

# Radiation Dose Evaluation for Space Utilization After the Decommissioning of a Medical Cyclotron

Jung-Hoon Kim, Yeon-Hee Kang\*

Department of Radiological Science, College of Health Sciences, Catholic University of Pusan,

Received: November 26, 2024. Revised: December 30, 2024. Accepted: December 31, 2024.

## ABSTRACT

This study evaluated radiation doses using the RESRAD-BUILD 4.0 program to assess space reuse after decommissioning a cyclotron facility. The PETtrace cyclotron, widely used in the medical field, was selected for the analysis. Two types of concrete were examined: NBS03 concrete and magnetite and steel concrete. For NBS03 concrete, six radionuclides, including  $^{55}\text{Fe}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{152}\text{Eu}$ ,  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{154}\text{Eu}$ , and  $^{152}\text{Gd}$ , were analyzed, whereas seven radionuclides were considered for magnetite and steel concrete, adding  $^{54}\text{Mn}$  to the aforementioned six radionuclides. The evaluation identified external exposure as the primary pathway. For NBS03 concrete,  $^{60}\text{Co}$  and  $^{152}\text{Eu}$  were the main contributors to radiation exposure, while for magnetite and steel concrete,  $^{60}\text{Co}$  and  $^{54}\text{Mn}$  were dominant. Operational duration had minimal impact on exposure dose. The radiation dose received by workers was below the 1 mSv dose limit for the general public, indicating that the space is safe for various uses after cyclotron dismantling. As cyclotron decommissioning is expected to increase, the findings of this study provide essential data to guide the repurposing of such facilities.

Keywords: Cyclotron, Concrete Radioactivity, RESRAD-BUILD, Dose Assessment, External Exposure

## I. INTRODUCTION

사이클로트론은 하전입자를 가속시켜 양전자를 방출하는 방사성동위원소를 생산하는 목적으로 이용한다. 양성자와 표적(target)과 (p,n) 핵반응으로 방사성핵종을 생산하며 핵반응 과정에서 불필요한 중성자를 발생시킨다. 이 중성자는 사이클로트론 시설 주변의 콘크리트 벽 구성 물질과 상호작용을 통해 2차적인 핵반응을 유발하고, 시간이 지남에 따라 점차 주변 물질을 방사화시킨다<sup>[1]</sup>. 방사화란 중성자와 핵과의 반응에 의해 변환된 핵이 방사능을 띠게 되어 beam-off 후에도 가속기 주변에서 방사선이 발생하는 과정을 말한다<sup>[2]</sup>. 동위원소 생산용 사이클로트론에서의 방사화 과정은  $^{18}\text{O}(p,n)^{18}\text{F}$  반응으로 생성된 중성자가 주위 콘크리트(차폐체) 내에서 감속되어 반응 단면적이 커지면서 (n, $\gamma$ ) 반

응을 통해 물질을 방사화한다. 이러한 과정으로 투과력이 강한 2차 감마선을 방출하는 방사성 폐기물이 발생한다. 해체 작업과정 중 피폭을 유발 할만한 동위원소는 그리 많지 않지만, 장반감기를 가진 동위원소 중  $^{152}\text{Eu}$ ,  $^{154}\text{Eu}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{134}\text{Cs}$ 가 상대적으로 큰 반응 단면적을 가진 것으로 확인되었다<sup>[3]</sup>.

사이클로트론은 사용하는 에너지에 따라 구분된다. 의료용 사이클로트론은 일반적으로 약 20 MeV 이하의 소형 사이클로트론으로 저에너지 양성자 방출 시스템이 주를 이루고 있다. 낮은 에너지를 사용하는 사이클로트론은 양성자를 가속하는 에너지가 낮기 때문에 낮은 원자번호인  $^{11}\text{C}$ ,  $^{13}\text{N}$ ,  $^{15}\text{O}$ ,  $^{18}\text{F}$ 을 생산한다. 그중  $^{18}\text{F}$ 은 국내 PET(Positron Emission Tomography) 사이클로트론에서 생산되는 의료용 방사성동위원소의 약 98%를 차지하고 있다<sup>[4,6]</sup>.

2023년 기준 국내에는 총 42대의 사이클로트론

\* Corresponding Author: Yeon-Hee Kang

E-mail: kyh10681@cup.ac.kr,

Tel: +82-51-510-0522

이 가동 중에 있다. 대부분 2000년대 이후에 설치되어 15~20년 이상 가동 중으로 기계적 수명과 사용 목적의 변경, 품질 향상 그리고 경제적 이유 등으로 향후 다수의 사이클로트론 및 시설의 해체가 예상된다<sup>[7]</sup>. 하지만 사이클로트론 및 시설의 해체 사례와 이에 대한 연구는 부족한 실정이다. 사이클로트론 해체 후 공간 활용을 위하여 먼저 RESRAD 전산코드를 통한 피폭선량을 평가한다면 이후 해체 작업에 도움이 될 것으로 생각된다. 따라서 본 연구는 사이클로트론 시설의 해체 후 공간 재사용을 위한 피폭선량을 분석하여 향후 사이클로트론 및 시설 해체에 따른 방사선학적 영향 평가의 기초 자료를 제공하고자 한다.

