고체 · 액체 및 기체의 'Clearance Level'과 실제 적용

John Cooper
영국/National Radilogical Protection Board

'Clearance Level' 이라는 용어는 방사선 방호 분야에서 비교적 새로운 용어로서 아직까지 ICRP 에서는 사용되지 않는 용어이다. 환경으로 처분하거나 방출을 허가하는 과정이 있으므로 'clearance'가 '행위'로부터 물질을 방출 또는 처분하는 유일한 방법은 아니라는 것을 인식하는 것은 중요하다.

어떻게 'cleance'를 방출이나 처분과 연관시킬 수 있을까? 이에 대한 해답은 'cleance level'의 유도에 사용된 방사선 방호 제한 기준에 내재되어 있다.

핵종별 'clearance level'을 해제 기준으로 사용하는 데 도입된 기초적인 방식은 규제 기관으로부터의 더 이상의 규제 없이 물질을 방출하는 '면제' 개념과 유사하다.

면제로 허가 받으려면 규제 기관으로부터 허가나 제한을 받는 것과는 달리 방사선 영향과 관련된 특별한 평가를 받아야 한다. 따라서 'clearance'는 규제 행위로부터 물질을 방출하는 방법 중 하나로 인식해야 한다.

또 다른 문제는 'conditional clearance'라는 용어의 사용이다. 과거에는 이 용어가 예전에는 특별한 매립지나 재활용 시설 같은 특별한 조건에서 고려되는 물질로부터 나오는 방사선량이 사소(trivial)할 경우에 사용되었다.

그러나 규제 기관의 허가 후에도 물질에 관한 관리와 규제 기관의 규제 행위가 계속 필요한 개념이다.

'Clearance'는 물질을 환경으로 방출하기 전에 방사선의 영향이 사소하다는 것이 분석되고 입증할 수 있는 상황으로 정의하는 것이 좋다.

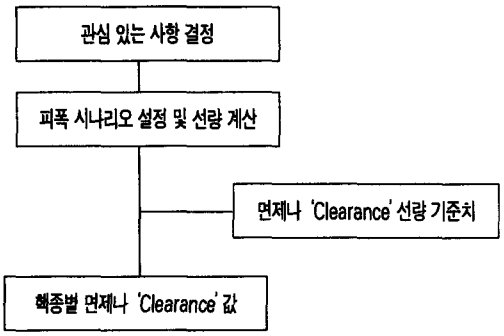
'clearance'는 사소 선량(trivial dose)과 연계된다. 'cleared' 되는 물질은 방사선 영향이 사소하여야 한다는 말이다. 그러나 각 후보 물질의 방사선 영향을 평가하는 데 선량 기준 자체가 즉각적으로 유용한 것은 아니다.

그러므로 'clearance'에 물질이 적합한지를 평가하는 기준으로 사용할 수 있고 측정할 수도 있는 양을 정하기 위하여 많은 연구가 행해졌다.

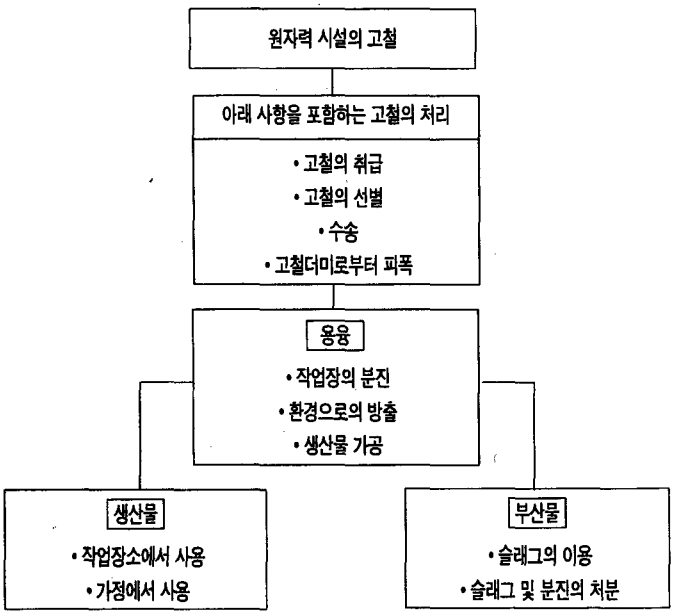
가장 일반적으로 산출된 것이 물질의 핵종 농도이며 여러 연구를 통하여 부피에 대한 핵종 농도로 표시된 'clearance' 기준이 개발되었다.

