

# The Assessment and Reduction Plan of Radiation Exposure During Decommissioning of the Steam Generator in Kori Unit 1

## 고리1호기 증기발생기 제염해체 시 작업자 피폭선량 평가 및 저감화 방안

Young Jik Son<sup>1,2</sup>, Sang June Park<sup>1</sup>, Jihyang Byon<sup>1</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>*Kori Nuclear Power Site, Korea Hydro & Nuclear Power, 96-1, Gilcheon-gil, Jangan-eup, Gijang-gun, Busan, Republic of Korea*

손영직<sup>1,2</sup>, 박상준<sup>1</sup>, 변지향<sup>1</sup>, 안석영<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>*부산대학교, 부산광역시 금정구 부산대학교63번길 2*

<sup>2</sup>*한국수력원자력(주) 고리원자력본부, 부산광역시 기장군 장안읍 길천길 96-1*

(Received March 20, 2018 / Revised June 8, 2018 / Approved July 18, 2018)

Korea's first commercial nuclear power plant, Kori Unit 1, was permanently shut down on June 18, 2017, after 40 years of successful operation. Kori Unit 1 plans to construct a waste treatment facility in the turbine building prior to commencement of dismantling in earnest. Various radioactive wastes are decontaminated, disassembled, cut and melted in the waste treatment facility and sent to the radioactive waste repository. The proportion of metal radioactive waste in dismantled waste is about 70%, of which large metal radioactive waste is mainly generated in the primary circuit and has high radioactivity, so radiation exposure must be managed during disassembly. In this study, the steam generators are selected as large metal radioactive waste, the exposure doses of the dismantling workers are calculated using RESRAD-RECYCLE code and the methods for reducing the exposure doses are suggested.

**Keywords:** Decontamination, Decommissioning, Steam generator, Exposure dose calculation

\* Corresponding Author.

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

### ORCID

Young Jik Son <http://orcid.org/0000-0001-9859-334X>

Jihyang Byon <http://orcid.org/0000-0001-8425-8807>

Sang June Park <http://orcid.org/0000-0002-6998-2490>

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

대한민국 첫 상업원전인 고리1호기는 40년간의 성공적인 운영을 끝내고 2017년 6월 18일 영구정지 되었다. 고리1호기는 본격적인 해체에 앞서 터빈건물에 폐기물처리시설 건설을 계획하고 있다. 각종 방사성폐기물은 폐기물처리시설에서 제염, 해체, 절단, 용융되어 자체처분 되거나 방사성폐기물 처분장으로 보내 진다. 해체폐기물 중 대형금속방사성폐기물은 주로 1차계통측 기기들로 높은 방사능을 띄고 있어 해체활동 중 작업자의 피폭관리가 필요하다. 본 논문에서는 대형금속방사성폐기물 중 크기가 가장 크고 형상이 복잡한 증기발생기를 선정하여 RESRAD-RECYCLE 코드를 이용하여 작업자 피폭선량을 평가하고 저감화 방안을 수립 하고자 한다.

중심단어: 제염, 해체, 증기발생기, 피폭선량계산

## 1. 서론

고리1호기는 한국 최초의 상업용 원전으로 40년간의 성공적인 운영을 마치고 2017년 6월 18일 0시를 기해서 영구정지 되었다. 산업통상자원부(2017.06.19) 보도자료에 따르면 시설물 본격해체에 앞서 터빈건물 부분 철거 후 폐기물처리시설 건설을 계획하고 있다. 원전 해체 시 발생하는 예상 해체 방사성폐기물량은 약 6,200 ton이며, 금속방사성 폐기물은 4,150 ton으로 약 70%를 차지한다[1]. 대형방사성폐기물은 발전소 1차계통측의 방사성 환경에서 구동된 기기들로 높은 방사능을 띄고 있어 해체활동 중 피폭관리 및 오염방지 조치가 필요하다. 특히 증기발생기는 무게 326 ton, 부피 400 m<sup>3</sup>로 크기가 가장 크고 형상이 복잡하여 제염해체 시 어려움이 커 효과적인 처리방안 마련이 필요하다. 증기발생기 제염해체 해외 사례를 보면 1차측인 수실과 세관을 제외한 부분은 오염이 없거나 미미하여 대부분 자체처분이 가능하다.

본 논문에서는 해체 방사성폐기물의 약 70%를 차지하는 금속방사성폐기물 중 크기가 크고 형상이 복잡한 증기발생기를 선정하였다. 증기발생기 해체작업자의 피폭을 저감화 하는 방안을 제안하기 위한 작업자 기초 피폭계산을 RESRAD-RECYCLE을 이용하여 분석하였다. 피폭선량 평가에 필요한 선원항은 1998년 고리 1호기 교체 증기발생기 방사성오염도를 참고하였다[2]. 고리 1호기 증기발생기 해체 작업자 피폭선량 평가를 통하여 이미 교체한 증기발생기 해체 및 해체하게 될 원자력발전소의 증기발생기 해체 작업 시 작업자의 피폭선량 평가 방법을 제시하고, 고피폭 작업자에 대한 피폭 저감화 방안을 수립하고자 한다.

