

環保新知

現地玻璃化法在土壤復育工程之應用

張萬權*

摘要

毒性事業廢棄物掩埋場由於人為設計上的疏失或因天然的破壞，在使用後仍常常可發現高污染濃度的滲出水滲漏出來，而造成掩埋場周遭地下水及土壤的嚴重污染。同樣的，各種毒性化學物質意外的溢散或蓄意的傾棄亦會造成類似的結果。因此，土壤復育(soil remediation)工程也就成了現代環保工作中愈來愈受重視的一項課題。美國環保署的超級基金(supercfund)就不斷地投入大量人力、物力來解決這些後遺症，以避免二次污染的發生。

本文中將介紹引起廣泛重視的現地玻璃化法(*in-situ vitrification*, ISV)在土壤復育工程之應用。首先扼要說明其原理、作業方式及作業設備等基本觀念，並探討該法在處理被污染土壤之功能及作業條件限制。最後則研究現地玻璃化法對有機物在土壤中移動特性之影響及成本效益分析。

【關鍵字】

- ①現地玻璃化法(*in-situ vitrification*) ②土壤復育(*soil remediation*)
- ③固定化(*immobilization*) ④超鈾輻射性廢棄物(*transuranic radioactive waste*)

一、原理及發展歷史

現地玻璃化法屬於固定化(*immobilization*)技術的一種，它是以電能轉變成熱能的物理方法，將土壤中污染物質破壞分解或固定於呈玻璃狀的矽酸鹽物質而降低污染物之移動性。當進行玻璃化過程中，土壤中有機及無機污染物會被穩定化(*stabilization*)及匣限化(*encapsulation*)，其最終產物為類似玻璃之惰性物質，具有高穩定性及耐久性，可通過有害性事業廢棄物溶出標準(TCLP)之測試。

ISV 最早是在1980年由 Pacific Northwest Laboratories, Division of Battelle

*金屬工業研究發展中心工程師

Memorial Institute發展出來，以處理超鈾輻射性廢棄物(transuranic radioactive waste)⁶。經過歷年來不斷地嘗試與實驗，ISV的處理方式已證明具有潛力可應用在染色土壤(contaminated soil)、脫水污泥(dewatered sludge)、礦渣(mine tailings)、沖積物(sediments)及石棉(asbestos)等廢棄物之處理⁹。

ISV 原理是將電極棒插入待處理區域的土壤中，在通入高壓電後，因土壤為高電阻而會將電能轉變成熱能，以融化待處理區域之土壤。當融化物質逐步冷卻後，即成為類似玻璃之穩定物質，其基本示意圖請參考圖 1。

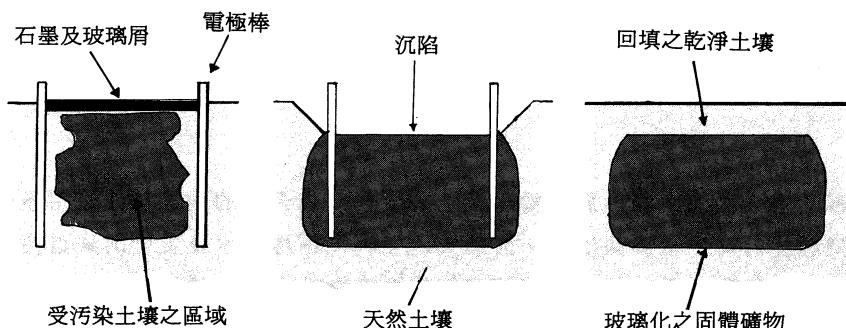


圖 1 ISV法示意圖⁸

二、作業設備配置

首先將已進行之實地 ISV 作業設備配置情形說明於圖 2。從圖中可明顯看出 ISV 作業設備可大致區分成 4 個單元，亦即：①電源供應單元。②鉑／石墨電極單元。③空氣污染防治單元。④系統控制單元。其中電源供應、空氣污染防治及系統控制三個單位皆安裝於標準型之拖車廂內，以方便移動至下一個處理區域。

電力來源可由當地電廠的配電系統供應 12.5kV 或 13.8kV 的三相高壓電或自備柴油發電機使用。在電源供應單元之拖車上設置有多段式變壓器(multiple tap transformer)將供電轉變成雙相並穩定電壓及電流。其電路系統配置請參考圖 3。