원자력 시설에서 발생하는 금속의 재활용에 적용하는 'clearance level'

EU에서 적절한 수준의 방사선 방호 수준을 유지하는 동시에 원자력 시설의 철거시 경제적으로 가치있는 물질을 재활용할 수 있는 기준 개발의 필요성이 요구되었다.



〈그림 1〉 핵종별 면제 혹은 'Clearance level' 설정의 일반 체계



〈그림 2〉 고철의 'Clearance level' 계산시 사용한 일반 sinario 체계

1984년 Euratom 조약 31항의 규정에 따라 전문가 그룹이 이 문제의 검토를 목적으로 실무자급 회의를 소집하였다.

실무자 그룹은 고철의 재활용에 따른 보고서를 1988년에 발간하였고 현재 고철의 재활용에 관한 보고서를 개정중이며 이용 분야에 알루미늄과 구리를 포함하려 하고 있다.

새 보고서는 1998년에 발간되었으며 다음과 같은 가정을 하고 있다. 고철의 'clearance level'은 부피 당 방사능 농도와 표면 오염 농도로 표시되어 있다.

고철의 'clearance level'에 관한 전체적인 가정은 〈그림 1〉과 같다.

몇 가지 피폭 시나리오가 만들어졌다. 서로 다른 몇 가지 시나리오가 3가지의 다른 금속의 처리를 대표하기 위하여 사용되었는데 철의 경우 스테인리스와 탄소강에 서로 다른 파라미터 값이 적용되었다. 핵종 오염의 이동 경로도 고려되었다.

예를 들어 대부분 Cs-137은 금속 용융 과정에서 휘발할 것이다. 일반적인 피폭 경로는 〈그림 2〉에 표시되어 있다.

30개 주요 핵종에 대해서 계산이 수행되었다. 각각의 핵종에 대해 고려된 시나리오로부터 각 금속으로부터 가장 높은 선량을 내고 가장 작은 값을 갖는 'clearance level'이 계산되었다.

'clearance level'은 BSS의 schedule 1에 있는 면제 준위와 같은 방법으로 단순화하였다. 즉 계산된 값이 3×10^{x} 과 $3\times10^{x+1}$ 사이의 값이면 단순화된 값은 $1\times10^{x+1}$ 이다. 농도와 표면 값이 모두 계산되었다.

이 'clearance level'은 재활용하기 위해 처리되는 고철 금속에 적용할 목적으로 고안되었다. 이 값은 원자력 시설로부터 나오는 시점에 적용된다.

재활용에 관한 EU 보고서에는 물질을 직접 재사용시 적용할 수 있는 핵종 표면 오염 농도가 나타나 있다. 이 경우 총(고착성+비고착성) 표면 농도가 제거되지 않는 것을 기준으로 유도되었다.

금속 재활용에 따른 집단 선량도 추정되었다. 계산은 'clearance' 수준이 되는데 1년이 소요되고 재활용된 물질의 사용이 끝나고 또다시 재사용되는 데까지 100년이 걸리는 것으로 하여 종합적인 선량을 계산하였다. 재활용으로 인한 EU에서의 집단 선량은 연간 1manSv 미만이다.

