

行政院原子能委員會核能研究所

委託研究計畫研究報告

核設施除役拆除作業污染擴散管制研究

**Study of the Contamination Control for Dismantling
Operations during the Decommissioning of Nuclear Facility**

計畫編號：109B008

受委託機關(構)：鈞元能源技術工程股份有限公司

計畫主持人：趙宏耀

聯絡電話：03-3283693

E-mail address：hungyao.chao@gmail.com

研究期程：中華民國 109 年 6 月至 109 年 12 月

研究經費：新臺幣 67 萬元

核研所聯絡人員：陳家貫

報告日期：109 年 12 月 7 日

目 錄

目 錄.....	I
中文摘要.....	1
ABSTRACT.....	3
壹、計畫緣起與目的.....	6
貳、研究方法與過程.....	8
一、各種金屬切割方法之懸浮微粒生成量比較.....	8
二、除役作業環境探討.....	9
三、防治污染擴散措施及其相關規範與指引.....	10
四、容許暴露劑量.....	13
五、放射性污染物之氣流模擬分析.....	14
參、研究結果與討論.....	25
一、除役拆除作業之建議切割方法.....	25
二、局部排氣系統設計步驟.....	25
三、局部排氣系統設計注意事項.....	26
四、局部排氣系統之實驗設計規劃.....	27
五、負壓隔離區間之整體通風系統設計步驟.....	30
六、負壓隔離區間整體通風系統之實驗設計規劃.....	31
七、微粒污染擴散之電腦建模與模擬分析.....	33
八、核設施除役拆除作業污染擴散安全考量事項.....	34

九、軟體模擬驗證與應用方法檢討	37
肆、結論與建議.....	41
伍、參考文獻.....	64

圖目錄

圖一、各種切割方式之懸浮微粒產生量之比較.....	19
圖二、各種切割方式之切割速度與懸浮微粒產生量之比較	20
圖三、電漿、雷射與砂輪機切割之懸浮微粒產生量之比較	20
圖四、雷射切割法之投射距離對於浮渣產生量之影響	21
圖五、核電廠之負壓區域分類.....	21
圖六、氣罩與污染物之距離與排氣量之關係.....	22
圖七、各類常見氣罩之壓損係數.....	22
圖八、具放射性污染物之實驗室模擬模型.....	23
圖九、具放射性污染物之實驗室氣流模擬結果(一).....	23
圖十、具放射性污染物之實驗室氣流模擬結果(二)	24
圖十一、局部排氣系統設計流程.....	45
圖十二、局部排氣系統實驗設計規劃示意圖.....	46
圖十三、污染物捕集速度選用結果.....	46
圖十四、氣罩吸氣量計算結果.....	46
圖十五、污染物搬運速度選用結果.....	46
圖十六、局部排氣系統之風管尺寸計算結果.....	47
圖十七、效率 99.995% HEPA 之壓損	47
圖十八、空氣 30°C 時之氣體性質.....	47
圖十九、節點 1 之氣罩摩擦損失係數.....	48

圖二十、節點 3 之管件摩擦損失係數.....	48
圖二十一、節點 5、7、15 之管件摩擦損失係數.....	49
圖二十二、節點 8 之管件摩擦損失係數.....	49
圖二十三、節點 11 之管件摩擦損失係數.....	49
圖二十四、節點 12 之管件摩擦損失係數.....	50
圖二十五、節點 13 之管件摩擦損失係數.....	50
圖二十六、節點 17 之管件摩擦損失係數.....	50
圖二十七、局部排氣系統壓損計算結果.....	51
圖二十八、局部排氣系統之排氣風機選用結果.....	52
圖二十九、整體通風系統設計流程.....	53
圖三十、整體通風系統實驗設計規劃示意圖.....	54
圖三十一、空間通風量與風管尺寸計算結果.....	55
圖三十二、節點 S2 之管件摩擦損失係數.....	55
圖三十三、節點 S4 之管件摩擦損失係數.....	55
圖三十四、節點 S5 之管件摩擦損失係數.....	56
圖三十五、節點 S6 之管件摩擦損失係數.....	56
圖三十六、節點 S8、S10、E3、E5、E13 之管件摩擦損失係數.....	56
圖三十七、節點 E6 之管件摩擦損失係數.....	57
圖三十八、節點 E9 之管件摩擦損失係數.....	57
圖三十九、節點 E10 之管件摩擦損失係數.....	58

圖四十、節點 E11 之管件摩擦損失係數	58
圖四十一、節點 E15 之管件摩擦損失係數	58
圖四十二、進氣管路壓損計算結果.....	59
圖四十三、排氣管路壓損計算結果.....	59
圖四十四、進氣風機選型結果.....	60
圖四十五、排氣風機選型結果.....	61
圖四十六、本研究建立之驗證模型.....	62
圖四十七、文獻之模擬結果(速度向量圖).....	62
圖四十八、本研究軟體之模擬結果(速度向量圖).....	62
圖四十九、本研究模擬之動畫截圖(速度分布圖).....	63
圖五十、本研究模擬之動畫截圖(速度向量圖).....	63

表目錄

表一、經濟部工業局建議之污染物捕集速度.....	15
表二、經濟部工業局建議之污染物搬運速度.....	16
表三、ASHRAE 建議之污染物捕集速度.....	17
表四、ASHRAE 建議之污染物搬運速度.....	18
表五、各國與國際各組織之容許暴露劑量建議值.....	19

中文摘要

我國針對核設施除役階段之工作經驗目前仍相當有限，本研究旨在提出核設施除役過程拆除作業污染擴散管制作業準則之建議。首先透過蒐集國內外相關法規與文獻之資料，彙整國內外目前針對核設施除役或相關作業之實際經驗與工作規範，並透過電腦模擬與實測驗證系統之初步設計，提出各種管制方法之可行性，藉此提出適用於我國核設施除役拆除作業污染擴散管制之建議。

核設施於除役階段需在保障人員安全、環境安全、人員暴露合理抑低的條件下完成相關作業，本計畫將說明具活化效應或放射性污染之系統、設備、組件與廠房結構之拆除方法及使用設備之相關建議，亦將提出除役作業中相關安全作業程序及輻射防護與「防治污染擴散」之設計要點，本研究將蒐集與分析有關懸浮微粒(aerosol)產生、污染擴散等國內外相關文獻、法規、管制規範，並針對除役過程中懸浮微粒的產生與擴散狀況進行模擬與初步驗證實驗規劃，依此針對我國核設施除役作業中有關污染擴散管制技術進行研究。

本計畫相關工作項目均已完成。第貳章研討核設施除役作業拆解方式之污染擴散評估、除役作業環境探討、防治污染擴散措施之相關規範等文獻。第參章歸納出適合執行除役切割之方法與局部排氣系統設計要點，以一負壓隔離區間污染擴散實驗設計規劃為案例，發展負壓區間通風系統與局部排氣系統之設計計算書。此外，另針對室

內作業微粒污染產生與擴散現象進行電腦模擬，冀以電腦模擬結果提出與驗證室內環境通風與局部排氣系統之設計方案，並提出流場可視化之實驗規劃與建議，作為未來修正各項電腦建模參數之參考依據。

第肆章說明本研究得出之相關作業管制之結論與建議，主要包括不同切割方法之適用性、除役作業之局部排氣系統之注意事項、整體通風系統於設計階段、運轉階段等面向之安全考量事項。

Abstract

This study proposes the suggestion of the standards and strategies for controlling the radioactive pollutant spread during the nuclear facility decommissioning processes, because the experience in the decommissioning is limited in Taiwan. The first stage is to gather the foreign and domestic references and to analyze and organize the practices and standards about the nuclear facility decommissioning. The achievable plans for controlling the contamination diffusion are presented by the results of the CFD simulation and the verification experiment design.

The issues of the personnel safety, the environmental protection and ALARA have to be considered and implemented during the decommissioning. This project demonstrates the methods and equipment of removing the components, facilities, systems and plant structures with the activation effect or the radioactively contamination. The safety operation procedure and the design consideration of the decommissioning, the radiation protection and the prevention of the contamination spread are shown in this research. This investigation collects and analyzes the references, regulations and specifications about the suspended particulate matter production and the contamination spread control. The simulation and the preliminary experiment plan on the production and spread of the

suspended particulate matter during the decommissioning are established. The results are applied to review the technologies of controlling the contamination spread of the decommissioning.

All the work items of this research have been accomplished. In chapter 2, the references about “the evaluation of the contaminated pollutant spread from the nuclear facility decommissioning disassembling process”, “the discussion of the influences of different decommissioning environment” and “the relevant standards on preventing the radioactive pollution” are investigated. The appropriate cutting method for commissioning and the key points for designing the local exhaust system are exhibited in chapter 3. It schemes a minus pressure isolation space of the experiment for observing the contaminated pollutant diffusion, and the calculation sheets of designing the ventilation and local exhaust systems are developed. The particle generation and diffusion phenomena are simulated by the Fire Dynamics Simulator (FDS). The results of the simulation can be utilized to propose the indoor ventilation and local exhaust systems design program and to verify the effectiveness of the systems. The suggestions to plan the flow field visualization experiment of modifying the CFD modeling parameters are presented in this report. The content of chapter 4 offers the conclusion and the suggestion of the

decommissioning. It includes the suitability of the different cutting methods, the notice to establish the local exhaust system for decommissioning, the consideration in safety to design and to operate the whole ventilation system.

壹、計畫緣起與目的

我國核一廠於 108 年已取得除役許可進入除役階段，其將成為我國第一座實際進行除役之重大核設施，其實際除役之經驗將成為其他核設施相關作業的重要參考。在進行核設施除役時，必然有相關物體切割、分解等作業，過程中將產生大量帶有放射性之懸浮微粒散佈於作業環境之中，包括沉積於地面、工作表面、壁面、同時跟隨周圍空氣遠距離、長時間傳播，因此放射性微粒擴散與移除是相當重要的管制項目。除役作業流程與使用之設備相關的可靠性、完整性、便利性影響人員與設備甚鉅，本研究主要目的即在針對核設施於除役作業提出相關作業管制準則，達到保障人員安全、確實完成作業，作為未來國內核設施除役過程相關作業之指引。

國內目前鮮有對於核電廠除役過程中產生的放射性懸浮微粒的污染擴散及人員暴露的相關研究，針對相關施行作業可供參考之國內相關法規包括職業安全衛生法、勞工安全衛生法、游離輻射防護法、核子反應器設施除役計畫導則中有關金屬切割、通風換氣、微粒捕捉、人員管制等要求。於國外的部分，包括 NRC(Nuclear Regulatory Commission)、ASSP(American Society of Safety Professionals)、OSHA (Occupational Safety and Health Administration)、ASHRAE(American Society of Heating,

Refrigerating, and Air Conditioning Engineers) 、Office of Environment, Health, Safety & Security 、Journal of Radio analytical and Nuclear Chemistry 、Journal of Hazardous Materials 、Nuclear Engineering and Technology 等機構或期刊都有相關法規、作業指導或研究成果之發表，可作為本研究進行相關除役作業管制準則在地化之規劃建議參考。

貳、研究方法與過程

國內法規雖然已有針對部分施工作業之要求訂定相關準則(例如粉塵作業、通風換氣、個人作業防護、明火作業、高空作業等等)可供參考,我國目前尚未有大型核設施除役之實際執行經驗,因此本研究首先針對相關國內、外有關除役過程中,相關金屬切割、通風換氣、懸浮微粒捕捉等相關研究成果與作業要求進行蒐集與整理,依此提出在地化、適合我國除役作業中放射性懸浮微粒管制之作業準則參考。

一、各種金屬切割方法之懸浮微粒生成量比較

常見除役作業拆解方法包括機械切割、電漿切割(Plasma Cutting)、雷射切割與氧乙炔切割(Oxy-fuel Cutting)。機械切割多以探討往復鋸與砂輪機兩種方式為主[1,2]。在前述所有的切割方式中,以往復鋸切割之速度最慢,但其切割過程中最不易使切割材料分解出具放射性之懸浮微粒,如圖一與圖二所示。但同屬於機械切割之砂輪機在切割過程所產生之懸浮微粒遠高於往復鋸切割。

在金屬拆解作業中電漿切割亦是常見之切割方式。Lucia Bonavigo 等人[3,4]以義大利核能發電廠 E. Fermi 之除役作為實驗分析對象,比較熱交換管、蒸汽產生器管束與加壓器等部位分別以電漿切割與氧乙炔時,對於切割速度與懸浮微粒產生量之

差異。實驗結果顯示兩者的工作時數雖然互有快慢，但採用氧乙炔所需切除的材料體積、產生的微粒數量等等均明顯小於電漿切割法，兩者差異將近 10 倍。Nakkyu Chae 等人[1]以實驗方式觀察電漿切割在 50A 與 200A 工作電流之差異，並與雷射切割及砂輪機切割進行比較。結果如圖三所示，電漿切割之懸浮微粒產生量低於雷射切割與砂輪機切割，且工作電流越低，電漿切割產生之懸浮微粒數量越少。

Ana Beatriz Mendes Lopez[5]針對不同投射距離、聚焦距離與氣體壓力等參數組合下，以實驗方式探討雷射切割之切割效率、懸浮微粒粒徑分佈與浮渣(dross)之差異性。雷射聚焦點是主要影響切口寬度之因素，建議聚焦點剛好位於切割表面(即聚焦距離為零)，此時切口寬度最小，強度最集中，切割效率最佳。結果顯示聚焦距離越小、投射距離越小、氣體壓力越小或輸出功率越小皆可減少雷射浮渣(浮渣會沾黏於被切割物的表面，或是掉落在工作區域周圍，雖不會隨氣流擴散，但仍屬於待處理之廢棄物，因此其產生量應愈少愈少)。

二、除役作業環境探討

除役作業環境係從區分各工作區域(例如除役作業區與非除役作業區)之壓力梯度、設置局部排氣系統、水下進行切割作業等方面進行文獻探討。ASHRAE[6]依據核電廠內各工作區域

