



표면오염의 측정방법과 표면오염한도



정 규 환

한국원자력안전기술원 방사선평가실

표면오염의 측정

방사성 표면오염은 일반적인 방사성 오염의 한 형태이며 표면오염한도는 방사선관리구역의 운영과 방사성물질의 운반, 방사선관리구역으로부터의 물품 반출에 적용되고 있을 뿐만 아니라 향후에도 원자력시설의 제염 및 해체를 위한 규제해제 기준의 설정, 처분장의 건설·운영에도 또한 고려되어야 할 기준이다. 따라서 원자력 이용시설에서 방사선관리의 한 분야로서 지속적인 감시와 관리가 필요한 표면오염의 적절한 관리를 위해 스메어 측정을 중심으로 한 표면오염도 평가방법, 전이율의 적용, 표면오염한도의 산출 근거, 국내 표면오염도 규제기준의 특징을 고찰한 후 표면오염도 규제기준의 적용 방법을 제시하였다.

표면오염의 측정

표면오염의 정의

방사성 오염(contamination)은 그 형태와 규모가 매우 다양하다. 오염의 대상과 분포형태에 따라 공기오염, 수질오염, 표면오염, 인체오염 등으로 분류되며 대개 어떠한 공간 혹은 매질에 원하지 않는 방사성 물질이 분포하는 것으로 정의된다. 규모나 그 정도 면에서도 실험실내에서의 실험 결과에 영향을 줄 수 있는 극 미량의 방사성물질이 존재하는 수준에서부터 지표면에서의 핵실험에 의한 전 지구적인 규모의 오염까지 포함될 수 있다.

오염의 형태 가운데 표면오염(surface conta-

mination)이란 구조물, 공간, 물체 또는 인체 등의 표면에 원하지 않는 방사성물질이 부착되는 것을 의미하며¹⁾ 이러한 오염 중 보통 인간에게 해(harm)를 줄 수 있을 정도의 오염이 규제 대상이 된다.

표면오염은 비고착성(non-fixed) 표면오염과 고착성(fixed) 표면오염으로 구성되며 고착성과 비고착성 오염도의 합을 '총 표면오염도'라고 정의한다. 비고착성 오염(non-fixed contamination)은 제거성, 또는 유리성 오염(removable, transferable, smearable, loose contamination)이라고도 하며 제거성 표면오염이란 보통의 작업조건에서 제거할 수 있거나 전이될 수 있는(transferable) 오염²⁾, 적절한 압력을 주어 문지르는 스메어 테스트(smear test, 또는 wipe test라고도 함)에 의해 표면의 방사성물질이 스메어물질(smear material)로 전달될 수 있는 오염³⁾⁴⁾ 또는 평범한 접촉, 닦아냄, 솔질, 세척 등 비파괴적인 방법에 의해 방사성물질이 표면으로부터 제거될 수 있는 오염⁵⁾으로 정의된다.

고착성 표면오염의 정도는 오염물질의 입자 크기와 상태, 매질 표면의 특징(갈라진 틈이나 이음새, 거칠기, 액체의 침투, 흡수성, 밀도 등), 온·습도, 환기 등의 환경조건에 따라 결정되며 이러한 조건의 변화에 따라 제거성 오염이 되기도 하고 체적오염이 되기도 한다. 고착성 오염과 제거성 오염이 혼합되어 있는 것으로 추정되고 별다른 정보가 없는 상황이라면 고착성과 제거성 오염은 동일하게 분포하고 있는 것으로 간주한다⁶⁾.

고착성 오염에 의한 피폭 경로는 베타, 감마선에 의한 개인 외부피폭과 피부피폭인 반면 제거성 표

면오염에 의한 피폭 경로는 베타, 감마선에 의한 개인 외부피폭과 방사성물질의 공기중 재부유(resuspension)로 인한 흡입, 손을 통한 소화기관으로의 섭취, 공기중 방사성 오염물질 환경(submersion)에서의 외부 피폭 등 4가지 경로가 있으며 특수한 경우로 상처를 통한 체내로의 침투가 있을 수 있어 제거성 오염은 고착성 오염에 대해 체내 피폭의 경로가 추가된다.

표면오염도 평가방법

표1. 직접측정법 및 간접측정법의 장단점 비교

	장 점	단 점
직 접 측정법	<ul style="list-style-type: none"> - 비교적 정확한 측정이 가능함 - 측정이 비교적 용이함 	<ul style="list-style-type: none"> - 제거성 오염과 고착성 오염을 구분할 수 없음 - 주변 선량률이 높은 경우 측정이 불가능하거나 측정 신뢰도가 떨어짐
간 접 측정법	<ul style="list-style-type: none"> - 제거성 오염만의 평가가 가능함 - 주변선량률에 영향을 받지 않음 - 핵종 분석이 가능함 	<ul style="list-style-type: none"> - 실제의 제거성 오염을 정확히 측정하기는 어려움 - 고착성 오염의 평가는 불가능함

표면오염의 위치와 정도를 평가하기 위한 방법으로는 팬케이크 검출기(pancake probe) 형태의 GM 계수기 측정기구 등을 이용한 주사(走査) 측정법과 정지 측정법(scans and static measurements)으로 오염 위치 확인과 총 표면오염도를 측정하는 직접측정법이 있으며 측정대상 표면을 문지르는 방법(wipe, smear, swipe, swab measurements) 등으로 제거성 오염의 존재 여부 또는 그 정도를 평가하는 간접측정법이 있다. 스메어법

으로 대표되는 간접측정법은 제2차 세계대전 중 맨하탄 프로젝트 수행 당시 알파 측정기가 부족했던 작업장과 실험실의 플루토늄 오염 여부를 파악하기 위해 궁여지책(窮餘之策)으로 고안해낸 방법으로 주로 제거성 오염의 정성적 평가와 밀봉선원의 누설여부를 확인하기 위해 사용되었다¹⁴⁾. 직접측정법과 간접측정법은 측정의 특성상 상호보완적인 장단점이 있는데 이를 비교하여 정리하면 위의 표와 같다.

직접측정법을 사용하여 총 표면오염준위를 계속하였을 때 이 오염 준위가 제거성 오염한도 이내에 든다면 스메어법 등을 사용한 제거성 오염의 측정은 필요하지 않으며⁷⁾ 서베이 기구에 의한 주사 또는 정지법에 의한 측정으로 표면오염의 준위를 적절히 평가하거나 계속할 수 없는 H-3, Ni-63과 같은 저에너지 베타 방출체로 오염이 되었을 경우에는 간접측정법(습식 스메어법)만이 오염을 확인하는데 효과적이다.

