

行政院國家科學委員會

八十八年度石油暨石化產業科技學術合作研究計畫

地下儲槽滲漏偵測方法評估及建議

中華民國八十九年一月三十一日

地下儲槽滲漏偵測方法評估及建議

期末報告

委託單位：中國石油股份有限公司

計畫編號：NSC 88-CPC-E-009-004

執行期間：87年8月1日至88年7月31日

計畫主持人：單信瑜

執行單位：國立交通大學土木工程學系

中華民國八十九年一月三十一日

目錄

第一章 計畫目標.....	4
第二章 研究背景.....	6
第三章 研究方法及步驟.....	9
第四章 研究結果.....	10
第五章 結論與建議	49
參考文獻.....	50
附錄一.....	52
附錄二.....	55

摘要

近年來國內陸續發生加油站地下儲槽及輸油管線洩漏事件，引起社會大眾的注意。老舊的儲槽及管線，因材質發生銹蝕或老化的材料受應力扭曲，極易造成破損洩漏。爲了要能夠對老舊油槽加以適當地管理，包括全面監測以及優先更新洩漏可能性高且洩漏後果嚴重的儲槽。然而，監測設施的設置與監測的執行往往必須要龐大的經費，且必須要耗費時間始得以完成。如何將老舊的油槽設置偵測系統加以區分出優先順序，以及需要設置的偵測裝置，將有利於降低儲槽滲漏造成的災害。另一方面，選擇適當的偵測方法，在最短時間內設置並開始進行監測也同等地重要。本研究將針對各種不同的滲漏偵測方法利用資料分析、數值模式模擬加以評估。依據滲漏率和發生滲漏和偵測到滲漏的時間差之關係爲主，建立其有效性與設置之便利性之評估準則，以利管理階層能夠有所依循。本研究針對目前可用的偵測方法與滲漏污染電腦程式進行資料收集與比較。

關鍵詞：地下儲槽，滲漏偵測，監測

Abstract

The leakage of underground storage tanks and pipelines occurs frequently in recent years. The leakage is resulted from corrosion, constructional imperfection, or structural damage of the tanks and pipelines. To reduce the liability of leakage, the owner and manager relies on the effective monitoring system for early warning. In addition, it is important to replace old tanks with new ones or upgrade the old tanks to reduce the risk of leakage. Currently, there are a few types of monitoring methods that are approved by the regulations. However, there is little information on the comparative effectiveness between these methods. As a result, it is difficult to select the most appropriate monitoring method for any particular site. The proposed research will make comparisons between these methods based on the effectiveness and the sensitivity under various conditions. The evaluation of each method will be based on the relationship between the time lag from leakage occurs till detection is confirmed. The results will allow the owners and managers of underground storage tanks to select the most appropriate monitoring schemes of each site based on effectiveness and cost.

Keywords: Underground Storage Tank (UST), Leak Detection, Monitoring

第一章 計畫目標

地下儲槽的滲漏問題近年來在國內外都引起重視。尤其是遍布各地的加油站使得地下儲槽的管理更為困難，為了能夠有效預防地下儲槽滲漏造成的污染，選擇採用適當的偵測方法是絕對必要的。

目前法規所規範的滲漏偵測方法，係基於工業界可使用的�方法加以整理後，對儲槽所有人與管理者提出。事實上，由於這些方法的基本理論間有極大的差異。各自的有效性和偵測靈敏度，並未予以適當地比較區分。

本研究的目的是在於針對這些方法，作合理的比較區分。比較的基礎為滲漏量與滲漏時間，滲漏率。以一定的滲漏率為基準，比較方法間能夠測得滲漏的時間順序。

本研究將先針對目前有的偵測系統工業標準加以評估分級。之後以自動監測系統(ATG)的精度為準，利用土壤氣體的傳輸模式，對幾種現地狀況加以模擬油氣傳播的情形。利用此結果，判斷設置在不同位置的偵測設備何時偵測到油氣外洩。藉此不僅可以判斷出各方法的有效性，同時也建立偵測點配置及取樣頻率等準則。

本研究的最終目的是要建立一套地下儲槽監測系統設置的準則，俾使業者能夠針對現地條件與儲槽狀況選擇最經濟有效的監測系統。

本年度係此計畫的第一個年度，預計在年度中將完成以下兩項重要工作：

1. 一般滲漏偵測方法於不同環境條件下效能之初步評定與分級
2. 滲漏污染模擬程式之比較與分析

其中對於滲漏偵測方法的初步分級，將可以立即提供地下儲槽業主參考使用。對於目前所擁有的各地下儲槽使用的偵測方法做一概況評估與檢討。若發現使用的偵測系統效能無法達到要求的地下儲槽，依照滲漏發生後果的嚴重性研判，可以立即著手進行監測系統的改善。

第二章 研究背景

近年來相繼發生加油站油品儲運洩漏問題，造成土壤、地下水的污染，進而危害農作物、民眾健康，且油品容易蒸發、易燃、極易火災、爆炸等危險事件。為此，行政院環境保護署對新設加油站防止污染地下水體設施暨監測設備已訂定規範，於民國 86 年 8 月 8 日公告地下儲油之汽油、柴油為中央主管機關公告指定之物質及應設置之防止污染地下水體設施暨監測設備，以檢測並防範地下儲油槽洩漏之發生(環保署，1997)。

然而，加油站及地下儲槽之成長速度亦極高，環保署表示自 77 年開放民營後加油站數目已成長一倍。依據統計資料在 84 年 10 月 16 日止台灣地區實際加油站有 1,226 站，估計地下儲油槽可達 6,000 個；根據經濟部能源委員會資料統計截至民國 86 年 10 月止，臺灣地區已開業加油站共計 1458 站，其中公營 586 站、民營 890 站，地下儲油槽近 7000 座，其中部分加油站設立已超過 20 年。

另一方面，地上儲槽及管線也同樣有滲漏的問題。在台中市五權路加油站及高雄苓雅寮儲運所等相繼發生油料洩漏事件，顯示出地面上及地下儲槽為潛在地下水污染源。地面上儲槽的數量亦不少，僅台中港區共有 162 座儲槽，苗栗縣中港流域亦有 145 座貯槽，儲存著如氯乙烯、苯、環己烷、己內醯胺、甲醇、DMF、及燃料油等物質，儲槽洩漏的資料統計並不完整。地上儲槽一旦發生滲漏，較易被觀測到，因此若滲漏防制系統優良，其監測系統不若地下儲槽般複雜。此外，地上儲槽所處的環境條件也較地下儲槽有利，較不易發生鏽蝕等狀況；發生滲漏可能多因工程結構上因素使然。

由於地下儲油槽及管線埋設於地下，易使油槽或管線受氧化腐蝕、外力

破壞或其它原因造成洩漏污染，而地下儲油槽洩漏的機率與其埋設的年代有正比例的關係，根據美國賓州環境資源部的研究，埋設 10 年以上的儲油槽有 46% 會發生洩漏，而埋設 15 年以上者，其洩漏機率更高達 71%。地面上及地下儲槽，依據美國賓州之統計，地下儲油槽系統產生的洩漏，儲槽本身之洩漏佔 49%，管路之洩漏佔 39%，其他兩者皆洩漏者佔 12%，亦隨著儲槽埋設時間之增加而增加。國內加油站漏油大部分在油管部分，原因有施工不當造成土木結構之鋼筋與油管或油槽連接、包覆不良使金屬外漏與土壤直接接觸、及加油機漏電與接觸不良導致電蝕。

環保署為瞭解地上儲槽現況，八十四年補助苗栗縣辦理完成苗栗中港溪流域地下、地上儲槽調查，並研擬防治規範將做為管理方式之參考。此外，環保署為瞭解加油站地下儲油槽現況，八十五年度辦理完成建立地下儲油槽防蝕、測漏設施設置資料庫，並實際檢測五十處公民加油站測漏管油氣濃度，並探討國內加油站滲漏原因，發現主要為管線之滲漏。歸納出臺灣地區加油站油品洩漏之三項本土化之因子：主要為興建之施工品質不佳、防蝕設計不當、加油站管理不善。並提出改善之方法，包括建立加油站設置之標準、加強加油站工作人員之專業知識，定期執行洩漏監測，並研擬設置加油站地下油槽/管線之防污染費用，以為改善之基金。此外，環保署將特別針對老舊加油站加強抽檢測漏調查，建立加油站洩漏檢測程序，調查地下儲油槽污染現況等，加強業者對其地下儲油槽系統監測採取適當之管理。

各業者本身為避免災害之發生及災害善後與賠償龐大財務負擔，應自行對其所擁有的老舊油槽與管線進行檢測，並且監測工作應不以滿足法令要求為依歸，而應以確實能發揮早期警訊為目標。此外，若能針對老舊管線加以更新，則更可以大幅降低因滲漏造成的損失之風險。

以環境工程師的眼光來處理這類地下儲槽或輸油管線所造成的問題，係由三方面著手。首先是預防，即是避免或防止此類洩漏的發生。如近年來發

展的雙層式地下儲槽(Double Wall Tank)，即在油槽上加裝一層外殼以阻止洩漏發生，並配備有預警裝置，可及早通知油槽之使用或管理者。同時也有雙層之輸油管，以保護長期受壓力的輸油管線。

其次是對現有的地下油槽進行測漏試驗，並加裝預警系統，以利在洩漏發生時可以適時採取行動，以免污染繼續擴散而不可收拾。在過去幾年中，有揮發性氣體偵測井、地下水監測井、電子式土壤氣體連續性監視系統等技術及設備的發明、改良與應用。同時為了解使用中的儲油槽的適用性，在法規中明定必須定時對儲槽及管線進行測漏檢驗(Tightness Test)。在這方面的技術與設備，在過去幾年裡也有很大的進步。以美國加州為例，目前美國加州法律規定，在測漏檢驗時，若發現油槽或管線的滲漏大於每小時 0.05 加侖，即判定為不合格。必須立即截斷污染源，採取更換儲槽與其他補救措施，同時在一定時間內通報有害廢棄物主管單位。然後對儲槽所在場址進行污染調查，以了解是否有污染物質滲出，再由調查結果界定污染範圍，並作為採取進一步行動的依據。

因此，綜合上述，建立適當的地下儲槽滲漏監測系統是迫不及待的工作。有鑑於此，本研究將比較現行法規所容許的偵測方法，以利對各種條件不同的地下儲槽做出最有效率偵測方法的建議。

第三章 研究方法及步驟

本年度主要的工作在於儲槽滲漏偵測方法與設備以及滲漏污染模擬程式之相關資料資料收集與分析。

針對目前法規所列可使用中的方法做比較評估。偵測方法目前可分成三大類，存量統計分析、儲槽測試、滲漏油監測；此三類方法之間差異性頗大。本研究將以較客觀的方式，探討不同偵測方法間適用狀況的差異，提出不同儲槽與環境條件下可能較適用的方法。此外，由於舊儲槽與新儲槽條件不同，許多適用於新槽的監測方法無法使用，因此亦將對土壤油氣監測井與地下水監測井提出較詳細的評估。另一方面，亦將收集先進偵測方法(例如利用光纖偵測等)之資料，並探討在本地利用的可行性。評估過程中，將收集設有監測裝置儲槽之資料，輔助評估。

目前訂定的方向以蒐集美國環保署和石油院(American Petroleum Institute, API)的文件，以及各設備製造商的文件為主；同時也將蒐集其他國家的環保石化機構與學術研究成果。現今可得的資料包括個別方法的精確度限制，與現地條件限制。根據這些資料，可以對個別方法做出效能的最低要求限制條件，以提高使用時的效果。配合現地條件的限制資料整合後，預期可以完成以儲槽條件和環境條件選擇偵測方法的初步準則。

本年度中希望能建立基本的滲漏偵測方法評估方式並進行可用之儲槽滲漏模擬程式篩選，以利次年度的程式模擬分析順利進行。

第四章 研究結果

4.1 國內的法令規範和執行狀況

目前國內的法令規定(環保署，1997)，新設加油站地下儲油槽系統應設置下列防止污染地下水體之設施：卸油管離開加注口處須裝設防止濺溢危害環境之設施。而地下儲油槽系統應依下列防腐蝕方法之一，進行地下儲油槽及其關連之管線防腐蝕措施：

(一)使用非腐蝕材料建造

(二)使用下列方法之一保護鋼材：

1. 包覆以適當之不導電物質
2. 裝設陰極保護系統
3. 裝設加壓電流系統

(三)具有二次阻隔層(Secondary Containment)保護

在監測系統方面，依據水污染防治法所訂定的法規要求新設加油站地下儲油槽系統必須設符合下列規定之置監測設備與監測措施：

1. 每月一次之總量管制(SIR)及每五年一次之密閉測試(Tank Tightness Test)
2. 每月一次之自動儲槽量計及下列監測方式之一：土壤氣體監測、地下水監測、槽壁間隙監測或其他經中央主管機關認可之測漏方式