鉑／石墨電極棒共有 4 根插入土中，其立體示意圖詳如圖 4，其所扮演的角色是將電能轉變成熱能，以融化待處理之土壤。Pacific Northwest Laboratory甚至已發展出一套電腦模擬程式，可利用個人電腦在輸入電極相對位置、土壤特性等參數後，預測玻璃化所需之時間、深度及所耗電力等情形¹⁰。

空氣污染防治單元包括抽風罩、風管及排氣處理系統。抽風罩置於融化區正上方並保持輕微負壓，以吸引因高熱蒸發之氣狀污染物進入後續處理系統。這套空氣污染防治設備是 ISV 系統中最複雜、最昂貴的單元，詳如圖 5 所示。這套系統中包括冷卻塔、洗滌器、除霧器、過濾除塵器、活性碳吸附塔及風車等。

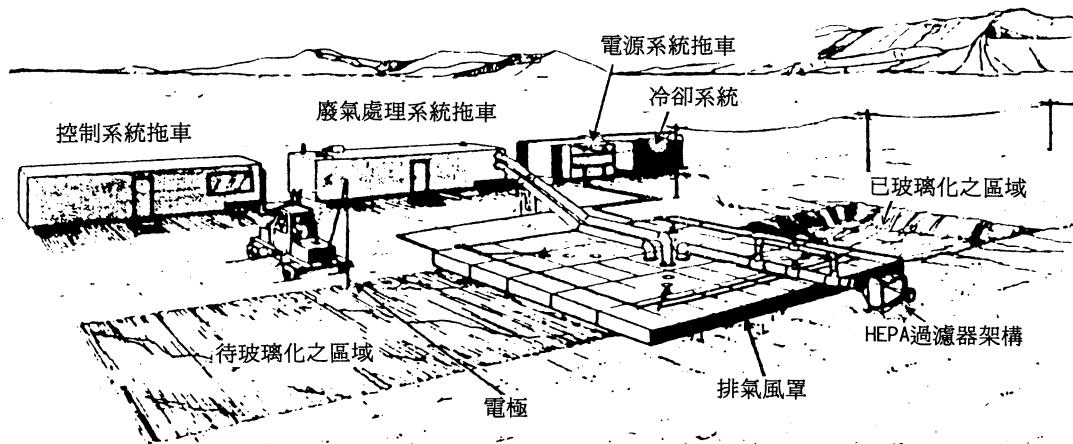


圖 2 ISV 實際作業設備配置圖¹⁰

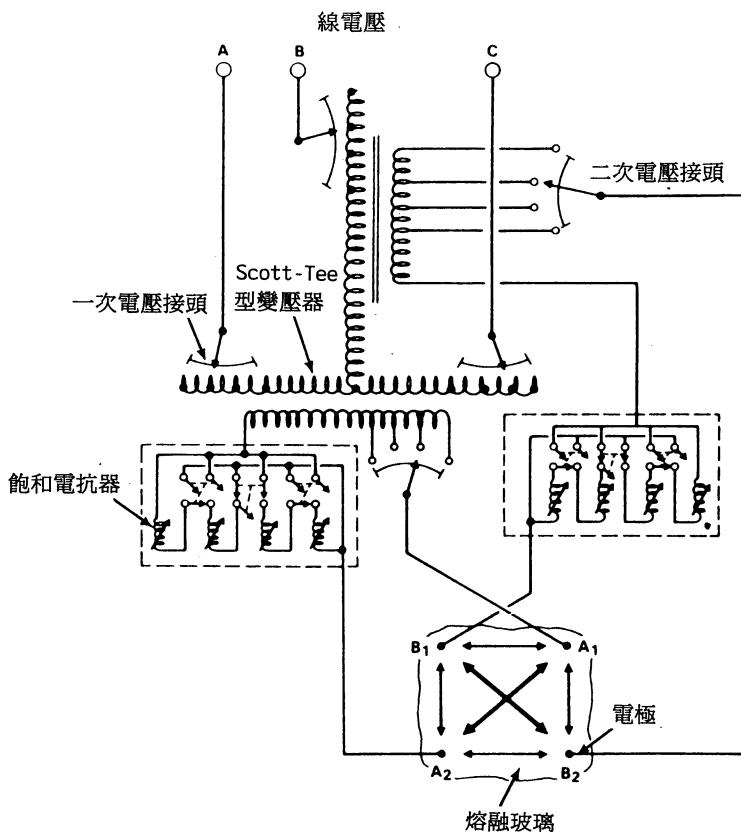


圖 3 ISV 電路系統配置圖⁷

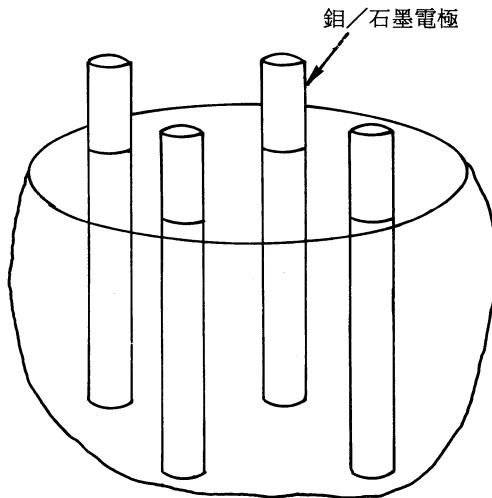
