臺灣警察專科學校警專學報，民國 108.12
第七卷第二期：83-100 頁

撒水系統動作評估模式之建構

Development of the Assessment Model on Sprinkler System Operation

柯博仁、吳榮平、林元祥*

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

摘 要

火災一旦發生，往往造成嚴重的生命與財產損失，如能在火災發生初期抑制火勢，可降低生命及財產損失。美國防火協會（NFPA）統計指出，火災初期撒水動作後可有效的控制火勢，得知撒水系統是否可靠並如預期動作，常常是控制火勢發展的主要關鍵。本研究以理論及實際撒水系統動作之火源熱釋率為評估基準，結合可靠度設計之供給及需求之概念，建構撒水系統動作評估模式，輔以蒙地卡羅模擬方法，估計撒水系統動作的可靠度。本文以濕式撒水系統為例，模擬撒水系統可靠度值達 93%，與美國防火協會調查結果具有一致性。

關鍵字：可靠度、撒水系統動作評估模式、功能函數、蒙地卡羅模擬

Abstract

The event of fire disaster usually causes great damage to lives and losses of property. If we are able to suppress fire in its initial stage, the loss of lives and property can be reduced. Fire statistics from National Fire Protection Association (NFPA) indicates that the activation of the automatic sprinkler system could result in effective fire suppression. Accordingly, the reliability of the automatic sprinkler system is a critical factor to control the development of fire.This research aims to constitute an assessment model of sprinkler operation on the basis of theoretical and actual heat release rates combining with the concept of supply and demand derived from reliability-based design. Moreover, Monte

* 柯博仁：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；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；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）。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。

Carlo simulation is applied to assess the operation reliability of the automatic sprinkler system. With the demonstrated example ofthewet pipe sprinkler system, this research shows that the operation reliability of the simulation of the automatic sprinkler system is up to 93%, which is consistent with the result of the report of NFPA.

Key words：reliability, automatic sprinkler system, assessment model of sprinkler operation, performance function, Monte Carlo simulation.

壹、前言

建築物消防安全設備包含多種自動滅火設備，其中以自動撒水系統經濟實惠且最為普及，廣泛裝設於各類場所中，美國防火協會統計資料（Hall, 2013）指出，所有建築物消防安全設備當中，以自動撒水系統可靠度及有效性最佳，且自動撒水系統於火災初期動作後可有效的控制火勢，維持利於人員避難之環境，提供內部人員更多避難疏散時間，另建築物設置自動撒水系統可降低火災死亡率 80%，降低直接財務損失 45～60%。因此，撒水系統在建築物發生火災時，是否可靠的如預期動作，是控制火勢發展的主要關鍵，一旦延誤或動作失敗，可能造成人命及財務重大損失。

當某一系統將於指定的使用時間，不發生故障的機率即為可靠度，簡言之為系統於指定的使用時間(T)，依其設計發揮該有功能的機率，可用數學方程式 $R(t) = P(t|t \geq T)$表示可靠度函數，對於系統的壽命可用指數、韋伯、伽碼、對數常態等分配描述。可靠度工程則透過運用數學或統計之方法，來評估設備或系統的可靠度，一般可靠度工程的設計問題多視為供給（supply）與需求（demand）的問題，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。本研究將此供給與需求觀點運用於撒水系統動作的評估，因影響設計或使用條件的因素相當複雜多樣且無法確定，因此，可靠度以機率的方式呈現。

貳、文獻探討

本節僅就撒水系統可靠度之不同定義、評估撒水系統可靠度之方式及相關結果進行整理，作為本研究建立撒水系統動作評估模式之理論基礎。

一、撒水系統可靠度定義

學者對撒水系統可靠度定義眾說紛紜，有定義可靠度為撒水系統「成功動作」之機率；亦有定義可靠度為「成功動作且有效控制火勢」之機率。其中也隱含許多情境或條件，述如下。

Rohr（2001）以火災案例中，撒水系統「是否動作」為撒水系統可靠度之定義，但不包含撒水系統是否被適當設計、安裝及維修、因火勢過小無法啟動者、及建築內雖裝設撒水系統但撒水頭並未在起火區等原因。

