

細水霧應用於艦船 消防滅火效果之探討

海軍上校 朱旭明

提 要：

- 一、艦船是由各種大小的封閉空間所組成，在火災過程所造成的損害通常是難以估計，因此消防系統對於艦船是相當重要的一環。
- 二、海龍1301是早期運用在艦船上的主要消防系統，但在環保意識抬頭，海龍便受到質疑。而另外也有利用鹵化煙做為消防系統，但是鹵化煙本身含有毒性，因此在使用時必須將船艦上的人員進行撤離，這段時間火災的損害仍舊持續不斷，因此也有其缺失。
- 三、水霧滅火原理主要表面冷卻、窒息、衝擊乳化和稀釋。水霧噴頭噴灑之霧滴粒徑細小，霧滴會迅速汽化，帶走大量熱量，使燃燒表面溫度迅速降到燃點以下，達到冷卻燃燒體之目的。
- 四、細水霧滅火系統具有滅火速度快、冷卻效果佳、95%以上濃煙抑制能力、用水需求量低、無分解物產生、符合環保趨勢、無毒性、無腐蝕性、無氧氣稀釋效果、降低設備損壞程度、復原成本低之特性。

關鍵詞：水霧、細水霧、滅火系統、艦船失火

壹、前言

長久以來，火災一向是艦船事故中發生率高、危害性大的威脅，火災發生後往往死傷慘重，且經濟損失巨大。尤以軍用艦船為甚，因其所處的特殊環境及所負擔的特殊使命，在有限的空間內集中有大量的人員和裝

備，需要裝載數量較多的燃油、彈藥等易燃、易爆物品，且軍用艦船在執行任務過程中還可能會遭受攻擊，較一般民用船舶更容易發生火災和爆炸。即使被視為「海上霸王」的航空母艦，在面臨火災的威脅時，也表現出極大的脆弱性，若對火災處理不好，往往會產生重大傷害。

貳、現行艦艇滅火作業缺失檢討

一般而言，艦艇於各部位均配置有可攜式CO₂，可即時就近處理小型火災，較大之火場則必須動員修理班人員，攜帶抽水泵、消防水帶等救火器材，並穿著救火衣與防煙防毒面罩，往往耗費時間，且可能會因此有延誤最佳滅火時機之情形。

從艦艇發生火災情形來探討，是以機艙失火最為嚴重(如表一)，因為機艙中包含有主、電機、輔機、配電系統、控制系統等裝備與各式油、水、污水管路，甚至艙底含油之排(污)水等，火災一旦發生，即會迅速蔓延擴大，對人員與裝備將造成嚴重傷害；現行機艙滅火方式，大多是以海龍或FM200系統進行封艙式滅火，此時，人員無法進入，更遑論是做出任何緊急處置，火場情況嚴重

時並再輔以修理班人員攜帶抽水泵、消防水帶等救火器材，以海水實施灌救，雖然可以達到滅火功效，但就效益而言，將對機艙重要裝備相對造成嚴重傷害，甚至無法復原，影響艦船後續的機動與維修成本增加。

此外，尚必須顧慮火災引起之煙塵與高溫，因為機艙是密閉空間，煙塵累積其中無法排出，起火相對引起機艙周遭金屬環境之高溫，並按照作業程序與人員安全考量，必須切斷火場電源、關閉通風，期間大約3至4小時，已限縮人員無法在短時間內進行搶救，倘失火點位於發電機與動力電盤附近，亦將造成裝備停機，艦船喪失動力，無法保持基本運作，肇生航安顧慮；更有甚者，若因火勢過大、溫度過高，而引起艙間悶燒，即有衍生船體變形、破裂、爆炸與沉船之危機。

綜上，基於有效實施機艙滅火與保持艦

表一 一般艦艇火災情形比較

部位	舵 房	機 艙	廚 房	帆纜庫房	控制室
火災種類	電器/電力火災	油類火災	高溫油脂或電器/電力火災	纜繩、帆布、油漆火災	電器/電力火災
火場範圍	裝備或電纜束起火	1. 可燃性液體外洩或艙底油水因高溫全面引燃 2. 煙塵巨大且濃黑	1. 高溫油脂起火 2. 電器/電力短路	彈藥、化學物質起火爆炸	裝備或電纜束起火
滅火方式	1. 輕便CO ₂ 滅火器 2. 高速水霧	1. AFFF系統軟管 2. AFFF龍帶泡沫真空抽 3. HALON、固定式CO ₂ 4. 高速水霧	1. 液態碳酸鉀滅火系統 2. 輕便CO ₂ 滅火器 3. 救火高速水霧	1. HALON、固定式CO ₂ 2. 救火高速水霧 3. 拋棄可燃性物資	1. 輕便CO ₂ 滅火器 2. 高速水霧
蔓延速度	較慢	快	較慢	較慢	較慢
損傷程度	人員均在部位易於控制	全面性引燃，無法及時控制	人員均在部位易於控制	悶燒伴隨煙幕，較易發覺與控制	人員均在部位易於控制

