

呼吸性傳染之隔離病室空調系統 設計施工要點

王茂榮

工業技術研究院能資所研究室

前言

開放性肺結核病菌會隨著病患所呼出之空氣，傳染給鄰近的人，尤其是抵抗力較弱的人，更容易被感染。肺結核病菌之飛沫核 (airborne droplet nuclei)，可在病人打噴嚏、咳嗽或說話時，由肺部或喉部藉由空氣傳染而擴散。藉空氣傳染之病原核能在空氣中停留相當長的時間，直到其藉由通風、空氣濾清、沉澱、或被人們吸入等方式而稀釋或消失。抵抗力弱之人們可因吸入肺結核菌之病原核而被感染。根據美國疾病管制中心 (Centers for Disease Control and Prevention, CDC) 的記錄，被肺結核菌感染的人在他們的有生年間，有 10% 的機會成為實際肺結核病患。而根據衛生署防疫處之統計，台灣目前肺結核病人之數量已經超過 9 萬多人，此數據且一直往上攀升，防治肺結核病之擴散，除了加強對病患之用藥管理外，在醫院針對開放性肺結核病人之住院治療期間，更應予以隔離，以免感染其他病患。國內近兩年來基於肺結核病人

住院之需求，不少醫院陸續設置呼吸性傳染之隔離病室，由於大多數隔離病室係利用普通病房改建，設計施工上困難度較高；加上醫院工作人員本身對隔離病室之空調等設施需求並不一定完全了解，因此會有改建後之隔離病室，無法符合基本功能需求。本文即針對呼吸性傳染之隔離病室空調系統，在設計施工上應具備之要點提出討論，並就教於國內專家。

防止呼吸性疾病傳染之方法

一般可透過空氣傳染之病原不外乎細菌及病毒兩種，肺結核菌屬於細菌之一種，其尺寸約為 0.5 microns 左右 (一般人之頭髮直徑約 100 microns，而 15 microns 以下之微粒，裸眼就無法看到)，結核菌與一般細菌類似，通常會聚集成群粒，隨著空氣四處飄浮散播，防不勝防；在強烈的紫外線照射下，一至二小時方可滅除，因此針對結核菌之防禦，建議採用以下之措施：

1. 以隔離病患之方式，防止擴散傳染。

2. 以正負壓差之控制，避免向外滲透。

3. 以空調換氣之方式，稀釋病菌含量。

以上三要點亦是我們在規劃設計呼吸性隔離病室時，必須要掌握的三項原則。茲一一說明如下：

一、以隔離病患之方式，防止擴散傳染

利用具有與一般區域隔離功效之病室，將病人置於其中，因此作為病室之建築物部分，必須具有氣密之功能；病室與一般區之間，必須有前室(anteroom)之設置，以避免人員進出時，病室內具有感染性之氣體隨著人員走動之氣流外洩；病室與前室間以及前室與一般區之間的兩道門，必須設計能隨時保持關閉。

二、以正負壓差之控制，避免向外滲透

為了避免病室內具有感染性之氣體外洩，病室內之壓力應維持在最低條件下，至於差壓應該多少才算安全，應考慮當門開時，如果有人員進出，能保證氣流不會從病室內往外滲出；根據研究文獻[1]之建議，負壓如維持在 -7Pa （約 $0.76\text{mmH}_2\text{O}$ 或 $0.03\text{in. H}_2\text{O}$ ）以上時，病室與一般區間氣體之洩漏量將小於1%；因此，基於系統衰減之安全考量，個人對於國內呼吸性隔離病室之負壓值，建議病室對前室最好能維持在 $1\text{mmH}_2\text{O}$ 以上之壓力，前室對一般區則可略減為 $0.5\text{mmH}_2\text{O}$ 以上之壓力，此壓力在建築物具有適當的氣密條件下，只要病房內之排氣量略大於進氣量10至15%

左右，即可以非常容易達到，且不會因壓差形成之風阻，而造成開門或關門不易之問題。

三、以空調換氣之方式，稀釋病菌含量

引入適量的外氣，可將病房內病人所咳出之病菌藉由空氣帶走，以稀釋病菌之濃度，減少周圍其他人受感染之機會。因此引入適當之外氣，或稱適當之換氣量（新鮮之外氣），是防治結核菌傳染相當有效的一種好方法。

