

撒水系統動作下火災逃生安全隨機性評估

Stochastic Evaluation of Fire Evacuation Risk under the Operation of Automatic Sprinkler System

柯博仁*、林元祥、吳榮平**

Bor-Ren Ke、Yuan-Shang Lin、Zong-Ping Wu

摘要

本研究旨在評估居室火災撒水系統動作下人員之避難安全。首先研提「撒水系統動作評估模式」；其次建構「避難容許時間評估模式」與「避難所需時間評估模式」後，結合為「火災逃生危險評估模式」；最後，整合撒水系統動作與火災逃生危險兩評估模式，建構「隨機型避難安全評估模式」，評估撒水系統動作下火災避難安全。其中「避難容許時間評估模式」考量煙層溫度、能見度、一氧化碳濃度、碳氧血紅蛋白濃度、輻射熱通量等五項火災危險評估因子。

隨機型避難安全評估模式建構完成後，界定模式中重要參數及機率分配，結合電腦程式輔以蒙地卡羅模擬方法，產生參數之隨機亂數值，進行多次模擬，以估計避難人員面臨一項以上致命情境導致避難失敗的機率值。本研究係以一商場中面積 200m^2 之居室為主體，分別就設置一般反應型撒水頭及快速反應型撒水頭等條件作為樣本，分別進行模擬，以利分析比較撒水快慢（不同 RTI 值）下，人員避難失敗機率值之變化情形，進而探討五項評估因子對該機率值之影響程度。

模擬結果顯示，火災致命因子以能見度下降最易導致避難失敗。本研究建構之撒水系統動作評估模式可有效評估撒水系統可靠度；另快速反應型撒水頭較一般反應型撒水頭，更能降低避難失敗機率。

關鍵字：撒水系統動作評估模式，火災逃生危險評估模式、蒙地卡羅模擬、撒水系統可靠度、功能函數、能見度

* 中央警察大學消防科學研究所畢業，現任職於高雄市政府消防局。

** 林元祥：美國杜克大學土木與環境工程博士，現任中央警察大學防災所教授（通訊作者 Email：YL4@mail.cpu.edu.tw）；吳榮平：國立台北大學都市計劃研究所都市與區域規劃博士，現任中央警察大學防災所副教授。本文為行政院科技部補助研究(計劃編號為 MOST 105-2410-H-015-009 -)之一部份，在此特表感謝。

Abstract

This research attempts to evaluate the evacuation safety in the sprinkled room in case of fires. This research firstly develops the Assessment Model of Sprinkler Operation, assesses models of available safe egress time (ASET), and the required safe egress time (RSET) are used to develop the Assessment Model of Evacuation Safety. Finally, the Stochastic Assessment Model of Evacuation Safety is proposed by coordinating the Assessment Model of Sprinkler Operation Model and the Assessment Model of Evacuation Safety in order to evaluate the evacuation safety. The model of available safe egress time includes five evaluation factors: namely smoke temperature, visibility, carbon monoxide concentration, carboxyhemoglobin concentration, and radiation heat flux.

As the Stochastic Assessment Model of Evacuation Safety has been proposed, the important parameters and the related probability distributions are assumed. Random numbers of parameters are generated by Monte Carlo simulation and computer program. After several simulations, the failure probability of egress due to any one of untenable conditions is estimated. A room with 200 square meters in the commercial premises is taken as an example. Two sets of samples with the standard response sprinkler and with the fast response sprinkler are designed for model simulations. The failure probabilities in the room with different RTI of sprinkler systems are discussed and compared. The impacts of five evaluation factors on failure probabilities are also examined.

In summary, among evaluation factors visibility reduction is the main determinant of causing egress failure. The Assessment Model of Sprinkler Operation in this study can effectively assess the reliabilities of sprinkler systems. Simulation results show that installation of the fast response sprinkler can reduce more failure probabilities of egress than the standard response sprinkler.

Key words : Assessment Model of Sprinkler Operation, Assessment Model of Evacuation Safety, stochastic assessment model, Monte Carlo simulation, sprinkler reliability, performance function, visibility.

壹、前言

一般而言，電腦模擬火災人員避難安全方法，可分為決定型模式與機率型模式兩種，其中決定型模式以相關的物理及化學定律為基礎，使用數學方程式運算並模擬區劃空間內火災過程，並不考慮機率的問題（鄭志強，1998）；機率型模式則泛指涉有機率運算的評估模式，如：利用相關數據或火災統計資料進行基本假

設及分析，或將決定型模式參數隨機化，以預測區劃空間內火災發生或逃生的危險。在考量建築物內部配置複雜多變，無法詳細調查且確定內部配置特性，在未獲得所有參數值情況下，決定性模式模擬結果會產生諸多的不確定性；另一方面，國內研究人員避難安全領域中，以隨機型模式評估人員避難安全之研究較為少見，故筆者考慮使用隨機性模式以改善決定性模式，預測居室火災避難安全，克服決定型模式不確定的問題。

再者，自動撒水系統對火災時人員避難的影響情形又如何？美國防火協會統計 1980~2006 年美國官方建築物火災數據 (Hall, 2009)，指出 88% 的溼式自動撒水系統啟動 1~2 個撒水頭即可有效控制火勢，因此設置自動撒水系統除了可降低直接財務損失 45~60% 外，也能降低建築物火災死亡率近 80%，此乃由於自動撒水提供避難之有利環境，提供內部人員更多避難疏散時間。可知自動撒水系統可有效控制損失，故筆者嘗試評估自動撒水系統動作結合避難之模式。

一旦建築物發生火災，所產生之濃煙、高溫及熱輻射皆為影響人員避難的危險因素，本研究嘗試以火災容忍極限值中之煙層溫度、能見度、一氧化碳濃度、碳氧血紅蛋白濃度及輻射熱通量等 5 項為人員避難評估因子。本研究以五項達致命情境之屆臨時間 (T_{cj} , $j=1\sim5$) 及避難所需時間 (RSET) 相競合，以評估人員是否面臨致命情境，並將自動撒水系統動作情形加入避難評估，建立隨機型避難模式評估撒水系統動作下人員之避難安全。

基於上述體認，觸發筆者進行隨機型居室火災避難安全評估之研究，具體而言，透過以「簡易二層驗證技術手冊」為基礎建構火災成長模式，計算避難容許時間；以「建築物防火避難安全性能驗證法」為基礎建構避難人員行為模式，計算避難所需時間；兩者時間（避難容許時間、避難所需時間）相互競合決定人員之逃生危險；最後再與自動撒水系統動作結合，建構系統性的避難評估模式。

本文之結構如下：第一單元為前言；第二單元簡要回顧相關文獻；第三單元研提評估模式；第四單元為研究模擬實施過程；結果與討論列於第五單元；最後第六單元為結論與建議。

貳、文獻回顧

一、撒水系統可靠度

Bukowski 等人 (1999) 藉由統計文獻中之撒水頭數據，探討撒水系統動作可靠度，將系統可靠度區分為動作可靠度及性能可靠度兩類。

(一) 動作可靠度 (operational reliability) 包含了兩個主要的觀念，在未發生火災

時誤動作的失敗性安全 (failed-safe)；及發生火災時未動作，或動作後未有效控制或撲滅火勢的失敗性危險 (failed-dangerous)。

(二) 性能可靠度 (performance reliability) 指撒水系統滅火性能達設計目標之機率，可藉由實際火災案件或全尺寸結果進行分析。

Budnick (2001) 定義撒水系統可靠度為撒水系統在指定的時間內，如設計預期般動作的機率，自消防設備檢查中，撒水系統測試及原廠維修數據取得撒水系統中不同部位構件可靠度數據，例如：幫浦、管線、自動警報逆止閥等，整合上述之數據，採用實驗性研究搭配故障樹分析法 (Fault Tree Analysis)，評估撒水系統動作可靠度。

Frank 等人 (2012) 統計紐西蘭消防單位 (New Zealand Fire Service, NZFS)、美國防火協會等數據，將數據區分為可靠度 (reliability)、功效 (efficacy) 及效能 (effective)，其中「可靠度」指當火勢發展至一定程度時，撒水系統是否動作；「功效」為撒水系統動作可否有效撲滅或控制火勢；「效能」則為撒水頭是否可靠的動作並達其功效，將上述數據輔以蒙地卡羅模擬，估計撒水系統可靠度、功效及效能及服從之機率分配，並比較紐西蘭及美國數據兩者之區別，研究結果顯示撒水系統可靠度及效能分配服從常態或對數常態分配，而功效分配服從常態分配，相關平均數、標準差如表 2-1-1。

表 2-1-1 紐西蘭與美國撒水系統可靠度、功效及效能比較表

統計值 數據 來源	可靠度		功效		效能	
	平均數	標準差	平均數	標準差	平均數	標準差
NZFS	95%	1.6%	90%	4.7%	86%	4.6%
NFPA	92%		97%		91%	

二、居室避難安全評估與避難所需時間

現今對於避難安全評估多以量化分析避難逃生所需時間作為指標，以評估建築物人員之避難安全。Marchant (1976) 將避難逃生時間細分為偵測火災的時間、對火災做反應的時間、開始採取避難行動的時間、抵達安全地點的時間，其中對火災做反應的時間和開始採取避難行動的時間合計稱為避難準備時間，將上述四階段時間加總之避難時間與避難容許時間進行比較，以判斷建築物內人員能否安

全完成避難；若人員避難所需時間小於避難容許時間，則內部人員安全避難，反之，則代表內部人員是危險的，而日本建築中心及英國建築防火安全工程規定亦以此觀點驗證建築物的避難設計。

台灣目前的建築物防火避難設計可分為 Route A(規格式)、Route B(替代式)及 Route C(性能式)，其中 Route B 及 Route C 皆以避難所需時間及避難容許時間的概念進行驗證。Route B 為採建築物防火避難安全性能驗證法，驗證人員避難所需時間與煙層下降時間的關係，且依驗證對象不同，區分為居室避難安全驗證、樓層避難安全驗證、整棟避難安全驗證，其中樓層或整棟避難驗證，必須前一階段驗證經確認安全後，才可進行下一階段之驗證，其將避難所需時間區分為三個部分，避難開始時間、步行時間、通過出口所需時間(陳建忠、簡賢文，2014)。

本文以居室環境達人體容忍極限之時間取代避難容許時間，而避難所需時間參考建築物防火避難安全性能驗證法(Route B)，將居室人員避難時間分為避難開始時間、到達出口之步行時間、通過出口所需時間三階段，並以該驗證法計算居室人員避難時間。

三、火災情境容忍極限

居室火災情境容忍極限(達致命危險)時間可謂為避難容許時間，考量火煙溫度增加對人體呼吸系統及皮膚造成傷害、煙層粒子造成人員可視能力下降導致避難困難、及一氧化碳為火煙致昏迷氣體中對人體危害性較高者且阻礙氧氣的吸收，導致人員昏迷無法避難等影響(即為人體火災容忍極限)。本文參考美、英及紐西蘭等國以科學為基礎的避難安全工程設計所設定之建築安全設計之目標基準(火災避難評估因子)後，採煙層溫度、能見度、輻射熱通量、一氧化碳濃度及碳氧血紅蛋白濃度等五項作為評估因子，詳細容忍極限值如表 2-3-1。下一節模式建構也將補充評估火災容忍極限因子的數學式及人體可承受的時間。