資料來源：本文整理

船基本運作及控制損害範圍、降低復原成本，實有必要就現行之滅火方式，作一精進探討。

參、細水霧滅火系統之滅火效能與原理

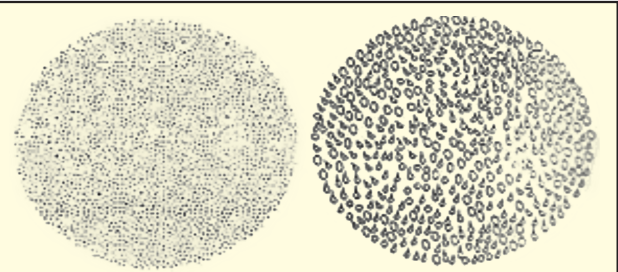
在科技發達的今日，水仍然是重要的消防滅火劑，以水為滅火劑之滅火系統主要可分為撒水頭(Sprinkler)、水霧(Water spray)和細水霧(Water mist)，主要區分在於水滴粒徑大小之不同，不同的水滴粒徑在消防滅火中扮演著不同的角色。

細水霧滅火系統主要是藉由壓力、特殊噴頭設計將水流碎化分解成許多小液滴，使在一定量體積之水能增加吸熱表面積對體積之比值(Surface to Volume Ratio)，以便進行火源抑制或是防護冷卻時能增加冷卻火焰及煙層溫度之效能，並產生隔絕氧氣降低氧氣的持續供應(氧氣窒息)與減少熱輻射等抑火機制，達成火災防護之目的。

細水霧系統與標準撒水頭噴撒之水滴樣態(如圖一所示)，粒徑大小有明顯有區別，以同樣容量的水量，若單以水滴之樣態來比較兩者較明顯之差異可以(如表二所示)。

美國國家防火協會(NFPA)所制定之NFPA 750中〔註一〕，列出5項細水霧滅火系統設計之功能目標如下：

- 一、撲滅火勢：可抑制火勢並進一步有效撲滅火勢，使火場中無燃燒狀況。
- 二、抑制火勢：可有效降低火場熱釋放



圖一 細水霧與標準撒水頭噴撒水滴之樣態比較
資料來源：97年物業管理種子教師培訓班第二期講習訓練教材「消防設備與檢修」，頁77

表二 相同水量下細水霧與標準水滴性質之比較

	細水霧	標準水滴
水滴數量	水滴粒子較多	水滴粒子較少
水滴面積	水滴總面積較大	水滴總面積較小
蒸發程度	大部分水滴蒸發為水蒸氣	大部分水滴未蒸發
滅火方式	蒸氣吸收大部分的火焰熱量並降低其溫度	水滴塗佈可燃物表面，藉水來吸收熱量

資料來源：簡賢文、薛裕霖－「揭開細水霧滅火系統神秘面紗～影響滅火性能因素及所適用場所探討」

率(Heat Release Rate)，使可燃物不再復燃。

三、控制火勢：噴撒火場鄰近未燃物，預先冷卻防護，控制火勢成長。

四、控制溫度：可降低室內溫度維持出入口安全性，減低高溫對逃生者的危害。

五、防止延燒：噴撒火場鄰近未燃物，延遲其引燃之時間。

根據Hankins在F. M. 所進行的實驗結果中發現〔註二〕，設有撒水系統可在整個火災過程中藉著水的冷卻效果來減低火場溫度

註一：“NFPA 750 2000 edition：Standard on Water Mist Fire Protection Systems”
註二：Joseph, H., “Sprinkler Systems: An approach to Active Fire Resistance” , U.S. Department of Commerce, National Bureau of Standard, Final Report, Dec. 1980, Washington, D.C. 20234, pp.197-200.

，而未設置撒水設備的情況下，一般室內的最高溫度將有相當長的時間會超過1000°F (538℃)以上，但是有設置撒水設備者其火場最高溫度都在1000°F以下。設有水系統或許不一定能一舉滅火，但卻能將室內火場溫度控制在一定溫度以下，或延長閃燃發生的時間。

Fristrom研究指出水的滅火機制藉由水本身的熱容量與蒸發潛熱將熱從火源處帶走〔註三〕，同時水會稀釋燃料(在可溶於水之液態燃料情況下)或者是覆蓋住燃料(在燃料表面形成一個隔絕)並且水在吸熱變成水蒸氣的過程體積會膨脹1700倍，具有稀釋周遭氧氣和油氣的特性進一步抑制火源燃燒。水的滅火機制主要可分為：

一、冷卻或預濕燃料表面，降低高溫分解的速率，也就是降低燃料提供到火焰區的速率，因此可以降低熱釋放率與火焰回授到燃料表面之輻射熱。

二、直接冷卻火焰區，中斷燃燒化學反應。部分的反應生成熱會轉移至加熱液態水滴並將水蒸發，火焰燃燒區附近反應生成的熱量將會大量減少。

三、氧氣被置換，主要是水吸收燃燒熱量變成水蒸氣的過程體積會膨脹，氧氣的空間位置將會被水蒸氣取代，氧氣的濃度將會降低。這就是所謂的「火焰窒息」。

當水霧滅火運用於消防上時同常會同時

出現數種滅火機制，由於水霧具有適用範圍廣的優點，不僅在撲滅固體可燃物火災中提高水的滅火效率。同時由於水霧液滴具有不會造成液體火災飛濺、電器絕緣度高的特點，國內外大量進行水霧滅火實驗，確定的水霧的滅火效果，並以法規明訂廣泛的運用於撲滅可燃液體火災和電器火災中。

經由近年來不斷的研究，細水霧系統已經被證實其獨特之滅火效應可以用在許多場所之滅火防護工作上，尤其是在平時人員常駐的地方、易燃性液體儲存設備、電氣設備空間的消防使用上。另外Mawhinney發現預先弄濕鄰近之可燃物的表面可控制火勢的擴大，能夠有效的延遲著火延燒的時間〔註四〕，而1989年Ravigururajan和Beltran研究指出輻射熱的減少與水滴粒徑的大小和粒滴的質量密度有關，越小、越密集的水滴將更有效的阻隔輻射熱，小水滴水霧可以形成熱阻防止因來自輻射之熱量進一步加熱燃燒和未燃燒之燃料表面〔註五〕。