目前國內環保主管機關並未頒佈對監測方法與設備的詳細規範，也未提供進一步的技術資料可供參考。

4.2 國外的法令規範和執行狀況

因美國方面的資料較齊全，也較先進，因此以美國為例說明。另一重要原因是我國與儲槽管線相關的法令規範完全抄襲自美國環保法規，卻較不嚴格。所以，舉美國的例子可以更清楚整個概況。

根據美國的統計資料，美國共有 110 萬個受聯辦法規管制的地下儲槽分佈於 40 萬個位址。這些地下儲槽絕大多數裝的是石化油品。其中有 25000 個地下儲槽中裝的是有害物質。截至 1996 年 10 月為止，共有 318,000 件經證實的地下儲槽洩漏事件。

美國聯邦政府由環保署在 1988 年公佈新建地下儲槽的最低標準，並要求舊槽升級、更新、或封閉。USEPA 的技術法規是設計來降低地下儲槽發生洩漏的機會，在洩漏或漫流時能即時偵測到，並確保即時清除。

相較於美國環保署的規定，我國的法令較不嚴格。美國目前規定除了新地下儲槽必須具有預防滲漏與滲漏偵測設施之外，在 1988 年 12 月 22 日之前設置的老舊儲槽也必須在 1998 年 12 月 22 日之前完成所有的同等級預防滲漏與滲漏偵測設施。若老舊油槽在規定截止時間仍無法達到要求，則必須停止使用，予以封閉。

在預防滲漏的方面，共計有三項要求：進油溢流保護(Spill Protection)、加油口溢流保護(Overfill Protection)、預防鏽蝕保護設施(Corrosion Protection)。

進油溢流保護設施是爲了防止油灌車卸油至儲槽過程中的油品漫流，一般以桶狀的承接裝置(Catchment Basin)包圍注油口。加油口溢流保護則是爲了防止在爲客戶加油服務時的油品滿溢漫流，一般可以用自動關閉裝置(Automatic Shutoff Device)、滿溢警鈴(Overfill Alarm)、浮球閥(Float Ball

Valve)。防蝕保護則有下列幾種選擇：儲槽和管線完全由不會被鏽蝕(Noncorrodible)的材料如玻璃纖維製造、儲槽和管線由鋼材製造外塗抗蝕(Corrosion-resistant Coating)材料並使用陰極保護(Cathodic Protection)、儲槽由鋼材製造包覆一厚層的不會被鏽蝕材料(此方式不適用於管線)。此外，地下儲槽的設計、製造、安裝均必須要符合何國家執行標準規範。

老舊儲槽的防蝕保護則有三種方式進行改善：加裝陰極保護設備、設置槽內襯砌(Interior Lining)、同時加裝陰極保護設備並設置槽內襯砌。老舊管線則一律必須使用陰極保護。

因為裝置這些設備所費不貲，因此在某些州官方有低利貸款幫助財力不足的儲槽所有人完成這些工作。

4.3 美國環保署所規範之滲漏偵測法規與方法

在滲漏偵測方面，自 1988 年 12 月 22 日起所有的新儲槽均必須在安裝時同時設置滲漏偵測設備。在此日期之前設置的所有老舊儲槽必須在 1993 年 12 月 22 日之前具備滲漏偵測裝置。

地下儲槽的洩漏偵測系統必須要滿足三項基本需求：

1. 必須要能夠偵測到自平時盛裝油品的地下儲槽和其管線的任何部份的洩漏；
2. 洩漏偵測系統的安裝、率定(Calibrated)、操作、維護都必須符合製造廠商的指示；
3. 洩漏偵測系統的效能必須符合聯辦法規的要求(CFR280.43 和 280.44)。

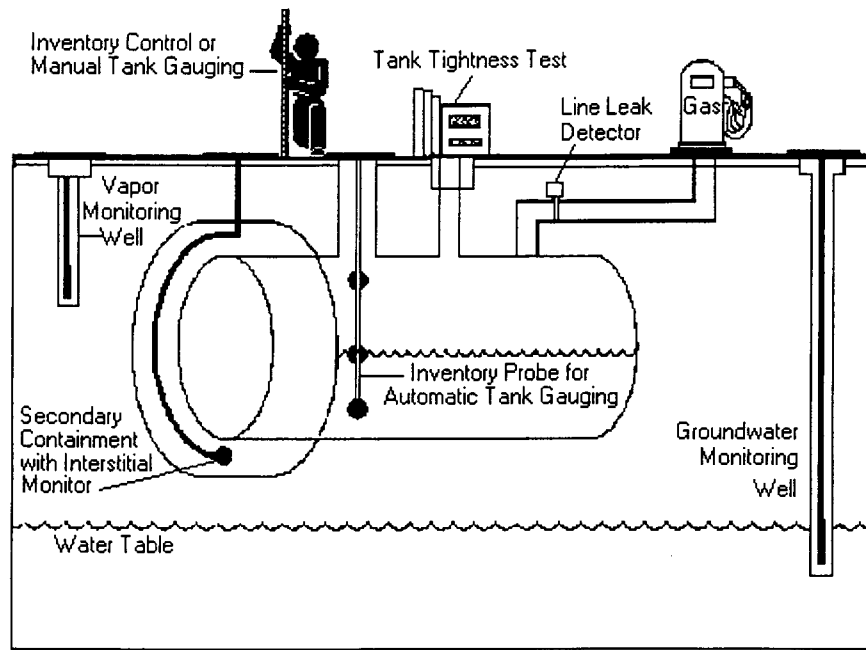


圖 1 地下儲槽監測裝置示意圖

圖 1 是採用雙層式地下儲槽的加油站，圖中其它得配備為目前典型的加油站洩漏偵測系統。儲槽最少必須要設置以下七種偵測方式之一，或其他該州核准之偵測方式：

1. 二次阻隔層和間隙偵測 (Secondary Containment and Interstitial Monitoring)：

在儲槽和周遭環境間設置阻絕層。此阻絕層形同第二層的槽體(相對於儲槽本身為主槽體，因此稱為 Secondary Containment)。此次層槽可以是混凝土窖、襯砌、或是雙層儲槽的外層。自儲槽滲漏出的油品被引至位於儲槽和外層障壁間監測設施。此監測裝置可以簡易如一測桿(Dip Stick，如引擎之機油桿)至複雜的自動氣液體感測器。盛裝有害物質的地下儲槽必須要使用此法。

2. 儲槽自動計測系統(Automatic Tank Gauging [ATG] Systems)

儲槽自動計測系統(ATG)利用固定裝置於槽中的感測裝置。此裝置連接至電子控制設備，可量測油品液面高和溫度。在槽體密閉測試時，在幾小時中油品未注入或移出儲槽，此裝置可自動計算槽中油品體積變化，從而得知是否有滲漏。此法不適用於管線。

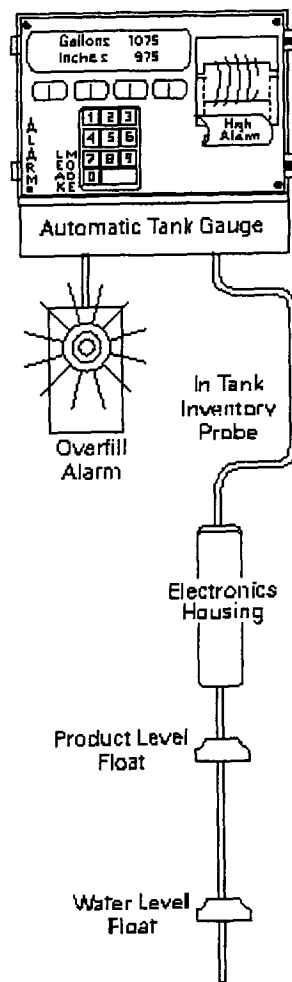


圖 2 儲槽自動計測系統

3. 土壤油氣監測(Vapor Monitoring)

土壤油氣監測可以量測在儲槽與管線周遭土壤孔隙中油品蒸氣的濃度以

決定是否有滲漏。此法須要設置監測井。蒸氣監測可以用人工取樣設備定期採樣或用自動監測裝置連續量測。

4. 地下水監測(Groundwater Monitoring)

地下水監測設備感測浮在地下水位上的油品存在。此法必須要靠設置在儲槽或沿管線臨近適當位置的監測井。可以定期人工取樣或用自動感測裝置決定是否有滲漏油品到達地下水位。此法只在地下水位深度在 20 英尺內有效，否則無法即時偵測到洩漏。

5. 存量統計(Statistical Inventory Reconciliation, SIR)

存量統計(SIR)利用複雜精細的電腦軟體以判斷是否儲槽是否有洩漏。電腦對一定期間內由操作者提供給測試者的油品存量、進出量資料作統計分析。

6. 人工儲槽計測(Manual Tank Gauging)

人工儲槽計測只能用在 2000 加侖以下的小型儲槽。對於容積大於 2000 加侖的儲槽和管線，此法無法作用。使用此法必須要每星期中儲槽暫停使用 36 小時來量測儲槽內的油品體積。容積 1000 加侖或以下的儲槽可以只用這個方法。容積在 1001 至 2000 加侖的儲槽只有在和定期槽體密閉性測試時，且當儲槽在新設或升級的 10 年中，才可使用。在 10 年過後，地下儲槽必須要用上述的 1-5 偵測方法。

7. 儲槽槽體密閉測試和存量控制(Tank Tightness Testing and Inventory Control)

這個方式由兩種方法組成。儲槽槽體密閉性測試需由測試業者定期在儲槽中暫時裝設特殊的設備以測試槽體之密閉性。槽體密閉性測試必須伴隨存量控制。存量控制是即時的會計系統，就像地下儲槽所有人或操作者的支票簿，用以偵測滲漏。存量控制必須靠每日精確量測槽內油品體積和每月的計算以證明儲槽沒有洩漏。槽體檢測和存量控制只能在新槽安裝或舊槽升級後的 10 年中使用。在 10 年過後，地下儲槽必須要用上述的 1-5 偵測方法。

由於各種方法目前尚未有相互比較的研究，因此各國法令均將其一視同仁，賦予同等的有效性與靈敏度，因此只要求在儲槽系統中擇一裝置即可。

地下儲槽所有人必須向主管機關呈報地下儲槽的資料，包括滲漏偵測方法的描述。若在偵測法的操作過程中發現可能有滲漏，地下儲槽所有人和操作者必須向主管機關呈報可能發生洩漏。地下儲槽所有人和操作者必須要保存偵測系統效能的記錄並隨時更新。這些資料包括過去年度的監測結果、最近一次的槽體密閉性測試結果、偵測裝置廠商提供的效能資料、以及最近的維護和修理記錄。

4.4 美國加州地下儲槽技術規範

加州州政府水資源管理局、地方則為各級地方政府之公共工程局、消防局與衛生局。在加州州政府法規第 23 條水資源中之水質監測法規強調每日目測(Visual Monitoring)地下儲槽為最佳方法。若不能達到直接目測情況，則需採用下述八種可能方案達到監測功能。八種方案簡述如下：

1. 地下儲槽測試(UST Testing)

- 按月測試
- 根據美國國家防火學會(NFPA) 329 標準方法進行測試

- 管線壓力測試
- 測試結果紀錄與報備

2. 氣體或地下通氣層(Vadose Zone)之監測、地下水監測及土壤取樣

- 設井時需包括土壤取樣
- 通氣層監測：按日或連續性進行監測
- 地下水監測：每半年一次（限於自由含水層地下水面距離地面 100 呎以內者）

3. 通氣層監測、土壤取樣與地下儲槽測試

- 設井時需包括土壤取樣
- 通氣層監測：按日或連續性進行監測
- 油槽測試：每年一次（限於自由含水層地下水面距離地面 100 呎以內者）

4. 地下水與土壤取樣分析

- 設井時需包括土壤取樣
- 地下水監測：每月一次（限於自由含水層地下水面距離地面 30 呎以內者，且該含水層之地下水未做任何用途）

5. 油槽存量管制核對、儲槽結構完整性測試與管線洩漏偵測

- 按日核對儲槽存量(Daily Inventory Reconciliation)
- 儲槽結構完整性測試：每年一次

- 管線洩漏偵測

儲槽存量核對乃根據量測儲槽進出值以推估是否有洩漏情形，其允許量測誤差之要求為 $\pm 0.15\%$ 。

6. 儲槽存量核對、油槽測試、管線洩漏偵測、通氣層/地下水監測及土壤取樣分析

- 按日核對儲槽存量(Daily Inventory Reconciliation)
- 儲槽結構完整性測試：每年一次
- 管線洩漏偵測
- 設井時需包括土壤取樣
- 通氣層或地下水監測（限於車輛燃料油儲槽）

