

中文摘要

火災對於艦船機艙所造成的重大傷害與損失，一直是艦船使用者急欲避免發生的情事，但審視現行於艦船機艙滅火方式與人員部署配置，並未有新的突破與改變，雖然國內外學者專家就此議題已有許多研究與討論，且均對於細水霧系統應用於艦船機艙滅火抱持正面看法，惟其論述大多基植於軟體模擬結果，卻較少見有實體模擬之研究，故依個人於艦船服務之經驗，考量在執行艦船機艙滅火環境中，尚有艙間封閉、通風啟停、煙塵之能見度、艙間溫度、對動力裝備之危害與復原等情形，必須一併納入檢討評估；基此，本研究以模擬與試驗分析為執行主軸，透過文獻收集，掌握國內外應用之經驗與案例，提供模擬與試驗參考，並依據國際海事組織（IMO）及美國海岸巡防隊（USCG）有關船、艦細水霧規範，應用挪威 Computit 公司火災模擬軟體 Kameleon FireEx (KFX)，來模擬艦船輪機艙使用細水霧系統之滅火成效，透過建置實體火場配合電腦模擬條件，搭配細水霧系統實際進行滅火觀測，研究中針對艦船機艙場景建構電腦模擬 24 個火災情境，以火焰區域附近氧氣濃度低於 12% 時作為判斷火勢撲滅的依據。模擬結果只有在通風與艙門同時關閉時，細水霧滅火系統於 5 分鐘之內可以將火勢撲滅；在通風開啟或艙門打開的情況下，滅火系統未能於開始燃燒的 5 分鐘之內將火勢撲滅。此外在 24 個電腦模擬案例中，基於成本與效益考量，檢討較可能發生與機艙環境較易佈置的情形，選擇 6 個情境進行實驗，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，皆能於 5 分鐘之內將火勢撲滅，而中壓系統比高壓系統有較短的滅火時間。實驗過程中細水霧對火場的降溫與煙霧的洗滌（增加能見度）也呈現良好的效果。設備損害管制方面，除了因為艙體空間的配置，可能造成水霧顆粒凝結成水滴而直接滴入電器設備（DC 馬達），造成設備短路以外；在電力箱與 AC 馬達設備上，細水霧顆粒並未影響絕緣阻抗。本次研究結果顯示，細水霧滅火系統對於艦船機艙滅火與復原工作，確實可提供為一個良好與具效益之選項。

Abstract

The damage of cabin in a vessel caused by fire is always the issue that has to be warded off. But the current method of fire extinguishes and personnel deployment remains invariable. Although foreign and domestic specialists have made numerous efforts on this, and had positive perspectives on water mist system applying to vessel fire extinguish. However, the results of research and discussion are mostly based on software simulations, hardly on field test research. In my experience of serving in navy vessels, all the followings have to be taken into consideration, such as cabin sealed, ventilation system activated, visibility of smog, cabin temperature, damage of power equipment and restoration, in conducting fire extinguish in a cabin of vessel. This research is focused on simulation and experiment analyze, taking foreign and domestic cases and experience as reference, also, refers to the vessel water mist standard of IMO (International Maritime Organization) and USCG (United States Coast Guard), uses fire simulating software (Kameleon FireEx, KFX) of Computit Co., Norway, to simulate the effects of fire extinguishes applying water mist. In order to observe the fire extinguish applying water mist, a fire test field, in correspondence with software simulation, is built. 24 simulated fire situations are developed in this research and conducting fire extinguish when the oxygen density is less than 12% near the fire zone. The result of simulation shows that the water mist system can extinguish the fire in 5 minutes with all ventilations off and cabin sealed. Considering budgets, effects, fire likely to occur and cabin layouts in these 24 situations, 6 are selected to conduct field tests. The result of field test shows that fire can be extinguished in 5 minutes under mid- or high-pressure spray to fuel poor fire resource or jet fire resource. However, time required to extinguish the fire using mid-pressure spray is shorter than high-pressure spray. In the process of field test, water mist shows good effects of temperature reducing and visibility increasing. Regarding the damage control, short circuit of electrical equipment, such as DC motor, could result from water drops condensed by moisture, directly dropping into the equipment. The insulation resistance of power supply and AC motor doesn't affected by moisture. The result of this research shows that water mist system truly provides a good and effective method of vessel fire extinguish and restoration.

誌 謝

一篇論文的製作，從構思、資料蒐整、拜讀專家論述，到撰寫、比較、修改、定稿，說實話是真的非常辛苦與沉重的壓力，所幸在此，我已經走過來了，回首過去，好幾次遇到瓶頸，或是工作的忙碌，無法順利繼續，著實的讓我產生了放棄的念頭，但真不知這一路的跌跌撞撞，到最後竟是如此的甘甜。

不敢說我寫這篇論文有著多大的抱負與理想，我也知道在這次的研究中尚存有許多假設性且與實際不大相符的基礎，後續仍有許多值得探討與深入研究的議題；但經過這次研究，讓我對細水霧滅火系統建立了更進一步的認識，這個系統的確是一個乾淨、環保、有效與低廉的滅火工具，要讓它發揮更高的運用價值，則必須吾輩人士多方規劃各種場景，透過高度仿真的模擬，建立完整可靠的數據資料，才能對各種的應用環境，規劃並創造出完備的細水霧滅火系統，當然我在這領域裡，僅僅只是略盡一些小小的綿薄之力，未來只要有機會，我仍然會繼續探討此次尚未涉略的領域。

非常感謝我的師長—單信瑜先生，在他亦師亦友的指導下，卸除了我對架構研究過程論述的恐懼，也讓我得以知悉如何正確表達研究的重點，這篇論文的完成，若沒有單老師的醍醐灌頂，我實在不敢想像如何得竟全功；當然，也有我工作夥伴的協助，謝謝他們在研究過程中協助掌握相關細節，並與我逐一討論及比對結果，及時提醒我修正錯誤之處，讓我不致繼續往死胡同裡鑽，才会有雲開見日的喜悅。

最後，當然要謝謝我的家人，美麗賢淑的妻子、溫柔可愛的女兒及活潑善良的兒子，在這段披荊斬棘的辛苦日子裡，一直陪伴我，無怨無悔地給我支持與鼓勵，雖然無從參與，但卻提供我最需要的無牽無掛生活與心情，讓我毫無後顧之憂埋首於論文寫作；我已疏於照顧家人甚久，也實在虧欠家人太多，相信在往後的歲月裡，我必定會盡全力彌補、愛護我深愛的家人，也僅以這篇論文獻給我摯愛的妻子與小孩。

目 錄

中文摘要	I	
英文摘要	II	
誌謝	III	
目錄	IV	
表目錄	VI	
圖目錄	VII	
一、	緒論	1
1.1	艦艇火災種類	1
1.2	一般艦艇滅火方法	2
1.3	研究目的	3
二、	艦船火災與滅火方式檢討	4
2.1	現行艦艇滅火作業缺失	4
2.2	滅火效益與環保要求	5
2.3	細水霧滅火系統的緣起	6
2.4	細水霧滅火系統與其他滅火系統（CO ₂ 、FM200 等 2 種作比較）	7
三、	相關研究與文獻探討	10
3.1	細水霧滅火基本原理	10
3.1.1	水	13
3.1.2	水霧	14
3.1.3	細水霧	16
3.2	細水霧系統設計特性	18
3.3	細水霧系統種類區分	20
3.4	細水霧滅火系統應用於艦船探討	22
3.4.1	各國海軍運用經驗	22
3.4.2	運用於輪機艙間之探討	23
3.4.3	細水霧滅火系統對輪機艙間電控裝備的影響	26
3.4.4	細水霧滅火系統運用於艦船之要求	26
3.4.5	細水霧滅火系統模擬驗證情形	27
四、	實驗規劃與應用軟體	29
4.1	實驗規劃	29
4.1.1	模擬情境	29
4.1.2	幾何空間配置	30
4.1.3	火源與細水霧噴頭設定	34
4.1.4	對艙間內電控裝備影響量測	37
4.1.5	實驗邊界條件設定	38
4.2	應用軟體說明	40
4.2.1	軟體背景	40
4.2.2	軟體介紹	40
4.2.3	運算原理	41
4.3	應用特色	42
五、	驗證方法與過程	43
5.1	滅火成效評估	43

5.1.1	滅火比較	43
5.1.2	實驗限制	44
5.2	情境設定	44
5.3	模擬運算	45
5.3.1	幾何模型	45
5.3.2	邊界條件	45
5.4	實際驗證實驗規劃	46
5.4.1	實驗空間	46
5.4.2	水系統	47
5.4.3	溫度量測	48
5.4.4	火源	48
5.4.4.1	油池火災	48
5.4.4.2	噴射火源	49
5.4.5	漏電實驗	50
5.4.5.1	漏電實驗箱	50
5.4.5.2	馬達漏電實驗	51
六、	實驗結果	52
6.1	電腦模擬結果與探討	52
6.1.1	熱電偶溫度	53
6.1.2	熱電偶溫度計算結果	54
6.2	滅火	55
6.2.1	火災影像	56
6.2.2	模擬結果	56
6.3	實際驗證實驗結果	57
6.3.1	實驗過程	57
6.3.1.1	實驗一：CASE 2	57
6.3.1.2	實驗二：CASE 3	58
6.3.1.3	實驗三：CASE 9	58
6.3.1.4	實驗四：CASE 5	58
6.3.1.5	實驗五：CASE 6	59
6.3.1.6	實驗六：CASE 12	60
6.3.2	漏電實驗	61
6.3.1	電力箱漏電實驗	61
6.3.2	馬達漏電實驗	61
6.3.3	實驗結果分析	62
6.4	損害管制規劃	65
七、	結論與建議	66
7.1	結論	66
7.2	建議	67
八、	參考文獻	71
附錄 A	電腦模擬熱電偶溫度	73
附錄 B	電腦模擬火焰附近地區的氧濃度	113
附錄 C	電腦模擬火災的影像	121
附錄 D	實際驗證實驗溫度	127



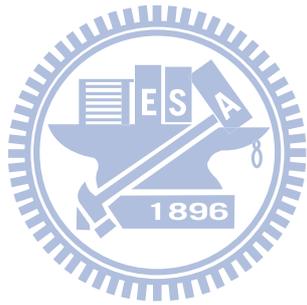
表 目 錄

表 1	一般艦艇滅火方法	2
表 2	一般艦艇火災情形比較	5
表 3	溫室氣體全球暖化潛勢	6
表 4	各類滅火劑可能之危害	7
表 5	細水霧、CO ₂ 與 FM200 之比較表	8
表 6	相同水量下細水霧與標準水滴性質之比較	11
表 7	各類滅火系統適用對照表	12
表 8	細水霧與水霧系統之比較表	17
表 9	24 種模擬情境編排規劃	29
表 10	噴射火源試驗規範	34
表 11	所有情境的關鍵輸入參數	45
表 12	噴射火焰器規格	49
表 13	24 個情境模擬結果	52
表 14	滅火時間計算結果	55
表 15	燃燒試驗之 6 種情境	57
表 16	實驗結果一覽表 (艙體縫隙未予密閉處理)	60
表 17	實驗結果一覽表 (艙體縫隙有密閉處理)	61
表 18	電阻值量測情形	61
表 19	馬達漏電量測情形	62
表 20	水霧液滴蒸發所需時間	64
表 21	水霧液滴落下所需時間	64



圖 目 錄

圖 1	火之成因三角形	1
圖 2	細水霧與標準灑水頭噴灑水滴之樣態比較	10
圖 3	水滴尺寸頻譜圖	11
圖 4	細水霧水滴累積百分比尺寸與分類關係圖	20
圖 5	模擬 3D 頂視圖 (全貌)	31
圖 6	模擬 3D 頂視圖 (甲板下層)	31
圖 7	模擬 3D 頂視圖 (甲板上層)	31
圖 8	模擬背向立面圖	32
圖 9	模擬正向立面圖	32
圖 10	模擬左向立面圖	32
圖 11	模擬右向立面圖	32
圖 12	模擬 3D 透視圖 1	33
圖 13	模擬 3D 透視圖 2	33
圖 14	模擬火源設定概念圖	34
圖 15	細水霧噴頭粒徑、流速、壓力曲線圖	35
圖 16	細水霧噴頭噴水角度	36
圖 17	FM & VDS 規範配置圖	36
圖 18	細水霧佈點圖	37
圖 19	漏電測試設備	38
圖 20	熱電偶配置位置	39
圖 21	KFX 於電腦之安裝情形	41
圖 22	EDC 概念示意圖	41
圖 23	模擬機艙實體 (外觀)	46
圖 24	模擬機艙實體 1 (內部)	47
圖 25	模擬機艙實體 2 (內部)	47
圖 26	模擬機艙實體 3 (內部)	47
圖 27	高壓泵浦 (左) 與水塔 (右)	47
圖 28	熱電偶 (T1>T2 之情形)	48
圖 29	熱電偶 (左)、Data Logger (中)、資料接收電腦 (右)	48
圖 30	噴射火焰機	50
圖 31	漏電實驗箱 (左)、警示燈 (右)	51
圖 32	AC 馬達 (左)、DC 馬達 (右)	51
圖 33	熱電偶樹設置透視圖	53
圖 34	熱電偶樹設置平面圖	54
圖 35	細水霧系統災害控管流程圖	69



一、緒論

1.1 艦艇火災種類

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。即便被公認為“海上霸王”的航空母艦，在面臨火災時也無法承受其所造成的威脅，若處理不好，將導致極為嚴重的傷害。

火的起源可能由於自發性燃燒，人為疏忽、被敵砲彈擊中，或撞船而產生，並在有下列三種條件，同時配合才會形成。包括可燃物，足夠的溫度和充分的氧氣。此三種構成所謂的「火之成因三角形」(Fire triangle) — 燃料、溫度、氧氣，缺少任何一項，火便無法形成，如圖1。



圖 1 火之成因三角形

一般可將火，區分為下列數種：

- 1、A 類（甲種火）是指固體物質燃燒所形成的火，例如木材、紙張、衣服等。燃燒後會留下灰燼，燃燒深入內部，與空氣接觸易復燃。
- 2、B 類（乙種火）是指燃燒於液體表面之火，燃燒後不會留下灰燼，例如汽油、柴油、燃油、食用油及油漆等。
- 3、C 類（丙種火）是指燃燒於各種電器及電路之火，滅火時首先切斷電源，二氧化碳為主要滅火劑，並嚴禁使用泡沫與水柱，因為泡沫急水柱會對各種電器設備造成嚴重的破壞。

4、D 類（丁種火）是指金屬物質燃燒之火，例如鎂、鈉、鋁、鈦等。這些金屬材料大都使用於飛機、飛彈、電路系統及其他設施上。

1.2 一般艦艇滅火方法，如表 1。

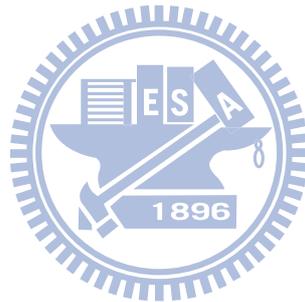
表 1 一般艦艇滅火方法

可燃性物質	火的種類	可用救火的裝備
木製品、寢具、衣物、 易燃的儲存物	甲 / A	1.固定式噴灑系統 2.救火總管 3.水膜泡沫 4.乾粉滅火器 5.二氧化碳滅火器
爆炸性物質、發射推進 藥劑、藥包	甲 / A	1.彈藥庫噴灑系統 2.救火總管 3.水膜泡沫
油漆、酒精類、易燃液 體儲存物	乙 / B	1.1030 海龍系統 2.固定式二氧化碳系統 3.泡沫 / 水膜泡沫系統 4.固定式噴灑系統 5.救火總管 6.乾粉滅火器 7.二氧化碳滅火器
燃油、JP-5、汽油	乙 / B	1.固定式救火系統（CO2 / 海龍 1310） 2.水膜泡沫 3.乾粉滅火器 4.噴灑冷卻系統 5.1211 海龍系統 6.救火總管 7.拋棄
油炸鍋	乙 / B	1.液態碳酸鉀滅火系統（APC） 2.乾粉滅火器與低速水霧同時使用救火
電器類、電子類	丙 / C	1.切斷電源 2.1031 海龍系統 3.二氧化碳滅火器 4.救火總管（非水柱） 5.水膜泡沫、乾粉滅火器
鎂合金	丁 / D	1.丟入海中 2.救火總管（非水柱） 3.乾砂、滑石粉
手榴彈、膠化汽油（燃 灼彈）	丁 / D	1.乾性氯化鈉 2.儲放於沒油或相似之碳氫化合物

1.3 研究目的

本研究係以電腦的火災模擬與實驗驗證之評估方式，針對細水霧應用於艦船消防系統與損害管制規劃進行評估，研究目的如下：

- 1、透過文獻收集國內外資料，掌握國內外對於細水霧滅火系統之發展與應用現況。
- 2、利用電腦模擬與試驗分析評估細水霧應用在艦船消防系統之效果與可行性。
- 3、提出艦船應用細水霧消防設備在損害管制規劃方面之建議。



二、艦船火災與滅火方式檢討

2.1 現行艦艇滅火作業缺失

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，攜帶抽水機、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。然基於人員安全第一考量，此舉，也是具有不得不為之必要條件存在。

從艦艇發生火災之情形來探討，是以輪機艙間失火最為嚴重（如表 2），因為輪機艙之中包含有主、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；現行輪機艙滅火方式，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，更遑論是作出任何緊急處置，火場情況嚴重時並再輔以修理班人員攜帶抽水機、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，將對輪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，因為輪機艙是密閉空間，煙塵累積其中無法排出，起火相對引起輪機艙間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、釋放海龍系統滅火，因海龍具有毒性，人員必須撤離，且在確認火場熄滅與空氣中不具毒性氣體後，方能進入期間大約 30 分鐘至數小時，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。

表 2 一般艦艇火災情形比較

部位	舵房	輪機艙	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
火災規模	小型火災：裝備或電纜束起火	大型火災： 1.可燃性液體外洩或艙底油水因高溫全面引燃 2.煙塵大且濃黑	小型火災： 1.高溫油脂起火 2.電器/電力短路	大型火災：彈藥、化學物質起火爆炸	小型火災：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，人員均在部位易於控制	快，且為全面性引燃，無法及時控制	較慢，人員均在部位易於控制	較慢，始於悶燒伴隨煙幕，較易發覺與控制	較慢，人員均在部位易於控制
損傷程度	小	大	小	大	小

※彈藥庫類之化學物質爆炸伴隨強大破壞，災害搶救包含損管堵漏，踰越滅火範圍，不在本研究中探討。

2.2 滅火效益與環保要求

一般而言，艦艇上各式可燃物充斥，如何選擇一套適合各種型態之滅火設備，以免同一艦艇上架設有多種自動滅火設備，進而造成系統無法相互支持及維護不便之問題；且考慮船隻對減輕設備載重之需求。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（儲水空間小）、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，故本研究採細水霧為對象，進行應用於艦船輪機艙間消防滅火效果之探討。

消防界中常見的滅火系統為：水、氣體滅火藥劑、固體滅火藥劑。其中屬於氣體滅火藥劑的 CO₂ 和 FM200 滅火系統對地球暖化之潛勢極高，尤其以 FM200

造成的全球暖化是 CO₂ 的 140-11700 倍（如表 3），而「水」是原本存在地球上最環保之物質，發展出水幕、灑水系統、細水霧系統等方式進行滅火，其中的細水霧滅火系統，經國外研發使其水滴粒徑小於可應用在油類與電器火災之撲滅，受北歐等具高度環保意識國家的廣泛使用，若研究證實細水霧滅火系統亦可應用於船艦上並有良好的滅火效果，對於日後以環保的「水」取代 CO₂ 與 FM200 等滅火藥劑，於節能減碳之措施，將提供極大之貢獻。

表 3 溫室氣體全球暖化潛勢

溫室氣體	全球溫暖潛式 GWP	排放來源
二氧化碳(CO ₂)	1	石化燃料、物質燃燒、森林砍伐
甲烷(CH ₄)	23	垃圾廠、農牧活動、天然氣、石油、煤礦開採
氮氧化合物(N ₂ O)	296	氮化物肥料施用、工業製程
氫氟碳化物(HFCs)	140~11700	海龍替代品(FM200)、光電半導體業、冷煤
全氟碳化物(PFCs)	6500~9200	光電半導體業、封裝
六氟化硫(SF ₆)	22200	電力設施、半導體業、鎂製程

2.3 細水霧滅火系統的緣起

經由近年來不斷的研究，細水霧滅火系統（water mist）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。從滅火效果來看，細水霧系統可視為自動灑水、水霧、二氧化碳及海龍滅火系統的合成品。總體而言，細水霧系統使用水，作為撲滅、抑制及控制火災的媒介，卻採取了與傳統截然不同的方式，在目前的研究中，因為考慮鹵化烷系氣體藥劑其具有毒性（如表 4），以及對環境的影響和從熱表面移除熱量的有限能力【1】，所以細水霧已被視為一種理想的替代滅火系統來提供船艦輪機艙間的滅火。

表 4 各類滅火劑可能之危害

項次	海龍1301	海龍1211	海龍2402	FM200	FE13	CO ₂
化學主成份	CBrF ₃	CF ₂ ClBr	C ₂ Br ₂ F ₄	C ₃ HF ₇	CHF ₃	CO ₂
LC ₅₀ (測試動物、吸收途徑)	84,000 ppm (15分鐘、大鼠、吸入)	20,000 ppm (15分鐘、大鼠、吸入)	58,400 ppm (4小時、大鼠、吸入)	>788,696 ppm (4小時、大鼠、吸入)	10,000 ppm (4小時、大鼠、吸入)	6,000,000 ppm (24小時、懷孕10天雌鼠、吸入)造成胚胎發育不正常

註：LC₅₀：動物實驗中施用之化學物質能使50%實驗動物族群發生死亡時所需要之濃度。通常對水體生物毒理研究與生物呼吸道吸入毒理研究以半數致死濃度替代半數致死劑量。

資料來源：工研院環安中心

2.4 細水霧滅火系統與其他滅火系統 (CO₂、FM200 等 2 種作比較)

CO₂ 和 FM200 滅火系統已經用在艦船輪機艙間防火有著多年的歷史【2】，但隨著最近逐步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船艦輪機艙間的防火。

FM200 滅火過程中會產生氫氟化合物 (HF)，HF 若與水混合，會產生高腐蝕性的氫氟酸。在滅火過程中滅火劑分解的量值主要取決於火的大小、滅火劑的濃度，滅火劑遭遇火焰或是熱表面時間的長短，如果能快速達到滅火濃度值，火將迅速被撲滅，HF 值及分解物將可能會限制在最小值。這些滅火劑長時間暴露在高溫下會產生很高的 HF 值。這些分解產物與人員和材料兼容性還有待於進一步研究【3】。

細水霧系統主要以水作為滅火物質，作用過程為利用壓力及特殊噴頭將水加壓產生懸浮微霧，並藉由懸浮微霧所產生的冷卻、稀釋及遮斷三種效果來對火源進行去除燃燒熱、降低氧氣濃度及減少輻射熱的工作，最後達成火災防護的目的，利用細水霧來滅火並不是嶄新的概念，早在 1930 年開始就有這類的文獻，只是在應用上尚未到達廣泛使用之層次，這種現象直到蒙特婁協定的執行以及海龍滅火系統逐漸停用後，經過防火專家不斷鑑定各種新的滅火方式，細水霧才被公認是替代海龍的有效滅火系統，目前已有不少細水霧滅火系統應用在商業營業場所的

工程案例，也有不少大型豪華客輪以細水霧滅火系統來取代二氧化碳滅火系統，遏阻火勢蔓延，也相對維護船體結構且不致變型（如表 5）。

表 5 細水霧、CO₂ 與 FM200 之比較表

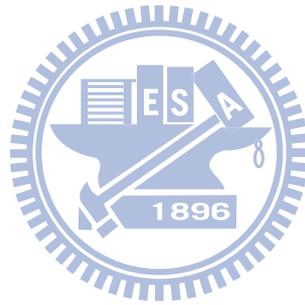
	細水霧滅火系統	CO ₂ 滅火系統	FM200 滅火系統
適用場所	電腦機房、室內停車空間、引擎試驗室、石油試驗室、船舶、發電機室、變壓器室及其他類似之電器設備場所。	電腦機房、渦輪機、石化業工廠、電信機房、船舶、博物館及檔案保存處(資料庫)。	電腦機房、渦輪機、石化業工廠、電信機房、船舶、博物館及檔案保存處(資料庫)。
適用空間	大、小空間皆適用。密閉空間且適用。	要求密閉空間且適用小空間。	要求密閉空間且適用小空間。
是否危害人體	不會	有缺氧危險	非完全無毒
針對火災類型	Class A：木材火災 Class B：油脂火災 Class C：電氣設備火災	Class A：木材火災 Class B：油脂火災 Class C：電氣設備火災	Class A：木材火災 Class B：油脂火災 Class C：電氣設備火災
降溫效果	佳	無	無
對火災之煙氣效果	可明顯降低火災之煙氣含量及毒性，	較不明顯	較不明顯
裝備重量及所需空間	共用既有泵與水源則無額外負擔	額外高壓氣體鋼瓶重量與存放空間	額外高壓氣體鋼瓶重量與存放空間
初期獲得成本	低	高	高
後續維持成本	非常低 (幾乎免維保)	高 (鋼瓶定檢或補充)	高 (鋼瓶定檢或補充)
對火災中的固體懸浮顆粒濃度之影響	可有效吸收和降低火場煙氣中的固體懸浮顆粒濃度，提高能見度，減小煙粒對人體的損壞，有利於人員的安全撤離。	無	無
藥劑來源	天然水源	化學合成品	化學合成品
藥劑濃度	無要求	34%	9%

資料來源：展信科技股份有限公司，細水霧之探討，p-12

2003 年財團法人消防安全設備中心基金會受委託擬定「消防安全設備水霧噴頭認可基準研究案」【4】，參考英國 (BS EN 12259-11)【5】及美國 (UL2351)【6】相關水霧標準，檢討細水霧滅火系統在不同放水量、操作壓力、噴頭設計等條件限制下，造成不同粒徑的水滴，分別運用在相異的火場，提出我國對相同滅火媒

介一水，在不同使用場合，以不同身份協助滅火，如何做到有效又不浪費，安全同時減少水損害之完整的探討。

水在消防上持續扮演著冷卻火源的功能，水滅火系統又可分為灑水頭、水霧系統及細水霧系統，而這三種名詞，透露出人們對水依據不同液滴粒徑，而創造出如此微妙的名詞。1850年美國開始使用灑水頭抑制火勢的蔓延，國際海事組織（IMO）1974年國際海上生命安全公約【7】要求所有客輪需安裝自動灑水設備，這項規定使得輕量，低水損，高滅火效率的水霧系統得以快速發展。



三、相關研究與文獻探討

3.1 細水霧滅火基本原理

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，確定水霧的滅火效果，並以法規明訂廣泛運用於撲滅可燃液體火災和電器火災中。

以水為滅火劑之水滅火系統可分為灑水頭（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。

細水霧系統與標準灑水頭噴灑之水滴樣態如圖 2 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表 6 所示。

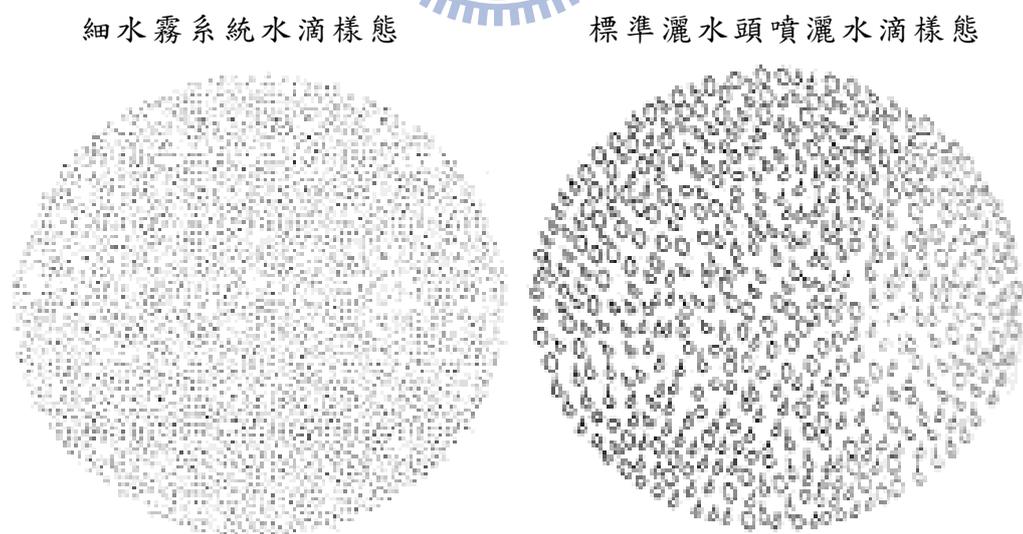


圖 2 細水霧與標準灑水頭噴灑水滴之樣態比較
資料來源：97 年物業管理種子教師培訓班
第二期講習訓練教材「消防設備與檢修」P-77

表 6 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~響滅火性能因素及所適用場所探討」

此外，Herterich 等人利用液滴尺寸頻譜分佈圖【8】、【9】、【10】，對不同噴灑狀況進行定義，圖中界定了灑水頭、水霧及細水霧的粒徑範圍，如圖 3 所示。且根據 Herterich 所做之研究指出，平均水滴直徑在 $100\mu\text{m}\sim 1000\mu\text{m}$ 之間似乎能被有效用來作為滅火使用。美國國家防火協會 NFPA 750 的規範中，將細水霧滅火系統依其工作壓力大小，可區分為低壓、中壓和高壓系統。工作壓力分別為：高壓系統 $\geq 35\text{kgf/cm}^2$ 、中壓系統 $> 12.3\text{kgf/cm}^2 < 35\text{kgf/cm}^2$ 之間、低壓系統 $\leq 12.3\text{kgf/cm}^2$ 。

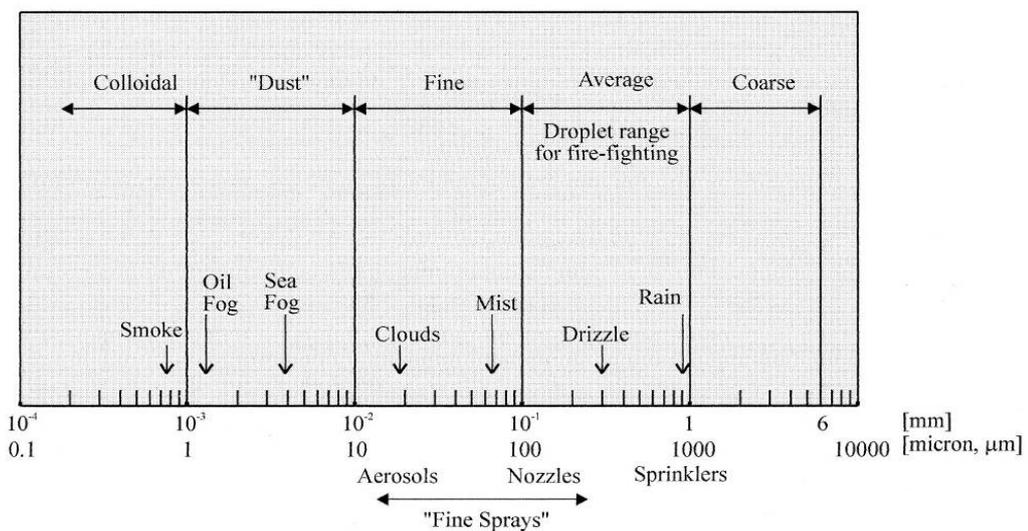


圖 3 水滴尺寸頻譜圖

資料來源：Discussions on the use of fine water sprays or mists for fire suppression. A. Jones and P. F. J. Loss Prev. Process Ind., 1995, Volume 8, P17

細水霧滅火系統適合於 A、B、C 類火災，依據美國 NFPA-750、IMO-668 與我國 CNS 3658 指出，細水霧除具一般灑水系統可熄滅的 A 類火災之效能外亦適用於 B 類火災，即石油類、油漆類、植（動）物油類、有機溶劑類等可燃液體、及液化石油氣、天然氣、乙炔氣等易燃性氣體火災，更可運用於電器設備場所。細水霧應用於各類火災之特性說明如下：

- 1、A 類：對一般 A 類燃燒型態均有效，且對於 A 類火災中最不易被一般灑水頭撲滅之深層火災，以其迅速吸熱的速度與氣霧籠罩阻絕氧氣之功能，亦具極佳之滅火功效。
- 2、B 類：乾粉僅對平面之油池火災（pool fire）有效，而細水霧無論是平面之油池火災（pool fire）或噴濺燃燒的油火災（spray fire）均有極佳之滅火功效。
- 3、C 類：細水霧系統可用於電力設備火災防護，若水源再經去離子處理，更可防止滅火時空氣潮濕所可能引起之放電游離現象。

依細水霧系統相關技術報告及國外適用於船艦上的案例，細水霧滅火系統幾乎可全面適用於我國消防法規中之『各類場所消防安全設備設置標準』第十八條所列之場所【11】，其具體內容如下表 7 所示。

表 7 各類滅火系統適用對照表

應 設 場 所	水霧	泡沫	二氧化碳	乾粉	海龍替代品	自動灑水	細水霧
引擎試驗室、石油試驗室、印刷機房及其他類似危險工作場所，樓地板面積在二百平方公尺以上者。	○	○	○	○	○		○
發電機室、變壓器室及其他類似之電器設備場所，樓地板面積在二百平方公尺以上者	○		○	○	○		○
鍋爐房、廚房等大量使用火源之場所，樓地板面積在二百平方公尺以上者			○	○	○		○

3.1.1 水

A 類型火災最常用的滅火物質是水。水對燃料表面有極佳降溫效果，可減低燃料氣化。滅火器的水通常不會大量霧化，因此對燃燒中的氣體作用不大。通常水劑滅火器內會加入少量其他化學品，以避免滅火器生鏽。部份滅火器亦加入少量化學物減少水的表面張力，讓水能更容易滲入燃燒中物體內部。水不一定能救滅液體（B 類型）火災，視乎液體燃燒的份子的極性。水可以救滅極性燃料（如酒精）的火，但用在非極性燃料（如燃油）上，卻會把火散開，令其更為不受控。

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，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，具有稀釋週遭氧氣和油氣的特性進一步抑制火源燃燒【12】。水的滅火機制主要可分為：

- 1、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。
- 2、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。
- 3、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”。

水具有相當高的蒸發潛熱，使一公升的水由 0°C 升高至 100°C 需要提供 418KJ 的熱量，另外需要 2257KJ 的熱量將其相變成水蒸氣（溫度沒有改變）。而蒸發只會在液體的表面發生，所以在理論上每單位體積的水有較大的表面積將會有較好的滅火效能，然而在實際上在一般的火災中灑水，相對較大的水滴只有小比例能夠透過蒸發帶走最大的潛熱，大部分會保持在液態與原來的形體，但大水滴卻容易穿越火焰到達燃料表面；相反的假如水滴非常的細小則會被迅速的蒸發，然水

滴卻沒有足夠的動量穿越火焰，滅火效率將會打折扣。

另外 Mawhinney 等人發現預先弄濕鄰近可燃物的表面，可控制火勢的擴大，能夠有效的延遲著火延燒的時間【13】，而 1989 年 Ravigururajan 和 Beltran 等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【14】。

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 3-1 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【15】：

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

因此每一個水滴的直徑為

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

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

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)【16】，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 $D_{v0.5}$ 來表示；在此有一半的水滴體積其滴徑會大於 $D_{v0.5}$ ，而另外一半的水滴體積其滴徑會小於 $D_{v0.5}$ 。

3.1.2 水霧

水霧較與氣體滅火系統具有不具毒性、容易使用、成本較低、避免復燃、有效冷卻作用及較少清潔時間的優點，並允許火災後空間能在短時間再被使用。

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；當霧狀水噴射至燃燒區域受熱後汽化為比原體積大約 1680 倍之水蒸氣，包圍覆蓋在火焰周圍，可降低燃燒體周圍空氣中氧含量，燃燒將會因缺氧而中斷，實現窒息滅火主要取決於能否瞬間生成足夠的水蒸氣並完全覆蓋整個著火面；當水霧噴射到正在燃燒的可燃液面時，由於水霧的衝擊，在液體表面造成攪拌作用，液體表面與水霧混合形成不燃性的乳狀液體層，進而中斷燃燒；對於水溶性火災，可利用水霧稀釋液體，降低液體燃燒速度，其滅火效果取決於水霧冷卻、窒息和稀釋的綜合效應。由於水霧具備上述滅火機理，使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了滅火效率，同時由於他細小霧滴的形態具有不會造成液體火飛濺，電器絕緣度高的特點，在撲滅可燃液體火災和電器火災中得到廣泛的應用。

根據國內外多年來對水霧滅火機制的研究，一致的結論皆說明當水以小水霧滴噴射到正在燃燒的物質表面時，會產生以下作用：

1、表面冷卻：

相同體積的水以水霧狀噴射比直射流型態噴出時的總表面積大上數百倍，當水霧噴頭將水以霧狀噴射至燃燒表面時，因吸熱面積大而會快速吸收大量熱量使水霧迅速汽化，使燃燒物質表面溫度迅速降至物質熱分解所需要溫度以下進而中斷熱分解，終止燃燒行為。表面冷卻效果不僅取決於水霧液滴的總表面積，同時還取決於滅火用水的溫度與可燃物閃點的溫度差等因素。當可燃物閃點越高與其水霧滴之溫差越大，冷卻效果越佳；但對表面冷卻對氣體或閃點低於水霧滴溫度的液體火災是無效的。這項理論也由大量試驗中得到證明，並可說明為：當閃點低於 60°C 之可燃液體火災利用水霧滅火機制之表面冷卻是不甚理想的。

2、窒息：

水霧液滴受熱後汽化形成較原體積大 1680 倍的水蒸氣，如燃燒區劃為密閉

空間，水蒸氣遍佈於區劃空間中，阻絕燃燒物質之氧氣供應，燃燒會因缺氧而受抑當空氣中氧含量更可中斷燃燒行為，但一般人存活的氧氣濃度下限為 10%，故窒息滅火時需注意人員是否全離開火場。窒息滅火的水霧滅火效果取決於能否瞬間生成足夠的水蒸氣並完全覆蓋火源。

3、乳化：

乳化僅適用於不溶於水的可燃液體，當水霧液滴噴射至燃燒的液體表面時，由於水霧滴的衝擊，在液體表面造成攪拌作用，進而造成液體表層乳化，由於乳化層的不燃性使燃燒中斷。對於某些輕質油類，乳化層只在水霧噴頭連續噴射水霧的條件下存在，但對黏性大的重質油類，乳化層在停止噴射水霧後仍可保持一段時間，而乳化層持續時間的長短影響著火勢復燃程度。

4、稀釋：

對於水溶性液體火災，可利用水霧稀釋液體，使液體的燃燒速度降低，減緩火勢蔓延，加速火災撲滅。



3.1.3 細水霧

細水霧與傳統灑水系統相較下，具有降低對敏感設備及場所的水損、運用空間大用水量小，且可控制易燃性液體火災的優點（如表 8）。

根據 Hankins 的實驗中【17】發現，設有灑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，而未設置灑水設備的情況下，一般室內的最高溫度將有相當長的時間會超過 1000°F（538°C）以上，但是有設置灑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。

表 8 細水霧與水霧系統之比較表

評比項目	細水霧	水霧	撒水
適用火災類型	A、B、C	B、C	A
粒徑比較	1000μm 以下	1000~5000μm	5000μm 以上
水量需求單位	1/10 (平均)	1/2 (約)	1
工作壓力	低壓 12.1bar 以下 中壓 12.1~34.5bar 高壓 34.5bar 以上	2~15bar	1~10bar
配管管徑規格	小	大	大
承載負重	輕	局部負荷	重
配管等級	不銹鋼	壓力碳鋼管	壓力碳鋼管
電氣絕緣性	佳	可	差
阻隔煙塵熱流	佳	無	無
排水設施	簡易	必設區域界堤	應具備
油隔離設施	不必要	集油槽	不適用
放射角度	由向下至向上 -90°~+90°無段調整	固定射角 45°、90°等	唯向上型、向下型、 側牆式等三種固定型式
涵蓋角度	180° (最大)	固定射出角度	固定涵蓋面積
防護死角	幾乎不受遮蔽物影響 放射性能	需考量射角與遮蔽物 之相對位置	遮蔽物影響大必要時 須增設噴頭
發展沿革	最新滅火技術	30 年	100 年
吸熱冷卻效率	極高	優	佳
蒸發稀釋能力	極優	優	可
沖洗煙積熱流層	具備	無	無

資料來源：川源科技股份有限公司，細水霧介紹，p-7

細水霧粒滴吸熱冷卻火焰或燃燒表面形成水蒸氣，1994 年 Kanury 的研究指出粒滴的蒸發率與週遭溫度、粒滴表面積、熱傳係數及粒滴與週遭氣體的相對速度有關【18】。對於水霧粒徑範圍在 $100\mu\text{m} < d < 1000\mu\text{m}$ 之間其熱傳係數與粒徑大小之關係可表示成【19】：

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

其中 d：水霧粒徑

K：空氣之熱導率

P_r ：Prandtl Number

R_e ：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【20】。

細水霧滅火系統是藉由壓力、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。

3.2 細水霧系統設計特性

美國國家防火協會 (NFPA) 所制定之 NFPA 750 中，列出 5 項細水霧滅火系統設計之功能目標如下【21】：

- 1、撲滅火勢：細水霧可抑制火勢並進一步有效撲滅火勢，使火場中無燃燒狀況。
- 2、抑制火勢：細水霧可有效降低火場熱釋放率 (Heat Release Rate)，使可燃物不再復燃。
- 3、控制火勢：噴灑火場鄰近未燃物，預先冷卻防護，控制火勢成長。
- 4、控制溫度：可降低室內溫度維持出入口安全性，減低高溫對逃生者危害。
- 5、防止延燒：噴灑火場鄰近未燃物，延遲其引燃之時間。

依據 NFPA 750 對於細水霧滅火系統之規範【21】，細水霧系統為細水霧噴頭距噴頭在最小設計工作壓力下，在噴頭下方 1m 平面上，能產生水氣霧滴累積體積分布 99% ($D_{V0.99}$) 之粒滴直徑尺寸小於 1000 微米；而應用於戰艦中的細水霧系統設計特性如下：

- 1、延長供水時間
- 2、專用的乾淨儲水槽
- 3、雙重水源
- 4、強化耐震效果
- 5、雙重啟動方式
- 6、防腐蝕性
- 7、雙重電源且能自動轉換
- 8、適戰性
- 9、閥類、管件、支撐時的強化
- 10、控制及閥類的分隔
- 11、船底泡沫灑水
- 12、全流量測試管件
- 13、通封閉鎖
- 14、儲存槽監視



Mawhinney 與 Solomon 依據累積容積百分比分佈，進一步將粗糙（coarser）至微細（finer）間的細水霧細分成 Class1~Class3 三個等級【22】，如圖 4 所示。Class 1 為控制 90%容量之水滴粒徑小於 200 μm 、Class 2 為 90%容量之水滴粒徑介於 200 μm 至 400 μm 之間、而 Class 3 水滴粒徑範圍則是在 200 μm 至 400 μm 之間。不同粒徑大小之水霧滴所產生之滅火機制也會有所不同，實際上 Class 1、Class 2 的細水霧適合抑制油類火災或噴灑火災，避免因水滴粒徑過大造成燃料噴濺使得火勢擴大。而 Class 3 較大之水滴粒徑具有較大動量，容易穿越火焰預濕燃料及冷卻火源根部進一步達成滅火。

細水霧系統不像傳統灑水頭噴灑較大粒徑水滴，很容易受到火源位置處通風條件之影響。Liu 等人進行不同通風條件下細水霧滅火效能之研究指出【23】，在強制通風下細水霧系統滅火效率將降低，主要原因是強制通風增強了起火室內和

外界氣體質量混合，氧氣代換和抑制之滅火機制影響將降低。

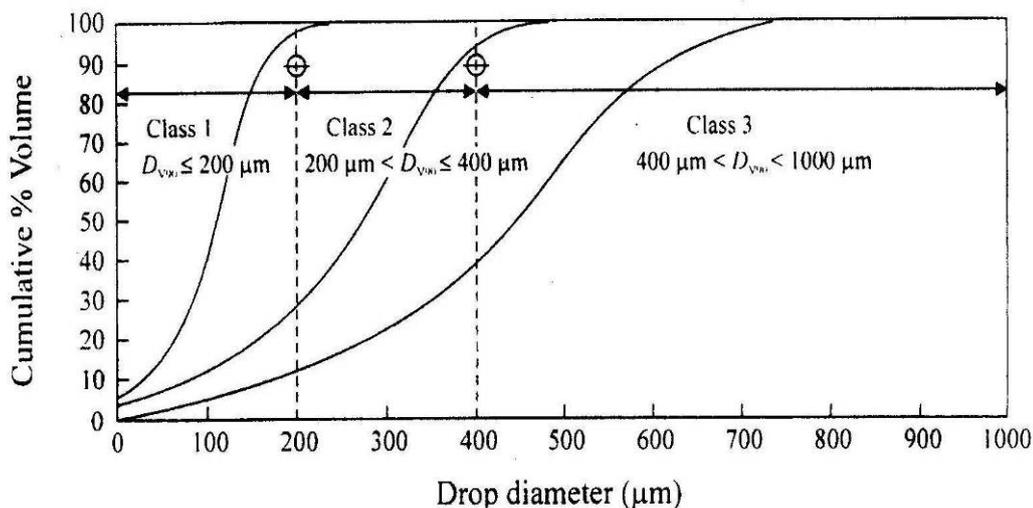


圖 4 細水霧水滴累積百分比尺寸與分類關係圖

此外，噴頭裝設位置距火源高度，亦會影響細水霧水滴停留火場時間與貫穿火焰區之水滴數量，進一步影響細水霧系統滅火效能，由 Wang 等人改變噴頭距火源高度之實驗結果顯示【24】，相同壓力下，噴頭距火源高度越高細水霧滅火困難，相同高度下噴灑壓力越大滅火效果越好。因此噴頭設置之位置、距火源高度與相關噴灑壓力對於細水霧之滅火效能，有一定之影響。

3.3 細水霧系統種類區分

細水霧系統亦可參考 NFPA 針對系統配管與動作區分，分為密閉濕管系統、密閉乾管系統、密閉預動系統、開放系統、以及乾管與預動組合等系統。

1、密閉式：

- (1) 濕式：平時管內貯滿高壓水（同系統壓力設定值），細水霧噴頭動作時即迅速灑水，適用於一般場所。
- (2) 乾式：平時管內貯滿高壓空氣（35PSI, 約 1/6 水壓），細水霧噴頭動作時先排空氣，繼而灑水，因為有延遲放水之虞，故僅適用於可能結冰之場所。

(3)預動式：平時管內貯滿低壓空氣(約 7PSI)，以探測器啟動流水檢知裝置，且細水霧噴頭動作時才灑水，具雙重確認之功能與提早偵知及防止誤動作之特性，適用於高價值物品之保護。

2、開放式：平時管內無水，啟動一齊開放閥，使水流入該區各開放式細水霧噴頭同時灑水，適用於火災有迅速蔓延之虞的場所。

3、乾管與預動組合系統：係指一個系統使用自動式噴頭，連接在充滿定壓空氣的管路系統，並在噴頭同樣區域加裝火災偵測裝置。當火災偵測系統偵測到火災後，即操作開啟跳脫裝置，並同時開啟乾管閥，使水能進入管路中，此時管路中的空氣尚未損失。火焰偵測裝置作動也開啟管路末端的空氣出口閥溢出空氣，便於將系統充滿水，這個動作通常較先於噴頭的開啟。火災偵測系統同樣也使用在火災自動警報系統。此組合系統的優點在於當火災偵測裝置或者乾管系統的自動式噴頭失效後，能較傳統式自動乾管系統及火災自動警報系統維持一定的功能。

細水霧系統若依放射方式可區分為以下幾種放射方式：

1、全區放射：對特定空間內可燃物分佈有延燒之虞，起火時除滅火外亦對未燃物有冷卻預防之效果。

2、分區放射：同一系統分成數個放射區域，用以分別防護各不同特定區間或對象物，可節省系統用水量。

3、局部放射：用以針對室內對象物個體之防護，或戶外特定對象物之保護。

細水霧系統若依流體系統亦可區分兩種型式：

1、單流式：系統僅供應以一種流體(水)，藉高壓由單一管路輸送至噴頭，由精細的孔徑放射出微細之水滴。

2、雙流式：系統以兩種流體供應，一組管系輸送液體(通常為水)另一組輸送氣體(通常為氮氣或空氣)，兩組配管在噴頭前端匯集為一，使

氣液混合輸送至噴頭，由精細的孔徑放射出微細之水滴。

3.4 細水霧滅火系統應用於艦船探討

3.4.1 各國海軍運用經驗

自 1995 年以來世界各國海軍已有英、美、加等 15 個國家，於獵雷艦、運輸艦、近岸巡防艦與一般後勤艦艇安裝細水霧系統，計有 66 艘次之實績【25】。另自 1990 年以來，一些製造商和研究機構一直投入參與制定船舶輪機艙的細水霧滅火技術。國際海事組織（IMO）為針對於船舶輪機艙間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【26】。UL 依據國際海事組織的測試草案，更編寫了船舶機艙的細水霧滅火系統的性能要求-UL2167 標準草案。

單流式和雙流式的系統相比，因為高壓細水霧系統會產生大量且具有高動能的水滴，此一情況對火場有著更好的滅火性能【27,28,29】。然而低壓細水霧系統因為有著高流率且大粒徑的水滴的特性，所以在對於非遮蔽的池火源和木條火源有著良好的滅火性能【30,31】。因為考慮了系統的成本效益、簡單性以及可靠性，所以細水霧系統的選擇和火災危害與噴嘴特性的搭配是息息相關的。美國海軍根據他們所做的測試中，已經發現在他們的應用中最好的成果是在 70bar 的開啟壓力下之改良後的噴霧系統的噴嘴（Model 7N 噴嘴）【32】。然而英國皇家海軍和一些製造商對於低壓細水霧系統（7-12bar），應用於船舶輪機艙間特別感到興趣【33,34】。英國皇家海軍已經評估了 6 種低壓細水霧系統（3.5-7bars）【35,36】，根據他們的實驗顯示低壓細水霧系統（7bar）運用在船舶上的性能是可以被接受的。船艦船艙火災具有一般建築火災的所具有的共同特性，船艦船艙火災還具有以下特點：1. 火災發生率高。2. 火源負載大。3. 散熱困難。4. 火災蔓延速。5. 撲滅火源及搶救難度大。6. 火災造成的損失巨大【37】。由於細水霧滅火系統對保護對象可實施滅火、抑制火源、控制火源、降低火場溫度、以及降低火場中煙霧粒子的濃度而進而增加火場中之可視度。同時對於電器設備的火災也可以發揮良好

的作用，鑑於以上的優點，細水霧滅火系統在船艦上的應用大致上可以應用在主機區域、輔機區域、分油機間、鍋爐房、幫浦房、舵機間、工作間、集控室、求生通道、備件間【38】。

美國、英國、加拿大在 90 年代中期，聯合發展細水霧系統作為海軍艦船機艙固定式消防系統。並於 1994 年在消防試驗船 EX-USS Shadwell 進行細水霧系統全尺寸實驗，模擬 LPD17 兩棲運輸艦的機艙佈置，其目的是對海軍艦船的應用，制定設計標準。2004 年 1 月 13 號所出廠的新遊輪瑪麗女王 2 號，整艘郵輪的消防設備皆是依靠細水霧系統。其系統涵蓋了船上所有的客房，公共設施和服務場所，不再僅僅只是將細水霧系統運用在高風險地區，遊輪上超過一萬個噴頭。

3.4.2 運用於輪機艙間之探討

在過去 10 年中，進行了許多測試其中包括小尺寸（ 24m^3 ）到全尺寸（由國際海事組織定義的 class III 引擎室），已進行了對船舶輪機艙間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、皆是以國際海事組織的火災試驗草案為基礎，或是以可能在船舶輪機艙間可能發生的火災情況下來作相關的評估。這些火災情景包括各種火災類型（木條火災，噴射火災，油池火災和層疊火災），火源尺寸（30MW）和火災場所（遮蔽和非遮蔽），以及各種燃料種類（由高粘度重油柴油燃料和正庚烷燃料）和不同的起火來源（例如，引擎過熱區域造成）。對於空間的情境，全尺寸的實體模型引擎是依據 IMO 測試草案所製作的，或是在船舶輪機艙間減少設備或是相關供應及排氣管。在這些實驗中所包括的參數有細水霧特性（霧滴動能、噴霧形式、粒徑分佈等），細水霧系統的形式（單流式或雙流式、不同的流量、供應壓力、噴嘴間距等），火災情境（火源形式、火源尺寸、火源位置），各種通風條件和滅火添加劑。

測試結果顯示細水霧滅火系統對各種的曝露和有保護的碳氫化合物的油池火

源、噴射火災及層疊火災，以及可能發生於船舶輪機艙間的 A 類火災及 B 類火災都可以有效的滅火【27-36】。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輪機艙間，並使燃燒所產生的 CO 和 CO₂ 維持在一個低水平。加拿大國家研究院（NRC）的實驗中，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，船舶輪機艙間溫度下降到 50°C【39】，且在實驗中所量測到最高的 CO 和 CO₂ 濃度低於 0.08% 和 3.5%。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輪機艙間，對於消防員的進入，已經提供足夠安全的保障。

在船舶輪機艙間的細水霧滅火系統之滅火性能取決於火場大小、阻礙物的程度、通風條件、船舶機艙室幾何條件、細水霧系統的噴嘴形式、以及其船舶機艙間之配置。相對於船舶輪機艙間尺寸的大型火源，比小型火源還要來的容易撲滅，由於氧氣的消耗因大火源而變大，且由於細水霧系統所產生的大量水蒸氣，取代了船舶輪機艙間之氧氣。在 Pepi 所做的實驗中【28,34】，在 IMO 測試草案的情境 1 和 2 的大型噴燃火源（6MW，低壓力）之撲滅速度比在情境 6 的小型噴燃火源（1MW，低壓力/低流量）還要快。隨著噴嘴的類型和船舶機艙的尺寸大型噴燃火災撲滅時間從 23 秒到 175 秒，小型噴燃火災撲滅時間從 5 分 24 秒到 21 分 10 秒。

隨著阻礙的程度增加，水霧到達火源的程度也跟著減少且有阻礙物的火源之撲滅更加的困難。在 Pepi 所做的全尺寸實驗中，在通風的環境下之引擎區域（IMO 測試草案的情境 9）下的 0.5 平方公尺的庚烷型油池火源，因為火源會完全不受到細水霧的影響，所以此為 IMO 測試草案中最具有挑戰性的火災情況。在角落和靠近天花板的火源，是不容易撲滅的【39】。然而，由於水霧蒸氣的膨脹可使火災中的熱空氣層燃燒的產物改變方向進而降低可供燃燒的氧氣，所以即使是阻礙型火災，細水霧還是可以有效地控制火源大小。

增加輪機艙間體積及降低艙間高度，會影響細水霧系統滅火性能，因為噴頭

難以提供足夠濃度的細水霧去抵達火源位置。Bill、Hanseb、Richards 所做的實驗中顯示，當噴嘴安裝在一個大型實驗設施中（面積為 2800m²、高度為 18m）噴頭間距 1.5m、高度在 5m 高的地方，沒有任何添加的圍欄圍住這些噴嘴，或是噴嘴直接安裝於天花板上，在高壓（69bar）到低壓（12-15bar）下針對各類火源型態（1 到 6MW 的遮蔽和非遮蔽型噴燃火源，和木條火源和 2 平方米的平面火源）皆無法撲滅【40】。甚至噴嘴數量由 30 個增加到 100 個也都無法撲滅火源。在實驗過程中船舶輪機艙間的氧氣濃度並沒有因為開啟細水霧系統而明顯地降低而且還高於 20.5%。6MW 的非遮蔽型噴燃火災只有在 940m³ 的空間中能被撲滅，此空間使用以前安裝的天花板以及在牆壁上使用防水布（塗有焦油、蠟等）或帆布。根據 Bill、Hanseb、Richards 的建議，目前細水霧技術所代表的兩個測試系統，是無法撲滅 IMO 測試草案中的 Class III 的引擎室火災【40】。由於水蒸氣的洩漏和熱空氣以及流進的新鮮空氣，所以開放的船舶輪機艙間對細水霧是有著很大的影響。然而對於有通風環境的火源，細水霧比氣體滅火藥劑（如海龍、CO₂ 以及海龍替代品）有著更好的滅火效應。在低壓細水霧的研究中【28,34】顯示對於在 IMO 的測試草案的情境 5、6、11 中，在一個高 8m 面積為 160 m² 的空間，4 m² 的門一直維持開啟的狀態下，火源還是可以撲滅但撲滅時間增加約 30%到 70%。由於門口的噴嘴數量從 2 個增加到 4 個，在這個開放空間下的細水霧密度也會相對的增加，使得細水霧的效能能更增加。通風對細水霧系統性能的影響也是取決於火源大小，美國海軍所做的全尺寸實驗中，顯示當船舶機艙室的三個門維持開啟的狀態下，對小型火源的撲滅時間有些微的增加，但對大型火源的撲滅時間並沒有影響【29】。

船舶輪機艙間中細水霧有效性也是依靠噴頭的配置，如噴嘴安裝間距、天花板下到噴嘴距離、噴嘴數量等。Back 等人在一個 960m³ 空間做的全尺寸實驗中顯示細水霧滅火性能因為船舶機艙室內兩個不同的安裝高度而改善【30】。在這種配置中，細水霧系統能夠在低於 25 秒以及用水量在 100L 的情形下撲滅所有無通風

的火場。局部細水霧系統應用於船舶機艙室防護的研究中，顯示位在火源正上方的滅火性能比遠離火源的狀況要好【41】。此外噴嘴位在正上方的滅火性能比距離 2m 的上方的滅火性能還要來得更好，因為在這種配置下熱空氣層會產生更多的水蒸氣，這些上層的水蒸氣和抑制火災的空氣會有效的再去影響火場，使細水霧的滅火性能更增加。

3.4.3 細水霧滅火系統對輪機艙間電控裝備的影響

雖然細水霧對電控設備的影響還不能定量化，但和傳統的灑水系統相比較，由於細水霧滅火系統的低流量和微小粒徑，必然會造成較少的影響。能否在細水霧噴灑過程中用足夠少的水量來抑制火勢和撲滅火源，同時又保證敏感的輪機電控設備繼續正常運行，確實是內含電子設備的防護空間中，能否成功運用細水霧的關鍵。國際火災安全機構對配電轉換開關進行了細水霧滅火的有效性實驗，實驗結果證明，在高壓情況下通過單流體噴嘴產生的高速氣態水霧能有效地抑制、撲滅轉換開關上部、底部和前面的火災，高速氣態水霧也能夠越過障礙物滲透到火焰的中心，從而有效地撲滅火焰。而傳統的灑水系統由於產生的水滴粒徑大、動量小而無法越過障礙物，因此無法有效的撲滅障礙物後的火源。【42】【43】

3.4.4 細水霧滅火系統於艦船運用之要求

依據美國 NFPA-750 中 Marine System 專章與美國海岸巡防隊的規定，皆要求系統的組成元件與測試皆須滿足 IMO-668 的規定。以下僅就 NFPA-750 中提出 Marine System 特別要注意的事項：

- 1、系統設計與組成元件的可靠度、效率需符合 IMO 的相關規定。
- 2、所有的管路貫穿部需滿足 US Coast Guard Navigation and Vessel Inspection Circular (NVIC) 9-97。
- 3、配管需使用 schedule 80 steel or schedule 40 galvanized steel。

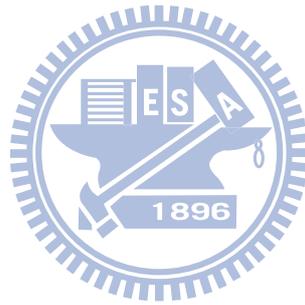
- 4、銅管接頭過濾器材質的熔點需高於 538°C。
- 5、當系統所供應的新鮮水源於 30 分鐘後耗盡，系統需能持續以手動介入使系統持續操作。
- 6、系統需連接固定式海水進口，使系統能持續使用海水運轉至少 120 分鐘。
- 7、過濾器需能克服最壞水源狀況。
- 8、系統必須為乾式配管。
- 9、壓力桶動作到需於 60 秒以內提供額定壓力。
- 10、系統需供應至少 30 分鐘新鮮水源。若以船上飲用水為水源也必須滿足至少 30 分鐘需求。

另外在周學軍等人討論到主機區域、輔機區域、分油機間、鍋爐房、幫浦房、舵機間、工作間、集控室、求生通道、料配件間皆安裝細水霧系統，求生通道細水霧系統可保護船員逃生通道安全，一旦發現機艙發生火災便可連動打開此系統【39】。另外艙壁細水霧系統可讓隔壁艙室不被火勢所波及，避免火勢蔓延。與相對應的區域保持聯動。將船舶機艙內需要保護的重點部份分成若干獨立區域，配合分區域滅火系統的設計，在滅火的同時可降低用水量，通過聯動打開艙壁細水霧系統避免火災的蔓延，同時透過對機艙逃生通道的保護，對船員的逃生提供有力保障。

3.4.5 細水霧滅火系統模擬驗證情形

參閱劉維義先生 2005 年“電腦數值模擬在細水霧滅火效能之應用與探討”【44】與隋增輝先生 2007 年“海軍艦艇應用細水霧滅火效能之探討”【45】，等二份研究，均確認細水霧滅火系統較其他滅火系統有較為優異的滅火效能，因為電腦運算速度突飛猛進、硬體價格下滑、性能式設計興起，以及火場電腦模擬技術漸趨成熟等因素，依據實際環境之特性與條件，在節約實體驗證的時程與成本的考量下，透過電腦數值模擬之方式模擬不同的危害情境，並分析結論訂定妥善

之防（滅）火與救災計畫；透過電腦模擬平台來驗證細水霧系統在艦艇輪機主要艙間之應用，由前述研究模擬的結果得知，細水霧滅火系統於自然通風或強制通風的狀態下均可有效抑制火災，另相較於艦艇其它現行之滅火系統，其火災抑制效能亦較為優異。本研究依據將參考其電腦模擬之方式，再加諸實際架設火場燃燒驗證結果，進行比較分析，以確認細水霧滅火系統運用於艦船機艙滅火之實際效能。