水的粒滴越細小，可以增加粒滴的吸熱表面積及蒸發率，能更有效的抑制火源，水霧粒滴大小與表面積的關係(如表三所示)。為了說明水滴平均直徑與表面積之相對關係，因此將一公升的水假設為一定數目具有相同直徑的水滴，並且為理想的球體。將1公升的水細分為i個具有相同體積的水滴〔註六〕：

註三：Fristrom, R.M., “Combustion suppression” , Fire Research Abstracts and Reviews, Sep. 1967, pp.125-160.
註四：Mawhinney, J.R., and Back, G.G., “Bridging the Gap Between Theory & Practice: Protecting Flammable Liquid Hazards Using Water Mist Fire Suppression Systems” , Fire Suppression and Detection Research Application Symposium, Feb. 1998,Orlando, FL.
註五：Ravigururajan, T.S., and Betran, M.R., “A Model for Attenuation of Fire Radiation Through Water Droplets” , Fire Safety Journal, Vol. 15, 1989, pp.171-181.
註六：Herterich, A.O., “Water as an extinguish agent” , Heidelberg: Alfred Huthig Publishing Company, 1960.

$$V_{total} = i \frac{\pi d^3}{6} = 10^6 (mm^3) \dots\dots\dots (1-1)$$

因此每一個水滴的直徑為

$$d = \frac{\sqrt[3]{6 \times 10^6}}{i \pi} (mm) \dots\dots\dots (1-2)$$

$$S_{tot} = i \pi d^2 (mm^2) \dots\dots\dots (1-3)$$

另一種普遍用來表示粒滴直徑大小的方式，是利用累積體積平均滴徑百分數 (Volume median diameter；VMD)〔註七〕，代表小於某直徑範圍內的所有粒滴體積佔全部粒滴體積的百分數。用Dv0.5來表示；在此有一半的水滴體積其滴徑會大於Dv0.5，而另外一半的水滴體積其滴徑會小於Dv0.5。

細水霧粒滴吸熱冷卻火焰或燃燒表面形成水蒸氣，1994年Kanury的研究指出〔註八〕，粒滴的蒸發率與周遭溫度、粒滴表面積、熱傳係數及粒滴與周遭氣體的相對速度有關。對於水霧粒徑範圍在100 μm < d < 1000 μm之間其熱傳係數與粒徑大小之關係可表示成〔註九〕：

$$H = \frac{0.6}{d} K P_r^{1.5} R_e^{0.5} \dots\dots\dots (1-4)$$

其中 d：水霧粒徑

K：空氣之熱導率

Pr：Prandtl Number

Re：Reynolds Number

較小的水滴粒子由於其重量較小，停留在起火空間中的時間較長，相對吸收熱量的時間也較長，相反的由於輕所以也亦受空間內氣流的影響，包含火源燃燒所造成內部氣流流動及空間相關的通風條件，根據Yule和Eereaut於1996年實驗指出，最佳滅火水滴的粒徑會受通風條件、火源大小及燃燒的特性影響〔註十〕。

肆、細水霧滅火系統應用於艦船區域範圍探討

CO₂和海龍滅火系統在機艙滅火已有多年的歷史〔註十一〕，但隨著淘汰海龍和考量使用二氧化碳滅火系統的安全問題，鹵化烷系氣體藥劑和細水霧滅火系統被視為是可以接受的替代滅火系統來提供艦船機艙的防火。但目前的研究中，因為考慮鹵化烷系氣體藥劑其具有毒性、以及對環境的影響和從熱表面移除熱量的有限能力，所以細水霧已被視為一種理想的替代滅火系統來提供艦船機艙的防火。

自1990年以來，國際海事組織(IMO)為針對於船舶機艙室細水霧滅火系統取代自動噴水滅火系統制定了火災試驗草案〔註十二〕。UL依據國際海事組織的測試草案，更編

註七：Mugele, R., and Evans, H.D., “Droplet size distribution in sprays” , Ind Engng Chem, 1994, 43(6), pp.1317-1324.
註八：Kanury, A.M., “Introduction to Combustion Phenomena” , Eighth Edition, Gordon and Breach Science Publishers, USA, 1994.
註九：Herterich, A.O., “Library of the Science of Fire Protection and Related Area: Section 3: the Diffuse Jet-Spray Jet” , Heidelberg: Alfred Huthig Publishing Company, Germany, 1960.
註十：Yule, A.J., Eerreaut, P.R., and Unget, A., “Droplet Sizes and Velocities in Vaporizing Sprays” , Combustion and Flame, Vol. 54, 1983, pp.15-22.
註十一：Mawhinney, J.R., "Engineering Criteria for Water Mist Fire Suppression Systems,"Proceedings: Water Mist Fire Suppression Workshop, NIST, Gaithersburg, MD,1993, p.37.
註十二：International Maritime Organization (IMO), "MSC/Circ. 668, ANNEX, APPENDIX A (Component manufacturing standards

寫了船艦機艙的細水霧滅火系統的性能要求-UL2167標準草案。

在過去十年中，進行了許多測試其中包括小尺寸(24m³)到全尺寸(由國際海事組織定義的classⅢ引擎室)，已進行了對船舶機艙室之細水霧滅火系統的性能與限制評估。各種不同細水霧系統的性能，包括修改工業用噴嘴、市場上的細水霧系統來作相關的評估。火災情景包括各種火災類型，火源尺寸和火災場所，以及各種燃料種類和不同的起火來源。在這些實驗中所包括的參數有細水霧特性，細水霧系統的形式，各種通風條件和滅火添加劑。

