

中國石油股份有限公司派員出國工作報告

目 次

壹、 目的與行程 -----	1
一、 目 的-----	1
二、 出國行程表-----	1
貳、 研習內容-----	2
一、 石油產品含添加劑(如 MTBE)引起之污染整治技術	
二、 風險評估模式界定油品污染對健康的影響及整治目標	
三、 自然降解(Nature Attenuation)於污染整治之應用	
四、 長途管線之漏油檢測	
參、 研習心得-----	2
一、 美國對 MTBE 的管制趨勢及整治技術-----	2
二、 自然衰減(NA)及風險評估的應用-----	8
三、 新穎的土壤及地下水污染整治技術-----	25
四、 長途管線測漏技術-----	32
肆、 結論與建議-----	39
伍、 參考文獻-----	47
陸、 附錄-----	48

中國石油股份有限公司派員出國工作報告

圖 目 錄

圖一、 MTBE 在環境中之污染傳輸模式-----	4
圖二、 受監測自然衰減的評估流程-----	24
圖三、 典型的地下水污染整治流程-----	31
圖四、 典型的單泵--雙相抽取(DPE)系統示意圖-----	33
圖五、 典型的單泵--雙相抽取(DPE)系統示意圖-----	34
圖六、 典型的多泵--雙相抽取(DPE)系統示意圖-----	35
圖七、 典型的多泵--雙相抽取(DPE)系統示意圖-----	36
圖八、 三合一污染整治技術三階段示意圖-----	37
圖九、 三合一整治技術—井內氣提系統示意圖-----	38
圖十、 超音波流量計檢測原理示意圖-----	40
圖十一、 Line Watch 長途管線測漏系統示意圖-----	41

表 目 錄

表一、 美國加州等地飲用水 MTBE 標準-----	5
表二、 評估受監測自然衰減之分析方法及相關資訊-----	20
表三、 主要各型流量計功能比較表-----	42

中國石油股份有限公司派員出國工作報告

壹、目的與行程：

一、目的：

「土壤及地下水污染整治法」已於八十九年二月二日正式公告，其施行細則及相關標準亦積極草擬中，未來將對本公司各處廠產生極大的衝擊，故宜針對各處廠已遭遇或可能遭遇的地下環境污染問題，評估及引進新穎的污染檢測及整治技術，以符合日益嚴格的法規標準，避免再度發生重大的漏油污染及公害糾紛事件。

二、出國行程表：

預定起迄日期	天數	到達地點	行程與工作內容
89.07.21	1	台北-紐約	啟程。
89.07.22	1	紐約	與 ESI 公司討論 322.5K 污染整治相關技術。
89.07.23-- 89.08.31	40	柏林頓	1.研習地下水相關法規及標準，以瞭解美國對污染場址自然衰減及風險評估的管制方向。 2.赴 ESI 公司研習各項地下水污染整治設備及實際參與美國超級基金場址污染整治工程。
89.09.01--09.10	10	匹茲堡	赴 Caldon 公司研習長途管線測漏技術。
89.09.11--09.24	14	亞特蘭大	赴 EES 公司研習地下水相關法規，以瞭解美國在 MTBE 的管制方向及整治技術。
89.09.25--09.28	4	格林貝	赴 ANSUL 參加漏油污染緊急應變課程。
89.09.29--10.07	9	芝加哥	赴 MK 環境公司研習各項地下水污染整治設備及實際參與美國超級基金場址污染整治工程。
89.10.08--10.11	4	西雅圖	赴 PPC 公司研習油水氣三合一污染整治技術。
89.10.12	1	舊金山	赴 CEE 公司研習超級基金污染場址整治工程。
89.10.13--10.14	2	台北	返程
合計	86		

貳、研習內容：

- 一、石油產品含添加劑(如 MTBE)引起之污染整治技術：掌握 MTBE 之分解機制及擴散控制與去除方式，解決本公司整治此方面污染之問題。
- 二、風險評估模式界定油品污染對健康的影響及整治目標：瞭解自然降解方式於漏油污染整治時之應用條件，期以推廣使用，節省整治成本。
- 三、自然降解(Nature Attenuation)於污染整治之應用：掌握地下水及土壤污染對健康風險評估之最佳評估模式，界定油品污染對健康的影響及設定整治目標，應用於本公司污染場址，縮短整治時間與節省整治成本。
- 四、長途管線之漏油檢測與緊急應變制度：瞭解國外先進之長途管線漏油檢測技術及重大漏油污染事件之緊急應變制度與災害預防措施，期能提升本公司的技術水準，避免漏油污染及工安事故的發生。

參、研習心得：

一、美國對 MTBE 的管制趨勢及整治技術

甲基第三丁醚(Methyl tertiary - butyl ether, MTBE)在室溫下是一種無色、具揮發性的液體，由天然氣中異丁烷與甲醇合成出來的人造化學物質。當溫度升高時，具有可燃性；加熱分解時，會釋放出具有辛辣味的煙霧與刺激性的蒸氣。

MTBE 添加在無鉛汽油中的作用是取代四乙基鉛來提高辛烷值，或作為氧化劑使用，為了促使汽油的燃燒更加完全，降低車輛行駛時一氧化碳或碳氫化合物的排放，在各種無鉛汽油中添加 2-11%(v/v) 或 0.35-2% (w/w)之甲基第三丁基醚(Methyl-tert-butyl ether, MTBE)。MTBE 之其他用途，尚有作為異丁烷的製造原料，高效能液態層析儀之層析液，及醫學臨床上作為溶解膽結石療法的藥劑等。

MTBE 作為油品添加劑之沿革最早起於 1973 年，在歐洲作為取代四乙基鉛之辛烷提升劑，美國環保署則在 1977 年核准油品中添加 MTBE。90 年代初期，美國「清淨空氣法修正案 (Clean Air Act Amendment, CAAA)」所提出的「新配方汽油(Reformulated gasoline)」及「含氧汽油 (Oxygenated gasoline)」之施行政策，於 1992 年 11 月起，針對一氧化碳未達空氣品質標準的區域(約有 18 州)，在冬季的四個月份中，規範其使用 MTBE 含量為 2.7 wt % (約 15 Vol %) 的

含氧汽油。1995年元月起，則針對臭氧嚴重未達空氣品質標準地區，分兩階段進行其全年供應 MTBE 添加量為 11 Vol % 的新配方汽油。

在歐洲方面，瑞典於 1994 年 12 月起規定汽油含氧量在 2%(w/w) 以下，芬蘭於 1993 年 1 月起亦規定汽油含氧量在 2.0-2.7%(w/w)，法國則規定含氧汽油添加劑僅可使用醚類，其含量在 15%(v/v) 以下；而歐聯則在 1985 年訂定 85/536/EEC 規範，規定 1988 年以後歐聯組織各國必須於汽油中添加含氧化合物，所添加之含氧化合物可為醇類（甲醇 3%(v/v)，乙醇 5%(v/v)，異丙醇 5-10%(v/v)，三丁醇 7%(v/v)，異丁醇 7-10%(v/v)），醚類（10-15%(v/v)）或其它特定有機含氧化合物（7-10%(v/v)，2.5-3.7%(w/w)）。

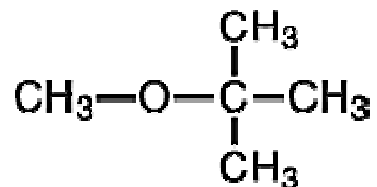
MTBE 在美國地區油品的添加情形有逐年增加的趨勢，至 1997 年時，油品中 MTBE 含量已超出 30%。而其日使用量亦由 1980 年之 50 萬加侖成長至 1997 年時已超過 1 千萬加侖。國內目前年使用量約為 32 萬噸，多數由國外進口，在台塑的六輕計畫中亦規劃出 MTBE 廠，年產能約達 4.4 萬噸，顯見 MTBE 在國內之使用量呈現成長情形。

MTBE 之物理、化學性質

甲基第三丁醚(Methyl tertiary - butyl ether, MTBE)

化學式： $C_5H_{12}O$ 分子量：88.15

化學分子結構式：



顏色：無色

沸點：55.2

閃火點：- 28

比重：0.74 (at 25)

溶解度：43 g/l (at 25)

