

## Method for Determining Transportation Grade for HIC Containing Spent Resin Using Radioactivity Analysis

### 방사성폐기물 핵종분석 결과를 사용한 폐수지의 운반물등급 분류 방법

Taewook Kim\*, Kiseop Choi\*\*, Kidoo Kang\* and Jonghyun Ha\*

\*Nuclear Engineering & Technology Institute, KHNP, 25-1 Jang-dong, Yuseong-gu, Daejeon

\*\*Korea Hydro & Nuclear Power, 167 Samsung-dong, Kangnam-gu, Seoul, Korea

[taewook@khnp.co.kr](mailto:taewook@khnp.co.kr)

김태욱\*, 최기섭\*\*, 강기두\*, 하종현\*

\*한국수력원자력(주) 원자력발전기술원, 대전시 유성구 장동 25-1

\*\*한국수력원자력, 서울시 강남구 삼성동 167번지

(Received October 9, 2007 / Approved February 29, 2008)

#### Abstract

In order to transport spent resin in a high integrated container made of high density polyethylene, a method for determining transportation grade by radioactivity analysis was developed. Ratios of radioisotopes in spent resin were derived from radioactivity analysis on spent resin. Associated curie-to-dose factors were determined to estimate radioisotope inventory from surface dose rates of spent resin. From the results, Activity limit of type A package was derived to be 1.19 TBq for HIC, and the corresponding surface dose rate was found to be 124.2 mSv/h.

**Key words** : Spent Resin, Radioisotope Inventory, Transportation Grade, Dose-To-Curie Factor

#### 요 약

고밀도폴리에틸렌 고건전성용기에 담은 폐수지의 운반을 위해 원전 폐수지의 방사능 분석결과를 사용하여 운반물 등급 분류방법을 도출하였다. 원전 폐수지의 방사능 분석결과로부터 폐수지 내 핵종 존재비를 구하였고, 폐수지의 표면선량률로 핵종재고량을 평가하기 위해 MCNP 코드로 방사능대선량 환산인자를 모사하였다. 이로부터 고밀도폴리에틸렌 고건전성용기에 담은 폐수지에 대한 A형 운반물과 B형 운반물의 경계값은 1.19 TBq 이고 이를 표면선량으로 환산한 결

과는 124.2 mSv/h임을 알 수 있었다.

**중심단어** : 폐수지, 핵종재고량, 운반등급, 선량대방사능 환산인자

### I. 서론

방사성폐기물 드럼을 운반할 때는 '방사선안전관리 등의 기술기준에 관한 규칙[1]' 및 '방사성물질 등의 포장 및 운반에 관한 규정[2]'에 따라 운반물의 핵종재고량을 평가하여 운반물의 운반등급을 분류하고 해당 되는 기술기준에 적합한 운반용기를 사용하여야 한다. 그러기 위해서는 먼저 운반물의 핵종재고량을 평가하여야 한다. 핵종재고량 평가방법에는 이때 직접 또는 간접 측정방법이 사용될 수 있다. 감마핵종의 경우 직접 측정방법은 감마핵종분석기를 사용하는 것이고, 간접 측정방법은 핵종 존재비와 선량대방사능 환산인자를 사용하는 것이다. 알파베타핵종의 경우 직접 측정방법은 방사화학분석 방법을 사용하는 것이고, 간접 측정방법은 key 감마핵종과의 방사능 비율인 척도인자를 사용하는 것이다. 본 연구에서는 고밀도폴리에틸렌 고건전성용기에 담겨진 폐수지의 핵종재고량을 핵종분석 결과와 선량대방사능 방법을 사용한 직간접 혼합방법을 사용하여 평가하였다.