之特性，將負壓程度劃分成三個等級，如圖五所示。一級限制區(Primary Confinement)為手套作業箱(Glove Boxes)，屬危險程度最高之工作區域，負壓程度須為最高。二級限制區(Secondary Confinement)為核能設備操作室與維修室，危險程度屬於次高等級，故其負壓程度亦為次高。三級限制區(Tertiary Confinement)為核電廠內一、二級限制區以外之區域。將負壓程度量化表示時，三級限制區壓力須比 1 大氣壓力低 2.5~37 Pa；二級限制區壓力須比三級限制區低 25~37 Pa；一級限制區壓力須比 1 大氣壓力低 75~375 Pa。同時，ASHRAE 亦提出核設施除役時之通風設計原則，包括除役作業區須確保負壓、針對局部排氣系統須選用適當之捕集風速與搬運風速以及採用活動室排氣罩並儘可能接近作業區域。有關前述負壓數據與通風設計原則皆可作為設計除役作業環境之重要參考依據。

Nakkyu Chae 等人[1]探討在水下進行核設施除役作業對於懸浮微粒產生量之影響。作者建議以水下環境進行切割將可使放射性污染程度降至最低，可使懸浮微粒數量減少 80%以上。若在水深 7 公尺進行切割時，則可使懸浮微粒減少 99%。

三、防治污染擴散措施及其相關規範與指引

防治污染擴散係以建置整體通風系統與局部排氣系統為主要措施。整體通風系統設置目的主要是建立各區域不同之壓力

梯度，避免具放射性污染懸浮微粒從除役作業區擴散至其他無污染區域；局部排氣系統設置目的則是將切割過程中之懸浮微粒在產生之初隨即自工作區域抽離，儘量避免殘留於環境中。國內外各機關、單位與研究組織針對整體通風系統與局部排氣系統之設置提供相關規範與指引分別簡述如下。

ONR(Office for Nuclear Regulation)[8]提供核設施通風系統設置指引可作為本研究防治污染擴散之通風系統設置指引除役作業之設計參考如下所述。通風系統須能建立正確之壓力梯度，讓氣流可自無污染區域流向污染區域。具放射性污染之區域須維持負壓，開口與縫隙處須確保足夠之進風速度，以防污染粒子或氣體外散。通風系統之設計須考量到核能設施可能遭遇到之突發狀況或極端氣候，諸如火災、風災、淹水、高溫警報等，針對各種突發狀況須具備相因應之操作程序，以避免發生污染擴散情形。通風系統之排氣須符合與國際及當地核安相關之法規。通風系統之機械與電氣組件皆須有備援設計。

經濟部工業局針對防治工業粉塵污染防治技術提供局部排氣系統設計指南[8]。影響排氣系統主要參數為氣罩、排氣量、污染物於管道內之搬運速度、風管形狀與尺寸以及風機選用等。氣罩為局部排氣系統之關鍵，其型式與安裝位置係直接影響排氣量以及系統壓損之計算。排氣量多寡亦受到氣罩與污染物之

距離以及污染物之捕集速度影響。污染物搬運速度則直接影響風管尺寸之設計與管路壓損之計算。該指南建議之污染物捕集速度與污染物搬運速度分別如表一與表二所示。

ASHRAE[9]於 2019 年提供之局部排氣系統捕集速度與搬運速度分別如表三與表四所示。捕集距離(意即氣罩與污染物之距離)與排氣量之關係如圖六所示，當氣罩離污染源 1 個排氣風管等效直徑之距離時，捕集風速僅剩斷面風速之 8%，故建議氣罩離污染源越近越好，以減少系統排氣量。圖七提供各類常見氣罩之壓損係數，俾利進行氣罩壓損計算與選用符合排氣需求之風機規格。

黃榮芳等人[10]以實驗之方式將常用氣罩根據其尺寸與捕集距離，迴歸出斷面風速與排氣量之經驗公式，大幅簡化局部排氣系統設計之排氣量計算程序。同時全面檢討環境干擾氣流、室內障礙物與通風系統補氣量對於局部排氣系統之影響。

勞動部勞動及職業安全衛生研究所[11]提出建置可移動式排氣設備可更接近污染源，將更有效避免工作者吸入污染物。輔導改善之具體成果包括可改善研磨作業環境之排氣風速、有效降低作業場所之懸浮微粒濃度、可降低零件組裝作業場所之揮發性有機物濃度、降低焊接作業場所之空氣粉塵濃度以及改善複合式作業場所(如大型賣場)室內空氣品質。

四、容許暴露劑量

Sun Il Kim 等人[2]彙整各國與各國際組織對於容許暴露劑量之建議值，如表五所示。該研究尚使用南韓原子能研究所所開發之程式－BiDAS(Bioassay Data Analysis Software)，用以評估進行除役作業之工作者其內部曝露劑量。惟該程式資料庫未臻完善，若資料庫發展成熟後，將可計算每人容許進行除役作業之時間。

根據游離輻射防護安全標準第 7 條，輻射工作人員職業曝露之劑量限度規定如下：

- (一) 每連續五年週期之有效劑量不得超過一百毫西弗，且任何單一年內之有效劑量不得超過五十毫西弗。
- (二) 眼球水晶體等價劑量一年內不得超過一百五十毫西弗。
- (三) 皮膚或四肢之等價劑量於一年內不得超過五百毫西弗。

根據游離輻射防護法第 16 條，雇主僱用輻射工作人員時，應要求其實施體格檢查；對在職之輻射工作人員應實施定期健康檢查，並依檢查結果為適當之處理。

承上，輻射工作人員因一次意外曝露或緊急曝露所接受之劑量超過五十毫西弗以上時，雇主應即予以包括特別健康檢查、劑量評估、放射性污染清除、必要治療及其他適當措施之特別醫務監護。

五、放射性污染物之氣流模擬分析

G. de With[12] 採用商用計算流體力學軟體 FLUENT 進行具放射性污染物之實驗室氣流模擬分析。考慮氣體擴散、粒子擴散(假設粒子擴散時不影響氣流)，並採用經驗公式進行粒子沉積作用之計算，對於小容積作業區域(0.13m^3)，該文之分析結果與實驗數據驗證得知其有相當之準確性。再以該模型檢討大系統(108m^3)不同通風口位置、換氣率對不同粒徑、粒子濃度等影響，相關方案如圖八所示。模擬結果如圖九、十所示，對於 $>10\mu\text{m}$ 之微粒，採用圖八方案(a)者，換氣次數愈高，反而不利於工作區上方之粒子移除，圖八方案(b)至(d)者之效果接近於一般手套箱；對於工作區周圍地面上方者之現象亦與上述者近似；研究亦表明，粒徑小於 $1\mu\text{m}$ 者，其濃度與粒徑無關，大於 $1\mu\text{m}$ 者，濃度隨粒徑增大而降低。另由其研究結果中亦可得知，工作區上方之粒子濃度約為周邊之百倍以上，且粒徑愈大者，持續漂浮於空氣中之比例愈低；且排風口應採用多點方式設計取代單點者，以提升整體通風效率、降低粒子濃度。

表一、經濟部工業局建議之污染物捕集速度[8]

污染物發生之條件	實例	捕集速度 (m/s)
污染物以幾近無速度排放至靜止空氣中	由液面蒸發產生之蒸氣	0.25~0.5
污染物以低速排放至中等靜止空氣中	噴漆棚、間斷操作之容器、低速輸送帶、焊接、電鍍液儲槽、金屬之酸液清洗	0.5~1.0
污染物產生較快，排放至快速運動空氣中	較淺之噴漆棚、卸料口、粉碎機、輸送帶之加料	1.0~2.5
污染物以高速排放至快速運動空氣中	磨碎機	2.5~10

表二、經濟部工業局建議之污染物搬運速度[8]

污染物	實例	搬運速度 (fpm)
蒸氣、氣體、 煙	所有蒸氣氣體及煙	任何意欲風速(經濟 風速常為 1000~2000)
煙霧	鋅和氧化鋁煙霧	1400~2000
非常細微之輕 灰塵、乾塵及 粉	棉紗、木粉、石粉	2000~2500
	細橡皮塵、電木塑粉塵、 黃麻絨、棉塵、刮下屑 (輕)、肥皂粉塵、皮革刮 下屑	2500~3500
一般工業塵	鋸木屑(重而濕)、研磨 塵、磨光絨(乾)、毛黃麻 塵、咖啡豆、製鞋灰塵、 花崗石塵、矽粉、一般物 料處理、切磚、黏土塵、 鑄造、石灰石塵、紡織業 石綿打包與秤重時放出之 粉塵	3500~4000
重粉塵	金屬錠俥、鑄造鼓轉筒及 搖動器塵、噴砂灰塵、木 塊、豬廢料等處理粉塵、 黃銅錠俥、鑄造搪孔塵、 鉛塵	4000~4500
重或潮濕粉塵	鉛塵夾有小切塊、潮濕黏 合料塵、切管時之石綿或 塑膠塵、磨光絨(有黏 性)、生石灰塵	4500 以上

表三、ASHRAE 建議之污染物捕集速度[9]

Condition of Contaminant Dispersion	Examples	Capture Velocity, m/s
Released with essentially no velocity into still air	Evaporation from tanks, degreasing, plating	0.25 to 0.5
Released with low velocity into moderately still air	Container filling, low-speed conveyor transfers, welding	0.5 to 1.0
Active generation into zone of rapid air motion	Barrel filling, chute loading of conveyors, crushing, cool shakeout	1.0 to 2.5
Released at high velocity into zone of very rapid air velocity	Grinding, abrasive blasting, tumbling, hot shakeout	2.5 to 10

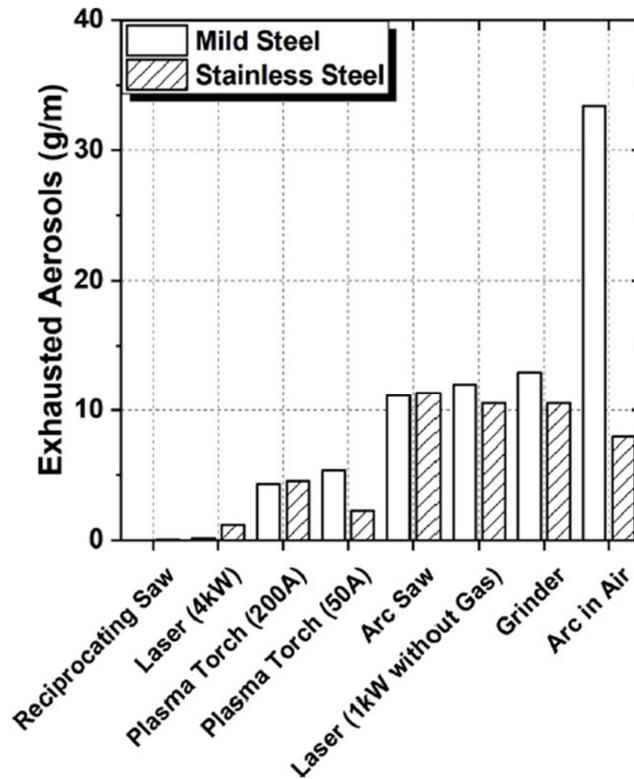
表四、ASHRAE 建議之污染物搬運速度[9]

Nature of Contaminant	Examples	Min. Transport Velocity, m/s
Vapor, gases, smoke	All vapors, gases, smoke	Usually 5 to 10
Fumes	Welding	10 to 13
Very fine light dust	Cotton lint, wood flour, litho powder	13 to 15
Dry dusts and powders	Fine rubber dust, molding powder dust, jute lint, cotton dust, shavings (light), soap dust, leather shavings	15 to 20
Average industrial dust	Grinding dust, buffing lint (dry), wool jute dust (shaker waste), coffee beans, shoe dust, granite dust, silica flour, general material handling, brick cutting, clay dust, foundry (general), limestone dust, asbestos dust in textile industries	18 to 20
Heavy dust	Sawdust (heavy and wet), metal turnings, foundry tumbling barrels and shakeout, sandblast dust, wood blocks, hog waste, brass turnings, cast-iron boring dust, lead dust	20 to 23
Heavy and moist dust	Lead dust with small chips, moist cement dust, asbestos chunks from transite pipe cutting machines, buffing lint (sticky), quicklime dust	23 and up

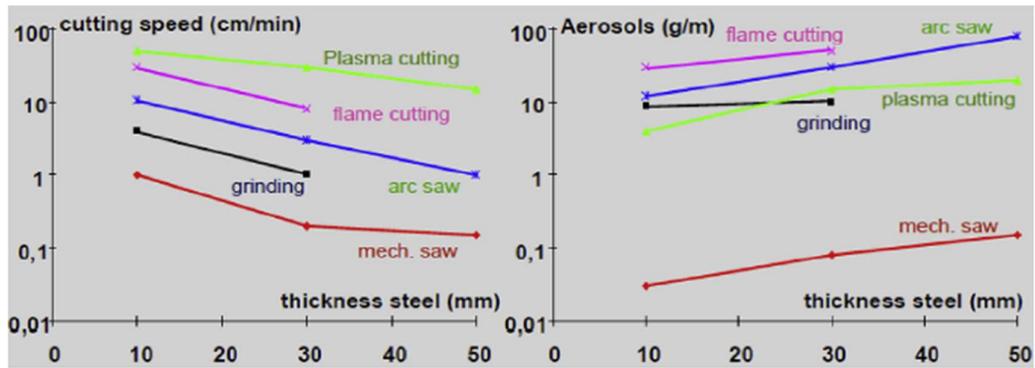
表五、各國與國際各組織之容許暴露劑量建議值[2]

單位：mSv

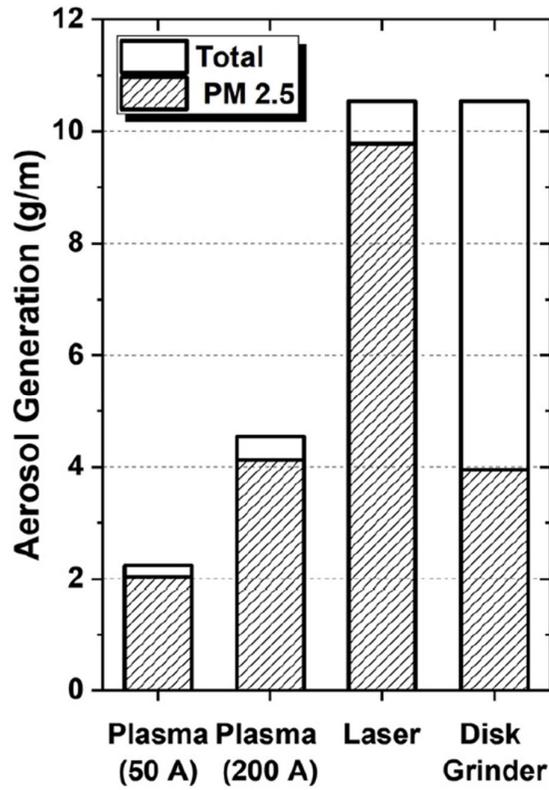
最大有效劑量	Euratom	ICRP	IAEA	德國	美國	日本	韓國	英國	法國
5年累計	100	100	100	100	-	100	100	100	100
1年累計	50	50	50	50	50	50	50	50	50



