

# 극저준위 방사성 콘크리트폐기물 처분을 위한 안전성평가 Safety Assessment for the Disposal of Very Low-level Radioactive Concrete Wastes

정운수, 홍상범, 서범경, 박승국, 박진호  
한국원자력연구소  
대전광역시 유성구 덕진동 150

## 요약

연구로 2호기 부속시설 해제 시 발생하는 극저준위 방사성 콘크리트폐기물의 방사능농도가 자체처분기준을 만족함을 평가하기 위해서 RESRAD Ver. 6.21 전산코드를 이용하였다. 국내의 실정에 맞도록 입력변수를 수정하고, ICRP Pub. 60에서 적용하고 있는 유효선량 개념에 근거한 내부피폭 선량환산인자를 적용하여 개인최대선량 및 집단선량을 평가하였다. 방사성핵종의 농도가 0.4 Bq/g 인 경우에 대한 평가 결과는 매립작업자의 경우 가장 위해도가 큰 Co-60 핵종의 개인최대선량 및 집단선량은 49.25  $\mu\text{Sv}/\text{y}$ ,  $7.880 \times 10^{-5} \text{ man} \cdot \text{Sv}/\text{y}$ 이고, 폐쇄 후 거주자의 경우 가장 위해도가 가장 큰 Cs-137 핵종의 결과는 53.44  $\mu\text{Sv}/\text{y}$ ,  $2.432 \times 10^{-3} \text{ man} \cdot \text{Sv}/\text{y}$ 로 평가되었다. 콘크리트폐기물의 자체처분기준치를 만족하기 위한 방사성 콘크리트 폐기물의 농도는 핵종의 농도가  $8.122 \times 10^{-2} \text{ Bq}/\text{g}$  이하가 되어야한다.

## Abstract

To estimate concentration of very low level radioactive concrete wastes which arise from decontamination activities of the KRR-2 auxiliary facility satisfied with the dose limits of clearance level by using RESRAD Ver. 6.21. The maximum individual dose and collective dose were evaluated by using dose conversion factor which was based on the concept of effective dose in ICRP publication 60 and partly adopting input parameter to circumstance in Korea. In case the radionuclide concentration is 0.4 Bq/g, the result of maximum individual dose and collective dose is 49.25  $\mu\text{Sv}$  per year,  $7.880 \times 10^{-5} \text{ man} \cdot \text{Sv}$  per year about landfill workers for the most risky source(Co-60) and 53.44  $\mu\text{Sv}$  per year  $2.432 \times 10^{-3} \text{ man} \cdot \text{Sv}$  per year about residents after closed for the risky source(Cs-137) respectively. The concentration of radionuclide for self-disposition for satisfying the dose limits of clearance level is less than  $8.122 \times 10^{-2} \text{ Bq}/\text{g}$  in the very low-level radioactive concrete wastes.

## 1. 서론

전 세계적으로 산재해 있는 수많은 원자력시설들은 한계수명에 도달하게 되고 궁극적으로 해체단계를 맞이하게 된다. 이때 해체 시 발생하는 폐기물의 상당량은 콘크리트이다. 실제로 PWR과 BWR의 경우 각각 180,000톤, 350,000톤의 콘크리트 폐기물이 발생한다.[1] 해체 시 발생하는 대부분의 콘크리트는 아주 미미하게 방사성 물질에 의해 오염되어있다. 이러한 콘크리트폐기물을 규제해제 방법으로 적용하는데 가장 폭넓게 적용될 수 있는 방안으로 매립(landfill)하는 것이다. 이를 위해서 연구로 2호기 부속시설인 동위원소 생산시설과 실험실의 제염·해체 과정에서 발생 가능한 방사성 콘크리트폐기물의 매립에 따른 자체처분 안전성평가를 통하여 매립 작업자 및 폐쇄 후 거주자의 예상 피폭방사선량을 평가하여 국내 원자력관계법령의 처분제한치(최대개인선량 : 10  $\mu$ Sv/y, 집단선량 1 man Sv/y)를 만족함을 입증할 필요가 있다.

본 연구에서는 연구로 2호기 부속시설의 제염·해체 과정에서 발생 가능한 방사성 콘크리트 폐기물을 매립처분하기 위하여 RESRAD Ver. 6.21 전산코드를 이용하여 예상되는 방사선학적 영향을 평가하였다. RESRAD 전산코드는 ICRP Pub. 26에서 제시하고 있는 총유효선량당량(TEDE : Total Effective Dose Equivalent)를 적용하고 있다. 그러나 국내 “방사성폐기물의 자체처분에 관한 규정”[2]은 ICPR Pub. 60에서 정하고 있는 유효선량 개념을 채택하고 있다. 따라서 RESRAD 전산코드의 출력결과를 국내의 규제요건을 충족시키기 위해서는 선량환산인자를 수정하여 적용하여야한다. 내부피폭 선량환산인자의 경우 ICRP Pub. 68[3]과 ICRP Pub. 74[4]에서 제시하고 있는 작업자와 일반인에 대한 선량환산인자를 적용하였다. 또한 RESRAD 전산코드의 입력 자료를 선정함에 있어 국내의 특성자료를 확보할 수 있는 경우에는 이를 보수적으로 채택하는 것을 원칙으로 하고, 조사결과가 부재한 경우에는 국외 문헌에서 제시한 값을 보수적으로 선정하여 적용하였다. 위의 과정을 통하여 도출된 평가결과를 이용하여 처분제한치를 만족하기 위한 핵종의 농도를 도출하였다.