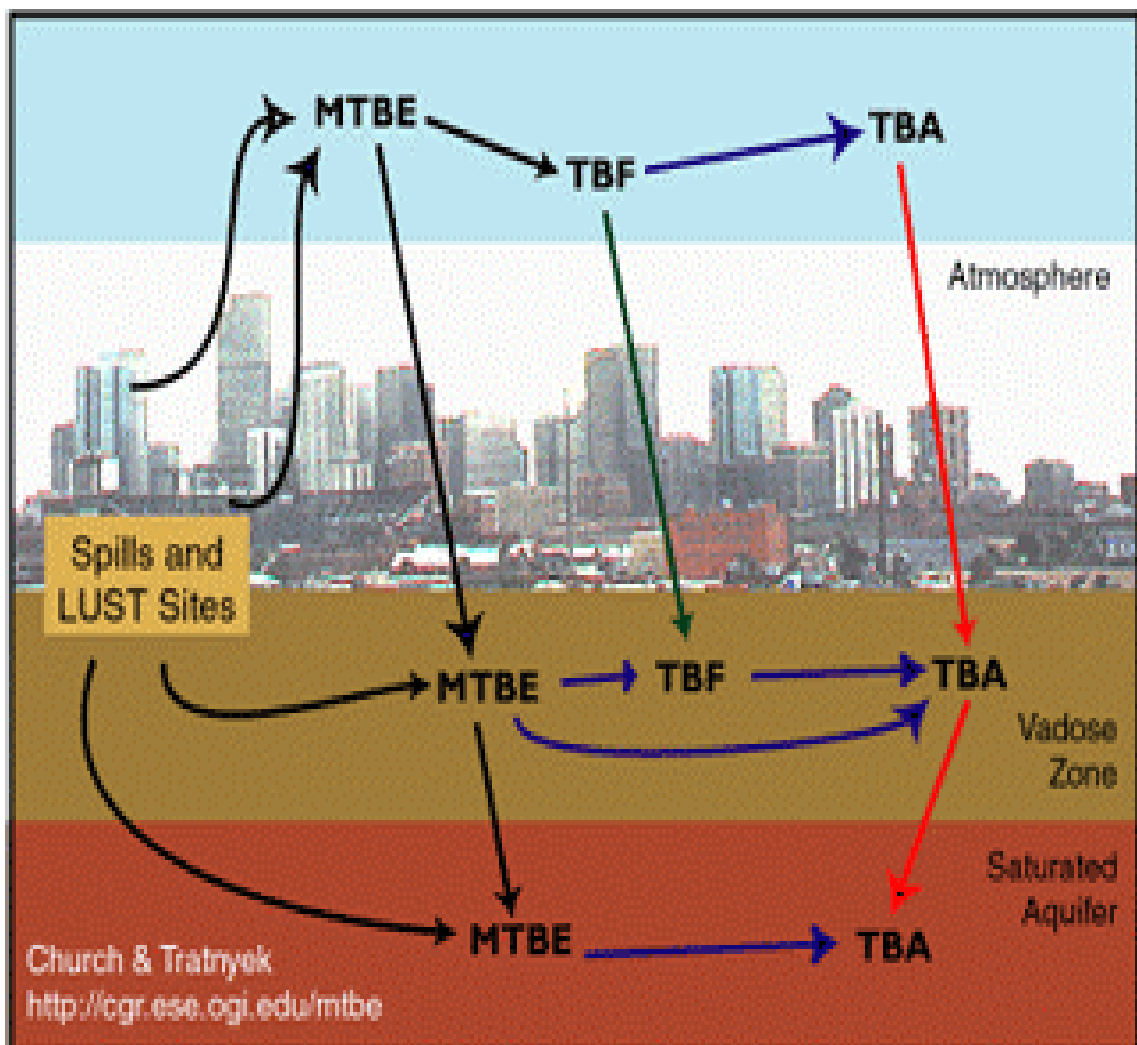
蒸氣壓：249 mm Hg (at 25)

MTBE 在環境中之傳輸

由於 MTBE 具有較大之蒸氣壓 - (249 mmHg at 25)，當其洩漏至土壤、空氣或水體環境中時，其高揮發度之特質使其迅速擴散。土

壤中之 MTBE 除了將迅速地擴散至土壤孔隙中，更可能經由重力作用向下移動並污染地下水體。若不慎溢漏於地面水體，MTBE 將在極短的時間內（半衰期約 4.1 小時至 2.0 天）揮發並擴散至大氣中，成為空氣污染。

由於具有高水溶性，MTBE 較其他碳氫化合物容易在水中擴散及傳輸，當 MTBE 隨著溢漏之油料進入地下水體後，其在地下水中移動之速度較其他成分來得快速，因此一旦污染至地下水，極易造成大範圍之污染團。圖一所示即為 MTBE 在環境中之污染傳輸模式。



圖一、MTBE 在環境中之污染傳輸模式

MTBE 污染來源

造成 MTBE 環境污染之主要來源係來自地上、地下儲油槽、輸油管線之滲漏，以及運輸槽車意外事故或清除、處理油污染土壤等點污染源。此外自未裝設油氣回收系統之加油站，及汽車、機車油箱散發之 MTBE 在進入大氣環境後，亦可能因重力沉降或雨水沖刷之作用，致使空氣中之 MTBE 轉變成為地面水、地下水或土壤的污染來源。

由於近年來 MTBE 在國內、外的使用量有逐年增加的趨勢，因儲油槽、輸油管線之滲漏所引起之土壤及水污染問題，逐漸受到重視與討論。因為 MTBE 容易在土壤及水中迅速擴散，只要少量滲漏就能污染大量的土壤及水，加上 MTBE 在自然環境中不易被分解、移除之特性，更使得 MTBE 污染問題變得複雜化。

有鑑於此，歐美各國紛紛針對其作為飲用水源之地下水進行 MTBE 污染監測與調查。根據去年(1999 年)六月之一項統計數字顯示：美國加州地區飲用水，有百分之三七可測出含有 MTBE 成分；而威斯康辛州則針對九個油料外洩場址進行地下水 MTBE 污染檢測，分析結果顯示各污染場址之地下水樣皆含 MTBE 成分，其濃度介於 0.47 至 1.1ppb 間。地下水含有較高濃度 MTBE 成分者亦曾被發現，位於美國紐澤西州 South Brunswick 小鎮的一座工廠下的地下水，就曾測出含 50ppb 的 MTBE。英國環保署自 1996 年起也開始留意地下水 MTBE 污染問題，並著手進行全國性監測、調查計畫，由於以往 MTBE 並不是經常性地下水監測項目之一，經初步研判受 MTBE 污染之地下水層之範圍將遠超過目前調查所知的範圍。

飲用水 MTBE 標準

雖然 MTBE 對人體而言屬於較低毒性化學物質，但由於其容易在土壤及水中迅速擴散造成土壤及地下水污染，加上只要極低的濃度(5 - 15ppb) 即可造成飲用水之臭味問題，目前已有加州等地將其列入飲用水標準(數值詳如表一)，我國飲用水標準目前並未將 MTBE 納入。

表一、美國加州等地飲用水 MTBE 標準

州名	飲用水 MTBE 標準(ppb)
California	5
Florida	50
Connecticut	100
Massachusetts	50

Maine	50
New Hampshire	100
New Jersey	700

MTBE 之分析、檢測方法

「水中揮發性有機化合物檢測方法-吹氣捕捉/氣相層析質譜儀法」為分析水樣中 MTBE 的化學分析檢驗法。含揮發性有機物之水樣以針筒注入吹氣捕捉裝置中，吹氣捕捉裝置放置在室溫下，通以惰性氣體（如氦氣 - Helium），將其中揮發性有機物導入捕捉管收集。待捕捉完成後，以瞬間加熱脫附並使用氦氣逆向通過捕捉管之方式，將有機物質導入氣相層析儀中。利用氣相層析管柱分離各個成份後，再以質譜儀作為偵測器，進行水中揮發性有機物之檢測。此類檢測法大多參考美國環保署 524.2 分析法 (U.S.EPA, Method 524.2: Measurement of Purgeable Organic Compounds in Water by Capillary Column Gas Chromatography/Mass Spectrometry, 1992.)。我國環保署亦於八十九年(2000 年)三月公告了「水中揮發性有機化合物檢測方法-吹氣捕捉/氣相層析質譜儀法」，該分析方法詳細內容刊載於環保署公告中，可供參考。

MTBE 應否禁用在美國所引發之討論與發展

自從 1997 年開始有研究報告顯示 MTBE 可能具有致癌性，同時因 MTBE 可能透過破漏的地下汽油儲槽進入地下水與飲水中，於是環保團體開始呼籲與推動禁用 MTBE 之行動。包括：

1998 年緬因州允許七個郡自行選擇是否禁用含 MTBE 汽油。

1999 年 3 月 25 日美國加州州政府發佈命令，自 2003 年 1 月 1 日起該州禁止汽油中添加 MTBE。

1999 年 5 月美國眾議院提出提案，允許各州可以選擇不執行汽油必須含有氧化添加劑之規定，並且設下三年期限廢除 MTBE 之使用，但此提案尚未通過生效。

1999 年 11 月美國紐約州州長宣佈將把在州界內水體所含汽油添加劑 MTBE 的允許值由現行的 50 ppb 降低到 10 ppb。這項命令將在經過 30 天的審查與公告階段，以及最後的公開通告手續之後正式生效。

1999 年 12 月美國加州空氣資源局(CARB)宣佈通過不含 MTBE 添加劑的新汽油配方，以因應加州州長在 1999 年 3 月宣佈將要求在

2003 年前完全禁用 MTBE 的規定。

2000 年 3 月 20 日美國聯邦政府環境保護署基於 MTBE 會危害地下水及人體健康，正式宣佈全國 3 年後禁止汽油中添加 MTBE。

由於資訊的發達，任何與環保、民生息息相關之消息，皆能迅速引起國內各界之熱烈討論。因此有關 MTBE 的禁用問題，不論是國內的報章雜誌或學術刊物，都不難發現相關的報導與討論，足見社會各界對此事件之關心與重視，相關報導與討論資料亦收錄於本報告附錄中。除此之外，學術界及環保署亦針對此事展開相關學術研究，並密切注意國際間的最新發展。

儘管 MTBE 的添加對空氣品質改善具有相當程度的貢獻，其因地下儲油槽系統(USTs)的滲漏可能造成之土壤與地下水污染，進而影響飲用水安全、人體健康等相關議題卻也備受關注與討論。近來美國政府對汽油添加劑 MTBE 禁用與否態度漸趨明朗，依此趨勢看來，MTBE 的禁用問題在國內將有持續擴大發展的現象，值得本公司密切注意。