四、實驗規劃與應用軟體

4.1 實驗規劃

參考國際海事組織 (IMO) 及美國海岸巡防隊有關船、艦用細水霧規範，並引用挪威 Computit 公司的火災模擬軟體 Kameleon FireEX (KFX) 執行電腦模擬分析，再實際進行燃燒測試驗證，以評估細水霧應用於艦船機艙消防安全之適用性。

4.1.1 模擬情境

艦船輪機艙間的實驗設定與配置如下：

- 1、機艙尺寸：8.75 m 長×3.5 m 寬×5.7 m 高（參考一般輪機艙間設置）。
- 2、通風要求：關閉、開啟（ $280\text{m}^3/\text{min}$ ）。
- 3、船艙出口：封艙、不封艙。
- 4、火源：噴射火源、油池火源。
- 5、滅火系統壓力：低壓（ $P \leq 175\text{PSI}$ ）、中壓（ $175\text{PSI} < P < 500\text{PSI}$ ）、高壓（ $P \geq 500\text{PSI}$ ）。
- 6、模擬情境依上述「模擬尺寸」、「通風要求」、「船艙出口」、「火源」及「滅火系統壓力」等不同條件，設計 24 種模擬情境（如表 9）實施模擬。
- 7、檢討細水霧滅火效能、壓力大小、用水量、噴灑角度、佈點等參數，以最佳設計實施模擬，並作為後續實際驗證之依據。

表 9 24 種模擬情境編排規劃

	通風		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		噴射火源			V
Case4	關		是		油池火源	V		
Case5	關		是		油池火源		V	

Case6	關		是		油池火源			V
Case7	關			否	噴射火源	V		
Case8	關			否	噴射火源		V	
Case9	關			否	噴射火源			V
Case10	關			否	油池火源	V		
Case11	關			否	油池火源		V	
Case12	關			否	油池火源			V
Case13		開	是		噴射火源	V		
Case14		開	是		噴射火源		V	
Case15		開	是		噴射火源			V
Case16		開	是		油池火源	V		
Case17		開	是		油池火源		V	
Case18		開	是		油池火源			V
Case19		開		否	噴射火源	V		
Case20		開		否	噴射火源		V	
Case21		開		否	噴射火源			V
Case22		開		否	油池火源	V		
Case23		開		否	油池火源		V	
Case24		開		否	油池火源			V

4.1.2 幾何空間配置

根據上述需求，參考國際海事組織【46,47】機艙試驗規範，作為本研究執行模擬與試驗的空間配置的架構。因此依據一般艦船輪機艙間尺寸：8.75 m 長×3.5 m 寬×5.7 m 高，進行空間配置，配置的情況亦參考一般船機艙基本配置，以下為其本配備（詳細位置如圖 5 至圖 13）：

艙門：位於船艙上方甲板處

空調：1 進風口、1 排風口（圖中綠色開口）

船艙空間：包含 1 甲板（黑色）

設備：架高的引擎（附連接的排氣管）道具 1 台、發電機（附連接的排氣管）

道具 1 台、配電盤 1 台以及架高的馬達 2 台，上述道具皆以塊體作為代表。

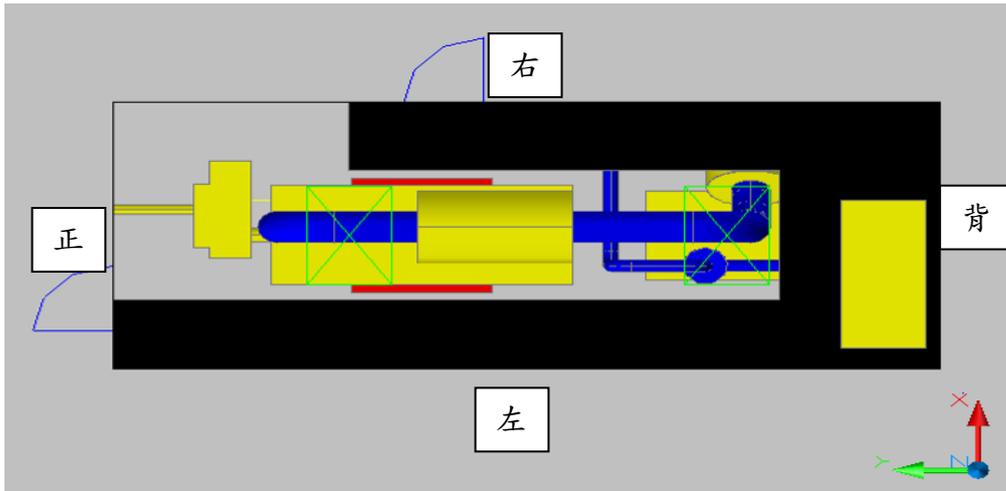


圖 5 模擬 3D 頂視圖 (全貌)

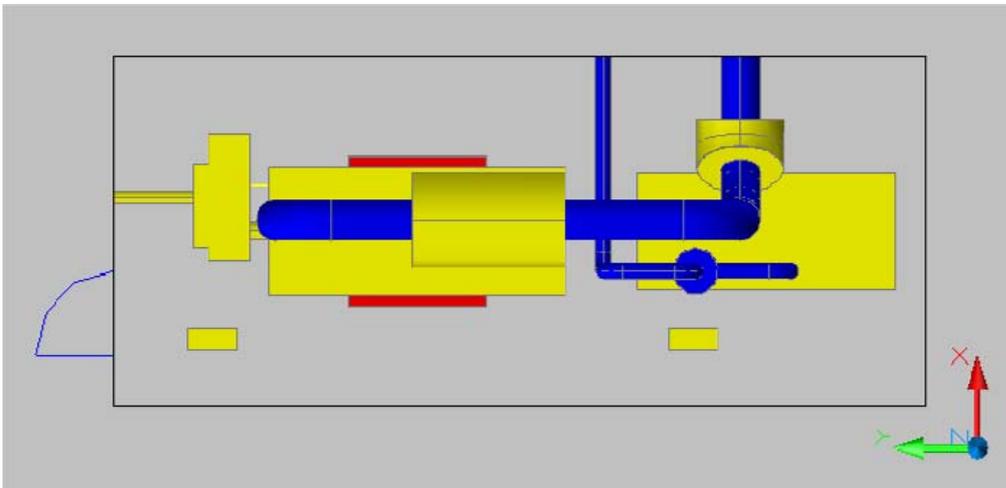


圖 6 模擬 3D 頂視圖 (甲板下層)

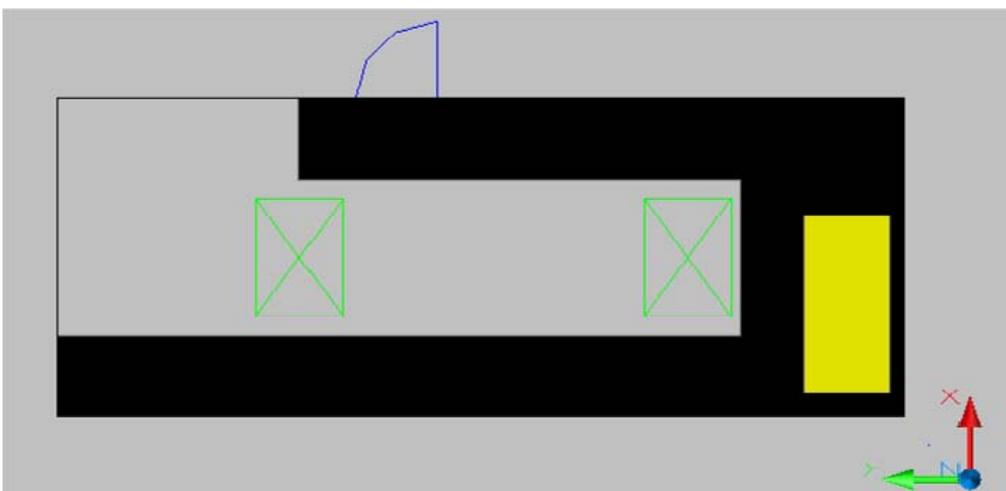


圖 7 模擬 3D 頂視圖 (甲板上層)

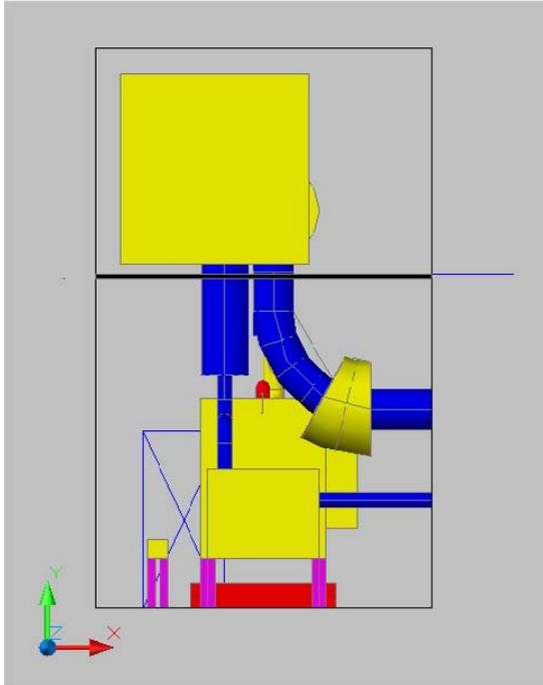


圖 8 模擬背向立面圖

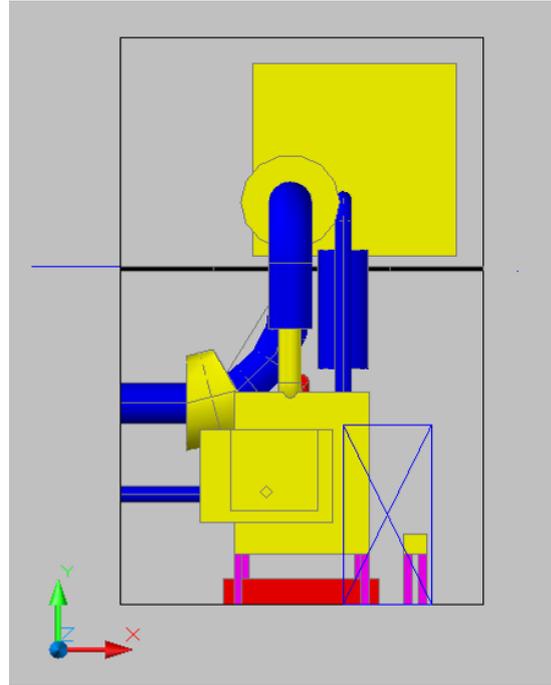


圖 9 模擬正向立面圖

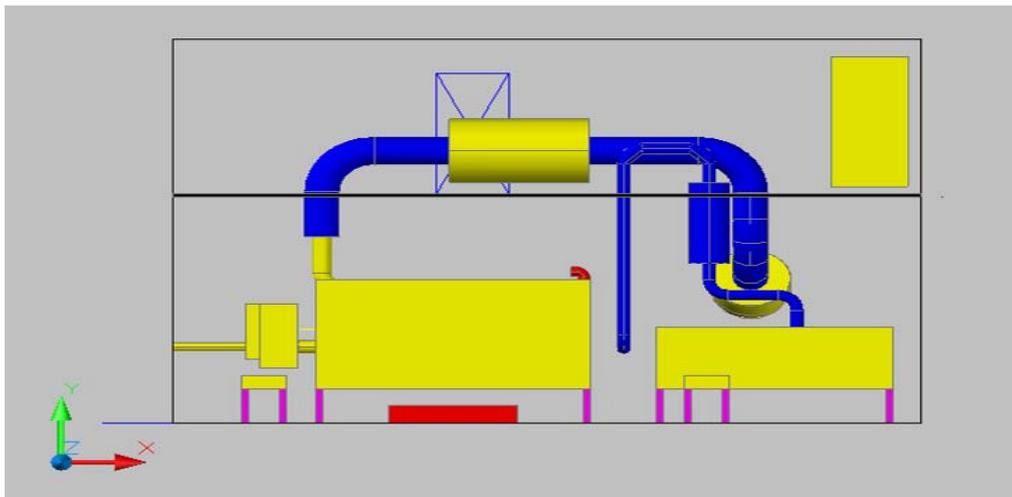


圖 10 模擬左向立面圖

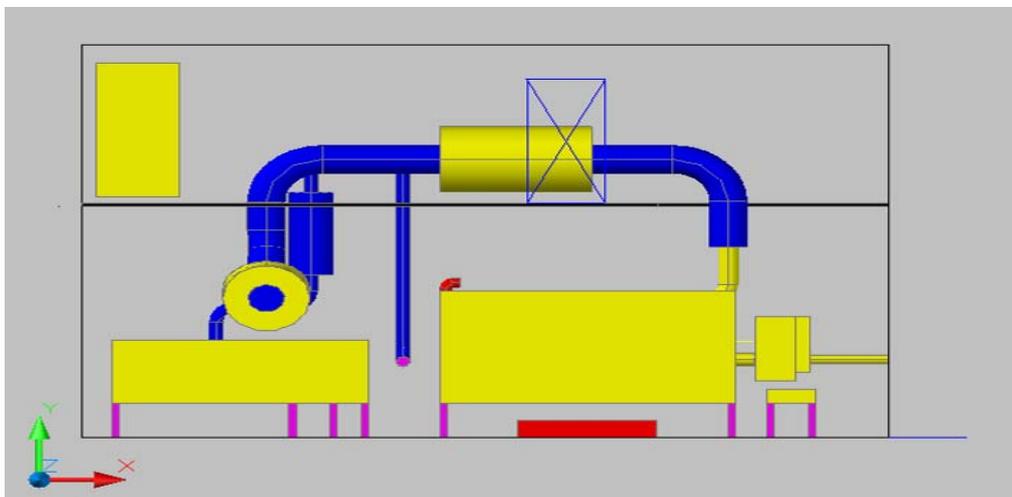


圖 11 模擬右向立面圖

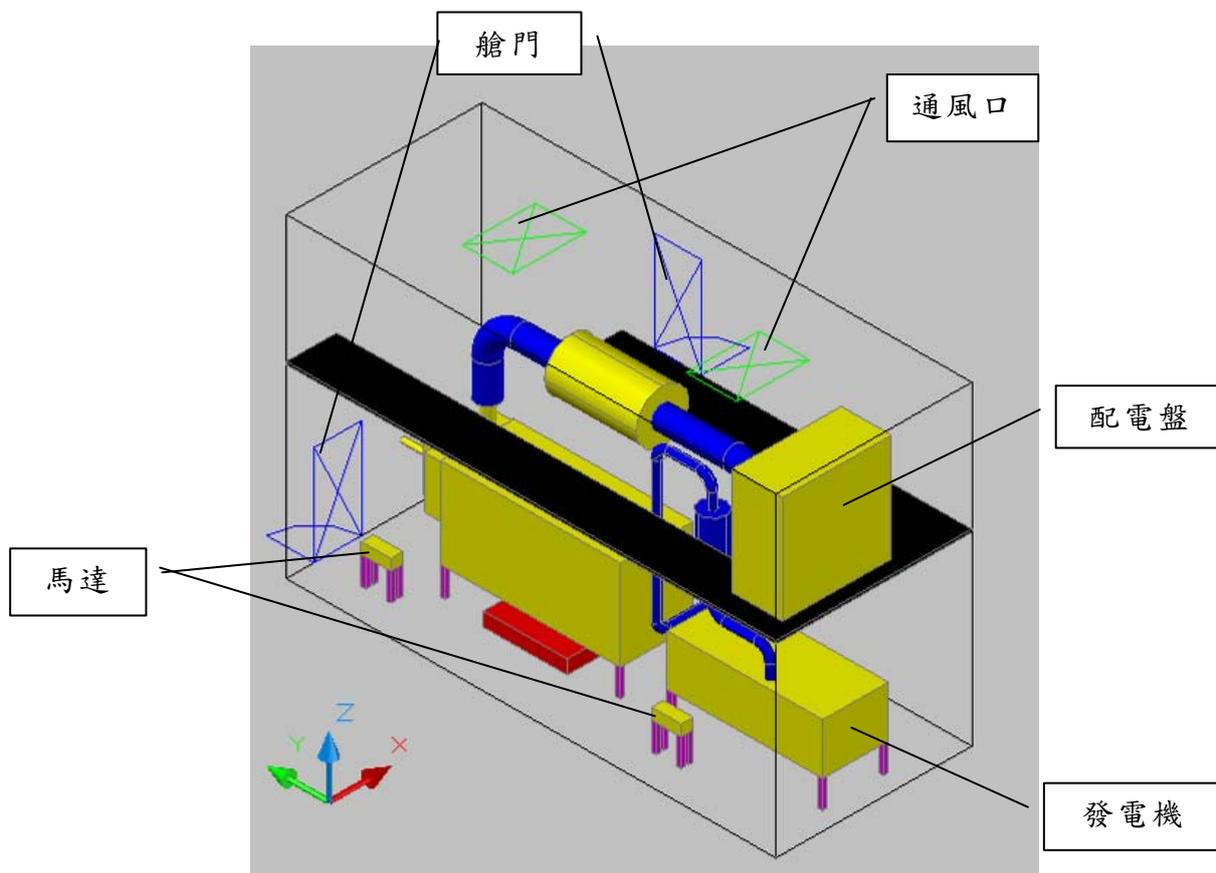


圖 12 模擬 3D 透視圖 1

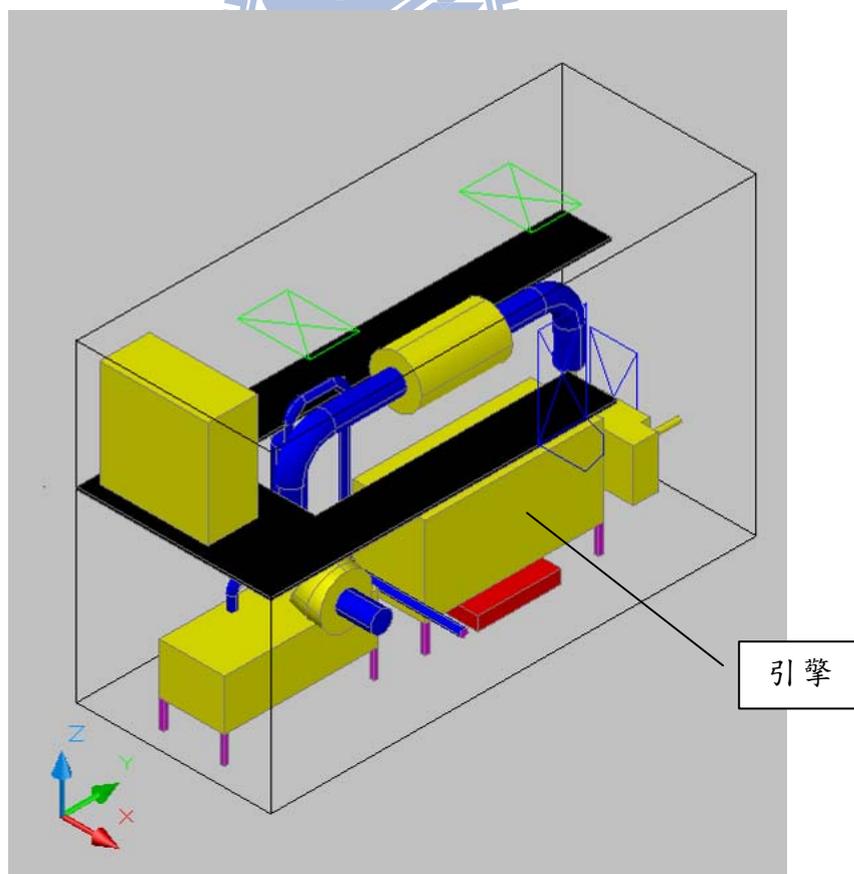


圖 13 模擬 3D 透視圖 2

4.1.3 火源與細水霧噴頭設定

依據目前船舶實際用油（柴油）作為本研究案的燃料。

1、噴射火源

參考美國海岸巡防隊有關船艦用細水霧規範及國際海事組織機艙試驗規範【48，49】，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（如圖 14 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。

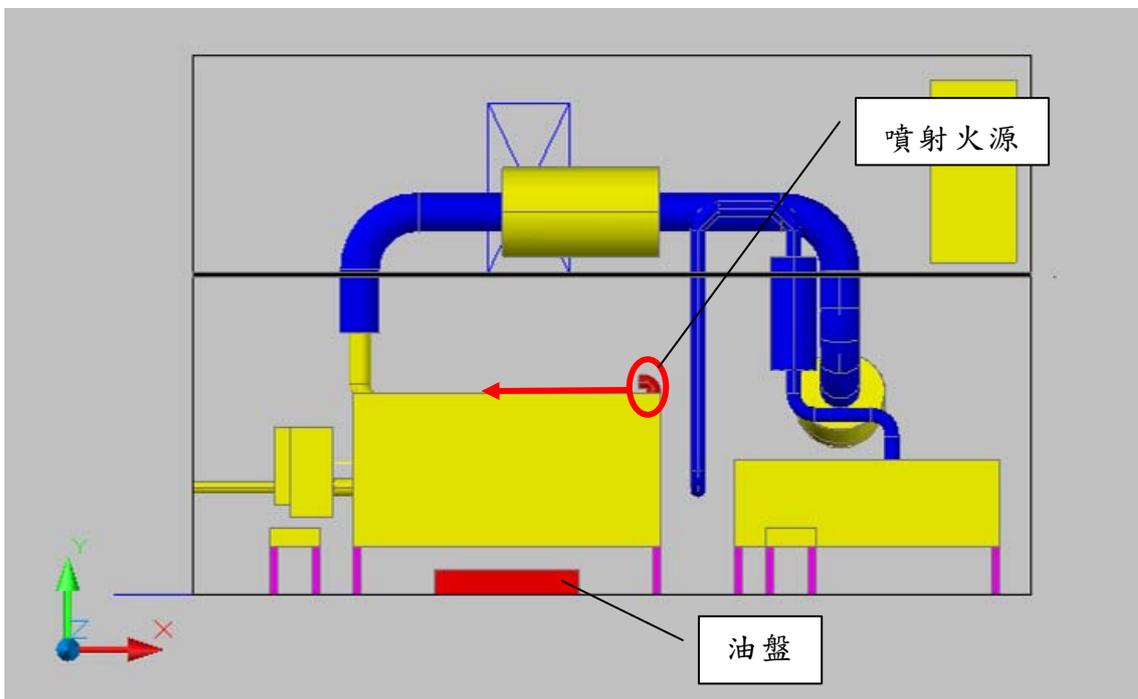


圖 14 模擬火源設定概念圖

依據國際海事組織機艙試驗中 spray fire 的規範（如表 10），其中燃料噴頭應水平配置，噴油方向朝向細水霧噴頭噴灑的下方。：

表 10 噴射火源試驗規範

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

2、油池火源

參考實驗室的設定【50】，並考慮空間體積的差異（IMO 的實驗空間至少

500 立方米，本研究約 175 立方米)、細水霧啟動滅火時間(火災偵測器感應時間)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。

3、細水霧噴頭選擇

考量低壓 ($P \leq 175\text{PSI}$)、中壓 ($175\text{PSI} < P < 500\text{PSI}$)、高壓 ($P \geq 500\text{PSI}$) 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(如圖 15)。

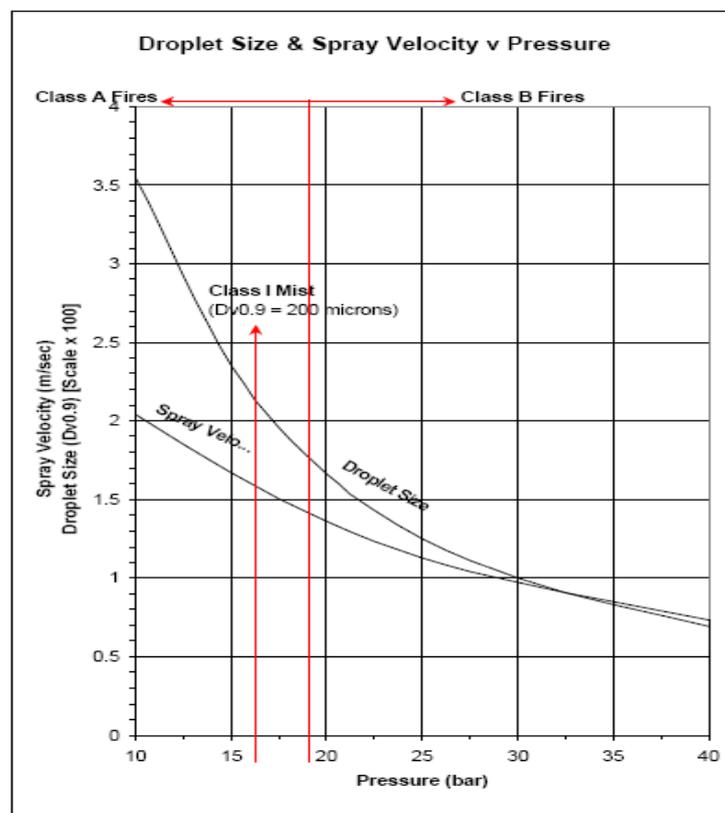


圖 15 細水霧噴頭粒徑、流速、壓力曲線圖

資料來源：Combustion and Flame Volume 54, Issues 1-3, December 1983, Pages 15-22 Droplet sizes and velocities in vaporizing sprays A.J. Yulea, P.R. Ereatb and A. Ungut

因為不同類型噴頭其噴水的散佈角度不同(如圖 16)，基於艙間高度與噴射範圍考量，本實驗以 ST650 噴頭之規格與性能較能獲得水霧集中範圍，相對具有較好的滅火與省水效果，故選擇以 ST650 噴頭進行試驗，且於日後配合將細水霧系統應用於船艦上，亦可較為節省成本。

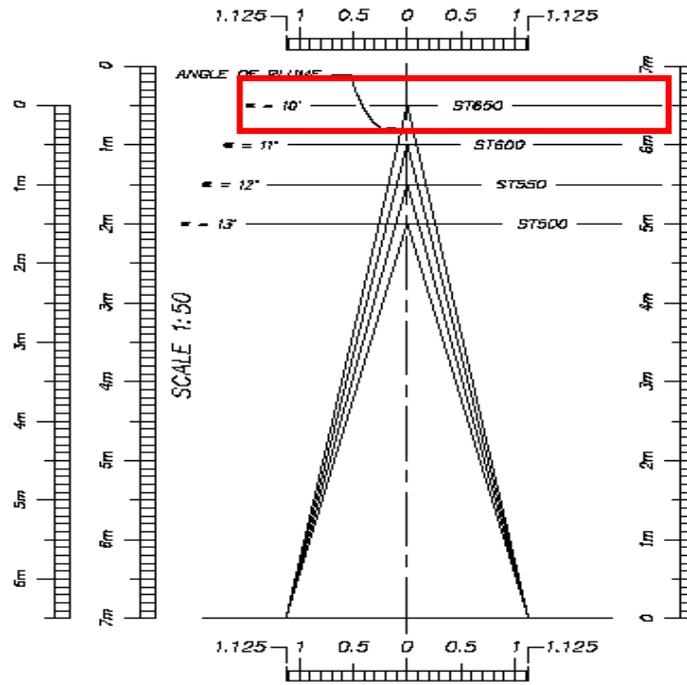


圖 16 細水霧噴頭噴水角度

資料來源：Combustion and Flame Volume 54, Issues 1-3, December 1983, Pages 15-22 “Droplet sizes and velocities in vaporizing sprays” A.J. Yulea, P.R. Ereauth and A. Ungut

4、細水霧噴頭佈點設計

依據 FM & VDS 對細水霧噴頭於機械空間與渦輪機房的配置(參考圖 17)。

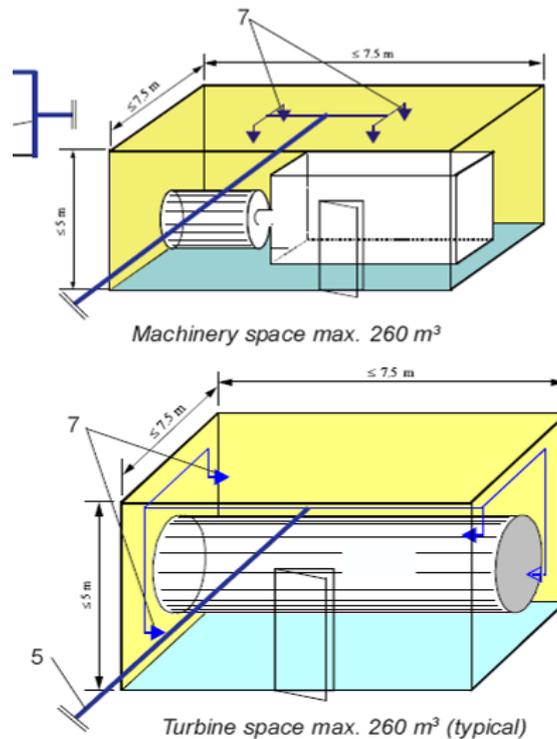


圖 17 FM & VDS 規範配置圖

本實驗將設計垂直（90°）與水平（180°）共 8 顆的噴頭配置（參考圖 18）作為此研究案的空間防護。

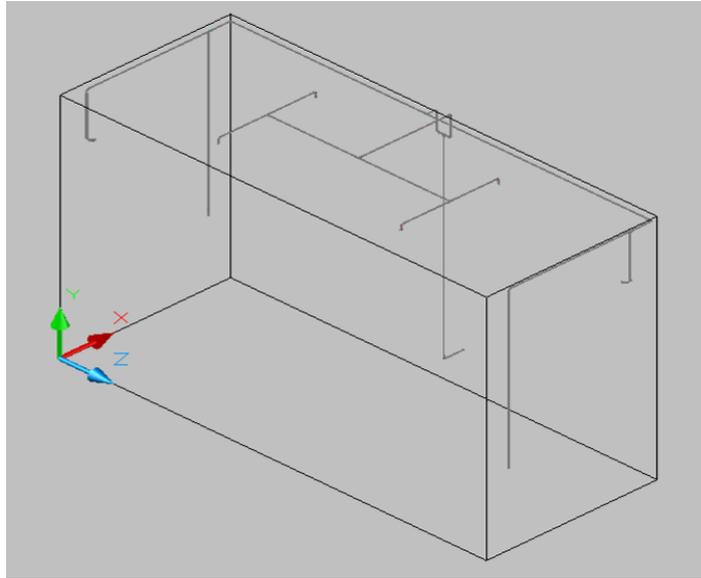


圖 18 細水霧佈點圖

4.1.4 對艙間內電控裝備影響量測

為了解細水霧設備對於船艙的電力設備與馬達之影響，參考 IMO【51】對細水霧系統釋放期間對電控設備（暫以電力馬達與電力開關箱為研究對象）影響評估。

1、電力馬達

參考長榮大學實驗【52】，於船艙內放置一個小型直流馬達與一個小型交流馬達，於引擎等高的平面上（參考圖 10 與圖 12），用來評估細水霧釋放期間對運轉中馬達的影響，定量的評估是以「絕緣電阻計」來記錄絕緣電阻值（絕緣電阻應當要有 $0.1M\Omega$ 以上）。馬達尺寸則依照圖 5 至圖 13 中的尺寸大小為依據。

2、電力開關箱

利用漏電斷路器作動，來得知產生漏電之情況，但實驗中不易觀察出漏電斷路器是否作動，故於電力開關箱上裝設警示燈，通電中燈號應保持閃爍，當燈號熄滅即表示已產生漏電。本試驗將以細水霧系統啟動後持續 20 分

鐘，依燈號是否熄滅作為判斷產生漏電之時間，漏電測試之實驗設備如下（參考圖 19）。

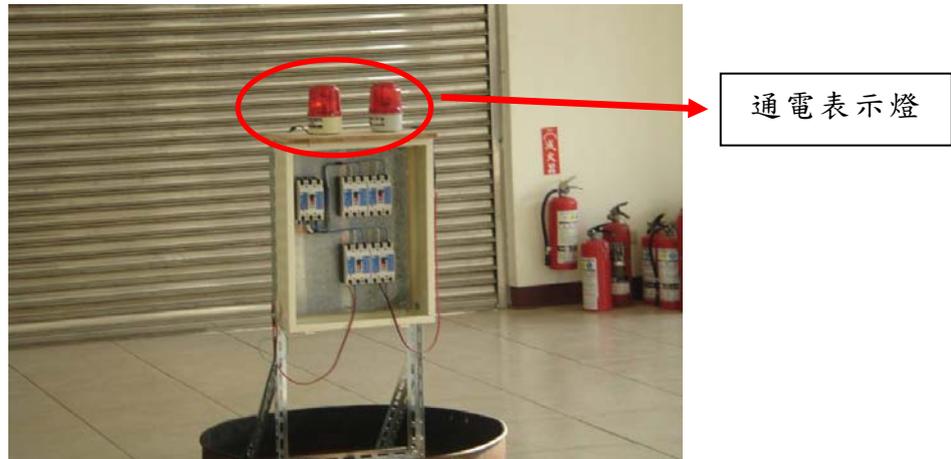


圖 19 漏電測試設備

4.1.5 實驗邊界條件設定

1、邊界條件

- (1) 考量電腦模擬與實驗道具一致性，所有道具塊體與艙體結構皆設定為鐵類材質。
- (2) 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【49】，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。
- (3) 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，參考一般艦船大型通風能量，設定為風速 280M3/min。
- (4) 燃料特性、火源設定及細水霧（噴頭、壓力、水量、噴灑角度與佈點）相關設定依上述說明，代入模擬條件設定。
- (5) 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【50】。
- (6) 模擬時間（simulation Time）須涵蓋引燃火源到細水霧釋放後五分鐘為止【49】，若未達五分鐘火已熄滅，則可逕行停止電腦模擬。

2、滅火成效評估【49，53】

- (1) 是否在細水霧釋放後的五分鐘內撲滅火源。

- (2)細水霧釋放前後艙內的溫度變化，以評估細水霧的滅火效果。
- (3)電腦模擬不包含細水霧系統釋放期間對電器設備（電力馬達或電力開關箱）的影響評估。

3、量測儀器

- (1)依據 IMO【50，53】於 2002 年提出，除了依據「滅火時間」來評估細水霧系統滅火成效外，其釋放的微小水滴所造成的冷卻效果，亦是一個不能忽視的成效。依此於本研究放入 4 條熱電偶樹 (Thermocouple Tree)，依續編號為#1,#2,#3 及#4，其位置如圖 20 中所示，每條熱電偶樹由 10 支 k-型的熱電偶所組成。甲板距地板高度 3.4 米，甲板至天花板高 2.3 米，每條熱電偶樹於甲板上方配置兩個熱電偶，於甲板下方配置 8 個熱電偶；其中甲板上方離天花板 0.3 米處往下每間距 1 米配置 1 個熱電偶，甲板下方離地板 0.4 米處起往上每間距 0.4 米配置 1 個熱電偶。
- (2)因考慮細水霧滅火後是否有效滅火、降低船艙內溫度而不會超過艙體結構的耐熱程度，在艙體四周離艙壁 30cm 處各設四條熱電偶樹，依續編號為#5,#6,#7 及#8（參考圖 20），#5、#7、#8 含 8 個熱電偶，#6 因距離較遠溫度梯度較小而設置 4 個熱電偶，設置位置由甲板下方離地板 0.4 米處起往上每間距 0.4 米配置 1 個熱電偶。

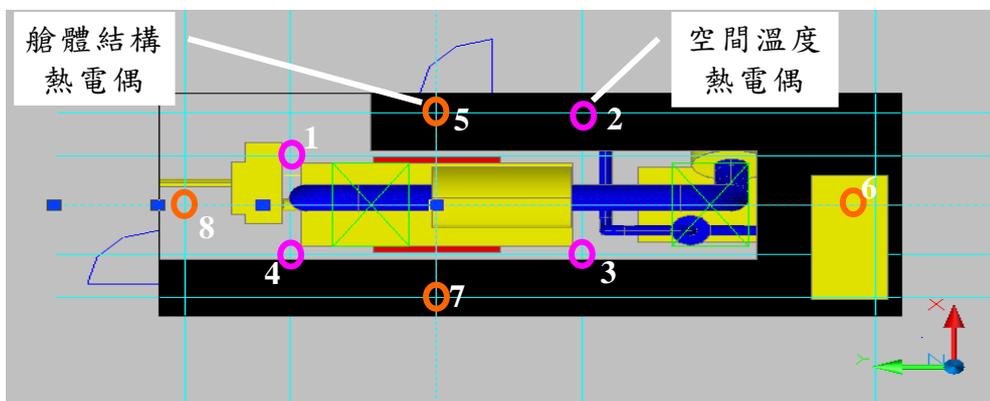


圖 20 熱電偶配置位置

4.2 應用軟體說明

4.2.1 軟體背景

ComputIT 公司在海上和陸上設施對氣體的傳播、通風、火災與燃燒等的流體動力學之研究有著多年的豐富經驗。計算流體力學的工具 Kameleon FireEx (KFX 軟體) 是由 ComputIT 公司/挪威 SINTEF 實驗室/NTNU (挪威大學) 所開發，KFX 具有模擬氣體擴散與碳氫化合物火災的能力，並能處理封閉空間與開放空間中的液體燃料與噴氣火災，其模擬結果經過挪威 SINTEF 防火研究實驗室、美國 SANDIA 國家實驗室等試驗的驗證，故任何與氣體擴散及火災相關的消防安全模擬，皆可採用此系統。

4.2.2 軟體介紹

KFX 軟體是採有限體積法 (Finite Volume Method)，又稱為控制體積法 (Control Volume Method)，其方法是將計算區域劃分為網格，每個網格格點周圍有一個互不重複的控制體積；將待解微分方程 (控制方程) 對每一個控制體積積分，從而得出一組離散方程，其中的未知數是網格格點上的變量 Φ 。為了求出控制體積的積分，必須假定變量值在網格格點間之變化規律。

從積分區域的選取方式來看，有限體積法屬於加權餘量法中的子域法，從未知解的近似方法來看，有限體積法屬於採用局部近似的離散方法。有限體積法能得出直接的物理解釋，離散方程的物理意義，在於變量在有限大小的控制體積中的守恆原理，如同微分方程表示變量在無限小的控制體積中的守恆原理一樣。

KFX 軟體是在 Linux 作業系統操作環境下進行模擬，因此在執行 KFX 之前需要進行 Linux 作業系統的安裝，於 Linux 作業系統安裝完成後，打開電腦按照安裝步驟輸入安裝指令 (如圖 21)，安裝成功後打 liz 便可執行 KFX。

```
bjornev@citsvg4...5A/rocket_launcher
bjornev@citsvg4:~> cd Projects/
bjornev@citsvg4:~/Projects> mkdir NASA
bjornev@citsvg4:~/Projects> cd NASA/
bjornev@citsvg4:~/Projects/NASA> mkdir rocket_launcher
bjornev@citsvg4:~/Projects/NASA> cd rocket_launcher/
bjornev@citsvg4:~/Projects/NASA/rocket_launcher> llz
```

圖 21 KFX 於電腦之安裝情形

4.2.3 運算原理

KFX 軟體在處理燃燒能量傳遞方面，由平均流動之層流發展至大尺度渦流、小尺度渦流，最後渦流耗散而將機械能轉變成熟能，詳如圖 22 模式上採用了 Magnussen 教授提出之 Eddy Dissipation Concept (EDC) 概念【54】。

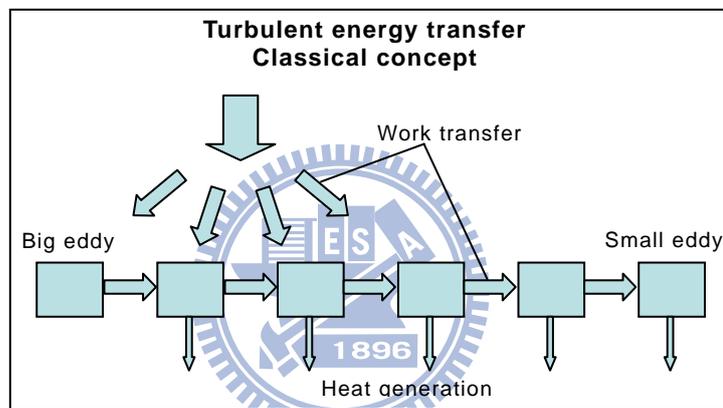


圖 22 EDC 概念示意圖

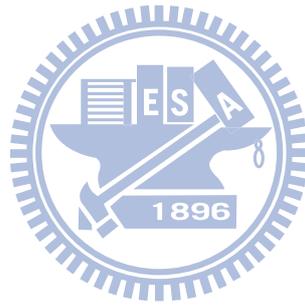
其瞬時行為的數學模式，是採用向後尤拉法 (backward Euler scheme)，系統可解決焓 (Enthalpy)、組分質量分率 (Species mass fractions)、煙灰質量分率 (Soot mass fractions) 等法柏平均物理量 (Favre averaged physical quantities) 之方程式。另外，在動量方程中的壓力項採用 SIMPLEC 演算法 (SIMPLEC algorithm)，並以理想氣體定律 (the ideal gas law) 結合壓力、溫度及密度間的關係。

除此，在處理紊流輸運效應方面以 κ - ε 紊流模組進行計算；以 EDC 模擬組分質量分率的平均反應速度；煙灰源項是根據渦流耗煙灰模組，此模組包含了煙灰核心 (soot nucleus) 之輸運方程式；煙灰質量分率主要是運用在了解控制體的正確輻射吸收係數，此吸收係數運用在離散輸運模式以計算火焰、火焰與周遭間的輻射傳遞。

4.3 應用特色

KFX 軟體具有模擬濃氣、稀氣的氣體擴散、碳氫化合物火災的能力，並且能處理封閉空間與開放空間中的液體燃料與噴氣火災。其模擬結果經過挪威 SINTEF 防火研究實驗室、美國 SANDIA 國家實驗室等試驗的驗證，故任何與氣體擴散及火災相關的消防安全模擬皆可採用此系統。

在應用領域上 KFX 軟體除了可以分析火煙的危害（包括溫度分布、組分濃度分布、熱輻射分布等）並了解滅火系統設計的性能外，亦可以結合結構抗火能力的分析，進行圖形的顯示，使設計人員、學者專家、工程界更加了解火災對建築物、構造體所造成的危害。而此系統亦成功運用在立管破裂和隨後的起火境況、鑽油平台火災及其相關結構構件之結構行為。



五、驗證方法與過程

5.1 滅火成效評估

本實驗考量到水蒸汽稀釋空氣以作為最重要的火源抑制方式。根據理論，水蒸汽體積濃度超過 30% (280g/m^3) 時火災熄滅；但實驗顯示，濃度低至 100-180 g/m^3 時就有可能會撲滅，主要取決於水滴粒徑之大小。本實驗以水蒸汽濃度超過體積的 30 % 作為判斷撲滅的標準，而超過體積 25 % 的濃度很可能也撲滅了，尤其是在現場如果也有二氧化碳的情況下。除了細水霧的蒸發外，水蒸汽是由火的化學反應所產生，而火亦會生產一種惰性氣體—二氧化碳，一種可能滅火的滅火藥劑。

氧濃度也可作為是否將火災撲滅與否的一項指標，氧燃燒的要件取決於溫度。以細水霧系統來說，保守估計氧氣濃度低於體積的 12 % 時將發現撲滅。

可以從計算區域的任何角度去計算任何物種的體積濃度。從這點，我們可以調查該地區供應空氣給燃燒區的水蒸汽和二氧化碳濃度。目前 KFX 不一定能自行顯示火勢熄滅。然而，仍可藉由分析結果，我們可以評估是否存在火勢熄滅的條件。

應當注意的是，空氣溫度在飽和蒸汽壓滿足體積 30 % 的水蒸汽之前必須高於 70°C (即 100 % 相對濕度在 70°C)，以致於一些受熱的空氣會在燃燒區域內重複循環對流，使得水蒸汽將火撲滅。

5.1.1 滅火比較

- 1、檢視是否在細水霧釋放後的五分鐘內撲滅火源，比較實驗與電腦模擬的差異。細水霧釋放前後艙內的溫度變化，以評估細水霧的冷卻效果；比較實驗與電腦模擬的差異。
- 2、細水霧系統釋放期間對電器設備（電力馬達或電力開關箱）的影響評估。

5.1.2 實驗限制

1、燃料：

實驗使用柴油為燃料，惟柴油較難以點燃，所以進行實驗時另加入一公升之甲醇輔助燃燒。

2、氧氣：

模擬的實驗空間為密閉良好之室內，惟實際進行實驗之空間，無法如模擬般密閉，使得氧氣會從縫隙進入（因燃燒時，室內空間壓力為負壓），會造成與模擬結果有所差異。

3、熄滅：

因模擬對於熄滅的判斷標準，是以火焰區域附近氧氣濃度低於 12% 時為依據，而實驗中我們僅能以目測去觀察火焰是否熄滅，又因在實驗過程中會產生大量的黑煙而阻礙視線，故對於目測火焰是否熄滅可能會造成時間上的誤差。

5.2 情境設定

表 11 為此模擬的幾何空間模組之參數，本實驗中需改變的參數包括：

1、通風開啟或通風關閉（通風量 280 m³/min，開口面積 900mm×1300mm）

2、兩扇門都打開或都關閉

3、三種壓力對於每一壓力、每個噴嘴的流量計算。

通風假設有水蒸氣含量 4% 的體積。這相當於室外條件下約 35 度和 80% 的相對濕度。水流動速率通過噴嘴是由下列公式決定：

$$Q(\text{l/min}) = 2.77 P^{0.5} \quad (5)$$

Q：流量 P：壓力

三個壓力範圍為：

•低壓力（170.4 Psi） •中壓力（340.8 Psi） •高壓力（511.2 Psi）

細水霧噴頭的錐角規範為 10 度。細水霧噴頭座標位置如 18 所示。天花板下方的四個噴頭指向下。其餘噴頭位於各角落指向中心。

每個情境模擬 15 秒，細水霧系統開始啟動。

表 11 所有情境的關鍵輸入參數

	Ventilation On/off	Door positions	Fire source	Pressure bar	Flow per nozzle liter/min	Flow per nozzle kg/s	Av. Droplet Size micro m	Droplet vel. m/s
Case1	off	closed	Jetfire	12	9,69	0,161	300	1,75
Case2	off	closed	Jetfire	24	13,70	0,228	125	1,1
Case3	off	closed	Jetfire	36	16,78	0,280	82	0,8
Case4	off	closed	Poolfire	12	9,69	0,161	300	1,75
Case5	off	closed	Poolfire	24	13,70	0,228	125	1,1
Case6	off	closed	Poolfire	36	16,78	0,280	82	0,8
Case7	off	open	Jetfire	12	9,69	0,161	300	1,75
Case8	off	open	Jetfire	24	13,70	0,228	125	1,1
Case9	off	open	Jetfire	36	16,78	0,280	82	0,8
Case10	off	open	Poolfire	12	9,69	0,161	300	1,75
Case11	off	open	Poolfire	24	13,70	0,228	125	1,1
Case12	off	open	Poolfire	36	16,78	0,280	82	0,8
Case13	on	closed	Jetfire	12	9,69	0,161	300	1,75
Case14	on	closed	Jetfire	24	13,70	0,228	125	1,1
Case15	on	closed	Jetfire	36	16,78	0,280	82	0,8
Case16	on	closed	Poolfire	12	9,69	0,161	300	1,75
Case17	on	closed	Poolfire	24	13,70	0,228	125	1,1
Case18	on	closed	Poolfire	36	16,78	0,280	82	0,8
Case19	on	open	Jetfire	12	9,69	0,161	300	1,75
Case20	on	open	Jetfire	24	13,70	0,228	125	1,1
Case21	on	open	Jetfire	36	16,78	0,280	82	0,8
Case22	on	open	Poolfire	12	9,69	0,161	300	1,75
Case23	on	open	Poolfire	24	13,70	0,228	125	1,1
Case24	on	open	Poolfire	36	16,78	0,280	82	0,8

5.3 模擬運算

5.3.1 幾何模型

幾何空間的設定，是透過 SolidWorks CAD 的系統輸出 IGES 的格式模擬；本研究為模擬而使用一個油池火災和一個噴射火焰的兩種格點，每個案件所選擇的格點設定為 400,000 個格點數。

5.3.2 邊界條件

由於一些情境設定為經由開口門的自然通風，要計算的區域由開口門之領域與天花板上方向外擴展。在計算區域外面外部的邊界，地面仿照固體，而其他的邊界則仿照常數壓力作為分界。根據經驗，將開口門設定朝向未知的環境是最好

的方式。

在 KFX 油池的邊界條件設定由計算火災輻射與油蒸汽壓力中使用反射來計算多少石油被蒸發。火災的規模主要是由輻射的反射作用所控制。柴油噴射是仿照的噴霧模式，雖然跟水霧的原理大致相同，不過柴粒滴是蒸發成可燃的碳氫化合物氣體而非水蒸汽。若要火能水平噴射出來，需要將柴油液滴射入到火舌內，因為最初的溫度低於柴油的燃點。KFX 從液滴的大量擴散和液滴蒸汽壓力來推算蒸發率。

5.4 實際驗證實驗規劃

5.4.1 實驗空間

本案之全尺寸模擬實驗空間尺寸：8.75 m 長×3.5 m 寬×5.7 m 高（輪機艙間），並就此進行空間配置（如圖 23-26）。



圖 23 模擬機艙實體（外觀）



圖 24 模擬機艙實體 1 (內部)



圖 25 模擬機艙實體 2 (內部)



圖 26 模擬機艙實體 3 (內部)

5.4.2 水系統

本研究在使用高壓、八個灑水頭同時作用下，作動五分鐘的水量約為 670 公升，所以在水系統的部分，使用 1 噸（1000 公升）的水塔，搭配 15HP 的高壓泵浦（如圖 27），使其壓力可以達到 36bar（522psi）。



圖 27 高壓泵浦（左）與水塔（右）

5.4.3 溫度量測

本實驗過程中需量測實驗空間溫度，依模擬所設定共有 68 個測點，使用的測溫工具為 K Type (量測範圍為 $0^{\circ}\text{C} \sim 1450^{\circ}\text{C}$ 、最大誤差 $\pm 0.75\%$) 的 Thermocouple (熱電偶)，搭配 Data Logger (資料擷取器)，作為本次實驗溫度量測之工具。

如圖 28 所示，利用兩種均質之金屬導體 A 與 B 所製作形成之封閉迴路，當兩接合點之溫度為 T_1 與 T_2 時，若 $T_1 > T_2$ 時回路內產生電流 i ，若 $T_1 = T_2$ 時無電流產生，當 $T_1 < T_2$ 時電流 i 之方向會相反。此種現象在 1821 年由 T.J. Seebeck 發現，因此被稱之為席貝克效應 (Seebeck effect)。當回路內之電流流動時會產生電動勢，稱為熱電動勢 (emf)，將基準接點打開後之端子所量測之電動勢被稱為 Seebeck emf。利用席貝克效應以兩種金屬與兩端接合點所形成之測定溫度感應裝置稱為熱電偶。

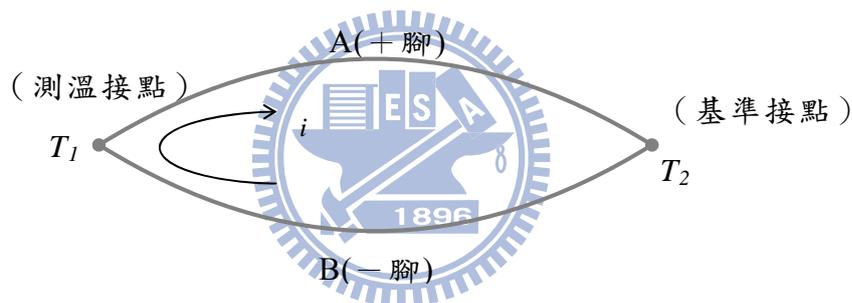


圖 28 熱電偶 ($T_1 > T_2$ 之情形)



圖 29 熱電偶 (左)、Data Logger (中)、資料接收電腦 (右)

5.4.4 火源

5.4.4.1 油池火災

模擬油池火災所使用的火盆為 $1.5\text{m} \times 1.5\text{m}$ 面積為 2.25m^2 ，但實驗時考量安

全與方便性，故改用四個 $0.9m \times 0.65m$ 面積合計為 $2.34 m^2$ 的火盆進行實驗。

研究中欲使用 $2.15MW$ 火載量*進行實驗，火載量計算方式如下【55】：

$$\dot{Q} = A \cdot \dot{m}'' \cdot \chi \cdot \Delta H_c \quad \leftarrow \text{此為火載量計算公式} \quad (6)$$

$$A = 0.9m \times 0.65m \times 4 = 2.34m^2 \quad \leftarrow \text{此為火盆面積} \quad (7)$$

$$\dot{m}'' = \dot{m}''_{\infty} \cdot (1 - e^{-k\beta D}) \quad \leftarrow \text{此為經驗公式} \quad (8)$$

$$\dot{m}''_{\infty} = 0.039 kg/m^2s \quad (9)$$

$$k\beta = 3.5m^{-1} \quad (10)$$

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot A}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 2.34}{\pi}} = 1.726m \quad (11)$$

$$\dot{m}'' = 0.039 \cdot (1 - e^{-3.5 \times 1.726}) = 0.037 kg/m^2s \quad (12)$$

$$\chi = 70\% = 0.7 \quad \leftarrow \text{此為燃燒效率} \quad (13)$$

$$\Delta H_c = 43.2 \sim 44 MJ/kg \quad (13)$$

$$\dot{Q} = 2.34m^2 \cdot 0.037 \frac{kg}{m^2s} \cdot 0.7 \cdot 43.2 \frac{MJ}{kg} \quad (14)$$

$$\dot{Q} = 2.62 \frac{MJ}{s} = 2.62MW \quad \leftarrow \text{此為柴油火載量}$$

$$\dot{Q} = 2.34m^2 \cdot 0.025 \frac{kg}{m^2s} \cdot 0.7 \cdot 20.0 \frac{MJ}{kg} \quad (15)$$

$$\dot{Q} = 0.819 \frac{MJ}{s} = 0.819MW \quad \leftarrow \text{此為甲醇火載量}$$

5.4.4.2 噴射火源

依據規範規定，如表 12 的規格訂製一具噴射火焰器，本實驗使用的燃料為中油公司所販售之「超級柴油」，在油池火災中另配合使用「甲醇」作為助燃之燃料。

表 12 噴射火焰器規格

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°C
熱釋放率	1MW

*因火盆面積不變，所以燃燒多少燃料為定值，不會因為燃料的多寡而有所改變，例如：八分滿的燃料跟三分滿的燃料所產生的火載量是相同的。



圖 30 噴射火焰機

噴射火源熱釋放率計算如下【56】：

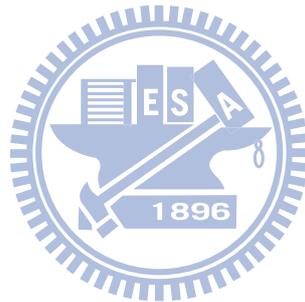
$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot \Delta H \quad (16)$$

$$\Delta H = 44 \text{ MJ/kg} \times 70\% = 30.8 \text{ MJ/kg} = 30811.2 \text{ KJ/kg} \quad (17)$$

$$1000 \frac{\text{kJ}}{\text{s}} = \frac{x \text{ kg}}{300\text{s}} \times 30811.2 \frac{\text{KJ}}{\text{kg}} \quad (18)$$

$$x \text{ kg} = \frac{300\text{s} \times 1000 \frac{\text{KJ}}{\text{s}}}{30811.2 \frac{\text{KJ}}{\text{kg}}} = 9.74 \text{ kg} \quad (19)$$

$$\frac{9.74 \text{ kg}}{860 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 0.01132 \text{ m}^3 = 11.32 \text{ L} \quad (20)$$



經審視，要達到 1MW 的熱釋放率可由燃料消耗量是否達到 11.32L/5min 得知，五分鐘超過 11.32L 其熱釋放率即大於 1MW，反之則小於。本實驗每分鐘大約消耗 2.5L 的柴油，熱釋放率換算得知大約為 1.1MW。

5.4.5 漏電實驗

5.4.5.1 漏電實驗箱

本實驗將電力開關箱取下箱體面板，箱體含三組漏電斷路器。本研究利用漏電斷路器作動，來得知產生漏電之情況，但實驗中不易觀察出漏電斷路器是否作動，故於實驗室外裝設警示燈，連接至電力開關箱，通電中燈號應保持閃爍，當燈號熄滅即表示已產生漏電（如圖 31）。



圖 31 漏電實驗箱（左）、警示燈（右）

5.4.5.2 馬達漏電實驗

以實體之 DC、AC 馬達施行馬達漏電實驗，馬達大小選用倉內泵浦體積尺寸相近者（如圖 32），規格如下：

DC 馬達： 5HP、3.7KW、1750RPM、3 Φ 220V

AC 馬達： 10HP、7.5KW、3 Φ 220V

漏電的評估以「絕緣電阻計」紀錄實驗前後的絕緣電阻值，絕緣電阻值參考說明如下：

- 5M Ω 以上 — 絕緣電阻良好
- 1M Ω 以上 — 絕緣電阻尚可，須注意
- 1M Ω 以下 — 稍有漏電現象
- 0.5M Ω 以下 — 漏電嚴重
- 0.1M Ω 以下 — 漏電非常嚴重，已影響電氣設備正常運轉



圖 32 AC 馬達（左）、DC 馬達（右）

六、實驗結果

6.1 電腦模擬結果與探討

透過電腦模擬船艙內柴油機發電機的 24 個火災情境，火源設定包括油池火災和噴射火焰，通風條件和流經水霧噴嘴設定之變化方式（如表 13）。以 5 分鐘的模擬時間為限，超過 5 分鐘即停止程式模擬，並以火焰區域附近氧氣濃度低於 12% 時為熄滅判斷標準；根據電腦模擬數據顯示，案例 1~3 與案例 4~6 顯示該火焰被細水霧滅火系統撲滅，而其他案例，則未在 5 分鐘內由細水霧滅火系統撲滅。根據文獻分析，細水霧滅火系統之水滴粒徑越小，即噴頭壓力越大致使噴灑出的粒徑越小而具有較大動量，更容易穿越火焰預濕燃料及冷卻火源根部進一步達成滅火，對大型火災之滅火效果越佳。在 24 個情境案例中，挑選 10 個案例進行探討，分別為：1~3、6、9、12、15、18、21、24。將由船艙內部設置的熱電偶樹量測的熱電偶溫度、船艙內含氧濃度等，來分析這 10 個火災模擬案例。

表 13 24 個情境模擬結果

	通風 (280M ³ /min)		封艙	不封艙	火源	低壓	中壓	高壓	模擬結果
	關	開							
Case1	關		V		噴射火源	V			第 145 秒撲滅
Case2	關		V		噴射火源		V		第 145 秒撲滅
Case3	關		V		噴射火源			V	第 175 秒撲滅
Case4	關		V		油池火源	V			第 75 秒撲滅
Case5	關		V		油池火源		V		第 75 秒撲滅
Case6	關		V		油池火源			V	第 75 秒撲滅
Case7	關			V	噴射火源	V			未在 5 分鐘內撲滅
Case8	關			V	噴射火源		V		未在 5 分鐘內撲滅
Case9	關			V	噴射火源			V	未在 5 分鐘內撲滅
Case10	關			V	油池火源	V			未在 5 分鐘內撲滅
Case11	關			V	油池火源		V		未在 5 分鐘內撲滅
Case12	關			V	油池火源			V	未在 5 分鐘內撲滅
Case13		開	V		噴射火源	V			未在 5 分鐘內撲滅
Case14		開	V		噴射火源		V		未在 5 分鐘內撲滅
Case15		開	V		噴射火源			V	未在 5 分鐘內撲滅
Case16		開	V		油池火源	V			未在 5 分鐘內撲滅
Case17		開	V		油池火源		V		未在 5 分鐘內撲滅
Case18		開	V		油池火源			V	未在 5 分鐘內撲滅

Case19		開		V	噴射火源	V			未在 5 分鐘內撲滅
Case20		開		V	噴射火源		V		未在 5 分鐘內撲滅
Case21		開		V	噴射火源			V	未在 5 分鐘內撲滅
Case22		開		V	油池火源	V			未在 5 分鐘內撲滅
Case23		開		V	油池火源		V		未在 5 分鐘內撲滅
Case24		開		V	油池火源			V	未在 5 分鐘內撲滅

6.1.1 熱電偶溫度

熱電偶測量溫度是求各區域熱電偶熱平衡的結果。在火焰附近的熱電偶溫度明顯不同於氣體溫度，往往是由輻射熱平衡佔主導地位。若要在熱電偶間溫度測量獲得有意義的比較結果，必須得計算設備對流和輻射熱兩者間的平衡。現有的結果以直徑 0.5 公分圓柱體的熱平衡為根據，為了簡便起見，假設熱電偶的熱質量可以忽略不計。

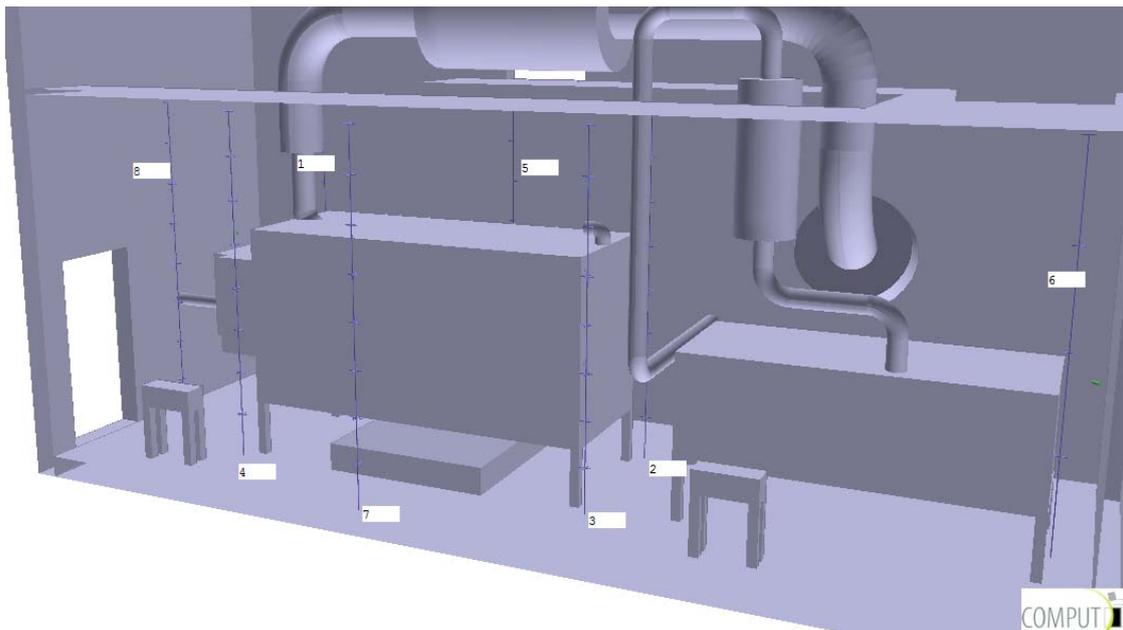


圖 33 熱電偶樹設置透視圖

圖 34 顯示熱電偶樹的位置，其中 1-5 與 7-8 的熱電偶樹有 8 個垂直間距為 0.4m 的熱電偶；熱電偶樹 6 有 4 個垂直間距為 0.8m 的熱電偶。熱電偶溫度隨時間的成長圖如附錄 A 所示，每個熱電偶樹都有一張圖，在該圖中有標示每個曲線所代表的熱電偶的高度，即 $EI(m)$ 。10 個案例便有 80 張的熱電偶樹溫度變化圖（熱電偶溫度變化圖請參考附錄 A）。