換氣量越高對於病菌之稀釋效果當然越好，不過基於有效與能源合理化之考量，依據ASHRAE Application Handbook（美國冷凍空調工程師學會所出版之技術手冊）的建議，換氣應採用全部外氣，換氣量以每小時六次以上為原則。如果以一間：寬5公尺深8公尺高3公尺之病房為例，每小時六次之換氣量為： $5\text{公尺} \times 8\text{公尺} \times 3\text{公尺} \times 6\text{次/小時} \div 60\text{分/小時} = 12\text{CMM}$ ，換句話說，病房內新鮮外氣之送風量，每分鐘不應少於12立方公尺或是420CFM（立方英尺/分鐘）左右。

此外，透過空調系統的溫溼度控制，可以達到適當環境控制目的，來降低病菌之活躍性與成長率，亦有助於減低傳染之風險。

隔離病室空調系統規劃設計要點

隔離病室空調系統之規劃設計首應掌握上述之基本原則，再配合現場之建築架構來進行相關設備之配置，

茲就隔離病室之空調設計，歸納出以下幾項要點，提供作為設計者參考：

一、隔離病室必須設有前室，作為人員進出之緩衝區；前室之空間不須太大，但應滿足病床進出時，所需要的動線與迴旋空間。如僅針對單純的肺結核病人來設計隔離病室時，前室應設計比外走廊之壓力為低，但比隔離病室之壓力高，以確保房門打開時，氣流之流向係由外走廊向病室內流動。

二、負壓控制條件：隔離病室氣壓應低於前室 $1\text{mmH}_2\text{O}$ 以上，前室氣壓應低於一般區 $0.5\text{mmH}_2\text{O}$ 以上，以確保氣流不會向走廊滲漏。

三、空調系統應採用全換氣系統，如屬於舊有病室改建為隔離病室者，由於考量既有建築之空間不足，風管等配置不易，換氣量建議值為每小時 6 次以上；新建隔離病室在設計時，則應考慮每小時有 12 次以上之換氣量。

四、排氣量應比送風量大 15% 左右，加上建築及門窗等有良好的氣密處理，即可維持相當的負壓條件。

例如：隔離病室內淨空間為 $6 \times 6 \times 2.5$ 公尺，合計 90m^3 ，如屬於舊病室改建，應選用： $90\text{m}^3/\text{次} \times 6\text{次}/\text{hr} = 540\text{m}^3/\text{hr}$ (約 320 CFM) 之送風量；排氣應選用： $320\text{CFM} \times 1.15 =$ 約 370 CFM。前室與廁所之送、排氣量依此類推，將所有空間之送、排氣量分開加總後，即可選出隔離病室所需之外氣空調箱與排氣風車組之風量值。

五、排氣風車裝於樓頂為最佳地點；如裝於病室或前室之天花板上方，不但噪音較大，且因空間不足，維護非常困難且易造成感染，並不建議採用。

六、隔離病室空調系統之配置如圖一所示，供設計參考，排氣空調箱若不影響周遭環境（與其他進氣口相隔 10 公尺以上距離），出風口可直接往高空排出（出風口應高出屋頂突出物，例如：樓梯間等 3 公尺以上），出風口不需要設置雨遮或作成鵝頸管，但應以鋼絲加強立管之固定；排氣若不影響周遭環境，排氣空調箱並不一定要裝設 HEPA 作後處理；排氣風車前後可加設紫外線殺菌燈，以保護維修人員之安全。

