

# A Radionuclides Suite Selection for Site Characterization and Final Status Survey in the U.S. NPPs

## 미국의 원전 해체관련 부지특성 및 최종상태 조사를 위한 방사성 오염 핵종 결정 방법에 대한 분석

Pengfei Zhao<sup>1</sup>, Yeo Ryeong Jeon<sup>2</sup>, Yongmin Kim<sup>2</sup>, Jong Seh Lee<sup>3</sup>, and Seokyoung Ahn<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>*Pusan National University, 2, Busandaehak-ro 63beon-gil, Geumjeong-gu, Busan, Republic of Korea*

<sup>2</sup>*Catholic University of Daegu, 13-13, Hanyang-ro, Hanyang-cup, Gyeongsan-si, Gyeongsangbuk-do, Daegu, Republic of Korea*

<sup>3</sup>*Hanyang University, 222, Wangsimni-ro, Seongdong-gu, Seoul, Republic of Korea*

조봉비<sup>1</sup>, 전여령<sup>2</sup>, 김용민<sup>2</sup>, 이종세<sup>3</sup>, 안석영<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>*부산대학교, 부산광역시 금정구 부산대학로 63번길 2*

<sup>2</sup>*대구가톨릭대학교, 경상북도 경산시 한양읍 한양로 13-13*

<sup>3</sup>*한양대학교, 서울특별시 성동구 왕십리로 222*

(Received April 26, 2016 / Revised July 11, 2016 / Approved July 28, 2016)

For the decommissioning of a nuclear power plant, a site characterization and final status survey require a site-specific suite of radionuclides that could potentially still be present in the site during or after the decontamination processes. The United States Nuclear Regulatory Commission (U.S. NRC) requires a Decommissioning Technical Base Document (DTBD) along with a Site Characterization and Historical Site Assessment (HSA) from the utility for decommissioning to proceed. Both the DTBD and HSA are preliminary components of the Radiological Site Survey investigation process and should be included in the final License Termination Plan (LTP) for site release and reuse consideration from the U.S. NRC and the utility company. This study reviews the United States Nuclear Power Plants (U.S. NPPs) decommissioning cases and is especially focused on the methodologies used for determining a site-specific suite of radionuclides before and during the site characterization and final status surveys. In 2017, Kori-1 will be ready for decommissioning and related preparations are ongoing, this review will help Korea to prepare regulatory guidelines and give technical background for the safe and successful decommissioning of NPPs.

Keywords: Nuclear decommissioning, Radiological site survey, Site characterization, Final status survey, DandD

\* Corresponding Author.

Seokyoung Ahn, Pusan National University, E-mail: [sahn@pusan.ac.kr](mailto:sahn@pusan.ac.kr), Tel: +82-51-510-2471

### ORCID

Seokyoung Ahn <http://orcid.org/0000-0002-6978-7273>

Yongmin Kim <http://orcid.org/0000-0002-0387-119X>

Jong Seh Lee <http://orcid.org/0000-0001-9785-8203>

Pengfei Zhao <http://orcid.org/0000-0001-9069-6950>

Yeo Ryeong Jeon <http://orcid.org/0000-0003-1683-386X>

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited

노후 원전 해체의 경우 부지 특성 및 최종 상태 조사 보고서에 해당 부지내 잔존가능성이 있는 방사성 핵종 정보에 대한 내용을 포함하여야 한다. 미국 NRC의 경우 이에 해당하는 해체기술관련문서(DTBD)를 부지 특성 조사시에 부지이력조사(HSA)와 같이 사업자 측이 제출하도록 규제하고 있다. 또한 해체기술관련문서는 방사선학적 부지 조사와 해체완료계획서에 포함되어야 하는 내용으로써 부지 규제 해제와 재이용에 관해서 중요한 자료를 제공한다. 이 논문은 부지 별 잠재적 핵종에 대해 미국 원전의 해체 사례중 부지 특성 및 최종 상태조사 과정에서 결정하는 방법론을 분석하고 2017년 고리 1호기의 영구 운전정지 후 이루어질 해체 과정에 필수적인 규제 지침과 기술적 근거 수립에 도움이 되고자 한다.

중심단어: 원전해체, 방사선학적 부지조사, 부지특성조사, 최종상태조사, DandD

## 1. 서론

국내 최초 원전인 고리 1호기는 2017년 영구 운전정지를 앞두고 있으며 규제 기관과 운영자 측은 원전 해체에 대한 준비를 진행중에 있다. 특히 원전 부지의 규제 해제와 무제한 또는 제한적 재이용을 앞두고 부지 규제 해제기준에 대해서 규제기관에서 고시안이 준비되고 있다[1]. 본 연구는 부지해제기준이 마련되는 경우 부지 해제 기준을 만족하는지 해체 사업자(국내의 경우 운영자)가 부지해제기준의 만족 여부를 증빙하기 위해서 규제기관에 제시해야 할 기술적 근거와 규제기관이 조사 및 검토할 내용 중, 부지 별 잔존 핵종 선택과 관련된 기술적 배경에 대해 미국의 해체 원전 사례를 중심으로 분석하고 국내에 적합한 방법론에 대해서 기술하였다.

최종상태조사에서 잠재적으로 존재가 가능한 방사성 핵종에 대한 결정은 부지 별(Site-specific) 유도농도기준(Derived Concentration Guideline Levels, DCGLs)을 구하기 위해서 반드시 필요한 절차이며 부지의 피폭 선량 기준 방사선학적 상태를 구하는데 필수 정보이다. 핵종 선별은 시스템적인 접근법을 이용하여 위협적인 잔존 핵종은 찾아내고 무시할 만한 농도의 잔존 핵종은 제외하여야 한다. 잠재적인 핵종 목록을 결정하기 위한 방법론에 대해서 미국 NRC의 규제 지침서(NUREG series)는 원전 해체시 부지 제어 및 복원후 부지내 잔존 물질에 대한 잠재 가능 핵종 프로파일의 필수적이라고 명기하고 구성성분이나 운영이력에 따른 방사화의 가능성도 고려하도록 하고 있다. 다양한 형태의 오염이 가능함으로 규제기관은 일률적인 잠재가능 핵종 프로파일보다는 각 해체 부지 별 최종상태조사시 잔존할 것으로 예측되는

핵종들에 대한 고려를 하도록 권고하고 기술적 고려사항과 제한 사항 등에 대해서는 장수명 핵종의 경우 NUREG/CR-3474 [2], 미국내 7개 원전의 실제 핵종조사를 근거로 한 2년 이상의 반감기를 가진 핵종의 경우 NUREG/CR-4289 [3], 그리고 추가로 가압경수로(PWR)관련 핵종 정보를 조사한 NUREG-0130 [4] 등을 참고하도록 하고 있다 [5].

## 2. 부지특성조사 및 최종상태조사시 핵종 선별에 관한 방법론

### 2.1 잠재적 핵종을 추가하는 방법

해체 부지 내에 잠재적으로 존재하는 핵종을 규정하는 방법은 앞에서 언급된 문헌들에서 참조가능하다[2-5]. 하지만 단순히 참고문헌에 근거한 잠재적 핵종목록은 부지 별 유도농도 기준(DCGLs)을 구하는데 바로 사용될 수 없다. 이 절 후반에서 설명할 추가적인 기술적 검토가 필요하다.