## 2. 평가 방법 및 입력자료의 선정

### 2.1 적용 코드(RESRAD Ver. 6.21)

RESRAD 전산코드는 오염토양(부지) 상부 거주자의 방사선학적 영향을 평가하기 위해 US DOE의 지원 하에 ANL의 EAD (Environmental Assessment Division)에서 개발되었으며, 최근 상업용원전의 해체 후 부지재활용 기준(DCGL ; Derived Concentration Guideline Level)의 만족여부를 평가하기 위한 목적으로 활용되고 있다. 또한 US NRC는 원자력발전소 해체 후 안전성 평가에 RESRAD 전산코드의 적용을 인정하고 있다.[5]

## 2.2 입력 자료의 선정

RESRSD 전산코드를 이용하여 매립시나리오를 평가하기 위한 입력 자료를 아래와 같이 선정하였다. 입력 자료를 선정함에 있어 국내 특성자료를 확보할 수 있는 경우에는 이를 보수적으로 채택하는 것을 원칙으로 하였고, 국내 자료가 부재한 경우에는 외국의 문헌에 제시된 보수적인 값을 선정하였다. 본 연구에서 매립시나리오에 대한 방사선학적 영향을 평가하는 과정에서 결정집단으로 매립장에 근무하는 작업자와 매립장 폐쇄 후 매립장 상부에 거주하는 일반인을 대상으로 평가하였다.

### 2.2.1 초기 방사성핵종의 수량 및 농도

연구로 2호기 부속시설 제염·해체과정에서 발생된 극저준위 방사성 콘크리트 폐기물에서 발생 가능한 핵종 및 수량은 Table 1.과 같다. [6]

핵 종	Na-22	Mn-54	Fe-55	Co-60	Cs-137	Eu-152	Eu-154
수량(Ton)	160						
농도(Bq/g)	0.4						

Table 1. 콘크리트 폐기물의 방사성핵종의 농도 및 수량

폐기물에서 발생 가능한 핵종의 농도는 현재 MDA(최소검출하한치) 이하, MDA ~ 0.4 Bq/g, 0.4 Bq 이상의 세 가지로 구분하여 관리되고 있으며, 본 연구의 대상 폐기물의 경우 대부분 MDA 이하의 범위에 있다. 그러나 모든 핵종에 대해서 보수적으로 0.4 Bq/g으로 가정하여 평가대상으로 선정하였다.

### 2.2.2 평가대상 및 기간

매립장 상부에 근무하는 매립작업자의 경우 폐기물에 의한 외부피폭, 분진의 흡입 및 2차 피폭의 경우를 고려하였으며, 규제해제 직후 (0년)부터 1,000년까지를 평가대상 기간으로 선정하였다.

폐쇄 후 매립장 상부에 거주하는 거주자의 경우 매립된 폐기물에 의한 외부피폭, 분진의 흡입 및 2차 섭취, 지하수, 지표수, 매립장 상부에서 재배된 농축산물과 수산물에 의한 피폭경로가 추가적으로 고려되었다. 매립장 폐쇄 후 일반인의 거주가 일정기간동안 제한된다. 국내의 경우 환경부 폐기물관리법 제50조 및 동법 시행령 제38조의 규정은 “사용이 종료된 매립장은 사용종료 및 폐쇄 후 20년 이내의 기간 동안 사용이 제한하되, 이 정하는 기간동안 그 토지이용을 공원, 수목의 식재, 초지의 조성 및 체육시설의 설치에 한정하도록 그 용도를 제한할 수 있다.” 본 연구에서는 매립장 폐쇄 후 관리기간 동안에는 일반인의 거주가 예상되지 않음을 고려하여 평가기간을 매립장 폐쇄 후 5년이 경과된 시점부터 1000년까지로 선정하였다.

### 2.2.3 폐기물의 매립조건

RESRAD 전산코드의 기본 가정을 반영하여 오염지역의 기하학적 형상을 원기둥 형태로 가정하였다. 위의 가정을 반영하여 폐기물의 질량(M), 폐기물의 밀도( $\rho$ ), 높이(h)를 이용하여 단면의 반지름(R)과 지름(D) 및 단면적(A)을 아래의 식을 통해 도출하였다.

$$\text{반지름(R : radius)} \quad R = \sqrt{\frac{M}{\pi \cdot \rho \cdot h}}$$

$$\text{지름(D : Diameter)} \quad D = 2R = 2 \cdot \sqrt{\frac{M}{\pi \cdot \rho \cdot h}}$$

$$\text{단면적(A : Area)} \quad A = \pi \cdot R^2 = \frac{M}{\rho \cdot h}$$

발생 가능한 폐기물의 질량은 160 Ton이며, 폐기물은 대부분 콘크리트 덩어리이지만 일부는 재염과정에서 발생한 콘크리트 가루이다. 이러한 폐기물을 보수적으로 모두 콘크리트 덩어리로 가정하여 폐기물의 밀도를 일반 콘크리트의 밀도인 2.4 g/cm<sup>3</sup>로 선정하였다.

매립층의 두께는 매립장에서 폐기물을 매립하는 방법에 따라 차이가 있을 수 있으며, 일반적으로 트럭 적재함으로부터 폐기물을 일시에 내리는 경우 매립층의 두께는 일반적으로 1 ~ 3 m 내외가 될 것으로 예상되는데 본 연구에서는 2 m로 가정하였다.

