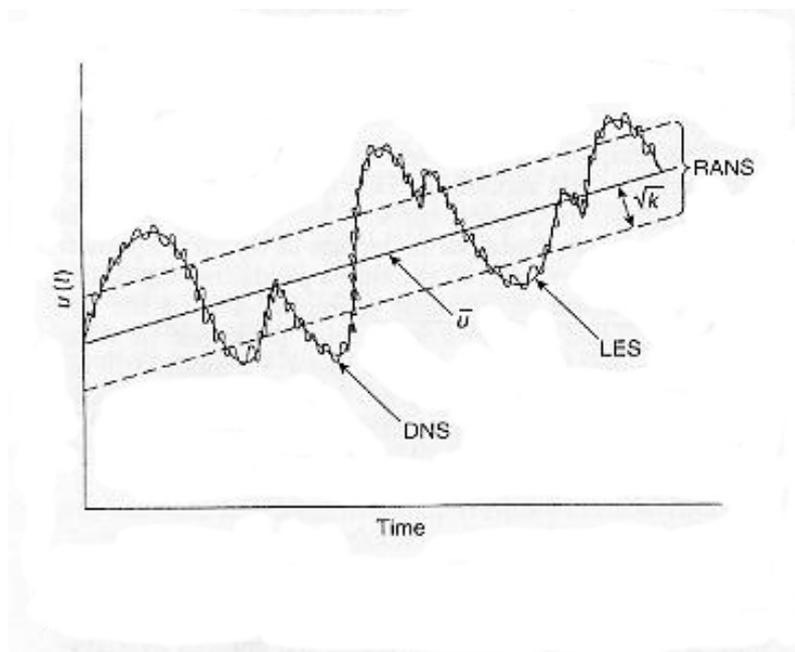
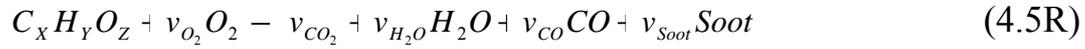


圖 4-2(b) 紊流模式示意圖³⁰

²⁹ 資料來源：Geoff Cox and Suresh Kumar, Modeling Enclosure Fires Using CFD, The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, third edition, 2002, p3-196.

三、燃燒模式

本研究採用 FDS 所內定之混合分率 (mixture fraction) 燃燒模式。FDS 的燃燒反應式可表示為



使用者必須在輸入(input)檔中設定釋煙率 y_s 以及一氧化碳釋放率 y_{CO} ，然後分別計算出各反應物與生成物的化學計量係數：

$$v_{O_2} = \left(x - \frac{M_f}{M_{CO}} y_{CO} - \frac{M_f}{M_C} y_s \right) + \frac{y}{4} - \frac{z}{2} \quad (4.6)$$

$$v_{CO_2} = x - \frac{M_f}{M_{CO}} y_{CO} - \frac{M_f}{M_C} y_s \quad (4.7)$$

$$v_{H_2O} = \frac{y}{2} \quad (4.8)$$

$$v_{CO} = \frac{M_f}{M_{CO}} y_{CO} \quad (4.9)$$

$$v_{soot} = \frac{M_f}{M_C} y_s \quad (4.10)$$

其中

v_i = 化學計量係數 (stoichiometric coefficient)

M_i = 各物種的分子量 (M_f 表燃料的分子量)

當使用者未設定一氧化碳釋放率時，FDS 所提供的經驗計算公式為

$$y_{CO} = \frac{12x}{M_f v_f} 0.0014 + 0.37 y_s \quad (4.11)$$

其中 v_f 表燃料的化學計量係數，在此可假設為 1。

³⁰ 同註 25。

而所謂混合分率燃燒模式，即假設在燃燒中之所有物種 (species) 可以用混合分率 (mixture fraction) $Z(x,t)$ 來描述，而物種之質量分率 (mass fraction) 與混合分率之關係則以狀態關係式 (state relation) 來示。

由燃燒的通式



其中

ν_i = 化學計量係數 (stoichiometric coefficient)

O = 氧氣

F = 燃料

P = 產物

可以得到，燃料與氧化劑的質量耗損率之關係式：

$$\frac{\dot{m}_F'''}{\nu_F M_F} = \frac{\dot{m}_O'''}{\nu_O M_O} \quad (4-13)$$

定義混合分率 (mixture fraction) Z

$$Z = \frac{sY_F - (Y_O - Y_O^\infty)}{sY_F' + Y_O^\infty} \quad (4-14)$$

$$s = \frac{\nu_O M_O}{\nu_F M_F} \quad (4-15)$$

其中

Y_F' = 燃料流 (fuel stream) 中燃燒所佔的分率

M_F = 燃料的分子量

M_O = 氧的分子量

可知當 $Z=1$ 時，表示該處只含燃料，而當 $Z=0$ 時，表示該處氧的質量分率與一般空氣中氧的質量分率 Y_O^∞ 相同。

而混合分率亦滿足

$$\rho \frac{DZ}{Dt} = \nabla \cdot (\rho D \nabla Z) \quad (4-16)$$

本模式假設燃燒之化學反應速率為無限快，因此，燃料與化劑無法共存，可定義火焰曲面（flame surface）為

$$Z(x,t) = Z_f \quad ; \quad Z_f = \frac{Y_O^\infty}{sY_F^I + Y_O^\infty} \quad (4-17)$$

四、灑水頭滅火模式

在灑水頭灑水下，燃燒物的整體熱釋率（total heat release rate）可表示為：

$$\dot{Q} = \dot{Q}_0 e^{-k(t-t_0)} \quad (4-18)$$

其中

\dot{Q}_0 = 剛開始灑水時，燃燒物之整體熱釋率(kW)

t_0 = 開始灑水的時間(s)

k = 與燃燒物有關的係數(s^{-1})

因為燃燒物在灑水頭灑水下而被撲滅（suppression）時，不論其巨觀或微觀的燃燒行為均有相同的特性，因此，可以定義燃燒物的局部燃燒率（local burning rate）為

$$\dot{m}_f''(t) = \dot{m}_{f,0}''(t) e^{-\int k(t) dt} \quad ; \quad k(t) = a \dot{m}_w''(t) \quad (4-19)$$

其中

$\dot{m}_{f,0}''$ = 未灑水時，單位面積之燃燒率(kg/sm^2)

$\dot{m}_w''(t)$ = 在每單位面積中所灑水的水的質量(kg/m^2)

a = 實驗常數($m^2/s \cdot kg$)

五、邊界條件之設定

(一) 火源 (fire) 邊界條件之設定

在混合分率模式 (mixture fraction model) 中，FDS 以燃燒物之單位面積的熱釋率 HRRPUA (Heat Release Rate Per Unit Area) 來定義火焰，以此參數來控制燃料的燃燒率。

(二) 開口 (open) 邊界條件之設定

假設模擬之情況為燃燒的火焰所產生之產物氣體(包含二氧化碳、水、氮氣等)及煙塵飄向室外或窗戶，因此，我們必須在計算域的某部份適當邊界上設定開放邊界條件，以模擬燃燒產物及煙塵飄向戶外廣大空間之情形，通常開放之邊界條件之壓力內定值為一大氣壓。

(三) 壁面 (wall) 邊界條件之設定

由於流體之分布是從牆壁上的邊界層 (boundary layer) 內向外發展，造成近壁流場分布有劇烈變化的特性。對此變化過劇的現象在數值分析上若採用不移動 (no-slip) 的邊界條件，就必須使用大量的分析格點才足以掌握近壁流場之分布特性。為了避免使用過量的分析格點以節省計算時間，同時兼顧模擬流場的準確性，FDS 程式將牆壁上的速度設為相鄰格點的速度之分率值，並以參數 VBC 來定義之：

$$-1 < VBC < 1$$

當 VBC=-1 時，表示壁面為不移動 (no-slip) 之邊界條件；當 VBC=1 時，表示壁面為自由移動 (free-slip) 之邊界條件；而當 VBC 界於-1 與 1 之間時，表示壁面為部分移動 (partial-slip) 之邊界條件。

在 FDS 程式中，LES 數值方法，內定牆壁的邊界條件為 VBC=0.5，如此可以避免使用過量的分析格點以節省計算時間，同時兼顧模擬流場的準確性；而 DNS 的數值方法，牆壁的邊界條件為 VBC=-1。

六、使用上應注意事項

火災是一複雜之燃燒過程，基本上應無法完全精確地模擬，加上程式本身設計上一些不確定因素，因此在操作上及結讀果判讀上需要火災燃燒工學上之基本知識，使用火場模擬軟體前，首先必須認識到軟體的功能限制在那裡，也就是說要了解軟體適用在那裡，不適用

在那裡，才不致於誤用。為避免軟體的錯用、誤用，在使用FDS時，須注意下列事項：

- (一) 程式本身無法判定輸入資料之正確與否，因此使用者對輸入之任何資料(Database)如建物區劃材料及可燃物本身之密度、比重、厚度、熱傳導率、熱貫性、燃燒熱、燃燒速度、單面面積之釋熱率、燃燒反應等等可燃物之燃燒特性參數及區劃空間中開口、排煙口、出風口之位置及開口大小及風量等，應有判段與比對求證之必要，否則輸入一堆不正確之資料，所得結果也必將無法使用(Garbage IN-Garbage OUT)。
- (二) FDS目前最大的缺點是計算格點系統必須為立方體形，在模擬非立方體形建築物或其內之擺放物體時，必須以分解為多個立方體的方式來建構，不過整體而言，核能電廠內大部分空間均為四方形或類似四方形之規則空間，FDS仍是目前較佳的選擇。
- (三) 數值網格(Computational Grid)之大小形狀對計算結果會造嚴重之差異性，基本上以正方形之網格最為適當，網格劃分愈細者其結果較大網格者理想，但所須花費之電腦計算時間及結果所佔之電腦記憶體也就愈大，使用者必須在兩者之間取得適當的平衡。
- (四) FDS 預測燃燒率(BURNING RATE)之方式有二種，第一種方式是直接指定物體的單位面積熱釋率(HRRPUA, kW/m²)，這一種方式較無爭議；另一種方式是先指定物體的汽化熱(HEAT OF VAPORIZATION)及(HEAT OF COMBUSTION)，爾後再依物體周圍之對流、輻射或傳導所傳來之熱來決定其燃燒率，這種計算目前仍存在一定程度的不確定性，這主要源自於格點密度不足、吸收率(absorption coefficient)及火焰溫度的不準度等因素，故為避免這種不準度之發生，本研究為求模擬的精確性，在火災邊界條件之設定均直接指定物體的單位面積熱釋率。
- (五) FDS 在材質設定功能上僅考慮物體最外層之材質屬性，因此，如果所考量空間中之物體是由有多層不同特性物質所組成時，使用者必須深切了解這一軟體特性，以免產生不必要的錯誤。

第二節 設計火源與格點設定之探討

設計火源大小與適當的格點設定對 FDS 火災模擬評估有相當關鍵性的影響，因此，本節特別針對設計火源與格點大小之決定分別加以探討。

一、設計火源

而預測電纜托網(cable tray)燃燒時的熱釋放率以及火焰的延燒是一項非複雜的工作，現今的電腦模擬軟體尚沒有實際預測這種燃燒現象的能力，因此，目前世界先進國家的研究單位在進行電纜托網火災的模擬時，通常將其熱釋放率特性明定於輸入檔。美國國家標準局(NIST) Monideep K. Dey 等人所著之「Evaluation of Fire Models for Nuclear Power Plant Applications: Cable Tray Fires」³¹中根據各種實驗資料發現，在通風良好的環境下，一條大約長 15m、寬 0.6m、厚 0.1m 的電纜托網，其熱釋率的分佈範圍大約為 0.8MW 至 2MW，而其成長特性亦遵循時間平方(t-squared)的規則，成長至最高熱釋率的時間大約為 10 分鐘，由於本研究中所模擬電纜托網之尺寸為 15m×0.6m×0.1m，因此，本研究在同時考量最常發生狀況與最嚴重狀況之下，分別以 1MW 與 2MW 兩種最高熱釋放率作為本次模擬的設計火源，在以時間平方成長的條件下，熱釋率成長時間設定為 10 分鐘，並以最高熱釋放率持續 10 分鐘為觀察範圍，因此，本研究所建立之兩種設計火源分別如公式 4-20 及圖 4-3 所示。

$$Q = Q_0 \left(\frac{t}{t_g} \right)^2 \quad (\text{MW}) \quad (4-20)$$

t_g : 火勢成長時間 (設為 600sec)

³¹ Monideep K. Dey 等，NISTIR 6872, Evaluation of Fire Models for Nuclear Power Plant Applications: Cable Tray Fires, p9.

Q_0 ：最高熱釋率(分別為 1MW 與 2MW)

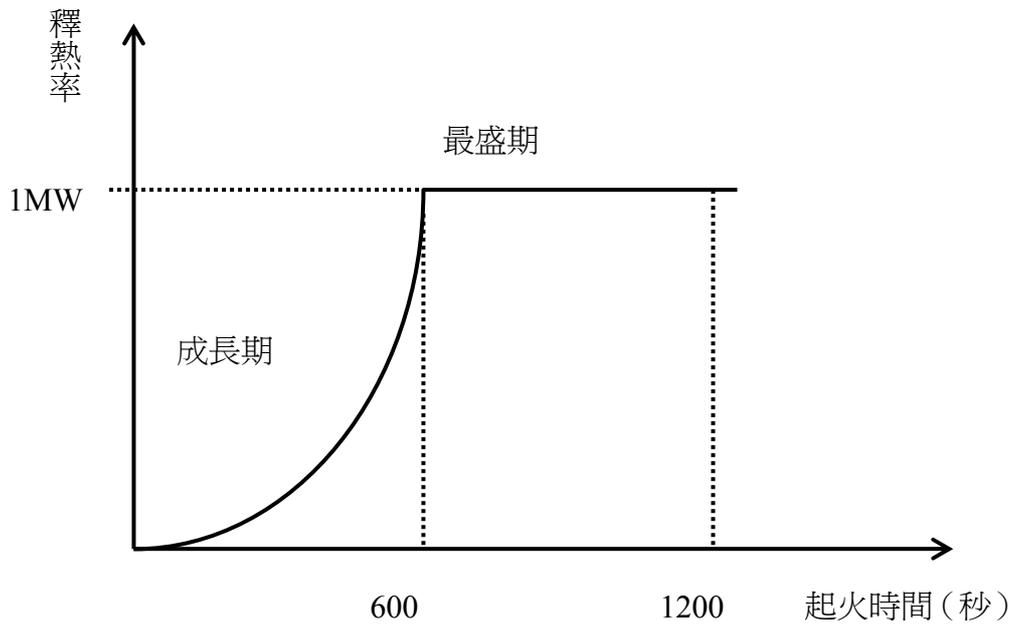


圖 4-3(a) 最高熱釋率 1MW 之設計火源圖

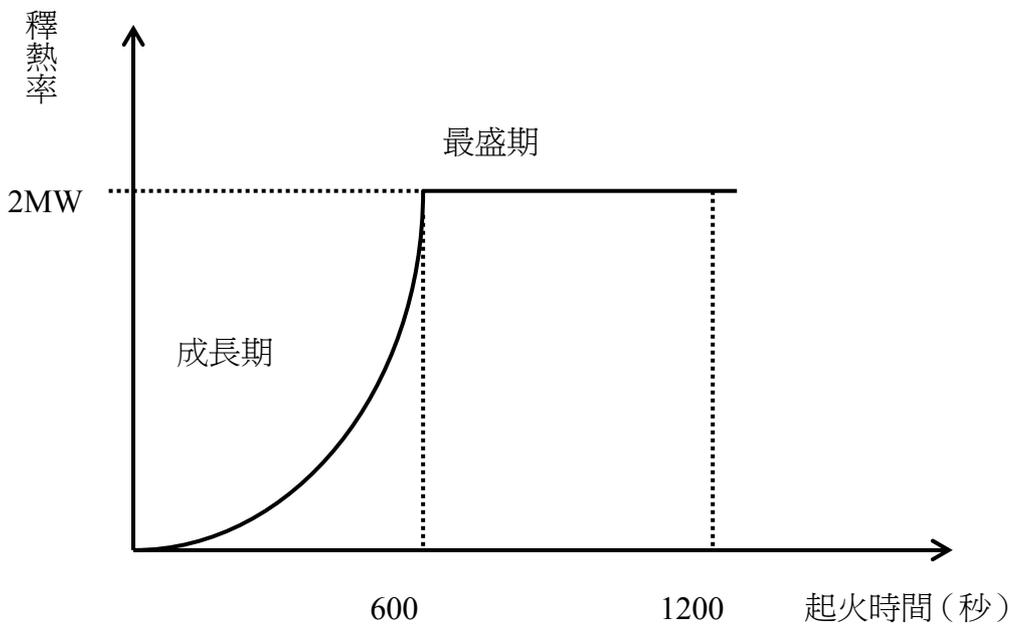


圖 4-3(b) 最高熱釋率 2MW 之設計火源圖

二、格點設定

在 CFD 數值分析中，計算區域 (computational domain) 的格點 (mesh) 分布，一方面必須考慮有足夠的密度，以正確合理地描述流場中每一位置之物理量變化，一方面又必須兼顧計算資源 (電腦 CPU 運算速度、記憶體容量) 之有效運用與計算時間之控制；因此，太密的格點系統將造成格點數目太多，而導致計算時間太久、計算資源需求過高之問題發生，尤其是面臨建築物火災模擬這種計算域體積龐大、流場隨時間變化之複雜暫態系統 (transient system) 時，情形更是嚴重；相反地，若格點系統分布太過稀疏，將可能造成無法正確描述流場之問題，甚至產生不合理的結果；因此，如何適當地劃分計算域之格點，實為一關鍵之課題。