먼저 NUREG/CR-3474는 해체시 압력용기 제작에 사용된 재료, 각종 스테인레스강, 콘크리트등 총 52개 재료들에 존재 가능한 장수명 핵종들에 관한 기본 정보를 제공한다. 원자로 내부, 압력용기 및 생물학적 차폐벽 등의 방사학적 조사 자료를 근거로 작성되었으며 NUREG/CR-3474의 내용을 기반으로 잠재적 핵종 초기 목록을 작성할 수 있다. 이 목록은 일반적으로 반감기가 2년 이상 되는 핵종만 고려하고 있으며 보통 해체가 완료되는 시점이 운영 종료 후 최소 5년에서 10년 이상이므로 합리적인 판단으로 사료된다 (Table 1 참조).

Table 1. NUREG/CR-3474 Identified Activation Product Radionuclides [3]

Radionuclide	Half Life (Years)	Radionuclide	Half Life (Years)	Radionuclide	Half Life (Years)
<sup>108m</sup> Ag	4.18×10 <sup>2</sup>	<sup>154</sup> Eu	8.59×10 <sup>0</sup>	<sup>63</sup> Ni	1.00×10 <sup>2</sup>
<sup>110m</sup> Ag	6.84×10 <sup>1</sup>	<sup>155</sup> Eu	4.76×10 <sup>0</sup>	<sup>205</sup> Pb	1.51×10 <sup>7</sup>
<sup>39</sup> Ar	2.69×10 <sup>2</sup>	<sup>55</sup> Fe	2.70×10 <sup>0</sup>	<sup>145</sup> Pm	1.77×10 <sup>1</sup>
<sup>133</sup> Ba	1.05×10 <sup>1</sup>	<sup>59</sup> Fe	1.22×10 <sup>-1</sup>	<sup>239</sup> Pu	2.41×10 <sup>4</sup>
<sup>14</sup> C	5.73×10 <sup>3</sup>	<sup>3</sup> H	1.23×10 <sup>1</sup>	<sup>124</sup> Sb	1.65×10 <sup>-1</sup>
<sup>41</sup> Ca	1.03×10 <sup>5</sup>	<sup>178m</sup> Hf	3.00×10 <sup>1</sup>	<sup>46</sup> Sc	2.29×10 <sup>-1</sup>
<sup>141</sup> Ce	8.90×10 <sup>-2</sup>	<sup>166</sup> Ho	1.20×10 <sup>3</sup>	<sup>79</sup> Se	1.13×10 <sup>6</sup>
<sup>36</sup> Cl	3.01×10 <sup>5</sup>	<sup>129</sup> I	1.57×10 <sup>7</sup>	<sup>146</sup> Sm	1.00×10 <sup>8</sup>
<sup>58</sup> Co	1.94×10 <sup>-1</sup>	<sup>81</sup> Kr	2.29×10 <sup>5</sup>	<sup>151</sup> Sm	9.30×10 <sup>1</sup>
<sup>60</sup> Co	5.27×10 <sup>0</sup>	<sup>85</sup> Kr	1.07×10 <sup>1</sup>	<sup>121m</sup> Sn	5.00×10 <sup>0</sup>
<sup>51</sup> Cr	7.58×10 <sup>-2</sup>	<sup>53</sup> Mn	3.70×10 <sup>6</sup>	<sup>90</sup> Sr	2.86×10 <sup>1</sup>
<sup>134</sup> Cs	2.06×10 <sup>0</sup>	<sup>54</sup> Mn	8.56×10 <sup>-1</sup>	<sup>158</sup> Tb	1.80×10 <sup>2</sup>
<sup>135</sup> Cs	2.30×10 <sup>6</sup>	<sup>93</sup> Mo	3.50×10 <sup>3</sup>	<sup>99</sup> Tc	2.13×10 <sup>5</sup>
<sup>137</sup> Cs	3.02×10 <sup>1</sup>	<sup>92m</sup> Nb	2.78×10 <sup>-2</sup>	<sup>233</sup> U	1.59×10 <sup>5</sup>
<sup>152</sup> Eu	1.36×10 <sup>1</sup>	<sup>94</sup> Nb	2.03×10 <sup>4</sup>	<sup>65</sup> Zn	6.69×10 <sup>-1</sup>
		<sup>59</sup> Ni	7.50×10 <sup>4</sup>	<sup>93</sup> Zr	1.53×10 <sup>6</sup>

Table 2. Radionuclides Identified in NUREG/CR-4289 [5]

Radionuclide	Half Life (Years)	Radionuclide	Half Life (Years)	Radionuclide	Half Life (Years)
<sup>241</sup> Am	4.32×10 <sup>2</sup>	<sup>154</sup> Eu	8.80×10 <sup>0</sup>	<sup>237</sup> Np	2.14×10 <sup>6</sup>
<sup>14</sup> C	5.73×10 <sup>3</sup>	<sup>3</sup> H	1.23×10 <sup>1</sup>	<sup>238</sup> Pu	8.78×10 <sup>1</sup>
<sup>244</sup> Cm	1.81×10 <sup>1</sup>	<sup>129</sup> I	1.57×10 <sup>7</sup>	<sup>239</sup> Pu	2.41×10 <sup>4</sup>
<sup>60</sup> Co	5.27×10 <sup>0</sup>	<sup>94</sup> Nb	2.03×10 <sup>4</sup>	<sup>240</sup> Pu	6.60×10 <sup>3</sup>
<sup>137</sup> Cs	3.02×10 <sup>1</sup>	<sup>59</sup> Ni	7.50×10 <sup>4</sup>	<sup>90</sup> Sr	2.86×10 <sup>1</sup>
<sup>152</sup> Eu	1.36×10 <sup>1</sup>	<sup>63</sup> Ni	1.00×10 <sup>2</sup>	<sup>99</sup> Tc	2.13×10 <sup>5</sup>

또한 2년 이상의 반감기를 가진 잠재적 핵종에 관한 추가 정보는 NUREG/CR-4289에서 참조가능하다[3]. NUREG/CR-4289는 1992년 미국내 운영 종료된 원전4기, 운영 중인 원전3기, 총 7기의 상업용 경수로 원전에 대한 핵종의 농도, 분포 그리고 종류에 대한 데이터 베이스를 제공한다.

특히 압력용기 에서 그 외 다른 시스템으로 핵종이 이동되는 경로에 관한 정보 제공 및 장수명 핵종의 저준위 폐기물 처분 및 운영에 관한 관점에서 유용하게 사용된다. 미국 NRC는 이 자료를 바탕으로 잠재적 해체 대상 원전의 해체 정책, 전략 그리고 가이드라인을 도출하였다. NUREG/CR-4289는

Table 3. Radionuclides Identified in NUREG/CR-0130 Vol.1 [4]

Radionuclide	Half-life (days)	Radionuclide	Half-life (days)	Radionuclide	Half-life (days)
<sup>3</sup> H	4.5×10 <sup>3</sup>	<sup>90</sup> Sr	1.0×10 <sup>4</sup>	<sup>131</sup> I	8.0×10 <sup>0</sup>
<sup>51</sup> Cr	2.8×10 <sup>1</sup>	<sup>90</sup> Y	2.7×10 <sup>0</sup>	<sup>134</sup> Cs	7.5×10 <sup>2</sup>
<sup>54</sup> Mn	3.0×10 <sup>2</sup>	<sup>91</sup> Y	5.9×10 <sup>1</sup>	<sup>136</sup> Cs	1.4×10 <sup>1</sup>
<sup>55</sup> Fe	9.5×10 <sup>2</sup>	<sup>95</sup> Zr	6.5×10 <sup>1</sup>	<sup>137</sup> Cs	1.1×10 <sup>4</sup>
<sup>59</sup> Fe	4.5×10 <sup>1</sup>	<sup>95</sup> Nb	3.5×10 <sup>1</sup>	<sup>140</sup> Ba	1.3×10 <sup>1</sup>
<sup>58</sup> Co	7.2×10 <sup>1</sup>	<sup>103</sup> Ru	4.0×10 <sup>1</sup>	<sup>140</sup> La	1.7×10 <sup>0</sup>
<sup>60</sup> Co	1.9×10 <sup>3</sup>	<sup>106</sup> Ru	3.7×10 <sup>2</sup>	<sup>141</sup> Ce	3.2×10 <sup>1</sup>
<sup>86</sup> Rb	1.9×10 <sup>1</sup>	<sup>125m</sup> Te	5.8×10 <sup>1</sup>	<sup>144</sup> Ce	1.4×10 <sup>1</sup>
<sup>89</sup> Sr	5.3×10 <sup>1</sup>	<sup>129m</sup> Te	3.4×10 <sup>1</sup>	<sup>143</sup> Pr	1.4×10 <sup>1</sup>