#### 2.2.4 복토층 및 오염된 지역에 대한 수문학적 자료

복토층(Cover Soil)은 폐기물을 매립한 후 매립층을 안정화하기 위하여 매립폐기물 상부에 덮는 청정 토양이나 기타 청정 매질을 말한다. 국내의 경우 매립시설의 복토에 관한 환경부 규정[7]을 근거로 매립작업자의 경우에는 일일 복토요건인 15 cm로 가정하였고, 폐쇄 후 거주자의 경우에는 60 cm 식생대층이 존재하는 것으로 가정하였다.

#### 2.2.5 매립층에 대한 수문학적 자료

매립층의 밀도는 RESRAD 전산코드에서 오염토양의 밀도를 기본값인 1.5 g/cm<sup>3</sup>로 설정하고 있는데, 매립층의 밀도는 폐기물의 종류에 따라 달라지므로 본 연구에서는 폐기물의 밀도인 2.4 g/cm<sup>3</sup>로 가정하였다.

#### 2.2.6 환경자료

강수량은 기상청에서 발표한 1993년부터 2002년까지의 울산지역의 강수량의 평균치를 이용하였다. 본 연구에서는 이러한 결과를 바탕으로 Table 2.에 제시된 평균치를 적용하였다.

연평균 관개율의 경우 RESREA 전산코드에서는 기본값으로 0.2 m/y로 제시하고 있으나 일본의 원자력안전위원회의 규제해제기준 도출에 관련된 보고서[2]에서는 일본 내 경작지의 관개율을 0.4 m/y로 가정하였다. 국내 경작지의 형태가 미국 보다 일본과 유사함을 고려하여 연평균 관개율을 0.4 m/y로 가정하였다.

물의 이동현상을 평가하기 위해서 RESRAD 전산코드에서는 물질수지모델(Material Balance Model)과 비분산모델(No Dispersion Model)을 적용하고 있는데, 매립층이 협소한(1,000 m<sup>2</sup> 이하) 경우에는 물질수지모델의 적용을 권고하고 있어 본 연구에서 고려된 매립층의 면적 (66.7 m<sup>2</sup>)을 반영하여 물지수지모델을 적용하였다.

[ mm/y ]

강수량	1993년	1994년	1995년	1996년	1997년	1998년	1999년	2000년	2001년	2002년	평균
울산	1649.4	921.4	693	1015	1198.6	1796	1864.9	1027.1	869.1	1559.8	1259.4

표 2. 1993년부터 2002년간 조사된 울산 지역 평균 강수량

우물의 양수율의 경우 2002년도 건설교통부 조사 자료[9]를 근거로 울산지역의 총 관정수는 7,068개이고, 년 간 총 채수량은 54,992,262.4 m<sup>3</sup>/y이므로 각 관정 당 년 간 평균 채수량은 7771 m<sup>3</sup>/y로 선정하였다. 매립장 하단에서 우물까지의 거리는 매립장 지하수 하류단에 우물이 있다고 한 보수적인 값인 0 m를 적용하기 위해 RESRAD 전산코드의 최저 값인 0.00001를 적용하였다.

### 2.2.7 거주·호흡 및 외부피폭 관련 입력 자료

매립작업자의 호흡률은 일반적인 방사선량 평가 시 일정 수준의 작업을 수행하는 성인의 호흡률(1.2 m<sup>3</sup>/h = 10519 m<sup>3</sup>/y)로 가정하였고, 폐쇄 후 매립장 상부에 거주하는 일반인의 경우에는 일반적인 방사선량 평가용 프로그램에서 적용하고 있는 호흡률인 8,400 m<sup>3</sup>/y로 선정하였다.

매립장 환경에서 호흡가능한 분진의 농도는 일본에서 조사된 폐기물 매립장 상부에서의 분진의 농도로 매립작업자의 경우 5.0E-4 g/m<sup>3</sup>, 폐쇄 후 거주자의 경우 RESRAD 전산코드에서 제시하고 있는 2.0E-4 g/m<sup>3</sup>을 선정하였다.

외부감마선차폐계수(External Gamma Shielding Factor)는 일본에서 Co-60 핵종을 기준으로 폐기물 매립장 작업환경에서의 감마선 차폐계수를 0.4로 채택하고 있으며, RESRAD 전산코드에서도 동일한 기본값을 선택하고 있다.

실내거주비율(Indoor Time Fraction)은 1년 중 매립장 상부에 위치한 건물 내에서 체류하는 시간의 비율로 정의되며, 매립작업자와 폐쇄 후 거주자의 거주비율은 상이할 것으로 예상된다. 매립작업자의 경우 매립장 부지 내에서 1년간 총 작업시간을 2000 시간으로 가정하여, 부지 내 옥내에 거주하는 기간의 비율을 1/4로 가정하면 1년간 작업자가 건물 내에 거주하는 기간의 비율은 0.057로 산출된다. 폐쇄 후 거주자의 경우에는 1년 중 1/2을 옥내에서 거주한다고 가정하였으며, RESRAD 전산코드의 기본값과 동일하다.