7. 地下儲槽存量量測與測試

- 存量量測：每週一次
- 儲槽測試：每年一次

8. 過渡期的監測：槽封測驗、總量控制或儲槽量測

- 儲槽測試：每年一次
- 存量核對：按日進行
- 儲槽量測（限於小型儲槽）

（過渡期之監測限於三年期限，若儲槽使用將超過三年需根據上述之 1-7 方案選擇一種進行，否則將停止該儲槽之運作或汰換儲槽）

表 XX 儲槽滲漏之偵測方法與認定標準

偵測方法	認定標準
a. 進出物料控制	須控制在至少每月進出物料總額之 1% 加上 130 加侖(429 公升)以內
b. 人工儲槽量測	在 36 小時無油品進出情況下進行油品數量測定，唯有容積少於 550 加侖以下之儲槽才可單獨使用此方法
c. 槽封測試	靈敏度要求至少要達 0.1 gph
d. 自動儲槽量測	靈敏度要求至少要達 0.2 gph
e. 土壤油氣監測	達到顯著增加範圍
f. 地下水監測	連續監測或人工量測須能監測出至少 1/8 英吋(0.32 cm)之浮油厚度
g. 儲槽與包容體間之空間監測	本系統裝置於儲槽與第二包容體之間以利監測儲槽可能之洩漏
h. 其他方法	要偵測出至少 0.2 gph 之洩漏率或每月在 95% 可信度下至少 150 加侖之洩漏

1. 資料來源為美國 CFR 40, Part 280 (1995)

2. 油槽開挖區內進行之土壤氣體監測需滿足下列條件：

- 回填材料孔隙大，足以讓油氣由滲漏處擴散至開挖區域
- 儲存物質之揮發濃度須足以產生致使監測儀器可測得之油氣濃度
- 監測儀器不致因雨或濕度大而失效
- 開挖區域的污染背景濃度須不致於影響測漏方法的進行
- 氣體監測系統須足以偵測任何顯著增加的濃度
- 須有足夠測點以確定漏油來自何座油槽或油管
- 所有測點須保護上鎖以防止未經許可的使用或破壞

4.5 滲漏油品偵測與取樣分析

目前油氣取樣後分析的方法以手提式燄化離子偵測儀(Flame Ionization Detector, FID)或光化離子偵測儀(Photoionization Detector, PID)偵測，或將樣品送到實驗室用氣相層析儀(Gas Chromatography, GC)配合 FID 和 PID 探測器以偵測土壤中油氣成份。然而，皆因無法作連續監測將影響到偵測的有效性。偵測的效果將取決於取樣的頻率。

目前國外有一些研究企圖用光電材料(Opto-Electronic Sensors)(Mayne and Burns, 1994)或利用光纖感測(Aggarwal, 1994)、螢光頻譜(Fluorescence Spectrometry)等設備偵測油品(Corps. of Engrs Waterway Experimental Station, 1994; Bratton W., 1994)。這些新方法在近幾年中這些應用受到極大的重視。然而，上述的這些新的方式也都有各自必須克服的問題。在化學物質的偵測方面，這些感測器大多屬於間接量測，因此必須要有大量的基本資料。而一些直接量測的感測器又只能有效感測特定的單一化合物，其它的化合物之存在可能使得這些感測器效果折減，精確度降低。但是，利用這些方法可以連續偵測油氣，因此若能使用於地下儲槽的油氣偵測系統中定點連續偵測，效果將較目前的定時取樣分析高。

國內蘇與陳(1997)將同軸電纜為媒介之電磁波脈衝量測儀(MTDR)應用在大地工程上，應用 TDR (Time Domain Reflectometry)對信號在時間域積分。若同軸電纜配合特殊之探頭，亦可感測土壤氣體成份的變化。

在有關氣體於土壤中的傳輸模式方面，可以藉之來瞭解監測系統配置的適切性。近年因儲槽滲漏污染問題受到重視，因此有不少氣體傳輸模式的發展(Silka, 1986; Mendoza and McAlary, 1990; Mendoza and Frind, 1990a, b)。目前這類程式的發展已達應用的階段。

國內對於地下儲槽滲漏方面的研究甚少。目前的法令係全盤翻譯自美國環保署的規範(劉振宇, 1988)。測漏方法的相關試驗有張魯均等(1994)為中油公司進行油槽測漏及尋跡試驗，係利用儲槽及管線中的示蹤劑，藉土壤氣體

中示蹤劑含量來判斷是否有液體外洩。此法自國外引進，據稱可以偵測到每小時 0.19 公升的滲漏。

黃與曾(1994)對土壤氣體取樣調查提出其經驗與建議，認為對於加油站而言，污染調查時的取樣可以用以 5 至 10 公尺間隔平均佈點方式全面取樣，可靠度較高，且有助於漏源研判及整治方案評估。

4.6 儲槽滲漏監測試驗方法比較與分析

根據所收集到的各種儲槽檢測與滲漏偵測方法資料整理後，可以得到各種方法的精確度等資料，這些資料的主要來源是美國環保署發佈的報告。

其中，部分的監測方法的精確度並未量化。例如油氣偵測與地下水監測，因為所涉及的條件較為複雜，因此並無量化的精確度資料。本研究在後續的工作中將嘗試進行這部分的工作。

4.6.1 自動儲槽計量(ATG)系統

自動儲槽計量系統是一套先進的檢測設備，我國的法規中規定，每個月進行一次試驗。系統所用的偵測器有超音波探頭(Ultrasonic Probe)、電磁探頭(Magnetostrictive Probe)、電容探頭(Capacitance Probe)、浮力探頭(Mass Buoyancy Probe)等幾種。目前的系統中，以使用前兩種探頭者精確度較高。對於 15,000 gal 的儲槽而言，偵測門檻值均為 0.05 gph，滲漏速率偵測精確度可達 0.1 gph。對大型地上或地下儲槽方面，可以適用的儲槽容積達 2,000,000 gal，偵測門檻值均為 1.4 gph 滲漏速率偵測精確度可達 0.7 gph。

4.6.2 統計存量分析(SIR)

我國的法規中規定，每個月一次。適用之儲槽容積達從 15,000 gal 至 45,000 gal，偵測門檻值均為 0.05 gph 滲漏速率偵測精確度可達 0.1 gph。

4.6.3 儲槽密閉性試驗(Tank Tightness Test)

我國的法規中規定，每五年一次。

試驗分為體積性與非體積性試驗。非體積性試驗包括利用示蹤劑的試驗，一旦在儲槽外發現有示蹤劑就判斷有滲漏。精確度可至 0.1 gph。此法尚無法建立偵測門檻值的靈敏度資料。

另外一類非體積性試驗為利用偵測在儲槽加壓或抽真空時所發出的聲波或超音波，和背景觀測值比較，來檢驗是否有滲漏的狀況，當聲波或超音波與背景值不同時就判斷有滲漏。可偵測之最大儲槽容積為 24,000 gal，滲漏速率精確度 0.1 gph。此法尚未建立偵測門檻值的靈敏度資料。

此外，也有利用將儲槽抽真空，藉由真空狀態下負壓力的變化來判斷滲漏與否。可偵測之最大儲槽容積為 75,000 gal，滲漏速率精確度 0.1 gph。此法亦尚未建立偵測門檻值的靈敏度資料。

在體積性密閉性試驗方面，有分為滿槽和不滿槽兩種，滿槽者可偵測之最大儲槽容積為 75,000 gal，偵測門檻值 0.05 gph，滲漏速率精確度 0.1 gph。不滿槽者可偵測之最大儲槽容積為 45,000 gal，偵測門檻值 0.05 gph，滲漏速率精確度 0.1 gph。

4.6.4 槽外油氣與地下水監測系統

國內的法規規定每個月一次取樣分析。由於現地的條件關係，因此尚未有相關資料顯示可能達到的精確度範圍。

基本上，這兩個方法的靈敏度與精確度取決於幾個因子，在現地條件方面包括：儲槽周遭的土壤性質、土壤含水狀況、地下水位的深度、監測井設置的位置等。另一方面，則取決於取樣的程序。最後，決定於現地或實驗室的分析儀器之靈敏度與精確度。

在利用地下水監測井做液相油品監測方面，現地可用的偵測方法或儀器包括：染料示蹤劑(Leak Tracer Dye)、以及監測地下水質變化的各種探頭，例如無線電波頻率衰減(Radio frequency (RF) attenuation)、導電度(Electrical conductivity)、金屬氧化物半導體(Metal oxide semiconductor)、光纖化學物質感測器(Fiber optic chemical sensor)、導電聚合物(Conductive polymer)、電阻抗變化(Impedance change)等等。

油氣偵測方面所利用的偵測儀器也和液相的類似，包括：金屬氧化物半導體(Metal oxide semiconductor)、光纖化學物質感測器(Fiber optic chemical sensor)、滲流率偵測器(Product permeable detector)等。此外，也可以利用氣相層析儀(GC)偵測示蹤劑，或者利用活性炭吸附油氣採樣再分析。

4.6.5 槽壁間隙偵測(Interstitial Monitoring)

我國的法規中規定，每個月進行一次偵測分析。

可用的方法有利用液相槽壁間隙偵測器(Liquid-phase interstitial detector)偵測雙層儲槽的槽壁間隙內的液相油品的存在與否。可用的檢測方法所利用的原理有折射(Refraction)、液體折射指數差異(Refractive index of liquids)、浮力開關(Float switch)、磁力開關(Magnetic switch)、導電度(Electrical conductivity)、導熱度(Thermal conductivity)、油品溶解度(Product solubility)、電容(Capacitance)、超音波(Ultrasonic)等等。這些偵測方法尚無靈敏度與精確度資料。

此外，可以將槽壁間的空隙抽真空或加壓，利用真空或壓力的變化來判斷是否槽體有破損。對於 15,000 gal 的儲槽，精確度可達 0.1 gph。

4.6.6 儲槽滲漏監測與偵測方法有效性之初步比較

根據上述的資料顯示，針對儲槽本身的試驗大都能夠建立偵測門檻值（靈敏度）與精確度的資料。不論是自動儲槽計測系統、統計存量分析系統、壓力/真空槽壁間隙監測等，大體上而言，這些方法可達到的最低偵測門檻值約為 0.05 gph，精確度可以達到 0.1 gph。

在另一方面，利用偵測儀器進行的槽壁間隙監測、以及地下水監測井、油氣監測井來做滲漏偵測，則因為偵測方法的因素，或者是牽涉的現地條件複雜的程度較高，均無法明確的訂定出偵測門檻值（靈敏度）與精確度的資料。然而，由於這些方法多係利用安裝在現地的儀器連續監測，因此若偵測儀器的靈敏度高，則應該較一個月進行一次的儲槽試驗檢測方式，可能更達到隨時預警的效果。

4.7 儲槽滲漏與污染傳輸模式

在儲槽滲漏模式與污染傳輸模式方面，主要的發展國家為歐美等先進國家，其中又以美國為主。除了 U.S. EPA 所屬的研究機構和所贊助的研究團隊之外，還有許多民間的業者也開發出各種不同的模擬軟體。

4.7.1 U.S. EPA 提供的模擬程式組

4.7.1.1 HSSM 程式組

若利用 U.S. EPA 所提供的 HSSM 程式組來進行模擬，則油品滲漏後在非飽和層的下滲行為可用 KOPT 程式計算、至形成浮流體可用 OILENSE 程式計算，溶解態的傳輸可用 TSGPLUME 程式計算。這套程式由美國德州大學奧斯丁校區土木工程系的 Dr. Randall Charbeneau 開發經過幾年的演進與修正，頗為準確。U.S. EPA 提供這套程式的視窗版。

然而，這一套程式組無法計算地下水中(非溶解相)的油粒的傳輸。而且 U.S. EPA 並未提供蒸汽相(Vapor Phase)的油氣傳輸與分佈模式，因此無法計算油氣在非飽和土層中的濃度分佈。必須要設法套接到另一套程式 RITZ 來模擬。然而並非十分理想。