Table 4. Radionuclides Potentially Present at RSNGS [7]

Radionuclide	Half Life (Years)	Radionuclide	Half Life (Years)	Radionuclide	Half Life (Years)
* <sup>3</sup> H	1.23×10 <sup>1</sup>	* <sup>93m</sup> Nb	1.46×10 <sup>1</sup>	<sup>158</sup> Tb	1.50×10 <sup>2</sup>
* <sup>14</sup> C	5.73×10 <sup>3</sup>	<sup>94</sup> Nb	2.03×10 <sup>4</sup>	<sup>166m</sup> Ho	1.20×10 <sup>3</sup>
<sup>22</sup> Na	2.60×10 <sup>0</sup>	* <sup>99</sup> Tc	2.13×10 <sup>5</sup>	* <sup>178m</sup> Hf	3.00×10 <sup>1</sup>
* <sup>36</sup> Cl	3.01×10 <sup>5</sup>	<sup>108m</sup> Ag	1.27×10 <sup>2</sup>	* <sup>205</sup> Pb	1.51×10 <sup>7</sup>
* <sup>39</sup> Ar	2.69×10 <sup>2</sup>	* <sup>121m</sup> Sn	5.00×10 <sup>0</sup>	* <sup>233</sup> U	1.59×10 <sup>5</sup>
<sup>40</sup> K	1.28×10 <sup>9</sup>	<sup>125</sup> Sb	2.77×10 <sup>0</sup>	* <sup>234</sup> U	2.45×10 <sup>5</sup>
* <sup>41</sup> Ca	1.03×10 <sup>5</sup>	* <sup>129</sup> I	1.57×10 <sup>7</sup>	<sup>235</sup> U	7.04×10 <sup>8</sup>
* <sup>53</sup> Mn	3.70×10 <sup>6</sup>	<sup>133</sup> Ba	1.05×10 <sup>1</sup>	* <sup>236</sup> U	2.34×10 <sup>7</sup>
* <sup>55</sup> Fe	2.70×10 <sup>0</sup>	<sup>134</sup> Cs	2.06×10 <sup>0</sup>	* <sup>238</sup> U	4.47×10 <sup>9</sup>
* <sup>59</sup> Ni	7.50×10 <sup>4</sup>	* <sup>135</sup> Cs	2.30×10 <sup>6</sup>	* <sup>237</sup> Np	2.14×10 <sup>6</sup>
<sup>60</sup> Co	5.27×10 <sup>0</sup>	<sup>137</sup> Cs	3.02×10 <sup>1</sup>	* <sup>238</sup> Pu	8.78×10 <sup>1</sup>
* <sup>63</sup> Ni	1.00×10 <sup>2</sup>	<sup>145</sup> Pm	1.77×10 <sup>1</sup>	* <sup>239</sup> Pu	2.41×10 <sup>4</sup>
* <sup>79</sup> Se	6.50×10 <sup>4</sup>	* <sup>146</sup> Sm	1.00×10 <sup>8</sup>	* <sup>240</sup> Pu	6.60×10 <sup>3</sup>
<sup>81</sup> Kr	2.10×10 <sup>5</sup>	* <sup>147</sup> Pm	2.62×10 <sup>0</sup>	* <sup>241</sup> Pu	1.44×10 <sup>1</sup>
<sup>85</sup> Kr	1.07×10 <sup>1</sup>	* <sup>151</sup> Sm	9.30×10 <sup>1</sup>	<sup>241</sup> Am	4.32×10 <sup>2</sup>
* <sup>90</sup> Sr	2.86×10 <sup>1</sup>	<sup>152</sup> Eu	1.36×10 <sup>1</sup>	<sup>243</sup> Am	7.38×10 <sup>3</sup>
* <sup>90</sup> Zr	1.53×10 <sup>6</sup>	<sup>154</sup> Eu	8.80×10 <sup>0</sup>	<sup>243</sup> Cm	2.85×10 <sup>1</sup>
* <sup>93</sup> Mo	3.50×10 <sup>0</sup>	<sup>155</sup> Eu	4.96×10 <sup>0</sup>	* <sup>244</sup> Cm	1.81×10 <sup>1</sup>

\*Hard to Detect Nuclides (HTDN - radionuclides not readily detected by gamma spectroscopy, e.g., Ni-63 or Cm-244, and requiring offsite, contract laboratory analysis)

일반적으로 NUREG/CR-3474와 같이 참조되며 어떤 핵종이 NUREG/CR-3474에는 언급되지 않았지만 NUREG/CR-4289에 언급되었다면 그 핵종 또한 최종 잠재 목록에 추가해야 한다. Table 2에 NUREG/CR-4289를 참조하여 추가되는 핵종을 나타내었다. 초기 목록에 NUREG/CR-4289에서 언급된 모든 핵종을 추가하여 핵종 목록을 갱신한다[3].

그 외 NUREG/CR-0130 Vol. 1에서 2년 이상의 장수명 핵종에 대한 정보를 토대로 목록에 추가가 가능하며 위에서 언급한 2개의 문서와 비교참조되어야 한다 (Table 3 참조). NUREG/CR-0130 Vol. 1은 PWR해체에 대한 기술, 안전 그리고 비용에 대한 원형 모델을 제시하고 있다. PWR의 운영 시 계통 내에 발생하는 핵종 조사에 대한 결과를 참조하여 NUREG/CR-3474 그리고 NUREG/CR-4289에서 누락된 핵종이 있다면 잠재적 핵종 목록에 추가 하여야 한다[4].

최종적으로 미국 Oak Ridge 국립연구소에서 개발된 방사성 물질의 생성, 붕괴, 처리과정을 시뮬레이션 할 수 있는 ORIGEN 방사화 계산 코드를 사용하여 핵종이 추가될 수 있다. 부지이력조사(HSA)의 운영이력에 근거하여 ORIGEN 코드를 실행하고 결과에서 누락된 핵종이 있다면 잠재적 핵종 목록에 추가한다 (Rancho Seco의 경우, 6번 연료다발의 4~7 주기까지의 연소이력, 붕괴기간 13.64년을 기준으로 하였다. 그 결과로  $^{147}\text{Pm}$ ,  $^{241}\text{Pu}$ ,  $^{243}\text{Am}$ , 그리고  $^{243}\text{Cm}$  이 추가되었다). 또한 부지이력조사(HSA)에 포함되어야 하는 사고관련 기록등에서 언급되는 핵종을 추가 가능하다.

위의 NUREG 참조문서나 ORIGEN 코드에 빠져있는 핵종으로는  $^{234}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{236}\text{U}$  그리고  $^{238}\text{U}$ 등이 추가로 잠재적 핵종 목록에 추가될 수 있는데 NCRP Report No.58에 의하면 핵연료에서 위의 핵종들이 검출되었기 때문이다[6].