### II. 본 론

#### 가. 혼합핵종의 A2값

운반물의 핵종이 복합 핵종일 경우에 운반등급별 운반 한도량을 구하기 위해서는 '방사성물질 등의 포장 및 운반에 관한 규정'에 따라 혼합 핵종의 A2값(또는 A1값)을 구하여 각 운반등급 기준과 비교하여야 한다. 특히, 운반물의 방사능이 혼합핵종의 A2값(또는 A1값)을 초과하는지 여부가 중요한 변수령이 된다. 혼합핵종의 A2값(또는 A1값)은 식 (1)과 같다.

$$A_1 \text{ 또는 } A_2 = \frac{1}{\sum_i \frac{f(i)}{X(i)}} \dots\dots\dots (1)$$

여기서 f(i)는 운반물 전체의 방사능 중 핵종 i의 방

사능이 차지하는 비율(핵종 존재비)이고 X(i)는 핵종 i에 대한 단일핵종의 A2값(또는 A1값)이다. 운반물 전체의 방사능이 혼합 핵종의 A2값(또는 A1값)을 초과하면 운반물의 등급은 B형이상, 미달하면 A형이하가 된다.

#### 나. 핵종 존재비 도출

식 (1)의 혼합 핵종의 A2값(또는 A1값)을 구하기 위해서는 운반물의 핵종 존재비 f(i)를 알아야 한다. 핵종 존재비 f(i)는 원전에서 발생된 방사성폐기물의 핵종분석결과로부터 얻었다. 한국수력원자력에서는 2002년부터 2005년까지 원전 폐기물을 13개 원전군 및 6개 폐기물 유형으로 구분하여 '중저준위 방사성폐기물 인도규정[3]'에서 정한 규명대상핵종과 추가 감마핵종에 대하여 분석을 수행하였다[4]. 핵종 분석결과는 최종적으로 노형(PWR, PHWR) 및 6개 폐기물 유형(잡고체, 폐필터, 농축폐액, 고방사능 폐수지, 저방사능 폐수지, 슬러지)으로 분류되었으며, 알파, 베타, 감마 총 18개 핵종에 대하여 핵종 존재비가 도출되었다. 고방사능 폐수지의 핵종별 분율을 표 1에 폐수지의 존재비를 표 2에 나타내었다.

#### 다. 선량대방사능 환산인자 도출

운반물의 총 방사능을 구하기 위해서는 핵종별로 방사능을 구하여야 한다. 감마핵종의 방사능은 선량대방사능 환산방법을 사용하여 구하였다. 선량대방사능 환산방법은 스페인에서 처분시 핵종재고량 평가에 사용하고 있으며[5], ISO에서는 감마핵종 재고량 평가방법의 표준의 하나로 규정하였으며[6], DOE에서도 TRU 폐기물의 방사능분석에 사용하고 있다[7].

선량대방사능 환산방법은 드럼의 표면선량을 측정하여 감마핵종 재고량을 평가하는 방법이다. 표면 방사선량을 분포에 따른 표면선량을 평균치 계산방

표 1. PWR 원전의 고방사능폐수지 핵종별 방사능 분율

번호	<sup>60</sup> Co	<sup>137</sup> Cs	<sup>125</sup> Sb	<sup>110m</sup> Ag	<sup>134</sup> Cs	<sup>54</sup> Mn	<sup>58</sup> Co	<sup>144</sup> Ce	<sup>3</sup> H
1	4.59E-02	2.01E-02	3.11E-03	2.10E-04	7.52E-03	2.78E-02	5.62E-01	1.97E-04	1.94E-04
2	2.48E-02	8.49E-03	4.13E-03	1.56E-04	3.27E-03	3.16E-02	6.75E-01	1.49E-04	1.60E-04
3	1.36E-01	6.38E-03	5.47E-03	1.13E-04	2.93E-03	8.31E-02	1.85E-01	7.02E-04	1.93E-04
4	4.32E-02	3.95E-01	2.42E-03	0.00E+00	3.52E-01	1.97E-02	2.21E-02	1.67E-03	4.40E-05
5	9.27E-02	1.30E-01	5.22E-03	1.24E-04	5.30E-02	2.24E-02	5.75E-04	4.77E-04	2.37E-04
6	5.69E-02	1.91E-01	7.29E-03	0.00E+00	1.90E-01	3.58E-02	3.54E-02	6.59E-04	1.81E-04
7	1.22E-01	9.45E-03	8.21E-03	0.00E+00	8.49E-05	1.96E-02	2.72E-04	1.34E-04	1.98E-04
8	2.27E-02	4.13E-01	1.28E-03	8.79E-04	4.22E-01	5.81E-03	2.45E-03	3.21E-03	8.73E-06
평균	6.80E-02	1.47E-01	4.64E-03	1.85E-04	1.29E-01	3.07E-02	1.85E-01	9.00E-04	1.52E-04
표준편차	4.36E-02	1.73E-01	2.38E-03	2.91E-04	1.72E-01	2.30E-02	2.76E-01	1.06E-03	8.09E-05