## 2. 증기발생기 해체폐기물 처리 작업자 피폭선량 계산

### 2.1 증기발생기 처리 과정

증기발생기의 제염해체 과정은 다음과 같이 요약할 수 있으며 흐름도는 Fig. 1과 같다.

- Steam Dome 분리
- 증기발생기 수실 및 튜브판을 분리
- 세관의 전 처리를 위해 grit blasting 수행
- Lower Shell을 분리
- U-tube와 Wrapper를 함께 절단(U-tube를 감싸고 있는 Wrapper의 경우 7개의 세관 지지판과 용접되어 있기 때문에 세관과 함께 절단)

증기발생기의 2차측 부분인 Steam Dome, Lower Shell, Wrapper의 경우 방사선 측정 후 자체 처분된다. 수실(Channel Head)과 튜브판(Tube Sheet)은 Band Saw를 이용하여 절단 후 CNC밀링머신으로 제염 한다. U-tube는 절단 전 Grit Blasting으로 전 처리하며, 스웨덴의 Studsvik에서는 독일의 Ringhal3 증기발생기 U-tube Grit Blasting을 통해 얻은 제염계수(DF) 7으로 설정하였다[3]. 고리1호기 화학제염 방법은 원자로냉각재펌프를 이용하는 방법과 잔열제거펌프를 이용하는 두 가지 방안이 있다. 원자로냉각재 펌프를 이용 시 증기발생기 및 원자로용기 제염이 가능하다. 하지만 계통 가압 및 원자로냉각수펌프 밀봉수를 처리해야 한다는 단점이 있다. 잔열제거펌프 이용 시에는 유량이 적어 증기발생기 제염이 불가능

하다[4]. 그러므로 화학제염 방법 및 예상 제염계수가 결정되지 않아, 본 논문에서는 증기발생기 화학제염은 하지 않는 것으로 설정하여 선량평가를 하였다.

### 2.2 증기발생기 제원 및 선원향

선량평가를 위해서는 증기발생기 제원 및 방사성 핵종별 선원향이 필요하다. 고리1호기 증기발생기는 높이 21 m, 지름 4.5 m, 무게 약 326 ton이며 그 중 수실 55 ton, 세관 45 ton 등으로 구성된다[5]. 선량평가 자료로 1998년 고리 1호기 증기발생기 교체 당시 측정된 데이터를 이용하였다. Table 1 에는 핵종별 방사능이 자세히 나타나 있다. 증기발생기 총 방사능은 3.33 TBq로 수실에 약 5%, 세관에 95%가 존재한다. RESRAD-RECYCLE 코드 입력 단위는  $Bq \cdot g^{-1}$ 이므로 총 방사능에서 무게를 나눈 값을 사용하였다. 터빈건물에 폐기물처리시설이 완공되는 시점은 영구정지 후 9년이 지난 2026년으로 16개의 핵종 중 반감기가 긴  $^{54}Mn$ ,  $^{60}Co$ ,  $^{65}Zn$ ,  $^{106}Ru$ ,  $^{144}Ce$ 을 제외한 핵종들의 방사능은 영향을 주지 않을 정도로 미미하

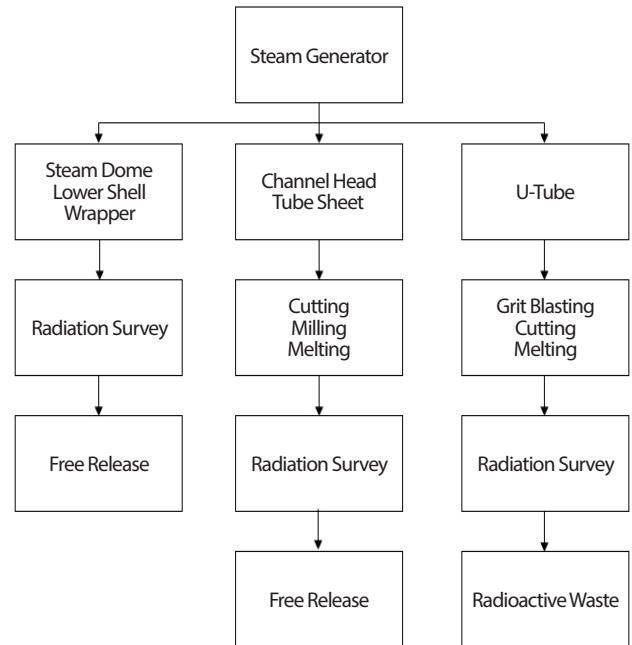


Fig. 1. Flow chart for dismantling of a steam generator used in a nuclear power plant.