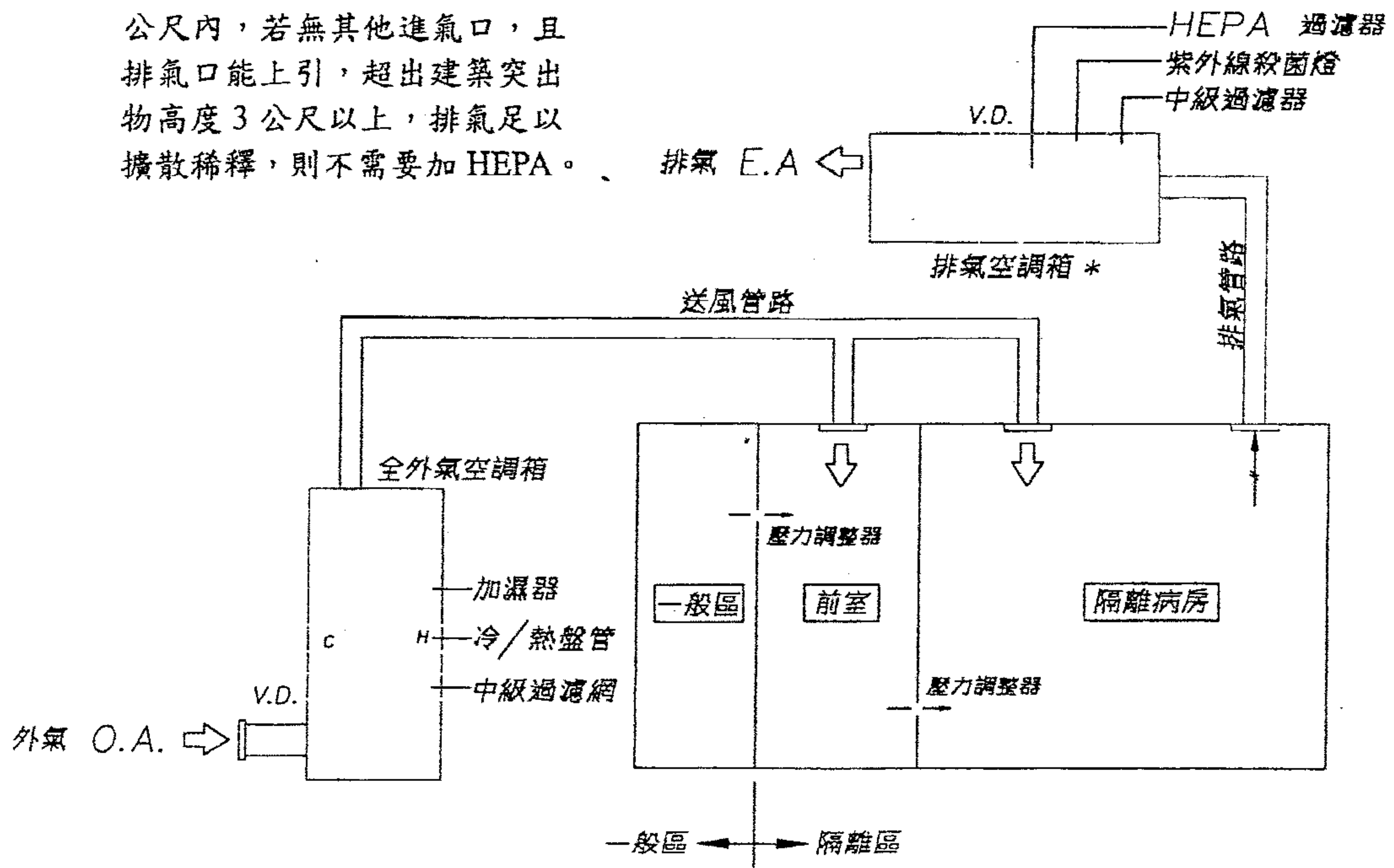
七、如必須採用如濾網等可能被污染之空調器材，盡量將其設計在屋頂或空曠之室外，勿設於室內，以減少換修時之感染風險。

八、隔離病室與前室之門可加視窗，並應該隨時保持關閉（可利用門弓器調整或自動關門器）。

九、空氣簾無法達到氣流隔絕之功能，如角度調整不當反而會導致氣流外引，不應使用於隔離病室替代隔離門。

十、分離式冷氣機、小型送風機或窗型冷氣機等會有使用再循環空氣者，由於其本身之濾網上會聚積病菌，易造成未來維護人員感染之危險。故不適用於隔離病室。

*排氣空調箱置於樓頂，周邊 10 公尺內，若無其他進氣口，且排氣口能上引，超出建築突出物高度 3 公尺以上，排氣足以擴散稀釋，則不需要加 HEPA。



圖一 隔離病房空調系統配置圖

- 十一、隔離病室內浴廁之排氣，應直接接到隔離病室專用的排氣風管系統，勿排到原有建築之管道內。
- 十二、隔離病室之排氣風管上可加裝風壓開關 (flow switch)，監測風車是否正常動作。
- 十三、隔離病室內的負壓訊號應接到護理站，隨時可監視病房之負壓情況。
- 十四、利用一般病室改建成隔離病室時，病室建築之氣密性須加強，尤其天花板上方之隔牆須砌到頂，並以發泡材料確實密封；亦可採用氣密式天花板施工。
- 十五、在隔離病室與前室及前室與走廊之間安裝調壓風門 (或稱釋壓風門)，可以穩定的維持病室與前室及前室與一般區之負壓值。
- 十六、隔離病室及前室之窗戶以固定窗為佳，除氣密性較佳外，更可避免病患隨意打開窗戶影響負壓之建立；但須考量消防逃生問題，不宜採用強化玻璃。
- 十七、避免將同一間病室設計成感染隔離 (負壓系統) 與保護隔離 (正壓系統) 通用之系統。由於兩者使用條件截然不同，以及考慮人為操作的疏失或錯誤，不應採用此種設計。