번호	<sup>14</sup> C	<sup>55</sup> Fe	<sup>59</sup> Ni	<sup>63</sup> Ni	<sup>90</sup> Cs	<sup>94</sup> Nb	<sup>99</sup> Tc	<sup>129</sup> I	전알파
1	5.03E-04	7.76E-02	2.85E-03	2.51E-01	7.52E-03	4.43E-06	6.48E-07	9.57E-08	9.26E-09
2	6.24E-04	8.75E-02	2.33E-03	1.62E-01	3.27E-03	3.24E-06	4.13E-06	7.82E-08	4.28E-09
3	4.79E-04	1.59E-01	5.19E-03	4.15E-01	2.93E-03	1.53E-06	6.29E-06	6.63E-10	4.24E-06
4	5.80E-04	6.60E-02	1.21E-03	9.52E-02	3.52E-01	2.50E-07	1.44E-06	1.52E-09	1.85E-05
5	4.01E-03	2.46E-01	6.13E-03	4.39E-01	5.30E-02	5.94E-05	4.54E-06	1.04E-08	2.72E-07
6	2.84E-02	3.34E-01	9.77E-04	1.18E-01	1.90E-01	3.32E-07	4.25E-06	3.27E-04	4.44E-08
7	3.30E-03	4.84E-01	3.45E-03	3.49E-01	8.49E-05	4.19E-05	4.27E-06	6.36E-05	1.51E-06
8	2.54E-04	3.44E-02	1.16E-03	9.22E-02	4.22E-01	1.45E-07	9.84E-09	1.43E-07	5.72E-09
평균	4.77E-03	1.86E-01	2.91E-03	2.40E-01	1.29E-01	1.39E-05	3.20E-06	4.89E-05	3.07E-06
표준편차	9.67E-03	1.58E-01	1.92E-03	1.44E-01	1.72E-01	2.32E-05	2.21E-06	1.15E-04	6.39E-06

법은 그림 1과 같이 드럼의 수평방향에 대해 전후좌우, 수직방향에 대해 상중하의 총 12개 지점의 측정 결과를 각각 수평방향에 대해서는 기하평균을, 수직 방향에 대해서는 산술평균을 사용하여 평균표면선량률을 구하였다.

수평방향에 대해 기하평균을 사용한 이유는 거리 효과로 인하여 전후좌우 측정위치에 따라 측정선량에 차이가 많이 날 수 있기 때문이며 이 경우 기하평균이 대표성과 보수성을 갖기 때문이다. 우선 먼저 상중하 각 층의 평균 표면선량률을 기하평균을 사용하여 구하고

$$D_{상} = \sqrt[4]{D_1 \cdot D_2 \cdot D_3 \cdot D_4}$$

$$D_{중} = \sqrt[4]{D_5 \cdot D_6 \cdot D_7 \cdot D_8}$$

$$D_{하} = \sqrt[4]{D_9 \cdot D_{10} \cdot D_{11} \cdot D_{12}}$$

그 다음 드럼 전체의 평균 표면선량률을 산술평균을 사용하여 구하였다.