地下水及土壤中 MTBE 的污染整治技術

由於極低濃度的 MTBE 即可引起飲用水的異味，因此地下水中的 MTBE 處理已逐漸受到重視。傳統的活性碳吸附 (Activated carbon adsorption) 及氣提法 (Air stripping) 雖可去除地下水中的 MTBE，其處理成本卻遠高於同濃度的碳氫化合物。

有關地下水中 MTBE 的生物處理 (Biological treatment) 研究結果不一，以混合培養 (Mixed culture) 去除 MTBE 的研究顯示，由於 MTBE 代謝過程的中間產物 Tertiary-butyl alcohol (TBA) 無法 (或很難) 再進一步分解，因此 MTBE 的生物處理並不可行。然而亦有許多研究報告顯示，以流體化床生物反應器 (Fluidized bed bio-reactor) 可以完全去除 MTBE，其機制為 MTBE 先吸附於流體化床的表面或進入其微孔洞 (Micropore) 中，然後附著於流體化床表面的微生物再加以生物分解，其去除率可達 75% 以上，最終產物則為 CO_2 。由於 MTBE 的物理處理成本過高以及生物處理的效率較差，以 Fenton's reagent 或過氧化氫 (Hydrogen peroxide, H_2O_2) 的化學氧化顯示了較高的可行性。其他的化學氧化技術如過氧化氫/臭氧 ($\text{H}_2\text{O}_2/\text{Ozone}$) 或紫外線/臭氧 (UV/Ozone) 技術，都可藉由 OH 基的產生來達到化學氧化 MTBE 的目的，其最終產物亦為二氧化碳及水。

二、自然衰減 (NA) 及風險評估的應用

自然衰減 (Nature Attenuation) 在污染整治上的應用是美國近

年內才提出的觀念，主要目的在透過地下水及土壤污染對健康風險的評估，來界定油品污染對健康的影響及設定整治目標，如能應用於本公司的污染場址，將可縮短整治時間與節省整治成本。

MNA 的定義

美國環保署對 MNA 的定義 (USEPA1997) 為依靠自然衰減作用，其所需時間與其他污染整治技術耗時相比顯為合理時，達成特定污染整治目標的方法。

當土壤及含水層中有自然衰減作用 (尤其是原生性生物降解作用) 時，是否污染情況即可用自然衰減作用作為整治手段？答案是否定的。簡而言之，自然衰減作用僅構成法定自然衰減方法的充份條件。他的必要條件是污染帶範圍不再持續擴大；若污染帶範圍呈縮小趨勢則更佳。

若含水層中沒有自然衰減作用，則污染帶範圍會因地下水流動而擴大。若含水層中有自然衰減作用，污染帶範圍是擴大、穩定、或縮小，則端視自然衰減作用的強弱與污染源釋出污染物快慢的關係而定。當自然衰減率小於污染源釋出率時，污染帶範圍繼續擴大。當自然衰減率等於污染源釋出率時，污染帶範圍維持穩定。當自然衰減大於污染源釋出率時，污染帶範圍縮小。

自然衰減在應用時必須配合適當的監測計畫 (Monitored Natural Attenuation)，故簡稱為 MNA 復育法。在美國經過一段長時間的研究與討論後，其適用的污染物特性、污染場址、整治時效的考量等，都已獲致相當的共識。美國環保署 (USEPA) 所屬的 "固體廢棄物及緊急應變部門" (Office of Solid Waste and Emergency Response - OSWER) 曾經於 1997 年 12 月發佈了一份名為 MNA 復育法在超級基金及地下儲槽污染場址之使 (應) 用 (Use of Monitored Natural Attenuation at Superfund, RCRA Corrective Action and Underground Storage Tank Sites) 報告初稿，供各界參考並提供意見與看法。經過一年餘的討論與修訂，這份報告終於在 1999 年四月底定稿，並正式函送各州。

這份報告書的主要用意，在於說明美國環保署 (USEPA) 對 MNA 復育技術使用的政策方針及原則。

由於我國的「土壤及地下水污染整治法」(以下簡稱土水法) 已於八十九年二月二日正式公告，其施行細則及相關標準亦積極草擬中。由於「土水法」的精神與法條有部份係引用歐美各國之相關法規，雖然目前在我國土壤及地下水污染尚無法可管，但發生污染事件時，

環保主管機關及參與監督的學者專家們大多引用歐美各國之法規來要求業者進行污染整治。在眾多可用的整治技術中，MNA 復育法常被提及，然而此法所使用的主要整治機制是在不外加其他任何物理、化學或生物機具、設備或原料下，單靠自然界之土壤、地下水及其中之微生物的自然復育能力，將污染物逐漸地去除，以達到預定的污染整治目標。如此一來，MNA 法很容易被認為是一種消極、被動、不負責任，甚至是逃避責任式(Walk away)的整治法。

該份報告係由美國環保主管機構經多年之努力而獲致之寶貴經驗。作者希望藉由本文加以擇要摘譯，讓更多從事環保工作或關心環保者能對 MNA 法目前在美國的發展趨勢與政策方向有多一分的瞭解。

MNA 之適用性

如前所述，MNA 法係在無任何人工輔助與外加設施的條件下依靠純天然之復育機能，對污染物進行分解減量，以期能在預定的"合理期間"內達成污染整治的目標。天然復育機能中包括了物理、化學、生物等各項機制(如微生物分解、擴散、稀釋、吸收、吸附、蒸發散、化學轉化、穩定化...)。這些不同反應機制裡，以能實質移除或破壞污染物的反應機制，較能使 MNA 發揮其預期的功能，相對地亦較易被主管機關所同意接受。不論所使用的整治法是主動或被動，其主要的整治目標都必須能合乎預定的成效，即：(1)污染源與污染物的控制(2)防止污染團的擴散(3)土壤與地下水的復育。因此在考量 MNA 是否為適切合用的整治技術時，下列幾項因素必須列入衡量的重點：

- (1) 必須對污染場址中所涉及的所有污染物質皆能產生功效，而非部分有效但部分無效。以汽油所產生的土壤及地下水污染而言，其部分污染物如 BTEX (benzene, toluene, ethylbenzene, and xylenes)，可以容易地被土壤中的微生物所分解，而汽油中所含之另一物質 MTBE 則可能在極短的時間內隨地下水擴散至極廣泛之範圍，因此利用 MNA 可能無法於"合理時間"內有效地整治汽油所引起之土壤及地下水污染。
- (2) 污染物的轉化過程是否形成對環境、生態更具毒性及威脅性的中間產物。
- (3) 是否可能引起污染物跨介面(土壤、地面水、空氣、地下水、土壤氣體)的傳輸。

MNA 對石油、含氯溶劑與無機污染物之整治效能

若以污染物種類與特性為主要考量，不同污染物對 MNA 整治法的處理效果亦呈現相當大的差異性。

就上述三大類污染物而言，石油污染即包含了數百種有機碳氫化合物。對於此類污染物，由科學界豐富之研究與經驗證明，大部分石油污染物皆可被微生物分解，因此 MNA 法可謂合適之處理技術之一。唯石油污染物於環境中分解速率與其分子量成反比，含碳量愈高的重質碳氫化合物愈不易被分解。

基於整治之時效性與全面性之考量，MNA 法並不適於成為石油污染之"唯一"整治方法，而宜與其他技術配套使用或當成其他處理法的後續(follow-up)處理法。

含氯溶劑(如 TCE-trichloroethylene)一般之比重皆較水為大，通常被歸類為 DNAPLS (Dense non-aqueous phase liquids)，一但進入土壤很容易向下滲至地下水層的底部。這類污染物其確切的污染位置不易準確測得，而且此類化合物非常不易分解，因此往往可以存在土壤及地下水中長達數十年之久。這類污染連使用較積極之整治技術都不一定能夠見效，若單以 MNA 法來處理含氯溶劑污染，除了在極少數主客觀條件皆非常有利於 MNA 法之情況外，一般皆難達預期的成效與目標。

至於無機污染之複雜度較之含氯溶劑有過之而無不及，無機污染物可能因環境因子的改變而使其溶解度增加，進而擴大其污染範圍。只有在特定有利條件下，MNA 才能發揮預期的處理功效。因而對無機污染物的處置而言，應以能夠降低污染物移動性(穩定化)及有效達增加輻射衰減等效果時才較適用。

MNA 之優缺點

(一) 優勢與潛力:

1. 降低整治廢棄物量，減少跨介面交錯污染的可能，因此人員(操作人員及附近居民)受污染的風險較低。
2. MNA 法之部分反應機制可以達到污染物現地分解之效果。
3. 只需少許監測設備，大大減少了地面設施的興建設置，故可使外界對受污染的環境體之干擾減至最低。
4. 若整治目標許可，並配合相當現地條件，MNA 法可全面或部分應用於特定污染場址。
5. 可與其他整治措施方法聯合配套使用或當成後(接)續的整治法。
6. 較之其他積極性整治技術，此法可以降低整治總成本。

此外根據阮國棟等(1998)的研究報告，MNA 的優點尚包括：(USEPA 1998 及阮國棟，1998)

1. MNA 屬就地(in situ)性質，不會產生大量的廢棄物；因而降低場外處理潛在的介質間傳遞、以及人體暴露於污染介質的風險。
2. 無需大量人為工程，所以干擾地表施工或活動的情況不多。
3. 依據場址狀況和整治目標，可以用在整個場址或部分場址。
4. 可以和其他整治方法一起使用，或為其他整治方法的後續處理方法。
5. 成本可能較主動式整治方法為低。