4.7.1.1.1 碳氫化合物

在 HSSM 中，LNAPL(或碳氫化合物)假設是由二要素構成。第一構成要素是 LNAPL 本身，一種和地下水分離且不會相混合的液體。這個模式有幾道等式來追蹤 LNAPL 相的運動。一些模式模擬結果和圖形可以描繪 LNAPL 相的分佈。這第二構成要素是被視為 LNAPL 的化學成份，因為一般的 LNAPL 是由許多個別的化學成分構成。HSSM 追蹤這些化學成分之一的傳輸。因為這些化學成分可以溶解到地下水中，它有可能經由地下水傳輸，造成下游接受點的污染。例如 HSSM 可以使用來模擬汽油污染。苯可能是關切的最主要化學成份。汽油所有其餘的化學成份均被視為 LNAPL 的一部份。當必須要評估汽油中的其他成分例如甲苯的衝擊時，這化學成份將會是甲苯。這麼一來，可以針對 LNAPL 幾個重要化學成份執行 HSSM。模式使用者能根據比較這些不同的化學成分的結果得出對此模式的感覺。

HSSM 是為 LNAPL 設計的。因為 NAPL 是假設"漂浮"在地下水位上，它不適合用於密度比水高的 NAPL (DNAPLs)。然而，HSSM 的通氣層模組(2.1

部)可以用於DNAPL，因為該模組的定性行為不會受到液體密度影響。

4.7.1.1.2 溢漏(Spill)

溢漏是LNAPL釋出的通稱。這釋出可能是溢漏、洩漏或其他使得LNAPL得以進入地下的事件。在HSSM中必須要知道某些細節，因為這些是必須要輸入到這模式的條件。這些細節可能包括釋出開始和結時束的時間、釋出的速率、或LNAPL在地表面的淤積深度。

4.7.1.1.3 篩選模式(Screening Model)

篩選模式可能包括各種的化學和水文學過程，但是通常不包括地表下的異質性。大多數篩選模式之形式為其支配等式的解析解。為了得到這些解，通常必須要簡化模式。結果，電腦執行篩選模式只需要相對小的計算時間。

大致而言，篩選模式能被使用於估計在假設的狀況下污染造成的衝擊。

HSSM是一篩選模式；它包括許多化學和水文現象，假設地表下為均質、在個人電腦迅速地執行、和排除某些現象。例如，假如汽油溢出，HSSM可以用來粗估地下水中汽油成分的濃度。因為在這模式中，許多潛在的重要過程是近似或完全被忽略，這模式的只是用來做同數量級的估計。而且，模式不考量異質性，所以不預期可以經由調整參數的空間分佈來率定這模式。

假如需要模擬複雜異質性的場址或HSSM中其他的近似方式不能被接受，則需要包括更多考量的模式，應該採用諸如在VPI發展的MOFAT程式(Kuppusamy et al., 1987)；由Geotrans公司發展的SWANFLOW程式 (Faust, 1985)；由Hydrogeologic,有限公司發展的MAGNUS程式(Huyakorn and Kool, 1992)；或由電力研究學會發展的VALOR程式(Abriola et al., 1992)來代替HSSM，或加以補充。HSSM的潛在使用者應該緊密注意下面對於模式的假

設和限制的討論，如此他們才可以在有充分資訊支持下做出關於使用這模式的決策。

4.7.1.2 構成的模式要素

圖4.7.1顯示一典型的LNAPL污染物在地表釋放情形。LNAPL由於地心引力和毛細力作用，向下流動穿越通氣層(vadose zone)。LNAPL因為在向地下水位流動的路徑上遇到地質上的異質體而使之偏離。滲透雨水會推著LNAPL以比它自己移動更快的速度快速向下。因為LNAPL是非濕相且密度比水小，所以一旦到了地下水位附近，LNAPL會漂浮在毛細緣層中。由於自然起因或抽水井導致的地下水位波動可能形成包含被困住的LNAPL之區域。和地下水或入滲補注水接觸會使得LNAPL的化學成份溶解，造成地下水含水層的污染。由於各成分不同的性質，他們會有不同的下滲速率。依他們的揮發性，這些成份也分配到通氣層中的空氣裡。一旦在這地下水含水層中，有限的混合使得這些成分在靠近地下水含水層上方形成狹窄的帶狀區域。這些成分經由移流和延散傳輸穿越這下水含水層。如同通氣層，地下水含水層是異質性的，因而流動可能循著特定偏好的路徑(Preferential Path)。

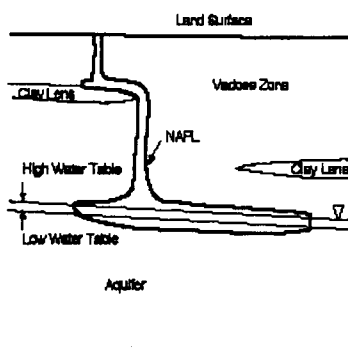


圖4.7.1 NAPL釋放示意圖

HSSM是根據一簡化之LNAPL釋放概念。圖4.7.2顯示HSSM所假設的幾何狀況，即是在圖1描繪狀況的簡化版本。在HSSM中，LNAPL循著一維的路徑從這地表面移動到地下水水面。地表下土層的性質視為均質。LNAPL由二要素構成：一是LNAPL相、另一為所關切的化學成分。在這地下水面上，LNAPL放射狀地擴散開，意味著區域性的水力坡度對LNAPL流動沒有影響。化學成份的溶解係遵照該小範圍的平衡分配(Local equilibrium partitioning)，但是被流動的地下水和到達地下水水面的補注水推動。化學成分經由移流和延散傳輸到在均勻性地下水含水層中的多重接受點。這些假設的更進一步細節，將在下面的段落中敘述。

根據上述的簡化之概念，本模式是由三個模組構成。

所有的模組之形式為控制方程式的半解析解(semi-analytical solutions)，因此HSSM的模組不把水流區域(Flow Domain)離散化(Discretization)，也不利用反覆運算(Iteration)求解技巧。這些近似是為要能迅速地執行程式。這些模組的概念化依據將在以下的段落討論。

在碳氫化合物溢出篩選模式(The Hydrocarbon Spill Screening Model (HSSM))中可以找到這些模組數學上的細節。

卷冊2：理論背景(Charbeneau et al., 1994).

模式的用意在於探討LNAPL從這地面流動和傳輸到一個具有地下水水面之地下水含水層的問題。假定主要的焦點在於地下水水質，LNAPL模式強調的是決定這鏡體尺寸和這污染物進到這地下水含水層質量通量(Mass Flux)。這些量定義地下水含水層污染源的狀況，而且必定得基於在通氣層多相流動的現象。HSSM的第一、二模組探討LNAPL在通氣層中的流動和傳輸。

此二者為「油品污染物動態傳輸」(Kinematic Oily Pollutant Transport

(KOPT))和OILENS模組。KOPT和OILENS被整合到單一個電腦程式，HSSM-KO，可提供地下水含水層模式一個隨時間改變的污染源狀況。

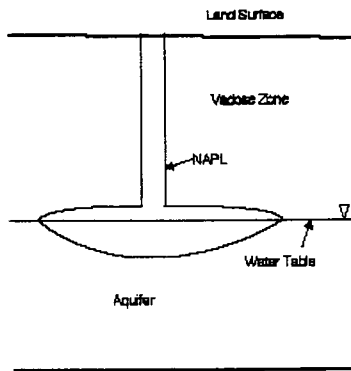


圖4.7.2 HSSM所使用的理想化NAPL釋放示意圖

KOPT和OILENS計算一同時溶解於LNAPL和水相的化學成分的蹤跡。一旦這個化學成分到達地下水位，它會經由和補注水接觸以及從LNAPL鏡體釋出污染地下水含水層。如此，這模式這第三部份模擬的是LNAPL的化學成分穿越地下水含水層的傳輸。由於從OILENS釋放的質量通量隨時間改變，因此地下水含水層模式必定得能夠模擬隨時間改變的污染源狀況。為了和使用於KOPT和OILENS的近似假設保持一致，一適當選擇是採用移流-分散等式解析解的瞬時態污染源高斯羽團模式(Transient Source Gaussian Plume (TSGPLUME))。

TSGPLUME使用異於KOPT和OILENS的數值技巧；因此並不納入HSSM-KO之內，而另外撰寫於電腦程式HSSM-T之中。TSGPLUME模式將HSSM-KO模組中OILENS模組計算的溶解質量通量，計算下游接受點的預期濃度。

表4.7.1中將HSSM構成模組做一摘要整理。KOPT、OILENS和TSGPLUME指的是數學模型，HSSM-KO和HSSM-T指的是執行些模型的電腦程式。

表4.7.1 履行的HSSM 模組

地表下區域	數學模型	電腦程式
通氣層(Vadose Zone)	KOPT	HSSM-KO
地下水位	OILENS	HSSM-KO
地下水含水層	TSGPLUME	HSSM-T

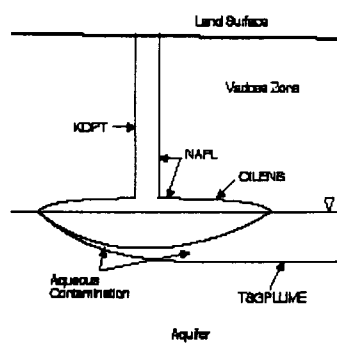


圖4.7.3 HSSM中每個模組用途之示意圖

HSSM中每個模組所涵蓋的地表下各部份顯示於圖4.7.3中。在模擬狀況中，LNAPL污染物是由接近地表面處流動到地下水面。

如圖所示，這部份污染事件是由KOPT和OILENS模擬。經由和入滲的補注水和地下水接觸，NAPL中的化學成分溶解並污染地下水含水層。NAPL化學成分的傳輸是由TSGPLUME模擬。

4.7.1.2 RITZ 程式

RITZ 是用來計算在非飽和層中油品污染物的傳輸，所涵蓋的物化現象包

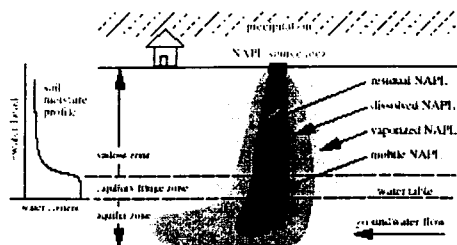
括水流、揮發、降解、吸附、滲淋(Water movement, volatilization, degradation, sorption and leaching)。

4.7.1.3 NAPL 模擬器(NAPL Simulator)

此程式可模擬油品等非水溶相液體在地表下，包括非飽和層與地下水含水層中的傳輸。同時計算油品在三相，水、NAPL、氣體，中的平衡。可考慮非飽和層中液體分佈的毛細作用與遲滯現象(accommodates capillary and fluid entrapment hysteresis)。此外，也利用限定速率的質量傳輸方式來考量 NAPL 溶解和揮發的狀況。

U.S. EPA 只提供這套程式的 DOS 和 UNIX 版，並未提供視窗版。

這部分集中焦點在通稱為非水相液體(NAPLs)的有機液體的釋放所導致的土壤和地下水含水層污染的模擬。這模擬中所用的方法適用於三個有互相關係的區域：與大氣接觸通氣層(Vadose Zone)、毛細管層、和地下水面-地下水含水層區域。這個模擬器適應三個移動相：水、NAPL、和氣體。數值求解運算法則是根據賀米特安排有限元素離散化(Hermite collocation finite element discretization)。這模擬器提供根據組合律和熱力學上關係結合之基礎平衡等式所產生的一群耦之非線性偏微分等式的準確解。



4.7.1.4 MOFAT

油品的滲漏穿過非飽和層並形成浮流體可用 MOFAT 分析。此程式可以模擬多相流(Multicomponent flow)，包括水相、非水溶相(NAPLs)以及氣相。可以涵蓋的物理化學傳輸等現象包括平流、機械延散、分子擴散、吸附、衰減、質量轉換等(Advection, dispersion, diffusion, sorption, decay, mass transfer)。

U.S. EPA 只提供這套程式的 DOS，且為 1991 年的版本。

MOFAT是一個二維的有限元素模式，模擬耦合的多相流動和多成分傳輸在平面或放射狀地對稱垂直方向。程式考慮三流體相水、非水相液體(NAPL)和氣相的流動和傳輸，同時也可以處理在任一給定時間時氣體及/或NAPL相不存在於部份或整個範圍內的狀況。

這個程式讓使用者到分析只有水流或耦合水流和傳輸狀況。水流模組能可用於分析在一氣體以定壓形態存在的系統中水和NAPL二相流動；或水，NAPL和氣體在變化的壓力狀態下的流動。在小區間平衡之異相間質量交換或第一階動態支配質量交換狀況下，這傳輸模組能處理在水、NAPL、氣相和固體相之間分配的五個成分的模擬。落後時間差的不同相之間質量交換速率和相的密度被用來排除在水流和傳輸分析之間的反覆運算程序，且同時容許準確的質量平衡和密度相異造成的流動。

