

低 Level 放射性廢棄物의 處分 (I)

- 陸地處分安全評價의 方法論 -

1. 緒 言

오늘날 原子力發電을 비롯하여 널리 産業界 般에 원자력 이용이 확대, 보급됨에 따라 放射性廢棄物의 安全管理가 심각한 문제로 대두되고 있다.

이웃 일본을 예로 들면, 青森縣, 下北半島 6개의 村에 이른바 低레벨 放射性廢棄物貯藏施設의 建設 계획을 進진시킴으로써 低레벨 방사성 폐기물의 陸地處分에 대해 점차 본격화 될 징조를 보이고 있다. 本稿에서는 低레벨 방사성 폐기물을 육지처분하는 데 있어서 안전성이 어떻게 說明되어야 하는지 그 科學的方法論에 대해 說明코저한다.

2. 陸地處分은 原子力에 한정된 것은 아님

美國環境廳의 조사에 의하면, 大氣汚染이나 하천의 水質汚染에 관한 環境基準이 엄해짐에 따라 미국에서는 폐기물의 淺地埋設處分이 급증, 1980년 현재 약 20만개소의 처분장에서 매년 1억 5천만톤의 一般固體廢棄物과 2억 4천만톤의 産業固體廢棄物이 매설 처분되고 있는 것으로 추정되고 있다.

淺地埋設이라는 육지 처분에 관한 한 이와같이 原子力産業 이외의 분야에서도 이미 충분한 실적이 있다. 방사성폐기물의 육지처분이라 하더라도 低레벨방사성폐기물의 경우는 이 淺地

埋設法이 고려되고 있으나, 그것은 방사성폐기물에 한정되는 것이 아님을 우선 명기해 둘 필요가 있다.

原子力이라 하면 어떠한 무엇인가 특별한 것 (대개의 경우 특별히 위험한 것)이라고 보기 쉬운데, 低레벨 방사성 폐기물의 육지 처분에 관한 한 소위 産業廢棄物의 한 형태로 보아도 될 것 같다. 적어도 그 安全性의 기초가 되는 科學的根拠나 理論的基盤에 대해서는 공통되는 부분이 많다.

淺地埋設되는 일한 및 산업폐기물의 안전성과 관련하여 가장 유의해야 할 점은 그에 의한 地下水의 오염이다. 이점은 低레벨폐기물의 육지 처분에서도 마찬가지다. 물론 일반 및 산업폐기물의 경우에도 그 주되는 汚染源은 液體廢棄物로서 固體廢棄物은 아니다. 여기서 말하는 低레벨 방사성 폐기물이란 고체폐기물에 한정되므로 그 오염의 가능성은 훨씬 낮은 것이다.

3. 地下水에 存在하는 空間

地下에서의 물의 舉動은 지하수가 중요한 水資源이므로 土木工程이나 資源開發工學 등의 분야에서 주요한 題의 하나가 되어 왔다. 특히 최근에는 지하수 오염 문제와 관련, 環境科學의 관점에서 왕성하게 연구가 행해지고 있다.

일반으로 地表에 가까운 地下空間은 물을 透

過시키기 쉬워 土壤粒子間의 틈사이(단위 체적 당 점하는 비율을 空隙率이라 한다)에 공기가 들어가 있는 층(通氣層이라 불려진다)과 그 아래의不透水層으로 인해 물같이 모여져 있는 상태(틈사이의 물이 飽和되어 있다)의 層(帶水層이라 불려진다)으로 나누어진다. 예컨대 우물물의 水源은 대수층에 있다. 같은 지하의 물이라도 대수층 속의 물은 重力의 작용으로 流動可能한 지하수가 거의 전부를 점하고 있는데 대해, 통기층속의 물은 곧 토양을 구성하는 물질의 하나로 土壤水라 불려지며 토양입자와의 결합 정도에 따라 吸濕水, 毛管水, 自由水로 나누어진다.

통기층과 대수층과의 경계는 地下水面이라 불려진다. 이 面의 水壓은 大氣壓과 같다. 지하수 面은 降水量의 계절 변동에 의해 변화한다. 따라서 통기층과 대수층과의 경계는 動的이다. 또 통기층속의 含水率(單位體積當 물이 점하는 비율)은 공간적으로도 시간적으로도 변화한다. 이로 인해 통기층속의 물의 거동을 넓은 空間領域 및 長期의 時間領域에 걸쳐 정밀하게 解析하는 것은 쉬운 일이 아니다. 그러나 대수층에 있어서는 空隙이 지하수로서 포화되어 중력 작용(水頭差)에 의해서 유동하고 있으므로 그 大局의 流動特性을 파악하기 쉽다.