## II. MATERIAL AND METHODS

### 1. 연구 대상

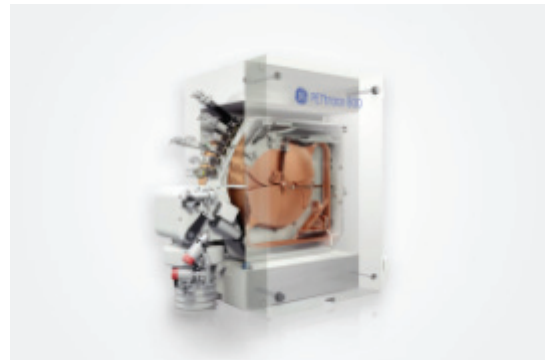
사이클로트론의 종류에는 GE사의 PETtrace, IBA사의 Cyclone 18/9, Sumitomo 사의 HM-12S 등이 있다. 이 중 37.3%로 가장 많이 사용하는 PETtrace (GE) 장비를 연구 대상으로 선정하였다. PETtrace는 16.5 MeV, 50~60  $\mu$ A의 양성자를 사용하고 주로 <sup>18</sup>F-FDG 생산하는데, 사이클로트론의 형태에 따라 Fig. 1<sup>[9]</sup>과 같이 (a) 자체차폐형과 (b) 비자체차폐형으로 분류된다. 자체차폐형 사이클로트론은 운영 중에 발생하는 2차 중성자를 줄이기 위한 목적으로 폴리에틸렌(Polyethylene, PE), 콘크리트, 보론(Boron, B)이 함유된 물을 사이클로트론 주변에 배치한 형태이다. 비자체차폐형 사이클로트론은 자체차폐형에 비해 사이클로트론 실 내부가 작으며 주변에 차폐 물질 없이 사이클로트론 기계실의 콘크리트 차폐벽으로만 구성되어 있다. 기계실의 벽이 2차 중성자를 차폐하는 역할을 하므로 자체차폐형에 비해서 콘크리트 차폐벽의 방사화 우려가 크다<sup>[8]</sup>. 따라서 자체차폐형에 대한 평가는 바닥면에 대한 방사화만 고려하였고 비자체차폐형은 바닥 면과 벽면에 대한 방사화를 고려하였다<sup>[9]</sup>.

벽을 구성하는 콘크리트는 NBS03과 Magnetite and Steel, 그리고 Barium이 포함된 Barytes의 3개의 종류가 있다. 그중에서 원자번호가 낮은 물질인 산

소와 규소 등이 높게 함유되어 있으며, 가장 흔하게 사용하는 NBS03 콘크리트와 약 70% 이상의 철 함유량을 가지고 있는 Magnetite and steel 콘크리트를 선택하여 방사선량을 측정하였다. PETtrace를 가동한 기간은 ‘10년’, ‘20년’, ‘30년’으로 고려하였다. 방사선량을 평가하기 위한 비방사능은 콘크리트 깊이를 ‘10 cm’ 기준으로 평가하였다<sup>[8]</sup>.



(a) Self-shielding cyclotron



(b) Non-self-shielding cyclotron

Fig. 1 PETtrace 800 Cyclotron

### 2. 연구 방법

본 연구에서는 사이클로트론 시설을 해체한 후 공간 활용을 위하여 RESRAD-BUILD 4.0 프로그램으로 방사선량 평가를 수행하였다.

RESRAD-BUILD 프로그램은 미국 ANL(Argonne National Laboratory)에서 개발한 실내 환경에서의 선량 평가를 위한 코드로서, 방사화 오염된 구조물 및 건물 내에서 오염원으로부터 개인이 받는 잠재적 피폭방사선량을 년 단위로 계산하는 코드이다. 따라서 오염된 건물에 체류하는 작업자의 피폭선량을 예측하고 그에 따른 방사선학적 위험도를 분석할 수 있다. 또한 건물 내부 방사성물질의 확산, 제염 활동, 침식 등과 같은 매개를 통해 실내 공기

로의 방출특성을 고려한다. 변수는 개인 피폭선량 평가를 위하여 외부피폭과 내부피폭으로 나누어져 있는데, 외부피폭 입력경로는 유효선량을 구하는 기반이 되고 내부피폭 입력경로는 예탁유효선량을 구하는 근거자료가 될 수 있다<sup>[10-12]</sup>.