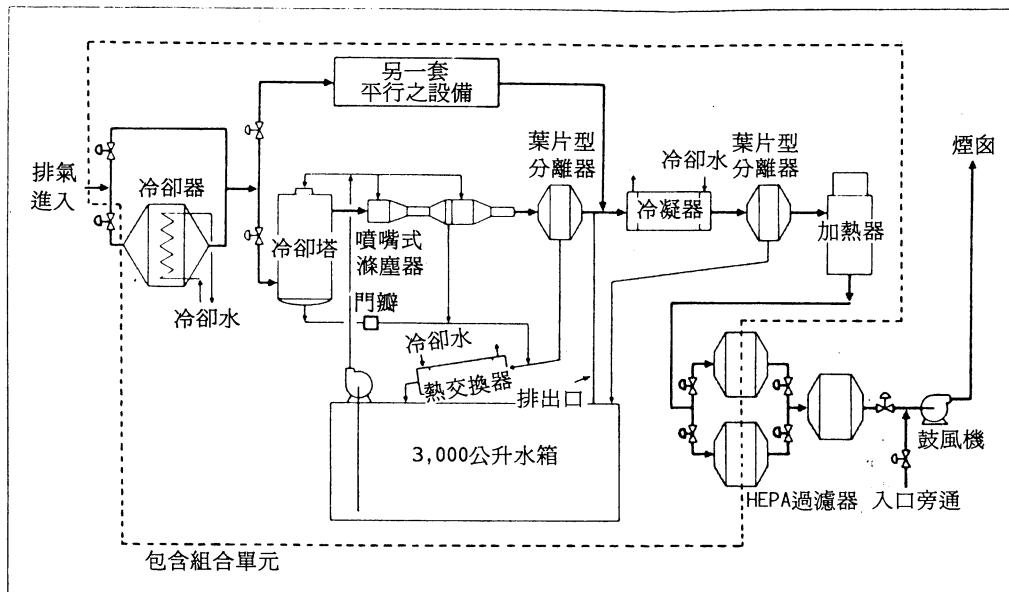


圖 4 鉑／石墨電極之配置圖¹⁰



[註] 另一套平行之設備包括：冷卻塔、濾塵器、分離器及水箱

圖 5 ISV法空氣污染防制單元之流程圖⁷

至於整個ISV設備的控制則安裝在系統控制單元拖車上，包括電力及空氣污染防治設備的監控裝置。

三、作業流程

ISV 處理操作可概分成四個階段，如圖 6 所示。首先將 4根鉬／石墨電極等距插入待處理區至適當深度。然後在 4 根電極中間鋪灑一層導電性物質（石墨片及玻璃碎粒之混合物）以作為「起動路徑(starter path)」，當電力開始輸入後，電能因電阻而轉變成熱能，此時溫度可高達 1700°C 而先融化「起動路徑」及其周遭土壤。土壤在變成熔融狀態後也具有導電性，因此可持續進行其融化過程至到達所需深度為止。融化過程一般約以 $3\sim6\text{cm/hr}$ 的速度進行⁸。整個熔融區的形體大約是帶圓角的立方體形狀。