Table 1. Radioactivity measurement of the replaced steam generator from Kori Unit 1 in 1998

Radionuclide	Decay (Day)	Chamber (MBq)	U-Tube (MBq)	SG Total (MBq)
$^{51}Cr$	27.704	$7.71 \times 10^2$	$1.71 \times 10^5$	$1.72 \times 10^5$
$^{54}Mn$	312.7	$1.57 \times 10^2$	$3.49 \times 10^4$	$3.50 \times 10^4$
$^{59}Fe$	44.63	$1.16 \times 10^2$	$2.58 \times 10^4$	$2.59 \times 10^4$
$^{57}Co$	270.9	$1.37 \times 10^1$	$3.04 \times 10^3$	$3.06 \times 10^3$
$^{58}Co$	70.8	$5.05 \times 10^3$	$1.12 \times 10^6$	$1.13 \times 10^6$
$^{60}Co$	1923.92	$2.85 \times 10^3$	$6.33 \times 10^5$	$6.36 \times 10^5$
$^{65}Zn$	244.4	$8.81 \times 10^1$	$1.96 \times 10^4$	$1.97 \times 10^4$
$^{85}Sr$	64.84	$6.75 \times 10^2$	$1.50 \times 10^5$	$1.51 \times 10^5$
$^{95}Zr$	64.2	$2.87 \times 10^2$	$6.38 \times 10^4$	$6.40 \times 10^4$
$^{95}Nb$	35.06	$5.58 \times 10^2$	$1.24 \times 10^4$	$1.25 \times 10^5$
$^{103}Ru$	39.35	$8.67 \times 10^2$	$1.93 \times 10^5$	$1.93 \times 10^5$
$^{106}Ru$	368.2	$8.31 \times 10^2$	$1.85 \times 10^5$	$1.85 \times 10^5$
$^{113}Sn$	115.1	$2.54 \times 10^1$	$5.64 \times 10^3$	$5.67 \times 10^3$
$^{136}Cs$	13.16	$2.30 \times 10^3$	$5.11 \times 10^5$	$5.13 \times 10^5$
$^{141}Ce$	32.5	$1.75 \times 10^2$	$3.89 \times 10^4$	$3.91 \times 10^4$
$^{144}Ce$	284.3	$1.72 \times 10^2$	$3.82 \times 10^4$	$3.84 \times 10^4$
Total		$1.49 \times 10^4$	$3.32 \times 10^6$	$3.33 \times 10^6$

Table 2. Input parameters used for RESRAD-RECYCLE

Radionuclide	Decay (Day)	Chamber (Bq·g <sup>-1</sup> )		U-tube (Bq·g <sup>-1</sup> )	
		Before Milling	After Milling	Before Decontamination	After Decontamination
<sup>54</sup> Mn	312.7	-	-	0.53	-
<sup>60</sup> Co	1923.92	15.9	0.01	4309	615
<sup>65</sup> Zn	244.4	-	-	0.04	-
<sup>106</sup> Ru	368.2	0.03	-	8.47	1.2
<sup>144</sup> Ce	284.3	-	-	0.28	-
Total		15.93	0.01	4.32 × 10 <sup>3</sup>	6.16 × 10 <sup>2</sup>

였다. RESRAD-RECYCLE code 방사성 핵종 및 선량은 입력인자는 Table 2와 같다.

### 2.3 RESRAD-RECYCLE 코드 입력 인자

RESRAD-RECYCLE 코드는 규제해제 된 철재 및 알루미늄의 재활용 및 재이용 과정에서 유발되는 방사선학적 영향을 평가하기 위한 목적으로 미국 DOE의 지원 하에서 ANL (Argonne National Laboratory)의 EAD (Environmental Assessment Division)에서 개발되었다. 방사성금속폐기물의 이동과 유통에 따라 다양한 시나리오를 설정하여 작업자와 일반인이 받는 선량을 평가할 수 있다. 금속 방사성폐기물의 수집, 운반, 처리 작업자(Worker)와 소비자 및 공공재를 이용하는 일반인(Public)에 대해서 총 41개의 시나리오와 54개의 핵종에 대해서 잠재 피폭선량 및 위해도를 평가하도록 고려되었다. RESRAD-RECYCLE의 금속 재활용 과정은 Fig. 2와 같다[6].

RESRAD-RECYCLE 코드는 내부피폭 선량환산인자(Dose Conversion Factor)를 ICRP-26을 사용하고 있어, 국내에서는 ICRP-60 선량모델을 사용하기 때문에 선량환산인자를 수정하였다. 작업자의 경우 ICRP-72에 따라 호흡과 섭취의 선량환산인자를 적용하여 내부피폭 선량을 평가하였다[7].

#### 2.3.1 Radionuclide Partitioning Factor

금속폐기물에 포함된 각 핵종들은 용융점, 밀도, 휘발성 등의 특징에 따라 용융 시 ingot, slag, dust로 분배되게 된다. 대표적으로 <sup>60</sup>Co은 ingot, <sup>235</sup>U는 slag, <sup>137</sup>Cs은 dust로 대부분 분배된다.