(二)缺點：

1. 在某些情況下，MNA 法可能需要較長的時間來達成預定的整治目標。
2. 需要較複雜且詳盡的現地調查，因此調查成本較高。
3. 經 MNA 法轉化後的某些污染物質，可能比原污染物更具毒性及不穩定性。
4. 為確認其成效所做的長期成效分析需密集且長時間進行。
5. MNA 計畫執行過程中，場址的地質、水文條件很可能已隨著時間改變，並影響且改變了原已呈穩定化的污染物，而造成新的環境衝擊並降低了處理效率。
6. 在爭取社會大眾認同上，較為困難。

根據阮國棟等(1998)的研究報告，MNA 的缺點尚包括：(USEPA 1998 及阮國棟，1998)

1. 與主動式整治方法比較，可能需要較長的時程。
2. 複雜的場址特徵調查可能花費較高。
3. 轉換產物的毒性可能比原污染物為高(此點一般僅限於DNAPL污染場址)。
4. 通常需要長時間的監測。
5. 可能需要機構的管制來確保長期監測及不受外來因素的干擾。
6. 污染物繼續移動的潛勢存在，和/或污染物在介質間交互傳遞。
7. 水文和地球化學狀況隨著時間變動，可能引起已達穩定的污染物重新移動，造成整治效果負面衝擊。
8. 需要密集的教育和額外的努力來得到公眾的接受。

MNA 法的限制

任何污染整治技術或方法若無法清除、減少、或限制污染範圍，必然無法達到污染整治的目的----保護人體健康及環境，進而受污染的土壤或地下水回復到可有益使用(Beneficial use)的目標。所以即使有自然衰減作用發生，但污染範圍並未達到穩定或縮小的條件，僅靠自然衰減作用並無法達到整治目標。反之，若藉由自然衰減作用，污染範圍受到控制，已達到穩定或縮小的污情況，則在可預期的未來時程內，污染物可被消滅(或污染濃度達到預定的清除標準)，而無需額外的人工或人為的整治工作。這種情況才符合自然衰減的充份與必要條件。

自然衰減本身已可達到污染整治目的，並不一定需要人工技術，所以自然衰減是一種無人為工程介入的被動式污染整治方法。但自然衰減並不排除任何人工污染整治工作，亦可搭配合適的人工污染整治工作，以加速污染清除的進行，縮短自然衰減所需的時間。

雖然無需人為污染整治工作參與，受監測自然衰減並非「棄之不顧」(Walk away)或「無需行動」(No action)的行為。完善的MNA須具備下列三項要素：

- (1) 詳細的評估調查，以確認污染範圍已達到穩定或縮小的必要條件，及證實自然衰減機制(尤其是原生生物降解機制)存在的充分條件。
- (2) 長期監控計畫，以確認自然衰減機制之持續進行和符合污染整治的目的。長期監控需要執行適合場址狀況的地下水質監測計畫替代方案，以備不時之需。
- (3) 污染源控制措施評估，污染源是指地層中污染物的殘留量(Residue)、污染物的游移相(Free product)、以及污染物池(Pool)。對可移動的游移相及污染物池池應盡量予以回收。對不易清除的主要危害因子(如殘留量)，則可用工程性圍堵方法加以阻隔。其實所有的污染整治工作最根本道理是「正本清源」；污染源若無法清除或隔離，則污染整治工作是事倍功半。所以，所有的污染整治工作均需污染源控制措施(USEPA 1997)；此項工作並非專對MNA而定。

MNA 法的充份與必要條件

美國環保署於1998年正式公告(USEPA 1997) MNA的評估標準。這個評估標準建立於下列三種證據的證明：

- (1) 自適合監測或採樣點所得到的長期地下水及/或土壤化學資料可以證實污染物質質量及/或污染濃度呈明顯且有意義的減少趨勢。

(2) 水文地質及地球化學資料證實場址中正在進行發生自然衰減機制的類別及衰減率。

(3) 污染場址之現場資料(Field data)或取自污染場址材料所作的微型實驗證實場址中有生物降解的發生。

實際上，第一項的證據在於證明 MNA 必要條件的滿足(污染範圍及污染程度不再擴大及惡化)，第二項證據則是提出滿足充份條件(的確有自然衰減機制存在)的證明。USEPA(1998)亦明確指出除非環保主管機構決定第一項證據已足夠作出裁定 MNA 成立的決定，否則第二項證據必需要提出。換言之，一般情況下，第一及第二項證據皆必須提出，以證實 MNA 的充份與必要條件。至於第三項證據，則屬次要條件，不具決定性。只有在第一、二項證據未能明確證實充份及必要條件滿足情況下，第三證據才可用來作參考性的資料，進一步釐清第一、二項證據不明或不足之處。若必要條件未能由第一項證明證實屬實，則 MNA 不成立。

第一項證明成立後，第二項證據依然需要，理由如下：

(1) 地下水或土壤污染範圍不再擴大，甚至縮小的原因可能是非自然衰減機制造成的偽正情形(False positive)。如一個滲漏含水層系統，地下水可能經由滯水層或不當水井濾料導致的錯接污染(Cross contamination)滲至其他水層，遂使直接受污染含水層中的污染範圍及污染程度呈不繼續擴大或縮小的情況。這種情況很明顯地並不符合污染整治目的；污染物雖未在受調查含水層中持續遷移，擴大污染範圍，卻在垂直方向造成新的污染。此外，非消滅性的吸附作用亦能導致穩定狀態。在這種情況下，雖然源染範圍不再擴大，但因污染物質仍舊存在，所以污染問題並未得以解決。

(2) 自然衰減是自然衰減機制消滅污染物質或降低污染濃度的速率。第二項證據除了驗明剔除可能的偽正情況外，亦需提出自然衰減率的估算結果，以預估大約需時多久，污染帶可由自然衰減方式整治至預定的清除標準。

必須強調的是 MNA 的最主要機制是原生生物降解，所以有時 MNA 亦被稱為「被動式」生物復育、「內在」(Intrinsic)生物復育、或內在整治，以別於人為的生物復育方法。但是污染場址中原生生物降解作用並不等於 MNA；僅是 MNA 的充份條件而已。雖然絕大部份含水層的水文地質及地球化學環境中有合適降解污染物的原址微生物，但並非每個場址均適合 MNA 的情況----當自然衰減率在合理時程內可將土壤或地下水污染濃度降至預定或法定清除標準以下時，MNA 方視為可行。

自水文地質角度來看，土壤中有高含量自然有機物的(如腐植土或沼澤地區)場址通常是成功 MNA 的處所。含水層由石灰岩組成或由是破碎性的岩體構成時，其中地下水流變化相當複雜，以致於污染帶範圍的遷移及改變難以分析掌控。再加上這種地質情況中，原生微生物可能較少，所以石灰岩及破碎岩體含水層通常較不適合 MNA。

自健康風險角度來看，若污染帶範圍或下游附近的受體(抽水井、或地表水體水力連通情況)有可能汲入污染地下水時，MNA 較不適合。尤其是若有抽水井(飲用水或工業、灌溉用水)大量抽水影響地下水流方向，將穩定或縮小的污染帶入井中時，被動式的 MNA 顯然不適合。MNA 亦不適合 TPH 濃度高於 20；000 至 25；000mg/l 的污染場址。除了這些不同角度的考量外，下列九點意見亦可協助判斷 MNA 是否合適：

- (1) MNA 是否能有效的整治存在於土壤或地下水的污染物？
- (2) 轉換衍生物的結果是否比原有污染物具有較高的風險？
- (3) 污染源的性質和分佈是否已經或能夠適當的被控制？
- (4) 污染帶是否相當的穩定或仍舊在移動？和環境狀況是否潛在的隨時間變動？
- (5) 現有或預計使用的主動整治方法對於 MNA 各項整治組成的影響。
- (6) 在選用 MNA 的結果是否對於飲用水的供應 其他地下水 地面水、生態系、沉積物、空氣或其他環境資源可能造成有害的衝擊？
- (7) 整治時程的預估與其他主動(人工)的整治方法的時程比較是否合理？
- (8) 現在或未來計畫需要使用受污染地下水層的時候，整治工作仍持續進行中？(包括其他替代水源的可用度和因為其他污染所降低地下水的可用度)
- (9) 在場址是否有可靠的工具來執行機關管制？和執行監測與執法的機關能否確定？

MNA 法在污染整治中所應扮演之角色與定位

雖然美國環保署(USEPA)認為 MNA 法在特定的污染狀況與條件下是一個適當且可行的一種整治方法與技術，然而對任何污染場址而言，決定採用何種組合的整治技術，以及何時採行 MNA 法皆需經過繁複地思考與評估程序。因而 MNA 法應該與其他有效的處理法與技術一樣列為可供選用的處理方法之一。應在參酌現場的各項主客觀條件，謹慎地評估其適用性及與其他方法合併使用的可行性之後再做決策。美國環保署(USEPA)一再強調 MNA 法只是許多可供選用的污染整

治技術中之一種，絕不可因其具有低處理成本且易於管理，而將其視為 "預設" 或 "內定" 的污染整治技術。並且只有在能夠完整保護人員健康，確保不導致污染擴大，以及能在 "合理期間" 內達成預期整治目標等前題之下，執行或採用 MNA 法才具有其正當性與適用性。然當所有條件皆滿足且 MNA 法亦已合理順利地執行時，與污染事件有關的團體(環保主管機關、污染事件之業主...) 仍應忠實地扮演好各自的角色，善盡污染整治監督或執行等責任，一直到該污染場址的整治已達預定的整治目標為止。