國內學者蔡尤溪氏³²將 FDS 模擬計算結果與實驗資料做比對，量測空間中各點垂直溫度之變化，並分別以不同格點大小(100mm、150mm、300mm)切割整個計算區域做測試，並與全尺度實驗比較火場中垂直溫度分佈，如圖 4-4 所示。研究發現當靠近火源，100mm 與 150mm 格點尺寸模型與實驗結果相當吻合，300mm 格點尺寸模型則與實驗結果有較大的誤差，當遠離火源時，不同格點大小對溫度場均能有相當精確的預測。值得注意的是，在火源上方約 0.5 公尺以內模擬預測的垂直溫度分布與實驗值仍有一定的誤差，而 FDS 在火源表面約 1 公尺以上即可得到良好的預測值。

另外，由 McCaffery(1989)所提出的火災之特徵直徑(characteristic fire diameter) D^* 是決定格點大小之另一種方式，如公式 4-5 所示，國內學者柯建明氏³³則提出分別以 $1D^*$ 、 $0.5D^*$ 、 $0.3D^*$ 與 $0.1D^*$ 之格點尺寸進行測試，將 FDS 模擬預測平均軸心速度與溫度和 McCaffery

³² 蔡尤溪等，大空間防煙性能模擬與現場實測基準之研究，內政部建研所研究計畫，九十二年三月。

³³ 柯建明，大型車站建築之火災煙控系統設計與電腦模擬分析，國立中山大學機械與機電工程研究所碩士論文，九十二年六月。

的實驗回歸公式做比較，如圖 4-5 所示，研究發現當採用格點尺寸為 0.1D*時 FDS 模擬預測值才會與實驗值相吻合，因此，進行 FDS(LES model)火災模擬時較適當的格點尺寸應為 0.1D*，由於本研究共採用 1MW 與 2MW 兩種熱釋率做為設計火源，當火源為 1MW 時，算出之 D*約為 0.96m，當火源為 2MW 時，算出之 D*約為 1.27m 因此，本研究採用運算格點尺寸大小為 0.1m(0.1D*)應屬合理。

$$D^* = \left(\frac{Q}{\rho_{\infty} c_p T_{\infty} \sqrt{g}} \right)^{\frac{2}{5}} \quad 4-21$$

其中：

Q ：總熱釋率 (kW)

ρ_{∞} ：空氣密度(kg/m³)

C_p ：空氣比熱(kJ/kg-K)

T_{∞} ：環境溫度(K)

g ：重力加速度(m/s²)

本研究所建立的空間尺寸為 15m×10m×5m，為兼顧模擬分析結果的精確性、電腦運算能力以及運算所需時間限制，格點大小設定為 100mm，整個計算區域共 750,000 格點，所建構之空間格點如圖 4-6 所示。

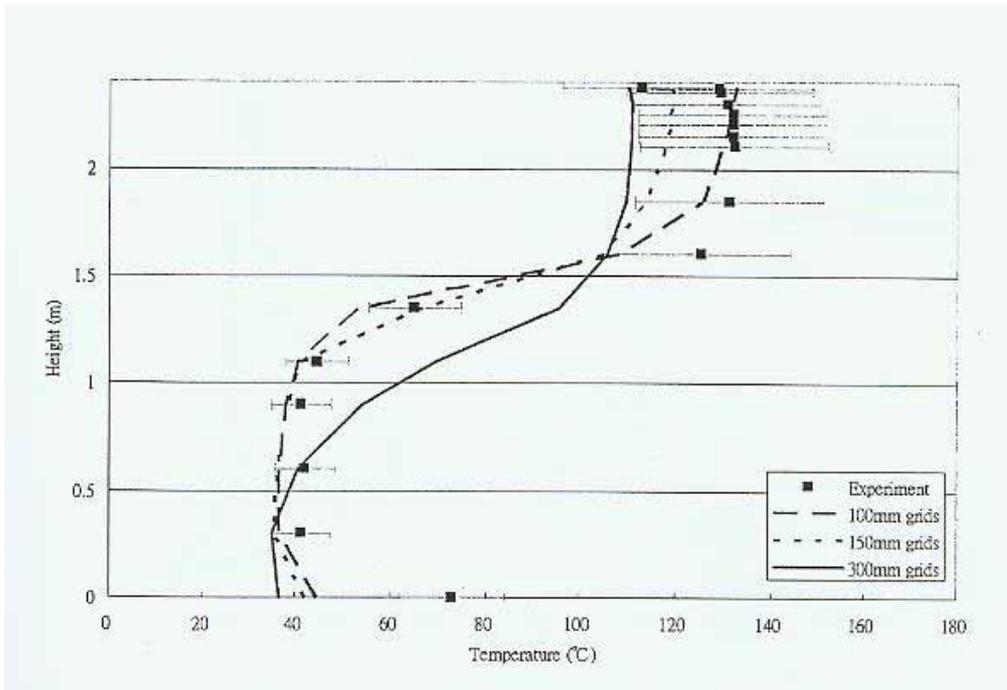


圖 4-4(a) 距火源水平 1.65 公尺處垂直溫度比較

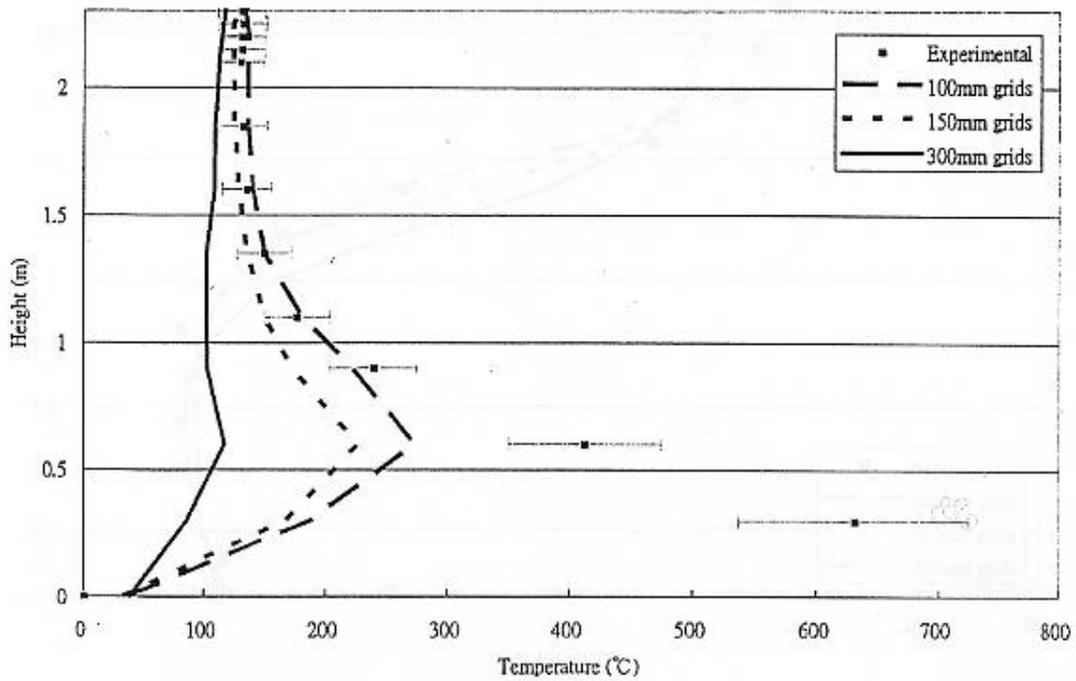


圖 4-4(b) 火源處垂直溫度分布比較

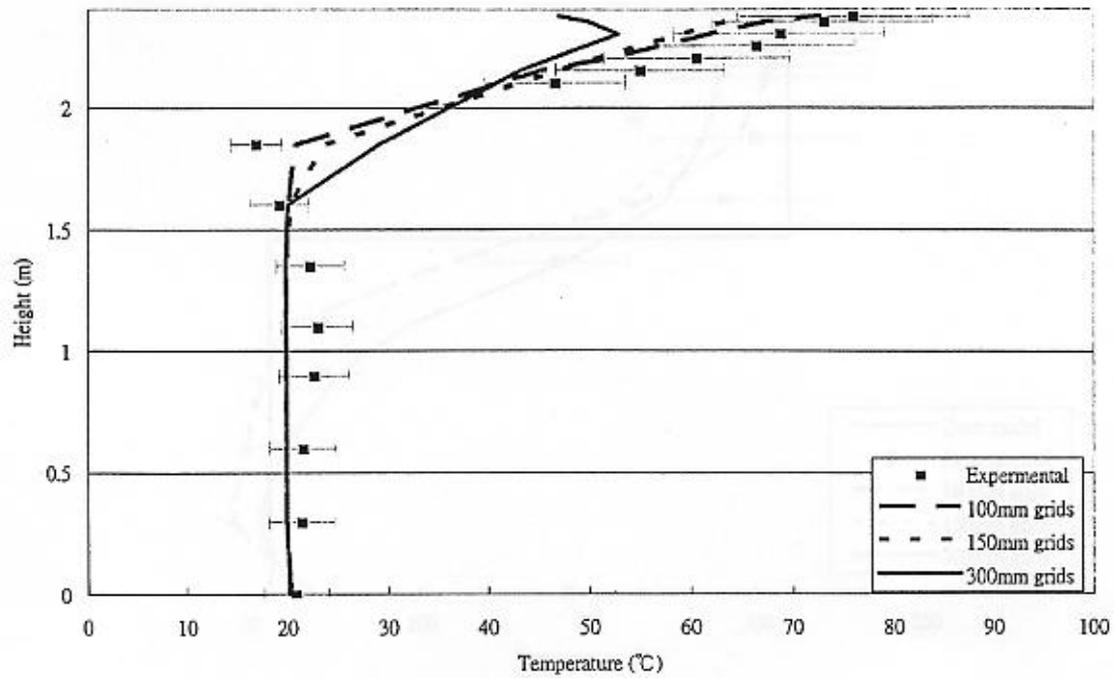


圖 4-4(c) 距火源水平 5.6 公尺處垂直溫度比較

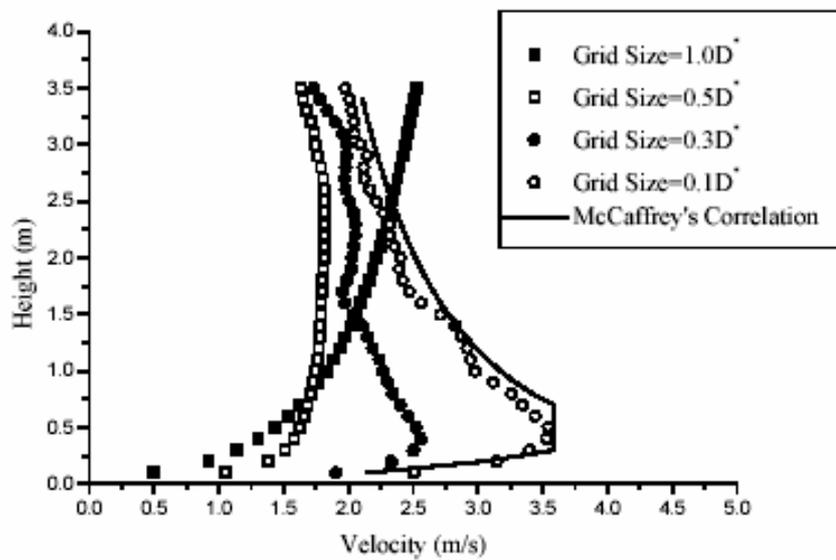


圖4-5(a) 不同格點之時間平均軸心速度 (熱釋放率=24kW)

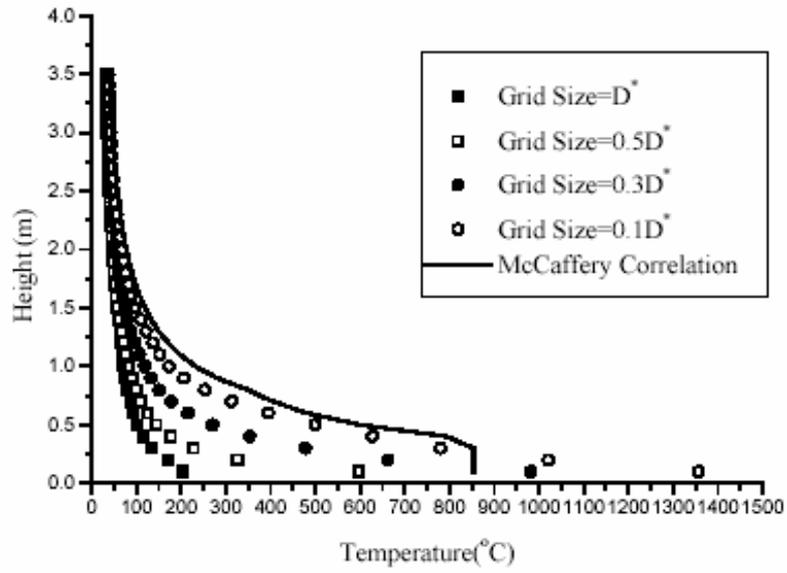


圖4-5(b) 不同格點之時間平均軸心溫度 (熱釋放率=24kW)