4. 地下水의 移動現象

帶水層과 같이 多孔質媒體속을 흐르는 流體의 平均流速(v)는 Darcy's 則 :

$$v = KI/\epsilon \dots\dots\dots(1)$$

K = 透水係數, I = 動水勾配, ϵ = 空隙率에 따른다고 하고 있다. 원래부터 (1)식은 어떤 空隙領域의 평균 특성을 나타내는 것이므로 미세한 공간 mesh에 대해서는 성립치 않는다.

개개의 공간 매쉬에서의 流速은 이 평균 유속에서 당연히 벗어나 있다. 流體的物質의 이동 현상으로 보았을때, 이 미세한 유속의 벗어

남은 微視的인 混合效果가 있는 것으로 생각하고 있다. 또 대수층과 같은 多孔質媒體는 토양 입자의 粒徑, 密度, 組成 등 物性值自體均一이 아니며 이것들이 벗어나서 존재할 경우에는 유체의 흐름도 벗어나 소위 偏流가 생길 가능성도 있다. 이와같은 현상이 있을 수 있다는 것은 (1)식의 평균 유속의 흠어짐이 巨視的으로도 어느 정도 큰것이라고 생각하지 않을 수 없다. 즉, 이와같은 흠어짐은 유체내 물질의 이동현상으로서 巨視的인 혼합 효과가 있다고 생각되고 있다.

이들 혼합 효과는 유체내 물질에 대해서 보면 그 空間의 濃度分布를 均一化하는 작용이 있다고 생각된다. 말하자면, 통상의 擴散現象(分子擴散)과 마찬가지로 거기에는 마치 空間의 濃度差를 추진력으로 하여 물질이 이동하는 현상이라고 이해될 때가 많으며, 통상의 확산 현상과 이들 혼합 현상을 총칭해서 分散現象이라고 부르고 있다. 따라서 분산 현상은 확산에 관한 Fick 第2 法則으로부터의 類推에 의해서

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(D_{ij}^* \frac{\partial c}{\partial x_j} \right) : D_{ij}^* = D_{ij} + D_a \dots\dots (2)$$

D_{ij}^* = 分散係數, D_{ij} = 混合擴散係數

D_a = 分子擴散係數, c = 着目하는 물질의 地下水中濃度(x_i, x_j 는 공간에 관한 直交座標)로 표시된다.

분자확산계수 D_a 는 그 정의에서 scalar 量이나, 혼합확산계수 및 분산계수는 일반적으로는 tensor이다.

多孔質媒體中에는 固液이 공존하여 流路가 복잡하고 또한 제한되고 있다. 따라서 분자확산계수라 하더라도 均質液相中에서 측정된 값을 그대로 쓸 수는 없다.

통상은 實効擴散係數 D_{eff} 를

$$D_{eff} = D_a \cdot \epsilon / x ; x = \text{屈曲度} \dots\dots\dots(3)$$

에 의해서 정의하며 (2)식의 D_a 대신에 D_{eff} 를 사용한다.

소위 液中の 분자확산계수는 溶質·溶媒의 여하를 불문하고 거의 10^{-9} [m^2/s] 정도임이 알려져 있다. 대수층이 다공질매체라는 것을 고려한 測定例에 의하면 實効擴散係數는 10^{-10} [m^2/s] 정도라 한다. 이에 대해 통상의 대수층속에서의 혼합분산계수는 적어도 한자리는 큰 값이므로 이른바 분자확산계수 項은 무시된다.