## 2.2 잠재적 핵종 목록에서 중요하지 않은 핵종을 제외시키는 방법

앞서 언급한 모든 NUREG 규제지침서, ORIGEN 코드, NCRP Report No.58, HSA을 근거로 하여 작성된 잠재적 핵종 목록에는 많은 미량 원소들이 포함되어 있고 그들의 중요성은 전체 핵종에 대한 방사화 량의 정량적 비교를 통하여 중요하지 않은 핵종들은 제거가 가능하다. Table 4는 Rancho Seco 참조원전의 경우 2.1의 방법론을 토대로 작성된 이론적 잠재 핵종 목록(총 54종)이다.

방사화된 재료에 대한 분석을 통한 핵종 제외법은 전체 핵종에서 각각 핵종이 차지하는 방사능과 분율을 NUREG/CR-3474를 참조하여 계산한 결과를 사용하는 것이다. Table 5는 Humboldt Bay 원전 해체기술 배경서에서 0.1% 미만 핵종을 계산한 결과표이다[10].

사용후 핵연료와 관련된 ORIGEN 코드 해석 결과를 이용한 핵종 제외법은 실제로는 발견되지 않을 미량원소들을 포함하고 있을 수 있다. 그러므로 최종 핵종 목록과 각 핵종의 상대적 기여도가 실행시 고려되어야 한다. Table 6은 Ranch Seco 참조원전에서 ORIGEN 코드를 사용해서 계산한 전체 핵종에서 각각 핵종이 차지하는 방사능과 분율(%)을 나타내었다.

## 2.3 잠재적 제외핵종의 선량에 대한 고려

앞에서 언급한 방사화물질에 대한 고려(NUREG 핵종), 사용후 핵연료 핵종(ORIGEN 핵종)에 대한 고려를 바탕으로 전체 선량 기여도가 0.1%미만을 차지하는 핵종의 경우 잠재적 핵종에서 제외되기 위해서는 관련 핵종이 기여하는 선량의 합이 주민 선량과 종사자 선량 (Residential and Occupancy) 시나리오에서 전체 선량에 대한 기여도가 1%를 넘지 않음을 증명하여야 한다. 중요하지 않은 핵종들이 기여하는 총 선량이 전체 선량에 대한 기여도가 10% 미만일 경우 무시 가능하다고 권고하고 있지만 자료의 불확실성등을 고려하여 미국의 해체 사업자는 1% 기준을 적용하고 있다 [5]. Humboldt Bay 원전의 경우 선량이 0.1%를 넘지 않는 잠재적 제외 핵종들의 전체선량에 대한 기여도는 0.007%이었다 (Table 5 참조). 다음은Rancho Seco 참조원전의 경우, 선량이 0.1%를 넘지 않는 핵종들을 나타내었다.

$^{36}\text{Cl}$	$^{39}\text{Ar}$	$^{41}\text{Ca}$	$^{53}\text{Mn}$	$^{79}\text{Se}$	$^{81}\text{Kr}$
$^{85}\text{Kr}$	$^{93}\text{Zr}$	$^{93}\text{Mo}$	$^{121\text{m}}\text{Sn}$	$^{129}\text{I}$	$^{133}\text{Ba}$
$^{135}\text{Cs}$	$^{145}\text{Pm}$	$^{146}\text{Sm}$	$^{151}\text{Sm}$	$^{158}\text{Tb}$	$^{166\text{m}}\text{Ho}$
$^{178\text{m}}\text{Hf}$	$^{205}\text{Pb}$	$^{235}\text{U}$	$^{243}\text{Am}$	$^{243}\text{Cm}$	

선량 비율이 0.1% 미만이지만 어떤 핵종들은 계속 잠재적 핵종 목록에 남게 되는 경우가 생기는데, 10 CFR Part 61의 폐기물 특성 분석(Waste Stream Analyses)이나 부지 특성 조사 샘플에서 원자로 외에서도 다른 방법으로 검출이 되는

Table 5. Evaluation of NUREG/CR-3474 Total Activity Fractions (decayed to Sep.1 2019) [10]