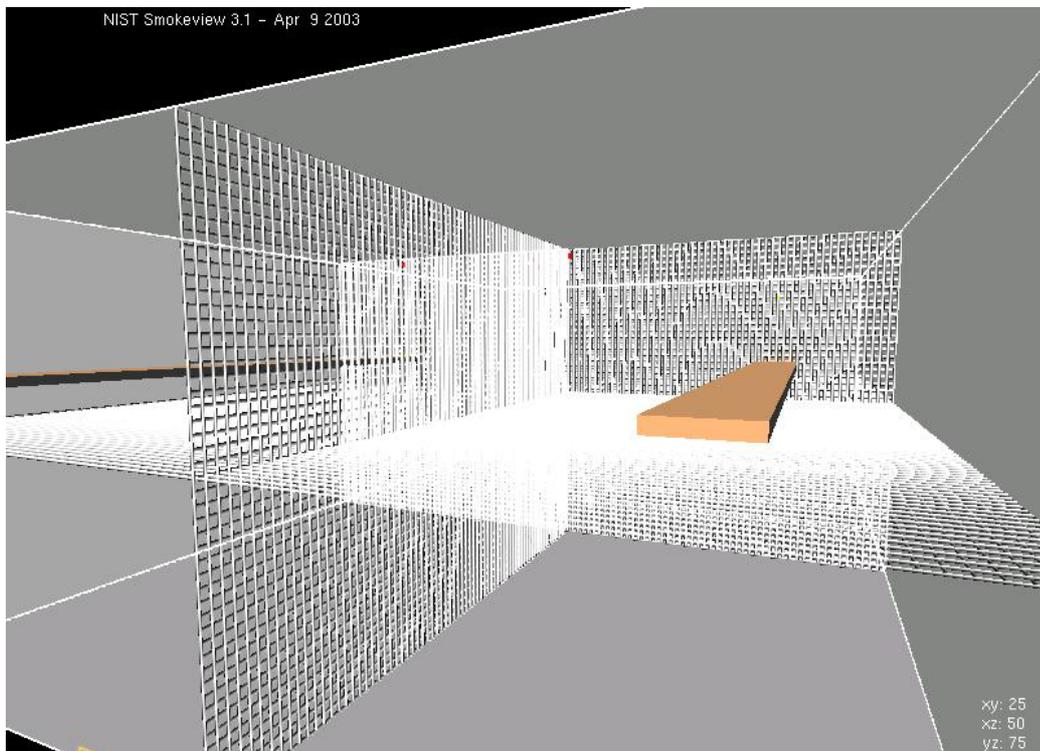


圖 4-6 格點劃分示意圖

第三節 火災情境之建立

本研究所選定之火災情境為核電廠內之電纜分配室(cable spreading room)火災，假定一裝滿電纜線的水平電纜托網內部有一條高壓電纜線內部發生短路，引燃電纜絕緣被覆，並可能波及附近一條與核能安全有關的電纜托網。本研究所建構之空間型態與配置情形如圖 4-7 所示，空間特性參數如表 4-1，該空間壁面為混凝土材質，其長、寬、高為 15m×10m×5m，前後各有一門，門之尺寸為 3m×4m，房間內高度離地面 3m 處通過兩條與核能安全有關之電纜托網，各位於左、右兩側並與牆壁有相同之間距。電纜托網長、寬、厚為 15m×0.6m×0.1m，材質為鋼板，電纜表面材質假定為 PVC，內部絕緣材質(亦即主要之可燃物)假定為 PE，電纜表面相關熱物理參數採用美國國家標準局(NIST) Monideep K. Dey 等人所著之「Evaluation of Fire Models for Nuclear Power Plant Applications：Cable Tray Fires」³⁴內所用之參數，如表 4-2 所示。Nuclear Energy Institute 的研究報告指出熱塑性電纜(Thermoplastic cable)在 200°C 的環境中就會受損，熱固性電纜(Thermoset cable)在 370°C 的環境中就會受損，而外裝電纜(Armored cable)在 305°C 的環境中就會受損³⁵，本研究基於保守原則之考量，當電纜表面溫度達到 200°C 即認定電纜受到損害並失效。另外，量測受熱電纜托網中心點上方約 1m 處之溫度代表熱空氣層的溫度變化，並量測火源中心點上方約

³⁴ Monideep K. Dey 等，NISTIR 6872, Evaluation of Fire Models for Nuclear Power Plant Applications: Cable Tray Fires, p6.

³⁵ "Guidance for post-fire safe shutdown analysis" NEI Circuit Failure Issues Task Force, October, 2002.

1m 處之空氣含氧量變化情形。而房間內裝設之消防設備有排煙設備與自動撒水設備，排煙口設於天花板中間正上方，大小為 1m×1m，排煙風量設為 2m³/s 並與探測器連動，而撒水頭之放射壓力 1.3(bar)，K-factor 為 166(L/min/bar^{1/2})，動作溫度 74°C，反應時間指數 RTI 值為 148(m^{1/2}/s^{1/2})，配置方式為正方形，間距為 1m，另為達到分析最嚴重狀況(the worst case)之目的，本研究並非直接將撒水頭配置於火源上方，而僅配置於所防護之電纜托網上方側，如圖 4-7(i)所示。

透過本火災情境，本研究欲分析之項目包括：

- 一、兩條電纜托網間不同距離對所防護之電纜(以下簡稱受熱目標)所產生的影響。
- 二、不同空間通風狀況(例如開門與關門)對火勢發展以及所防護之電纜所產生的影響。
- 三、排煙設備對火勢發展以及所防護之電纜所產生的影響。
- 四、自動撒水設備對火勢發展以及所防護之電纜所產生的影響。

基於這些分析項目，本研究共建立十個火災情境，如表 4-3 所示。



圖 4-7 空間架構示意圖(門開放且設機械排煙)

表 4-1 空間特性參數

空間大小	15m×10m×5m，共 750,000 格點
初始溫度	20°C
初始速度	0
空間壁面材質	混凝土，厚 0.2m
開口	前後各 1 個門縫， 3m×0.1m
門	前後各一個門， 3m×4m
機械通風	中間正上方，1m×1m，排氣量=2m ³ /s
撒水頭	每一公尺配置一個，型號 K-11
電纜托網大小尺寸	15m×0.6m×0.1m，鋼質，內置電纜
電纜托網材質	鋼

表 4-2 電纜表面材質特性參數

電纜表面材質	表層 PVC，黃褐色
PVC 熱物理參數	熱擴散係數 $\alpha = 5 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ ，熱傳導係數 $KS = 0.092 \text{ W/mK}$ ， 燃點=370，熱釋率 $\text{HRRPUA} = 222 \text{ Kw/m}^2$ ， 臨界熱通量 $\text{CHF} = 10 \text{ Kw/m}^2$ ，損害溫度基準定為 200

表 4-3 FDS 電腦模擬火災情境

火災情境	HRR(MW)	電纜托網間距(m)	門	機械通風	撒水頭
Case1	1	6.2	關	off	off
Case2	1	3.2	關	off	off
Case3	2	1.4	關	off	off
Case3a	2	1.4	關	on	off
Case4	2	6.2	開	off	off
Case5	2	3.2	開	off	off
Case6	2	1.4	開	off	off
Case7	2	6.2	開	0n(與探測器連動)	off
Case8	2	6.2	開	off	on

第四節 模擬結果分析與探討

本研究進行 FDS 火災模擬分析所用之電腦設備等級為 Intel Pentium 4、3.0GHz(RAM=1.0GB)，每次火災情境模擬所需要之時間大約為 72 小時，就本研究所建立之火災情境而言，造成所防護之電纜托網(以下簡稱受熱目標)溫度昇高的熱源主要包括來自火焰的輻射熱通量以及週圍空氣的對流熱，各火災情境下受熱目標經由電腦模擬所得的最高溫度與最高熱通量，如表 4-4 所示；各火災情境下之火災動態如圖 4-8 所示。受熱目標之溫度時間曲線之比較如圖 4-9 所示；熱通量隨時間變化之比較如圖 4-10 所示；各火災情境氧氣量隨時間變化情形之比較如圖 4-11 所示；各火災情境熱空氣層溫度隨時間變化比較如圖 4-12 所示。由以上之模擬結果可知，各情境下受熱電纜托網中心點最高溫度僅達 103℃，並未達到所設定的損害基準 200℃，亦即在本研究所建立的火災情境中均能確保至少一條安全停機路徑，達到核能安全性能基準。此外，雖然本研究所輸入的熱釋率成長曲線只有二種，但由於受到通風狀況以及電腦數值運算的影響，電腦所計算出來的熱釋率成長曲線仍會有些許的差異，各火災情境之熱釋率成長曲線如圖 4-13 至圖 4-21 所示。由以上各圖之比較可知，受熱目標的溫昇曲線基本上與熱釋率、空氣中氧氣含量、熱空氣層溫度成正相關。此外，針對本研究所欲分析之項目分別探討如下：

一、兩條電纜托網間不同距離對受熱目標產生的影響

本研究所探討電纜托網之不同距離共有 6.2m、3.2m、1.4m，由 case1 與 case2 比較可知，當火源大小設定為 1MW，且空間為密閉之狀況下，當兩條電纜托網間之距離為 6.2m 時，受熱目標中心最高溫度為 75℃；當兩條電纜托網間之距離為 3.2m 時，受熱目標中心最高溫度卻降低為 72℃，這是由於其火源最多只有成長到 1MW，並且隨著空氣量的不足，火勢亦逐漸將近熄滅的狀態，因此造成受熱目標溫度昇高的熱源主要來自週圍空氣的對流熱，而非來自火焰的輻射熱通

量，當兩條電纜托網間之距離為 6.2m 時，距離兩側牆壁較近，如圖 4-8(a) case1 火勢動作圖可以明顯觀查到熱空氣層受到牆壁阻擋，而在天花板與牆壁交界處累積並形成旋渦，使得受熱目標所受到的熱通量比較高(6.2m 時為 2.3kW/m^2 ，3.2m 時為 2.2kW/m^2)，因此，距離 6.2m 溫度反而比距離 3.2m 時高一些。

另外一方面，當火源大小設定為 2MW，且兩側門打開，即空氣充足的狀況下，由表 4-4 中 case4、case5、case6 的模擬結果可知，距離 6.2m 時受熱目標最高溫度為 90，距離 3.2m 時受熱目標最高溫度為 94，距離 1.4m 時受熱目標為 99，距離愈近，受熱目標的溫度愈高，顯示火焰輻射熱對受熱目標具有相當程度的影響，這是由於在空氣充足的情況下，火勢可以充分的發展，使得火焰輻射熱成為主道受熱目標溫昇的主要因素。

二、空間通風狀況對火勢發展以及受熱目標所產生的影響。

在本研究所建立之火災情境中，case1、case2、case3 前後兩側門為關閉之狀況，僅假設門下方各有 $10\text{cm}\times 3\text{m}$ 之門縫，因此，基本上是屬於密閉空間；而 case4、case5、case6、case7、case8 前後兩側門均開啟，為開放空間，屬於空氣充足、通風良好之狀況。當火源大小設定為 1MW 時，由圖 4-13、圖 4-14 熱釋率變化曲線可以發現，火勢大約在 600 秒左右即明顯減弱，並逐漸接近熄滅，當火源大小設定為 2MW 時，由圖 4-15 熱釋率變化曲線可以發現，火勢大約在 500 秒左右即迅速減弱，由圖 4-11 氧氣量隨時間變化整比較可知，這是由於所設定的火源愈大，消耗空氣中氧氣的速度愈快，使得火勢更快減弱；而另一方面，當空間氣充足時，從圖 4-17、圖 4-18、圖 4-19、圖 4-20、圖 4-21 之熱釋率變化曲線與輸入值幾乎完全一致，因此，空間通風狀況之良好與否對火勢的成長具有相當程度的影響，同時，觀察圖 4-9，由各情境受熱目標時間溫度變化之比較可以發現，當空間屬於開放狀態時，受熱目標溫度大致上均呈上昇之趨勢，而當空間通風狀況不良時，受熱目標大致上均隨著熱釋率的減少而逐漸下降。

由於核電廠內大部分空間均屬於通風不良之狀況，因此，在評估其火災危害時，除了考量有焰燃燒之危害外，亦必須考量悶燒可能造成的影響。

三、排煙設備對火勢發展以及受熱目標所產生的影響。

為防止煙的蔓延，核電廠一般會設置排煙設備，由於核電廠空間型態常常為密閉空間，因此，本研究分別探討排煙設備在密閉空間與開放空間啟動對火場所造成的影響。在本研究所建立的火災情境中，case3a 和 case7 均在天花板正中央設定面積為 $1\text{m}\times 1\text{m}$ ，排氣量 $2\text{m}^3/\text{s}$ 的排煙口，並與受熱目標正上方熱探測器連動啟動，兩個案例中火源大小均設定為 2MW，且兩條電纜托網間的距離均為 1.4m，以模擬排煙設備動作時的影響，其中 case3a 為密閉空間，排煙設備設於第 333 秒啟動，而 case7 屬於開放空間，受到外部冷空氣流動冷卻的影響，排煙設備稍微延後於第 336 秒啟動，排煙設備動作時火場中空氣流動情形如圖 4-8(h)、圖 4-8(d)所示。從圖 4-9 各火災情境受熱目標時間溫度變化之比較可知，case7 自排煙設備動作後，受熱目標之溫昇較同樣屬於開放空間之 case4、case5、case6 降低，顯示當空間通風狀況良好時，排煙設備之啟動可有效減少電纜托網受溫度損害之可能性；而從圖 4-11 各火災情境氧氣量隨時間變化之比較中可發現，case3a 自排煙設備動作後，空氣中含氧量明顯比 case3 充足，造成 case3a 的火勢較猛烈，同時因為屬於密閉空間型態，受到外部冷空氣流動冷卻的效應較少，使得 case3a 中受熱目標所受到之熱通量最高 ($3.1\text{kW}/\text{m}^2$)，溫度也最高(103)，顯示在密閉空間中啟動排煙設備，容易造成火場成為一高溫空間環境，增加電纜托網受到溫度損害的可能性，因此，當啟動排煙設備後，必須迅速將火災撲滅，以免電纜托網處在高溫之空間環境下。

四、自動撒水設備對火勢發展以及受熱目標所產生的影響。

為探討自動撒水設備的影響，本研究在火災情境 case8 中，在所

防護電纜托網之一側上方設置灑水頭，兩側電纜托網間距與 case4 為 6.2m 且前後兩個門均開啟，撒水頭動作時之情形如圖 4-8(i)、圖 4-8(j) 圖 4-8(k)所示，在第 380 秒時最靠近火源側之一排撒水頭前後各啟動一個，第 380 秒至第 640 秒之間持續啟動同串灑水頭中的 12 個，從圖中可清楚看出火場空間被水滴冷卻後之溫度場分佈。另由表 4-4 可知，case8 中受熱目標之最高溫度為 41℃，而未裝設撒水頭之 case4 中受熱目標最高溫度可高達 90℃，另外，由圖 4-10 各火災情境下受熱目標熱通量隨時間變化之比較可以發現，大約在第 400 秒左右，即由最高熱通量 0.4 kW/m² 迅速降到 0.1 kW/m² 以下；且由圖 4-9 受熱目標時間溫度變化之比較可以發現，大約在 400 秒左右時，受熱目標之溫度明顯受到控制；而透過觀察圖 4-12 熱空氣層溫度隨時間變化整比較亦可發現，自第 400 秒後，熱空氣層的溫度即明顯由 100℃ 左右降至 50℃ 以下，由此可知，適當的配置撒水設備可有效降低火場空間的溫昇，防止電纜托網受到溫度的損害。