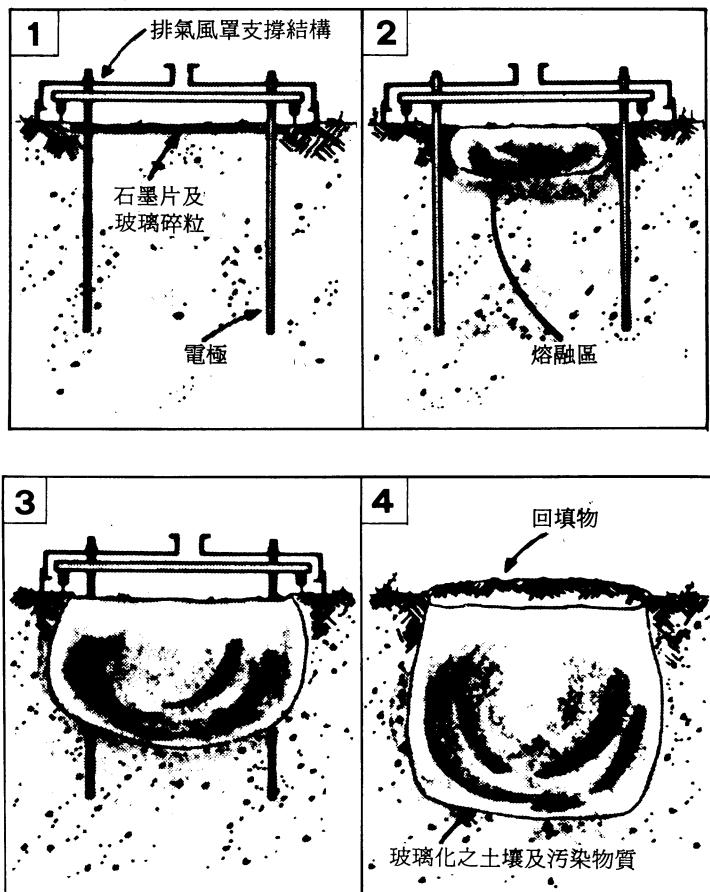


圖 6 ISV 處理程序示意圖⁷

當融化到達所需處理深度時，電力即停止供應並拔出電極棒。熔融狀態之土壤將在自然環境下逐漸冷卻固化。約 2週後在表面土壤冷卻並略微沉陷時，以乾淨土壤覆蓋其上而完成整個處理過程。

在熔融過程中，由於熔融區的逐漸成長導致電阻的降低，因此必須週期性的調整電壓及電流大小之比例，以保持穩定的功率輸入，亦即根據下式來調整：

$$P = IR^2$$

其中 P：功率，I：電流，R：電阻

熔融的深度受限於熔融區熱損失相對應於電能供應之大小。一般而言，熔融區約可向外成長至電極間距之一半。現場用ISV設備則設計可達4.57~6.10m的處理深度。

在實際應用時，典型的ISV處理速度可達4~5ton/hr，此與其他土壤復育技術的處理速度可相比擬⁸。通常在插入電極後150~200hr左右即可處理完該區域之土壤，而移動至下一塊土壤開始處理，其間隔時間約需16hr，其中包括進行日常維護所需之時間。

四、處理成果

ISV法的應用已經歷過各種階段實驗包括工作台型(bench)、工程型(engineering)、試驗型(pilot)及全規模型(full scale)。實驗過的土壤種類超過30種型態⁶。表1中詳列出不同階段實驗製程參數之比較。

表1 不同階段實驗製程參數比較⁷

發展規模	電力(kW)	電極間距(m)	每次安裝可處理重量(ton)
工程型	30	0.23~0.36	0.05~1.0
試驗型	500	1.2	10~50
全規模型	3750	3.5~5.5	400~800