### 2.1. Case Parameter

사이클로트론이 있었던 공간을 이용하는 실무자를 바탕으로 설정하였고, 연간 피폭선량을 계산하였다. 피폭 기간은 우리나라의 연간 평균 근무일수 계산을 위하여 Eq. (1)을 이용하여<sup>[12]</sup> 계산한 결과 약 247일의 근무 일수가 계산되었다. 실질적인 공휴일 수는 연간 공휴일 수인 15일에서 실제 평균 공휴일 수인 10일, 대체 공휴일 수 3일을 더한 값으로 약 13일로 설정하였다. 실내 거주 비율은 사이클로트론이 있었던 공간에서 근무하는 시간은 근무 일수는 근무 방식, 연차의 사용 등 여러 요인에 따른 차이가 있지만 우리나라 법정 근로 시간인 1주 40시간 기준 1일 8시간<sup>[13]</sup> 있는 것으로 가정하여 0.333으로 설정하였다. 콘크리트가 방사화되었을 때 나타나는 핵종의 수가 약 최대 6개이고 딸핵종까지 고려하여 Dose/risk를 9로 설정하였다. 선량 추정 기간은 PETtrace가 설치된 공간을 바로 사용한다고 가정하여 ‘0년’으로 설정하였다.

$$1\text{년근무일수}(Day) = (365.25Day \times \frac{5}{7}) - \text{실제공휴일수} \quad (1)$$

### 2.2. Build Parameter

건물 인자는 방의 개수, 건물 내 공기 중의 방사성 핵종의 퇴적 속도, 건물 표면에 있는 방사성핵종이 다시 공기 중으로 나오는 재부유율을 설정할 수 있는 Parameter이다. 공간은 사이클로트론이 있었던 공간을 평가하기 위해서 한 개의 방으로 설정하였고 퇴적 속도와 재부유율은 확률론적 분석을 바탕으로 설정하였다. PETtrace가 있는 공간의 면적은 20 m<sup>2</sup>, 높이는 2.4 m로 설정하였고<sup>[9]</sup>, 건물 환기 비율은 프로그램의 기본값으로 설정하였다.

### 2.3. Receptor Parameter

피폭경로는 외부(External) 호흡기(Inhalation) 침착

(Deposition), 현탁(Suspension), 소화기(Ingestion) 섭취 총 5가지 분류하여 분석하였다.

### 2.4. Shielding Parameter

근무자는 방사선 차폐를 위한 별도의 차폐 장비 등을 착용하지 않고, 차폐체 또한 없는 것으로 설정하였다.

### 2.5. Source Parameter

본 연구의 평가대상 핵종은 NBS03 콘크리트에서 생성된 <sup>55</sup>Fe, <sup>60</sup>Co, <sup>152</sup>Eu, <sup>134</sup>Cs, <sup>154</sup>Eu로 총 5가지이며, Magnetite and Steel은 <sup>54</sup>Mn가 추가로 발생했다. 콘크리트 종류에 따라 방사성 핵종 5종과 6종으로 각 입력하였으며, 딸핵종 각 1종류가 추가되어 최종적으로 NBS03 콘크리트는 6종류, Magnetite and steel 콘크리트는 7종류의 핵종으로 계산하였다. 선원의 위치는 Fig. 2와 같이 자체차폐형의 경우 바닥으로 설정하였고, 비자체차폐형의 경우 바닥과 4개의 벽면으로 선원 위치를 설정하였다. 선원은 벽에서 10 cm 깊이에 위치한다고 가정하고, 선원의 모형은 콘크리트 전체 벽면을 대상으로 평가하므로 Volume Source로 설정하였다. 벽면에서 10 cm 깊이의 선량을 평가한 이유는 깊이가 깊어질수록 작업자와의 거리가 멀어져 피폭선량이 줄어들 것으로 예상되어 가장 높은 선량을 나타내는 깊이를 선택하였다. 10 cm에 해당하는 비방사능 값은 기존 연구자들이 참여했던 『사이클로트론 방폐물 인수 처분방안 도출 용역』 과제<sup>[8]</sup> 중 콘크리트 차폐체 NBS03과 Magnetite and Steel을 대상으로 분석된 자료를 Table 1에 제시하였다. 이를 바탕으로 사이클로트론 시설 해체 후 공간에 대한 피폭선량을 평가하였다.

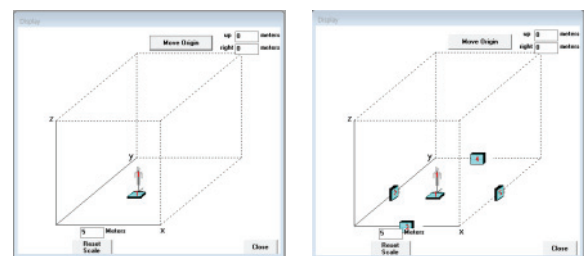


Fig. 2. RESRAD-BUILD Program Source Parameter Setting.