表一 結核病隔離病室室壓與室內氣流及對合格建築之要求 (美國規範)

	ASHRAE	CDC	OSHPD
負壓 (-)	是	是 0.25Pa (0.001in. H ₂ O)	是 0.25Pa (0.001 in. H ₂ O)
排氣至戶外	是	是	是
回風循環	否	否 (在現有建築物中： 是，但須使用 HEPA 過 濾網)	否
每小時最小換氣量	6 次	現有建築物中：6 次 新或修繕過之建築物： 12 次	現有建築物中：未提及 新或修繕過之建築物：10 次
最小外氣量	2 次	未提及	2 次
室內氣流建議	無	排氣量：10% 或 24L/s (50ft ³ /min) 大於進風量	排氣量應大於送風量 35L/s (75ft ³ /min) 以上，或者 $\Delta P < 0$ 負壓條件及在移動開口處 之氣流 $V=0.51\text{m/s}$ (100ft/ min)

註：以上數據僅供參考，肺結核之隔離要求屬於第三級防護；以筆者實際參觀在華盛頓之 Johns Hopkins Hospital 及 CDC 之實際做法，針對第三級防護之隔離病室，其負壓控制值均在 0.01 in. H₂O (即 2.5mmH₂O 或 25Pa 左右)。

國內隔離病室改建所面臨之問題

近兩年來衛生署有感於國內肺結核病患與日俱增，乃部分補助醫院增設隔離病室，並委託能資所協助受補助之醫院，解決既有病房改建所面臨之問題。筆者經過兩年之察訪與檢測，包括提供技術諮詢及協助改善計畫審核之醫院已有五十餘家，就國內

一般病室改建為隔離病室所經常面臨之問題，歸納如下：

一、將就既有建築隔間，氣密性未妥善處理

由於國內目前泰半以普通病室改建為隔離病室，原有建築物包括隔間牆、門窗等之氣密性均不夠，如果施工時未能補強此部份之氣密條件，即使排氣量比送風量大一倍，負壓也建

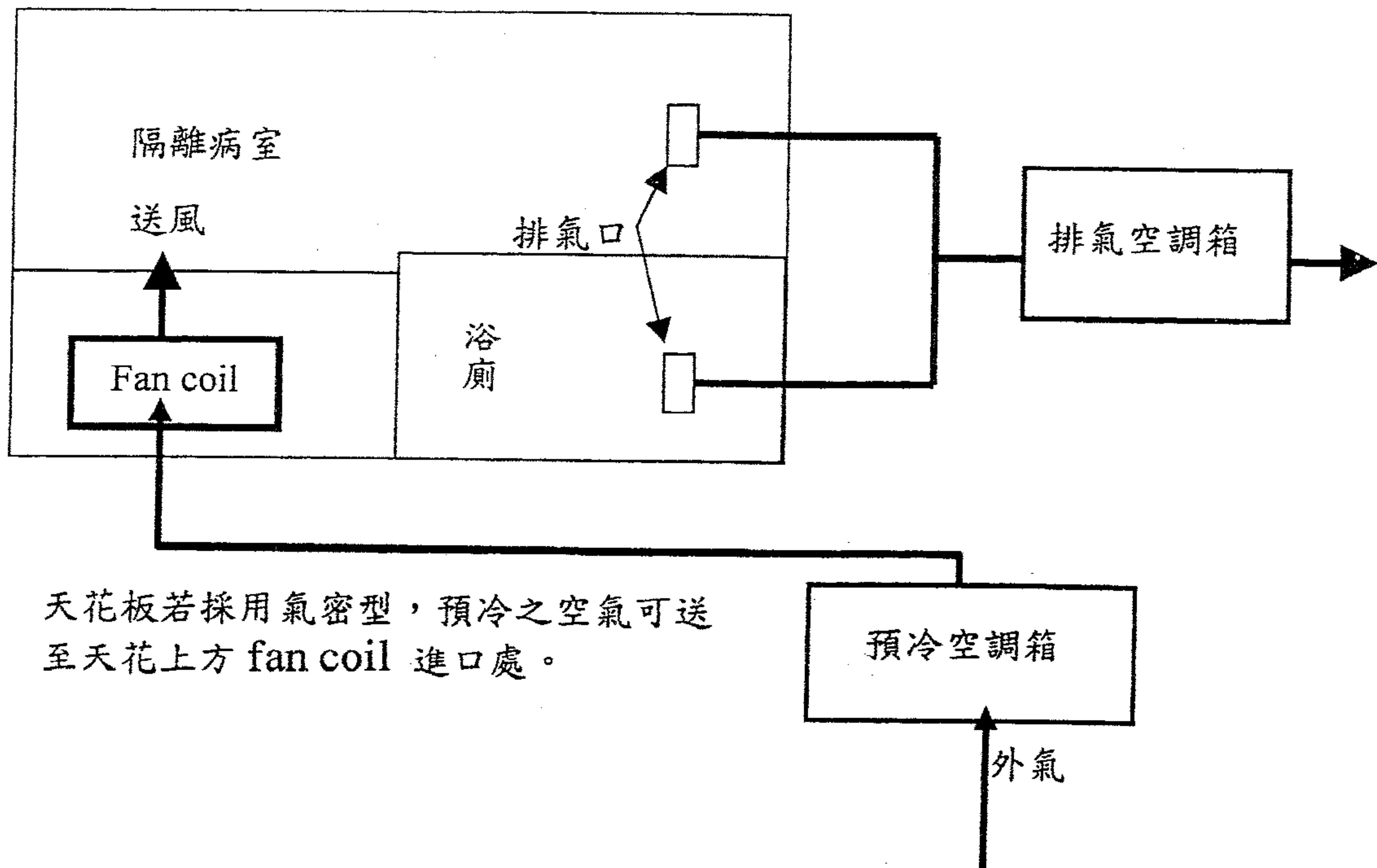
立不起來；尤其隔間牆，在天花板上方經常未隔到頂，而且往往會被無數的風管、水管、電管、真空抽氣管、特殊氣體管路甚至衛生排放管等幾十根管路所穿越，類此個案，欲求在隔牆上作氣密處理，非常困難；如又使用輕鋼架天花板，其負壓值均不容易建立。比較有效的做法是採用氣密式天花板，直接從天花板處進行氣密處理，成本不一定較高，但是容易處理。