細水霧滅火系統對各種暴露和有保護的碳氫化合物油池火源、噴射火災及層疊火災，以及可能發生於船舶機艙室的A類火災及B類火災都可以有效的滅火。和氣體滅火系統相比，細水霧滅火系統滅火時間較長。但可以快速控制火源和有效冷卻船舶機艙室，並使燃燒所產生的CO和CO₂維持在一個低水平。依據加拿大國家研究院(NRC)的實驗，在根據火災規模和預燒期間下，細水霧系統在開啟15秒之內，船舶機艙室溫度下降到50℃，且在實驗中量測到最高的CO和CO₂濃度低於0.08%和3.5%〔註十三〕。可研判應用了細水霧系統之後，在這樣的熱條件和氣體濃度下的船舶機艙室，對於消防員的進入，

已經提供足夠安全的保障。

伍、艦艇機艙火場模擬驗證規劃

經參考國際海事組織(International Maritime Organization, IMO)〔註十四〕及美國海岸巡防隊(United States Coast Guard, USCG)有關船、艦用細水霧規範，進行燃燒測試驗證，以評估細水霧應用於船艙消防安全之適用性。船艙的實驗設定與配置如下：

- a. 模擬艙間尺寸：8.75m長×3.5m寬×5.7m高(輪機艙間)。
- b. 通風要求：關閉、開啟。
- c. 船艙出口：封艙、不封艙。
- d. 火源：噴射火源、油池火源。
- e. 滅火系統壓力：低壓(P≤175PSI)、中壓(175PSI<P<500PSI)、高壓(P≥500PSI)。
- f. 模擬情境在「模擬尺寸」不變下，依上述「通風要求」、「船艙出口」、「火源」及「滅火系統壓力」等不同條件交互設定。

一、幾何空間配置情形

根據上述需求，參考國際海事組織機艙試驗規範〔註十五〕，做為執行模擬與試驗的空間配置的架構，以下為其本配備(詳細位置請參考圖二至圖六)：

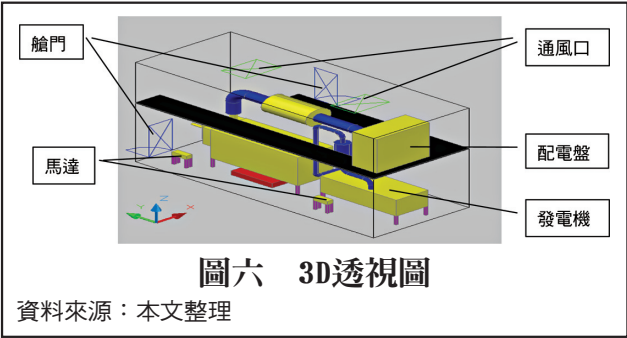
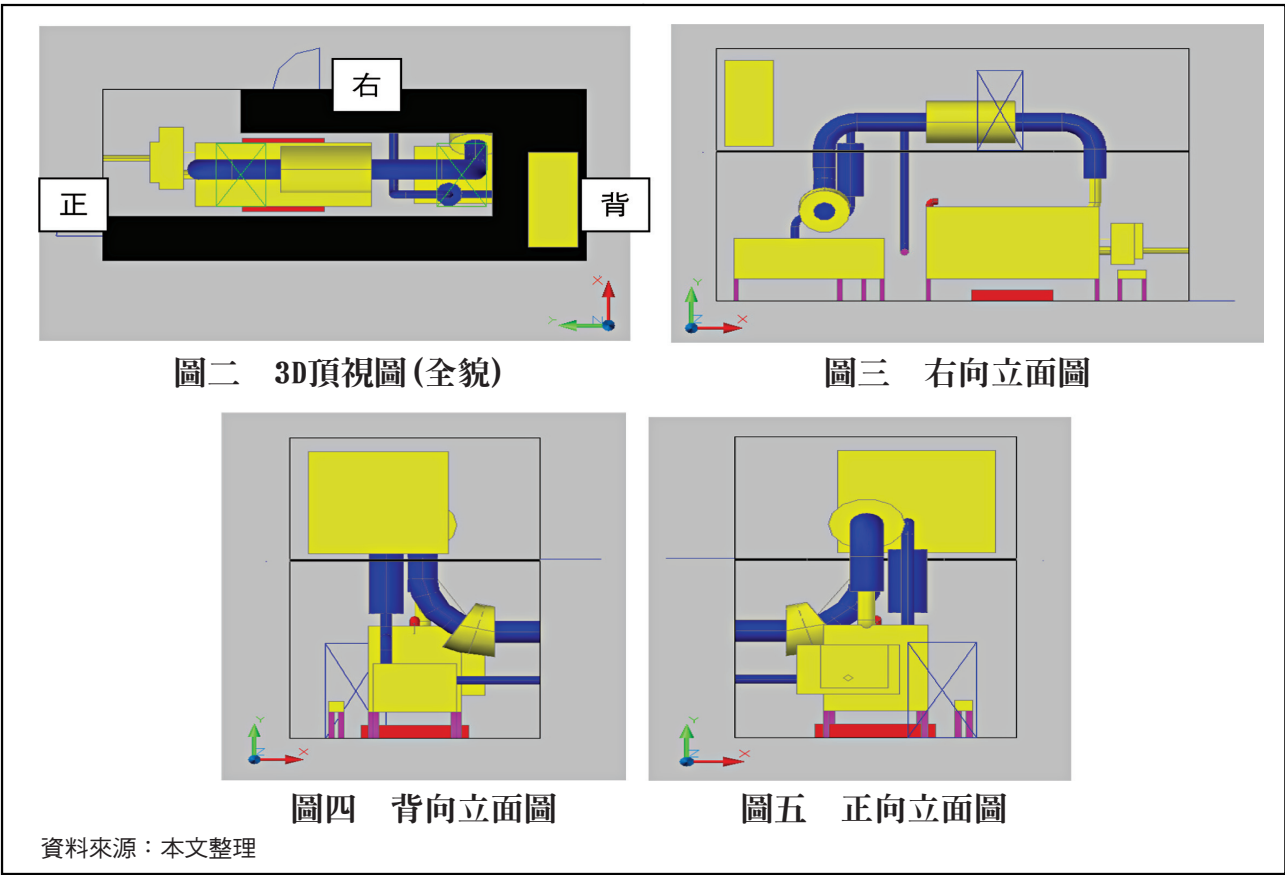
- (一)艙門：位於船艙上方甲板處。