表 2-3-1 本研究評估極限值

評估因子	煙層溫度 ($^{\circ}\text{C}$)	能見度 (m)	一氧化碳 (ppm)	熱通量 (kW/m^2)	碳氧血紅蛋白 (%)
容忍極限值	200	5	1400	2.5	30
參考來源	BS 7974 與 SFPE Handbook	BS 7974 與 SFPE Handbook	SFPE Handbook	BS 7974 與 SFPE Handbook	SFPE Handbook

參、評估模式之建構

一般工程的可靠度設計 (reliability-based design) 可視為供給 (supply) 與需求 (demand) 的問題，以傳統的設計而言，系統、結構或組件是否能滿足實際使用需求，取決於系統設計可承受之強度是否大於使用時所遭受的最大作用力；換言之，即供給是否多過於需求。然而，實務上影響設計或使用條件的因素相當複雜多樣且時常無法確定或準確定量，因此將「系統設計是否合乎實際使用需求」以機率的方式呈現，是可靠度設計常見的方式。本文也將此供給與需求觀點運用於撒水系統動作及火災逃生危險評估的建模。本節有關模式之建構，分別依撒水系統動作評估模式與火災逃生危險評估模式 (含避難所需時間、避難容許時間) 加以說明。

一、撒水系統動作評估模式

(一) 撒水系統動作不確定性

撒水頭動作時間，雖可用天花板噴射流溫度、撒水頭動作額定溫度及反應時間指數加以推估，然實際火災中，火勢達一定程度，天花板噴射流足以啟動撒水頭時，撒水頭仍可能因各種不同因素而未動作。因此，運用可靠度工程設計中供給與需求的觀點，比較實際及理論的撒水系統動作時之各項參數機率分配，作為評估撒水頭是否動作之依據，為一可行的方法。經比較影響撒水頭動作之溫度、火源熱釋率等因子，本文考量結合可靠度設計評估方式，需找尋評估因子 (參數) 服從的適當機率分配，本研究選擇以撒水頭動作之火源熱釋率為評估因子。

Alpert (1972) 指出當假設撒水頭僅在天花板熱流最高溫度大於撒水頭

額定動作溫度時才動作的前提下，提出撒水頭動作時之最小火源熱釋率可由天花板噴射流溫度及流速公式推導，將原天花板噴射流氣體最高溫度改以撒水頭額定動作溫度 (T_{act}) 代入，以式 (3-1-1) 表示：

$$Q_{min} = 0.08R[(T_{act} - T_{\infty})H]^{3/2} \dots\dots\dots (3-1-1)$$

Q_{min} ：撒水頭動作之最小火源熱釋率 (kW)，
 T_{∞} ：室溫 (K)。

Tanaka (1991) 以撒水頭動作之溫度上限做為評估火勢最大熱釋率的基準，其以 Alpert 提出之公式 (式 3-1-2) 進行些微修正，以撒水頭動作溫度 T_{act} 加上邊際溫度 (margin temperature, dT) 導出動作之最大火源熱釋率 (Q_{max})，以式 (3-1-2) 表示。

$$Q_{max} = 0.08R[(T_{act} - T_{\infty} + dT)H]^{3/2} \dots\dots\dots (3-1-2)$$

Q_{max} ：撒水頭動作之火源最大熱釋率 (kW)，
 dT ：撒水頭動作之邊際溫度 (K)，
 T_{act} 、 T_{∞} ：同式 (3-1-1) 所定義。

NFPA13 撒水系統規定中，以溫度上、下限方式規定撒水頭測試動作溫度，而本國密閉式撒水頭認可基準中，規定撒水頭測試動作值亦以額定動作溫度之 95% 為下限，115% 為上限；因此，本研究參考 Tanaka (1991) 提出以動作溫度加上邊際溫度之概念，以撒水頭動作溫度之上、下限代入 Alpert 公式 (式 3-1-1) 中 T_{act} ，可導出撒水動作之火源熱釋率上、下限。惟獲得火源熱釋率之範圍，仍未知火源熱釋率數值服從之機率分配，如假設適用三角型機率分配，因無法得知最易動作之火源熱釋率為何，因此恐欠周延；如假設適用均勻分配則較適合。因此，假定理論撒水頭動作之熱釋率服從參數為 Q_{min}, Q_{max} 之均勻分配，其機率密度函數可表示如式 (3-1-3)。

$$f(y) = \frac{1}{Q_{max} - Q_{min}} \dots\dots\dots (3-1-3)$$

Frank (2011) 研究密閉溼式撒水頭動作時間及動作之火源熱釋率之不確定性，在兩種居室火災情境下測試撒水頭動作情形，其中情境一為於居室空間內進行實際撒水頭動作試驗；而情境二採用與情境一相同之空間參數，使用 BRANZFIRE 軟體結合蒙地卡羅法模擬；比較兩種情境下撒水頭動作時間及動作之火源熱釋率。結果顯示不管是實際試驗 (情境一) 或蒙地卡羅法模擬 (情境二) 之撒水頭動作時間及動作之火源熱釋率皆服從對數常態分配，其中情境二動作之火源熱釋率服從平均數為 5.29 (kW) 及標準差為 0.60 (kW) 的對數常態分配。本研究參考 Frank 情境二之研究結果，

假設真實火災中，實際撒水頭動作之熱釋率服從對數常態分配 $\ln X \sim N(\lambda, \xi^2)$ ，其機率密度函數如式 (3-1-4) 所示：

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\xi x} e^{-(\ln x - \lambda)^2 / 2\xi^2} \dots\dots\dots (3-1-4)$$

(二) 撒水系統動作可靠度評估模式

參考工程系統可靠度問題中供給及需求的設計，以隨機變數 X 代表供給量， Y 代表需求量，則機率 $P(X > Y)$ 代表工程系統成功操作的機率，反之， $P(X < Y)$ 代表系統失敗的機率，而 $X - Y$ 即為工程系統的功能函數 (performance function) (Ang and Tang, 1984)。爰此，本文嘗試以實際撒水頭動作之熱釋率 Q_R 代表供給 (X)，理論撒水頭動作之熱釋率 Q_T 代表需求 (Y)，撒水頭成功動作條件為實際撒水動作熱釋率大於理論撒水動作熱釋率，則撒水系統動作的功能函數為 $G_S = Q_R - Q_T$ ，而將撒水系統可靠度定義為功能函數成功操作的機率，並針對 Q_R 與 Q_T 進行下列假設：

1. 實際撒水頭動作之熱釋率 Q_R ，服從以 λ_R 為平均數， ξ_R 為標準差的對數常態分配。
2. 理論撒水頭動作之熱釋率 Q_T 服從 $[Q_{min}, Q_{max}]$ 間的均勻分配。
3. Q_R 與 Q_T 為相互獨立的隨機變數。

撒水系統動作失敗機率可以功能函數 $Q_R - Q_T < 0$ 的機率表示 (式 3-1-5)：

$$p_{sf} = p(Q_R - Q_T < 0) \dots\dots\dots (3-1-5)$$

第一個假設係依學者對撒水頭動作研究結果所做的合理假設，第二個假設的基礎，則參考 NFPA 13 對撒水頭動作溫度的規定 (NFPA 13, 2019)，並結合 Alpert 半公式及 Tanaka 之概念而建立 (Alpert, 1972; Tanaka, 1991)，但因目前尚無適當描述撒水頭動作時火源熱釋率之機率分配。因此，假設其服從均勻分配是合理近似的假設，如果有新的調查研究發現其他更適合的分配，那麼預測撒水頭動作之準確性即可透過應用更適當的機率分配加以改善。

式 (3-1-5) 以實際撒水頭動作之火源熱釋率 Q_R 及理論撒水頭動作之火源熱釋率 Q_T 兩者建立的功能函數 $Q_R - Q_T$ 進行評估，當功能函數小於零為撒水系統未依設計動作的情況；相反的，功能函數大於零代表撒水系統依設計動作，其機率 $(1 - p_{sf})$ 即代表撒水系統動作的可靠度。

二、避難所需時間評估模式

避難人員行為模式目的在估算人員避難所需時間，本研究參考本國建築物防火避難安全性能驗證法，將人員偵測火災的時間和對火災做反應的時間合併為避難開始時間，避難所需時間分為人員避難開始時間 t_{start} 、步行至居室出口之時間 t_{travel} 、通過居室出口所需時間 t_{queue} 等三個時間階段，分述如下：

(一) 人員避難開始時間

人員避難開始時間，為發生火災到居室內人員偵知火災並對做出反應開使避難行動的時間，本研究假設居室內有 K 位人員，第 k 位人員的避難開始時間為 $t_{start,k}$ ，可寫成式 (3-2-1)：

$$t_{start,k} = t_{detection,k} + t_{response,k} \dots\dots\dots (3-2-1)$$

$t_{start,k}$ ：第 k 位人員的避難開始時間 (sec)，

$t_{detection,k}$ ：第 k 位人員偵知火災時間 (sec)，

$t_{response,k}$ ：第 k 位人員反應時間 (sec)。

(二) 人員步行至居室出口之時間

人員步行時間可透過所需步行距離與步行速度計算，因此，人員步行至居室出口之時間 (t_{travel}) 可利用式 (3-2-2) 計算：

$$t_{travel,k} = \frac{l_k}{v_k} \dots\dots\dots (3-2-2)$$

$t_{travel,k}$ ：第 k 位人員步行至居室出口之時間 (sec)，

l_k ：第 k 位人員從起始所在位置到達居室出口之步行距離 (m)，

v_k ：第 k 位人員之步行速度 (m/s)。

(三) 通過居室出口所需時間

當人員避難到達居室出口時，受限於居室避難人員多寡、居室出口之有效寬度及人員通過出口的流動情形三者之影響，會有滯留的情形，因此人員通過居室出口所需時間 (t_{queue})，可寫成式 (3-2-3) 計算 (陳建忠等，2014)：

$$t_{queue,k} = \frac{f(k)}{N_{eff}B_{eff}} \dots\dots\dots (3-2-3)$$

$t_{queue,k}$ ：第 k 位人員通過居室出口所需時間 (sec)，

$f(j)$ ：第 j 位人員抵達居室出口時，所需等待的人數 (人)， $j=1,2,\dots,K$ ，

N_{eff} ：有效流動係數 (人/sec.m)，

B_{eff} ：有效出口寬度 (m)。

通過居室出口的有效流動係數 (N_{eff}) 部分，本研究單純考慮人員避難離開居室之情況，因此不考慮人員依序離開居室後，面臨走廊、樓梯等

不同避難路徑收容能力，導致人員滯留於居室出口的情形。針對有效流動係數值部份，模擬軟體 Simulex 對於人員平面之有效流動係數值為 1.4 (人/sec.m)；另 Fahy (2008) 研究結果指出，避難人員在走廊、通道及出口處的有效流動係數為 1.30(人/sec.m)；為保守計，本研究參考 Fathy 研究結果，有效流動係數訂為 1.3(人/sec.m)。再者，居室出口的有效出口寬度(B_{eff})部分，因本研究考慮火勢限於起火居室內的情況，且起火點並非於居室出口附近，假設火勢不會延燒至出口附近導致出口無法避難情形，故以居室出口寬度作為居室出口的有效出口寬度。

