

# A Study on the Application of Standards for Clearance of Metal Waste Generated During the Decommissioning of NPP by Using the RESRAD-RECYCLE

## RESRAD-RECYCLE을 활용한 원전 해체 시 발생하는 금속폐기물의 자체처분 기준 적용 연구

Jong Soon Song, Dong Min Kim, and Sang Heon Lee\*

*Chosun University, 309, Pilmun-Daero, Dong-Gu, Gwangju, Republic of Korea*

송중순, 김동민, 이상현\*

*조선대학교, 광주광역시 동구 필문대로 309*

(Received June 15, 2016 / Revised August 24, 2016 / Approved September 8, 2016)

---

The metal waste generated during nuclear power plant decommissioning constitutes a large proportion of the total radioactive waste. This study investigates the current status of domestic and international regulatory requirements for clearance and the clearance experience of domestic institutions. The RESRAD-RECYCLE code was used for analyzing the clearance of the metal wastes generated during actual nuclear power plant decommissioning, and assessment of the exposure dose of twenty-six scenarios was carried out. The evaluation results will be useful in preliminary analysis of clearance and recycling during nuclear power plant decommissioning. As a next step, the effects of reducing disposal costs by clearance can be studied.

Keywords: Decommissioning, Decontamination, Clearance, Recycle, Metal waste

---

\*Corresponding Author.

Sang Heon Lee, Chosun University, E-mail: leesanghoen@naver.com, Tel: +82-62-230-7165

### ORCID

Jong Soon Song <http://orcid.org/0000-0001-9162-7631>

Sang Heon Lee <http://orcid.org/0000-0002-5203-3029>

Dong Min Kim <http://orcid.org/0000-0003-3539-7477>

원자력발전소 해체 시 발생하는 금속폐기물은 폐기물 중에서 많은 비중을 차지하고 있다. 본 연구에서는 국내 자체처분 규제 요건 및 국내 기관별 자체처분현황을 조사하였다. 실제 원자력발전소 해체 시 발생하는 금속폐기물의 자체처분을 위하여 RESRAD-RECYCLE 코드를 이용하였으며 26가지 시나리오에 대한 선량평가를 수행하였다. 평가결과는 원자력발전소 해체 시 자체처분 및 재활용에 관한 사전자료로서 활용가치가 있을 것으로 사료된다. 추후 자체처분을 통한 처분비용 저감효과 연구가 추가로 가능할 것으로 판단된다.

중심단어: 해체, 제염, 자체처분, 재활용, 금속폐기물, RESRAD-RECYCLE

## 1. 서론

국내 원자력 발전은 1978년 고리 1호기 원자력발전소의 상업운전을 시작으로 현재 고리, 월성, 영광, 울진에서 총 24기의 원전이 운영 중에 있다. 발전소의 안정적인 운영을 위해서는 철저한 안전 정비, 노후 시설 교체등과 같은 작업이 필요하다. 필연적으로 정비 및 노후 시설 교체에 따른 방사성 폐기물이 발생하며, 발생한 방사성폐기물에 대한 처리가 요구된다. 원전 운영 중 발생된 폐기물의 상당 부분은 그 준위가 매우 낮으며 발생량의 대부분을 차지하고 있다. 최근 고리1호기 해체결정과 더불어 원자력 발전소 해체 시에는 더 많은 폐기물이 발생할 것으로 예상된다.

운영 중 발생한 방사성폐기물의 대부분은 금속폐기물이다. 이러한 방사성 금속폐기물은 대부분 절단 후 제염을 통해 자체처분 절차에 따라서 오염도가 낮은 폐기물을 규제대상에서 해제하여 일반폐기물과 같이 매립, 소각 및 재활용의 방법으로 자체처분하고 있다. 이러한 극저준위 방사성금속 폐기물을 오염여부 판단을 통해 재활용 할 수 있다면 처리, 처분 비용 감소 효과가 있을 것으로 판단된다.

본 연구에서는 자체처분 및 재활용을 위한 국내의 처분 현황 및 규제요건을 분석하였으며, 실제 원자력발전소 해체 시 발생하는 방사성금속폐기물을 재활용 하였을 시 작업자와 제한적 재활용 시나리오의 방사선학적 위험도를 평가하기 위해 RESRAD-RECYCLE 코드를 활용하였다.

## 2. 자체처분 규제 요건분석 및 국내 자체처분 현황 및 사례

방사성폐기물 분류기준의 경우 과거에는 1994년 IAEA 안전기준의 발생폐기물 분류체계를 반영하여 원자력안전법 제2조(정의) 제18항에서는 고준위 방사성폐기물과 중·저준위 방사성폐기물로 분류되어 왔다. 현재는 잠재위험도 및 안전성 확보를 위해 기존의 방사성폐기물 분류기준과 이에 따른 처분 방식을 개선하기 위하여 제18회 원자력안전위원회를 열고, 원전의 부품 교체 및 해체 시 발생할 수 있는 방사성폐기물에 대한 분류체계화 기준을 마련하고 원자력안전위원회 고시 제2014-3호를 개정하여 신 분류체계를 적용해 오고 있다. 신 분류체계에 맞는 분류기준을 마련하기 위하여 규제해제 농도기준을 도입하였으며 잠재위험도와 최적의 처분방식에 따라 방사성폐기물을 재 분류하였다[1].

### 2.1 자체처분 규제 요건 분석

#### 2.1.1 국내

국내에서는 방사성폐기물의 신 분류체계 적용 과정에서 “처분 제한치 미만의 방사성폐기물”을 규제 해제 대상 폐기물로 규정하고 규제해제 절차를 개정하였다. 규제해제 기준(핵종별 농도 또는 선량)은 IAEA RS-G-1.7을 도입하였으며 규제해제 폐기물은 원자력 안전법의 적용범위에서 제외하도록 규정한 바 있다. 향후 규제해제 제도를 원자력시설 발생 방사성폐기물과 RI 폐기물에 대해 분리 적용할 수 있는 방향으로 개선하여 제한적 규제해제를 통한 금속방사성폐기물의 재활용을 염두에 두어야 하는 실정이다.

원자력위원회 고시 제2014-3호에 의하면 자체처분 허용 농도 미만인 방사성폐기물과 자체처분 허용선량을 만족하는 것이 입증된 방사성폐기물은 자체처분 할 수 있다. 방사성