Radionuclide	Shroud	Vessel Cladding	Vessel Walls	Total Activity	Total Fractions	Less Than 0.1%?
<sup>108m</sup> Ag	1.76×10 <sup>-1</sup>	7.26×10 <sup>-6</sup>	6.30×10 <sup>-5</sup>	1.76×10 <sup>-1</sup>	2.74×10 <sup>-6</sup>	Yes
<sup>39</sup> Ar	2.41×10 <sup>-1</sup>	2.71×10 <sup>-5</sup>	9.94×10 <sup>-4</sup>	2.42×10 <sup>-1</sup>	3.77×10 <sup>-6</sup>	Yes
<sup>133</sup> Ba	7.49×10 <sup>-1</sup>	2.62×10 <sup>-5</sup>	1.65×10 <sup>-4</sup>	7.50×10 <sup>-1</sup>	1.17×10 <sup>-5</sup>	Yes
<sup>14</sup> C	1.03×10 <sup>2</sup>	2.79×10 <sup>-3</sup>	1.19×10 <sup>-2</sup>	1.03×10 <sup>2</sup>	1.59×10 <sup>-3</sup>	No
<sup>41</sup> Ca	2.00×10 <sup>-2</sup>	5.20×10 <sup>-7</sup>	2.00×10 <sup>-6</sup>	2.00×10 <sup>-2</sup>	3.11×10 <sup>-7</sup>	Yes
<sup>36</sup> Cl	2.24×10 <sup>0</sup>	5.70×10 <sup>-5</sup>	1.43×10 <sup>-4</sup>	2.24×10 <sup>0</sup>	3.48×10 <sup>-5</sup>	Yes
<sup>60</sup> Co	2.58×10 <sup>3</sup>	7.90×10 <sup>-2</sup>	5.47×10 <sup>-1</sup>	2.58×10 <sup>3</sup>	4.01×10 <sup>-2</sup>	No
<sup>134</sup> Cs	6.19×10 <sup>-5</sup>	1.80×10 <sup>-9</sup>	6.43×10 <sup>-9</sup>	6.20×10 <sup>-5</sup>	9.63×10 <sup>-10</sup>	Yes
<sup>135</sup> Cs	3.80×10 <sup>-4</sup>	3.67×10 <sup>-10</sup>	2.46×10 <sup>-9</sup>	3.80×10 <sup>-4</sup>	5.91×10 <sup>-9</sup>	Yes
<sup>137</sup> Cs	8.57×10 <sup>-1</sup>	8.12×10 <sup>-6</sup>	5.61×10 <sup>-5</sup>	8.57×10 <sup>-1</sup>	1.33×10 <sup>-5</sup>	Yes*
<sup>152</sup> Eu	4.18×10 <sup>-8</sup>	5.21×10 <sup>-4</sup>	2.30×10 <sup>-3</sup>	2.82×10 <sup>-3</sup>	4.39×10 <sup>-8</sup>	Yes*
<sup>154</sup> Eu	5.82×10 <sup>-1</sup>	2.09×10 <sup>-5</sup>	2.04×10 <sup>-4</sup>	5.82×10 <sup>-1</sup>	9.05×10 <sup>-6</sup>	Yes*
<sup>155</sup> Eu	2.10×10 <sup>-2</sup>	7.05×10 <sup>-8</sup>	7.80×10 <sup>-7</sup>	2.10×10 <sup>-2</sup>	3.26×10 <sup>-7</sup>	Yes
<sup>55</sup> Fe	3.91×10 <sup>1</sup>	9.93×10 <sup>-4</sup>	4.80×10 <sup>-3</sup>	3.91×10 <sup>1</sup>	6.08×10 <sup>-4</sup>	Yes
<sup>3</sup> H	2.00×10 <sup>1</sup>	1.53×10 <sup>-3</sup>	6.68×10 <sup>-3</sup>	2.00×10 <sup>1</sup>	3.12×10 <sup>-4</sup>	Yes*
<sup>178m</sup> Hf	2.10×10 <sup>-1</sup>	1.74×10 <sup>-5</sup>	2.86×10 <sup>-4</sup>	2.10×10 <sup>-1</sup>	3.27×10 <sup>-6</sup>	Yes
<sup>166m</sup> Ho	3.84×10 <sup>-1</sup>	1.08×10 <sup>-5</sup>	1.55×10 <sup>-4</sup>	3.84×10 <sup>-1</sup>	5.98×10 <sup>-6</sup>	Yes
<sup>129</sup> I	5.90×10 <sup>-7</sup>	4.40×10 <sup>-12</sup>	1.88×10 <sup>-12</sup>	5.90×10 <sup>-7</sup>	9.18×10 <sup>-12</sup>	Yes
<sup>81</sup> Kr	2.24×10 <sup>-4</sup>	5.40×10 <sup>-12</sup>	3.04×10 <sup>-11</sup>	2.24×10 <sup>-4</sup>	3.48×10 <sup>-9</sup>	Yes
<sup>85</sup> Kr	6.41×10 <sup>-2</sup>	3.93×10 <sup>-7</sup>	1.73×10 <sup>-6</sup>	6.41×10 <sup>-2</sup>	9.97×10 <sup>-7</sup>	Yes
<sup>53</sup> Mn	6.50×10 <sup>-3</sup>	8.00×10 <sup>-7</sup>	1.00×10 <sup>-5</sup>	6.51×10 <sup>-3</sup>	1.01×10 <sup>-7</sup>	Yes
<sup>54</sup> Mn	1.84×10 <sup>-10</sup>	1.79×10 <sup>-14</sup>	2.00×10 <sup>-13</sup>	1.84×10 <sup>-10</sup>	2.87×10 <sup>-15</sup>	Yes
<sup>93</sup> Mo	4.55×10 <sup>-4</sup>	1.85×10 <sup>-8</sup>	3.35×10 <sup>-7</sup>	4.55×10 <sup>-4</sup>	7.07×10 <sup>-9</sup>	Yes
<sup>92m</sup> Nb	6.33×10 <sup>-7</sup>	2.20×10 <sup>-10</sup>	2.90×10 <sup>-9</sup>	6.36×10 <sup>-7</sup>	9.89×10 <sup>-12</sup>	Yes
<sup>94</sup> Nb	8.85×10 <sup>-1</sup>	2.80×10 <sup>-5</sup>	7.19×10 <sup>-5</sup>	8.85×10 <sup>-1</sup>	1.38×10 <sup>-5</sup>	Yes*
<sup>59</sup> Ni	6.04×10 <sup>2</sup>	1.80×10 <sup>-2</sup>	8.00×10 <sup>-2</sup>	6.04×10 <sup>2</sup>	9.39×10 <sup>-3</sup>	No
<sup>63</sup> Ni	6.09×10 <sup>4</sup>	1.75×10 <sup>0</sup>	7.28×10 <sup>0</sup>	6.10×10 <sup>4</sup>	9.48×10 <sup>-1</sup>	No
<sup>205</sup> Pb	4.00×10 <sup>-6</sup>	2.58×10 <sup>-10</sup>	3.04×10 <sup>-9</sup>	4.00×10 <sup>-6</sup>	6.23×10 <sup>-11</sup>	Yes
<sup>145</sup> Pm	9.46×10 <sup>-4</sup>	2.80×10 <sup>-8</sup>	2.02×10 <sup>-8</sup>	9.46×10 <sup>-4</sup>	1.47×10 <sup>-8</sup>	Yes
<sup>239</sup> Pu	3.80×10 <sup>-2</sup>	3.00×10 <sup>-6</sup>	6.79×10 <sup>-5</sup>	3.80×10 <sup>-2</sup>	5.91×10 <sup>-7</sup>	Yes*
<sup>79</sup> Se	1.40×10 <sup>-3</sup>	9.80×10 <sup>-8</sup>	1.00×10 <sup>-6</sup>	1.40×10 <sup>-3</sup>	2.18×10 <sup>-8</sup>	Yes
<sup>146</sup> Sm	4.07×10 <sup>-10</sup>	4.50×10 <sup>-14</sup>	6.20×10 <sup>-13</sup>	4.08×10 <sup>-10</sup>	6.34×10 <sup>-15</sup>	Yes
<sup>151</sup> Sm	3.96×10 <sup>-2</sup>	1.34×10 <sup>-5</sup>	1.08×10 <sup>-4</sup>	3.97×10 <sup>-2</sup>	6.17×10 <sup>-7</sup>	Yes
<sup>121m</sup> Sn	4.64×10 <sup>-5</sup>	4.33×10 <sup>-9</sup>	6.07×10 <sup>-8</sup>	4.64×10 <sup>-5</sup>	7.22×10 <sup>-10</sup>	Yes
<sup>90</sup> Sr	8.15×10 <sup>-1</sup>	5.41×10 <sup>-6</sup>	2.36×10 <sup>-5</sup>	8.15×10 <sup>-1</sup>	1.27×10 <sup>-5</sup>	Yes*
<sup>158</sup> Tb	4.42×10 <sup>-3</sup>	5.26×10 <sup>-7</sup>	6.67×10 <sup>-6</sup>	4.43×10 <sup>-3</sup>	6.89×10 <sup>-8</sup>	Yes
<sup>99</sup> Tc	2.10×10 <sup>-1</sup>	9.00×10 <sup>-6</sup>	1.59×10 <sup>-4</sup>	2.10×10 <sup>-1</sup>	3.27×10 <sup>-6</sup>	Yes*
<sup>233</sup> U	2.25×10 <sup>-3</sup>	1.30×10 <sup>-7</sup>	2.00×10 <sup>-6</sup>	2.25×10 <sup>-3</sup>	3.50×10 <sup>-8</sup>	Yes
<sup>65</sup> Zn	3.38×10 <sup>-15</sup>	8.94×10 <sup>-20</sup>	6.33×10 <sup>-20</sup>	3.38×10 <sup>-15</sup>	5.26×10 <sup>-20</sup>	Yes
<sup>93</sup> Zr	1.41×10 <sup>-4</sup>	6.90×10 <sup>-9</sup>	8.10×10 <sup>-8</sup>	1.41×10 <sup>-4</sup>	2.19×10 <sup>-9</sup>	Yes
Total	6.43×10 <sup>4</sup>	1.86×10 <sup>0</sup>	7.93×10 <sup>0</sup>	6.43×10 <sup>4</sup>	1.00×10 <sup>0</sup>	
Total percent of activity discounted					6.73×10 <sup>-4</sup>	

\*Radionuclides meet the criteria of contributing less than 0.1 percent of the total activity but cannot be discounted because they have other methods of production in addition to activation of reactor components and/or have been observed in 10 CFR Part 61 waste stream analyses or site characterization samples.