Table 1. Specific radioactivity values at 10 cm depth for NBS03, Magnetite and steel concrete

[Unit : Bq/g]				
Concrete	Nuclide	Year	Self shielding	Non-self shielding
NBS03	<sup>55</sup> Fe	10	1.88	3.61
		20	2.02	3.89
		30	2.04	3.92
	<sup>60</sup> Co	10	0.80	1.32
		20	1.01	1.92
		30	1.07	2.36
	<sup>152</sup> Eu	10	0.65	1.20
		20	1.04	1.67
		30	1.27	1.77
	<sup>134</sup> Cs	10	0.15	0.26
		20	0.16	0.26
		30	0.16	0.26
<sup>154</sup> Eu	10	0.06	0.13	
	20	0.09	0.18	
	30	0.10	0.21	
Magnetite and steel	<sup>55</sup> Fe	10	45.50	68.27
		20	49.09	73.66
		30	49.38	74.09
	<sup>54</sup> Mn	10	3.10	2.15
		20	3.10	2.15
		30	3.10	2.15
	<sup>60</sup> Co	10	0.43	0.64
		20	0.54	0.81
		30	0.58	0.86
	<sup>152</sup> Eu	10	0.25	0.38
		20	0.40	0.61
		30	0.48	0.74
<sup>134</sup> Cs	10	0.23	0.35	
	20	0.24	0.36	
	30	0.24	0.36	
<sup>154</sup> Eu	10	0.06	0.09	
	20	0.09	0.13	
	30	0.10	0.15	

### III. RESULT

사이클로트론 시설 해체 후 방사화된 콘크리트의 방사선량을 RESRAD-BUILD 4.0 프로그램을 이용하여 평가한 결과, 주된 피폭 원인은 외부피폭으로 나타났다.

#### 1. NBS03 콘크리트

NBS03 콘크리트에 대한 10 cm 깊이에 해당하는 방사선량은 자체차폐형 PETtrace를 10년, 20년, 30년 가동했을 때의 연간 피폭선량을 Table 2에 나타냈다. 사이클로트론 가동 기간이 10년, 20년, 30년 일 때 연간 피폭선량은  $4.79 \times 10^2 \mu\text{Sv}$ ,  $6.38 \times 10^2 \mu\text{Sv}$ ,

$7.07 \times 10^2 \mu\text{Sv}$ 의 결과가 도출되었다. 핵종에 따른 방사선량을 평가는 Table 3에 나타냈다. <sup>60</sup>Co이  $3.17 \times 10^2 \mu\text{Sv}$ ,  $4.00 \times 10^2 \mu\text{Sv}$ ,  $4.24 \times 10^2 \mu\text{Sv}$ 로 가장 높았고, 다음으로 <sup>152</sup>Eu가 높은 것으로 나타났다. 비자체차폐형의 결과는 Table 4와 Table 5에 나타났다. 10년, 20년, 30년을 가동했을 때 연간 피폭선량은  $6.01 \times 10^2 \mu\text{Sv}$ ,  $8.62 \times 10^2 \mu\text{Sv}$ ,  $9.62 \times 10^2 \mu\text{Sv}$ 로 나타났다. 핵종에 따른 방사선량을 평가했을 때 <sup>60</sup>Co이  $3.74 \times 10^2 \mu\text{Sv}$ ,  $5.61 \times 10^2 \mu\text{Sv}$ ,  $6.63 \times 10^2 \mu\text{Sv}$ 로 가장 높았고, <sup>152</sup>Eu가 그 다음으로 높게 나타났다.

Table 2. Radiation dose evaluation results by exposure path of self-shielding PETtrace NBS03 concrete

[Unit : $\mu\text{Sv/y}$ ]			
Path	10 Year	20 Year	30 Year
External	$4.79 \times 10^2$	$6.38 \times 10^2$	$7.07 \times 10^2$
Inhalation	$1.56 \times 10^{-4}$	$2.20 \times 10^{-4}$	$2.51 \times 10^{-4}$
Deposition	$2.98 \times 10^{-6}$	$3.97 \times 10^{-6}$	$4.41 \times 10^{-6}$
Suspension	$1.21 \times 10^{-6}$	$1.61 \times 10^{-6}$	$1.79 \times 10^{-6}$
Ingestion	$1.56 \times 10^{-6}$	$1.92 \times 10^{-6}$	$2.08 \times 10^{-6}$
Total	$4.79 \times 10^2$	$6.38 \times 10^2$	$7.07 \times 10^2$

Table 3. Radiation dose evaluation results for each nuclide in self-shielding PETtrace NBS03 concrete