ISV的熔融及固化過程極類似自然界地質化學反應(geochemical reactions)產生火成岩(igneous rocks)的過程。一般土壤組成主要包含矽及鋁氧化物，其熔點範圍約在1,100~1,600°C。當ISV經由電能產生之高熱達1,700°C時，可融化土壤成熔融狀態。在停止操作後，熔融區逐漸冷卻而產生化學成份均勻之玻璃狀結構，密度平均在2.3~2.5g/cm³範圍¹⁰，其組成成份及風化性質皆類似於自然界之黑曜石(obsidian)，強度及耐久性實驗結果發現與花崗岩(granite)接近⁸。

在自然的環境下，一般火成岩的水解速率約為1~20μm/1,000yr，如果取其平均值10μm/1,000yr來估計ISV產生之火成岩物質之強度，發現在一萬年期間，該物質被水解之表面厚度遠小於1mm。此數值顯示ISV穩定化之傑出效果⁸。

ISV法對土壤中有機污染物的破壞去除效率(DRE)及無機污染物之穩定固化作用效果也相當令人滿意。兩者處理的效果分別列於表2及表3。

土壤中有機物在ISV處理過程中可經由下列三種機構去除之¹¹：

(1)因土壤中缺氧，在熔融區周遭形成高還原性氣氛而對有機物進行熱裂解。

(2)蒸發之有機物被風罩吸引而處理。

(3)在熔融區周遭土壤溫度的升高而導致各種化學反應的加速進行。

無機物的處理則與有機物不同，因無機物在ISV過程不會揮發而殘留在黑曜石結構體內部，產生穩定及匣限化作用。

表 2 ISV法對有機性污染物之處理效果⁶

汚染物	原始濃度(ppb)	破壞率(%)	總破壞去除效率(含廢氣處理)(%)
阿特靈	113	>97	>99.99
氯丹	535,000	99.95	>99.999
DDD,DDE,DDT	21~240,000	99.9~99.99	>99.999
狄氏劑	24,000	98~99.9	>99.99
戴奧辛	>47,000	99.9~99.99	>99.9999
燃料油	230~ 11,000	>99	>99.999
呋喃	> 9,400	99.9~99.99	>99.9999
乙二醇	—	>90	>99.99
飛布達	61	98.7	>99.99
MEK	—	99	>99.999
PCBs	19,400,000	99.9~99.99	>99.9999
五氯酚	>4,000,000	99.995	>99.99999
甲苯	203,000	99.996	>99.99999
三氯乙烷	106,000	99.995	>99.99999
二甲苯	3,533,000	99.998	>99.99999

如表 2 所示，對含黏土之沃質土壤中多氯聯苯 (PCBs) 之總破壞去除效率 (total DRE) 高達 99.9999%，符合美國環保署規定之破壞去除效率。微量之PCBs、PCDDs 及 PCDFs 氣體因高熱蒸發之關係而存在於排氣系統中，因此須設立活性碳吸附塔去除之。

至於無機性污染物方面，以ISV產生之火成岩樣品進行溶出試驗(TCLP)，結果發現ISV能有效固定無機性污染物，所有有害性重金屬之溶出試驗值皆遠低於法規之容許標準。

ISV法適用處理之污染物種類很多，與焚化法處理項目類似，不過可行性仍待進一步的評估，可能適用項目列於表 4。

表 3 ISV法對無機性污染物之處理效果⁶

污 染 物	滯 留 率(%)	TCLP試驗結果	TCLP容許標準
砷	70~85	0.168~0.9	5.0
銀	99.9	0.14~0.229	100.0
鎘	67~75	0.001	1.0
銻	99~99.9	—	—
鉻	99.9	0.02	5.0
鈷	99~99.9	<0.01	—
銅	90~99	3.3	—
鉛	90~99	0.06~0.636	5.0
汞	0	0.0001	0.2
鎳	99.9	ND	—
鉻	99.99	—	—
鐳226	99.9	6.4pCi/g	100.0pCi/g
硒	—	0.098	1.0
銀	—	0.023	5.0
鈷	99.99	—	—
鈾	99.99	—	—
鋅	90~99	<0.05	—