핵종별 준위는 Co-60 및 악티나이드의 1 Bq/g부터 Fe-55, Ni-63의 10^4 Bq/g사이에 분포한다. 표면 오염 농도는 삼중 수소의 10^5 Bq/㎡부터 거의 모든 α방출 핵종의 0.1 Bq/㎡ 사이에 분포한다. 부피당 농도와 표면 농도는 동일하게 적용된다.

재사용시의 제일 높은 농도는 10^4Bq/㎡이고 낮은 것은 0.1 Bq/㎡이다. 한 핵종 이상의 핵종이 존재할 때는 물질이 'cleared' 될 수 있도록 간단한 비례법을 사용할 수 있다.

IAEA의 'clearance level'

1. 고체 물질 핵종에 대한 'clearance level'

IAEA는 최근 고체 물질의 핵종별 'clearance level'에 관한 중간 보고서를 발간했다(TecDoc 855). 이 보고서는 관리가 끝난 후 그 물질이 사용처나 위치에 관계없이 적용할 수 있는 핵종별 체적당 'clearance level'이 주어졌다.

그러나 어떤 면에서 이 수치들은 보고서들에 기술된 것과 다른 수치이다. clearance level은 낮은 방사능 물질의 처분 재이용이나 재활용을 위한 면제에 관한 전에 발간된 보고서에 근거하여 유도되었다.

고려된 상황들에는 매립 처분(처분장까지 수송 및 처분과 처분 후 피폭 포함), 소각(소각재 및 방출물에 의한 운전원의 피폭 포함), 철의 재활용, 건물, 장비 및 기구의 재활용이 있다.

이 분석에서는 대략 10μSv/년에 상당하는 핵종들의 농도를 그룹화하였다. 핵종별로 0.3Bq/g, 3 Bq/g로부터 3,000Bq/g의 단일 대표 농도가 제안되었다.

그러므로 거의 모든 α-방출 악티나이드들은 0.3Bq/g의 'clear-arnc level'이 제안되었으며 삼중수소는 3,000Bq/g의 'clearance level'이 제안되었다.

'clearance level'은 56 핵종에 대해 만들어졌다, 수치가 주어지지 않은 핵종에 대해서는 'clearance level' 계산에 아래 공식을 사용하도록 제안되었다.

$$\text{최소치}\left\{\frac{1}{E_\gamma+0.1E_\beta}, \frac{ALI_{inh}}{1{,}000}, \frac{ALI_{ing}}{10{,}000}\right\}$$

단 $E\gamma$은 ICRP 38에 기술된 MeV로 표시된 감마 유효 에너지이고 $E\beta$는 MeV로 나타낸 유효 β에너지이며 ALI_{inh}는 Bq로 나타낸 흡입에 의해 연간 제한치 중 가장 엄격한 수치이고 ALI_{ing}는 ICRP 61에 Bq로 주어진 연간 섭취 제한치 중 가장 엄격한 수치이다. clearance level은 세가지 중 가장 낮은 수치이다.

특별한 권고치가 없는 경우, IAEA 보고서는 표면 오염에 관한 'clearance level'은 핵종 오염 농도치 Bq/g과 같은 값으로 간주하도록 하였다. 즉 EU의 금속 재활용 보고서와 같이 표면 오염 농도와 농도 제한치로 같은 값을 적용하도록 시도되었다.

한 핵종 이상이 포함되면 간단한 비례 방식으로 물질이 'cleared' 될 수 있는지에 관해 검토할 수 있도록 제안되었다.

2. 의약 · 공업 및 연구에서 핵종 사용에 따른 물질의 'clearance level'

지금까지 기술한 연구에서는 고체 물질에서의 핵종별 'clearance level'을 계산해왔다. 그러나 'clearance' 개념이 시설의 기체상 및 액체상 방출에 있어서 근본적으로 사용하지 못할 이유가 없

다. 이 경우에는 'clearance level'이 고체들의 경우와 다르게 특성화되어야 하며 이것이 액체 및 기체 방출의 경우에는 고의적으로나 부주의로 인해 희석되는 가능성이 커짐으로 핵종 농도로 clearance level을 사용하는 데 어려움이 되고 있다.