圖一、各種切割方式之懸浮微粒產生量之比較[1]



圖二、各種切割方式之切割速度與懸浮微粒產生量之比較[2]



圖三、電漿、雷射與砂輪機切割之懸浮微粒產生量之比較[1]

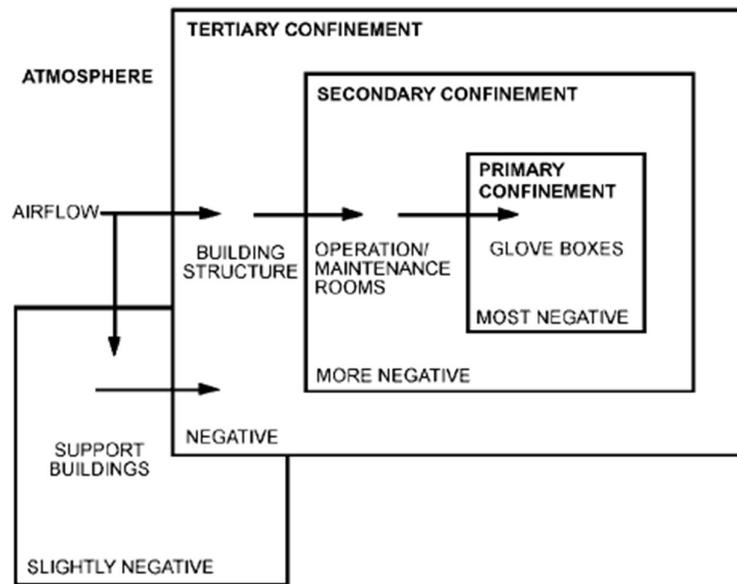


(a) 投射距離=15mm

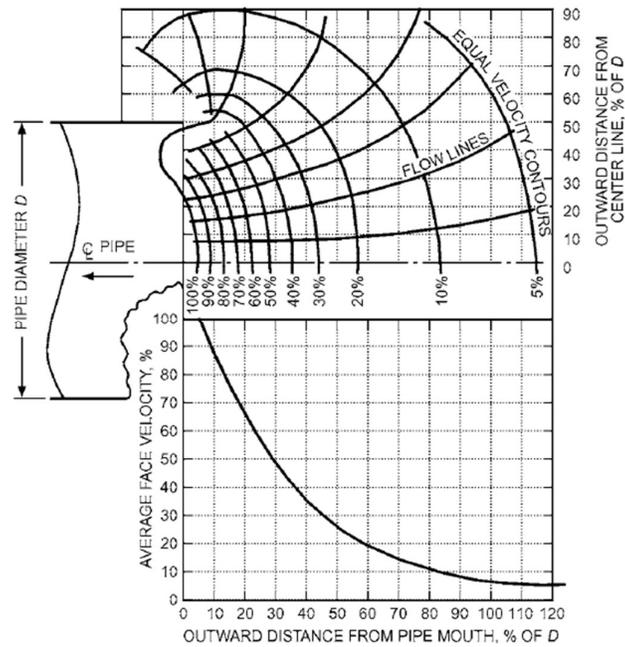


(b) 投射距離=65mm

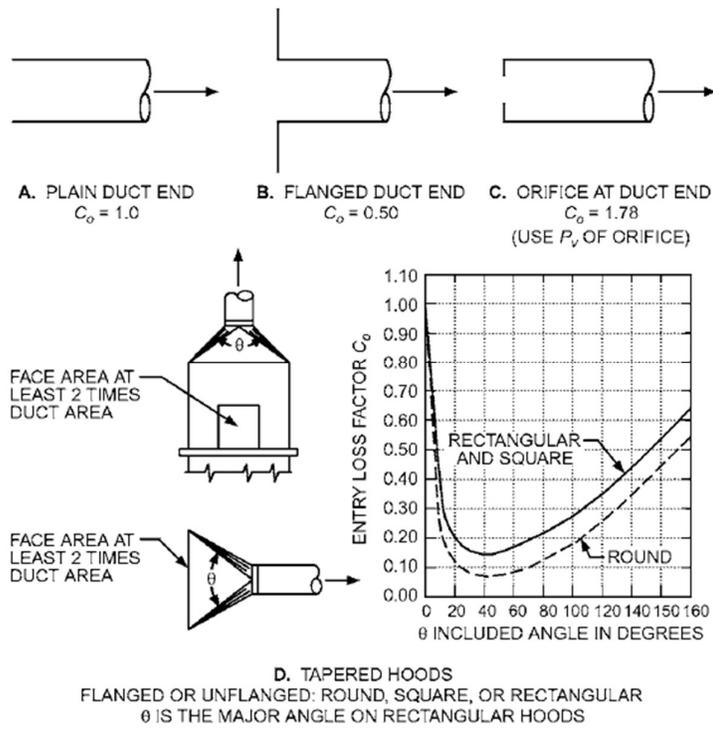
圖四、雷射切割法之投射距離對於浮渣產生量之影響(氣體壓力 6bar 及輸出功率 3kW) [5]



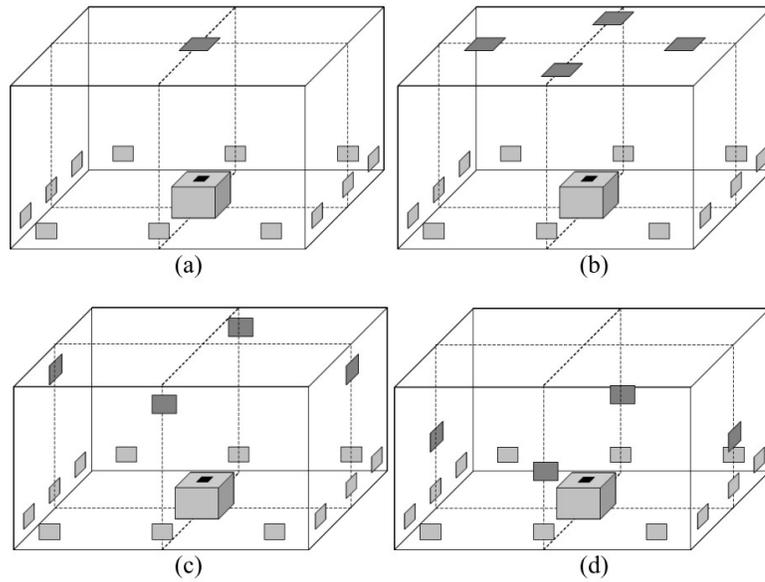
圖五、核電廠之負壓區域分類[6]



圖六、氣罩與污染物之距離與排氣量之關係[9]



圖七、各類常見氣罩之壓損係數[9]



圖八、具放射性污染物之實驗室模擬模型[12]

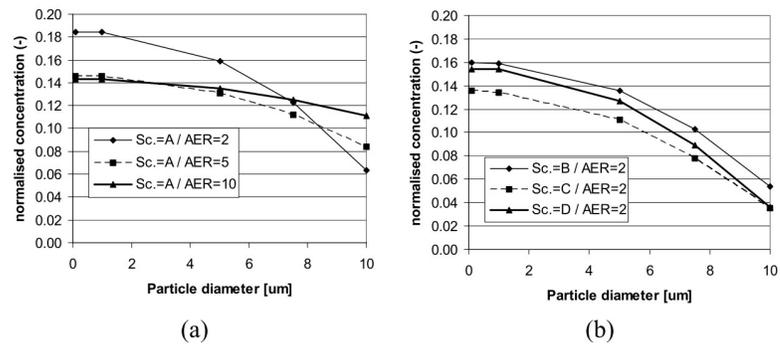


Figure 6: Particle concentration above the release at 1.5m above ground level.

圖九、具放射性污染物之實驗室氣流模擬結果(一)[12]

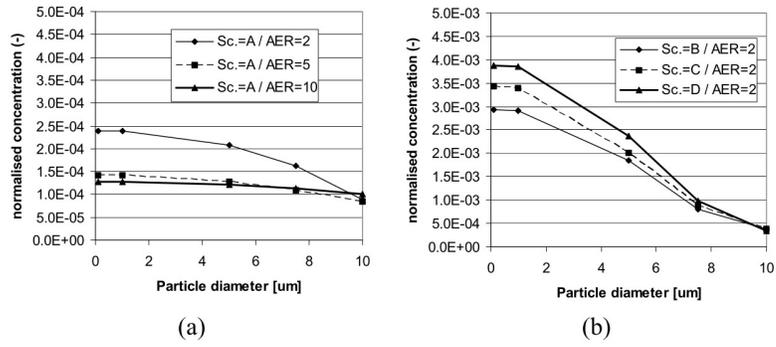


Figure 7: Mean particle concentration in the room at 1.5m above ground level.

圖十、具放射性污染物之實驗室氣流模擬結果(二) [12]

參、研究結果與討論

一、除役拆除作業之建議切割方法

眾多金屬切割方法中，雖然以往復鋸之切割速度最慢，但它具有低懸浮微粒產生量之特點。同時，搭配水下環境進行切割，可再減少 80%之懸浮微粒，進而減少工作者在作業環境接觸到放射性污染之暴露劑量，當以工作者健康、工作完成速度作為考量依據時，本研究建議以往復鋸切割搭配水下作業環境作為核設施高污染部件除役之主要拆解方法，若為低污染者，則可使用氧乙炔切割、電漿切割等方式快速完成工作。

二、局部排氣系統設計步驟

除役作業環境除了須藉由整體通風系統建立正確之壓力區隔以防治污染擴散，局部排氣系統設計之成敗更是保護工作者安全健康之關鍵。本研究整理前述文獻分析結果，將局部排氣系統設計流程歸納如圖十一所示。

- (一) 決定補集風速：根據金屬切割工法與被切割物種類，可從 ASHRAE 建議之污染物捕集速度 (如表三)選用合適之懸浮微粒補集風速。
- (二) 選用氣罩種類：根據切割作業所需之操作空間以及懸浮微粒產生時之可能流向，選出適用之氣罩種類。若被拆解物部位眾多且形狀差異大時，建議可選用多種氣罩，增加局部排

氣系統之應用範圍與彈性。

- (三) 評估捕集距離：考量工作者有足夠之操作空間後，氣罩應儘可能接近污染源。
- (四) 計算排氣量：懸浮微粒所需之捕集風速、氣罩種類、氣罩尺寸與捕集距離皆為影響排氣量之主要因素。
- (五) 決定搬運風速：根據懸浮微粒種類，可從 ASHRAE 建議之污染物搬運速度 (如表四)選用合適之搬運風速。
- (六) 設計管路尺寸：藉由排氣量與搬運風速兩項參數即可進行排氣管路之設計。
- (七) 選用過濾設備：局部排氣系統所抽除之懸浮微粒皆具有放射性，為避免對環境造成放射性污染與危害，必須選用正確且容量足夠之過濾設備。
- (八) 計算系統壓損：氣罩種類、排氣量、管路尺寸、管路配置與過濾設備規格皆為影響系統壓損之主要因素。
- (九) 選用排氣風機：主要以排氣量與系統壓損作為風機操作點選用依據。

三、局部排氣系統設計注意事項

局部排氣系統極易受到整體作業環境之影響，例如現場工作型態、作業人員動作或障礙物位置等，因此本研究列出重要注意事項，確保局部排氣系統得以成功運作。

- (一) 避免環境干擾氣流之影響：通風出風口之氣流、門窗縫隙若有氣流滲入時，當氣流速度太大，將會干擾氣罩之捕集性能，甚至失效。
- (二) 避免人員之影響：作業人員之動作過大或移動過快時，亦會造成干擾氣流。人員作業位置阻擋氣流路徑時，將造成鈍體尾流，使懸浮微粒回流至人員周圍。
- (三) 避免障礙物之影響：在氣流路徑中若出現障礙物，例如工具、置物檯，將可能造成渦流產生，導致室內出現氣流滯留區(Dead Zone)，使該區污染度濃度愈來愈高。
- (四) 確保室內有足夠之補氣量：若未提供足夠之補氣氣流，室內負壓程度將越大，越不利於排氣。若室內負壓程度過高時，高濃度污染源將以擴散方式洩漏到低污染濃度區域，危害到工作者之安全。

四、局部排氣系統之實驗設計規劃

本研究針對局部排氣系統發展設計規劃計算書，可作為建立局部排氣實驗平台之依據。局部排氣實驗平台擬由氣罩、管路、過濾器與排氣風機所組成，本研究以某特定案件為例，逐步說明計算書之使用過程，該例每一組成元件之尺寸如圖十二所示，系統設計與計算過程如下所述：

- (一) 根據懸浮微粒產生來源與流場運動情形，可查詢 ASHRAE

提供之各類懸浮微粒捕集風速建議表，找出合適之捕集風速。不同的懸浮微粒產生源與流場有各自合適的捕集風速建議範圍，若懸浮微粒會危害人體健康時，則捕集風速應選用建議範圍之上限值。本研究之污染源係來自於研磨機切割金屬管路所產生之金屬塵屑，塵屑本身具有放射性，故捕集速度適合採用 10 m/s 進行設計，選用結果如圖十三所示。

(二) 氣罩排氣量計算與氣罩型式、尺寸、吸入口斷面中心點與污染源距離與捕集風速等參數息息相關。本實驗設計之氣罩為無凸緣開口式，寬(W)70 cm，長(L)120 cm，店面中心點離污染源最遠處距離為 20 cm。經計算後，氣罩吸氣量為 4.76 CMS (17143 CMH)，如圖十四所示。

(三) 污染物搬運速度係決定風管尺寸之主要因素。根據懸浮微粒種類與特性，可查詢 ASHRAE 提供之各類污染物搬運速度建議表，找出合適之風管設計風速。同理，當污染物將嚴重危害人體健康時，搬運速度亦應選用建議範圍之上限值。經查表，金屬塵屑(Metal turnings)搬運速度應為 23 m/s 以上，如圖十五所示。