二、原有小型送風機 (fan coil) 之改裝利用不當

既有病房內往往已經有小型送風機等空調設備，有些醫院直接利用小型送風機系統，在回風口加裝高效率

濾網 (HEPA)，認為可以將病菌藉由濾網濾除；問題是結核菌等被吸附在靠病房側的一端，前面又沒有任何初中級濾網，不知濾網壽命能耐多久？以及換裝濾網時，如何避免濾網受震動，將吸附在上面的病菌抖落下來？

類此案例的改善可將系統稍加重整，將天花進行氣密處理後，封閉回風口，改加排氣口及排氣風車設備；並加裝一台預冷空調箱，引入外氣至天花板上方，再經過既有小型送風機冷卻後送入病室內（如圖二所示）。如此可以解決室內空氣再循環之問題。不過，此乃權宜之計，並不鼓勵採用。



圖二 既有小型送風機之配置圖

三、缺乏前室緩衝區之設置

兩個有壓差之小房間，如將其中之房門打開，其壓力會馬上趨於平衡。因此，為了維持隔離病室之房門打開後，其負壓值不會馬上與一般區走廊相平衡，隔離病室與一般區之間必須要有前室之設置。除了考量壓差問題外，也避免人員進出時，直接將含有病菌之氣流帶出來。尤其是快速行走的人，在其後方會因誘導作用，產生氣流隨行之情況，病室如與一般區直通時，醫護人員出入過程中，很容易將病室內之氣流帶出來，而增加外區之感染問題。由於國內有些隔離病室是從加護病房之既有病室中挑出來改建，基於空間之限制，往往沒有地方設置前室，因此其隔離效果自然也較差。

