

An Analysis on the DCGL setting Method of the United States for Demonstrating Nuclear Power Plants Site Release Criteria

Yeo Ryeong Jeon,¹ Sang June Park,² Seokyoung Ahn,² Jong Seh Lee,³ Yongmin Kim^{1,*}

¹Department of Radiological Science, Catholic University of Daegu

²School of Mechanical Engineering, Pusan National University

³Department of Civil Engineering, Hanyang University, ERICA

Received: November 17, 2016. Revised: December 15, 2016. Accepted: February 28, 2017

ABSTRACT

The U.S. NRC establishes a radiological criteria with regard to restricted or unrestricted use of nuclear plant site after decommissioning in NUREG-1757. According to this, a nuclear plant site can be released in a restricted way or unrestricted way only if a licensee demonstrates that the dose criteria is fulfilled after the site decontamination and remediation. In order to prove compliance with the radiological criteria of site release, LTP(License Termination Plan) must include the site release criteria, site characterization, final survey plan with major radionuclides and DCGL(Derived Concentration Guideline Levels), etc. Based on the decommissioning case of Rancho Seco nuclear power plant in the United States, this paper analyzed a method of setting the DCGL that can be applied to Kori NPP Unit 1 which will be permanently disabled in 2017.

Keywords: Nuclear Power Plant decommissioning, Rancho Seco, DCGL, RESRAD

I. INTRODUCTION

국제원자력기구(IAEA)의 통계자료에 따르면 세계 30개국에서 437기의 원전이 가동중이고, 70기가 건설 중, 32개국이 원자력도입을 검토 중이며 원자력을 이용한 발전량이 향후 2030년까지 계속 증가할 것이라고 예상하였다.^[1] 이처럼 체르노빌, 후쿠시마 원전사고 이후에도 세계적으로 원자력발전량은 증가할 것으로 예상되나 3, 40년 이상 운전중인 원전이 288기로 총 운영 원전 대비 약 66%에 해당하여 운영정지를 앞두고 있고^[2] 이에 따른 원전 해체 및 부지 복원 작업도 크게 늘어날 것이다. 국내 원전의 경우에도 설계 시 운전 수명이 30년 또는 40년으로 설계되어 다가오는 2017년 6월 고리1호기의 수명이 다할 예정으로 최초 발전용 원전 해체를 앞두고 있다. 현재 국내에서는 원자력 안전법 제28조 3~9항에서 부지복원 및 규제해제와 관련하여 부지 제염 및 복원 공사, 허가 종료를 위한 사항들

이 있으나^[3] 구체적인 부지 규제 해제의 기준이 되는 선량 및 선량 충족 방법 또한 정해진 바가 없다.

원전 해체 사례가 많은 미국의 경우, NRC의 NUREG-1757 문서에서 제한적/무제한적 이용을 위한 부지 해제 선량 조건을 준수하는 것에 대한 충족 여부의 증명에 있어 일반적으로 Dose modeling 방식과 유도농도기준(Derived Concentration Guideline Level, DCGL)을 이용하는 두 가지 방법을 제시하였다.^[4] Dose modeling을 이용한 평가 방식의 큰 장점은 현실적이라는 것이고, 부지의 혼합된 방사성 핵종들에 대하여 선량이 최대일 때의 시간에 대해 처리가 가능하며, 부지-특성 분석(Site-Specific Analysis)에서 해체 과정 중의 추가적인 자료 사용을 가능하게 한다. 또 이것은 추후의 부지 복원 활동에 대한 지원을 가능하게 한다. 반면, 부지 특성화와 복원을 반복하게 될 가능성이 크고, 복원활동과 부지 조사 설계에 있어 예비 복원 목표인 DCGL이 필요할 수도 있다.