Bukowski（1999）對系統可靠度定義為當空間需要設備動作時，系統可準確動作的機率，將系統可靠度區分為動作可靠度（operational reliability）及性能可靠度（performance reliability）兩類。其中，動作可靠度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）。至於性能可靠度則指撒水系統在實際火災或全尺寸實驗時，滅火性能達設計目標之機率。

Bukowski 為避免動作可靠度及性能可靠度混為一談，對於動作可靠度數據統計僅考慮撒水系統的失敗性危險情況；而可靠度從統計觀點亦可分為，環境達動作標準時即動作的非條件性可靠度（unconditional reliability），及火災時才動作的條件可靠度（conditional reliability），兩者之差別在於系統動作時是否為火災情況。

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，並參考 Bukowski 等人（1999）對撒水系統之可靠度定義，亦將可靠度區分為動作可靠度及性能可靠度兩類，但對於評估動作可靠度未納入失敗性危險的情形。

Gravestock（2008）認為評估撒水系統的方式，可區分為可靠度、功效（efficacy）及效能（effectiveness）三項，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」則為系統動作時撒水頭可否使用，及可否提供足夠水量及水壓。

二、撒水系統可靠度評估方式

目前仍多以統計火災案件，撒水系統動作情形作為評估可靠度的主要方式，但受限於火災統計的詳細程度，進而影響撒水系統可靠度的準確度，因此，學者對於統計資料的分類方式，為影響可靠度的主要因素，亦有學者以統計數據結合故障樹或蒙地卡羅模擬評估撒水系統可靠度，另保險公司則以實驗的方式，測試撒水頭於火災發生時動作失敗的機率。

美國防火協會（NFPA）採統計方式評估撒水系統可靠度，收集美國官方建築物火災統計資料，並分析火災案件中撒水系統動作情形，早期建築物火災統計資

料雖為官方資料，但未完整分類，包含火勢過小不足以動作、限制火災（confined fire）及撒水頭未裝設於起火空間等非造成撒水頭動作失敗之情況，因此可靠度相對較低，相較之下，近期建築物火災統計資料剔除上述不合理情況，故近期統計資料之撒水系統可靠度明顯提高。

Budnick（2001）指出多數學者提出之撒水系統皆有高可靠度，是歸因於有限的火災數據及數據收集的偏差，造成撒水系統可靠度研究的限制，且大多數的學者並未嘗試處理這些問題。因此，Budnick 嘗試以新的統計方式處理樣本數據少量或稀疏的問題。另於數據收集方面，將動作可靠度之失敗性安全情形排除，認為撒水系統於火災時未即時動作，應為內部構件損壞，從每季消防設備檢查中，撒水系統測試及維修數據取得撒水系統不同構件壽命資訊，整合文獻中分析之數據，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

Gravestock（2008）統計紐西蘭及澳洲撒水系統相關數據，結合故障樹分析法，分析撒水系統效能，雖無法確定撒水系統可靠度、功效、效能服從之機率分配，但認為系統效能應為一範圍非定值，以上、下限值表示；Frank 等人（2012）採用不同國家消防統計數據，將數據區分為可靠度、功效及效能，輔以蒙地卡羅模擬，計算撒水系統可靠度、功效與效能及服從之機率分配，並比較不同國家間撒水系統可靠度之區別，其中可靠度及功效參考 Gravestock（2008）之定義，而定義效能為火勢發展至一定程度，撒水系統是否動作並有效撲滅或控制火勢。

Hauptmans 等人（2008）嘗試以故障樹分析撒水系統故障率，將撒水系統失敗分成，管線損壞、水源供給損壞、幫浦損壞及閥類損壞四項主要原因，使用半定量故障樹分析法，估算系統失敗原因之數值；ŠakėnaitėJurgita（2009）認為撒水頭動作失敗的原因主要為系統遭到關閉或幫浦損壞、系統構件故障、系統運轉失敗及火勢超過撒水頭設計能力等 4 種原因，參考 Hauptmans 等人（2008）以故障樹分析法為研究撒水系統動作失敗之方法，結合貝氏定理（Baye's theorem）計算撒水系統失敗機率（式 2-2-1），定義該研究撒水系統故障樹為「或」的概念（圖 2-2-1 之 ⏃）。

$$p_f = P(F_{sys}|fire) = P\left(\bigcup_{i=1}^{4} F_i \middle| fire\right) = \sum_{i=1}^{4} P(F_i|fire) \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (2\text{-}2\text{-}1)$$