綜上，第 k 位居室人員自火災開始至離開居室之避難所需時間 ($T_{e,k}$) 可以式 (3-2-4) 表示：

$$T_{e,k} = t_{start,k} + t_{travel,k} + t_{queue,k} \dots\dots\dots (3-2-4)$$

$T_{e,k}$ ：第 k 位人員避難所需時間 (sec)。

三、避難容許時間 (致命情境屆臨時間) 評估模式

居室火災情境容忍極限 (達致命危險) 時間可謂為避難容許時間，一旦發生火災，會伴隨熱、煙、毒性氣體生成及氧濃度降低，當煙層高度、煙層溫度、輻通量、毒性氣體等超過人體可負荷或能見度而影響人類避難時，人員將無法自力避難 (即為人體火災容忍極限)。本研究針對煙層溫度、能見度、輻射熱通量、及一氧化碳濃度等評估因子之人體容忍極限值及相關數學式進行探討，藉由火災成長相關文獻回顧，估算煙層溫度、能見度、一氧化碳濃度、碳氧血紅蛋白濃度、輻射熱通量等五項評估因子之經驗公式及其人體容忍極限值；估計不同評估因子到達容忍極限值之時間，即為致命情境屆臨時間或避難容許時間。本文將五類致命情境屆臨時間記為 T_{cj} , $j=1,2,3,4,5$ ，各類致命情境屆臨時間述如下。

(一) 煙層溫度達人體容忍極限值之屆臨時間

煙層溫度可以式 (3-3-1) 表示 (何明錦、陳俊勳，2007)：

$$T_{s,t} = T_0 + \frac{1}{C_p \rho_{s,t} Z_{s,t} A} \sum_0^t (\dot{Q}_t - \dot{Q}_c) \dots\dots\dots (3-3-1)$$

$T_{s,t}$ ：第 t 秒煙層溫度 (K)

C_p ：空氣定壓比熱 (kJ/kg.K)，

$\rho_{s,t}$ ：第 t 秒煙層密度 (kg/m^3)，

$Z_{s,t}$ ：第 t 秒煙層厚度 (m)，

\dot{Q}_t ：第 t 秒火源熱釋率 (kW)， \dot{Q}_c ：牆壁熱損失。

煙層溫度 200°C 為人體容忍極限值，本研究假設居室人員面臨此情境即

無法繼續避難，因此，當式 (3-3-1) 推導之煙層溫度 $T_{s,t} \geq 473\text{K}$ ，其時之時間 t 即為第 k 位人員面臨第一類致命情境之時間 (T_{c1})。

(二) 能見度達人體容忍極限值之屆臨時間

本研究能見度之計算，係結合 Jin (1978) 及 Mulholland (2002) 經驗式所推導之能見度公式 (式 3-3-2)：

$$S_{k,t} = \frac{8 \times V}{2.3 \times \Delta M_t \times D_m} \dots\dots\dots (3-3-2)$$

$S_{k,t}$ ：第 k 位人員於第 t 秒的能見度 (m)，

V ：居室體積 (m^3)，

ΔM_t ：第 t 秒可燃物已燃燒質量 (kg)，

D_m ：單位質量光學密度 (OD/m)。

單位質量光學密度 (D_m) 隨可燃物改變，可燃物已燃燒質量為隨時間改變之變數，假設可燃物燃燒熱及燃燒效率為定值，火源燃熱率受時間及撒水系統動作影響，以火源熱釋率、燃燒效率及可燃物之燃燒率推導已燃燒質量，如式 (3-3-3)：

$$\Delta M_t = \sum_0^t m_{f,t} = \sum_0^t \frac{\dot{Q}_t}{\chi \Delta H_c} \dots\dots\dots (3-3-3)$$

$m_{f,t}$ ：單位時間燃料消耗質量 (g)，

\dot{Q}_t ：第 t 秒火源熱釋率 (kW)，

χ ：燃燒效率，

ΔH_c ：燃燒熱 (kJ/g)。

當居室能見度 $S_{k,t} < 5\text{m}$ 之時間 t ，即為第 k 位人員面臨第二類致命情境之屆臨時間 (T_{c2})。

(三) 一氧化碳濃度達人體容忍極限值之屆臨時間

本研究假設居室火災為有焰燃燒，且通風良好提供足夠空氣，未有悶燒之情形；另考量煙層下降，一氧化碳質量分率 (Y_{CO}) 隨之增加，採用 Milke (2002) 公式 (式 3-3-4)，以可燃物之一氧化碳生成率及燃燒狀況推導一氧化碳濃度質量分率。

$$\begin{aligned} ppmCO_{k,t} &= \frac{M_{air}}{M_{co}} \times Y_{CO,t} \times 10^6 \\ &= \frac{M_{air}}{M_{co}} \times \frac{f_{co} Q_t}{\rho_{s,t} \chi \Delta H_c A (H - Z_{s,t})} \times 10^6 \dots\dots\dots (3-3-4) \end{aligned}$$

$ppmCO_{k,t}$ ：第 k 位人員於第 t 秒的煙層一氧化碳濃度 (ppm)，

M_{air} ：空氣分子量 (kg/kmol)，

M_{co} ：一氧化碳分子量 (kg/kmol)，

$Y_{CO,t}$ ：至第 t 秒一氧化碳質量分率 (kg_{CO}/kg_{smoke})，

f_{CO} ：一氧化碳生成率(每公斤可燃物產生之一氧化碳質量 kg_{CO}/kg_{fuel})

Q_t ：至第 t 秒可燃物已釋放之熱量 (kJ)，

$\rho_{s,t}$ ：第 t 秒煙層密度 (kg/m^3)，

χ ：燃燒效率，

ΔH_c ：燃燒熱 (kJ/kg)，

A ：居室樓地板面積 (m^2)，

H ：天花板高度 (m)，

$Z_{s,t}$ ：第 t 秒煙層厚度 (m)。

煙層一氧化碳濃度 $ppmCO_{k,t} \geq 1400ppm$ 之時間 t ，即為第 k 位人員面臨第三類致命情境之屆臨時間 (T_{C3})。

(四) 碳氧血紅蛋白濃度達人體容忍極限值之屆臨時間

一氧化碳進入體內會與血紅蛋白結合成碳氧血紅蛋白，碳氧血紅蛋白濃度亦可評估避難人員之意識狀態，採用 Stewart 公式 (式 3-3-5) (Purser, 1989)，由環境一氧化碳濃度計算碳氧血紅蛋白濃度，考慮呼吸量 (RMV) 受二氧化碳濃度影響，因此需加乘二氧化碳乘數因子 (V_{CO_2})，其中二氧化碳濃度 ($ppmCO_{2,k,t}$) 以一氧化碳濃度計算式(式 3-3-6)推導。

$$\%COHb_{k,t} = 3.317 \times 10^{-5} \times ppmCO_{k,t}^{1.036} \times RMV_k \times t \times V_{CO_2,t} \dots\dots (3-3-5)$$

$$V_{CO_2,t} = \frac{\exp(0.1903 \times ppmCO_{2,k,t} + 2.004)}{7.1}$$

$$ppmCO_{2,k,t} = \frac{M_{air}}{M_{CO}} \times \frac{f_{CO_2} Q_t}{\rho_{s,t} \chi \Delta H_c A (H - Z_{s,t})} \times 10^6 \dots\dots\dots (3-3-6)$$

$\%COHb_{k,t}$ ：第 k 位人員於第 t 秒的碳氧血紅蛋白濃度 (ppm)，

$ppmCO_{k,t}$ ：第 k 位人員於第 t 秒的煙層一氧化碳濃度 (ppm)，

$ppmCO_{2,k,t}$ ：第 k 位人員於第 t 秒的煙層二氧化碳濃度 (ppm)，

$V_{CO_2,t}$ ：第 t 秒二氧化碳乘數因子，

RMV：每分鐘呼吸量 (L/min)，

t ：暴露的時間 (min)，

餘參數同式 (3-3-4)。

一旦血液中碳氧血紅蛋白濃度 $\%COHb_{k,t} \geq 30\%$ 之時間 t 即為第 k 位人員面臨第四類致命情境之屆臨時間 (T_{C4})。

(五) 輻射熱通量達人體容忍極限值之屆臨時間

本研究假設人體所受輻射熱源為起火源，因此，人體所受輻射熱通量受人員所在居室位置影響，假設空間為一矩形居室，居室樓地板面積為 A (m^2)，火源位於居室中心，將居室俯面圖假想為平面座標，火源位置以座標 $\left[\frac{\sqrt{A}}{2}, \frac{\sqrt{A}}{2}\right]$ 表示，居室內有 K 位人員均勻分散居室內，模擬初始人員位置均勻分散於 $[0,0]$ 到 $[\sqrt{A}, \sqrt{A}]$ 間任一點，第 k 位人員所在居室位置以 $[x_k, y_k]$ 表示；另為利運算，假設人員避難方向僅以沿居室牆壁步行（即為沿平行 X 軸及 Y 軸方向步行），不以斜線方向行進，因此，模擬初始第 k 位人員與火源之距離可以式 (3-3-7) 表示，隨著時間改變，人員位置 $[x_{k,t}, y_{k,t}]$ 依人員移動速度改變，但需遵守沿平行 X 軸及 Y 軸方向行進。

$$R_k = \sqrt{\left(x_k - \frac{\sqrt{A}}{2}\right)^2 + \left(y_k - \frac{\sqrt{A}}{2}\right)^2} \dots\dots\dots (3-3-7)$$

採用 Drysdale (2011) 公式，計算第 k 位人員於模擬初始受火源輻射熱通量，每位人員不同時間所受火源輻射熱通量，則以不同時間點第 k 位人員之 $[x_{k,t}, y_{k,t}]$ 代入計算。

$$\dot{q}_{r,k,t}'' = \frac{\dot{Q}_r}{4\pi R_k^2} = \frac{\chi_r \dot{Q}}{4\pi R_k^2} = \frac{\chi_r \dot{Q}}{4\pi \left[\left(x_{k,t} - \frac{\sqrt{A}}{2}\right)^2 + \left(y_{k,t} - \frac{\sqrt{A}}{2}\right)^2\right]} \dots\dots\dots (3-3-7)$$

\dot{Q}_r ：火源輻射熱釋率 (kW)，

R_k ：第 k 位人員至火源中心之水平距離 (m)，

χ_r ：輻射熱釋率占火源熱釋率比例， \dot{Q} ：火源熱釋率 (kW)。

一旦人體受火源輻射熱通量 $\dot{q}_{r,k,t}'' \geq 2.5$ (kW/m^2) 之時間 t 即為第 k 位人員面臨第五類致命情境之屆臨時間 (T_{c5})。

四、逃生危險評估模式與避難失敗機率評估

(一) 逃生危險評估模式

至於逃生成功與否，以人員避難逃生時間與避難容許時間建立逃生危險評估模式，避難容許時間為火災中居室人員面臨致命情境之時間，依人類火災容忍極限值中之煙層溫度、能見度、一氧化碳濃度、碳氧血紅蛋白濃度及輻射熱通量等 5 項，為 5 類火災致命情境，將人員面臨火災致命情境之時間與人員離開居室之避難所需時間相互競合，評估人員逃生危險。

逃生危險評估模式參考工程可靠度設計概念，以居室環境達任一火災致命情境之時間 (T_{cj}) 視為供給，其中 j 分別表示 5 類火災致命情境；復以第 k 位人員避難所需時間 ($T_{e,k}$) 視為需求，而逃生危險評估模式的功能函數 G_j 以式 (3-4-1) 表示。因此，當功能函數 $T_{cj} - T_{e,k} > 0$ 代表第 k 位人員成