직접측정법에 대하여 간접측정법은 측정의 정확도가 떨어지기 때문에 표면오염의 확인, 평가에 스메어법만을 전적으로 의존하려는 것은 바람직하지 않으므로 휴대용 측정기구에 의한 계속 등의 손쉬운 직접측정법을 병행하는 것이 좋다⁸⁾.

지금까지 개발된 스메어 측정법 또는 스메어 시료 채취, 측정 표준 절차는 다음과 같다.

- 1) 측정할 표면을 선택한다.
- 2) 스메어물질 또는 스메어 용지(smear paper)에 식별 표시를 한다.
- 3) 스메어물질을 손가락에 대고 가로, 세로 각각 10cm (면적 100 cm²) 정도 되는 표면을 10회 정도

나선의 원을 그리며 문지르거나 S자 형태로 문질러 오염물질이 스메어물질로 옮겨지도록 한다.

4) 스메어물질을 별개의 플라스틱 봉지에 넣거나 두꺼운 종이로 제작된 카세트에 꽂아 교차오염이 발생하지 않도록 한다.

5) 계측실 혹은 실험실로 옮기거나 주변의 방사능준위가 낮은 곳으로 옮긴다. 이때 스메어물질은 방사성물질로 취급하여 운반규정을 따른다.

6) 스메어물질을 평가 목적에 따라 표면오염의 직접측정법에 사용되는 검출기로 방사능을 계측하거나 홀더가 있는 핵종 분석기로 계측한다.

7) 계측이 끝난 스메어물질은 측정 결과를 별도의 용지나 양식에 기록하고 폐기물 처리한다.

제거성 표면오염의 측정은 스메어 용지, 면봉, 화학 처리된 천 등을 사용할 수 있지만 천은 알파입자에 대한 자기흡수를 일으키므로 알파 방출체에 의한 오염에 대해서는 사용할 수 없다. 천이 효율을 증가시키거나 건식법으로는 측정할 수 없는 H-3의 평가를 위하여 습식방법이 사용될 수도 있으나 스메어물질 자체에서 수분이 배어 나올 정도가 되어서는 안되며 알파 방출체에 의한 오염에는 습식법을 적용하지 않는다¹⁴⁾. 스메어는 적당한 압력(moderated pressure)으로 하여야 하고 스메어물질은 서로에 의해 교차오염이 되지 않도록 취급되어야 한다.

스메어물질은 원형, 사각형의 셀룰로오즈, 유리 섬유, 천, 플라스틱, 면봉 등이 사용될 수 있으며 크기는 원형의 경우 대개 직경 1 ~ 2inch (2.54 ~ 5.08cm), 사각형의 경우 1 × 1inch, 2 × 2inch 등의 크기를 사용하는 것이 일반적이지만 경우에 따라 다양한 형태와 크기가 사용될 수도 있다¹⁴⁾.

스메어물질의 재질은 측정할 표면에 적합하게 선정되어야 한다. 매끄러운 표면은 종이(filter paper)류, 거친 표면은 면직물(천) 등을 이용한다. 오염 형태별로 적절한 스메어물질의 재질을 적합한 순서대로 나열하면 베타오염의 경우에는 유리섬유(glass fiber), 면봉, 종이, 스티로폼 순이고 알파 방출체에 의한 오염의 경우에는 유리섬유, 종이의 순으로 나타났다. 하지만 특수한 경우를 제외한 보통의 경우에는 종이류가 가장 적합한 물질로 알려져 있다¹⁴⁾.

스메어의 면적은 U.S. NRC Reg. Guide 8.21과 Reg. Guide 8.23에서 측정 대상이 물체일 경우에는 300cm²에 대하여 측정하고 바닥, 벽면, 천장 등 시설이나 지역의 표면에 대하여는 100cm²를 측정하도록 규정하고 있다. 이는 물체의 경우 주로 손에 의한 접촉이 이루어지므로 스메어의 면적을 손바닥의 면적으로 모사하기 위한 것으로 추정된다.

우리 나라의 포장 및 운반에 관한 오염관리 규제기준 {과학기술부 고시 제96-38호 “방사성물질 등의 포장 및 운반에 관한 규정”(96. 10. 17)}과 DOT의 49 CFR 173.443 규정에서도 수송될 방사성물질의 포장물에 대한 스메어는 300cm²를 대상으로 수행하고 측정대상물의 표면적이 300 cm² 이하인 경우에는 전체 면적을 스메어하도록 명시하고 있다.

DOE, 10 CFR 835 Appendix D - 1998에서는 “4×4 inch (10.2×10.2cm) 면적을 나선원법, 직선법, 지그재그법 등의 여러 형태로 문지를 수 있다.”라고 규정하고 있으므로 스메어의 면적은 100 cm² 혹은 300 cm²를 규제 기준과 허가 조건에 따라 경우에 맞게 선택할 필요가 있으며 정확한 면적보다는 스메어 방법과 스메어물질의 표준화가 더욱 중요함을 염두에 두어야 한다.

건식법과 습식법에 대해서는 국내 운반규정에 관한 고시의 경우 건식법(건조한 휴지를 문질러서)을 간접적으로 제시하고는 있지만 국내외의 규제기준에 특정 조건에 따라 습식법과 건식법 중 어느 것을 사용하여야 한다고 규정하지는 않고 있다. 하지만 H-3, Ni-63 등 저에너지 베타 방출물질에 대한 표면오염 시료채취는 습식의 유리섬유 스메어물질 등으로 시료를 채취하고 Liquid Scintillation Cocktail을 이용, 액체섬광계수기(Liquid Scintillation Counter)로 계측해야 비교적 정확한 계측이 가능하다. 습식 물질은 물과 알콜, 글리세린 등이 사용될 수 있으나 효율에는 큰 차이가 없는 것으로 알려져 있다¹⁴⁾.

스메어물질을 계측한 결과가 나오면 다음 식을 이용하여 총 제거성 오염도 As (dpm/cm²)를 산출할 수 있다¹⁴⁾.

$$As = (Rs+b - Rb)/eiesFS \quad (1)$$

여기서

Rs+b = 스메어 측정에 의한 총 계수율
(gross count rate)

Rb = 배경 계수율(background)

ei = 기기 효율(instrument efficiency)

es = 선원 또는 표면 효율(source or surface efficiency)

F = 전이율(removal fraction)

S = 스메어 대상 면적(surface area, e.g. 100cm²)

주) 기기 및 선원 효율의 곱(e_ie_s)이 계측효율이다.
전이율 (surface removal factor, removal fraction, wipe efficiency, smear collection efficiency)

전이율이란 제거성 표면오염도를 평가하기 위하여 스메어테스트를 실시하였을 때 평가 대상면적(스메어 면적)의 총 제거성 표면오염중 스메어물질에 옮겨진 제거성 표면오염의 분율을 말한다. 전이율은 각각의 상황에 따라 실험으로 결정될 수 있으며 실험으로 전이율을 결정할 수 없을 때는 기본 값인 0.1 (10%)을 적용한다. 전이율의 산출방법은 'Exhaustive removal by repetitive smear method'를 사용하는데 이 방법은 같은 종류의 서로 다른 스메어물질을 사용하여 같은 지역을 여러 차례 문질러 총 제거성 방사능을 구하고 처음의 스메어물질에 측정된 방사능으로 총 제거성 방사능을 나누어 전이율을 구하는 방법이다.