Table 6. Evaluation of ORIGEN Computer Code Total Activity Fractions (Radionuclides to be discounted appear in bold font.) [7]

Radionuclide	Activity (Ci)	Percent Total	Radionuclide	Activity (Ci)	Percent Total
<sup>3</sup> H	9.37×10 <sup>1</sup>	4.30×10 <sup>-2</sup>	<sup>154</sup> Eu	3.31×10 <sup>3</sup>	1.52×10 <sup>0</sup>
<sup>55</sup> Fe	1.14×10 <sup>3</sup>	5.25×10 <sup>-1</sup>	<sup>155</sup> Eu	1.48×10 <sup>3</sup>	6.81×10 <sup>-1</sup>
<sup>60</sup> Co	2.20×10 <sup>3</sup>	1.01×10 <sup>0</sup>	<sup>238</sup> Pu	1.75×10 <sup>3</sup>	8.01×10 <sup>-1</sup>
<sup>59</sup> Ni	3.20×10 <sup>0</sup>	1.47×10 <sup>-3</sup>	<sup>239</sup> Pu	1.46×10 <sup>2</sup>	6.68×10 <sup>-2</sup>
<sup>63</sup> Ni	4.12×10 <sup>2</sup>	1.89×10 <sup>-1</sup>	<sup>240</sup> Pu	2.51×10 <sup>2</sup>	1.15×10 <sup>-1</sup>
<sup>90</sup> Sr	5.62×10 <sup>4</sup>	1.29×10 <sup>1</sup>	<sup>241</sup> Pu	4.59×10 <sup>4</sup>	2.11×10 <sup>1</sup>
<sup>125</sup> Sb	1.33×10 <sup>3</sup>	6.11×10 <sup>-1</sup>	<sup>241</sup> Am	5.51×10 <sup>2</sup>	2.53×10 <sup>-1</sup>
<sup>134</sup> Cs	1.03×10 <sup>4</sup>	4.71×10 <sup>0</sup>	<b><sup>243</sup>Am</b>	8.78×10 <sup>0</sup>	4.03×10 <sup>-3</sup>
<sup>137</sup> Cs	7.96×10 <sup>4</sup>	3.66×10 <sup>1</sup>	<b><sup>243</sup>Cm</b>	1.97×10 <sup>1</sup>	9.04×10 <sup>-3</sup>
<sup>147</sup> Pm	1.22×10 <sup>4</sup>	5.60×10 <sup>0</sup>	<sup>244</sup> Cm	8.40×10 <sup>2</sup>	3.86×10 <sup>-1</sup>
<b><sup>151</sup>Sm</b>	1.55×10 <sup>2</sup>	7.10×10 <sup>-2</sup>			
Totals				2.18×10 <sup>5</sup>	1.00×10 <sup>2</sup>
Total percent of activity discounted					8.41×10 <sup>-2</sup>

핵종의 경우이며, Rancho Seco 참조 원전의 경우, <sup>3</sup>H, <sup>14</sup>C, <sup>94</sup>Nb, <sup>108m</sup>Ag, <sup>152</sup>Eu, <sup>239</sup>Pu 등이 추가 되었다. Humboldt Bay 참조 원전의 경우 1983년 운전 정지후 해체완료까지의 기간 (2016년 예정이었으나 이후 2019년으로 수정)을 고려하여 반감기 5.4년 이하의 핵종은 NUREG/CR-4289의 참조목록에서 제외하였는데, <sup>60</sup>Co은 예외로 하였다. <sup>60</sup>Co의 반감기는 5.27년이고 2006년 9월 1일 작성된 Humboldt Bay HSA 보고서의 <sup>60</sup>Co 방사능량은 672.3 Ci, 해체가 완료되는 시점인 2019년에는 121 Ci 로 무시하지 못할 정도의 방사능량으로 예상되어 <sup>60</sup>Co은 반감기에 따른 핵종 제외법 적용의 예외로 두었다.

제외된 핵종들이 선량기준을 만족하는지 확인하기 위해서 NRC가 개발한 운영허가 종료 및 해체 관련 피폭 시나리오, 경로, 모델 등, NUREG/CR-5512관련 변수들에 대한 검증 프로그램인 DandD 코드를 사용하여 주민 선량과 종사자 선량 시나리오에 대해서 선량 기준 검증이 필요하다. DandD 코드는 NUREG/CR-5512 Vol. 1에서 제시하는 4개의 시나리오에 특화된 선량 모델링 코드로서 주로 이 절에서 언급하는 사전선별(Screening)목적으로 사용되고 있다[11]. RESRAD

코드는 좀 더 일반화된 환경학적 선량 모델을 제공하고 LTP에서 부지별 DCGLs을 유도할 때 해당 시나리오의 변수등을 검증하는데 주로 사용된다[12]. 하지만 DandD코드에서 선량을 계산하지 못하는 핵종들도 있다. 다음과 같은 핵종들이다. DandD 코드와 RESRAD 코드의 비교 및 용례에 대한 내용은 NUREG/CR-5512 Vol.1-Vol.4를 참조하여야 한다.

<sup>39</sup> Ar	<sup>53</sup> Mn	<sup>81</sup> Kr	<sup>85</sup> Kr	<sup>108m</sup> Ag	<sup>133</sup> Ba
<sup>145</sup> Pm	<sup>146</sup> Sm	<sup>158</sup> Tb	<sup>178m</sup> Hf	<sup>205</sup> Pb	

결과적으로 앞에서 언급한 잠재적 제외 핵종 목록에서 DandD 코드를 통해서 선량을 계산할 수 있는 핵종은 다음과 같다.

<sup>36</sup> Cl	<sup>41</sup> Ca	<sup>79</sup> Se	<sup>93</sup> Zr	<sup>93</sup> Mo	<sup>121m</sup> Sn	<sup>129</sup> I
<sup>135</sup> Cs	<sup>151</sup> Sm	<sup>166m</sup> Ho	<sup>233</sup> U	<sup>243</sup> Am	<sup>243</sup> Cm	

제외된 핵종들은 DandD 코드에서 주민 선량과 종사자 선량 시나리오를 모두 적용하여 총 선량에서 차지하는 비율을

계산하고 무시할 만 수준이라는 것을 입증하여야 한다. Rancho Seco의 경우 주민선량 시나리오에서 제외된 NUREG 핵종의 총 선량 기여분율은  $3.73 \times 10^{-2}\%$ , 제외된 ORIGIN 핵종의 총 선량 기여분율은  $4.27 \times 10^{-2}\%$ 로 계산되었고 종사자선량 시나리오에서는 각각  $1.99 \times 10^{-3}\%$ ,  $5.53 \times 10^{-1}\%$ 를 차지하고 있는 것으로 검증되었고 제외에 대한 검증자료를 확보하게 되었다. 사업자는 규제기관에 관련 모든 자료를 제공해야 한다.

Rancho Seco의 경우, NUREG-3474의 총 선량표를 참고할 때 DandD 코드에서 선량 계산을 하지 못하는 핵종들의 총 분율은  $4.23 \times 10^{-3}\%$ 로 파악되며  $^{39}\text{Ar}$ ,  $^{81}\text{Kr}$ ,  $^{85}\text{Kr}$ 의 경우는 비활성기체(Noble gas)로서 해체가 마무리 되는 시점에 토양이나 구조물의 표면에 남아 있을 확률은 거의 희박할 것으로 예상된다. 그러므로  $^{39}\text{Ar}$ ,  $^{81}\text{Kr}$ ,  $^{85}\text{Kr}$  또한 잠재적 핵종 목록에서 제외가능하다. Rancho Seco의 경우는 DandD 코드에서 다루지 못하는 모든 핵종을 잠재적 핵종 목록에서 제외할 수 있었다. 또한 잠재적 리스트에는 포함되어 있으나 자연발생적인 핵종들  $^{40}\text{K}$ ,  $^{234}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$ , 그리고  $^{238}\text{U}$ 는 부지특성조사에서 검출되지 않았으므로 잠재적 리스트에서 최종적으로 제외 가능하였다.