(四) 本實驗風管分為可撓性圓型風管與鍍鋅鐵皮方型風管兩種。在計算風管尺寸過程中，本計算書係設定每 50 mm 為一個計算級距。在搬運風速至少 23 m/s 與風量 17143 CMH 之設

計條件下，計算結果如圖十六所示，圓型風管管徑為 500 mm，管內實際搬運風速為 24.3 m/s；方型風管尺寸為 450 mm*450 mm，實際搬運風速為 25.1 m/s。

(五) 根據歐盟標準 EN 1882，高效率濾網(High-efficiency particulate air，簡稱 HEPA)等級分為 H10~H14。本實驗規劃採用可針對粒徑 0.3 μ m 微粒，其過濾效率可達 99.995% 之 H14 等級作為主要過濾設備。調查市售 HEPA 型錄，乾淨 H14 等級濾網壓損約 300 Pa，經使用後且過濾效果已飽和之壓損約 600 Pa。為確保排氣系統在尚未更換 HEPA 情況下運轉，系統吸氣量須可以滿足污染物之捕集風速與搬運風速，因此過濾器壓損應以 600 Pa 計之。

(六) 流體物理性質亦會影響系統管路壓損，流體密度與黏度會根據溫度不同而有所變化。本研究之室內溫度設定於 30°C 時，空氣密度約 1.164 kg/m³，運動黏度約 1.608 x10⁻⁸ m²/s，如圖十八所示。

(七) 圖十二中，各類管件(例如氣罩、轉接口與 90 度彎頭)與風機系統效應之壓力損失係數 C。皆可從 ASHRAE Handbook[14]與 ACGIH Manual[15]查表求得。節點 1、3、5、7、8、11、12、13、15、17 等節點之壓力損失係數查詢結果如圖十九至圖二十六所示。

(八) 不同的管路材質具有不同的表面絕對粗糙度 ε ，而表面絕對粗糙度亦將影響流體流經各段管路與管件時，所產生壓損之多寡。如圖二十七所示，氣罩材質為 PVC，其絕對粗糙度為 0.05 mm；可撓風管絕對粗糙度為 4 mm；鍍鋅鐵皮風管絕對粗糙度為 0.15 mm；不鏽鋼鐵皮絕對粗糙度為 0.03 mm。

(九) 將前述各管路與管件之尺寸、數量、絕對粗糙度、壓力損失係數、HEPA 壓損與風量(氣罩吸氣量)等參數全部輸入計算書，安全係數採 10%，最後計算出來之系統總壓損為 2850 Pa，計算結果如圖二十七所示。

(十) 以風量 17143 CMH 與系統總壓損 2850 Pa 作為風機運轉操作點，最後可藉由風機型錄資料或風機製造廠商開發之選機軟體[16]可找出合適之排氣風機，如圖二十八所示。

五、負壓隔離區間之整體通風系統設計步驟

除役作業空間須藉由整體通風系統建立正確之壓力梯度，以防治污染擴散。本計畫將整體通風系統設計流程歸納如圖二十九所示。

- (一) 輸入空間尺寸：丈量實驗空間(房間)之長、寬、高等尺寸。
- (二) 計算通風換氣量：通風系統由進氣子系統與排氣子系統所組成，故須分別計算系統之進氣量與排氣量。進氣量計算係

以每小時換氣次數(Air change per hour, 簡稱 ACH)20 次為基本量。排氣量計算部分, 相對於非除役作業區域, 除役作業空間須確保為負壓, 因此排氣量需大於進氣量。

(三) 設計管路尺寸: 藉由進氣量、排氣量與管路風速(一般通風系統合理之管路風速為 10 m/s 以下)等參數即可進行管路之設計。

(四) 選用過濾設備: 考量除役作業所產生之放射性懸浮微粒不會 100% 被局部排氣系統排除, 將有少量微粒仍將留存於空間內, 故在設計整體通風系統之排氣段時, 建議選用與局部排氣系統相同之過濾設備。

(五) 計算系統壓損: 進氣量、排氣量、管路尺寸、管路配置、管路材質、管件種類與過濾設備規格皆為影響系統壓損之主要因素。

(五) 選用通風風機: 主要以通風量與系統壓損作為風機操作點選用依據。

六、負壓隔離區間整體通風系統之實驗設計規劃

本研究亦發展整體通風系統設計規劃計算書, 整體通風系統計算案例假設為長 6m 寬 6m 高 4m 之空間, 具有進氣系統與排氣系統。進氣系統由進氣百葉、管路、進氣風機、送風口所組成; 排氣系統由排氣口、管路、過濾設備、排氣風機所組成。每

一組成元件之假設尺寸如圖三十所示，系統設計與計算過程如下所述：

- (一) 計算案例假設為長 6m 寬 6m 高 4m。進氣量係以 20 次換氣次數計算；排氣量比進氣量多 10%，即以 22 次換氣次數計算。風速上限為 10 m/s。風管統一設計為方型風管，每 50 mm 為一個計算級距。進氣量 2880 CMH 與風速低於 10 m/s 之設計條件下，進氣風管尺寸為 300 mm*300 mm，實際風速為 9.5 m/s。排氣量 3168 CMH 與風速低於 10 m/s 之設計條件下，排氣風管尺寸為 350 mm*300 mm，實際風速為 8.9 m/s。
- (二) 本實驗室內溫度亦設定於 30°C，空氣密度約 1.164 kg/m³，運動黏度約 1.608 x10⁻⁸ m²/s，如圖十八所示。
- (三) 進氣百葉、送風口與排氣吸入口等壓損可由產品型錄直接取得。其餘各類管件(例如轉接口與 90 度彎頭)與風機系統效應之壓力損失係數 C_v。可從 ASHRAE Handbook[13]與 ACGIH Manual[14]查表求得。節點 S2、S4、S5、S6、S8、S10、E3、E5、E6、E9、E10、E11、E13、E15 等節點之壓力損失係數查詢結果如圖三十二至圖四十一所示。
- (四) 進氣風管管路材質為鍍鋅鐵皮，絕對粗糙度為 0.15 mm；排氣系統風管管路材質包括鍍鋅鐵皮與不鏽鋼鐵皮，不鏽鋼

鐵皮之絕對粗糙度為 0.03 mm。

(五) 將前述進氣量、排氣量、管路尺寸、管件尺寸、數量、絕對粗糙度、壓力損失係數、HEPA 壓損等參數全部輸入計算書，安全係數採 10%，最後計算出來之進氣系統總壓損為 290 Pa，排氣系統總壓損為 910 Pa，計算結果如圖四十二與圖四十三所示。

(六) 以風量 2880 CMH 與系統壓損 290 Pa 作為進氣風機運轉操作點；風量 3168 CMH 與系統壓損 910 Pa 作為排氣風機運轉操作點，最後藉由風機製造廠商開發之選機軟體[15]分別找出合適之進氣與排氣風機，結果分別如圖四十四與圖四十五所示。

七、微粒污染擴散之電腦建模與模擬分析

本研究以既有相關文獻之模型為建置對象，透過不同模擬軟體之結果比對，檢討軟體是否可重複文獻之研究結果，藉此判斷軟體之可用性。本研究之模擬軟體系採用美國國家標準暨技術研究院(NIST)開發之 FDS，比對之文獻為 Fangzhi Chen 等人 [16]於 2006 年於 Atmospheric Environment 所刊出者。

驗證模型為長度、寬度、高度分別為 0.8m、0.4m、0.4m 之長方體空間，於該空間之左、右兩側水平置中處各設置一個風口，風口寬度與高度均為 0.04m，整體採左側上方進風，右側下

方排風，模型建置結果如圖四十六所示，其中右下側之紅色方塊為風機模組，其風速設定值為 0.225m/s，格點之設置係比照 Fangzhi Chen 等人之文獻設定(每個隔點之長度、寬度、高度均為 0.01m)。

由模擬結果比較所示，圖四十七 Fangzhi Chen 等人之文獻中所刊出之氣流流場模擬結果，圖四十八至圖五十則為本研究之軟體模擬結果。由兩者之結果比較可知，兩者之氣流方向(以向量箭頭表示)與分佈狀況均接近，因此本研究所採用之軟體具有相當之適用性，因此未來研究可進一步以軟體模擬之結果為依據。透過對於切割工作空間之氣流運動狀況之分析，以檢討不同空間(或局部)排氣設計之差異，以提出適合對應作業之合適排氣系統設計方案。

八、核設施除役拆除作業污染擴散安全考量事項

本研究根據前述文獻回顧之分析與彙整，輔以實際應用於核作業通風與排氣系統建置現場實務經驗之建議，提出以下建議安全考量事項

- (一) 除役作業區域(負壓隔離區間)通風系統須能建立正確之壓力梯度，讓氣流可自無污染區域流向污染區域，壓力梯度可參考前述 ASHRAE HandBook 所建議之數值。
- (二) 除役作業區域及其他具放射性污染區域須維持負壓，開口

與縫隙處須確保足夠進風速度，以防污染粒子外散。

(三) 除前述建立壓力梯度外，負壓隔離系統於設計及運轉階段其他要點如下：

1. 備援設計

(1) 相關進風風機、排風風機、過濾器等設備均應設計至少兩台，每台規格均須滿足 100%運轉之要求，單一設備故障時另一台可備援替代。

(2) 控制系統應採用具有雙模組且能自動備援之機種，於單一模組故障時，可立即切換另一組繼續運轉。且維修時亦應採用可熱拔插(Hot plugging)之設計，避免需斷電維修所致之風險。

(3) 重要感測元件應獨立設置兩套(或三套)，並輔以數據正確性之判斷系統，避免因數據錯誤(含斷線)而誤動作。

2. 機電設施電源規劃：重要機電設備應具有雙電源設計(台電+UPS/發電機或為台電 A 迴路+台電 B 迴路)，單一電源無法供應時，不影響另一組設備之運轉。

3. 控制系統電源規劃：控制系統應設置不斷電系統(UPS)與相關濾波器與保護器，避免因電源故障而致整體系統無法操作；同時應注意系統應確實獨立接地，以避免接地共用所產生之干擾。

4. 應有手動操作設置：於隔離區域邊界應有強制手動操作裝置。所有電源均無法工作時，仍可以人員手動方式進行全系統對外界之隔離操作。

(四) 除役工作區之排氣設計除應考慮壓力梯度、安全備援之外

1. 為使切割過程所產生之污染物能在第一時間就被捕捉，在鄰近切割點處應設置局部排氣系統，避免擴散後才捕捉所致之暴露風險。
2. 整體區域之通風系統可用來處理少量未經局部排氣捕捉之污染物，並維持整體氣流流向。然應注意空間中人員位置、設備位置都可能產生滯留區(污染物停留於部分區域中)之問題。
3. 針對滯留區的處理，除可透過改變障礙物之位置之外，亦可使用局部排氣系統予以加強，降低污染物滯留之問題。

(五) 變頻運轉兼顧安全與節能：前述風機、過濾器採用一開一備

運轉，建議平常應兩台同時開啟但變頻降載運轉，於單一故障時自動變頻加載，以維持系統正常運作。此設計方式除可於日常運轉中節省能源(特別是電力)消耗之外，亦可避免日常僅開啟一台系統，當主設備故障、備援機組因突然開機所造成氣壓不穩定或備援機種無預期跳機(系統完全無法運轉)之風險。

- (六) 通風系統之規劃設計須考量系統故障時，污染物不會擴散至鄰近乾淨區域。
- (七) 通風系統之規劃設計須考量到現場可能遭遇到之突發狀況或極端氣候，諸如火災、風災、淹水、高溫警報等，且針對各種突發狀況須具備相因應之系統操作程序。
- (八) 通風系統之排氣須符合國際及當地核安相關之法規。
- (九) 根據現場作業內容變化，通風系統須具備可易於擴充與變更之使用彈性。
- (十) 通風系統須根據建築物防火區劃而設置防火風門。
- (十一) 通風系統須定期檢視，確保功能健全。

九、軟體模擬驗證與應用方法檢討

根據上述研究結果可知，本研究所使用之模擬軟體具有相當之準確性。然而與文獻所比對之空間僅有 0.4mx0.4mx0.8m，與核設施除役過程所需使用之空間尺度有明顯之差異，因此本案建議未來應考量進行流場可視化實驗。根據實驗取得之數據，重新檢討軟體模擬工作流程、建模流程、輸入參數分析、參數調整等工作方法，使整體工作方法得以使模擬軟體之分析結果可應用於核設施除役之實際場所。主要預期成果係以建立軟體模擬整體工作方法為主，檢討軟體建模、輸入參數簡化、參數輸入調整、數據驗證等各個階段之工作方法、流程步驟，根據每次實

驗與模擬數據相互驗證之差異，重新再調整軟體建模相關參數，使實驗與模擬數據間之誤差降低，從定性分析逐漸成為定量分析，於流場可視化之觀察參數可包括

- (一) 氣流流向與速度：係針對空間中特定點之氣流於縱軸、橫軸、立軸各方向之流動速度。
- (二) 氣流壓力：係針對空間中特定點之氣流壓力，包括該點之全壓、靜壓或動壓。
- (三) 氣流溫度：特別用於檢討於切割而產生高溫狀況下，溫度與流場間之交互影響。
- (四) 粒子濃度分布：可進一步分為定性觀察或定量量測，前者可利用攝影之方式記錄不同時間下之粒子群濃淡分布狀況，後者則是利用儀表進一步量測粒子之濃度(mg/kg)。
- (五) 粒徑分布：檢討切割所產生之不同粒子粒徑之分布狀況。

然而針對場域之規劃，流場可視化實驗場域尺度建議可分兩個階段。第一階段為小型系統，尺度約為 1.0 m x 1.0 m x 1.0 m，小型系統具有響應快速、模擬格點數量少、模擬速度較快等優點，因此可以使軟體模擬整體工作方法得以快速建立。第二階段再將此工作方法應用於核設施除役所使用之實際空間尺度之驗證，此時系統尺度可以擴大到 3.0 m x 3.0m x 3.0m 或其他所內既有操作空間之中。

針對微粒種類之檢討。第一階段於實驗初期係以流場可視化作為軟體模擬工作流程、數據驗證為主要目標，因此產生粒子之方式可先以煙霧產生器代替，且應採用有色煙霧材料(或水)，不僅可維護人員與設備安全，亦便於觀察流場粒子流動分布狀況；第二階段可於空間內直接進行無核污染之金屬或非金屬材料切割作業，模擬實際除役過程所可能產生之微粒，此時採用之材質可為鋼鐵、不銹鋼、水泥塊或其他材料；如有需要，可考慮於第三階段切割具有污染之材料，此階段將另需要使用輻射量之量測儀器。