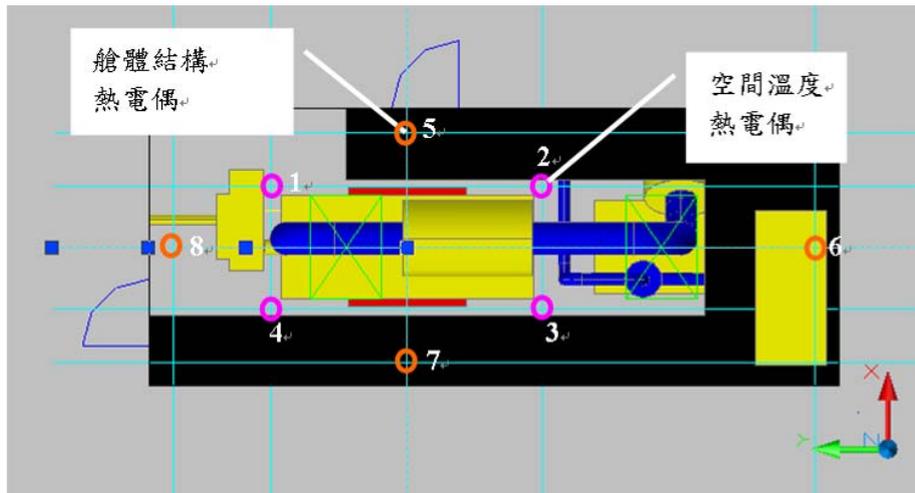


圖 34 熱電偶樹設置平面圖

6.1.2 熱電偶溫度計算結果

案例 1、2 和 3 都是柴油噴射火焰，同樣都沒有外部空氣供應（即通風關閉、封艙），不同的是細水霧系統的粒徑和流量（不同壓力之影響），在這三個案件中都在 1 和 4 號熱電偶樹發現最大溫度值，由於這些熱電偶樹最接近噴射火焰，這種結果應是可以被預期的。熱電偶溫度的最高點在這三個情境相對接近 $800^{\circ}\text{C} \pm 50^{\circ}\text{C}$ 。在模擬開始啟動後的 120 秒至 150 秒之間熱電偶出現最高溫度點（細水霧是在開始模擬後 15 秒啟動）。某些熱電偶樹的溫度震盪比其他熱電偶樹更為明顯，在案例 1 至 3 中，1 號熱電偶樹發現最大振幅。在案例 3 中，8 號熱電偶樹在模擬接近尾聲時出現個怪異的高溫點，這可以解釋為 8 號熱電偶樹附近個很小的空氣區塊促使延長燃燒，油滴在碰觸到火焰前沒被蒸發和稀釋，以致於油滴可以穿越惰性區域，等到接觸到足夠的氧氣時再燃燒。

KFX 模擬得到的熱電偶升溫曲線有時在讀取上有些困難，如果火勢熄滅已經發生了，但一般降溫趨勢在細水霧啟動後的某些時間點，表明在案例 1 至 3 中有可能火被撲滅了。

案例 6 是一個油池火災案例，沒有外部空氣供應（即通風關閉、封艙），細水霧系統的情境設定為高壓（最高流量和最小水滴粒徑）。熱電偶最大溫度值（1100

°C) 在開始模擬後 50 秒出現 (即細水霧啟動後的 35 秒)。這是水系統/水霧系統的一個典型的行為，水噴灑的初步影響是轉換空氣的動量和增加火場的對流，而導致水滴或水蒸氣在開始冷卻火焰之前火勢在短期間更加劇烈。在這場火災中，水的蒸發很快以致於大量的水蒸汽產生，由熱電偶溫度的紀錄上可以很明顯的看出火勢撲滅。

模擬案例中開口門不封艙和/或通風開啟 (案例 9,12,15,18,21 和 24) 普遍顯示，熱電偶溫度達到高原值 (最高值) 後開始在這個值附近振盪持續至 5 分鐘而沒有降溫的趨勢。如果有趨勢略微上升。一般油池火災振盪幅度大於柴油噴射火災，這是可以預期的，因為油池火災的輻射反射機制，油氣將火焰帶離油面，減少輻射的反射，然後被輻射驅動的蒸發會減少，使火焰又再度接近油池。這是一個傾向振盪的動態系統。油池火災可以觀察到熱電偶的最高溫度 (1100 °C)，可能是因為熱電偶離油池火災火源的距離比噴射火災火源距離更近而造成的。



6.2 滅火

細水霧系統最重要的滅火方式是利用水霧阻絕空氣 (氧氣) 對火源的作用。計算結果包含所有種類物質於燃燒過程之濃度詳細資料。例如，可以查看在火源周圍空氣供給量及水霧的濃度。然而，研究空氣中的氧氣濃度的方式更為便利，可對水霧與二氧化碳圍繞火源狀況作迅速評估。根據模擬結果觀察火焰區域附近氧氣濃度%，可以相當精確評估目前火災撲滅狀況。所以當氧氣濃度低於 12% 時，可確定細水霧系統已經撲滅火勢。

附錄 B 顯示當等溫線在水平面上，火焰區域附近之氧氣濃度。從這些平面圖，可測量出以下滅火時間 (如表 14)。

表 14 滅火時間計算結果

Case	01	02	03	04	05	06
Time to extinction	145s	145s	175s	75s	75s	75s
Case	07-09	10-12	13-15	16-18	19-21	22-24
Time to extinction	>5 min	>5min				

氧氣濃度平面圖顯示，當門和/或通風系統是打開的，火災撲滅機會不高。在模擬情境中，當門和通風系統是關閉的，火災會於合理時間內熄滅。在噴射火災中似乎是相反狀況；一般來說，大家會期望較高的質量流量（mass flow）能提供更好的效能。

而在通風良好、使用高壓的高流量時的案例中顯示，5 分鐘模擬期間內很少或根本沒有撲滅的跡象。

細水霧的供應量不充足到建立足夠的水霧/蒸氣濃度，要滅火是不太可能的，而提供某一通風率會降低水流動的滅火能力。較低的壓力會製造較大顆的水滴粒徑與較低的流速，大顆的水滴可能有更好的機會可以滲入火焰的核心，但其實不太可能，因這將降低水的覆蓋範圍。

6.2.1 火災影像

從 KFX 模擬，計算容積性質可以用來模擬火災樣子（在這個研究中藉著一個透明的牆面）。在計算期間產生數以千張這種類型的影像，來製作成動畫影片。雖說視頻的呈現對於計算火災的瞬態行為更讓人深刻理解，但不適用於報告。附錄 C 的圖表為電腦藉由模擬火災生成的影像。

6.2.2 模擬結果

電腦模擬這 24 個火災情境可以給予下列結果：只有在通風與艙門同時關閉時，細水霧滅火系統於 5 分鐘之內可以將火勢撲滅；在通風開啟或艙門打開的情況下，滅火系統未能於開始燃燒的 5 分鐘之內將火勢撲滅。

細水霧的滅火原理，係由噴頭提供足夠濃度的細水霧去抵達火源位置進而撲滅火災，於文獻回顧與 24 個模擬情境的結果可看出通風與封艙條件為影響細水霧滅火效能之最大主因，在通風開啟時進風量高至 $280\text{M}^3/\text{min}$ ，進風口又正好位於火源上方，極強的風速對著火的方向吹，細水霧可能在尚未到達火源附近即受風影響吹跑了而無法到達火源中心；不封艙時，開口門甲板上與甲板下各一個，又

靠近火源位置，剛好作為空氣對流的進氣與出氣口，極可能也影響火源區域細水霧濃度的累積；本報告文獻分析探討內容亦提到：Liu 等人進行不同通風條件下細水霧滅火效能之研究指出【23】，在強制通風下細水霧系統滅火效率將降低，主要原因是強制通風增強了起火室內和外界氣體質量混合，氧氣代換和抑制之滅火機制影響將降低。

6.3 實際驗證實驗結果

6.3.1 實驗過程

依據電腦模擬的 24 個情境結果，顯示通風開啟與滅火系統噴嘴壓力設定為低壓力時，細水霧系統之滅火效果不佳，故基於成本與效益因素考量，從中選擇較具滅火效果之 6 種情境，進行全尺寸實驗（如表 15），以利探討。

表 15 燃燒試驗之 6 種情境

	通風		封艙	不封艙	火源	低壓	中壓	高壓	電腦模擬結果
	(280M ³ /min)								
Case2	關		V		噴射火源		V		第 145 秒撲滅
Case3	關		V		噴射火源			V	第 175 秒撲滅
Case9	關			V	噴射火源			V	未在 5 分鐘內撲滅
Case5	關		V		油池火源		V		第 75 秒撲滅
Case6	關		V		油池火源			V	第 75 秒撲滅
Case12	關			V	油池火源			V	未在 5 分鐘內撲滅

註：中壓（24bar=348psi）、高壓（36bar=522psi）（psi=lb/in²）（bar=kg/cm²）

6.3.1.1 實驗一：CASE 2

實驗設定：通風關閉、封艙、噴射火源、中壓。

實驗步驟：

- 1、開啟排煙口、關閉艙門、設定壓力為中壓（24bar=348psi）。
- 2、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（以下實驗皆同）。

- 3、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（以下實驗皆同）。

實驗結果：約在 55 秒時火焰熄滅，如表 16 所示。

6.3.1.2 實驗二：CASE3

實驗設定：通風關閉、封艙、噴射火源、高壓。

實驗步驟：

- 1、開啟排煙口、關閉艙門、設定壓力為高壓（36bar=522psi）。
- 2、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。
- 3、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。

實驗結果：約在 56 秒時火焰熄滅，如表 16 所示。



6.3.1.3 實驗三：CASE9

實驗設定：通風關閉、不封艙、噴射火源、高壓。

實驗步驟：

- 1、開啟排煙口、開啟艙門、設定壓力為高壓（36bar=522psi）。
- 2、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。
- 3、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。

實驗結果：約在 150 秒時火焰熄滅，如表 16 所示。

6.3.1.4 實驗四：CASE5

實驗設定：通風關閉、封艙、油池火源、中壓。

實驗步驟：

- 1、開啟排煙口、關閉艙門、設定壓力為中壓（24bar=348psi）。
- 2、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。
- 3、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。

實驗結果：實驗結果如表 16 所示，雖然目視火焰於 272 秒熄滅，但只要一停止灑水或開啟艙門使其氧氣有所補充，隨即造成復燃現象。經討論過後，研判是為艙體密封不足所造成，於加強艙體密封後，再次實驗，實驗結果如表 17 所示，火焰熄滅時間分別為 219 秒、234 秒、271 秒，平均滅火時間為 241 秒。二次實驗不同之處，在於實行第二次實驗時，當目視火焰熄滅時，並不馬上關閉灑水系統，而是繼續噴灑約 1 分鐘後再予關閉，當關閉灑水系統或開啟艙門後，油池火源並無復燃現象發生。

6.3.1.5 實驗五：CASE6

實驗設定：通風關閉、封艙、油池火源、高壓。

實驗步驟：

- 1、開啟排煙口、關閉艙門、設定壓力為高壓（36bar=522psi）。
- 2、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。
- 3、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。

實驗結果：實驗結果如表 16 所示，雖然目視火焰於 296 秒熄滅，但只要一停止灑水或開啟艙門使其氧氣有所補充隨即造成復燃現象。經討論過後，研判仍是為艙體密封不足所造成，故於加強艙體密封

後，再次進行實驗，實驗結果如表 17 所示，火焰熄滅時間分別為 279 秒、297 秒、330 秒，平均滅火時間為 302 秒。二次實驗不同之處，在於實行第二次實驗時，當目視火焰熄滅時，並不馬上關閉灑水系統，而是繼續噴灑約 1 分鐘後再予關閉，當關閉灑水系統或開啟艙門後，油池火源並無復燃現象發生。

表 16 實驗結果一覽表（艙體縫隙未予密閉處理）

	封艙	不封艙	火源	中壓	高壓	模擬結果	實驗結果
Case2	V		噴射火源	V		145 秒撲滅	55 秒撲滅
Case3	V		噴射火源		V	175 秒撲滅	56 秒撲滅
Case9		V	噴射火源		V	未在 5 分鐘內撲滅	150 秒撲滅
Case5	V		油池火源	V		75 秒撲滅	272 秒目視已熄滅，停止灑水後隨即復燃，於 868 秒時完全熄滅
Case6	V		油池火源		V	75 秒撲滅	296 秒目視已熄滅，360 秒時開啟艙門隨即復燃，於 554 秒時完全熄滅
Case12		V	油池火源		V	未在 5 分鐘內撲滅	未在 5 分鐘內撲滅，於 480 秒時進入艙體滅火，於 517 秒時完全熄滅

6.3.1.6 實驗六：CASE12

實驗設定：通風關閉、不封艙、油池火源、高壓。

實驗步驟：

- 1、開啟排煙口、開啟艙門、設定壓力為高壓（36bar=522psi）。
- 2、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。
- 3、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。

實驗結果：實驗結果如表 16 所示，火焰無法在 5 分鐘內熄滅。經討論過後

懷疑是否為艙體密封不足所造成，故於加強艙體密封後，再次進行實驗，實驗結果如表 17 所示，火焰依然無法在 5 分鐘內熄滅。

表 17 實驗結果一覽表（艙體縫隙有密閉處理）

	封艙	不封艙	火源	中壓	高壓	模擬結果	實驗結果
Case5	V		油池火源	V		75 秒撲滅	219 秒撲滅
							234 秒撲滅
							271 秒撲滅
Case6	V		油池火源		V	75 秒撲滅	279 秒撲滅
							297 秒撲滅
							330 秒撲滅
Case12		V	油池火源		V	未在 5 分鐘內撲滅	未在 5 分鐘內撲滅

6.3.2 漏電實驗

6.3.2.1 電力箱漏電實驗

本實驗從實驗一開始直至實驗六結束，電力箱漏電實驗均持續施作，而警示燈一直保持閃爍，表示電力箱無漏電之虞。



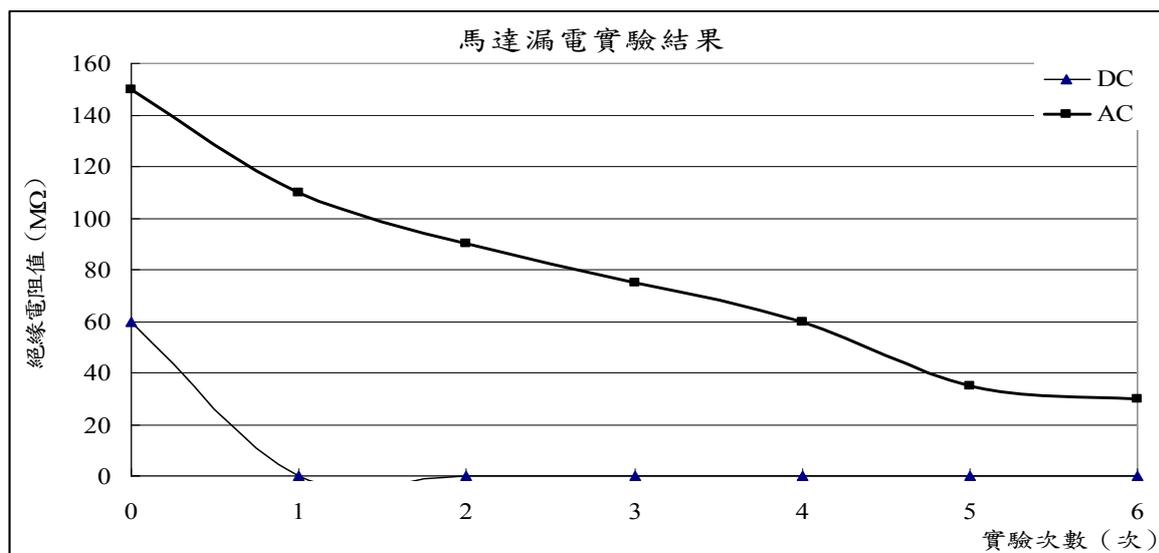
6.3.2.2 馬達漏電實驗

實驗步驟：於每次實驗開始前，先以「絕緣電阻計」量測 DC 直流馬達與 AC 交流馬達之絕緣電阻值，並於實驗結束後，再進行一次測量，結果如表 18、19 所示。

表 18 電阻值量測情形

		DC 馬達	AC 馬達		DC 馬達	AC 馬達
Case2	馬達實驗前 電阻值	60 MΩ	150 MΩ	馬達實驗後 電阻值	0 MΩ	110 MΩ
Case3		0 MΩ	110 MΩ		0 MΩ	90 MΩ
Case9		0 MΩ	90 MΩ		0 MΩ	75 MΩ
Case5		0 MΩ	75 MΩ		0 MΩ	60 MΩ
Case6		0 MΩ	60 MΩ		0 MΩ	35 MΩ
Case12		0 MΩ	35 MΩ		0 MΩ	30 MΩ

表 19 馬達漏電量測情形



6.3.3 實驗結果分析

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灑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：

$$D_0^2 - Dx^2 = \lambda t \quad (21)$$

D_0 : 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 (m^2/sec)

蒸發係數 (λ) 可以透過下列公式計算【57】:

$$\lambda = \frac{8k \ln(1+B)}{C_p \rho_F} \quad (22)$$

- k : 水蒸汽之熱傳導係數 ($2.48 \times 10^{-2} \text{ W/m} \cdot \text{K}$)
 C_p : 水蒸汽之比熱 ($2 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$)
 ρ_F : 水的密度 (958.4 kg/m^3)
 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：

$$B = \frac{C_p (T_\infty - T_b)}{L} \quad (23)$$

- T_b : 水霧滴表面溫度 (K)
 T_∞ : 水霧滴週遭氣體溫度 (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°C ，分別取水霧液滴所受周遭火場溫度 $T_\infty=523\text{K}$ (250°C)、 $T_\infty=473\text{K}$ (200°C)、 $T_\infty=423\text{K}$ (150°C)、 $T_\infty=398\text{K}$ (125°C) 及 $T_\infty=373\text{K}$ (100°C) 進行蒸發所需時間計算，其它條件為：

水霧滴表面溫度 $T_b=373\text{K}$ ；

水的潛熱 $L=2257.1\text{kJ/kg}$ ；

水蒸汽的比熱 $C_p=2\text{kJ/kg}\cdot\text{K}$ ；

水蒸汽之熱傳導係數 $k=2.48 \times 10^{-2} \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ；

水的密度 $\rho_F=958.4\text{kg/m}^3$

將上述性質條件代入上式公式計算，分別計算水霧滴粒徑 $85\mu\text{m} \sim 300\mu\text{m}$ 在本

實驗條件下水霧液滴蒸發所需時間。計算結果如表 20 所示。

表 20 水霧液滴蒸發所需時間

溫度 \ 粒徑	250°C	200°C	150°C	125°C	100°C
	523K	473K	423K	398K	373K
85μm	0.35 秒	0.43 秒	0.56 秒	0.66 秒	0.82 秒
125μm	0.75 秒	0.93 秒	1.21 秒	1.44 秒	1.78 秒
200μm	1.93 秒	2.37 秒	3.10 秒	3.68 秒	4.55 秒
300μm	4.35 秒	5.33 秒	6.97 秒	8.28 秒	10.24 秒

忽略火源燃燒產生之熱浮力，以自由落體公式計算 85μm~300μm 水霧液滴落下之時間，計算結果如下表 21 所示。

表 21 水霧液滴落下所需時間

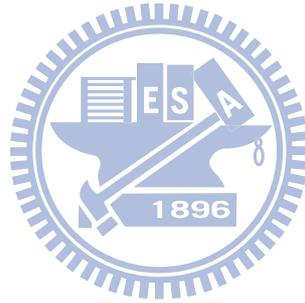
	5.7m*	3.5m
85μm	1.00 秒	0.77 秒
125μm	0.97 秒	0.74 秒
300μm	0.91 秒	0.68 秒

由表 20、21 可知，在油池火源燃燒的空氣最高溫度約 200°C 時，高壓所產生的粒徑（85μm）落下時間約需 1 秒，但蒸發時間卻只耗時 0.43 秒，換句話說當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（125μm）落下時間約需 0.97 秒，但蒸發時間約為 0.93 秒，這表示其水霧液滴接近火源附近才被蒸發。如此便可說明為何油池火源實驗時，中壓具有較好的滅火效能了。而噴射火源燃燒的空氣最高溫度約 100°C 時，高壓所產生的粒徑（85μm）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（125μm）落下時間約需 0.74 秒，但蒸發時間約為 1.78 秒，這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。

* 註：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

6.4 損害管制規劃

本實驗的損害管制規劃以艙間電力裝備（通電中的電力箱、未通電 AC 馬達及 DC 馬達），是否因細水霧的噴灑而漏電或受損為研究內容。第一次實驗後 DC 馬達的絕緣阻抗量測呈現短路現象（ 0Ω ），但 AC 馬達於每次實驗後（累積噴水量）的絕緣阻抗量測值（大於 $30M\Omega$ ）皆在接受值（ $5M\Omega$ ）以上。電力箱歷經每次實驗均能正常運作 20 分鐘以上。而 DC 馬達漏電部分原因，是因為水霧粒子在甲板上方凝結成水滴後直接滴落，使得 DC 馬達進水，造成短路現象。這雖從實驗中無法確認是由細水霧顆粒直接造成，只能說明若使用之艙間配置中有類似的情形，會造成水霧粒子凝結而滴落，有可能會造成漏電，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。



七、結論與建議

7.1 結論

1. 從預擬的 24 個案例中挑選 6 個情境進行實驗，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下的油池火源或噴射火源，大約皆能在 5 分鐘內火勢撲滅，嚴格比較之下，中壓系統比高壓系統有較短的滅火時間。
2. 在實驗過程中細水霧對火場的降溫與煙霧的洗滌（增加能見度）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，同時也大大減少煙塵粒子對設備所造成的污染。
3. 本研究先執行電腦模擬再進行實驗驗證，與防火工程上先依據實驗結果去調整模擬參數設定順序不同。在未知實際參數情況下，發現噴射火源所產生火焰長度不同（電腦模擬較長），造成現場空間溫度極大差異，進而影響燃燒區的範圍大小及和水霧受熱蒸發的交互作用，也影響火源被撲滅的時間，所以電腦模擬滅火時間較長（case 2, case 3），也產生 case 9 無法於五分鐘之內撲滅的原因。
4. 在油池火源情境下的電腦模擬設定中，可以規劃為一個 100%密閉的空間設定，然而在實際的試驗空間中卻很難達到，這也是為何本實驗進行第二次實驗的原因。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 5, case 6）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 12 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。
5. 火場行為是非線性的現象，從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。在此第

二次的實驗中，火源被撲滅時間僅呈現 10%的範圍變化，因此，這是一個重複性可被接受的實驗結果。

6. 基於成本與時間因素，實際驗證的實驗是採連續性的執行，故所獲得之相關環境變數係（如水的累積）是為持續增加的情形，與實際火場中自零基開始並不相同，此為探討過程中必須留意的事情；此外，本實驗獲得了一個可以參考比較的實際成果，即是細水霧系統對水的消耗量，這可以在日後規劃細水霧滅火系統時，提供淡水配置量的參考。
7. 依據實驗結果，並參酌相關救火操演範例與實際於艦艇服務之經驗，規劃細水霧系統災害控管流程圖供參（如圖 35）。

7.2 建議

1. 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火場抑制與撲滅效果；在細水霧系統的選擇上，從實驗證明使用「中壓」（125 μ m）可為較適合的選擇；在成本上來說，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；此外，在水量方面，本實驗配置八個灑水噴頭，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，對於在船上的作業人員來說，有著較大的幫助。
2. 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，建議上方加裝檔板等防護措施。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。
3. 在本研究中設置的模擬實體火場，仍與實際艦船輪機艙間有顯著的差異，如金屬鑄板之材質與厚度、艙間封閉的情形、實體裝備的佈設、電纜配線的環繞、艙底油水的沉積等，都會影響到火場的蔓延與燃燒的變化，這是本實驗

所無法顧及之處，建議日後應可檢討一個實際艦船機艙的環境進行驗證，如此獲得之數據將可更接近真實，當然必須要顧及成本之考量。

4. 在火場模擬軟體應用上，本研究僅選用 Kameleon FireEx (KFX)，來模擬艦船輪機艙使用細水霧系統之滅火成效，暫且不論環境背景之差異，雖然與實際驗證比較仍可歸納出一致結論，但存在之差異性卻是事實，坊間尚有許多類似功能之軟體，建議未來應可就軟體之應用上嘗試著依軟體的不同特性，尋找出合適該軟體於火場模擬的最適搭配。
5. 本研究僅就艦船輪機艙間之「通風與艙門開關之影響」、「火場的降溫與煙霧的洗滌效果」、「不同壓力的滅火成效差異」及「電器設備的損害管制」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。

- 噴頭在不同擺設位置、角度及壓力對火源撲滅的成效差異。
- 不同孔徑的噴頭與擺設位置、角度及壓力對火源撲滅的成效差異。
- 單流系統與雙流系統（加氮氣）對滅火成效的差異。
- 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。
- 運用細水霧滅火系統於不同噴嘴之淡水消耗量統計，用以規劃最適之淡水儲備量。
- 移動式（推車）或背負式細水霧滅火裝備與傳統修理班架設水龍帶，運用於艦船艙間滅火之效益比較評估。
- 火場預警系統之設計與細水霧滅火系統啟動之時間設計，達成最佳滅火效果之探討。
- 火場煙塵之影響與人員逃生路徑、通風設備配置之最適規劃。

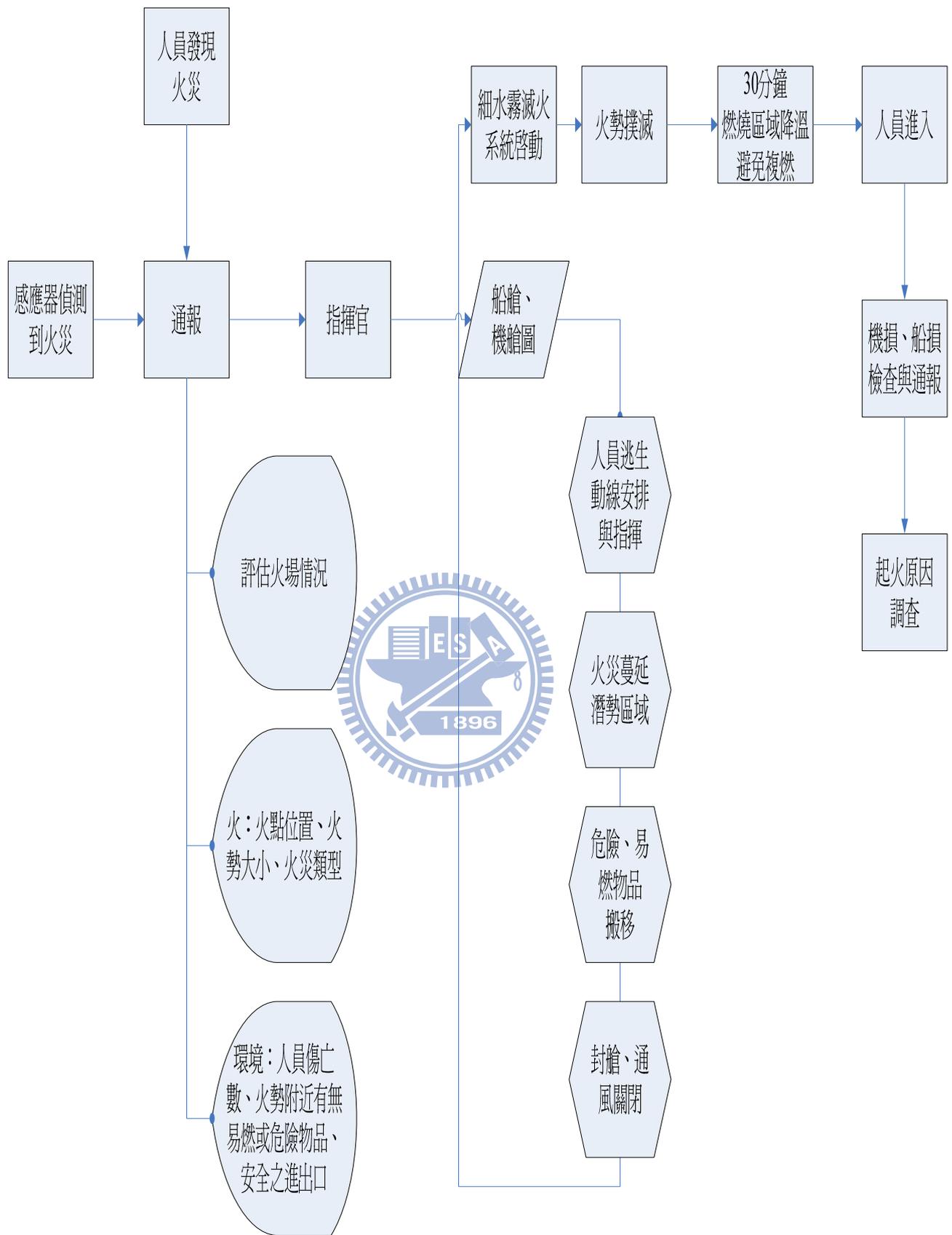


圖 35 細水霧系統災害控管流程圖

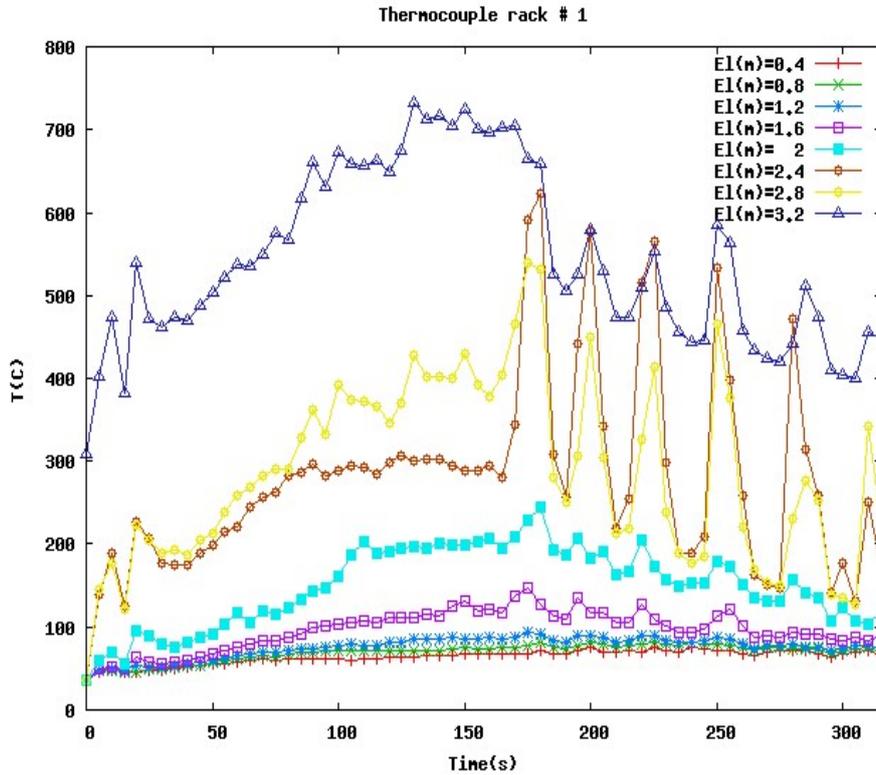
八、參考文獻

1. Edwards, M and Watkins, S., "Further Evaluation of Water Mist for the Royal Navy," Proceedings: Halon Alternatives Technical Working Conference, Albuquerque, New Mexico, 1997, p. 528.
- 2 Mawhinney, J.R., "Engineering Criteria for Water Mist Fire Suppression Systems," Proceedings: Water Mist Fire Suppression Workshop, NIST, Gaithersburg, MD, 1993, p. 37
- 3 Lefebvre A. H., 1989, "Atomization and sprays", Taylor & Francis, New York.
- 4 消防安全設備水霧噴頭認可基準研究案，內政部消防署，2003 年
- 5 BS EN 12259-11，Fixed firefighting system-Components for sprinkler and water spray systems-part11：Medium and high velocity water sprayers, 2000
- 6 UL2351，standard for Spray Nozzles for fire-Protection Service, 2000
- 7 國際海事組織 (IMO)，國際海上生命安全公約，1990 年
- 8 Herterich, A.O., "Water as an extinguish agent", Heidelberg: Alfred Huthig Publishing Company, 1960.
- 9 Lefebvre AH., "Atomization and sprays". New York : Hemisphere, 1997
- 10 Jones A, Nolan PF., "Discussions on the use of fine water sprays or mists for fire suppression", Journal of Loss Prevention Processing, vol. 8(1), 1995, pp. 17-22.
- 11 消防安全法令彙編，財團法人消防安全中心基金會編印，2005
- 12 Fristrom, R.M., "Combustion suppression", Fire Research Abstracts and Reviews, Sep. 1967, pp125-160.
- 13 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.
- 14 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.
- 15 Herterich, A.O., "Water as an extinguish agent", Heidelberg: Alfred Huthig Publishing Company, 1960.
- 16 Mugele, R., and Evans, H.D., "Droplet size distribution in sprays", Ind Engng Chem, 1994, 43(6), pp1317-1324.
- 17 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.
- 18 Kanury, A.M., "Introduction to Combustion Phenomena", Eighth Edition, Gordon and Breach Science Publishers, USA, 1994.
- 19 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.
- 20 Yule, A.J., Eerreaud, P.R., and Unget, A., "Droplet Sizes and Velocities in Vaporizing Sprays", Combustion and Flame, Vol. 54, 1983, pp.15-22.
- 21 "NFPA 750 2000 edition : Standard on Water Mist Fire Protection Systems"

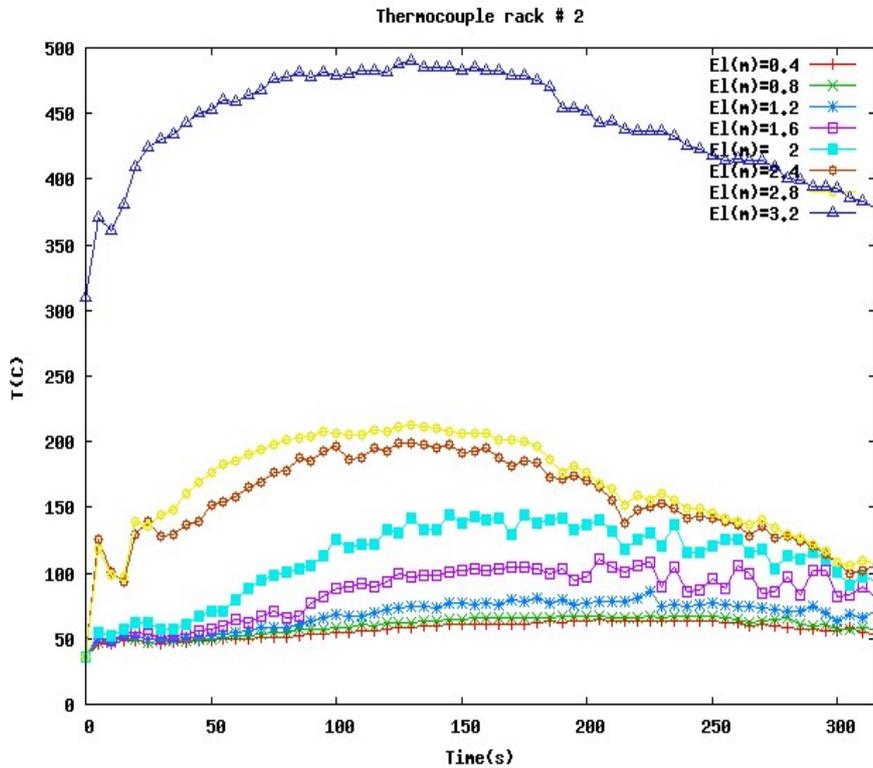
- 22 Mawhinney JR, Solomon, R., "Water mist fire suppression systems", In Cote AE, editor-in-chief. Fire protection handbook.18th ed sect. 6/chap. 15, Quincy ,MA. National Fire Protection Association.1997 p 6/216-6/248.
- 23 Liu, Z.G., Kim, A.K., and Su, J.Z., "Examination of Performance of Water Mist Fire Suppression Systems under Ventilation Conditions", Journal of Fire Protection Engineering, Vol. 11, 2001, pp.164-193.
- 24 Wang, X.S., Liao, G.G, Qin, J., and Fan, W.C., "Experimental Study on the Effectiveness of the Extinction of a Pool Fire with Water Mist", Journal of Fire Science, Vol. 20, 2002, pp.279-295.
- 25 取自 http://www.hi-fog.com/en/references/marine-list-appl_EN.shtml
- 26 International Maritime Organization (IMO), "MSC/Circ. 668, ANNEX, APPENDIX A (Component manufacturing standards 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.
- 27 Edwards, M and Watkins, S., "Further Evaluation of Water Mist for the Royal Navy," Proceedings: Halon Alternatives Technical Working Conference, Albuquerque, New Mexico, 1997, p. 528.
- 28 Pepi, J.S., "Performance Evaluation of a Low Pressure Water Mist System in a Marine Machinery Space with Open Doorway," Proceedings: Halon Alternatives Technical Working Conference, Albuquerque, New Mexico, 1995, p. 424.
- 29 Williams, F.W., Back, G.G., III, DiNenno, P.J., Darwin, R.L., Hill, Havlovick, S.S., Toomey, T.A., Farley, J.P. and Hill, J.M., Full-Scale Machinery Space Water Mist Tests: Final Design Validation,. Naval Research Laboratory, NRL/MR/6180-99-8380, 1999.
- 30 Back, G.G., DiNenno, P.J., Leonard, J.T. and Darwin, R.L., "Full Scale Tests of Water Mist Fire Suppression Systems for Navy Shipboard Machinery Spaces: Part II - Obstructed Spaces," Naval Research Laboratory, NRL/MR/6180-96-7831,1996.
- 31 Back, G.G., DiNenno, P.J., Hill, S.A. and Leonard, J.T., .Full-Scale Testing of Water Mist Fire Extinguishing Systems for Machinery Spaces on U.S. Army Watercraft,. Naval Research Laboratory, NRL/MR/6189-96-7814, 1996.
- 32 Darwin, R.L. and Williams, F.W., .Overview of the Development of Water-Mist Systems for US Navy Ships,. Proceedings: Halon Alternatives Technical Working Conference, Albuquerque, New Mexico, 1999, p. 373.
- 33 Back, G. G. and Williams, F. W., .Full Scale Evaluation of the Water Mist Additive QUAD-EX,. NRL Ltr Rep Ser 6180/0027, Washington, DC, 1997
- 34 Pepi, J.S., .Advances in the Technology of Intermediate Pressure Water Mist Systems for the Protection of Flammable Liquid Hazards,. Proceedings: Halon Alternatives Technical Working Conference, Albuquerque, New Mexico, 1998, p.417.
- 35 Buckley, C. and Rush, D., "Water Mist Developments for the Royal Navy," Proceedings: Halon Alternatives Technical Working Conference, Albuquerque, New Mexico, 1996, p. 37.
- 36 Edwards, M., Watkins, S. and Glockling, J., .Low Pressure Water Mist, Fine Water Spray, Water Source and Additives: Evaluation for the Royal Navy,. 8th International Fire Science and Engineering Conference, Edinburgh, Scotland, 1999.
- 37 劉順隆， “中國船舶機艙火災研究現況”【J】.中國安全科學學報，2004(5)

- 38 周學軍、陳海泉等人，”船舶機艙細水霧滅火系統研究”，大連海事大學輪機工程學院，2007。
- 39 Kim, A. K., Liu, Z. and Su, J. Z., Full-Scale Fire Testing of Water Mist Systems Private Communication, 1997.
- 40 Bill, R. G., Hansen, R. L. and Richards, K., .Fine-Spray (Water Mist) Protection of Shipboard Engine Rooms,. Fire Safety Journal, Vol., 29, 1997, p. 317.
- 41 Hansen, R., .Local Application of Water Mist for Machinery Protection, Proceedings: Halon Alternatives Technical Working Conference, Albuquerque, New Mexico, 1998, p. 439.
- 42 Project Hulvul. Waterfig Evaluation Trials[R]. British Ministry of Defense. Navy, Yard. 1998
- 43 Mawhinney J.R. Design of Water Mist Fire Suppression Systems for shipboard Enclosures[C]. Sweden. Swedish National Testing and Research Institute. 1993
- 44 劉維義，”電腦數值模擬在細水霧滅火效能之應用與探討”，國立交通大學產業安全與防災學程碩士論文，2005.1。
- 45 隋增輝，”海軍艦艇應用細水霧滅火效能之探討”，國立交通大學產業安全與防災學程碩士論文，2008.7。
- 46 IMO MSC/Circ.668, “Alternative Arrangements For Halon Fire-Extinguishing System In Machinery Spaces And Pump-Rooms”, 1994.
- 47 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.
- 48 USCG, “Sprinkler and Water Mist Extinguishing Systems”, 2009.
- 49 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.
- 50 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.
- 51 IMO FP 46/5/10, “Unified Interpretation To SOLAS Chapter II-2 And Related Fire Test Procedures—Supplementary tests to MSC/Circ.913- Annex 2 Water Discharge Test Against Electrical Systems”, 2001.
- 52 何三平，”固定式細水霧系統的漏電測試”，長榮大學職業安全衛生與職業醫學研究中心，2008.
- 53 IMO FP 47/8/4, “Performance Testing And Approval Standards For Fire Safety Systems, 2002.
- 54 簡賢文、高惠瑜、李婉菁等人，”Kameleon FireEx 之原理及應用”，消防與防災科技雜誌 21 期，2005.11-12，p.71-75。
- 55 Philip J. DiNunno, W. Douglas Walton, SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 3rd ed., National Fire Protection Association, Quincy, Massachusetts, p.3-25, 3-26
- 56 Björn Karlsson, James G. Quintiere, Enclosure Fire Dynamics, p25-35
- 57 Lefebvre A. H., 1989, “Atomization and sprays”, Taylor & Francis, New York.