MNA 的六項重要政策立場(阮國棟等 , 1998)

1. MNA 不是一個不行動的替代方式，污染責任者不能夠對污染問題棄之不顧。MNA 著重於確認和監測自然衰減過程，需要全面的場址特性記述、詳細的整治過程監測和替代方案，來確保長期保護民眾健康及生態系的可信度。美國國家緊急應變計畫(NCP)指出，選擇 MNA 不是表示地下水已經被遺棄或不需整治，而是在與人為整治可達到的相同時程內，經由生物衰減、延散、稀釋和吸附等作用，有效減低地下水中污染物濃度，使達到保護人體健康的濃度。簡單的說，利用 MNA 並不是意味著環保機關已經同意無需行動，或者環保機關或有責任的團體可以對污染問題棄之不顧。

2. MNA 不能改變保護人體健康及環境的整治目標

一般在選擇整治方法時必須要考慮的主要原則：

- (1) 主要污染物之污染源控制措施；如實際清除、移除、或利用工程圍堵將其隔離以降低長期影響。
- (2) 受污染地下水應在合理時程內將其復育至適合用途的程度。若無法達到此目標，則應防止污染帶移動，防止受體暴露於受污染的地下水，並且評估進一步降低風險的方法。
- (3) 受污染土壤應整治至人體和環境可接受的程度，並防止污染物傳輸至其他介質造成不可接受的風險。

因此在選擇 MNA 作為污染整治方法時，亦不應改變或忽視上述原則。

3. MNA 要在合理的時程內達成整治目標

MNA 比其他主動式整治法需要較長一點的時程是可以理解的，對於時程合理性的判定應該以該場址為主。在全部或部分利用 MNA 時，整個整治時程不應該比其他整治方式有過度長久的現象。

4. MNA 要實際減低污染物的量

MNA 的機制包括生物降解、水力延散、稀釋，吸附、揮發和/或污

染物的化學與生化穩定化。MNA 包括其中上種或多種的機制來有效減低污染物毒性活性或容積，來保護民眾健康和生態系。生物降解和化學轉換 (Chemical transformation) 破壞污染物並減低污染物之總質量。但稀釋、延散和吸附作用僅降低地下水中污染物之向外傳輸，而不會消滅污染物。因此生物降解為 MNA 最重要的機制，可以實際降低污染物的總量及濃度。僅靠單獨的延散、稀釋來降低污染物濃度之場址，選用 MNA 是不能接受的。

5. 使用 MNA 不表示「技術欠缺」的情況

MNA 可以是唯一的整治方法，亦可以搭配其他整治方法。若 MNA 無法在合理的時程內達到整治目標，則需與主動的整治方法合併使用。

6. MNA 為合法的整治方法

通常生物整治法可分為二種方式，一為內在生物復育 (Intrinsic bioremediation)，由污染場址本身提供所有必須物質，可以在無人為介入下進行，另一種為工程生物復育 (Engineered bioremediation)，由工程建造一個供應促進微生物分解物質之系統來加速生物整治速率。MNA 利用內在生物復育，應視為合法的整治方式。

MNA 的評估參數及方法

MNA 最重要的生物降解的評估參數大致分為原化合物及分裂產物、氧化、還原地球化學、電子供給者、及一般水質參數四類：

1. 原化合物及分裂產物：

- a. 原化合物 (四氯乙烯、三氯乙烯、1,1,1-三氯乙烷及四氯化碳；苯，甲苯、乙苯、二甲苯)。
- b. 中間產物 (二氯乙烯、二氯乙烷及氯乙烯)。
- c. 衰減產物 (乙烷及乙烯)。

2. 氧化-還原地球化學：

- a. 溶氧 (DO)：溶氧大於 1-2 mg/l 時為好氧狀態，溶氧小於 1 mg/l 時為厭氧狀態。厭氧狀態適合於含氯溶劑的還原脫氯作用。
- b. 氧化-還原潛勢 (ORP)：測定電子活性及溶質或化學物種接受或轉移電子的相對趨勢之指標。一般地下水中 ORP 的範圍約在 800mV 及 -400mV 之間。ORP 在零或負值時為厭氧狀態，一般在污染區的 ORP 較污染區外低 (在厭氧的地下水中，ORP 在 +100mV 以下時，屬於還原狀態)。

- c. 硫酸鹽及硫化物：硫酸鹽在厭氧生物降解時，做為電子接受者產生硫化物，四氯乙烯及三氯乙烯的還原作用在硫酸鹽還原狀況下發生。硫酸鹽的測定作為厭氧之指標，硫化物的測定用來驗證硫酸鹽的測定(在污染帶中之硫酸鹽濃度較污染帶外之硫酸鹽濃度為低)。
- d. 亞鐵(二價鐵)：在某些例子中，鐵離子(二價鐵)當做電子接受者，特別是在氯乙烯的生物轉換作用，亞鐵較鐵離子易溶於水，在污染帶上游地區含高濃度的亞鐵顯示厭氧呼吸作用，鐵的溶解度受到 Eh/pH 的影響。
- e. 錳：在厭氧呼吸中錳為電子接受者，四價的錳被還原為二價的錳，在污染帶中較上游地區含高濃度的二價錳顯示厭氧呼吸作用；二價錳較易溶於水。
- f. 甲烷：地下水中的甲烷濃度通常不顯著，在污染帶中上游地區含高濃度的甲烷，顯示甲烷化作用細菌的活性(Methanogenic microbial activity)。

3. 電子供給者

- a. 總有機碳(TOC)：與污染物的檢測一起，可以知道污染物以外的有機物量，用來評估支持還原去氯作用和含氯溶劑共同代謝作用所需電子供給者的量是否適當。
- b. 化學需氧量：化學需氧量高表示可化學氧化的有機物濃度較高(在污染井的化學需氧量之降低，可以做為還原脫氯作用中，有機物當做為電子供給者的指標，在污染帶中之化學需氧量較污染帶外之化學需氧量為低)。
- c. 生化需氧量：污染帶中生化需氧量較上游地區的生化需氧量低時，顯示微生物的活性。
- d. 氫(H₂)：決定最終電子接受程序。推估還原脫氯的可能性。

4. 一般水質參數

- a. pH 值：微生物分解有機污染物通常喜歡 pH 值在 6-8 之間，生物呼吸時會增加氫離子的活性，降低 pH 值。除非鹼度高中和 pH 值，在污染區內區外 pH 值的差異可以作為生物的活動研判。
- b. 導電度：導電度的測定可以瞭解監測井水樣是否為地層地下水。
- c. 溫度：可以影響氧的溶解度及其他地球化學參數、可以做為地下水代表性的指標，並且瞭解採樣前洗井是否合適。
- d. 鹼度：鹼度可以中和酸性，鹼度的增加可以作為生物活動的指標
- e. 氯：瞭解含氯溶劑降解情況。

此外瞭解水力延散及地下水補注或排洩所造成的稀釋作用，則

需污染場址的水文地質、地質、水文、氣象等資料來評估。水文地質及地質資料最重要的來源是地質鑽探或監測井鑽鑿過程中取得的岩心/土壤樣本。這些資料配合抽水試驗或微水試驗(Slug test)，可對污染場址進行場址特徵調查。場址特徵調查包括瞭解或決定下列事項：

1. 含水層之地質情況，包括土壤分類、粒徑分佈、孔隙率、岩性等。
2. 含水層之受壓、非受壓、或滲漏狀況。
3. 含水層補注或不透水的水文地質邊界。
4. 含水層水力等數/流通係數(Transmissivity)、儲水係數、滲漏因子、比出水量(Specific yield)等地下水流參數。
5. 地表滲漏補注區及補注量，含水層排洩區及排洩量。
6. 含水層異質性(土質變化及水力導數/流通係數的空間分佈)。
7. 降雨量、入滲量、地下水位之季節性變化及區域性地下水流方向改變和大小。
8. 污染範圍之可能大小、高低濃度區的識別。

這些資料用來建立污染場址的三維概念模式及地下水流場(地下水的流速、流向及流量變化)。三維概念模式可以幫助瞭解地下水及污染帶的平面和垂直方向的遷移。尤其當含水層有滲漏情形時，滲漏造成的污染帶範圍及濃度改變與 MNA 所造成的改變不可混為一談。概念模式方可用來瞭解可能的曝露途徑及監測井個數、位置。

概念模式是污染場址的三維、立體代表，用來瞭解及驗證地下水的流場、可能污染源的位置、污染釋放機制及污染的傳輸和宿命。這些資料可用來(1)評估可能適合污染場址的整治技術，及(2)提供數值模擬的基礎。概念模式異於數值模擬所用的電腦模式。電腦模式為一電腦語言程式，可用來計算模擬概念模式所代表的重要細節(地下水流場、污染物傳輸及宿命、補注/滲漏等等)。概念模式愈詳細，對現場狀況描述或代表的愈準確，則電腦模式所計算、模擬的結果也更可靠。