功避難，反之，功能函數 $T_{cj} - T_{e,k} < 0$ 代表第 k 位人員避難失敗，

$$G_j = T_{cj} - T_{e,k} \quad j = 1 \sim 5 \dots\dots\dots (3-4-1)$$

其中

G_1 ：人員是否面臨第一類火災致命情境（煙層溫度達容忍極限值）之功能函數，

G_2 ：人員是否面臨第二類火災致命情境（能見度達容忍極限值）之功能函數，

G_3 ：人員是否面臨第三類火災致命情境（一氧化碳濃度達容忍極限值）之功能函數，

G_4 ：人員是否面臨第四類火災致命情境（碳氧血紅蛋白濃度達容忍極限值）之功能函數，

G_5 ：人員是否面臨第五類火災致命情境（輻射熱通量達容忍極限值）之功能函數，

T_{c1} ：第一類火災致命情境屆臨時間（煙層溫度達容忍極限值 437K 之時間），

T_{c2} ：第二類火災致命情境屆臨時間（能見度達容忍極限值 5m 之時間），

T_{c3} ：第三類火災致命情境屆臨時間（一氧化碳濃度達容忍極限值 1400ppm 之時間），

T_{c4} ：第四類火災致命情境屆臨時間（碳氧血紅蛋白濃度達容忍極限值 30% 之時間），

T_{c5} ：第五類火災致命情境屆臨時間（輻射熱通量達容忍極限值 2.5 kW/m^2 之時間），

$T_{e,k}$ ：第 k 位人員避難所需時間。

當 5 個功能函數有任一小於零時，代表著人員面臨第 j 種火災致命情境導致避難失敗，透過重複模擬，可以估算面臨第 j 種火災致命情境避難失敗之機率為式 (3-4-2)，

$$p_{ef,j} = p(G_j < 0) \dots\dots\dots (3-4-2)$$

由功能函數 G_j 數值可判斷人員面臨各種火災致命情境時避難成功或失敗，而實際上，人員只要於避難時面臨到任一火災致命情境，即代表避難失敗，且功能函數 G_j 僅判斷單一人員避難成功與否，另火災致命情境之時間 T_{cj} 及人員避難所需時間 $T_{e,k}$ 的計算，以本節所述公式為基礎，並將公式內部份參數以隨機數值代入，模擬居室內人員的逃生情形，可進一步獲得人員避難失敗機率。因此，單一人員逃生危險評估方程式，只要面臨任一功能函數小於零即代表避難失敗，而面對 5 類可能致命的情境，其逃生失敗之

機率，可以式 (3-4-3) 表示：

$$p_{ef} = \bigcup_{j=1}^5 p(G_j < 0)$$

$$= p(G_1 < 0 \text{ or } G_2 < 0 \text{ or } G_3 < 0 \text{ or } G_4 < 0 \text{ or } G_5 < 0) \dots\dots\dots (3-4-3)$$

(二) 避難失敗機率

假設居室發生火災，內部有 k 位人員進行避難，模擬結果有 n 位人員因面臨火災致命情境導致避難失敗，則式(3-4-3)之人員避難失敗機率 p_{ef} 亦可以式 (3-4-4) 表示：

$$p_{ef} = \frac{k}{n} \dots\dots\dots (3-4-4)$$

從功能函數 G_j 模擬之成敗結果（大於 0 或小於 0），可統計面臨第 j 種火災致命情境導致避難失敗之次數，假設因面臨第 j 種火災致命情境導致避難失敗的人員有 q 位人員，可知避難失敗人員中因面臨第 j 種火災致命情境之機率 $p_{ef,j}$ 為式 (3-4-5)：

$$p_{ef,j} = \frac{q}{n} \dots\dots\dots (3-4-5)$$

上述為單次模擬的結果，本研究以蒙地卡羅方法重複 M 次模擬，產生一組隨機樣本，每次的模擬結果可視為隨機變數，其樣本平均數即為平均人員避難失敗機率，而另一個重要的參數，隨機樣本之變異數

當重複多次模擬，可假設隨機樣本近似於常態分配，以隨機樣本之平均數及變異數，作為母體平均數 (μ_p) 及變異數 (σ_p^2) 之估計值，而在 95 % 的信賴水準下，人員避難失敗機率 p_{ef} 之信賴區間可寫成 $\mu_p \pm 1.96\sigma_p$ 。

五、小結

居室火災避難安全隨機型評估模式之建構，係結合撒水系統動作及火災逃生危險兩個評估模式，以撒水系統動作之熱釋率及可靠度設計為基礎，建構撒水系統動作評估模式。火災逃生危險評估模式，以「簡易二層驗證技術手冊」與國外文獻為基礎，計算避難容許時間；以「建築物防火避難安全性能驗證法」為基礎，計算避難所需時間，兩者時間相互競合建構逃生危險評估模式。評估模式中參數可區分為決定型輸入項及隨機型輸入項，針對隨機型參數輸入項，運用蒙地卡羅模擬法，取得隨機數值，結合電腦程式運算，觀察面臨 5 類致命情境情形與評估居室人員避難失敗機率。上述蒙地卡羅模擬法在下節將會詳細地闡述。

肆、結果與討論

一、模擬過程

本研究對於撒水系統動作情形、煙層溫度、各項致命情境時間及避難失敗之評估，係以前節建構之火災逃生危險評估模式為基礎，輸入相關參數值計算，電腦程式模擬程序如圖 4-1-1 所示：

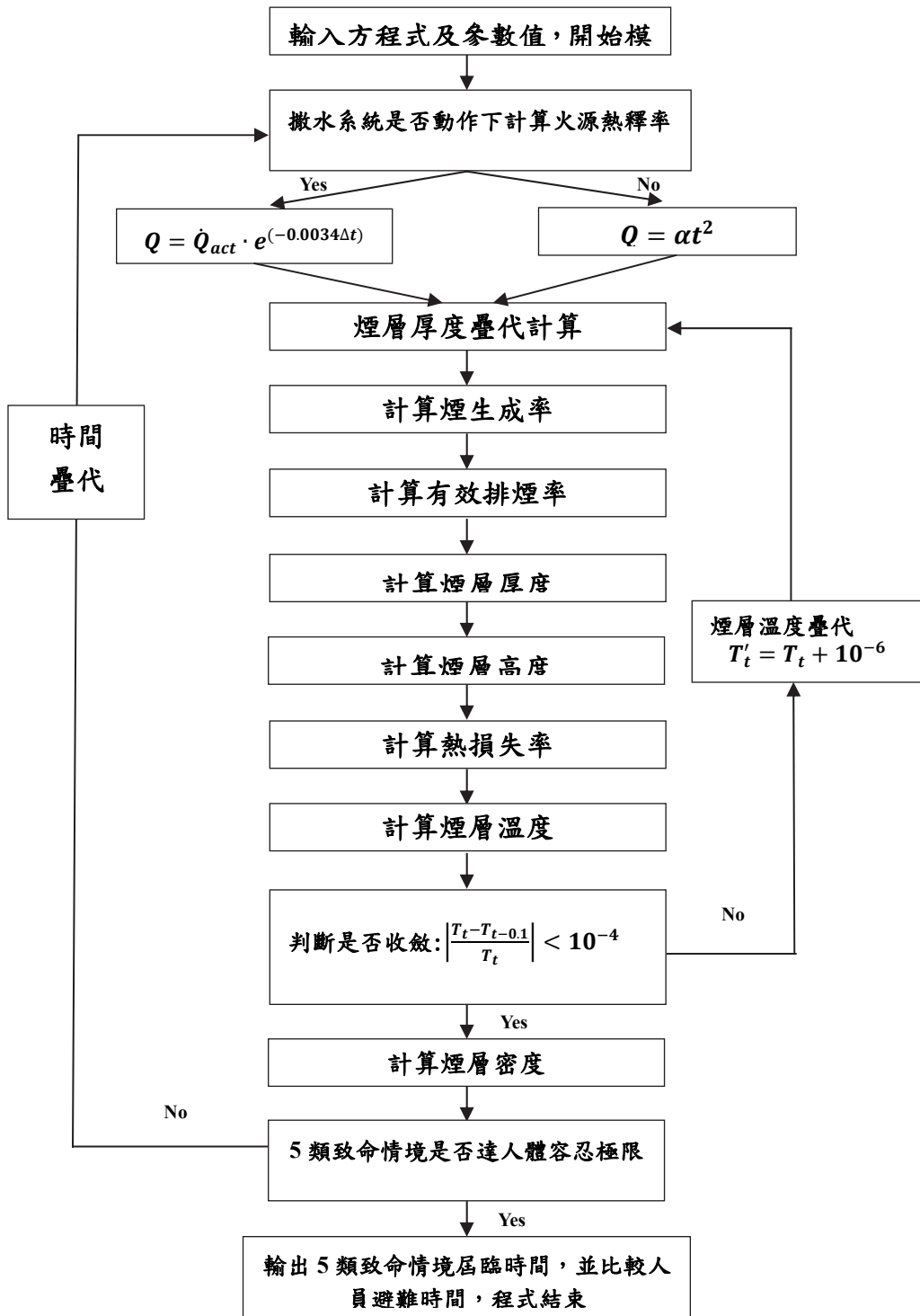


圖 4-1-1 「火災逃生危險評估模式」計算流程

二、蒙地卡羅模擬法

本研究中建構之撒水頭動作評估模式及火災逃生危險評估模式中，許多參數皆假設服從對數常態分配，在此就如何運用蒙地卡羅模擬方法得到與對數常態分配相對應的隨機數值，說明簡要步驟如下：

- (一) 利用電腦程式設計自動取一組初始亂數值，求出一組相互獨立且服從[0,1]均勻分配的隨機亂數值 (u_1, u_2)。
- (二) 以對數常態變數而言，若 X 為服從對數常態分配的隨機變數，可記為 $X \sim \text{lognormal}(\mu_x, \sigma_x^2)$ ，則 $\ln X$ 為一服從常態分配的隨機變數，可記為 $\ln X \sim N(\lambda_x, \xi_x^2)$ ，且對數常態與常態分配統計量之間的關係如下 (Ang and Tang, 1984)：

$$\text{平均數 } \lambda_x = \ln \mu_x - \frac{1}{2} \xi_x^2$$

$$\text{標準差 } \xi_x^2 = \ln \left[1 + \frac{\sigma_x^2}{\mu_x^2} \right]$$

因此，可將服從對數常態分配的隨機變數 X 之平均數 (μ_x) 及標準差 (σ_x^2)，可依上述關係轉化成服從常態分配的平均數 (λ_x) 與標準差 (ξ_x^2)，相關數值參數分配的平均數與標準差彙整如表 4-2-1 所示。

表 4-2-1 各參數的對數常態與常態隨機變數的平均值與標準差對照表

參數	μ_x	σ_x	λ_x	ξ_x
火災成長率 α (kW/s ²)	0.0524	0.060	-3.37	0.915
燃燒熱 ΔH_c (kJ/kg)	35250	1410	10.47	0.040
燃燒效率 χ	0.8	0.08	-0.23	0.100
煙單位質量光學密度 D_m (dB.m ² /kg)	330	66	5.78	0.198
一氧化碳生成率 f_{co} (kg _{co} /kg _{fuel})	0.057	0.011	-2.88	0.191
二氧化碳生成率 f_{co_2} (kg _{co_2} /kg _{fuel})	2.4	0.48	0.86	0.198

參數	μ_x	σ_x	λ_x	ξ_x
居室人員呼吸空氣量RMV _k (L/min)	25	5	3.20	0.198
居室人員自由步行速度v _k (m/sec)	1	0.3	-0.04	0.294
實際撒水頭動作之熱釋率 (kW)	198.70	4.80	5.29	0.6