실외거주비율(Outdoor Time Fraction)은 1년 중 매립장 상부에 위치한 건물 외부에서 체류하는 시간의 비율로 정의되며, 매립작업자와 폐쇄 후 거주자의 거주비율

은 상이할 것으로 예상된다. 매립작업자의 경우 매립장 부지 내에서 1년 간 총 작업시간을 2000 시간으로 가정하여, 부지 내 옥외에 거주하는 기간의 비율을 3/4로 가정하면 1년 간 작업자가 건물 외에 거주하는 기간의 비율은 0.171로 산출된다. 폐쇄 후 거주자의 경우에는 1년 중 1/4을 옥내에서 거주한다고 가정하였다.

### 2.2.8 음식물 섭취에 의한 피폭경로

연간 음식물 섭취량은 KINS/GR-119[10]에 고려된 국내 성인의 최대개인자료를 보수적으로 적용하였다. 매립 작업자의 경우 매립장의 운영기간동안 매립장 상부에 농작물을 경작하거나 음용수용 지하수 관정을 설치할 가능성은 무시할 수 있으므로 본 연구에서는 매립작업자에 대해서 음식물 섭취로 인한 피폭경로는 고려하지 않았다. 그러나 폐쇄 후 거주자의 경우 아래의 Table 3.과 같이 입력 자료를 선정하였다.

INADC 분류	INDAC 최대개인자료	RESRAD 분류	RESRAD 기본자료	최종입력자료
음료수	196.3 [L/y]	Drinking Water	510.0 [L/y]	196.3 [L/y]
어류	79.3 [kg/y]	Fish	5.0 [kg/y]	79.3 [kg/y]
연체 갑각류	17.6 [kg/y]	Other	0.9 [kg/y]	33.4 [kg/y]
해조류	15.8 [kg/y]	See Food		
곡류, 과일, 뿌리채소	190.0 [kg/y]	Fruit, Vegetable and Grain	160 [kg/y]	190.0 [kg/y]
엽채류	225.0 [kg/y]	Leafy Vegetable	14.0 [kg/y]	100.0 <sup>1)</sup> [kg/y]
우유	63.0 [L/y]	Milk	92.0 [L/y]	63.0 [L/y]
육류	55.0 [kg/y]	Meat and Poultry	63.0 [kg/y]	55.0 [kg/y]

표 3. 음식물 섭취량 관련 입력자료

1) RESRAD 전산코드에서 적용 가능한 최대값인 100 [kg/y] 적용

\* 토양섭취(Soil Ingestion)는 RESRAD 전산코드의 기본값(36.5 [kg/y]) 적용

\*\* 음식물 오염분율은 보수적으로 모두 동일하게 1로 적용(거주자가 섭취하는 음식물은 모두 오염된 것으로 가정)

### 2.2.9 지하수 이용률

RESRAD 전산코드에서는 음용수, 가정용수, 가축용수, 관개용수로 전량 지하수를 사용한다는 상황을 기본적으로 설정하고 있다. 그러나 국내의 지하수 이용현황을 살펴보면 1997년 통계청 자료[9]에서 매립장이 위치할 수 있는 경남(울산)의 군지역의 지하수를 음료수원으로 이용하는 경우 30.4 %로 조사되었다. 그 이외에 약수로 이용되는 경우 11.7 %와 기타 음료수원으로 이용하는 경우를 고려하여 음료수로서 지하수 이용률은 50 %로 가정하였다. 또한 가축의 사육 및 관개용수로 이용하는 경우는 2002년 건설교통부 자료[6]를 인용하여 울산 지역의 전체 지하수 이용량(59,985,762 m<sup>3</sup>/y) 중에서 농업용으로 이용되는 양(7,378,534 m<sup>3</sup>/y)과 기타(1,389,158

m<sup>3</sup>/y)의 경우를 고려할 경우 20 %정도이다. 본 연구에서는 가축의 사육 및 관개용수 사용량의 1/4를 지하수로 가정하여 폐쇄 후 거주자의 경우에 적용하였고, 매립작업자의 경우 오염된 음식물 섭취경로를 고려하지 않으므로 지하수 이용률은 계산결과에 영향을 미치지 않는다.

### 2.2.10 저장기간

농작물, 우유, 육류, 어류, 음용수 등을 섭취하기 전까지 저장기간은 INDAC의 기본값과 KINS/GR-199 보고서에서 제시된 값을 준용하여 다음과 같이 제시하였다.

대 상	저장기간(day)	대 상	저장기간(day)
과일, 비엽채류 및 곡식	14	감각류 및 연채류	1
엽채류	1	우물물	0.5
우유	1	표층수	0.5
육류	7	가축 사료	75
어류	1		

표 4. 음식물의 저장기간에 대한 가정

### 2.2.11 기타 농작물 관련자료

단위 면적당 농작물의 가식부(Edible Parts)의 생산량, 성장기간, 전이계수(Translocation Factor), 풍화작용에 의한 제거상수, 습윤침적에 의한 엽면 핵종침적비율, 건조침적에 의한 엽면 핵종침적비율 등은 IADAC의 기본값을 채택하였고, 일부 INDAC에 제시되지 않은 항목에 대해서는 RESRAD 전산코드의 기본값을 채택하였다. 본 연구에서 적용한 기타 농작물 관련 입력자료는 Table 5.과 같다.