of equivalent water-based fire extinguishing systems) and APPENDIX B (Interim test method for equivalent water-based fire-extinguishing systems for machinery spaces of Category A and cargo pump rooms),. London, 1994.

註十三：Kim, A. K., Liu, Z. and Su, J. Z.,Full-Scale Fire Testing of Water Mist Systems Private Communication, 1997.

註十四：IMO MSC/Circ.668, “Alternative Arrangements For Halon Fire-Extinguishing System In Machinery Spaces And Pump-Rooms” , 1994.

註十五：IMO MSC.1/Circ.1237, “Amendment To The Revised Guidelines For The Approval Of Equivalent Water-Based Fire-Extinguishing Systems For Machinery Spaces And Cargo Pump-Rooms (MSC/CIRC.1165)” , 2007.



- (二) 空調：1進風口、1排風口(圖中綠色開口)。
- (三) 船艙空間：包含1甲板(黑色)。
- (四) 設備：引擎(連接排氣管)、發電機(連接排氣管)、配電盤及馬達。

二、火源設定

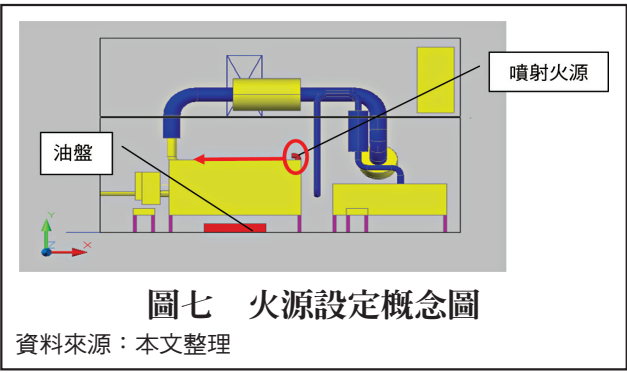
(一)噴射火源(Jet Fire)

參考美國海岸巡防隊(USCG)有關船艦用細水霧規範〔註十六〕及國際海事組織機艙試驗規範〔註十七〕，在噴射火源的情境設定裡，研究設定於引擎(燃油機)的輸油管的接管上(圖七中的紅色管子)，紅色箭頭的方向表示油管洩漏噴射的方向，即為火焰噴射的方向。

依據國際海事組織機艙試驗中spray fire的規範，規定如下(如表三)：

其中燃料噴頭應水平配置，噴油方向朝

註十六：USCG, "Sprinkler and Water Mist Extinguishing Systems", 2009.
註十七：IMO MSC/Circ. 913, "Guidelines For The Approval Of Fixed Water-Based Local Application Fire-Fighting systems For Use in Category A Machinery Spaces", 1999.



表三

噴 頭	80° 錐形噴頭
燃油壓力	8.5 Bar
燃油流速	0.03±0.005kg/s
燃油溫度	20±5℃
熱釋放率	1MW

資料來源：本文整理

表四 6個情境編排順序表

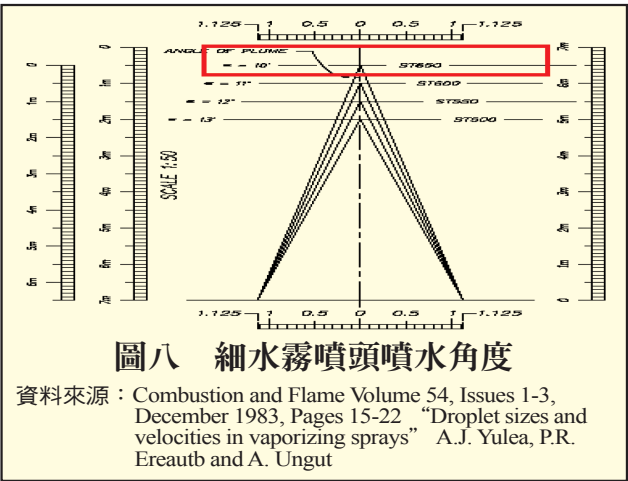
	通風 (280M ³ / min)		封艙	火源	低壓	中壓	高壓
Case1	關		是	噴射火源		V	
Case2	關		是	噴射火源			V
Case3	關		是	油池火源		V	
Case4	關		是	油池火源			V
Case5	關		否	噴射火源			V
Case6	關		否	油池火源			V