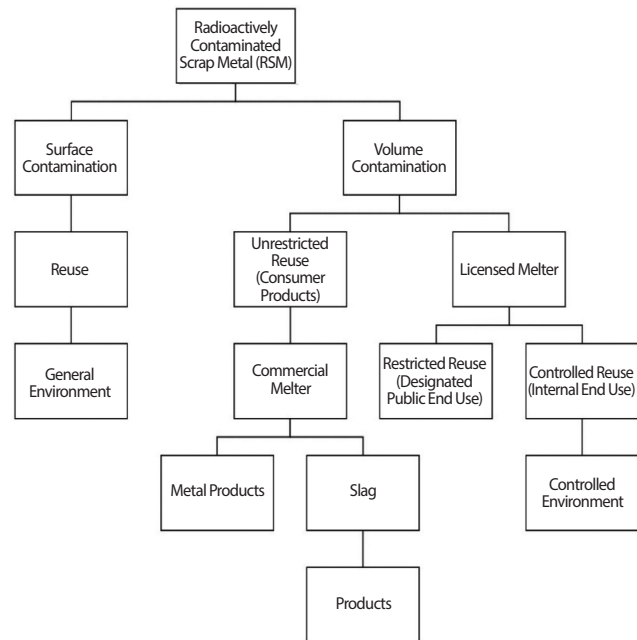


Fig. 2. Concept of recycle process used in RESRAD-RECYCLE code.

본 논문에서는 독일 CARLA 용융설비의 Radionuclide Partitioning Factor값을 사용하였다. Table 3은 CARLA 용융설비의 Radionuclide Partitioning Factor값으로 20년간 금속 방사성폐기물을 용융한 데이터를 이용하여 도출된 값이다[8].

#### 2.3.2 Mass Partitioning Factor

Mass Partitioning Factor는 용융과정에서 생성되는 생산물들의 무게비율로 용융 생성물에는 ingot, slag, dust가 있다.

Table 3. Radionuclide partitioning factors from CARLA melting facility in Germany

Nuclides		Distribution in %		
		Ingot	Slag	Dust
α-Nuclides (and daughters)	<sup>235</sup> U	1	99	
	<sup>238</sup> U			
	<sup>241</sup> Pu	1	99	
	<sup>241</sup> Am	1	99	
	<sup>231</sup> Th	1	99	
	<sup>234</sup> Th			
	<sup>234m</sup> Pa	1	99	
β/γ-Nuclides	<sup>55</sup> Fe	100	< 1	-
	<sup>60</sup> Co	88	11	1
	<sup>63</sup> Ni	90	10	-
	<sup>90</sup> Sr	< 1	97	2
	<sup>134</sup> Cs	< 1	60	40
	<sup>137</sup> Cs			
	<sup>110m</sup> Ag	< 1	32	68
	<sup>152</sup> Eu	4	95	1
	<sup>154</sup> Eu			
	<sup>144</sup> Ce	50	50	< 1
	<sup>54</sup> Mn	60	39	1
	<sup>65</sup> Zn	36	12	52
	<sup>14</sup> C	-	5	95
	<sup>95</sup> Zr	28	72	-
	<sup>103</sup> Ru	67	< 1	33
	<sup>106</sup> Ru			
<sup>125</sup> Sb	95	4	1	
<sup>95</sup> Nb	81	17	2	
<sup>96</sup> Nb				

ingot이 주를 이루며 그 비율은 40~90%이다. Mass Partitioning Factor는 여러 가지 요인들이 작용하며, 작용요인으로는 용융로의 종류, 첨가물, 용융로작업자의 기술 등이 있다. RESRAD-RECYCLE 코드에서는 기본값으로 ingot (90%)-slag (10%)-dust (1%)을 사용한다.

본 논문에서는 ingot (98.35%)-slag (1.64%)-dust (0.01%) 값을 사용하였다. 이 데이터는 Studsvik에서 사용 후 연료

저장조 랙 3.3 ton 처리 시 직접 측정된 데이터로 금속용융은 유사하므로 증기발생기 처리에도 적용이 가능한 값으로 사료된다[9].

### 2.3.3 Worker Scenario Description

해외 증기발생기 처리 사례 및 국내 증기발생기 처리 연구자료를 이용하여 작업시간, 인원, 차폐 등을 설정하였다.

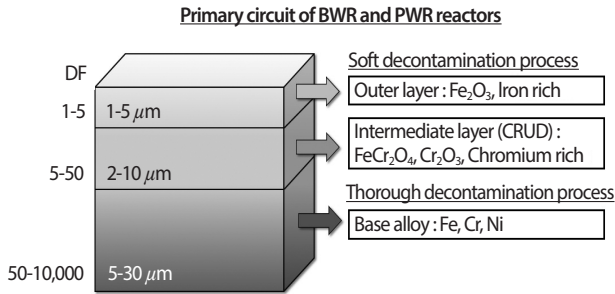


Fig. 3. Theoretical measure of the crude film thickness in the primary system [9].