四、負壓差之控制不良

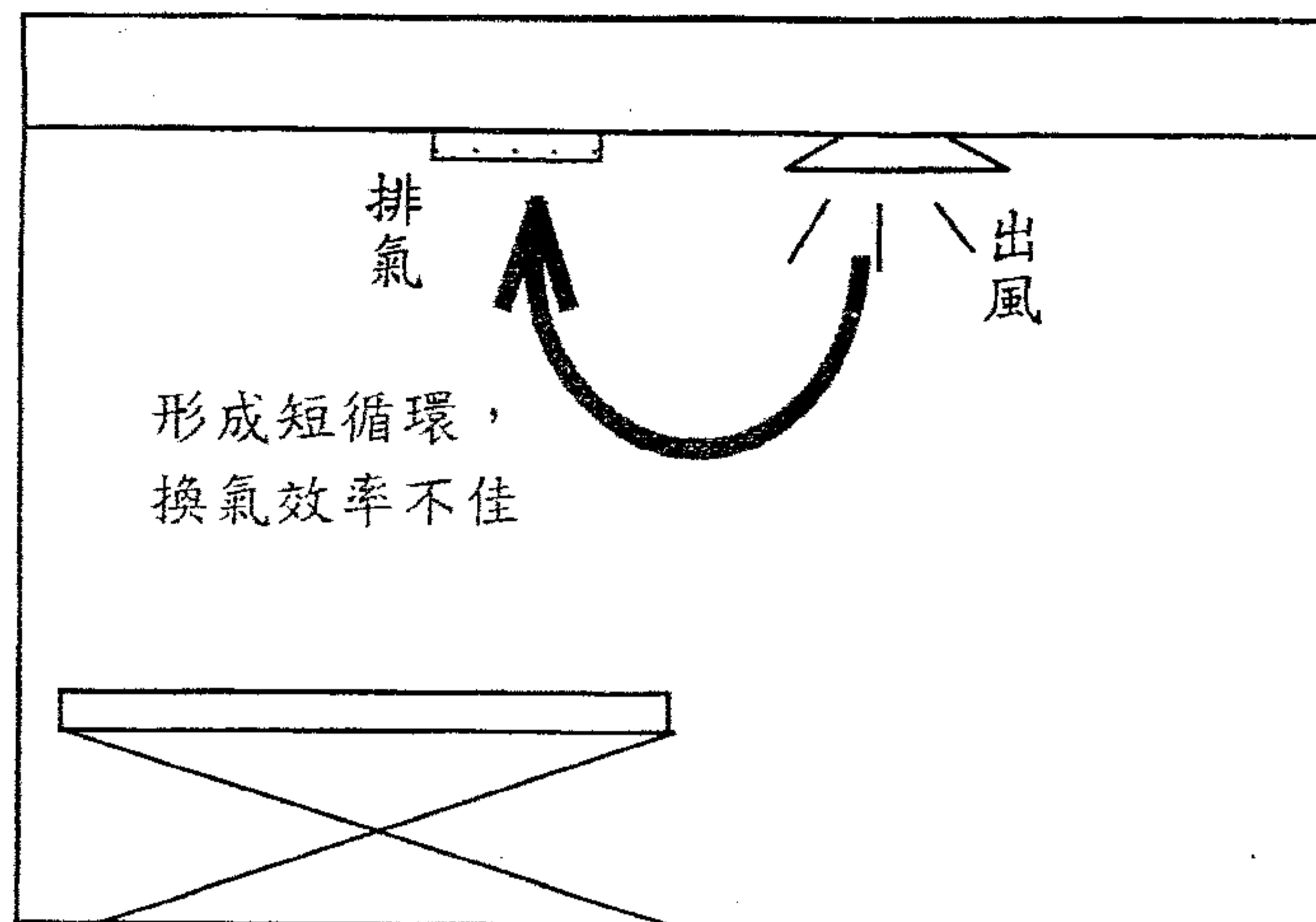
如前所述，隔離病室內必須比前室低 $1\text{mmH}_2\text{O}$ 以上之壓差，以避免氣流往外滲透。差壓之維持要領，除了排氣量必須大於送風量之外，病室本身之氣密更是重要。國內隔離病室設計施工時，往往只知道將排氣量加大，卻忽略了氣密之處理，負壓自然建立不起來。氣密處理可從兩方面下手，一、從建築既有隔間牆上處理，尤其是天花板上方之隔間牆大部分都不會圍到頂，一般輕鋼架天花板本身的氣密很差，因此，隔間牆必須要先隔到頂，並且要以發泡材料，將所有的隙縫填補完整，不得有絲毫的漏氣。

如果碰到天花板上佈滿管路系統，穿牆部分之氣密施工十分困難，類此個案，可如前述的採用氣密式天花板施工，以解決氣密不足之問題。其次門窗亦應該注意氣密問題，窗戶部分建議採用固定窗，一來容易氣密處理，再者，不會被病患或家屬隨意的打開，而破壞了負壓的建立。房門的氣密一般可以使用氣密門，不過單價較高；其實，如果其他部分的氣密非常良好，只有門板上下有少許隙縫的話，可以發泡材料或毛條加以填補，小量的漏氣是不會影響負壓的，完全的氣密反而必須要在病房與前室之間加裝壓差風門，以免壓差過大，無法開門。