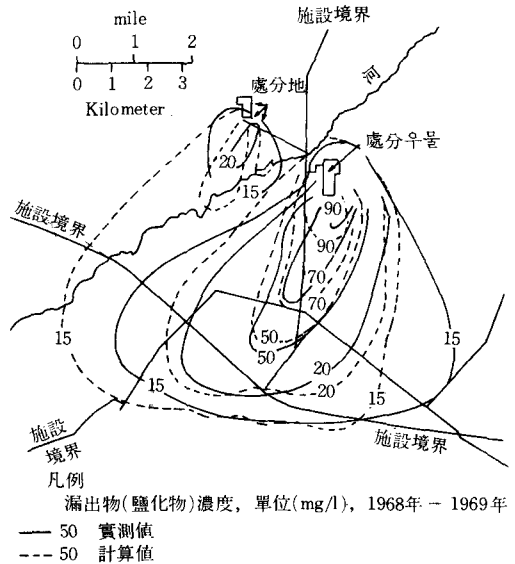
5. 分散現象은 Fick의 法測에 따르는가

地下水의 分散現象을 확산에 관한 피크 법칙의 類推에 의해서 설명한다는 思考는 이미 반세기나 전에 G. Taylor에 의해서 제창된 것이다. 그러나, 10여년 전부터 실험결과가 理論曲線에 부합하지 않음이 지적되기 시작해서 현재는 그 適否를 둘러싸고 연구가 계속되고 있다.

실제로 Taylor 自身도 피크 법칙에 따르는 것은 분산현상이 일어나기 시작해서 충분한 시간이 경과했을 때, 즉 發生源에서 충분히 떨어진 곳이라고 조건을 붙이고 있다. 그러므로 피크 법칙의 적용 범위에 대해서는 충분히 유의할 필요가 있다. 이런 점에서 현재로서는 충분히 거리가 떨어진 곳에 대해서만이 유속에 비례하는 분산계수(比例定數는 分散度라 불러진다)를 정의한 피크 법칙을 적용하는 것이 실제적이다. 이때에도 거리가 멀어짐에 따라 분산도가 커지는 것을 고려할 경우도 있다.

여기서 중요한 점이 2가지 있다고 생각된다. 하나는 擴散理論 자체(혹은 다공질 매체속의 분산 현상을 확산 이론에 의해 近似시킨다는 사고 방식)가 現象의 大局의特性을 파악하기 위한 것으로 局所의特性을 설명하는 데는 적합치 않다는 것, 즉 실험실이나 field에서 개개의 측정결과를 좋은 精度로 표현하는가 어떤가에 대해서는 원래 한계가 있다는 것이며, 다른 하나는 소위 폐기물의 지하수오염 가능성과 관련, 그 安全性을 입증하는 데 있어서 구해지고 있는 것은, 現象을 충실히 표현하는(소위 simulation)

〈그림 1〉 美國 Idaho 化學 process plant(ICPP)에서의 實測値와 計算値와의 비교



것으로서 일어날 것 같지 않은 현상이나 상황이라 할지라도 安全評價上 重要하다면 그것을 고려하며 그래도 아직 그것이 안전하다는 것을 가르키는 데 있다는 점이다. 原子力安全性에 관련해서는 이 제 2의 점 즉, 안전평가상의 保守主義 思考方式이 특히 중시되고 있다.

이와 같은 사고 방식에 따른다면 분산계수에 대해서도 충분한 여유도를 고려한 값을 가정할 수 있다. 이들 값을 사용한 解析結果는 당연히 最尤値를 나타내는 simulation 結果 내지 實測値와 일치하지 않는다. 그러나 이것은 역으로 시뮬레이션 입장에서는 분산계수에 대해 충분한 精度가 현재로서는 기대되지 않는다 하더라도 안전평가 입장에서는 여유도를 충분히 취함으로써 분산계수를 정의할 수 있을지도 모른다는 것을 시사하고 있다 하겠다.

6. 地層의 收着作用

多孔質媒體中の 물질 이동 현상으로서 하나의 중요한 현상은 地下水 즉 液相中에 있는 물질이 土壤 즉, 固相中에 吸收·吸着되는 현상이다.

흡수와 흡착을 총칭해서 收着이라 한다. 수착 작용을 고려해서 액상중의 주목하는 성분에 관한 物質收支를 취하면 (형식적으로 1次元表示),

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} - v \frac{\partial c}{\partial x} - \left[\left(\frac{\rho}{\epsilon} \right) K_s \right] \frac{\partial c}{\partial t} \dots\dots\dots (4)$$

$K_s = dS/dc$, $S =$ 固相中濃度 $= f(c)$, $\rho =$ 多孔質媒體의 외견상 비중, $D =$ 分散係數가 얻어진다. 固相中濃도와 液相中濃도는 平衡關係에 있으며 그 平衡曲線이 $S = f(c)$ 의 형으로 주어져 있다고 가정하고 있다.