[Unit : $\mu\text{Sv/y}$ ]			
Nuclide	10 Year	20 Year	30 Year
<sup>60</sup> Co	$3.17 \times 10^2$	$4.00 \times 10^2$	$4.24 \times 10^2$
<sup>134</sup> Cs	$3.39 \times 10^1$	$3.39 \times 10^1$	$3.62 \times 10^1$
<sup>152</sup> Eu	$1.16 \times 10^2$	$1.86 \times 10^2$	$2.27 \times 10^2$
<sup>152</sup> Gd	$4.63 \times 10^{-17}$	$7.40 \times 10^{-17}$	$9.04 \times 10^{-17}$
<sup>154</sup> Eu	$1.17 \times 10^1$	$1.75 \times 10^1$	$1.94 \times 10^1$
<sup>55</sup> Fe	$2.20 \times 10^{-6}$	$2.36 \times 10^{-6}$	$2.39 \times 10^{-6}$

Table 4. Radiation dose evaluation results by exposure path of non self-shielding PETtrace NBS03 concrete

[Unit : $\mu\text{Sv/y}$ ]			
Path	10 Year	20 Year	30 Year
External	$6.01 \times 10^2$	$8.62 \times 10^2$	$9.62 \times 10^2$
Inhalation	$2.57 \times 10^{-4}$	$3.84 \times 10^{-4}$	$4.46 \times 10^{-4}$
Deposition	$4.90 \times 10^{-6}$	$7.04 \times 10^{-6}$	$8.40 \times 10^{-6}$
Suspension	$1.99 \times 10^{-6}$	$2.87 \times 10^{-6}$	$3.42 \times 10^{-6}$
Ingestion	$2.51 \times 10^{-6}$	$3.45 \times 10^{-6}$	$4.04 \times 10^{-6}$
Total	$6.01 \times 10^2$	$8.62 \times 10^2$	$9.62 \times 10^2$

Table 5. Radiation dose evaluation results for each nuclide in non self-shielding PETtrace NBS03 concrete  
[Unit :  $\mu\text{Sv/y}$ ]

Nuclide	10 Year	20 Year	30 Year
$^{60}\text{Co}$	$3.74 \times 10^2$	$5.61 \times 10^2$	$6.63 \times 10^2$
$^{134}\text{Cs}$	$4.52 \times 10^1$	$4.52 \times 10^1$	$4.52 \times 10^1$
$^{152}\text{Eu}$	$1.65 \times 10^2$	$2.29 \times 10^2$	$2.26 \times 10^2$
$^{152}\text{Gd}$	$8.55 \times 10^{-17}$	$1.19 \times 10^{-16}$	$1.26 \times 10^{-16}$
$^{154}\text{Eu}$	$1.93 \times 10^1$	$2.68 \times 10^1$	$2.92 \times 10^1$
$^{55}\text{Fe}$	$4.22 \times 10^{-6}$	$4.55 \times 10^{-6}$	$4.59 \times 10^{-6}$

Table 7. Radiation dose evaluation results for each nuclide in self-shielding PETtrace Magnetite and steel concrete  
[Unit :  $\mu\text{Sv/y}$ ]

Nuclide	10 Year	20 Year	30 Year
$^{60}\text{Co}$	$1.70 \times 10^2$	$2.14 \times 10^2$	$2.30 \times 10^2$
$^{134}\text{Cs}$	$5.43 \times 10^1$	$5.43 \times 10^1$	$5.43 \times 10^2$
$^{152}\text{Eu}$	$4.48 \times 10^{-1}$	$7.16 \times 10^1$	$8.59 \times 10^1$
$^{152}\text{Gd}$	$1.78 \times 10^{-17}$	$2.85 \times 10^{-17}$	$3.42 \times 10^{-17}$
$^{154}\text{Eu}$	$1.17 \times 10^1$	$1.75 \times 10^1$	$1.94 \times 10^1$
$^{55}\text{Fe}$	$5.32 \times 10^{-5}$	$5.74 \times 10^{-5}$	$5.77 \times 10^{-5}$
$^{54}\text{Mn}$	$3.25 \times 10^2$	$3.25 \times 10^2$	$3.25 \times 10^2$