이렇게 한번 구해진 전이율은 전체 시설이나 물질의 표면에 적용하거나 표면에 대한 물리적 성질이 변화할 수 있는 상황에도 계속 일반화시켜 사용해서는 안 된다¹⁰⁾. 즉, 그 적용범위가 특정 표면과 특정 시간대로 국한되며 주요 혼합 오염과 각 물체의 표면에 따라 전이율이 결정되어야 함을 의미한다.

전이율 F는 다음과 같이 정의된다¹¹⁾.

$$F = \frac{\text{1회의 스메어를 통하여 포집된 시료의 방사능을 측정함 값}}{\text{시료채취 실시 전의 제거성 표면오염 방사능}} \quad (2)$$

이 경우 분모는 총 제거성 표면오염이다. 전이율을 실험적으로 구하는 것이 반드시 쉬운 것만은 아니므로 일상의 표면오염감시를 신속·간편하게 하기 위해 일본에서는 실험적으로 구한 수치를 표2와 같이 제시하여 전이율이 분명하지 않은 경우에 적용할 수 있도록 하고 있다.

표면오염한도

표면오염한도의 유도

현재 표면오염도에 대한 규제기준인 국내의 '허용표면오염도' 혹은 외국의 '표면오염한도'는 주로 표면오염에 의한 영향 중 가장 심각한 경로를 흡입에 의한 체내피폭으로 가정하여 다음과 같은 방법으로 유도하였다.

먼저 제거성 표면오염이 인간의 활동 등으로 인해 공기중으로 재부유되어 공기를 오염시킬 경우 표면오염에 따른 공기중 오염과의 상관관계를 나타내는 재부유인자(resuspension factor)를 다음과 같이 정의한다.

$$fr = \frac{\text{대기(공기)중의 농도, Bq/m}^3}{\text{표면의 오염도, Bq/m}^2} \quad (3)$$

표2. 표면의 종류에 따른 전이율 예

표면의 상태	표면재질의 예	전이율
평활·비침투성	염화비닐판, 유리판, 스테인레스판, 비닐시트, 표면처리된 콘크리트	0.5 (50%)
침투성	목재판, 표면이 처리되지 않은 콘크리트	0.05 (5%)

단, 침투성과 비침투성을 구분하지 않은 경우 전이율은 0.1 (10%)로 한다.

제거성 표면오염의 재부유에 관한 실험결과 도출된 재부유인자 f_r 은 실험의 조건에 따라 10^{-4} 부터 10^{-8} m^{-1} 까지의 분포를 보이는 것으로 알려져 있다¹²⁾. 보수적인 평가를 위하여 재부유인자로 10^{-4} 을 채택하고 독성이 강한 물질인 불용성 베타 방출 핵종 Sr-90을 선택하여 표면오염한도를 유도하여 보면 다음과 같다.

불용성 Sr-90의 유도공기중 농도는 60 Bq/m^3 (ICRP 30) 이므로

$$\begin{aligned} \text{표면오염한도(Sr-90)} &= \frac{60 \text{ Bq/m}^3}{10^{-4} \text{ m}^{-1}} \\ &= 600 \text{ KBq/m}^2 \text{ (} 1.6 \times 10^{-3} \text{ } \mu\text{Ci/cm}^2 \text{)} \end{aligned}$$

한편 BSS-96에서 제시한 Sr-90 핵종의 유도공기중 농도, 100 Bq/m^3 에 근거하여 같은 방법으로 표면오염한도를 유도하여 보면 1 MBq/m^2 ($2.703 \times 10^{-3} \mu\text{Ci/cm}^2$)의 결과를 얻을 수 있다.

핵종별로 구해진 표면오염한도의 분포는 유도공기중 농도의 분포 범위와 같은 차수의 분포를 가지게 된다. 즉, 대부분의 베타, 감마 방출 핵종의 유도공기중 농도가 약 102에서 106 Bq/m^3 사이에 분포하므로 여기서 유도된 표면오염한도는 약 1 MBq/m^2 에서 10 GBq/m^2 ($\sim 3 \times 10^{-3} \sim \sim 3 \times 10^1 \mu\text{Ci/cm}^2$) 사이에 분포하며 하한 값이라 할 수 있는 $10^{-4} \mu\text{Ci/cm}^2$ 가 현재 일반적으로 통용되고 있는 표면오염한도 또는 허용표면오염도의 값이다.

표면오염한도가 유도공기중 농도(DAC)와 같이 기본한도에 대한 보조한도로 사용되지 않고 유도한도로 사용되는 이유는 정밀도가 현저히 떨어지는 재부유인자를 사용하여 보조한도인 유도공기중 농도로부터 유도되었기 때문이며 이러한 정밀

도의 근본적 한계 때문에 핵종별 표면오염한도를 제시하는 것도 의미가 없는 것이 된다. 또한 선량한도가 하향조정 되었음에도 불구하고 표면오염한도의 하향조정을 고려하지 않는 이유도 같은 맥락에서 이해될 수 있을 것이다. 따라서 특정 시설 및 지역에 대한 표면오염도의 관리기준 산출은 재부유인자 외에도 해당 시설의 특성, 환기(Ventilation), 그 외 여러 인자들을 고려하여 해당 시설 보건물리요원(Health Physicist)의 판단에 맡기는 것이 가장 바람직하다¹²⁾. 즉, 표면오염은 유도한도에 속하는 한도로 선량한도(기본한도)나 섭취한도, 유도공기중농도 등의 보조한도(2차 한도)를 보완하는 한도이므로 그 기준의 적용에 유연성이 필요하다. 다만 방사성물질의 운반을 위한 운반포장물의 표면오염한도는 국제적으로 거의 일치되는 값이 사용되고 있다.

