

## 토양 폐기물의 자체처분을 위한 제염 목표치 설정에 관한 연구

### A Study on making guide line of the nuclide concentration in the contaminated soil from decommissioning of nuclear facilities

김용한, 이건재, \*오원진, \*김계남, \*원휘준  
한국과학기술원, \*한국원자력연구소

#### 요 약

원자력 시설의 해체 후 많은 경우 부지의 토양이 시설 사용기간중이나 해체 작업중 방사성 물질로 오염될 수가 있다. 이로 인해 발생한 토양 폐기물은 그 양은 상당히 많으나 오염도가 미미한 경우가 많아 어느정도 제염을 거치면 자체처분이 가능하다. 이를 자체처분하기 위해서는 자체처분 규정에 합한 수준으로 오염 농도를 낮추어야 하는데, 본 연구에서는 토양 매립을 시행할 수 있도록 잔류방사능 평가 도구인 RESRAD 코드를 이용하여 토양 폐기물을 소내 부지에 매립할 경우 필요한 제염 목표치를 평가해 보았다.

#### Abstract

After decommissioning of nuclear facilities, soil in site used to be found contaminated by radioactive nuclides from working of its operation or decommissioning process. Because while the contaminated soil produced this way has large volume, its contamination level would be very low, it can be disposed as a nonradiological industrial waste if its concentration can be reduced under clearance level. So it must be decontaminated under the clearance level. For the legal landfill, the soil concentration guideline for in-site landfill is suggested in this study by the computer code named RESRAD, that is used to evaluate the residual radiation.

## 1. 서론

원자력 시설은 그 시설 특성상 방사성 물질들을 많이 취급하는 공간으로 활용되므로 시설 자체가 많이 오염되어 있고, 경우에 따라 토양이 오염될 수도 있으며 수명이 다 한 후에는 그 해체 과정에서 오염이 되기도 한다. 이로 인해 원자력 시설이 해체된 부지를 재사용하기 위해서는 필히 제염작업이 필요하며, 오염 토양 자체를 수거하여 처리하고자 한다면 이는 고체폐기물과 비슷한 개념으로 볼 수 있다. 하지만 토양폐기물은 그 양(부피)에 비해 오염도가 상대적으로 낮은 경우가 대부분으로 이를 모두 방사성폐기물로 처분한다는 것은 지극히 비효율적인 일이므로 자체처분을 고려할 수 있다. 자체처분을 위해서는 방사성 오염물질 함량이 법령에서 제시하는 기준을 만족시킬 수 있는 농도 이하라야만 하며, 그렇지 못한 토양의 경우 방사성 폐기물로 취급하거나 그 농도 이하로 제염할 필요가 있다. 본 연구에서는 원자력연구소측에서 실제 임시 보관중인 토양 폐기물을 원자력 시설인 원자력연구소내의 인적이 드문 곳에 매립 부지를 선정하여 매립을 시도하고자 할 경우에 대비하여 자체처분 규정을 만족시키기 위한 토양 제염 목표치를 평가해 보았다.

## 2. 토양 폐기물 자체처분

### 2.1. 자체처분

특정한 방사선원(source) 또는 행위(practice)와 관련된 방사선학적 영향이 사소하거나 또는 이에 대한 규제 관리가 거의 불가능한 경우 이를 규제 대상에서 제외하는 개념으로 규제면제, 규제해제, 그리고 규제배제라는 용어를 사용한다. 규제배제(exclusion)는 방사선원 또는 행위에 대한 규제 관리가 현실적으로 거의 불가능하여 이를 규제하지 않는 경우로 우주선이나 체내 존재하는 K-40같은 선원이 이에 해당하며, 규제면제와 규제해제는 방사선원 또는 행위와 관련된 방사선학적 영향이 미미하여 이를 규제대상에서 제외하는 개념이다. 이중 규제면제(exemption)은 신규 선원 및 행위를 처음부터 규제 대상에서 제외하는 것으로 주로 소량 단일선원인 tracer, 기기보정용 선원, 기타 소량의 저준위 방사능을 함유한 소비재 등이 이에 해당되고, 규제해제(clearance)는 기존에 규제 대상이었던 선원 및 행위를 규제 대상에서 제외하는 것으로 주로 산업, 연구시설에서 발생하는 극저준위 방사성 폐기물같은 대량 혼합 선원이 이에 해당되고 국내 원자력 관계법령에서 규정한 “자체처분”이 바로 이 “규제해제”와 거의 유사한 개념이다. 따라서 이하에서는 용어 사용에 있어 “자체처분”과 “규제해제”를 동일한 개념으로 사용하겠다. 과학기술부 고시 제 2001-30호(방사성 폐기물 자체처분 등에 관한 규정)에서는 다음과 같이 명시하고 있다.