利用上游-權重有限元素法來解多相流動和多成分傳輸的控制方程式系統。利用線性矩形元素可套用一種影響係數法來避免進行費時的數值積分。

利用內含非常有效率和準確的控制方程式的隱含微分形式化之Newton-Raphson法處理水流分析的非線性時間積分。

水流分析需要的輸入資料包括初始條件、土壤的水力性質、流體性質、時間積分參數、邊界條件資料和網格幾何配置。由可考慮吸水期間油受困效

應的van Genuchten模式來定義三相之滲透係數-飽和-毛細張力關係。這個模式需要定義空氣-水毛細張力函數、NAPL表面張力、NAPL和水界面張力、NAPL黏滯性、NAPL密度、NAPL最大殘餘飽和度、土壤導水度等的詳載參數。土壤導水度可以是異向性且土壤性質可能具有空間上的變異性。

爲了要做傳輸分析，額外需要的輸入數據是孔隙介質延散度 (dispersivities)、初始的水相濃度、平衡分配係數、各成分的密度、擴散係數、第一階衰變係數、質量交換係數(爲了非平衡分析之用)和邊界條件資料。

利用以與水相密度相當的高程相表達的各相壓力來描述水流分析的初始條件。假如分析涉及NAPL，這程式有能力決定和分派在零油飽和狀況下的NAPL水頭。水流分析的隨時間而異的邊界條件可能需要使用者指定在各節點的相水頭(類型-1之狀況)或沿著一邊界片段的相流動通量(類型-2之狀況)(程式自行設定者爲無水流動狀況)。傳輸分析的初始條件是以各個可分配成分之平衡水相濃度定義。隨時間而異的邊界條件可利用孔隙介質中之平衡水相濃度描述(類型-1狀況)或定義爲流入液體中濃度描述的通量(類型-3狀況)。對於未定義的邊界片段這程式假設爲零延散通量(類型-2狀況)。

程式輸出包括：輸入參數的基本資訊、網格細節及初始狀況與壓力頭、給定輸出時距時每一個節點的各相飽和及速率。此外，每個時距列印各相的總體積或質量，時距大小和反覆運算的次數。傳輸分析時，在每個要求的時間輸出各節點的各相濃度。這程式讓使用者可以利用從先前模擬自動產生的輔助資料檔案定義初始狀況，從一個先前執行的結果重新開始模擬。

4.7.1.5 MT3D

地下水含水層中的水溶相污染物傳輸可以用 MT3D 來模擬。此三維模擬

程式涵蓋的物化現象包括平流、延散、非線性吸附、第一階不可回復衰減、生物降解等(Advection, dispersion, non-linear sorption, first-order irreversible)。

此程式必須和 USGS 的 MODFLOW 一起使用，利用 MODFLOW 的結果計算。

4.7.1.5.1 目的與範圍

污染物傳輸的數值模擬，特別是在三維時，比地下水流動的模擬更困難許多。傳輸模擬不但更易受到諸如數值擴散(numerical dispersion)和人為數值震盪(artificial oscillation)影響造成誤差，而且需要更多的電腦記憶體和執行時間，使得它的實際應用不切實際，尤其是在這微型電腦使用環境下。因此我們明顯地需要一個幾乎沒有數值擴散和震盪的電腦模式、易於使用且在各種狀況下具有彈性，並能有效率的運用電腦記憶體和執行時間使得它有可以在大部分的個人電腦上執行。

這稱為MT3D的新傳輸模式，模擬污染物在地下水流動系統中的二或三維移流、延散和化學反應。這模式根據結合特徵法和修正特徵法，使用一混合的Eulerian-Lagrangian法求解移流-延散-反應等式。這方法結合特徵法可消除用數值擴散的長處和修正特徵法的計算效率。此模擬程式使用類似USGS之三維有限-差分地下水流動模式MODFLOW的模組結構(McDonald and Harbaugh, 1988)。此模組化結構使得這傳輸模式可以獨立地模擬移流、延散、污染源/污染消失(Source/Sink)、或化學反應，而不需要為了未使用的選項保存電腦儲存空間；涉及其他的傳輸過程的新模組可以直接增加到此模式中，而不需要更動原來的程式碼。

MT3D傳輸模式是為了和諸如MODFLOW等有限-差分流動模式並用發展，而且是基於濃度場的變化將不會顯著影響水流場的假設。在一個水流模式開發和率定之後，傳輸模式需要的這些資訊可能以儲存在磁碟檔案中，然

後由傳輸模式取出運算。因為多數潛在的傳輸模式使用者，可能熟悉一個或更多的水流模式，MT3D提供不需要學習新的水流模式或更改水流模式就可以模擬污染物傳輸的機會。此外，在傳輸模式之外，獨立模擬水流和率定，可以節省電腦記憶體。因為水流狀況相同，因此當需要模擬很多傳輸狀況時，這模式結構也可以節省執行時間。

在多種類型的邊界條件下和有外在的污染源或消失槽，考慮移流、延散和某些簡單化學反應，MT3D傳輸模式可使用於模擬地下水中單一種類可溶解污染物的濃度變化。模式中所包括的化學反應有：受平衡控制的線性或非線性吸附和第一階不可逆衰變或生物降解。而且可以在不更動現有程式碼的狀況下，增加進去模式原本沒有考慮的更複雜的化學反應。目前MT3D可接受以下的空間劃分和傳輸邊界條件：(1)侷限、非侷限或會轉換的侷限、非侷限地下水含水層；(2)傾斜的模擬地層和同一層中各元素網格的厚度之變化；(3)給定濃度或質量通量的邊界；和(4)外在的污染源或消失槽造成的溶質傳輸效應，諸如：排水，河川，區域性補注和蒸發散。

4.7.1.5.2 求解技巧

本移流-延散-反應等式描述可溶解污染物在地下水流動系統中的傳輸。大多數的數值方法為了解釋這移流-延散的-反應性的等式可分類為Eulerian、Lagrangian或混合Eulerian-Lagrangian (Neuman, 1984)。

在Eulerian法中，利用諸如這有限-差分或有限-元素法等固定柵格法求傳輸等式的解。Eulerian法提供了固定柵格的優點和便利，有效的處理延散/反應所主宰的問題。然而，對於在許多現地狀況存在的移流主宰的問題，Eulerian法易發生數值擴散和震盪，且受到小柵格間距和時距限制。在Lagrangian法中，可持續變形的網格或固定網格中持續改變的座標狀況下解傳輸等式。

Lagrangian法對於移流主宰且有尖銳濃度鋒面的問題，提供準確和有效率解。然而，因為沒有固定網格或座標，在具有多重污染源和消失槽以及複雜邊界條件下的不均勻介質中，Lagrangian法可能引起數值不穩定和運算上的困難(Yeh, 1990)。混合Eulerian-Lagrangian法將移流項用Lagrangian法求解、延散和反應項用Eulerian法求解，企圖結合Eulerian法和Lagrangian法兩者的優越性。

在MT3D所用的數值解是混合Eulerian-Lagrangian法。這方法的Lagrangian部份，利用向前追蹤的特徵法(MOC)、向後追蹤修正特徵法(MMOC)、或混合這二個方法，來解移流項。這方法的Eulerian部份，運用傳統的有限-差分法，用於解延散和化學反應項，

在USGS二維的溶質傳輸模式(Konikow 和 Bredehoeft, 1978)中採用的特徵法被廣泛地用在現地研究。MOC技巧利用一組移動的粒子解移流項，實質上消除了尖銳鋒面的數值擴散問題。這技巧的一個較大缺點是它必須追蹤大量的粒子移動；特別是在三維模擬時，大量增加了電腦記憶體和執行時間。

修正特徵法(MMOC)(Wheeler and Russell, 1983; Cheng et. al., 1984)利用向後時序直接地追蹤固定網格節點和積分技巧來近似移流項。MMOC技巧消除了蹤跡和記錄大量移動粒子的需要；因此，它需要較少的電腦記憶體且和通常較MOC技巧具有更高的運算效率。MMOC技巧的缺點是當尖銳濃度鋒面存在時會導入某些數值擴散。這混合MOC/MMOC技巧(例如，Neuman, 1984; Farmer, 1987)企圖結合MOC和MMOC技巧的長處，基於現地濃度場的性質自動調整求解過程。MT3D中此自動調整程序在概念上和Neuman (1984)所提議者類似。

當尖銳濃度鋒面存在，移流項是利用在鋒面周圍動態分佈的移動粒子，

由向前-追蹤的MOC技巧求解。再者些鋒面以外，移流項用直接向後及時追蹤傑點的MMOC技巧求解。當一鋒面由於延散和化學反應消散，向前追蹤自動停止，且將相關粒子刪除。MT3D傳輸模式使用explicit version的有限-差分法求解延散和化學反應項。explicit scheme的限制是因為它有相關的穩定準則，因此時距不得超過某一定值。然而，使用explicit scheme是會因為它節省大量的電腦記憶體而被肯定。

此外，對於許多移流主宰的問題，傳輸step的大小是由移流過程控制，因此和延散和反應過程的穩定準則不相關。應注意的是一個基於implicit schemes的延散和反應求解步驟可以很容易地發展出來並增加到這模式中，在大型主機、更強大的個人電腦或工作站等記憶容量較不限制的機器上作為求解的備選方案。

MT3D水流模式的介面程式組從由和MT3D傳輸模式產生和儲存的未格式化的檔案讀取水頭、通過元素行列與層面的通量、各個污染源和消失槽的位置和速率。假設用USGS水流模式(MODFLOW)模擬水流，一名叫LKMT的程式可連結到MODFLOW程式來儲存資訊。

4.7.1.6 BIOPLUME III

BIOPLUME III程式是一個模擬這有機污染物在地下水自然衰減的二維有限差分模式。這些自然衰減過程包括：移流(advection)、延散(dispersion)、吸附(sorption)和生物降解(biodegradation)。這個模式利用許多好氧性和厭氧性電子接受者：氧氣，硝酸鹽，鐵(III)，硫酸鹽，和二氧化碳等模擬有機污染物的生物降解。

在過去的幾年，許多抽水和處理整治(pump-and-treat)系統昂貴的費用和令人無法滿意的效果，促使許多研究人員到考慮自然稀衰減可能可以作為地

下水整治的替代方案(Newell et al., 1996)。研究人員和位於在俄克拉荷馬州亞達的美國環保署國民風險管理研究實驗室合作，認為厭氧性路徑可能是重要、甚至是在許多石油燃料污染場址宰制降解的機制(Wilson, 1994)。結果空軍環境優越中心(AFCEE)的技術轉移部門在1993年開始推動由三點要素組成的技術發展的努力：

- 1)在全美國30處以上場址收集到的現地資料(Wiedemeier et al., 1995)分析好氧性和厭氧性過程；
- 2)概略描述空軍所需要的自然整治(Intrinsic Remediation)研究之方式、資料收集技術和資料分析方法之技術標準程序(Technical Protocol) (Wiedemeier et al., 1995b)；和
- 3)兩個自然整治模擬工具：由Groundwater Services, Inc. (GSI)的Dr. C. J. Newell發展的BIOSCREEN模式和萊思(Rice)大學的Dr. Hanadi Rifai發展的BIOPLUME III模式。

此外，這空軍也監督由ZEi/MicroEngineering, Inc. 的Dr. S. Dendrou 和Dr. R. Dendrou發展的Environmental Information System (EIS)修正版本地下水模擬平臺信息系統。

這視窗版圖形化平台模式已經和BIOPLUME III整合在一起。平台模式和BIOPLUME III的整合是由主要承包者GSI and Deerinwater Environmental Management (DEM)，以及其協力承包商Rice University和ZEi/MicroEngineering負責。此團隊係在AFCEE和EPA的研究人員審核EIS系統而認為這兩個模擬系統各自的優點結合在一起可以發展出一更先進且更容易讓使用者接受的自然衰減模式。

在1994年於Denver, Colorado舉行的EPA/Air Force Natural Attenuation Symposium研討會中與會者的共識裡面，這樣的一個模式被認為是廣泛使用

和接受的自然衰減模式的一個關鍵需求。

整體而言，這些軟體工具、技術標準程序，和空軍環境優越中心(AFCEE)和美國環保署的降低風險實驗室從許多自然衰減過程研究中學習到的知識將提供使用者進行完整的自然衰減研究的必要資產。

4.7.1.6.1 BIOPLUME III-充擴的BIOPLUME I和II

BIOPLUME III是一個模擬在地下水中的碳氫化合物生物降解的二維有限差分模式。這模式除了模擬移流，分散，吸附和離子交換，也模擬好氧性和厭氧性生物降解過程。BIOPLUME III是植基於USGS (USGS)在1989年發展出的特徵線法(Method of Characteristics)模式(Konikow and Bredehoeft, 1989)。