총 제거성 표면오염한도와 스메어테스트 한도

미국내 표면오염에 대한 규제기준의 경우 한번의 스메어테스트 결과와 비교하는 규제기준과 실제 표면의 총 제거성 표면오염에 대한 규제기준이 이중으로 존재하고 있다. 즉, 어떤 규정내에서 스메어테스트 한도(wipe test limit)를 언급하고 있다면 한번의 스메어에 의한 오염도 측정결과를 규제기준과 비교하여야 하고 (이때의 표면오염한도는 전이율을 10%로 가정하여 유도되었음) 규제기준이 단순히 오염한도(contamination limit)로만 언급되어 있다면 10%의 전이율 또는 실험을 통하여 얻어진 대상 표면적의 고유 전이율을 고려한 총 제거성 오염한도를 적용해야 한다. 따라서 이러한 총 제거성 오염한도와 스메어테스트 한도는 동일한 기

준일 경우 10배의 차이가 난다.

1983년 이전에 DOT 규정에서는 운반포장물의 제거성 오염 적용 기준으로 두 가지 다른 한도를 제시했었다. 첫째는 스메어로 전이된 오염 측정값에 대한 한도와 다른 하나는 포장물 표면에서의 총 제거성 오염한도에 관한 것이었다. 이런 어색한 접근 방법은 작업자들에게 각각의 한도에 따른 차이점을 인식시키도록 하기 위함이었다¹³⁾.

하지만 미국 내에서 적용되고 있는 주요 원자력 시설에서의 표면오염한도는 주로 스메어테스트 한도이므로 물체나 구조물 표면의 총 제거성 표면오염한도를 적용하자는 주장이 제기되고 있다¹⁴⁾. 이러한 제안의 배경은 미국의 규제 요건을 국제적인 방식과 일치시켜 방사성물질의 국제간 이동에 도움을 주고 미국내의 표면오염도 규제기준 적용과 시설간의 오염도 비교에 일관성을 갖고자 하는 것이다. 미국내의 각종 규정에 나타난 표면오염도 규

제 기준의 차이를 표로 정리하면 표3과 같다¹⁴⁾.

총 제거성 표면오염한도는 조정될 수 없지만 스메어테스트 한도는 10%의 전이율을 가정하여 유도된 것이므로 스메어 효율이 이 기본가정(10%)과 다르다는 것이 확인될 경우 스메어테스트에 의한 한도를 조정하는 것이 타당하며 이러한 경우 한도의 조정은 다음과 같은 방법을 적용해야 한다.

$$L_{adj} = L_{0.1} \times F/0.1 \quad (4)$$

여기서,

L_{adj} = 조정된 제거성 표면오염 한도

$L_{0.1}$ = 전이율 0.1을 적용하여 제시된 표면오염 한도

F = 측정된 전이율

문제는 미국내의 각 규정중 포장물의 오염에 관

표3. 미국내 각종 규정에 제시된 표면오염도 규제기준

오염한도가 총 제거성 오염도를 의미하는 규정	오염한도가 한번의 스메어로 제거된 오염도를 의미하는 규정
표면오염물질 관련 • 49 CFR 173.403 • 10 CFR 71.4 • ICAO Technical Instructions • IATA Dangerous Goods Regulations • IMDG	설비 표면 및 도구 관련 • 10 CFR 35.70 • 10 CFR 835 Appendix D • Reg Guide 1.86 • Reg Guide 8.21 • Reg Guide 8.23 • Reg Guide 8.24
포장물 관련 • ICAO Technical Instruction • IATA Dangerous Goods Regulations • IMDG	포장물 관련 • 49 CFR 173.443 • United State Postal Service Publication 52

※ ICAO : International Civil Aviation Association

IATA : International Air Transport Association

IMDG : International Maritime Dangerous Goods Code

한 DOT, 49 CFR173.443 규정에서는 위와 같은 방식의 오염한도 조정을 허용하고 있으나 다른 규정에서는 스메어테스트 한도의 조정에 대한 조항이 없다는 것이다(외국의 표면오염도 규제기준 5) 참조].

표면오염에 관한 국내의 규제기준

국내 원자력법에서 정하는 원자력시설 내 오염관리 기준과 방사성물질 등의 포장 및 운반에 관한 오염관리 기준에 관련된 조문은 다음과 같다.

- 시행령 제103조(방사선관리구역 등에의 조치)
발전용원자로운영자는 방사선관리구역·보전구역 및 제한구역을 정하여 이들 구역에서는 다음의 조치를 하여야 한다. <개정 95·10·19, 99·8·31> 1. 방사선관리구역에 대한 조치 :

나. 바닥·벽 기타 사람이 접촉할 우려가 있는 물질에 대하여는 방사성물질에 의한 표면의 오염도가 과학기술부장관이 정하는 허용표면오염도를 초과하지 아니하도록 할 것.

다. 방사선관리구역으로부터 사람이 퇴거하거나 물품을 가지고 나가는 경우에는 그 사람의 신체·의복·신발 등 신체에 착용하고 있는 것과 반출하는 물품(그 물품을 용기에 넣거나 포장한 경우에는 그 용기 또는 포장을 포함한다)의 표면방사성물질오염도가 과학기술부장관이 정하는 허용표면오염도의 10분의 1을 초과하지 아니하도록 할 것

- 과학기술부 고시 제98-12호¹⁵⁾ “방사선량 등을 정하는 기준” 개정(안)

제10조(허용표면오염도)영 제2조 제10호와 영 제103조 제1호 및 시설기술규칙 제91조 제4호의 규정에 의한 허용표면오염도는 그 오염을 제거할

수 있는 경우로서 다음 각 호와 같다.

1. α선을 방출하는 방사성물질에 대하여는 3.7kBq/m² (10⁻⁵μCi/cm²)

2. α선을 방출하지 않는 방사성물질에 대하여는 37 kBq/m² (10⁻⁴μCi/cm²)

- 방사선방호 등의 기술기준에 관한 규칙(안) 제 104조(표면오염도)

운반물 등의 제거성 표면오염도는 임의의 표면 300평방 센티미터 이상에 대하여 측정된 평균값은 다음 각 호에서 정하는 제한 값을 초과하지 아니하여야 한다.