DCGL을 이용한 평가 방식은 한 번 DCGL을 설정

하고 나면 수정하기 어렵다는 것과 혼합된 방사성 핵종에 대해 보수적으로 평가될 수 있다는 단점이 있지만, 수행하기 간편하다는 것과 부지 복원 이후 선량 조건 준수를 달성하지 못할 가능성이 낮다는 장점이 있다. 이러한 이유 때문에 NUREG-1757 Vol 2.에서는 접근방식의 유연성을 위해 위의 2가지 방법을 제시하였으나, DCGL 방식이 더 단순하고 효율적이기 때문에 대부분의 사례에서 주로 DCGL 이하의 선량을 준수하는 방법으로 부지 해제 선량 조건 준수를 증명한다고 하였다.^[4] 하지만 두 방식은 상호 배타적으로 생각해서는 안되며 선량 수용이 가능함을 보여주기 위한 다른 방식으로 인지하여야 한다.^[4]

본 논문에서는 미국의 Rancho Seco 원전 해체에서의 DCGL 설정 방법을 분석하여 다가오는 국내 원전 해체에서 부지 해제 기준 선량 설정에 적용할 수 있는 방안을 검토하였다.

II. DEMONSTRATING COMPLIANCE DOSE CONDITIONS FOR SITE RELEASE OF RANCHO SECO NUCLEAR POWER PLANT

미국의 Rancho Seco 원전은 1975년 상업운전을 실시하여 1989년 잦은 운전정지로 인해 영구정지가 되었고 지연해체(SAFSTOR)를 승인받아(1995) 현재는 해체가 완료(2009)된 상태이다. RESRAD code는 원전부지의 무제한적 및 제한적 이용을 위한 해체를 위해 규제요건을 충족시킨다는 것을 입증하기 위해 활용되고 있으며, RESRAD-Build code는 RESRAD code의 부속 code로 건물의 바닥, 벽 및 천장의 방사성물질들로 인한 사람(작업자)의 피폭선량 계산에 활용된다. 부지 해제를 위한 DCGL을 설정하기 위해 RESRAD ver 6.22 및 RES-RA D-Build ver 3.32, 3.33 code를 사용하여 부지내의 표면 토양과 지표밀의 토양, 건물의 표면, 대량자재, 격납건물의 내부 표면, 매설배관, 매복도관으로 구분하여 각각에 대해 DCGL을 설정하였다. 각각의 계산에 사용된 입력 parameter 및 피폭경로 및 Scenario, 선량환산인자는 Rancho Seco 운영허가종료계획서(License Termination Plan, LTP)의 Chapter 6^[5]에서 확인할 수 있다.

1. Surface and Subsurface Soil

부지특성조사과정에서 수집된 토양 sample을 실험실

에 보내 총 26개의 알려진 핵종 중 6개의 주요 핵종(¹⁴C, ⁶⁰Co, ⁶³Ni, ⁹⁰Sr, ¹³⁴Cs, ¹³⁷Cs)을 확인하고 각각의 핵종들에 대한 DCGL값을 획득하였다. RESRAD 및 RESRAD-Build Code 사용에서 먼저 수행되는 parameter 분류에서 선원이나 그들의 위치, 토양 유형과 같은 부지의 지리적 특성에 의해 결정되는 physical 로 분류되는 경우 측정가능 여부를 검토하게 되며 ANL(Argonne National Laboratory)에서 physical parameter의 우선순위 지정을 위해 개발한 통계적인 parameter 분포를 이용하여^[6] parameter의 우선순위가 가장 낮은 3단계일 때는 default 값을 사용하여 민감도 분석이 수행되었다.

민감도 분석에 사용한 핵종의 농도는 부지 내의 gamma 핵종 분석에서 가장 크게 오염된 토양으로 판별된 사용 후 핵연료 pad sample의 농도를 사용하였다. 이 sample들은 분석을 시작한 날부터 최종 상태 조사가 종료될 시점인 2008년 7월 1일까지 붕괴할 것으로 하고, RESRAD에서의 계산은 식별된 핵종들 모두 사용하여 2008년 7월 1일까지 존재할 것이라 가정하여 계산되었다. 이러한 접근 방법을 이용하여 전체 핵종 혼합물에 대해 민감한 parameter를 정의하였다. 민감도 분석에 사용한 방사성 핵종의 농도는 Table 1과 같다.