F_{sys}：撒水系統失敗事件，

F_i：撒水系統子系統失敗事件，$i = 1\sim4$。

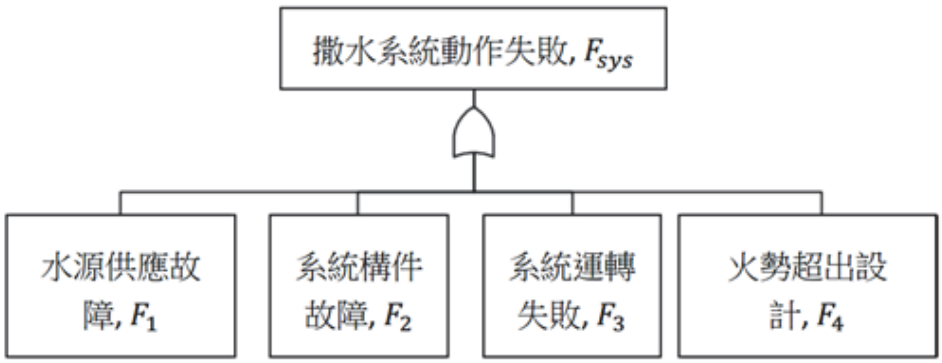


圖 2-2-1　撒水系統故障樹圖

孟川氏（2008）統計特定商場撒水頭損壞情況作為評估撒水頭可靠度之數據來源，損壞情形包含撒水頭漏水、腐蝕、玻璃球內液體變色、減少等情形，其中以玻璃球上之塵埃為影響撒水頭失效常見原因。其蒐集某商場 1997-2005 年間每年度撒水頭損壞情形，推導初步撒水頭可靠度（$R(t_i)$）估計式（式 2-2-2），$R(t_i)$表示第 i 年損壞t_i個撒水頭情況下撒水頭之可靠度，採用兩參數韋伯分配建立撒水頭可靠度模型，導出密閉式撒水頭隨使用時間（t）改變的可靠度函數（式 2-2-3），並使用迴歸方程式檢驗推導函數，結果顯示該函數可確切的估計撒水頭可靠度，因此該方式適用於評估撒水系統子系統之可靠度。

$$R(t_i) = 1 - \frac{i}{1+n} \quad \cdots\cdots (2\text{-}2\text{-}2)$$

i：已使用時間（年）,$i = 1 \sim n$,

t_i：第i年已知撒水頭損壞數量，

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{6.49}\right)^{1.08}} \quad \cdots\cdots (2\text{-}2\text{-}3)$$

除以上述統計官方火災數據、或使用故障樹法分析撒水系統可靠度之方式外，工業風險保險公司（industrial risk insures, IRI）及美國核能保險公司（American Nuclear Insurers, ANI）以撒水系統動作實驗估算撒水系統可靠度。

三、可靠度評估結果

Hall（2011）統計美國 1989-1998 年間建築物火災數據，在 273,400 件火災中，撒水頭動作可靠度為 83.6%，此項結果因年代久遠，相關數據無法進行分類篩選，包含撒水系統是否被適當設計、安裝及維修者、因火勢過小無法啟動者，及建築內雖裝設撒水系統但撒水頭並未在起火區等情形，導致可靠度較低。但 Hall 比對

未校正及經校正後之 1999-2002 火災數據，校正前可靠度為 82%，與前述 83.6%差距不大，但數據經校正後，撒水系統可靠度提昇至 93%，可明顯看出數據正確分類，對於撒水系統可靠度影響程度。