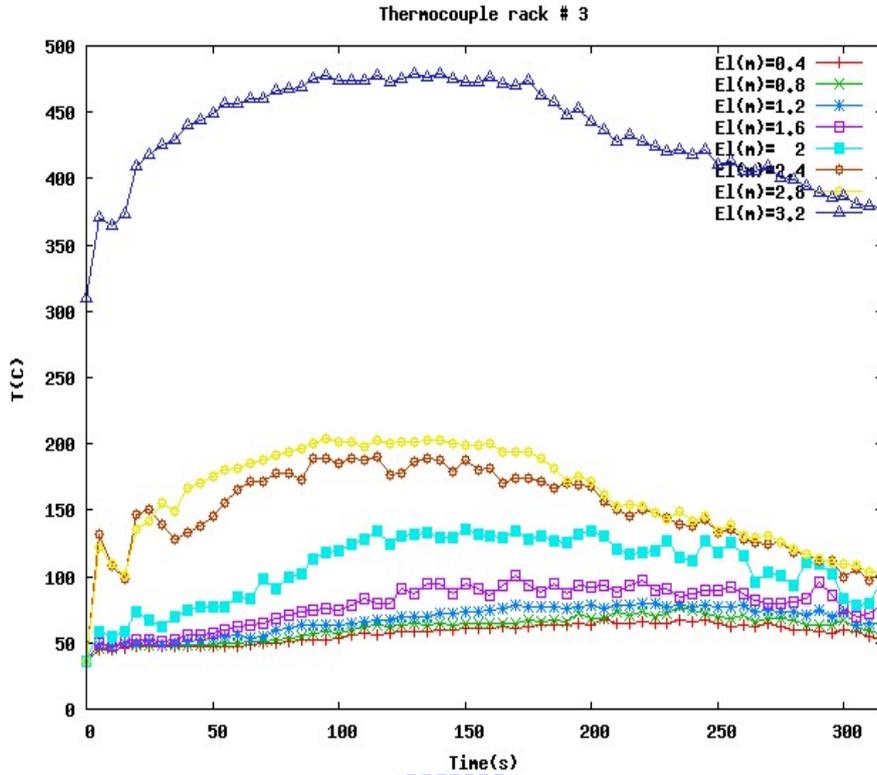
Appendix A 電腦模擬熱電偶溫度



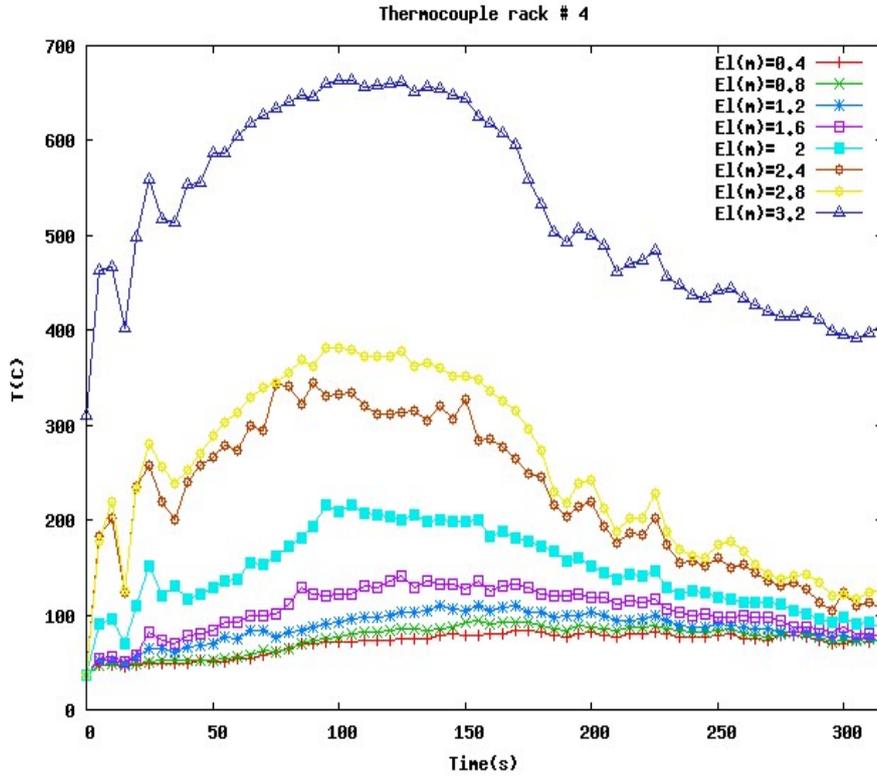
ES A
案例 1 : 1 號熱電偶樹



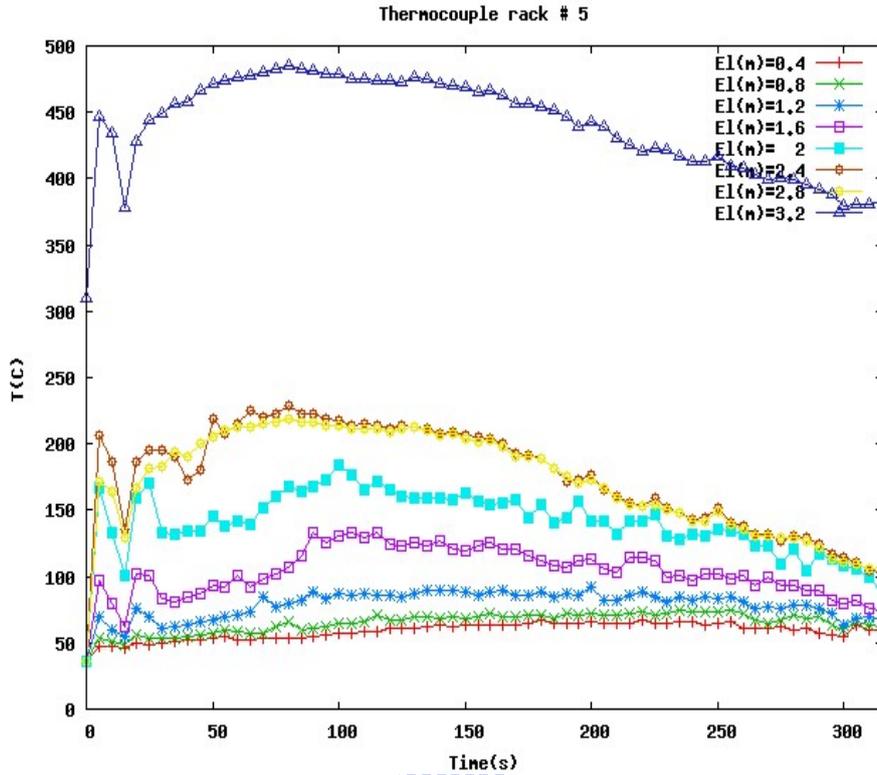
案例 1 : 2 號熱電偶樹



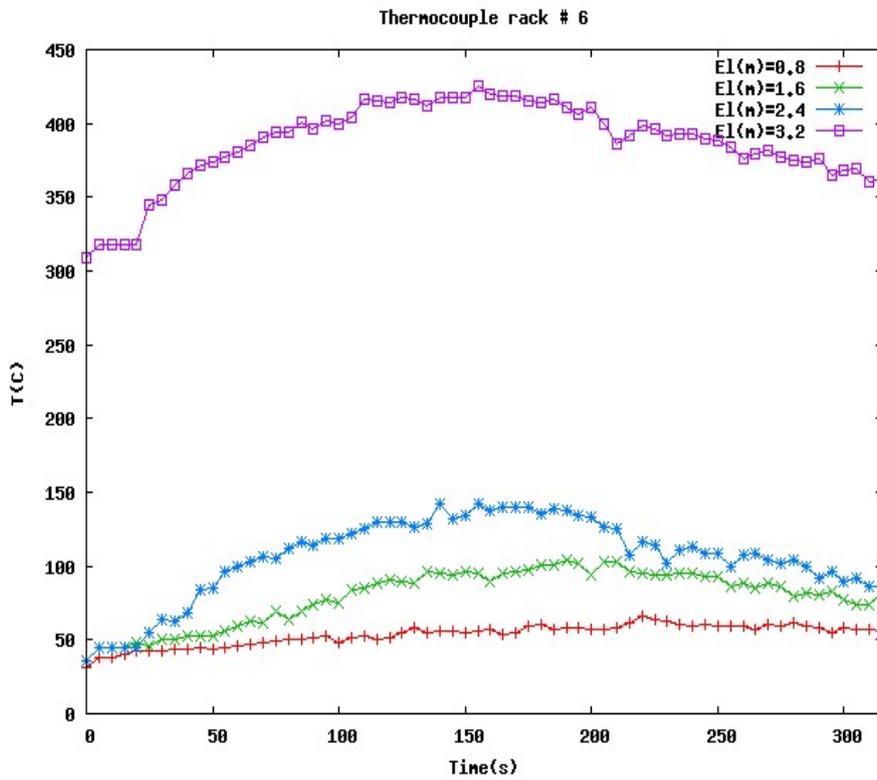
案例 1 : 3 號熱電偶樹



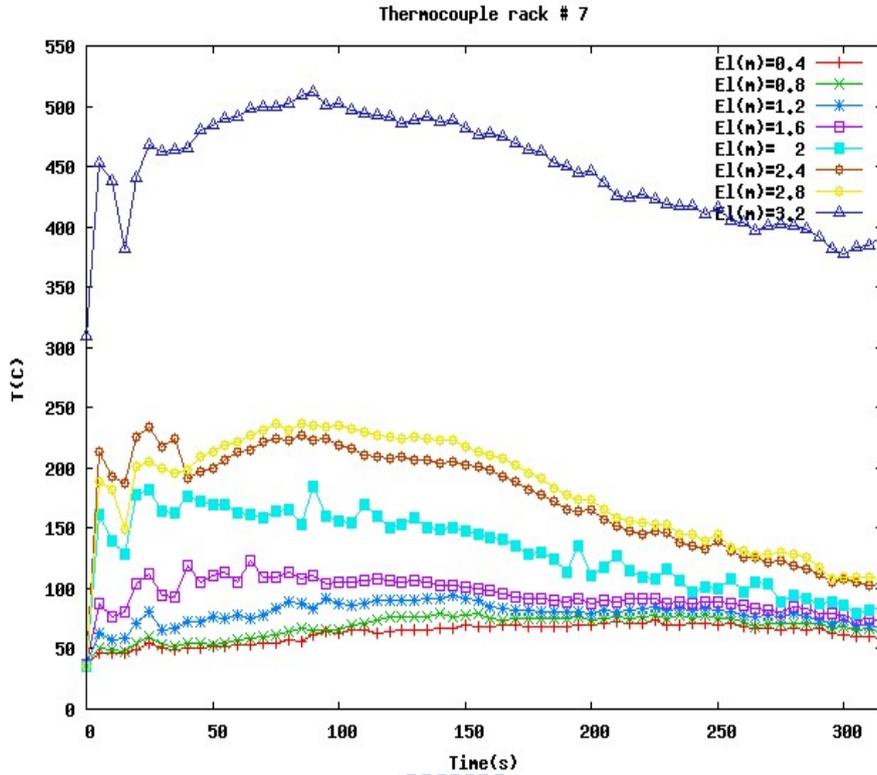
案例 1 : 4 號熱電偶樹



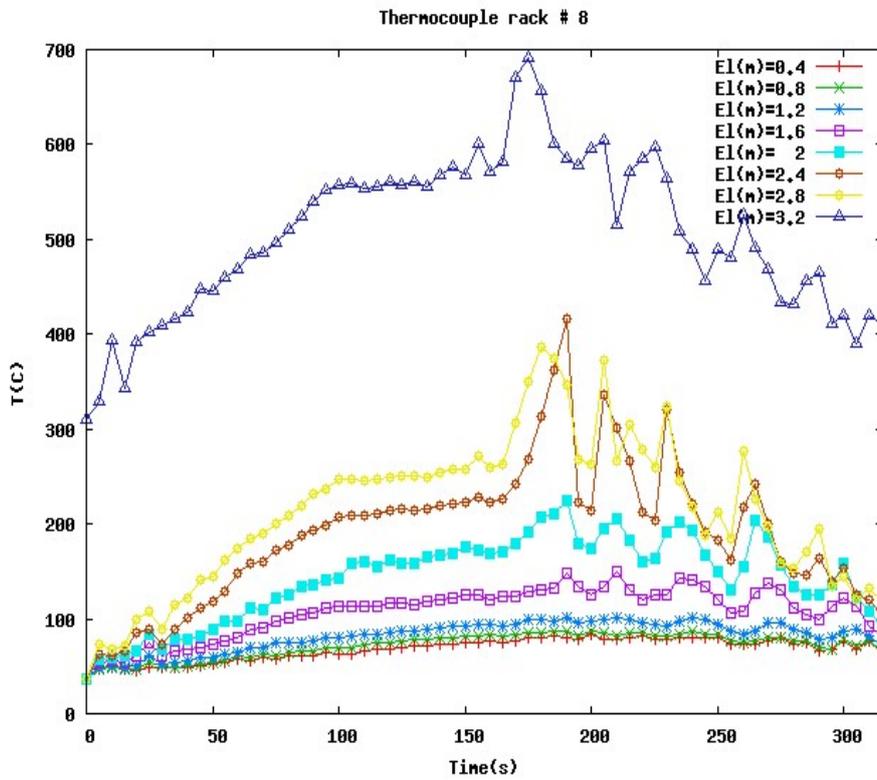
案例 1 : 5 號熱電偶樹



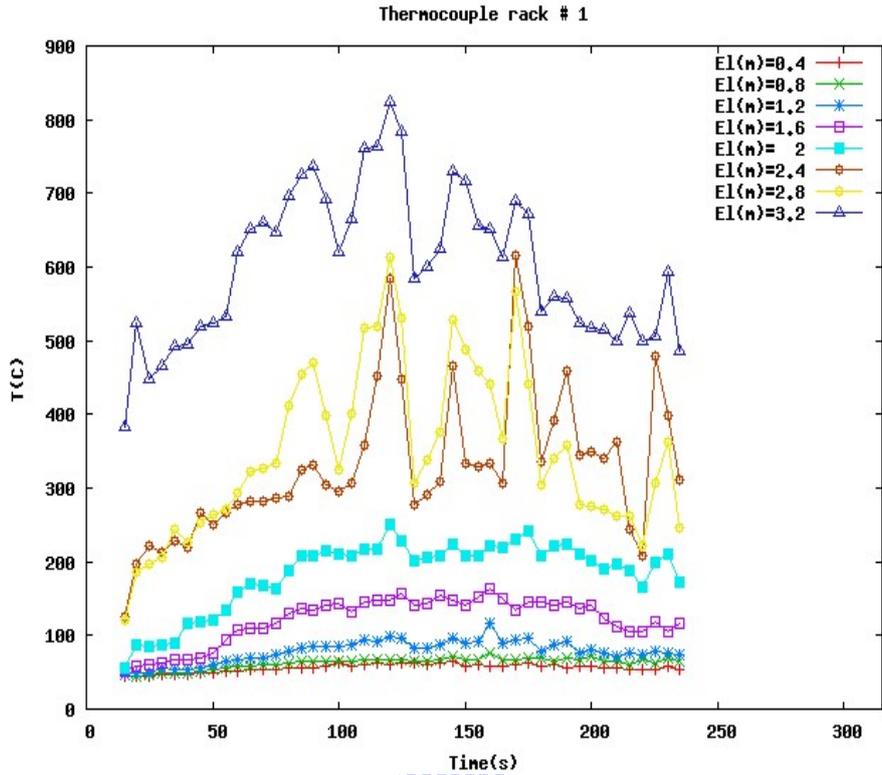
案例 1 : 6 號熱電偶樹



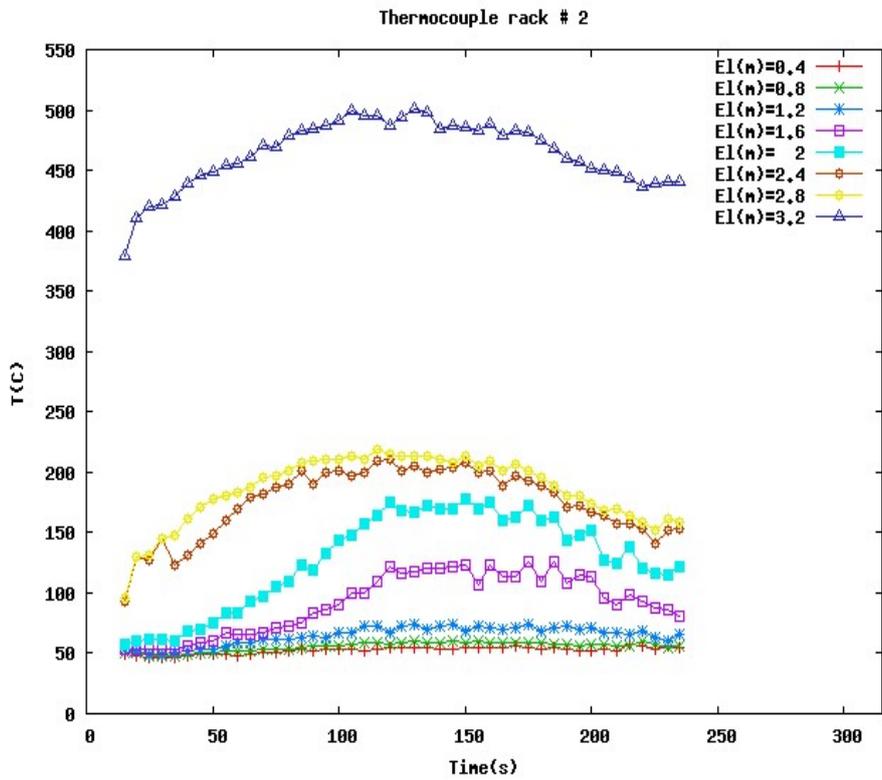
案例 1 : 7 號熱電偶樹



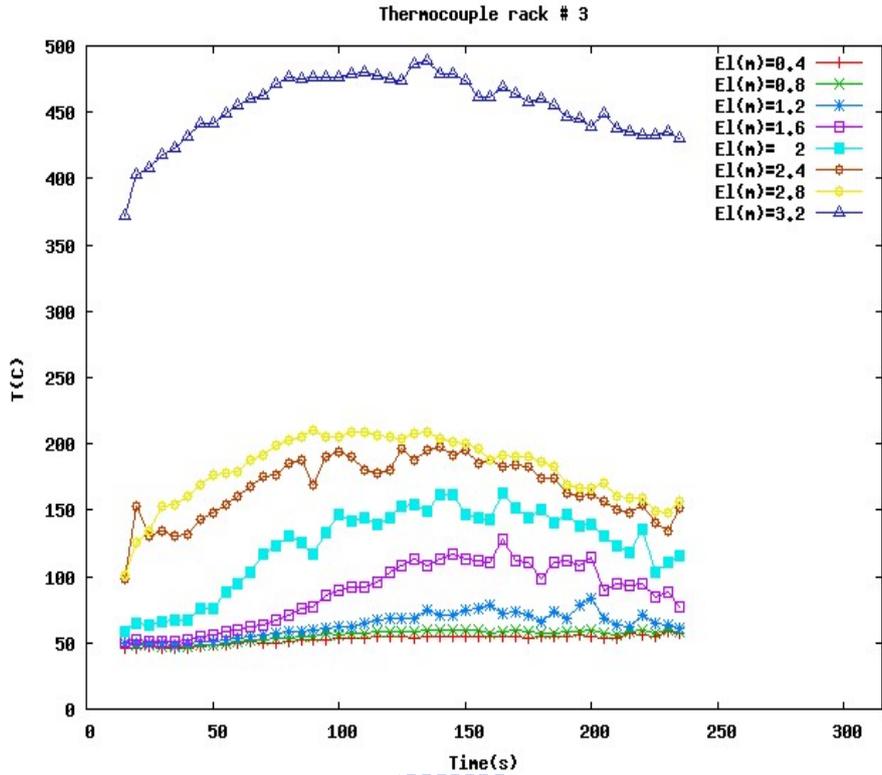
案例 1 : 8 號熱電偶樹



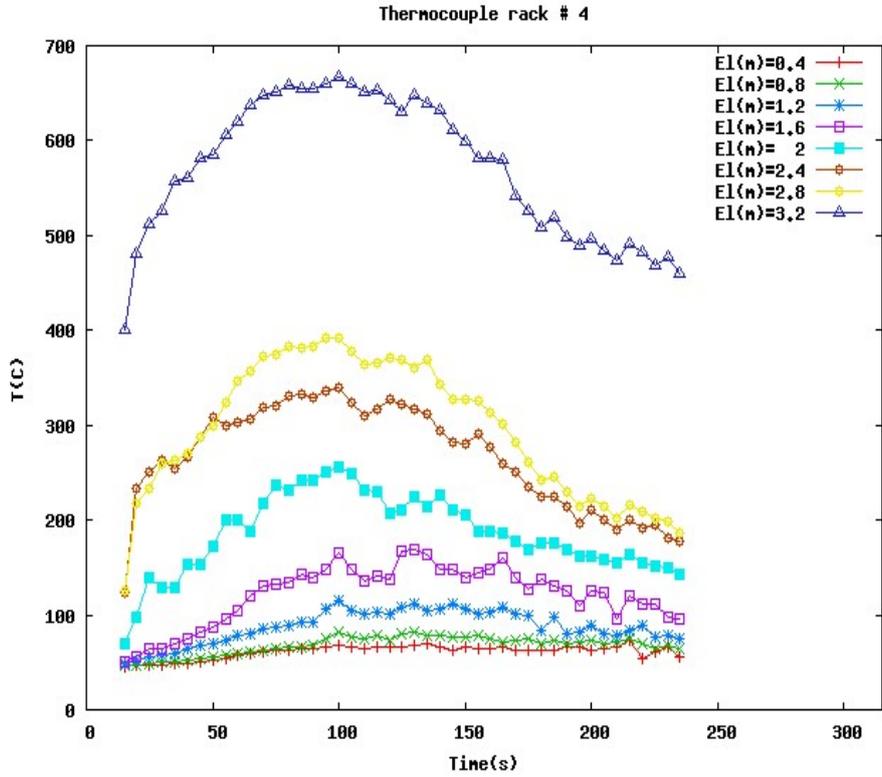
案例 2 : 1 號熱電偶樹



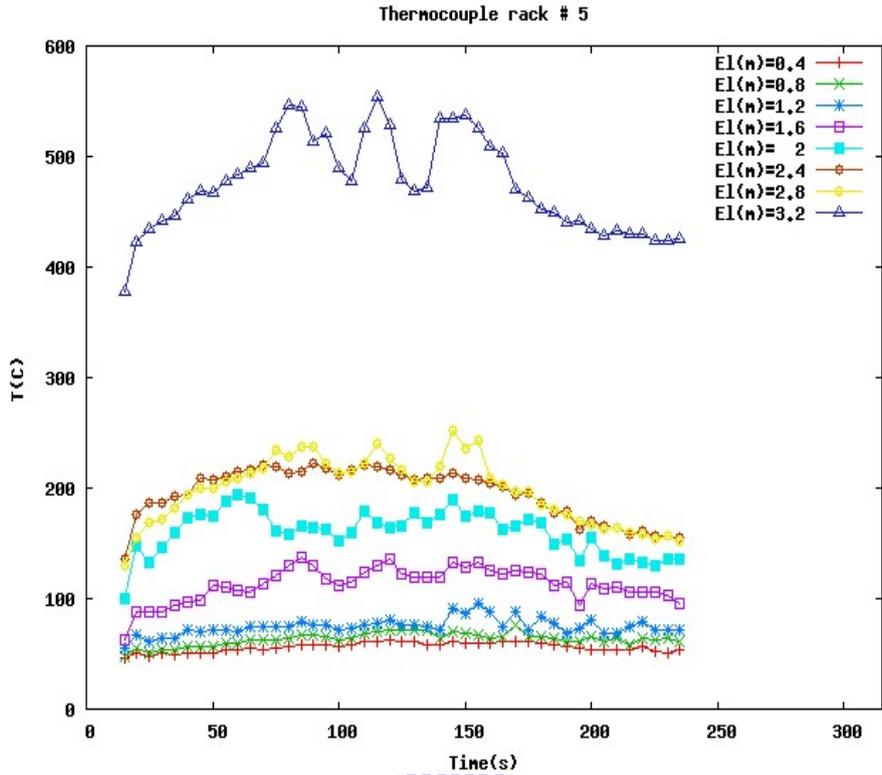
案例 2 : 2 號熱電偶樹



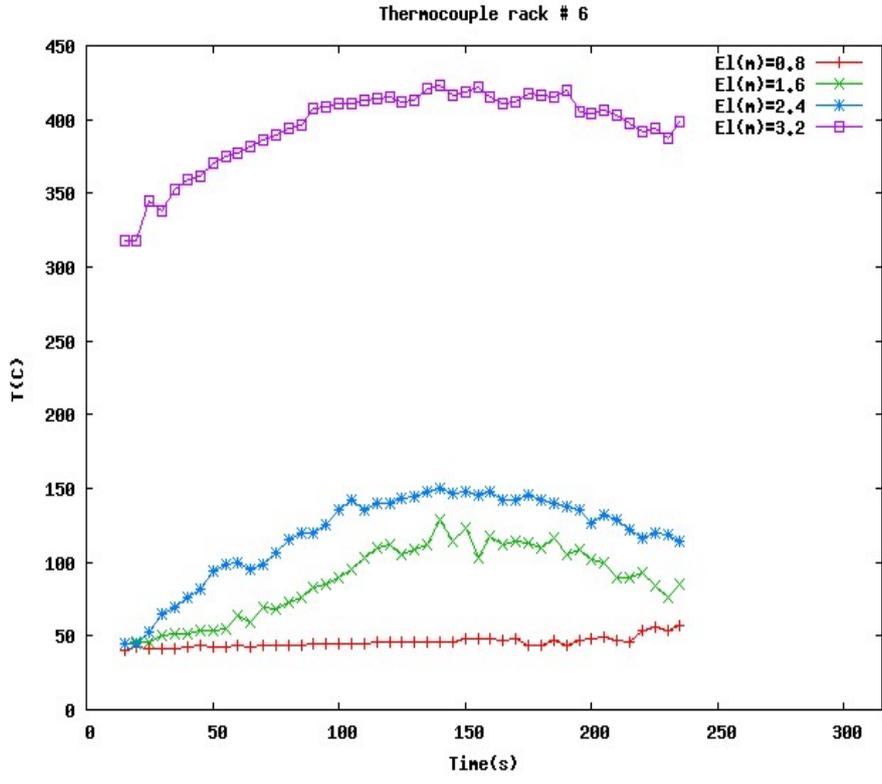
案例 2 : 3 號熱電偶樹



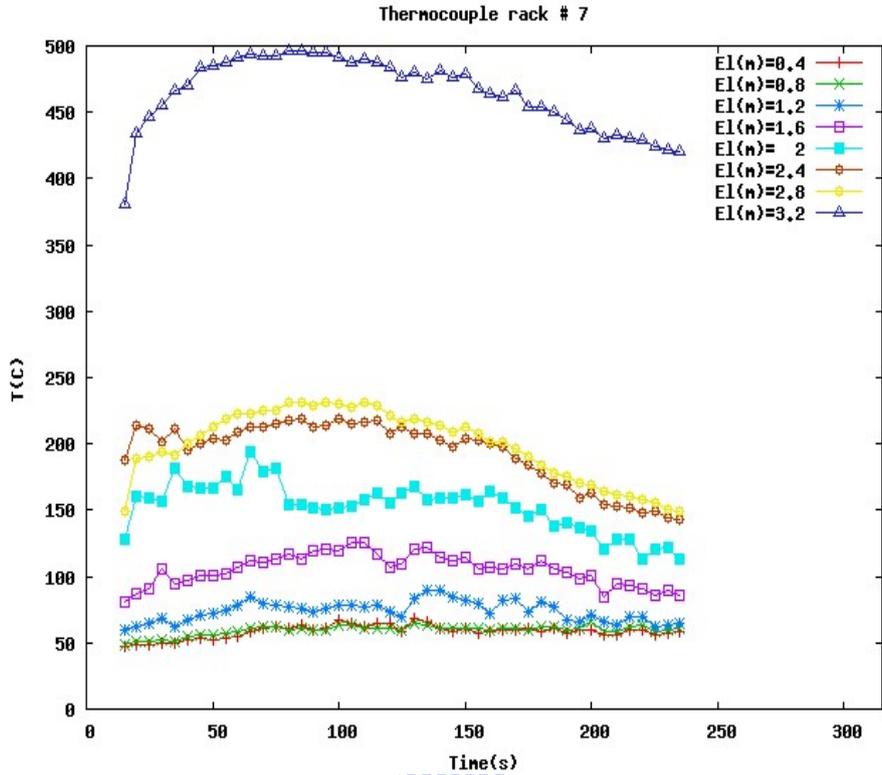
案例 2 : 4 號熱電偶樹



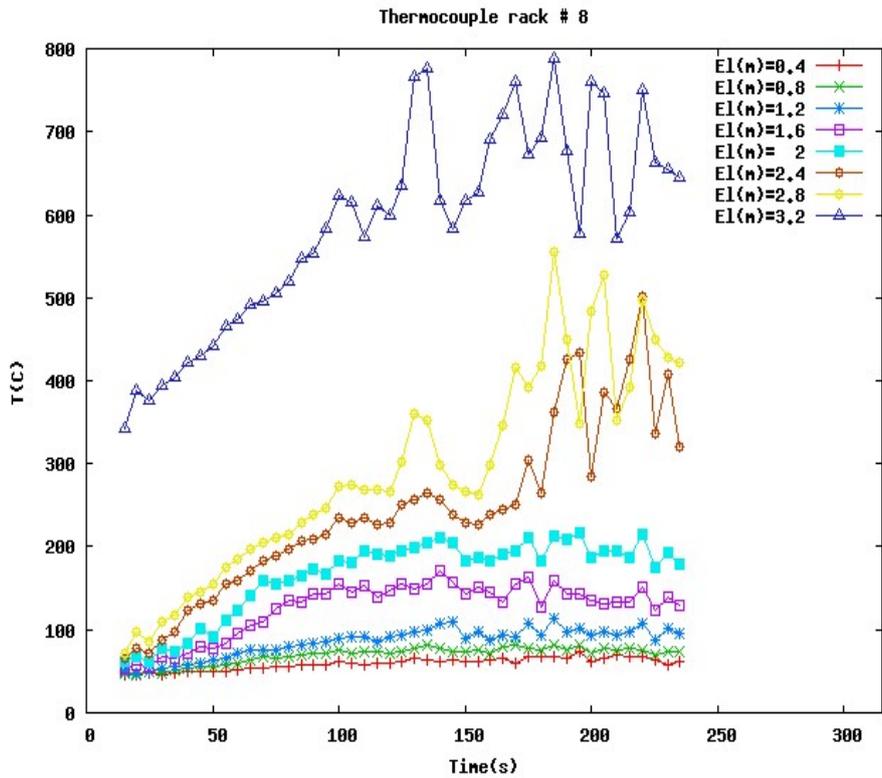
案例 2 : 5 號熱電偶樹



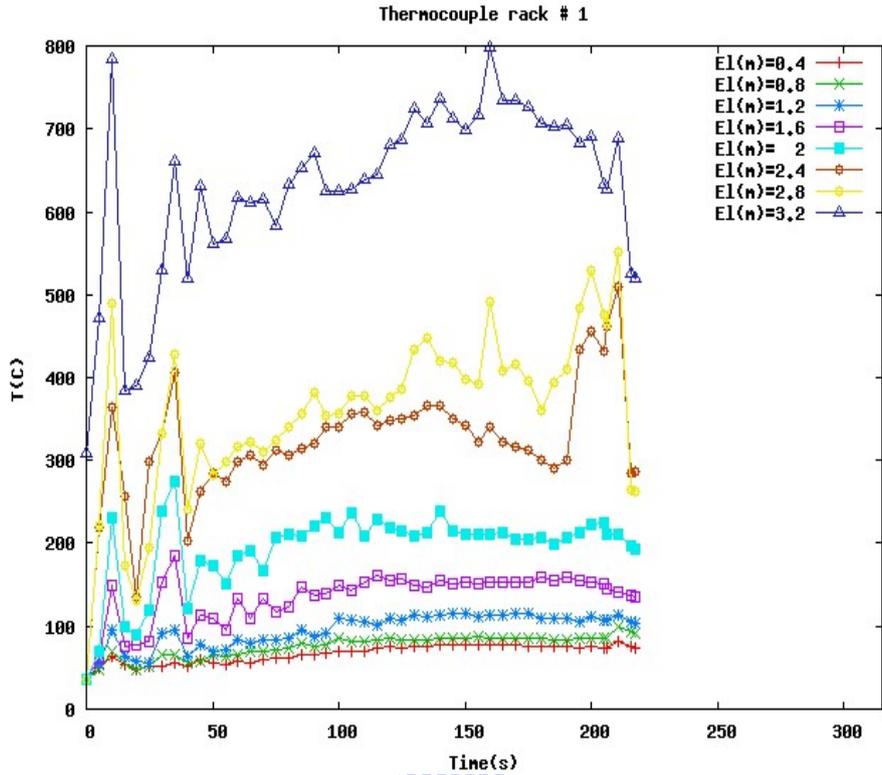
案例 2 : 6 號熱電偶樹



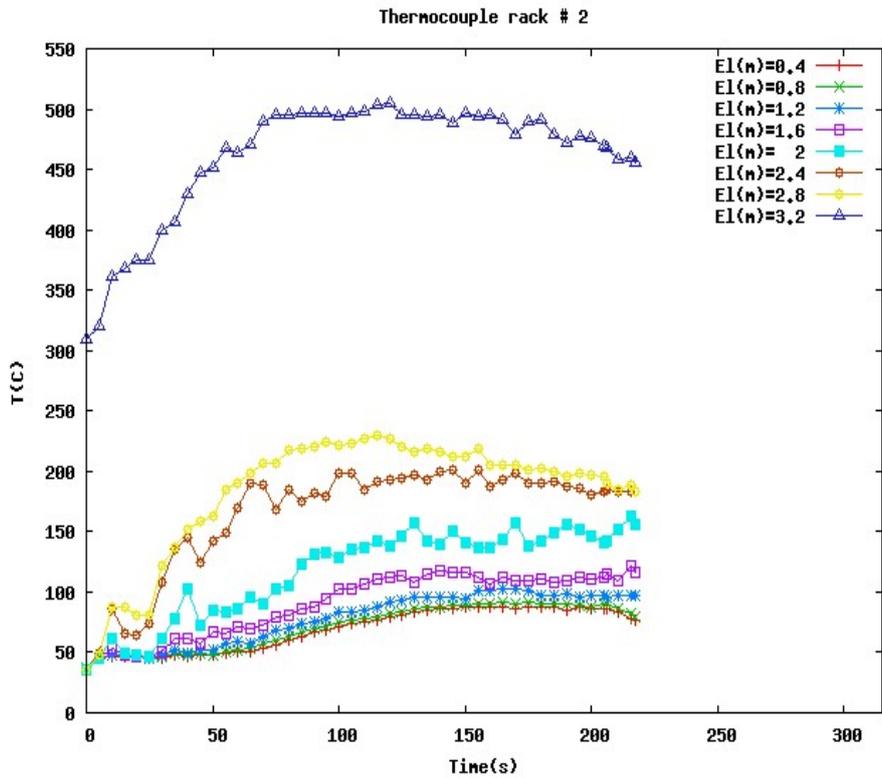

 案例 2 : 7 號熱電偶樹



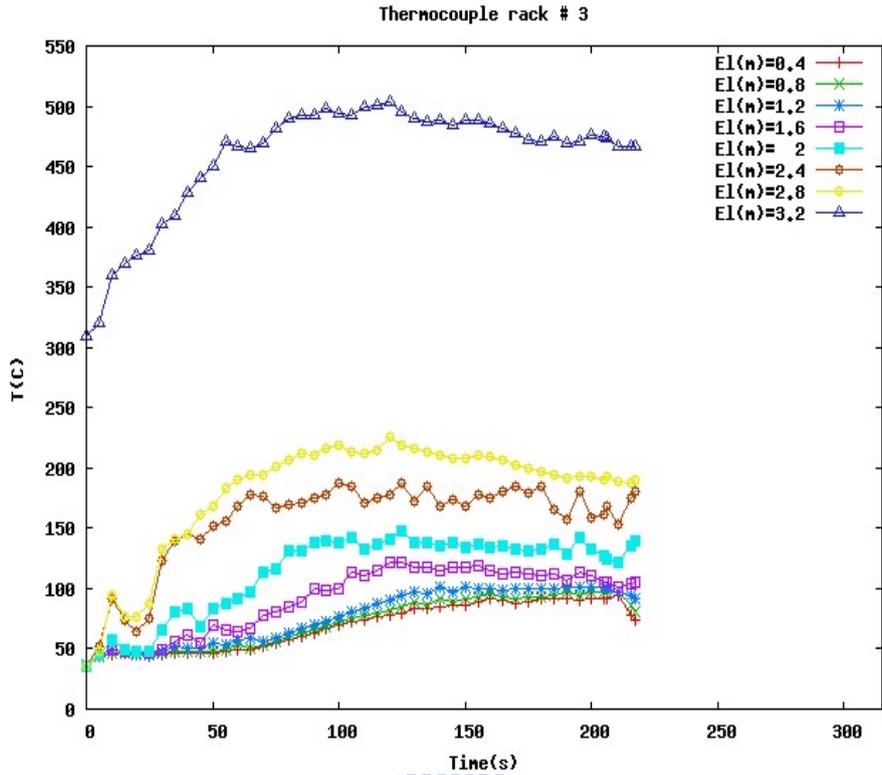
案例 2 : 8 號熱電偶樹



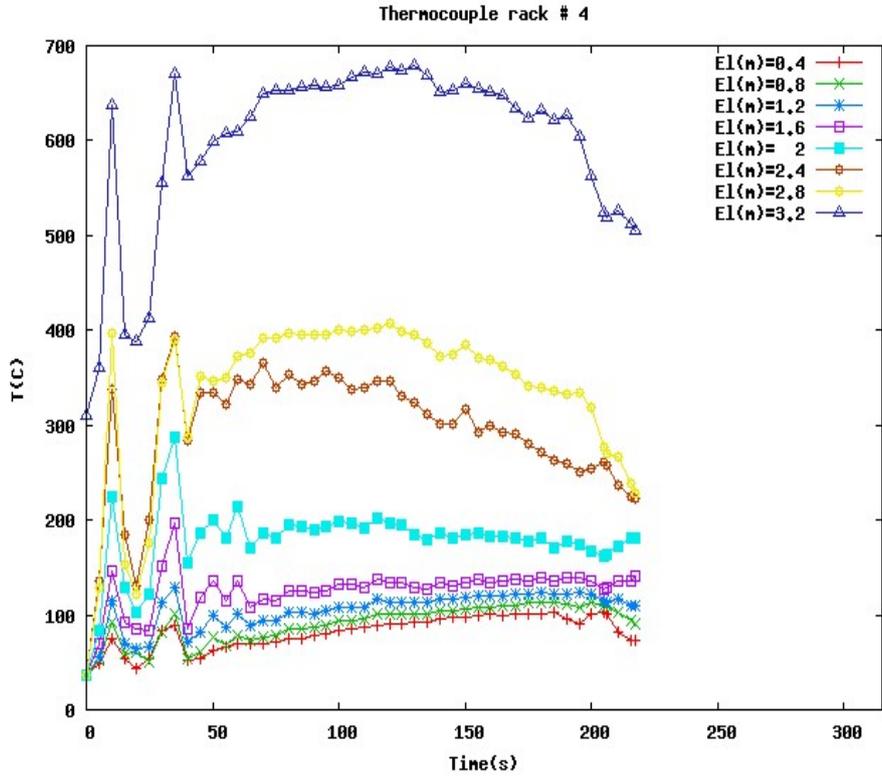
案例 3 : 1 號熱電偶樹



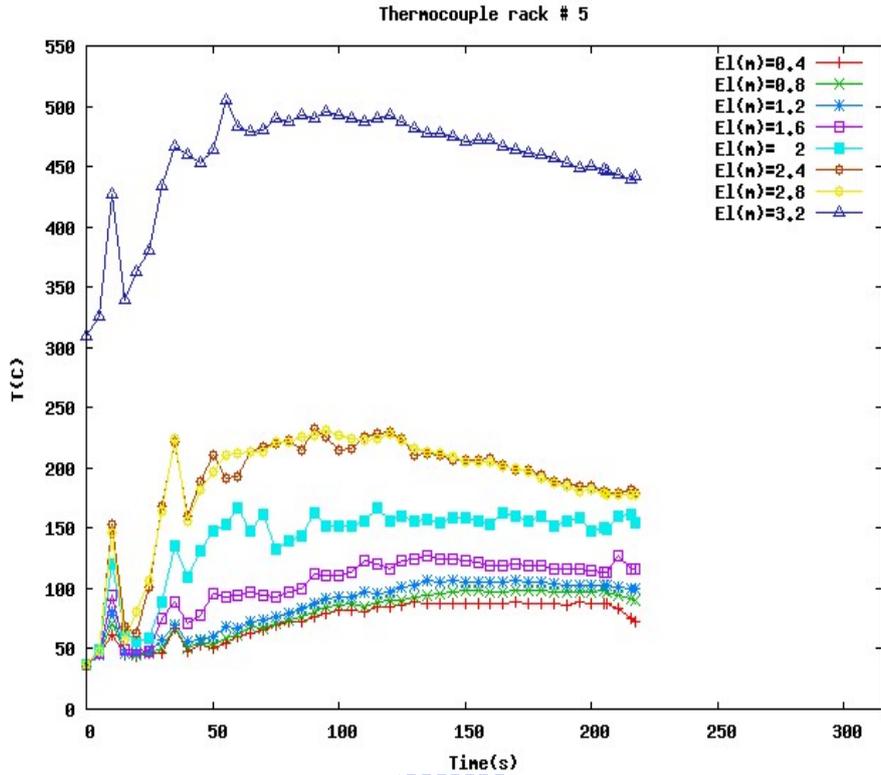
案例 3 : 2 號熱電偶樹



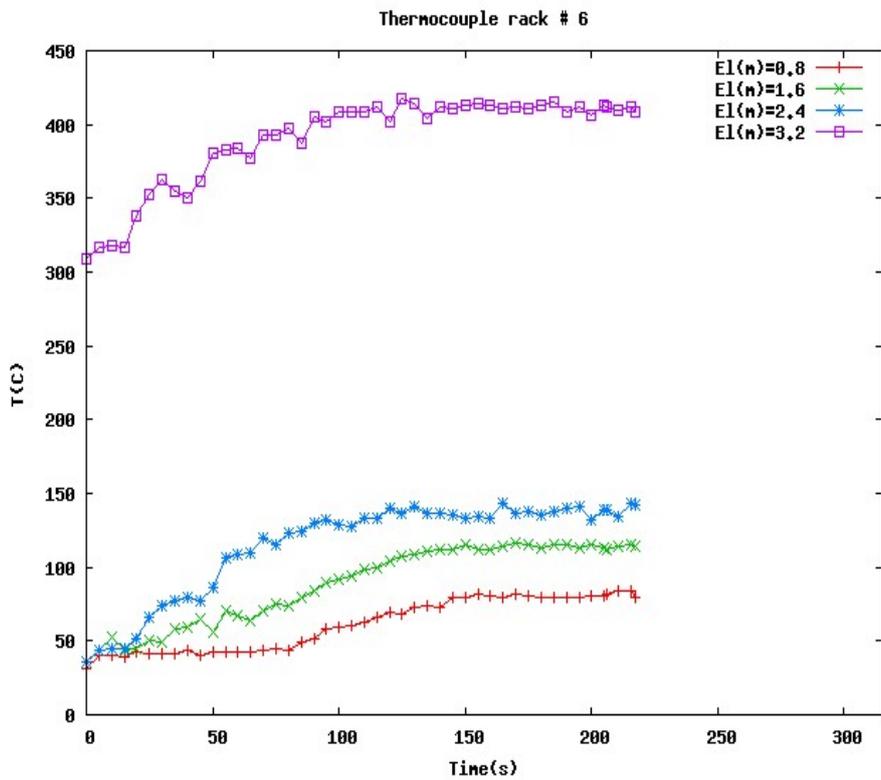
案例 3 : 3 號熱電偶樹



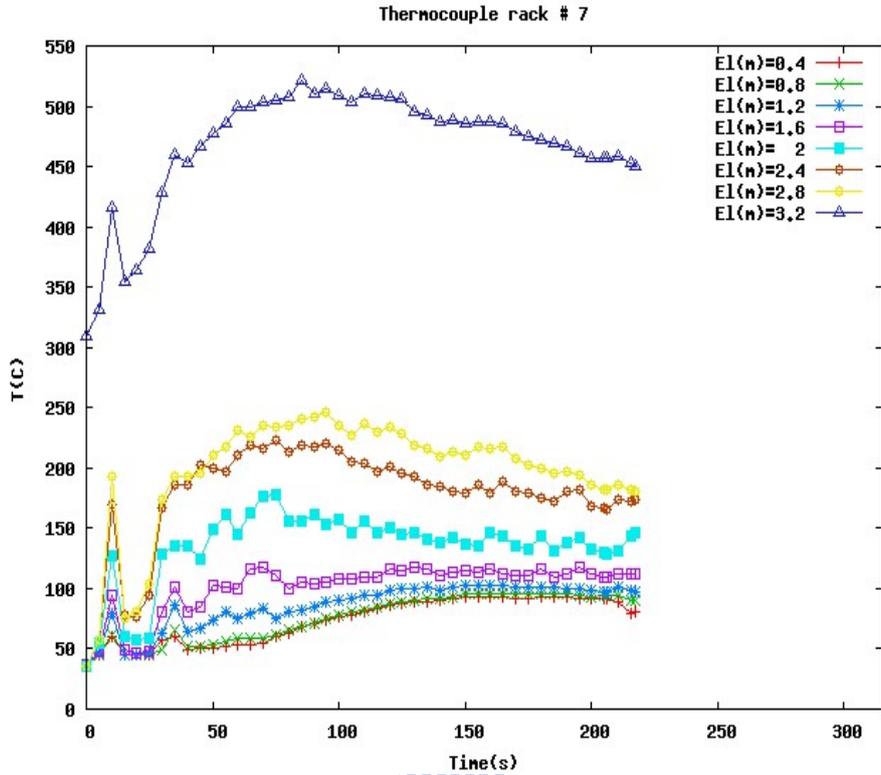
案例 3 : 4 號熱電偶樹



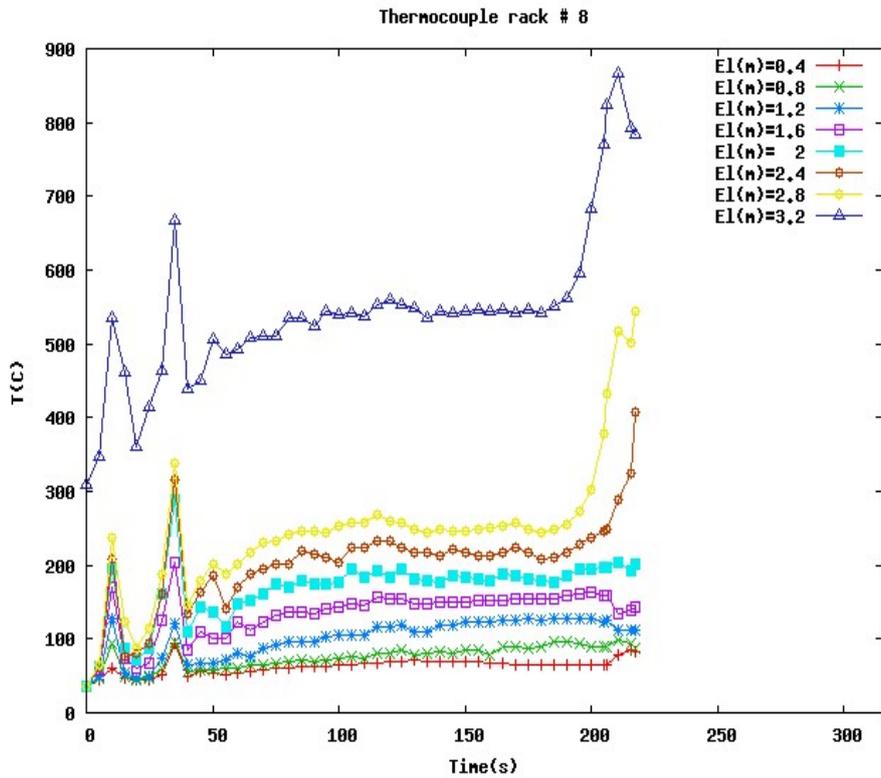
案例 3 : 5 號熱電偶樹



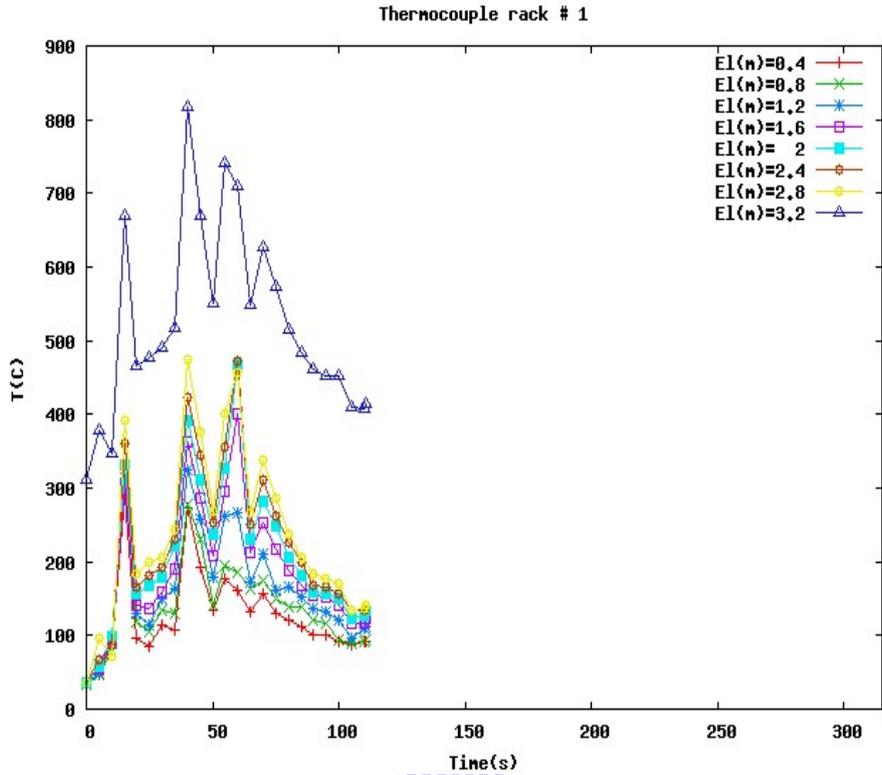
案例 3 : 6 號熱電偶樹



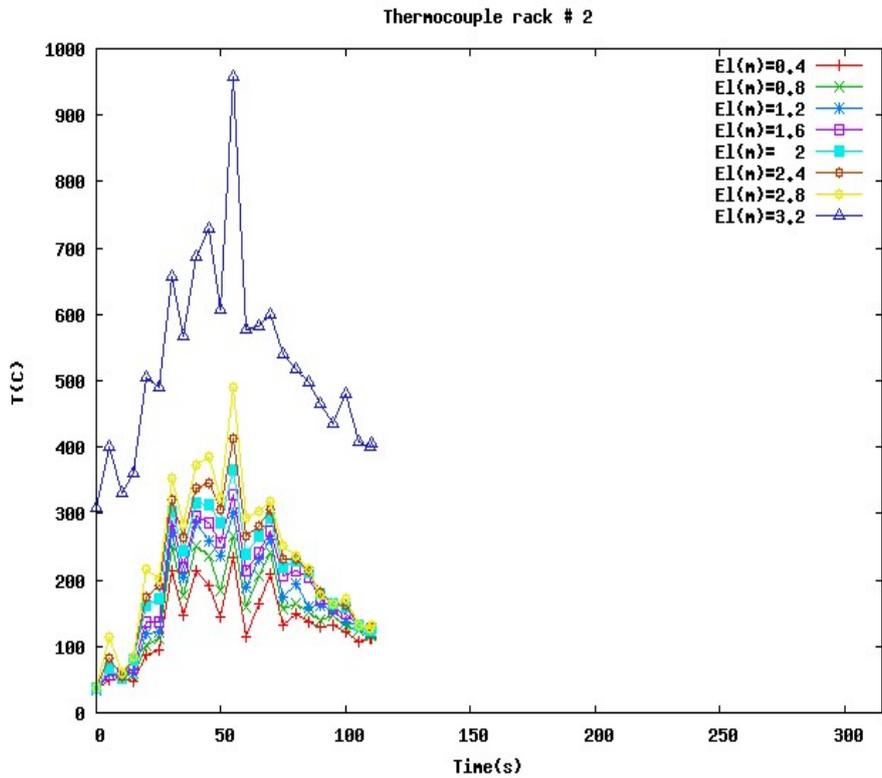
案例 3 : 7 號熱電偶樹



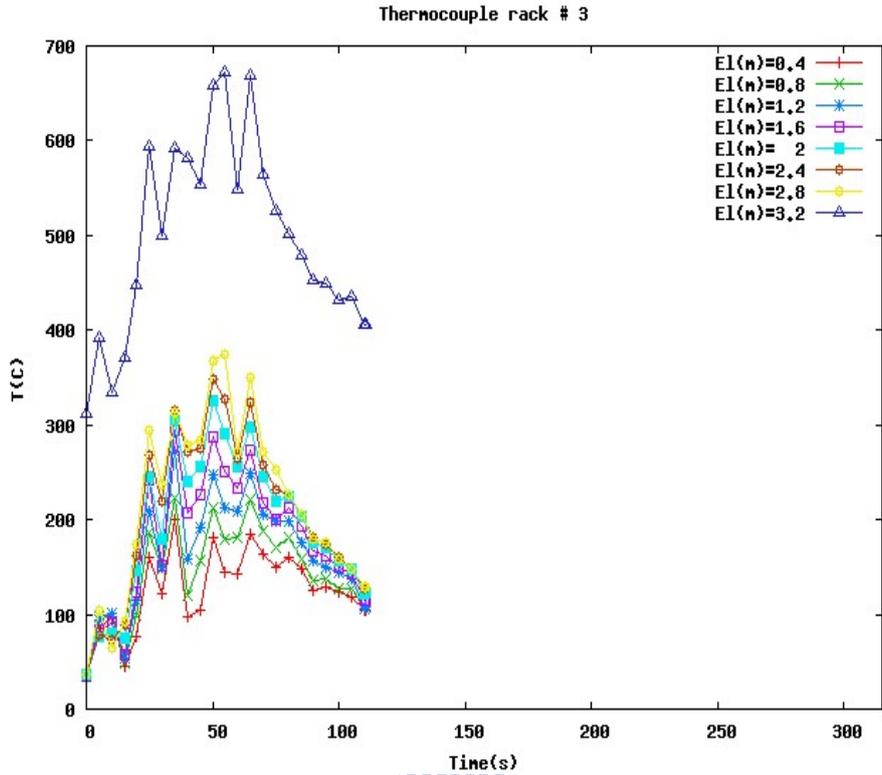
案例 3 : 8 號熱電偶樹



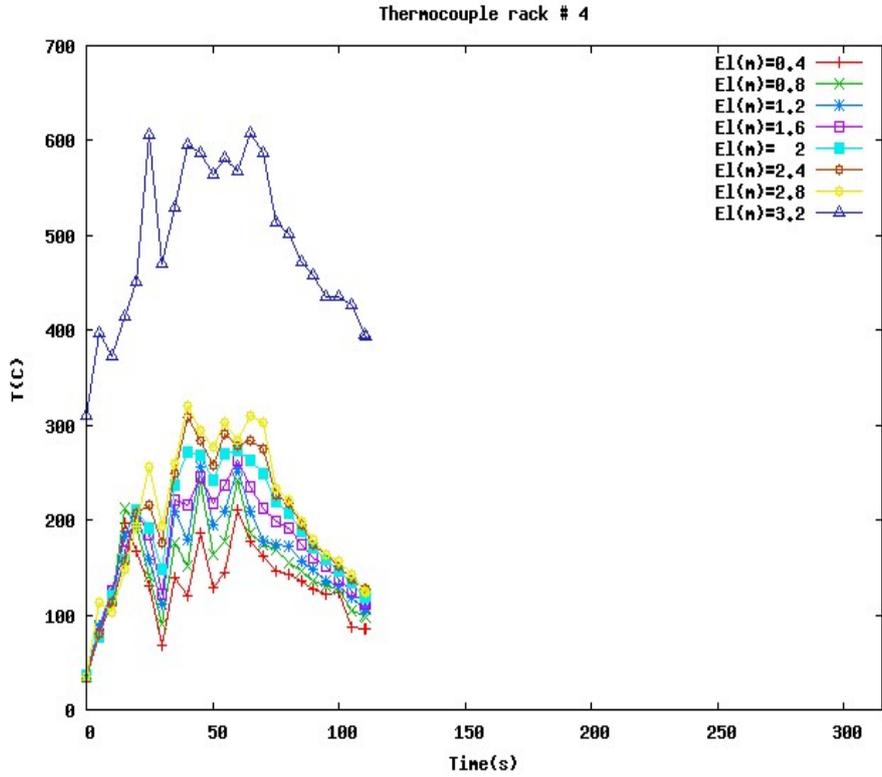
案例 6 : 1 號熱電偶樹



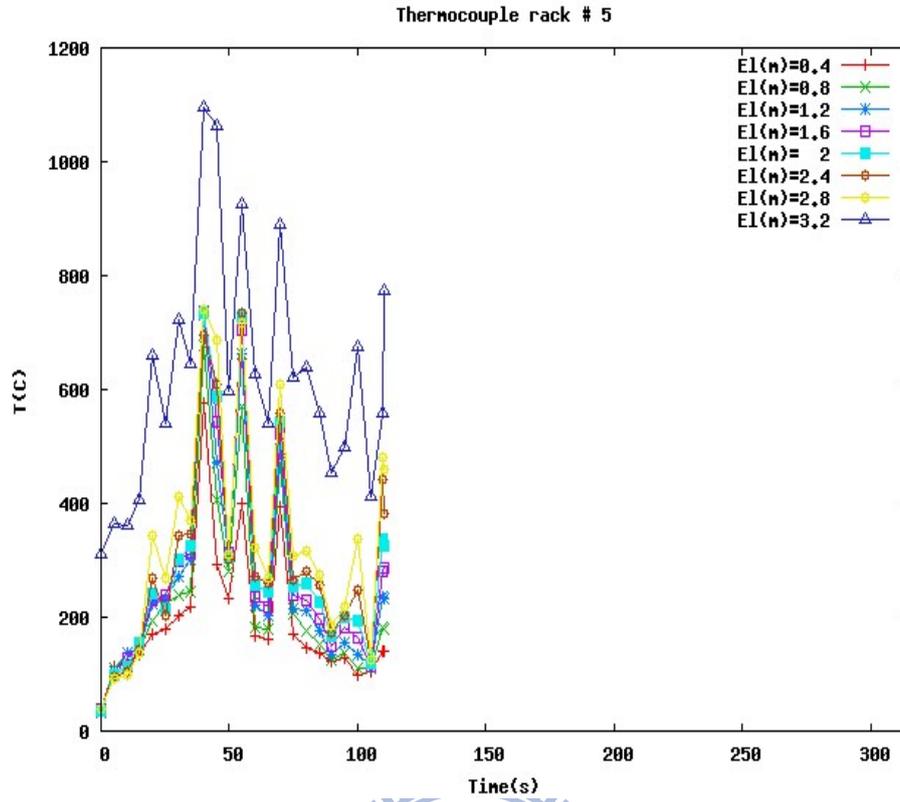
案例 6 : 2 號熱電偶樹



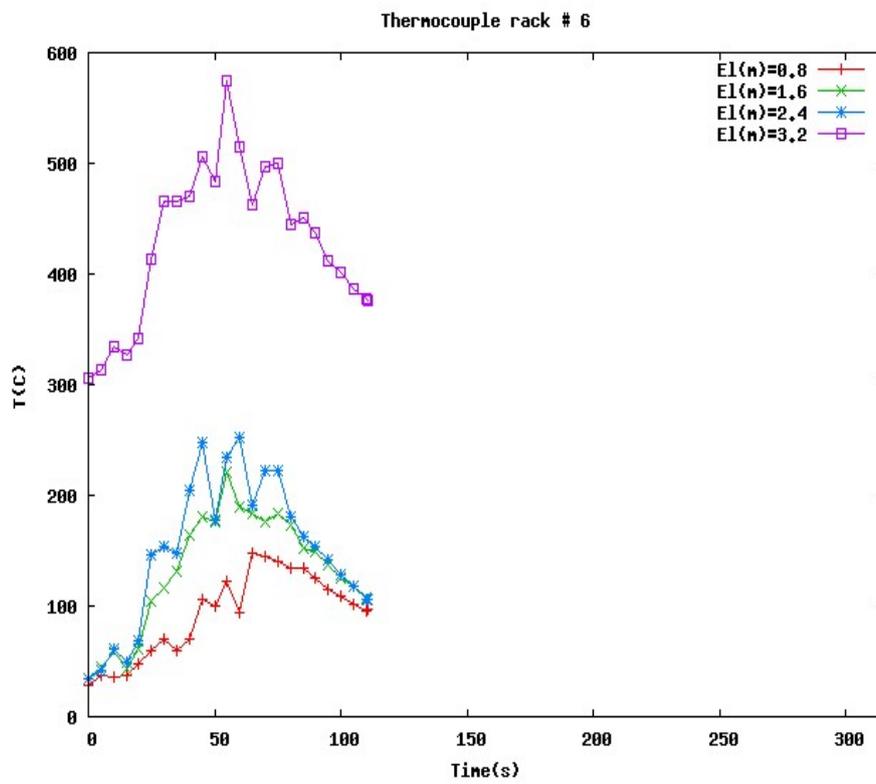
案例 6 : 3 號熱電偶樹



案例 6 : 4 號熱電偶樹

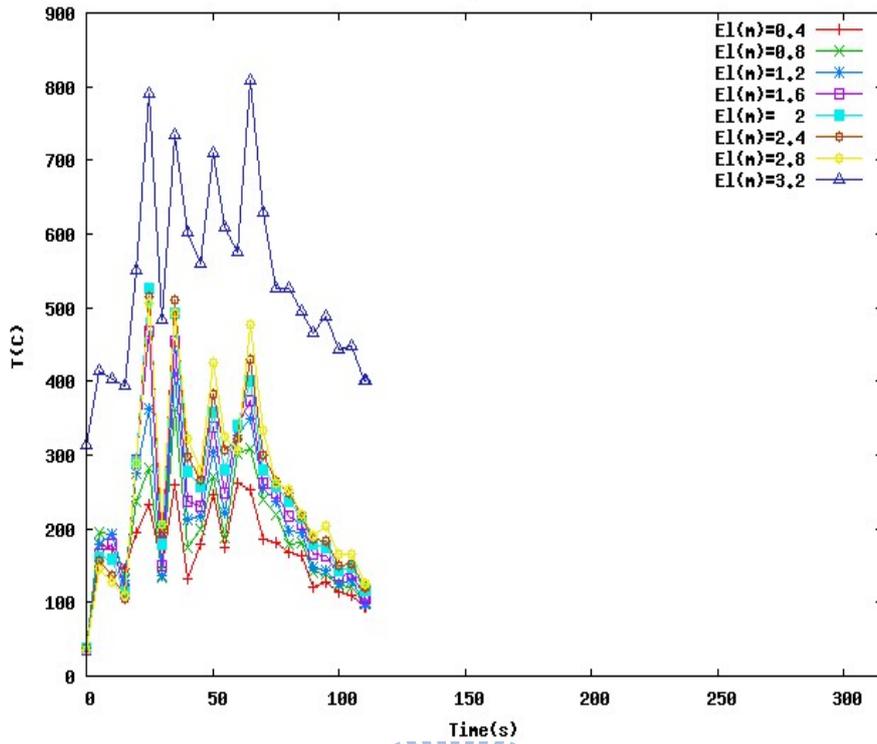


案例 6 : 5 號熱電偶樹



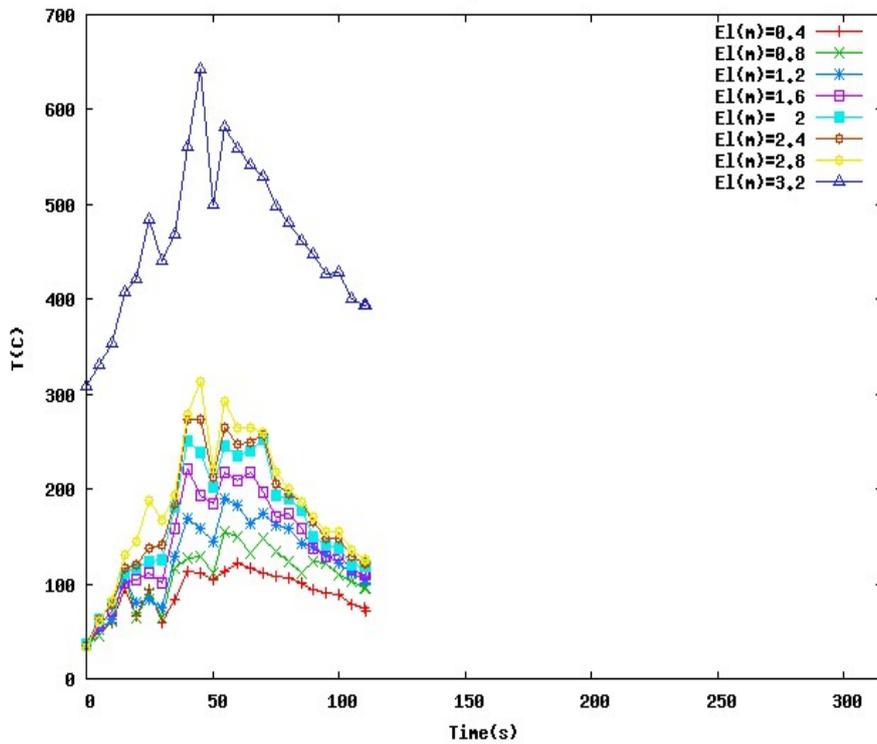
案例 6 : 6 號熱電偶樹

Thermocouple rack # 7

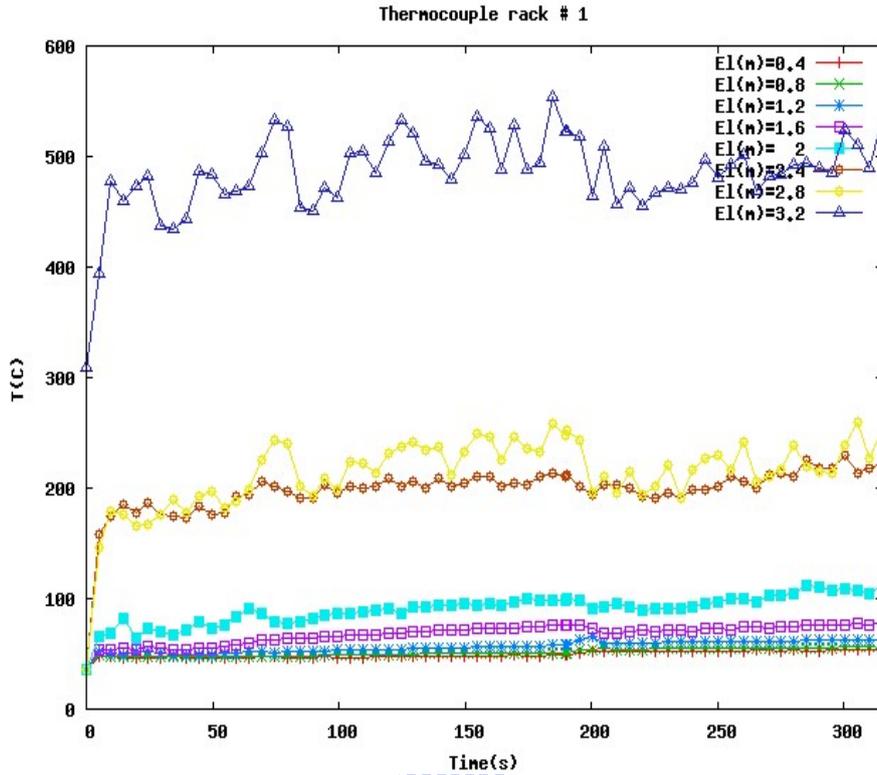


案例 6 : 7 號熱電偶樹

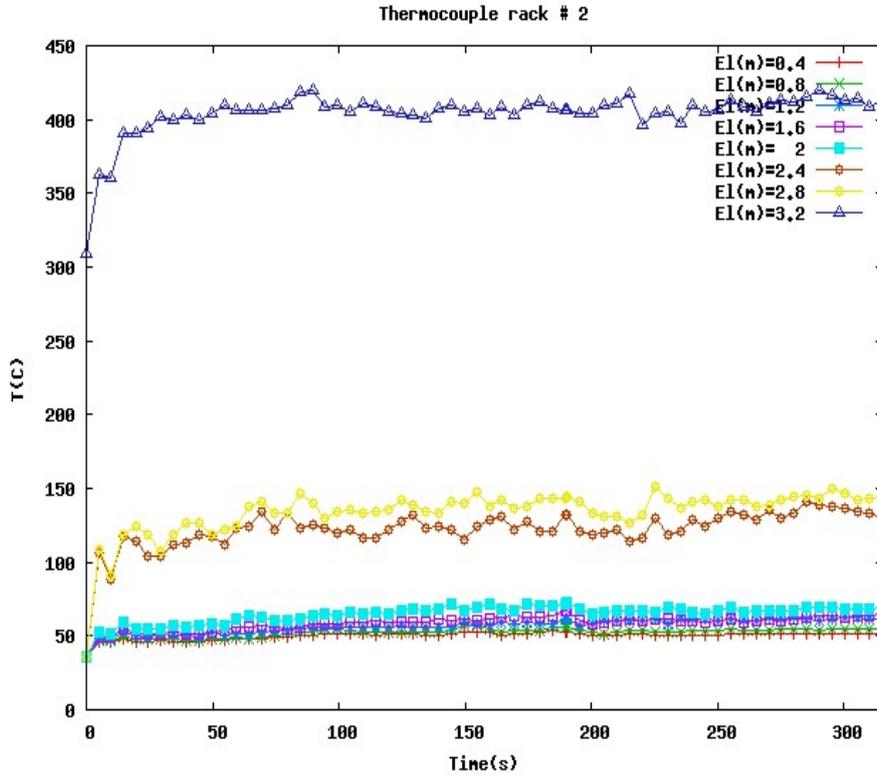
Thermocouple rack # 8



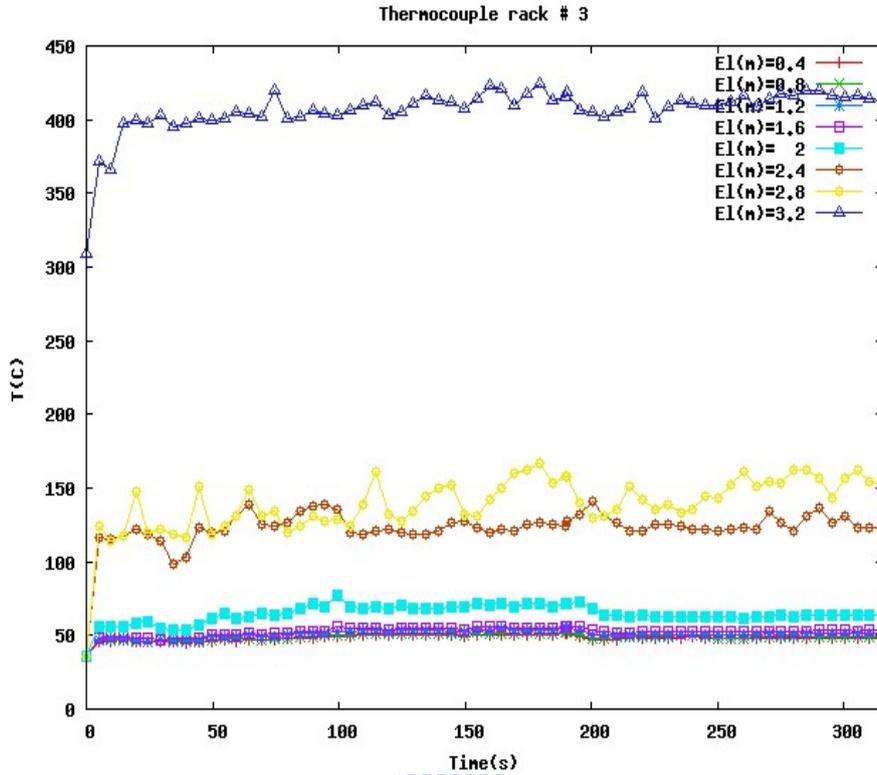
案例 6 : 8 號熱電偶樹



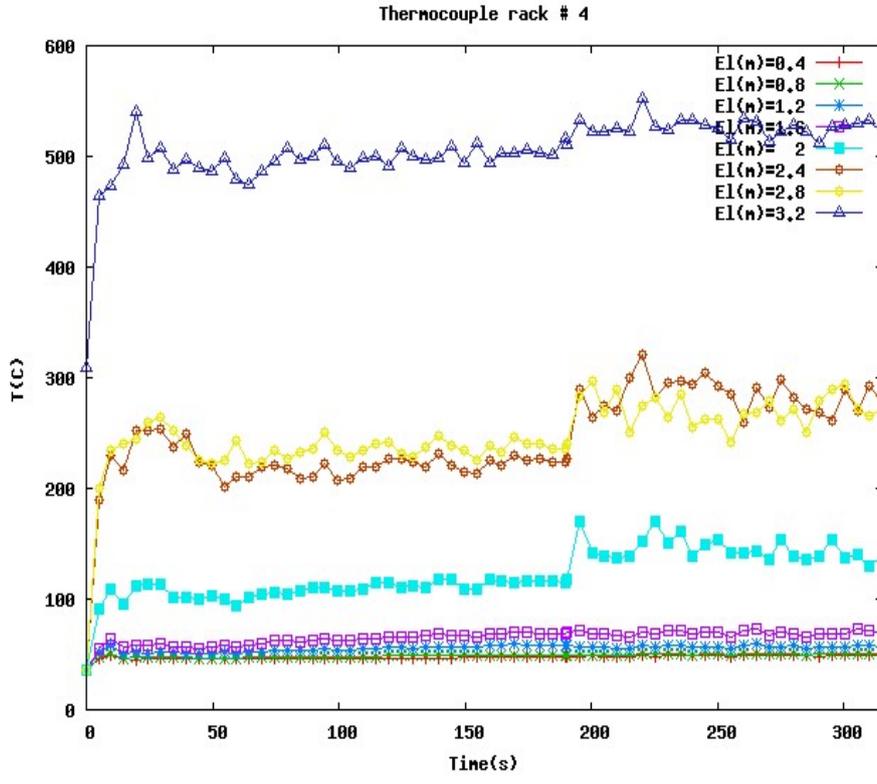