	비엽채류	엽채류	사료
Wet Weight Crop Yield	0.7 Kg/m <sup>2</sup>	1.5 Kg/m <sup>2</sup>	1.1 Kg/m <sup>2</sup>
농작물 성장기간	0.17 y	0.17 y	0.08 y
전이계수	0.1	1	1
풍화작용에 의한 제거상수	18/y	18/y	18/y
습윤침적에 의한 엽면 핵종침적비율	0.25	0.25	0.25
건조침적에 의한 엽면 핵종침적비율	0.25	0.25	0.25

표 5. 기타 농작물 관련자료

위에서 언급되지 않은 입력변수는 RESRAD 전산코드의 기본값을 그대로 준용하였다.

## 2.3 RESRAD 전산코드의 수학적 모델

### 2.3.1 피폭경로별 선량환산인

RESRAD 전산코드에서는 개별 핵종에 의한 피폭경로별 선량환산인자를 도출하고, 이를 합산하여 특정 시나리오에 의한 전체적인 피폭방사선량을 평가하는 방법론을 채택하고 있다. 이에 따라 전체적인 피폭방사선량 계산모델[11]은 다음과 같은 수식으로 요약할 수 있다.

$$H_E(t) = \sum_i \sum_p H_{E, i, p}(t)$$

$$H_{E, i, p} = DCF_{i, p} \cdot ETF_{i, p}$$

여기서

$H_{E, i, p}(t)$  : 핵종 i, 피폭경로 p에 의해서 유발되는 유효선량당량

$DCF_{i, p}$  : 핵종 i, 피폭경로 p에 대한 선량환산인자

$ETF_{i, p}$  : 환경이동계수(Environmental Transport Factor)

### 2.3.2 흡입 피폭경로

RESRAD 전산코드에서는 다음과 같은 모델을 이용하여 오염토양으로부터 유래된 방사성 물질의 흡입에 의한 내부 피폭방사선량을 평가하고 있다.

$$ETF_i(t) = ASR_i \cdot FA \cdot FCD(t) \cdot FO \cdot FI$$

$ASR_i$  : Mass Loading Factor (공기/토양 핵종 농도비)

$FA$  : Area Factor (오염면적과 풍속의 함수)

$FCD(t)$  : Cover and Depth Factor (시간 경과에 따른 오염층의 침식효과 고려)

$FO$  : 거주인자 (Occupancy Factor)

$FI$  : 연간 호흡량 (Annual Intake of Air)

### 2.3.3 섭취에 의한 내부피폭 계산모델

RESRAD 전산코드에서는 다음과 같은 모델을 이용하여 섭취에 의한 내부 피폭방사선량을 평가하고 있다.

$$ETF_{ij} = FA \cdot FCD(t) \cdot \sum_k [DF_k \cdot FSR_{ik}(t)]$$

$FA$  : Area Factor

$FCD(t)$  : Cover and Depth Factor

$DF_k$  : 연간 음식물 k 섭취량 (Dietary Factor)

$FSR_{ik}(t)$  : 음식물/토양의 농도비

한편 부주의하게 오염토양을 섭취함에 따른 피폭방사선량은 다음과 같이 평가된다.

$$ETF_i = Fa \cdot FCD(t) \cdot FO \cdot FI$$

$FA$  : Area Factor

$FCD(t)$  : Cover and Depth Factor

$FO$  : Occupancy Factor

$FI$  : 연간 토양 섭취량 (Annual Intake of Soil)

#### 2.3.4 외부피폭 계산모델

RESRAD 전산코드에서는 오염토양에 의한 외부 피폭방사선량을 평가하고 있다.

$$ETF_i(t) = FO \cdot FAS \cdot FD_i(t) \cdot FC_i(t)$$

여기서,

$FO$  : 거주 및 차폐인자

$FAS$  : Area and Shape Factor

$FD_i(t)$  : Depth Factor (오염토양의 자체흡수 현상을 보정하기 위한 인자)

$FC_i(t)$  : Cover Factor (복토(cover)에 의한 차폐효과를 고려하기 위한 인자)

#### 2.3.5 선량환산인자

RESRAD 전산코드는 ICRP Pub. 26에 근거한 총유효선량당량(TEDE : Total Effective Dose Equivalent)를 기준으로 피폭방사선량을 평가하도록 개발되었으며 흡입과 섭취에 의한 내부피폭 선량환산인자는 EPA FGR No. 11(1988)에서 제시한 값을 채택하고 있고, 무한면적 오염토양에 대한 외부피폭 선량환산인자 즉 EPA FGR No. 12(1993)를 근간으로 오염면적과 오염두께를 보정하여 적용하는 방법을 채택하고 있다. 그러나 우리나라는 현재 국가 방사선방호기준으로 ICRP Pub. 60이 권고한 유효선량 개념을 공식적으로 채택하고 있다. 그래서 유효선량 개념에 근거한 성인의 내부피폭 평가를 위해서는 ICRP Pub. 72의 호흡과 섭취에 의한 내부피폭 선량환산인자 값으로의 적용을 필요로 한다. 그러므로 매립 작업자 및 매립 후 거주자에 대한 내부피폭(호흡, 섭취)으로 구분되며 작업자 시나리오에 대해서는 ICRP Pub. 68의 작업자에 대한 내부피폭 선량환산인자를 선정하여 적용하였으며 일반인에 대해서는 연령별 선량환산인자의 차이를 보정하기 위해 ICRP Pub. 72의 일반인에 대한 내부피폭 선량환산인자 값의 2배를 호흡과 섭취에 대한 내부피폭 선량환산인자로 채택하였다. 또한 호흡에 의한 선량환산인자는 ICRP Pub. 68에 근거하여 작업자에 대해서  $5 \mu\text{m}$ 의 AMAD(Activity Median Aerodynamic Diameter) 입자크기를, 일반인에 대해서는  $1 \mu\text{m}$ 의 AMAD 입자크기를 적용하였으며 흡수율 파라미터(F(Fast), M(moderator), S(Slow))는 핵종의 반감기에 따라 F, M, S 값을 각각 적용하였다.