Hall（2010）統計美國各地政府消防局自 2003 至 2007 年之建築物火災數據，結果顯示已裝設撒水系統的場所發生火災時，因火勢過小導致撒水系統未動作的機率為 65%。然當火勢達足以啟動撒水系統時，僅有 7%的撒水系統未動作，撒水系統可靠度為 93%。其進一步探討動作失敗原因，原因多為撒水系統遭到關閉，佔所有原因之 53%（圖 2-3-1），另 Hall（2013）亦分析 2007-2011 之建築物火災統計資料，撒水系統可靠度稍降至 91%，但撒水系統動作失敗原因，仍以撒水系統遭到關閉為主要原因，佔所有原因之 64%。

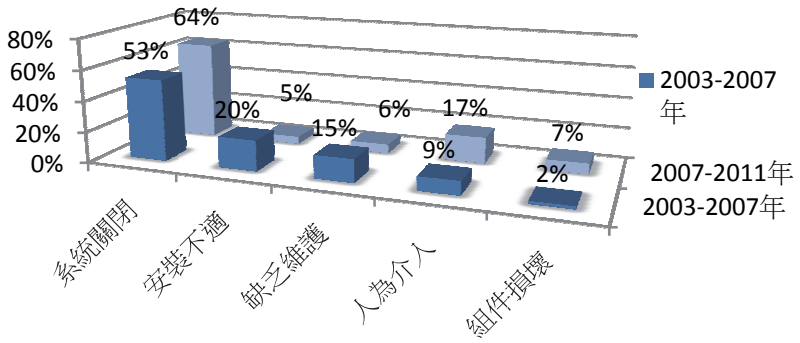


圖 2-3-1　美國防火協會統計撒水系統未動作原因

Budnick（2001）認為可靠度因仍具不確定性，故主張撒水系統可靠度應以平均值及 95%的信賴區間表示，表 2-3-1 為該研究在撒水系統於不同維護頻率及不同構件數據下，所評估之可靠度值及 95%信賴區間，Budnick 同時也指出撒水系統的形式、測試的頻率及維修情形等因素皆會影響動作之可靠度。

表 2-3-1　不同維護頻率下撒水系統之可靠度

可靠度 / 樣本	每個月維護一次的撒水系統	每個月維護一次的撒水系統	每三個月維護一次之撒水系統	每三個月維護一次之撒水系統
構件數據		原廠提供之失敗率	參考文獻之失敗率	原廠提供之失敗率

樣本 1	$0.949 < 0.993 < 0.999$	$0.864 < 0.984 < 0.997$	$0.854 < 0.978 < 0.998$	$0.684 < 0.971 < 0.996$
樣本 2	$0.949 < 0.993 < 0.999$	$0.840 < 0.971 < 0.994$	$0.854 < 0.978 < 0.998$	$0.665 < 0.963 < 0.993$
樣本 3	$0.949 < 0.993 < 0.999$	$0.864 < 0.984 < 0.997$	$0.854 < 0.978 < 0.998$	$0.684 < 0.971 < 0.996$
樣本 4	$0.949 < 0.993 < 0.999$	$0.864 < 0.984 < 0.997$	$0.854 < 0.978 < 0.998$	$0.684 < 0.971 < 0.996$
樣本 5	$0.949 < 0.993 < 0.999$	$0.864 < 0.984 < 0.997$	$0.854 < 0.978 < 0.998$	$0.684 < 0.971 < 0.996$
樣本 6	$0.948 < 0.993 < 0.999$	$0.856 < 0.981 < 0.996$	$0.852 < 0.978 < 0.997$	$0.665 < 0.963 < 0.993$

註：表列數值，中間為平均值，左右為信賴區間之上下限。

Bukowski 等人（1999）考量撒水系統是否動作之數據多取自文獻，故採用非條件可靠度，撒水系統動作不限訂於火災情況，分析結果撒水頭可靠度會隨場所不同而異，在商業場所動作可靠度為 88-98%，而在一般場所下動作可靠度則為 94-98%，可知撒水頭的動作可靠度高於 88%，如果非商業場所的話可靠度可提昇至 94%以上，相關結果可參閱表 2-3-2。