Table 1. Clearance permissive concentration of radionuclide

Radionuclide	Permissive concentration (Bq · g <sup>-1</sup> )
<sup>129</sup> I	0.01
<sup>22</sup> Na, <sup>46</sup> Sc, <sup>54</sup> Mn, <sup>56</sup> Co, <sup>60</sup> Co, <sup>65</sup> Zn, <sup>94</sup> Nb, <sup>106</sup> Ru, <sup>110m</sup> Ag, <sup>125</sup> Sb, <sup>134</sup> Cs, <sup>137</sup> Cs, <sup>152</sup> Eu, <sup>154</sup> Eu, <sup>182</sup> Ta, <sup>207</sup> Pb, <sup>229</sup> Th, <sup>232</sup> U, <sup>238</sup> Pu, <sup>239</sup> Pu, <sup>240</sup> Pu, <sup>242</sup> Pu, <sup>244</sup> Pu, <sup>241</sup> Am, <sup>242m</sup> Am, <sup>243</sup> Am, <sup>245</sup> Cm, <sup>246</sup> Cm, <sup>247</sup> Cm, <sup>248</sup> Cm, <sup>249</sup> Cf, <sup>251</sup> Cf, <sup>254</sup> Es	0.1
<sup>14</sup> C, <sup>24</sup> Na, <sup>36</sup> Cl, <sup>48</sup> Sc, <sup>48</sup> V, <sup>52</sup> Mn, <sup>59</sup> Fe, <sup>57</sup> Co, <sup>58</sup> Co, <sup>75</sup> Se, <sup>82</sup> Br, <sup>85</sup> Sr, <sup>90</sup> Sr, <sup>95</sup> Zr, <sup>95</sup> Nb, <sup>96</sup> Tc, <sup>99</sup> Tc, <sup>103</sup> Ru, <sup>105</sup> Ag, <sup>109</sup> Cd, <sup>113</sup> Sn, <sup>124</sup> Sb, <sup>123m</sup> Te, <sup>132</sup> Te, <sup>136</sup> Cs, <sup>140</sup> Ba, <sup>140</sup> La, <sup>139</sup> Ce, <sup>155</sup> Eu, <sup>160</sup> Tb, <sup>181</sup> Hf, <sup>185</sup> Os, <sup>190</sup> Ir, <sup>192</sup> Ir, <sup>204</sup> Tl, <sup>206</sup> Bi, <sup>233</sup> U, <sup>237</sup> Np, <sup>236</sup> Pu, <sup>243</sup> Cm, <sup>244</sup> Cm, <sup>248</sup> Cf, <sup>250</sup> Cf, <sup>252</sup> Cf, <sup>254</sup> Cf	1
<sup>7</sup> Be, <sup>18</sup> F, <sup>38</sup> Cl, <sup>43</sup> K, <sup>47</sup> Ca, <sup>51</sup> Mn, <sup>52m</sup> Mn, <sup>56</sup> Mn, <sup>52</sup> Fe, <sup>55</sup> Co, <sup>62m</sup> Co, <sup>65</sup> Ni, <sup>69m</sup> Zn, <sup>72</sup> Ga, <sup>74</sup> As, <sup>76</sup> As, <sup>91</sup> Sr, <sup>92</sup> Sr, <sup>93</sup> Zr, <sup>97</sup> Zr, <sup>93m</sup> Nb, <sup>97</sup> Nb, <sup>98</sup> Nb, <sup>90</sup> Mo, <sup>93</sup> Mo, <sup>99</sup> Mo, <sup>101</sup> Mo, <sup>97</sup> Tc, <sup>97</sup> Ru, <sup>105</sup> Ru, <sup>115</sup> Cd, <sup>111</sup> In, <sup>114m</sup> In, <sup>125</sup> Sn, <sup>122</sup> Sb, <sup>127m</sup> Te, <sup>129m</sup> Te, <sup>131m</sup> Te, <sup>133</sup> Te, <sup>133m</sup> Te, <sup>134</sup> Te, <sup>126</sup> I, <sup>130</sup> I, <sup>131</sup> I, <sup>132</sup> I, <sup>133</sup> I, <sup>134</sup> I, <sup>135</sup> I, <sup>129</sup> Cs, <sup>132</sup> Cs, <sup>138</sup> Cs, <sup>131</sup> Ba, <sup>143</sup> Ce, <sup>144</sup> Ce, <sup>153</sup> Gd, <sup>181</sup> W, <sup>187</sup> W, <sup>191</sup> Pt, <sup>198</sup> Au, <sup>203</sup> Hg, <sup>200</sup> Tl, <sup>202</sup> Tl, <sup>203</sup> Pb, <sup>203</sup> Po, <sup>205</sup> Po, <sup>207</sup> Po, <sup>225</sup> Ra, <sup>230</sup> Pa, <sup>233</sup> Pa, <sup>230b</sup> U, <sup>236</sup> U, <sup>240</sup> Np, <sup>241</sup> U, <sup>242</sup> Cm, <sup>254m</sup> Es	10
<sup>3</sup> H, <sup>35</sup> S, <sup>42</sup> K, <sup>45</sup> Ca, <sup>47</sup> Sc, <sup>51</sup> Cr, <sup>53</sup> Mn, <sup>61</sup> Co, <sup>59</sup> Ni, <sup>63</sup> Ni, <sup>64</sup> Cu, <sup>86</sup> Rb, <sup>85m</sup> Sr, <sup>87m</sup> Sr, <sup>91</sup> Y, <sup>91m</sup> Y, <sup>92</sup> Y, <sup>93</sup> Y, <sup>97m</sup> Tc, <sup>99m</sup> Tc, <sup>105</sup> Rh, <sup>109</sup> Pd, <sup>111</sup> Ag, <sup>115m</sup> Cd, <sup>113m</sup> In, <sup>115m</sup> In, <sup>129</sup> Te, <sup>131</sup> Te, <sup>123</sup> I, <sup>125</sup> I, <sup>135</sup> CS, <sup>141</sup> Ce, <sup>142</sup> Pr, <sup>147</sup> Nd, <sup>149</sup> Nd, <sup>153</sup> Sm, <sup>152m</sup> Eu, <sup>159</sup> Gd, <sup>166</sup> Dy, <sup>166</sup> Ho, <sup>171</sup> Er, <sup>170</sup> Tm, <sup>175</sup> Yb, <sup>177</sup> Lu, <sup>188</sup> Re, <sup>191</sup> Os, <sup>193</sup> Os, <sup>194</sup> Ir, <sup>197m</sup> Pt, <sup>199</sup> Au, <sup>197</sup> Hg, <sup>197m</sup> Hg, <sup>201</sup> Tl, <sup>227</sup> Ra, <sup>231</sup> U, <sup>237</sup> U, <sup>239</sup> U, <sup>240</sup> U, <sup>239</sup> Np, <sup>234</sup> Pu, <sup>235</sup> Pu, <sup>237</sup> Pu, <sup>249</sup> Bk, <sup>253</sup> Cf, <sup>253</sup> Es, <sup>255</sup> Fm	100
<sup>31</sup> Si, <sup>32</sup> P, <sup>33</sup> P, <sup>55</sup> Fe, <sup>60m</sup> Co, <sup>69</sup> Zn, <sup>73</sup> As, <sup>77</sup> As, <sup>89</sup> Sr, <sup>90</sup> Y, <sup>96m</sup> Tc, <sup>103</sup> Pd, <sup>125m</sup> Te, <sup>127</sup> Te, <sup>131</sup> Cs, <sup>134m</sup> Cs, <sup>143</sup> Pr, <sup>147</sup> Pm, <sup>149</sup> Pm, <sup>151</sup> Sm, <sup>165</sup> Dy, <sup>169</sup> Er, <sup>171</sup> Tm, <sup>185</sup> W, <sup>186</sup> Re, <sup>191m</sup> Os, <sup>193m</sup> Pt, <sup>197</sup> Pt, <sup>211</sup> At, <sup>226</sup> Th, <sup>243</sup> Pu, <sup>242</sup> Am, <sup>246</sup> Cf	1,000
<sup>58m</sup> Co, <sup>71</sup> Ge, <sup>103m</sup> Rh, <sup>254</sup> Fm	10,000

핵종별 자체처분 허용농도는 Table 1에 나타내었다. 영 제 107조 제3항 제2호에서 “위원회가 정하여 고시하는 자체처분 허용기준”이라 함은 다음과 같다.

- 방사성폐기물 분류 및 자체처분 기준에 관한 규정 제 9조(자체처분 대상 폐기물의 관리)에 따른 기준을 만족시킬 것
  - ① 자체처분사업자는 자체처분 하고자 하는 방사성폐기물(이하 “자체처분 대상 폐기물”이라 한다)을 별도로 구분하여 분리·저장하여야 하며, 다른 폐기물이 혼입되지 아니하도록 하여야 한다.
  - ② 자체처분사업자가 자체처분 허용농도 또는 자체처분 허용선량을 만족함을 자체적으로 확인한 방사성폐기물 중에서 「방사선안전관리 등의 기술기준에 관한 규칙」 제3조 제2항 제4호에 따른 방사선관리 구역 반출기준을 만족하는 폐기물은 강우 또는 바람

등에 의한 오염의 확산가능성이 없는 사업소 내의 방사선관리구역 외부의 저장장소에 임시로 저장할 수 있다.

- ③ 자체처분 대상 폐기물은 취급·저장 또는 운반 과정에서 방사성 물질 등이 주변으로 전이되거나 확산되지 않도록 관리하여야 한다.
- ④ 매립 또는 소각할 예정인 자체처분 대상 폐기물은 가능한 한 부주의하게 재활용되지 않도록 관리하여야 한다.
- ⑤ 자체처분 대상 폐기물이 용기에 들어 있거나 포장한 경우에는 그 용기 또는 포장재 중에서 자체처분 후 회수되지 않을 용기 또는 포장재는 자체처분 대상 폐기물에 준하여 관리하여야 한다.
- ⑥ 자체처분으로 인하여 부수적으로 폐기물이 발생될 경우, 이 부수적인 폐기물의 관리방안을 사전에 마련하여야 한다.

- 방사성폐기물 분류 및 자체처분 기준에 관한 규정 제 10조(방사선 및 방사능의 측정·평가 기준)에 따른 기준을 만족시킬 것
  - ① 자체처분 대상 폐기물의 방사선 및 방사능은 교정을 통하여 신뢰성이 확보된 측정기를 이용하여 측정하여야 한다.
  - ② 자체처분 대상 폐기물의 표면 방사선량률은 부득이한 경우를 제외하고 자연방사선준위를 확인할 수 있는 지역에서 폐기물의 표면으로부터 10 cm의 거리에서 측정하여야 한다.
  - ③ 방사성 핵종별 방사능 농도를 측정하기 전에 별표 1에 규정된 방사성 핵종별로 자체처분 허용농도보다 충분히 낮은 수준으로 검출 목표치를 수립하여야 하며, 실제 최소검출가능농도는 검출 목표치 이하하여야 한다.
  - ④ 자체처분 대상 폐기물에 존재하는 모든 방사성핵종의 종류를 알고 있을 때에는 이론적 방법을 적용하여 핵종 별 방사능 농도를 평가할 수 있다. 이 경우 핵종 별 방사능 농도가 과소평가 되지 않도록 하여야 한다.
- 방사성폐기물 분류 및 자체처분 기준에 관한 규정 제11조(자체처분절차서)에 따른 절차가 수립되어 있을 것

자체처분사업자는 다음 각 호의 사항을 포함한 방사성폐기물 자체처분 절차서를 마련하여, 그 절차서에 따라 자체처분에 관한 제반업무를 수행하여야 한다.