案例 9 : 1 號熱電偶樹



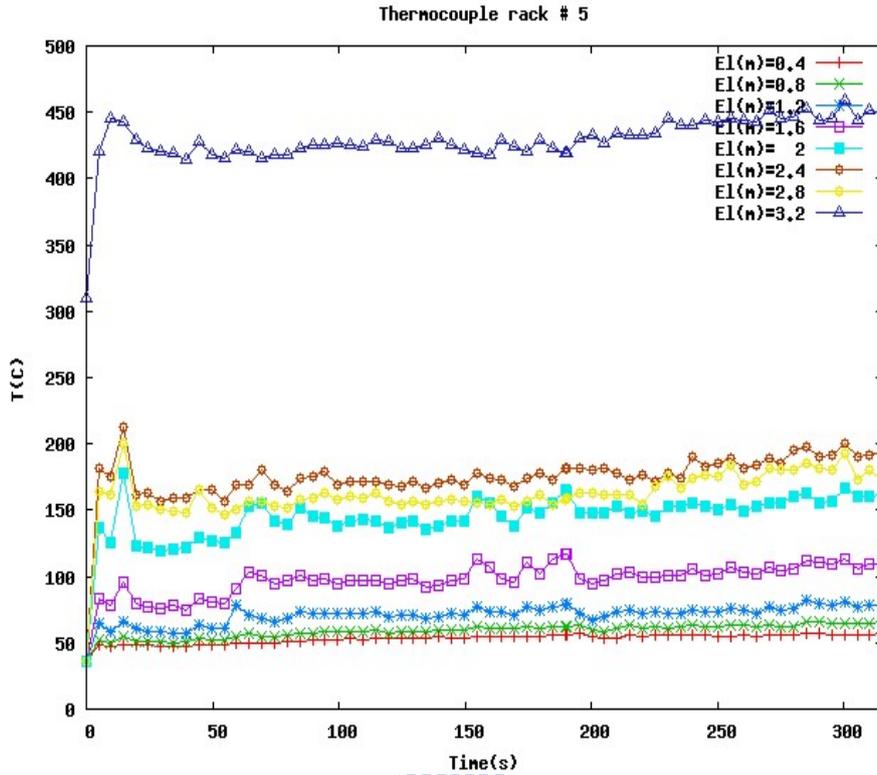
案例 9 : 2 號熱電偶樹



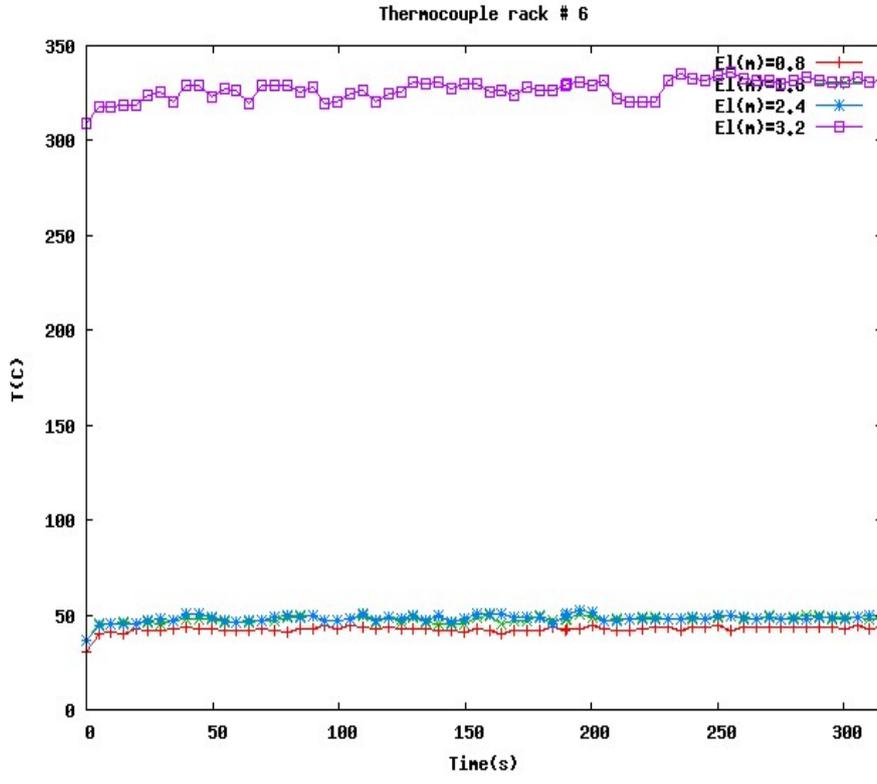
案例 9 : 3 號熱電偶樹



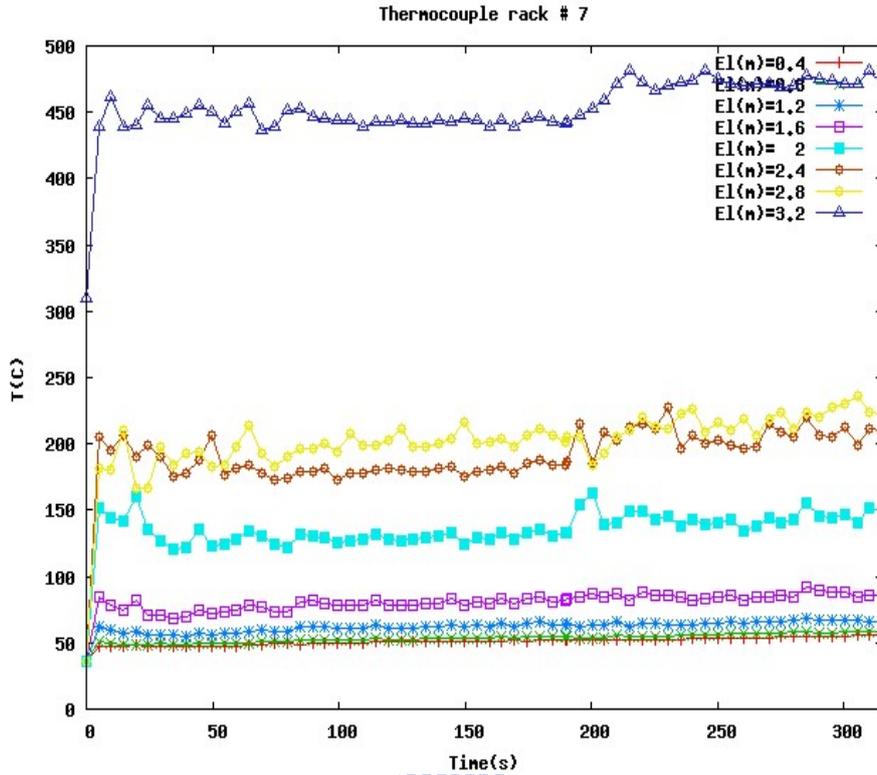
案例 9 : 4 號熱電偶樹



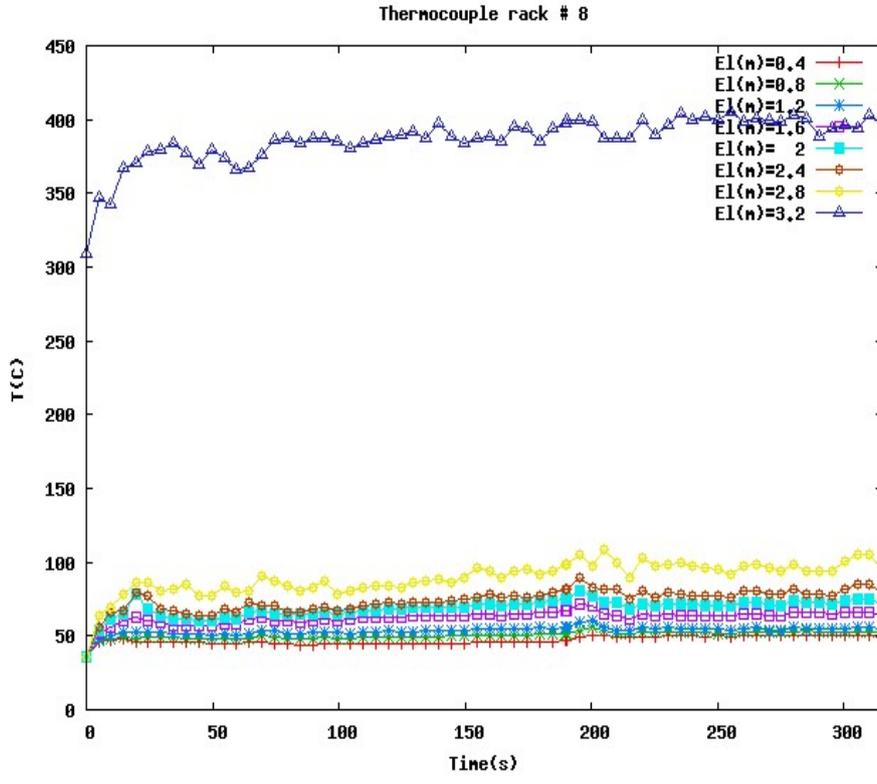
案例 9 : 5 號熱電偶樹



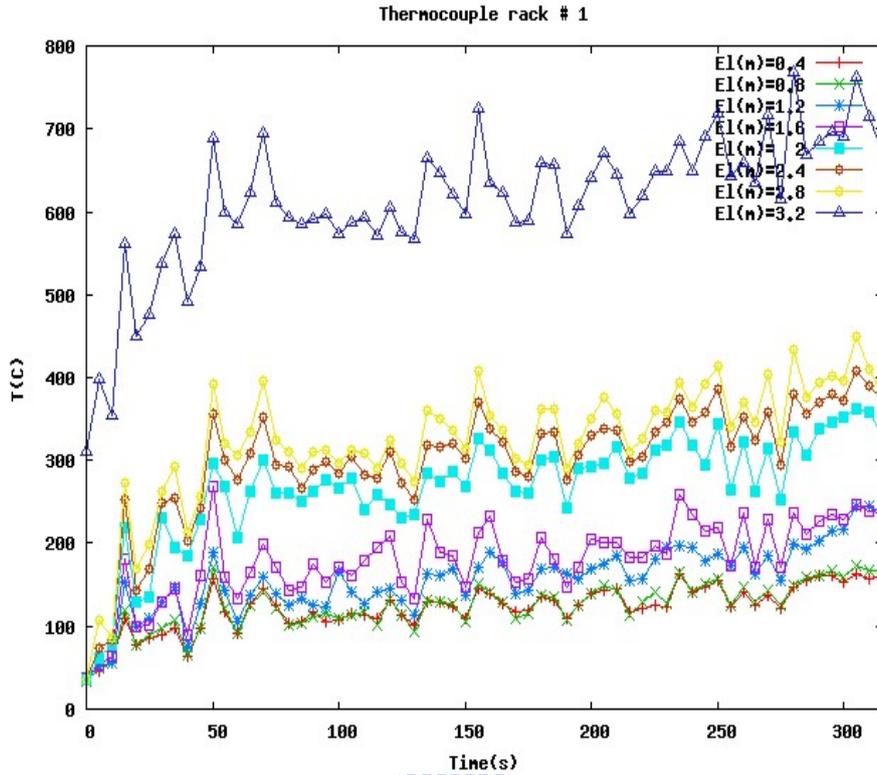
案例 9 : 6 號熱電偶樹



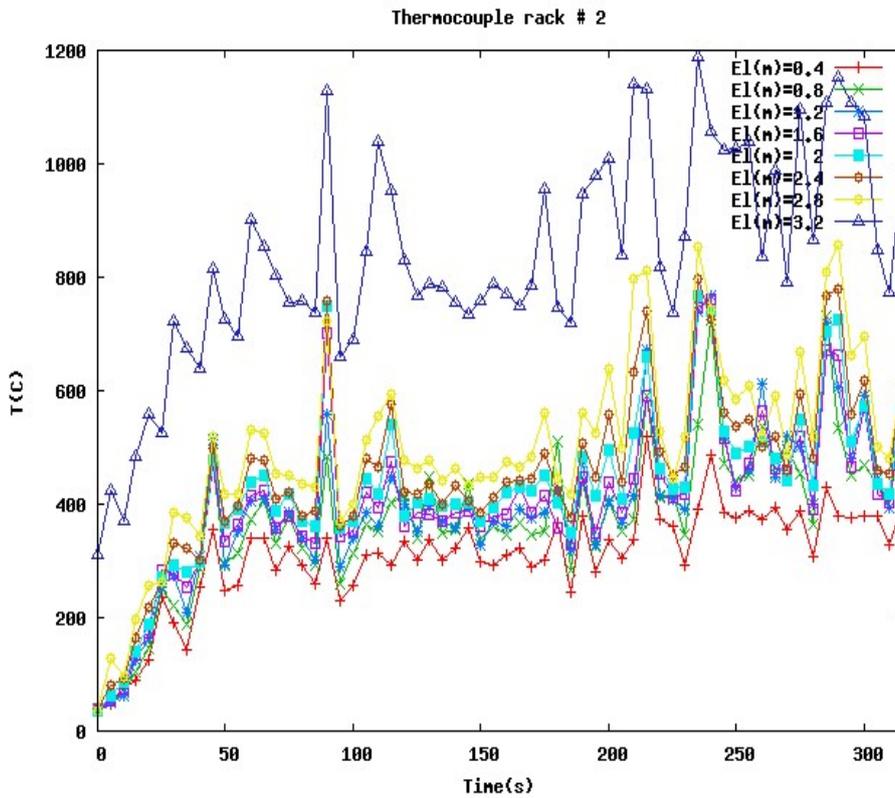
案例 9 : 7 號熱電偶樹



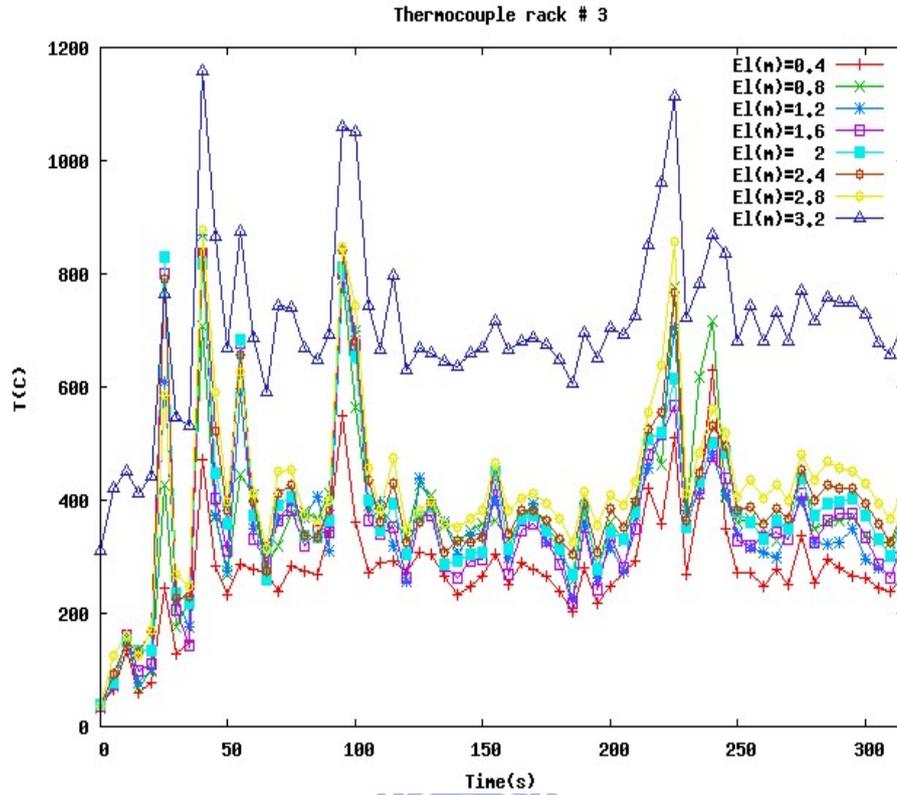
案例 9 : 8 號熱電偶樹



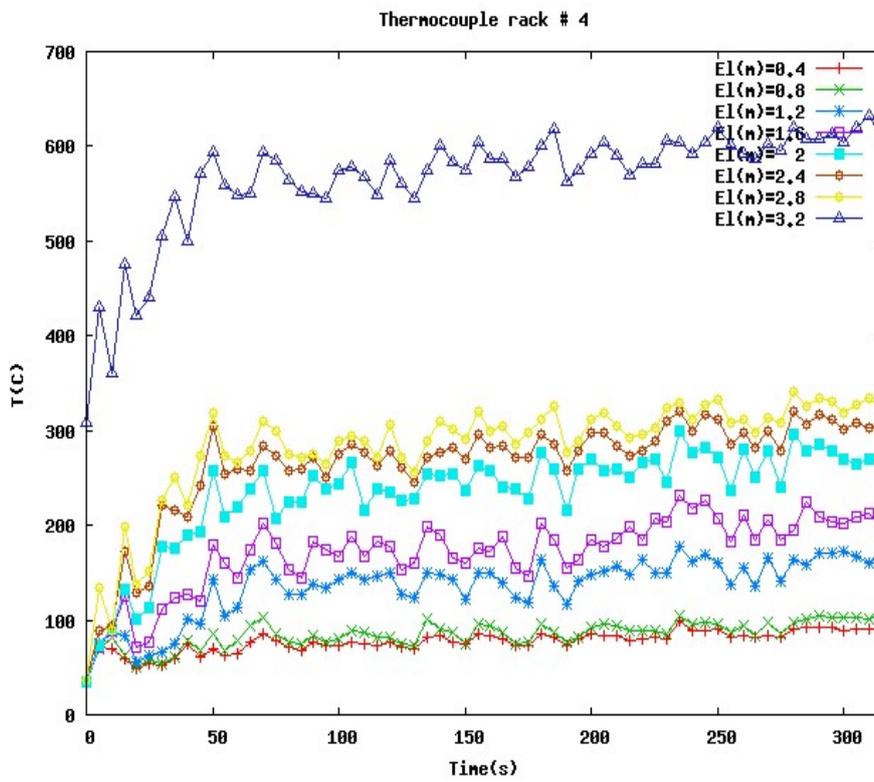
案例 12 : 1 號熱電偶樹



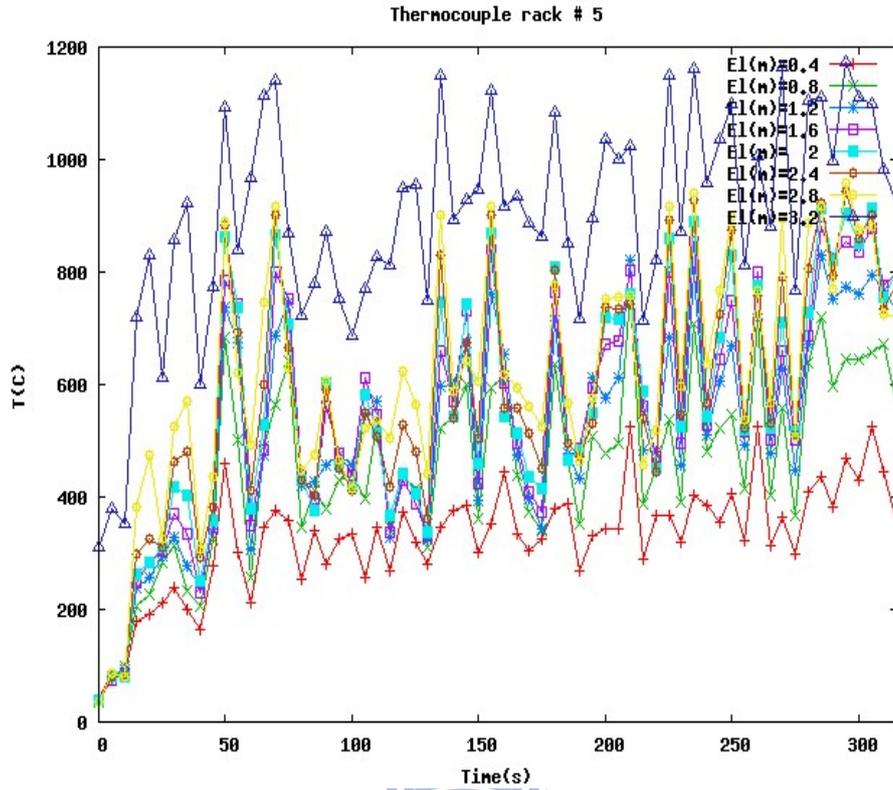
案例 12 : 2 號熱電偶樹



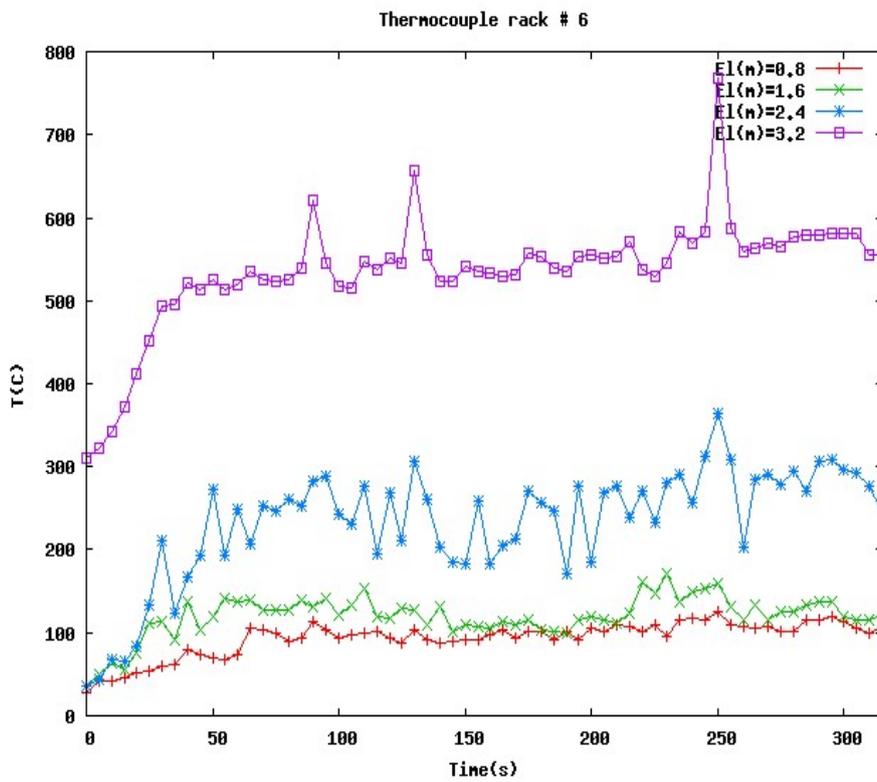
案例 12：3 號熱電偶樹



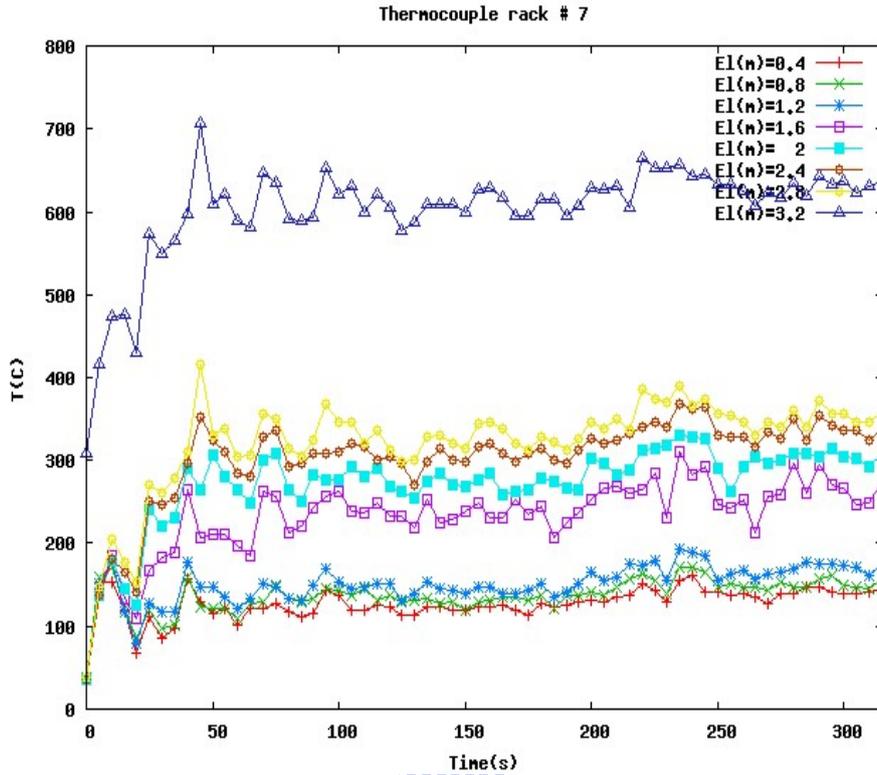
案例 12：4 號熱電偶樹



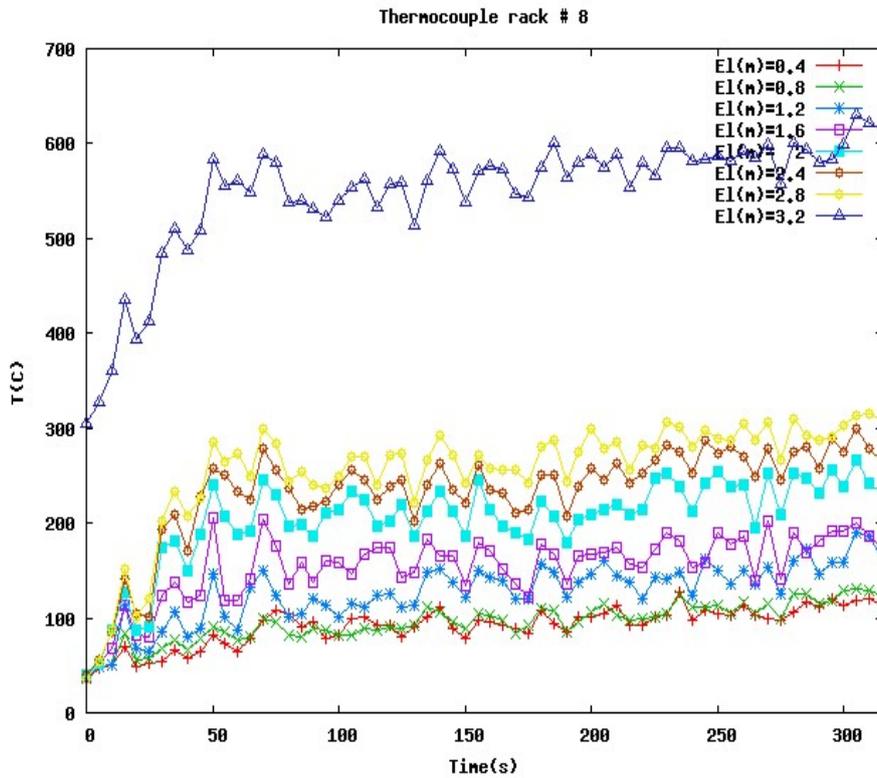
案例 12：5 號熱電偶樹



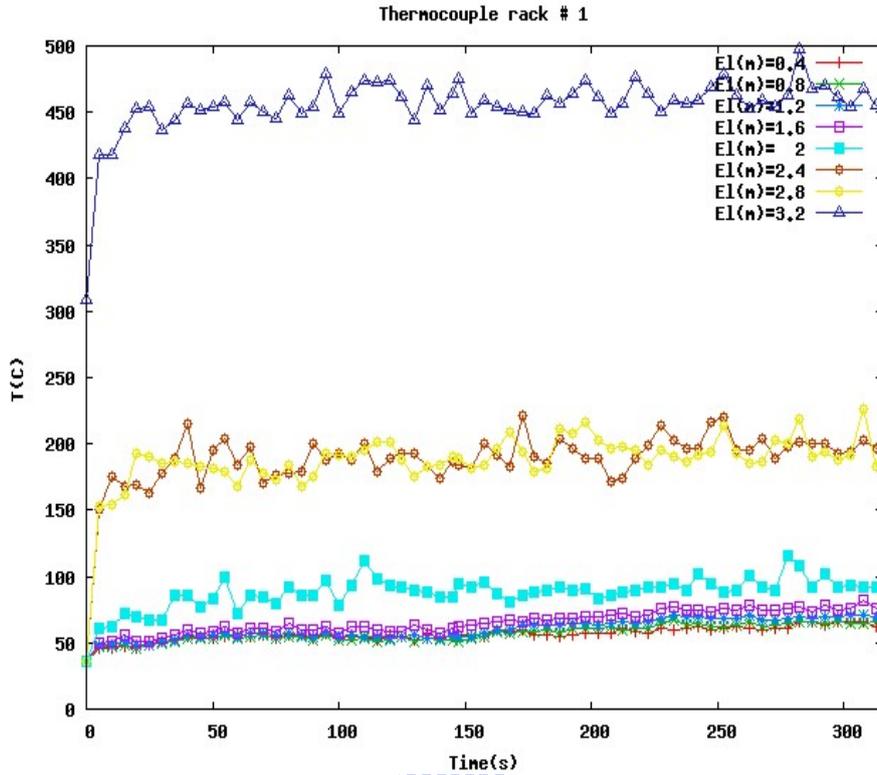
案例 12：6 號熱電偶樹



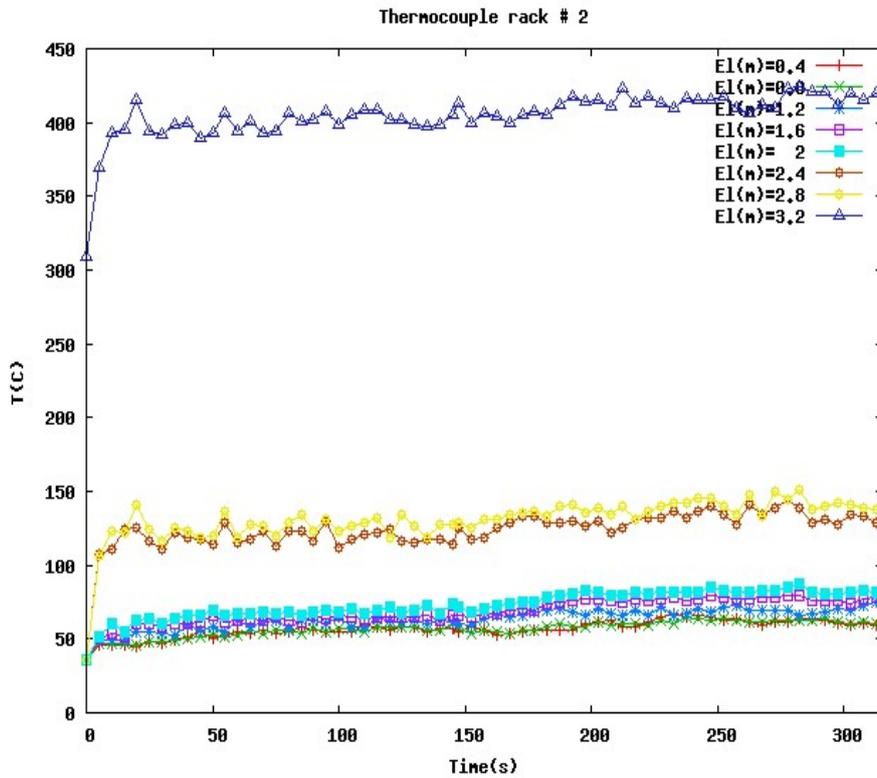
案例 12：7 號熱電偶樹



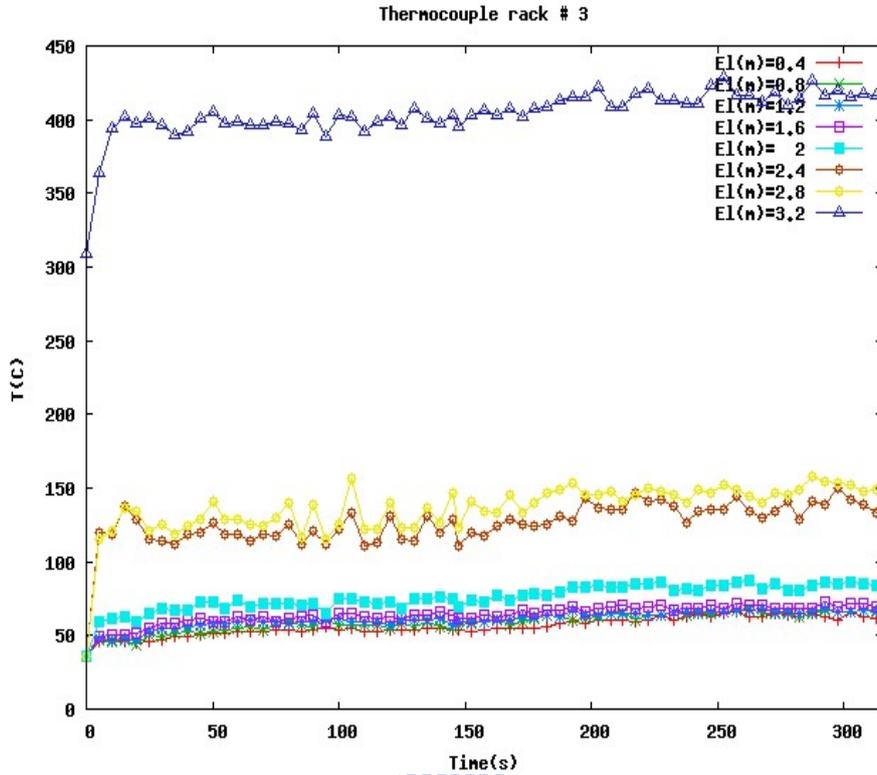
案例 12：8 號熱電偶樹



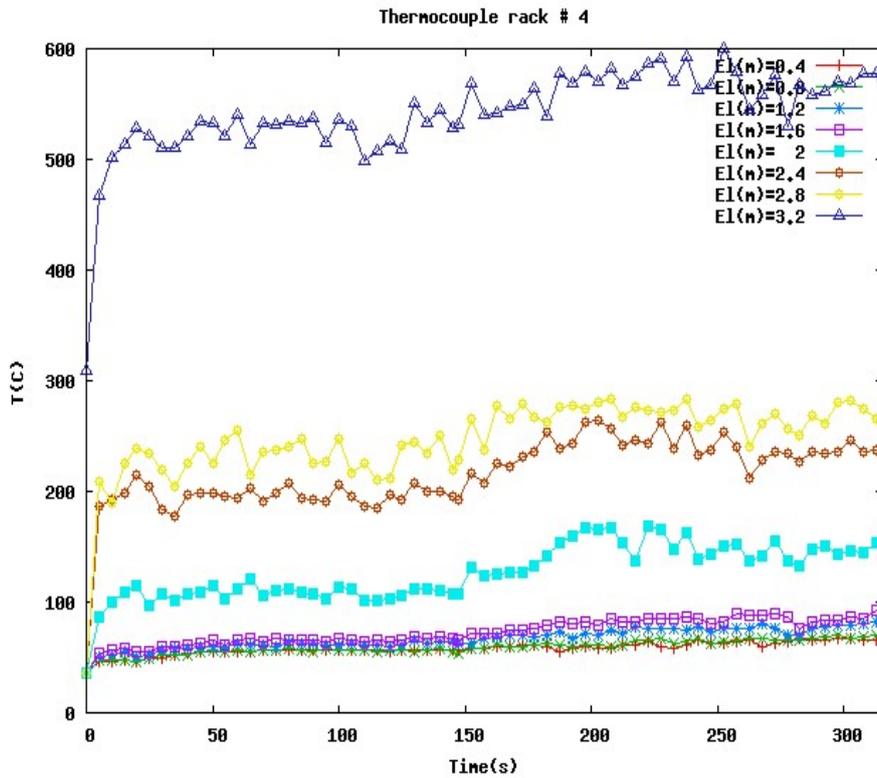
案例 15 : 1 號熱電偶樹



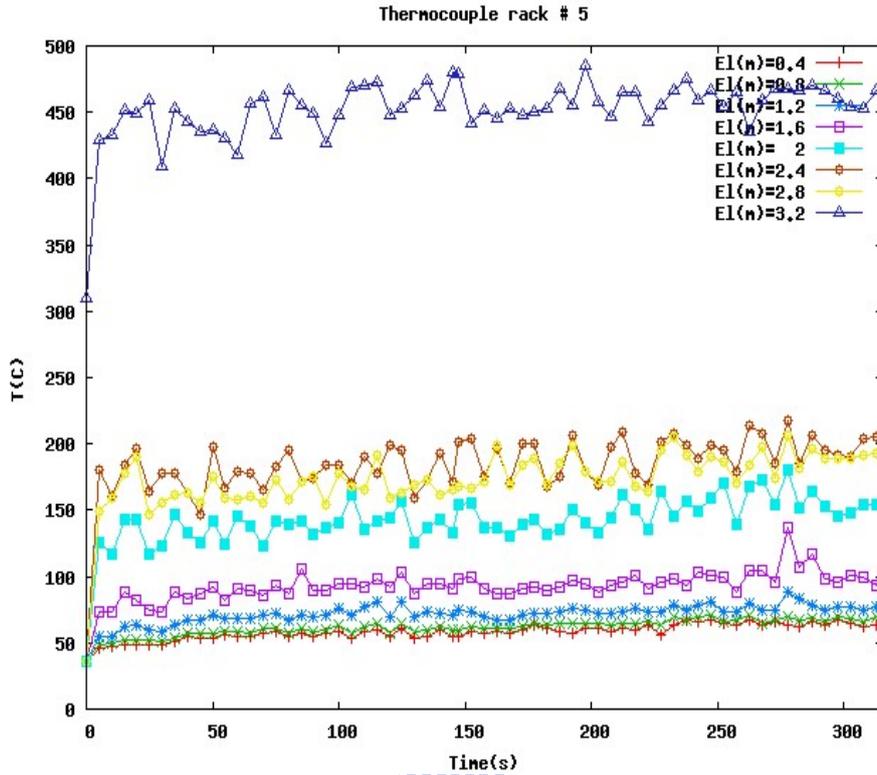
案例 15 : 2 號熱電偶樹



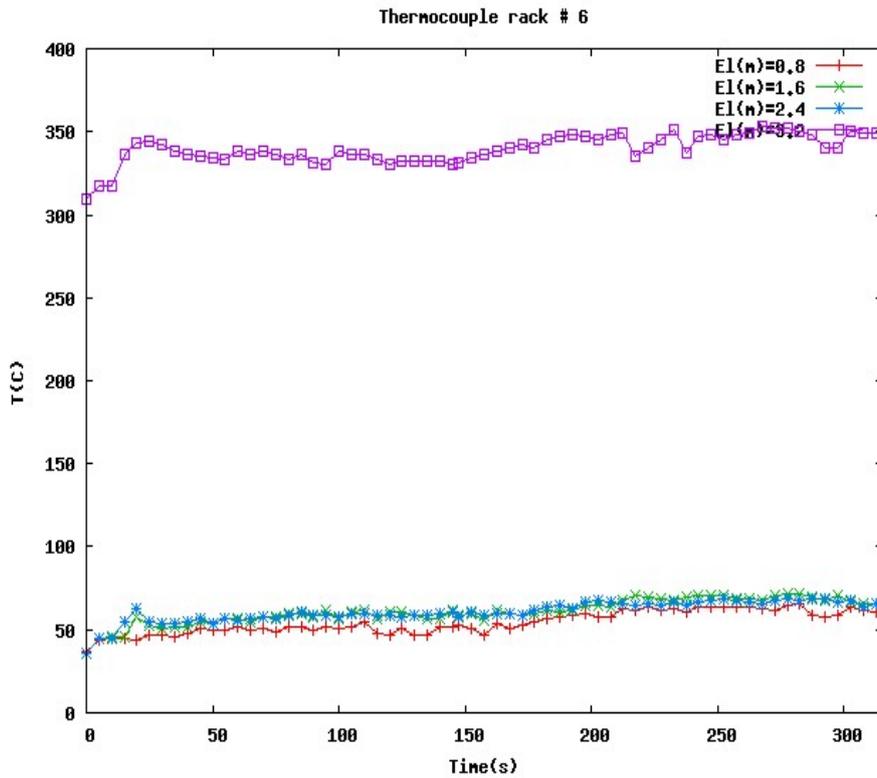
案例 15：3 號熱電偶樹



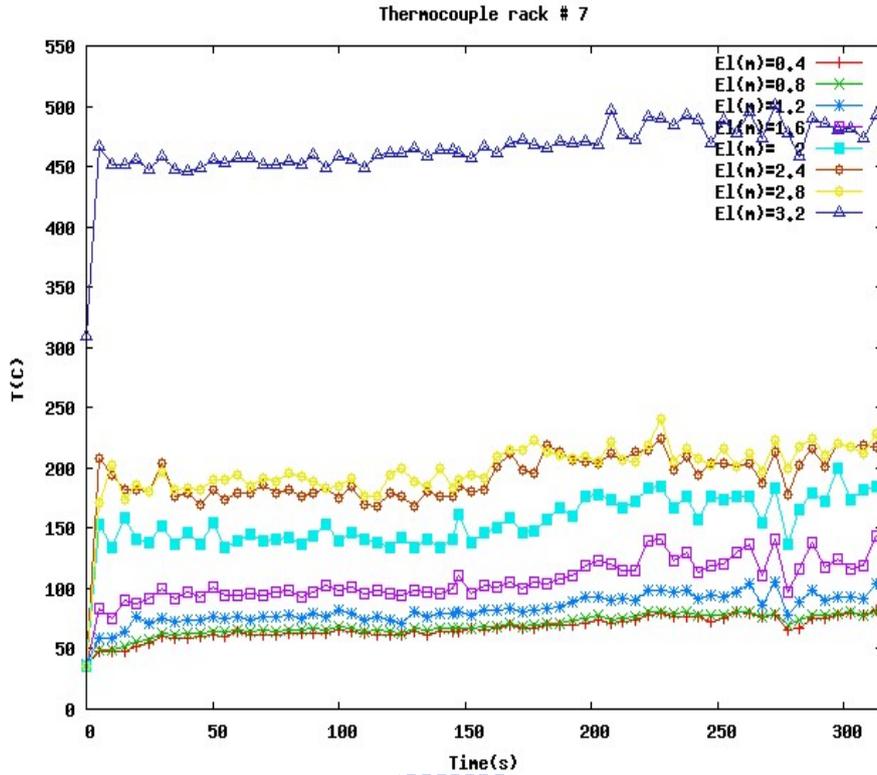
案例 15：4 號熱電偶樹



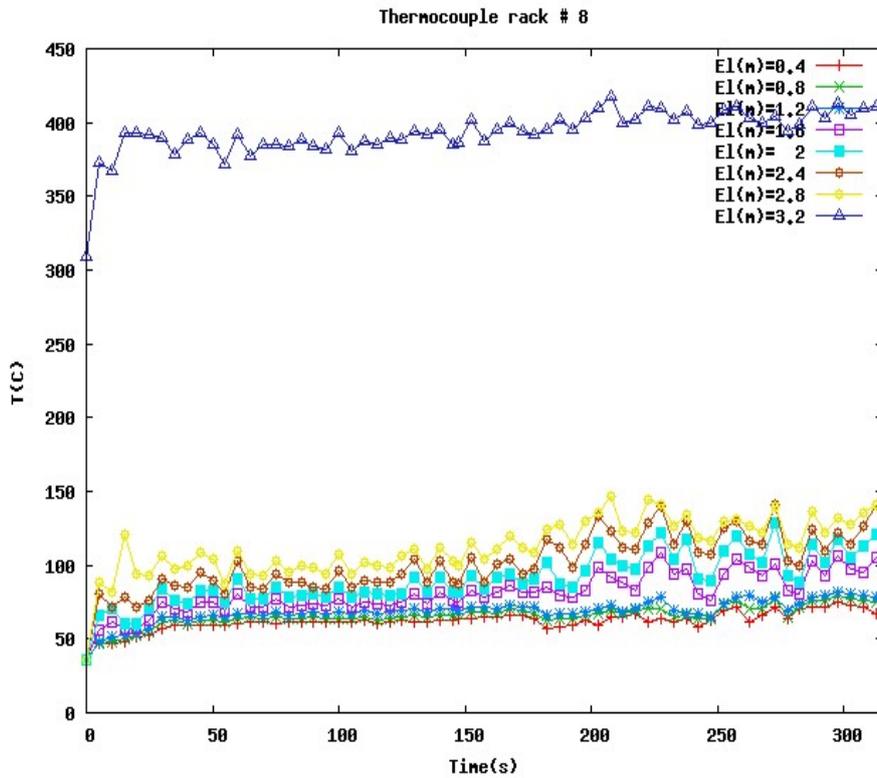
案例 15 : 5 號熱電偶樹



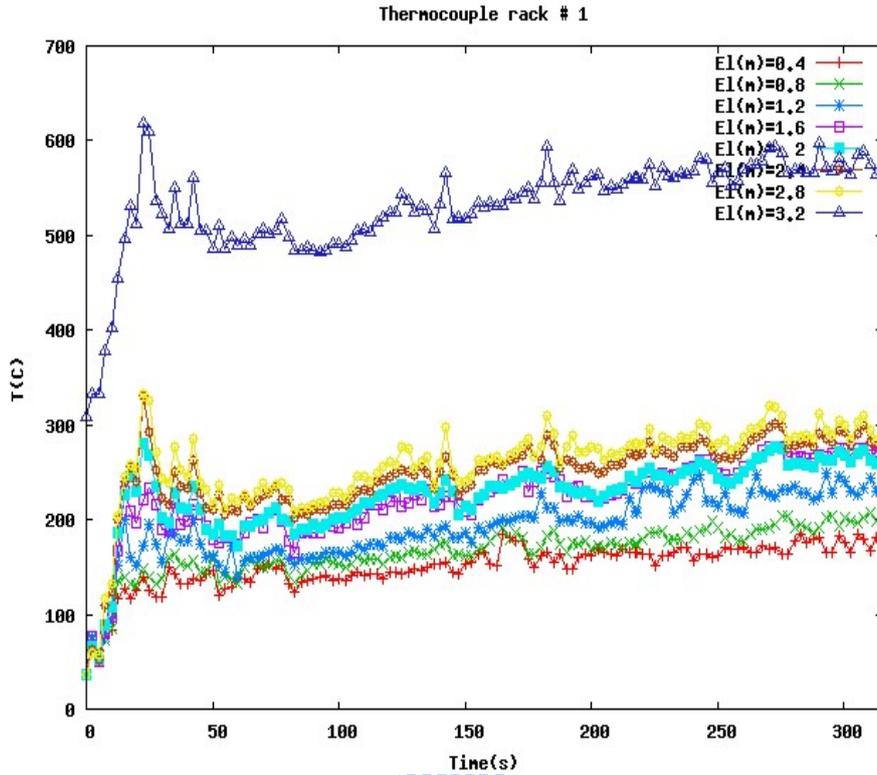
案例 15 : 6 號熱電偶樹



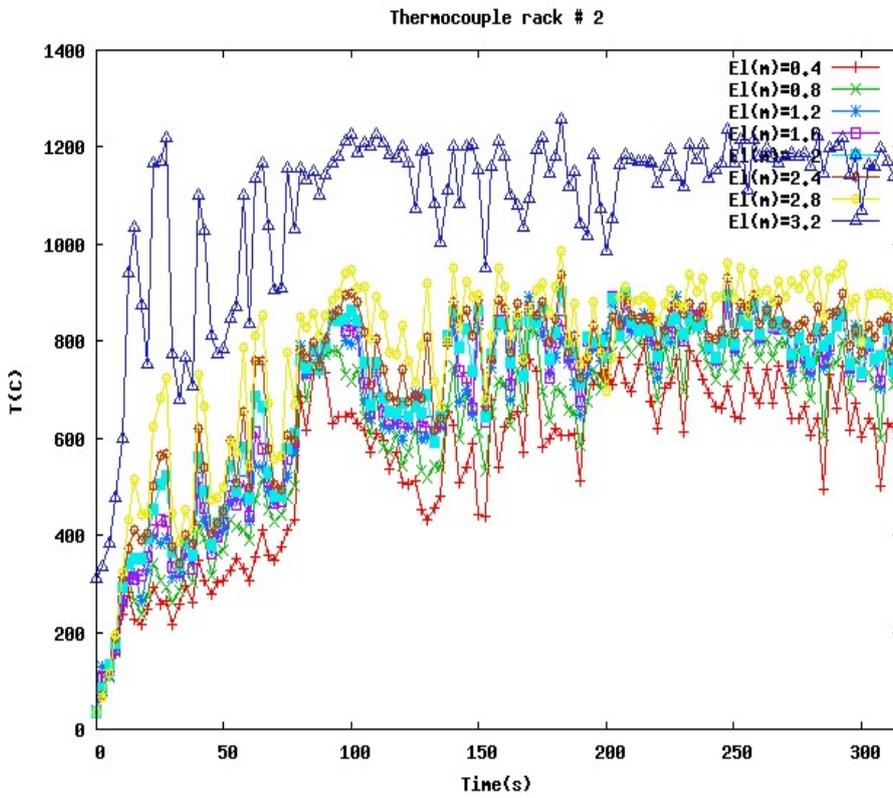
案例 15：7 號熱電偶樹



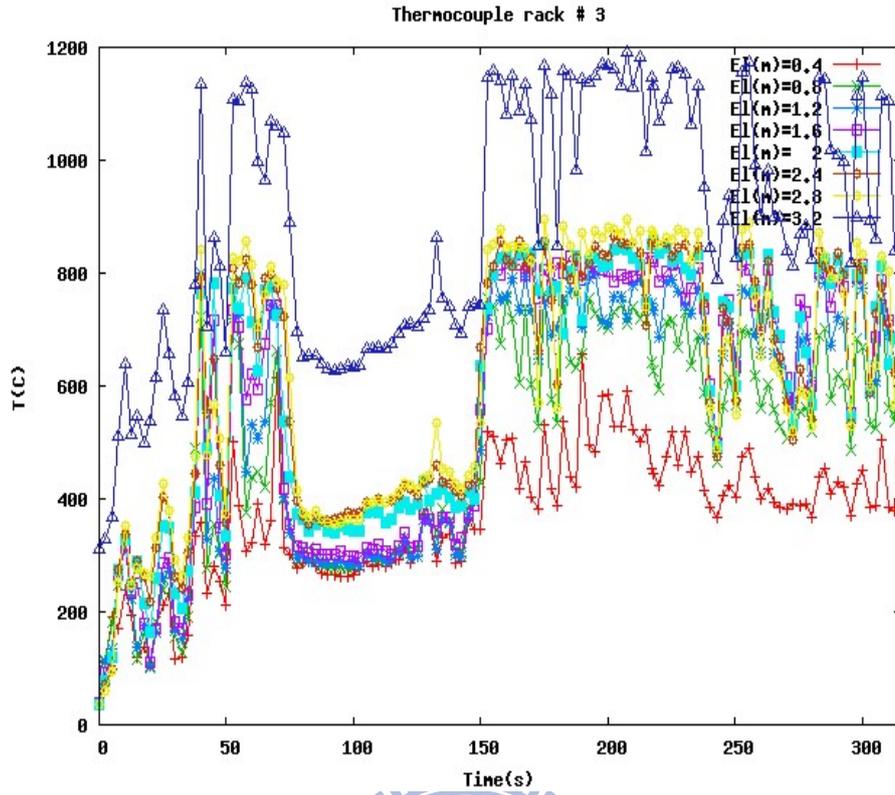
案例 15：8 號熱電偶樹



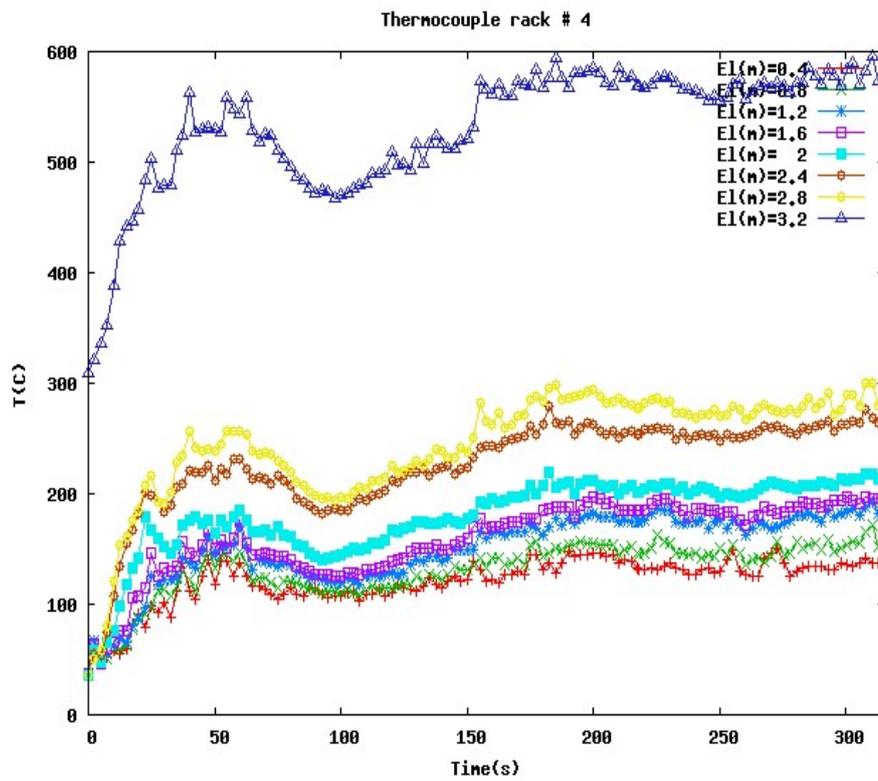
案例 18：1 號熱電偶樹



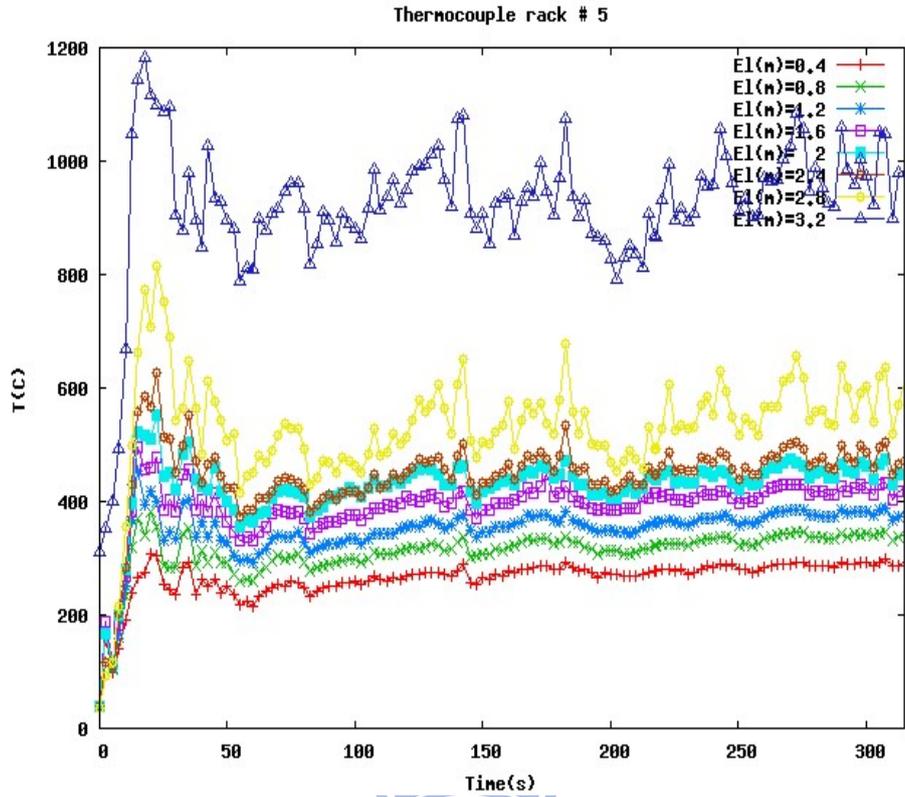
案例 18：2 號熱電偶樹



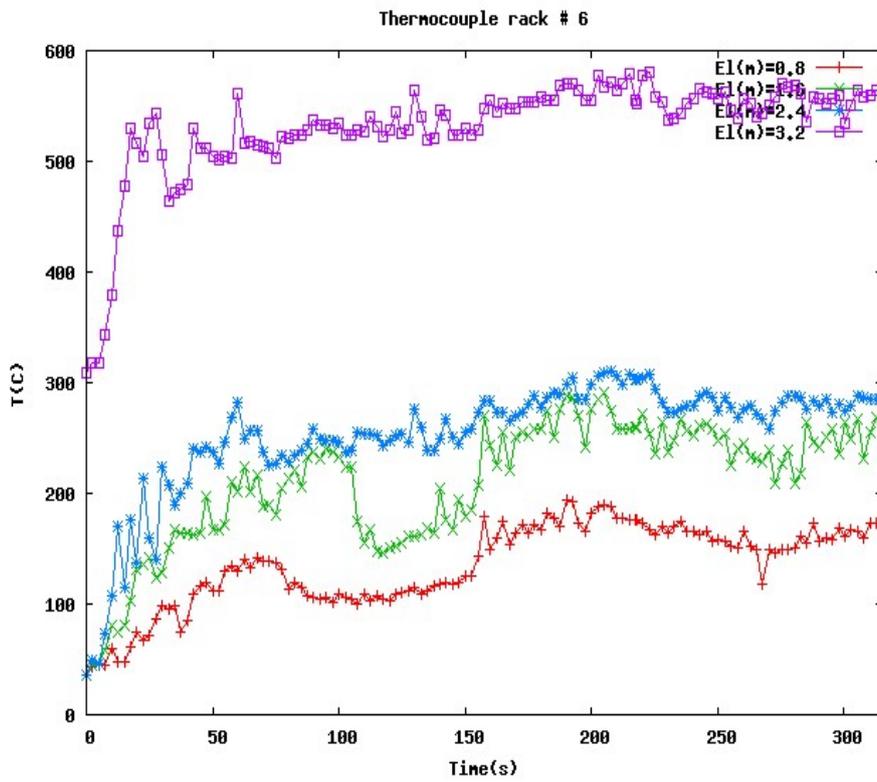
案例 18：3 號熱電偶樹



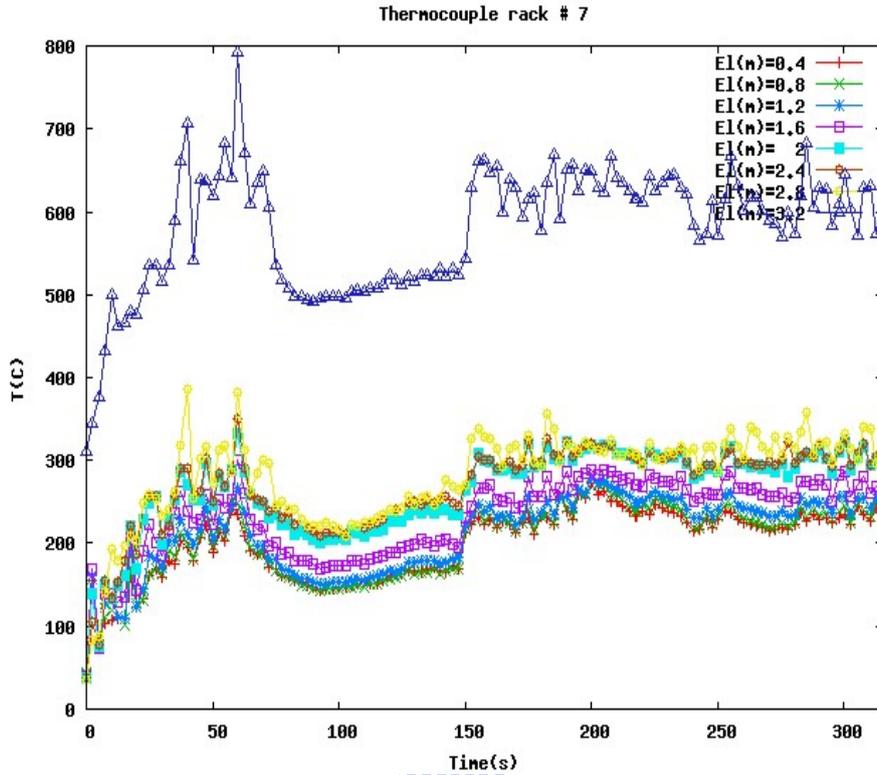
案例 18：4 號熱電偶樹



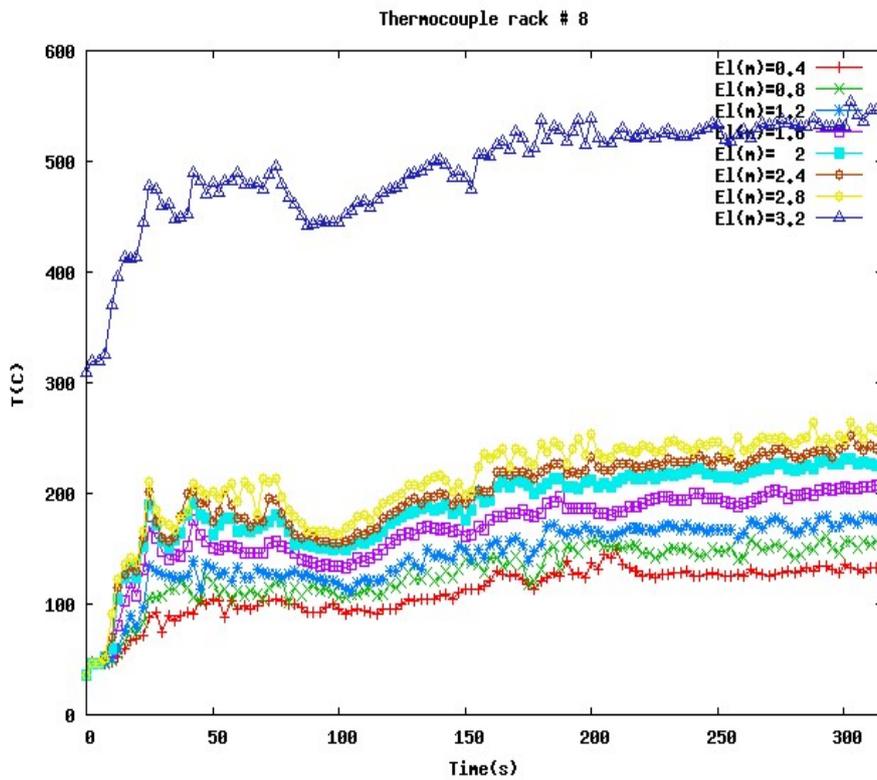
案例 18：5 號熱電偶樹



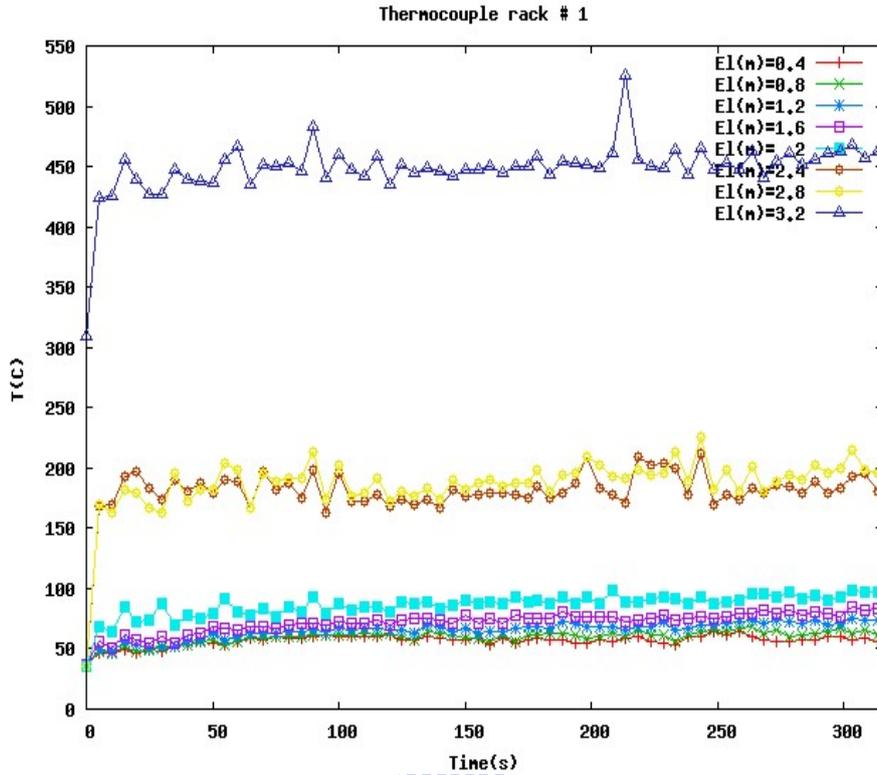
案例 18：6 號熱電偶樹



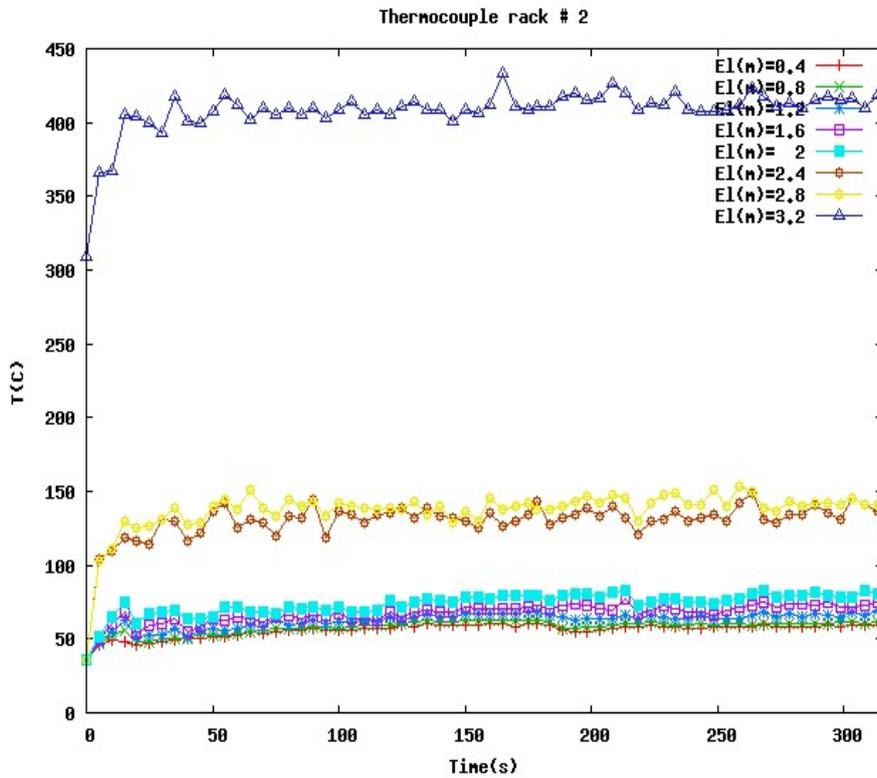
案例 18：7 號熱電偶樹



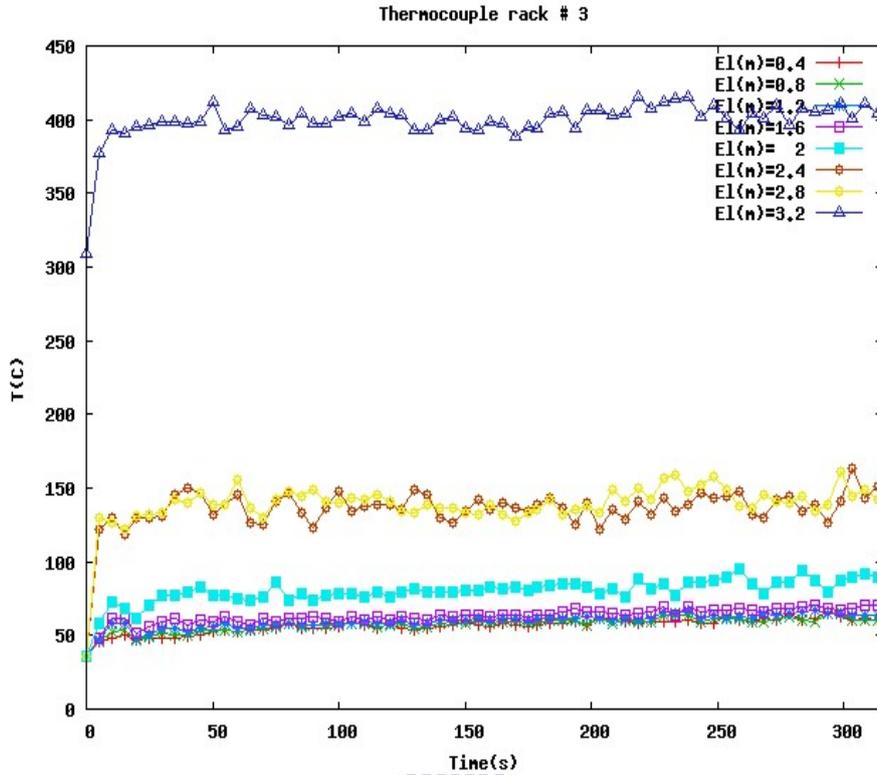
案例 18：8 號熱電偶樹



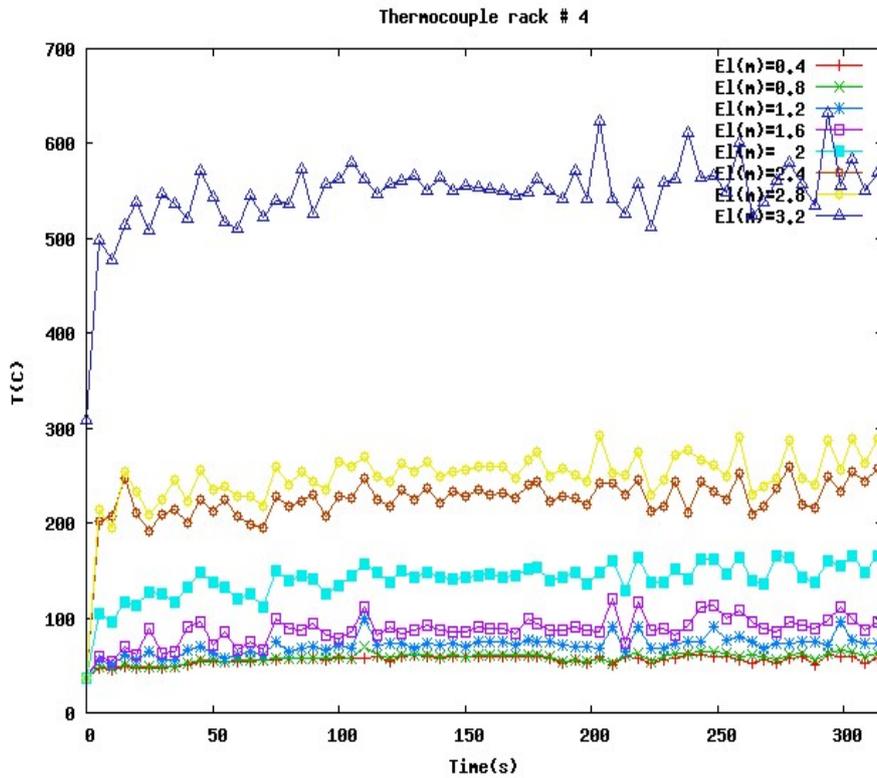
案例 21 : 1 號熱電偶樹



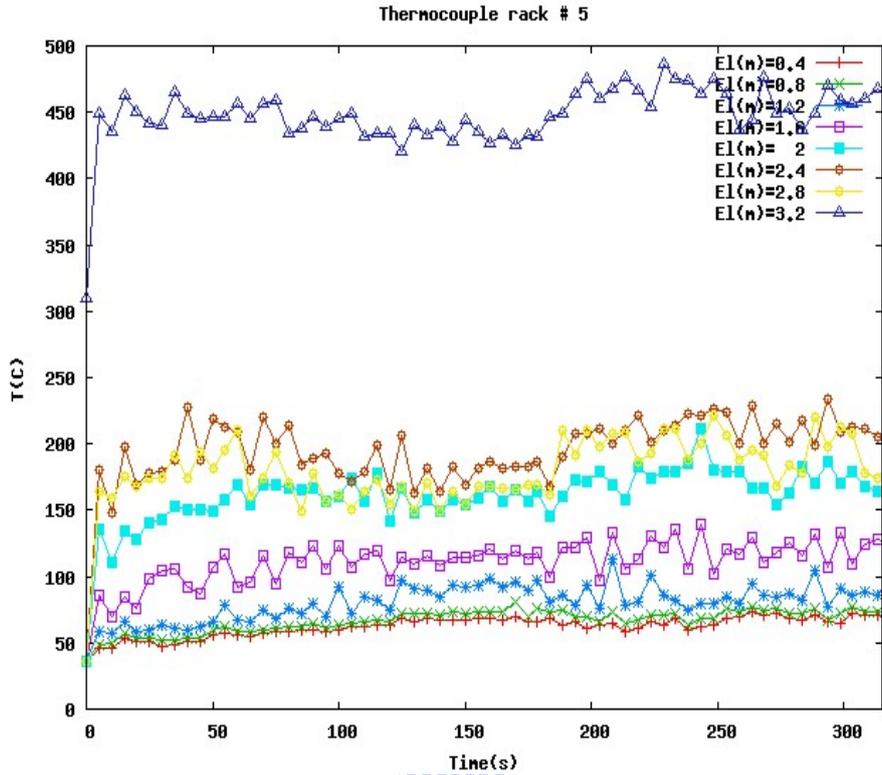
案例 21 : 2 號熱電偶樹



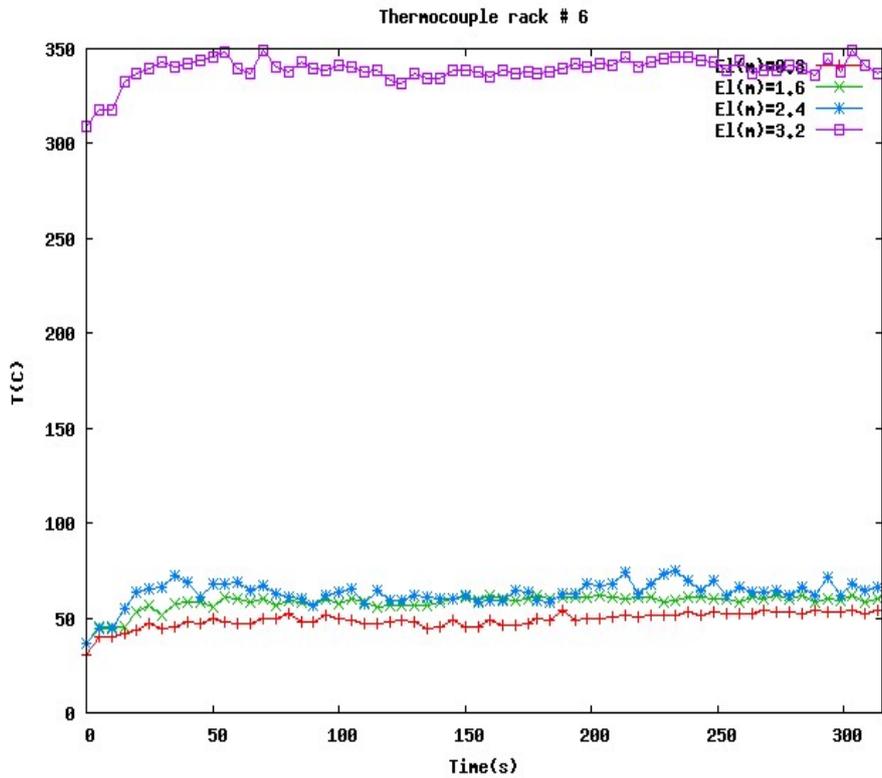
案例 21：3 號熱電偶樹



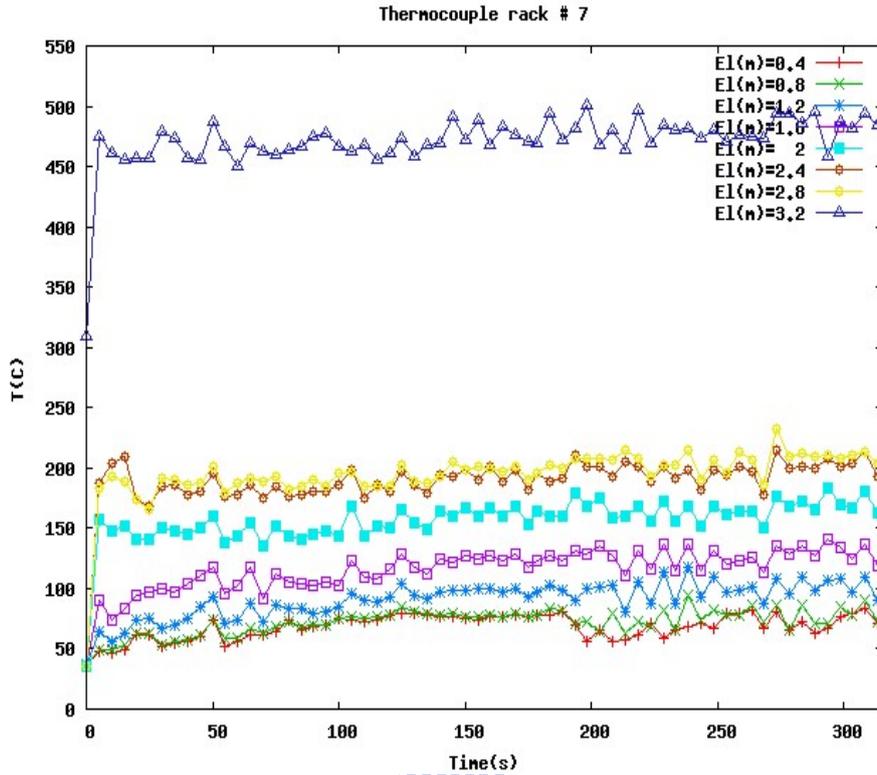