表 2-3-2　不同場所撒水系統動作可靠度一覽表

場所類別	住宅	機構	商業場所	一般場所	綜合平均值
可靠度	96.6%	96.6%	$88.1\% < 93.1\% < 98.1\%$	$93.9\% < 96.0\% < 98.1\%$	$92.2\% < 94.6\% < 97.1\%$

註：表列數值，中間為平均值，左右為信賴區間之上下限。

Gravestock（2008）指出可靠度及功效值相對於效能值較為穩定，而效能不僅因場所不同而異，且上、下限值範圍亦較廣，評估之可靠度、功效及效能值如表 2-3-3（此處「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」則為系統動作時撒水頭可否使用，及可否提供足夠水量及水壓）。其另指出，如欲獲得效能之機率分配以利進一

步運用，可在取得範圍情況下，假設其服從均勻分配；當知最大值時，則可假設其服從三角分配。

表 2-3-3　撒水系統效能一覽表

	可靠度	功效	效能	
			辦公場所	住宅
上限	99.9%	99.94-99.98%	99.5%	99.6%
平均值	99%	99.9%	98%	98%
下限	92%	98.7-99.78%	75-97%	74-89%

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、功效及效能，輔以蒙地卡羅模擬系統，計算撒水系統可靠度、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，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 2-3-4。

表 2-3-4　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%	

企業風險保險公司進行 10636 次實驗，結果撒水頭動作失敗的次數為 75 次，比例為 0.71%，而美國核能保險公司則進行 1400 次實驗，結果撒水頭動作失敗為 54 次，比例為 4.6%，兩者之撒水系統可靠度皆高達 95%以上，但這些數據為實驗所得結果，並未將人為因素造成撒水系統失敗之情形納入考慮，如系統遭人為關閉或缺乏人為適當維修等。

參、模式建構

一、撒水系統動作不確定性

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；或者因元件製作不良，尚未達撒水頭動作溫度，但撒水頭卻已動作之情況。因此，為克服複雜多樣且無法確定之影響因子，可嘗試以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，經比較撒水頭動作溫度、火源熱釋率等因子，考量採用可靠度評估方式，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，撒水頭動作時之火源最小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：

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

Q_{min}：撒水頭動作之火源最小熱釋率（kW），

T_{∞}：室溫（K）。

但上式僅可求得最小熱釋率，動作時之火源熱釋率仍無法以機率分配形式表示，然而 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，其對 Alpert 提出之公式（式 3-1-1）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。

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

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。

平常對於撒水頭動作溫度多以定值描述，但受限於生產技術及材料性質等多項因素，撒水頭成品之實際動作溫度難有一致性。另從 NFPA13 撒水系統規定中，可知其以溫度上、下限方式規定撒水頭實際測試動作溫度；而本國密閉式撒水頭認可基準中，規定撒水頭實際測試動作值亦以溫度上、下限方式呈現，以額定動作溫度之 95%為下限，115%為上限（密閉式撒水頭認可基準，2017）。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或範圍服從之機率分配，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，因此恐不適用，如假設適用均勻分配則較適合。故假定撒水頭於該熱釋率範圍內，撒水頭

動作之機率皆相等，亦即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），

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

Frank 等人（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，相關參數包括熱釋率、煙層高度及溫度與參數所服從之機率分配等（Frank 等人，2011），進行模擬並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，其中情境二撒水頭動作時間服從平均數為 4.922（s）及標準差為 0.648（s）的對數常態分配（圖 3-1-1），而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（圖 3-1-2），情境二因參數以隨機數值代入模擬，模擬結果顯示較為分散。

本研究參考 Frank 等人（2011）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$lnX\sim N(\lambda,\xi^2)$，其機率密度函數表示如式（3-1-4）：