- ① 자체처분 정책 및 전략
  - 가. 자체처분 원칙
  - 나. 자체처분이 정당화되는 근거
  - 다. 자체처분 폐기물의 수량 및 방사능 최소화 전략
  - 라. 자체처분 업무를 수행하는 조직, 책임 및 권한
- ② 자체처분하고자 하는 폐기물의 특성과 관리방안
  - 가. 폐기물의 발생장소, 발생과정 및 예상 발생량
  - 나. 폐기물의 종류 및 형태
  - 다. 폐기물에 함유될 수 있는 방사성핵종의 종류
  - 라. 폐기물의 선별, 수거, 분리 및 저장방법
  - 마. 핵종별 및 폐기물별 자체보관기간 및 자체보관

- 기간의 평가방법(적용 가능한 경우에 한함)
- 바. 폐기물의 표면오염 관리방안
- ③ 자체처분 관련 기준을 만족함을 입증하는 방법
  - 가. 방사능 측정방법(대표시료 채취방법을 포함한다) 또는 방사능 평가방법(평가의 타당성에 대한 논거)
  - 나. 방사선 측정방법
  - 다. 기타 이 규정의 제반 규정을 만족함을 입증하는 방법
- ④ 자체처분 방법 및 사전 조치
  - 가. 자체처분 방법
  - 나. 자체처분 전 조치사항
  - 다. 자체처분으로 인하여 부수적으로 폐기물이 발생될 경우, 이 부수적인 폐기물의 관리방법
- ⑤ 기록 및 관리
  - 가. 기록의 종류 및 작성양식
  - 나. 기록의 보존방법 및 보존기간
- 자체처분 방법 및 절차 등이 위원회로부터 적합한 것으로 판정된 검토결과를 통지 받은 자체처분계획서의 내용과 변경이 없을 것
- 자체처분 되는 방사성폐기물의 총량이 연간 1톤(또는 이에 상당하는 부피)을 초과하지 않을 것

## 2.1.2 국외

### 2.1.2.1 IAEA

IAEA에서는 1996년 국제방사선방호안전기준(BSS-115)을 발간하여 현재 대부분의 국가들이 규제해제 기준 또는 규제해제를 위한 핵종별 농도기준의 유도근거가 되는 선량기준을 발표하였다. 즉 개인선량  $10\mu\text{Sv} \cdot \text{y}^{-1}$  및 집단선량  $1 \text{ Person-Sv} \cdot \text{y}^{-1}$ 를 만족하는 정당화된 행위 및 방사선원은 규제면제될 수 있다고 기술하고 있으며, 규제면제 기준농도 및 수량을 제시하였다. 1998년에는 IAEA-TECDOC-1000을 통해 의학, 연구, 산업분야에서 발생하는 방사성물질에 대한 규제해제 농도를 발표하였다. 2004년도에는 IAEA Safety Guide RS-G-1.7을 발표하여 규제면제, 규제해제에 대한 개념제시와 자연방사성핵종 뿐만 아니라 257개 인공핵종에 대한 자체처분농도를 제시하였다. RS-G-1.7 안전기준에 제시된 자체처분농도는  $10\mu\text{Sv} \cdot \text{y}^{-1}$ 의 개인선량으로부터 유도되었으며, 외부피폭, 호흡, 섭취에 의한 시나리오가 고려되었다. 각 시나리오에 따라 유도된 수치 중 가장 낮은 값이

선정되었다[1,2].

IAEA RS-G-1.7 안전기준의 자체처분 농도기준은 일본, 호주, 핀란드 등의 국가에서 기 채택하여 규제기준으로 활용하고 있다. 일본에서는  $^3\text{H}$ ,  $^{54}\text{Mn}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  등 원전 등에서 발생할 수 있는 33개 주요 핵종에 대하여 IAEA Safety Guide RS-G-1.7의 기준과 유사한 규제해제농도 기준을 도입하여 적용하고 있다[3].

### 2.1.2.2 스웨덴

스웨덴에서의 자체처분은 SSI FS 1996:2 규정에 따라 시행되고 있으며, 상기 규정은 고체폐기물의 매립, 재활용 및 폐유의 소각에 활용되고 있다. SSI FS 1996:2 규정에 따르면, 방사성폐기물의 자체처분 경우에는  $10\mu\text{Sv} \cdot \text{y}^{-1}$ 를 만족하여야 한다. 또한 현행 스웨덴의 규제요건에 따르면 VLLW의 무제한 규제해제준위는 총 방사능  $0.5 \text{ Bq} \cdot \text{g}^{-1}$  이하(이중  $\alpha$ 선 방출핵종의 농도는  $0.1 \text{ Bq} \cdot \text{g}^{-1}$ )이고, 폐기물을 생활폐기물 매립장에 매립할 경우에 적용되는 규제해제 준위는 총 방사능  $5 \text{ Bq} \cdot \text{g}^{-1}$  이하(이중  $\alpha$ 선 방출핵종의 농도는  $0.5 \text{ Bq} \cdot \text{g}^{-1}$  이하)이며, 원전의 방사선관리구역에서 반출될 수 있는 폐기물의 총 방사능은 연간  $1\text{GBq}$  이하로 제한되고 있다. 한편, 폐유를 소각할 때 적용되는 규제해제기준은  $\beta$ 선 및  $\gamma$ 선을 방출하는 핵종의 경우  $5 \text{ Bq} \cdot \text{g}^{-1}$ ,  $\alpha$ 선을 방출하는 핵종의 경우  $0.1 \text{ Bq} \cdot \text{g}^{-1}$  이하로 규정되어 있다. 2004년을 기준으로 연간 약 600톤의 VLLW가 생활폐기물 매립장에 매립되었고, 방사능 농도가  $0.5 \text{ Bq} \cdot \text{g}^{-1}$  미만인 고철 약 500톤이 규제해제 제도를 통해 재활용 되었다. 스웨덴에서는 폐유 소각 등 대부분의 자체처분은 사업자가 시행을 하고, 연 1회 그 결과를 SSI에 보고를 하고 있다. 그러나 금속폐기물의 용융처리, 핵연료제조시설로부터의 폐기물, 건물해체 폐기물, PVC 재활용 등의 자체처분에 대해서는 case-by-case의 사전심사를 거쳐 규제해제를 수행하고 있다. 이 중에서 VLLW는 무제한 규제해제, 규제기관의 결정에 따른 조건부 규제해제, 특수 연소로를 이용한 소각처리(폐유에 한함) 등의 방법으로 규제해제 하거나, 또는 원자력법에 따라 허가된 처분시설(SFR)에 처분하거나 VLLW 전용 처분시설에 처분할 수 있도록 허용되고 있다[4]. 현재 SSI는 유럽 방호기준 122(EU RP-122)와 IAEA RS-G-1.7의 자체처분 제한농도를 비교하여, 새로운 자체처분 농도기준을 유도하고 있다.

대형 폐 금속슬러지는 STUDSVIK에서 제염 및 용융 처리하여

자체처분이 시행되고 있으며, 지금까지 스웨덴에서 발생한 4기의 증기발생기가 처리되었다. 2009년도에는 Ringhals 원전에서 원자로헤드 폐기물이 발생하였으며 당 헤드도 STUDSVIK에서 처리될 예정이다. 스웨덴 SSI는 유출물관리 및 방사선방호분야의 규제를 수행하였으며, SKI는 그 외 분야의 규제를 수행하고 있었으나, 일부 분야에 대해 두 기관으로부터 중복규제가 수행되고 있어 2008년 7월을 기해 두 기관을 병합하여 SSM으로 발족하였다[5,6].

### 2.1.2.3 핀란드

핀란드에서는 VLLW를 일반 규제해제 또는 사안별 규제해제 제도를 통해 재이용 및 재활용하거나 또는 매립장에 처분할 수 있도록 허용되고 있다. Olkiluoto 원전에서는 이러한 폐기물을 처분하기 위한 전용 매립장을 부지 내에 조성하여 운영하고 있으며, Loviisa 원전에서는 규제해제된 폐기물을 지역 매립장에 처분할 수 있도록 협약을 체결하고 있다. 일반 규제해제의 경우, 대량의 물질에 대해서는 IAEA의 규제해제 안전지침을 준용하고, 원자력시설 당 연간 100톤 이내 소량의 물질에 대해서는  $\alpha$ 선 방출핵종, 고 에너지  $\beta \cdot \gamma$ 선 방출핵종( $^{54}\text{Mn}$ ,  $^{58}\text{Co}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{65}\text{Zn}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{106}\text{Ru}$ ,  $^{110\text{m}}\text{Ag}$ ,  $^{124}\text{Sb}$ ,  $^{125}\text{Sb}$ ,  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{144}\text{Ce}$  등) 및 저에너지  $\beta \cdot \gamma$ 선방출핵종( $^3\text{H}$ ,  $^{14}\text{C}$ ,  $^{51}\text{Cr}$ ,  $^{55}\text{Fe}$ ,  $^{63}\text{Ni}$  등)의 체적오염 규제해제준위를 각각  $0.1 \text{ Bq} \cdot \text{g}^{-1}$ ,  $1 \text{ Bq} \cdot \text{g}^{-1}$ , 및  $10 \text{ Bq} \cdot \text{g}^{-1}$ 으로, 표면오염 규제해제준위를 각각  $0.4 \text{ Bq} \cdot \text{cm}^{-2}$ ,  $4 \text{ Bq} \cdot \text{cm}^{-2}$  및  $40 \text{ Bq} \cdot \text{g}^{-2}$ 로 규정하고 있다. 한편, 규제기관이 규제해제준위를 사안별로 승인하는 사안별 규제해제의 경우, 폐기물의 평균 방사능농도를  $10 \text{ Bq} \cdot \text{g}^{-1}$  미만으로, 인수가 소유하게 될 방사능 총량을  $1\text{GBq}$  미만( $\alpha$  방사능은  $10 \text{ MBq}$  미만)으로 제한하고 있다[4].