제2조(정의) 이 규정에서 사용하는 용어의 정의는 다음과 같다.

1. “허용기준”이라 함은 원자력법 제84조 제3항 및 시행령 제2조 제35호의 규정에 따라 방사성폐기물의 자체처분을 허용할 수 있는 요건으로 과학기술부장관

이 정하는 값을 말한다.

2. “처분제한치”라 함은 원자력법 제84조 제2항에서 규정하는 “과학기술부령이 정하는 종류 및 수량”으로 **개인에 대한 연간 피폭방사선량이 10마이크로시버트 이상이거나 집단에 대한 연간 총 피폭방사선량이 1맨·시버트 이상**으로서 제3조에서 정하는 허용기준 및 핵종별 농도 이상을 말한다.

제3조(허용기준 및 핵종별 농도) 허용기준 및 원자력법시행규칙 제86조의 규정에서 과학기술부장관이 정하는 핵종별 농도는 별표1(표 1)과 같다.

제4조(규정준수 및 표지제거) ① 이 규정에 의하여 자체처분 하고자 하는 방사성 폐기물은 처분제한치 미만이어야 하며 처분시점에서 본 규정의 제반기준을 만족하여야 한다.

- ② 처분제한치 미만의 방사성폐기물을 자체처분할 때에는 방사성물질의 표지 및 표시를 제거하여야 한다.

제5조(행위제한) ① 제3조의 규정에서 정하는 기준을 초과하는 방사성폐기물을 임의로 처분하여서는 아니된다.

- ② 처분제한치 미만의 방사성폐기물의 자체처분을 위하여 임의적인 혼합·세척 또는 희석 등의 방법으로 핵종별 농도를 낮추어서는 아니된다.

∴

동 고시가 개정되기 전에는 과기부고시 제97-19호 제11조(별도승인)에서 “이 규정에서 정하지 않은 방사성 폐기물을 자체처분하고자 하는 원자력관계사업자는 과학기술부장관의 승인을 얻어 자체처분할 수 있다”고 규정한 바 있으나, 고시 제2001-30호로 개정되는 과정에서 이러한 별도승인 조항은 삭제되었다. 이에 따라 동 고시 별표 1에서는 기타 방사성핵종의 제한농도를 “개인에 대한 연간 피폭방사선량이 10마이크로시버트 미만이고 집단에 대한 총 피폭방사선량이 1맨·시버트 미만”이 되는 것이 입증되는 농도”로 별도로 규정하였다. 이는 별표1에서 정하지 않은 핵종의 경우 처분제한치를 만족하는 농도기준을 신고자 스스로 도출하여 제시하고 계획서에 대한 검토를 통하여 규제기관이 적합성을 확인하여야 함을 의미하는 것이다. 이러한 자체처분 선량기준치의 만족여부는 자체처분 절차 및 방법에 따른 피폭경로 및 시나리오에 대한 피폭방사선량 평가를 통하여 입증되어야 한다.

## 2.2. 매립을 통한 규제해제

매립(landfill)은 원자력이용시설에서 발생된 비오염 폐기물 또는 오염도가 미미한 폐기물의 규제해제 방법으로 가장 폭넓게 적용될 수 있는 대안이다. US NRC는 1981년부터 1994년까지 비협약주(Non-Agreement States)의 원자력발전소에서 발생된 극저준위 폐기물에 대하여 10CFR20. 2002 규정에 따라 약 30여건의 규제해제를 승인한 바 있으며, 규제해제가 승인된 폐기물의 대부분은 토양, 모래, 슬러지, 콘크리트 등으로 부지 내 일반폐

기물 매립장에 매립된 것으로 확인되었다. 국내에서도 1994년 이후 원전에서 발생한 콘크리트, 슬러지, 폐활성탄, 2차계통 폐수지, 소각재 등의 폐기물에 대하여 부지 내부 또는 외부에서 매립을 통한 규제해제가 제한적으로 승인된 바 있다.