案例 21：4 號熱電偶樹



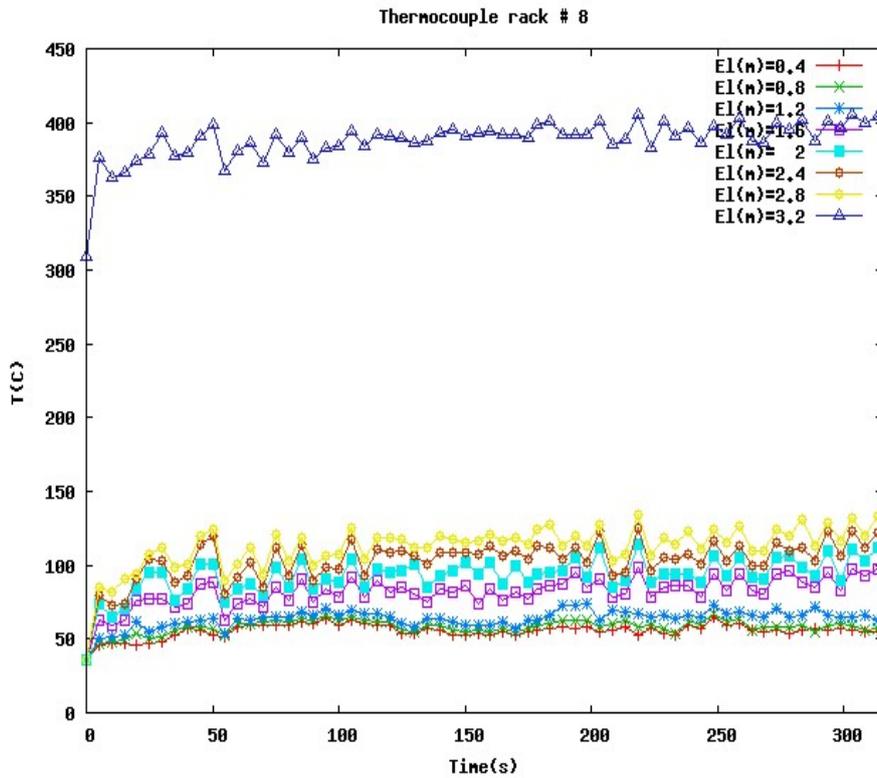
案例 21 : 5 號熱電偶樹



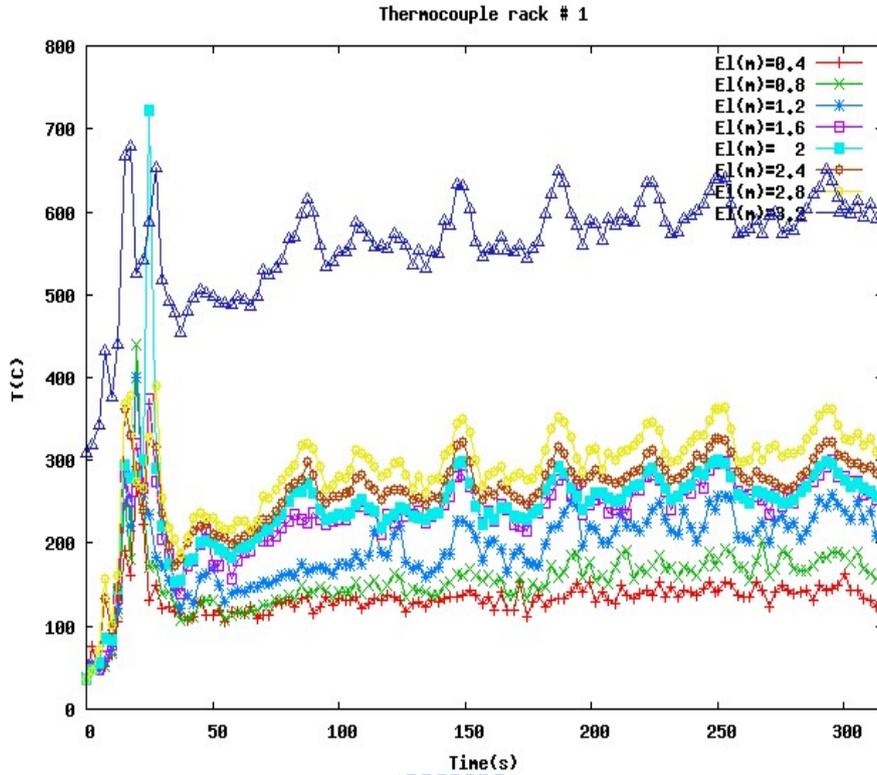
案例 21 : 6 號熱電偶樹



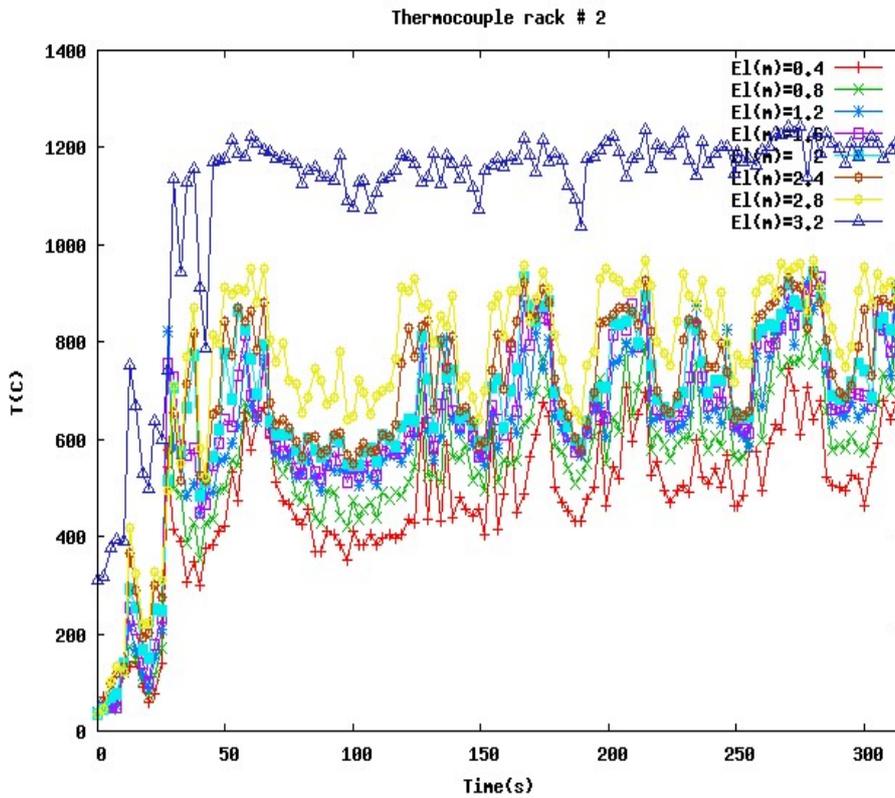
案例 21：7 號熱電偶樹



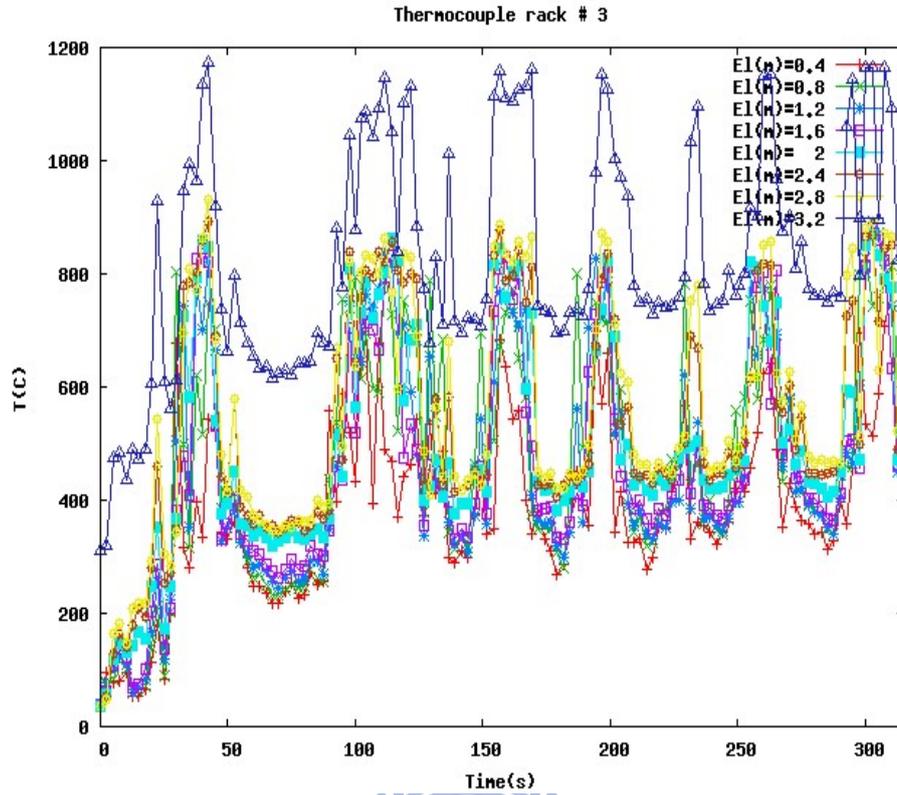
案例 21：8 號熱電偶樹



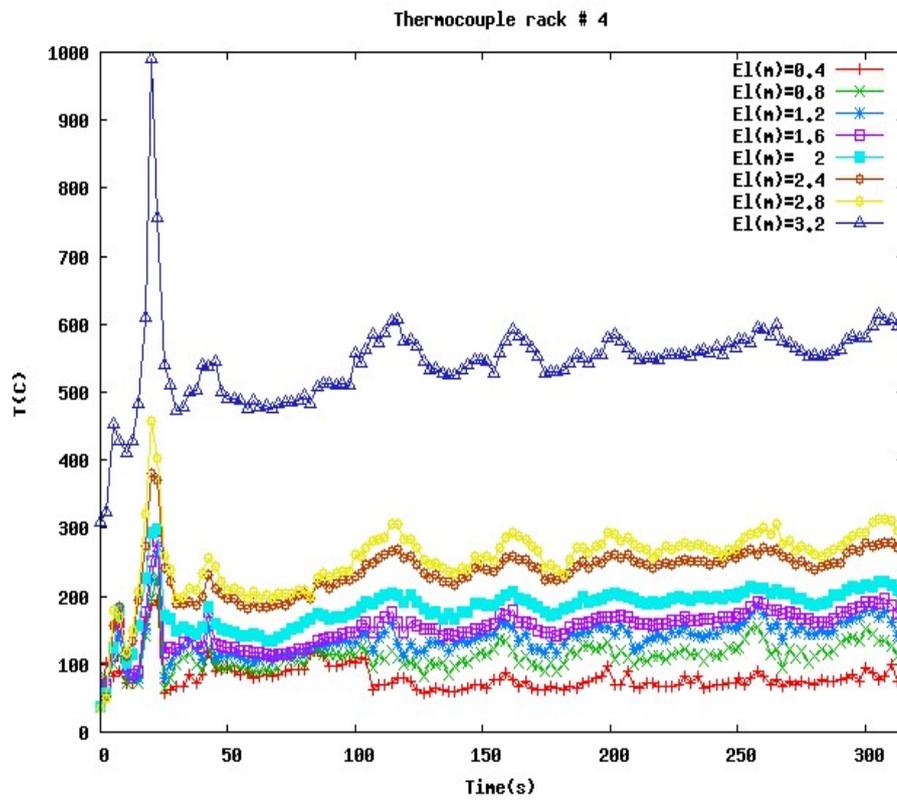
案例 24 : 1 號熱電偶樹



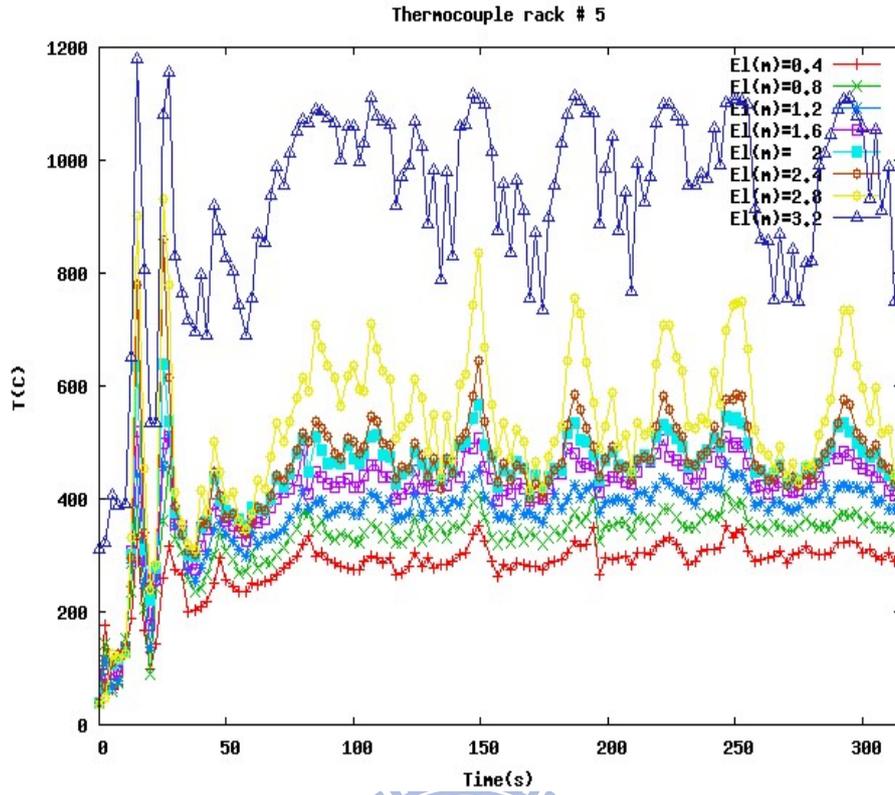
案例 24 : 2 號熱電偶樹



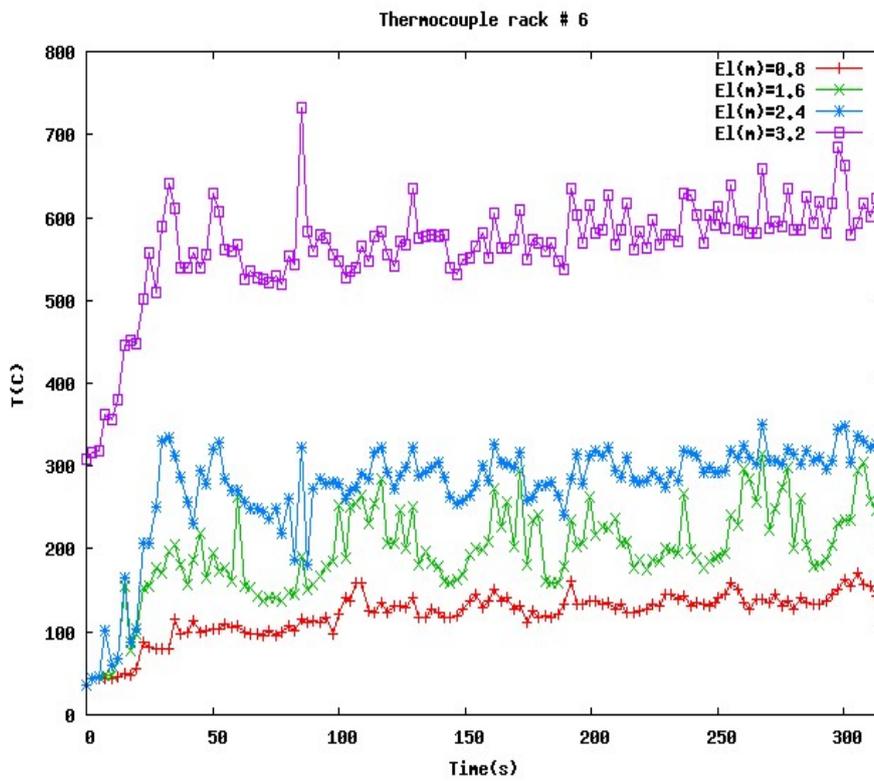
案例 24：3 號熱電偶樹



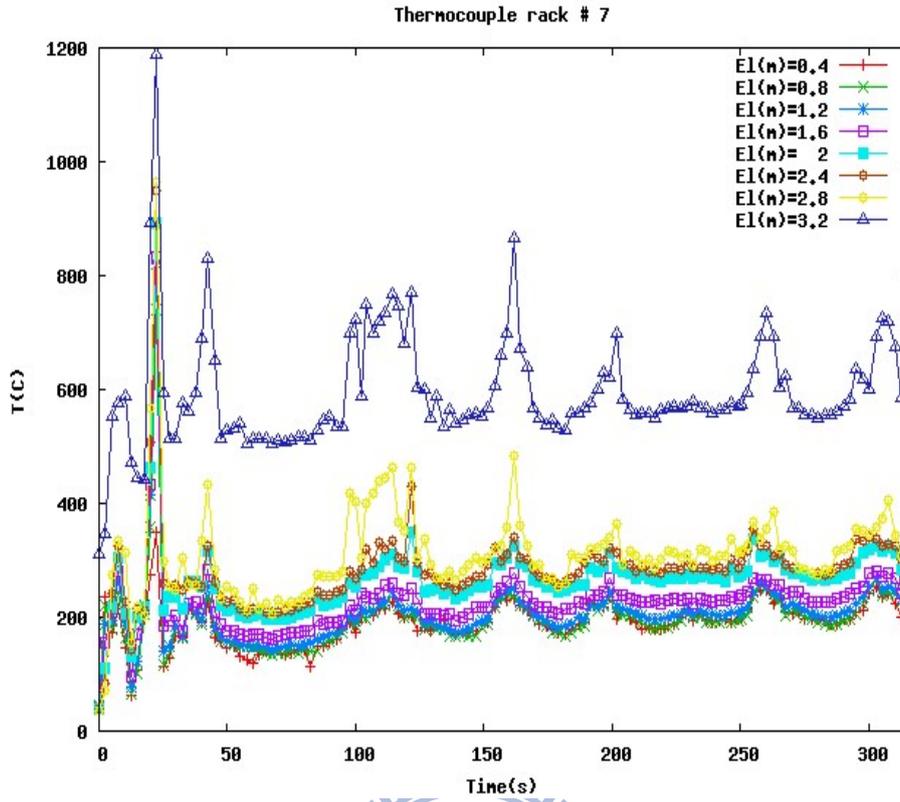
案例 24：4 號熱電偶樹



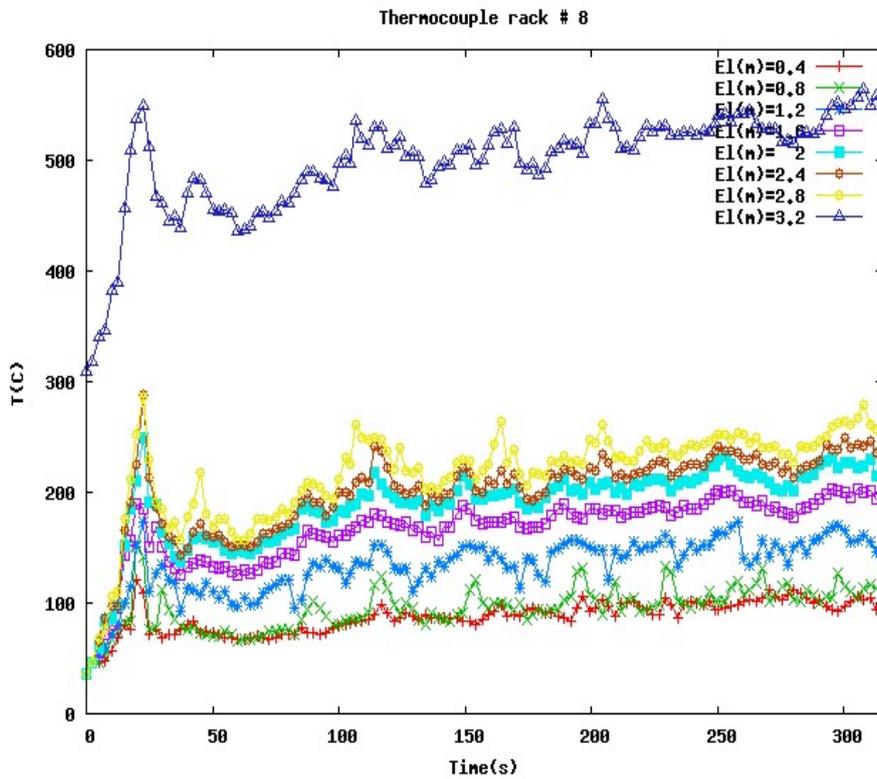
案例 24：5 號熱電偶樹



案例 24：6 號熱電偶樹

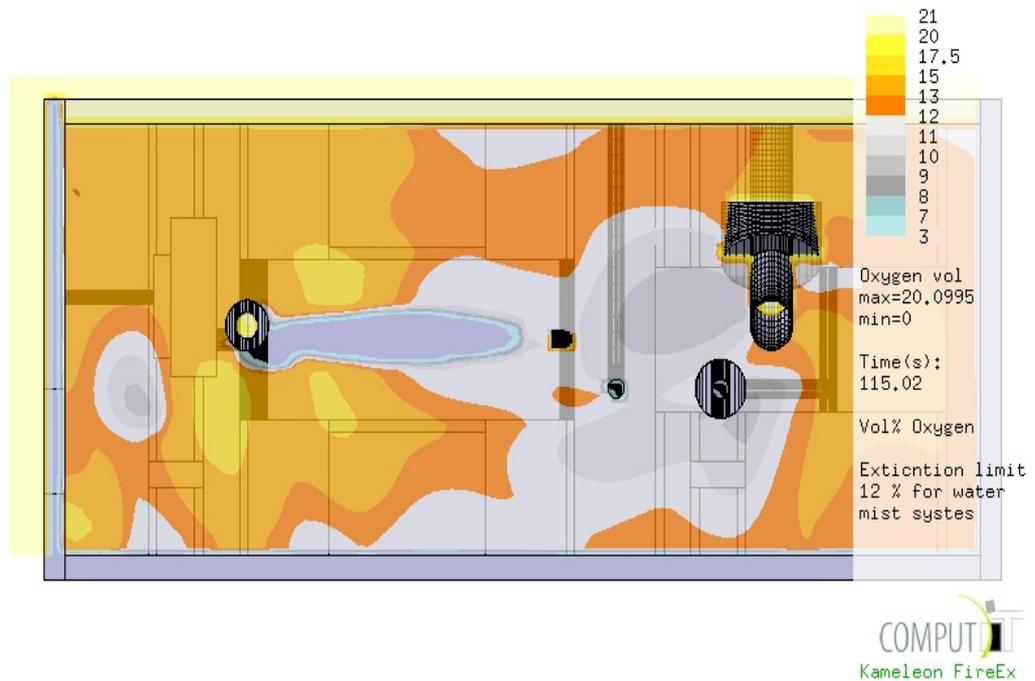


案例 24 : 7 號熱電偶樹

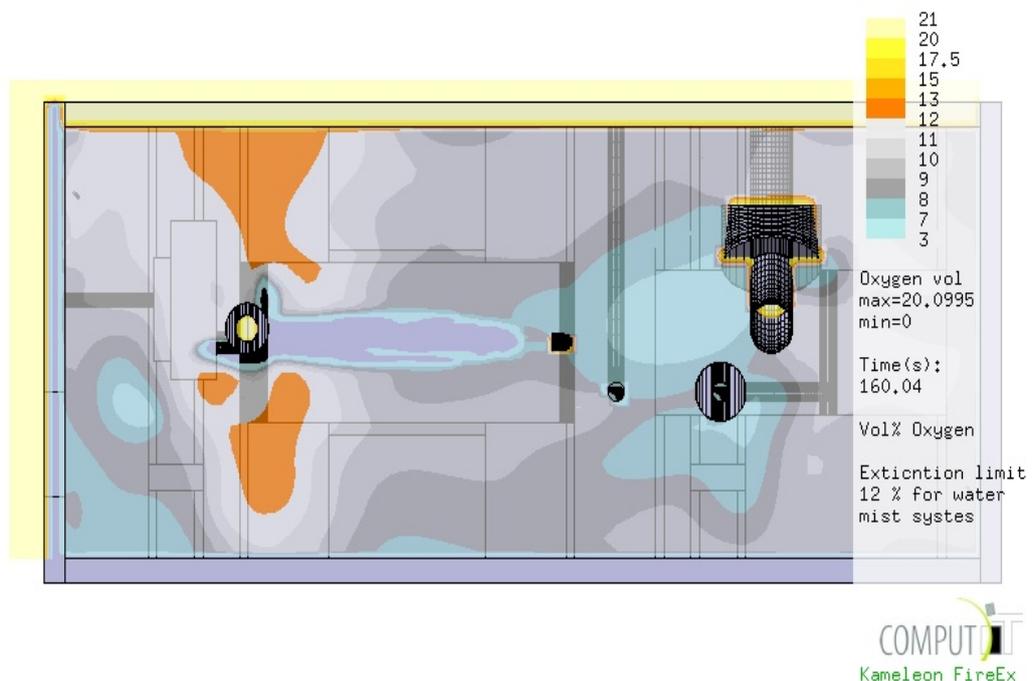


案例 24 : 8 號熱電偶樹

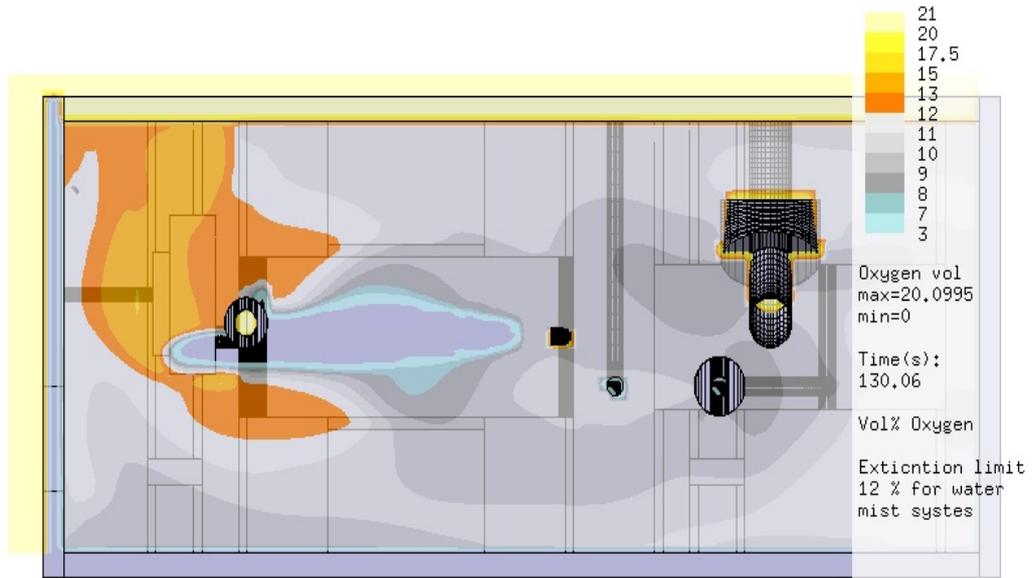
Appendix B 電腦模擬火焰附近地區的氧濃度



案例 01: 低濃度氧(灰色)進入柴油噴射火焰逆風的部分

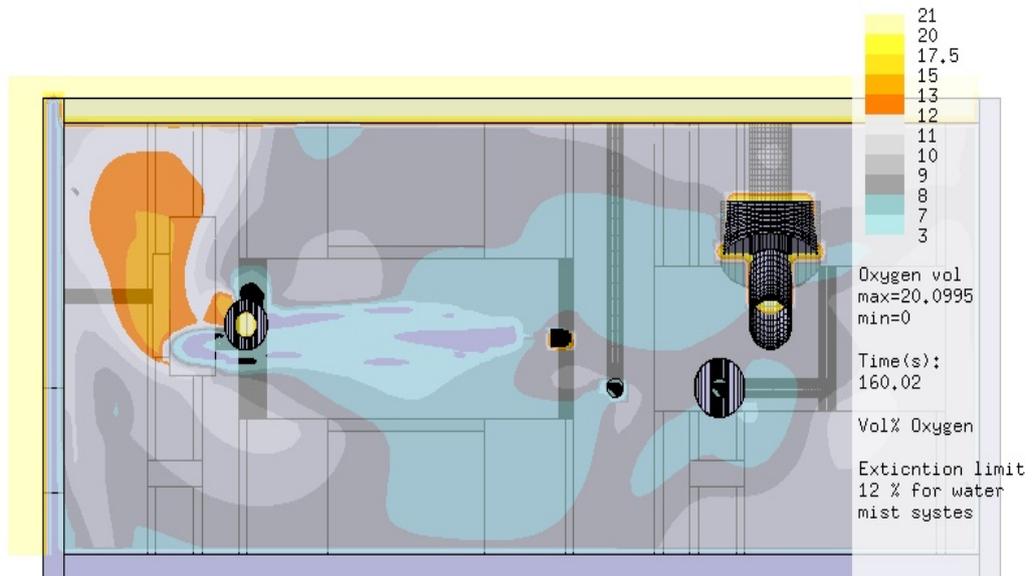


案例 01: 火焰被低濃度氧所吞噬，火勢撲滅



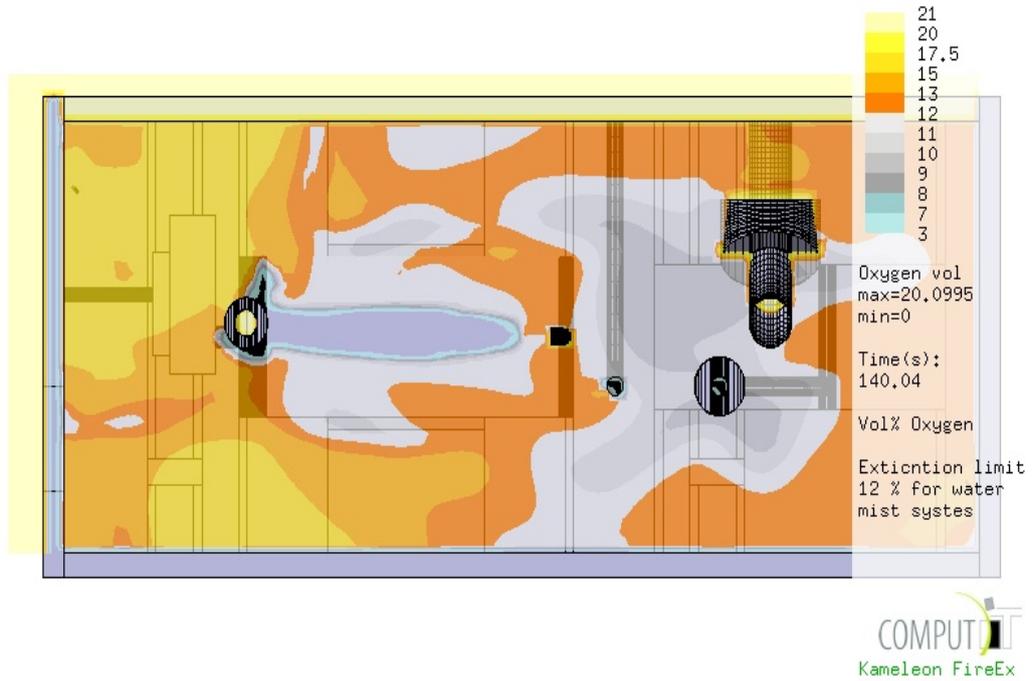
COMPUTER
Kameleon FireEx

案例 02: 火焰差不多被低濃度氧吞噬

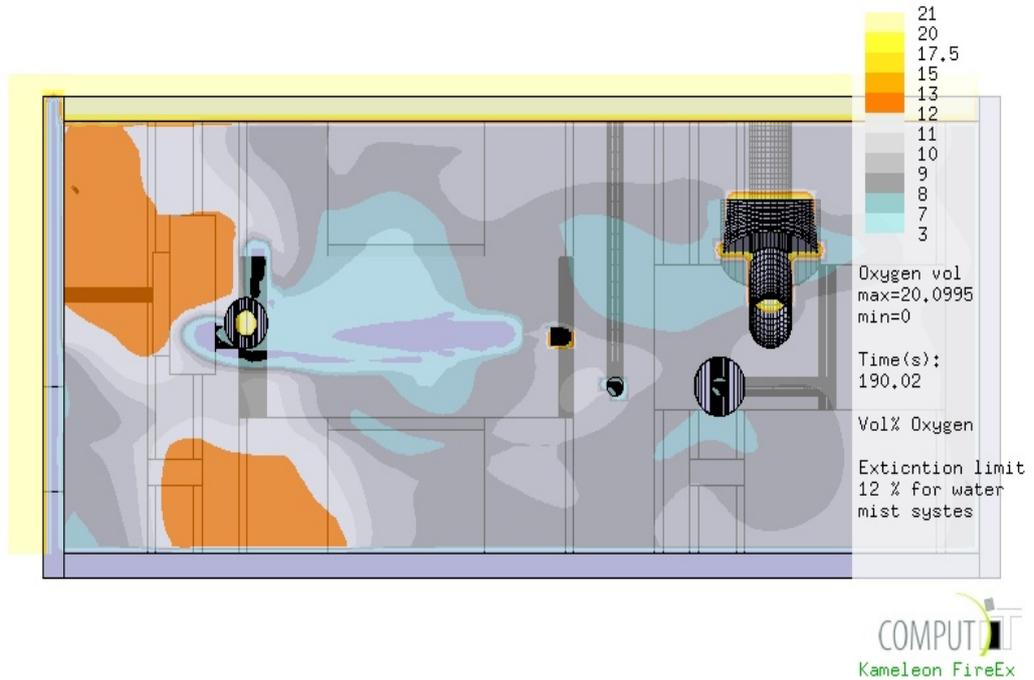


COMPUTER
Kameleon FireEx

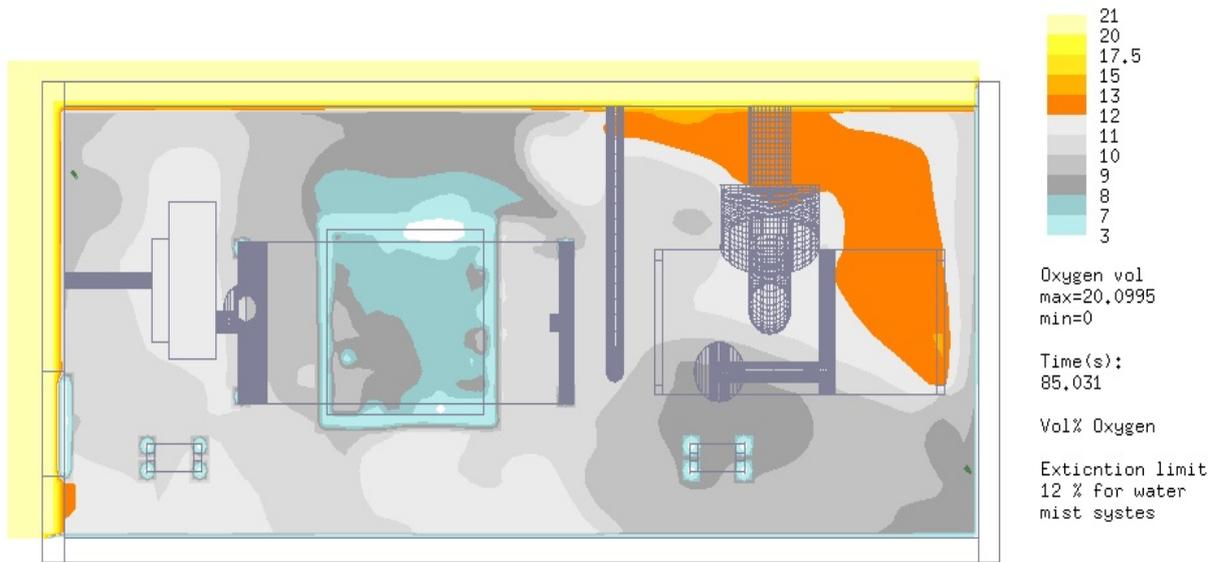
案例 02: 火勢被低濃度氧吞噬



案例 03: 低濃度氧進入火焰逆風的部分

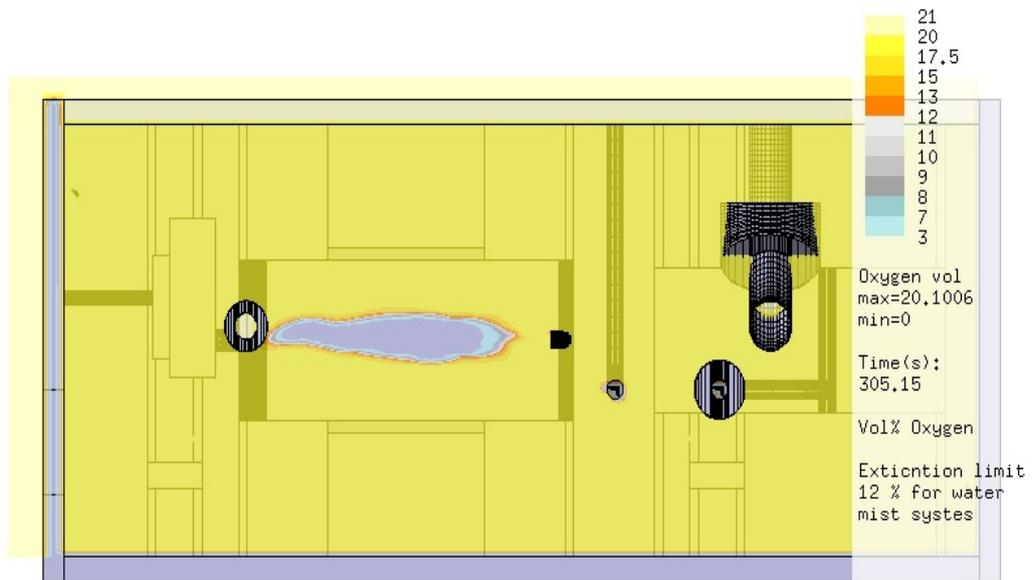


案例 03: 火焰被低濃度氧吞噬



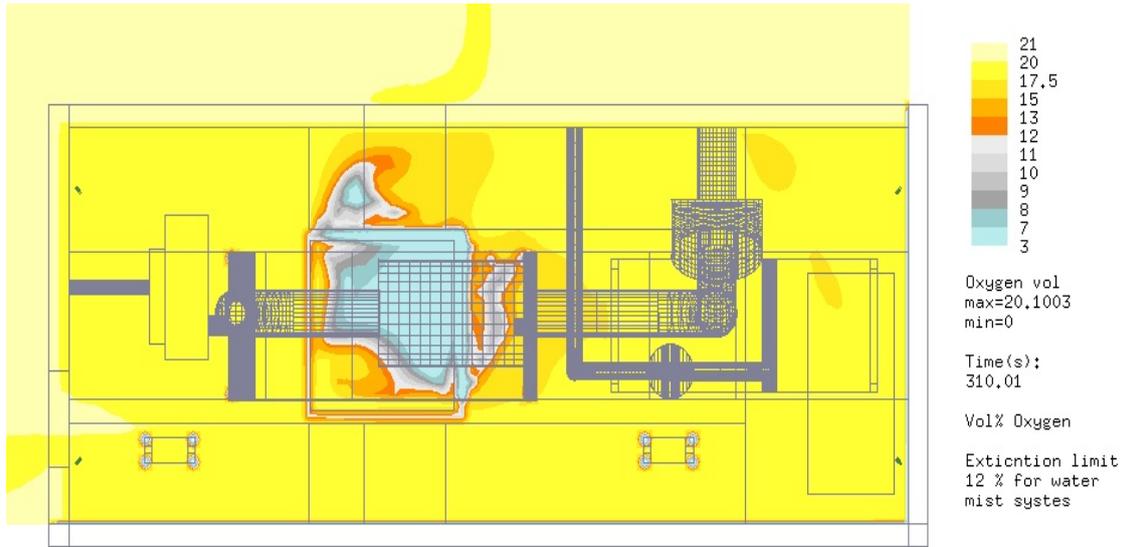
COMPUTER
Kameleon FireEx

案例 06: 油池火災提供空氣的區域氧氣體積濃度低於 12%



COMPUTER
Kameleon FireEx

案例 09: 模擬結束前火焰仍有足夠的空氣供燃燒



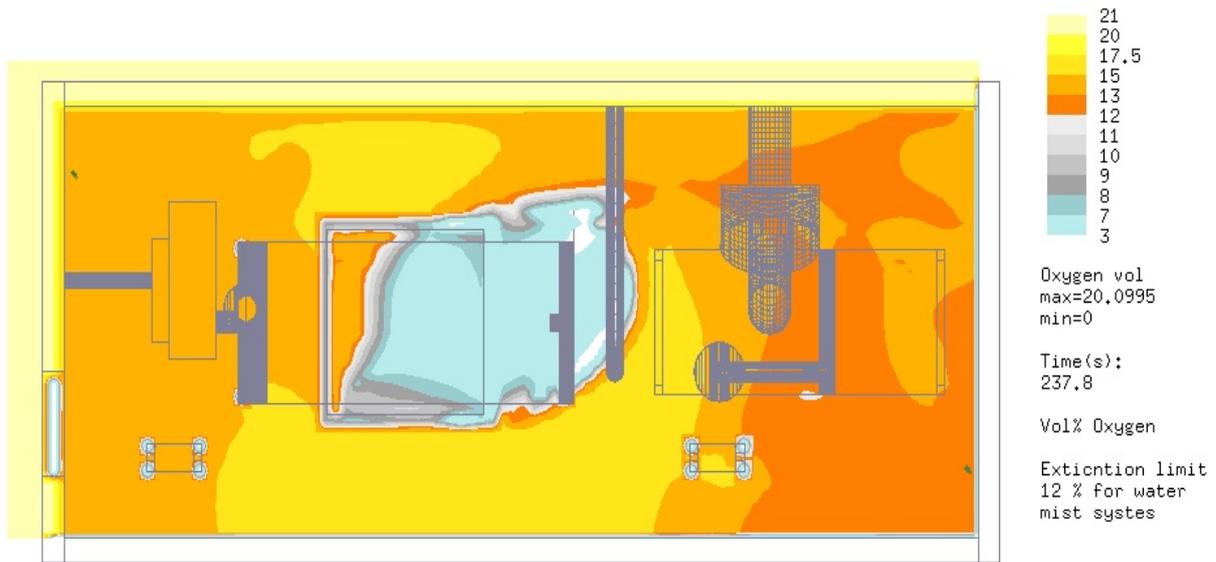
COMPUTE
 Kameleon FireEx

案例 12: 模擬結束前火焰仍有足夠的空氣供燃燒



COMPUTE
 Kameleon FireEx

案例 15: 模擬結束前火焰仍有足夠的空氣供燃燒



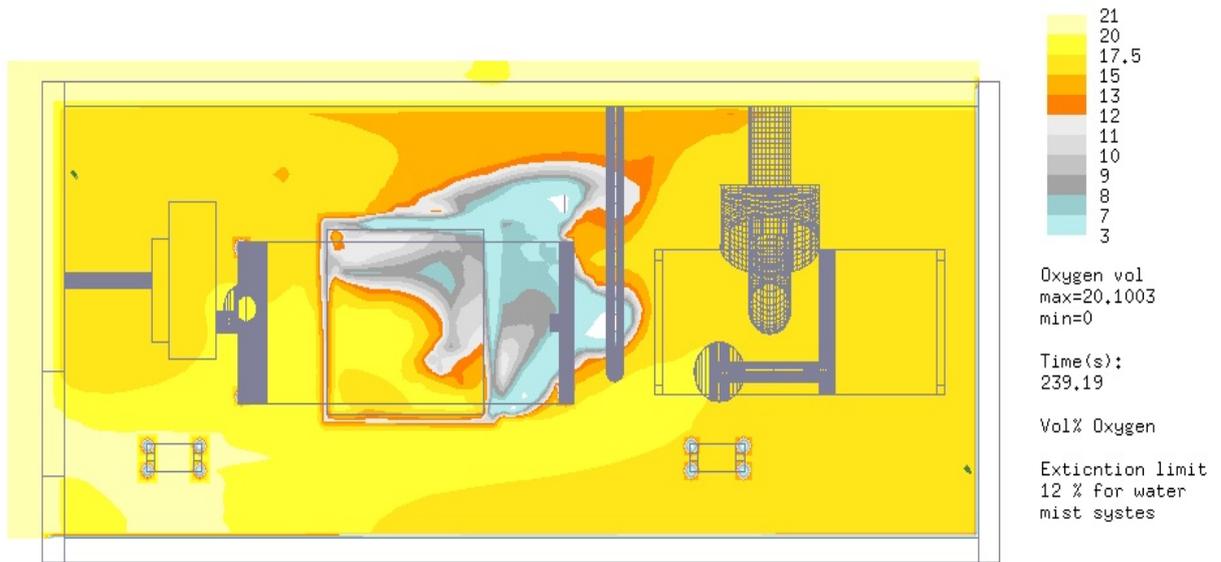
COMPUT
Kameleon FireEx

案例 18:模擬結束前火焰仍有足夠的空氣供燃燒



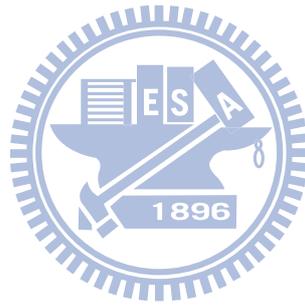
COMPUT
Kameleon FireEx

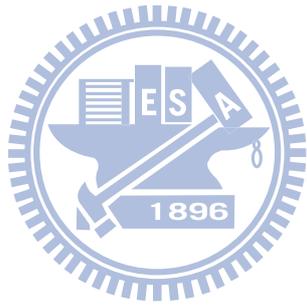
案例 21:模擬結束前火焰仍有足夠的空氣供燃燒



COMPUTER
Kameleon FireEx

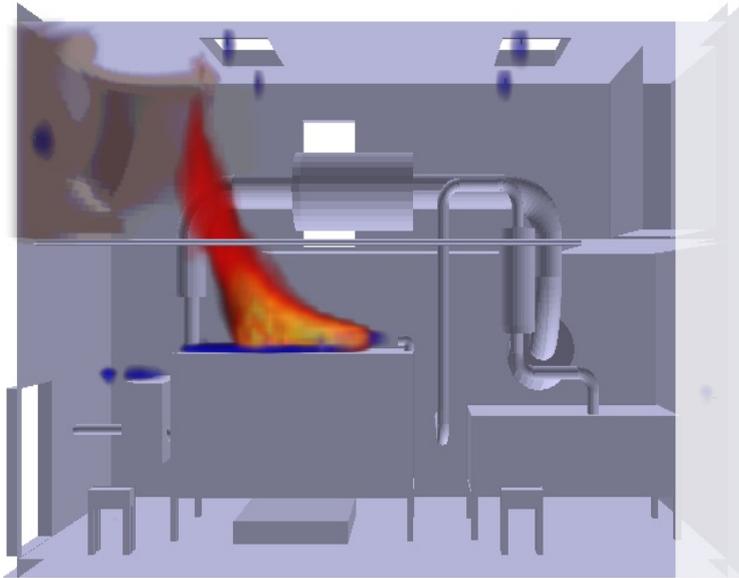
案例 24: 模擬結束前火焰仍有足夠的空氣供燃燒





Appendix C 電腦模擬火災的影像

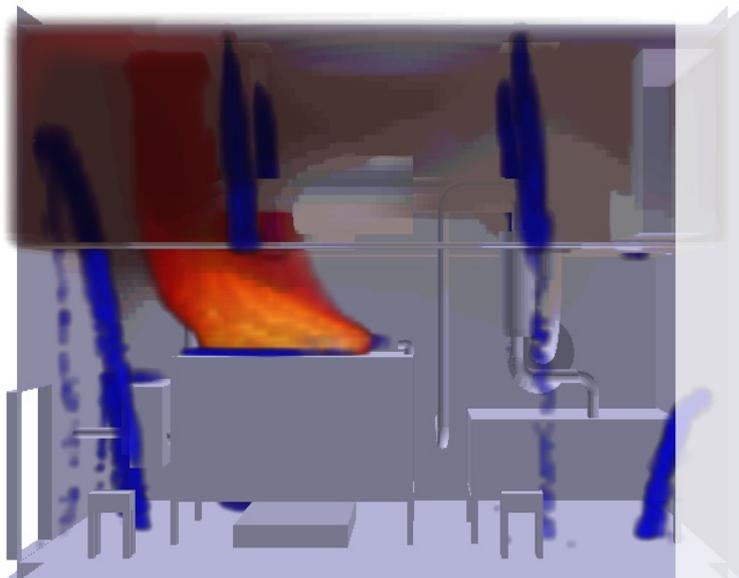
Time(s):
15.016



COMPUTER
Kameleon FireEx

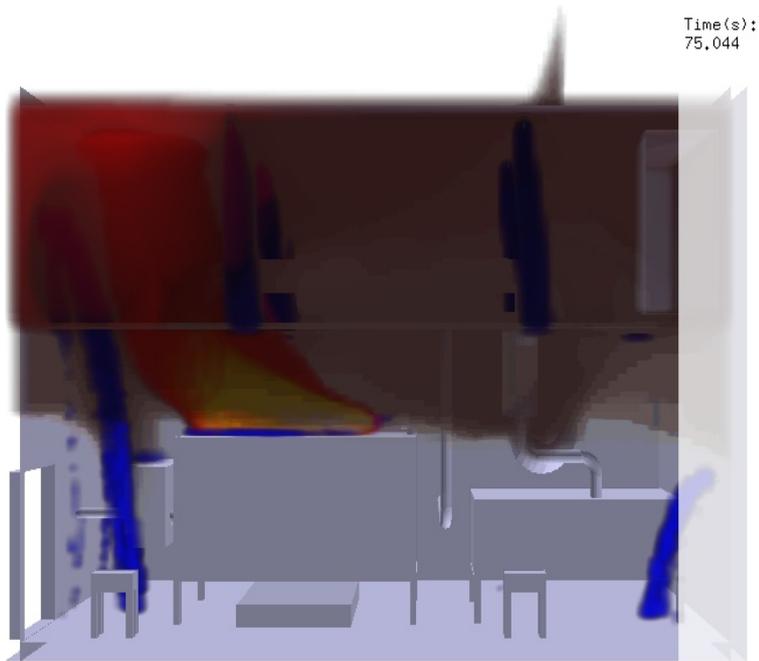
案例 01: 當細水霧啟動後, 藍色顯示為汽化柴油或水滴

Time(s):
45.031



COMPUTER
Kameleon FireEx

案例 01: 30 秒後細水霧抑制火災, 一些水滴抵達樓板而沒蒸發(藍色)