(三) 若 u_1 及 u_2 為相互獨立的標準均勻分配隨機數值，則由下列的轉換方式，可得一組常態分配 $N(\mu, \sigma^2)$ 的獨立隨機數值 (Ang and Tang, 1984)。

$$x_1 = \mu + \sigma\sqrt{-2\ln u_1} \cos(2\pi u_2)$$

$$x_2 = \mu + \sigma\sqrt{-2\ln u_1} \sin(2\pi u_2)$$

如將 μ 以 λ_x 代入上式， σ 以 ξ_x 代入上式，則所求得之獨立隨機數值則為服從常態分配的隨機數值 $\ln X$ ，即 $x_1 = \ln X$ 或 $x_2 = \ln X$ ，因此可以 $X = e^{x_1}$ 或 $X = e^{x_2}$ 方式，來做為服從對數常態分配的隨機數值，而本研究採用 $X = e^{x_1}$ 計算參數之隨機數值。

上述為蒙地卡羅模擬法之基礎理論與運算流程，如搭配電腦程式設計，每次模擬可得到與預設機率分配相對應的隨機亂數值，並將隨機亂數值代入提到之五個人命危險情境方程式及評估模式，以評估系統的功能表現，並經反覆重複模擬，所得結果可進一步進行統計分析，意即利用蒙地卡羅模擬方法可模擬本研究所欲探討之撒水頭動作可靠度及居室火災人員面臨一項以上致命情境導致避難失敗的機率值。

三、空間情況與參數輸入

(一) 空間情況敘述與決定型參數

本研究選定一棟十一層樓以上建築物，場所用途為供百貨商場使用，挑選建物中之一面積為 200 平方公尺之矩形居室作為模擬空間；依據「各類場所消防安全設備設置標準」第十七條規定，十一層樓以上建築物且供第十二條第一款所列場所者，依法需設置自動撒水設備（為進行比較，未設置自動撒水系統也列入模擬），另參考「建築物防火避難安全性能驗證技術手冊」所列各用途居室之收容人員密度，「2 商場百貨-百貨公司」收容人員密度為 1.0 (人/m²)，因此，假定居室內部人員為 200 名。

藉由前節所建構的評估模式，以蒙地卡羅模擬法，進行 200 次模擬，比較並討論設置不同撒水系統及撒水系統與否動作對居室人員避難的影響。本節首先針對模擬空間參數之決定型輸入項說明，假設居室內部裝修為符合耐燃二級之材料，相關物理性質密度、比熱及傳導率等詳如表 4-3-1，另參考吳秉宸及蕭嘉俊（2007）之研究，不同時間格點 0.1、0.01 及 0.001 對於煙層下降及溫度模擬結果影響不大，在考慮運算時間之經濟性，本研究採用時間格點為 0.1 (s)

表 4-3-1 模式決定型輸入項

決定型輸入項	數值
居室樓地板面積 (m ²)	200
天花板高度 (m)	3
有效出口寬度 (m)	2
有效流動係數 (人/sec·m)	1.3
室溫 (K)	303
周圍牆壁之厚度 (m)	0.125
周圍牆壁之密度 (kg/m ³)	300
周圍牆壁之比熱 (kJ/kg·K)	1.63
周圍牆壁之熱傳導率 (W/m·K)	0.04
空氣比熱 (kJ/kg·K)	1
煙生成率係數 (kg/s·kW ^{-1/3} ·m ^{-5/3})	0.0076
模擬次數	200
居室人數	200
時間格點 (s)	0.1

(二) 隨機型參數輸入項

前節所提各種方程式為決定性評估方法的基礎，若將方程式中各種參

數，藉由蒙地卡羅模擬法，從參數預定機率分配取得相對應的隨機數值，實施多次模擬，即為隨機型評估方法。方程式中之參數界定，包含決定型輸入項及隨機型輸入項，決定型參數輸入項為在多次模擬中均為常數者，包含居室空間大小、開口及裝潢材料性質等（如表 4-3-1），而隨機型參數輸入項為每次模擬皆為不同的數值者，包含火災成長係數、居室內可燃物燃燒及產物生成率、人員避難反應時間、步行速度等。透過上述參數的選定，可將決定型評估模式轉換為隨機型評估模式，藉以蒙地卡羅模擬法及電腦程式模擬，評估居室火災人員面臨致命情境導致避難失敗之機率值。

本研究選定 ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene) 材質代表居室內可燃物材質，其燃燒熱為 35250 kJ/kg，在有焰燃燒下產生煙的單位質量光學密度為 0.330 dB·m²/g，一氧化碳生成率為 0.057 kg_{co}/kg_{fuel}，二氧化碳生成率為 2.4 kg_{co₂}/kg_{fuel}，另參考 Wilkie 等人 (2009) 研究結果將 ABS 燃燒效率設定為 0.8，而火災成長率參考 Notake 等人 (2011) 提供之值，居室火災成長率平均值為 0.0524 kW/s²，標準差 0.060 kW/s²，與 NFPA72 快速火災成長係數 0.04689 kW/s² 相近。

人員避難行為相關參數部分，居室人員呼吸空氣量，以輕微活動下每分鐘呼吸空氣量 25 L/min 作為參數之平均值，另參考 Nystedt (2003) 對於標準差的設定，以 5 L/min 作為此參數的標準差；另居室人員偵知火災時間參考 Nystedt (2003)，假設其服從 [20~40] 的均勻分配，居室人員反應時間亦參考 Nystedt (2003)，假設其服從 [10~30] 的均勻分配；而人員步行速度，參考避難安全性能驗證技術手冊中群集流的步行速度之研究，假定居室人員步行速度為 1m/sec，並考慮人員步行過程，步行速度受擁擠情形等影響，假設其服從對數常態分配，而人員之步行距離，由人員於居室內之初始位置計算，人員初始位置則為均勻分配於居室內；撒水頭動作之熱釋率參考 Frank (2011) 研究結果，假設理論撒水系統動作之火源熱釋率服從 [123.84~199.67] 的均勻分配，實際撒水系統動作之火源熱釋率服從 $\ln X \sim N(5.29, 0.6^2)$ 的對數常態分配。

另本研究隨機型參數之統計量，參考 Nystedt (2003) 及 Williams (2003) 之研究，對於參數標準差之假設方式，可燃物參數標準差值為平均值的 10% 或 20%，另居室人員呼吸空氣量之標準差為平均值的 20%，居室人員自由步行速度考慮受單位面積人員密度影響，假設其標準差為平均值的 30%。綜上，本研究界定之隨機型參數統計量及服從之機率分配，彙整如表 4-3-2。

亦可參閱前述蒙地卡羅模擬法乙小節討論。

表 4-3-2 參數統計量及機率分配

參數	平均值	標準差	服從機率分配
火災成長率 α (kW/s ²)	0.0524	0.060	對數常態分配
燃燒熱 ΔH_c (kJ/kg)	35250	1410	對數常態分配
燃燒效率 χ	0.8	0.08	對數常態分配
煙單位質量光學密度 D_m (dB.m ² /kg)	330	66	對數常態分配
一氧化碳生成率 f_{CO} (kg _{CO} /kg _{fuel})	0.057	0.011	對數常態分配
二氧化碳生成率 f_{CO_2} (kg _{CO_2} /kg _{fuel})	2.4	0.48	對數常態分配
居室人員呼吸空氣量RMV _k (L/min)	25	5	對數常態分配
居室人員偵知火災時間 $t_{detection,k}$ (sec)	30	5.7	均勻分配
居室人員反應時間 $t_{response,k}$ (sec)	20	5.7	均勻分配
居室人員自由步行速度 v_k (m/sec)	1	0.3	對數常態分配
實際撒水頭動作之熱釋率 (kW)	5.29	0.6	對數常態分配
理論撒水頭動作之熱釋率 (kW)	161.76	21.89	均勻分配

四、蒙地卡羅模擬結果與討論

(一) 撒水系統可靠度之模擬

本研究首先以撒水系統動作評估模式，評估撒水系統動作可靠度，參考各類場所消防安全設備設置標準，假設居室設置之撒水頭為一般反應型撒水頭(第二種感度)，防護半徑為 2.3 公尺，額定動作溫度之設定依據 Frank (2011) 研究設定為 72°C，另參考本國密閉式撒水頭認可基準，以 115% 及 95% 之額定動作溫度做為本研究理論撒水頭動作溫度之上下限，因此，理論撒水頭動作範圍為 68.4°C ~ 82.8°C。由 Alpert 經驗式推導，設定理論撒水頭動作之火源熱釋率 (Q_T) 上下限，假設其機率密度函數服從 [123.84, 199.67] 之均勻分配，可表示為 $Q_T \sim U[123.84, 199.67]$ ；另實際撒水頭動作之火源熱釋率 (Q_R) 參考 Frank (2011) 研究結果，假設其機率密度函數服從平均數為 5.29 及標準差為 0.60 的對數常態分配，可表示為 $\ln Q_T \sim (5.29, 0.60^2)$ ，並以前述之撒水系統動作功能函數 (G_S) 評估撒水系統之可靠度，本研究以電腦程式配合蒙地卡羅模擬法，對撒水系統動作功能函數進行模擬評估，其中模擬次數分別為 500、1000、5000、10000 及 50000 次，觀察可靠度的收斂情形，從表 4-4-3 可以發現當模擬次數大於 5000 次以上，撒水系統可靠度值皆近似 93%，模擬結果趨近收斂。

表 4-4-1 撒水系統可靠度模擬結果

模擬次數	撒水頭失敗數	撒水系統可靠度
500	35	93%
1000	59	94.1%
5000	321	93.58%
10000	663	93.37%
50000	3249	93.51%

對照文獻回顧資料，不管為美國防火協會固定年份調查之結果、紐西蘭火災統計資料或者保險公司結果 (如表 4-4-2)，撒水系統可靠度皆高於 90%，而本研究模擬結果為 93% 與文獻探討撒水系統可靠度相近。孟川 (2008) 指出隨著裝置時間增加，撒水頭可能有玻璃球佈滿塵埃、漏水、腐蝕、玻璃球內液體變色或減少等情形，撒水頭系統故障數逐漸上升。本模式之建構未將已安裝時間納入考慮，因此，本研究模擬之可靠度有高估趨勢。

表 4-4-2 撒水系統動作可靠度彙整表

數據年份	數據來源	撒水系統可靠度
1989-1998	美國	83.6%
1999-2002	美國	93%
2003-2007	美國	93%
2007-2011	美國	91%
2008	紐西蘭	95%
	美國核能保險公司	95.4%

(二) 避難模擬結果

本研究係以居室設置一般反應型自動撒水系統、設置快速反應型自動撒水系統等情境，探討渠等情境對居室人員避難情形之影響；換言之，模擬情境下，一棟 11 層樓之百貨商場火災發生時，居室內部 200 名人員的避難情形。

本研究參考各類場所消防安全設備設置標準，假設居室設置之撒水頭為一般反應型撒水頭(第二種感度)，反應時間指數(RTI)為 $80(m^{1/2}s^{1/2})$ ，防護半徑為 2.3 公尺，額定動作溫度之設定依據 Frank(2011)之研究設定值，額定動作溫度為 $72^{\circ}C$ ，此外考量模式撰寫係採用 C++ 語言中迴圈之概念，透過時間疊代觀念，計算各類致命情境屆臨時間，一旦撒水系統啟動，火勢受控制，熱釋率逐漸減小或維持，某些情境極可能不會到達人體容忍極限，導致電腦程式重複迴圈而無法輸出模擬結果，因此將模擬時間上限設定為 600 秒，一旦模擬至 600 秒，如致命情境仍未達屆臨時間，致命情境屆臨時間即以 600 秒表示(詳如樣本 1 之討論)。