$$\bar{D} = \frac{D_{상} + D_{중} + D_{하}}{3}$$

표 2. PWR 원전의 고방사능폐수지 핵종분배비

핵종	존재비(%)	핵종	존재비(%)
<sup>60</sup> Co	6.800	<sup>3</sup> H	0.015
<sup>137</sup> Cs	14.666	<sup>14</sup> C	0.477
<sup>125</sup> Sb	0.464	<sup>55</sup> Fe	18.616
<sup>110m</sup> Ag	0.019	<sup>59</sup> Ni	0.291
<sup>134</sup> Cs	12.888	<sup>63</sup> Ni	24.033
<sup>54</sup> Mn	3.073	<sup>90</sup> Sr	0.026
<sup>58</sup> Co	18.536	<sup>94</sup> Nb	0.00139
<sup>144</sup> Ce	0.090	<sup>99</sup> Tc	< 10-3
		<sup>129</sup> I	0.00489
		전알파	< 10-3

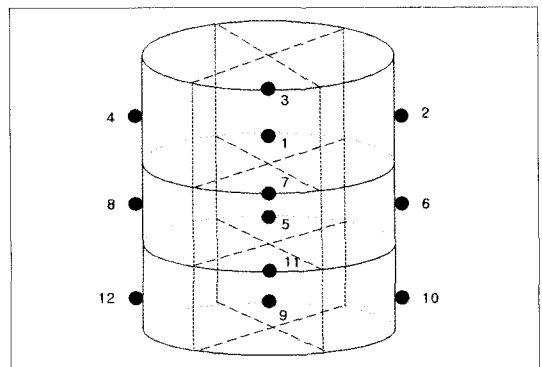


그림 1. 선량대방사능 환산방법 적용을 위한 표면선량률 측정지점

방사능대선량 환산인자는 MCNP 코드를 사용하여 폐기물 종류별로 실제 폐기물을 모사하여 핵종별 단위 방사능 당 드럼 표면에서의 선량률을 계산하였다. MCNP 모사시 HDPE의 밀도는 0.96 g/cm<sup>3</sup> 두께는 1.78 cm, 폐수지의 밀도는 0.76 g/cm<sup>3</sup> 직경 119.4 cm 높이 129.5 cm boundary는 반지름 1.5 m 로 가정했다. 폐수지에 대한 8개 핵종에 대하여 방사능대선량 환산인자를 구한 결과는 표 3 과 같다 [8].

위의 감마핵종 존재비와 방사능대선량 환산인자를 사용하여 식 (2) 와 같이 단위 방사능당 표면선량률을 환산하였다.

$$D = \sum_{i=1}^8 C_i \times f(i) \quad \text{..... (2)}$$

여기서 D는 8 개 핵종의 단위 총 방사능당 표면선량률 환산인자이고 C<sub>i</sub> 는 핵종 i의 방사능대선량 환산인자이며 f(i) 는 핵종 i의 존재비이다. 방사능대선량 환산인자 계산에 사용되는 감마핵종의 존재비는 8 개 핵종에 대한 존재비로 재계산되었으며 그 결과는 표 4 와 같다.

표 4에서 보듯 8 개 핵종의 단위 총 방사능당 표면선량률 환산인자 D 는 185.141 mSv/h/TBq 이다. 그러면 8 개 핵종의 총 방사능당 선량대방사능 환산인자 A는 D의 역수가 된다.

$$A = \frac{1}{D} \quad \text{..... (3)}$$

또한, 핵종별 선량대방사능 환산인자는 A에 핵종 i의 존재비 f(i) 를 곱하여 구한다.

$$A_i = A f(i) \quad \text{..... (4)}$$

8 개 감마핵종의 핵종별 선량대방사능 환산인자가 도출되면 핵종 존재비 f(i) 를 사용하여 나머지 알파베타 핵종의 핵종별 선량대방사능 환산인자를 도출할 수 있다. 이를 사용하면 표면선량률

을 측정하여 드럼 내의 핵종재고량을 평가할 수 있게 된다.