Time(s):
75.044

COMPUTER
Kameleon FireEx

案例 01:1 分鐘細水霧抑制火災情形

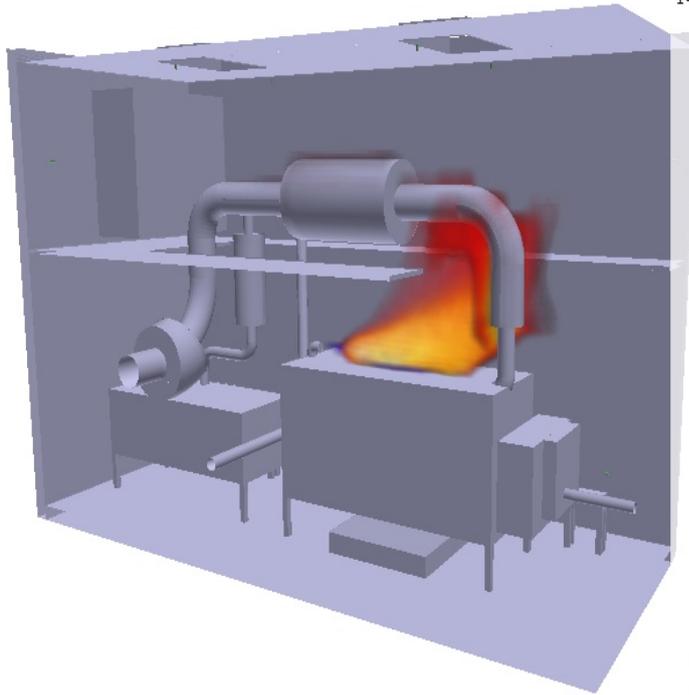


Time(s):
135.04

COMPUTER
Kameleon FireEx

案例 01:2 分鐘細水霧抑制火災情形, 艙內能見度大多趨近於零

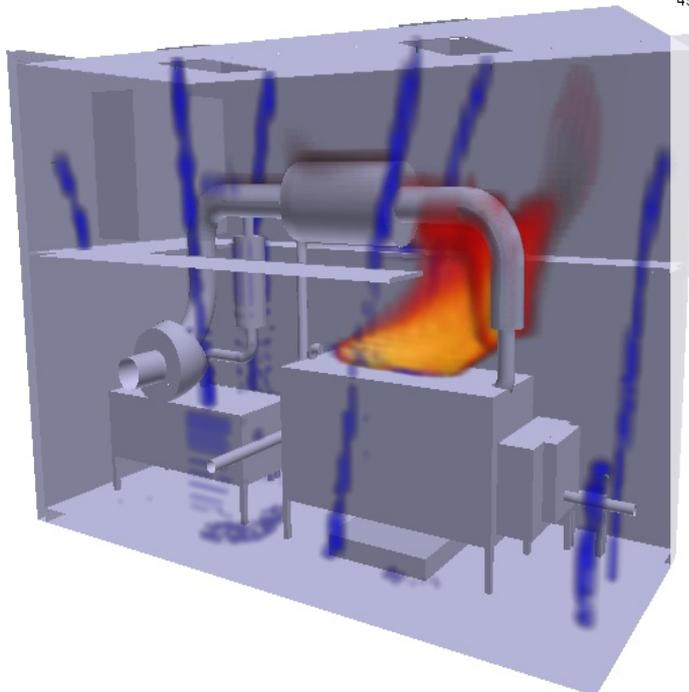
Time(s):
14,9041



COMPUTER
Kameleon FireEx

案例 15: 尚未啟動細水霧之燃燒情形

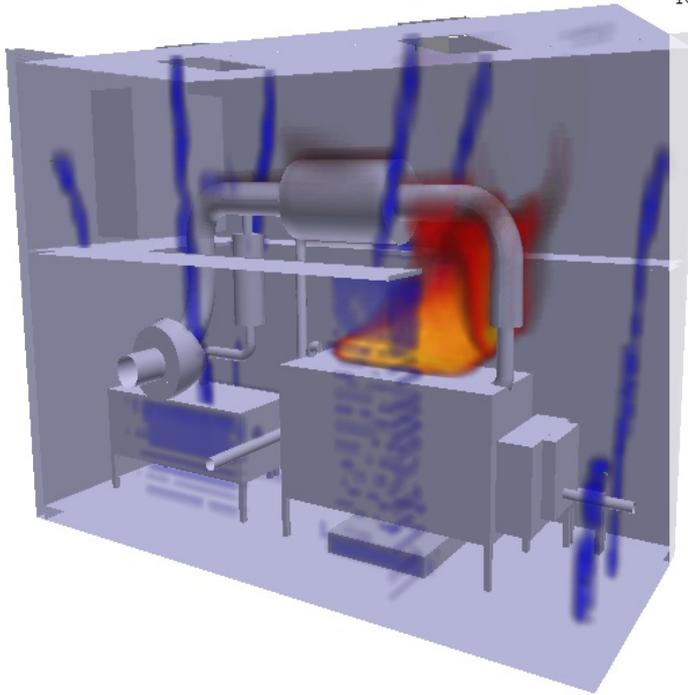
Time(s):
45,0177



COMPUTER
Kameleon FireEx

案例 15: 30 秒細水霧抑制火災情形

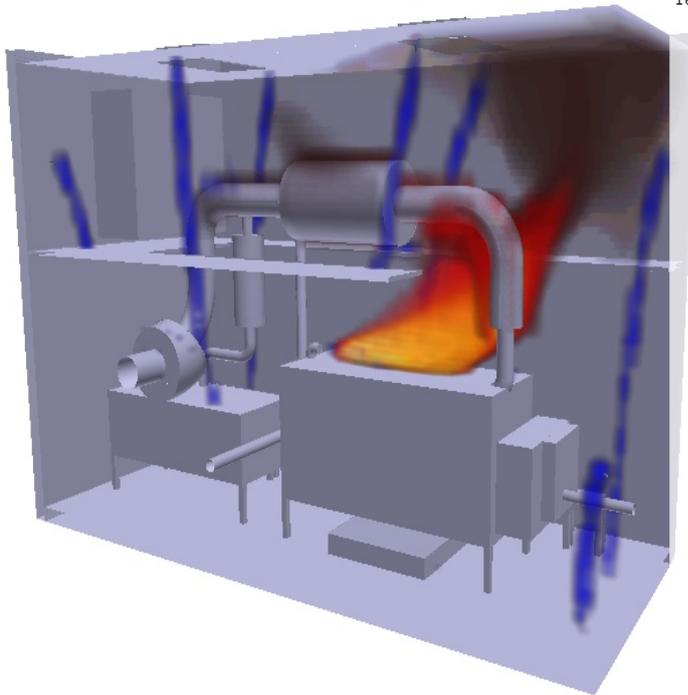
Time(s):
105.013



COMPUTER
Kameleon FireEx

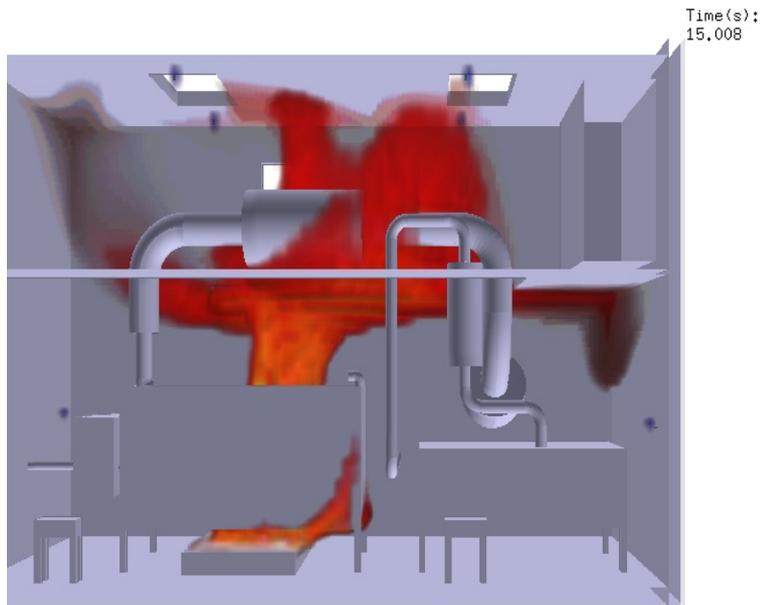
案例 15:90 秒細水霧抑制火災情形

Time(s):
165.015



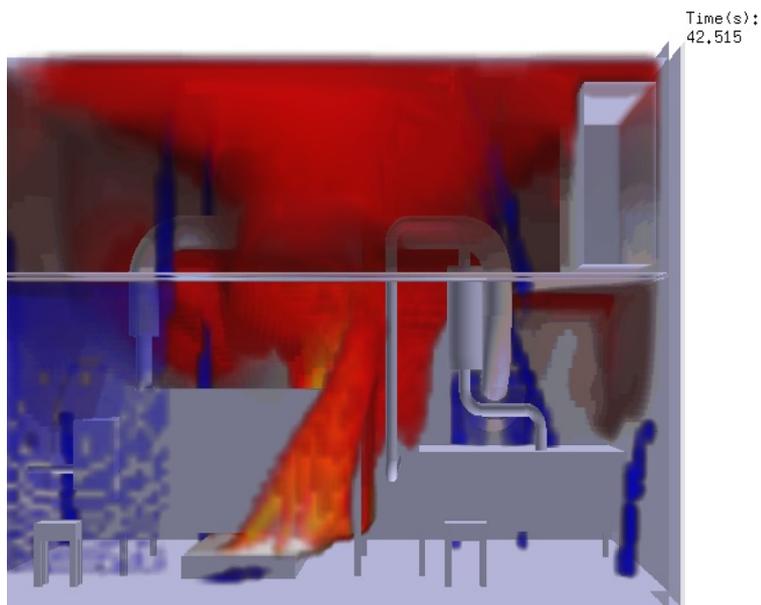
COMPUTER
Kameleon FireEx

案例 15:150 秒細水霧抑制火災情形



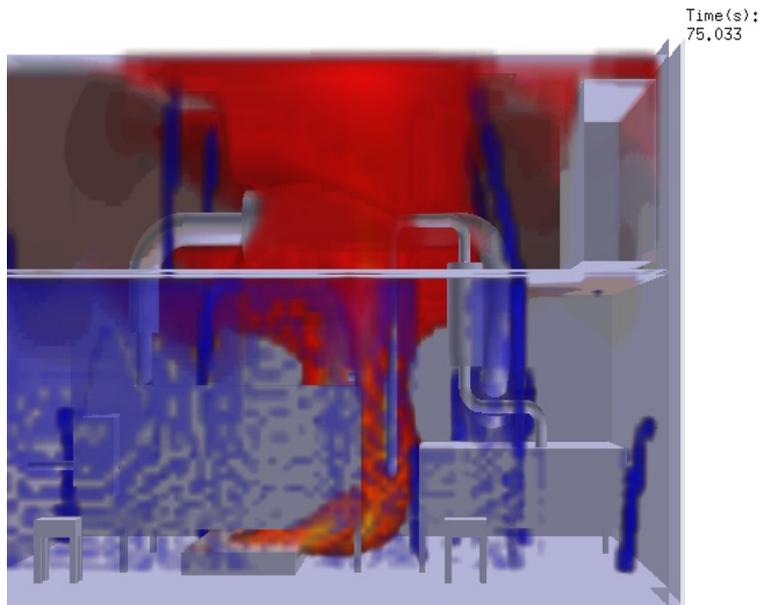
COMPUTER
Kameleon FireEx

案例 18:油池火災於細水霧尚未啟動之燃燒情形



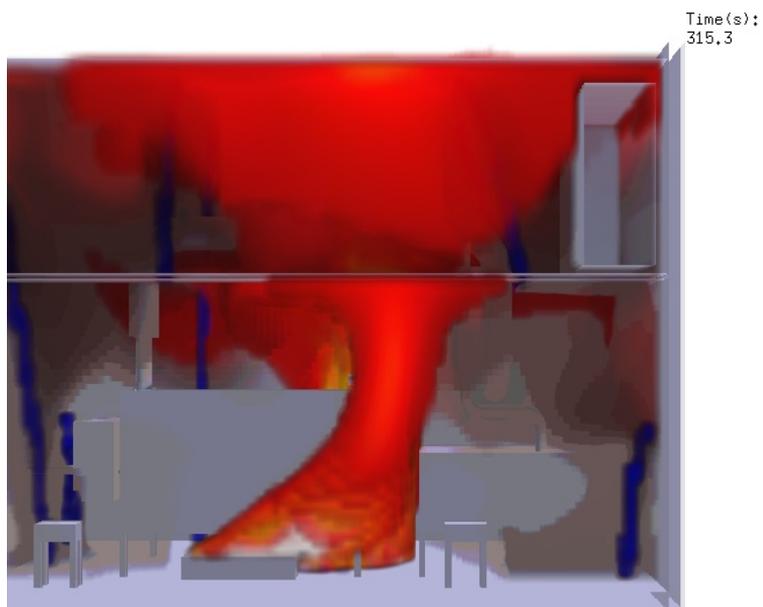
COMPUTER
Kameleon FireEx

案例 18:27.5 秒細水霧抑制火災情形,請注意:噴到甲板上的水經收集後變成水池並沿著甲板邊緣溢出,導致製造出如同水幕之效果



COMPUTER
Kameleon FireEx

案例 18:1 分鐘細水霧抑制火災情形

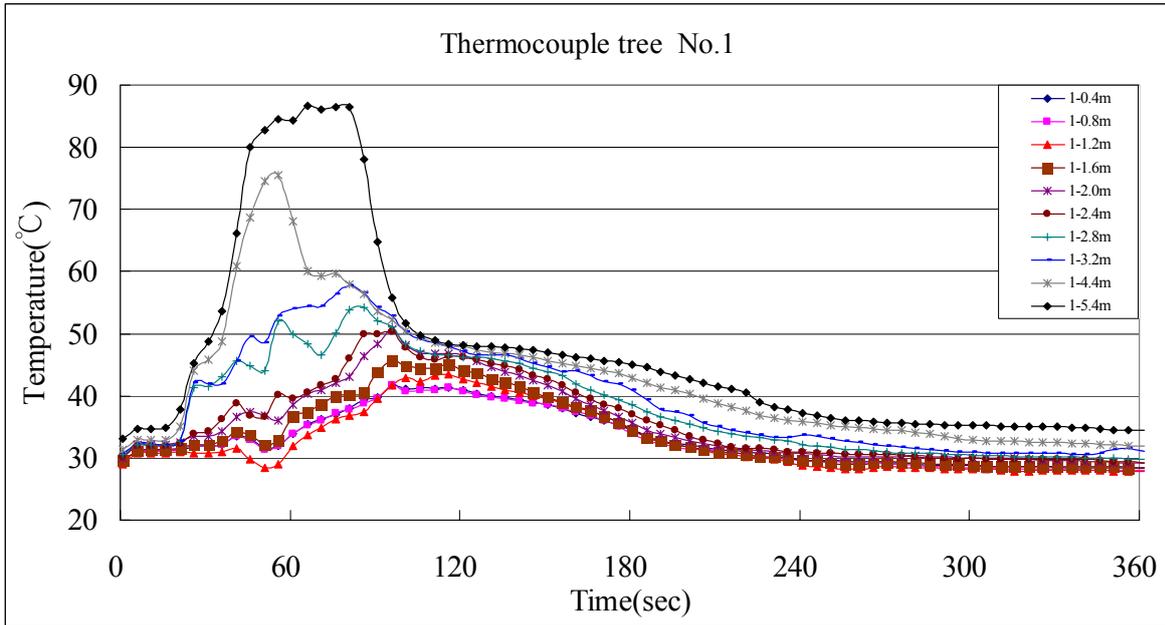


COMPUTER
Kameleon FireEx

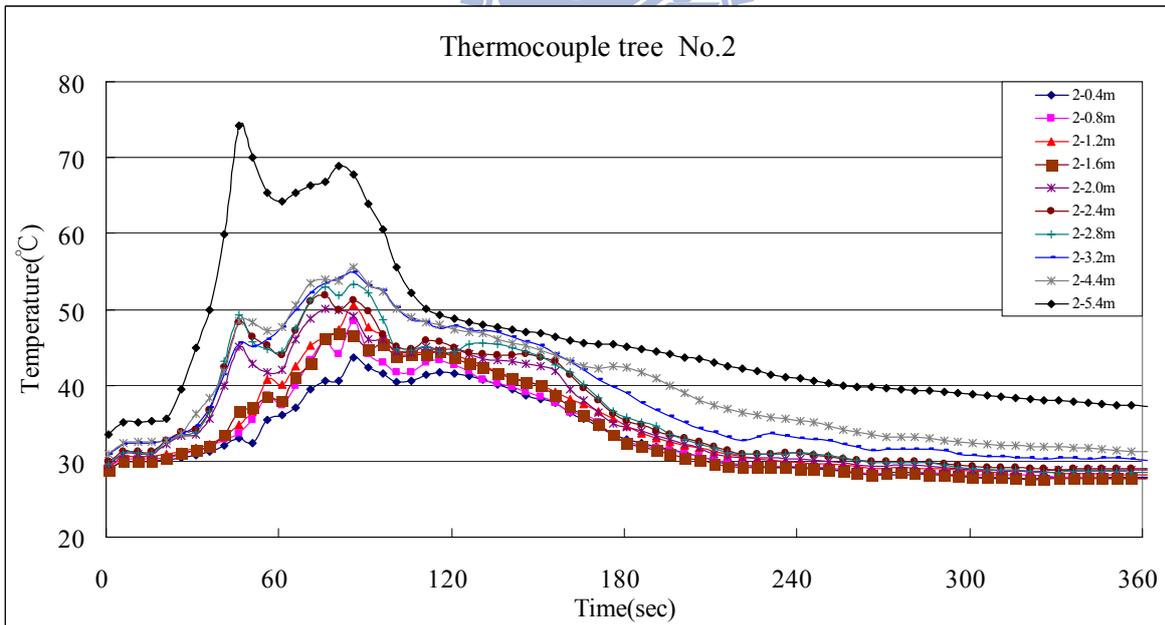
案例 18: 5 分鐘細水霧抑制火災情形

Appendix D 實際驗證實驗溫度

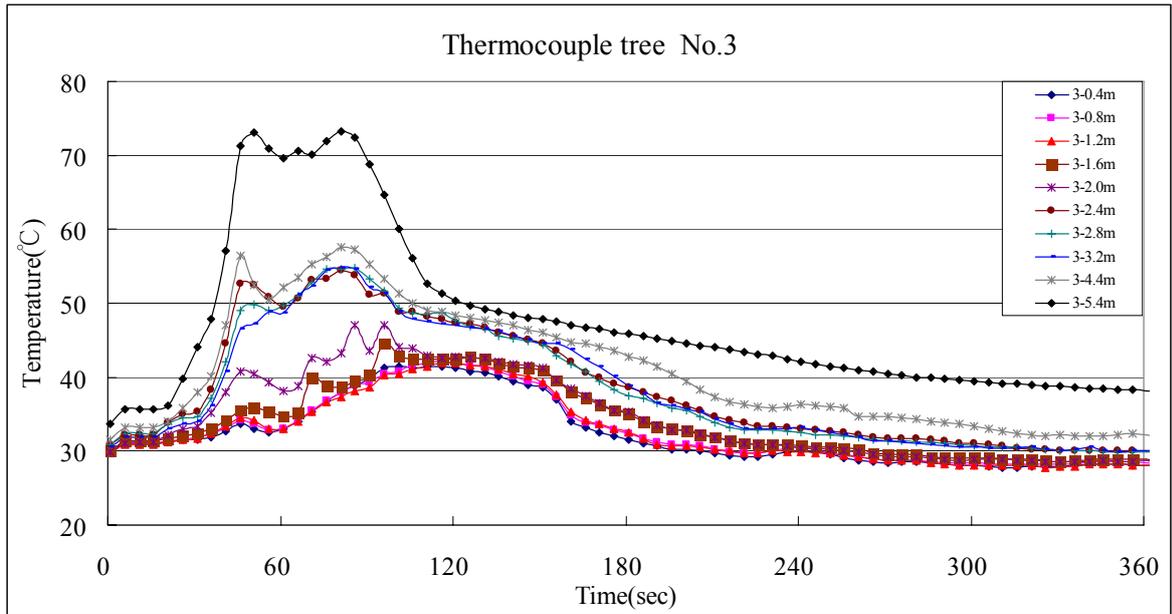
實驗一：CASE2 熱電偶溫度



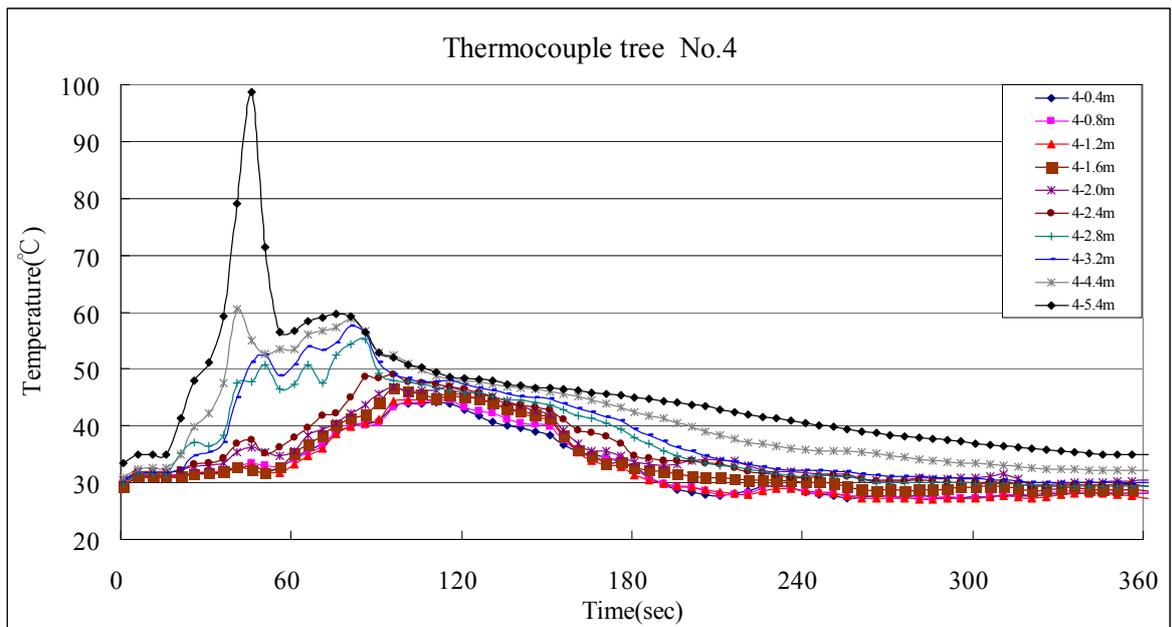
案例 2：1 號熱電偶樹



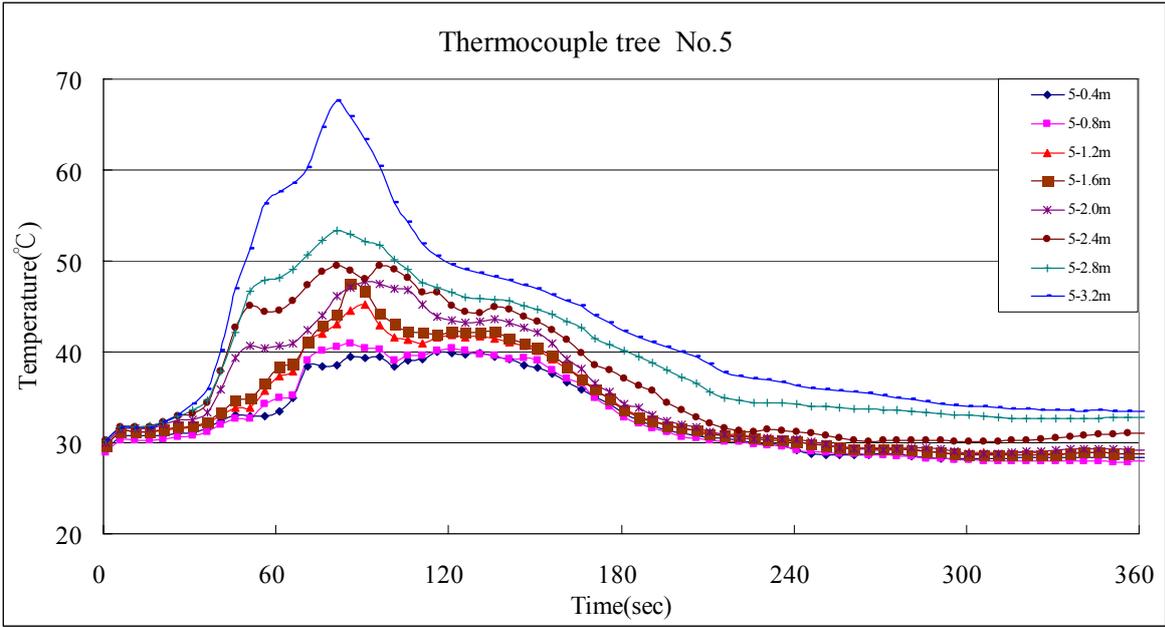
案例 2：2 號熱電偶樹



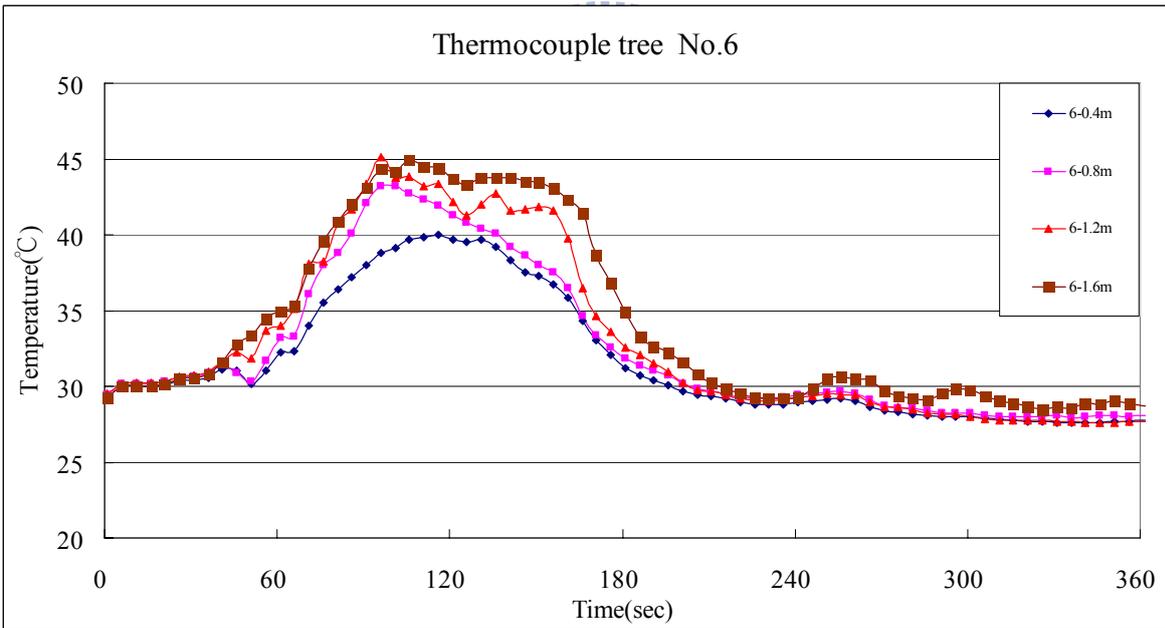
案例 2：3 號熱電偶樹



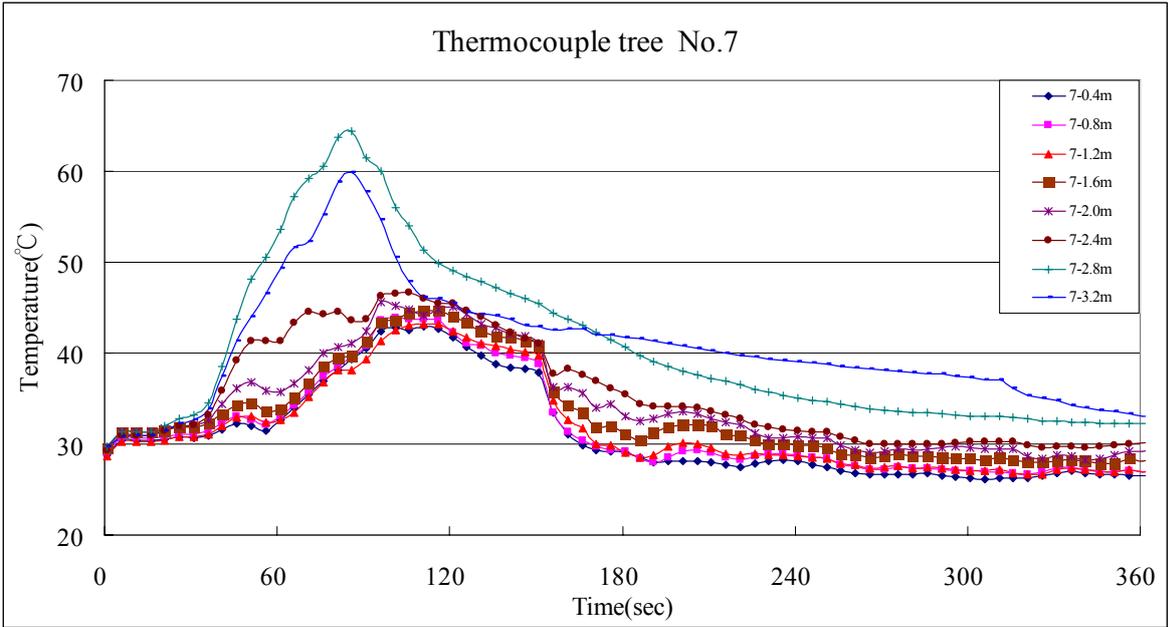
案例 2：4 號熱電偶樹



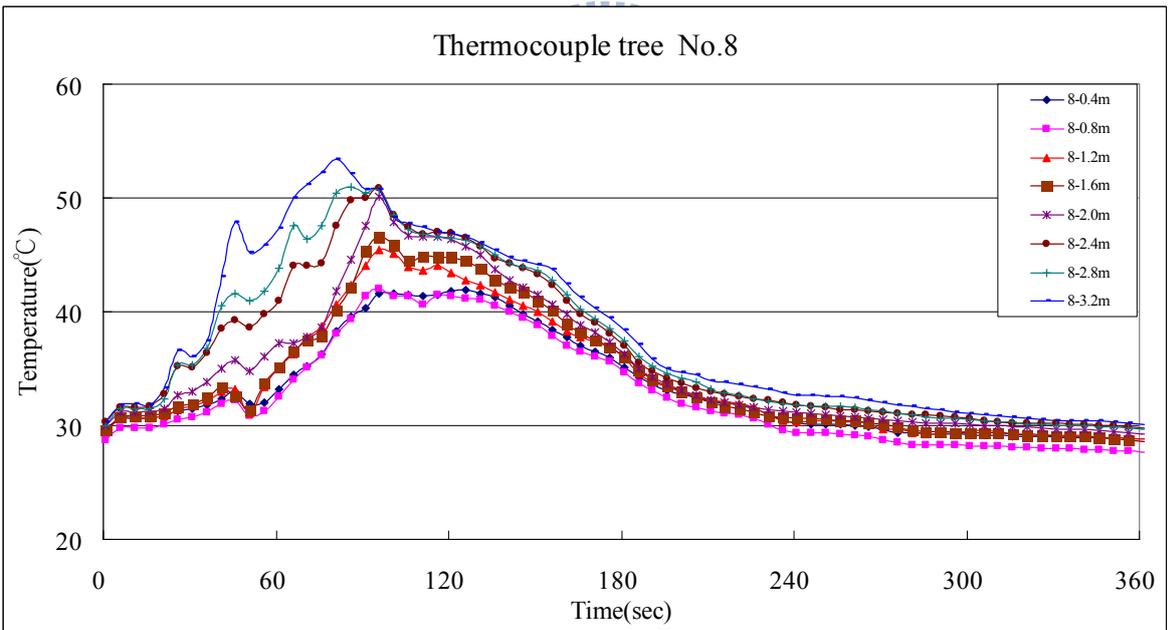
案例 2：5 號熱電偶樹



案例 2：6 號熱電偶樹

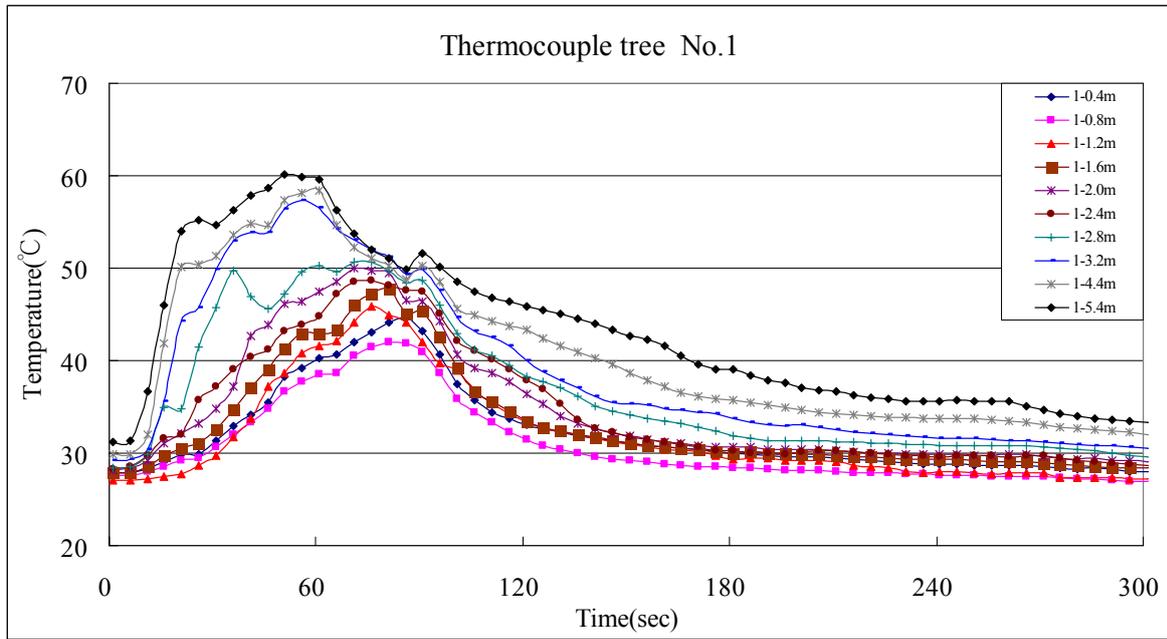


案例 2：7 號熱電偶樹

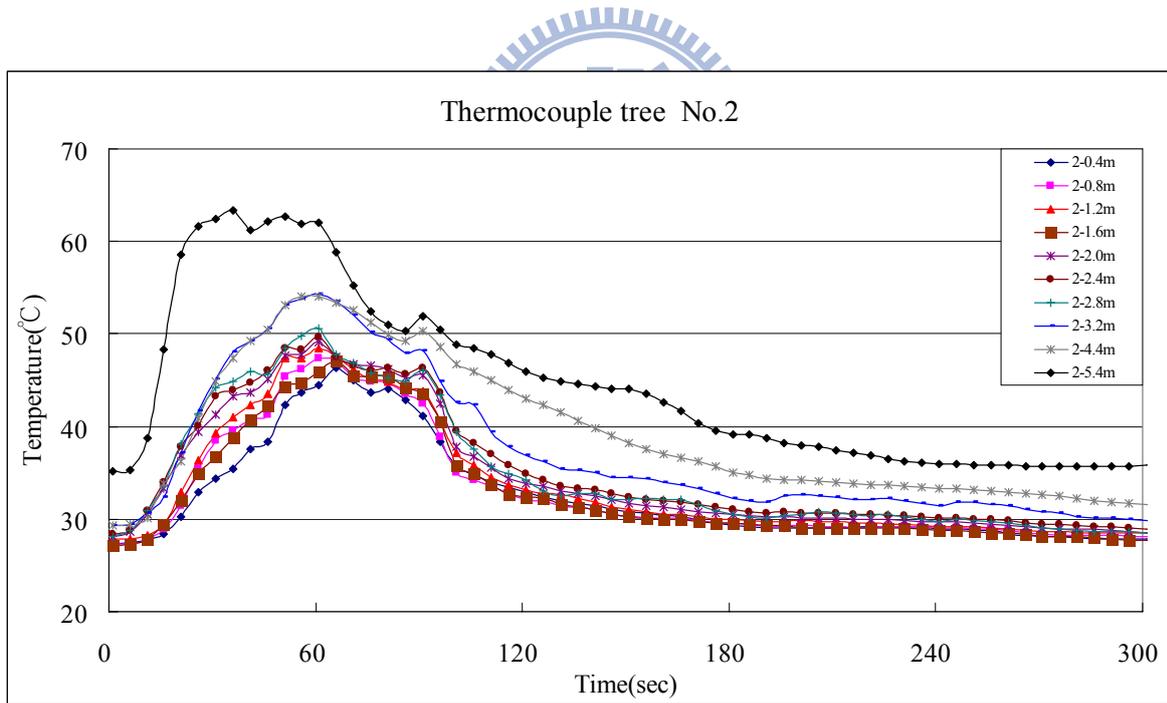


案例 2：8 號熱電偶樹

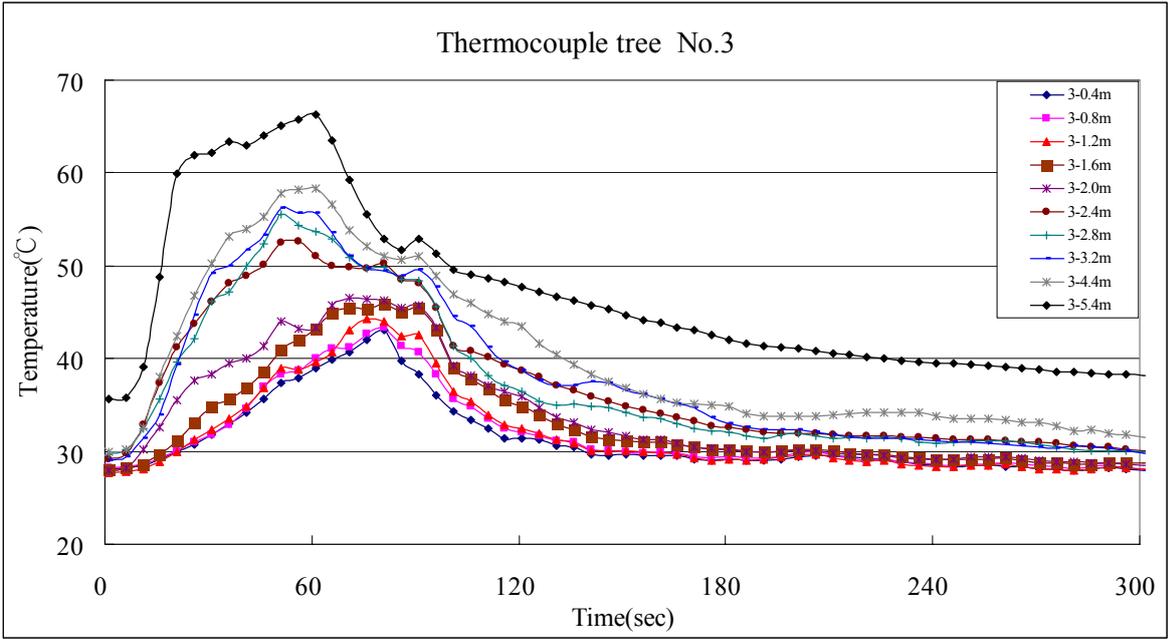
實驗二：CASE3 熱電偶溫度



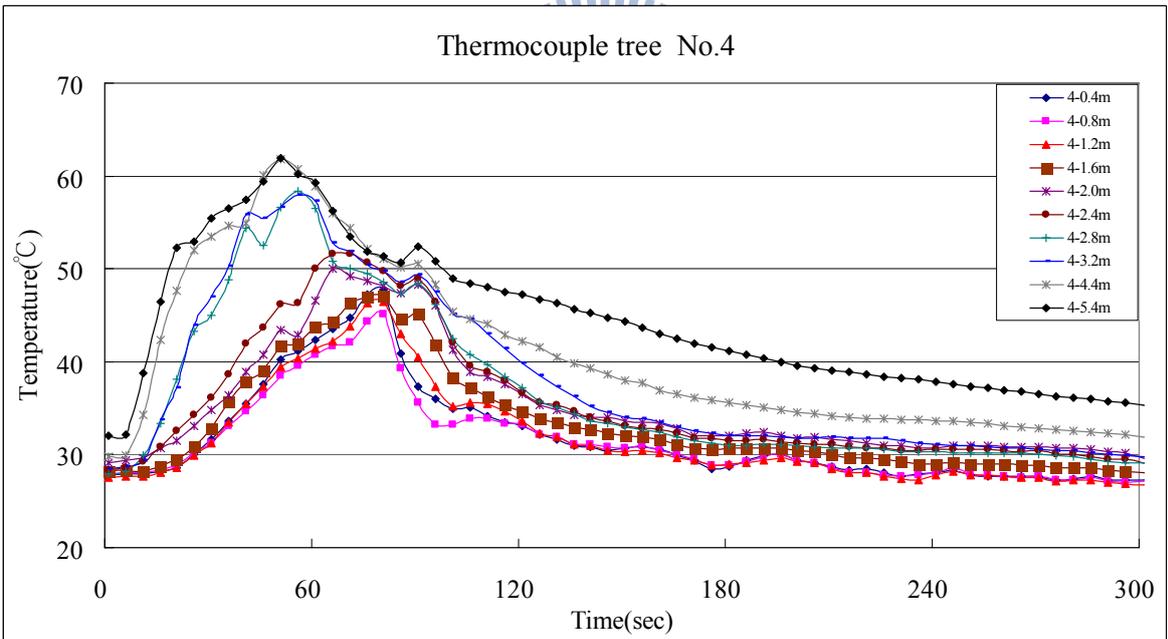
案例 3：1 號熱電偶樹



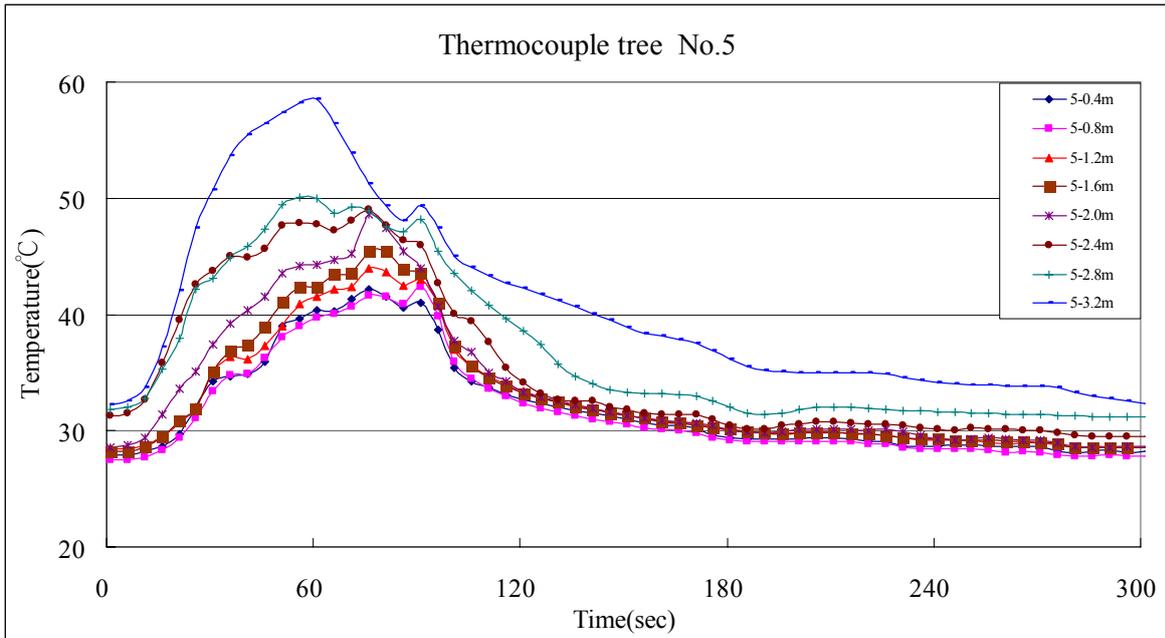
案例 3：2 號熱電偶樹



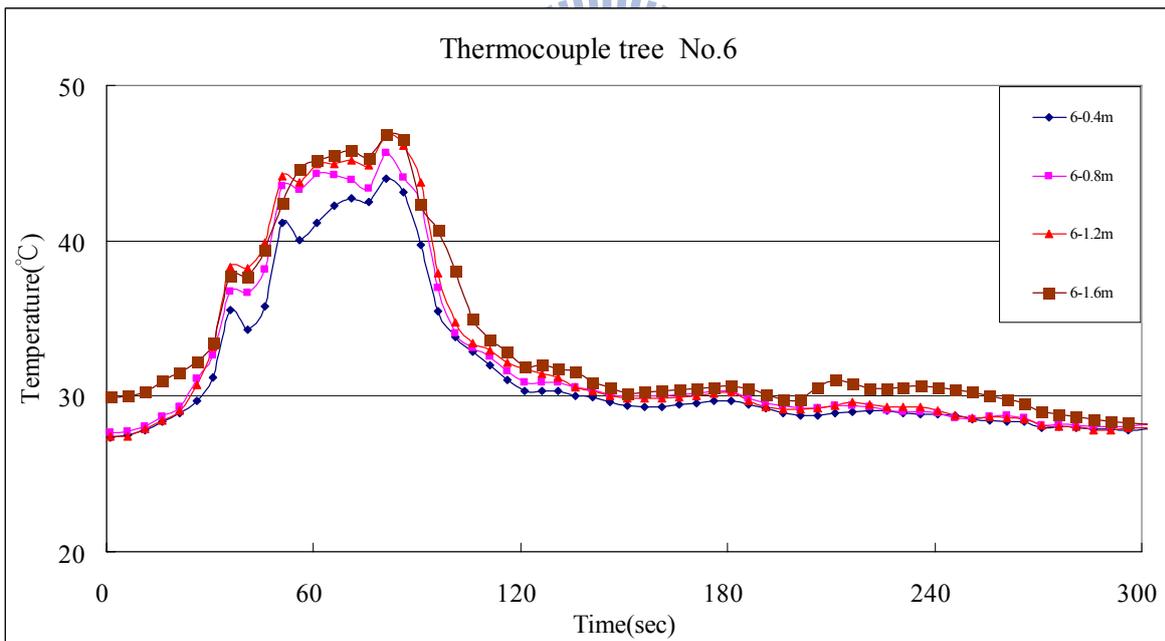
案例 3 : 3 號熱電偶樹



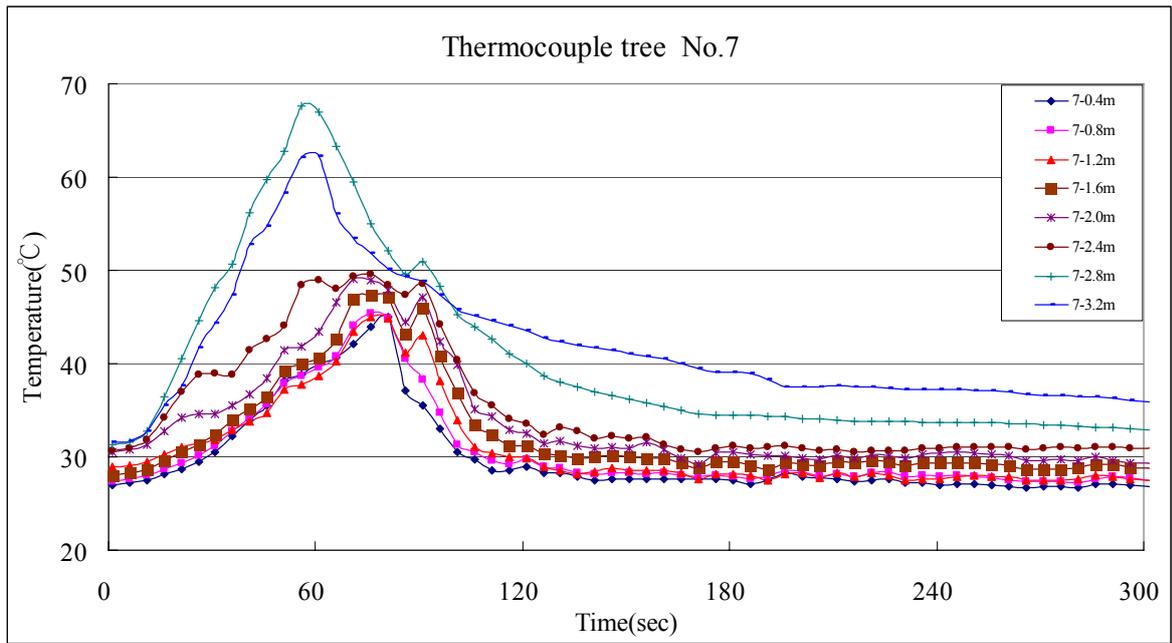
案例 3 : 4 號熱電偶樹



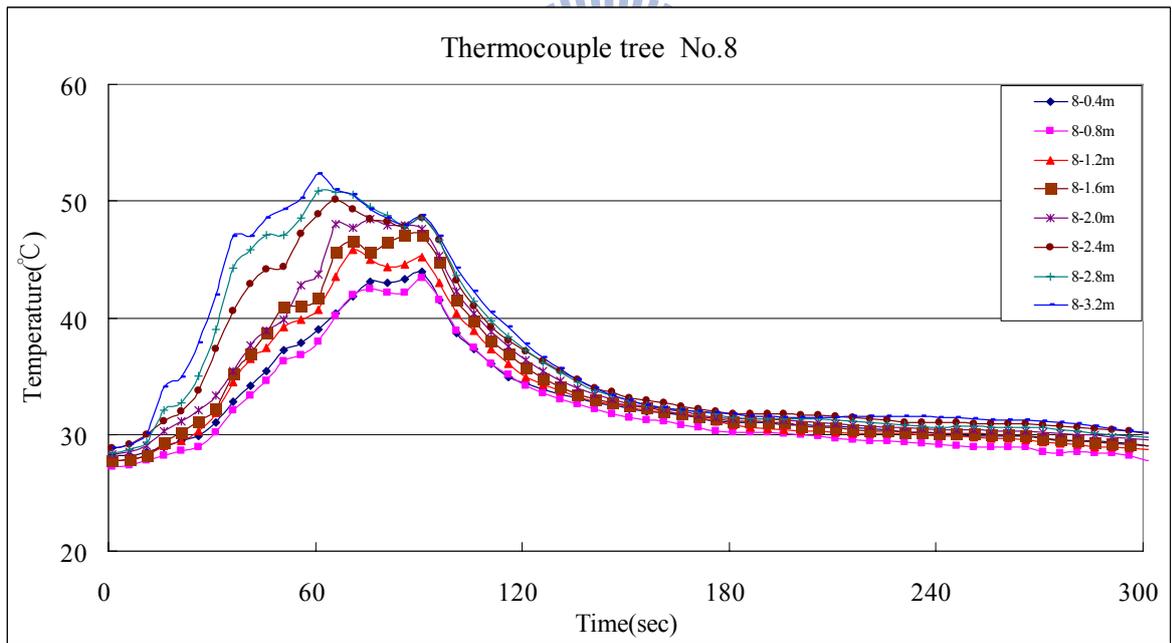
案例 3 : 5 號熱電偶樹



案例 3 : 6 號熱電偶樹