여전히 DandD 코드에서 다루지 못하는 핵종들에 대한 선량 기여치는 호흡 및 섭취 피폭-선량 변환 계수 (Inhalation and Ingestion Exposure-to-dose Conversion Factor)를 이용하여 구할 수 있다[8]. 선량변환계수, DCF(Dose Conversion Factor)를 각각의 핵종에 대해서 구하고 모두 합하여 호흡 및 섭취DCF를 구할 수 있다. 이 총합은 다시 가장 광범위하게 존재하고 있는  $^{60}\text{Co}$ 과  $^{63}\text{Ni}$ 의 경우와 비교를 하여 호흡과 섭취에 대한 DCF를 구해서 분율이 무시할 수준이면 핵종목록에서 제외할 수 있게 된다. Rancho Seco의 경우의 계산 결과를 Table 7에 나타내었다.

최종적으로 10 CFR 61.55의 Table 1 과 2에 나타나 있는 핵종 목록이 폐기물 특성 분석에서 검출되었는지 확인이 필요하다[9]. 해체 부지의 폐기물 특성 분석 결과에서 특정 핵종이 검출이 된다면 잠재적 핵종목록에 추가해야 하며 Rancho Seco의 경우는 앞에서 제시된 잠재적 핵종 목록에서는 없었지만 추가로  $^{242}\text{Pu}$ 가 검출되어 최종적으로 잠재적 핵종 목록에 추가되었다. Table 8은 Rancho Seco의 경우 이 모든 핵종 선별 과정을 통해서 결정된 잠재적 최종 핵종 목록(총 26종)이다. Humboldt Bay의 경우는 총 20종이 최종 부지별 핵종 목록으로 결정되었다.

### 3. 결론

부지 특성 및 최종상태조사시 해당 부지내 잔존가능성이 있는 방사성 핵종 정보를 구하기 위해서 미국 해체 원전의 경우를 분석하여 이론적으로 잠재적 핵종 목록을 도출하는 과정에 대해서 분석해 보았다. 그 절차는 다음과 같이 요약할 수 있다(Fig. 1 참조). 또한 국내 실정에 적합한 적용 방법에 대해서도 다음과 같이 정리하였다.

- 선행 연구결과 (NUREG-3474, 4289, 0130, NCRP Report No.58), ORIGIN 코드 해석, HSA을 통하여 잠재적 핵종목록을 작성
- 잠재적 목록에서 미량 핵종의 기여 선량이 전체 핵종의 선량 대비 무시할 만한 경우 해당 핵종 제외 (NUREG-3474의 미량 핵종 분율을 참고)
- HSA의 운영이력을 근거로 한 ORIGIN 코드 해석을 통하여 미량 핵종의 기여 선량이 전체 핵종의 선량 대비 무시할 만한 경우 해당 핵종 제외
- 위의 두 경우들에 대해서 도출된 무시할만한 핵종들(분률0.1%미만)에 대한 선량의 총합이 전체 선량의 1~10%가 넘지 않는 것을 주민 선량과 종사자 선량(Residential and Occupancy)시나리오로 DandD 코드를 적용하여 검증 (NUREG/CR-5512참조). 국내의 경우에는 NUREG/CR-5512에 해당하는 사전선별용 주민 선량과 종사자 선량 시나리오에 대한 연구가 필요함
- DandD 코드에서 다루지 못하는 핵종들, 비활성기체 같은 경우 잠재적 핵종 목록에서 제외, 선량 기여치가 섭취 피폭-선량 변환계수 분석하여 무시할 수 있는 경우 제외
- 그 외 자연발생하는 핵종의 경우 부지 특성 조사에서 발견되지 않는 경우 제외
- 최종적으로 폐기물 특성 분석을 통해서 위에서 언급되지 않은 핵종의 경우 목록에 추가

이러한 절차를 통해서 이론적으로 도출된 잠재적 핵종들과 부지 특성 조사 등에서 수집한 실제 측정치를 보완하여 부지별 최종 핵종목록을 도출하고 앞 장에서 기술한 DCGLs 농도를 계산하는 기본 자료로 사용한다. 국내의 경우는 현재 NUREG 문서와 같은 규제 지침서 및 기술적 배경 자료가



Table 7. Dose Considerations for Radionuclides Not Supported by DandD [7]

Radionuclide	Percent Total	Inhalation			Ingestion		
		DCF*	Weighted DCF	% Total WDCF	DCF*	Weighted DCF	% Total WDCF
<sup>108m</sup> Ag	2.65×10 <sup>-4</sup>	7.66×10 <sup>-8</sup>	2.03×10 <sup>-11</sup>	8.08×10 <sup>-4</sup>	2.06×10 <sup>-9</sup>	5.46×10 <sup>-13</sup>	1.75×10 <sup>-4</sup>
<sup>133</sup> Ba	2.64×10 <sup>-3</sup>	2.11×10 <sup>-9</sup>	5.57×10 <sup>-12</sup>	2.22×10 <sup>-4</sup>	9.19×10 <sup>-10</sup>	2.43×10 <sup>-12</sup>	7.78×10 <sup>-4</sup>
<sup>145</sup> Pm	1.45×10 <sup>-6</sup>	8.23×10 <sup>-9</sup>	1.19×10 <sup>-14</sup>	4.75×10 <sup>-7</sup>	1.28×10 <sup>-10</sup>	1.86×10 <sup>-16</sup>	5.95×10 <sup>-8</sup>
<sup>146</sup> Sm	3.05×10 <sup>-13</sup>	8.26×10 <sup>-5</sup>	2.52×10 <sup>-17</sup>	1.00×10 <sup>-9</sup>	5.51×10 <sup>-8</sup>	1.68×10 <sup>-20</sup>	5.39×10 <sup>-12</sup>
<sup>158</sup> Tb	5.31×10 <sup>-6</sup>	6.91×10 <sup>-8</sup>	3.67×10 <sup>-13</sup>	1.46×10 <sup>-5</sup>	1.19×10 <sup>-9</sup>	6.32×10 <sup>-15</sup>	2.03×10 <sup>-6</sup>
<sup>178m</sup> Hf	1.63×10 <sup>-4</sup>	6.65×10 <sup>-7</sup>	1.08×10 <sup>-10</sup>	4.32×10 <sup>-3</sup>	5.68×10 <sup>-9</sup>	9.26×10 <sup>-13</sup>	2.97×10 <sup>-4</sup>
<sup>205</sup> Pb	5.56×10 <sup>-9</sup>	1.06×10 <sup>-9</sup>	5.89×10 <sup>-18</sup>	2.35×10 <sup>-10</sup>	4.41×10 <sup>-10</sup>	2.45×10 <sup>-18</sup>	7.86×10 <sup>-10</sup>
Total				5.36×10 <sup>-3</sup>	Total		1.25×10 <sup>-3</sup>
*Effective Committed Dose Equivalent per Unit Intake (Sv/Bq)							
<sup>60</sup> Co	4.18×10 <sup>1</sup>	5.91×10 <sup>-8</sup>	2.47×10 <sup>-6</sup>		7.28×10 <sup>-9</sup>	3.04×10 <sup>-7</sup>	
<sup>63</sup> Ni	4.96×10 <sup>1</sup>	8.39×10 <sup>-10</sup>	4.16×10 <sup>-8</sup>		1.56×10 <sup>-10</sup>	7.74×10 <sup>-9</sup>	
Total			2.51×10 <sup>-6</sup>	Total		3.12×10 <sup>-7</sup>	

Table 8. Site-Specific Suite of Radionuclides for Use at Rancho Seco Nuclear Power Plant Decommissioning [7]