1.1 각 핵종별 DCGL_w

Rancho Seco에서 사용한 RESRAD parameter는 각각의 검출 방사성 핵종에 대하여 확률론적으로 평가되었다. 확률론적 평가방법은 입력인자가 분포함수를 가지고 있고 각각의 인자에 의한 영향이 누적된 선량평가가 가능하지만 민감도가 낮은 parameter는 평가가 어렵다는 단점이 있다.^[7] 입력 parameter에 대한 정보는 LTP의 Appendix A에서 그 종류와 값을 알 수 있다. 각 핵종의 DCGL_w값은 규제 선량한도 25 mrem/yr에 감쇠된 방사선핵종으로부터의 잠재적 선량기여도인 0.572 mrem/yr를 뺀 값에서 제공되는 계산값인 최대 평균 선량으로 나누어 구하였다. 잠재적 선량기여도 값은 DTBD-04-001에 제공되는 6가지의 잠재적 핵종에 대하여^[8] 최종상태조사가 종료되는 2008년 7월 1일부터 사용 후 핵연료 냉각 pad의 토양 sample에서 검출되기 힘들 것으로 간주되는 방사성 핵종의 최소검출방사능(Minimum Detectable Activity, MDA)을 기반으로 하여 계산되었다. sample 분석에서 선별된 6가지 핵종에 대한 각각의 DCGL_w은 Table 1과 같다.

Table 1. Sensitivity analysis radionuclide concentrations and single nuclide DCGL_w value for Detectable Radionuclides.

Radionuclide	Analysis Date	Analysis Result (pCi/g)	Half Life (Years)	Decayed Conc. (pCi/g)	Peak of the Mean Dose (mrem/y per pCi/g)	DCGL _w (pCi/g)
¹⁴ C	06/24/04	4.74E+00	5.73E+03	4.74E+00	2.93E-06	8.33E+06
⁶⁰ Co	06/22/04	1.13E+01	5.27E+00	6.66E+00	1.93E+00	1.26E+01
⁶³ Ni	06/24/04	1.75E+02	1.00E+02	1.70E+02	1.60E-06	1.52E+07
⁹⁰ Sr	07/08/04	1.41E+00	2.86E+01	1.28E+00	3.76E-03	6.49E+03
¹³⁴ Cs	06/22/04	8.90E-01	2.06E+00	2.30E-01	1.09E+00	2.24E+01
¹³⁷ Cs	06/22/04	1.04E+03	3.02E+01	9.48E+02	4.62E-01	5.28E+01

1.2 지표 밑의 토양에 대한 표면 DCGL_w의 적용 가능성

Rancho Seco의 부지내에서 지표 아래의 토양에 대해서도 오염이 확인되어 앞서 구한 표면 DCGL_w의 적용 가능성을 평가할 필요가 있었다. 이 평가는 NUREG-1757, Vol.2의 Appendix I^[4]에서 말하는 방법을 따랐다. 방사성 핵종의 최대 제한치를 계산하기 위해 MARSSIM에서 제시한 "합산 법칙(Unity rule)"을 적용하였으며^[9], Table 1에서 제시한 방사성핵종의 농도와, 최대 방사성핵종 농도 제한치를 계산하기 위해 각 핵종별 DCGL_w 농도 값을 사용하였다. 먼저 합산 법칙에 따라 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{C_{M(C-14)}}{DCGL_{C-14}} + \frac{C_{M(Co-60)}}{DCGL_{Co-60}} + \frac{C_{M(Ni-63)}}{DCGL_{Ni-63}} + \frac{C_{M(Sr-90)}}{DCGL_{Sr-90}} + \frac{C_{M(Cs-134)}}{DCGL_{Cs-134}} + \frac{C_{M(Cs-137)}}{DCGL_{Cs-137}} \leq 1 \quad (1)$$

Table 1에서 방사성핵종의 농도와, 각 핵종별 DCGL_w 값을 적용하여 합산 법칙을 적용한 식을 전개한다.

$$\frac{4.74}{8.33E+06} + \frac{6.66}{1.26E+01} + \frac{170}{1.52E+07} + \frac{1.28}{6.49E+03} + \frac{0.230}{2.24E+01} + \frac{948}{5.28E+01} = 18.5 \quad (2)$$

양변을 18.5로 나누어 합산 법칙이 성립할 수 있도록 한다.

$$\frac{0.256}{8.33E+06} + \frac{0.360}{1.26E+01} + \frac{9.18}{1.52E+07} + \frac{0.0692}{6.49E+03} + \frac{0.0124}{2.24E+01} + \frac{51.2}{5.28E+01} = 1 \quad (3)$$

위 계산에 의한 최대 수용 가능한 방사성핵종의 농도는 Table 2와 같다.

Table 2. Maximum Allowable Radionuclide Mixture Concentrations.

