

“天然衰減法”整治土壤及地下水污染 之政策立場及實務準則

阮國棟*、張金豐**、郭荔安***

摘要

受含氯溶劑污染的地下水體利用傳統抽取處理技術，很難經濟有效達到符合飲用水標準的最終整治目標。未來地下水污染的整治策略應該更好、更靈活及更便宜，結合最新應用科學及過去二十年的經驗與知識，靈活的執行綜合整治策略。天然衰減法是綜合整治策略的一部分，本文記述天然衰減的發展歷程、作用原理、優缺點及使用限制、美國應用情況。最重要的，本文歸納國外文獻，提出有關天然衰減法的六項重要政策立場以及八項重要實務準則，藉供國內處理類似場址污染事件的參考。

*行政院環境保護署水質保護處處長

**新竹科學工業園區管理局勞資組副組長

***行政院環境保護署水質保護處技士

一、前　　言

美國在九〇年代每年大約使用一百億美元於地下水污染整治工作，但僅少數案子達成目標。依據美國國家研究委員會(NRC)分析，其原因為利用抽取處理法(pump and treat)做初期的技術，期望快速達成清除至嚴格的飲用水標準(MCLs)，亦即以飲用水標準做為地下水整治的標準。但是傳統抽除處理法不能達到整治目標的原因很多，尤其受含氯溶劑污染之場址，美國國家研究委員會整理 77 處利用傳統抽取處理法之場址，歸納失敗之原因有：

- 1.地層物理特性的不均勻和污染物移動途徑的複雜性，使得正確評估相當困難；
- 2.污染物通常為非水相液體(nonaqueous phase liquids, NAPLs)，抽取地下水方法不能有效的將污染物移除；
- 3.污染物移動到不易接觸之區域，造成污染物之回收受到污染物的擴散速率控制，並不決定於地下水的抽取速率；
- 4.污染物吸附於地表下物質，致使在水體中必須移除之污染物總量與時間被低估；
- 5.地表下的特性很難瞭解，因此在採樣點間延伸有困難，同時在整治工程設計上產生不確定因素。

含氯溶劑通常被使用為機器和衣服的去脂劑，為美國、加拿大和歐洲最常見的地下水污染物，在美國超級基金 (Superfund)所列管的場址中，一半以上都有三氯乙烯的污染，受含氯溶劑污染土壤及地下水之最佳可用的整治技術，包括土壤氣體抽除、生物抽氣、現地生物處理、界面活性劑、二階段抽除、被動性圍阻和工程性微生物處理，這些技術均能降低污染量，但各種技術都有其限制條件，除極少數的場址，目前並無技術可將含氯溶劑之污染整治至符合飲用水標準。

未來地下水污染整治的策略應該要更好、更靈活及更便宜，亦即需要更好的應用科學資料和過去近二十年來獲得的知識，利用靈活的綜合整治策略，在較便宜情況下整治受污染地下水。較好的利用資料之意義在用複查的取樣技術、新的分析方式，和更準確預測污染物宿命 (fate)及傳輸的模式來改進場址特性記述。更靈活的策略包括污染源的移除、污染源的阻隔/控制、天然衰減整治時可接受的暴露風險管理。較便宜是與抽取處理法比較，並評估整治至飲用水標準時的淨利益。

二、天然衰減法

根據美國環保署的定義，天然衰減法的機制包括生物衰減(biodegradation)、延散 (dispersion)、稀釋、吸附、揮發和/或污染物的化學與生化穩定化，經由其中一種或多種的機制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。天然衰減法利用自然界的環保過程來清除污染場址，為一種非干擾和清除過程中允許場址有效利用，需要小心的研究場址狀況和監測污染濃度的整治方法。天然衰減的過程包括破壞性和非破壞性二種，破壞性過程破壞污染物減低污染物之總質量，如生物衰減和化學轉換(chemical transformation)，非破壞性過程不會破壞污染物，如稀釋、延散、污染物吸附於土壤顆粒上降低污染物濃度、吸附作用降低地下水中污染物之向外傳輸。天然衰減不僅發生在有機物，亦會發生在無機物如金屬與放射性物質。