Radionuclide	Half Life (Years)	Radionuclide	Half Life (Years)	Radionuclide	Half Life (Years)
<sup>3</sup> H	1.23×10 <sup>1</sup>	<sup>94</sup> Nb	2.03×10 <sup>4</sup>	<sup>155</sup> Eu	4.96×10 <sup>0</sup>
<sup>14</sup> C	5.73×10 <sup>3</sup>	<sup>99</sup> Tc	2.13×10 <sup>5</sup>	<sup>237</sup> Np	2.14×10 <sup>6</sup>
<sup>22</sup> Na	2.60×10 <sup>0</sup>	<sup>108m</sup> Ag	1.27×10 <sup>2</sup>	<sup>238</sup> Pu	8.78×10 <sup>1</sup>
<sup>55</sup> Fe	2.70×10 <sup>0</sup>	<sup>125</sup> Sb	2.77×10 <sup>0</sup>	<sup>239</sup> Pu	2.41×10 <sup>4</sup>
<sup>59</sup> Ni	7.50×10 <sup>4</sup>	<sup>134</sup> Cs	2.06×10 <sup>0</sup>	<sup>240</sup> Pu	6.60×10 <sup>3</sup>
<sup>60</sup> Co	5.27×10 <sup>0</sup>	<sup>137</sup> Cs	3.02×10 <sup>1</sup>	<sup>241</sup> Pu	1.44×10 <sup>1</sup>
<sup>63</sup> Ni	1.00×10 <sup>2</sup>	<sup>147</sup> Pm	2.62×10 <sup>0</sup>	<sup>241</sup> Am	4.32×10 <sup>2</sup>
<sup>90</sup> Sr	2.86×10 <sup>1</sup>	<sup>152</sup> Eu	1.36×10 <sup>1</sup>	<sup>242</sup> Pu	3.76×10 <sup>5</sup>
		<sup>154</sup> Eu	8.80×10 <sup>0</sup>	<sup>244</sup> Cm	1.81×10 <sup>1</sup>

\*Hard to Detect Nuclides (HTDN - radionuclides not readily detected by gamma spectroscopy, e.g., Ni-63 or Cm-244, and requiring offsite, contract laboratory analysis), 각 핵종의 붕괴모드(Decay Mode)에 대한 정보는 [12]을 참조할 것.

확보 되어 있지 않은 상태로써 빠른 시일 내에 국내 실정에 적합한 규제 지침서 및 자료를 확보하고 미국내 해당 참조 원전들의 LTP문서등 관련자료를 기반으로 하여 잠재적 핵종 목록을

작성하는데 참고자료로 사용해야 할 것이다. 전체적인 방법론에 있어서는 국내 해체 원전의 경우도 크게 다르지 않을 것으로 사료되며 특이한 부분은 사전선별 및 부지별 DCGIs모형을

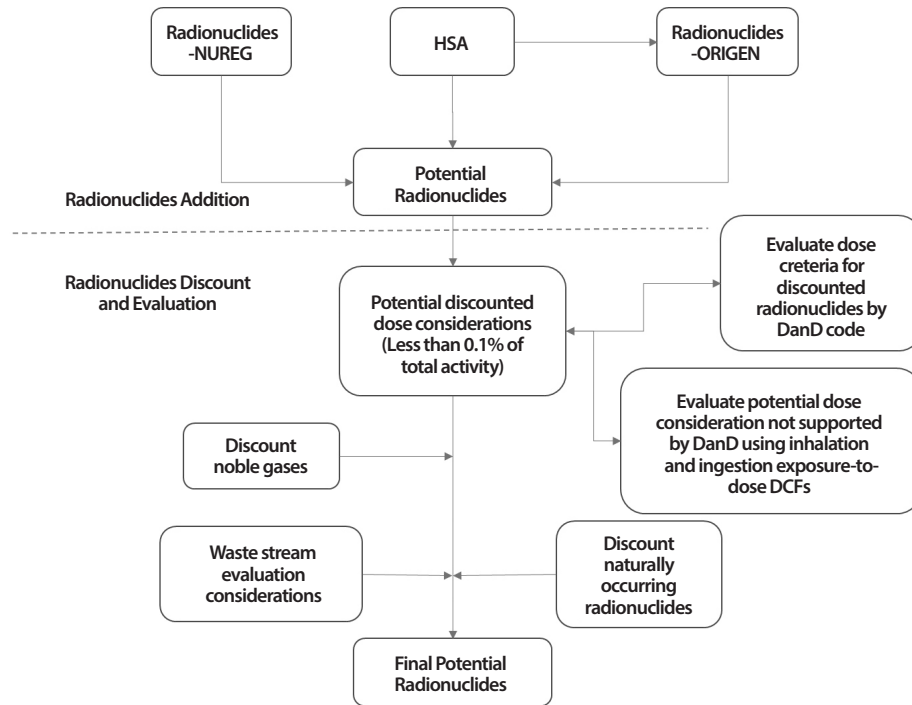


Fig. 1. Schematics of theoretical suite of radionuclide selection process.

위한 주민 선량과 종사자 선량 시나리오등에 대한 부분으로 현재 연구가 진행중이다[13]. 추가로 모든 자료가 공개되어 있는 미국의 해체 관련자료를 참고로 하여 해체사업자가 해체계획서나 허가 종료 계획서(LTP) 작성(안)을 구성하는데 사용해야 할 것이다. 미국 또한 시행착오를 통해서 해체에 관련된 각종 절차를 계속해서 가다듬어 나가고 있다.

## 감사의 글

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

## REFERENCES

[1] Y. Bae, Y. Kim, S. Ahn, and C. M. Kim, "An Integrative

Review on Domestic Site Release Criteria of Nuclear Power based in the Analysis of Foreign Site Release Criteria", *J. Kor. Soc. Rad.*, 9(5), 269-277 (2015).

- [2] U.S. Nuclear Regulatory Commission (NRC), "Long-Lived Activation Products in Reactor Materials", NUREG/CR-3474 (1984).
- [3] U.S. Nuclear Regulatory Commission (NRC), "Residual Radionuclide Contamination Within and Around Commercial Nuclear Power Plants", NUREG/CR-4289 (1986).
- [4] U.S. Nuclear Regulatory Commission (NRC), "Technology, Safety and Cost of Decommissioning", NUREG-0130 (1978).
- [5] U.S. Nuclear Regulatory Commission (NRC), "Consolidated NMSS Decommissioning Guidance, Characterization, Survey, and Determination of Radiological Criteria", NUREG-1757, Vol.2 (2003).
- [6] National Council on Radiation Protection and Measurements, *A Handbook of Radioactivity Measurements*

- Procedures (NCRP Report No. 58), 2nd ed., 247-302, NCRP, Bethesda (1985).
- [7] Sacramento Municipal Utility District, “Radionuclides for Characterization During Rancho Seco Nuclear Generating Station Characterization or Final Status Surveys”, Rancho Seco Decommissioning Technical Basis Document DTBD-04-001 Rev.2 (2005).
- [8] U.S. Environmental Protection Agency(EPA), “Limiting Values of Radionuclide Intake and Air Concentration and Dose Conversion Factors for Inhalation, Submersion, and Ingestion”, Federal Guidance Report No.11, EPA-520/1-88-020 (1988).
- [9] Sacramento Municipal Utility District, Rancho Seco Nuclear Generating Station License Termination Plan, Chapter 6 (2006).
- [10] Pacific Gas and Electric Company, “Radionuclide Selection for DCGL Development”, Enclosure 4, PG&E Letter HBL-13-008 (2012).
- [11] U.S. Nuclear Regulatory Commission (NRC), “Residual Radioactive Contamination from Decommissioning.”, NUREG/CR-5512, Vol.1 (1992).
- [12] E. W. Abelquist, Decommissioning Health Physics – A Handbook for MARSSIM Users, 2<sup>nd</sup> ed., 85-134, CRC Press, Boca Raton (2014).
- [13] J. H. Cheong, “A Mathematical Model to Evaluate the Radiological Risks for the Reuse of Decommissioning Site”, J. Kor. Rad. Waste Soc., 4(4), 353-363 (2006).