1. 운반물의 외부표면의 경우

가. 베타 감마방출체 및 저독성 알파방출체 : 4Bq/cm²

나. 가목을 제외한 모든 알파방출체 : 0.4Bq/cm²

- 과기부 고시 제96-38호 (96. 10. 17) “방사성 물질 등의 포장 및 운반에 관한 규정”

제3조 (포장물의 외관·규격·형태·표면·인양장치 및 결속장치)

4.포장물 표면의 제거성 표면오염(건조한 휴지를 문질러서 상당량이 제거될 수 있는 오염으로서 표면 300cm²를 문질러서 측정하여 평균값)이 오염물질의 구분에 따른 다음 표의 최대허용 준위를 초과하지 아니할 것. 또한, 오염 제거작업으로 인한 손상을 쉽사리 받지 않는 것

우리 나라의 표면오염에 관한 규제기준인 허용표면오염도는 총 제거성 표면오염한도에 해당한다. 따라서 제거성 표면오염도 평가 과정에서 전이율을 고려하지 않을 경우 실제 오염도를 최고 10배까지 과소 평가할 가능성이 있다. 현재 국내의 원자력

오염물질	최대허용준위	
	$\mu\text{Ci}/\text{cm}^2$	$\text{dis}/\text{min}/\text{cm}^2$
저독성 알파 방출 핵종 : 천연우라늄 · 천연토륨 · 우라늄 235 · 우라늄238 · 토륨232 · 원광 또는 정광에 함유된 토륨 228 및 230, 반감기가 10일 미만인 핵종	10^{-4} (3.7Bq/cm ²)	220
베타, 감마 방출 핵종	10^{-4} (3.7Bq/cm ²)	220
기타 알파 방출 핵종	10^{-5} (0.37Bq/cm ²)	22

관계시설에서 표면오염도를 평가할 때 적절한 전이율을 적용하지 않는 시설이 있으며 이러한 시설들의 경우 방사선관리구역으로부터 물품을 반출하거나 퇴거하는 인체의 제거성 표면오염도를 ALARA (Background)로 유지하기 위해 노력하고 있으므로 관리상에는 문제가 없지만 평가와 관리는 그 목적에 분명한 차이가 있는 것이므로 반드시 전이율을 고려하여 표면오염도를 평가해야 한다.

외국의 표면오염도 규제기준

외국의 표면오염 규제기준을 살펴보면 다음과 같다.

1) U.S. Reg. Guide 1.86 "Termination of Operating Licenses for Nuclear Reactors¹⁶⁾" : 원자로의 운영허가를 받은 자가 그 운영허가를 끝내려고 할 때 규제해제를 위한 각종 구역, 장비, 설비의 무제한적 이용에 적용할 제염요건 또는 허용 가능한 표면오염기준을 다음과 같이 기술하고 있다.

2) U.S. Reg. Guide 8.21 "Health Physics Surveys for Byproduct at NRC-Licensed Processing and Manufacturing Plants" : NRC 허가를 받은 처리 및 제조시설에서의 측정시 제거성 표면오염에 적용할 Action Level 권고치는 표5와 같다.

3) U.S. Reg. Guide 8.24 "Health Physics Surveys during Enriched Uranium-235 Processing and Fuel Fabrication" : NRC의 허가를 받은 농축우라늄 공정시설과 경수형 핵연료 제작시설에서의 측정에 관한 지침으로 제거성 알파 방사능 방출 핵종에 대한 표면오염한도가 다음의 표에 제시되어 있다.

4) IAEA Safety Standards ST-1¹⁷⁾, "Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material, 1996"에서 제시한 방사성물질의 안전한 운반을 위한 규제 기준에서 오염에 대한 정의와 한도는 다음과 같다.

- 214. 오염(Contamination)이란 표면에서의

표4. 허용 가능한 표면오염 준위 (Wipe Limits)

(단위 : dpm/100cm²)

핵종 ^a	평균 ^{b,c}	평균 ^{b,d}	평균 ^{b,e}
천연우라늄, U-235, U-238 및 붕괴생성물	5,000	15,000	1,000
초우란물질, Ra-226, Ra-228, Th-230, Th-228, Pa-231, Ac-227, I-125, I-129	100	300	20
천연 토륨, Th-232, Sr-90, Ra-223, Ra-224, U-232, I-126, I-131, I-133	1,000	3,000	200
Sr-90과 상기 핵종을 제외한 베타-감마 방출핵종(알파방출 붕괴 또는 자발핵분열은 제외)	5,000	15,000	1,000

- a 알파방출 핵종과 베타-감마 방출핵종 모두에 의해 표면이 오염된 경우 위 기준의 적용은 각각 독립적으로 적용한다(Sum of Fraction Rule은 적용하지 않는다).
- b 위 표에서 사용된 dpm은 배경계수(background)를 제거하고 계측기의 효율과 기하학적 인자를 모두 고려한 결과를 의미한다.
- c 평균 오염도의 측정은 1m² 이상의 넓이에 대하여는 적용할 수 없다. 대상 표면들이 이 보다 좁은 면적으로 구성되어있을 경우 각 표면마다 이 기준을 적용한다.
- d 최대 오염도 준위는 100cm² 이하의 넓이에 적용한다.
- e 표면적 100cm²의 넓이당 제거성 방사성물질의 양은 마른 필터 또는 부드러운 흡수성 종이로 적당한 압력을 주어 문질러(wiping) 효율이 잘 알려진 적절한 계측기로 측정하여 결정한다. 측정 대상 표면적이 100cm² 보다 좁은 경우에는 전체의 면적을 문질러서 측정하고 표 면적을 100cm²에 대한 면적으로 보정한다.

표5. NRC 허가를 받은 제조시설에서의 제거성 표면오염에 대한 Action Level (Wipe Limits)

(단위 : μ Ci/cm²)

표면의 종류	방사성물질의 종류 ^a			
	알파 방출체		베타 또는 X-선 방출체	저 위험의 베타 또는 X-선 방출체
	고 독성	저 독성		
Unrestricted area ^b	10 ⁻⁷	10 ⁻⁷	10 ⁻⁶	10 ⁻⁶
Restricted area ^c	10 ⁻⁴	10 ⁻³	10 ⁻³	10 ⁻²
Restricted area 외부에서의 개인 의복	10 ⁻⁷	10 ⁻⁷	10 ⁻⁶	10 ⁻⁶
Restricted area 내부에서만 착용하는 방호복	10 ⁻⁵	10 ⁻⁵	10 ⁻⁴	10 ⁻⁴

- a High toxicity 알파 방출핵종은 다음의 핵종을 포함한다. Am-243, Am-241, Np-237, Ac-227, Th-230, Pu-242, Pu-238, Pu-240, Pu-239, Th-228, Ch-252. Low risk 베타 방출핵종은 0.2 MeV 이하의 에너지를 방출하는 핵종을 말하고 감마, X-ray에 대해서는 1 Ci 당 1m 거리에서 0.1R/h 보다 낮은 선량률을 방출하고 공기중 허용농도가 10 CFR 20 Appendix B, 표 1에 제시된 10⁻⁶ μ Ci/ml보다 큰 핵종을 말한다.
- b 이 표에서 unrestricted(non-contamination-control) areas에서의 오염한도는 Reg. Guide 1.86 "Termination of Operating Licenses for Nuclear Reactors"에서 주어진 시설 및 장비에 대한 무제한적인 이용에 대한 안전 기준과 비교될 수 있다.
- c 바닥, 벽, 천장 등에서는 약 100cm²의 면적에 대해, 물체에 대하여는 약 300cm²의 면적에 대해 스메어한 결과를 평균한 값이다.