Radionuclide	Mixture Conc. (pCi/g)
¹⁴ C	2.56E-01
⁶⁰ Co	3.60E-01
⁶³ Ni	9.19E+00
⁹⁰ Sr	6.92E-02
¹³⁴ Cs	1.24E-02
¹³⁷ Cs	5.12E+01

각 핵종별 DCGL은 지표 밑 15 cm의 오염층 두께를 기반으로 계산되었으나 subsurface soil의 오염은 discrete pockets에서 발생하는 것으로 확인되었고, 실제 오염된 토양 두께는 이보다 더 깊을 것으로 예상되어 깊이 별로 나누어 계산하는 등 지리화학적 부분을 고려하였을 때 subsurface soil 오염에 관한 surface soil의 DCGL 값을 적용하는 것은 보수적임을 확인하였다.

2. Structural Surface and Bulk Material

먼저 NUREG/CR-6755에서 제시된 산업 작업자의 건물 점유 scenario를 근거로 하여 핵종 별 DCGL 값을 얻기 위해 RESRAD-BUILD ver 3.22를 사용하여 sensitive parameter를 확인하였다. 확인된 5개의 parameter는 방의 높이, 바닥의 넓이, 침적속도(deposition velocity), 공기 환기율, 재부유율이다.

원전 부지내의 일부 대량 자재의 표면은 중성자 방

Table 3. Calculated structure surface and bulk material single nuclide DCFs and DCGLs

Radionuclide	Structural Surface		Bulk Material	
	Dose Conversion Factor (mrem/yr per 10 ³ dpm/g)	DCGL (dpm/100 cm ²)	Dose Conversion Factor (mrem/yr per 10 ³ dpm/g)	DCGL (dpm/100 cm ²)
³ H	7.94E-08	3.15E+08	3.18E-03	7.86E+03
¹⁴ C	2.92E-06	8.56E+06	1.56E-05	1.60E+06
²² Na	1.47E-03	1.70E+04	2.98E+00	8.39E+00
⁵⁵ Fe	7.31E-07	3.42E+07	6.40E-07	3.91E+07
⁵⁹ Ni	3.13E-07	7.99E+07	1.68E-06	1.49E+07
⁶⁰ Co	1.64E-03	1.52E+04	3.54E+00	7.06E+00
⁶³ Ni	8.23E-07	3.05E+07	3.65E-06	6.85E+06
⁹⁰ Sr	2.07E-04	1.21E+05	6.01E-03	4.16E+03
⁹⁴ Nb	1.09E-03	2.29E+04	2.11E+00	1.18E+01
⁹⁹ Tc	2.13E-06	1.17E+07	3.39E-05	7.37E+05
^{108m} Ag	1.13E-03	2.21E+04	2.09E+00	1.20E+01
¹²⁵ Sb	3.13E-04	7.99E+04	5.26E-01	4.75E+01
¹³⁴ Cs	1.14E-03	2.19E+04	2.05E+00	1.22E+01
¹³⁷ Cs	4.50E-04	5.56E+04	7.40E-01	3.38E+01
¹⁴⁷ Pm	1.50E-06	1.67E+07	1.52E-05	1.64E+06
¹⁵² Eu	7.86E-04	3.18E+04	1.52E+00	1.64E+01
¹⁵⁴ Eu	8.43E-04	2.97E+04	1.67E+00	1.50E+01
¹⁵⁵ Eu	4.78E-05	5.23E+05	3.20E-02	7.81E+02
²³⁷ Np	1.05E-02	2.38E+03	3.34E-01	7.49E+01
²³⁸ Pu	7.30E-03	3.42E+03	6.92E-02	3.61E+02
²³⁹ Pu	8.19E-03	3.05E+03	2.04E-01	1.23E+02
²⁴⁰ Pu	8.19E-03	3.05E+03	8.45E-02	2.96E+02
²⁴¹ Pu	1.37E-04	1.82E+05	1.22E-03	2.05E+04
²⁴² Pu	7.81E-03	3.20E+03	8.09E-02	3.09E+02
²⁴¹ Am	8.37E-03	2.99E+03	9.26E-02	2.70E+02
²⁴⁴ Cm	4.15E-03	6.02E+03	3.72E-02	6.72E+02