### 3. 세부평가 방법을 적용한 매립시나리오의 평가

#### 3.1. 평가도구의 선정

규제해제폐기물의 매립과정은 원자력이용시설의 해체 후 무제한적 부지재활용 과정과도 유사성이 있다. 부지 재활용에서는 주로 오염된 토양에 의하여 유발될 수 있는 영향을 평가하는 반면에 규제해제 시나리오에서는 오염된 방사선원으로 부지로서의 “토양” 대신 고체폐기물로서의 “토양”을 고려한다는 차이가 있을 뿐이다. 지금까지 방사성 폐기물의 천층처분 및 부지재활용에 따른 방사선학적 영향을 평가하기 위한 목적으로 국내외적으로 다양한 수학적 모델과 방법론이 개발되었다. 본 연구에서는 국내외 많은 보고서에서 매립을 통한 규제해제의 영향을 평가하기 위한 목적으로 가장 적합한 것으로 판단하고 있는 RESRAD 전산코드를 이용하여 기준치를 평가했다. RESRAD는 원자력이용시설의 해체 후 부지재활용에 따른 영향을 평가하기 위한 목적으로 개발된 것으로, 현재 미국에서는 많은 사업자들이 해체부지 또는 오염부지에 대한 규제요건 만족여부를 입증하는데 활용하고 있고, 미국의 규제기관인 US NRC와 US DOE는 현재 RESRAD 전산코드의 개발을 직접적으로 지원하고 있으며, 규제요건 만족여부를 입증하기 위한 도구로서 이를 인정하고 있다. 또한 다른 전산프로그램(GENII GENII-S, DECOM, D&D, PRESTO-EPA-CPG, PATHRAE, MEPAS, MMSOILS 등)과의 벤치마킹을 통해 그 신뢰도가 충분하게 입증된 것으로 알려져 있다.

#### 3.2. 매립시나리오 평가를 위한 입력자료의 선정

본 연구에서는 RESRAD 전산코드를 이용하여 매립시나리오를 평가하기 위해 우선 필요한 입력변수를 선정하였다. 입력변수 선정에 있어 우선 측정을 통해 확보 가능한 자료는 우선적으로 이를 채택하였고, 확인하기 어려운 자료는 국내외 문헌에 제시된 보수적인 값을 선정하였으며, 이러한 방법으로도 적절한 대표적인 값을 선정하기 어려운 경우에는 RESRAD에서 기본적으로 제공하는 값을 적용하였다. 또, 실제 원자력연구소측의 연구소내 인적이 드문 곳을 매립지로 채택한다는 계획에 따라서 입력자료 선정을 고려하였다. 단, 본 연구에서 고려하는 매립의 개념은 일반적인 매립과 차별을 두어 생각해볼 필요가 있다. 이 경우는 오염된 부지 자체를 다루는 것이 아니라 고체폐기물의 하나로 볼 수 있는 오염된 토양 폐기물을 오염되지 않은 부지에 매립지를 만들어 처분하는 개념으로, 매립장 건설시 작업자의 피폭은 전무하며, 매립 후에도 거의 인적이 드문 위치 선정으로 인해 피폭이 크지 않은 상황으로 본다. 단지 매립지 완성 후 오염된 토양을 옮겨 붓는 과정에서 극히 짧은 시간(단 하루 작업으로 종료 가능하며, 10시간으로 가정) 작업자에게 가해질 피폭만이 의미 있는 평가 대상이 될 것으로 보인다. 따라서 본 연구에서 고려하

는 매립의 개념은 다소 제한적인 매립의 개념으로 생각해야 할 것이다.

#### 1) 초기 방사성 핵종의 농도 및 선량한도(Basic Radiation Dose Limit)

[표 1]에서 볼 수 있듯이 각 드럼마다 토양의 농도가 천차만별이다. 하지만 본 연구의 목표는 규제해제 기준농도 설정에 있으므로 초기 농도보다는 각 핵종들의 농도 비와 규제 기준 선량이 중요한 요소가 된다. 여기에서는 각 드럼내의 토양의 비율과 농도를 복합적으로 고려하고, 중앙값을 취하여 Co-60은 250 Bq/kg, Cs-137은 350 Bq/kg으로 하였고, 규제 기준 선량은 국내 과기부 고시에 명시된 대로 1 mrem/yr로 하였다.