表 4 ISV法適用處理之污染物種類⁶

適 用 種 類	處理效果	適 用 種 類	處理效果
<u>有機物</u>		<u>無機物</u>	
揮發性鹵化物	具潛力	揮發性金屬	具潛力
半揮發性鹵化物	具潛力	非揮發性金屬	具潛力
揮發性非鹵化物	具潛力	石棉	具潛力
半揮發性非鹵化物	具潛力	放射性物質	已證實
多氯聯苯	具潛力	無機性腐蝕物	具潛力
殺蟲劑	具潛力	無機性氰化物	具潛力
戴奧辛／呋喃	具潛力	反應性	
有機性氰化物	具潛力	氧化劑	具潛力
有機性腐蝕物	具潛力	還原劑	具潛力

五、ISV法對土壤中有機物移動特性之影響

在探討土壤中有機物移動特性受ISV影響前，茲先將處理區域之土壤依受熱狀況劃分成不同區域，如圖7所示。整個土壤體在ISV影響下可分成5個區域，分別為融化區(melt zone)、熱裂解區(pyrolysis zone)、乾燥區(dry zone)、過渡區(transition zone)及外圍土壤區(ambient soil zone)。

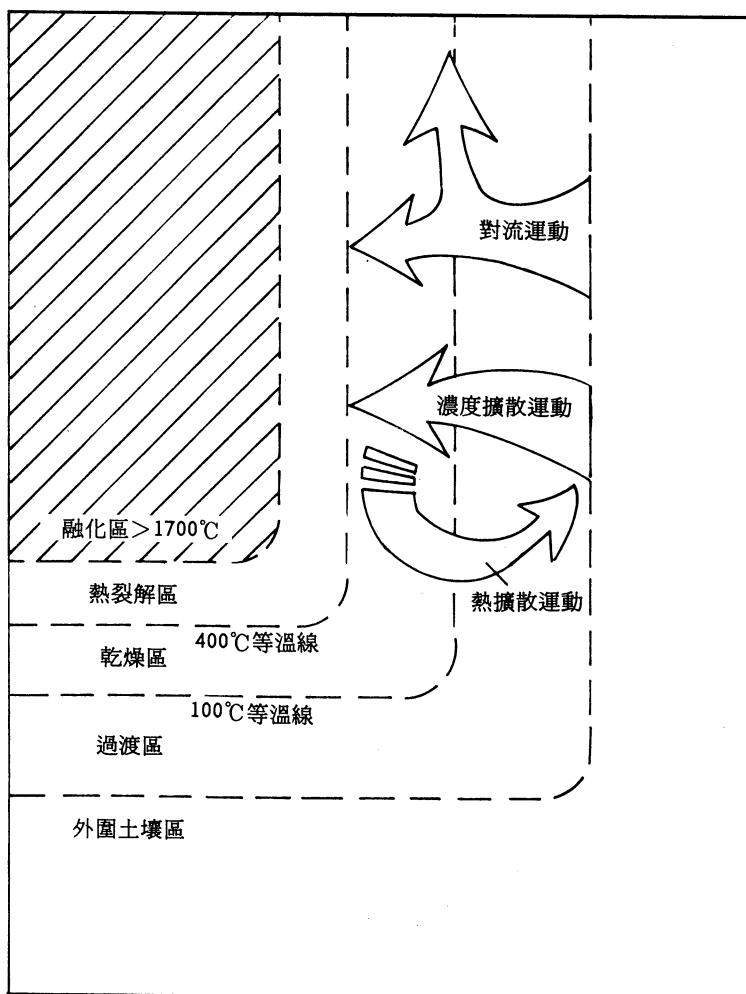


圖7 ISV熔融區周遭土壤化學物質反應及移動情形⁸

在ISV開始操作後，電力通過4根電極棒傳送至土壤而轉變成為熱能，在溫度高達1,700°C以上逐漸融化土壤而形成融化區。在融化區旁由於高溫缺氧，有機物的破壞分解為熱裂解反應。熱裂解過程中，有機物所裂解之產物將會從熔融液中冒出並迅即在大氣

中氧化；這些反應生成的氣體亦可順著電極旁向上浮升（因電極棒表面光滑，阻力小）。緊接著熱裂解區者為乾燥區，通常約有15~23cm寬。由於熱傳導作用，乾燥區內土壤之水分會被加熱蒸散，而使得乾燥區土壤之孔隙中空氣含量增加，因此對氣狀有機物的移動形成最小阻力路徑。乾燥區與過渡區的劃分可以100°C等溫線(isotherm)為分界線。過渡區中水分部分蒸發。外圍土壤區意指原有自然狀態下的土壤，此部份土壤因含水率較高，對氣體的移動有相當大的阻力。