BIOPLUME III主要是發展來模擬有機污染物在地下水由於移流、分散、吸附和生物降解導致的自然衰減。BIOPLUME III利用許多好氧性和厭氧性電子接受者：氧氣，硝酸鹽，鐵(III)，硫酸鹽和二氧化碳來模擬有機污染物的生物降解。這模式求解傳輸等式六次，求出碳氫化合物和電子接受者/反應產物的命運和傳輸。對於鐵(III)是電子接受者的狀況，這模式模擬鐵(II)或鐵的產生和傳輸。

三個不同的動力式能被用於模擬好氧性和厭氧性生物降解反應。這些動力式包括：第一階衰變、瞬間的反應和Monod動力(Monod kinetics)。利用疊加原理來結合碳氫化合物污染團和電子接受者的羽團。

Borden and Bedient (1986)根據他們在位於Conroe, Texas的United Creosoting Company, Inc污染場址的工作成果發展BIOPLUME I模式。BIOPLUME I是根據碳氫化合物好氧性生物降解常常被在地下水含水層中可用性的溶氧限制的假設。Borden and Bedient(1986)模擬碳氫化合物的好氧性生物降解為碳氫化合物和氧氣之間的瞬間反應。

Rifai et al. (1988)利用將Borden and Bedient(1986)發展的概念整合到USGS二維的溶質傳輸模式之中發展而成(Konikow 和 Bredehoeft, 1978)。BIOPLUME II模式追蹤氧氣和碳氫化合物兩個羽團。將這兩個羽團疊加來決定每一時距中氧氣和碳氫化合物的濃度。在BIOPLUME II中厭氧性生物降解是有如碳氫化合物濃度第一階衰變來模擬。

BIOPLUME II 和BIOPLUME III之間其他的較大差別包括：

- BIOPLUME II 是主要的發展在DOS 環境執行，BIOPLUME III 在Windows95環境下執行。
- BIOPLUME III 和由 ZEI/MicroEngineering, Inc. 發展的 Environmental Information System (EIS)修正版本地下水模擬平臺信息系統整合。

4.7.1.6.2圖形化使用者介面

自然整治研究需要大量資料需且要使用者促使在案例中自然衰減是正在一場址發生而且會隨著時間延續。爲了幫助環境專業人員做其中的資料管理，圖象化，和決策工作，空軍採用EIS 圖形使用者介面平臺。EIS(環境的信息系統)是在視窗環境下最新的整合性軟體平臺。它可以用來登錄，分類排序和評估在特定場址影響有機污染物隨地下水遷移的資料的實際過程。

EIS是基於以下的整合技術來發展：

- 物件化的模擬環境
- 製造空間和時序資料庫的控制工具(4維)
- 管理不同的演算法的解法之專利的巨觀工程(Macroengineering)架構
- 可自動調整到需要空間解析度內含在克力金(kriging)法中的繪圖法
- 容許對有效率運用經費的個別化(連結到其他的GIS系統之其他演算法的

解法)和擴充平臺(支持不同的周邊和現地監測裝置)之開放的軟體架構

- 將模擬和資料處理的誤差整合和量化到健康風險

基於這些理由，EIS平臺是AFCEE發展出來提供給工程界的支持自然衰減(自然整治)研究之各種工具中最為先進者。

4.7.1.7 BIOSCREEN

BIOSCREEN是一個容易使用的模擬在石油燃料污染場址溶解碳氫化合物自然衰減(RNA)整治的初步過濾模式。這軟體程式根據Domenico溶質傳輸解析模式，利用微軟Excel試算表軟體撰寫，能夠模擬移流、分散、吸附和好氧性分解和厭氧反應。在許多石油污染場址厭氧反應是主要的生物降解過程。

BIOSCREEN包括三個不同的模式類型：

- 1)沒有衰變的溶質傳輸，
- 2)模擬成第一階衰變過程(簡單，整合參數(Lumped-Parameter)方式)的溶質傳輸和生物降解，
- 3)模擬成同「瞬間的」生物降解反應(BIOPLUME模式所使用的)的溶質傳輸和生物降解。

這模式是設計來模擬經由好氧性和厭氧反應的生物降解。它是由位於德州休士頓的Groundwater Service Inc.為了在Little Creek空軍基地的空軍環境優越中心(AFCEE)技術轉移部門發展的。

BIOSCREEN的用途

BIOSCREEN企圖解答關於RNA的兩個基礎問題：

1. 假如沒有工程方式的控制或採取更進一步減少污染源的手段，這溶解污染物的污染團將延伸多遠？

BIOSCREEN使用溶質傳輸的解析模式和二種模擬就地(In-situ)生物降解的方式：第一階衰減和瞬間的反應。這模式將預測污染團遷移的最大範圍。此範圍可以拿來和可能曝露點的距離比較(例如：飲用水水井、地下水湧出區域、或產權界限)。地下水傳輸解析模式被廣泛用來達到此目的(例如：ASTM 1995)。經驗顯示在污染團區域狀況較為均質的情形下，這種模式能得到可信賴的結果。

2. 還要多久自然衰減過程才會使得污染團消散？

BIOSCREEN使用根據在污染源區域的可溶解碳氫化合物和碳氫化合物離開這污染源區域速率的簡單質量平衡法，估計污染源區域中濃度隨時間的變化。因為假設濃度在污染源區域中為指數衰減，預估的污染團壽命有可能很長，通常從5到500年。注意這是一未經驗證的關係，因為只有極少數污染團區域中濃度長時間裡變化資料。其結果應視為污染團消散時間的同數量級之估計而已。

BIOSCREEN的使用方式有二：

1. 決定在一場址中RNA否是可行的過濾模式。

在此狀況下，BIOSCREEN在整治調查的初期使用來決定是否應進行RNA計畫來量化該場址的自然衰減。某些資料，諸如電子接受者濃度，並無法取得，則可以使用慣用值。此外，這模式能被使用於幫助發展長期的RNA監測計劃。

2. 在小規模場址置用為主要的RNA地下水模式。

空軍的自然整治標準程序(Wiedemeier, Wilson, et al., 1995)描述如何應用地下水模式來幫助證實自然衰減確實發生和幫助預測在RNA狀況下污染團可能延伸多遠。

大體上，需要投入很多力量的場址，諸如Superfund和RCRA場址，採用一些更複雜模式諸如BIOPLUME可能會更為恰當。在較不複雜，需要投入較少力量的場址，諸如加油站，僅利用BIOSCREEN或許已經足以完成RNA研究。(註記：自然整治是一種仰賴RNA且以風險為基礎的策略)。

BIOSCREEN有以下的限制：

1. 做為一解析模式，BIOSCREEN假設簡單的地下水流動狀況。

這模式不可以用在因設置有抽水系統導致的複雜流場。此外，這模式不可以用在污染物傳輸受垂直水流梯度影響的狀況。

2. 做為一篩選工具，BIOSCREEN只能概估在現地發生的複雜過程。

這模式不可以用在結果必須要很詳細、很精確和現地狀況吻合的情形。在此狀況下，必須要採用更完整的數值模式。

4.7.1.8

VLEACH是一個一維的有限差分通氣層篩選模式，係用來估計通氣層中被吸附的有機污染物開始移動和遷移對於其下地下水資源造成的衝擊。這模式最初是由CH₂M Hill在1990為美國環保署第IX區發展出來的。

尤其，這模式是為鳳凰城-Goodyear航空站超級基金場址設計的，在該狀況下它成功被用來評估地下水的衝擊和易揮發有機污染物的揮發

(Rosenbloom et al., 1993)。自當時之後，此程式在無數場址被用來評估土壤中污染物對地下水的潛在衝擊和在土壤蒸氣抽取計畫中。由於VLEACH逐漸的被使用，因此開始發展這軟體之使用者親合度更高的版本。特別是從版本1.1到版本2.0有以下改變：

- 1)增加了使用者介面選單；
- 2)使用者可以自訂任一輸入檔案名稱，而不受到必須要定義為ATCH.INP?的限制；
- 3)發展了兩個圖形檔案：(i)地下水衝擊的時間函數；和(ii)使用者指定的時間時，土壤中污染物濃度隨深度的變化；
- 4)輸出檔案和列印增加了C sol的單位；
- 5)副程式IEQUIL中增加一定義邊界條件參數的公用敘述(COMMON Statement)：COMMON/BDRY/CINF，CATM，CGW?。

雖然VLEACH採用許多重要的假設，在進行通氣層中污染物的潛在衝擊之初步評估時很有用。

2.模式之概念化、假設與限制

VLEACH 描述這運動的一有機污染物 在範圍內和在..之間三不同相：(1)溶解在水中之溶質相，(2)氣體的蒸氣相，和(3)在固體相的吸附化合物(見圖4.7.4)。根據使用者所定義的各相之間的分配係數達到平衡狀況。特別是VLEACH可模擬在液相經由移流和氣相經由氣體擴散導致的垂直傳輸。

這些過程被概念化成如同在許多獨立的、使用者定義的垂直劃分之一系列多角形的使用者定義格框之中發生。多角形中的土壤性質、補注速率、和到地下水位的深度可能不同(圖4.7.5)。然而，假設在每個多角形之內，除了

可以在層間的格框會有變化的污染物濃度以外，其餘狀況為均質(圖4.7.6)。在每個時距之間，計算在格框內和在格框之間污染物的移動。因此，VLEACH能考慮側向的異質性，但是模擬垂直狀況時的異質性則受到限制。

最初，VLEACH計算污染物質量在液相、氣相、和吸附相之間的平衡分配。然後模擬傳輸過程。液體移流傳輸係根據使用者定義的入滲和土壤含水比的值計算。根據計算的相鄰格框之間的濃度坡度，蒸氣相中的污染物進入或移出鄰近格框。在質量在相鄰之間格框交換之後，重新計算每個格框中的總質量並重新求出各相之間的平衡。

每個時步均執行這些步驟，且獨立模擬每個多角形。在模式模擬結束時，整合每個多角形的結果來決定整個模擬區域的整體面積-權重地下水衝擊。

為了計算的目的，每個多角形都被垂直向的劃分成一系列的格框。當發展一模式模擬，完全了解VLEACH的概念化是很重要的。在發展VLEACH時，做了以下的假設：

- 1.利用線性等溫線來描述污染物在液相、蒸氣相和土壤相之間的分配。假設每個格框內小範圍的或瞬間的平衡。
- 2.就水的運動而言，通氣層是處於穩態狀況。更明確的說，在通氣層範圍內，土壤含水比剖面是固定的。這樣的假設狀況在現地很少出現。雖然無法模擬水分梯度，使用者可以經由比較涵蓋常見的或可能的土壤含水範圍的模擬結果，估計不同含水比的衝擊。
- 3.污染物不會在自然的狀態就地產生或降解。因為有機污染物，特別是碳氫化合物，一般會在通氣層經歷某些程度的降解，這樣的假定會導致保守的濃度值。
- 4.假設在一特定多角形之內土壤狀況是均質的。這樣的假設狀況在現地很少出現。雖然無法模擬空間上的梯度，使用者可以經由比較幾個涵蓋現地土壤