**라. 폐수지 운반등급 분류**

핵종재고량이 도출되면 혼합 핵종의 A2값을 구할 수 있다. 고밀도폴리에틸렌 고건전성용기에 담겨진 폐수지의 혼합 핵종의 A2값은 표 5와 같이 1.19 TBq

표 4. 고밀도폴리에틸렌(HDPE) 고건전성용기(HIC)에 담긴 폐수지의 방사능대선량 환산인자 계산결과

핵종	분율(%)	환산인자 (mSv/h/TBq)	계산결과 (mSv/h/TBq)
<sup>60</sup> Co	12.03	4.22 × 10 <sup>2</sup>	50.76
<sup>137</sup> Cs	25.94	8.62 × 10 <sup>1</sup>	22.35
<sup>125</sup> Sb	0.82	5.83 × 10 <sup>1</sup>	0.48
<sup>110m</sup> Ag	0.03	4.31 × 10 <sup>2</sup>	0.14
<sup>134</sup> Cs	22.79	2.40 × 10 <sup>2</sup>	54.68
<sup>54</sup> Mn	5.44	1.34 × 10 <sup>2</sup>	7.30
<sup>58</sup> Co	32.79	1.51 × 10 <sup>2</sup>	49.43
<sup>144</sup> Ce	0.16	6.70 × 10 <sup>1</sup>	0.001
합계	100		185.141

표 5. 고밀도폴리에틸렌 고건전성용기에 담겨진 폐수지의 혼합핵종의 A2값

핵종	분율 Ri (%)	A2 <sub>i</sub> (TBq)	Ri/A2 <sub>i</sub>
<sup>60</sup> Co	6.800	0.4	0.170
<sup>137</sup> Cs	14.666	0.6	0.244
<sup>125</sup> Sb	0.464	1.0	0.005
<sup>110m</sup> Ag	0.019	0.4	0.000
<sup>134</sup> Cs	12.888	0.7	0.184
<sup>54</sup> Mn	3.073	1.0	0.031
<sup>58</sup> Co	18.536	1.0	0.185
<sup>144</sup> Ce	0.090	0.2	0.005
<sup>3</sup> H	0.015	40	0.000
<sup>14</sup> C	0.477	3	0.002
<sup>55</sup> Fe	18.616	40	0.005
<sup>59</sup> Ni	0.291	-	-
<sup>63</sup> Ni	24.033	30	0.008
<sup>90</sup> Sr	0.026	0.3	0.001
<sup>94</sup> Nb	0.00139	0.7	0.000
<sup>99</sup> Tc	0.00032	0.9	0.000
<sup>129</sup> I	0.00489	-	-
총 알파	0.00031	0.001	0.003
합계	100.0	$\sum_{i=1}^{18} \frac{R_i}{A2_i}$	0.842
혼합 A2	1.190		

표 3. 고밀도폴리에틸렌(HDPE) 고건전성용기(HIC)에 담긴 폐수지드럼의 방사능대선량 환산인자

핵종	<sup>60</sup> Co	<sup>137</sup> Cs	<sup>125</sup> Sb	<sup>110m</sup> Ag	<sup>134</sup> Cs	<sup>54</sup> Mn	<sup>58</sup> Co	<sup>144</sup> Ce
환산인자 (mSv/h/TBq)	4.22 × 10 <sup>2</sup>	8.62 × 10 <sup>1</sup>	5.83 × 10 <sup>1</sup>	4.31 × 10 <sup>2</sup>	2.40 × 10 <sup>2</sup>	1.34 × 10 <sup>2</sup>	1.51 × 10 <sup>2</sup>	6.70 × 10 <sup>1</sup>

이다. 따라서 핵종재고량으로 볼 때 고밀도폴리에틸렌 고건전성용기 폐수지의 경우 1.19 TBq을 경계로 A형과 B형 운반물이 나누어진다. 이는 선량대방사능 환산인자를 사용하여 폐수지 표면에서의 선량 값으로 변환 할 수 있다.

먼저, 표면선량 1 mSv/h 당 폐수지의 총 방사능을 구하면 표 6과 같다. 즉, 폐수지의 단위 표면선량 당 핵종재고량은  $9.554 \times 10^{-3}$  TBq/mSv/h 이다. 따라서 이 값의 역수가 총 핵종재고량당 표면선량률이다.

$$\frac{1}{9.554 \times 10^{-3} \text{ TBq/mSv/h}} = 104.667 \text{ mSv/h/TBq}$$

따라서 표면선량률로 볼 때 고밀도폴리에틸렌 고건전성용기 폐수지의 경우 A형과 B형 운반물이 나누어지는 경계는

$$104.667 \text{ mSv/h/TBq} \cdot 1.19 \text{ TBq} = 124.2 \text{ mSv/h}$$

가 된다.