파라미터 K_s 의 가장 간단한 경우는 그것을 定數로 보는 경우이다. 定數라고 보여진 K_2 는 分配係數라 불려지며 K_a 라고 쓴다. K_a 를 사용하면 (4)식은

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D' \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} - v' \frac{\partial c}{\partial x} \dots\dots\dots (5)$$

$D/D' = v/v' = 1 + \frac{\rho}{\epsilon} K_a \equiv R$, $R =$ 遲延係數로 바뀌어질 수가 있다. (5)식과 (4)식을 비교해보면, (5)식에서는 외견상 (4)식에서의 收着作用의 項이 없어진 것을 알 수 있는데, 말하자면 수착작용이 있는 系에서 분산계수와 유속이 각각 R 배만큼 작아진 것으로 생각하면, 마치 수착작용이 존재하지 않았던 것처럼 (5)식을 사용할 수 있다. 유속에 한해서만 생각해 보면 주목하고 있는 성분의 움직임 속도는 지하수 자체의 흐름보다 R 배 늦다는 것을 뜻하고 있다. 이런 의미에서 파라미터 R 은 遲延係數라 불려지고 있다.

실제로 濃度 c 가 낮고 固液의 平衡關係를 分配係數 K_a 에 의해 정의할 수 있는 體系에서는 (5)식이 성립되고 있음을 실험실에서 확인할 수 있다. 이 원리는 용액속의 化學種分析 등에서 사용되는 액체 chromatography原理 그 자체이다.

(5)식에 의해서 지하수속의 着目成分의 이동 현상이 記述될 수 있다고 하면, 가령 處分場에서 어떤 물질이 漏出되어 지하수에 混入했을 경

우 그것이 처분 지점에서 어느 거리만큼 떨어진 지점에 도달하는 시간은 지하수 자체보다 R 배만큼 늦어진다. 放射性物質의 특유한 성질로서 그 방사성이라는 성질은 시간과 함께 자연히 없어져 간다는 성질이다. 따라서 이 시간이 늦어진다는 것은 그동안에 방사성 물질의 농도를 저하시키는 효과가 있게 된다.

그 減衰效果가 문자 그대로 효과적으로 기대될 수 있는가는 방사성물질의 半減期에 비해 그것이 지하수속에서 운반되는 시간이 어느 정도 긴가에 따른다. 분배계수 K_a 가 크고 遲延係數 R 이 크면 그만큼 이동 시간이 길어지며 감쇄 효과도 기대된다. 문제는 이와같은 분배계수를 定義지을 수 있는가, 혹은 정의지을 수 있다하더라도 그것을 어떻게 측정하는가이다. 이들중 어느 것도 쉽지 않다는 것, 혹은 주의깊은 검토를 요한다는 점에 대해서는 말할 여지가 없다. 여기에는 복잡한 化學反應이 여러 가지의 형태로 관여하고 있으며 측정된 데이터의 精度나 再現性은 반드시 양호하다고 할 수는 없다.

그러나, 이점에 관해서는 앞에서 말한 分配係數와 質的으로 같은 것이 지적될 수 있을 것이다. 즉 분배계수 K_a 를 사용한 (5)식은 원래 지하수에서의 注目成分의 大局的特性을 설명하려는 것으로 공간적 및 시간적으로 변화하는 지하의 環境條件을 엄밀히 기술하는 것은 아니다.

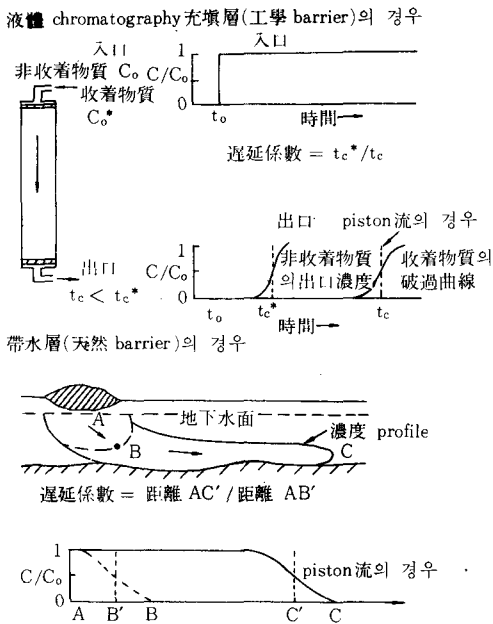
7. Source-term의 評價

이상은 處分場에 埋設된 폐기물속의 방사성 물질이 누출되었을 경우, 그것이 지하수에 의해 운반되어 하천이나 해양 등 生活水圈의 오염에까지 이르는가 어떤가를 安全評價의 관점에서 해석하는 방법에 대해 概設한 것이다. 여기서는 안전평가상의 보수주의를 피할수 없으며 이를 위한 여유도도 어느 정도 크게 잡지 않을 수 없다. 그러나 이와같은 것은 地下空間이 원래적으로 가지고 있는 分散效果나 遲延效果 혹