1.還原去氯作用

天然衰減過程中生物衰減作用是最重要的，許多地下水中污染物如石油產物之汽油及苯、甲苯、乙苯及二甲苯等都被證明可以被生物衰減分解，含氯有機化合物如三氯乙烯亦被證實可以被生物衰減，但其機制較難預測，且有效的場址數目比石油產物污染場址少。石油碳氫化合物的生物衰減作用是一個氧化-還原反應，其中碳氫化合物被氧化(電子供給者)，致使一個電子接受者被還原(如氧)，而轉換成最終產物。含氯溶劑的生物衰減作用亦為氧化-還原反應，但其發生有兩種不同狀況，有些含氯溶劑當做電子供給者，但大部分為電子接受者。還原去氯作用的速率隨著含氯的減少而減低，因此四氯乙烯較氯乙烯易受還原去氯作用，還原去氯過程以下列順序進行，四氯乙烯 \Rightarrow 三氯乙烯 \Rightarrow 1,1-二氯乙烯、反式 1,2-二氯乙anes、順式 1,2-二氯乙anes \Rightarrow 氯乙烯 \Rightarrow 乙anes。各種不同環境下的還原去氯作用反應如下表所述：

含氯溶劑	氧化-還原環境			
	全部	脫氮作用	硫酸鹽還原作用	甲烷化作用
四氯化碳(CT)	-	CT \Rightarrow CF	CT \Rightarrow CO ₂ +Cl ⁻	-
1,1,1-三氯乙anes(TCA)	TCA \Rightarrow 1,1-DCE+CH ₃ COOH	-	TCA \Rightarrow 1,1-DCA	TCA \Rightarrow CO ₂ +Cl ⁻
四氯乙anes(PCE)	-	-	PCE \Rightarrow 1,2-DCE	PCE \Rightarrow 乙anes
三氯乙anes(TCE)	-	-	TCE \Rightarrow 1,2-DCE	TCE \Rightarrow 乙anes

2.天然衰減法的優點：

- (1)在現地處理產生較少的整治廢物，降低場外處理潛在的介質間傳遞，及人體暴露於污染介質的風險；
- (2)擾動地表的需要很少；
- (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)可以和其它整治方法一起用或為其他整治方法的後續處理方法；
- (5)成本較主動式整治方法為低。

3.天然衰減法的潛在缺點：

- (1)與主動式整治方法比較，可能需要較長的時程；
- (2)場址特性記述可能較複雜和高成本；
- (3)轉換產物的毒性可能比原污染物為高；
- (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的保護；
- (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，可能引起原先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。

4.天然衰減法之使用限制

天然衰減法使用的時機必須符合下列各項情況：

- (1)在可見未來沒有使用地下水之需要；
- (2)與其他主動整治法比較的合理時程；
- (3)場址有大的污染團和較低的污染濃度（規定整治濃度可能在合理的時程中達到且比其他替代方法低成本）；
- (4)污染源已經被控制或者場址特性資料顯示污染源已經不存在（控制污染源的方法包括移除、處理、或阻隔污染源物質，地下水污染源包括地面設施、掩埋場、污染土壤或地表下非水溶液相物質）；
- (5)保護飲用水或環境資源（場址污染物之移動至未受污染區之潛勢要低，污染團移動之控制應該要包括在天然衰減法中）；