Note on Skin Contamination : 피부오염은 ALARA로 유지한다(N/D). 개봉선원을 사용하는 작업자의 피부오염은 항상 감시되어야 하고 오염이 발견될 시에는 즉시 제염하여야 한다. 하지만 제염을 위하여 피부가 상처를 입어 체내로 오염물질이 침투되어서는 안 된다.

표6. 농축우라늄 공정과 경수형 핵연료 제작시설에서의 제거성 알파 방출 핵종에 대한 표면오염한도 (Wipe Limits)

항 목	한도 (Limit)	
	dpm/100cm ²	μCi/cm ²
Controlled areas	5,000	2.3×10^{-5}
*Controlled area 내부에서만 착용하는 방호복	1,000	4.5×10^{-6}
부지내의 Uncontrolled areas	200	9×10^{-7}
*Restricted area 외부에서의 개인 의복	200	9×10^{-7}
피부	0**	0**

* 직접측정법 적용(총 표면오염도)

** 방사선안전관리요원 또는 의료전문가의 지시하에 수행되는 피부의 제염은 피부가 손상되거나 변형되기 전에 중지되어야 한다.

방사성물질 양이 베타, 감마 방출체 및 저독성 알파 방출체의 경우 0.4 Bq/cm² 이상, 기타 모든 알파 방출체의 경우 0.04 Bq/cm² 이상 존재하는 것을 의미한다.

- 508. 일상적인 운반상황에서 외부 포장물 표면에서의 비고착성 오염(Non-fixed Contamination)은 실제적으로 가능한 한 낮게 유지되어야 하며 다음의 한도를 초과해서는 아니 된다.

(a) 베타, 감마 방출체 및 저독성 알파 방출체의 경우 4Bq/cm²

(b) (a)에서 제시한 알파 방출체 이외의 모든 알파 방출체의 경우 0.4Bq/cm²

이러한 한도는 임의의 표면 300cm² 이상에 대하여 측정된 평균값을 적용할 수 있다.

역사주) 상기 기준은 총 제거성 표면오염도에 적용하는 한도이며 우리 나라의 운반물에 대한 표면 오염한도와 같다.

5) 49 CFR 173.443 "Contamination Control"에 제시되어 있는 표면오염한도와 표면오염도

측정방법

(a) 수송을 위한 각 포장의 외부표면에서 제거성 표면오염도는 가능한 한 낮게 유지되어야 한다. 제거성 방사능오염도는 표7의 한도를 초과하지 않아야 하며 다음 두 가지 방법 중 하나의 방법으로 결정되어야 한다.

(1) 적당한 압력으로 300 cm²의 표면을 스메어 하여 스메어물질의 방사능을 측정한다. 스메어는 제거성 오염도를 평가하는데 가장 적절한 장소에서 수행되어야 한다. 스메어한 면적에 대하여 평균한 스메어물질에서 측정된 총 방사능이 표7의 한도를 초과하지 않아야 한다.

(2) 동등하거나 그 이상의 효율을 갖는 다른 방법을 사용함으로써, 사용된 방법의 효율(전이율)을 고려해야 하는 경우 포장 외부표면의 제거성 오염도는 표7에 제시된 한도의 10배를 초과하지 않아야 한다.

6) 10 CFR 835 Appendix D에 제시되어 있는 표면오염한도

표7. 제거성 외부 방사성 오염 한도의 평균값 (Wipe Limits)

구 분	최대허용 오염한도		
	Bq/cm ²	μCi/cm ²	dpm/cm ²
베타, 감마 방출체 및 저독성 알파 방출체	0.4	10 ⁻⁵	22
상기 알파 방출체 이외의 모든 알파 방출체	0.04	10 ⁻⁶	2.2

역자 주) 상기 기준은 스메어테스트 한도이므로 총 제거성 표면오염한도로 환산하면 우리나라의 운반물에 대한 표면오염한도와 IAEA의 운반물에 관한 기준과 같은 값이 된다.

7) 일본 과기청 고시¹⁸⁾ 제15호, (88.5.18) “방사선을 방출하는 동위원소의 수량 등을 정하는 건” 제8조 (표면밀도한도) ; 규칙 제1조 제13호에 규정하는 사람이 접촉하는 물질의 표면의 방사성동위원소의 밀도한도는 별표 제3의 좌란에 언급하는 방사성동위원소의 구분에 따라 각각 우란에 언급하는 밀도로 한다.

별표 제3 (제8조 관계) 표면밀도한도

구 분	밀도 (Bq/cm ²)
알파선을 방출하는 방사성동위원소	4
알파선을 방출하지 않는 방사성동위원소	40

역자 주) 일본의 표면밀도한도는 총 표면오염(제거성+고착성)에 적용하는 한도이다.

※ 방사성표면오염의 측정·평가 매뉴얼, 일본원자력안전기술센터 - 1988

“법령에서의 표면밀도는 고착성과 유리성 표면오염을 합한 것에 적용되므로 고착성과 유리성 표면오염이 동시에 존재하는 상황에서 표면오염 측정의 결과를 법령상의 표면밀도한도와 비교하기 위해서는 간접측정법 뿐만 아니라 직접측정법도 병행하여 평가한다.”

8) 독일의 ‘전리방사선으로 인한 장애의 방호에 관한 령(전리방사선방호령)¹⁹⁾’, 제64조 (방사능오염과 제염) ... (3) 피부의 방사능오염이 확인되거

나 물건에 대한 방사능오염이 부록9의 최대허용수치를 초과하는 것으로 판명될 경우에는 더 이상의 방사능오염이나 신체에의 흡수를 방지하기 위한 즉각적인 조치를 취하여야 한다. 이러한 제염작업은 제염에 대한 전문적인 지식을 소유하고 있는 자를 통해서만 진행할 수 있다. 위험을 가져올 수 있는 방사능오염이 있는 물건은 그것이 작업과정에서 더 이상 필요하지 아니 한 경우, 사람으로부터 격리시키거나 밀폐시킴으로써 안전하게 하거나 방사성폐기물로서 처리하여야 한다.