시나리오는 수실해체작업과 세관해체작업 두 가지로 나누어질 수 있다.

### 2.3.3.1 수실 해체 작업(Scenario 1)

#### - Scrap cutter

증기발생기에서 수실과 튜브시트를 분리하고 세분화하는 작업자로 절단과정은 주로 자동적으로 이루어진다. 증기발생기에서 수실과 튜브시트를 분리하는 작업에는 circular saw를 사용한다. 작업자는 절단장비를 설치하고 작동하는 역할을 한다. 수실 및 튜브 시트는 밀링을 위해 적당한 크기로 절단된다.

수실의 경우 반구형의 모양으로 세분화하지 않을 시 밀링에 어려움이 있다. 250 mm (L)\*250~500 mm (W) 로 절단 시 곡률이 약 0.55의 조각이 생산되며, 밀링에 적당크기이다. 조각의 수는 약 250개로 설정하였다. 수실 및 튜브시트를 세분화하는 과정은 band saw를 이용하며 이때 작업자는 절단 대상물의 위치를 조정하고 절단장비를 운전하는 역할을 한다. 작업자의 작업 중 피폭예상 시간은 40시간으로 설정하였다. 작업자의 수는 2명으로 설정하였다.

#### - Scrap loader

세분화된 조각을 밀링 작업대로 운반하는 작업자로 1개의 조각을 운반하는데 약 10분으로 설정하고 총 작업시간은 42시간으로 설정하였다. 작업인원은 2명이다.

#### - Milling worker

밀링머신을 통해 수실 및 튜브시의 오염된 부분을 제거하게 된다. 밀링의 두께에 따라 다른 제거계수를 얻을 수 있다. 밀링의 두께가 두꺼워질수록 큰 제거계수를 얻을 수 있다.

Fig. 3을 보게 되면 1차측 이론적 크러드막 두께는 약 50 μm임을 확인할 수 있다[10].

본 논문에서는 수실내부의 크래딩 부위에 미세한 균열이 있을 것을 고려하여 밀링 두께를 1 mm이상으로 설정하였다.

작업자는 밀링머신에 절단된 금속을 고정하고 밀링머신을 작동하는 작업자로 밀링머신은 자동적으로 운전된다고 가정하였다. 1개의 금속조각을 밀링머신에 설치하는데 5분으로 설정하였고 총 작업시간은 21시간으로 설정하였다. 작업 인원은 1명이다.

#### - Furnace operator

용융로는 3.2 ton 용량으로 한번 배치 시 1 ton의 ingot 3개를 생산하는 설비로 가정하였다. 하루에 2번 배치로 총 6 ton의 ingot을 생산하는 것으로 가정하였다.

#### - Slag handler

용융로에서 생성된 slag를 걷어내는 작업자로 60 kg을 제거하는데 0.2시간으로 설정하였다. 이 시간은 스웨덴의 Studsvik에서 사용 후 연료 저장조 랙 용융 시 직접 측정된 데이터를 사용하였다기.

### 2.3.3.2 세관 해체 작업 (Scenario 2)

#### - Lower shell cutter

증기발생기에서 steam dome, 수실, 튜브관을 분리하고 남은 부분 중 lower shell을 분리하는 작업자이다. lower shell 두께 80 mm, wrapper 두께 9.5 mm로 입력 시 steel 89.5 mm의 차폐체가 있는 것으로 설정하였다. 작업은 대형 circular saw를 이용하여 6등분하여 절단한다. circular saw의 속도는 150~250 mm·min<sup>-1</sup>이다. 작업자는 circular saw를 설치 및 절단 3시간씩 6번 반복한다. 작업시간은 총 18시간이다.

#### - Wrapper cutter

lower shell 절단 후 남아있는 wrapper를 절단하는 작업으로 wrapper의 두께인 9.5 mm의 Steel 차폐체가 있는 것으로 입력하였다. 6등분으로 절단하며 1회 절단 시간은 2시간으로 총 12시간이 걸린다.