### 2.1.2.4 벨기에

벨기에는 EU Directive 80/836/Euratom (이후 84/467/Euratom으로 개정)에 명시된 기본안전기준(Basic Safety Standards)에 근거한 방사선방호기준을 적용하고 있다. 일단 자연 방사선준위를 초과하는 방사성폐기물에 대해서는 법령상의 별도 조항에 따라 규제하고 있으며, 고체폐기물에 대하여 적용되는 일반적인 규제해제준위는 없다. 벨기에는 Euro-Chem 재처리공장 해체폐기물에 대한 제한적 규제해제를 사안별로 허용한 바 있으며, 당시 적용된 기준치는 다음과 같다.



- 표면오염도 :  $\alpha$ 핵종  $\leq 0.04 \text{ Bq} \cdot \text{cm}^{-2}$ ,  
 $\beta/\gamma$  핵종  $\leq 0.04 \text{ Bq} \cdot \text{cm}^{-2}$
- 방사능 농도 :  $1 \text{ Bq} \cdot \text{g}^{-1}$  (임의의 1,000 kg 당 평균치,  
 최대  $10 \text{ Bq} \cdot \text{g}^{-1}$ )

당시 벨기에가 적용한  $\alpha$ 핵종에 대한 표면오염도 기준치는 국내 방사선관리구역 반출기준과 동일한 수준이며,  $\beta/\gamma$ 핵종에 대한 표면오염도는 국내 반출기준의  $1 \cdot 10^{-1}$  수준이다.

한편 최근에는 사안별 규제해제가 부분적으로 허용되고 있으며, 규제해제농도 기준으로는 IAEA-TECDOC-855에서 권고한 값을 참고하고 있는 것으로 알려져 있다. 현장의 방사선방호 담당 부서는 규제해제농도기준의 만족여부를 개관적으로 입증하기 위한 조치를 취하고 있으며, 규제해제 관련 사항은 규제기관에 보고되고 있다.

최근 벨기에는 개정된 EU Directive(96/26/Euratom)을 자국내 법령에 반영하기 위한 작업을 추진 중이며, 이미 관련 법안은 정부의 승인을 받은 상태에서 유럽의회의 자문을 위하여 대기중인 것으로 알려져 있다. 개정 법령에서는 일반 규제해제기준이 반영된 것으로 알려져 있으나 아직까지 EC Radiation Protection No. 122에 제시된 평가결과를 전면 반영할 것인가의 여부는 확정되지 않았다. 그러나 지금까지 확인된 바에 따르면, 벨기에는 EC Radiation Protection No. 122에 제시된 일반 규제해제기준과 독일 방사선방호위원회(SSK; Commission on Radiological Protection)의 1995년 권고값 중에서 상대적으로 보수적인 수치를 채택할 가능성이 클 것으로 예상된다[7].

### 2.1.2.5 미국

US NRC는 1990년 BRC(Below Regulatory Concern) 정책성명을 발표함으로써 규제해제 개념의 본격적인 시행을 계획한 바 있으며, 1994년까지는 사안별 평가를 통하여 원자로 시설에서 발생된 일부 고체폐기물에 대해 규제해제를 허가하였다. US NRC는 1999년 NUREG-1640(Radiological Assessments for Clearance of Materials from Nuclear Facilities)의 발간을 통해 규제해제 시 방사선영향이  $10 \mu\text{Sv} \cdot \text{y}^{-1}$ 에 해당하는 방사능농도를 제시하였다[8].

현재 US NRC는 관련 지침과 규정에 따라 고체상 물질의 규제해제를 극히 제한적으로 허용하고 있다. 원자로 시설에서 발생된 표면오염 고체폐기물은 Reg. Guide 1.86에

따른 오염도 조사결과 자연방사선 준위를 초과하는 방사능이 검출되지 않는 경우에 한하여 규제에서 제외될 수 있다. 한편 원자로에서 발생된 체적오염 고체폐기물은 Reg. Guide 1.86에 제시된 수치보다 더욱 보수적인 검출하한치 조건에서 수행된 방사능 계측결과에 따라 자연방사능 준위를 초과하는 폐기물은 규제해제가 허용되지 않는다. 이와 관련하여 US NRC는 Information Notice 88-22(Disposal of Sludge from Onsite Sewage Treatment Facilities at Nuclear Power Stations)에서 체적오염 폐기물에 대하여 환경시료의 측정에 적용되는  $\gamma$ 선핵종의 검출하한을 적용하여 천연방사성물질과 허가대상 방사성물질의 오염도 구분하여야 한다는 규제입장을 표명한 바 있다. 아직까지 사안별 선량평가에 적용되는 단일 기준치가 확정되지는 않았지만, 일반인 선량한도인 총유효선량당량 (Total Effective Dose Equivalent; TEDE)  $1 \text{ mSv} \cdot \text{y}^{-1}$ 의 매우 작은 비율임을 입증하여야 한다. 참고로 1992년 US NRC는 핵연료주기시설인 Allied Signal 사 (이후 Honey Well로 변경)에서 발생된 미량의 핵연료물질로 오염된  $\text{CaF}_2$ 를 철강산업에 사용되는 용제로 재활용하는 방안을 승인한 바 있으며, 당시 적용된 선량기준은 TEDE  $0.25 \text{ mSv} \cdot \text{y}^{-1}$ 였던 것으로 알려져 있다.

예외적으로 일반인에 대한 잠재적인 선량이 연간선량한도의 작은 비율인 경우에는 원자로시설 및 비원자로시설에서 발생된 고체폐기물에 대하여 매립을 통한 허가배출이 허용될 수 있으나, 아직까지 이러한 허가사례는 확인되지 않았다.

US NRC는 BRC 정책성명을 철회한 후 1994년부터 규제해제기준을 도출하기 위한 연구를 재개하였으며, 1999년 NUREG-1640의 발간을 통하여 도출된 농도기준(안)을 제시하였다. 그러나 일반인과 산업계의 다양한 이견을 보임에 따라 현재 국립과학원(National Academy of Science)의 주도로 검토를 재수행하고 있다. 미국 보건물리학회는 규제해제를 위한 사전 선별기준에 관한 산업기술기준 ANSI/HPS-N13.12(1999)를 발간하였다. 그러나 아직까지 규제기관이 동 기준을 채택하지 않음에 따라 실제 적용되지는 못하고 있다.

한편 2000년 1월에 US DOE는 체적오염 된 금속폐기물에 대한 규제해제를 US NRC가 연방법을 수립할 것인가의 여부를 결정하기 전까지 무기한 유예한다고 선언하였으며, 현재 방사성폐기물의 규제해제를 허용하지 않고 있다. 또한 2001년 1월에 US DOE의 장관 Mr. Richardson은 일련의

각서를 통하여 폐금속의 규제해제를 계속 연기할 것이며, 산하 시설 내에서 납을 재이용하는 데 정책의 우선순위를 둔다고 발표한 바 있다[7].

### 2.1.2.6 독일

독일은 EURATOM 기본안전기준을 도입하여, 2001년 방사성물질의 규제해제기준을 포함하는 방사선방호조례를 제정하였다. 당 조례를 통하여 고체 및 액체방사성물질, 건물 잡석, 토양 등에 적용될 수 있는 300여개의 핵종에 대한 규제해제 기준을 제시하였으며, 원자력 시설의 제염/해제로 발생하는 폐기물에 대해 광범위하게 적용을 시도하고 있다[8].

독일에서는 입법자문기구인 SSK가  $10\mu\text{Sv} \cdot \text{y}^{-1}$  개인선량 기준에 근거하여 권고한 핵종별 규제해제농도기준을 적용하고 있다. SSK의 규제해제 권고값은 기본안전기준에 명시된 약 300개의 방사성핵종을 대상으로 한다. 독일에서는 1999년 이후 규제해제 제도의 폐지 또는 연기를 주장하는 반대 세력이 있었으나, 최근에는 상당히 완화된 상태인 것으로 알려져 있다. 동 규제해제 권고값은 모든 물질에 대하여 전처리 또는 처리방법에 대한 특별한 제한조건 없이 적용되고 있다. 그러나 최근 독일에서는 EC RP No. 122에 제시된 수치를 반영하여 규제해제농도기준을 개정하기 위한 논의가 진행되고 있는 것으로 알려져 있다. 한편 현재 SSK가 권고하고 있는 표면오염도에 근거한 규제해제기준은 EC RP No. 89에 제시된 수치 보다 낮은 수준이며, 최근 이에 대한 개정작업을 수행하고 있는 것으로 알려져 있다.