28 “天然衰減法”整治土壤及地下水污染之政策立場及實務準則

- (6) 將天然衰減法與其他方法合併使用（利用天然衰減法無法在合理的時程中達到整治目標時，與更主動的整治方法合併使用將更為有效，當有些地區污染團需要比較長的時間時，如高污染區，在低濃度之污染團使用天然衰減法，配合高濃度區的抽取處理可能是個有效的方式）；
- (7) 提供管理機關及民眾的接受度（詳細的場址特質資料和分析證明這種方法將達到整治目標，小心的監測整治過程、明確的緊急應變方法）；
- (8) 詳細的場址特性資料，污染物濃度在過去時間中已經減低，地球化學或微生物指標被特質化來支持預測模式，模式預測場址可以在合理時程中達到整治目標（天然衰減法為有效的、可以長時間保護人類健康和環境、整治目標可以在合理時程中達到）；
- (9) 防止暴露的方法（長期防止污染地下水的暴露是確實保護的重點，必須避免影響公用或民用井，或提供事前有效的處理）；
- (10) 執行監測（監測是必須的，用來評估天然衰減的過程，並確保天然衰減過程如原先預測一樣、沒有不良衝擊、及時發現意外狀況發展適當的應變）；
- (11) 緊急應變（天然衰減法的策略必須配合緊急應變措施來處理非如預期的天然衰減過程，緊急應變措施應在文件中述明）。

天然衰減法不是新的整治方式，在 1985 年時已有人開始使用，因為實際的經驗及科學上的瞭解，使用此方法慢慢的增加，最近因科學上對於天然衰減過程的瞭解，視此方法為整治土壤及地下水污染至整治目標的潛在方法。美國大概有三分之一的州支持自然衰減整治，在美國超級基金計畫中已有七十三個場址選用天然衰減法為其整治方法之一，其中六個將天然衰減法視為主要整治方法，美國 1995 年有關地下儲油槽污染之整治，在 19,200 場址地下水污染中有 48%，及 103,000 個土壤污染清除場址中有 28% 使用天然衰減法。現在美國北卡羅納州及紐澤西州有天然衰減法的政策，加州也正在發展該州的政策。

三、有關天然衰減法的六項重要政策立場

1. 天然衰減法不是一個不行動的整治方法

天然衰減法不是一個不行動的替代方式，使污染責任者能夠離開該場址，天然衰減法著重於確認和監測天然衰減過程，需要更全面的場址特性記述，詳細的整治過程監測，和緊急應變方法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)指出選擇天然衰減法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。簡單的說利用天然衰減法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團體可以離開該場址。

2. 天然衰減法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，污染源的控制行動應對於主要污染物的實際處理，和工程控制如廢物的阻隔，來達到相對低的長期衝擊；受污染的地下水應該在合理的時程內，回復到其實際的適當用途，假如清理地下水是不可行的，主要將以防止污染團的移動，防止暴露於受污染的地下水，和評估更進一步的風險降低方法；受污染土壤應該整治至人體和環境可接受的程度，防止污染物傳輸至其他介質，造成不可接受的風險或超過要求的整治標準。在選擇天然衰減法時亦不應該改變或忽視上述的原則，天然衰減法必須要污染源的控制，配合監測、政府機關的有效管制來確保人體健康及環境安全，因此天然衰減整治不適用於不能分解的或不能衰減的污染物的濃度超過人體健康及環境可接受的程度的狀況。

3. 天然衰減法要在合理的時程內達成整治目標

天然衰減法比其他主動式整治法需要較長一些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，在全部或部分利用天然衰減法時，整個整治時程不應該比其它整治方式有過度長的現象。

4. 天然衰減法要實際減低污染物的量

30 “天然衰減法”整治土壤及地下水污染之政策立場及實務準則

天然衰減法的機制包括生物衰減、延散、稀釋、吸附、揮發和/或污染物的化學與生化穩定化，天然衰減包括其中一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。生物衰減和化學轉換(chemical transformation)破壞污染物減低污染物之總質量，但稀釋和延散，和使污染物結合在土壤顆粒上降低污染物濃度，吸附作用降低地下水中污染物之向外傳輸，不會破壞污染物。因此生物衰減為天然衰減法最重要的過程，可以實際降低污染物的總量及濃度，僅靠單獨的延散、稀釋降低污染物濃度之場址，選用天然衰減法是不能接受的。

5. 使用天然衰減法不表示主動式整治法不可行，或為技術不可行 (technical impracticability)