## 2. Magnetite and steel 콘크리트

Table 6과 Table 7에 Magnetite and steel 콘크리트에 대한 10 cm 깊이에 해당하는 방사선량 결과를 나타냈다. 자체차폐형 PETtrace를 10년, 20년, 30년 가동하였을 때 연간 피폭선량은 각각  $6.06 \times 10^2 \mu\text{Sv}$ ,  $6.82 \times 10^2 \mu\text{Sv}$ ,  $7.14 \times 10^2 \mu\text{Sv}$ 로 나타났다. 핵종에 따른 방사선량을 평가하였을 때  $^{54}\text{Mn}$ 의 방사선량이 가장 높았으며, 가동 연수에 상관없이  $3.25 \times 10^2 \mu\text{Sv}$ 로 동일한 값이 나타났다. 그 이유는 방사화로 인해 생성되는 핵종 중 상대적으로 반감기가 짧은 핵종은 붕괴되는 것과 생성되는 양이 상쇄되어 거의 포화되는 경향을 보이기 때문인 것으로 생각된다. 비자체차폐형의 결과는 Table 8과 Table 9에 나타났다. 10년, 20년, 30년을 가동했을 때 연간 피폭선량은  $4.94 \times 10^2 \mu\text{Sv}$ ,  $5.83 \times 10^2 \mu\text{Sv}$ ,  $6.19 \times 10^2 \mu\text{Sv}$ 로 나타났다. 핵종에 따른 방사선량을 평가한 결과  $^{60}\text{Co}$ 의 방사선량이 가장 높았으며, 10년, 20년, 30년을 가동했을 때  $^{60}\text{Co}$ 에 의한 연간 피폭선량은  $1.94 \times 10^2 \mu\text{Sv}$ ,  $2.45 \times 10^2 \mu\text{Sv}$ ,  $2.60 \times 10^2 \mu\text{Sv}$ 로 나타났다.

Table 6. Radiation dose evaluation results by exposure path of self-shielding PETtrace Magnetite and steel  
[Unit :  $\mu\text{Sv/y}$ ]

Path	10 Year	20 Year	30 Year
External	$6.06 \times 10^2$	$6.82 \times 10^2$	$7.14 \times 10^2$
Inhalation	$1.39 \times 10^{-4}$	$1.73 \times 10^{-4}$	$1.86 \times 10^{-4}$
Deposition	$3.76 \times 10^{-6}$	$4.23 \times 10^{-6}$	$4.44 \times 10^{-6}$
Suspension	$1.50 \times 10^{-6}$	$1.70 \times 10^{-6}$	$1.78 \times 10^{-6}$
Ingestion	$2.62 \times 10^{-6}$	$2.88 \times 10^{-6}$	$2.96 \times 10^{-6}$
Total	$6.06 \times 10^2$	$6.82 \times 10^2$	$7.14 \times 10^2$

Table 8. Radiation dose evaluation results by exposure path of non self-shielding PETtrace Magnetite and steel concrete  
[Unit :  $\mu\text{Sv/y}$ ]

Path	10 Year	20 Year	30 Year
External	$4.94 \times 10^2$	$5.83 \times 10^2$	$6.19 \times 10^2$
Inhalation	$1.40 \times 10^{-5}$	$2.54 \times 10^{-4}$	$2.74 \times 10^{-4}$
Deposition	$4.01 \times 10^{-6}$	$4.74 \times 10^{-6}$	$4.99 \times 10^{-6}$
Suspension	$1.61 \times 10^{-6}$	$1.91 \times 10^{-6}$	$2.00 \times 10^{-6}$
Ingestion	$2.40 \times 10^{-6}$	$4.10 \times 10^{-6}$	$4.16 \times 10^{-6}$
Total	$4.94 \times 10^2$	$5.83 \times 10^2$	$6.19 \times 10^2$

Table 9. Radiation dose evaluation results for each nuclide in non self-shielding PETtrace Magnetite and steel concrete  
[Unit :  $\mu\text{Sv/y}$ ]

Path	10 Year	20 Year	30 Year
$^{60}\text{Co}$	$1.94 \times 10^2$	$2.45 \times 10^2$	$2.60 \times 10^2$
$^{134}\text{Cs}$	$6.25 \times 10^1$	$6.25 \times 10^1$	$6.25 \times 10^1$
$^{152}\text{Eu}$	$3.89 \times 10^1$	$8.35 \times 10^1$	$1.01 \times 10^2$
$^{152}\text{Gd}$	$2.68 \times 10^{-17}$	$4.34 \times 10^{-17}$	$5.25 \times 10^{-17}$
$^{154}\text{Eu}$	$1.34 \times 10^1$	$1.93 \times 10^1$	$2.23 \times 10^1$
$^{55}\text{Fe}$	$1.66 \times 10^{-5}$	$8.60 \times 10^{-5}$	$8.65 \times 10^{-5}$
$^{54}\text{Mn}$	$1.72 \times 10^2$	$1.72 \times 10^2$	$1.72 \times 10^2$

## IV. DISCUSSION

본 연구는 사이클로트론 시설을 해체 후 공간 재 활용을 위하여 RESRAD-BUILD 4.0 프로그램을 사용하여 실내 근무자의 방사선 피폭선량을 평가하였다.



평가대상 사이클로트론은 의료 분야에서 사용 빈도수가 가장 높은 PETtrace를 대상으로 진행하였다. 선량평가에 사용된 콘크리트 종류는 가장 흔하게 사용하는 NBS03 콘크리트와 약 70% 이상의 철 이 함유된 Magnetite and steel 콘크리트를 사용하였다.