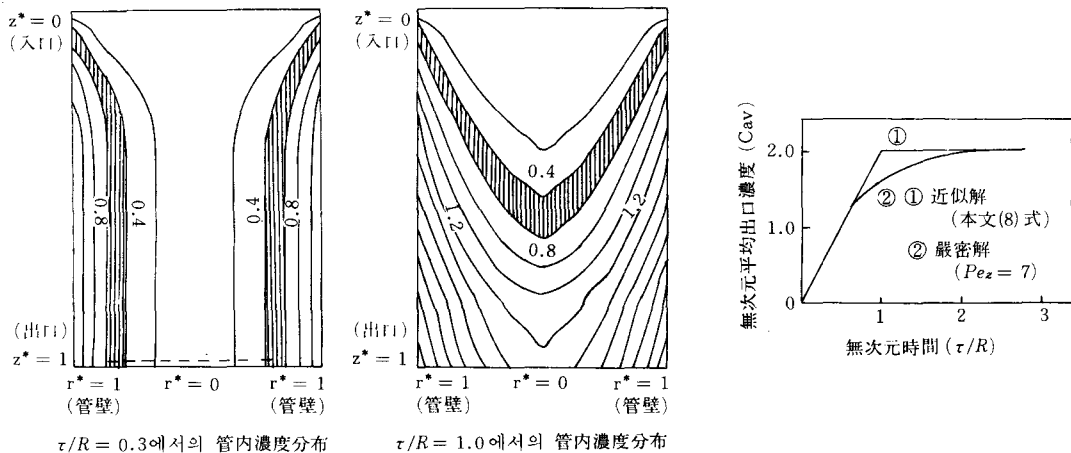
은 해양 등에서의 希釋效果(이것을 종합해서 天然 barrier라 부른다)에 관해 그 安全防護機能 이 현실로는 충분히 있다하더라도 안전 평가상으로는 그 기능을 훨씬 낮게 내다보지 않을 수 없음을 암시하고 있다.

이에 대해 처분장 자체가 갖추고 있는 安全防護機能(人工 barrier라 불려지고 있다)은 그것

〈그림 2〉 充填層이나 地層의 收着作用이 遲延效果를 가져옴을 나타내는 原理圖



〈그림 3〉 浸出率一定條件下에서의 source-term 解析의 一例



을 技術的으로 실증하는 것이 적어도 부분적으로는 가능할 뿐만아니라 안전평가의 결과는 현실의 기능에 보다 가까운 것이 될 수 있다. 그러나, 방사성폐기물 처분의 안전평가에서 대상으로 하는 時間領域이 통상의 工學的設備나 시설의 수명보다 긴 것이 특징으로 되어 있다. 현실로는 처분 시설이 통상의 工學的壽命을 넘어 아직도 안전방호기능을 계속 갖추고 있더라도 안전평가상으로는 그 기능을 잃어버린 것으로 상정해 볼(소위 source-term 평가) 필요가 있으며 여기서는 역시 안전평가상의 保守的前題를 세우기로 되어 있다.

보수적 전제에선 source-term 평가방법의 한 예를 제시해보자. 드럼통에 채운 시멘트固化體廢棄物을 지하에 규칙바르게 배열하고 각 폐기물 사이의 공간에 모래를 채운 후 그 처분시설 전체에 뚜껑을 하여 폐쇄했다고 하자. 뚜껑이 충분한 遮水性能을 가지고 있는 한 시설속에 물이 스며들어가는 일은 없겠으나, 언젠가는 시설속의 모래 부분에 물이 완전히 들어가버렸다고 가상해 보자. 이때 드럼통은 소위 土壤腐食에 의해서 劣化해 가는 것이 예상된다. 그 결과, 어느 때부터 내부의 시멘트固化體와 물이 접촉하여 속의 방사능 물질의 浸出이 시작한다. 침

출된 물질은 모래층중에 흡착되면서 물에 의해 시설 외부로 운반되어 나간다.