資料來源：本文整理

向細水霧噴頭噴灑的下方(如箭頭所示)。

(二) 油池火災

參考美海軍實驗室的設定〔註十八〕，並考慮空間體積的差異、細水霧啟動滅火時間及實驗時的安全。預計將2.25平方米的油盤置於引擎道具的下方(圖中引擎下方的



紅色塊體)，燃料使用柴油，火載量設定為2.15MW。表四為「通風要求」、「船艙出口」、「火源」及「滅火系統壓力」等不同條件交互設定，編排6種模擬情境來實施模擬。

三、細水霧噴頭選擇與佈點設計

(一) 細水霧噴頭選擇

考量低壓(P≤175PSI)、中壓(175PSI < P < 500PSI)、高壓(P ≥ 500PSI)對滅火效果的性能評估。此外防護空間高度亦是考量要素，因此選擇可適用於上述不同壓力下及安裝高度極限皆能符合的噴頭。

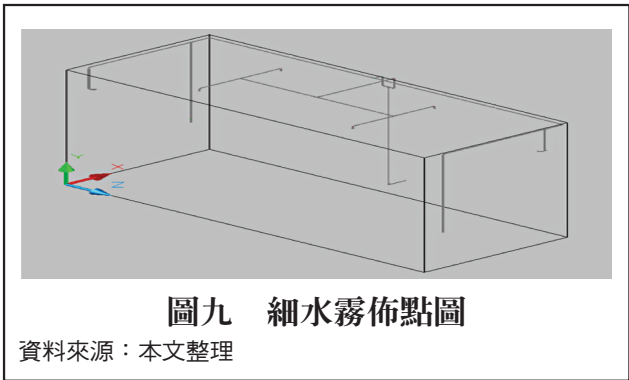
圖八為不同類型噴頭噴水的散佈角度，從該圖可以發現ST650噴頭因壓力噴射範圍較廣，本案選擇使用ST650的噴頭進行試驗，若日後考慮將細水霧系統應用於艦船上，可較為節省成本。

(二) 細水霧噴頭佈點設計

依據FM & VDS對細水霧噴頭於機艙的配置，本案設計垂直(90°)與水平(180°)共8顆噴頭配置(如圖九)做為空間防護規劃。

四、邊界條件設定

註十八：IMO MSC/Circ.1007, ” Guidelines For The Approval Of Fixed Aerosol Fire-Fighting systems Equivalent To Fixed Gas Fire-Fighting systems, As Referred To In SOLAS 74, For Machinery Space, 2001.



- (一) 考量模擬與實體的一致性，所有的道具塊體與艙體結構皆設定為鐵類材質。
- (二) 細水霧滅火系統啟動之前，封閉艙門但通風保持正常，以維持火源的正常燃燒，待細水霧滅火系統啟動後，再依24個情境中有關艙門與通風之條件持續進行模擬。
- (三) 艙門開啟時的通風條件設定為自然通風，通風開啟時的通風條件依業主指定為風速 $280\text{m}^3/\text{min}$ 。
- (四) 在火源引燃後燃燒的15秒以內，細水霧滅火系統必須啟動滅火。
- (五) 模擬時間(Simulation Time)須涵蓋引燃火源到細水霧釋放後的5分鐘為止，若未達5分鐘火已熄滅，則可逕行停止模擬。

陸、實際驗證結果

- 一、CASE1：通風關閉、封艙、噴射火源、中壓
 - (一) 開啟排煙口、關閉艙門、設定壓力為中壓(24bar=348psi)。
 - (二) 因泵浦開啟後需要約10秒的蓄壓時間，因此在點火完成後5秒即啟動泵浦。
 - (三) 點火完成即開始記錄時間，若火焰熄滅即停止紀錄，若未熄滅則記錄5分鐘。

- (四) 實驗結果：約在55秒時火焰熄滅
- 二、CASE2：通風關閉、封艙、噴射火源、高壓
 - (一) 開啟排煙口、關閉艙門、設定壓力為高壓(36bar=522psi)。
 - (二) 因泵浦開啟後需要約10秒的蓄壓時間，因此在點火完成後5秒即啟動泵浦。
 - (三) 點火完成即開始記錄時間，若火焰熄滅即停止紀錄，若未熄滅則記錄5分鐘。
 - (四) 實驗結果：約在56秒時火焰熄滅
- 三、CASE5：通風關閉、不封艙、噴射火源、高壓
 - (一) 開啟排煙口、開啟艙門、設定壓力為高壓(36bar=522psi)。
 - (二) 因泵浦開啟後需要約10秒的蓄壓時間，因此在點火完成後5秒即啟動泵浦。
 - (三) 點火完成即開始記錄時間，若火焰熄滅即停止紀錄，若未熄滅則記錄5分鐘。
 - (四) 實驗結果：約在150秒時火焰熄滅
- 四、CASE3：通風關閉、封艙、油池火源、中壓
 - (一) 開啟排煙口、關閉艙門、設定壓力為中壓(24bar=348psi)。
 - (二) 因泵浦開啟後需要約10秒的蓄壓時間，因此在點火完成後5秒即啟動泵浦。
 - (三) 點火完成即開始記錄時間，若火焰熄滅即停止紀錄，若未熄滅則記錄5分鐘。
 - (四) 實驗結果：如表五，火焰熄滅時間為219秒、234秒、271秒，平均為241秒。
- 五、CASE4：通風關閉、封艙、油池火源、高壓
 - (一) 開啟排煙口、關閉艙門、設定壓力