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

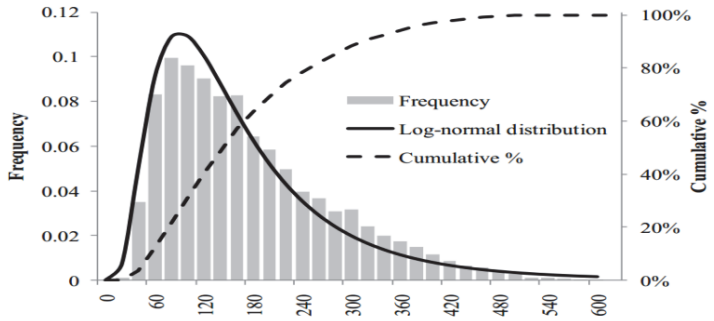


圖 3-1-1　情境二撒水頭動作時間（Frank 等人(2011)）

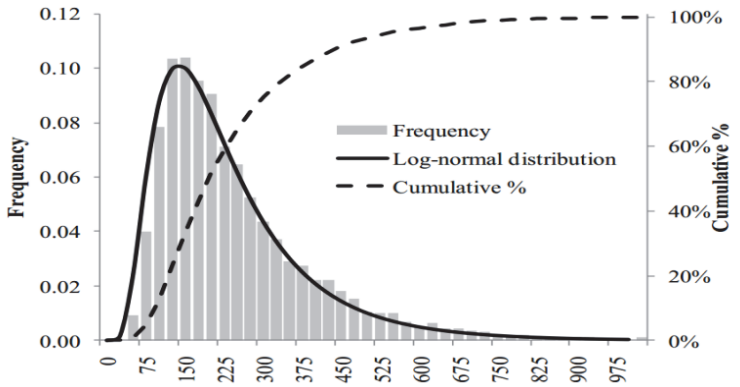


圖 3-1-2　情境二撒水頭動作時熱釋率（Frank 等人(2011)）

二、動作評估模式

本研究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）。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，則撒水頭動作的功能函數為$G_s = Q_R - Q_T$，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：

（一）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。

（二）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。

（三）Q_R與Q_T為相互獨立的隨機變數。

第一個假設的基礎係依學者對撒水頭動作研究的結果，第二個假設的基礎，則參考 NFPA13（2019）對撒水頭動作溫度的規定，並結合 Alpert 半實驗公式及 Tanaka 之概念而建立，但因無法找出適當描述撒水頭動作時火源熱釋率之機率分配，因此，在未知機率分配下，假設其服從均勻分配是合理近似的假設，對於其他不同類型或材質的撒水頭可能服從其他的機率分配，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。

綜上，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 3-2-1），而實際撒水頭動作之熱釋率Q_R及理論撒水頭動作之熱釋率Q_T機率密度函

數可分別以式（3-2-2）及（3-2-3）表示：

$$p_{sf} = p(Q_R - Q_T < 0) \cdots\cdots (3\text{-}2\text{-}1)$$

$$f_{Q_R}(q_R) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\xi_R q_R} e^{-(lnq_R - \lambda_R)^2/2{\xi_R}^2} \cdots\cdots (3\text{-}2\text{-}2)$$

$$f_{Q_T}(q_T) = \frac{1}{Q_{max} - Q_{min}} \cdots\cdots (3\text{-}2\text{-}3)$$

式（3-2-1）有關撒水系統動作失敗機率所要探討的情況是，火災成長到一定程度，天花板噴射流溫度已足以融化撒水頭熱感應元件，但撒水頭卻未動作的機率。因此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，並以功能函數小於零代表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的情況，其機率（1-p_{sf}）即代表撒水系統動作的可靠度。

肆、模擬結果與討論

一、蒙地卡羅模擬法

蒙地卡羅模擬為取得隨機變數值的方法之一，考慮撒水頭動作的問題含有許多隨機變數和不能確定數值的參數，且隨機變數轉換過程具函數關係，因此本研究採用蒙地卡羅模擬法評估撒水系統動作之可靠度。蒙地卡羅主要針對設計變數（design variables）產生與預定機率分配相對應的隨機亂數，透過取得介於 0 與 1 之間的標準均勻分配隨機數值，再經由適當的轉換可獲得與預定機率分配相對應的隨機變數值，配合電腦程式設計自動取得與預定機率分配相對應的隨機變數值，經重複多次的模擬，可使模擬結果趨近實際的結果。

本研究中建構之撒水系統動作評估模式中，假設實際撒水頭動作之熱釋率（Q_R）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（Angand Tang, 1984）：