독일에서는 특정한 몇 가지 시나리오에 따라서 특정한 물자가 조건부로 규제에서 제외될 수 있으며, 이는 조건부 규제해제 또는 허가배출에 해당하는 것이다. 예를 들어 폐기물 발생자가 특정 폐기물의 형태와 특성이 매립 또는 소각에만 적절함을 입증할 수 있다면, 이러한 제한된 시나리오에 한하여 일반적인 규제해제준위가 아닌 시나리오별로 설정된 규제해제준위를 적용할 수 있다. 예를 들어 특정한 핵종의 일반적인 규제해제준위가  $0.1 \text{ Bq} \cdot \text{g}^{-1}$  이더라도 매립 또는 소각에 대한 규제해제 준위는  $4 \text{ Bq} \cdot \text{g}^{-1}$ , 재활용을 위한 금속의 용융에 대해서는  $0.6 \text{ Bq} \cdot \text{g}^{-1}$  등으로 시나리오별로 상이한 기준치가 적용될 수 있다. 현재 방사선방호령에서는 이러한 제한적 규제해제의 적용 대상을 “매립장 또는 소각장에서 고체폐기물 처분” 및 “철거만을 고려하는 건물”로 정의하고 있다.

2001년 하반기로부터 시행되고 있는 방사선방호령(RPO : Radiation Protection Ordinance)에서 일반 규제해제의 대상으로 언급하고 있는 대상들은 다음과 같이 정리할 수 있다[7].

- 연간 1,000톤 미만의 고체상 물질의 재활용, 재이용 또는 매립
- 연간 1,000톤을 초과하는 건물의 파쇄물(Rubble)과 토양
- 재이용 또는 철거되는 건물
- 원자력시설 부지(건물 철거 후)

### 2.1.2.7 영국

영국은 “전리방사선규정 1999”를 통하여 EU Directive(96/26/Euratom)를 이행하고 있으며, 방사성폐기물의 처분에 관한 사항은 “방사성물질법 1993”에 따라 규제하고 있다. 현행 규제면제 및 규제해제 관련 조항에 대한 평가결과 개인선량기준  $10\mu\text{Sv} \cdot \text{y}^{-1}$ 와 거의 부합하는 것으로 결론이 이어짐에 따라 “방사성물질법 1993”은 개정되지 않았다.

원자력산업계를 포함한 모든 산업계에서 고체상 물질의 규제해제준위는 인공 방사성핵종에 대하여  $0.4 \text{ Bq} \cdot \text{g}^{-1}$  이다. 천연방사성핵종을 함유한 고체상 물질의 규제해제준위는  $11.1 \text{ Bq} \cdot \text{g}^{-1}$ (우라늄),  $2.59 \text{ Bq} \cdot \text{g}^{-1}$ (토륨),  $0.74 \text{ Bq} \cdot \text{g}^{-1}$ (납),  $0.37 \text{ Bq} \cdot \text{g}^{-1}$ (Ra, Pa, Ac, Po 등 기타 천연방사성핵종) 등이다. 이러한 규제해제준위는 원자력산업계 뿐만 아니라 비원자력산업계에서도 적용할 수 있다.

규제면제령(Exemption Order)에서는 천연방사성핵종을 함유한 고체상 물질의 규제해제를 다음과 같이 허용하고 있다; 위에 나열한 핵종의 경우  $14.8 \text{ Bq} \cdot \text{g}^{-1}$ , 희토류금속 및 Ce, Gd, Zr 등은  $37 \text{ Bq} \cdot \text{g}^{-1}$ . 이러한 조항은 모든 산업계에서 적용할 수 있으나, 특히 NORM 산업계에서 일반적으로 적용된다. 한편 영국에서는 표면 오염도 기준치를 사안별로 결정하고 있는 것으로 알려져 있다[7].

## 2.2 국내 자체처분 현황

국내의 경우, 1994년 한전원자력연료(주)에서 발생한 NaF 폐기물에 대한 자체처분이 처음 시행된 이후, 1995년부터 원전에서 발생한 방사성폐기물의 자체처분이 시행되었다. 그 후 관련 법령의 정비를 통하여 2000년부터 본격적으로

Table 2. The number of clearance plan per years (2005 ~ 2012 year)

Company	The number of clearance plan								
	'05	'06	'07	'08	'09	'10	'11	'12	SUM
KHNP	11	13	11	12	17	16	14	18	112
KEPCO NF	3	5	4	3	10	26	14	16	81
KAERI	0	1	2	1	1	2	2	-	9
KORAD	-	-	-	-	1	1	1	-	3
Etc.	-	-	-	-	-	1	-	-	1
SUM	14	19	17	16	29	46	31	34	206

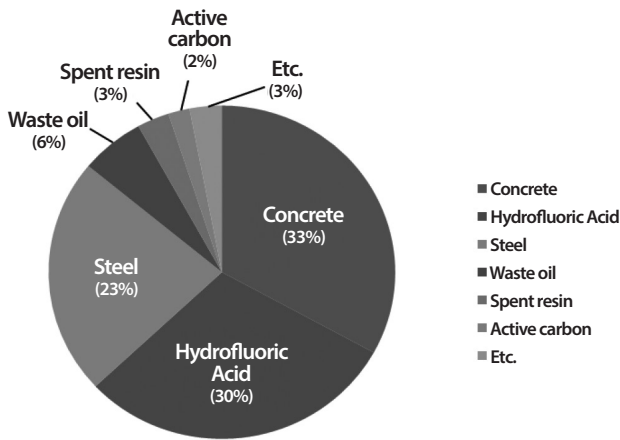


Fig. 1. Clearance ratio of radioactive waste type (2005~2009 years).

자체처분이 시행되었으며, 최근에는 자체처분 대상 폐기물 종류 및 수량이 증가하고 있는 추세이다.

주요 자체처분대상 폐기물에는 토양, 폐 콘크리트, 철재류, 활성탄, 폐수지, 폐유 등이 있으며 목재 및 종이류 등도 일부 자체처분 되고 있다. 자체처분 방법을 살펴보면, 철재류는 대부분 재활용되고 있으며, 토양, 폐수지, 활성탄, 콘크리트 등은 매립장에 매립하고 있다. 폐유, 폐수지, 종이 등은 허가 받은 폐기물 처리시설에서 소각하고 있다. Table 2는 최근 8년간(2005~2012년) 기관별 자체처분 계획서 신청건수를 보여주고 있다. 발전용 원자로 사업자인 한국수력원자력(주)은 철재류, 폐수지, 활성탄, 콘크리트 등 다양한 종류의 폐기물에 대하여 자체처분을 시행하고 있으며, 신청건수가 다른

기관에 비하여 많다. 한전원자력연료(주)는 연평균 3~4회 정도 금속폐기물과 콘크리트 폐기물에 대한 자체처분을 꾸준히 시행하고 있으며, 2009년도부터 신청건수가 증가하고 있다. 한국원자력연구원은 연구로 1,2호기 해체과정에서 발생한 방사성폐기물에 대하여 자체처분을 시행한 바 있다. 한편, 2009년도에 신설된 한국방사성폐기물관리공단에서는 자체처분을 3회 실시하였다.

Fig. 1은 2005~2009년간의 폐기물 종류별 전체 자체처분 수량을 보여주고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 자체처분 전체의 절반 이상을 콘크리트가 차지하고 있으며 콘크리트의 대부분은 매립을 가장 많이 시행하고 있으며, 철재류의 경우는 대부분 재활용되고 있다[8].

### 3. 선량평가를 위한 코드 선정 및 평가요건

RESRAD-RECYCLE 전산코드는 규제해제된 철재와 알루미늄의 재활용 및 재이용 과정에서 유발되는 방사선학적 영향을 평가하기 위한 목적으로 US DOE(Department of Energy)의 지원 하에서 ANL(Argonne National Laboratory)의 EAD(Environmental Assessment Division)에서 2003년 개발하였다. Fig. 2는 RESRAD-RECYCLE의 재활용 절차 개념도를 나타낸다. RESRAD-RECYCLE 전산코드는 금속성 방사성폐기물의 수집·운반·처리작업자(Worker)와 소비자 및 공공재를 이용하는 일반인(Public)에 대해서 총 41개의 시나리오와 54개의 핵종에 대해서 잠재 피폭선량 및 위험도를



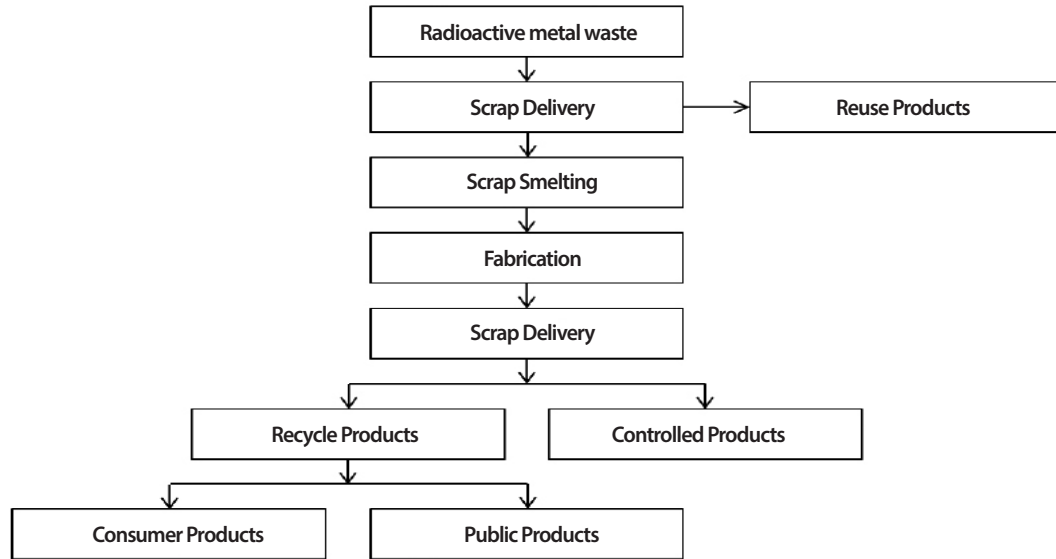


Fig. 2. Conceptual diagram for recycle process of RESRAD-RECYCLE code.