외부피폭 선량환산인자의 경우 ICRP Pub. 60에서 권고하고 있는 유효선량의 개념으로 평가하기 위해서는 ICRP Pub. 74에 제시된 외부피폭에 대한 선량환산인자를

적용하여 평가하는 것이 원칙이다. 그러나 Zankl(1992)등은 연구논문에서 대부분의 경우 유효선량 및 유효선량당량에 근거한 외부피폭선량 평가결과의 차이는 수 퍼센트 내외인 것으로 밝혀진 바 있으므로 외부피폭에 대해서는 유효선량당량에 근거한 EPA FGR No. 12를 적용하였다.

핵 종	반감기(Year)	폐쇄 후 거주자		매립 작업자	
		선량환산인자(ICRP Pub. 60)		선량환산인자(ICRP Pub. 60)	
		섭취	흡입	섭취	흡입
Na-22	2.6	6.40E-9	2.60E-9	3.20E-9	2.00E-9
Mn-54	0.856	1.42E-9	3.00E-9	7.10E-10	1.20E-9
Fe-55	2.68	2.00E-9	7.40E-10	3.30E-10	3.30E-10
Co-60	5.27	6.80E-9	1.92E-8	3.40E-9	7.10E-9
Cs-137	30.2	2.60E-8	9.60E-9	1.30E-8	6.70E-9
Eu-152	13.2	2.80E-9	7.80E-8	1.40E-9	2.70E-8
Eu-154	8.59	4.00E-9	1.00E-7	2.00E-9	3.50E-8

표 6. 폐쇄 후 거주자와 매립작업자에 대한 선량환산인자

## 2.4 평가방법

RESRAD 전산코드를 이용하여 연구로 2호기 부속시설의 제염·해체 과정에서 발생하는 콘크리트 폐기물을 매립하는 경우에 대해서 자체처분 안전성을 평가하였다. 유효선량의 개념을 적용하기 위해 외부피폭의 경우 EPA FGR. 12를 준용하였으며, 내부피폭의 경우 아래와 같은 방법으로 최대개인선량과 집단선량을 평가하였다. 매립작업자의 경우 ICRP 68에 제시된 섭취와 호흡(5 μ AMAD)의 선량환산인자를 적용하여 0년(규제해제 직후)부터 1000년까지의 최대개인선량을 도출하였으며, 매립 후 거주자에 대해서는 ICRP 72에 제시된 섭취에 대한 선량환산인자 및 ICRP 68의 호흡(1 μ AMAD)에 대한 선량환산인자를 각각 적용하여 규제해제 후 5년이 경과된 시점부터 1000년까지의 최대개인선량을 도출하였다. 집단선량의 경우 매립 후 거주자의 경우 매립장 면적에 2002년 울산시의 인구밀도를 곱한 결과(인구수)를 이용하여 집단선량을 도출하였으며, 매립 작업자의 경우 매립장 작업자가 조사결과 16명이므로 이를 이용하여 집단선량을 도출하였다. 위에서 도출된 결과를 이용하여 국내 원자력법 상의 자체처분 기준치(개인선량 : 10 μSv/y, 집단선량 1 man·Sv/y)를 만족하는지를 비교하여 자체처분을 위한 핵종의 농도를 도출하였다.

## 3. 결과 및 고찰

연구로 2호기 부속시설인 동위원소 생산시설과 실험실 등에서 발생한 콘크리트를 대상 폐기물로 선정하여 처분제한치를 만족함을 보이기 위해서 RESRAD Ver 6.21 전산코드를 이용하여 평가하였다. 본 연구에서는 ICRP Pub. 60에서 제시하고 있는

유효선량의 개념을 적용하여 평가하기 위해 내부선량환산인자를 수정하였고, RESRAD 전산코드의 입력변수의 경우 우선적으로 국내 상황에 맞도록 적용하고, 일부 자료는 RESRAD 전산코드의 기본값과 외국의 자료를 비교하여 보수적인 값을 선정하여 적용하였다.

콘크리트 매립처분을 위한 자체처분 안전성평가 결과는 Table 7과 Table 8.에 제시하였다. 매립 작업자 경우 가장 위해도가 큰 핵종인 Co-60을 기준으로 평가된 개인선량 및 집단선량은  $49.25 \mu\text{Sv/y}$ ,  $7.88 \times 10^{-5} \text{ man} \cdot \text{Sv/y}$ 이고, 폐쇄 후 거주자의 경우 가장 위해도가 큰 핵종인 Cs-137을 기준으로 평가된 결과는  $53.44 \mu\text{Sv/y}$ ,  $2.432 \times 10^{-3} \text{ man} \cdot \text{Sv/y}$ 로 평가되었다.