使用天然衰減法並不表示主動的整治方法不可行，或者為技術不可行(TI)。天然衰減法可以為主要的整治方法，亦可為其他整治法的後續整治方法，利用天然衰減法無法在合理的時程內達到整治目標時，與更主動的整治方法合併使用將更為有效，當有些地區污染團需要比較長的時間時，如高污染區，在低濃度之污染團使用天然衰減法，配合高濃度區的抽除處理可能是個有效的方式。

技術的不可行決定是基於使用的整治技術無能力達到要求的整治程度，在美國技術不可行是用來調整超級基金和資源回收法場址的整治目標。一個技術不可行的場址並不是表示該場址沒有主動的整治方式，或表示天然衰減將被使用於該場址，天然衰減法不能直接視為或預設的技術不可行決定的結果。

6. 天然衰減法為合法的整治方法

通常生物整治法可分為二種方式，一為天然的生物整治(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，另一種為工程生物整治(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。天然衰減法含天然的生物整治，在美國超級基金、資源保育及回收法(RCRA Corrective Action)和地下儲槽整治計畫中，被視為是地下水整治的一個合法整治方式。

四、有關選用天然衰減法的八項重要實務準則

1. 證明場址具有明顯的生物衰減作用

污染物在天然衰減整治過程中，生物衰減速率高於污染物溶出速率時，污染團之範圍將被限制甚至於退縮，但當生物衰減速率低於污染物的溶出速率時，污染團將繼續向外擴散。因此場址應該有活躍的生物衰減作用，且污染團應該達到穩定狀態下選用天然衰減法。在評估天然衰減的有效性，下列三種資料或證明應該運用在評估過程中：

- (1)地下水和/或土壤化學歷史的數據，證明在適當的監測或取樣地點，有清楚和有意義的污染物質量和/或濃度隨時間降低趨勢，這個濃度降低不是由於污染團的移動所造成的，在無機污染物的案例主要的衰減機制亦應該要瞭解；
- (2)以水文地質和地球化學的數據，間接證明場址天然衰減過程的活動，和衰減速率將使污染物濃度降低至要求的濃度，如特性記述資料可以數量污染物吸附、稀釋或揮發的速率，或證明和量化場址中生物衰減過程的速率；
- (3)從現場或實驗室模擬環境研究的數據，直接證明在場址發生的一個特定的天然衰減過程，和它對於我們關懷的污染物之衰減速率。

生物衰減的評估需要包括：營養鹽、地下水中存在的電子供給者及接受者、共代謝物質和代謝產物的濃度、確定出現的微生物族群。在評估吸附、稀釋和延散對於污染地下水的天然衰減的貢獻，必須要詳細的瞭解地下水力學、回注和排洩區域和體積、以及化學性質。在第一種數據沒有足夠的品質和夠長時間的資料來支持使用天然衰減法的決定，環保署將要求提供場址天然衰減過程的性質與速率的數據特性記述，當上述的資料仍不適切或不確定，應該要提出第三種數據。

2. 提出完整的場址特性記述文件

場址特性記述應該包括：搜集數據來確定污染物來源的性質與分布（三度空間分布與時間之變化）、地下水污染團的範圍、可能潛在的接受者。由場址特性記述來證明天然衰減整治的適用性時，應該包括特性記述數據和分析、污染量的瞭解、地下水流、污染物相的分布、以及污染物與土壤、地下水和土壤氣體間的結合情形，生物的及非生物的轉換情形，以及這些因素隨時間變動的瞭解。