儀器規格之部分，建議之煙霧產生器規格包括粒徑分布位於微米至數十微米之間；造霧量 10~80g/min；工作電壓配合現場，可為 110/220VAC，50/60Hz；出霧口應具有可延伸之軟管，便於調整水霧出口方向。粒徑分析儀之規格為：可量測粒徑範圍為次微米至數十微米之間；可顯示 PM1、PM2.5、PM4、PM10 之個別單位體積下之微粒重量($\mu\text{g}/\text{m}^3$)、為粒取樣管可連接延伸型軟管(軟管表面不應會吸附微粒)，便於調整取樣點；量測數據除可記錄、即時顯示之外，亦可透過有線或無線(或記憶卡)之方式傳輸至 Windows 電腦系統；針對輻射量之量測儀器相關規格將視日後需要另行檢討。

前述 1.0 m x 1.0 m x 1.0 m 之系統設計時，應注意以下事項

- (一) 外殼應為透明材質，本體後方應放置顏色(配合可視化微粒之顏色)可便於攝影或照相之布幕或烤漆板。
- (二) 整體設置進風與出風口之位置需可調整，以利驗證不同風口位置下之微粒移動狀況。
- (三) 通風設備之風量、壓力需可調整，建議採用變頻或是可調風門設計，以利檢討不同風速、風量下之微粒移動狀況。
- (四) 本體周圍應靠考量量測儀表進入之空間與路徑不應造成流場之明顯干擾、不應阻礙空氣通道。
- (五) 相關風量之計算、設備規格之選用可參考本研究提出之相關計算表與使用方法，於此不再贅述。

肆、結論與建議

一、綜上所述，本研究已完成所有工作項目之相關工作，包括完成相關文獻蒐集與分析、電腦模擬建模分析、實驗初步規劃、排氣系統設計方法與計算書與範例說明、與污染擴散安全考量研擬等。

二、核設施除役之切割作業將產生具有放射性之微粒，其中以跟隨氣流移動之懸浮微粒風險最高，其擴散管制除應考量切割方法之選擇，亦應同時搭配良好的局部排氣及通風系統設計以達到擴散管制之目標。

三、除役切割方法之選用建議

(一) 應根據不同污染程度之部件搭配不同之切割方法。

(二) 往復鋸(機械式切割)之切割速度較慢，但懸浮微粒產生量較低；氧乙炔、電漿切割切割速度快，但懸浮微粒產生量也較高。

(三) 建議往復鋸切割可作為高污染部件除役主要拆解方法；若為低污染者，可使用氧乙炔或電漿切割以快速完成工作。

四、局部排氣系統安全考量事項

(一) 局部排氣系統之設計與設備選用方法如前述(請參閱 p.25 至 p.30)。

(二) 局部排氣口(氣罩)位置應設於切割點附近，於微粒產生的第

一時間就透過排氣將其帶離現場，避免產生擴散至大空間而難以捕捉。

(三) 局部排氣之氣流順暢與否影響其捕捉效率甚鉅，其重要注意事項如下所述：

1. 避免環境干擾氣流

鄰近氣罩之通風出風口之氣流過大、門窗縫隙有氣流滲入時，將降低氣罩之捕集性能，甚至導致失效，因此應盡量減少氣罩周圍之氣流干擾。

2. 避免人員之影響

作業人員之動作不應過大或移動過快，以避免造成氣流干擾，且人員作業位置不應阻擋氣流，以免造成鈍體尾流或氣流滯留區(Dead Zone)，使懸浮微粒回流至人員周圍。

3. 避免障礙物之影響

於氣流路徑中應避免放置物體，例如工具、置物檯等等，避免出現氣流滯留區，使該區域內之污染難以被捕捉。

4. 確保室內有足夠之補氣量與壓力

局部排氣系統之負壓應高於室內負壓，俾使切割點之微粒得以正確捕捉，若室內負壓過大或環境補氣量過低，都將不利於局部排氣，危害到工作者之安全。

五、除役拆除作業通風系統安全考量事項

(一) 通風系統之設計與設備選用方法如前述(請參閱 p.30 至 p.33)。

(二) 作業區域通風系統應建立正確之壓力梯度，壓力梯度值可參考前述 ASHRAE HandBook 所建議者。

(三) 負壓區之開口或縫隙之進風速度應足夠，以防污染擴散。

(四) 設計及運轉階段其他要點：

1. 備援設計

(1) 風機、過濾器等設備至少為一開機、一備援，且均為滿載之規格。

(2) 控制系統應具有雙模組且能自動備援、熱拔插(Hot plugging)之機種。

(3) 重要感測元件應獨立設置兩套或以上，並輔以數據正確性之判斷系統。

2. 電源備援

(1) 重要機電設備(例如進、排氣風機)應具有雙電源設計。

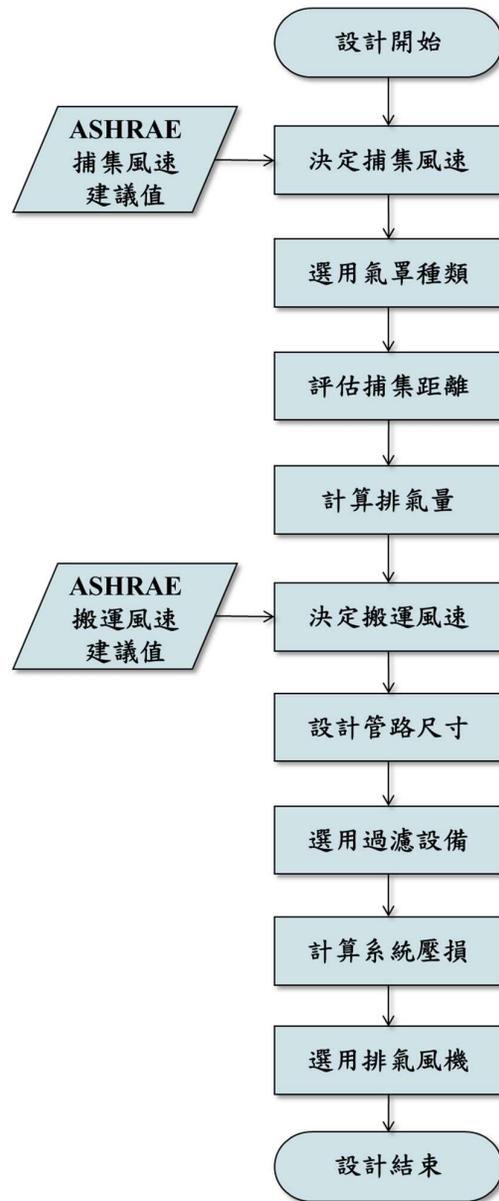
(2) 控制系統(含相關控制元件、感測器)應設置不斷電系統(UPS)與相關濾波器與保護器，同時應注意應確實獨立接地。

3. 應有手動操作設置：區域邊界應有強制手動操作裝置。

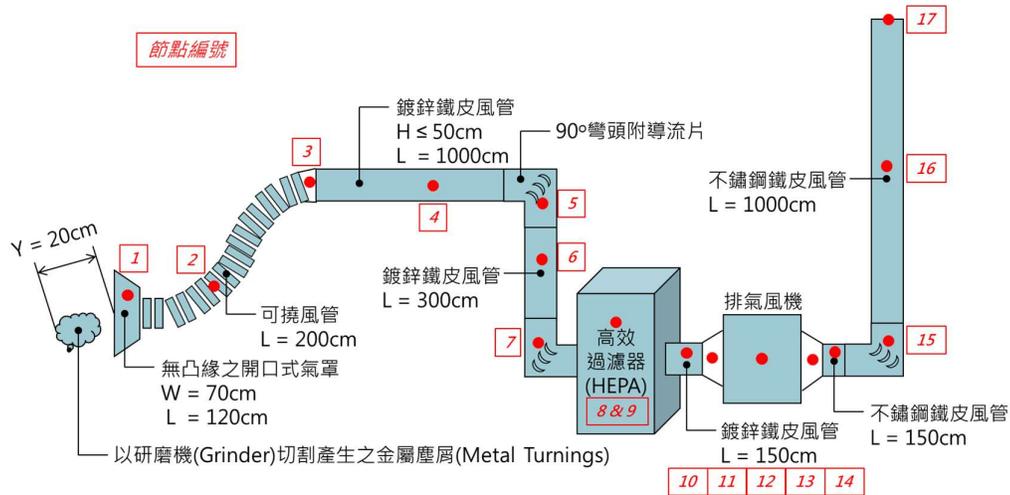
4. 變頻運轉兼顧安全與節能：前述風機、過濾器平常應兩台同

時開啟但變頻降載運轉，兼顧安全與節能。

5. 系統規劃設計須考量到現場可能遭遇到之突發狀況或極端氣候，針對各種突發狀況須具備相應之系統操作程序。
6. 排氣品質須符合國際及當地核安相關之法規。
7. 通風系統須具備可易於未來擴充與變更之使用彈性。
8. 通風系統須根據建築物防火區劃而設置防火風門。
9. 通風系統須定期檢視、備援應定期切換，確保功能健全。



圖十一、局部排氣系統設計流程



圖十二、局部排氣系統實驗設計規劃示意圖

Condition of Contaminant Dispersion	Examples	Capture Velocity, m/s
Released with essentially no velocity into still air	Evaporation from tanks, degreasing, plating	0.25 to 0.5
Released with low velocity into moderately still air	Container filling, low-speed conveyor transfers, welding	0.5 to 1.0
Active generation into zone of rapid air motion	Barrel filling, chute loading of conveyors, crushing, cool shakeout	1.0 to 2.5
Released at high velocity into zone of very rapid air velocity	Grinding, abrasive blasting, tumbling, hot shakeout	2.5 to 10

圖十三、污染物捕集速度選用結果

<p>開口式氣罩 (Opening Hood)</p> <p>使用限制 $W/L \geq 0.2$ 或圓型氣罩</p>	氣罩寬度	W	0.7	m	$W/L=0.58$
	氣罩長度	L	1.2	m	
	設計風速	V	10	m/s	不得小於汙染物捕集速度 V_{cap}
	氣罩吸氣口斷面中心至污染源發生源之垂直距離	Y	0.2	m	為保守計算，可採用吸氣口斷面中心至污染源最遠處之距離
	氣罩面積	A	0.84	m^2	
	氣罩周長	P_e	3.8	m	
	氣罩吸氣口斷面速度	V_s	14.76	m/s	
氣罩吸氣量	Q_s	4.76	CMS		

圖十四、氣罩吸氣量計算結果

Nature of Contaminant	Examples	Min. Transport Velocity, m/s
Vapor, gases, smoke	All vapors, gases, smoke	Usually 5 to 10
Fumes	Welding	10 to 13
Very fine light dust	Cotton lint, wood flour, litho powder	13 to 15
Dry dusts and powders	Fine rubber dust, molding powder dust, jute lint, cotton dust, shavings (light), soap dust, leather shavings	15 to 20
Average industrial dust	Grinding dust, buffing lint (dry), wool jute dust (shaker waste), coffee beans, shoe dust, granite dust, silica flour, general material handling, brick cutting, clay dust, foundry (general), limestone dust, asbestos dust in textile industries	18 to 20
Heavy dust	Sawdust (heavy and wet), metal turnings, foundry tumbling barrels and shakeout, sandblast dust, wood blocks, hog waste, brass turnings, iron boring dust, lead dust	20 to 23
Heavy and moist dust	Lead dust with small chips, moist cement dust, asbestos chunks from transite pipe cutting machines, buffing lint (sticky), quicklime dust	23 and up

圖十五、污染物搬運速度選用結果

編號	搬運風速 下限值	風量 CMH	風管型式代號 1為圓型 2為方型	風管型式	圓管管徑	方管寬度	方管高度	寬高比	搬運風速 實際值
	m/s				mm	mm	mm		m/s
1	23.0	17,143	1	圓管	500	---	---	1.0	24.3
2	23.0	17,143	2	方管	---	450	450	1.0	25.1

圖十六、局部排氣系統之風管尺寸計算結果

HEPA Filter Class *	Efficiency on 0.3 μm	Initial Pressure Drop (Pa)	Final Pressure Drop (Pa)
H13	99.95%	250	500
H14	99.995%	300	600