表 4-4 模擬結果一覽表

火災情境	受熱 Cable tray 中點最高溫度 (°C)	受熱 Cable tray 中點最高熱通量(kW/m ²)
Case1	75	2.3
Case2	72	2.2
Case3	82	2.7
Case3a	103	3.1
Case4	90	1.9
Case5	94	2.1
Case6	99	2.2
Case7	83	1.6
Case8	41	0.4

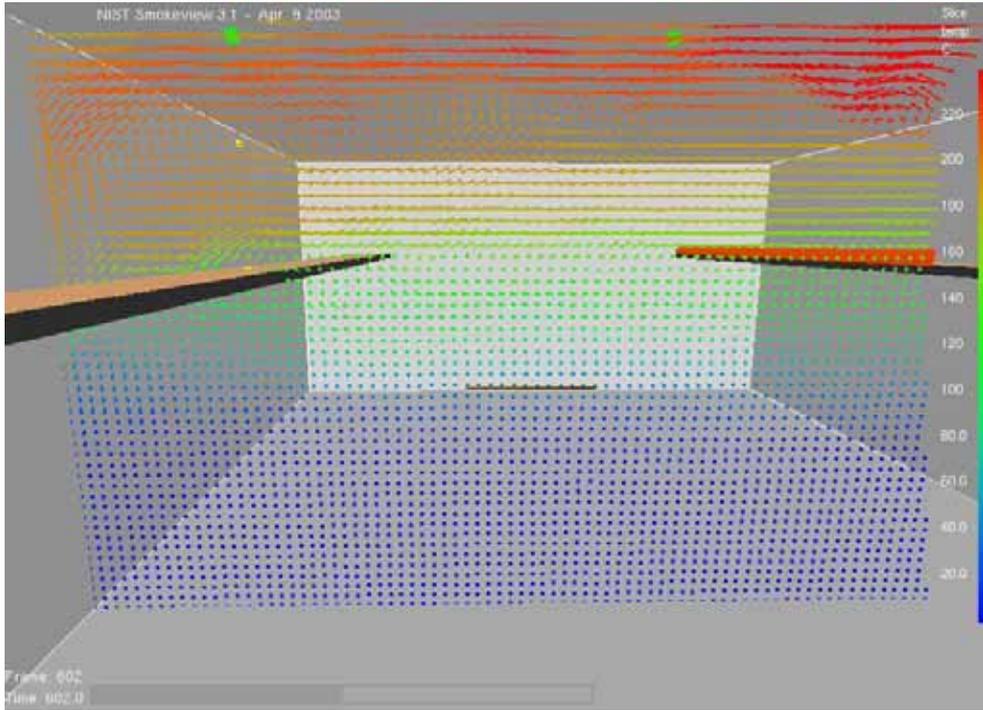


圖 4-8(a) case1 動作圖

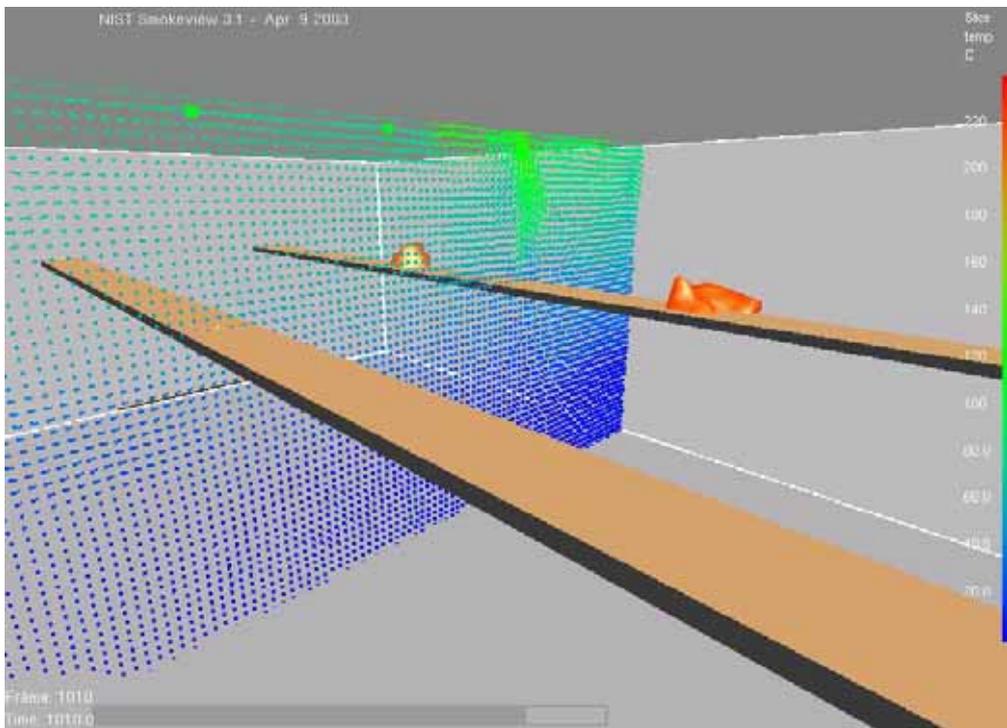


圖 4-8(b) case2 動作圖

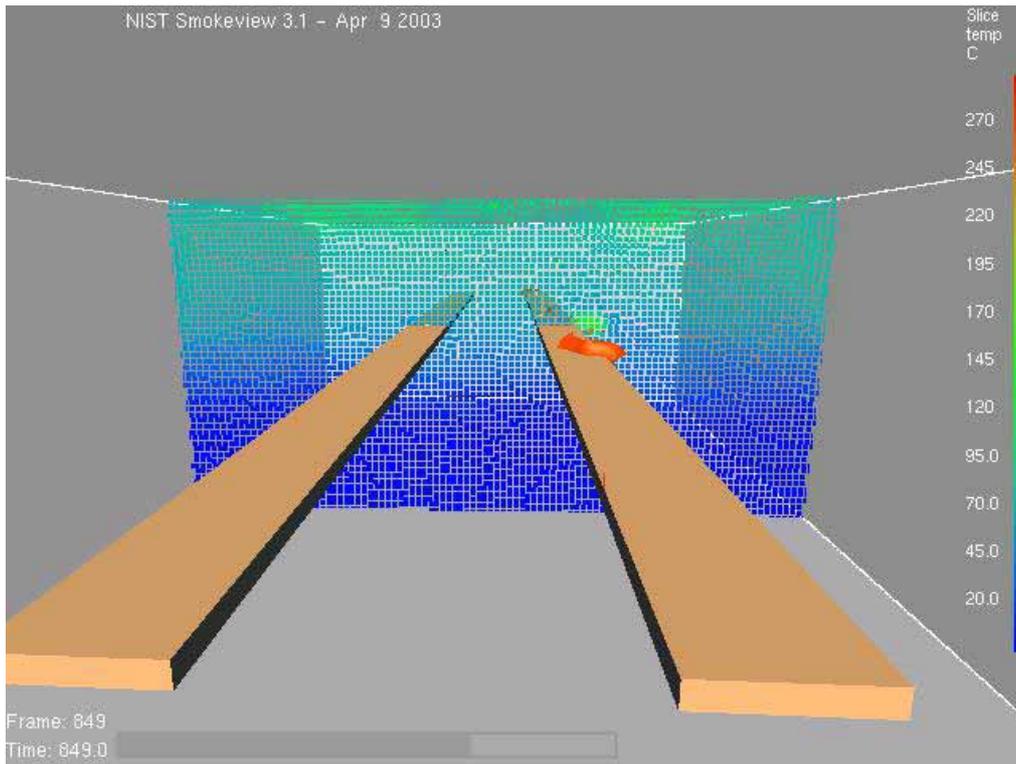


圖 4-8(c) case3 動作圖

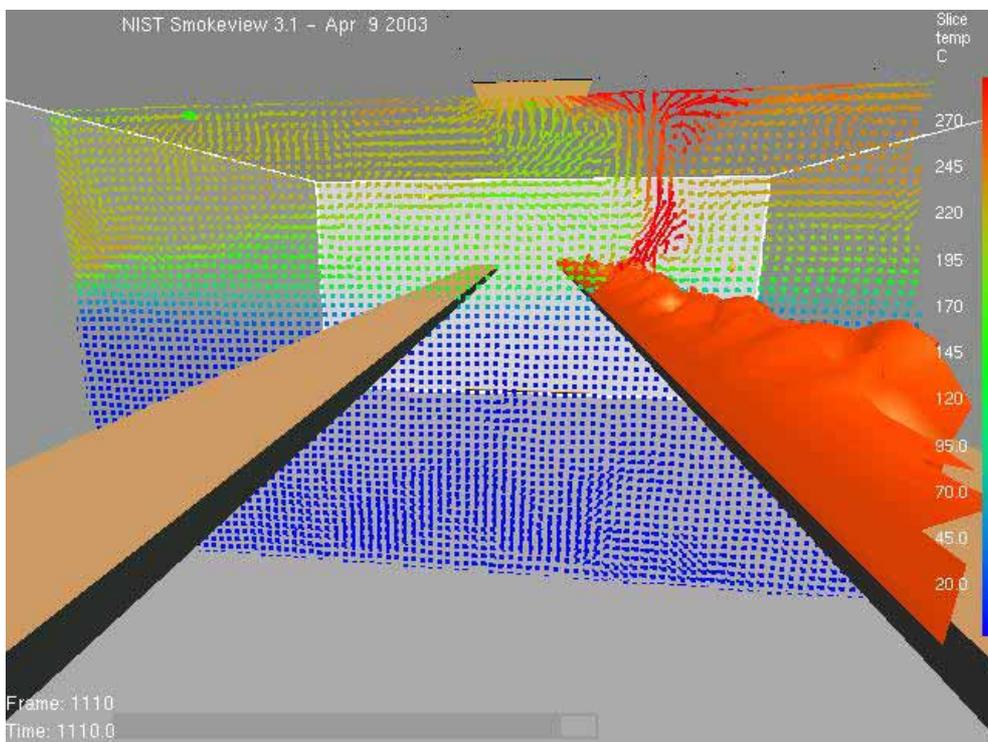


圖 4-8(d) case3a 動作圖