#### - Tube cutter

Wrapper 절단과 tube 절단은 함께 이루어진다. 증기발



Table 4. Input values for steam generator tube bundle disassembly time

Task		Time (h)		
U-band	U-Band Cutting & Disassembly	40		
Except U-band	Installation of cutter	Time	# of Repeat	Sub Total
	Tube cutting	2	6	12
	Removal of cut tubes	4	6	24
Total		100		

Table 5. Scenario 1 (Chamber Dismantling Workers): Source Geometries and Exposure Parameters

Worker Scenario	Source Geometry	Mass (t)	Density (g·cm <sup>-3</sup> )	Thickness (cm)	Radius (cm)	Distance (cm)	Time (h)	Shielding	Dust Loading (g·cm <sup>-3</sup> )	Number of workers
Scrap Cutter	1 full cylinder	55	2.53	235	171.45	200	40	0.3 cm Lead	0.0005	2
Scrap Loader	1 full cylinder	0.25	7.85	25.34	20	100	42	-	0.0005	2
Milling Worker	1 full cylinder	0.25	7.85	25.34	20	150	21	-	0.0005	1
Furnace Operator	1 full cylinder	3	7.86	100	35	50	73	12 cm Concrete	0.001	2
Slag Worker	1 full cylinder	0.06	0.6	1.5	25	50	3	1.2 cm Steel	0.001	1

Table 6. Scenario 2 (Tube Dismantling Workers): Source Geometries and Exposure Parameters

Worker Scenario	Source Geometry	Mass (t)	Density (g·cm <sup>-3</sup> )	Thickness (cm)	Radius (cm)	Distance (cm)	Time (h)	Shielding	Dust Loading (g·cm <sup>-3</sup> )	Number of workers
Lower Shell Cutter	1 full cylinder	45	0.49	960	175	200	18	8.95 cm Steel	0.0005	2
Wrapper Cutter	1 full cylinder	45	0.49	158	175	200	12	0.95 cm Lead	0.0005	2
Tube Cutter	1 full cylinder	45	0.49	158	175	200	100	0.3 cm Lead	0.0005	4
Scrap Loader	1 full cylinder	0.45	0.49	96	55.4	50	15	1 cm Steel	0.0005	1
Furnace Operator	1 full cylinder	3	7.86	100	35	50	60	12 cm Concrete	0.001	2
Slag Worker	1 full cylinder	0.06	0.6	1.5	25	50	2.5	1.2 cm Steel	0.001	1

생기 수평, 수직 지지대가 wrapper에 용접되어 있기 때문이다. wrapper 절단 후 tube 절단기를 설치하고 tube를 절단한다. 튜브번들에는 수직, 수평 지지대가 설치되어 있어 절단이 까다롭다. 작업은 두 단계로 나누어진다. 튜브번들에서 U-band 부위를 절단하고 수직지지대를 제거, U-band를 제외한 부분을 절단하고 수평지지대를 제거하는 단계이다. 부위 별 작업시간은 Table 4과 같다.

- **Scrap loader**

절단된 tube를 운반하는 작업자로 한번 운반 시 450 kg을 운반한다고 가정하였다. 운반용기는 1 cm 두께의 steel을 사용하며, code입력 시 steel 1 cm의 차폐체가 있는 것으로 설정하였다. 총 작업시간은 15시간이다.

시나리오별 작업자의 수, 작업시간, 차폐, 방사선원과의 거리 등을 정리하면 Table 5, 6과 같다.

Table 7. Chamber Dismantling Workers Expose Dose

Worker Scenario	Person (mSv)	Group (man-mSv)
Scrap Cutter	$6.38 \times 10^{-2}$	$1.28 \times 10^1$
Scrap Loader	$5.59 \times 10^{-3}$	$1.12 \times 10^{-3}$
Milling Worker	$9.82 \times 10^{-3}$	$9.82 \times 10^{-3}$
Furnace Operator	$9.36 \times 10^{-5}$	$1.87 \times 10^{-4}$
Slag Worker	$4.21 \times 10^{-5}$	$4.21 \times 10^{-5}$
Total		$1.49 \times 10^1$

Table 8. Tube Dismantling Workers Expose Dose

Worker Scenario	Person (mSv)	Group (man-mSv)
Lower Shell Cutter	$1.01 \times 10^{-1}$	$2.02 \times 10^{-1}$
Wrapper Cutter	$5.38 \times 10^{-1}$	$1.08 \times 10^0$
Tube Cutter	5.02	$2.01 \times 10^1$
Scrap Loader	$7.63 \times 10^{-1}$	$7.63 \times 10^{-1}$
Furnace Operator	$8.22 \times 10^{-1}$	$1.64 \times 10^0$
Slag Worker	$6.90 \times 10^{-3}$	$6.90 \times 10^{-3}$
Total		$2.38 \times 10^1$

Table 9. Summary of chemical decontamination results from the NPPs decommissioned [10, 11]

Plant	Corrosion products (kg)	Activity removal (ci)	Resin waste (m <sup>3</sup> )	DF		Applied technology
				RCS	SG	
Maine Yankee	305	102	15.3	31	-	DFD
Stade	435	730	15.4	58	160	CORD
Obrigheim	313	151	6.7	625	1409	CORD

### 2.4 작업자 피폭선량 계산

RESRAD-RECYCLE code를 이용하여 증기발생기 해체 작업자 별 피폭선량을 평가하였다. 평가 결과는 Table 7, 8과 같다. 수실해체 작업자 중 수실 및 튜브시트를 절단하는 scrap

cutter가 가장 많은 피폭을 받았으며, 세관해체 작업자 중에서는 tube cutter가 가장 많은 피폭을 받았다.