(4) 부록9에 언급된 최대허용수치가 준수되기 어려운 경우에는 작업장에서 방사선작업에 종사하는 종사자를 방사능오염, 방사능의 인체흡수나 외부로부터의 피폭으로부터 보호하기 위한 조치를 해야 한다.

결론

제거성 표면오염은 여러 경로를 통하여 작업자와 일반인에게 내·외부피폭을 유발할 수 있으므로 오염도의 관리와 평가가 필요하며 제거성 오염의 평가는 스메어테스트에 의해 결정할 수가 있다. 스메어테스트에 관한 상세한 절차와 지침은 ISO 7503-1²⁾, U.S. Reg. Guide 1.86¹⁶⁾, 8.21³⁾, 8.23,

표8. 표면오염도한도 (dpm/100cm²)^{1,2} (Wipe Limits)

방사성 핵종	제거성 ^{2,4}	종합(고착성+제거성) ^{2,3}
천연우라늄, U-235, U-238, 관련붕괴핵종 등	1,000	5,000
초우라늄원소, Ra-226, Ra-228, Th-230, Th-228, Pa-231, Ac-227, I-125, I-129 등	20	500
천연토륨, Th-232, Sr-90, Ra-223, Ra-224, U-232, I-126, I-131, I-133 등	200	1,000
Sr-90과 위에서 언급된 핵종을 제외한 베타-감마 선원 ⁵ (알파방출 핵종이나 자발핵분열을 제외한 방사성붕괴 형태에 의한 핵종)	1,000	5,000
삼중수소 유기화합물 : HT, HTO에 의한 표면오염, metal tritide aerosols	Reserved	Reserved

¹이 값은 오염된 물질의 내부는 고려하지 않고 외부에 침착된 방사능오염에 대해서 적용한다. 표면오염이 알파 방출핵종과 베타-감마 방출 핵종이 동시에 존재할 때 표면오염한도는 각각에 대해서 별도로 적용한다.

²이 표에서 사용된 dpm(disintegration per minute)은 방사성물질에 의한 방출율의 의미이다. 이 방출율은 계수기로 계수된 cpm(counts per minute)으로부터 주변방사능, 계수기의 효율 및 기하학적 인자를 고려하여 구한 값이다.

³오염준위는 특정지역의 100cm²에서 최대표면오염 방사능이 명기된 값의 3배 미만일 때 1평방미터에 대해 평균할 수 있다. 평균값을 구하기 위해 다음과 같은 경우 표면의 입방미터는 방사능 지침 G이상으로 간주한다. (1) 특정 n구역의 측정값이

$$\frac{1}{n} \sum_n S_i \geq G \text{ 일 때, 여기서 } S_i \text{는 } i \text{구역의 측정값 (dpm/100cm}^2\text{)}$$

(2) 모든 고립지점에서 총방사능량이 100 cm²당 3G를 초과할 경우

⁴100cm² 표면적의 제거성 방사성물질의 양은 dry filter나 soft absorbent paper로 적절한 압력을 주어 오염지역을 문질러 계속효율을 잘 알고 있는 계수기로 묻어있는 방사성물질을 계속한다. (삼중수소의 경우 dry material의 사용은 적절하지 않다). 오염측정 대상영역의 면적이 100cm² 미만일 경우 단위면적당 방사능은 실제 표면적 전체를 문질러 결정한다. 초우라늄원소와 Ra-228, Ac-227, Th-228, Th-230, Pa-231, 알파방출 핵종은 제외한다. 직접측정법에 의한 총표면오염도가 제거성 표면오염한도를 초과하지 않는다면 Smear 방법을 적용하지 않아도 된다.

⁵이 방사성핵종의 범주에는 혼합 핵분열생성물에 포함되어 있는 Sr-90도 포함된다. 핵분열생성물에 포함되지 않은 Sr-90 또는 농축된 Sr-90 혼합물은 적용되지 않는다.

8.24⁴⁾, DOE draft Information Guide G441.9-1 등에 상세히 기술되어 있다. 표면오염이 알파 방출 핵종과 베타-감마 방출핵종이 동시에 존재할 때 표면오염한도는 각각에 대해서 별도로 적용한다¹⁴⁾.

표면오염으로 인해 야기될 수 있는 피폭경로를 모두 고려한 특정 시설 또는 지역별 표면오염도의 관

리 기준치는 다음과 같은 방법으로 결정할 수 있다.

$$DSCL = \min \{ AS_{atom}, AS_{ingestion}, AS_{skin}, AS_{surf} \} \quad (5)$$

여기서,

DSCL = 유도표면오염한도(Derived Surface Contamination Limit)

부록9. 작업장 및 물건의 표면방사능오염의 경우 방호대책 수단을 위한 최대허용수치

표면방사능오염의 최대허용수치 (Bq/cm ²) ¹⁾			
방사성핵종	작업장 ²⁾ 및 통제구역에서의 작업복 표면	물건, 작업복, 세탁물	
		사업소 내의 관리구역 내부	사업소내의 관리구역 외부
방호안전한계치가 5E3 Bq로 정해진 알파선 조사기구	5	0.5	0.05
방호안전한계치가 5E8 Bq로 정해진 베타선 조사기구 및 전자 방사기구 ³⁾	500	50	5
기타 방사성핵종들	50	5	0.5

1) 100cm²의 넓이에 대하여 산정된 수치

2) 작업장의 표면오염이 고착성 오염으로써 외부로 확산되거나 인체에 흡수되어 위험을 전혀 야기하지 않을 것이 확실할 경우에는 적용하지 아니한다(제거성 오염에 대한 적용만을 의미).

3) C-14, P-33, S-35, Ca-45, Fe-55, Ni-63, V-48, Pm-147도 포함한다.

주) 상기 기준은 총 제거성 표면오염한도이다.

As_{atm} = 재 부 유 (resuspension)로 인해 $ALI_{ingestion}$ 을 야기할 수 있는 단위 오염 지역당 방사능(Bq/cm²)

$As_{ingestion}$ = Organ transfer factor로 $ALI_{ingestion}$ 을 야기할 수 있는 단위 오염 지역당 방사능(Bq/cm²)

As_{skin} = 연간 500mSv의 피부선량을 야기할 수 있는 단위 오염지역당 방사능(Bq/cm²)

$As_{surface}$ = 외부피폭에 의해 연간 20mSv의 유효 선량을 야기할 수 있는 단위 오염지역당 방사능(Bq/cm²)

위와 같은 방식으로 유도된 표면오염 관리기준은 각 시설의 특성을 고려한 시설별 유도한도이며 시설

특성에 따라 현저한 차이를 보일 수 있으므로 일반적인 규제기준으로 설정하기에는 적합하지 않다.