性質範圍的模擬結果，估計非均勻土壤的衝擊。然而，各格框之間的初始污染物濃度可以是不同的。

5.從土壤邊界的揮發若非完全流通就是完全限制。根據調查的深度和土壤類型，這假設可能會很重要。尤其是在深度1 m以下，揮發到大氣將顯著減少。

6.這模式不考慮非水相液體和因密度改變造成的流動狀。

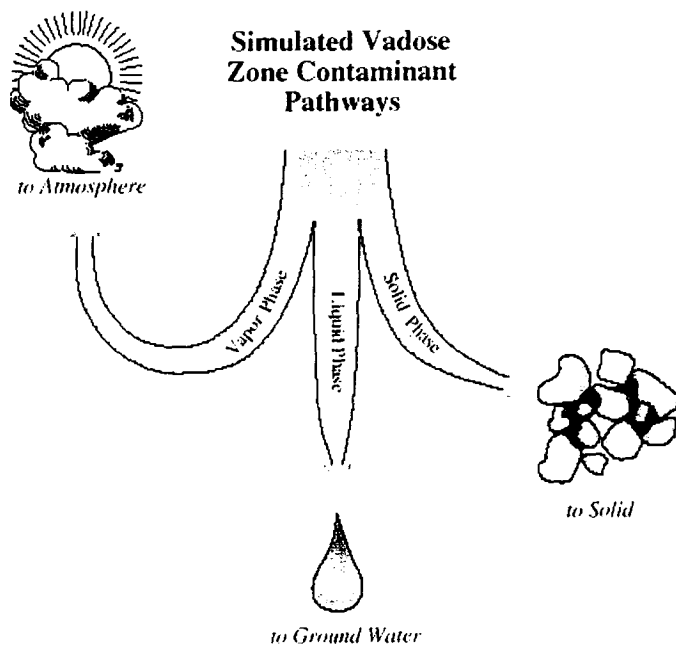


圖 4.7.4 VLEACH 模擬的污染物路徑示意圖

A. Site Conditions

B. Model Conceptualization

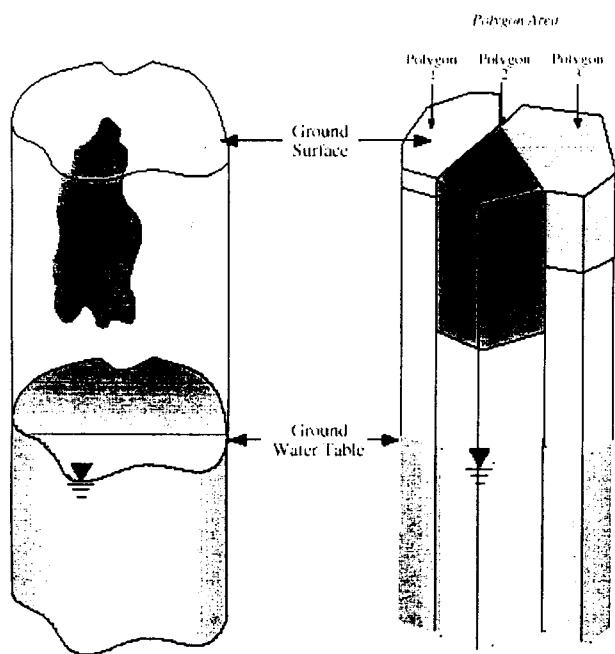


圖4.7.5 因現地狀況變化模擬成多角形的模式概念化示意圖

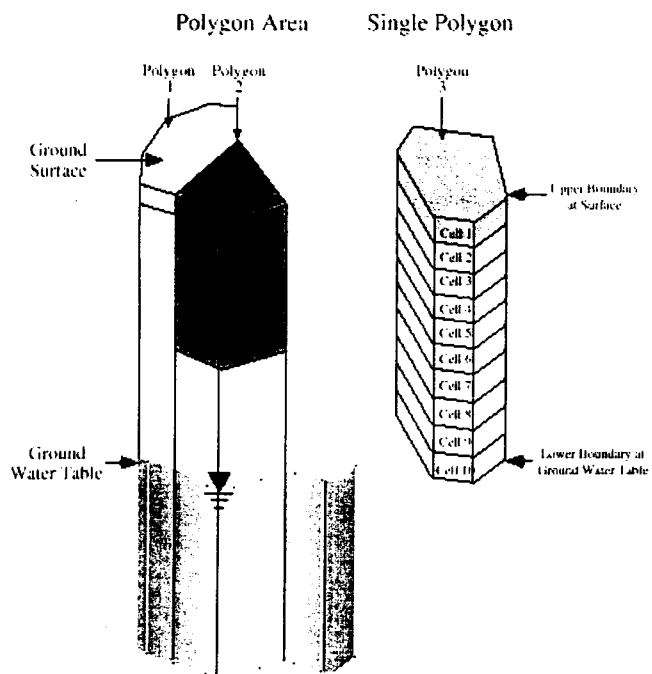


圖4.7.6 單一多角形內格框劃分示意圖--較上方三格框陰影描繪污染物差異

4.7.2 已經商業化的模擬程式組

然而，目前有較上述 U.S. EPA 的程式更為精密的套裝軟體群組可以利用。雖然 U.S. EPA 提供某些程式的原始程式碼，但是經過民間專業公司的改進，可以分析更大的範圍，並且開發出視窗介面以及和其他應用程式間的介面。

油品的滲漏穿過非飽和層並形成浮流體可用民間版的 MOFAT 分析。如上述，此程式可以模擬多相流(Multicomponent flow)，包括水相、非水溶相(NAPLs)以及氣相。可以涵蓋的物理化學傳輸等現象包括平流、機械延散、分子擴散、吸附、衰減、質量轉換等(Advection, dispersion, diffusion, sorption, decay, mass transfer)。民間版是視窗介面。

在非飽和層中的油氣傳輸可以用 AIRFLOW/SVE 分析，或者利用更精密且包括生物降解效應的 BioF&T 3-D 來分析。至於溶解在地下水中的成分可以用 MODFLOWT、3DFATMIC、AQUA、MT3D96 等 3D 污染傳輸程式擇一模擬。

第五章 結論與建議

根據目前所得到的成果來說，儲槽的滲漏監測仍有很大的改善空間。雖然儲槽槽體本身的檢測，可以達到最低偵測門檻值約為 0.05 gph，精確度可以達到 0.1 gph，但是由於這些方法都必須要暫停儲槽使用，因此法規規範每個月實施一次。在檢測實施之間，無法得知滲漏的發生。

另一方面，雖然利用在地下水監測井中或油氣監測井中安裝的現地偵測儀器，監測地下水面上的液態油品或非飽和土壤孔隙中的油氣，可以隨時發出警告，達到立刻預警的效果。但是，由於各條件較為複雜，因此，目前尚無針對不同條件組合進行充分的研究，導致無法判斷其靈敏度與精確度。

本研究將繼續進行各種資料的收集與分析。並希望在下一年度，利用這些資料，配合模擬程式的運用，分析這些連續監測方法在不同條件下的靈敏度與精確度，以期能夠將這些資料與儲槽槽體檢測方式的資料整合。如此，可以找出最適當最有效的儲槽滲漏監測方法。

參考文獻

- 張魯均、王承賓、葉榮椿、王明民，1994，「油槽測漏及尋跡試驗之應用」，地下水資源及水質保護研究討論會，台北市，pp. 593-610
- 黃冠良、曾玲玲，1994，「加油站土壤及地下水污染之檢測」，「油槽測漏及尋跡試驗之應用」，地下水資源及水質保護研究討論會，台北市，pp.749-760
- 環保署，1997，環署水字第四一六二八號，中華民國八十六年八月八日，「公告地下儲油槽儲存之汽油、柴油為中央主管機關公告指定之物質及應設置之防止污染地下水體設施暨監測設備」
- 劉振宇，1988，「加油站管理辦法研究」，環保署委託計畫報告
- 陶正綱，1994，「油品污染土壤與地下水之調查與整治案例介紹」，地工技術雜誌，第45期，pp. 93-107
- 蘇苗彬、陳育志，1997，「MTDR 在大地工程上之應用」，第七屆大地工程研討會論文集，金山，pp. 289-294
- Aggarwal, I., (1994), "Summary of Fibre Optic Sensing Techniques," in Summary Report of the Workshop on Advancing Technologies for Cone Penetration Testing for Geotechnical and Geoenvironmental Site Characterization, 14-15 June, Engineering and Environmental Sciences Div., U.S. Army Research Offices, Research Triangle Park, NC27709
- Bratton, W., (1994), "ARA's Environmental Sensors Past, Present and Future," in Summary Report of the Workshop on Advancing Technologies for Cone Penetration Testing for Geotechnical and Geoenvironmental Site Characterization, 14-15 June, Engineering and Environmental Sciences Div., U.S. Army Research Offices, Research Triangle Park, NC27709
- Mayne, P. W., and Burns, S. E., (1994), "Development of an Integrated Optics Geoenvironmental Cone Penetration for Detecting and Mapping Soil and Groundwater Contaminants," in Summary Report of the Workshop on Advancing Technologies for Cone Penetration Testing for Geotechnical and Geoenvironmental Site Characterization, 14-15 June, Engineering and Environmental Sciences Div., U.S. Army Research Offices, Research Triangle Park, NC27709

- Mendoza, C. A. and Frind, E. O., (1990a), "Advective-Dispersive Transport of Dense Organic Vapors in the Unsaturated Zone: 1, Model Development," *Water Resources Res.*, **26**(3), pp. 379-387
- Mendoza, C. A. and Frind, E. O., (1990b), "Advective-Dispersive Transport of Dense Organic Vapors in the Unsaturated Zone: 1, Sensitivity Analysis," *Water Resources Res.*, **26**(3), pp. 388-398
- Mendoza, C. A. and McAlary, T. A., (1990), "Modeling of Ground-Water Contamination Caused by Organic Solvent Vapors," *Ground Water*, **28**(2), pp. 199-206
- Silka, L. R., (1986), "Simulation of the Movement of Volatile Organic Vapor through the Unsaturated Zone as it Pertains to Soil-Gas Surveys," *Proceedings, NWWA/API Conf. On Petroleum Hydrocarbons and Organic Chemicals in Grand Water - Prevention, Detection and Restoration*, Nat. Water Well Assoc., pp. 204-224
- U.S. Army Corps of Engineers Waterway Experiment Station, (1994), "LIF System for In Sit Identification of Petroleum, Oil, or Lubricants (POL)," contact Ernesto Cespedes, USA-COE WES
- U.S.EPA, (1989), Volumetric Tank Testing: An Overview, EPA/625/9-89/009, Cincinnati, OH, U.S.A.
- U.S.EPA, (1997), List of Leak Detection Evaluations for Underground Storage Tank Systems - Third Edition, EPA 510-B-97-004, Cincinnati, OH, U.S.A.
- U.S.EPA, (1990), EPA Standard Test Procedures for Evaluating Leak Detection Methods (EPA/530/UST-90/004 through 010), Cincinnati, OH, U.S.A.

附錄一

被接受的試驗方法之試驗程序(Accepted Test Protocols)

1. 自動儲槽計測系統(Automatic Tank Gauging Systems)

Standard Test Procedures for Evaluating Leak Detection Methods: Automatic Tank Gauging Systems”, EPA/530/UST-90/006, March 1990

2. 槽體試驗(Bulk Tank Testing)

Alternative Test Procedures for Evaluating Leak Detection Methods: Evaluation of Bulk Field-constructed Tanks”, Ken Wilcox Associates, February 1996

3. 連續槽內滲漏偵測系統(Continuous In-Tank Leak Detection Systems)

Evaluation Protocol for Continuous In-Tank Leak Detection Systems”, Midwest Research Institute, April 1995

4. 大口徑管線滲漏偵測器(Large Pipeline Leak Detection Systems)

Modified Third-Party Testing Protocol for Large Pipeline Leak Detection”, EFA Technologies, Inc., August 1995

5. 液相槽壁間隙偵測器(Liquid-Phase Out-of-Tank and Interstitial Product Detectors)

A. Standard Test Procedures for Evaluating Leak Detection Methods: Liquid-Phase Out-of-Tank Product Detectors”, EPA/530/UST-90/009, March 1990

B. Development of Procedures to Assess the Performance of External Leak Detection Devices: Liquid-Phase ASTM-Formatted Methods - Revised Draft to Include JP-4 Jet Fuel”, Radian Corporation, June 29, 1990

C. Test Procedures for Third Party Evaluation Of Leak Detection Methods: Cable Sensor Liquid Contact Leak Detection Systems”, Carnegie Mellon

Research Institute, November 11, 1991

D. Test Procedures for Third Party Evaluation of Leak Detection Methods: Point Sensor Liquid Contact Leak Detection Systems”, Carnegie Mellon Research Institute - Advanced Devices and Materials Group, November 11, 1991

6. 非體積性儲槽密閉性試驗方法(Non-volumetric Tank Tightness Testing Methods)

Standard Test Procedures for Evaluating Leak Detection Methods: Non-volumetric Tank Tightness Testing Methods”, EPA/530/UST-90/005, March 1990

7. 管線滲漏偵測系統(Pipeline Leak Detection Systems)

Standard Test Procedures for Evaluating Leak Detection Methods: Pipeline Leak Detection Systems”, EPA/530/UST-90/010, September 1990

8. 統計存量試驗方法(Statistical Inventory Reconciliation Methods)

A. Standard Test Procedures for Evaluating Leak Detection Methods: Statistical Inventory Reconciliation Methods”, EPA/530/UST-90/007, June 1990

B. Protocol for Determining Applicability of a SIR Method for Manifolded Tanks and Determining Size Limitation”, Developed under coordination by the SIR team of the National Work Group on Leak Detection Evaluations, November 1996

9. 油氣(蒸汽相)儲槽外偵測器(Vapor-Phase Out-of-tank Product Detectors)

A. Standard Test Procedures for Evaluating Leak Detection Methods: Vapor-Phase Out-of-Tank Product Detectors”, EPA/530/UST-90/008, March 1990

B. Development of Procedures to Assess the Performance of External Leak Detection Devices: Vapor-Phase ASTM-Formatted Methods”, Radian Corporation, June 6, 1990

C. Development of Procedures to Assess the Performance of External Leak Detection Devices: Vapor-Phase ASTM-Formatted Methods”, Radian Corporation, June 29, 1990