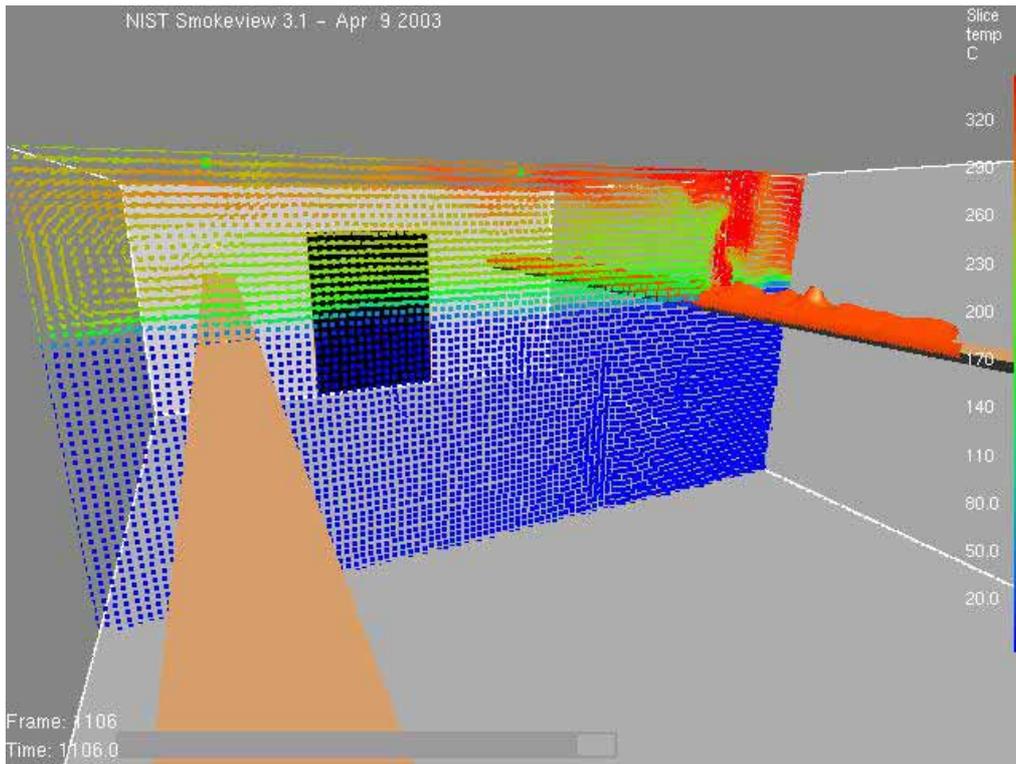


圖 4-8(e) case4 動作圖

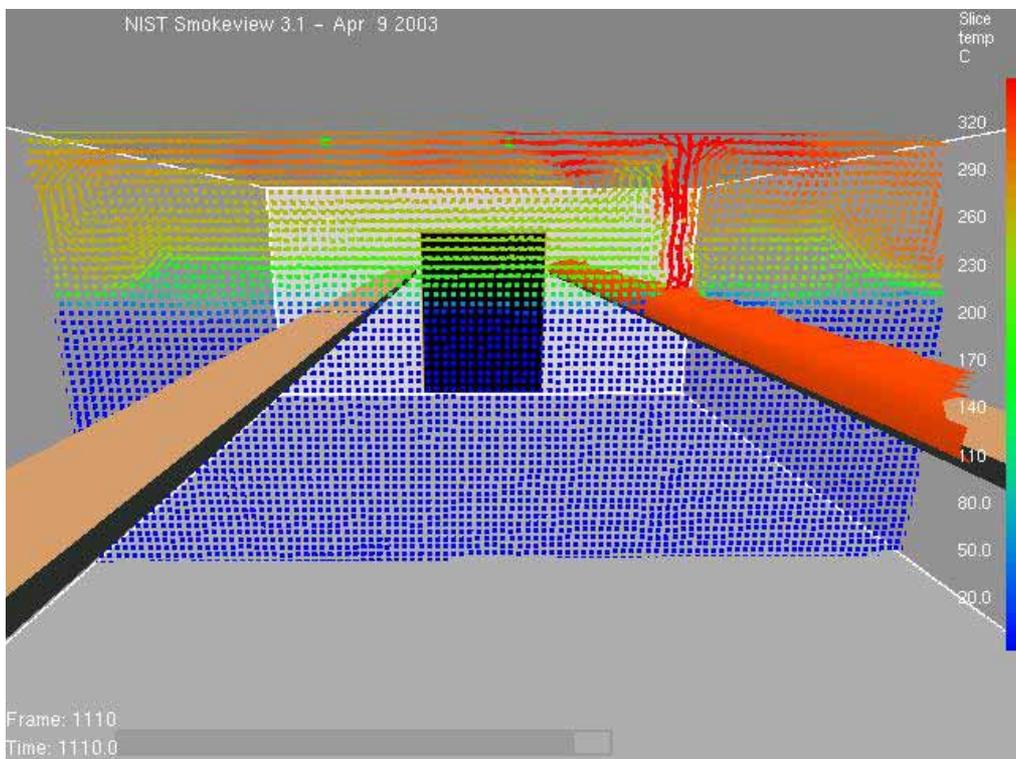


圖 4-8(f) case5 動作圖

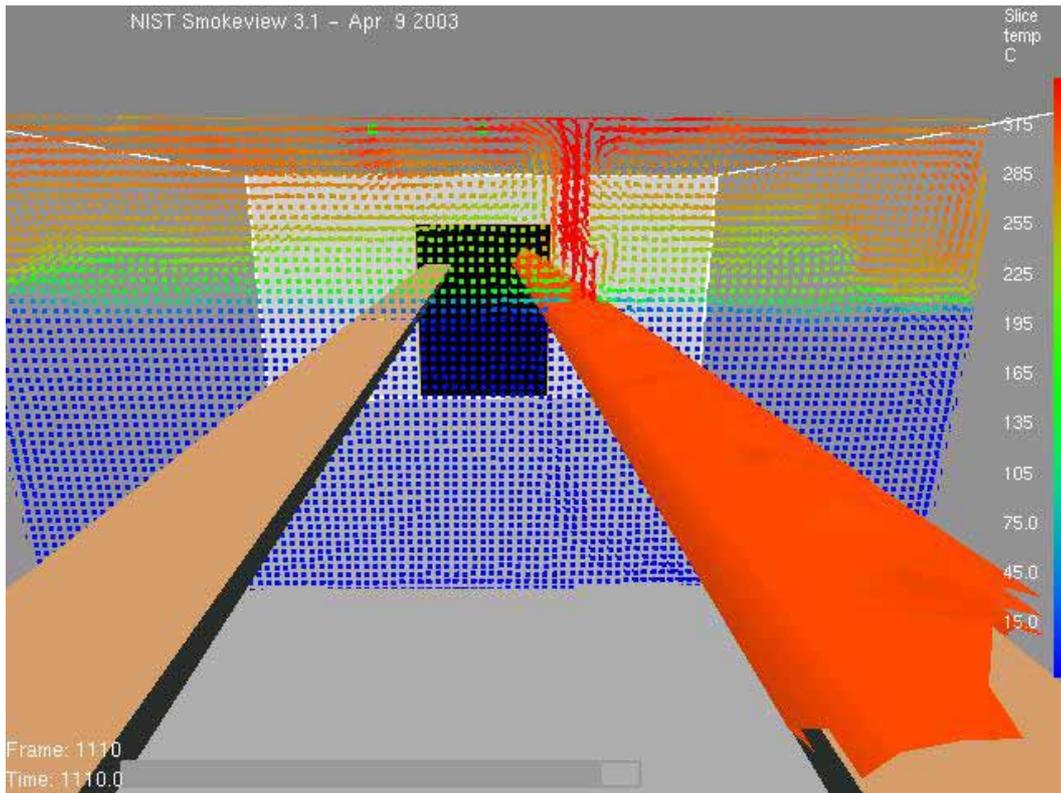


圖 4-8(g) case6 動作圖

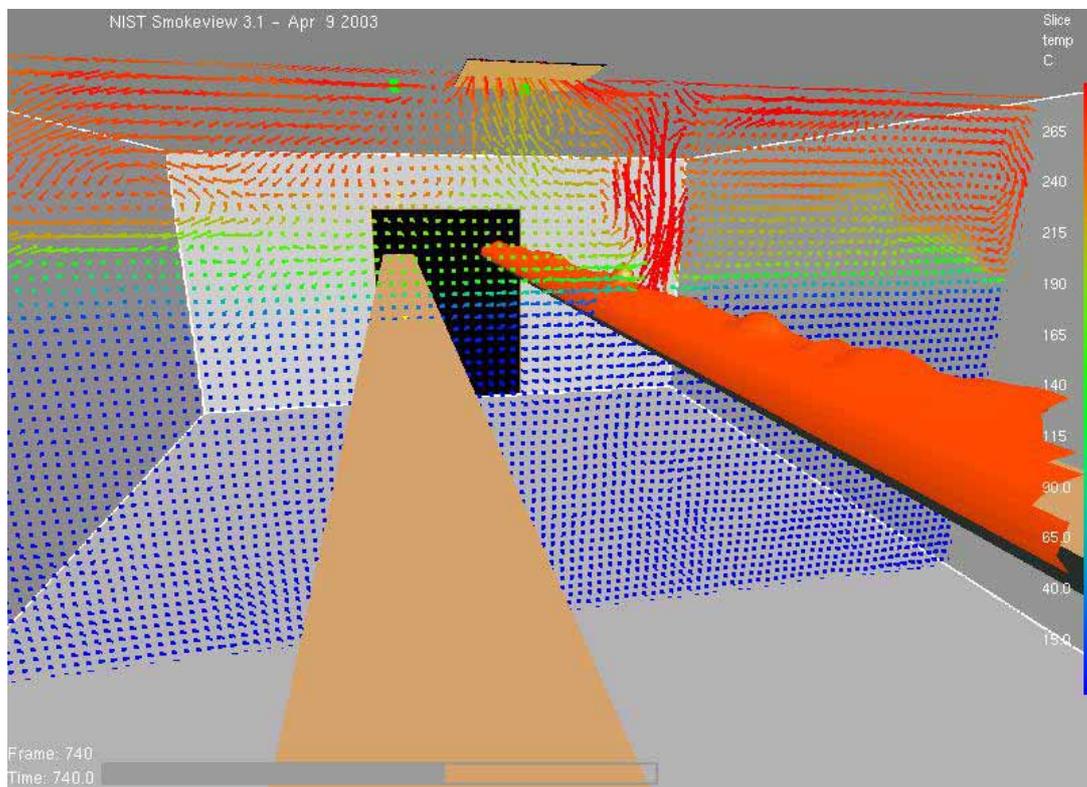


圖 4-8(h) case7 動作圖

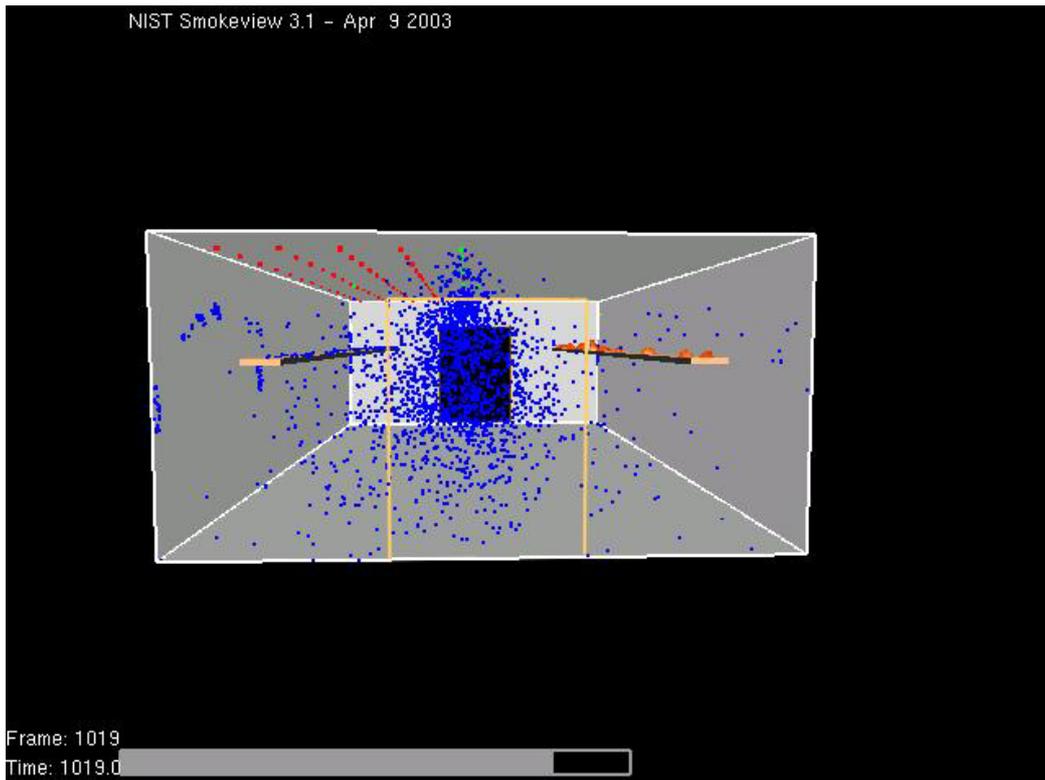


圖 4-8(i) case8 動作圖(撒水頭動作情形)

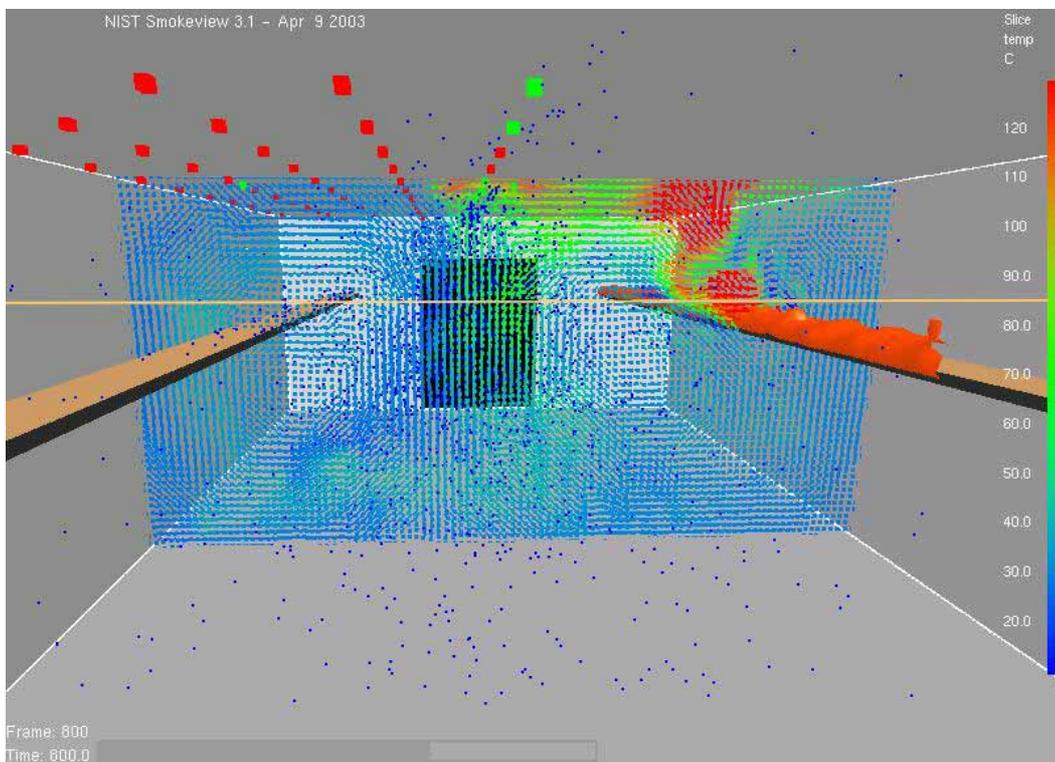


圖 4-8(j) case8 動作圖(切面正視)

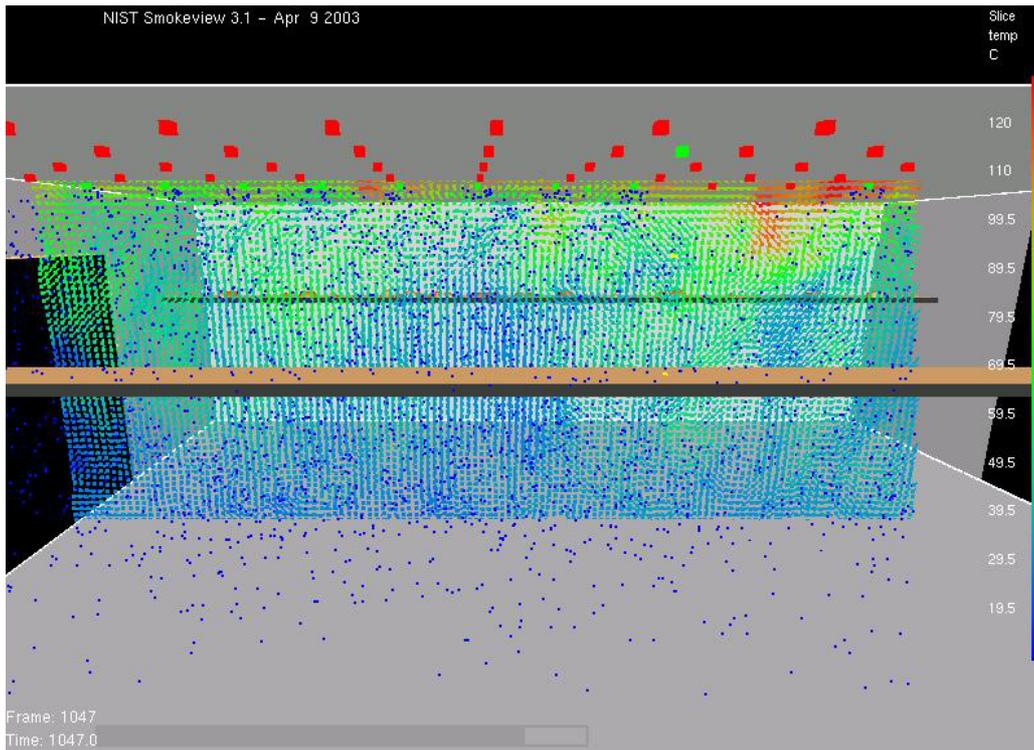


圖 4-8(k) case8 動作圖(切面側視)