고리1호기 증기발생기 제염해체 시 무게 약 326 ton중 세관을 제외한 나머지 부분은 무제한 재활용이 가능하다. 무제한 재활용 가능한 무게비율은 약 86%이다. 증기발생기 제염



Table 10. Reduced dose from the different approaches

	Dose after the suggestion (man-mSv)	Dose Reduction (%)	Remarks
Chemical Decontamination	0.8~0.151	96~99	DF:30~160
After natural decay	6.43	73	20 years decay
Improve worker skills	22.2	7	Reduce cutting time 10%

해체 시 집단선량은 23.9 man-mSv이며, 세관 절단작업자는 5.02 mSv로 가장 많은 방사선 피폭선량을 받았다. 증기발생기 세관처리 작업은 상대적으로 고피폭 작업으로 작업자 선량 저감화 방안의 수립이 필요함을 알 수 있다.

### 3. 작업자 피폭선량 저감화 방안

#### 3.1 증기발생기 화학제염을 통한 선량 저감

화학제염은 일반적으로 해체작업이 이루어지기 전에 실행된다. 발전소의 기존설비를 활용하여 1차측의 주유기기 및 배관을 제염하여 1차측 해체 시 작업자의 피폭저감 및 오염물질의 확산을 방지한다. Table 9는 해외 원자력 발전소의 화학제염 적용사례를 정리한 것이다[11, 12].

고리1호기 화학제염 방법은 원자로냉각재펌프를 이용하는 방법과 잔열제거펌프를 이용하는 두 가지 방안이 있다. 원자로냉각재 펌프를 이용 시 증기발생기 및 원자로용기 제염이 가능하다. 하지만 계통 가압 및 원자로냉각수펌프 밀봉수를 처리해야 한다는 단점이 있다. 잔열제거펌프 이용 시에는 유량이 적어 증기발생기 제염이 불가능하다[4]. 고리1호기 증기발생기를 화학제염하여 30~160의 제염계수(DF)를 얻는다면 작업자의 피폭선량은 0.8~0.15 man-mSv가 된다.

#### 3.2 방사성 붕괴 후 처리

독일의 대형폐기물 처리 방식은 대형폐기물을 원형 그대로 중간저장 시설로 이송 후 장기간 보관 후 처리하는 방법으로 30~50년간 중간저장 시설에서 보관 후 처리한다. 붕괴기간이 10년 이상 넘어가면서 단주기 핵종들의 방사성능도는 무시할 수 있을 만큼 낮았으며,  $^{60}\text{Co}$ 만이 남아 있었다.  $^{60}\text{Co}$ 의

반감기가 약 5년으로 5년이 지날 때마다 약 1/1.9만큼 감소하는 것을 확인하였다. 독일과 같이 대형폐기물 중간저장 시설만 갖추어 진다면 20년 이상 보관 후 처리하는 것이 작업자 피폭 저감화 측면에서 효과가 있다.

#### 3.3 폐증기발생기 활용

고리1호기 증기발생기를 처리하기 전 1998년 교체된 폐증기발생기를 먼저 처리하는 것을 고려하여야 한다. 폐기물 처리 설비가 완공되는 2026년 폐증기발생기를 처리한다고 가정하였을 때 약 28년 동안 방사성 붕괴를 하므로 방사능이 감소할 수 있다. 정지 후 초기 방사능 농도와 비교하면 제염계수 DF는 수실의 경우 약 200, u-tube 의 경우 약 73으로 총 방사능이 감소 되었다. 증기발생기 제염해체는 국내에서 최초로 이루어지는 프로젝트이므로 많은 시행착오가 예상된다. 용융, 자동절단, CNC milling 과 같이 처리용량과 시간이 정해져 있는 작업을 제외하고 장비설치, 위치운반과 같이 작업을 준비하는 시간을 감소한다면 감소하는 시간만큼 피폭선량이 감소하게 된다. 개인선량을 가장 많이 받는 증기발생기 세관작업자의 작업시간을 100시간에서 90시간까지만 감소시키더라도 5.02 mSv에서 4.52 mSv로 감소한다.

따라서 28년간 붕괴한 2기의 폐증기발생기를 먼저 처리하여 작업자 숙련도 향상 및 작업 시 생기는 예상치 못한 상황이나 결과를 수정한다면 고리1호기 증기발생기를 처리 시 제염해체 작업자 피폭선량 저감화 효과가 있을 것으로 기대된다.

제시한 3가지 방안을 모두 적용하면 큰 효과를 볼 수 있다. 모든 방법을 함께 적용하지 못한다면 증기발생기 해체 전 화학제염을 하지 않았을 경우 별도의 저장 시설에 보관하여 붕괴 후 처리하고, 화학제염을 하였을 경우 즉시 해체하는 방법을 적용하는 것이 작업자 피폭선량 저감에 가장 적합할 것이다.