表五 實驗結果一覽表－艙體縫隙有處理							
	封艙	不封艙	火源	中壓	高壓	模擬結果	實驗結果
Case3	V		油池火源	V		75秒撲滅	219秒撲滅
							234秒撲滅
							271秒撲滅
						平均滅火時間	241秒撲滅
Case4	V		油池火源		V	75秒撲滅	279秒撲滅
							297秒撲滅
							330秒撲滅
						平均滅火時間	302秒撲滅
Case6		V	油池火源		V	未在5分鐘內撲滅	未在5分鐘內撲滅

資料來源：本文整理

為高壓(36bar=522psi)。

(二)因泵浦開啟後需要約10秒的蓄壓時間，因此在點火完成後5秒即啟動泵浦。

(三)點火完成即開始記錄時間，若火焰熄滅即停止紀錄，若未熄滅則記錄5分鐘。

(四)實驗結果：如表五，火焰熄滅時間為279秒、297秒、330秒，平均為302秒。

六、CASE6：通風關閉、不封艙、油池火源、高壓

(一)開啟排煙口、開啟艙門、設定壓力為高壓(36bar=522psi)。

(二)因泵浦開啟後需要約10秒的蓄壓時間，因此在點火完成後5秒即啟動泵浦。

(三)點火完成即開始記錄時間，若火焰熄滅即停止紀錄，若未熄滅則記錄5分鐘。

(四)實驗結果：如表五，火焰無法在5分鐘內熄滅，但已有效抑制與可控制。

七、結果探討

在噴射火源實驗中，細水霧系統可以在短暫的時間內(60秒以內)撲滅其火勢，就撲

滅時間上來看，使用中壓或高壓的差異在2％以內；而在油池火源的部分，細水霧系統亦能發揮滅火的效能，但使用中壓或高壓的差異就很明顯，平均來看，中壓的滅火時間大約在241秒左右，而高壓的滅火時間大約在302秒左右，相差大約60秒，造成此差異的原因可以從粒徑大小的蒸發速度與撒水頭安裝高度來說明。

為了發揮水霧滴吸熱冷卻之滅火效應，水霧滴需在火場中有足夠的時間能對火焰進行蒸發冷卻。假使水霧滴完成蒸發時間比水霧滴在火焰區停留間短，則液滴在到達燃料表面前將完全蒸發。相反的，若水霧滴蒸發所需時間較其在火場空間殘留時間長，則水液滴之質量受蒸發影響而降低之效應將不顯著。在此情形下，火源無法藉由火焰冷卻之滅火機制來加以撲滅。水霧滴完全蒸發時間包括加熱時間與蒸發時間，水霧滴在穩態蒸發過程中，任何時刻下之粒滴直徑與其初始粒徑可以寫成下面關係式：

$D_0^2 - Dx^2 = \lambda t$
D₀：初始水霧滴粒徑大小(μm)
D_x：任何時刻下水霧滴粒徑大小(μm)
t：時間(sec)
λ：蒸發係數(m²/sec)
蒸發係數(λ)可以透過下列公式計算〔註十九〕：

$$\lambda = \frac{8k \ln(1+B)}{C_p \rho_F}$$

k：水蒸汽之熱傳導係數(2.48×10⁻² W/m·K)
C_p：水蒸汽之比熱(2 kJ/kg·K)
ρ_F：水的密度(958.4 kg/m³)
B：Jakob number
熱傳無因次常數Jakob number主要是定義水霧滴由液相相變化至汽相過程中顯熱與潛熱吸收能量比，可進一步定義為：

$$B = \frac{C_p(T_\infty - T_b)}{L}$$

T_b：水霧滴表面溫度(K)
T_∞：水霧滴周遭氣體溫度(K)
L：水的潛熱(2257.1 kJ/kg)
細水霧系統作動後(點火後15秒)火場最高溫度約為200℃，分別取水霧液滴所受周遭火場溫度T_∞=523K(250℃)、T_∞=473K(200℃)、T_∞=423K(150℃)、T_∞=398K(125℃)及T_∞=373K(100℃)進行蒸發所需時間計算，其他條件為：

水霧滴表面溫度T_b=373K；
水的潛熱L=2257.1kJ/kg；

表六 水霧液滴蒸發所需時間					
溫度 粒徑	250℃	200℃	150℃	125℃	100℃
	523K	473K	423K	398K	373K
85 μm	0.35秒	0.43秒	0.56秒	0.66秒	0.82秒
125 μm	0.75秒	0.93秒	1.21秒	1.44秒	1.78秒
200 μm	1.93秒	2.37秒	3.10秒	3.68秒	4.55秒
300 μm	4.35秒	5.33秒	6.97秒	8.28秒	10.24秒

資料來源：本文整理

表七 水霧液滴落下所需時間		
	5.7m〔註二十〕	3.5m
85 μm	1.00秒	0.77秒
125 μm	0.97秒	0.74秒
300 μm	0.91秒	0.68秒

資料來源：本文整理

水蒸汽的比熱CP=2kJ/kg.K；
水蒸汽之熱傳導係數k=2.48×10⁻² W/m.K；
水的密度 ρF=958.4kg/m³
將上述性質條件1代入上式公式計算，分別計算水霧滴粒徑85 μm～300 μm在本實驗條件下水霧滴蒸發所需時間。計算結果(如表六所示)。

忽略火源燃燒產生之熱浮力，以自由落體公式計算85 μm～300 μm水霧液滴落下之時間，計算結果(如表七所示)。

表六、七可知，油池火源燃燒的空氣最高溫度約200℃時，高壓所產生的粒徑(85 μm)落下時間約需1秒，但蒸發時間卻僅0.43秒，即水霧液滴尚未落至火源附近時即被蒸發。而中壓產生的粒徑(125 μm)落下時