각국이 정한 표면오염한도 규제기준은 그 적용에 있어 총 표면오염도(제거성+고착성)를 적용하는 방법(일본), 총 제거성 표면오염도를 적용하는 방법(IAEA, 독일), 스메어물질에 전이된 제거성 표면오염도만을 적용하는 방법이 있다. 미국의 규제 기준과 같이 총 제거성 오염한도와 스메어테스트 한도를 혼용하여 사용하는 경우도 있으나 우리나라의 '허용표면오염도'는 총 제거성 표면오염만을 기준으로 설정되었으므로 제거성 표면오염의 평가에 전이율은 반드시 적용되어야 하며 실험으로 구한 고유값을 한정적으로 사용할 수 없을 경우 기본값인 10%를 적용해야 한다.

우리 나라의 원자력법령과 고시에서 제시하는 표면오염도 규제기준 중 운반물과 물품의 방사선관리구역 반출기준은 국제적인 기준과 잘 일치하는 수치이며 방사선관리구역으로부터 반출되는 물품에 적용하는 표면오염한도는 방사성물질 등의 포장 및 운반에 관한 표면오염한도의 1/10을 적용하고 있는데 이는 방사선관리구역에서 반출된 물품의 경우 일반구역에서 별다른 통제나 관리 없이 무제한적으로 사용될 수 있는 반면 방사성물질 등의 포장 및 운반물일 경우에는 운반 중 지속적인 관리와 통제가 이루어지며 궁극적으로는 다시 방사선관리구역 안으로 들어가게 된다는 점을 고려한 것이다.

방사선관리구역 내부의 표면오염관리 기준치는 U.S. NRC의 경우 스메어테스트 한도(wipe limit)로서 $10^{-3} \mu\text{Ci}/\text{cm}^2$ (베타, 감마 방출 핵종)³⁾로 총 제거성 표면오염한도로 환산할 경우 $10^{-2} \mu\text{Ci}/\text{cm}^2$ 가 되어 우리 나라 허용표면오염도의 100 배에 해당하게 된다. 따라서 우리 나라의 방사선관리구역 내부에 적용하도록 되어 있는 허용표면오염도는 어떠한 경우에도 결코 초과해서는 안 되는 기준으로 이해하기보다는 종사자의 방사선방호를 위하여 충분하고 적절한 표면오염의 제거, 저감, 오염의 원인분석 및 추가 오염방지 조치 시행 등의 조치가 필요한 기준(Action level)으로 이해되어

야 한다.

방사성물질의 운반이나 방사선관리구역 운영을 위한 표면오염 평가 및 관리에 고착성 오염은 고려하지 않고 제거성 표면오염한도만을 고려해도 되는 이유는 방사성물질의 운반이나 방사선관리구역의 경우 공간선량률 또는 표면선량률에 관한 별도의 규제기준 혹은 자체 관리기준이 설정되어 관리되기 때문이다. 또한 고착성 오염의 관리를 위해 무리한 제염 작업 등으로 정당화나 최적화가 성립되지 않는 불필요한 피폭을 방지하기 위해서이기도 하다. 하지만 이러한 시설이나 물품의 규제해제에는 고착성 오염 또는 체적오염도가 고려되어야 한다.

사람의 신체표면(피부, 머리카락, 체모 등)에 대한 오염관리 기준은 가능한 한 낮은 값(N/D)을 적용하여야 하고 관리구역 작업복과 일반의복, 신체표면 등은 제거성 표면오염의 효과적인 측정을 기대하기 어려우므로 총 표면오염한도를 적용하는 것이 합리적이다. 물론 표면오염의 관리 기준은 규제기준의 만족에만 그칠 것이 아니라 가능한 한 낮은 수준으로 유지하여 불필요한 피폭을 방지하는 것이 ALARA 원칙을 구체적으로 이행하는 방법이다. **KRIA**

참 고 문 헌

- 1) NUREG-0770, Glossary of Terms, Nuclear Power and Radiation; 1981.
- 2) International Organization for Standardization. Evaluation of surface contamination-part 1: beta emitters and alpha emitters. ISO-7503-1; Geneva; 1988.
- 3) U.S. Nuclear Regulatory Commission. Health physics surveys for byproduct materials at NRC-licensed processing and manufacturing plants. Regulatory Guide 8.21. Washington DC; 1979a.

- 4) U.S. Nuclear Regulatory Commission. Health physics surveys during enriched uranium-235 processing and fuel fabrication. Regulatory Guide 8.24. Washington DC: 1979c.
- 5) U.S. Department of Energy. Radiological control manual. Washington, DC: U.S. DOE; DOE/EH-0256T Revision 1: 1994.
- 6) NUREG-1608. Categorizing and transporting low specific activity materials and surface contaminated objects. RAMREG-003: 1998.
- 7) U.S. Department of Energy. 10 CFR 835 Occupational radiation protection. Federal Register 63(213): 1998.
- 8) Klein, R. C.; Linins, I.; Gershey, E. L. Detecting removable surface contamination. Health Phys. 62: 186-189: 1992.
- 9) 과학기술부 고시 제96-38호 "방사성물질 등의 포장 및 운반에 관한 규정" (96. 10. 27)
- 10) U.S. Nuclear Regulatory Commission. Information notice No. 85-46. Clarification of several aspects of removable radioactive surface contamination limits for transport packages. Washington, DC: SSINS No. 6835, IN 85-46: 1985.
- 11) 방사성표면오염의 측정·평가 매뉴얼, 일본원자력안전기술센터: 1988.
- 12) Herman Cember, "Introduction to Health Physics" 3rd Edition.
- 13) U.S. Department of Transportation. Radioactive materials. U.S. Code of Federal Regulation 49 CFR 173, Subpart 1. Washington, DC: 1992.
- 14) Paul W. Frame, Eric W. Abelquist, Use of Smears for Assessing Removable Contamination. Health Phys. 76(Supplement 2): S57-S66: 1999.
- 15) 과학기술부 고시 제98-12호 "방사선량 등을 정하는 기준" (98. 8. 11)
- 16) U.S. Nuclear Regulatory Commission. Termination of operating licenses for nuclear reactors. Regulatory Guide 1.86. Washington DC: 1974.
- 17) IAEA Safety Standards ST-1, "Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material", 1996 Edition: Requirements No. ST-1, IAEA Vienna: 1996.
- 18) 1990년판 Isotope 법령집, 방사선장해방지법관계법령 I, 사단법인 일본 Isotope 협회.
- 19) KINS/HR-040, 독일 원자력법령집, 전리방사선방호령(1992.7개정), 한국원자력안전기술원: 1993.