일련번호	핵종	매립작업자	매립작업자	폐쇄 후	폐쇄 후	규제해제 기준 농도
		유효선량	규제해제농도	거주자	거주자	
		t = 0 y	t = 0 y	t = 5 y	t = 5 y	
평가시점					-	
단위						
		[mSv/y]	[Bq/g]	[mSv/y]	[Bq/g]	[Bq/g]
1	Na-22	3.237E-02	1.236E-01	6.836E-03	5.851E-01	1.236E-01
2	Mn-54	9.192E-03	4.352E-01	2.024E-04	1.977E+01	4.352E-01
3	Fe-55	2.809E-11	1.424E+08	2.425E-05	1.650E+02	1.650E+02
4	Co-60	4.925E-02	8.122E-02	1.364E-02	2.932E-01	2.932E-01
5	Cs-137	7.654E-03	5.226E-01	5.344E-02	7.486E-02	5.226E-01
6	Eu-152	1.934E-02	2.069E-01	3.423E-04	1.169E+01	2.069E-01
7	Eu-154	2.134E-02	1.874E-01	4.061E-04	9.849E+00	1.874E-01
8	합계	0.1392	2.876E-2	7.489E-02	5.341E-2	2.876E-2

표 7 매립시나리오에 대한 세부평가결과 및 도출된 규제해제농도 기준

	매립장 면적	인구밀도	인구수	개인선량	집단선량
단위	[km <sup>2</sup> ]	[인/km <sup>2</sup> ]	[인]	[Sv/y]	[man · Sv/y]
매립 작업자	0.04487	-	16	4.925E-5	7.880E-05
폐쇄 후 거주자	0.04487	1,013	45.5	5.344E-5	2.432E-03

표 8 매립시나리오에 대해 도출된 집단선량

위 결과를 바탕으로 Cs-137의 경우에는 폐쇄 후 거주자 시나리오에서 예상되는 피폭방사선량이 매립작업자 시나리오에 비하여 상대적으로 큰 것으로 평가되었다. 이러한 핵종은 상대적으로 반감기가 길고, 저 에너지의 감마선을 방출하는데서 기인하는 것으로 추정된다. 한편, 반감기가 상대적으로 짧고 감마선을 방출하는 핵종의 경우(Mn-52, Co-60) 등은 매립작업자의 피폭방사선량이 폐쇄 후 거주자에 비하여 상대적으로 큰 것으로 나타났다.

콘크리트 폐기물을 매립 처분하는 경우 매립 작업자의 경우에는 Co-60, 폐쇄 후 거주자의 경우 Cs-137 핵종의 위해도가 가장 큰 것으로 평가되었다. 자체처분 규정

을 만족하기 위한 핵종의 농도는 각각  $8.122 \times 10^{-2} \text{ Bq/g}$ ,  $7.486 \times 10^{-2} \text{ Bq/g}$ 로 도출되었다. 매립작업자와 폐쇄 후 거주자의 경우를 모두 만족하기 위해서는 핵종의 농도가  $8.122 \times 10^{-2} \text{ Bq/g}$ 이하인 폐기물만을 자체처분 대상으로 선정해야 한다. 그러나 본 연구의 대상으로 하는 콘크리트 폐기물의 경우 모든 핵종에 대해서 동일하게  $0.4 \text{ Bq/g}$ 로 선정하였으나, 실제 연구로 2호기 부속시설에서 제거된 콘크리트 폐기물의 방사성핵종의 농도는 Co-60이나 Cs-137의 경우 최대 약  $10^{-2} \text{ Bq/g}$  정도 검출되고 있으나, 제염 후의 시료를 분석한 결과 MDA이하로 자체처분제한치를 충분히 만족할 수 있을 것으로 예상된다.