### III. 결 론

고밀도폴리에틸렌 고건전성용기에 담은 폐수지의 운반등급 분류방법을 도출하기 위해 원전 폐수지의 방사능을 분석하고 방사능대선량 환산인자를 도출하였다. 폐수지의 핵종별 존재비를 사용하여 혼합 핵종의 A2값 1.19 TBq 을 도출하였다. 이를 표면선량으로 환산한 결과 124.2 mSv/h임을 알 수 있었으며 이

표 6. 고밀도폴리에틸렌(HDPE) 고건전성용기(HIC) 폐수지표면선량 1 mSv/h 당 핵종별 방사능재고량

핵종	방사능(TBq)	핵종	방사능(TBq)
<sup>60</sup> Co	$6.497 \times 10^{-4}$	<sup>3</sup> H	$1.452 \times 10^{-6}$
<sup>137</sup> Cs	$1.401 \times 10^{-3}$	<sup>14</sup> C	$4.559 \times 10^{-5}$
<sup>125</sup> Sb	$4.433 \times 10^{-5}$	<sup>55</sup> Fe	$1.779 \times 10^{-3}$
<sup>110m</sup> Ag	$1.768 \times 10^{-6}$	<sup>59</sup> Ni	$2.782 \times 10^{-5}$
<sup>134</sup> Cs	$1.231 \times 10^{-3}$	<sup>63</sup> Ni	$2.296 \times 10^{-3}$
<sup>54</sup> Mn	$2.936 \times 10^{-4}$	<sup>90</sup> Sr	$2.465 \times 10^{-6}$
<sup>58</sup> Co	$1.771 \times 10^{-3}$	<sup>94</sup> Nb	$1.328 \times 10^{-7}$
<sup>144</sup> Ce	$8.599 \times 10^{-6}$	<sup>99</sup> Tc	$3.057 \times 10^{-8}$
		<sup>129</sup> I	$4.672 \times 10^{-7}$
		총 알파	$2.933 \times 10^{-8}$
		합계	$9.554 \times 10^{-3}$

값이 A형 운반물과 B형 운반물의 핵종재고량 경계값임을 알 수 있었다.

### 참고문헌

- [1] 과학기술부, “과기부령 제30호: 방사선안전관리 등의 기술기준에 관한 규칙,” 제83조-87조, 과학기술부, 2001.
- [2] 과학기술부, “과학기술부고시 제2001-23호: 방사성물질 등의 포장 및 운반에 관한 규정,” 제 8조, 과학기술부, 2001.
- [3] 과학기술부, “과학기술부고시 제2005-18호: “중저준위 방사성폐기물 인도규정,” 제6조, 과학기술부, 2005.
- [4] 지광용, 김원호, 손세철, 박영재, 표형렬, “ 원전 방사성폐기물 핵종분석용 척도인자 및 주기적 검증방법 개발,” 별책 11, 한국수력원자력(주), 2005.
- [5] 전병기, 최기섭, 김태욱, 이진재, 김성일, 이창민, 육대식, 이상철, 이윤희, 안민호, Michael, “ 기존 폐기물 처분대비 방안정립 연구, 한국수력원자력, 2006.
- [6] ISO 21238 : 2005 - Nuclear Energy - Nuclear Fuel Technology - The Scaling Factor method to determine the radioactivity of low and intermediate level radioactive waste packages generated at nuclear power plant, 2005.
- [7] EPA, “Final Decision to Approve the DOE’s Remote Handled TRU Waste Characterization Program Implementation Plan, 2004.
- [8] 김경덕, 김태욱, 이진재, 황기하, 김성일, 이창민, 육대식, 이상철, 강상희, “척도인자 운영프로그램 및 기존드럼 핵종분석방법 개발,” 한국수력원자력, 2005.