再者，考量百貨商場內部陳列及販售商品多為可燃物，且場所使用人為不特定之多數人，一旦發生大火，往往造成慘重的財產損失及傷亡，基於人命安全及成本之因素，因此亦考量居室設置快速反應型撒水頭(第一種感度)進行模擬，其反應時間指數為 $30(m^{1/2}s^{1/2})$ ，額定動作溫度為 $72^{\circ}C$ ，防護半徑為 2.3 公尺，探討設置不同反應型撒水頭對於此類場所居室人員避難情形之影響(詳如樣本 2 之討論)。

1. 樣本 1 (居室設置一般反應型撒水頭)

(1)撒水系統動作情形

經過 200 次模擬，撒水系統未動作之情形累計有 15 次，撒水系統可靠度為 92.5%，相較於撒水系統可靠度之模擬結果 93% 值為低，主要原因為模擬次數僅 200 次，如增加模擬次數，可靠度則可趨近一致；另撒水系統動作時間平均值為居室起火後之 107.66(s)，相關統計量如表 4-4-3 所示，

表 4-4-3 樣本 1 一般反應型撒水頭動作時間統計量

統計量	平均值 (s)	標準差 (s)	95%信賴區間
數值	107.66	3.965	107.097~108.223

(2)整體避難失敗機率

對設置一般反應型撒水頭之居室人員進行 200 次避難模擬，模擬樣本之居室人員避難失敗機率之平均值 ($\bar{p}_{ef,s}$) 為 0.216，標準差 ($S_{ef,s}$) 為 0.1229，相關統計數值整理如表 4-4-4。

表 4-4-4 樣本 1 設置一般反應型撒水頭之居室人員避難失敗機率

統計量	平均值 ($\bar{p}_{ef,s}$)	標準差 ($S_{ef,s}$)	95%信賴區間
數值	0.216	0.1229	0.1996~0.2332

另將 200 次人員避難失敗機率繪製直方圖 (圖 4-4-1)，避難失敗機率最大值為 0.575，而避難失敗機率值大部分 (95%) 落於 0.05~0.4 之間，其中僅少數未造成人員傷亡 (避難失敗機率值為 0)，初步觀察居室裝設撒水系統仍會造成人員避難失敗發生。

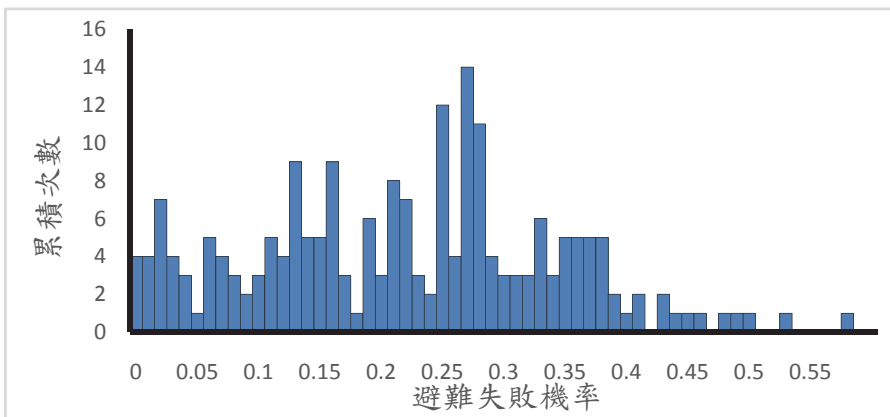


圖 4-4-1 樣本 1 避難失敗機率 ($p_{ef,s}$) 直方圖

將 200 次模擬中，15 次撒水系統未動作情況移除，統計 185 次撒水系統動作下人員避難失敗機率 ($p_{ef,s,o}$)，其平均值為 0.208 (表 4-4-5)。此外，另統計 15 次撒水系統未動作之情況，撒水系統未動作避難失敗機率平均值高達 0.306 ($p_{ef,s,f}$)。

表 4-4-5 樣本 1 一般反應型撒水頭動作人員避難失敗機率

統計量	平均值	標準差	95%信賴區間
數值	0.208	0.121	0.1917~0.2262

(3)第一類致命情境

居室裝設撒水系統下 (一般反應型)，第一類致命情境避難失敗機率 ($p_{ef,s,1}$) 之平均值為 0.0049，平均屆臨時間為 492.34 (s) (表 4-4-6)，一旦撒水系統啟動，多數模擬結果於模擬時間 600 (s) 內，煙層溫度皆未達 200°C，代表有足夠的安全時間可供居室人員進行避難，人員皆能成功完成避難。此外，撒水系統未啟動之狀況下皆有人員避難失敗，統計未動作情況，致命情境屆臨時間之平均值為 154.4 (s)，人員避難失敗的機率 ($p_{ef,s,f,1}$) 分配情形，其平均值為 0.063 (表 4-4-6)。

表 4-4-6 樣本 1 第一類致命情境屆臨時間與撒水系統未動作避難失敗機率

統計量	平均值	標準差	95%信賴區間
屆臨時間 (T_{c1}) (s)	492.34	179.42	467.87~516.81
第一類情境避難失敗機率 ($p_{ef,s,1}$)	0.0049	0.019	0.0023~0.0074
撒水系統未動作避難失敗機率 ($p_{ef,s,f,1}$)	0.063	0.0292	0.0476~0.0787

(4)第二類致命情境

第二類致命情境避難失敗機率 ($p_{ef,s,2}$) 之平均值為 0.214，平均屆臨時間為 135.00 (s) (表 4-4-7)；單獨討論撒水系統動作情況，避難失敗機率小降至 0.208，而致命情境屆臨平均時間提昇至 135.81 (s)；其中撒水系統平均動作時間為 107 (s)，而能見度降低至 8 (m) 之平均時間為 109 (s)，表示撒水系統啟動時，居室能見度約為 8 (m)，已接近容忍極限值 5 (m)，而同時煙層溫度約為 100°C，僅為容忍極限值 200°C 之一半。因此，初步推論係因撒水系統動作時間因素 (不夠快速)，導致其對延長第二類致命情境屆臨時間效果有限；另撒水系統未動作之避難失敗

機率平均值 ($p_{ef,s,f,2}$) 則上升至 0.287，與未設置撒水系統居室之避難失敗機率相近。

表 4-4-7 樣本 1 第二類致命情境屆臨時間與避難失敗機率

統計量	平均值	標準差	95%信賴區間
屆臨時間 (T_{c2}) (s)	135.00	18.734	132.45~137.56
第二類情境避難失敗機率 ($p_{ef,s,2}$)	0.214	0.1225	0.198~0.231
撒水系統未動作避難失敗機率 ($p_{ef,s,f,2}$)	0.287	0.1172	0.224~0.349
撒水系統動作避難失敗機率 ($p_{ef,s,o,2}$)	0.208	0.1212	0.191~0.225

(5) 第三類致命情境

第三類致命情境避難失敗機率 ($p_{ef,s,3}$) 之平均值為 0.0003，平均屆臨時間為 544.46 (s) (表 4-4-8)，其中撒水系統動作下之避難失敗情況，與第一類致命情境雷同，一旦撒水系統啟動，多數模擬結果於模擬時間 600 (s) 內，煙層一氧化碳濃度皆未達人體容忍極限 1400ppm，而居室人員避難失敗均為撒水系統未啟動之狀況。統計未動作情況，屆臨時間之平均值為 180.84 (s)，人員避難失敗機率 ($p_{ef,s,f,3}$) 之平均值為 0.0034 (表 4-4-8)，造成人員避難失敗的情形不多，僅於少數的模擬中造成極少數人員傷亡。

表 4-4-8 樣本 1 第三類致命情境屆臨時間與撒水系統未動作避難失敗機率

統計量	平均值	標準差	95%信賴區間
屆臨時間 (T_{c3}) (s)	544.46	179.42	526.68~562.25
第三類情境避難失敗機率 ($p_{ef,s,3}$)	0.0003	0.0022	0.0000~0.0006
撒水系統未動作避難失敗機率 ($p_{ef,s,f,3}$)	0.0034	0.0074	0.0000~0.0074

(6) 第四類致命情境

第四類致命情境避難失敗機率 ($p_{ef,s,4}$) 之平均值為 0.0001，平均屆臨時間 538.12 (s) (表 4-4-9)，撒水系統動作情況與第一、三類致命情境相同，一旦撒水系統啟動，模擬時間 600 (s) 內，人體血液內碳氧血紅

蛋白濃度皆未達 30%，未造成任何一位人員傷亡；另撒水系統未啟動情況，人員避難失敗情形也不多，僅造成 3 人次避難失敗，避難失敗機率 ($p_{ef,s,f,4}$) 之平均值僅 0.00094 (表 4-4-9)，統計撒水系統未動作情況，屆臨時間之平均值為 192.39 (s)，相較於第三類致命情境屆臨時間，多出了 10 秒之餘裕值，因此避難失敗機率更低是可以預測的。

表 4-4-9 樣本 1 第四類致命情境屆臨時間與撒水系統未動作避難失敗機率

統計量	平均值	標準差	95%信賴區間
屆臨時間 (T_{c4}) (s)	538.12	121.00	536.97~539.28
第四類情境避難失敗機率 ($p_{ef,s,4}$)	0.0001	0.0006	0.0000~0.0002
撒水系統未動作避難失敗機率 ($p_{ef,s,f,4}$)	0.00094	0.002	0.000~0.0020

(7)第五類致命情境

第五類致命情境避難失敗機率 ($p_{ef,s,5}$) 之平均值為 0.01，平均屆臨時間 556.07 (s) (表 4-4-10)，撒水系統動作情況下與第一、三、四類致命情境相同，於撒水系統啟動情況，模擬時間 600 (s) 內，人體受輻射熱強度皆未達 2.5kW；而撒水系統未啟動之狀況皆導致人員避難失敗，其中人體受輻射熱強度達 2.5kW 時間之平均值為 148.89 (s)，避難失敗機率 ($p_{ef,s,f,5}$) 分配情形，其平均值為 0.13 (表 4-4-10)，95%信賴區間為 (0.1044, 0.1556)。

表 4-4-10 樣本 1 第五類致命情境屆臨時間與撒水系統未動作避難失敗機率

統計量	平均值	標準差	95%信賴區間
屆臨時間 (T_{c5}) (s)	556.07	139.51	554.74~557.41
第五類情境避難失敗機率 ($p_{ef,s,5}$)	0.01	0.037	0.005~0.015
撒水系統未動作避難失敗機率 ($p_{ef,s,f,5}$)	0.13	0.048	0.1044~0.1556

上述為裝設一般反應型撒水頭系統下，人員面臨單一避難致命情境避難情形探討，一旦撒水系統動作，致命情境屆臨時間多可有效延遲或拉長 (表 4-4-11)，其中第一、三、四及五類致命情境中，撒水系統一旦動作則環境多不會達致命情境，故撒水系統動作時，對於第一、三、四及五類致命情境，撒水系統可有效控制避難環境，避免環境達人體容忍極

限而造成人員避難失敗。惟第二致命情境屆臨時間僅由 125.22 (s) 延長至 135.81 (s)，提供居室人員多約 10 秒的避難時間，因延長危險情境時間效果有限，多數的模擬結果仍造成居室人員避難失敗；其中表 4-4-6 至表 4-4-10，受限於致命情境屆臨時間之統計包含撒水系統動作及未動作之情況，導致第一、三、四及五類致命情境屆臨時間之標準差數值高達 100 以上，且樣本之屆臨時間無法以適當的機率分配描述。比較五類致命情境之平均避難失敗機率值，能見度降低仍為避難失敗之主要原因，次要為熱輻射通量對人體之影響，餘依序為煙層溫度、煙層一氧化碳濃度及碳氧血紅蛋白濃度，其中仍以前三類具一定之影響力。