사화로 인해 발생한 체적 오염을 포함하여 구조재의 단면 오염도 잠재적으로 존재할 것으로 파악되었다. 오염물의 표면 오염을 평가하기 위한 핵종별 DCGL을 구하기 위해 Structural surface와 동일한 방법으로 parameter를 확인하였으며 확인된 5개의 parameter는 네 개의 벽면과 바닥이다. 또한, 핵종 별 DCGL 값을 구하기 위해서는 선량환산인자(Radionuclide dose Conversion Factors, RCFs)를 구해야하며 이는 마찬가지로 RESRAD-BUILD ver 3.22를 이용한 확률론적 계산을 수행하여 부지에 존재하는 26개의 핵종 각각에 대해 계산되었다. 핵종 별 DCGL 값은 선량한도(25 mrem/yr)를 DCF로 나누어 구할 수 있다. Structural Surface & Bulk Material에 대한 핵종별 계산된 DCF와 DCGL값은 Rancho Seco D TBD-05-005문서의 Reference 6-20에 제시되었으며 각각 Table 3과 같다.

3. Containment Building Interior Surface

Rancho Seco 부지의 격납 건물은 재사용 계획이 없었고 격납 건물로의 접근은 출입구를 포함, 폐쇄하여 극히 제한적인 상태였다. 이러한 이유들로 산업 작업자 건물 점유 scenario는 현실적이지 않아 산업 작업자 건물 조사 scenario를 격납 건물 내부 표면 DCGL을 계산하는데 사용하였다. 또한 격납 건물이 허가 종료 후 개조 또는 보수의 계획이 없었다 하더라도, 건물의 개조/해체 scenario는 오염된 건물 표면의 DCGL을 도출하는데 가장 제한적인 scenario이므로 NUREG/CR-5512, Vol.1^[10]에서 제시한 바에 따라 사용하였다.

3.1 산업 작업자 건물 조사 scenario

오염된 건물의 최종상태는 불을 밝히거나, 전원을 사용하거나, 환기를 하는 그 어떤 상황도 일어나지 않을 극히 통행이 제한되는 상태가 될 것이었기 때문에

작업자가 건물 내에서 작업을 하는 상황이 아닌 scenario를 사용하였다. DTBD-05-015 문서에서 특성화 조사에 사용되었던 발전소 건물, 보조 건물, 연료와 터빈 건물의 sample조사를 근거로 한 26개의 핵종 중 건물의 주요 선량에 기여하는 핵종 9개를 선별하였다.^[11] 핵종별 D CGL 값은 이전과 마찬가지로 선량한도에 DCF값을 나누어 구하였다. DCFs를 구하기 위한 parameter의 입력값은 Rancho Seco LTP Appendix 6-P에 제시된 대로^[5] RESRAD-BUILD ver 3.3에 입력하여 구하였다. 계산된 결과는 Table 4와 같다.

3.2 격납 건물의 개조/해체 scenario

건물의 개조/해체 scenario는 건물의 면허 종료 후 개조가 시행하는 때에 상관없이 건물 해체 후에 즉각적으로 발생하는, 혹은 그 이전에 추가적인 방사성핵종 붕괴가 일어나는 상황을 평가할 수 있고 작업자가 건물의 개조가 시행되는 당해년도에만 작업에 참여될 것이라는 것을 가정하는 scenario이다.^[10] Scenario의 Dose modeling에 사용한 물리적 parameter는 NUREG/CR-6676의 지침에 따라 계산된 PRCC(Partial Ranked Correlation Coefficient)의 민감성에 근거하여 선택되었다.^[12] 각 방사성핵종에 대한 DCF는 RESRAD-BUILD ver 3.3을 사용하여 앞서 언급된 방법으로 계산되었다.

Table 4. Containment building surface single nuclide DCF and DCGL values for the industrial worker building inspection scenario.