除了注意氣密外，隔離病室與前室的門更應有自動關門的裝置，以保持房間能隨時關閉。

五、換氣量與氣流之分配不良

由於病患所呼出之氣體可能帶有污染源，空調設計之觀點，可以利用大量的換氣，將此污染源予以稀釋去除，根據美國冷凍空調工程師學會 (ASHRAE) 對於高感染性隔離病室，如肺結核病室等之換氣率需求，建議為每小時 6 次以上 [2]；國內衛生署對於隔離病室之換氣率，雖未有明文之規定，在工程設計時仍可沿用先進國家之標準；事實，要稀釋室內污染源之濃度，除了需有足夠的換氣量之外，送入病房內之氣流分佈與流向亦是需要考慮的要項。換句話說，出風口與排氣口之配置非常重要，以圖三



圖三 進排氣配置太接近

所示為例，進出風口設置不當，在氣流分佈上容易形成短路現象，再大的送風量亦給浪費掉了。類此案例不僅存在於隔離病室之空調改善案，一般空調系統亦常看到；其次氣流之流向亦應考量，出風口送出的是乾淨的空氣，盡量靠近病房進門處，經過病人後，已被污染之空氣，應在的短時間或距離內被從排氣口抽走。因此理想的氣流流向設計，排氣口應設於氣流通過病床後之下游側，並應遠離病房之進門處，避免已污染之氣流在開門時滲出外面。

六排氣後處理問題

國內隔離病室排氣空調箱會加裝高效率濾網 (HEPA)、紫外線殺菌燈、福馬林、負離子甚至靜電等各種過濾殺菌設備，姑不論其實效如何；高效率濾網雖然可用來過濾 99.97% 以上之結核菌，但是累積在濾網上之

高濃度結核菌，可能對維護人員造成感染。基於國內維護保養人員之維護技術並未經嚴格考核，以及減少維護保養之負擔情況下，個人建議如果周圍沒有較高的建築物，且與其他建築物距離在 10 公尺以上，可將排氣風機置於屋頂，風管出口盡量往上延伸，最好能高出屋頂突出物 3 公尺以上，讓具有感染性之廢氣向上空排放，以達到擴散稀釋之目的；因此，除非排氣出口周邊有其他建築物或空調進氣口，排氣會影響附近的人員造成感染之風險，必須要裝設殺菌過濾設備；否則，為了避免維護人員換修排氣設施時，因為附有高濃度病菌的濾網處置不當而造成感染，個人並不建議使用高效率濾網於排氣系統。如必須使用高效率濾網，則應採用袋入袋出 (bag-in bag-out) 型式之設備，以利換裝。

七、設置地點不當置維護保養不易

隔離病室必須使用獨立的空調系統，因此會以一組全外氣空調箱搭配一組排氣空調箱來處理，由於既有病室改建所能利用的空間受限，往往就近將空調箱置於病室或走廊的天花板上方，其空間本來就比較狹窄，如果周圍再有管路穿插其中，有些根本無法進行濾網等的清理維護工作，類此案例不少。

基於空調之觀點，最好能將隔離病室設置於頂樓，其送排氣風管之配置較不容易產生污染的問題；如果隔離病室設在中間樓層，建議應將排氣空調箱或風車組置於屋頂，利用風管將廢氣引至樓頂上排放，風管可走管道間，或走室外明管加以包飾，由於風管內為抽吸狀況，屬於負壓，風管如有洩漏也不會對其他樓層造成污染。其次，排氣空調箱或風車組置於樓頂上，要做維修時不但容易落腳，且有相當大的維修空間好處理；否則排氣空調箱或風車組如置於隔離病室側，將排氣以風管送至屋頂排除，風管內為推送狀況，屬於正壓，風管如有洩漏很容易由管道間對其他樓層造成污染；因此，建議將排氣空調箱或風車組置於頂樓，不但可解決維護不易的問題，兼可減少洩漏污染的問題。

八、門窗氣密不良，造成負壓不足

既有病房大部分採用可左右推開式的鋁門窗，不但本身氣密不良，也容易被病人打開，不易管理。筆者最

初進行醫院檢測時，即曾經遇到因為浴室內小氣窗被病人打開，造成病房內壓力一下子為負壓，一下子為正壓的不穩定狀態。因此建議將病房內之窗戶改用固定窗，氣密佳同時也不會有管理的問題，如基於消防救災的考量，窗戶玻璃可採用一般玻璃即可。

九、溫溼度控制不良

針對肺結核等呼吸性隔離病室內溫溼度之控制，與一般病房之要求大致相同，只是有些個案採用既有小型送風機，僅作送風風速控制，未設溫度開關，往往造成病房內之溫度與溼度均過低，不利於病患之休養；其實隔離病室內，溫度可以依病患之需要，控制在 $24-28^{\circ}\text{C}$ 之範圍內，其相對溼度可控制在 $50-60\%$ 之間即可。