IAEA는 최근 의약·공업 및 연구에 핵종을 이용할 때 발생하는 액체·기체·고체 방출물에 대한 'clearance level'을 TecDoc-1000에 기술하였다. 위에 언급한 문제로 인하여 방출물의 'clearance level'은 연간 방출되는 총 농도의 형태로 기술되었다.

첫 단계는 추정 핵종, 방출 경로 및 폐기물의 물리적 및 화학적 형태를 알아내는 것이다.

병원 등에서 개봉 선원을 사용함에 따라 발생되는 폐기물의 형태에는 진단이나 치료를 위해 핵종을 섭취한 환자로부터의 나온 배설물과 물건들을 포함하고 있다.

공업적인 사용시에는 오염된 액체와 소각 가능한 물질로부터 유기화합물과 대형 오염 장비 같은 다루기 쉽지 않은 물질들이 발생한다.

연구소 및 병원에서 사용하는 많은 핵종들의 대부분은 비교적 반감기가 짧다. 가능하면 이것들은 반감기가 긴 핵종들로부터 분리해서 저장하여 붕괴시킨 후 처분한다.

피폭 시나리오별로 36핵종에 대하여 'clearance level'이 유도되었다.

〈표 1〉 기체 및 액체의 방출시 제안된 'clearance level'

핵종	Bq/년	
	기 체	액 체
Na-22	1×10^{6}	1×10^{5}
P-32	1×10^{8}	1×10^{6}
S-35	1×10^{8}	1×10^{6}
Sr-89	1×10^{8}	1×10^{9}
Tc-99m	1×10^{11}	1×10^{9}
I-131	1×10^{8}	1×10^{7}
Ra-226	1×10^{6}	1×10^{6}

가능한 한 핵종 방출로부터 선량을 추정하는 데 사용된 모델과 수치는 IAEA Scfety Series 57 「Generic Models and Parameters for Assessing the Environmental Transfer of Radionuclides from Routine Releases」의 것을 사용하였다.

기체 방출은 건물 옆에서 되는 것으로 가정하였다. 피폭되는 사람은 20m 떨어져 있는 건물에 살고 그들의 선원에서 100m 떨어진 장소의 채소를 섭취하고 우유는 800m 떨어진 곳에서 섭취하는 것으로 가정하였다.

피폭 경로는 plume의 흡입 및 우유·고기 및 곡식으로부터의 핵종 섭취를 포함 plume에 의한 외부 피폭도 고려하였다.

하수로의 방출은 2가지 경우를 고려했다. 첫 번째는 모든 방사능이 하수 처리 과정에서 하수 찌꺼기에 남아있는 것이고, 두 번째는 모든 방사능이 하수에 액체로 방출되는 경우이다.

각각 방출된 기체와 액체의 연간 방출률을 계산하고 연간 선량은 합해진다. 계산은 성인과 유아에 대해 수행되었으며 가장 엄격한 결과가 'clearance level'을 추정하는 데 사용되었다. 'clearance level'은 연간선량으로 10μSv 상당하는 방출률이다. 제안된 'clearance level'은 〈표 1〉에 주어져 있다.

대략 결과는 기체 방출의 경우 연간 토륨-232의 1×10^{5} Bq로부터 탄소-14 및 Ca-45를 포함하는 많은 핵종의 1×10^{10}사이이다.

고체 물질에서는 별도로 'clearance level'을 계산하는 대신에 보고서는 앞부분에 명시된 고체 물질의 핵종별 'clearance level'을 이용하였다.