#### 2) 매립 조건 관련 입력자료

앞서 언급했듯이 매립 대상 폐기물의 양은 약 900m<sup>3</sup>이며 이를 모두 매립한다고 가정하면 매립지의 용량도 900 m<sup>3</sup>이 되어야 할 것이다. 일반적인 매립지의 기하학적인 형태는 직육면체형태로 볼 수 있다. 아직 이 부분에 대해서는 구체적인 계획이 없는 관계로 본 연구에서는 매립지의 형태를 정사각기둥으로 가정하였다. 이때 매립층의 두께를 2m로 가정함에 따라 가로와 세로 길이 각 21.2m이고 면적이 450m<sup>2</sup>인 정사각기둥의 형태로 가정하도록 한다. 두께의 경우 매립폐기물이 균일한 깊이의 단일 매립층에 매립되는 상황을 가정하며, 국내 환경부 조사자료로부터 분석된 결과 국내 시설 매립두께의 하위 5퍼센타일인 약 2m로 가정하였다. 두께가 두꺼워질수록 매립폐기물의 자체흡수(self absorption) 현상으로 매립장 중심부의 외부피폭 선량률은 감소하므로 하위 5퍼센타일인 2m정도면 충분한 보수성을 가질 뿐 아니라 일반적으로 트럭으로 폐기물을 일시에 부리는 경우 매립층의 두께가 1~3m 될 가능성이 크므로 충분한 의미가 있으리라 본다. 실제 US NRC가 PG 8-10과 관련하여 소각재 매립층의 두께를 2.5m로 가정한 바 있다.

#### 3) 복토층에 대한 수문학적 자료

복토층(cover soil)은 폐기물을 매립한 후 매립층을 안정화하기 위해 상부에 덮은 오염되지 않은 토양이나 다른 매질을 말한다. 복토층의 두께가 두꺼울수록 매립폐기물의 방사능에 의한 외부 피폭선량률은 감소하며, 복토층의 침식에 의해 매립된 폐기물이 외부로 노출되기까지 소요되는 시간이 길어져 최대 개인선량의 발현시점이 지연된다. 여기서는 보수적인 가정을 위해 복토층이 없는 것으로 가정한다.

매립층의 밀도는 1.6 g/cm<sup>3</sup>, 침식률은 0.01 m/yr, 총 다공도 0.43, 유효 다공도 0.2, 수리 전도도 0.01로 실측값을 최대한 반영하였고, 매립층의 방사성 핵종 침출률 평가 목적으로 적용하는 인자인 b-parameter는 RESRAD 전산코드의 기본값인 5.3을 적용하였다.

#### 4) 환경자료

공기중 습도는 삼중수소에 의한 선량 평가 목적이므로 본 연구에서는 고려하지 않았고, 증발산계수는 특별한 데이터가 없는 관계로 RESRAD 전산코드에서 제공하는 기본값인

0.5를 적용하였다. 풍속은 기상청에서 발표한 국내 각 지역의 연평균 풍속과 큰 차이가 없으므로 역시 코드의 기본값을 사용하였고, 강수량은 대전지역 연간 강수량 평균치인 1.4 m/yr으로 하였다.

#### 5) 거주·호흡 및 외부피폭 관련자료

<일반인의 경우> - 매립 작업 이후 매립지 관리 인력에 해당

호흡률은 INDAC에서 일반 성인의 호흡률로 채택하고 있는 7,400 m<sup>3</sup>/yr를, 호흡 가능한 분진의 농도는 일본원자력안전위원회 보고서에 제시된 매립장 폐쇄 후 일반인 거주환경의 분진농도인 6.0E-06 g/m<sup>3</sup>을 적용하였다. 피폭기간은 본 평가 결과에 영향을 미치지 않으므로 기본값이 30년을 적용하였고, 실내 거주비율은 실내 0, 실외 0.03으로 하였는데, 토양 폐기물 매립 후 그곳에 별도로 건물을 짓지 않고 작업자 또한 상주하지 않으며 1주일에 5일, 하루 1시간씩 점검 및 기타 활동을 하는 것으로 가정한 것이다. 실제로는 매우 외진곳에 건설할 것이며 매립 후에는 특별한 경우가 아니면 거의 사람의 발이 닿지 않을것으로 보이므로 실내외 거주비율은 훨씬 더 작은 수치가 적용되어야 할 것으로 보인다. 오염지역의 형태는 앞서 언급했듯이 가로, 세로 공히 21.2m 인 정사각형으로 하였고, 동심원형태로 분할하는 추가 계산이 이루어지게 되는데 사각형의 중심과 동심원의 중심을 일치시켜 가장 큰 원이 바로 사각형의 외접원이 되도록 하였다.