註十九：Lefebvre A. H.,1989, “Atomization and sprays” ,Taylor & Francis,New York.
註二十：5.7m為撒水頭至地面高度，3.5m約為撒水頭至噴射火源之高度。

間約需0.97秒，但蒸發時間約為0.93秒，表示其水霧液滴接近火源附近才被蒸發。可說明為何油池火源實驗時，中壓具有較好的滅火效能。而噴射火源燃燒的空氣最高溫度約100℃時，高壓產生的粒徑(85 μm)落下時間約需0.77秒，蒸發時間耗時0.82秒，而中壓產生的粒徑(125 μm)落下時間約需0.74秒，但蒸發時間約為1.78秒，表示兩種壓力產生的水霧液滴均能至火源附近才被蒸發，所以均有吸收熱量與阻隔氧氣之效果。

柒、結語與建議

一、結語

(一)在上述6個情境實驗結果顯示，在通風與艙門同時關閉時，無論是中壓或高壓噴灑之下的油池火源或噴射火源，皆大約能於5分鐘之內將火勢撲滅，嚴格比較之下，中壓系統有比高壓系統較短的滅火時間。

(二)細水霧對火場的降溫與煙霧的洗滌也呈現良好的效果。因此細水霧滅火系統對發生火災時之船體結構展現良好隔熱保護作用；對火場人員的逃生避難，及搶救人員的搜救行動所造成的視覺障礙不大，同時也減輕煙塵粒子對設備所造成的污染。

(三)在油池火源情境下，置於地板的油池火源剛好在火場動力學裡，外部新鮮空氣引入的範圍內，因火場內燃燒所產生的負壓與向上熱流，牽引外部新鮮空氣從任何未密封的空隙進入地板上方附近，進而提供燃燒所需要的氧氣。所以需要更久的時間(Case 3, Case 4)讓水霧受熱蒸發膨脹來包圍火源，產生窒息效果。對於未封艙的Case 6在外

部新鮮空氣引入的效應之下，當然無法撲滅地板上的油池火源。

(四)火場行為是非線性的現象，從前國外的實驗中也發現，在相同的環境條件下重複多次實驗，針對火源被撲滅時間的紀錄也有20%-80%的變化範圍。在本次實驗中，火源被撲滅時間僅呈現10%的範圍變化，故是一個重複性且可被接受的實驗結果。

二、建議

(一)就實驗結果看來，無論是油池火源或是噴射火源，細水霧系統都能獲得良好的抑制與撲滅效果；在細水霧系統的選擇上，從實驗證明使用「中壓」(125 μm)可為較適合的選擇；成本上來說，加壓泵浦只需達到中壓24bar(348psi)左右，不需達到高壓36bar(522psi)，加壓泵浦的成本可以降低；在水量方面，以中壓噴灑20分鐘所需水量大約是2.2公噸，使用高壓則需要2.7公噸，因為船艙上的淡水用途相當廣泛，所以能夠減少其滅火時的使用量，對於船上作業人員來說有著較大的幫助。

(二)針對設備損害管制部分，為避免艙間配置有可能會造成水霧粒子凝結而滴落，而造成電器裝備短路或漏電，因此建議上方加裝防護措施。水本身雖無腐蝕性，若在船艦上使用的话，必須搭配海水淡化抑或是直接使用淡水，以免使用海水造成機具、儀器受海水侵蝕而損壞。

(三)本案例探討僅就「通風與艙門開關之影響」、「不同壓力的滅火成效差異」進行基礎探討並獲得初步可行的結論，建議未來還可以在以下議題作研討，讓細水霧應用

於船艦消防系統更為合理、有效。

- 1. 噴頭在不同擺設位置、角度及壓力對火源撲滅的成效差異。
- 2. 不同的噴頭與擺設位置、角度及壓力對火源撲滅的成效差異。
- 3. 單流系統與雙流系統(加氮氣)對滅火成效的差異。

- 4. 細水霧滅火系統與其他滅火系統(泡沫)同時放射時對滅火成效的交替影響。 錨

作者簡介：
朱旭明上校，中正理工學院73年班，國防管理學院91年班，交通大學工程管理碩士在職生，現服務於海軍司令部計畫處。

老軍艦的故事

中鼎軍艦 LST-203

中鼎艦在公元1946年完工下水並成軍，於美海軍服役時之編號為LST-537，二次世界大戰期間，曾參加過多次登陸戰役，乃是美國Amerion Bridge Co.所建造。

民國35年5月29日美國以美援名義於我國青島將該艦移交我國，我海軍於接收該艦後立即成軍，命名為「中鼎」，編號為203，直隸海軍總司令部，民國39年2月改隸第三艦隊，後又改隸登陸艦隊及兩棲艦隊，執行人員及車輛登陸與外島運補等任務。

該艦服勤期間曾參加多次戰役，較重要的有37年遼西會戰、38年海南保衛戰、44年大陳島撤退戰、以及47年金門「八二三砲戰」期間，執行「閃電計畫」二次，「鴻運計畫」九次。該艦在共軍密集的砲火封鎖下，載運兩棲登陸戰車(LVT)及軍品物資至金門料羅灣搶灘運補，歷次均能圓滿完成任務。由於運補任務逐次遞減，該艦於民國78年2月18日奉令作簡易封存。(取材自老軍艦的故事)