평가할 수 있다. 현재 국내외에서 재활용 및 자체처분을 위한 평가코드는 RESRAD-RECYCLE 코드밖에 없는 실정이다 [9,10].

평가 결과는 개인선량과 집단선량, 누적선량으로 출력되고, 자체처분을 위해서 국내 원자력 법에서 정하고 있는 “방사성폐기물 자체처분에 관한 규정” 개인에 대한 연간 피폭방사선량  $10 \mu\text{Sv} \cdot \text{g}^{-1}$  미만, 집단에 대한 총 피폭방사선량  $1 \text{ Person-Sv} \cdot \text{y}^{-1}$  미만을 만족해야 한다.

#### 4. RESRAD-RECYCLE을 이용한 선량평가 대상 및 평가방법

RESRAD-RECYCLE 전산코드를 이용한 선량평가를 하기 위해서는 먼저 평가 대상을 선정해야 한다. 원자력발전소는 1차측과 2차측으로 나누어져 있고, 2차측 기기와 계통은 대부분 저준위와 극저준위이므로 해체 시 제염 수행 여부와 관계없이 대부분 자체처분이 가능할 것으로 예상된다. 이에 본 연구에서는 1차측 화학 및 체적제어계통 내에 속해 있는 BRS(Boron Recovery System)의 BRT(Boron Recovery Tank) 배관을 평가대상으로 결정하였으며 발전소 계획예방정비 기간에 실측한 값을 사용하였다. BRS(Boron Recovery

Table 3. Nuclides input value of RESRAD-RECYCLE code (Unit :  $\text{Bq} \cdot \text{g}^{-1}$ )

Concentration of Nuclides		
Nuclide	Half-Life	Activity Concentration
$^{60}\text{Co}$	5.27y	$1.66 \times 10^1$

System)는 냉각재 계통의 기동, 정지, 봉산회석운전 동안에 체적제어탱크로부터 나오는 유출유량과 격납용기 내부기기의 냉각재 누설, 밸브 스템 누설수, 배수 및 방출밸브의 배출수로 구성되는 원자로배수탱크(RDT) 및 격납용기 외부의 기기배수탱크(EDT) 내용물을 처리하는 설비이다. 평가를 위해서는 대상 시나리오를 선정하고 평가 대상 금속폐기물의 처리량과 핵종별 방사능 농도를 분석해야 하며 코드 내에 입력 인자를 국내 체계에 맞게 수정하여야 한다. 국내의 경우 자체 처분 시 작업자에 대한 규정 외 명확한 규정이 정해지지 않았기 때문에 본 연구에서는 RESRAD-RECYCLE 코드내 41개 시나리오 중 무제한 재활용(소비재, 공공재, 재이용) 시나리오 15개를 제외하고 국내에 적용 가능한 작업자 시나리오와 제한적 재활용 시나리오 26개를 대상으로 평가를 수행하였다. 핵종 분석을 위해 ISOCS 검출기를 이용하여 BRT 배관을 계측한 결과  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{110\text{m}}\text{Ag}$  이 검출되었고 본 연구에서는 작업자

Table 4. Scenario of RESRAD-RECYCLE code

Classification	Scenario	Classification	Scenario
Scrap Delivery	Scrap Cutter		Storage Yard Worker
	Scrap Loader	Initial Fabrication	Sheet Maker
	Scrap Driver		Coil Maker
	Public Exposure		Sheet Handler
Scrap Smelting	Scrap Processor	Final Fabrication	Coil Handler
	Smelter Yard Worker	Ingot Delivery	Ingot Loader
	Smelter Loader		Ingot Driver
	Furnace Operator		Product Loader
	Baghouse Processor	Product Distribution	Product Driver
	Refinery Worker		Warehouse Worker
	Ingot Caster		Sheet Assembler
	Small Objects Caster	Controlled Products	Shielding Block
	Slag Worker		Radioactive Waste Container

시나리오를 대상으로 평가를 수행하기 때문에 작업자에 많은 영향을 미치는 <sup>60</sup>Co을 평가대상 핵종으로 선정하였다. BRT 배관의 처리량은 0.024 t이며, 평가에 이용된 핵종의 방사능 농도는 핵종특성과 함께 Table 3에 제시하였다.

또한 코드 내에 선량환산인자를 국내 실정에 맞게 수정해야 하는데 국내에서는 ICRP60의 평가체계를 적용하기 때문에 선량평가를 수행하기 위해서는 코드 내에 입력되어 있는 내부피폭 선량환산인자(Dose Conversion Factor)를 ICRP26에서 ICRP60으로 수정해야 한다. 작업자에 경우 ICRP72에 명시되어있는 호흡과 섭취의 선량환산인자를 적용하여 내부피폭선량을 평가하였고 호흡에 대한 AMAD(Active Median Aerodynamic Diameter)는 ICRP 68에 근거하여 5 μm의 AMAD 입자크기를 적용하였다. 평가 조건은 원전 영구정지 시 즉시해체의 가능여부를 확인하는 것으로, 제염을 수행하지 않고 즉시 해체할 경우 작업자와 제한적 재활용 시나리오의 선량평가를 수행하여 자체처분 허용선량 만족 여부를 확인하였다. 본 연구에서는 코드에서 평가 가능한 41가지 시나리오 중에서 26개 시나리오를 평가하였으며 Table 4에 제시하였다[9].

RESRAD-RECYCLE 코드 평가결과는 시나리오 별로 입력되는 입력인자와 관련성이 매우 크다. 본 연구에서는 실제 RESRAD-RECYCLE 코드를 활용한 선량평가 시 대부분의 입력인자 값이 국내 실정에 맞는 데이터 확보의 한계로 인하여 미확보 Data를 코드에서 제시하는 Default값을 사용하였다. 이에 따라, 본 연구에서는 평가 결과의 신뢰성을 높이고자 시나리오별 특정 인자(노출시간, 호흡율, 섭취율, 분진농도)에 비율(50, 100, 150%)을 적용하여 민감도 분석을 수행하였다. 민감도분석을 수행한 결과 호흡율, 섭취율, 분진농도에 비해 노출시간이 평가결과에 많은 영향을 미치는 것을 알 수 있었다. 민감도분석 결과는 Table 5~8에 제시하였다.

또한, 본 연구에서는 선량평가 시 노출시간을 주요 입력인자로 선정하였다. 노출시간은 방사성금속폐기물의 처리량에 비례하는데 본 연구에 적용된 방사성금속폐기물의 처리량은 극 미량(0.024t)이므로 작업자의 노출시간이 평균 85초이다. 국내의 경우 작업자의 작업시간이 연간 최대 2000시간으로 교육과학기술부에 고시되어 있지만 처리량이 극 미량이므로 작업자의 작업시간을 Table 9와 같이 수정하였다. 코드 내 노출시간의 Default값과 도출한 값은 Table 9에 제시하였다.

Table 5. The result of sensitivity analysis for worker depending on exposure duration change

Scenario	Exposure Duration		
	50%	100%	150%
Scrap Cutter	$1.74 \times 10^{-2}$	$3.48 \times 10^{-2}$	$5.22 \times 10^{-2}$
Scrap Loader	$2.48 \times 10^{-2}$	$4.97 \times 10^{-2}$	$7.45 \times 10^{-2}$
Scrap Truck Driver	$2.18 \times 10^{-2}$	$4.36 \times 10^{-2}$	$6.54 \times 10^{-2}$
Scrap Processor	$1.78 \times 10^{-2}$	$3.55 \times 10^{-2}$	$5.33 \times 10^{-2}$
Smelter Yard Worker	$1.61 \times 10^{-1}$	$3.21 \times 10^{-1}$	$4.82 \times 10^{-1}$
Smelter Loader	$2.98 \times 10^{-2}$	$5.96 \times 10^{-2}$	$8.94 \times 10^{-2}$
Furnance Operator	$1.07 \times 10^{-1}$	$2.13 \times 10^{-1}$	$3.20 \times 10^{-1}$
Baghouse Processor	$4.74 \times 10^{-3}$	$9.48 \times 10^{-3}$	$1.42 \times 10^{-2}$
Refinery Worker	$1.17 \times 10^{-1}$	$2.35 \times 10^{-1}$	$3.52 \times 10^{-1}$
Ingot Caster	$5.85 \times 10^{-2}$	$1.17 \times 10^{-1}$	$1.76 \times 10^{-1}$
Small Objects Caster	$2.70 \times 10^0$	$5.40 \times 10^0$	$8.09 \times 10^0$
Slag Worker	$1.13 \times 10^{-8}$	$2.26 \times 10^{-8}$	$3.39 \times 10^{-8}$