表 4-4-11 樣本 1 一般反應型撒水頭（各類致命情境避難失敗機率及屆臨時間）

項目	撒水系統未動作下避難失敗機率	撒水系統未動作下屆臨時間 (s)	撒水系統動作下避難失敗機率	撒水系統動作下屆臨時間 (s)
第一類致命情境	0.063	154.4	0.00	520.35
第二類致命情境	0.287	125.22	0.208	135.81
第三類致命情境	0.0034	180.84	0.00	574.6
第四類致命情境	0.00094	192.39	0.00	563.75
第五類致命情境	0.13	148.89	0.00	600.00
整體避難情形	0.306		0.208	

2. 樣本 2（居室設置快速反應型撒水頭）

(1) 撒水系統動作情形

200 次模擬中，撒水系統未動作之情形累計有 19 次，撒水系統可靠度為 90.5%，相較於前節可靠度模擬（93%）或前述樣本 1 模擬結果值（92.5%）為低，應為模擬次數僅 200 次尚未達收斂，如增加模擬次數，可靠度則應可趨近收斂且一致；另撒水系統動作時間平均值為火勢開始

後之 81.41 (s)，相關統計量如表 4-4-12 所示，相較一般反應型撒水頭，快速反應型撒水頭確實動作較快，動作時間平均提早 25 秒。

表 4-4-12 樣本 2 快速反應型撒水頭動作時間統計量

統計量	平均值 (s)	標準差	95%信賴區間
數值	81.41	3.576	80.884~81.933

(2) 整體避難失敗機率

對設置快速反應型撒水頭之居室人員進行 200 次模擬，模擬樣本之居室人員避難失敗機率之平均值 ($\bar{p}_{ef,qs}$) 為 0.086，標準差 ($s_{ef,qs}$) 為 0.119，相關統計數值整理如表 (4-4-13)。

表 4-4-13 樣本 2 設置快速反應型撒水頭之居室人員避難失敗機率

統計量	平均值 ($\bar{p}_{ef,qs}$)	標準差 ($s_{ef,qs}$)	95%信賴區間
數值	0.086	0.119	0.0695~0.1028

另將 200 次人員避難失敗機率繪製直方圖 (圖 4-4-2)，可觀察到避難失敗機率最大值為 0.575，而其中幾近半數 (90 次約 45%) 未造成人員傷亡 (避難失敗機率值為 0)，如避難失敗，失敗機率值主要分佈於 0.05 ~ 0.35 之間，初步觀察裝設快速反應型撒水頭可降低避難失敗機率，欲知其對各類危險情境之影響，仍需透過單一致命情境分析探討詳細情形。

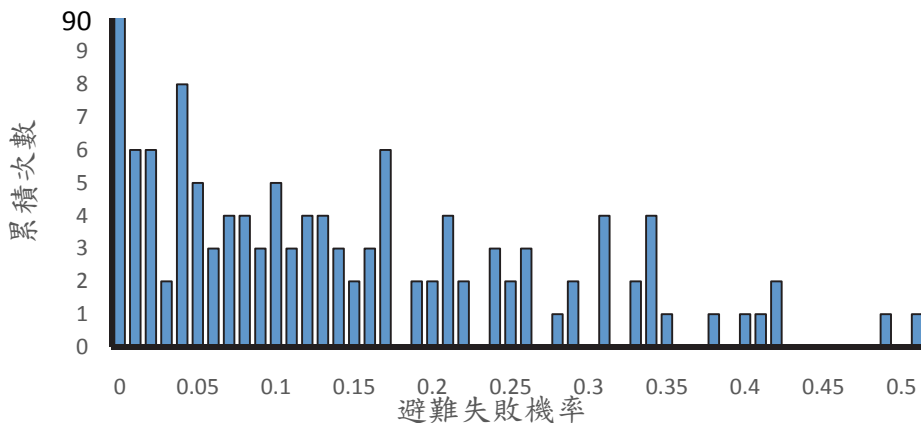


圖 4-4-2 樣本 2 避難失敗機率直方圖 ($p_{ef,qs}$)

排除撒水系統未動作情況，統計其餘 181 次撒水系統成功動作下人員避難失敗機率 ($p_{ef,qs,o}$)，其平均值為 0.065 (表 4-4-14)，相對於裝設一般反應型撒水頭系統居室之人員避難失敗機率 0.216 (表 4-4-4)，裝設快速反應型撒水頭系統居室之避難成功機率提高許多，另撒水系統未動作避難失敗機率 ($p_{ef,qs,f}$) 平均值高達 0.287。

表 4-4-14 樣本 2 快速反應型撒水頭成功動作人員避難失敗機率

統計量	平均值	標準差	95%信賴區間
數值	0.065	0.099	0.050~0.080

(3)第一類致命情境

第一類致命情境避難失敗機率 ($p_{ef,qs,1}$) 之平均值為 0.005，平均屆臨時間為 557.75 (s) (表 4-4-15)，一旦撒水系統啟動，於模擬時間 600 (s) 內，181 次模擬中煙層溫度皆未達 200°C，因此屆臨時間以 600 (s) 表示，顯示有足夠時間供居室人員進行避難，居室人員皆能成功完成避難；另，撒水系統未啟動之狀況下皆有人員避難失敗，煙層溫度達 200 °C 時間之平均值為 155.27 (s)，人員避難失敗機率 ($p_{ef,qs,f,1}$) 之平均值為 0.058。

表 4-4-15 樣本 2 第一類致命情境屆臨時間及避難失敗機

統計量	平均值	標準差	95%信賴區間
屆臨時間 (T_{c1}) (s)	557.75	130.74	539.52~575.98
避難失敗機率 ($p_{ef,qs,1}$)	0.005	0.0186	0.0026~0.0075

(4)第二類致命情境

第二類致命情境避難失敗機率 ($p_{ef,qs,2}$) 平均值為 0.078，平均屆臨時間為 175.23 (s) (表 4-4-16)，雖設置快速反應型撒水頭之居室相較設置一般反應型撒水頭之居室，僅延長第二類致命情境屆臨時間 40 秒 (參表 4-4-7)，但 99.6% 的居室人員可在 175.23 (s) 內完成避難，故裝設快速反應型撒水頭系統雖僅延長屆臨時間 40 (s)，卻可降低因能見度不足而避難失敗的機率至 0.07；另，撒水系統動作下之避難失敗機率 ($p_{ef,qs,o,2}$) 則降至 0.065，檢視致命情境屆臨時間則提昇至 180.42 (s)，其中撒水系統啟動時 (81 秒)，居室能見度約為 20 (m)；另相較於其他類致命情境

屆臨時間可延長至 600 秒以上（參表 4-4-20），樣本 2 撒水系統動作下第一、三、四及五類屆臨時間），雖延長致命情境屆臨時間效果有限，但仍降低避難失敗機率；再者，撒水系統未動作之避難失敗機率（ $p_{ef,qs,f,2}$ ）之平均值則上升至 0.279。

表 4-4-16 樣本 2 第二類致命情境屆臨時間及避難失敗機率

統計量	平均值	標準差	95%信賴區間
屆臨時間 (T_{c2}) (s)	175.23	52.95	167.85~182.61
第二類情境避難失敗機率 ($p_{ef,qs,2}$)	0.078	0.116	0.063~0.093
撒水系統未動作避難失敗機率 ($p_{ef,qs,f,2}$)	0.279	0.104	0.229~0.329
撒水系統動作避難失敗機率 ($p_{ef,qs,o,2}$)	0.065	0.099	0.050~0.080

(5)第三類致命情境

第三類致命情境避難失敗機率（ $p_{ef,qs,3}$ ）之平均值為 0.0002，平均屆臨時間 560.25(s)(表 4-4-17)，其中撒水系統動作情況之避難失敗情況，與第一類致命情境雷同，一旦撒水系統啟動，模擬時間 600 (s) 內，181 次模擬中煙層一氧化碳濃度皆未達人體容忍極限 1400ppm，人員皆能成功避難；而居室人員避難失敗皆發生於撒水系統未啟動之狀況下，屆臨時間之平均值為 181.56 (s)，人員避難失敗機率（ $p_{ef,qs,f,3}$ ）之平均值為 0.0002，僅於少數的模擬中造成人員傷亡。

表 4-4-17 樣本 2 第三類致命情境屆臨時間避難失敗機率

統計量	平均值	標準差	95%信賴區間
屆臨時間 (T_{c3}) (s)	560.25	123.02	543.09~577.40
避難失敗機率 ($p_{ef,qs,3}$)	0.0002	0.0011	0.00005~0.0004

(6)第四類致命情境

第四類致命情境避難失敗機率（ $p_{ef,qs,4}$ ）之平均值為 0.0001，平均屆臨時間為 561.49 (s) (表 4-4-18)，撒水系統動作情況下與第一、三類致命情境相同，模擬時間 600 (s) 內，多次模擬中人體血液內碳氧血紅蛋白濃度皆未達 30%，未造成任何一位人員傷亡；另，撒水系統未啟動情

況，人員避難失敗情形也不多，僅造成 5 人次避難失敗，該情況下避難失敗機率之平均值僅 0.0013。

表 4-4-18 樣本 2 第四類致命情境屆臨時間及避難失敗機率

統計量	平均值	標準差	95%信賴區間
屆臨時間 (T_{c4}) (s)	561.49	119.47	544.87~578.10
避難失敗機率 ($p_{ef,qs,4}$)	0.0001	0.0009	0.000~0.0020

(7)第五類致命情境

第五類致命情境避難失敗機率 ($p_{ef,qs,5}$) 之平均值為 0.0106，平均屆臨時間為 559.43 (s) (表 4-4-19)，撒水系統動作情況下與第一、三、四類致命情境相同，模擬時間 600 (s) 內，181 次模擬中人體受輻射熱強度皆未達 2.5kW；其餘撒水系統未啟動之狀況皆有人員避難失敗情形，該情況下避難失敗機率平均值為 0.113，其屆臨時間之平均值為 148.03(s)。

表 4-4-19 樣本 2 第五類致命情境屆臨時間及避難失敗機率

統計量	平均值	標準差	95%信賴區間
屆臨時間 (T_{c5}) (s)	559.43	128.98	541.40~577.46
避難失敗機率 ($p_{ef,qs,5}$)	0.0106	0.036	0.0056~00158

上述為裝設快速反應型撒水頭系統下，人員面臨單一避難致命情境避難情形之探討。另快速反應型撒水頭系統動作下，致命情境屆臨時間相較一般反應型撒水系統更有效拉長 (表 4-4-20)，其中第一、三、四及五類致命情境中，撒水系統一旦動作則環境不會達致命情境，撒水系統可有效控制避難環境，避免環境達人體容忍極限而造成人員避難失敗；另第二致命情境平均屆臨時間亦由撒水系統未動作下之 125.74 (s) 延長至 180.42 (s)，提供居室人員平均多 50 (s) 的避難時間，已能有效降低避難失敗機率 (仍有少部份人員避難失敗)；致命情境屆臨時間之統計包含撒水系統動作及未動作之情況 (表 4-4-15 至 4-4-19)，導致 5 類致命情境屆臨時間之標準差數值較大，且樣本之屆臨時間無法以適當的機率分配描述。整體而言，相較於裝設一般反應型撒水頭之居室，裝設快速反應型撒水頭相對有效提高人員避難安全 (參表 4-4-11 與表 4-4-20)。