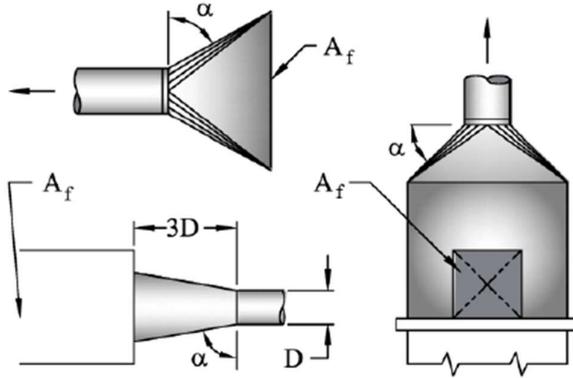
* European Standard EN 1882

圖十七、效率 99.995% HEPA 之壓損

Properties of air at 1 atm pressure							
Temp. T, °C	Density ρ, kg/m ³	Specific Heat c _p J/kg·K	Thermal Conductivity k, W/m·K	Thermal Diffusivity α, m ² /s	Dynamic Viscosity μ, kg/m·s	Kinematic Viscosity ν, m ² /s	Prandtl Number Pr
-150	2.866	983	0.01171	4.158 × 10 ⁻⁶	8.636 × 10 ⁻⁶	3.013 × 10 ⁻⁶	0.7246
-100	2.038	966	0.01582	8.036 × 10 ⁻⁶	1.189 × 10 ⁻⁶	5.837 × 10 ⁻⁶	0.7263
-50	1.582	999	0.01979	1.252 × 10 ⁻⁵	1.474 × 10 ⁻⁵	9.319 × 10 ⁻⁶	0.7440
-40	1.514	1002	0.02057	1.356 × 10 ⁻⁵	1.527 × 10 ⁻⁵	1.008 × 10 ⁻⁵	0.7436
-30	1.451	1004	0.02134	1.465 × 10 ⁻⁵	1.579 × 10 ⁻⁵	1.087 × 10 ⁻⁵	0.7425
-20	1.394	1005	0.02211	1.578 × 10 ⁻⁵	1.630 × 10 ⁻⁵	1.169 × 10 ⁻⁵	0.7408
-10	1.341	1006	0.02288	1.696 × 10 ⁻⁵	1.680 × 10 ⁻⁵	1.252 × 10 ⁻⁵	0.7387
0	1.292	1006	0.02364	1.818 × 10 ⁻⁵	1.729 × 10 ⁻⁵	1.338 × 10 ⁻⁵	0.7362
5	1.269	1006	0.02401	1.880 × 10 ⁻⁵	1.754 × 10 ⁻⁵	1.382 × 10 ⁻⁵	0.7350
10	1.246	1006	0.02439	1.944 × 10 ⁻⁵	1.778 × 10 ⁻⁵	1.426 × 10 ⁻⁵	0.7336
15	1.225	1007	0.02476	2.009 × 10 ⁻⁵	1.802 × 10 ⁻⁵	1.470 × 10 ⁻⁵	0.7323
20	1.204	1007	0.02514	2.074 × 10 ⁻⁵	1.825 × 10 ⁻⁵	1.516 × 10 ⁻⁵	0.7309
25	1.184	1007	0.02551	2.141 × 10 ⁻⁵	1.849 × 10 ⁻⁵	1.562 × 10 ⁻⁵	0.7296
30	1.164	1007	0.02588	2.208 × 10 ⁻⁵	1.872 × 10 ⁻⁵	1.608 × 10 ⁻⁵	0.7282
35	1.145	1007	0.02625	2.277 × 10 ⁻⁵	1.895 × 10 ⁻⁵	1.655 × 10 ⁻⁵	0.7268
40	1.127	1007	0.02662	2.346 × 10 ⁻⁵	1.918 × 10 ⁻⁵	1.702 × 10 ⁻⁵	0.7255
45	1.109	1007	0.02699	2.416 × 10 ⁻⁵	1.941 × 10 ⁻⁵	1.750 × 10 ⁻⁵	0.7241
50	1.092	1007	0.02735	2.487 × 10 ⁻⁵	1.963 × 10 ⁻⁵	1.798 × 10 ⁻⁵	0.7228
60	1.059	1007	0.02808	2.632 × 10 ⁻⁵	2.008 × 10 ⁻⁵	1.896 × 10 ⁻⁵	0.7202
70	1.028	1007	0.02881	2.780 × 10 ⁻⁵	2.052 × 10 ⁻⁵	1.995 × 10 ⁻⁵	0.7177
80	0.9994	1008	0.02953	2.931 × 10 ⁻⁵	2.096 × 10 ⁻⁵	2.097 × 10 ⁻⁵	0.7154
90	0.9718	1008	0.03024	3.086 × 10 ⁻⁵	2.139 × 10 ⁻⁵	2.201 × 10 ⁻⁵	0.7132
100	0.9458	1009	0.03095	3.243 × 10 ⁻⁵	2.181 × 10 ⁻⁵	2.306 × 10 ⁻⁵	0.7111
120	0.8977	1011	0.03235	3.565 × 10 ⁻⁵	2.264 × 10 ⁻⁵	2.522 × 10 ⁻⁵	0.7073
140	0.8542	1013	0.03374	3.898 × 10 ⁻⁵	2.345 × 10 ⁻⁵	2.745 × 10 ⁻⁵	0.7041

圖十八、空氣 30°C 時之氣體性質

TAPERED HOODS
 Flanged or unflanged; conical, square or rectangular. α is the major angle on rectangular hoods.



Face area (A_f) at least 2 times the duct area.

F_h Entry Loss Coefficient

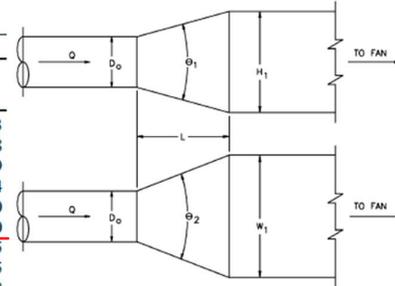
α	Conical	Rectangular
90	0.93	0.93
80	0.11	0.19
70	0.06	0.13
60	0.08	0.16
50	0.12	0.21
45	0.15	0.25
40	0.18	0.28
30	0.25	0.35
20	0.34	0.43
10	0.44	0.52
0	0.56	0.64

Note: 0° values represent round ducts butted into back of booth or hood without a rectangular to round transition.

圖十九、節點 1 之氣罩摩擦損失係數

ED4-2 Transition, Round to Rectangular, Exhaust/Return Systems

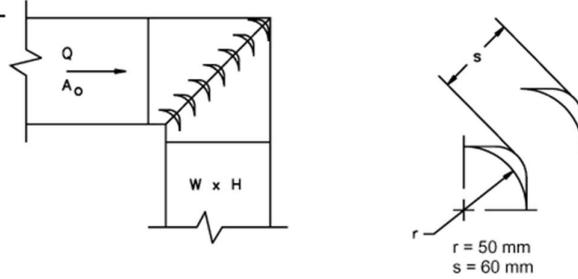
A_0/A_1	C_p Values													
	θ	0	3	5	10	15	20	30	45	60	90	120	150	180
0.063	0.0	0.17	0.19	0.30	0.46	0.53	0.64	0.77	0.88	0.95	0.95	0.94	0.93	
0.10	0.0	0.17	0.19	0.30	0.45	0.53	0.64	0.75	0.84	0.89	0.89	0.89	0.88	
0.167	0.0	0.18	0.19	0.30	0.44	0.53	0.63	0.72	0.78	0.79	0.79	0.79	0.79	
0.25	0.0	0.16	0.18	0.25	0.36	0.45	0.52	0.58	0.62	0.64	0.64	0.64	0.64	
0.50	0.0	0.14	0.14	0.15	0.22	0.25	0.30	0.33	0.33	0.33	0.32	0.31	0.30	
1.00	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
2.00	0.0	0.30	0.27	0.26	0.28	0.25	0.19	0.23	0.27	0.52	0.75	0.91	0.95	
4.00	0.0	1.60	1.14	0.84	0.85	0.86	0.76	0.90	1.09	2.78	4.30	5.65	6.55	
6.00	0.0	3.89	3.04	1.84	1.77	1.78	1.73	2.18	2.67	6.67	10.07	13.09	15.18	
10.00	0.0	11.80	9.31	5.40	5.18	5.15	5.05	6.44	7.94	19.06	28.55	36.75	42.75	



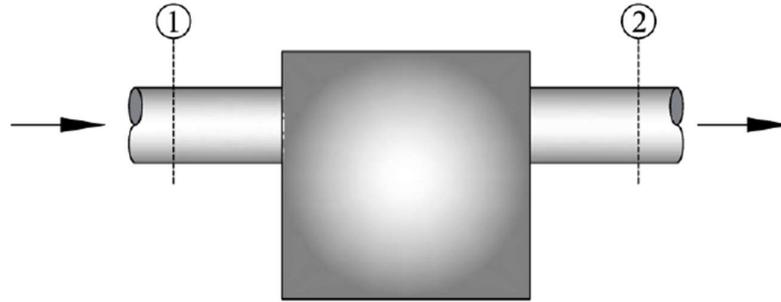
圖二十、節點 3 之管件摩擦損失係數

CR3-15 Elbow, Mitered, 90 Degree, Double-Thickness Vanes (60 mm Vane Spacing)

$C_o = 0.25$



圖二十一、節點 5、7、15 之管件摩擦損失係數



$$SP_2 - SP_1 = 1.5 VP_2$$

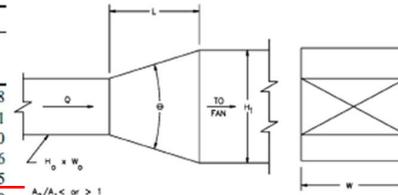
$$F_h = 1.5$$

$$C_e = 0.8$$

圖二十二、節點 8 之管件摩擦損失係數

ER4-1 Transition, Rectangular, Two Sides Parallel, Symmetrical, Exhaust/Return Systems

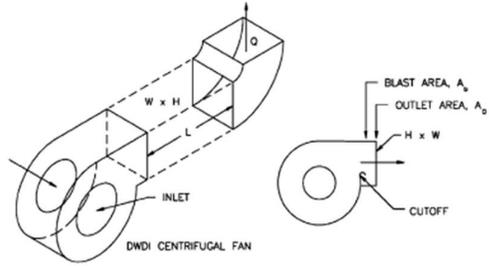
A_2/A_1	C_o Values													
	θ													
	0	3	5	10	15	20	30	45	60	90	120	150	180	
0.063	0.0	0.44	0.27	0.25	0.27	0.36	0.56	0.71	0.86	0.99	0.99	0.98	0.98	
0.10	0.0	0.41	0.27	0.23	0.25	0.34	0.53	0.69	0.83	0.94	0.94	0.92	0.91	
0.167	0.0	0.34	0.28	0.21	0.23	0.30	0.48	0.65	0.76	0.83	0.83	0.82	0.80	
0.25	0.0	0.26	0.29	0.17	0.19	0.25	0.42	0.60	0.68	0.70	0.70	0.68	0.66	
0.50	0.0	0.16	0.24	0.14	0.13	0.15	0.24	0.35	0.37	0.38	0.37	0.36	0.35	
1.00	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
2.00	0.0	0.30	0.38	0.25	0.17	0.17	0.17	0.23	0.29	0.49	0.66	0.81	0.88	
4.00	0.0	1.66	1.25	0.77	0.70	0.70	0.70	0.90	1.09	2.84	4.36	5.69	6.57	
6.00	0.0	4.05	3.14	1.76	1.58	1.58	1.58	2.12	2.66	6.71	10.11	13.13	15.20	
10.00	0.0	12.01	9.39	5.33	5.00	5.00	5.00	6.45	7.93	19.10	28.60	36.79	42.79	



圖二十三、節點 11 之管件摩擦損失係數

SR7-11 Fan Outlet, Centrifugal, DWDI, with Elbow (Position C)

A_b/A_o	C_o Values					
	L/L_e					
	0.00	0.12	0.25	0.50	1.0	10.0
0.4	5.50	4.50	3.20	1.60	0.0	0.0
0.5	3.80	3.20	2.20	1.00	0.0	0.0
0.6	2.90	2.50	1.60	0.80	0.0	0.0
0.7	2.00	1.60	1.00	0.53	0.0	0.0
0.8	1.40	1.20	0.80	0.33	0.0	0.0
0.9	1.20	0.80	0.67	0.26	0.0	0.0
1.0	1.00	0.80	0.53	0.26	0.0	0.0



$$V_o > 13 \text{ m/s: } L_e = \frac{V_o \sqrt{A_o}}{4500}$$

$$V_o \leq 13 \text{ m/s: } L_e = \frac{\sqrt{A_o}}{350}$$

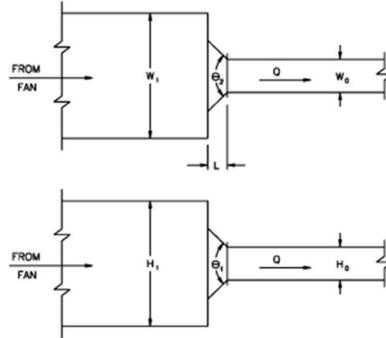
where:

V_o = duct velocity, m/s
 L_e = effective duct length, m
 A_o = duct area, mm²

圖二十四、節點 12 之管件摩擦損失係數

SR1-1 Conical Bellmouth/Sudden Contraction, Plenum to Rectangular, Supply Air Systems

L/D_h	C_o Values								
	θ								
	0	10	20	30	40	60	100	140	180
0.000	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
0.025	0.50	0.47	0.45	0.43	0.41	0.40	0.42	0.45	0.50
0.050	0.50	0.45	0.41	0.36	0.33	0.30	0.35	0.42	0.50
0.075	0.50	0.42	0.35	0.30	0.26	0.23	0.30	0.40	0.50
0.100	0.50	0.39	0.32	0.25	0.22	0.18	0.27	0.38	0.50
0.150	0.50	0.37	0.27	0.20	0.16	0.15	0.25	0.37	0.50
0.600	0.50	0.27	0.18	0.13	0.11	0.12	0.23	0.36	0.50



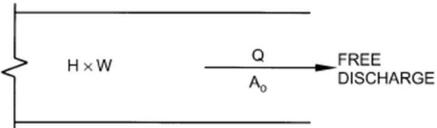
$$D_h = \frac{2 H_o W_o}{(H_o + W_o)}$$

θ IS LARGER OF θ_1 AND θ_2

圖二十五、節點 13 之管件摩擦損失係數

SR2-1 Abrupt Exit

H/W	Laminar Flow									
	0.1	0.2	0.9	0.999	1.0	1.001	1.1	4.0	5.0	10.0
C_o	1.55	1.55	1.55	1.55	2.00	1.555	1.55	1.55	1.55	1.55
Turbulent Flow										
$C_o = 1.0$										



圖二十六、節點 17 之管件摩擦損失係數

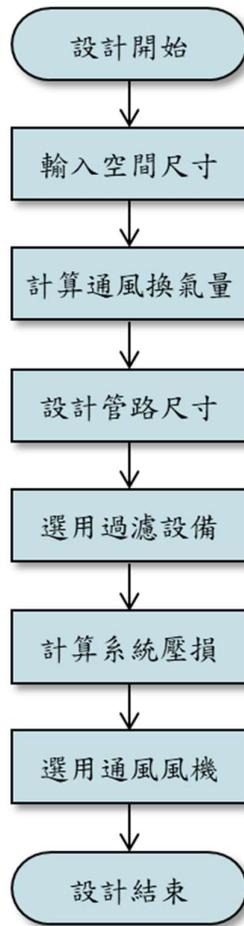
空氣密度 (kg/m ³)	1.164
空氣運動黏度係數 (m ² /s)	0.00001608

管路材質	絕對粗糙度 ϵ (mm)
鍍鋅鋼鐵皮	0.09~0.15
不鏽鋼鐵皮	0.03
PVC管	0.01~0.05
銅管	0.0015
玻璃管	0.0015
可撓性管	2~4