（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~lognormal（μ_x, σ_x^2），則lnX為一服從常態分配的隨機變數，可記為lnX~N（λ_x, ξ_x^2），且對數常態與常態分配統計量之間的關係如下：

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

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

因此，實際撒水頭動作之熱釋率（Q_R）服從對數常態分配的之平均數（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），如表 4-1-1 所示。

表 4-1-1　實際撒水頭動作之熱釋率（Q_R）的平均值與標準差對照表

參數	μ_x	σ_x	λ_x	ξ_x
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（μ,σ^2）的獨立隨機數值。

$x_1 = \mu + \sigma\sqrt{-2lnu_1}\cos(2\pi u_2)$

$x_2 = \mu + \sigma\sqrt{-2lnu_1}\sin(2\pi u_2)$

如將μ以λ_x代入上式，σ以ξ_x 代入上式，且u_1及u_2以流程（一）之u_1及u_2代入，則所求得之獨立隨機數值則為服從常態分配的隨機數值lnX，即$x_1 = lnX$或$x_2 = lnX$，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。

二、撒水系統可靠度

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），防護半徑為 2.3 公尺（各類場所消防安全設備設置標準，2018），額定動作溫度之設定依據 Frank（2011）研究設定為 72℃，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（密閉式撒水頭認可基準，2017），因此，理論撒水頭動作範圍為 68.4℃～82.8℃。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～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，並以本研究提出之撒水系統動作功能函數評估撒水系統之可靠度，配合電腦程式執行蒙地卡羅模擬法，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（表 4-2-1），從表 4-2-1 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 4-2-1　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研究結果、紐西蘭火災統計資料或者保險公司實驗結果（如表 4-2-2），撒水系統可靠度皆高於 90%，而本研究模擬結果為 93.5%與文獻探討撒水系統可靠度相近。澳洲 Moinuddin Khalid（2019）研究報告指出，60 層以上高層建築物撒水系統可靠度介於 86%到 97%之間、購物中心則介於 90%到 98%之間。表 4-2-2 之資料，俟各國有進一步系統性調查研究時，可適時補充。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，在未考量定期檢修情形，本研究目前模擬之可靠度有高估趨勢。

表 4-2-2　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
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%

伍、結論

一、撒水系統可靠度定義眾說紛紜，本文首先有系統的探討撒水系統可靠度定義，

再探究評估撒水系統的方式，可區分為可靠度（reliability）、功效（efficacy）及效能（effectiveness）三項。

二、目前學者對於撒水系統可靠度的定義不盡相同，大致上可區分為動作可靠度及性能可靠度兩類，評估方式亦呈現多元化，部分學者統計火災案例中，撒水系統是否動作或者控制火勢，藉以推估撒水系統可靠度。有學者以固定空間固定時間內撒水頭損壞情形，推估撒水系統損壞之迴歸方程式，藉以推導撒水系統可靠度；也有學者以實驗方式了解撒水系統動作數量，並推算撒水系統可靠度。然而不管採用何種評估方式，所得撒水系統可靠度多高於 90%，顯示出撒水系統具極高的可靠度；惟採用統計火災案例的方式，可能涵蓋不同火勢大小及撒水頭動作時間的誤差等等，如未妥善的統計並分類，評估之可靠度仍有疑慮。相較之下，採用實驗的方式或許可具更高的可信度，此方式在歐美常為保險公司研發與採用，可望結合成法規並有效推廣施行。

三、本文以撒水系統動作評估模式對密閉濕式撒水系統，分別實施 500、1000、5000、10000 及 50000 等不同次數的模擬以評估可靠度，模擬次數為 500 及 1000 次時，模擬結果尚未收斂（參表 4-2-1），隨模擬次數增加達 5000 次時，撒水系統可靠度趨於一致，約為 93.5%。相對於美國防火協會定期調查之結果、紐西蘭火災統計資料或者保險公司實驗結果之撒水系統可靠度（參表 4-2-2），本文模擬結果與美國防火協會調查結果具有一致性，可知以撒水系統動作之火源熱釋率評估撒水系統動作可靠度為一可行的評估方式。