表 4-4-20 樣本 2 快速反應型撒水頭（各類致命情境避難失敗機率及屆臨時間）

項目	撒水系統未動作下避難失敗機率	撒水系統未動作下屆臨時間 (s)	撒水系統動作下避難失敗機率	撒水系統動作下屆臨時間 (s)
第一類致命情境	0.058	155.27	0.00	600.00
第二類致命情境	0.279	125.74	0.065	180.42
第三類致命情境	0.002	181.56	0.00	600.00
第四類致命情境	0.0013	192.70	0.00	599.98
第五類致命情境	0.113	148.03	0.00	600.00
整體避難情形	0.287		0.065	

（三）模擬結果比較與討論

以撒水系統動作與否，比較居室人員避難情形。從表 4-4-21，一般反應型撒水系統動作後，第一、三、四及五類致命情境之人員避難失敗機率皆下降至 0，第二致命情境之人員避難失敗機率由未動作之 0.287 下降至 0.208；另表 4-4-22，快速反應型撒水系統動作後，第一、三、四及五類致命情境之人員避難失敗機率皆下降至 0，第二致命情境之人員避難失敗機率由未動作之 0.279 下降至 0.065。

撒水系統未動作下，第二類致命情境避難失敗平均機率遠高於其餘四類致命情境，推測避難失敗主要因為人員面臨第二類致命情境（能見度不足）；另比較致命情境時間（參表 4-4-11 與表 4-4-20），推測五類評估因子對避難之影響性，以能見度為影響居室人員避難失敗之主要原因，輻射熱通量則為次要原因，餘依序為煙層溫度、一氧化碳濃度及碳氧血紅蛋白濃度，其中後三者對於避難失敗的影響相較於前兩者而言，影響幅度較小。

一旦撒水系統動作，即可有效抑制煙層溫度、一氧化碳濃度及熱輻射

通量達人體容忍極限，故第一、三、四及五類致命情境避難失敗機率皆降至沒有人員傷亡；一般反應型撒水頭動作對於第二類致命情境避難失敗機率影響較小，本研究結果探討其可能原因，主要受限於撒水系統動作時間及模式建構方式。其中動作時間方面，可從裝設反應時間較小的撒水頭對於控制環境之時間延長效果較佳之方向推論；而模式建構方式方面，模式採用之能見度公式係以假定煙均勻混合於居室內，與實際靠近天花板處，煙的濃度會較高情形不同，因此本研究對於能見度屬保守評估。另對於撒水系統動作後之改變，主要以撒水系統對火源熱釋率影響為主，並未討論是否影響燃燒效率，因此對於能見度模擬結果，即便撒水動作，對於致命情境屆臨時間之延長或者避難成功情形提昇效果並不如其他致命情境，或許可藉由擴展模式內避難評估因子及撒水改變火勢的項目改善，模式可望能更貼切模擬實際火災及評估撒水動作的效益。從避難失敗機率及致命情境屆臨時間值之改變，發現撒水系統動作，還是可有效控制居室環境，避免達人體容忍極限，若未啟動則避難情境形同未裝設撒水系統情形。因此，居室裝設撒水系統，可有效減少居室人員避難失敗之風險，此外透過提高撒水系統可靠度，降低撒水系統未動作情況，可進一步保障居室人員安全。

表 4-4-21 一般反應型撒水系統動作與否對人員避難失敗機率影響表

致命情境 \ 撒水系統動作與否	撒水系統動作	撒水系統未動作
第一類致命情境	0	0.063
第二類致命情境	0.208	0.287
第三類致命情境	0	0.0034
第四類致命情境	0	0.00094
第五類致命情境	0	0.13
整體避難失敗機率	0.208	0.306

表 4-4-22 快速反應型撒水系統動作與否對人員避難失敗機率影響表

致命情境 \ 撒水系統動作與否	撒水系統動作	撒水系統未動作
第一類致命情境	0	0.058
第二類致命情境	0.065	0.279
第三類致命情境	0	0.0021
第四類致命情境	0	0.0013
第五類致命情境	0	0.113
整體避難失敗機率	0.065	0.287

伍、結論與建議

一、結論

- (一) 國外學者多根據政府火災統計數據，估算撒水系統動作可靠度，亦有學者以材料性質壽命評估撒水系統可靠度，而本文則以國內外學者推導之熱流經驗方程式及撒水頭動作公式為基準，結合自動撒水頭相關參數之機率分配，建立「撒水系統動作評估模式」，預測居室火災自動撒水系統動作之可靠度。
- (二) 本文參考國內外學者提出之火、煙生成相關經驗方程式，結合火災容忍極限方程式及居室人員避難時間方程式，建構「居室火災逃生危險評估模式」，預測並比較居室火災致命情境屆臨時間及居室人員避難所需時間；另進一步找出火災容忍極限方程式參數之統計量或機率分配，輔以蒙地卡羅模擬，研擬更貼近實際火災行為的隨機型居室火災避難安全評估方法，並以點估計及區間估計，估算逃生失敗機率之估計值及其信賴區間。
- (三) 本研究對於居室之火災避難危險度評估，以本研究研擬之隨機型模式，評估不同撒水系統是否動作及居室火災人員面臨 5 項中任一項以上致命情境導致避難失敗之情形，其評估結果以機率值及信賴區間表示，改善以往較狹隘的評估內涵（僅考慮某一、二項危險情境）與結果（僅以機率值表之，未有信賴區間），值得參酌。
- (四) 本文結合上述「撒水系統動作評估模式」與「居室火災逃生危險評估模式」，

探討設置一般反應型自動撒水系統、設置快速反應型自動撒水系統居室火災時，人員面臨致命情境避難失敗的情形，結果顯現設置快速反應型撒水頭較一般反應型撒水頭，更能降低避難失敗機率，也顯示五類致命情境之平均避難失敗機率值，指出能見度降低為避難失敗之主要原因，次要為熱輻射通量對人體之影響，餘依序為煙層溫度、煙層一氧化碳濃度及碳氧血紅蛋白濃度。這些成果可供建築、消防主管機關判別特定場所之火災危險程度，推動居室火災預防之依據參考，以提昇居室內人員之避難安全。

二、建議

- (一) 本研究所發展之居室火煙成長模式，係參考各國學者推導之火、煙生成及煙層流動等方程式，相對於火災動力學模擬軟體，屬較簡易之評估方式，因此本研究之模式並未考慮下列情形，後續研究可對此改善精進。
1. 本研究未對居室外界開口進行設定，故無法反應外部溫度、風速，亦未考慮與外部之能量交換。
 2. 對煙層變化之評估僅針對單一空間居室，故無法同時預測多個鄰近空間的煙層變化。
 3. 撒水系統動作後，僅考慮撒水對於火勢之影響，並未考慮下降水滴與煙層粒子間之物理變化，及撒水後煙層對於避難人員之影響。
 4. 本研究撒水系統對於火災影響，以火源熱釋率為主要，未考慮對燃燒效率及煙層等影響，後續研究者可針對撒水對燃燒效率改變情形進行試驗，得到更廣泛的數據資料。
- (二) 本研究避難容許時間 (ASET) 即為以「火煙成長模式」計算居室火災各個致命情境屆臨之時間，而影響避難容許時間之各項因素，可區分為物理、生理、心理等三方面，本研究雖盡可能探討物理因素 (煙層溫度、能見度、一氧化碳濃度、熱輻射通量) 及生理因素 (碳氧血紅蛋白濃度或無力行動劑量分率) 對避難之影響；但心理因素，不易量化且相當複雜，其中包含壓力、慌張、踐踏、熟悉等，本文並未考慮，後續研究可對此另闢專題探究。例如：能見度與熟悉環境之交互影響，對熟悉環境之民眾而言，可能可以容許較嚴峻之能見度。

伍、參考文獻

- Alpert, R. L. (1972), Calculation of Response Time of Ceiling-mounted Fire Detectors, *Fire Technology*, 8(3), 181-195.

- Ang, H. S. and Tang, H. (1984), *Probability Concepts in Engineering Planning and Design, Volume II -Decision, Risk, and Reliability*, NY, USA: John Wiley and Sons Press.
- Budnick, E. K. (2001), Automatic Sprinkler System Reliability, *Fire Prot. Engineering*, 9, 7–12.
- Bukowski, R. W, Budnick, E. K., Schemel, C. F. (1999), Estimates of the Operational Reliability of Fire Protection Systems, In *Proceedings of the 3rd International Conference on Fire Research and Engineering*, October 4-8. USA: Bethesda, MA (pp 87-98).
- Drysdale, D. (2011), *An Introduction to Fire Dynamics*, John Wiley and Sons, 3rd Edition.
- Fahy, R. F. (2008), Human Factors in Emergencies: Calculation Methods for Egress Prediction. *Fire Protection Handbook*, 20th Edition, National Fire Protection Association, Section 4.
- Frank, K., Spearpoint, M., Fleischmann, C. M., Wade, C. (2011), A Comparison of Sources of Uncertainty for Calculating Sprinkler Activation, In *Fire safety science—proceedings of the tenth international symposium*. International Association for Fire Safety Science, College Park, MD (pp. 1101-1114).
- Jin, T. (1978), Visibility through Fire Smoke. *Journal of Fire and Flammability*, 9(2), 135-155.
- Marchant. E.W. (1976), Some Aspects of Human Behaviour and Escape Route Design, in *5th International Fire Protection Seminar*.
- Milke, J. A. (2002), Smoke Management in Covered Malls and Atria. *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, 3rd Edition, National Fire Protection Association, Section 4.
- Mulholland, G. W. (2002), Smoke Production and Properties. *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, 3rd Edition, National Fire Protection Association, Section 2.
- NFPA 13 (2019), *Standard for the Installation of Sprinkler Systems*.
- Notake, H., Yamaguchi, J., Tanaka, T. (2011), Statistical Estimations of the Distribution of Fire Growth Factor - Study on Risk-Based Evacuation Safety Design Method. *Fire Safety Science* 10, 1087-1100.
- Nystedt, F. (2003), Deaths in Residential Fires-an Analysis of Appropriate FireSafety

- Measures. LUTVDG/TVBB--1026--SE.
- Purser, D. A. (1989), Modelling Toxic and Physical Hazard in Fire. *Fire Safety Science*, 2, 391-400.
- Tanaka, T. (1991), A Study for Performance Based Design of Means of Escape in Fire, In *Proceedings of the 3rd International Symposium on Fire Safety Science* (pp. 729-738).
- Williams, J. (2003), Life Safety Risk Assessment for Firecells with a Single Means of Escape. School of Engineering, University of Canterbury.
- 吳秉宸、蕭嘉俊 (2007)，簡易二層法於建築物防火避難之應用研究，內政部建築研究所研究報告。
- 何明錦、陳俊勳 (2007)，簡易二層驗證技術手冊之研究，內政部建築研究所研究報告。
- 孟川 (2008)，基於 Weibull 分布的自動噴水滅火系統噴頭可靠性建模，*消防科學與技術*，第 27 卷，第 7 期，頁 529-531。
- 陳建忠、簡賢文 (2014)，建築物防火避難安全性能驗證技術手冊，內政部建築研究所出版刊物。
- 鄭志強 (1998)，建築物火災危險度評估電腦化應用之研究，中央警察大學消防科學研究所碩士論文。