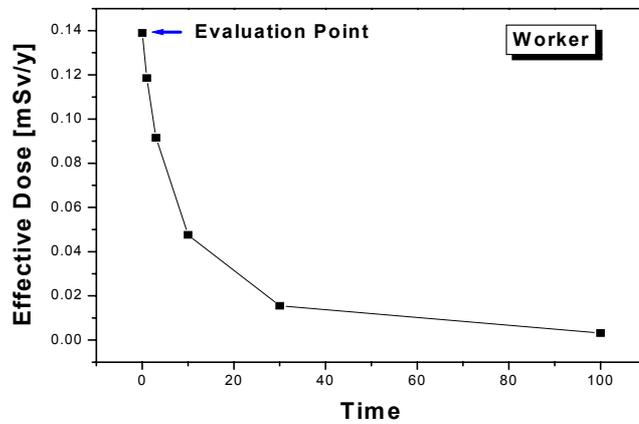


그림 1. 시간 경과에 따른 작업자의 피폭선량

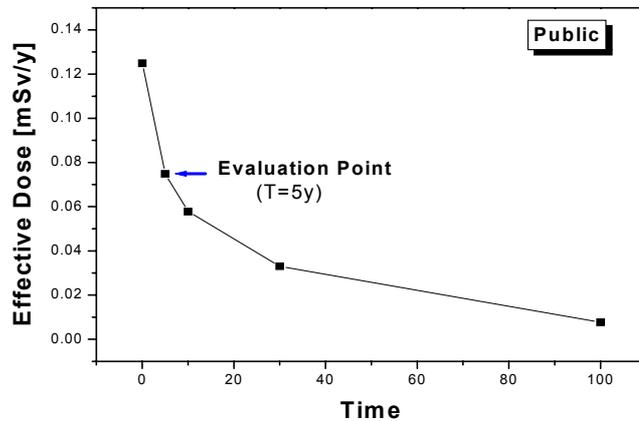


그림 2. 시간 경과에 따른 일반인의 피폭선량

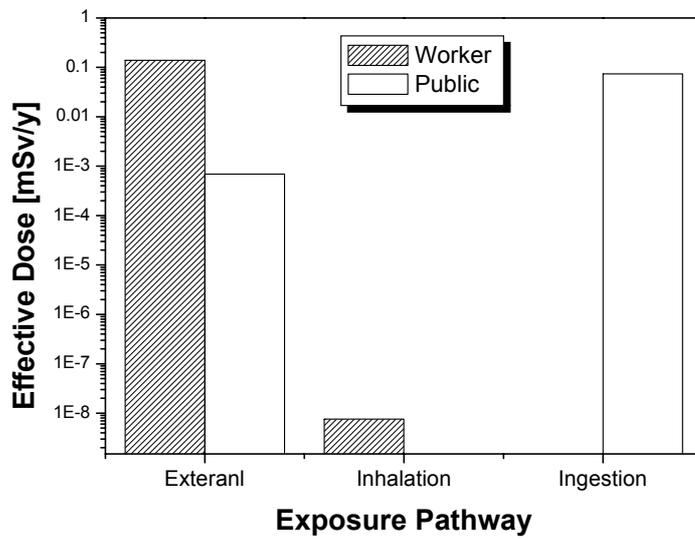


그림 3. 피폭경로에 따른 매립작업자와 폐쇄 후 거주자의 피폭선량

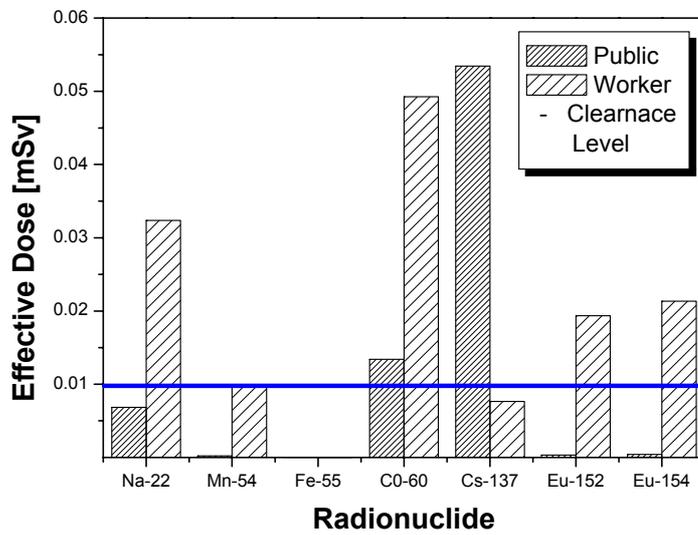


그림 4. 방사성 핵종에 따른 작업자와 일반인에 대한 피폭선량과 자체처분 기준농도의 비교

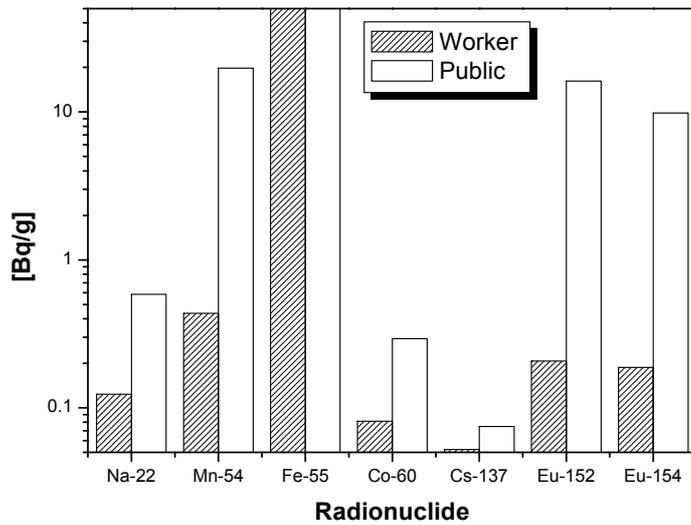


그림 5. 자체처분제한치를 만족하기 위한 규제해제 농도

#### 4.참고문헌

- [1] USEPA, NUREG-1640, "Radiological Assessments for clearance of Equipment and Materials from Nuclear Facilities", 1999. 3.
- [2] 과학기술부 고시 제 2001-30호, 방사성폐기물 자체처분에 관한 규정, 2001.
- [3] ICRP, "Dose Coefficients for Intakes of Radionuclides by Worker", ICRP Publication 68, Annals of the ICRP, 1994.
- [4] ICRP, "Age-dependent Dose to Members of the Public from Intake of Radionuclide", ICRP Publication 72, Annals of the ICRP, 1996.
- [5] 노병환 외, 방사성폐기물 규제해제 요건 개발, 한국원자력안전기술원, 2002. 5.
- [6] 연구로 1호기 및 2호기 폐로사업 해체계획서, 한국원자력연구소, 2000. 10.
- [7] 환경부, 폐기물관리법, 동법 시행령 및 시행규칙.
- [8] 건설교통부, 지하수조사연보, 2002.
- [9] 통계청, 국민의 음용수원 구성비, 1997.
- [10] 이종인 외, 방사능 방재 환경 규제기술 개발, 과학기술부, 1999.
- [11] ANL, ANL/EAD-4, User's manual for RESRAD version 6. 2001. 7.
- [12] ANL, ANL/EAIS-8, Data Collection Handbook to support Modeling the Impacts of Radioactive material in soil, 1993. 4.