含水層中代表水力延散作用強弱的參數稱為延散率(Dispersivity)。目前廣為接受的理論是延散率的大小隨污染帶尺度(長度)增加。在評估 MNA 因水力延散造成的現象時，在地下水流方向(縱向，Longitudinal)延散率約為：

$$a_L = 0.38(\text{Log } L)^{2.414} \text{ --- (Xu and Eckstein 1995)(1)}$$

其中 a_L 為縱向延散率， L 為污染帶長度。與縱向正文的水平方向稱為切向(Transverse)，切向延散率， a_T 大約為縱向延散率的

0.1 倍(Gelhar et al 1992)或 0.33 倍(USEPA 1986)

$$a_T = 0.1 \quad 0.33 a_L \quad (2)$$

含水層中垂直延散率， a_V ，約為縱向延散率的 0.025 至 0.1 倍 (USEPA 1986)

$$a_V = 0.025 \quad 0.1 a_L \quad (3)$$

縱向、切向、垂向延散率分析、模擬三維地下水污染傳輸的必要參數。式(1)；(2)及(3)的關係可作初試估計值；更精確的估算則需透過電腦模式對現場地下水中污染物濃度的校正步驟獲得。一般情況下，使用前述關係來決定這三個延散率的大小是可破接受的 (Wiedemeier et al.1998)。

吸附作用參數，如分佈係數和延滯因子(Retardation factor)，和生物降解率的決定已有相當標準的方法 (Freeze and Cherry 1979, McCarty et al.1981, Lyman et al.1992)，在此不再贅述。

雖然評估生物降解發生與否的參數相當多(見表二)，在實際問題中並非所有參數都需決定或使用。如美國威斯康新州自然資源局及依利諾州環保局結合產業界對七處不同地質狀況，受 LNAPL 污染場址進行 MNA 評估時，僅採用一般水質參數：DO、pH、ORP、電導度、及溫度。他們的結論是在這些場址中，僅 DO 一項即可相當清楚地證明 BTEX 的生物降解發生，並且作為推估生物降解率的主要資料 (Yang et al.1998)。七處場址中，污染帶之外未受污染的背景水質中 DO 濃度的超過 0.7mg/l，而苯、甲苯、二甲苯的好氧生物降解發生在 DO 大於 0.5mg/l。所以好氧情況發生於污染帶邊緣，使污染帶範圍不致擴大並且會逐漸縮小。在污染帶中間部分，DO 的濃度並不重要，因為在這一帶厭氧生物降解的發生是透過硝酸鹽、硫酸鹽、亞鐵及碳酸鹽作為電子接受者。

其餘的一般水質參數，pH、ORP、電導度及溫度並沒有提供更多的細節及更多用處。雖然量測分析較多的參數，對評估工作顯得較為嚴謹，但也增加成本與工作量。所以表六所列的參數應視為最高要求而非整體要求。亦即，用較少的參數即能科學性地證實生物降解及推估相關資料，應是可接受的。每一個場址的水文地質、地球化學、微生物作用、污染情況及污染物的物化特性均不一樣。所以對生物降解的證明參數應以個案視之。

MNA 的 評估準則與流程

一個完整合適的 MNA 的方案包括三部分：

第一部分的主體是提出證明，證實污染場址的土壤或含水層中自然衰減的充份及必要條件。充份及必要條件證據，所需資料及相關工作已詳述於前面數節中。其次，第一部分工作需要評估受體的潛在風險，包括：

1. 證明污染源被有效控制：

利用 MNA 處理之時間較長，在生物衰減速率比污染源釋放率高時，污染帶範圍不再向外推移，甚至逐漸萎縮變小。反之，污染帶繼續向外擴大可能產生人體及環境之危害。因此有效的控制污染源為場址利用 MNA(及任何污染整治方法)之先決條件。

2. 證明不可分解物質之濃度低於人體健康及環境可忍受濃度：

在污染物中含有物質不能衰減，其濃度對人體健康及環境產生不良影響時，該場址必需採取措施改善該項污染物之影響，才能利用 MNA 治。

3. 評估達到整治目標所需約合理整治時程：

MNA 整治時程的合理性是相對於可以使用不同主動式人為整治方式所需時間而言。一般 MNA 所需時間可能較人為方式為長但不應過長，因為地面狀況和污染帶穩定度可能在長的時程中變動。時程的合理性是一個複雜的且屬個別場址的決定，除了與可以使用的不同人工方式比較之外，合理性的評估亦應考慮：

1. 受影響的資源分類(如飲用水源、農業用水源)和資源的價值。
2. 受影響地下水層未來可能需要做為水源供應的相對的時程(包括替代供應源的可用度)。
3. 在地表下污染物量和預測分析的不確定因素(例如整治時程、未來需要的時間和污染物移動至產生暴露的時間)。
4. 長時間的監測和機關控制的可信度。
5. 公眾對延長整治時間的接受度。
6. 責任團體對整治所需的監測與評估的適當財政的供應。

第二部分的工作主要是提具完整的監測計畫並執行：

執行監測的目的為評估整治的效果、確保人體健康及環境，是一個重要的回應行動，在 MNA 中監測更為重要，因為整治時程長、污染物潛在的移動和其他不確定因素。對於每一個場址的監測計畫，應該要依位置、頻率、和評估整治成效所需的樣品型態與量測，和整治目標來規劃。所有監測計畫應設計達成下列各項：

1. 證明自然衰減發生是如預期的，並且沒有意外情況。
2. 辨識生物降解可能轉換產生的有毒產物。

3. 決定污染帶是否有向下游、橫向、或垂直方向擴大的趨勢。
4. 確保下游受體未受到影響。
5. 偵測環境中可影響自然衰減成效之新釋放出的污染物。
6. 證明保護潛在受體的有效性。
7. 偵測可能降低自然衰減任何過程的效率之環境狀況的變動。
8. 驗證整治目標的達成度。

只要污染物濃度未達預定的整治標準，監測工作就應繼續執行。污染物濃度到達預定的整治標準後，監測工作應延續一至三年，以確保污染濃度的穩定與維持在目標濃度以下。在整治決定或者其他場址文件中，維持監測計畫所需的機關與財政應該清楚的建立。詳細的監測計畫應該作為任何 MNA 建議的一部份，提供環保署或其他執行機關參考。

第三部分包含替代方案方法的整治計畫：

替代方案是在場址整治決定文件中的一個整治技術或方式，他的功能在當所選用的整治方法失敗時，作為事件的一個補救整治方法。替代方案可以為一個與選用整治方法不同的特定技術，或者為需要時選用技術的修正或加強。替代方案通常有彈性的，允許依場址風險與技術的新資訊來調整。在選用技術不被證實可使用在特定場址、在選用整治技術時污染物的性質與範圍有明顯的不確定性 或者被證實的技術被使用於場址特殊環境下其不確定性時，替代方案計畫是需要的。

整治決定文件中應建議一個或多個基準，包括選用整治技術執行不可接受的徵候，和指明執行替代方案時機，這些基準包括：

1. 特定地點的土壤或地下水之污染物濃度顯示是一個增加的趨勢。
2. 接近污染源的井顯示污染物的濃度大量增高，顯示一個新的或者的重新再一次的釋放。
3. 在原污染帶界線以外的監測井查出污染物，顯示污染物的重新移動。
4. 污染物濃度的降低速率不足以達到整治目標。
5. 土地和/或地下水使用的改變將造成影響 MNA 的保護的不良影響。

綜合本章討論，MNA 評估流程示於圖二。所有污染整治工作的目標均應涵蓋下列四項重點：

1. 阻止人體暴露於超過接受的風險水平之上。
2. 將污染帶的遷移減至最小程度。
3. 將污染源釋放率減至最小。
4. 儘可能地將污染帶復育至目前或未來之有益使用程度。

整治標準的訂定可用各污染物的 MCLs 作為基礎，或依場址目前或整治後的使用方式作導向。流程中明確定出若無生物降解的充份，或污染帶並未達到穩定或縮小的必要條件，則 MNA 不適合而應採用人工主動式整治方法。若場址情況滿足這兩條件，卻無法在合理時程內達到整治標準，則應考慮搭配其他人工主動整治方式以提高效率。

MNA 對污染整治之應用

若以污染物種類與特性為主要考量，不同污染物對 MNA 整治法的處理效果亦呈現相當大的差異性。

就上述三大類污染物而言，石油污染即包含了數百種有機碳氫化合物。對於此類污染物，由科學界豐富之研究與經驗證明，大部分石油污染物皆可被微生物分解，因此 MNA 法可謂合適之處理技術之一。唯石油污染物於環境中分解速率與其分子量成反比，含碳量愈高的重質碳氫化合物愈不易被分解。

基於整治之時效性與全面性之考量，MNA 法並不適於成為石油污染之"唯一"整治方法，而宜與其他技術配套使用或當成其他處理法的後續(Follow-up)處理法。

含氯溶劑(如 TCE-Trichloroethylene)一般之比重皆較水為大，通常被歸類為 DNAPLs (Dense non-aqueous phase liquids)，一旦進入土壤很容易向下滲至地下水層的底部。這類污染物其確切的污染位置不易準確測得，而且此類化合物非常不易分解，因此往往可以存在土壤及地下水中長達數十年之久。這類污染連使用較積極之整治技術都不一定能夠見效，若單以 MNA 法來處理含氯溶劑污染，除了在極少數主客觀條件皆非常有利於 MNA 法之情況外，一般皆難達預期的成效與目標。

至於無機污染之複雜度較之含氯溶劑有過之而無不及，無機污染物可能因環境因子的改變而使其溶解度增加，進而擴大其污染範圍。只有在特定有利條件下，MNA 才能發揮預期的處理功效。因而對無機污染物的處置而言，應以能夠降低污染物移動性(穩定化)及有效達增加輻射衰減等效果時才較適用。

三、新穎的土壤及地下水污染整治技術

近年來本公司各處廠陸續發生多起土壤及地下水污染案例，許多場址已投入相當多的人力與物力，然尚未有一場址已達整治標準而得以結案。以油品行銷事業部的國道322.5K漏油污染案為例，其發生迄今已逾兩年半，目前雖由本公司煉研所接手整治，唯成效不彰。總