四、本研究評估撒水系統可靠度之功能函數，主要構想在於，結合 Frank（2011）研究結果，假設撒水頭實際動作之火源熱釋率，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；設定理論撒水頭動作之火源熱釋率上下限，並假設其機率密度函數服從均勻分配；且參考國內密閉式撒水頭認可基準，設定撒水頭額定動作溫度範圍等，據此以提出撒水系統動作功能函數進而評估撒水系統之可靠度，是充分掌握現有研究成果、重要影響參數與合乎國內現況等情境下所建立之機率式評估模型，改善以往研究常僅設定參數為常數之缺乏隨機性質的缺陷。

五、本研究評估撒水系統可靠度之功能函數，所引用的數據僅針對限定動作溫度之密閉濕式撒水系統，適用撒水系統範圍有限。因此，後續研究者可針不同類型之撒水系統進行研究，如密閉乾式或預動作式等，且其動作評估參數並不限定於動作之火源熱釋率，亦可嘗試以動作溫度或溫升（增）速率為可靠度評估標準。除了溫度與火源熱釋率外，反應時間指標（response time index, RTI）、火災成長率（fire growth rate）、撒水頭與天花板距離（sprinkler distance

from the ceiling）與火煙流溫度（plume temperature）等參數的變化與敏感度分析，後續研究可多加探討。此外，亦可針對某種類型撒水頭、或某種類型裝有自動撒水設備之建築物，長時間觀察記錄故障之撒水頭，有關故障數量及時間等資訊，佐以危險率（失敗率、故障率）函數（hazard rate function, failure rate function）概念，可望從另一角度估計撒水頭之可靠度（或撒水頭之故障率函數、壽命之機率密度函數）；另可對管線及幫浦系統等可靠度建立測試數據，將其加入評估模式，可使此機率預測模式更加多元與準確，供爾後撒水系統動作可靠度評估參考使用。

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., Tang, H. (1984), Probability Concepts in Engineering Planning and Design, Volume Ⅱ-Decision Risk, and Reliability. John Wiley and Sons.

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).

Frank, K., Spearpoint, M., Challands, N. (2012), Uncertainty in Estimating the Fire Control Effectiveness of Sprinklers from New Zealand Fire Incident Reports. Fire Technology, 50(3), 611-632.

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).

Gravestock, N. (2008), Effectiveness of Fire Safety Systems for Use in Quantitative Risk Assessments. Wellington, NZ: New Zealand Fire Service Commission.

Hall, J. R. (2006), An Analysis of Automatic Sprinkler System Reliability Using Current Data. National Fire Protection Association.

Hall, J. R. (2009), US Experience with Sprinklers and Other Automatic Fire

Extinguishing Equipment.National Fire Protection Association.

Hall, J. R. (2010), US Experience with Sprinklers and Other Automatic Fire Extinguishing Equipment. National Fire Protection Association.

Hall, J. R. (2011), Fatal Effects of Fire. National Fire Protection Association.

Hall, J. R. (2013), US Experience with Sprinklers. National Fire Protection Association..

Hauptmanns, U., Marx, M., Grünbeck, S. (2008), Availability Analysis for Fixed Wet Sprinkler System. Fire Safety Journal, 43(7), 468–476.

MoinuddinKhalid, (2019),Reliability of Fire Sprinkler System.16th International Fire & Safety Expo Korea.

NFPA 13 (2019), Standard for the Installation of Sprinkler Systems. NFPA, M. A., USA.

Rohr, K. D. (2001), US Experience with Sprinklers. National Fire Protection Association.

Šakėnaitė, J. (2009),The Problem of Sprinkler Reliability / Sprinkleriu Patikimumo Problema. Vilnius Gediminas Technical University.

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).

Tsui, A. and Spearpoint, M.J., (2010) Variability of Sprinkler Response Time Index and Conduction Factor using the Plunge Test, Building Services Engineering Research and Technology 31(2): 163-176.

各類場所消防安全設備設置標準（2018），內政部消防署 107/10/17 修正。

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。

密閉式撒水頭認可基準（2017），內授消字第 1060823004 號令。