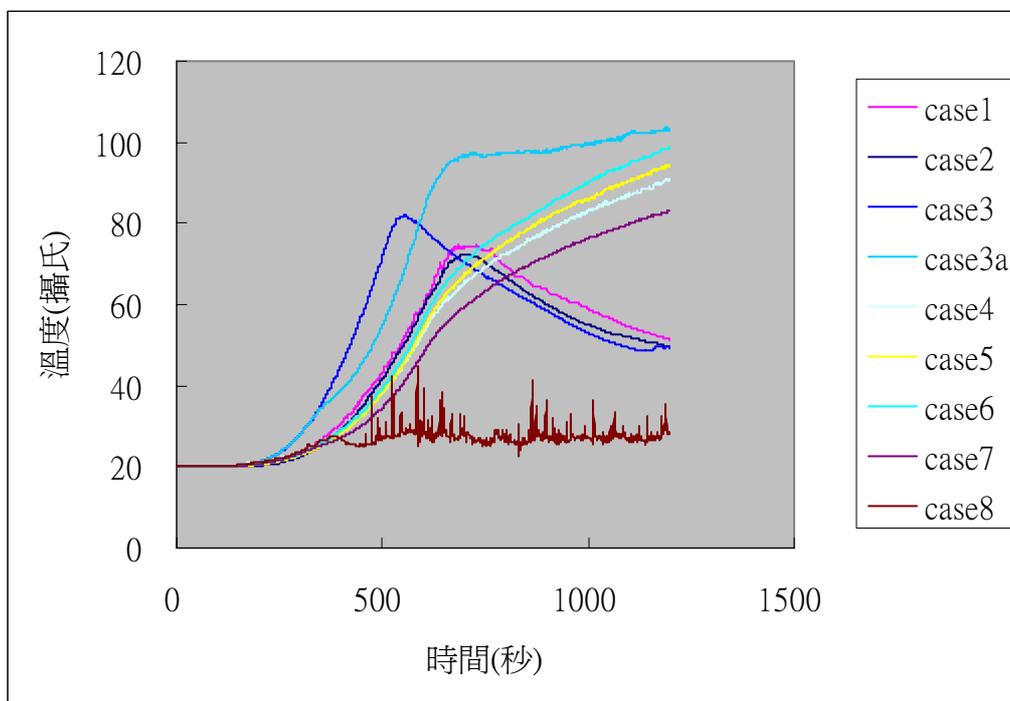


圖 4-9 受熱目標時間溫度變化比較圖

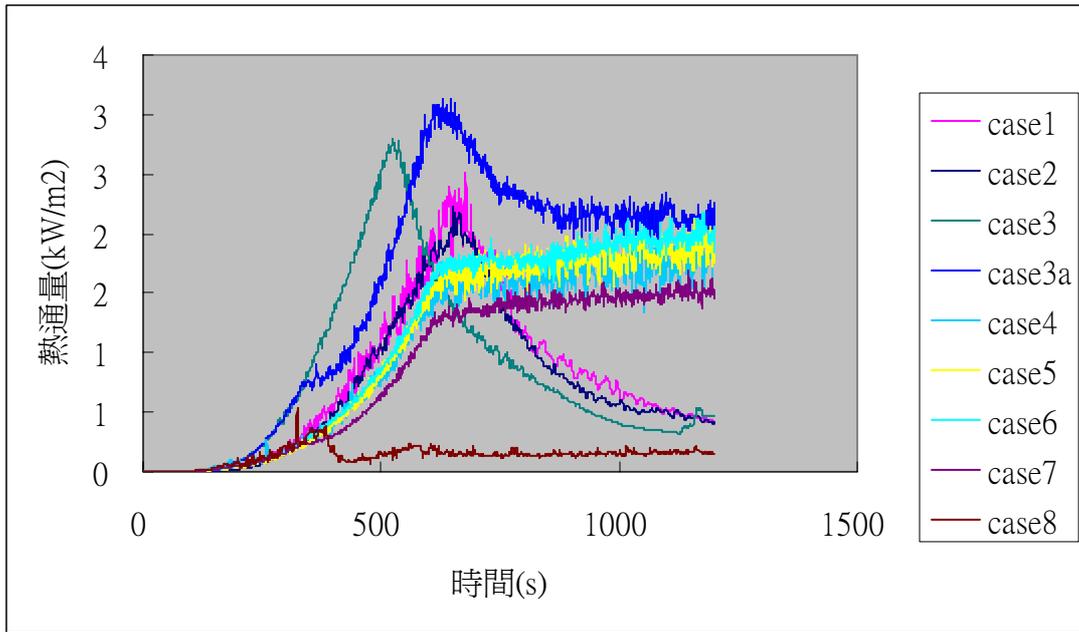


圖 4-10 熱通量隨時間變化比較圖

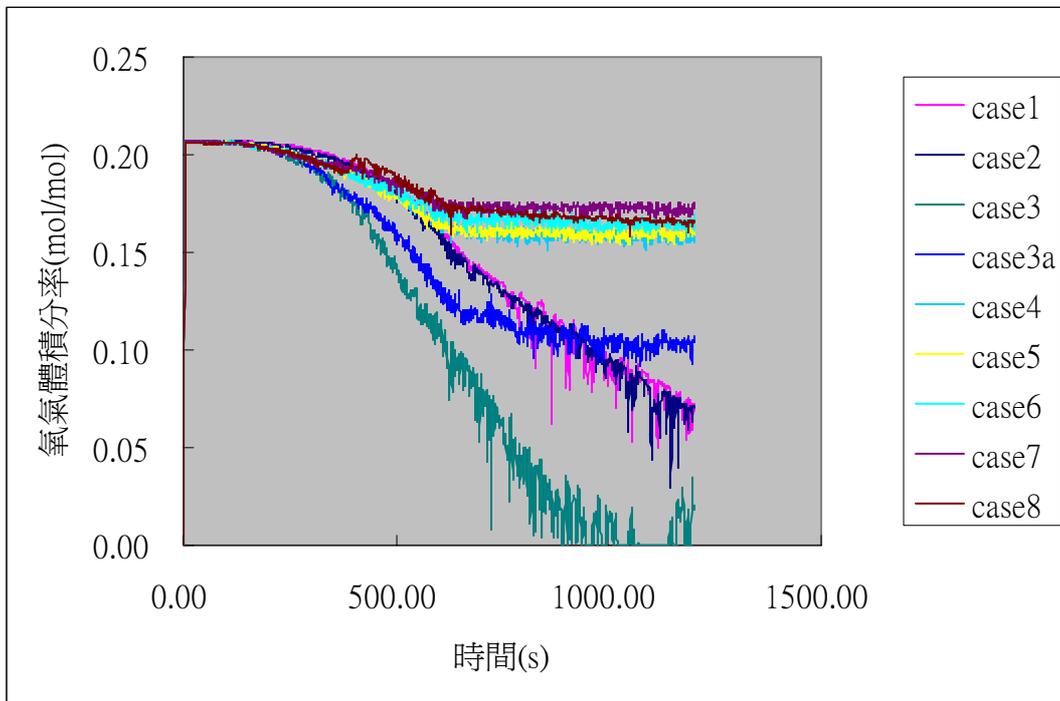


圖 4-11 氧氣量隨時間變化比較圖

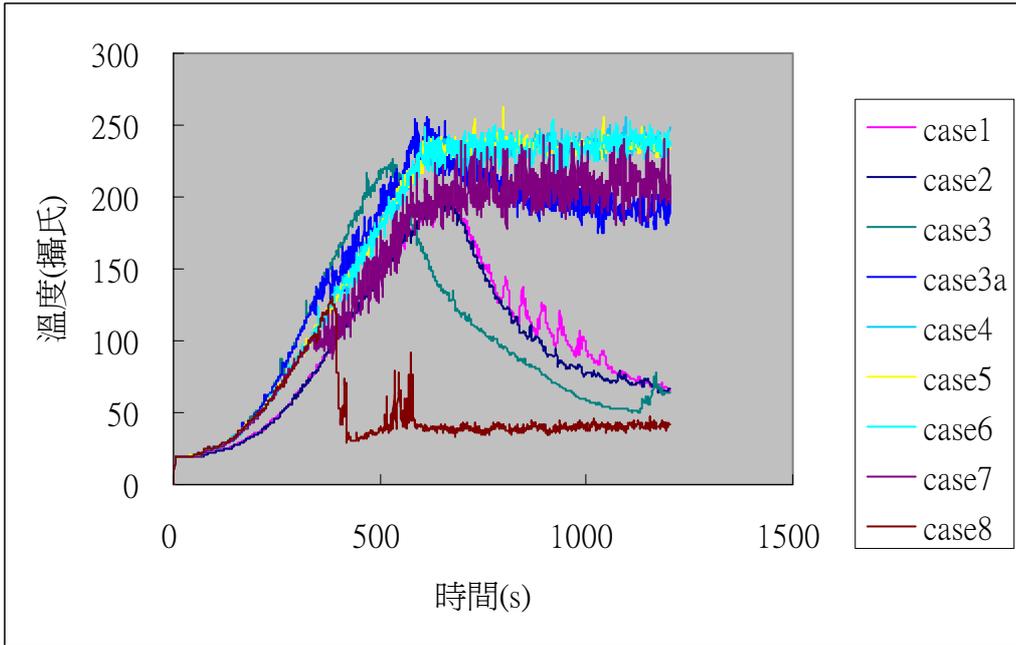


圖 4-12 熱空氣層溫度隨時間變化比較圖

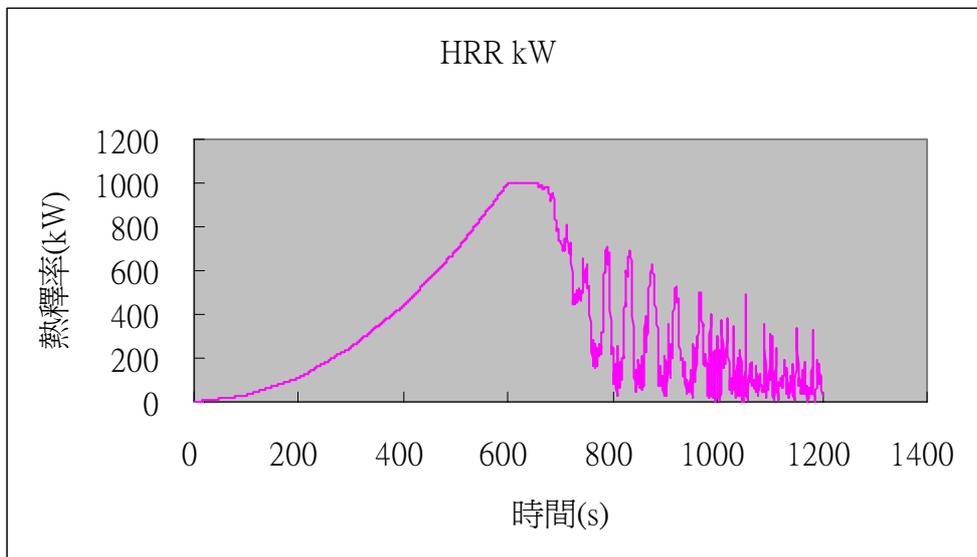


圖 4-13 case1 熱釋率變化圖

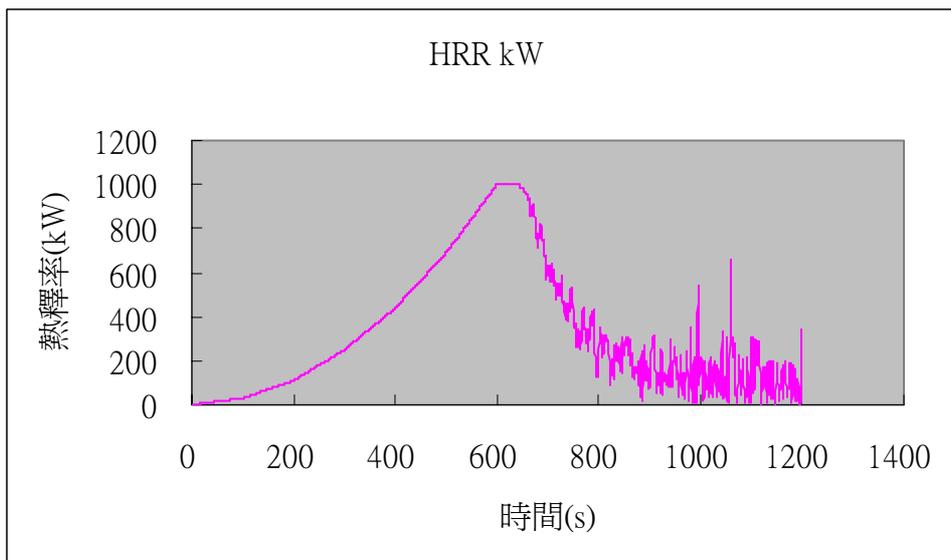


圖 4-14 case2 熱釋率變化圖

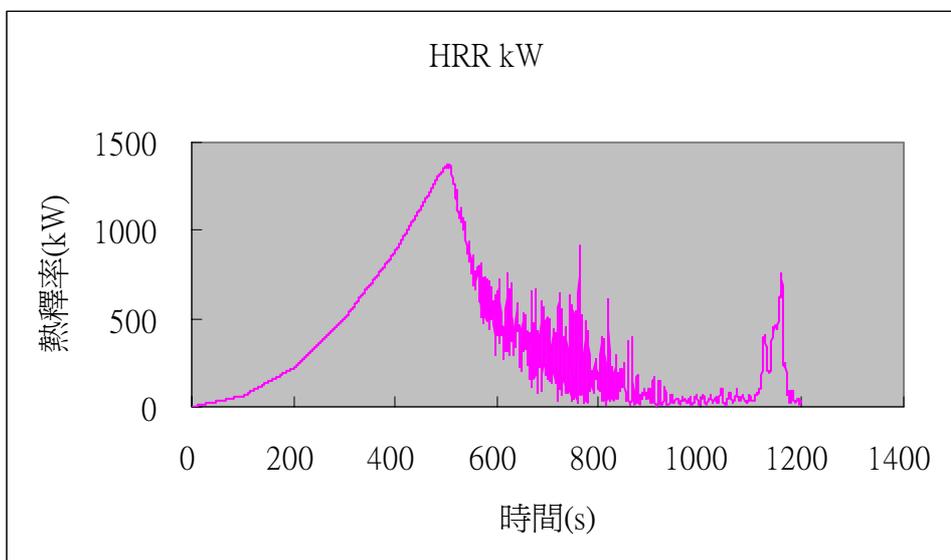


圖 4-15 case3 熱釋率變化圖

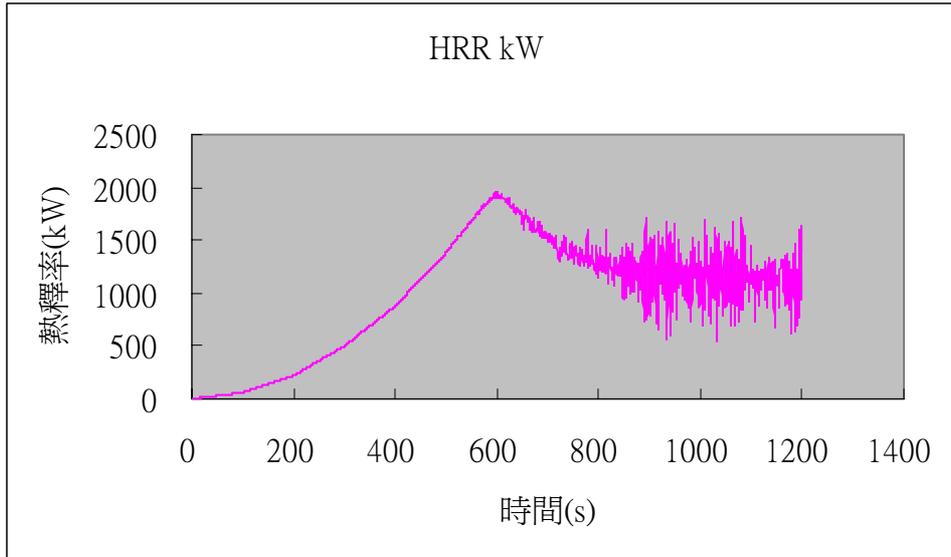


圖 4-16 case3a 熱釋率變化圖

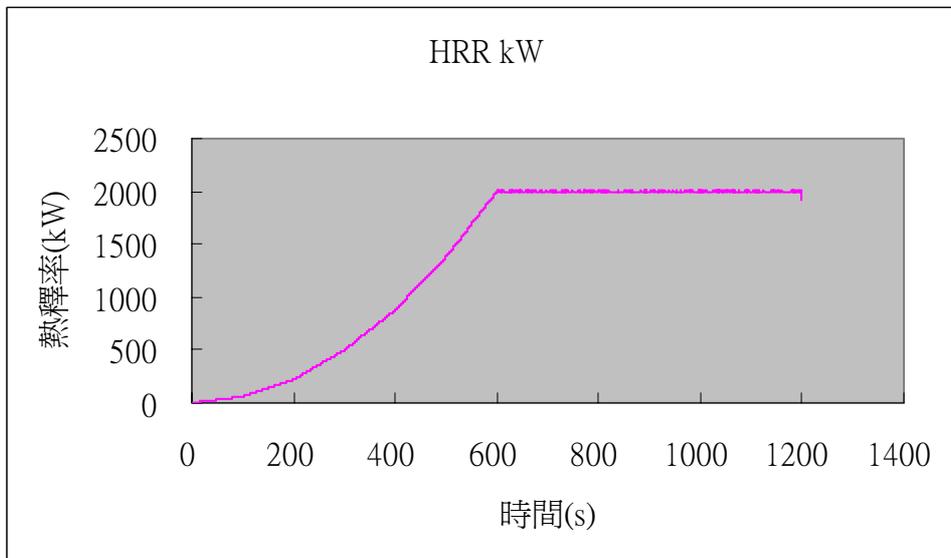


圖 4-17 case4 熱釋率變化圖

第五章 結論

台灣核電廠所適用的消防法規主要是根據一般的建築法規，這類法規在核電廠這種特殊空間的適用上有其困難。因此，台灣原子能委員會採取某些美國核管會的規定及指南，用以規定台灣核電廠消防防護計劃，例如，1974 年以前的 10 CFR 50 附錄 A(通用設計標)，1980 年的 10 CFR 50 Appendix R，NUREG-0800，RG 1.189(運轉中的消防防護計劃)及美國國家標準局(NIST)的 NFPA 805。