Radionuclide	Dose Conversion Factor (mrem/yr per 100 dpm/100 cm ²)	DCGL (dpm/100 cm ²)
⁶⁰ Co	2.81E-05	8.90E+05
⁹⁰ Sr	1.46E-05	1.71E+06
¹³⁴ Cs	2.38E-05	1.05E+06
¹³⁷ Cs	1.09E-05	2.29E+06
²³⁸ Pu	3.10E-04	8.06E+04
²³⁹ Pu	3.43E-04	7.29E+04
²⁴⁰ Pu	3.43E-04	7.29E+04
²⁴¹ Pu	6.63E-06	3.77E+06
²⁴¹ Am	3.53E-04	7.08E+04

건물의 개조 scenario에서 만약 오염된 건물 표면 방사능이 해체가 진행되는 동안 혼합된다고 하면, DCGL 값은 표면에 존재하는 모든 선원의 방사능을 추정하여 계산되어야 한다. 이 경우 아래의 식을 이용하여 DCG

L 값을 도출 할 수 있다.

$$\frac{10^3 \frac{dpm/g}{DCF_i \text{ mrem}} \times 25 \text{ mrem} \times 2.5 \frac{g}{cm^3}}{\times 1500 \frac{cm^3}{100cm^2}} = DCGL_i \frac{dpm}{100cm^2} \quad (4)$$

26개의 핵종에 대하여 계산에 사용된 DCF 값과 도출된 DCGL 값은 Table 5와 같다.

4. Buried and Embedded Piping

매설배관은 3 feet 이상의 깊이에 존재하는 것으로 확인되었으며 내부 표면이 오염된 매설배관은 허가 종료 후 즉시 해체된다고 가정하여 앞서 유도된 토양 DCGL값을 이용하였다. 매설배관과 매복도관 모두 피폭 선량에 주된 기여 방사성 핵종은 ⁶⁰Co, ¹³⁷Cs로 확인되었으며 방사성핵종 혼합물에서의 존재비는 ⁶⁰Co이 0.167 이며 ¹³⁷Cs이 0.833로 나타났고 이는 부지에서의 감마 spectroscopy로 확인되었다.

매복도관은 대략 5,360 feet 정도가 Rancho Seco 부지에 남게 될 것임을 확인하였으며, scenario의 평가는 다음의 네 가지를 가정하였다.

- Pipe는 향후 해체 시에도 그 자리에 존재 할 것이다.
- 산업작업자의 피폭은 pipe 위에 남아있는 콘크리트 벽 또는 바닥 두께에 의한 광자 감약을 감안한 pipe 내의 잔류 방사능으로부터의 직접적인 감마선 피폭이다.
- 매복도관으로부터의 전신 피폭선량은 pipe가 위치한 지역 또는 방의 바닥 또는 벽의 잔류방사능으로부터의 산업 작업자의 피폭선량과 마찬가지로 고려되어야 한다.
- 표면 DCGL은 연간 선량한도 준수를 확실히 하기위해 매복도관으로부터의 선량분포에 따라 감소되어야 한다.

매복도관에서 방사성핵종 혼합물의 존재비는 53개의 sample(배수시설, 배수조, trench에서 수집)을 감마 spectroscopy로 분석하였고 ⁶⁰Co이 0.161, ¹³⁷Cs이 0.802의 존재비로 나타났다. pipe의 크기와 종류에 따른 DCGL의

도출값은 DTBD-05-009 Attachments 8.4^[13]에서 제시하였다.

Table 5. Containment building surface single nuclide DCF and DCGL values - Renovation/Demolition Scenario.

Radionuclide	Dose Conversion Factor (mrem/yr per 100 dpm/100 cm ²)	DCGL (dpm/100 cm ²)
³ H	7.72E-02	1.21E+09
¹⁴ C	4.62E-01	2.03E+08
²² Na	1.98E+03	4.73E+04
⁵⁵ Fe	1.50E-01	6.25E+08
⁵⁹ Ni	6.64E-02	1.41E+09
⁶⁰ Co	2.33E+03	4.02E+04
⁶³ Ni	1.73E-01	5.42E+08
⁹⁰ Sr	4.67E+01	2.01E+06
⁹⁴ Nb	1.42E+03	6.60E+04
⁹⁹ Tc	3.93E-01	2.39E+08
^{108m} Ag	1.44E+03	6.51E+04
¹²⁵ Sb	3.56E+02	2.63E+05
¹³⁴ Cs	1.40E+03	6.70E+04
¹³⁷ Cs	5.15E+02	1.82E+05
¹⁴⁷ Pm	5.46E-01	1.72E+08
¹⁵² Eu	1.02E+03	9.19E+04
¹⁵⁴ Eu	1.11E+03	8.45E+04
¹⁵⁵ Eu	2.14E+01	4.38E+06
²³⁷ Np	5.48E+03	1.71E+04
²³⁸ Pu	3.86E+03	2.43E+04
²³⁹ Pu	4.23E+03	2.22E+04
²⁴⁰ Pu	4.23E+03	2.22E+04
²⁴¹ Pu	8.14E+01	1.15E+06
²⁴² Pu	4.05E+03	2.31E+04
²⁴¹ Am	4.38E+03	2.14E+04
²⁴⁴ Cm	2.44E+03	3.84E+04