指標項目分為原化合物(parent compound)及分裂產物、氧化-還原地球化學、電子供給者及一般環境指標四類，

(1)原化合物(parent compound)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）；
- 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：溶氧大於 1-2mg/L 時好氧狀態盛行，溶氧小於 1 mg/L 時厭氧狀態，在厭氧狀態適合於化合物的還原去氯作用；

b.氧化-還原潛勢：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，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+100 mV 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，硫酸鹽的測定做為厭氧之指標，硫化物的測定用來驗證硫酸鹽的測定（在污染團中之硫酸鹽濃度較污染團外之硫酸鹽濃度為低）；

d.亞鐵(二價鐵)：在某些例子中鐵離子(三價鐵)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，在污染團中較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，在污染團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，在污染團中較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：與污染物的檢測一起可以知道污染物以外的有機物的量，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，建議可以做為在還原去氯作用中，有機物當做為電子供給者的指標，在污染團中之化學需氧量較污染團外之化學需氧量為低）；

c.生化需氧量：污染團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；

(4)一般環境指標：

a.pH 值：微生物分解有機污染物通常喜歡 pH 值在 6 至 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 值的差異可以做為生物的活動研判；

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指標、可以做為地下水代表性的指標；

d.鹼度：鹼度可以中和酸性，鹼度的增加可以做為生物活動的指標。

在 1.含有生物不能衰減的污染物，2.污染物轉換成較毒的衍生物和/或更活潑的型式，3.以往監測的期間較短的場址，需要更多的資訊，這類證明資訊需求的數量和型態依據每個場址的特性，如污染問題的大小和性質、接受者的接近程度和其潛在風險、其他環境物理特性（水文地質、氣候及土地覆蓋）。同時必須注意有關責任的團體應該確保這些用來證明自然衰減效率的數據及分析是由有能力的且具有相關學科的技術專才所搜集與評估的，結果應該適時的送給環保署或其他執行評估和核定的機關。

3.證明污染源已經穩定或被有效控制

利用天然衰減法處理之時間較長，在生物衰減速率比污染物擴散速率高時，污染團範圍不再向外推移，甚至逐漸萎縮變小，如污染未達穩定，污染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天然衰減法之先決條件。

4.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會產生不良影響時，該場址必須要採取措施改善該項污染物之影響，才能利用天然衰減法整治。

34 “天然衰減法”整治土壤及地下水污染之政策立場及實務準則

5.評估達到整治目標所需的合理整治時程

場址整治的時程特別是天然衰減整治的時程應該與該場址土地與地下水使用來比較，整治的時程通常應該預估所有在進行詳細評估中的替代整治方法，包括天然衰減法。對於時程合理性的判定應該以該場址為基礎，天然衰減法比其他主動式整治法需要較長一些的時程是可以理解的，但整個整治時程在全部或部分利用天然衰減法時不應該比其它整治方式過度的長。地面狀況和污染團穩定度可能在長的時程的天然衰減整治中變動。考慮時程的合理性是一個複雜的且屬個別場址的決定，評估場址整治時程的合理性應包括：

- (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)公眾對於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。

6.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，在天然衰減法中監測更為重要，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。

監測井依據場址的個別特性來選定，為了使評估能夠具有代表性最少的井數包括未受污染的上游地區一口、在溶解污染團範圍內至少二口，在未受污染的下游地區至少一口，在檢視初步監測結果後可以依實際情況再增加或減少監測井數。為了成本效益監測採樣可以與含氯溶劑的取樣同時進行，如果含氯溶劑是每季取樣一次，生物指標項目的取樣可以同樣的頻率進行一年，和評估污染物濃度的變化趨勢一樣，瞭解地下水高程(groundwater elevation)對於指標項目的影響是非常有用的，在評估初期監測結果後可以適當的減少指標項目。對於含氯溶劑的

天然衰減分析建議項目如下：溶氧、氧化-還原潛勢、pH 值、導電度(specific conductance)、溫度、鹼度、氯鹽、硝酸鹽、硫酸鹽/硫化物、總溶解鐵、錳、總有機碳、生化需氧量、化學需氧量、甲烷、二氧化碳、乙烯及乙烷。

所有監測計畫應設計達成下列各項：

- (1)證明天然衰減發生是如預期的；
- (2)確定任何生物衰減可能轉換產生的有毒產物；
- (3)確定擴散中的污染團；
- (4)確保下游接受者無衝擊；
- (5)偵測環境中可影響天然衰減成效之新釋放出的污染物；
- (6)證明做為保護潛在接受者之機關管制的有效性；
- (7)偵測可能降低天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。