為了要達到消防法規的要求以取得核電廠的運轉執照，不止台灣，即使是美國的核電廠，都面臨相當大的問題。美國核能管理委員會(USNRC)揭櫫一套有關核能發電廠消防防護計劃的新式規定方針。這套被提議的規定允許核能發電領照者自發性地採用包含於美國國家標準局的一套消防防護需求—NFPA 805 “輕水式核能發電廠的性能式設計標準”。這套新的規定方針允許對 10CFR50 附錄 R 這套由美國核管會規定適用在既存核電廠所遵守的規定，減免其部分適用。

從國內外核電廠重大火災災例和核電廠火災統計資料的探討，分析核電廠之火災危害特性，找出核電廠之主要火災類型與其相關的火災情境；透過核電廠相關消防安全法規與標準，探討核電廠火災防護之理念以及核電廠性能式評估架構和方法，同時，針對常用於火災危害分析的火災模擬工具進行比較與探討，並基於核電廠電纜托網火災的特殊危害性，使用場模式火災模擬軟體 FDS 針對電纜托網火災進行性能式消防安全評估，並分別探討兩條電纜托網間不同距離、不同空間不同通風狀況、排煙設備以及自動撒水設備對所防護之電纜，亦即受熱目標可能產生的影響。

國外在累積了無數的經驗與教訓，經過長期的演進與不斷的投入研究，核電廠消防安全法規標準已逐漸完備，尤其是 NFPA 805 於 2001 年正式被核定為輕水式核能電廠消防安全標準，屬於性能式消防安全標準，不但明確指出核電廠應達到之性能基準，且對於工程分析方法、火災模擬技術、消防安全評估程序有明確的規範，並提供一套完整的核電廠消防安全設計方法，而透過本研究以上各章節的探討與模擬分析可知，應用 NFPA 805 於國內核電廠不但可使核電廠的消防安全評估工作更具有彈性，且可更進一步確保核電廠消防安全。

一旦決定以性能式方法替代條例式途徑，就需採用工程分析或電腦模擬計算法，以驗證其是否符合可接受的設計標準。本案為使用電腦模擬分析法評估核電廠電纜室的防火安全的實例運用，目前 FDS 這套軟體已逐漸為國內所接受，其不失為一適當評估工具。

但仍需搭配各種數據資料，建立國內核電廠專屬的火災資料庫，將國內核電廠大大小小的火災災例針對其發生原因、火災類型、危害特性甚至救災過程、核電廠內各種設備在火場中功能受損的極限值及對國內核電廠內火源特性進行實際燃燒實驗，各方面有系統的整理與分析，期能提昇國內的核電廠消防安全設計。

主要參考文獻

一、中文部分

1. 陳海曙，「建築防火安全設計學」，茂榮書局，1997年9月。
2. 中國大陸公安部上海消防科學研究所，「國外核電站消防隊伍技術資料選編」，1989年5月。
3. 范維澄，「火災科學導論」，湖北科學技術出版社，1991年3月。
4. 徐一量等，「火場模擬技術手冊」，財團法人工安衛技術發展中心，2001年12月。
5. 楊艷禾，「建築物火災避難安全性能評估方法之研究—以辦公大樓為例」，2002年6月，中央警察大學消防科學研究所碩士論文。
6. 核能研究所，「核設施之消防設計技術與應用研討會」，2003年10月。
7. 林文興，「核能電廠防火安全評估模式」，明志工專學報第十七期，民國七十四年。
8. 第三核能發電廠，「壓水式反應器系統介紹」，民國七十二年三月。
9. 第一核能發電廠，「沸水式核能電廠謝訓練教材」，民國八十四年十二月。
10. 台灣電力公司，台電核能月刊 242期，民國九十二年二月。
11. 曾偉文，「防火安全工程評估工具-燃燒動態模擬」，內政部消防署消防月刊，民國九十一年五月。
12. 柯建明，「大型車站建築之火災煙控系統設計與電腦模擬分析」，國立中大學機械與機電工程研究所碩士論文，民國九十二年六月。
13. 楊冠雄，「建築物防火之煙控設計分析」，國立中山大學機械工程研究所，1996年2月。

14. 翁寶山，「臺灣核能史話」，行政院原子能委員會編印，民國九十年八月。
15. 鄭智中，「流體力學導論」，全華科技圖書股份有限公司，民國八十年十二月。
16. 鍾基強等，「水系統火災控制技術之研究(I)-水系統效應對性能式煙控設計之研究與實驗驗證」，內政部建築研究所研究計劃報告，民國九十二年六月。
17. 黃德清，「消防模擬軟體之分析比較」，警專學報第三卷第三期，2003年6月。
18. 核能研究所，「台電／核研所核能發電技術發展方案－風險告知應用於核一廠火災分析與防火包覆評估期中報告」，民國九十年六月。
19. 林文興譯，「核能電廠的火警應變計劃」，臺電工程月刊第401期，民國七十一年一月。
20. 林文興譯，「核能電廠火災危險性及其可能造成的損失」，原子能委員會核能彙刊第二十四卷第一期，民國七十七年二月。
21. 林文興，「核能電廠柴油發電機火燒事故檢討」，台電核能月刊，民國七十四年三月。
22. 林子仁等，「從核能電廠安全度評估火災分析談起」，核研季刊第三十九期，2001年4月。
23. 張一岑，「防火與防爆」，揚智文化事業股份有限公司，1999年12月。
24. 陳弘毅，「火災學」，鼎茂圖書，民國八十七年五月。
25. 現代防災防火科技展望與應用國際研討會論文集，紐奧良文化事業股份有限公司，民國九十二年十二月。
26. 林木榮等，「性能式火災安全工程概述」，中央警察大學現代消防雜誌第八十八期，2000年3月。
27. 熊光華，「核子事故緊急應變體制之探討」，中央警察大學現代消防雜誌第八十八期，2000年3月。

28. 林振銘，「核能發電廠防火安全措施」，中央警察大學現代消防雜誌第四十九期，1990年1月。
29. 林文興，「核能電廠防火規定及災害防範」，中央警察大學現代消防雜誌第三十期，1984年12月。
30. 蔡尤溪等人，「大空間防煙性能模擬與現場實測基準之研究」，內政部建築研究所研究計畫，2003年3月。
31. 鍾基強等，水系統火場煙控機制之影響分析，核能研究所，2003年10月。
32. 煙控模擬軟體實務暨案例分析研討會書面資料，財團法人消防安全中心基金會，民國九十二年七月。
33. 顏世錫等，「建築物自動撒水設備檢測技術開發與應用」，中央警官學校，民國八十三年八月。
34. 陳弘毅，「消防學」，鼎茂圖書出版公司，民國八十五年。
35. 高樓防火避難與大空間煙控研討會論文集，內政部建築研究所，民國九十二年十一月。
36. 楊冠雄，「大空間建築自然煙控設計之全尺度實驗與驗證」，內政部建築研究所，民國九十二年三月。

二、英文部分

1. National Fire Protection Association, NFPA805, Performance-based Standard for Fire Protection for Light Water Reactor Electric Generating Plants, 2001 Edition.
2. National Fire Protection Association, NFPA 804, Standard for Fire Protection for Advanced Light Water Reactor Electric Generating Plants, 2001 Edition.
3. Nathan Siu, Fire Risk Assessment for Nuclear Power Plants, the SFPE Hand book of Fire Protection Engineering, National Fire Protection Association, 2002, p.5-214-5-226.

4. Dougal Drysdale, An Introduction to Fire Dynamics, Second Edition, University of Edingburgh, UK May, 1999.
5. Richard L.P Custer, Brian J. Meacham, Introduction to Performance-Based Fire Safety, June, 1997.
6. Evaluation of Fire Models for Nuclear Power Plant, Applications: Cable Tray Fires, compiled by Monideep K.Dey, U.S. Department of Commerce, National Institute of Standards and Technology, November 2002.
7. Fire Dynamics Simulator (Version 3)-User's Guide, November 2002.
8. Fire Dynamics Simulator (Version 3)-Technical Reference Guide, November 2002.
9. User's Guide for Smokeview Version 3.1-A Tool for Visualizing Fire Dynamics Simulation Data, November 2002.
10. Tewarson, A., Generation of Heat and Chemical Compounds in Fires, The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, third edition, 2002,p3-82 to p3-161.
11. Norman Thomson, Fire Hazard in Industry, Butterworth Heinemann, 2002.
12. Regulatory Guide 1.189-Fire Protection for Operating Nuclear Power Plants, U.S. Nuclear Regulatory Commission, April 2001.
13. 10 CFR 50.48, Appendix A and R, "Fire Protection for Light Water Reactors", Code of Federal regulations, U.S. NRC.
14. Willian D. Walton, Zone Computer Fire Models for Enclosures, The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, third edition, 2002, p3-189 to p3-193.
15. Geoff Cox and Suresh Kumar, Modeling Enclosure Fires Using CFD, The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, third edition, 2002, p3-194 to p3-218.
16. FIRE PROTECTION HANDBOOK, Nineteenth Edition, National

- Fire Protection Association, 2003.
17. Donald Hopkins, Jr. , Predicting The Ignition Time And Burning Rate Of Thermoplastics In The Cone Calorimeter , 1995 。
 18. Regulatory Guide 1.120-Fire Protection Guidelines for Nuclear Power Plants, U.S. Nuclear Regulatory Commission, November 1977.
 19. NUREG-0800, Standard Review Plan, U.S. Nuclear Regulatory Commission, July 1981.
 20. Howard R. Baum, Large Eddy Simulation of Fires, Fire Protection Engineering, 2000.
 21. Cheng-hsin Chang , Numerical Simulation of the Progress of Fire Smoke in Large Space, Building Atria, Department of Civil Engineering, Tamkang University, Taipei, Taiwan.
 22. A. H. Buchanan, Fire Engineering Design Guide, Centre for Advanced Engineering, 1994.

三、主要參考網站

1. <http://www.newnuclearhome.com> 美麗新世界-新核家園
2. <http://www.taipower.com.tw> 台灣電力公司
3. <http://vm.nthu.edu.tw/science/shows/nuclear> 核能知識網路展覽
4. <http://www.aec.gov.tw> 行政院原子能委員會
5. <http://www.iner.gov.tw> 核能研究所
6. <http://www.nrc.gov> 美國核能管制委員會
7. <http://www.nist.gov> 美國國家標準技術研究所

核能發電場審查導則草案

1.1

火災防護計畫

1.1.1

通則

核能電廠的火災防護計畫的內容需每二年被檢討一次，並且更新。例外，其他的檢討頻率是可被接受的，只要透過行政程序申請經主管機關同意。

1.2 管理政策方向和責任。

1.2.1

應準備一份用來定義主管單位、責任的政策文件及建立一份有關核能電廠火災防護計劃的一般性政策文件。

1.2.2

政策文件將賦予防火管理人在火災防護計畫有相關的權利和責任，並應包括解決衝突的相關權責。

政策文件將明確界定與其他機關的火災防護界面而且分配對協調活動的責任。

1.3 火災預防計畫

火災預防計畫應被建立及提供參考，其內容應包括下列各項：

- (1) 提供消防安全訊息給所有的從業員工及承包商，最少應包括核能電廠火災預防程序、火災報告、電廠緊急應變計畫、包括避難計畫等供相關人員參考。
- (2) 載明電廠監督機制，尤其是可能增加火災危害的相關設備的健檢。
- (3) 對於內部管理與臨時性可燃物的堆放需有一套正確的作業標準。
- (4) 可燃和易燃的氣體的管理程序需符合 NFPA 標準。
- (5) 起火來源的控制程序，如抽煙、焊接、切、磨的相關動作需依照 NFPA 51B 的相關規定。

- (6) 火災預防監督計劃（參照 NFPA 601）
- (7) 火災報告程序，包括調查需求及改善動作的需求。

1.4

火災危害分析

1.4.1

每個場所應載明火災危害分析，危害分析的內容如下所列：

- (1) 建築物的設計和儀器的放置位置，包括防火區劃和區劃邊界的防火等級。
- (2) 在每個防火子區劃內主要可燃物的存貨清單。
- (3) 火災防護設備的描述，包括警報系統和使用手冊、自動滅火系統。
- (4) 任何確保安全停機所必需之設備的描述，包括設備之間的電纜與管道等其他功能類似的位置。
- (5) 火災的情境分析，包括當火災防護設備失效時，火災對安全停機相關設備所造成的影響。
- (6) 假設在安裝自動滅火設備的情況下火災危害對生命安全、輻射外洩，電廠運轉和財產損失的潛在影響的分析。
- (7) 諸如地震、暴風雨和洪水這類災害對火災防護上所造成潛在影響的分析。
- (8) 其他非由火災所造成對安全停機潛在影響的分析，如機器故障或污染物外洩等問題。
- (9) 機器誤動作或中斷對核能安全相關的系統及裝置的防護影響分析。

1.5

程序

1.5.1

應建立一套和火災防護計畫相關的規範程序，其包括事項如下：

- (1) 檢驗，測試，維護，火災防護系統和設備，包含手動和自動，如偵測器及滅火系統。

- (2) 被動式火災防護系統(例如：防火牆、防火填塞)功能的檢驗、測試和維護。
- (3) 趨勢分析需求。
- (4) 區域進入的資格限制
- (5) 訓練需求

1.6

火災緊急應變計劃

1.6.1 應建立書面的火災緊急應變計劃，且至少需載明下列各項：

- (1) 火災時的緊急應變
- (2) 電廠內部的通報
- (3) 內部人員的避難
- (4) 安全、維護、運作等部門人員的協調
- (5) 滅火行動
- (6) 災後重建及污染物的控制
- (7) 緊急事件發生時控制室的運作
- (8) 失火對策
- (9) 緊急應變的組織或各個安全部門及消防隊、救災單位相關權責的協調