III. CONCLUSION AND CONSIDERATION

본 논문에서는 아직 국내에 법적으로 정해진 구체적인 원전 해체 후 부지 해제 선량기준이 마련되지 않은 실정에 국내 원전 부지 해체에 적용 가능한 기준을 마련

하기 위해 미국 Rancho Seco 원전의 DCGL 설정 과정을 분석해 보았다. 그 과정은 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 부지 내 오염 가능 건물 및 물질의 분류
- 오염물(토양, 건물 및 그 외 오염가능성 있는 물질)의 특성에 따른 scenario 선택
- parameter 선정 및 RESRAD 및 RESRAD-Build 전산 Code를 활용하여 DCGL을 계산

본 연구에 따르면 DCGL을 설정하는 것에는 위에서 정리한 바와 같이 부지의 오염물질이 토양인지, 건물인지, 부속자재들인지에 따라 다른 인자들과 scenario를 사용한다. Rancho Seco 원전의 경우 NUREG 문서를 참고하여 오염물과 상황에 맞는 scenario를 선택하여 MARSSIM에서 제시하는 방법에 따라 DCGL을 계산하였다. 국내의 경우 NUREG, MARSSIM과 같은 기술 문서가 존재하지 않아 사전에 수행되는 부지특성조사나, MARSSIM에서 말하는 HSA(Historical Site Assessment)와 같은 운영 이력을 살펴 국내 원전 부지 특성에 맞는 modeling scenario를 선정하는 것이 중요할 것이다. 또한 본 논문에서는 언급하지 않았지만, Area factor와 같이 DCGL의 계산에 부가적으로 필요한 data들을 계산해야 한다.

미국의 NRC 에서는 무제한적 부지 사용에 관한 부지 해제 기준으로 부지 잔류 방사능에 의한 총 유효선량이 0.25 mSv/y를 초과하지 않으면서 ALARA 수준까지 잔류 방사능을 최소화 하도록 하고 있다.^[14] 선행연구결과 국내에서는 원자력안전위원회 고시에서 무제한적 부지 이용을 위한 국내 부지해제 기준으로 제시한 0.1 mSv/y가 적합한 것으로 예상되어진다고 하였다.^[15] 부지 해제 기준이 정해지면 이를 준수했다는 것을 입증하기 위한 평가 기준이 필요하다. DCGL은 부지에 잔존할 수 있는 방사성 핵종 별 정해지는 최대피폭선량에 해당하는 선량으로 선정시에 원전부지의 특성과 부지 최종상태 평가 이전 수행되었던 폐기물처분이나 제염활동 등 원전 해체 과정에서 진행되는 기술적인 부분들이 고려되어야 할 것이다.^[16] 국내 첫 원전 해체 시점이 다가옴에 따라 미국 뿐만 아니라 원전 해체 사례가 있는 선진국의 원전 해체 기술 문서들과 국내 부지 특성 조사 자료의 적절한 활용, 규제기관과의 협의를 통하여 본문에서 제시한 RES-RAD 전산 Code 외에

도 DCGL을 설정하는데 사용될수 있는 전산 Code들을 적절히 활용하여 국내 실정에 맞는 평가 기준 수립이 필요할 것으로 사료된다.

Acknowledgement

본 연구는 한국 원자력 안전재단의 원자력안전연구 No. 1305009-0214-HD130의 지원과 한국연구재단 원자력연구개발사업 2012M2B2B10055의 지원으로 수행한 연구과제입니다.