監測的執行時程應該與污染物超過要求整治標準時間一樣長，特別是在污染濃度達到整治標準以後，應該再監測一段時間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做為任何天然衰減法建議的一部分，提供環保署或其他執行機關。

7. 包含應變整治方法的整治計畫

應變整治計畫是在場址整治決定文件中的一個整治技術或方式，它的功能在當所選用的整治方法失敗時，做為事件的一個補救整治方法。應變整治方法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。應變整治方法通常有彈性的，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具不確定性時，應變整治計畫是需要的。

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，和指明執行應變整治的時機，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；

36 "天然衰減法"整治土壤及地下水污染之政策立場及實務準則

- (2)接近污染源的井顯示污染物的濃度大量增高，顯示一個新的或老的重新再一次的釋放；
- (3)在原污染團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，將造成天然衰減法的保護的不良影響。

使用天然衰減法應該評估決定需要一個或更多可達成整治目標的應變方法，在決定使用天然衰減法主要利用預測分析者，較基於場址實際監測數據的歷史趨勢來決定使用天然衰減法者，更需要應變整治計畫。在建立機制或應變整治必須要小心，以確保採樣變異或季節變動不會造成不適當的執行應變整治方法。

8.在決定是否核准天然衰減法的時候需要考慮下列各點：

- (1)天然衰減法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)污染物源頭的性質和分布是否已經或能夠適當的被控制？
- (4)污染團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天然衰減法各項整治組成的衝擊。
- (6)在選用天然衰減法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更主動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？

五、結語

使用天然衰減法並不明顯的改變整治目標，天然衰減法僅在完全保護人體健康與環境下才能被選用，天然衰減法不應該被視為一個沒有行動的整治方法，寧可視它為一個在有限的場址環境下描述污染的方法，它的使用符合可適用的法令和法規

規定。天然衰減法不是一個假設的或停頓的整治方法，而是應該可與其他整治方法在選用過程中一起評估或比較，在許多場址中，天然衰減法為廣泛的整治策略中的一個合理的和具有保護功能的組成。在其他的許多場址中因為不確定性過高或需要更主動的整治方式，將天然衰減方法排除在唯一的整治方法之外。

六、參考資料

- 1.A Citizen's Guide to Natural Attenuation , EPA 542-F-96-015, US EPA OSWER.
- 2.Lovelace, K. and P. Feldman , Where Are We Now With Public And Regulatory Acceptance? (Resource Conservation and Recovery Act [RCRA] and Comprehensive Environmental Response, Compensation, and Liability Act [CERCLA]), pp.4-6 in the Proceedings of the Symposium on Natural Attenuation of Chlorinated Organics in Ground Water, EPA/540/R-97/504, 1997.
- 3.Protocol for Monitoring Intrinsic Bioremediation in Groundwater. Chevron Research and Technology Company Health, Environment, and Safety Group,pp.20, 1997.
- 4.Protocol for Monitoring Natural Attenuation of Chlorinated Solvents in Groundwater. Chevron Research and Technology Company Health, Environment, and Safety Group, pp.26, 1997.
- 5.Parker, T., T. Mohr, Symposium on Natural Attenuation of Chlorinated Solvents in Groundwater-A Summary. [Http://www.grac.org/winter96/mapaper.htm](http://www.grac.org/winter96/mapaper.htm).
- 6.Use of Monitored Natural Attenuation at Superfund, RCRA Corrective Action, and Underground Storage Tank Sites ; US EPA OSWER Directive 9200.4-17, (<http://www.epa.gov/swerust1/directiv/9200417z.htm>)
- 7.Ward, C.H., Where Are We Now? Moving to a Risk-Based Approach, pp.1-3 in Proceedings of the Symposium on Natural Attenuation of Chlorinated Organics in Ground Water, EPA/540/R-97/504, 1997.
- 8.Wilson, J., Chlorinated Solvents Biodegradation. From Ground Water Currents,1996. (<http://www.clu-in.com/gwe/gwcchlrs.htm>)