管路壓損安全係數	10%
----------	-----

節點編號	風管或管件	風量		絕對粗糙度 ϵ	風管型式代號 1為圓型 2為方型	風管型式	圓管管徑 mm	方管寬度 mm	方管高度 mm	管長 m	管件壓損係數 C_d	管件數量 pc	搬運風速		總壓損 Pa
		CMH	mm										m/s	Pa	
1	無源 PVC	17,143	0.050	1	圓管	500				0.93	1	24.3	318.68		
2	可撓風管	17,143	4.000	1	圓管	500				2.0	1	24.3	48.26		
3	方轉圓轉接	17,143	0.150	1	圓管	500				0.00	1	24.3	0.00		
4	直管_鍍鋅鐵皮	17,143	0.150	2	方管		450	450	10.0	0.25	1	25.1	117.96		
5	90度彎頭附導流片_鍍鋅鐵皮	17,143	0.150	2	方管		450	450		0.25	1	25.1	91.43		
6	直管_鍍鋅鐵皮	17,143	0.150	2	方管		450	450	3.0		1	25.1	35.39		
7	90度彎頭附導流片_鍍鋅鐵皮	17,143	0.150	2	方管		450	450		0.25	1	25.1	91.43		
8	過濾器箱體進出口_鍍鋅鐵皮	17,143	0.150	2	方管		450	450		1.5	1	25.1	548.58		
9	HEPA過濾材	17,143	-	2	方管						1	-	600.00		
10	直管_鍍鋅鐵皮	17,143	0.150	2	方管		450	450	1.5		1	25.1	17.69		
11	風機入口轉接_鍍鋅鐵皮	17,143	0.150	2	方管		450	450		0.07	1	25.1	25.60		
12	風機之系統效應	17,143	0.015	2	方管		450	450		0.0	1	25.1	0.00		
13	風機出口轉接_不鏽鋼鐵皮	17,143	0.030	2	方管		500	500		0.50	1	20.3	119.98		
14	直管_不鏽鋼鐵皮	17,143	0.030	2	方管		450	450	1.5		1	25.1	14.72		
15	90度彎頭附導流片_不鏽鋼鐵皮	17,143	0.030	2	方管		450	450		0.25	1	25.1	91.43		
16	直管_不鏽鋼鐵皮	17,143	0.030	2	方管		450	450	10.0		1	25.1	98.13		
17	排氣口	17,143	0.030	2	方管		450	450		1.00	1	25.1	25.1		
總計													2850		

圖二十七、局部排氣系統壓損計算結果



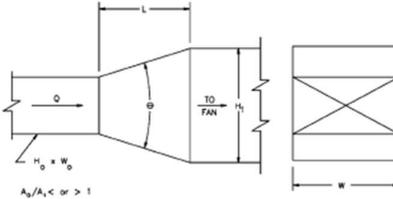
圖二十九、整體通風系統設計流程

項目	空間尺寸			換氣次數 (次/小時)	風量 CMH	風速上限 m/s	風管型式 代號 1為圓型 2為方型	風管型式	圓管管徑 mm	方管寬度 mm	方管高度 mm	寬高比	風速 實際值 m/s
	長(m)	寬(m)	高(m)										
進氣罩	6	6	4	20	2,880	10.0	2	方管	-----	300	300	1.0	9.5
排氣罩	6	6	4	22	3,168	10.0	2	方管	-----	350	300	1.2	8.9

圖三十一、空間通風量與風管尺寸計算結果

ER4-1 Transition, Rectangular, Two Sides Parallel, Symmetrical, Exhaust/Return Systems

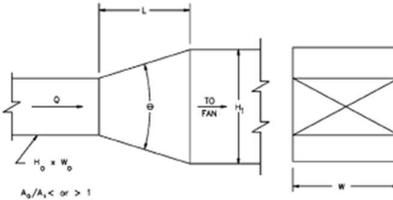
A_0/A_1	C_θ Values												
	0	3	5	10	15	20	30	45	60	90	120	150	180
0.063	0.0	0.44	0.27	0.25	0.27	0.36	0.56	0.71	0.86	0.99	0.99	0.98	0.98
0.10	0.0	0.41	0.27	0.23	0.25	0.34	0.53	0.69	0.83	0.94	0.94	0.92	0.91
0.167	0.0	0.34	0.28	0.21	0.23	0.30	0.48	0.65	0.76	0.83	0.83	0.82	0.80
0.25	0.0	0.26	0.29	0.17	0.19	0.25	0.42	0.60	0.68	0.70	0.70	0.68	0.66
0.50	0.0	0.16	0.24	0.14	0.13	0.15	0.24	0.35	0.37	0.38	0.37	0.36	0.35
1.00	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2.00	0.0	0.30	0.38	0.25	0.17	0.17	0.17	0.23	0.29	0.49	0.66	0.81	0.88
4.00	0.0	1.66	1.25	0.77	0.70	0.70	0.70	0.90	1.09	2.84	4.36	5.69	6.57
6.00	0.0	4.05	3.14	1.76	1.58	1.58	1.58	2.12	2.66	6.71	10.11	13.13	15.20
10.00	0.0	12.01	9.39	5.33	5.00	5.00	5.00	6.45	7.93	19.10	28.60	36.79	42.79



圖三十二、節點 S2 之管件摩擦損失係數

ER4-1 Transition, Rectangular, Two Sides Parallel, Symmetrical, Exhaust/Return Systems

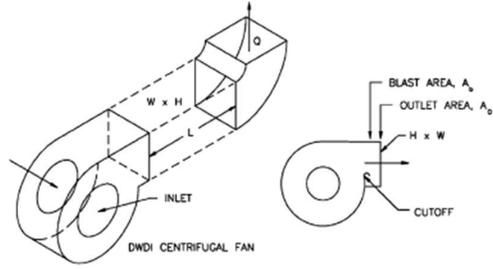
A_0/A_1	C_θ Values												
	0	3	5	10	15	20	30	45	60	90	120	150	180
0.063	0.0	0.44	0.27	0.25	0.27	0.36	0.56	0.71	0.86	0.99	0.99	0.98	0.98
0.10	0.0	0.41	0.27	0.23	0.25	0.34	0.53	0.69	0.83	0.94	0.94	0.92	0.91
0.167	0.0	0.34	0.28	0.21	0.23	0.30	0.48	0.65	0.76	0.83	0.83	0.82	0.80
0.25	0.0	0.26	0.29	0.17	0.19	0.25	0.42	0.60	0.68	0.70	0.70	0.68	0.66
0.50	0.0	0.16	0.24	0.14	0.13	0.15	0.24	0.35	0.37	0.38	0.37	0.36	0.35
1.00	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2.00	0.0	0.30	0.38	0.25	0.17	0.17	0.17	0.23	0.29	0.49	0.66	0.81	0.88
4.00	0.0	1.66	1.25	0.77	0.70	0.70	0.70	0.90	1.09	2.84	4.36	5.69	6.57
6.00	0.0	4.05	3.14	1.76	1.58	1.58	1.58	2.12	2.66	6.71	10.11	13.13	15.20
10.00	0.0	12.01	9.39	5.33	5.00	5.00	5.00	6.45	7.93	19.10	28.60	36.79	42.79



圖三十三、節點 S4 之管件摩擦損失係數

SR7-11 Fan Outlet, Centrifugal, DWDI, with Elbow (Position C)

A_b/A_o	C_o Values						
	L/L_e						
	0.00	0.12	0.25	0.50	1.0	10.0	
0.4	5.50	4.50	3.20	1.60	0.0	0.0	
0.5	3.80	3.20	2.20	1.00	0.0	0.0	
0.6	2.90	2.50	1.60	0.80	0.0	0.0	
0.7	2.00	1.60	1.00	0.53	0.0	0.0	
0.8	1.40	1.20	0.80	0.33	0.0	0.0	
0.9	1.20	0.80	0.67	0.26	0.0	0.0	
1.0	1.00	0.80	0.53	0.26	0.0	0.0	



$$V_o > 13 \text{ m/s: } L_e = \frac{V_o \sqrt{A_o}}{4500}$$

$$V_o \leq 13 \text{ m/s: } L_e = \frac{\sqrt{A_o}}{350}$$

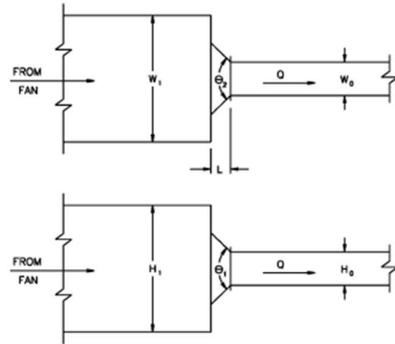
where:

V_o = duct velocity, m/s
 L_e = effective duct length, m
 A_o = duct area, mm²

圖三十四、節點 S5 之管件摩擦損失係數

SR1-1 Conical Bellmouth/Sudden Contraction, Plenum to Rectangular, Supply Air Systems

L/D_h	C_o Values								
	θ								
	0	10	20	30	40	60	100	140	180
0.000	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
0.025	0.50	0.47	0.45	0.43	0.41	0.40	0.42	0.45	0.50
0.050	0.50	0.45	0.41	0.36	0.33	0.30	0.35	0.42	0.50
0.075	0.50	0.42	0.35	0.30	0.26	0.23	0.30	0.40	0.50
0.100	0.50	0.39	0.32	0.25	0.22	0.18	0.27	0.38	0.50
0.150	0.50	0.37	0.27	0.20	0.16	0.15	0.25	0.37	0.50
0.600	0.50	0.27	0.18	0.13	0.11	0.12	0.23	0.36	0.50



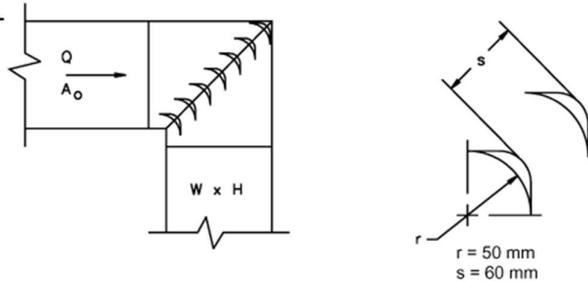
$$D_h = \frac{2 H_2 W_2}{(H_2 + W_2)}$$

θ IS LARGER OF θ_1 AND θ_2

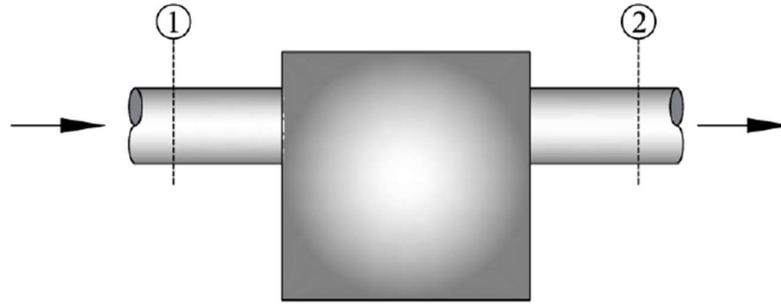
圖三十五、節點 S6 之管件摩擦損失係數

CR3-15 Elbow, Mitered, 90 Degree, Double-Thickness Vanes (60 mm Vane Spacing)

$C_o = 0.25$



圖三十六、節點 S8、S10、E3、E5、E13 之管件摩擦損失係數



$$SP_2 - SP_1 = 1.5 VP_2$$

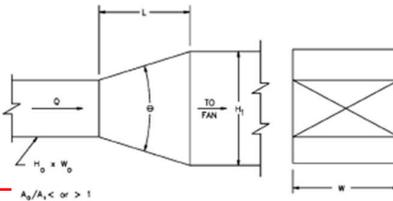
$$F_h = 1.5$$

$$C_e = 0.8$$

圖三十七、節點 E6 之管件摩擦損失係數

ER4-1 Transition, Rectangular, Two Sides Parallel, Symmetrical, Exhaust/Return Systems

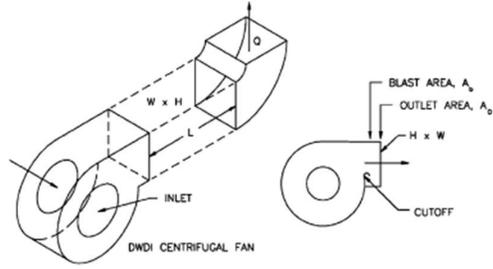
A_2/A_1	C_θ Values													
	0	3	5	10	15	20	30	45	60	90	120	150	180	
0.063	0.0	0.44	0.27	0.25	0.27	0.36	0.56	0.71	0.86	0.99	0.99	0.98	0.98	
0.10	0.0	0.41	0.27	0.23	0.25	0.34	0.53	0.69	0.83	0.94	0.94	0.92	0.91	
0.167	0.0	0.34	0.28	0.21	0.23	0.30	0.48	0.65	0.76	0.83	0.83	0.82	0.80	
0.25	0.0	0.26	0.29	0.17	0.19	0.25	0.42	0.60	0.68	0.70	0.70	0.68	0.66	
0.50	0.0	0.16	0.24	0.14	0.13	0.15	0.24	0.35	0.37	0.38	0.37	0.36	0.35	
1.00	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
2.00	0.0	0.30	0.38	0.25	0.17	0.17	0.17	0.23	0.29	0.49	0.66	0.81	0.88	
4.00	0.0	1.66	1.25	0.77	0.70	0.70	0.70	0.90	1.09	2.84	4.36	5.69	6.57	
6.00	0.0	4.05	3.14	1.76	1.58	1.58	1.58	2.12	2.66	6.71	10.11	13.13	15.20	
10.00	0.0	12.01	9.39	5.33	5.00	5.00	5.00	6.45	7.93	19.10	28.60	36.79	42.79	



圖三十八、節點 E9 之管件摩擦損失係數

SR7-11 Fan Outlet, Centrifugal, DWDI, with Elbow (Position C)

A_b/A_o	C_o Values						
	L/L_e						
	0.00	0.12	0.25	0.50	1.0	10.0	
0.4	5.50	4.50	3.20	1.60	0.0	0.0	
0.5	3.80	3.20	2.20	1.00	0.0	0.0	
0.6	2.90	2.50	1.60	0.80	0.0	0.0	
0.7	2.00	1.60	1.00	0.53	0.0	0.0	
0.8	1.40	1.20	0.80	0.33	0.0	0.0	
0.9	1.20	0.80	0.67	0.26	0.0	0.0	
1.0	1.00	0.80	0.53	0.26	0.0	0.0	



$$V_o > 13 \text{ m/s: } L_e = \frac{V_o \sqrt{A_o}}{4500}$$

$$V_o \leq 13 \text{ m/s: } L_e = \frac{\sqrt{A_o}}{350}$$

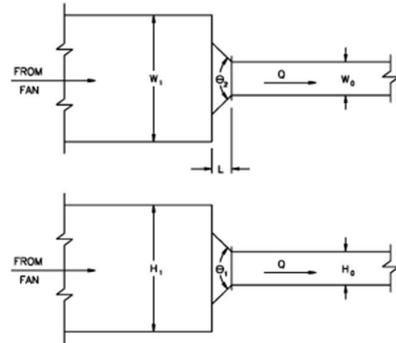
where:

V_o = duct velocity, m/s
 L_e = effective duct length, m
 A_o = duct area, mm²

圖三十九、節點 E10 之管件摩擦損失係數

SR1-1 Conical Bellmouth/Sudden Contraction, Plenum to Rectangular, Supply Air Systems

L/D_h	C_o Values									
	θ									
	0	10	20	30	40	60	100	140	180	
0.000	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
0.025	0.50	0.47	0.45	0.43	0.41	0.40	0.42	0.45	0.50	
0.050	0.50	0.45	0.41	0.36	0.33	0.30	0.35	0.42	0.50	
0.075	0.50	0.42	0.35	0.30	0.26	0.23	0.30	0.40	0.50	
0.100	0.50	0.39	0.32	0.25	0.22	0.18	0.27	0.38	0.50	
0.150	0.50	0.37	0.27	0.20	0.16	0.15	0.25	0.37	0.50	
0.600	0.50	0.27	0.18	0.13	0.11	0.12	0.23	0.36	0.50	



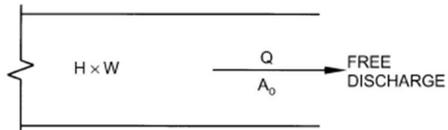
$$D_h = \frac{2 H_o W_o}{(H_o + W_o)}$$

θ IS LARGER OF θ₁ AND θ₂

圖四十、節點 E11 之管件摩擦損失係數

SR2-1 Abrupt Exit

H/W	Laminar Flow									
	0.1	0.2	0.9	0.999	1.0	1.001	1.1	4.0	5.0	10.0
C_o	1.55	1.55	1.55	1.55	2.00	1.555	1.55	1.55	1.55	1.55
Turbulent Flow										
$C_o = 1.0$										



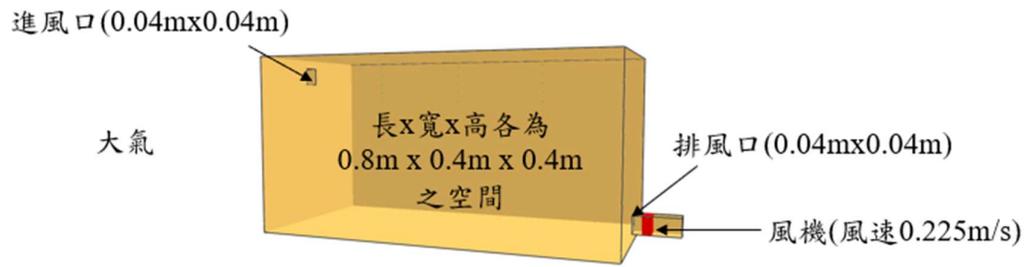
圖四十一、節點 E15 之管件摩擦損失係數

編號	風管或管件	風量		絕對粗糙度 ϵ	風管型式代號 1為圓型 2為方型	風管型式	圓管管徑	方管寬度	方管高度	管長	管件壓 損係數	管件數量	風速	總壓損
		CMH	mm				mm	mm	mm		m			
S1	進氣百葉	2,880	0.150	2	2	方管	800	800				1	2.5	30.00
S2	轉接	2,880	0.150	2	2	方管		300	300		2.5	1	9.5	130.64
S3	直管 鍍鋅鐵皮	2,880	0.150	2	2	方管		300	300	3.0			9.5	8.90
S4	風機入口轉接	2,880	0.150	2	2	方管		300	300		0.0	1	9.5	0.00
S5	風機系統效應	2,880	0.150	2	2	方管		300	300		0.0	1	9.5	0.00
S6	風機出口轉接	2,880	0.150	2	2	方管		300	300		0.5	1	9.5	26.13
S7	直管 鍍鋅鐵皮	2,880	0.150	2	2	方管		300	300	2.0			9.5	5.93
S8	90度彎頭附導流片 鍍鋅鐵皮	2,880	0.150	2	2	方管		300	300		0.25	1	9.5	13.06
S9	直管 鍍鋅鐵皮	2,880	0.150	2	2	方管		300	300	3.0			9.5	8.90
S10	90度彎頭附導流片 鍍鋅鐵皮	2,880	0.150	2	2	方管		300	300		0.25	1	9.5	13.06
S11	直管 鍍鋅鐵皮	2,880	0.150	2	2	方管		300	300	2.0			9.5	5.93
S12	送風口	2,880	0.150	2	2	方管		300	300			1	2.5	290
總計														290

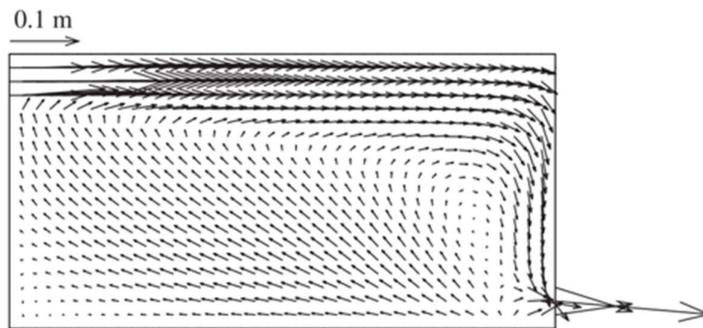
圖四十二、進氣管路壓損計算結果

編號	風管或管件	風量		絕對粗糙度 ϵ	風管型式代號 1為圓型 2為方型	風管型式	圓管管徑	方管寬度	方管高度	管長	管件壓 損係數	管件數量	風速	總壓損
		CMH	mm				mm	mm	mm		m			
E1	排氣吸入口	3,168	0.150	2	2	方管	350	300				1	2.5	20.00
E2	直管 鍍鋅鐵皮	3,168	0.150	2	2	方管		350	300	3.0			8.9	7.27
E3	90度彎頭附導流片 鍍鋅鐵皮	3,168	0.150	2	2	方管		350	300		0.25	1	8.9	11.65
E4	直管 鍍鋅鐵皮	3,168	0.150	2	2	方管		350	300	3.0			8.9	7.27
E5	90度彎頭附導流片 鍍鋅鐵皮	3,168	0.150	2	2	方管		350	300		0.25	1	8.9	11.65
E6	過濾器箱體進出口 鍍鋅鐵皮	3,168	0.150	2	2	方管		350	300		1.5	1	8.9	69.89
E7	HEPA過濾器	3,168	0.150	2	2	方管		350	300			1	8.9	600.00
E8	直管 鍍鋅鐵皮	3,168	0.150	2	2	方管		350	300	1.5			8.9	3.63
E9	風機入口轉接 鍍鋅鐵皮	3,168	0.150	2	2	方管		350	300		0.07	1	8.9	3.26
E10	風機之系統效應	3,168	0.150	2	2	方管		350	300		0.0	1	8.9	0.00
E11	風機出口轉接 不鏽鋼鐵皮	3,168	0.030	2	2	方管		350	350		0.5	1	7.7	17.06
E12	直管 不鏽鋼鐵皮	3,168	0.030	2	2	方管		350	300	1.5			8.9	3.22
E13	90度彎頭附導流片 不鏽鋼鐵皮	3,168	0.030	2	2	方管		350	300		0.25	1	8.9	11.65
E14	直管 不鏽鋼鐵皮	3,168	0.030	2	2	方管		350	300	5.0			8.9	10.73
E15	排氣口	3,168	0.030	2	2	方管		350	300			1	8.9	4650
總計														910

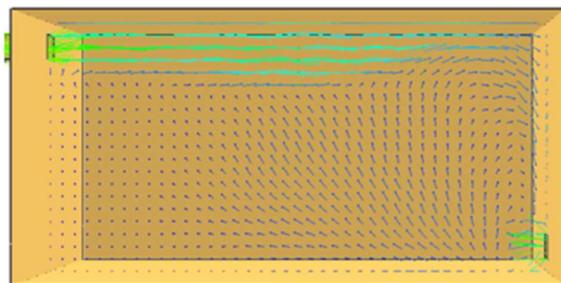
圖四十三、排氣管路壓損計算結果



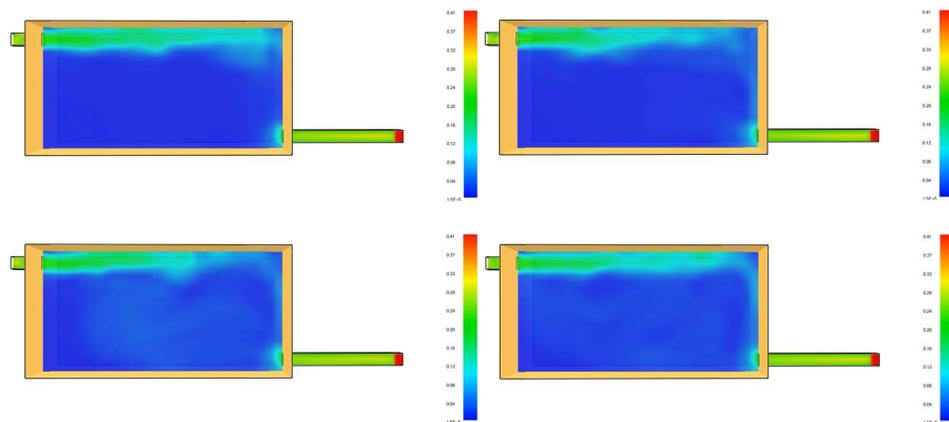
圖四十六、本研究建立之驗證模型



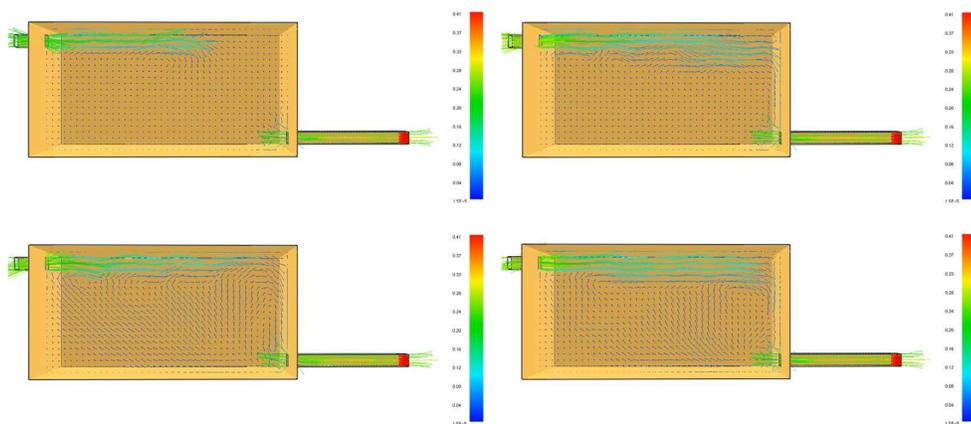
圖四十七、文獻之模擬結果(速度向量圖)[16]



圖四十八、本研究軟體之模擬結果(速度向量圖)



圖四十九、本研究模擬之動畫截圖(速度分布圖)



圖五十、本研究模擬之動畫截圖(速度向量圖)

伍、参考文献

1. Nakkyu Chae et. al., “Aerodynamic Diameter and Radioactivity Distributions of Radioactive Aerosols from Activated Metals Cutting for Nuclear Power Plant Decommissioning”, *Journal of Hazardous Materials*, 369(2019)727-745.
2. Sun Il Kim et. al., “A Study on Characteristics and Internal Exposure Evaluation of Radioactive Aerosols during Pipe Cutting in Decommissioning of Nuclear Power Plant”, *Nuclear Engineering and Technology*, 50(2018)1088-1098.
3. L. Bonavigo et. al., “Radioactivity Release and Dust Production during the Cutting of the Primary Circuit of a Nuclear Power Plant: The Case of E. Fermi NPP”, *Progress in Nuclear Energy*, 52(2010)359-366.
4. Lucia Bonavigo et. al., “Contamination Spread during Decommissioning of a Nuclear Power Plant”, *Fresenius Environmental Bulletin*, 19(2010) 2444-2448.
5. Ana Beatriz Mendes Lopez, “Laser Cutting in Decommissioning of Nuclear Power Stations”, *Thesis of Science Degree in Mechanical Engineering*, Instituto Superior Técnico, Lisbon University, Lisbon, Portugal, 2015.

6. ASHRAE(2019), Nuclear Facilities, ASHRAE Handbook - Applications, Ch29, Atlanta : ASHRAE Inc.
7. Office for Nuclear Regulation(2020), Nuclear Safety Technical Assessment Guide - Ventilation, ONR Guide (NS-TAST-GD-022 Revision 5).
8. 經濟部工業局(1996), 局部排氣系統設計, 工業污染防治技術手冊(ISBN 957-00-7113-3), 臺北市: 經濟部。
9. ASHRAE(2019), Industrial Local Exhaust Systems, ASHRAE Handbook - Applications, Ch33, Atlanta : ASHRAE Inc.
10. 黃榮芳等人(2020), 工業通風原理與實務-通風系統設計與改良方法, 臺北市: 中華環保安全衛生協會。
11. 勞動部勞動及職業安全衛生研究所(2015), 建立可移動式通風設施設置與維護指引, 勞動部研究計畫(ILOSH103-H307), 臺北市: 勞動部。
12. G. de With, CFD modeling of radioactive pollutants in a radiological laboratory, WIT Transactions on Enology and the Environment, 123(2009).
13. ASHRAE(2009), Duct Design, ASHRAE Handbook - Fundamentals, Ch21, Atlanta : ASHRAE Inc.

14. ACGIH(2016), Industrial Ventilation: A Manual of Recommended Practice for Design, 29th Edition.
15. KRUGER VENTILATION , 風機選機軟體。
16. Fangzhi Chen, Simon C.M. Yu, Alvin C.K. Lai, Modeling particle distribution and deposition in indoor environments with a new drift-flux model, Atmospheric Environment, 40(2006)357–367.