十、缺乏監視與控制機制

隔離病室為避免空氣傳染之考量，必須要維持病室內之負壓，由於空氣之滲透無法以肉眼目測，必須依靠儀器監視，因此負壓表及相對的警報設施，應該安裝在醫護人員隨時可看到的地方，以利隨時之監控。國內隔離病室有些未裝負壓表，或是缺乏警告設施，負壓不足時不會自動通知，因此，曾經檢測到隔離病室居然是正壓的，值得我們警惕；如僅裝有負壓表，就必須從管理層面要求醫護人員或維護人員定期紀錄，隨時注意其讀值。

差壓表可選用液位式壓差計或指針式壓差計，由於差壓值在 $2\text{mmH}_2\text{O}$ 左右，建議選用的指針式壓差計刻度

全範圍在 5mmH₂O 左右為宜，刻度如果超過 10mmH₂O 以上，其指示的讀值較不精確。

欲確認醫院內隔離病室的功能，利用儀器測試當然是最準確的。如果既有的隔離病室沒有裝設儀表，有一種簡易的測試方法供參考：利用廢棄的錄音帶，將帶子抽出約一公尺長，把隔離病室的門打開約 20 公分，將錄音帶置於門縫處，看帶子飄移的方向及角度，大概可以看出隔離病室負壓之狀況是否正常。原則上，帶子要往病室內飄移，表示有負壓，其上飄之角度最好與垂直線相差 30 度以上（病室空間愈大，其角度也應愈大），表示有足夠的負壓與抽氣效果。

十一、其他

隔離病室有保護隔離與感染隔離之分，前者為正壓系統，後者為負壓系統，對於送排氣之條件也有不同的需求，前者要求送風的空氣品質，以避免病房內的患者受感染；後者要求排氣必須無感染之虞，以避免外面的大眾受感染。因此，在整體設計條件上有全然不同的考量因素，並非只要調整正負壓條件，就可以一間病房當作兩種用途的；即使只是單純的一種負壓隔離病室功能，就曾有醫護人員誤將感染隔離病室當成保護隔離病室使用的例子，如果再正負壓變來變去，焉知最後系統會變成什麼。隔離病室設計施工時，應該把握這個要點：『最簡單的系統，才是最好的系統。』

結語

隔離病室之設計施工基本原則，在於如何確認負壓的建立及適當的換氣率，以及做好排氣之後處理，不會造成外界的感染，如能掌握此三項原則，隔離病室工程之施作就沒有太大的問題；要是後續之維護，醫院自己能加強，則一套完善的隔離病室，即使住有病患，其周邊之安全性仍是相當高的，一般人會被感染的機率極微，其風險甚至低於長處於密閉性公共場所，例如 KTV 或小 PUB 的人。目前硬體部分，由於有衛生署之補助計劃，許多醫院均已經設置有合乎條件之隔離病室；至於軟體部分，例如：對於病患之管理等仍有待加強，曾見有開放性肺結核之病患，不待在病室內，反而在醫院內到處閒逛，卻不見醫護人員主動制止。殊不知避免院內感染，除了要有完善的硬體設施外，在軟體管理方面也是非常重要的。參觀美國疾病管制中心及約翰霍普金斯醫院時，覺得他們的醫務人員在面對肺結核的態度相當的謹慎，對病患的管制及自身的防護裝置非常周全；反觀國內，有些醫師、護士進出隔離病室，甚至不戴口罩；對於具有傳染性的肺結核病人亦未強制要求不得自行外出，也許是基於人道的單向考量，與對病人心理的尊重；不過，讓自己或醫院內其他人暴露在被感染的風險下，此種做法是否恰當？據報導國內肺結核病人人數逐漸增加，抗

藥性問題也日愈嚴重，染上肺結核需要近半年的苦戰，才能痊癒，不但患者痛苦，亦降低社會的生產力，如何更有效的防止國內肺結核病患不停的增加，其間的課題值得我們深思。

參考文獻

1. Alevantis LE: Pressure and ventilation requirements of hospital isolation rooms for tuberculosis patients. In: Marco M, eds. Ventilation and indoor air quality in hospitals. Boston: Dorerecht. 1996: 101.
2. ASHRAE handbook 1995 HVAC applications 7.5 Table 3.
3. CDC: Guidelines for preventing the transmission of *Mycobacterium tuberculosis* in health-care facilities, MMWR 1994; 43 (RR-13): 1-132.