평가 결과로 주된 피폭경로는 외부피폭으로 나타났다. 핵종에 따른 방사선량 평가는 NBS03 콘크리트의 경우  $^{60}\text{Co}$ 과  $^{152}\text{Eu}$ 에 의한 피폭이, Magnetite and steel 콘크리트의 경우  $^{60}\text{Co}$ 과  $^{54}\text{Mn}$ 에 의한 피폭이 가장 높은 것으로 나타났다. 가동 연수에 따른 피폭선량의 차이는 크지 않은 것으로 나타났다.

Jang 등<sup>[5]</sup>의 연구에서 본 연구 모델과 동일한 모델인 PETtrace 장비, 30년 이용에 따른 콘크리트 방사화로 인한 피폭선량을 계산한 결과 콘크리트의 종류에 따라 약  $10^5 - 10^7 \mu\text{Sv/h}$ 로 나타났다. 피폭의 주요 원인은  $^{54}\text{Mn}$ 로 나타났으며, 방사화로 인한 방사선작업종사자의 피폭선량은 미미한 것으로 분석되었다. 본 연구 결과와 비교해 볼 때 자체차폐형 사이클로트론을 사용한 Magnetite and Steel 콘크리트의 경우 주요 피폭 원인이  $^{54}\text{Mn}$ 으로 나타난 점이 유사하였지만  $^{54}\text{Mn}$  피폭선량은  $3.25 \times 10^2 \mu\text{Sv/y}$ 로 Jang 등<sup>[5]</sup>의 연구보다 더 높은 것으로 나타났다. 그 이유로 콘크리트의 두께와 이에 포함된 불순물의 차이, 방의 면적 등을 들 수 있다. 하지만 본 연구 결과 역시 방사선작업종사자의 피폭선량으로 인한 영향은 크지 않을 것으로 보인다.

Ban<sup>[14]</sup>의 연구에서 RESRAD-BUILD를 이용하여 고리1호기 격납건물을 기념관으로 재이용하기 위한 작업자 및 방문자의 DCGL을 계산하였다. 그 결과 주요 핵종은  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ 이었고, 방문자의 경우 1년 동안 매일 8시간씩 격납건물을 방문해도 피폭선량이 0.1 mSv/y 이하로 나타났다. Lee<sup>[12]</sup>의 연구형 원자로 1호기가 있던 곳을 기념관으로 활용하기 위한 방사선량을 평가 결과에서는 청소원과 관리인, 관람객의 피폭선량은 일반인의 연간 선량한도인 1 mSv 보다 적게 나타났으며, 주된 피폭원은  $^{60}\text{Co}$ 에 의한 것으로 나타났다. 본 연구에서도 주된 피폭원이  $^{60}\text{Co}$ 으로 나타났으며, 근무자에 대한 피폭선량 역시 일반인의 연간 선량한도인 1 mSv 보다 낮은 것으로 나타나 선행연구와 유사한 결과를 나타냈다.

## V. CONCLUSION

본 연구는 사이클로트론 및 시설 해체 후 방사화된 콘크리트를 대상으로 근무자의 방사선 피폭선량을 평가하였다. 연구 결과 법정근로 시간을 준수한다면 연간 피폭선량이 일반인의 선량한도인 1 mSv의 96%, 한국의 연평균 자연방사선량률인 3.075 mSv<sup>[15]</sup>의 31% 수준으로 나타났다. 따라서 사이클로트론 시설 해체 후 방사선구역으로 활용 및 추가적인 차폐 시설을 설치하여 다양한 용도로 공간 활용이 가능할 것으로 사료된다.

향후 점차적으로 사이클로트론 해체는 늘어날 것으로 예상된다. 이에 본 연구 결과가 사이클로트론 시설 해체 후 공간 재활용에 대한 기초적인 자료로 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

## Acknowledgement

This paper was supported by RESEARCH FUND offered from Catholic University of Pusan in 2024.

## Reference

- [1] D. G. Jang, S. H. Shin, "Radiological Impact Assessment for Radioactive Concrete in Dismantling of the Medical Cyclotron", *Journal of the Korean Society of Radiology*, Vol. 13, No. 1, pp. 73-80, 2019. <https://doi.org/10.7742/jksr.2019.13.1.73>
- [2] H. J. Lee, D. Y. Kim, T. Won, "Evaluation on the radiation exposure from activated wedge filter", *The Korean Radiological Technologists Association*, Vol. 16, No. 2, pp. 69-79, 2004.
- [3] R. N. Woo, Y. M. Kim, M. C. Song, D. Y. Cho, J. S. Lee, W. T. Kim, "A Study on the Adoption of Cyclotron Decommissioning Plan Criteria by the Analysis of Domestic Relocation and Abroad Dismantling Practices", *Journal of Radiation Protection*, Vol. 38, No. 2, pp. 91-99, 2013. <https://doi.org/10.14407/jrp.2013.38.2.091>
- [4] D. H. Lee, "Neutron Activation Analysis of the Medical Linear Accelerator - Maintenance, Repair and Dismantling -", *Catholic University of Pusan, Doctor's thesis*, 2017.