Table 6. The result of sensitivity analysis for worker depending on inhalation rate change

Scenario	Inhalation Rate		
	50%	100%	150%
Scrap Cutter	$3.47 \times 10^{-2}$	$3.48 \times 10^{-2}$	$3.48 \times 10^{-2}$
Scrap Loader	$4.97 \times 10^{-2}$	$4.97 \times 10^{-2}$	$4.97 \times 10^{-2}$
Scrap Truck Driver	$4.36 \times 10^{-2}$	$4.36 \times 10^{-2}$	$4.36 \times 10^{-2}$
Scrap Processor	$3.55 \times 10^{-2}$	$3.55 \times 10^{-2}$	$3.55 \times 10^{-2}$
Smelter Yard Worker	$3.21 \times 10^{-1}$	$3.21 \times 10^{-1}$	$3.21 \times 10^{-1}$
Smelter Loader	$5.96 \times 10^{-2}$	$5.96 \times 10^{-2}$	$5.96 \times 10^{-2}$
Furnance Operator	$2.13 \times 10^{-1}$	$2.13 \times 10^{-1}$	$2.13 \times 10^{-1}$
Baghouse Processor	$9.48 \times 10^{-3}$	$9.48 \times 10^{-3}$	$9.48 \times 10^{-3}$
Refinery Worker	$2.35 \times 10^{-1}$	$2.35 \times 10^{-1}$	$2.35 \times 10^{-1}$
Ingot Caster	$1.17 \times 10^{-1}$	$1.17 \times 10^{-1}$	$1.17 \times 10^{-1}$
Small Objects Caster	$5.40 \times 10^0$	$5.40 \times 10^0$	$5.40 \times 10^0$
Slag Worker	$2.09 \times 10^{-8}$	$2.26 \times 10^{-8}$	$2.44 \times 10^{-8}$

Table 7. The result of sensitivity analysis for worker depending on ingestion rate change

Scenario	Ingestion Rate		
	50%	100%	150%
Scrap Cutter	$3.45 \times 10^{-2}$	$3.48 \times 10^{-2}$	$3.51 \times 10^{-2}$
Scrap Loader	$4.96 \times 10^{-2}$	$4.97 \times 10^{-2}$	$4.98 \times 10^{-2}$
Scrap Truck Driver	$4.36 \times 10^{-2}$	$4.36 \times 10^{-2}$	$4.36 \times 10^{-2}$
Scrap Processor	$3.52 \times 10^{-2}$	$3.55 \times 10^{-2}$	$3.58 \times 10^{-2}$
Smelter Yard Worker	$3.20 \times 10^{-1}$	$3.21 \times 10^{-1}$	$3.23 \times 10^{-1}$
Smelter Loader	$5.95 \times 10^{-2}$	$5.96 \times 10^{-2}$	$5.97 \times 10^{-2}$
Furnance Operator	$2.13 \times 10^{-1}$	$2.13 \times 10^{-1}$	$2.13 \times 10^{-1}$
Baghouse Processor	$9.46 \times 10^{-3}$	$9.48 \times 10^{-3}$	$9.50 \times 10^{-3}$
Refinery Worker	$2.35 \times 10^{-1}$	$2.35 \times 10^{-1}$	$2.35 \times 10^{-1}$
Ingot Caster	$1.17 \times 10^{-1}$	$1.17 \times 10^{-1}$	$1.17 \times 10^{-1}$
Small Objects Caster	$5.39 \times 10^0$	$5.40 \times 10^0$	$5.40 \times 10^0$
Slag Worker	$1.31 \times 10^{-8}$	$2.26 \times 10^{-8}$	$3.22 \times 10^{-8}$

Table 8. The result of sensitivity analysis for worker depending on contaminant dust loading change

Scenario	Contaminant Dust Loading		
	50%	100%	150%
Scrap Cutter	$3.47 \times 10^{-2}$	$3.48 \times 10^{-2}$	$3.48 \times 10^{-2}$
Scrap Loader	$4.97 \times 10^{-2}$	$4.97 \times 10^{-2}$	$4.97 \times 10^{-2}$
Scrap Truck Driver	$4.36 \times 10^{-2}$	$4.36 \times 10^{-2}$	$4.36 \times 10^{-2}$
Scrap Processor	$3.55 \times 10^{-2}$	$3.55 \times 10^{-2}$	$3.55 \times 10^{-2}$
Smelter Yard Worker	$3.21 \times 10^{-1}$	$3.21 \times 10^{-1}$	$3.21 \times 10^{-1}$
Smelter Loader	$5.96 \times 10^{-2}$	$5.96 \times 10^{-2}$	$5.96 \times 10^{-2}$
Furnance Operator	$2.13 \times 10^{-1}$	$2.13 \times 10^{-1}$	$2.13 \times 10^{-1}$
Baghouse Processor	$9.48 \times 10^{-3}$	$9.48 \times 10^{-3}$	$9.48 \times 10^{-3}$
Refinery Worker	$2.35 \times 10^{-1}$	$2.35 \times 10^{-1}$	$2.35 \times 10^{-1}$
Ingot Caster	$1.17 \times 10^{-1}$	$1.17 \times 10^{-1}$	$1.17 \times 10^{-1}$
Small Objects Caster	$5.40 \times 10^0$	$5.40 \times 10^0$	$5.40 \times 10^0$
Slag Worker	$2.09 \times 10^{-8}$	$2.26 \times 10^{-8}$	$2.44 \times 10^{-8}$



Table 9. Correction value of exposure duration according to sensitivity analysis

Scenario	Sensitivity Analysis	
	Default Value	Correction value
Scrap Cutter	0.00288 hr	1 hr
Scrap Loader	0.00096 hr	1 hr
Scrap Truck Driver	0.00096 hr	5 hr
Scrap Processor	0.00288 hr	1 hr
Smelter Yard Worker	0.0192 hr	1 hr
Smelter Loader	0.00096 hr	1 hr
Furnance Operator	0.0012 hr	1 hr
Baghouse Processor	0.00024 hr	1 hr
Refinery Worker	0.0012 hr	1 hr
Ingot Caster	0.0006 hr	1 hr
Small Objects Caster	0.012 hr	1 hr
Slag Worker	0.006 hr	1 hr
Ingot Loader	0.00048 hr	1 hr
Ingot Truck Driver	0.0012 hr	5 hr
Storage Yard Worker	0.0096 hr	1 hr
Sheet Maker	0.00024 hr	1 hr
Coil Maker	0.00024 hr	1 hr
Sheet Handler	0.00024 hr	1 hr
Coil Handler	0.0192 hr	1 hr
Product Loader	0.0048 hr	1 hr
Product Truck Driver	0.00192 hr	5 hr
Sheet Assembler	0.0048 hr	1 hr
Warehouse Worker	0.48 hr	1 hr
Shield Block	1 hr	1 hr
Radwaste Container	1 hr	1 hr

## 5. 평가결과

RESRAD-RECYCLE 전산코드를 활용하여 BRT(Boron Recovery Tank) 배관을 평가하기 위해, 현장 실측 값인

$^{60}\text{Co}$ 에 대한 방사능 농도 값을 사용하였다. 선량평가를 위해 선량환산인자(DCF)의 섭취와 호흡 값을 국내 체계에 맞춘 ICRP60으로 변경하였고, 민감도분석을 통해 주요 입력 인자(노출시간)를 도출하여 방사성금속폐기물의 처리량을

Table 10. Evaluation result of RESRAD-RECYCLE code

Evaluation Result (Immediate Dismantling)		
Scenario	Individual Dose	Collective Dose
Scrap Cutter	$3.97 \times 10^{-2}$	$1.19 \times 10^{-7}$
Scrap Loader	$1.71 \times 10^{-1}$	$3.43 \times 10^{-7}$
Scrap Truck Driver	$7.54 \times 10^{-1}$	$3.77 \times 10^{-6}$
Public Exposure	$0.00 \times 10^0$	$1.70 \times 10^{-10}$
Scrap Processor	$4.06 \times 10^{-2}$	$1.22 \times 10^{-7}$
Smelter Yard Worker	$5.52 \times 10^{-2}$	$5.52 \times 10^{-7}$
Smelter Loader	$2.06 \times 10^{-1}$	$1.03 \times 10^{-6}$
Furnance Operator	$5.90 \times 10^{-1}$	$1.77 \times 10^{-6}$
Baghouse Processor	$1.31 \times 10^{-1}$	$1.31 \times 10^{-7}$
Refinery Worker	$6.49 \times 10^{-1}$	$1.95 \times 10^{-6}$
Ingot Caster	$6.47 \times 10^{-1}$	$1.29 \times 10^{-6}$
Small Objects Caster	$1.49 \times 10^0$	$2.98 \times 10^{-6}$
Slag Worker	$0.00 \times 10^0$	$0.00 \times 10^0$
Ingot Loader	$4.36 \times 10^{-1}$	$8.73 \times 10^{-7}$
Ingot Truck Driver	$1.93 \times 10^0$	$9.67 \times 10^{-6}$
Storage Yard Worker	$7.94 \times 10^{-2}$	$7.94 \times 10^{-7}$
Sheet Maker	$1.10 \times 10^{-1}$	$1.66 \times 10^{-6}$
Coil Maker	$5.43 \times 10^{-1}$	$5.43 \times 10^{-7}$
Sheet Handler	$1.10 \times 10^{-1}$	$2.20 \times 10^{-6}$
Coil Handler	$5.42 \times 10^{-1}$	$2.71 \times 10^{-6}$
Product Loader	$4.36 \times 10^{-1}$	$8.73 \times 10^{-7}$
Product Truck Diver	$1.93 \times 10^0$	$9.67 \times 10^{-6}$
Sheet Assembler	$1.10 \times 10^{-1}$	$2.20 \times 10^{-6}$
Warehouse Worker	$2.91 \times 10^{-2}$	$1.45 \times 10^{-7}$
Shield Block	$1.27 \times 10^0$	$1.27 \times 10^{-6}$
Radwaste Container	$9.41 \times 10^{-2}$	$9.41 \times 10^{-8}$