이와같은 想定에 대해 안전평가상 충분히 보수적 전제를 가정하고 또한 解析이 용이한 모델이란 예컨대 모래층속의 물의 경로를 처분장의 상황에 따라 판단하여 가장 짧고 가는 圓管流路에 近似시킨 것이다. 이 近似 모델에서는 圓管의 주위가 시멘트固體로 둘러싸여 있고 거기로부터 浸出되어 나오는 물질이 圓管流路를 일정한 流速으로 흐르는 물과 함께 이동하게 된다. 이 상황은 원통용기의 벽면에 熱源이 있고 속의 充填物속을 흐르는 물이 그 열을 제거하고 있는 경우와 유사하다. 浸出物質의 이동현상에는 모래의 收着作用이 있는 점이 특징으로 되어 있다.

시멘트固體로부터의 浸出率을 일정으로 볼 수 있는 경우란 熱傳導問題에서는 壁面の 熱流速이 일정이라는 境界條件이 여기에 해당한다. 또 물의 유속이 대단히 작고 또한 물에 녹기 어려운 浸出物質의 경우에는 圓管流路의 주위에서 물속 농도가 어느 上限值(예컨대 溶解度)에서 일정이라고 볼 수 있을 때도 있을 것이다. 이 경우는 경계조건은 열전도 문제에서 보면 壁溫이 일정한 경우에 상당하고 있다.

이 近似 model은 또 모래로의 收着作用을 兩液界面에서의 물질 이동 현상으로 봄으로써 充填層에서의 物質移動理論을 응용할 수 있는 점에서도 흥미롭다. 실제로 이 모델과 같이 低 Reynolds 數領域에 대해서도 液境膜物質移動係數가 구해지고 있는 예도 보고되고 있다.

$$Sh = 2.4 Re^{1/3} Sc^{1/3}; 10^{-3} \leq Re \leq 10, \dots (6)$$

Sh = 샤우트數, Re = 레이놀드數,

Sc = 슈미트數

兩液의 평형관계가 항상 성립되어 있음을 가정한 경우와 物質移動係數를 가정한 경우와의 相異 및 모래층의 分散係數나 分配係數의 不確實性(天然 barrier인 지하공간의 그것에 비하면

훨씬 작은데)이 평가 결과에 미치는 영향에 대해서 해석한 보고가 있다. 이 보고에서는 분산 계수에 대해 그 標準的値는

$$D_L/\nu = 5.1Re, D_T/\nu = 0.0013Re; 0.2 \leq Re \leq 3 \dots \dots \dots (7)$$

D_L = 縱方向分散係數, D_T = 橫方向分散係數가 하나의 假定이 되어 있다. 低 Reynolds 數領域의 데이터는 적은 것 같다.

浸出率을 一定하게 볼 수 있는 경계 조건의 경우에 대해 그 解析結果를 요약하면, (1) 物質移動係數를 고려하지 않더라도 결과는 실질적으로 변하지 않는다. (2) 安全評價上으로는 縱方向의 페크레數($Pe = vL/D_L$; L 은 圓管流路의 길이)가 충분히 크면 가정에서 얻어지는 近似解(圓管流路出口에서의 無次元化平均濃度 c_{av}),

$$c_{av} = 2\tau/R; \tau/R \leq 1 \dots \dots \dots (8)$$

$$c_{av} = 2; \tau/R > 1$$

τ = 無次元化時間 = $(v/L)t$, R = 遲延係數을 사용할 수 있다.

다시, 그 일정한 값이란 最大濃度이기도 하며 안전평가상으로는 가장 중요한 값이다. (8)식은 그것이 농도의 無次元化파라미터(浸出率, 流路通過時間, 流路半徑) 및 遲延係數에 의해 一意的으로 결정되는 것을 가르키고 있다. 여기에는 불확실성이 크다고 할 수 있는 분산계수는 포함되어 있지 않다. 또 분배계수에 관한 불확실성의 영향이 어느 정도인가에 대해서는 지연 계수라는 형태로 (8)식에 明示的으로 제시되고 있으며, 소위 感度解析을 할 것까지도 없이 그 영향의 크기를 평가할 수가 있다.

안전평가상 중요한 파라미터란 무엇일까. 그 파라미터가 가진 불확실성은 어느 정도 평가결과에 영향을 미칠까. 이와같은 것들을 명백히 하기 위한 의미에서 위의 결과는 많은 示唆를 주고 있다. 이것은 浸出率을 一定이라고 볼 수 있는 體系에 대한 것인데 溶解度限界에 있는 체계에 대해서도 같은 접근이 가능하다.