- [5] D. G. Jang, D. Y. Lee, J. H. Kim, "Radioactivation Analysis of Concrete Shielding Wall of Cyclotron Room Using Monte Carlo Simulation", Journal of the Korean Society of Radiology, Vol. 11, No. 5, pp. 334-341, 2017.  
<http://doi.org/10.7742/JKSR.2017.11.5.335>
- [6] R. N. Woo, "A Study on the Method for Cyclotron Decommissioning Criteria by the Analysis of Domestic Relocation and Abroad dismantling Practices", Daegu Catholic University, Master's thesis, 2014.
- [7] H. S. Lee, "Development of a domestic cyclotron safety assessment-based decommissioning/disposal procedure", Pohang University of Science and Technology Report, 2018.
- [8] J. H. Kim, Y. I. Jo, Y. H. Kang, S. H. Shin, D. G. Jang "Study on the Acquisition and Disposal Methods for Cyclotron Radioactive Waste", Catholic University of Pusan Report, 2023.
- [9] PETtrace 800 series manual, GE Healthcare, 2017.
- [10] S. Y. Cho, "Dose assessment using RESRAD-BUILD code for decommissioning of nuclear fuel cycle facility", Hanyang University, Master's thesis, 2018.
- [11] User's Manual for RESRAD-BUILD Code Version 4, ANL/EVS-21/17 Vol. 1, Argonne National Laboratory, 2022.
- [12] S. B. Lee, "Predictive analysis of dose for memorial TRIGA mark-II using RESRAD-BUILD", Gachon University, Master's thesis, 2019.
- [13] Article 50 of the Labor Standards Act
- [14] D. H. Ban, "Differentiation of residual radioactivity induction concentration when reusing the Gori Unit 1 containment building memorial hall using RESRAD-BUILD", Graduate School of Pusan National University, Master's thesis, 2018.
- [15] Korea Radioactive Waste Agency, Difference between radiation from spent nuclear fuel and natural radiation, From URL;  
<https://www.korad.or.kr/webzine/202109/sub2-4.jsp>

# 의료용 사이클로트론 해체 후 공간 활용을 위한 방사선량 평가

김정훈, 강연희\*

부산가톨릭대학교 보건과학대학 방사선학과

## 요 약

본 연구는 사이클로트론 시설을 해체한 후 공간 활용을 위하여 RESRAD-BUILD 4.0 프로그램으로 방사선량 평가를 수행하였다. 평가대상 사이클로트론은 의료 분야에서 사용 빈도수가 가장 높은 PETtrace를 대상으로 진행하였다. 선량평가에 사용된 콘크리트는 NBS03 콘크리트와 Magnetite and steel 콘크리트 2종류를 사용하였다. 분석 핵종은 NBS03 콘크리트는  $^{55}\text{Fe}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{152}\text{Eu}$ ,  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{154}\text{Eu}$ ,  $^{152}\text{Gd}$ 로 총 6가지, Magnetite and Steel은  $^{54}\text{Mn}$ 가 추가되어 7종을 분석하였다. 평가 결과로 주된 피폭경로는 외부피폭으로 나타났으며, 핵종에 따른 방사선량 평가는 NBS03 콘크리트의 경우  $^{60}\text{Co}$ 과  $^{152}\text{Eu}$ 에 의한 피폭이, Magnetite and steel 콘크리트의 경우  $^{60}\text{Co}$ 과  $^{54}\text{Mn}$ 에 의한 피폭이 가장 높은 것으로 나타났다. 가동 연수에 따른 피폭선량의 차이는 크지 않은 것으로 나타났다. 근무자에 대한 피폭선량은 일반인 선량한도인 1 mSv에도 미치지 못한 것으로 나타났다. 따라서 사이클로트론 시설 해체 후 다양한 용도로 공간 활용이 가능할 것으로 사료된다. 향후 점차적으로 사이클로트론 해체는 늘어날 것으로 예상되며, 이에 본 연구 결과가 사이클로트론 시설 해체 후 공간 재활용에 대한 기초적인 자료로 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

중심단어: 사이클로트론, 콘크리트 방사화, RESRAD-BUILD, 선량평가, 외부피폭

## 연구자 정보 이력

	성명	소속	직위
(제1저자)	김정훈	부산가톨릭대학교 보건과학대학 방사선학과	정교수
(교신저자)	강연희	부산가톨릭대학교 보건과학대학 방사선학과	조교수