<매립 작업자의 경우>

매립 작업자의 호흡률은 일반적인 피폭방사전량 평가시 일정한 수준의 작업을 수행하는 성인의 호흡률(1.2 m<sup>3</sup>/hr = 10,519 m<sup>3</sup>/yr)로 가정하였다. 호흡 가능한 분진의 농도는 매립작업자의 경우 일반적인 농장에 비하여 공기중 분진의 동반량이 상대적으로 많을것이 분명하므로 본 연구에서는 일본에서 조사된 폐기물 매립장 작업환경에서의 분진농도인 5.0E-04 g/m<sup>3</sup>을 채택하였다. 작업 특성상 매우 짧은 시간 토양을 옮겨 넣는 작업뿐이므로 실내 거주비율은 0으로 봐도 무방할 것으로 판단되며 실외 거주비율은 앞서 언급했듯이 단 하루이며 그중 10시간 작업한다는 가정으로 0.00114(0.114%)로 하였다.

#### 6) 음식물 섭취에 의한 피폭경로

본 연구에서는 매립지 특성에 맞게 피폭경로로 외부피폭과 토양섭취만을 고려하였으므로 음식물 섭취에 의한 피폭은 대부분 무시하게 되고, 토양 섭취량만을 고려한다. 이는 US EPA의 Exposure Factors Handbook 4.4절에서 제시한 100 mg/d에 근거하여 RESRAD 코드에서 사용한 36.5 g/yr에서 출발하여 앞서 언급한 실외 체류시간을 고려하여 4.88 g/yr로 적용하였다.

### 3. 평가 결과 및 고찰

초기 방사성 핵종의 농도를 Co-60은 0.25Bq/g(=6.76 pCi/g), Cs-137은 0.35Bq/g(9.46 pCi/g)으로 가정하여 계산하면 우선 일반인(매립작업 후 매립지 관리작업자)의 경우 피폭되는 유효선량은 Co-60으로 인한 것이 2.676 mrem/yr, Cs-137로 인한 것이 0.827 mrem/yr이며, 규제해제 기준농도는 Co-60이 0.04 Bq/g, Cs-137이 0.25 Bq/g으로 평가되었다. 작업자의 경우 피폭되는 유효선량은 Co-60으로 인한 것이 0.10 mrem/yr, Cs-137로 인한 것이 0.03 mrem/yr이며, 규제해제 기준 농도는 Co-60이 1.02 Bq/g, Cs-137이 6.49 Bq/g으로 평가되었다. 이때, 작업자의 경우 피폭량은 일반인에 비해 매우 적고, 규제해제 기준농도는 매우 높게 나타난 것을 볼 수 있는데, 이는 작업자의 피폭시간이 워낙 짧다는 작업의 특성에 기인한다고 볼 수 있다. 본 계산 결과에 따라 이 토양을 자체처분하기 위해서는 Co-60은 0.04 Bq/g, Cs-137은 0.25 Bq/g으로 제염해야 하고, 이때 1mrem/yr라는 규정에 합하게 피폭선량이 제한될 것이며, 자체처분이 가능해진다는 것을 알 수 있다.

### 감사의 글

본 연구는 과학기술부의 중장기 연구개발 사업의 일환으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

### 참고문헌

1. User's Manual for RESRAD Version 6(ANL/EAD-4), US-DOE, 2002
2. 방사성폐기물 규제해제 요건 개발(KINS/RR-144), 한국원자력안전기술원, 2002(2p-98p)
3. 방사선안전 평가기술 심포지움(KINS/PR-034), 한국원자력안전기술원, 2002(p209-p246)
4. 방사성 폐기물 규제기술 개발(KINS/HR-306), 한국원자력안전기술원, 2000

[표 1] 허용기준 및 핵종별 농도

방사성 핵종	제한 농도
H-3, C-14, F-18, Na-24, P-32, S-35, K-42, Ca-45, Ca-47, SC-46, Cr-51, Fe-59, Ga-67, Ge-71, Se-75, Br-82, Sr-85, Rb-86, Mo-99, Tc-99m In-111, Sn-113, I-123, I-125, I-131, Pr-144, Yb-169, Au-198, Tl-201, Hg-203 및 반감기 100일 이하의 베타/감마 방사선 방출 핵종	100Bq/g
기타 방사성핵종	개인에 대한 연간 피폭방사선량이 10마이크로시버트 미만이고 집단에 대한 총 피폭방사선량이 1맨·시버트 미만이 되는 것이 입증되는 농도
* 방사성 핵종이 혼합되어 있는 경우에는 다음과 같이 한다. $\sum \frac{Y_{(i)}}{X_{(i)}} < 1$ Y(i) : 방사성 핵종 i의 방사능농도 X(i) : 별표에 주어진 방사성 핵종 i의 제한농도	