고려한 수정값을 적용하여 평가를 수행하였다. 원전 영구정지 후 제염을 수행하지 않고 즉시해체 할 경우에 대한 선량 평가결과 작업자와 제한적 재활용 시나리오의 피폭선량이

개인에 대한 연간 피폭방사선량  $10 \mu\text{Sv} \cdot \text{y}^{-1}$  미만, 집단에 대한 총 피폭방사선량  $1 \text{ Person-Sv} \cdot \text{y}^{-1}$  미만으로 자체처분 허용선량을 만족하는 것을 알 수 있었다. 제염을 수행하지

않고 즉시해체 할 경우에 대한 선량평가결과는 Table 10에 제시하였다.

그러나 원전 영구정지 후 자체처분을 수행할 경우 1차 계통에서는 BRT 배관보다 높은 방사능농도의 금속폐기물들이 발생할 것으로 예상되고 이러한 금속폐기물은 적절한 제염방법으로 제염을 수행한다면 자체처분이 가능할 것으로 사료된다. 이에 따라 해외사례를 바탕으로 추가적인 분석을 수행하였고 결과는 다음과 같다. 일본 JPDR(Japan Power Demonstration Reactor)에서 유동연마제염법을 이용하여 원자로수 정화계통을 계통제염한 결과 제염계수(DF)가 200~1600까지 가능한 것으로 조사되었다[11]. 일본 사례를 바탕으로 적용 가능한 계통제염 방법으로 화학적 제염법인 Chelation&Organic Acids 제염법을 선정하였다. Chelation&Organic Acids 제염법은 유기화합제를 금속이온에 결합시키는 것으로 화학제와 결합된 금속 이온은 불용 상태의 금속으로부터 분리되어 용액으로 이동되고 제거된다[12]. 독일 KWB-B(Biblis B)에서 Chelation&Organic Acids 제염법을 이용하여 원자로 냉각재 펌프 Inlet nozzle을 13시간 동안 제염한 결과 제염계수(DF)는 100(제염율 99%)까지 가능한 것으로 제시되었고, 비용은 면적당 10.76달러(10.76 \$ · m<sup>2</sup>)이다[13].

Chelation&Organic Acids 제염법을 이용하여 제염을 수행할 경우 2차 폐기물인 방사성화학폐액이 발생한다. 2차 폐액을 저장시키기 위한 방법으로는 중화, 침전 기술을 접목시킨 폐기물 처리 공정 등이 있다. 이러한 처리 공정은 용액 내 금속 이온을 제거하며, 제염 후 발생한 용액을 재생시켜 재사용한다면 화학 제염 후 발생하는 2차 폐액을 감소시킬 수 있을 것으로 판단된다[14].

국내 원전 해체를 대비하여 계통 및 기기제염 상용화 기술 개발 및 2차 폐기물 처리 기술의 확보가 시급하다고 생각된다.

## 6. 결론

본 연구는 국내원전 해체 시 발생하는 폐기물의 자체처분을 위한 사전연구로서, 국내외 규제요건을 분석하였으며, 기관별 자체처분현황을 분석하였다. 또한, 실제 원자력발전소 해체 시 발생하는 방사성금속폐기물을 재활용

하였을 시 작업자와 일반인이 받는 피폭선량을 평가하기 위해 BRT(Boron Recovery Tank) 배관을 평가대상으로 선정하였고, 검출된 핵종 <sup>60</sup>Co를 대상으로 작업자와 제한적 재활용 시나리오의 피폭선량을 평가하였다.

연구결과, 본 연구에서 수행한 RESRAD-RECYCLE의 입력인자 값은 국내 실정과 일부 상이한 부분으로 인해 보수적으로 평가됨을 알 수 있었다. 향후 국내 조건에 맞는 합리적인 입력인자를 구축하여 보수성을 재고한 후 각각의 계통 및 기기에 대한 평가를 수행한다면 해체 시 발생하는 금속폐기물의 자체처분 가능여부를 예측할 수 있을 것으로 기대된다. 또한, 국내에서는 방사성금속폐기물의 자체처분 시 작업자에 대한 규정 외 처분방법에 대한 명확한 규정이 정해지지 않았다. 이에 따라, 국내 기준에 맞는 처분방법 규정을 추가적으로 연구할 필요가 있다.

원전 해체를 위해서는 실제 원전 해체 시 발생이 예상되는 폐기물을 대상으로 사전 평가를 수행하여 해체구역에 따른 자체처분 가능여부를 데이터베이스화 할 필요가 있다. 이는 작업자 피폭관리 및 처분비용 절감을 위한 자료로서 활용이 가능할 것으로 기대한다.

## 감사의 글

본 연구는 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원으로 수행한 연구 과제입니다. (No. 20141510300310)

## REFERENCES

- [1] International Atomic Energy Agency, Classification of Radioactive Waste, IAEA, General safety Guide No. GSG-1, Vienna (2009).
- [2] International Atomic Energy Agency, Application of Exemption principles to the Recycle and Reuse of Materials from Nuclear Facilities. IAEA, Safety series No. 111-P-1.1, Vienna (1992).
- [3] International Atomic Energy Agency, Application of the Concepts of Exclusion, Exemption and Clearance, IAEA, Safety Guide No. RS-G-1.7, Vienna (2004).

- [4] J.H. Cheong, "Analysis on the International Trends in Safe Management of Very Low Level Waste Based upon Graded Approach and Their Implications", *J. of Korean Radioactive Waste Society*, 9(1), 49-62 (2011).
- [5] Organisation for Economic Cooperation and Development/Nuclear Energy Agency. Radioactivity measurements at Regulatory release levels, OECA/NEA, ISBN 92-64-02319-4, Paris (2006).
- [6] United States Nuclear Regulatory Commission. Radiological Assessments for Clearance of materials from Nuclear Facilities, U.S.NRC, NUGEG-1640 Washington, DC (2003).
- [7] W.J. Oh, M.S. Lee, and M.J. Song. Establishment on the free release method for the radioactive metal wastes, KAERI/CM-1434 (2011).
- [8] C.W. Jung, E.J. Seo, D.S. Yuk, H.Y. Jung, and K.H. Lee. A Study on the Introduction of IAEA BSS revision(draft) for the Clearance of Radioactive Waste in Korea, Korea Institute of Nuclear Safety, 10-19, KINS/RR-1026 (2011).
- [9] S.B. Hong, B.J. Lee, and U.S. Chung, "A Study on the Clearance Level(draft) for the Steel Scrap from the KRR-1 & 2 Decommissioning", *J. of Korean Radioactive Waste Society*, 2(1), 61-67 (2004).
- [10] J.J. Cheng, B. Kassas, C. Yu, D. Lepoire, J. Amish, E. S. Dovel, S.Y. Chen, W.A. Williams, A. Wallo, and H. Peterson. RESRAD-RECYCLE : A Computer Model For Analyzing the Radiological Doses and Risks Resulting from the Recycling of Radioactive Scrap Metal and the Reuse of Surface-Contaminated Material and Equipment, Argonne National Laboratory, 23-52, ANL/EAD-3 (2000).
- [11] Ishikawa Michio, "Reactor Decommissioning for Safe Retirement", 1st ed., 100-101, Korea Nuclear Energy Agency, Seoul (1997).
- [12] J.S. Song, M.Y. Jung, and S.H. Lee, "A Study on the Applicability for Primary System Decontamination through Analysis on NPP Decommission Technology and International Experience", *JNFCWT*, 14(1), 45-55 (2016).
- [13] Horst-Otto. Bertholdt, "Method for the chemical decontamination of nuclear reactor components", U.S.Patent, 4,226, 640 A (1978).
- [14] M.G. Gwon, W.G. Choe, and G.U. Lee, "A Study on disposal of 2nd liquid waste generated during the chemical decontamination", *J. of Korean Radioactive Waste Society*, 8(2), 65-66 (2010).