IAEA에서 유도한 'clearance level'과 면제 준위의 schedule 1의 값의 1/10이 일반적으로 일치하

〈표 2〉 고체 폐기물의 핵종별 일반 'clearance level'

핵종	보통 양의 경우 (Bq/g)	많은 양의 경우 (3톤 초과시 Bq/g)
H-3	1×10^{6}	1×10^{5}
C-14	1×10^{4}	1×10^{3}
S-89	1×10^{3}	1×10^{2}
Tc-99m	1×10^{2}	1×10^{1}
Ra-226	1×10^{1}	1×10^{0}

는 것이 관찰되었다. TecDoc-1000의 수치는 면제 준위의 schedule 1의 값과 수치가 같다.

그러나 면제치를 계산하는 데 사용한 시나리오는 단지 소량의 사용에 한해서만 고려되었기 때문에 많은 양의 물질에 대해 사용시에는 수치를 1/10 factor를 사용하여 보정하는 것을 권고하고 있다.

물질의 양은 일반적으로 단일 시설에서 단일 년도에 나온 고체 폐기물의 양이다. 연간 3톤이 넘을 경우 보정치를 사용해야 한다. 일반적인 'clearance level'은 〈표 2〉에 나타내었다.

'clearance level'의 실제 적용

고체의 대해서 'clearance level'은 방사능 농도로 표시되어 있다. 이 수치는 일반적인 양의 평균치이다. 핵종들은 모든 물질에 고르게 분포하는 것으로 가정하였다. 그러므로 평균 방사능 및 핵종 분포를 결정하는 방법이 요구된다.

평균 방사능을 평가하는 간단한 방법이 TecDoc-1000에 제안되어 있는데 한 포장 단위에 있는 물질의 부피를 일정 부분으로 나눠 각 부분의 방사능 농도를 평가한 다음 이것을 적절한 'clearance level'과 비교하는 방법이다.

부분의 최소수는 10이고 최대 부피는 20ℓ이며 최소 단위의 부피 제한을 더 중요시한다. 각 부분의 방사능은 측정이나 계산 또는 그의 조합에 의해 평가된다.

각 부분의 농도는 'clearance level'의 10배를 초과하지 못하는 것으로 되어 있으며 포장의 평균 농도는 적정 'clearance level'을 넘지 못한다.

여러 핵종이 포함되어 있으면 핵종 별로 'clearance'에 대해 고려한 후 아래의 간단한 식이 이용된다.

$$\sum_{i=1}^{n} \frac{Ci}{CLi} \leq 1$$

여기서 Ci는 제안된 Bq/g으로 표시된 핵종 I의 방출률이며 CLi는 'clearance' 방출률 제한치 혹은 폐기물 내 핵종의 Bq/g 농도이며 n은 혼합물 내의 핵종수이다. 비의 합이 1 이하이면 혼합물은 'clearane' 조건을 충족하는 것으로 본다.

기체 및 액체 방출의 경우 방출은 'clearance level'이 계산된 조건과 같이 연간 일정한 속도로 방출되어야 한다. 방출이 연속적이지 않는 조건에서는 'clearance level' 사용에 주의가 필요하며 특히 연간 방출중 많은 부분이 확산이 나쁜 계절에 일어나면 특히 주의가 필요하다.

또한 'clearance level'에 사용된 시나리오 모델 및 수치는 유럽 북미의 경험으로부터 나온 것이다.

국가간 약간 다른 점을 보정하기 위한 계산시에는 주의가 요구되는데 예를 들면 먹이사슬간 전이 및 식사 습관의 차이 등이다. 그러나 clearance level 유도에 사용한 가정을 벗어나는 경우나 다른 피폭 경로가 있을 수도 있다. 그러한 경우 국가 해당 기관에서 'clearance level' 유도에 사용한 방법이 지역 조건을 적절히 반영하고 있는지 판단을 내려야 한다.

'clearance level'의 적용은 물건을 환경으로 방출하는 시점 및 지점이라는 것을 명심해야 한다. 그러므로 단반감기 핵종에 대해서는 방사능 준위가 'clearance level'까지 붕괴되도록 저장하여 방사능을 감소시키는 것이 가능하다.