公司有鑑於此，特委託美國貝泰研究機構(Battelle)協助引進生物漱洗技術(Bio-slurping)，期能加速浮油回收速度，縮短整治時程。同時煉研所亦委託美國環境服務公司(Environmental Service Incorporation, ESI)，協助評估污染整治成效。筆者於旅美期間，曾就該案與貝泰機構及ESI公司充份討論，茲概述如下：

國道322.5K 漏油污染案處理過程概要

1. 87年3月22日根據一棟住戶告知，發現油管遭竊賊盜鑽，台南處漏夜緊急焊補並向治安機關報案。
2. 87年6月6日永二街居民反映，其住家水溝有浮油及油味。
3. 成立緊急應變處理小組，由副總處長擔任召集人，處長擔任副召集人，下分污染處理、安全維護、工關服務及理賠後勤支援五組。
4. 估計外漏到地表下油料約350公秉。
5. 87年6月6日至7月31日由台南處同仁自行整治，抽出浮油118公秉。
6. 87年8月1日至10月31日委託成功大學負責整治，抽出浮油約100公秉。
7. 87年11月起改由煉研所接手整治，共鑿井38口(3/4"淺井4M深9口，4"深井12M深2口，6"深井14M深27口)。
8. 至88年10月止，總計回收浮油279公秉，而整治井中的浮油厚度，亦從87年8月的276公分減少到5公分以下。
9. 89年6月委託美國環境服務公司總裁Peter Murray至現場檢閱及探討所收集之土壤、地下水、空氣樣本等分析報告。
10. 89年8月委託美國貝泰機構協助引進Bio-slurping技術進行整治。

根據美國環境保護公司總裁彼得 莫瑞(Peter Murray)於八十九年六月在國道322.5K漏油污染案作成的評估報告中，歸納出了以下的結論：

1. 於1998年三月在國道322.5公里標誌附近發現有汽油及柴油外洩出地面。外洩量起初預計有350,000公升。外洩的期間不清楚。外洩的起因是由於竊油賊非法盜接位於高速公路東側的兩條地下油管而引起的。
2. 而在獲報附近住宅建築物有油氣產生時，才得以發現此次的外洩狀況，油氣的濃度高到不得不撤離所有建築物中的居民。不僅如此，建築物內累積的油氣還曾經發生過氣爆。目前有些居民已遷回住所，並持續接受中國石油公司的理賠。
3. 目前為止仍然沒有實施任何關於建築物內空氣品質的分析。2000

年 6 月 26 至 28 日，彼得 莫瑞在這段檢查期間中發現建築物的地下室有臭味，而建築物地下室的下水道溝渠中似乎含有乳化狀的石油物。目前該處並沒有可以防止油氣擴散到建築物內週遭空氣的機器設備。此外尚無實施任何調查來測定是否有其它氣體進入到建築物中。

4. 從兩支輸油管外洩出來的汽油及柴油污染了外洩點附近地區的土壤及地下水。浮油範圍從污染源的東北方一直擴散到住宅建築物的北端。具溶解性與吸附性的污染物則從污染源的北邊一直擴散到住宅建築物的北端。
5. 此區域的沉積物包括沙粒、淤沙、淤泥、以及泥土，而地下水位在雨季期間達地表下 1.5 公尺，而在乾季期間則達 7 公尺。地下水位往東南方傾斜，而且傾斜坡度相當大。地下水位含水層呈不穩定狀態且其厚度亦未知。
6. 此區域並沒有製作任何相關的地質資料，而也只有做出某些特定的地下水位等高線地圖而已。另外亦缺乏該區立體的圖形描述。為了更清楚瞭解污染的分布、結果、以及運輸，製作一座此區域的立體模型是必要的，而這些瞭解對於發展一個更有效率與功效的整治計畫來說，是非常重要的。
7. 此區域包含三個場址。為了討論方便起見，我們把這三座場址稱為場址#1、場址#2、以及場址#3。場址#1 位於該區的北方末端，現為芒果園(小芒果園)。場址#2 正好鄰近盜油點，目前亦為芒果園(大芒果員園)。而場址#3 上目前為一座包含 27 個住宅單位的建築物。
8. 該地區附近的土地使用包括高速公路位於該區西側。而該區的北邊、南邊、以及東邊土地的使用則包括密集的住宅區、商業區、以及不同的農業活動。
9. 到了 1999 年十月，藉著從井中把石油抽出的方法，該地區約已回收了 279,000 公升的浮油。而進行中的土壤氣體抽除淬煉，則有可能已經至少去掉了相當 50,000 公升浮油的量。
10. 每天從此區域回收的液態產物，其回收速率已經從 1998 年七月的 "3,800 公升/每日"，降低到了 1999 年十月"小於 40 公升/每日"。而 2000 年六月該區水井中浮油的平均厚度已小於 5 公分(此結論係根據中國石油公司於 2000 年 6 月 24 日提供給美國環境保護公司的資料)，而在 1998 年八月該場址量測到最大的厚度為 276 公分。
11. 浮油可能會殘留在該區北邊的場址上(場址#1)。該場址上並無監測水井，且其用地主人拒絕進行進一步的區域特徵紀錄與補救措

施。該用地上可能有一片呈浮油狀態的污染物，進而成為場址#1及場址#3(住宅建築物)的上游污染源。

12. 目前為止，尚未對下游處實行適當的受體調查及風險評估。此外也尚未對地下輸送管的西側展開調查。地底下的污染物有可能會擴散到輸送管西邊，也就是高速公路的下面。
13. 油料輸送管為位於地表下約 1.5M，而管子旁的回填級配可能成為外洩石油往南北方向擴散的第一管道。回填級配可能持續作為下游處污染物的來源。至今，尚未實施任何有關回填級配的評估。
14. 中國石油公司已在該區施行浮油回收、SVE、以及注入空氣等綜合整治措施。在該區域空間條件的限制下，這些措施應該是去除該區域土壤、地下水污染物最適當且最有效的方法。
15. 目前，建築物旁僅有兩處 SVE 點。這些對於防範石油氣侵害的效果可能不明顯。
16. 目前也沒有實施試驗性的測試來證明空氣注入的作業不會將油氣引入附近的建築物或設施。注入系統在沒有適當的測試及控制下的持續作業可能會導致油氣發生意外的滲透。除此之外，也沒有需要空氣注入系統作業的理由。空氣注入的方法一般是用來補救溶解性的地下水污染物。目前為止，該區的溶解性污染物尚未證明會對大眾的健康安全或脆弱的環境受質造成危害。倘若風險評估顯示該地的溶解性污染物並不會造成明顯的危害，則可能將不再需要注入的作業。
17. 至今仍未建立該區域的整治目標。
18. 至目前為止所有的補救所付出的努力，可能已除去或降低該地的 90% 的外洩產物。
19. 根據最後所建立的該區整理目標，該區污染物的減少量若要達到可以接受的程度，或是若要消除那些對大眾健康安全有所危害的風險，從 2000 年七月算起大概將要花上兩年的時間。

針對這次國道322.5K漏油污染事件，ESI公司基於上述的結論，提出了以下幾項的補充建議。

1. 積極準備該場址的相關地質資料，以及該場址地層的立體模型。這些圖表資料及模型可以利用現有的鑽鑿紀錄、及用來測定含土水層厚度與垂直污染分布所建立之鑽探報告，來加以製作。
2. 紀錄有關地理水質紀錄、場址(場址#1)北邊污染分析結果和分布、以及輸送管西邊區域等方面的相關特徵。這將有助於實施有效又迅速的整理工作。
3. 藉由運用人工的方法沿著管溝挖掘試驗性的凹坑來紀錄輸送管溝

渠中污染物的分布特徵。而從試驗性凹坑收集來的土壤樣本則可以用掌上形的光游離儀器來掃描其 VOCs 成分。

4. 測定地下水含水層的厚度與垂直污染分布。這項工作可以藉由在該區 3 至 4 個固定點直接貫入土壤及地下水抽樣儀器而完成。
5. 更準確地估計該場址洩漏的總數量。
6. 更準確的估計自該區移除的氣態及溶解性污染產物的數量。
7. 建立該場址整治目標。確定該場址每一種污染狀態(游離態、吸收態、溶解態及氣態)可以接受的濃度。整治目標至少應包含清除該場址所有測量得到、會飄移的污染物，以及清除會影響到住宅建築物的油氣。
8. 撤離所有受災建物裡的居民，直到確認並降低所有的風險為止。
9. 於住宅建築物附近地區應用更有效率的土壤氣體抽除方法來防止氣體不斷滲透到建築物裡。可以藉由增加土壤氣體抽除點來達到此目的。這些額外增加的點可以裝設在該區目前正在使用的水封式真空幫浦上。
10. 若住戶居民拒絕撤離，那麼便封閉該棟建築物的下水道，並從其上游處施加負壓力。確認石油氣是否會透過其它的管道滲透到建築物中。如果有發現其它的管道，則試著封閉該出口，並將外洩的油氣抽除。
11. 收集建築物內一般的空氣作為實驗分析的樣本。空氣樣本應每隔一個月，或每隔一季收集一次，直到建築物復原為止。必須要先做出一個詳細的計畫後，才可以實施空氣取樣及分析的工作。而此計畫應該確保從每一住宅單住中抽取具代表性的樣本。另外還應該從其它地點抽取樣本，已證實此事件中濃度分析的可靠性。
12. 為了確認與估計其它潛在的風險，因此必須要實施徹底的風險評估。風險評估的重點應放在場址#3 上的住宅建築物、該區南邊及東邊的建築物、該場址南邊的地面排水系統、以及該場址南邊的兩座供應水井。
13. 實施試驗性的測試來測定目前使用之 PVC 油氣抽除/注入等的效率是否足夠。若測試結果顯示不夠，那麼就必須要用由不銹鋼線纏繞的連續孔狀過濾井材來替代。
14. 試驗個別抽氣點的影響範圍。
15. 倘若目前的地下水污染濃度超過所設定的整治標準，並對潛在者造成無法承受之風險的話，便重新開始空氣注入的作業。在直徑 1 吋長的空氣導入管和直徑 6 吋長的外管兩者之間，藉由在環帶上加裝密封墊的方法來改良日前的空氣注入點。密封墊應設置在地下水位以下的地方以防止空氣從該點靜止的水中流到地下水位以