從圖7中可發現由於在融化區及熱裂解區之有機物蒸發逸散，濃度趨近於零，而形成內低外高之濃度梯度(concentration gradient)，周遭土壤中有機物因而向內移動。又由於溫度差別，有機物亦會在熱擴散效應下向外移動。這二種移動方向相反而產生部份抵消情形。

有機物的移動亦受氣體對流(convective)之影響，當土壤中水分或其他化學物質蒸發時形成氣體的移動，這些移動的氣體將可攜帶有機物循最小阻力路徑前進。

六、ISV經濟性評估

據估計ISV處理費用在包括勞工、材料、能源、設備折舊、行政雜支及應得利益後，每噸土壤處理後約需275~600美元，主要成本變動因素有單位電費、土壤含水率及所處理面積大小，其他因素則有處理深度、污染物性質、土壤種類與特性等⁶。Buelt等人亦曾就現場整地費、設備費、人工操作費及能源材料消耗費（如電極及電費）等因素，在處理深度5m的前提下作一成本比較，如表5所示。

表5 ISV不同地點實際處理成本比較⁷

地點	電力來源	熱損失	人力需求	總成本, 1982\$/m ³ (ft ³)
Hanford	地方	高	中等	187(5.30)
Hanford	地方	中等	中等	161(4.60)
Hanford	地方	中等	略高於中等	183(5.20)
Generic	地方	中等	中等	180(5.10)
Generic	攜帶式	中等	中等	224(6.30)

七、結論

ISV從1980年開始發展至今經過各個階段的試驗證明在土壤復育工程中具有相當的可行性，其技術性及經濟性的評估都已獲得初步的認同。雖然在實際操作時曾發生過爆炸情事而遲緩了更進一步的現場實驗，但綜觀而言，因其能同時處理有機性及無機性污染物而且去除固定的效果非常卓越，在未來實不失為可行途徑之一。

八、參考資料

1. Kostcki, P.T. and Calabrese, E.J., Hydrocarbon Contaminated Soils and Groundwater, Vol. 1, Lewis Publishers, inc., Chelsea, Michigan, 354pp., 1991.
2. Kostcki, P.T. and Calabrese, E.J., Petroleum Contaminated Soils, Vol.1, Lewis Publishers, Inc., Chelsea, Michigan 357pp. 1990.
3. Yaron, B., Dagan, G. and Goldshmid, J., Pollutants in Porous Media, Springer-Verlag, New York, 296pp. 1984
4. Jumikis, A.R., Thermal Geotechnics, Rutgers University Press, New Brunswick, New Jersey, 375pp. 1977
5. Hillel, D., Fundamentals of Soil Physics, Academic Press, San Diego, California, 413pp. 1980.
6. Shearer, T.L., A Comparison of In-situ Vitrification and Rotary Kiln Incineration for Solid Treatment, J. Air Waste Manage. Assoc. 41(9), 1259~1264, 1991
7. Buelt, J.L., et al, Electrical Technique for In-place Stabilization of Contaminated Soils, Chem. Eng. Prog., 43~48, March, 1985.
8. Dragun, J., Geochemistry and Soil Chemistry Reactions Occurring During In-situ Vitrification, Journal of Hazardous Materials 343~364, 26, 1991
9. Timmons, D.M., et al, Vitrification Tested on Hazardous Wastes, Pollution Engineering, 76~81, June, 1990.
10. Koegler, S.S. and Kindle, C.H., Modeling of the In-situ Vitrification Process, Ceramic Bulletin, 70(5), 832~835, 1991.
11. Dragun, J., The Soil Chemistry of Hazardous Materials, Hazardous Materials Control Research Institute, Silver Spring, Maryland, pp458, 1988.
12. Jury, W.A., Farmer, W.J., and Spencer, W.F., Behavior Assessment Model for Trace Organics in Soil : 2. Chemical Classification and Parameter Sensitivity, J. Environ. Qual 13(4), 567~572, 1984