## 4. 결론

본 논문에서는 대형 금속방사성폐기물 중에서도 크기가 가장 크고 형상이 복잡한 증기발생기 제염해체 시 작업자 피폭선량을 도출해 보았다. 선량평가를 위해서는 방사선 핵종별선원항이 필요하다. 선량평가 자료로 1998년 고리 1호기 증기발생기 교체 당시 측정된 데이터를 이용하였다. 증기발생기 총선량은 3.33 TBq으로 수실에 약 5%, 세관에 95%가 존재한다. 고리1호기 터빈건물에 해체설비가 완공되는 시점인 2026년에 증기발생기를 처리하는 것으로 가정하였다. 평가 코드 RESRAD-RECYCLE 를 이용하였다.

해외 증기발생기 처리 사례 및 국내 폐증기발생기 처리 상용화 연구자료를 이용하여 작업자 및 작업시간을 선정하였다. 그 결과 증기발생기 제염해체 작업자의 피폭선량은 국내 법령 선량 한도 기준치인  $20 \text{ mSv} \cdot \text{yr}^{-1}$ 이하를 만족하는 것을 알 수 있었다. 집단선량은  $23.9 \text{ man} \cdot \text{mSv}$ 이며, 작업자 중 가장 피폭선량이 가장 큰 작업자는 증기발생기 세관절단 작업자로  $5.02 \text{ mSv}$ 를 받는 것으로 나타났다.

세관절단 작업자는 법령 선량 기준치인 이하이지만 고피폭을 받는 작업자로 피폭 저감화 방안을 수립해 보았다. 연구 결과 화학제염을 통한 증기발생기 방사능저감, 방사성 붕괴 후 처리, 폐증기발생기 활용을 통해 작업자 피폭선량 저감효과가 있을 것으로 예상된다.

## Acknowledgement

This work was supported by the Nuclear Safety Research Program through the Korea Foundation Of Nuclear Safety (KoFONS) using the financial resource granted by the Nuclear Safety and Security Commission (NSSC) of the Republic of Korea (No.1305009); and was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea government (No. NRF-2018M2B2B1065637).

## REFERENCES

[1] R. Coates, H. Efraimsson, V. Efremenkov, M. Laraia,

I. Majkowski, P.J. McIntyre, R. Meyer, W. Miller, J.G. Nokhamzon, M. Ondaro, L. Pillette-Cousin, M. Rhodes, M. Rodriguez, S. Romano, L. Teunckens, and L. Valencia, "Managing Low Radioactivity Material from the Decommissioning of Nuclear Facilities", IAEA, Technical Reports Series No. 462, 10-13 (2008).

[2] S.W. Shin, S.J. Son, C.H. Cho, and M.J. Song, "Analysis of Dose Rates form Steam Generator to be Replaced from Kori Unit 1", J. of The Korea Association Radiation Protection, 23(3), 175-184 (1998).

[3] A. Lindström, B. Wirendal, and M. Lindberg, "New Treatment Concept for Steam Generators Technical Aspects", Waste Management Symposia Conference, Session 24-03, February 25-March 1, Tucson 2007, Tucson.

[4] D.H. Lee, H.C. Kwon, and D.K. Kim, "Full System Chemical Decontamination Concept for Kori Unit 1 Decommissioning", J. Nucl. Fuel Cycle Waste Technol., 14(3), 289-295 (2016).

[5] Korea Electric Power Corporation, Kori Unit 1 Steam Generator Replacing Experience Report, '99-0328-DAN-38, KEPSCO (1999).

[6] 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, ANLEAD-3 (2003).

[7] J.S. Song, D.M. Kim, and S.H. Lee, "A Study in the Application of Standard of Clearance of metal Generated During the Decommissioning of NPP by Using the RESRAD-RECYCLE", J. Nucl. Fuel Cycle Waste Technol., 14(4), 305-320 (2016).

[8] U. Quade and W. Müller, "Recycling of radioactively contaminated scrap from the nuclear cycle and spin-off for other application", Revista De Metalurgia, 41, 23-28 (2005).

[9] H. Menon, C. Brun-Yaba, C. Yu, J.J. Cheng, J. Bjerler,

and A. Williams, Validation of dose calculation programmes for recycling, Swedish Radiation Protection Authority SSI rapport (2002).

- [10] L.E. Boing “Decontamination technologies”, Decommissioning of nuclear facilities, The R<sup>2</sup>D<sup>2</sup>Project, October 2, 2006, Manila.
- [11] R. Aker, Maine Yankee Decommissioning Experience Report, EPRI, 3-5, ENT000164 (2012).
- [12] C. Topf, “Full System Decontamination (FSD) with the CORD® Family prior to Decommissioning”, IYNC, 219, 20–26, September, 2008, Interlaken.