- 上的區域。密封墊將會使空氣自各點流入含水層中。如果可能的話，用經過設計的 1 吋 PVC 所製成的注入點來替代原先的注入點。
16. 若要繼續空氣注入的作業的話，則先實施測小型實性的測試來確保 SVE/空氣注入系統在進行時，能夠有負壓存在。
 17. 在進行整治措施及區域特徵紀錄的同時，應記得製作每一季的流程報告。
每一季的報告應包括：
 - 有關前一季該區整治工作的討論。
 - 地下水等高線圖。
 - 污染分布圖:含浮油、油氣、與溶解性 BTEX。
 - 產物每日回收的累積圖。
 - SVE 氣體抽除的速率及污染物每日回收累積的速率。
 - 室內空氣樣本的分析結果。
 18. 積極持續該區的整治工作，直到降低風險評估中所有已確定的重要風險為止。當這些風險均充分降低之後，即終止進行中的整治工作，讓污染濃度自然地降低，以達到所建立的整治目標。

完整的污染整治流程

ESI 公司的報告指出，本公司在國道 322.5K 的整治方向雖然正確，唯至今仍停留在緊急應變階段，並未能完全掌握場址特性，致無法有效回收殘存之浮油。筆者有鑑於此，特地參考了美國超級基金場址的污染整治流程，其中包括場址特性調查(Site characterization)、整治方案研究及可行性評估(Remedial investigation & Feasibility study, RI/FS)、模式模擬(Simulation model)、風險評估(Risk assessment)、以及基本設計(Basic design)等(如圖三)。尤其是行政院環保署已公告「地方環保機關處理特定土壤污染問題之行政指引」及「處理地下水污染案件之作業程序」，一旦污染場址遭到主管機關列管，則事業單位必須提出整治計畫，並依照此程序進行調查及整治，同時還須接受學者專家的監督及審查。故如何引進及建立完整的土壤及地下水污染整治流程及技術，應是本公司當前土壤及地下水污染防治工作的重點。

新穎的復育技術- - - 雙相抽取技術

除了建立場址調查與模式模擬技術外，如何引進新穎的土壤及地下水復育技術，以取代傳統的地下水抽出—處理(Pump and treat)及土壤油氣抽出(Soil vapor extraction, SVE)技術，以縮短整治時間，亦為本公司現階段的重點工作。雙相抽取技術(Dual phase

extraction, DPE)即是利用高真空度及特殊的設計(圖四~七),達到土壤及地下水污染整治的目的,可同時抽出浮油、土壤油氣及受污染的地下水,唯需較大的尾氣處理及廢水處理容量。雙相抽取技術較傳統的SVE及Pump & treat精密,故操作維護上亦須專業的技術。目前國外已有移動式的雙相抽取設備,本事業部將陸續採購及引進相關技術。

新穎的復育技術- - - 三合一整治技術

由於一般的地下水污染整治技術,尤其是浮油回收,常需伴隨著抽取大量的地下水,因此必須有極大容量的廢水處理設施,才能進行污染整治工作。然而對國內的加油站而言,並無足夠的空間來處理抽出的受污染地下水,如何引進一套適合國內加油站的地下水污染整治技術,亦為筆者此行的重點。

目前美國已研發出一套三合一整治技術(3 in 1 technology),採用中度真空及特殊的井體設計,同時達到土壤及地下水污染整治的目的。三合一技術係將浮油、土壤油氣及受污染的地下水,分不同的階段處理,亦即先以Bio VEPS回收浮油,再以SVE抽出土壤油氣,最後再採用井內氣提循環系統(In-well stripping system)處理受污染的地下水(圖八~九),其特點為在單一井內即可同時處理浮油、土壤油氣及受污染地下水,且不需抽出大量的地下水,可大幅減少廢水處理設備的容量,適合加油站使用。三合一整治技術較傳統的SVE及Pump & treat精密,故操作維護上亦須專業的技術。目前國外已有移動式的三合一整治設備,本事業部將陸續採購及引進相關技術,並選擇適當的場址進行試用及評估。

四、長途管線測漏技術

近年來本公司發生的多起重大漏油污染事件中,有半數以上是因管線遭外力破壞或竊油賊盜油不當所引起,而本公司常因未能及早發覺致污染擴散而遭外界質疑,除導致公害糾紛事件及鉅額賠償外,更嚴重影響公司形象。鑑於委內瑞拉於八十九年間曾因多起盜油案件而發生爆炸、火災及環境污染,並導致多人之傷亡。加上未來油品自由化後,民間業者亦有經營之輸油、氣管線,其所輸送之物質,或為易燃、或具毒性、或易污染環境,一旦遭盜油者破壞而發生洩漏,對管線周圍民眾之生命財產勢將造成立即危害。故基於整體油氣管線安全維護之考量,本公司實有必要及早建立一套長途管線的測漏技術,以避免發生漏油污染及火災爆炸等事故。

目前中油公司已委託煉製研究所陸續安裝壓力波長途管線測漏及監測系統，雖已發揮極大功效，然因其準確度仍為 $\pm 1,000$ 公尺，對盜油(或漏油)位置的研判而言，仍有極大的改善空間。筆者特地參訪了美商 Caldon 公司的高精密度超音波流量計，以及利用此原理研發的 Line Watch 長途管線測漏系統(圖十~十一)。該系統的特點為精密度高，對液體流量的計量誤差可達 $\pm 0.5\%$ (表三)，在最佳狀況下其測漏系統的定位誤差可達 ± 30 公尺，且該測漏系統不受操作溫度、壓力、油品種類的影響。據悉台塑六輕廠已訂購七套高精密度超音波流量計，將於近期內交貨，台塑公司也將陸續引進該公司的測漏系統，此種前瞻性的作法值得肯定與效法。

五、結論與建議

1. 汽油添加劑MTBE是否應禁用在國內外皆受到熱烈地討論與高度關注，由於MTBE較之其他碳氫化合物具高度水溶性，其可能引發之地下水污染亦是必須面對之問題。目前歐美各國正積極研究MTBE禁用之後，是否有較為安全之替代品（如醇類），本公司亦應及早準備，擬定妥善之因應策略。筆者以為，MTBE的添加對空氣污染防治而言，絕對有其正面的功效，只要能確實作好源頭的防漏管理，MTBE並不致對地下水質或飲用水源產生直接的影響，因此在MTBE的替代品及其安全性尚未證實之前，主管機關的政策仍宜審慎評估。
2. 受監測自然衰減(MNA)在美國已經是一個可以被認可與接受的污染整治技術。其污染移除機制主要是依靠非人工的自然分解為主，屬於被動之整治技術，但為了確保 MNA 整治期程與效果，整治者必須投入更多心力於積極的成效監測工作上，其適用性與可行性亦需先經過複雜且謹慎的評估程序，方能獲得確實有效的整治成果。目前MNA 復育法在國內仍無足夠的研究與相關實務經驗，其適用性與操作、監測技術的實務等仍有待進一步努力，因此本事業部亦將選擇一至二座加油站進行評估，期能建立此技術。
3. 目前本公司已有部份場址出現污染跡象，並積極進行整治中，唯並未能建立完整的污染整治流程及引進新穎的復育技術，致整治成效不彰。由於環保署已公告「地方環保機關處理特定土壤污染問題之行政指引」及「處理地下水污染案件之作業程序」，一旦污染場址遭到主管機關列管，則事業單位必須提出整治計畫，並依照此程序進行調查及整治，同時還須接受學者專

家的監督及審查。故如何建立完整的污染整治流程及引進新穎的復育技術，以縮短整治時間，應為現階段的重要課題。

4. 歐美各國已發展出極為先進的長途管線滲漏監測技術，可以有效監控油料輸儲過程中的異常變化，及早採取適當的應變措施，避免污染擴散及發生工安事故。中油公司雖已委託煉研所建立壓力波長途管線監控系統，唯其準確度尚有待提升，如何引進較精密的長途管線監控技術亦有及必要性。

六、參考文獻

1. 侯善麟；2000，鄰近水源地區加油站附近河川、湖泊水質採樣、檢測計畫報告；中國石油股份有限公司油品行銷事業部安環室，未發表。
2. James Jacobs, Jacques Guertin, and Christy Herron; 2000, MTBE: Effects on Soil and Groundwater Resources, Lewis Publishers.
3. 侯善麟;2001,配合監測計畫之自然復育法-MNA (Monitored Natural Attenuation)淺談；刊印中。
4. 陳家洵；1999，受碳氫化合物污染場址環境污染改善策略成效分析；行政院環保署委託計畫期末報告，審議編號：EPA-88-FA32-2202。