Reference

- ber 1992.
- [11] R. Decker. DTBD-05-015, Rancho Seco Nuclear Generating Station Structure Nuclide Fraction and DCGLs, United States Nuclear Regulatory Commission, 2006.
- [12] United States Nuclear Regulatory Commission, NUREG/CR-6676, Volume 1, Probabilistic Dose Analysis Using Parameter Distributions Developed for RESRAD and RESRAD-BUILD Codes, pp. 19-20, May 2000.
- [13] G. Pillsbury. DTBD-05-009, Embedded Piping Scenario and DCGL Determination Basis, NRC, pp. 21-25, November 2005.
- [14] United States Nuclear Regulatory Commission, 10CFR20, Subpart E, Radiological Criteria for License Termination, 2011.
- [15] Y. J. Bae, Y. M. Kim, S. Y. Ahn, C. M. Kim, "An Integrative Review on Domestic Site Release Criteria of Nuclear Power Plant based on the Analysis of Foreign Site Release Criteria," Journal of the Korean Society of Radiology, Vol.9, No.5, pp.269-277, 2015.
- [16] P. Zaho, Y. R. Jeon, Y. Kim, J. S. Lee, and S. Ahn, "A Radionuclides Suite Selection for Site Characterization and Final Status Survey in the U.S. NPPs, Journal of Nuclear Fuel Cycle and Waste Technology, Vol.14, No.3, pp. 267-277, 2016.
- [1] Nuclear Safety and Security Commission, "Nuclear Safety Yearbook", pp. 11, 2014.
- [2] <http://www.khnp.co.kr/content/196/main.do?mnCd=FN050504>.
- [3] Nuclear Safety and Security Commission, "Nuclear Safety Act", 2014.
- [4] United States Nuclear Regulatory Commission, NUREG-1757, Volume 2, Consolidated NMSS Decommissioning Guidance, Characterization, Survey, and Determination of Radiological Criteria, September 2003.
- [5] United States Nuclear Regulatory Commission, Rancho Seco License Termination Plan, Chapter 6, 2006.
- [6] United States Nuclear Regulatory Commission, NUREG/CR-6697, Development of Probabilistic RESRAD 6.0 and RESRAD-BUILD 3.0 Computer Codes, Attachment A, pp. 48, 2000.
- [7] S. Park, "A Study on the Optimization Method for Decommissioning Site Remediation", Graduate School of Kyung Hee University, pp. 35, 2016.
- [8] LEBrown. DTBD-04-001, Revision No.2, Radionuclides for Consideration During Rancho Seco Nuclear Generating Station Characterization or Final Status Surveys, United States Nuclear Regulatory Commission, 2005.
- [9] United States Nuclear Regulatory Commission, NUREG-1575, Revision 1, Multi-Agency Radiation Survey and Site Investigation Manual, pp. 126, August 2000.
- [10] United States Nuclear Regulatory Commission, NUREG/CR-5512, Volume 1, Residual Radioactive Contamination From Decommissioning, pp. 42-50, October 1992.

국내 원전 부지 해제 기준 준수 입증을 위한 미국의 유도농도기준(DCGL) 설정 방법에 대한 분석

전여령,¹ 박상준,² 안석영,² 이종세,³ 김용민^{1,*}

¹대구가톨릭대학교 방사선학과

²부산대학교 기계공학부

³한양대학교 토목공학과

요 약

원전 해체 이후 원전 부지의 제한적 또는 무제한적 이용에 대해서 미국 NRC는 NUREG-1757 문서를 통해 제한적 또는 무제한적 부지 이용에 관한 방사선학적 기준을 제시하였고 사업자가 체염 및 복원 후 이 선량 기준이 충족됨을 증명할 수 있어야만 부지가 제한적 또는 무제한적으로 해제될 수 있다고 하였다. 이와 관련하여 NRC는 운영허가종료계획서(LTP; License Termination Plan)에 방사선학적 부지 해제 기준 준수를 입증하기 위하여 부지 해제 기준, 부지 특성 평가, 최종 방사선 조사 계획에서 주요 방사선원항, 유도농도기준(DCGL) 등을 기재하도록 하고 있다. 이 논문은 국내 원전 해체에 있어서 참조사례가 될 수 있는 Rancho Seco 원전 해체 사례를 참고 및 절차를 분석함으로써 2017년 영구정지가 예정된 고리 1호기뿐만 아니라 향후 해체 원전 부지의 해제 기준 마련에 있어 사용될 수 있는 방법을 검토하였다.

중심단어: 원전해체, Rancho Seco, DCGL, RESRAD