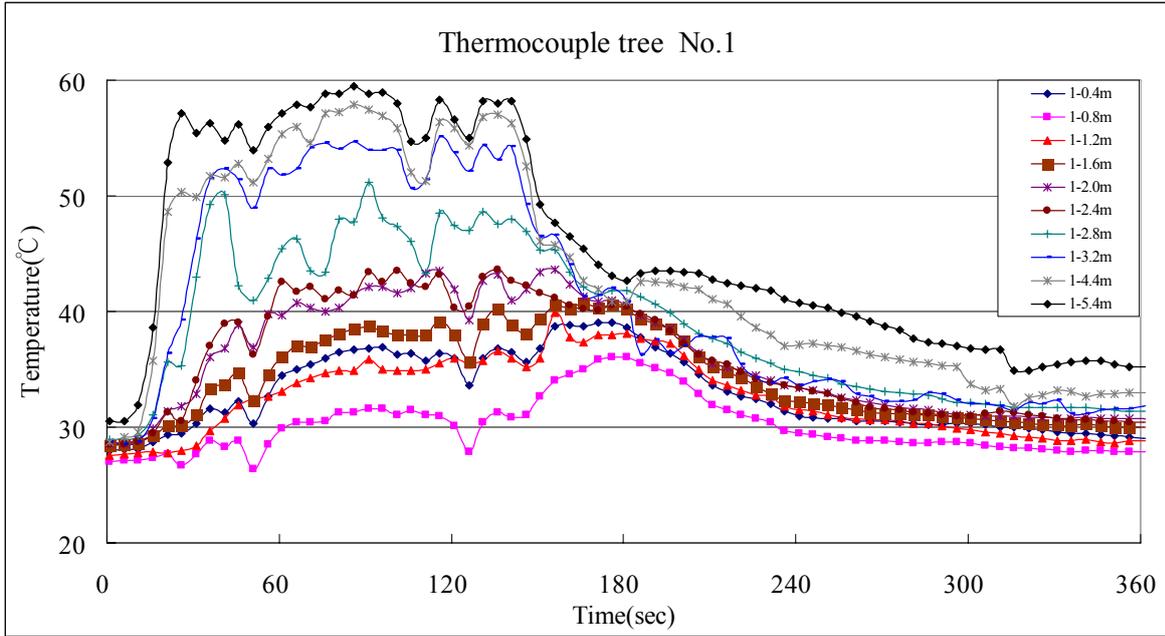


案例 3 : 7 號熱電偶樹

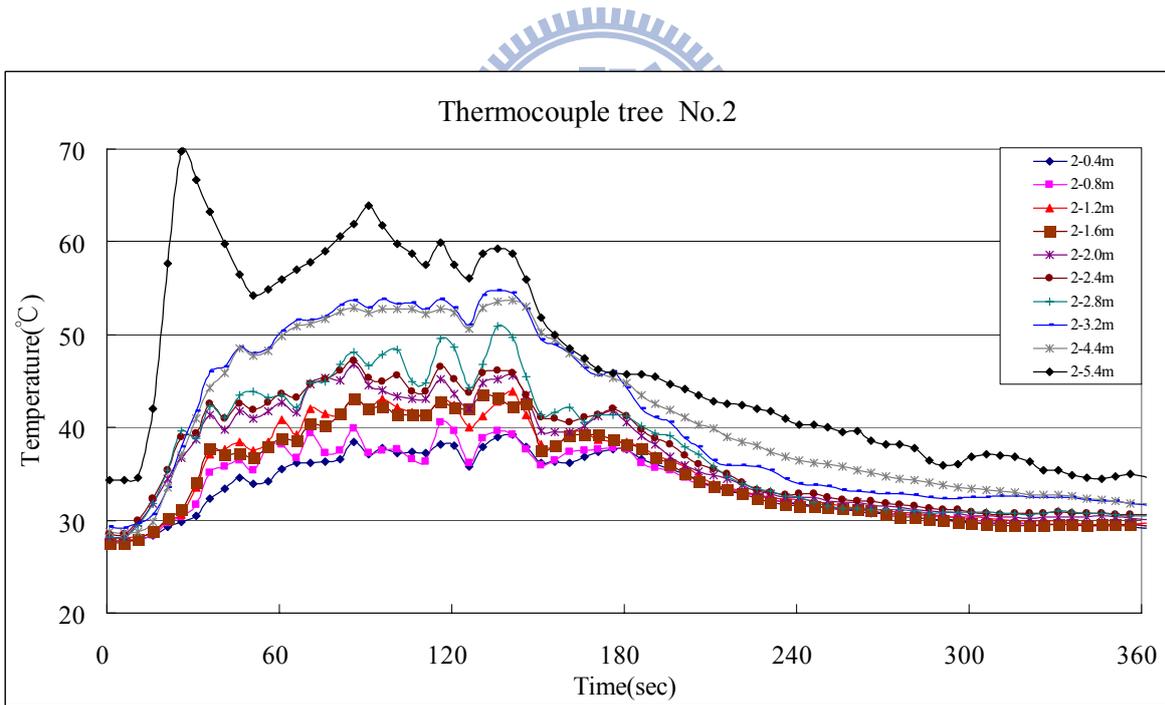


案例 3 : 8 號熱電偶樹

實驗三：CASE9 熱電偶溫度

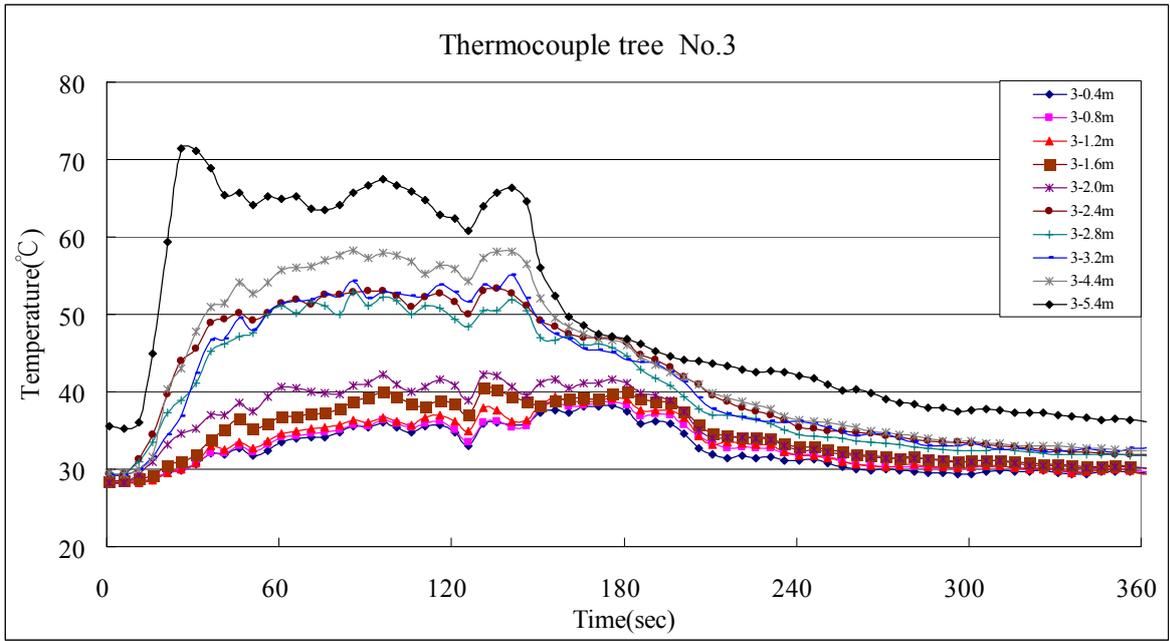


案例 9：1 號熱電偶樹

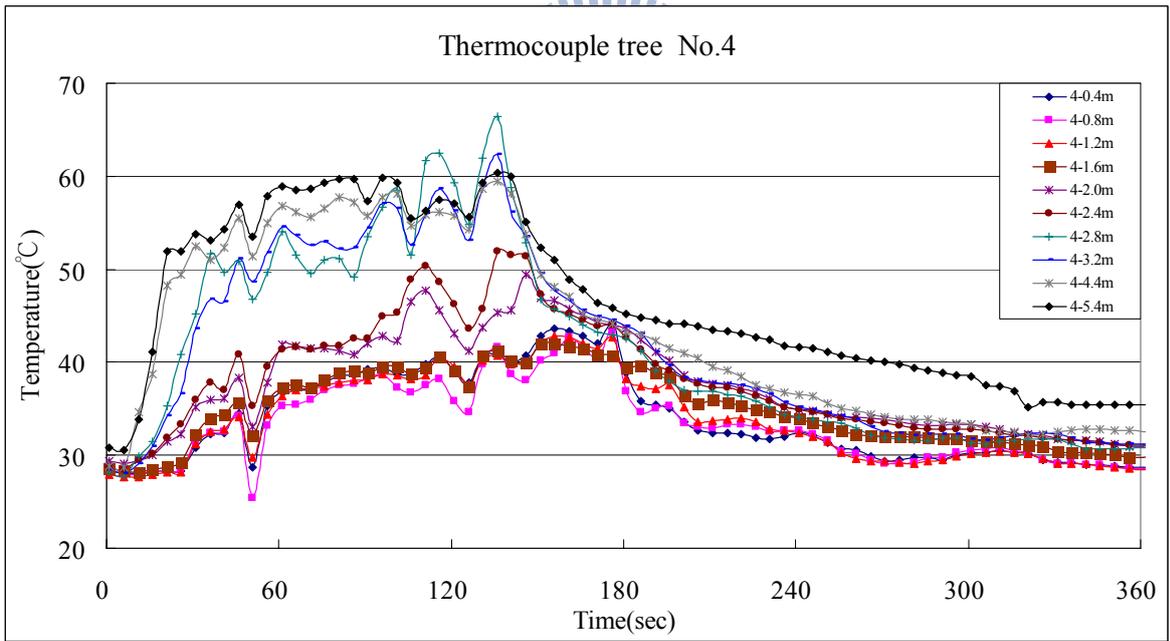


例 9：2 號熱電偶樹

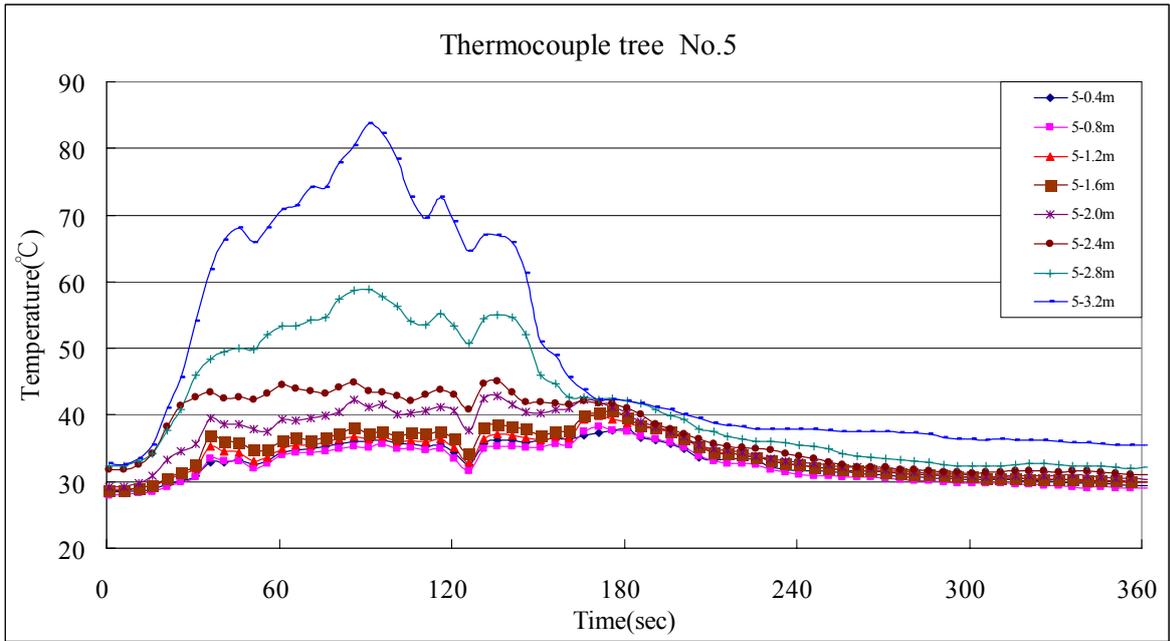
案



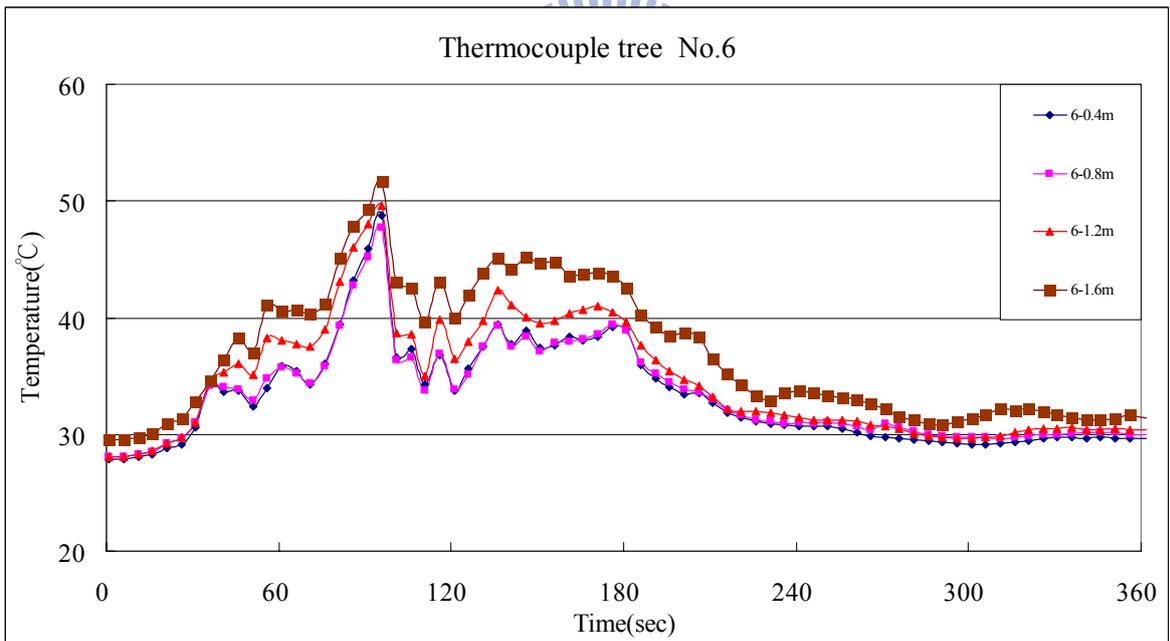
案例 9：3 號熱電偶樹



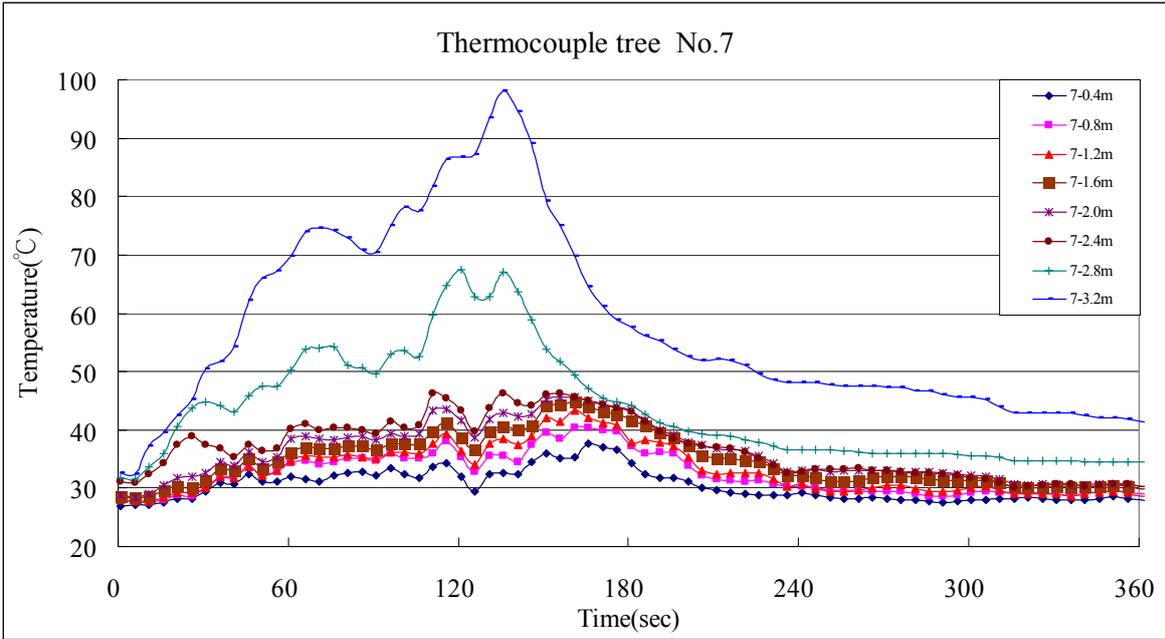
案例 9：4 號熱電偶樹



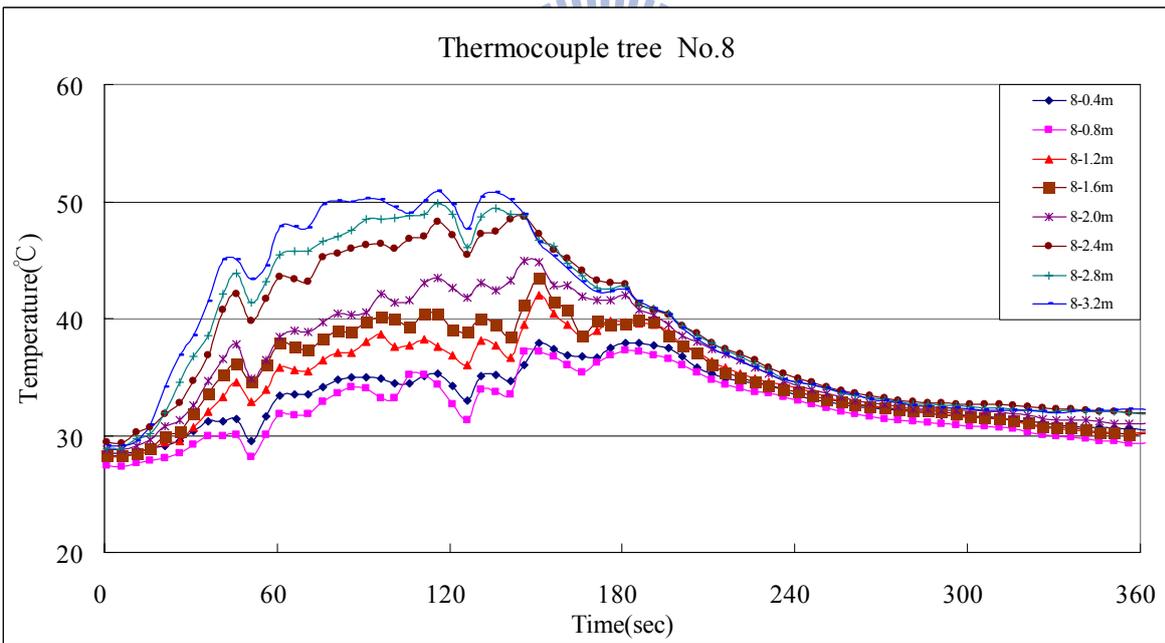
案例 9：5 號熱電偶樹



案例 9：6 號熱電偶樹

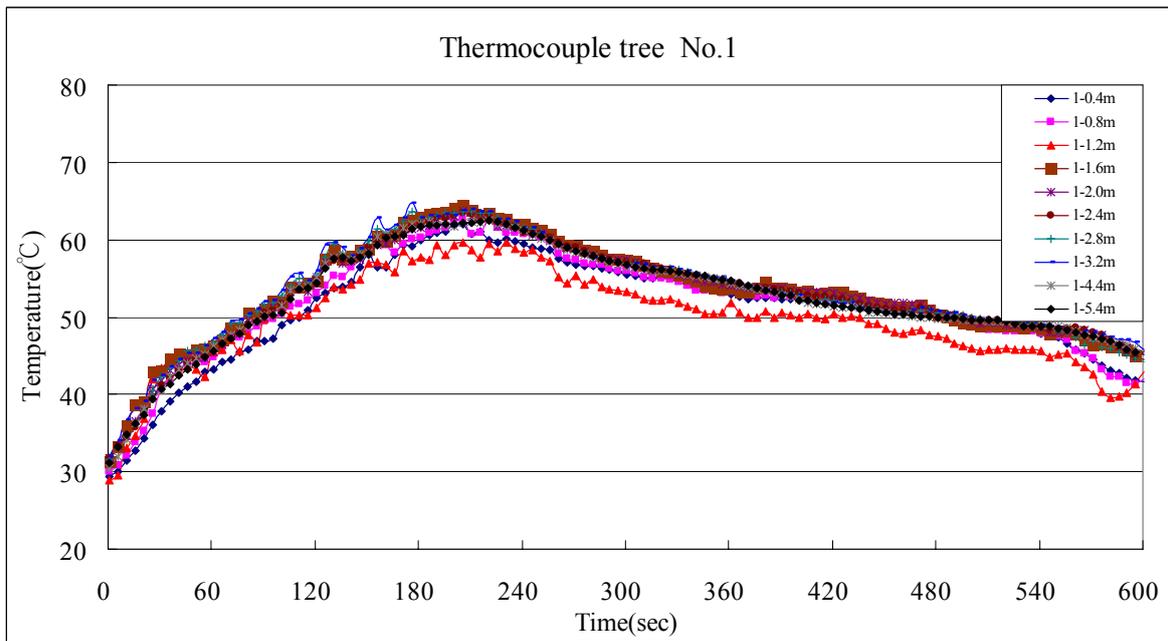


案例 9：7 號熱電偶樹

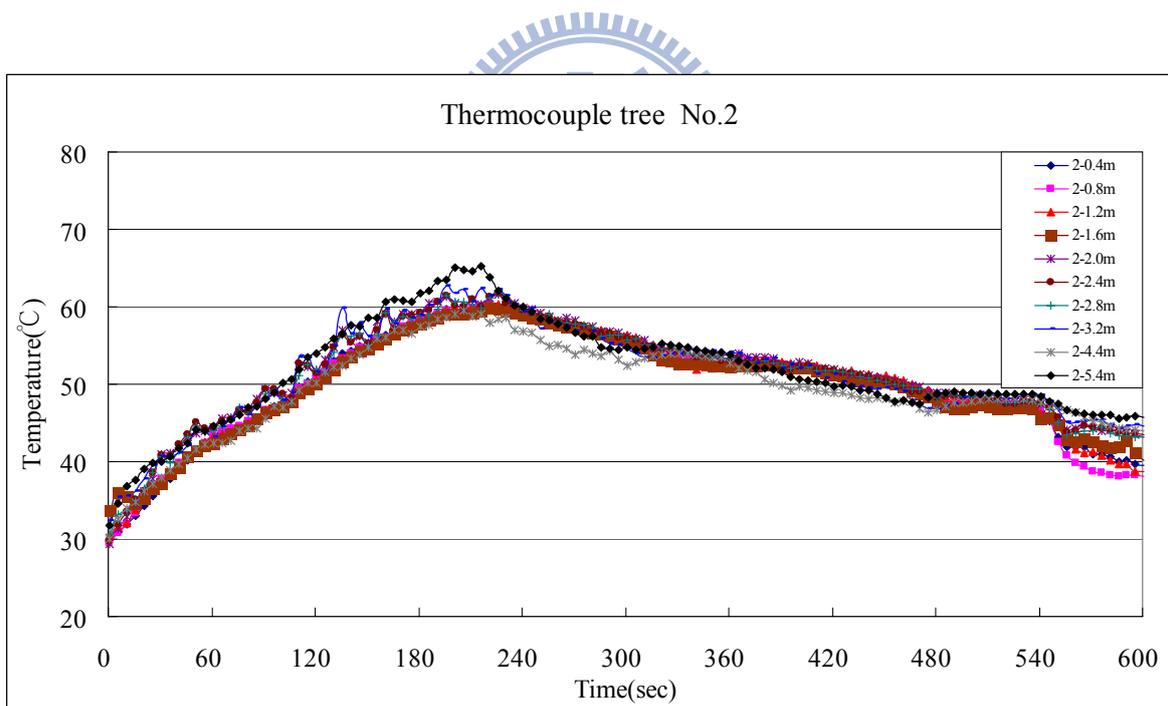


案例 9：8 號熱電偶樹

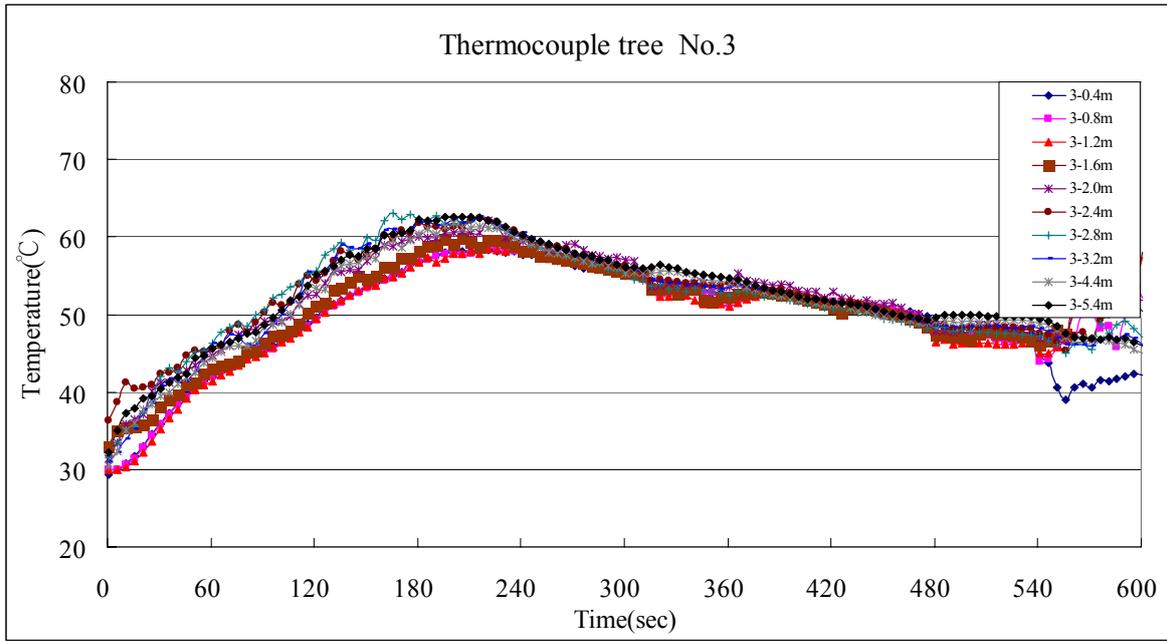
實驗四：CASE5 熱電偶溫度



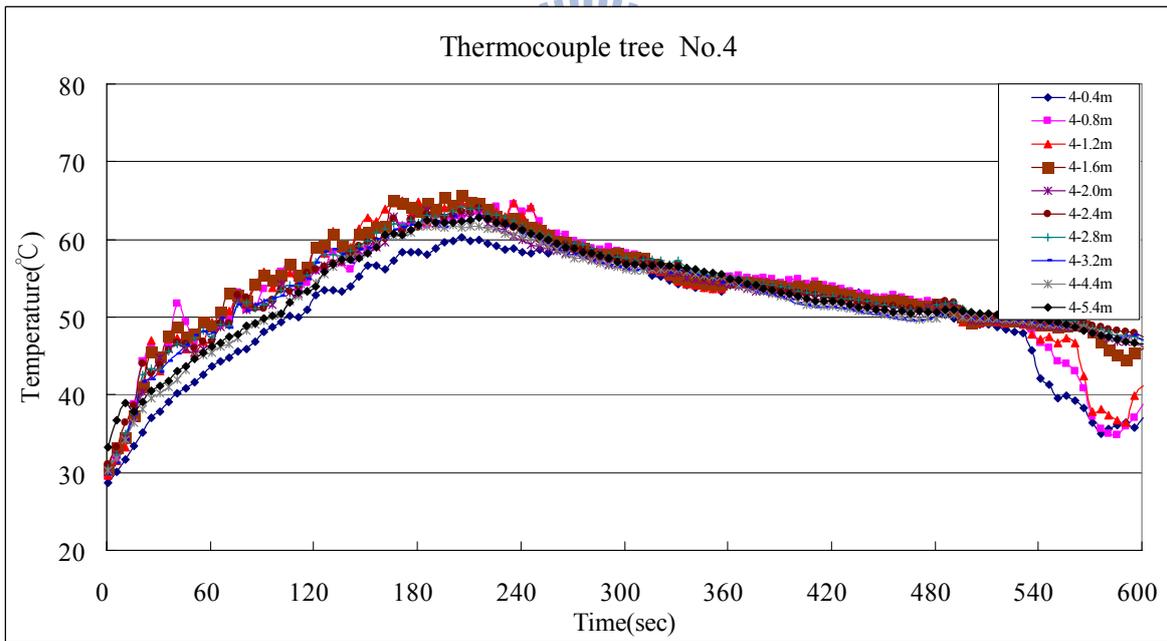
案例 5：1 號熱電偶樹



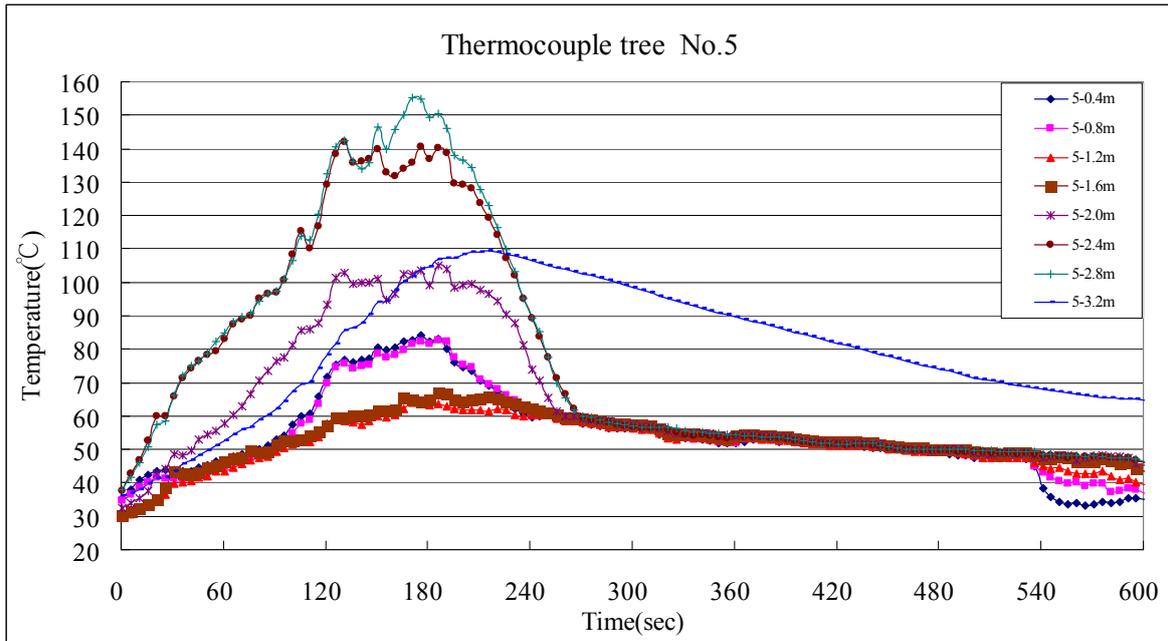
案例 5：2 號熱電偶樹



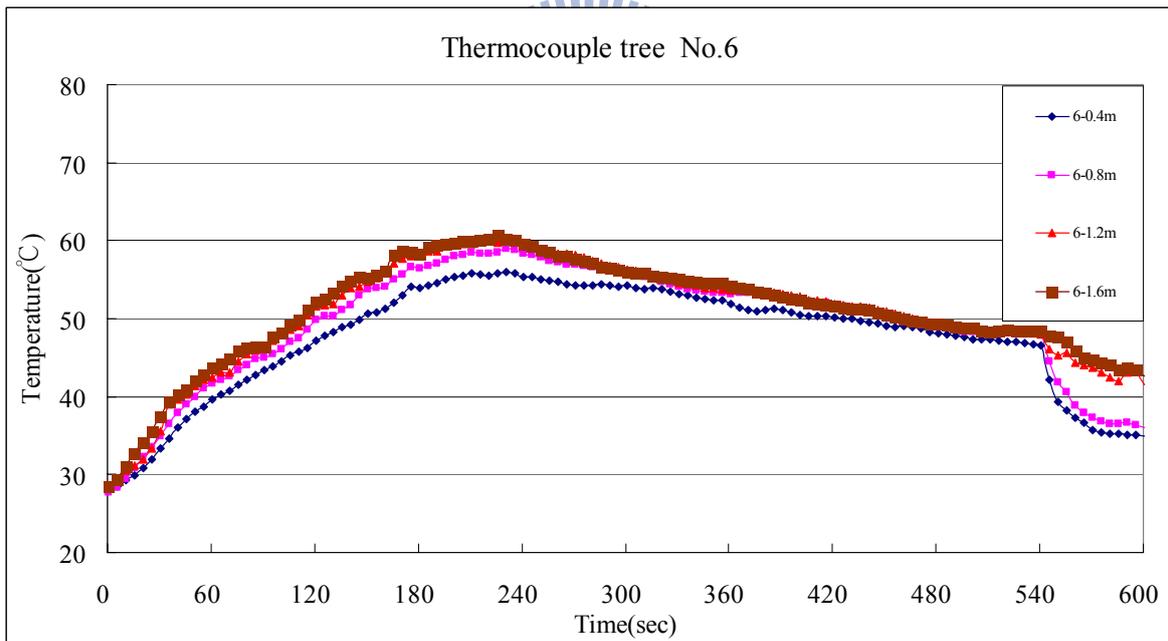
案例 5 : 3 號熱電偶樹



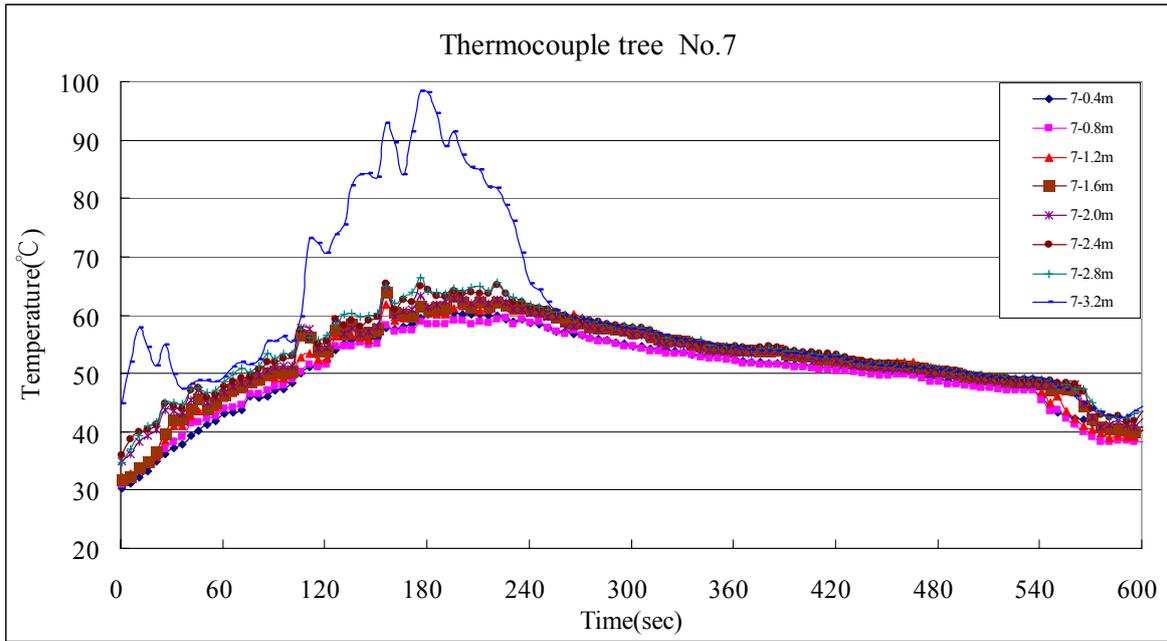
案例 5 : 4 號熱電偶樹.



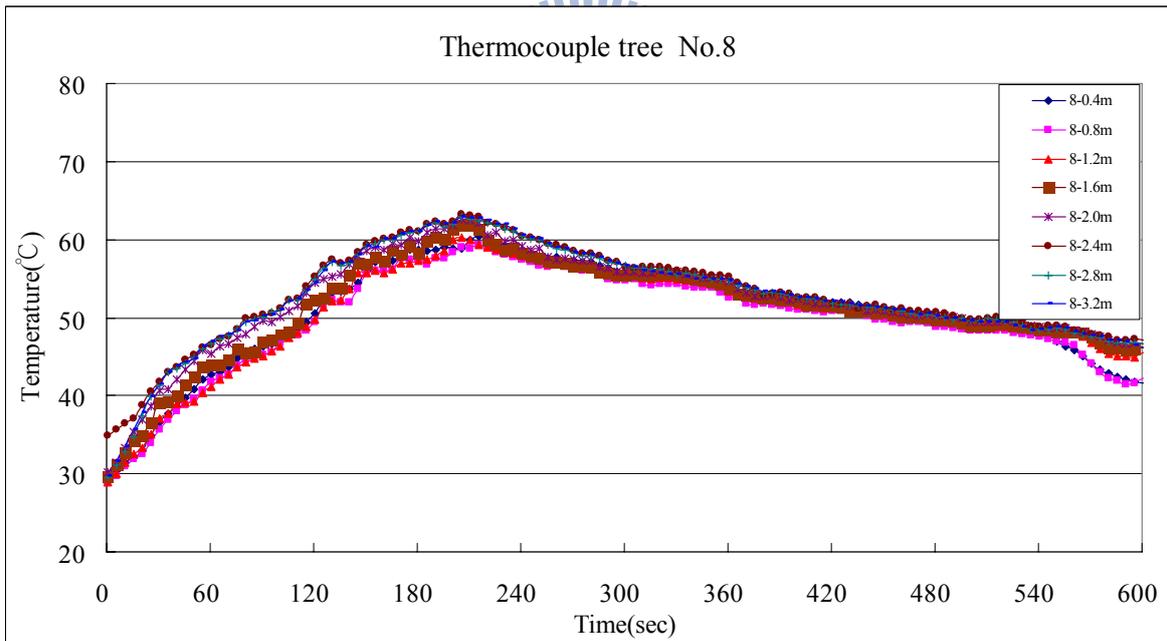
案例 5 : 5 號熱電偶樹



案例 5 : 6 號熱電偶樹

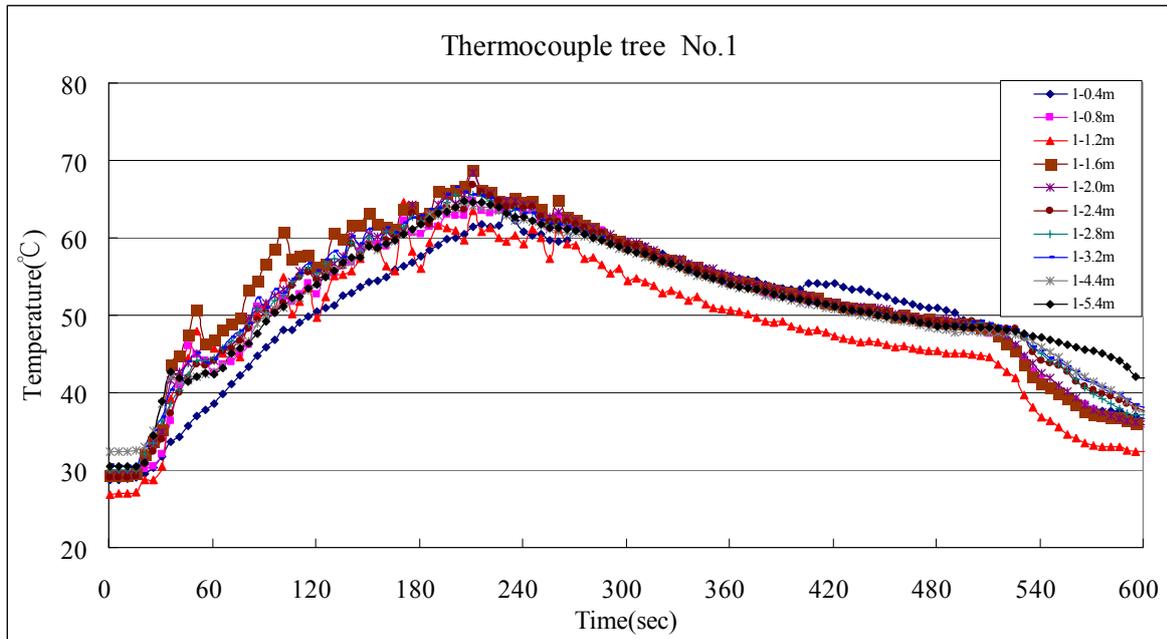


案例 5 : 7 號熱電偶樹

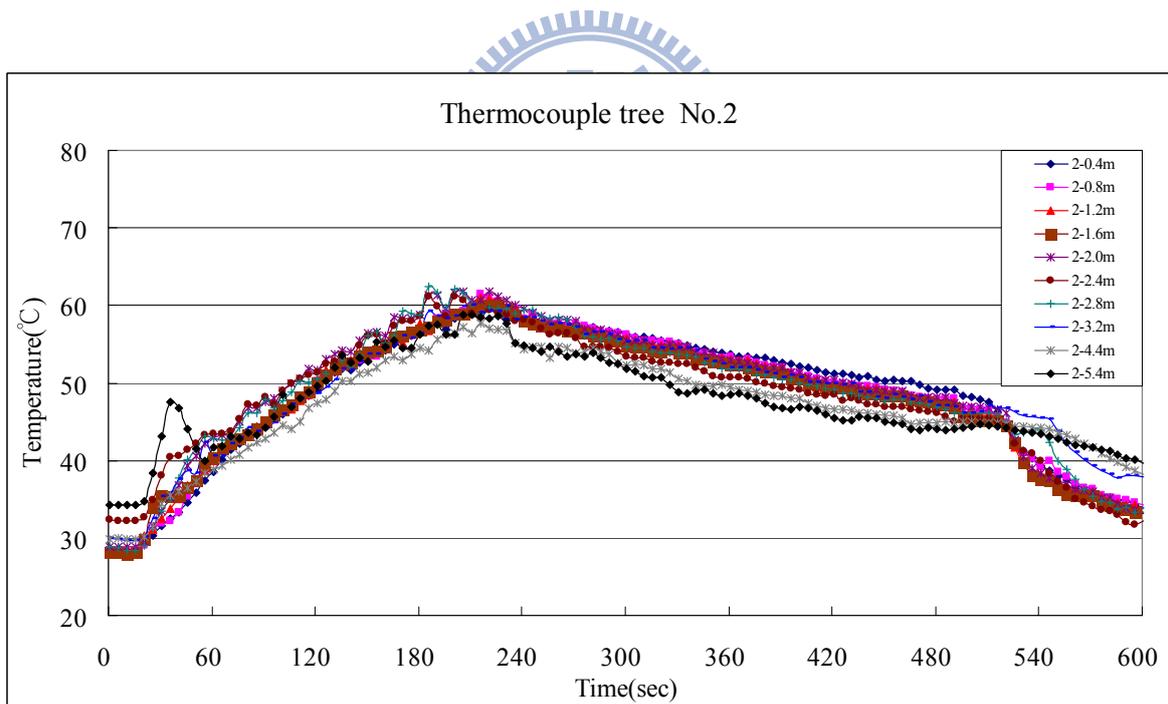


案例 5 : 8 號熱電偶樹

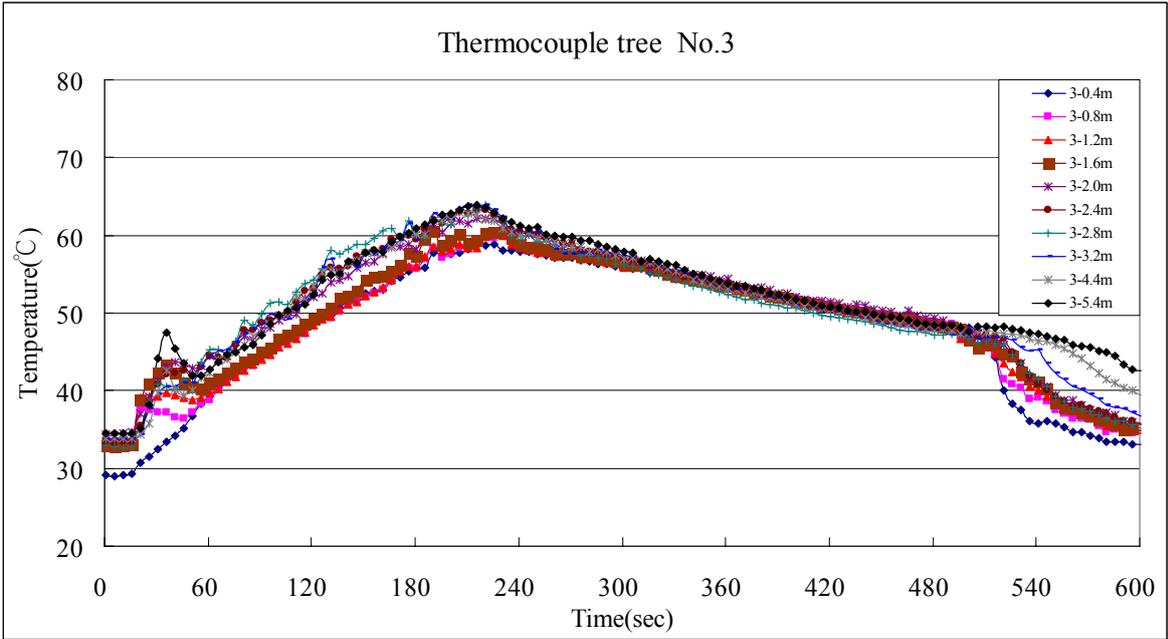
實驗五：CASE6 熱電偶溫度



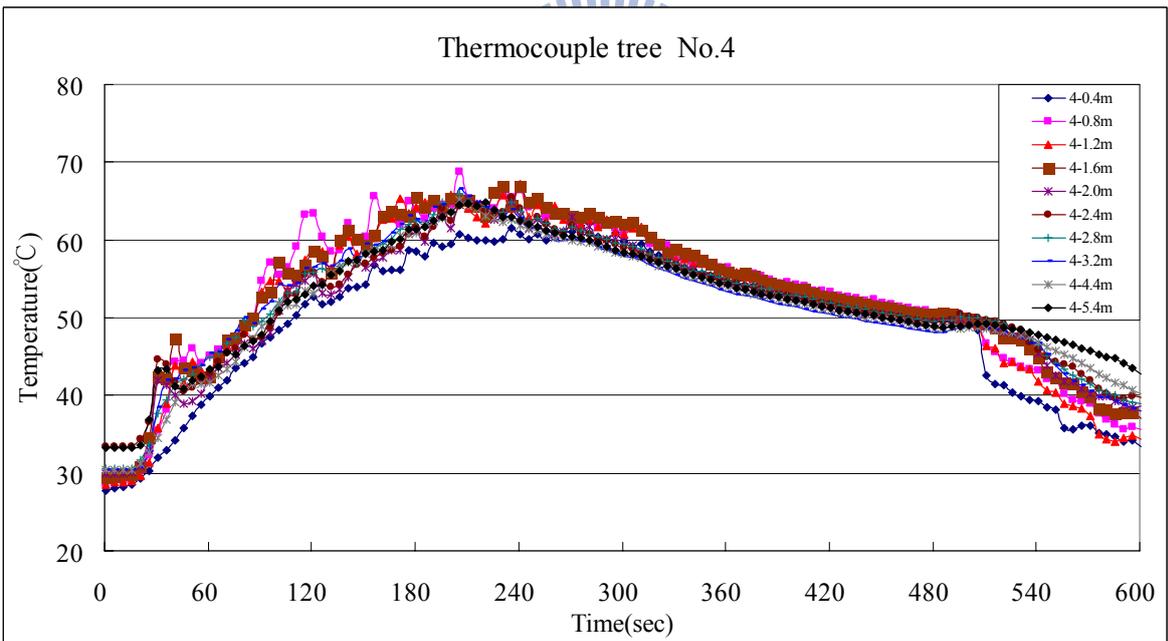
案例 6：1 號熱電偶樹



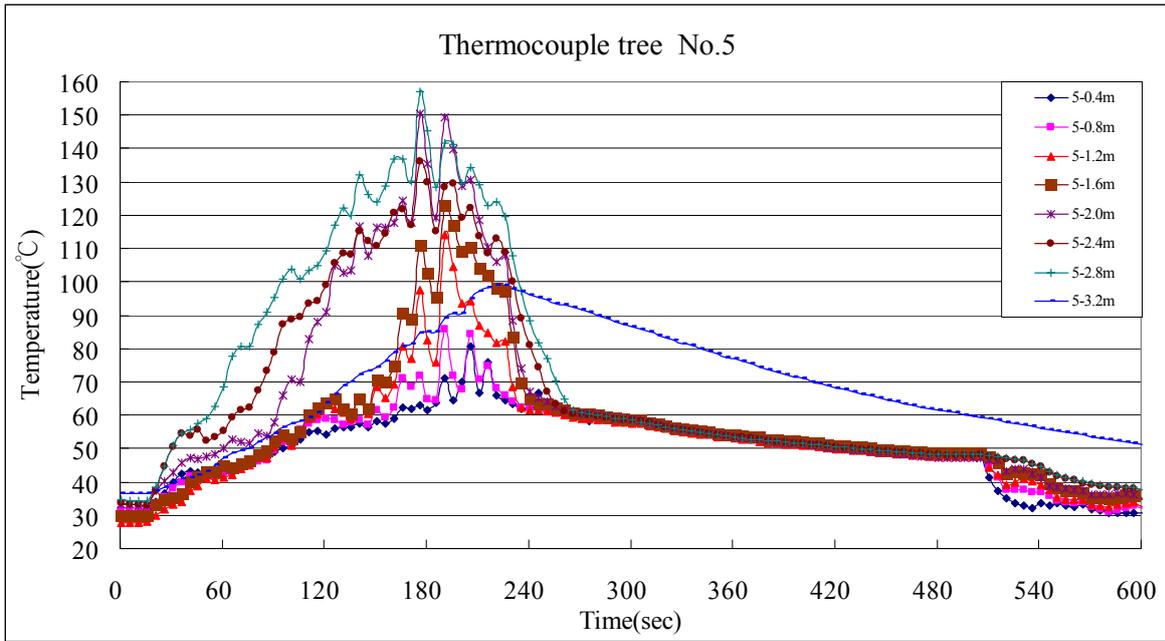
案例 6：2 號熱電偶樹



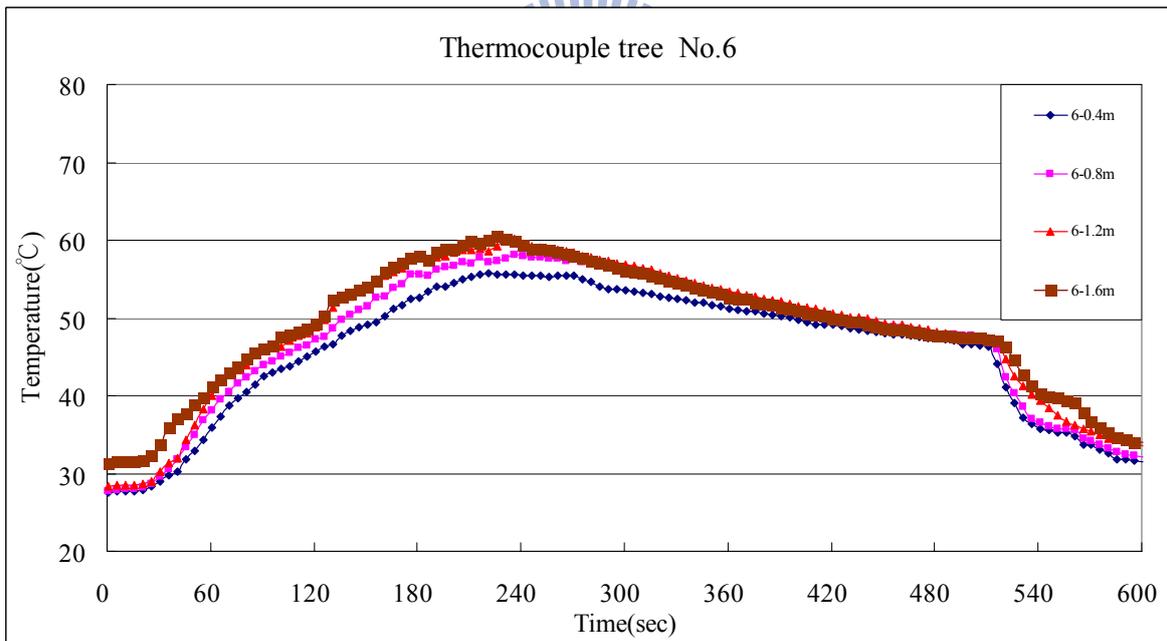
案例 6 : 3 號熱電偶樹



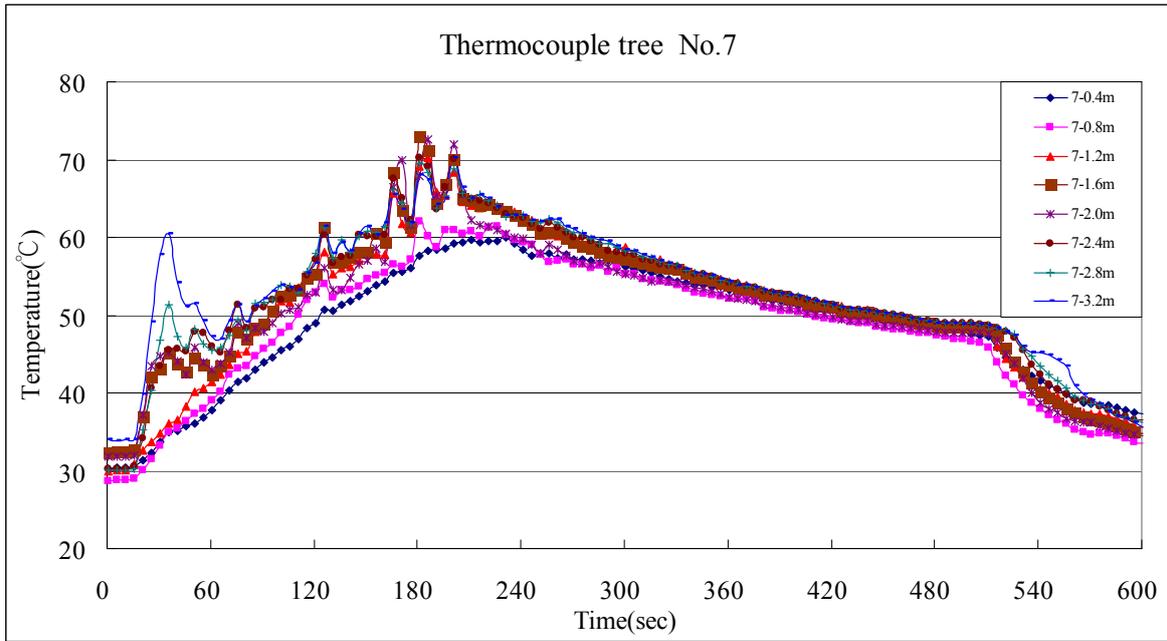
案例 6 : 4 號熱電偶樹



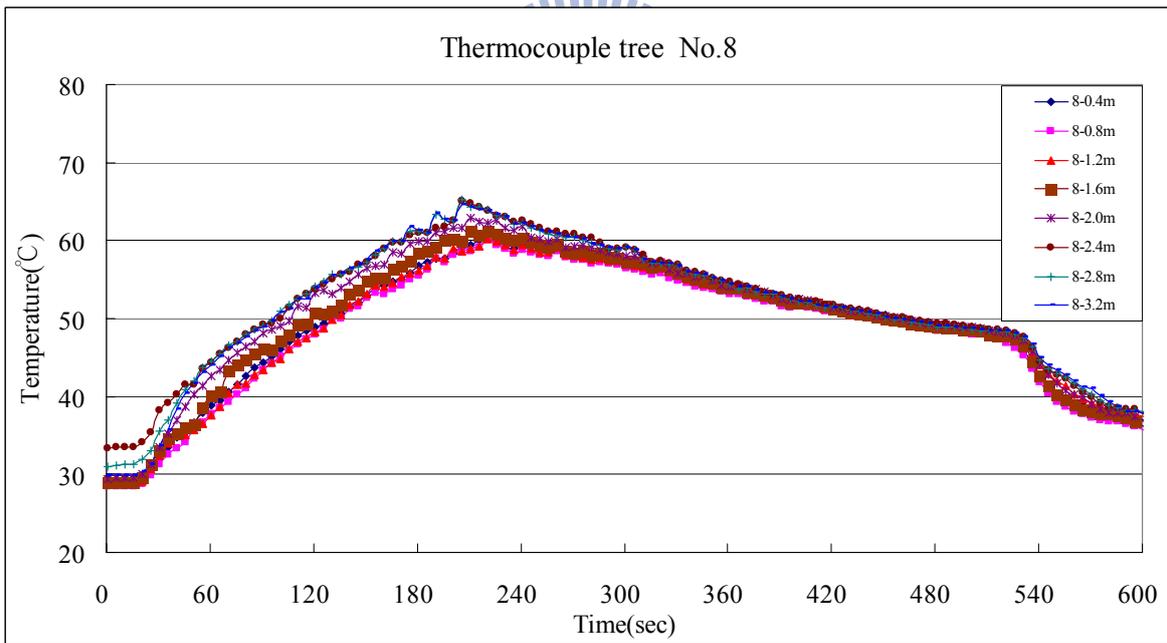
案例 6 : 5 號熱電偶樹



案例 6 : 6 號熱電偶樹

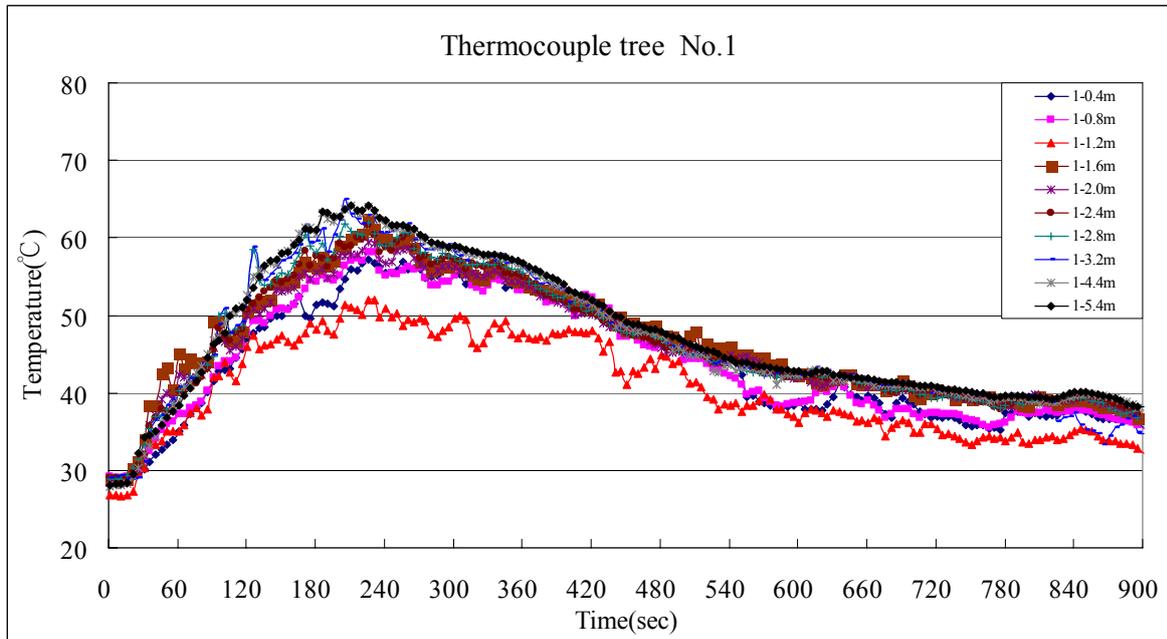


案例 6 : 7 號熱電偶樹

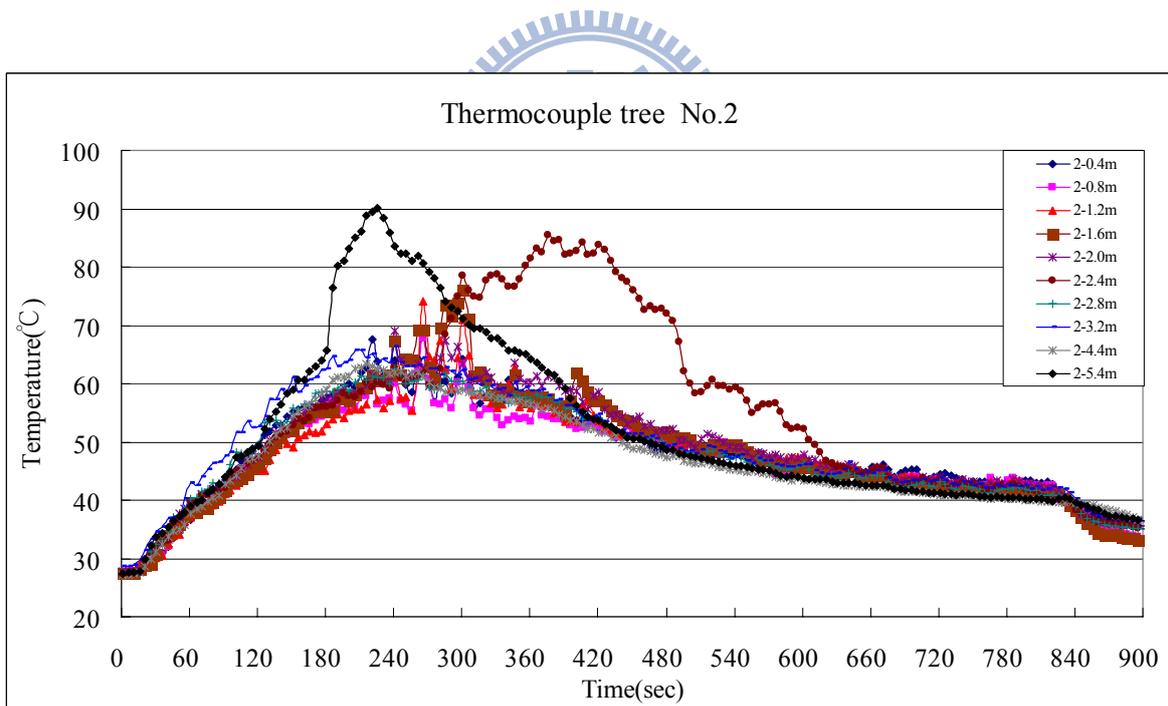


案例 6 : 8 號熱電偶樹

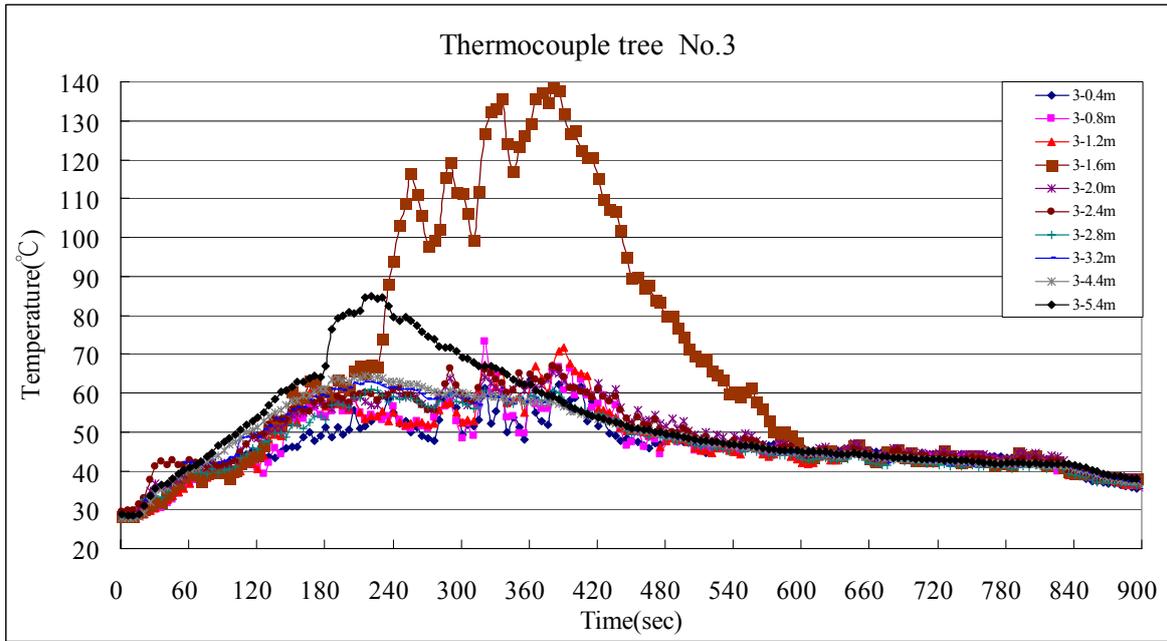
實驗六：CASE12 熱電偶溫度



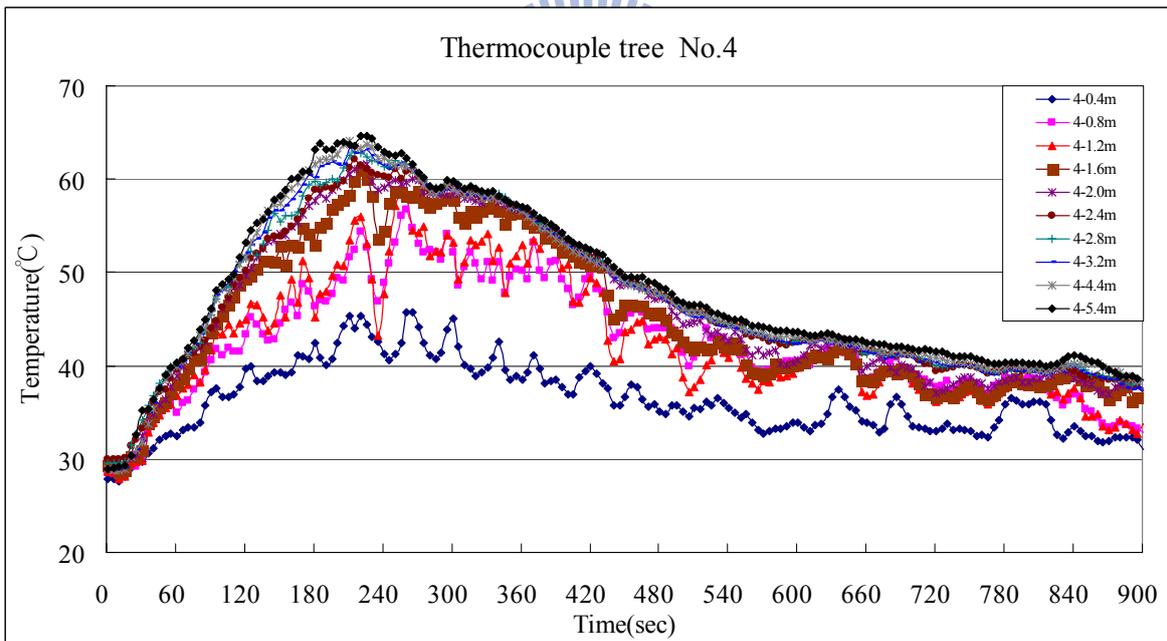
案例 12：1 號熱電偶樹



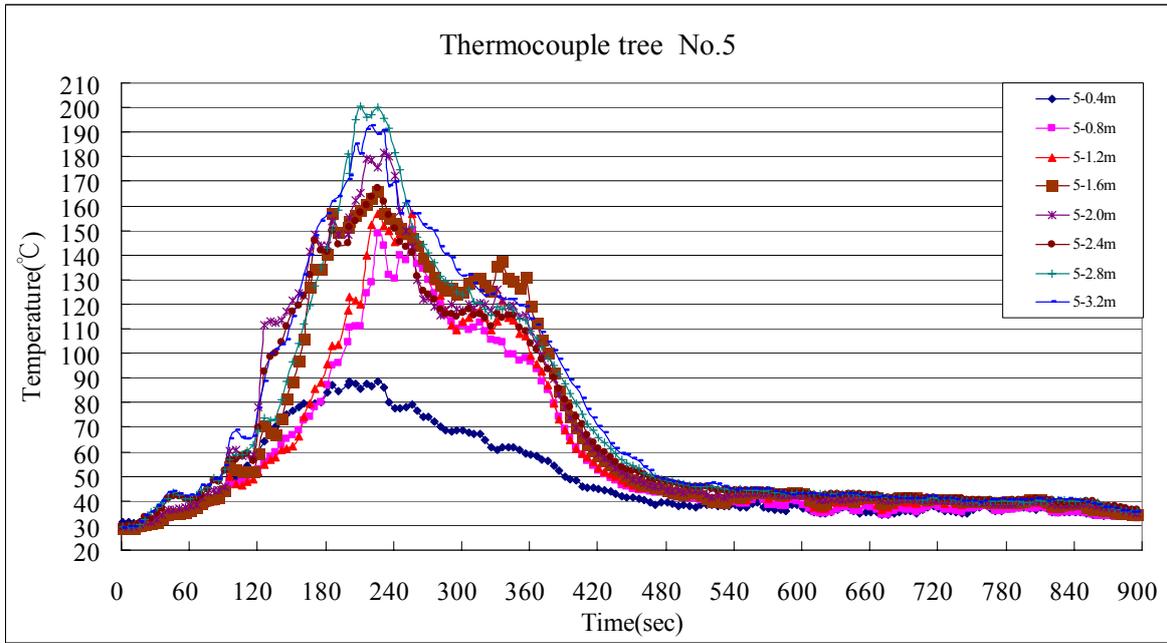
案例 12：2 號熱電偶樹



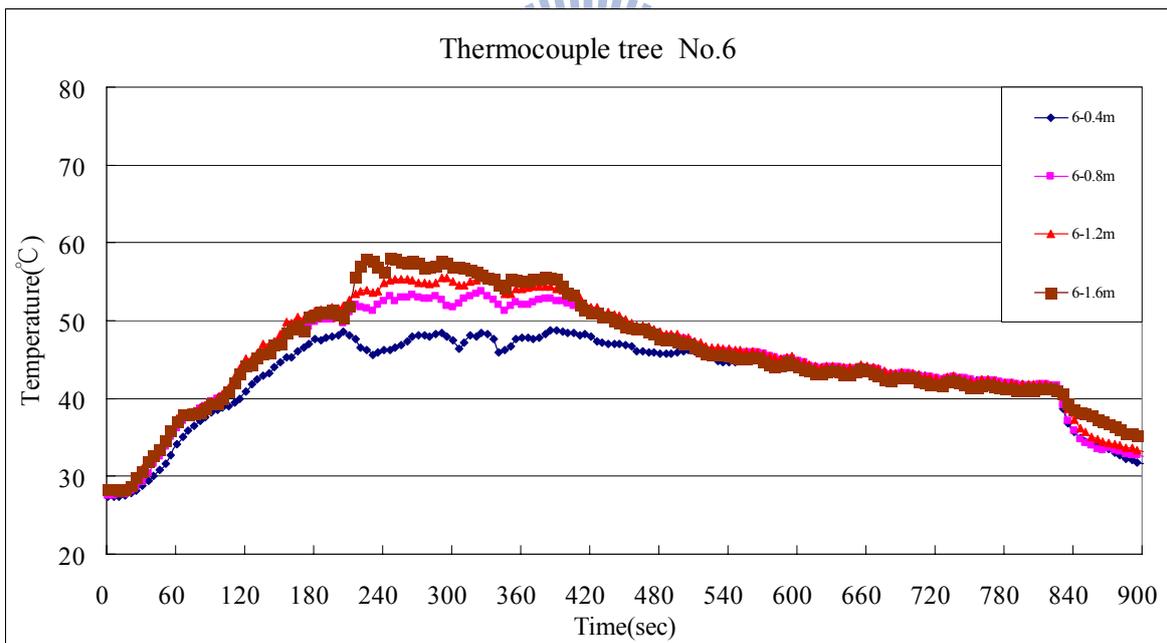
案例 12：3 號熱電偶樹



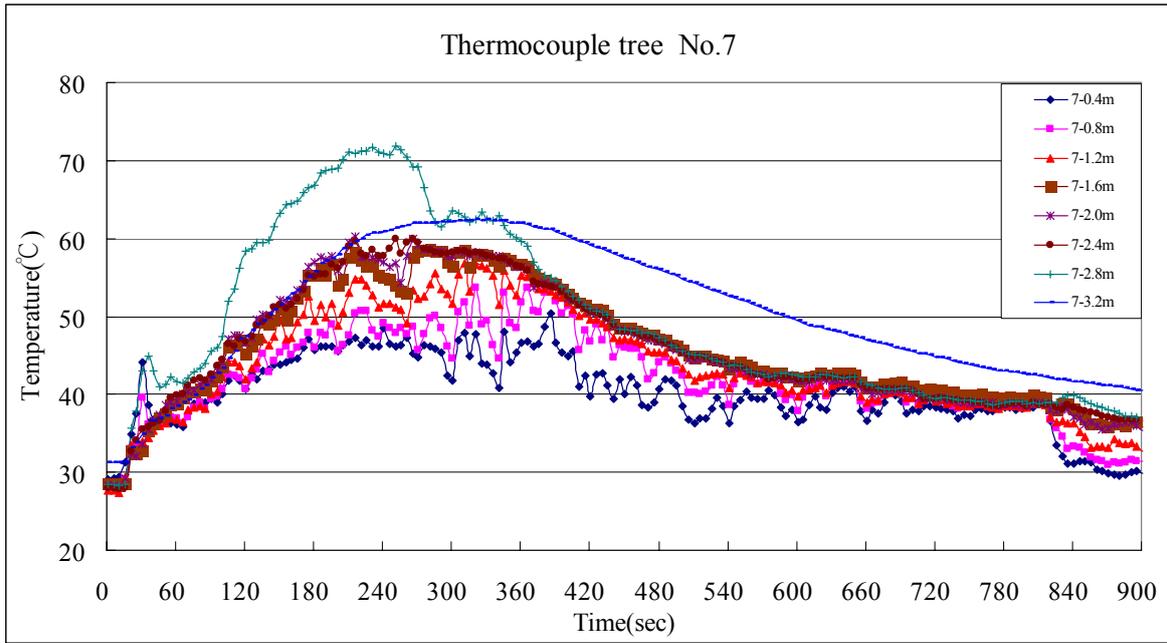
案例 12：4 號熱電偶樹



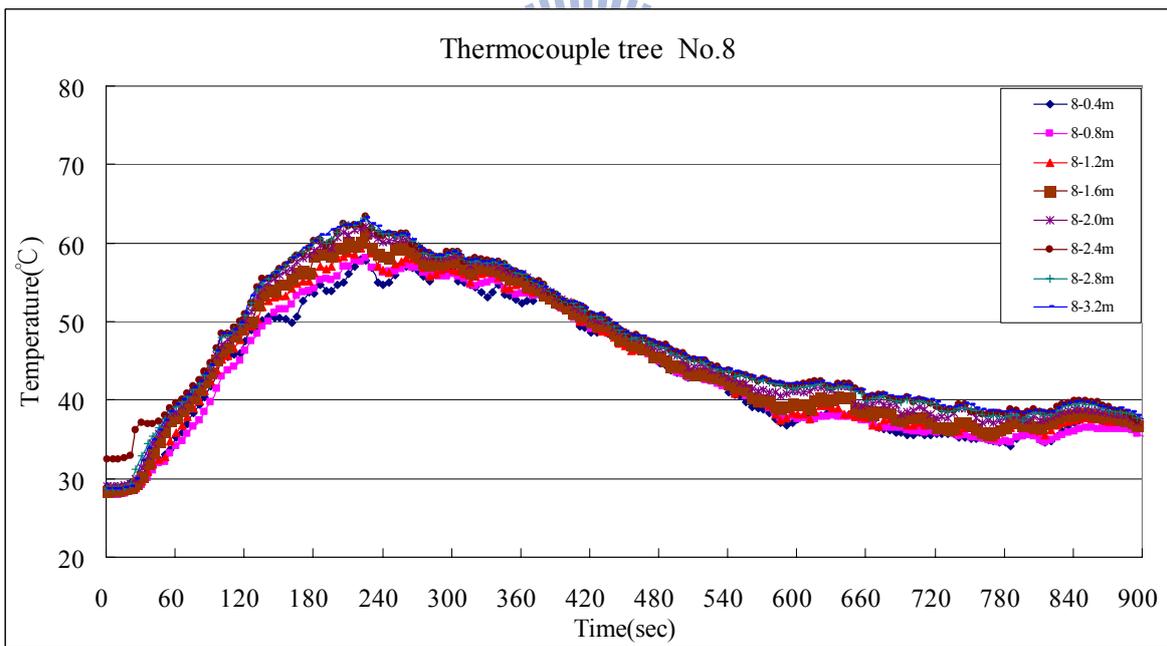
案例 12 : 5 號熱電偶樹



案例 12 : 6 號熱電偶樹



案例 12：7 號熱電偶樹



案例 12：8 號熱電偶樹