10. 體積性儲槽密閉性試驗方法(Volumetric Tank Tightness Testing Methods)

Standard Test Procedures for Evaluating Leak Detection Methods: Volumetric Tank Tightness Testing Methods”, EPA/530/UST-90/004, March 1990

附錄二

儲槽與管線滲漏檢測方法、檢測設備與精確度

1. 自動電子式管線滲漏偵測器(AUTOMATIC ELECTRONIC LINE LEAK DETECTOR)

方法名稱	滲漏速率/偵測門檻值/最大容積
LineTite Pipeline Leak Monitor	0.1 gph/0.062 gph/341 gallons
Line Leak Detector Model LLP2	0.1 gph/0.05 gph/89 gallons

2. 自動機械式管線滲漏偵測器(AUTOMATIC MECHANICAL LINE LEAK DETECTOR)

方法名稱	滲漏速率/偵測門檻值/最大容積
Red Jacket FX2/FX2-D and Bigflo	3.0 gph/2.0 gph/362 gallons
Vaporless LD 2000 and LD 2000S	3.0 gph/1.7 gph/129 gallons

3. 自動儲槽計測系統(AUTOMATIC TANK GAUGING SYSTEM)

方法名稱	滲漏速率/偵測門檻值/最大容積
UST 2001 (Ultrasonic Probe)	0.1 gph/0.05 gph/15,000 gallons
X-76 ETM and X-76 ETM-4X (Magnetostrictive Probe)	0.1 gph/0.05 gph/15,000 gallons
EMC Environmental Management Console, EMC Basic Monitoring System Tank Monitor 2.1, 3.1, PAO264XXX0000 (Capacitance Probe)	0.1 gph/0.071 gph/15,000 gallons
E PI III (Mass Buoyancy Probe)	0.2 gph/0.075 gph/15,000 gallons

4. 連續槽內滲漏偵測系統(CONTINUOUS IN-TANK LEAK DETECTION SYSTEM)

方法名稱	滲漏速率/偵測門檻值/最大容積
TLS Series 300/400 Monitoring Systems with CSLD versions 8473 and 8493 (Magnetostrictive Probes)	0.2 gph/0.16 gph/38,170 gallons

5. 雙層槽壁儲槽密閉性試驗(DOUBLE WALLED TANK TIGHTNESS TEST)

方法名稱	滲漏速率/偵測門檻值/最大容積
Xerxes Trucheck Hydrostatic Monitoring System	0.1 gph/0.05 gph/30,000 gallons

6.大口徑管線滲漏偵測器(LARGE DIAMETER PIPELINE LEAK DETECTOR)

方法名稱	滲漏速率/偵測門檻值/最大容積
Model LT-100 Version 1.0 Primary Method	0.1 gph/0.060 gph/3,400 gallons

7.大儲槽自動計測系統(LARGE TANK AUTOMATIC TANK GAUGING SYSTEM)

方法名稱	滲漏速率/偵測門檻值/最大容積
LTC-1000 (Mass Buoyancy Probe)	1.4 gph/0.7 gph/2,000,000 gallons

8.管線密閉性試驗方法(LINE TIGHTNESS TEST METHOD)

方法名稱	滲漏速率/偵測門檻值/最大容積
EZY-Chek II Automatic Line Leak Detector	0.1 gph/0.05 gph/129 gallons

9.液相槽壁間隙偵測器(LIQUID-PHASE INTERSTITIAL DETECTOR)

設備名稱	檢測原理
Soil Sentry Liquid 330(17-330-A/17-330-B), TLM-830, ENCOMPASS APAM Probes 17-141A, 17-142A, 17-143A, 17-144A	refraction
Model 404 Pump Cut-Off	float switch
Model 406 Pump Cut-Off	refractive index of liquids
AUTO-STIK Discriminating Sensors LS-5, LS-35	float switch and product permeability
EECO system, Leak Sensor II, Leak Sensor Jr. Thermistor and Proximity probes	thermal conductivity, proximity switch
Tank Sentinel TS-1000EFI TSP-DIS BriteSensor	opto-electric
Tank Sentinel TS-1000EFI TSP-HIS Brite Sensor	magnetic switch
Red Jacket PPM 4000 with Optical Liquid Discrimination Sensor	optical sensor
PAL-AT Models AT20C, AT50C, AT40K PHL Hydrocarbon Sensor	electrical conductivity
LDE 700, LDE 740, LDE 9000 Sensor Probe Models 9-901, 9-902, 9-903	capacitance
EMS-3500 with Containment Sump Probes Part 301-0642	magnetic switch/float and hydrocarbon sensitive polymer
TLS-350 Discriminating Interstitial Liquid Sensor	capacitance change/ultrasonic
TLS-350 Dispenser Pan Sensor(794380-320) and Containment Sump Sensor(794380-350)	electrical conductivity/ultrasonic
TLS-350 Solid-State Pan/Sump Sensor (794380-321, -351), Piping Sump Sensor (794380-208), Micro Sensor (794380-340)	product permeable/ultrasonic/float switch
Model DFP-25 Sensor	product solubility
Petrosentry IV, Petrosentry VIII, SiteSentinel Liquid Sensor	thermal conductivity

10.液相槽外偵測器(LIQUID-PHASE OUT-OF-TANK PRODUCT DETECTOR)

設備名稱	檢測原理
Leak Tracer Dye (LTD)	product solubility - color development
LEAKWISE Groundwater Monitor ID-220 Series Hydrocarbon on Water Detector System	radio frequency (RF) attenuation
ALERTMASTER 5100 Leak Detection Cable AMC-5007	electrical conductivity
ALERTMASTER 5100 Vapor Sensor AMC F4000	metal oxide semiconductor
Leak Detection Systems, KW-140 / KW-240 Monitors with Type 1 Sensor	product soluble
AUTO-STIK Discriminating Sensors LS-10,LS-15,LS-20	float switch and product permeability
Analog Hydrocarbon Probe AHP-100	fiber optic chemical sensor
Gems Smartwell Portable Monitor model WPM-535 with Groundwater Probe model WP-535	conductive polymer
Tank Sentinel TS-1000EFI TSP-DDS BriteSensor, TSP-DTS BriteSensor	magnetic switch, float, and hydrocarbon sensitive polymer
Tank Sentinel TS-1000EFI TSP-MWS BriteSensor Groundwater Probe	hydrocarbon sensitive polymer
Leak Edge Models 100-3001, 100-4001	product permeable
PAL-AT Models AT20C, AT50C, AT40K AGW Sensor Cable	impedance change
SiteSentinel 30-3206, -3207, -3210 Sensors	product permeable
EMS-3500 with Monitoring Well Probes Part 301-0641	conductivity via resistor ladder network
EMS-3500 with Sheen Probes Part 301-0687	electrical conductivity/hydrocarbon sensitive polymer

11.非體積性儲槽密閉性試驗方法[示蹤劑](NON-VOLUMETRIC TANK TIGHTNESS TEST METHOD (TRACER))

設備名稱	滲漏速率/偵測門檻值
Tracer Tight	0.1 gph/A leak is declared when tracer chemical is detected outside of the tank.

12.非體積性儲槽密閉性試驗方法[未盛滿油品部分之槽體](NON-VOLUMETRIC TANK TIGHTNESS TEST METHOD (ULLAGE))

方法名稱	滲漏速率/偵測門檻值/最大容積
Pressure and Vacuum Test	0.1 gph/ A leak is declared when the ratio of the ultrasonic signal (when the tank is under pressure or vacuum) to the background signal (prior to pressurization or evacuation) equals or exceeds 1.5 for either 12 kHz or 25 kHz frequency band./6,000 gallons
Vacuum Test	0.1 gph/ A leak is declared when the ratio of the ultrasonic signal (when the tank is under vacuum) to the background signal (prior to vacuumation) equals or exceeds 1.5 for either 12 kHz or 25 kHz frequency band. /24,000 gallons
Vacuum or Pressure Test	0.1 gph/A leak is declared when the acoustic signal detected is different from the baseline. (Baseline is the acoustic signal before tank is pressurized or evacuated.)/16,500 gallons
Pressure Test	0.1 gph/A leak is declared when the pressure decay trend equals or exceeds ± 0.016 psi/hr./10,260 gallons
Pressure Test	0.1 gph/A leak is declared when the make-up gas flow rate into ullage equals or exceeds 0.275 cubic feet/hour./7,500 gallons
Vacuum or Pressure Test	0.1 gph/A leak is declared when the acoustic signal detected is different from the baseline. (Baseline is the acoustic signal before tank is pressurized or evacuated.)/16,500 gallons.
Pressure Test	0.1 gph/A leak is declared when the make-up gas flowrate into ullage equals or exceeds 0.275 cubic feet per hour./7,500 gallons
Pressure Test	0.1 gph/A leak is declared when the pressure decay trend equals or exceeds ± 0.016 psi/hr./10,260 gallons.
Vacuum Test	0.1 gph/A leak is declared when an increase in the acoustic noise level (above background) of the tank under vacuum is detected due to air or water ingress./15,000 gallons
Pressure and Vacuum Test	0.1 gph/A leak is declared when there is a substantial increase in the acoustic noise signal (when the tank is under vacuum or pressure) above the background signal (prior to pressurization or evacuation) in the frequency interval of 10 kHz to 20 kHz/7,550 gallons (pressure), 5,250 gallons (vacuum).

13. 非體積性儲槽密閉性試驗方法[真空](NON-VOLUMETRIC TANK TIGHTNESS TEST METHOD (VACUUM))

方法名稱	滲漏速率/偵測門檻值/最大容積
EZY 3	0.1 gph/ A leak is declared when the vacuum decay is more than 1 inch water column pressure for non-volatile products and 10% of the lower determined vapor pressure for volatile products. A leak is also declared if any water ingress is detected. /50,000 gallons
VacuTect	0.1 gph/ A leak is declared when: sonic emission of air ingress is detected in ullage area and/or; sonic emission of bubbles formed by air ingress is detected in product-filled portion of the tank and/or; water ingress is detected at the bottom of the tank./75,000 gallons
TEI System 5000, Version 1.0	0.1 gph/ A leak is declared when the acoustic noise level of the tank under vacuum is greater than the calibrated background acoustic noise level (prior to evacuation)./20,000 gallons

14. 壓力/真空槽壁間隙監視器(PRESSURE/VACUUM INTERSTITIAL MONITOR)

設備名稱	滲漏速率/偵測門檻值/最大容積
VIGILANT Leak Detection System	0.1 gph/ A leak is declared when changes in interstitial vacuum exceed a predetermined change in slope versus time curve./15,000 gallons

15. 統計存量試驗方法[定性](STATISTICAL INVENTORY RECONCILIATION TEST METHOD (QUALITATIVE))

設備名稱	滲漏速率/偵測門檻值/最大容積
Precision Tank Inventory Control System, Version 90	0.1 gph/0.04 gph/15,000 gallons
SIR PRO 1 Version 2.0	0.1 gph/0.05 gph/18,000 gallons

16. 統計存量試驗方法[定量](STATISTICAL INVENTORY RECONCILIATION TEST METHOD (QUANTITATIVE))

設備名稱	滲漏速率/偵測門檻值/最大容積
SIR 5.7 LM	0.1 gph/0.05 gph/45,000 gallons

17.油氣(蒸汽相)儲槽外偵測器(VAPOR-PHASE OUT-OF-TANK PRODUCT DETECTOR)

設備名稱	OPERATING PRINCIPLE
Soil Sentry Twelve-X	metal oxide semiconductor
Fuel Finder Version IV	adsorption sampling
Analog Hydrocarbon Probe AHP-100	fiber optic
GasPak Vapor Monitoring System	product permeable detector
PA0266000000	adsistor
Tracer Tight	chromatographic (looks for chemical tracer)

18.體積性儲槽密閉性試驗方法[滿槽](VOLUMETRIC TANK TIGHTNESS TEST METHOD (OVERFILL))

設備名稱	滲漏速率/偵測門檻值/最大容積
AES System II - (Large Tanks)	0.1 gph/0.05 gph/75,000 gallons

19. 體積性儲槽密閉性試驗方法[滿槽][愛迪生試驗室程序](VOLUMETRIC TANK TIGHTNESS TEST METHOD (OVERFILL) (Edison Lab Protocol))

設備名稱	滲漏速率/偵測門檻值/最大容積
Leak Computer Tank Test System	0.1 gph/0.05 gph/12,000 gallons

20. 體積性儲槽密閉性試驗方法[不滿槽](VOLUMETRIC TANK TIGHTNESS TEST METHOD (UNDERFILL))

設備名稱	滲漏速率/偵測門檻值/最大容積
UST 2000/P	0.1 gph/0.05 gph/45,000 gallons