2.1

核電廠消防隊規定

2.1.1 一般

2.1.1.1

任何時間最少需有五個消防隊員待命且無其他指派之核電廠任務，否則可能阻礙火災或其他緊急狀況時之立即反應。

2.1.1.2

除了消防隊長之外至少還要有二名消防隊員，受過核電廠安全相關系統的訓練並擁有充份的相關知識，以了解火災及滅火藥劑對安全停機設備的影響。

2.1.1.3

在確認火災發生或滅火系統動作後消防隊應立刻被通知。

2.2

消防人員的資格及限制條件。

2.2.1

核電廠消防隊員應具備合格的體能以執行被指派之任務且應通過年度身體檢查以判定能否執行繁重的活動。

2.2.2

每個消防隊成員應符合如 NFPA 804 第 4.3 章所述的資格。

2.3

訓練和演習。

2.3.1

核電廠消防隊訓練

2.3.1.1

核電廠消防隊成員應接受 NFPA 600「工業消防隊標準」要求之訓練，或 NFPA 1500「消防單位職業安全 and 健康計畫標準」。

2.3.1.2

消防隊員每季應接受滅火訓練和演習且應有一份書面計畫詳述消防隊訓練程序。

2.3.1.3

書面記錄包括：每位成員之上課教室、親自參與的訓練、更新訓練、參加特別培訓學校、消防隊領導階層訓練。

2.3.2

演習

2.3.2.1

消防隊應舉行演習以測試消防隊反應，包括消防隊團隊效率、設備的正確操作、防火計畫的有效使用、與其他單位的合作。

2.3.2.2

消防隊演練應在核電廠各種不同的區域進行，特別是在火災危險評估

為核電廠運轉關鍵並且有可能發生火災危害之處。

2.3.2.3

演練記錄應被保存並詳述消防隊的演練情節、消防隊員反應和執行指派任務能力且在每次演練後應進行檢討。

2.4 滅火設備

2.4.1

核電廠消防隊應具有能夠充分執行所被分配工作的設備且應定時進行測試及維護，並保存書面記錄供檢閱。

2.5

互助協議(Off-Site Fire Department Interface)

2.5.1

核電廠防火管理人應和轄區消防分隊簽定互助協議，且應與轄區消防機關磋商訂定滅火及救援計畫。除此之外，當舉行年度演練時應邀請轄區消防隊參與，且核電廠應設置專門與消防隊聯繫之人員，在核電廠發生火災或其他的緊急事故負責與之聯繫。

2.5.2

特別場所訓練

2.5.2.1

轄區之消防人員應熟悉核電廠空間配置，且對進入火場之路徑(出入口被鎖住)應預先規畫並應接受放射性材料、輻射及危險材料處理之訓練。

2.6

排水

2.6.1

消防隊應具有足夠設備來協助處理水損區域之排水。

2.7 滅火通道

2.7.1

防火計劃應能標明，核電廠中那些區域因安全或輻射管制因素，被限制進入。應訂定相關規定以允許進入這些區域。如果需要的話，應由

安全及保健物理人員連同消防隊一起進入火場。安全及保健物理人員應和消防隊隊長協商決定進入輻射管制區域的最安全方法。

3.1. 控制室

3.1.1

控制室(含廚房,辦公室空間等)有火災危害區域應有獨立的防火區劃及至少三小時的防火時效.其他次要空間則至少裝置水系統自動滅火設備及至少一小時的防火時效區劃,通風系統必須裝設有自動偵煙式防火閘門,火災發生時能自動啟動關閉的動作。

3.1.2

手動滅火裝置應被裝置在下列場所:

- (1) 起火位置可能在儲藏櫃,控制板或其他相連電纜室
- (2) 有可能火源外露場所包括有可燃物的一般區劃內

3.1.3

控制室內應放置適當 Class A 及 Class C 的滅火器,消防水帶箱應被裝置在控制室外。

3.1.4

控制室外消防栓箱應提供和轄區消防單位相同的接頭,且要降低當執行滅火時電力的危害。

3.1.5

偵煙式探測器應裝置於控制室內及電訊組櫃,假如缺乏安全的自動停機裝置則必須將這兩部分區隔以降低危險。

3.1.6

控制室內呼吸面罩應隨時可取得

3.1.7

控制室內之外部進氣通風系統應裝置偵煙式探測器,並有手動隔離開關以防煙進入控制室內。

3.1.8

火災產生的煙應避免由一般通風系統進入控制室內。且通風系統的回風裝置應採獨立設計，操作員應能隨時關閉控制室內的通風系統。

3.1.9

所有的電線迴路最終連入控制室內，不應有線路穿越控制室至別的空間，地面下線路或天花板上線路均依消防安全法規標準所規範。

3.1.10

空調系統通道應與線路管道相區隔，(如電線迴路設於地面下，則通風氣體管線便不應設於同樣空間內)，若必須設於天花板上或地面下空間，且超過 1 平方英尺(0.09 平方公尺)交叉區域，則必須設置自動滅火設備，若線路在 4 in(101.6-mm)或較小的鋼製線圈時亦須設置自動滅火設備。

3.2

防火門符合 NFPA 252 防火性能測試的標準，而且安裝程序亦符合 NFPA 80 內的相關規定。

3.3

手提式滅火器

3.3.1

手提式及輪形式滅火器應依 NFPA 10 手提式滅火器標準、安裝、檢查保養及維修。

例外：滅火器安放處會影響消防活動或有核能安全相關影響，此時滅火器應依 NFPA10 考量放置高輻射區外。

3.3

火警探測器

3.3.1 自動火警探測器安裝及選擇應依根據以下考量：

- (1) NFPA72 火警警報法規
- (2) 設計參數應依照廠區火災危害分析
- (3) 標準上其他要求

3.4

警報系統

3.4.1

火災訊號系統應依據火災危害分析在全廠房每一區均需設置。相關要求可參閱 NFPA72 警報設備法規。

3.4.2

訊號系統的裝置及迴路必須提供火災時探測器，警報器，流水警報等故障時緊急狀況使用。

3.4.3

火警訊號裝置連動滅火系統必須提供視覺及聽覺的顯示，地區警鈴應被裝置，其他建築物火警警報訊息應能傳遞置中控室內。

3.4.4

聲響式的訊號裝置應具有特別聲響，且在環境有其他雜音干擾時亦能聽見。

3.4.5

廠房中控室或保全中心人員應受完整的火災訊號反應程序訓練，其訓練應包含如何定位起火處及操作滅火系統。

3.5.6

火災訊號系統及啟動裝置應連接不斷電系統，並依據 NFPA72 火警警報法規，整體外圍環境周圍都應併入防護範圍。

3.4.7

應依火災危害評估分析裝置手動警報箱，手動開關或釋壓裝置必須清楚標示，外圍的線路應有自動滅火設備防護。

4.1

纜線分佈室

4.1.1

纜線分佈室應裝置水系統滅火設備，撒水設備及噴撒頭應考量線路的安全防止造成纜線的火災危害，自動撒水設備放水密度應設計 0.30gpm/ft^2 (12.2L/min)，在最遠 2500 平方英尺 (232.2 平方公尺)。

4.1.2

滅火設備應以一區劃防護為設計目的，避免延燒至相鄰的其他空間，水量必須經過水力學計算以符合最大防護區域的放水量。

4.1.3

纜線分佈室應符合以下各項規定：

- (1) 至少有兩處獨立進出口可供消防人員進入
- (2) 兩處線圈盒相鄰走道至少保持 3 英尺(0.9 公尺)寬 8 英尺(24 公尺)高。
- (3) 水帶箱及適當滅火器應設於纜線分布室之門外可立即取得之處。
- (4) 區域型偵煙

4.2

纜線通道

4.2.1

纜線必須有防水的功能即使撒水設備動作亦不影響電力運作

4.3

超過 50ft(15.2m)纜線通道應符合下列要求：

- (1) 至少有兩處獨立進出口可供消防人員進入。
- (2) 兩處線圈盒相鄰走道至少保持 3 英尺(0.9 公尺)寬 8 英尺(24 公尺)高。
- (3) 水帶箱及適當滅火器應設於門外可立即取得之處。

4.3.1

探測系統

4.3.1.1

纜線通道應設置偵煙探測器

4.3.1.2

自動火警探測器安裝及選擇應依根據以下考量：

- (1) NFPA72 火警警報法規
- (2) 設計參數應依照廠區火災危害分析

(3) 其他需求

4.4

滅火系統

4.4.1

纜線通道應設置自動滅火系統，自動撒水設備設計放水量應達到 $0.3\text{gpm}/\text{ft}^2$ 最遠長度為 100 英尺最大面積為 2500 平方英尺。

4.4.2

撒水系統的最大放水量應能防護相連空間之最大區域範圍，且須透過水力計算求得流量值。

4.4.2.1 水源容量規定

- (1) 消防水源計算必須以能持續供應兩小時的最大流量為標準，但不少於 300,000 加侖(1,135,500 升)。手動消防栓管線加上最大撒水量設計或固定式水系統，依據 NFPA13 撒水系統安裝標準，或 NFPA15 消防水系統安裝標準，其流率為 500gpm(每分鐘 1892.5 升)。消防水系統供應必須能達到水力學上設計值。
- (2) 應架設兩個百分之 100 系統容量水槽(每一個最小有 300,000 加侖，<1,135,500 升>)，其中至少一水槽應與消防幫浦相連以執行取水。若有一處失效或故障不能造成兩處均無法使用，水槽設計應符合 NFPA22 消防水槽設計標準。
- (3) 水槽不能使用未經處理源頭的水

4.4.2.2

消防幫浦

- (1) 消防幫浦應符合 NFPA20 固定式消防幫浦安裝標準，且應能自動啟動。
- (2) 假設最大幫浦失效情況下，消防幫浦應仍能供應 100percent 的流率容量。
- (4) 獨立消防幫浦線路必須區分，每一個幫浦啟動裝置及控制裝置必須以防火區劃分隔不同空間且最少有三小時防火時效。幫浦柴油燃料亦須隔離以防增加起火危險。

- (5) 消防幫浦的獨立性應由自動壓力消防安全系統維護。
- (6) 監督信號及可視指示器應依 NFPA20 規定設於控制室內

4.5

纜線垂直豎井及豎板(riser)

4.5.1

纜線盤長度每 20ft(6.1m)應裝設防火區隔，垂直高度為每 30ft(9.1m)應設置一處，長度每 40ft(12.2m)高度每 20ft(6.1m)要設置一進出口，自動撒水設備及偵煙探測器應設於垂直天花板管道間。

5.1

廠區電腦及通訊室

應符合 NFPA75 防護電訊資料室設備標準要求。

5.1.1

電路開關室及中繼設備室

5.1.2

應設偵煙式探測器並可連動至控制室，所有電纜線進入電路開關室應有安全防護，且該空間不能作為其他用途使用，滅火器及水帶消防栓箱應設置隨時可取得之處。

5.1.3

設備應設置於便利消防搶救之處所，且應設置排水道及排煙裝置。

5.2

火警探測器

5.2.1

自動火警探測器安裝及選擇應依根據以下考量：

- (1) NFPA72 火警警報法規
- (2) 設計參數應依照廠區火災危害分析
- (3) 其他需求

5.3

手提式滅火器

5.3.1

手提式及輪形式滅火器應依 NFPA 10 手提式滅火器標準、安裝、檢查保養及維修。

例外：滅火器安放處會影響消防活動或有核能安全相關影響，此時滅火器應依 NFPA10 考量放置高輻射區外。

6.1

電力室(battery room)

6.1.1

電力室必須設置通風系統，內部氫氣的含量不超過總體積的 2%，一但高於標準則警報系統動作。

6.1.2

與安全相關的電力室必須防範火勢波及，應具有 1 小時以上防火時效之區劃，直流電路開關室及中繼設備室應配置於電力室內，並設有探測器、滅火器、水帶消及防栓箱應設置在方便取得之處所。

6.1.3

火警探測器自動火警探測器安裝及選擇應依根據以下考量：

- (1) NFPA72 火警警報法規
- (2) 設計參數應依照廠區火災危害分析
- (3) 其他需求

6.2

手提式滅火器

6.2.1

手提式及輪形式滅火器應依 NFPA 10 手提式滅火器標準、安裝、檢查保養及維修。

例外滅火器安放處會影響消防活動或有核能安全相關影響，此時滅火器應依 NFPA10 考量放置高輻射區外。

7.1

汽機廠房

7.1.1

汽機廠房必須與其他建築物區隔，防火區劃之防火時效最少 3 小時，防火區劃隔間必須穩固不能輕易倒塌，開口部及貫穿口必須設置防火閘門防護，依據 NFPA 804 第 6.4.3 章的規定裝設煙熱的排放裝置。例外：不需要在煙熱的排放裝置系統上設置自動撒水設備。

7.1.2

汽機操作層下方空間

7.1.2.1

所有汽機操作層下方空間必須裝置自動撒水設備或泡沫系統，超過 5000ft² 空間，最小放水密度須達到 0.3gpm/ft² 且管線部份的死角必須列入考量。

8.1.2.2

依據 NFPA 16 泡沫撒水設備標準設計有關泡沫型自動撒水設備。

7.1.2.3

該區域內的電力迴路應為封閉迴路，應將水損降至最低。

7.2

汽機組件

7.2.1

應裝置固定式的自動滅火設備，依據 NFPA 15 固定式撒水系統標準設計最小放水密度 0.30gpm/ft²。

7.2.2

汽機組件意外遭受水損可能性應被列入考量，假如有必要應置於金屬防護盒或箱內。

7.2.3

位於汽機上層的潤滑油管路應裝置自動撒水設備，防護易堆積油的區域包括汽機的護裙，且最小放水密度為 0.30gpm/ft²。

7.2.4

依據 NFPA 804 第 8.8.2.1 章的規定防護，添加潤滑油集油箱的撒水

設備防護必須能涵蓋整個區域。

7.2.5

假設未使用垂直抽取式通風系統，則必須裝設自動滅火系統防護；若裝設通風系統，則使用預動作式撒水系統放水密度為 $0.30\text{gpm}/\text{ft}^2$ 。

7.2.6

乾淨或污穢的油儲槽應依火災風險評估設計防護，設計者應參閱第 NFPA 804 第 6 章的規定，裝設自動滅火系統及通風設備等裝置。

7.2.7

火警探測器

自動火警探測器安裝及選擇應依根據以下考量：

- (1) NFPA72 火警警報法規
- (2) 設計參數應依照廠區火災危害分析
- (3) 標準上其他要求

7.2.8

自動撒水設備

7.2.8.1

水源容量規定

- (1) 消防水源計算必須以能持續供應兩小時的最大流量為標準，但不少於 300,000 加侖(1,135,500 升)。手動消防栓管線加上最大撒水量設計或固定式水系統，依據 NFPA13 撒水系統安裝標準，或 NFPA15 消防水系統安裝標準，其流率為 500gpm(每分鐘 1892.5 升)。消防水系統供應必須能達到水力學上設計值。
- (2) 應架設兩個百分之 100 系統容量水槽(每一個最小有 300,000 加侖，<1,135,500 升>)，其中至少一水槽應與消防幫浦相連以執行取水。若有一處失效或故障不能造成兩處均無法使用，水槽設計應符合 NFPA22 消防水槽設計標準。
- (3) 水槽不能使用未經處理源頭的水

7.2.8.2

消防幫浦

- (2) 消防幫浦應符合 NFPA20 固定式消防幫浦安裝標準，且應能自動啟動。
- (2) 假設最大幫浦失效情況下，消防幫浦應仍能供應 100percent 的流率容量。
- (7) 獨立消防幫浦線路必須區分，每一個幫浦啟動裝置及控制裝置必須以防火區劃分隔不同空間且最少有三小時防火時效。幫浦柴油燃料亦須隔離以防增加起火危險。
- (8) 消防幫浦的獨立性應由自動壓力消防安全系統維護。
- (9) 監督信號及可視指示器應依 NFPA20 規定設於控制室內

滅火系統

7.2.8.3

纜線通道應設置自動滅火系統，自動撒水設備設計放水量應達到 $0.3\text{gpm}/\text{ft}^2$ 最遠長度為 100 英尺最大面積為 2500 平方英尺。

7.2.8.4

撒水系統的最大放水量應能防護相連空間之最大區域範圍，且須透過水力計算求得流量值。