

# Radiological Impact Assessment for Radioactive Concrete in Dismantling of the Medical Cyclotron

Donggun Jang,<sup>1</sup> Sanghwa Shin<sup>2,\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Nuclear Medicine, Dongnam Institute of Radiological & Medical Sciences Cancer center

<sup>2</sup>Department of Radiological Science, College of Health Sciences, Catholic University of Pusan

Received: January 14, 2019. Revised: February 20, 2019. Accepted: February 28, 2019

## ABSTRACT

Neutrons are generated by the nuclear reaction, which is absorbed into the concrete wall and causes the activation during cyclotron operation. The purpose of this study is to investigate the effect of neutron activation and radiative concrete on concrete type. This experiment used Monte Carlo simulation and RESRAD model.

The results of the experiment showed that the higher the content of Fe in concrete, the greater the shielding rate. The effect of  $^{56}\text{Fe}(n, 2n)^{54}\text{Mn}$  reaction on workers is also increased. However, radioactive nuclides have low activity and have very low impact on workers. Radioactive concrete should be treated as general wastes with less than its self-disposal tolerance level, and it should be recycled to the surface such as road repair rather than landfill to minimize the effect of  $^{14}\text{C}$ .

Keyword: Cyclotron, Activation, Concrete

## I. INTRODUCTION

사이클로트론은 1929년 Lawrence에 의해 최초로 개발되었다.<sup>[1]</sup> 국제원자력기구(International Atomic Energy Agency; IAEA)에 따르면 Cyclotron은 전 세계적으로 약 350대 이상 설치되어 있으며, 계속 증가하고 있다.<sup>[2,3]</sup> Cyclotron은 사용 에너지에 따라 대형(70 MeV 이상), 중형(36~50 MeV), 소형(20~30 MeV), 초소형(15 MeV 전후)으로 구분할 수 있으며, 국내의 경우 2017년을 기준으로 32개의 초소형 Cyclotron이 생산허가를 받아 가동 중에 있다.<sup>[4]</sup> 입자를 가속하는 에너지가 낮은 초소형 사이클로트론은 의료용 방사성동위원소 생산시설로 이용되며 원자번호가 낮은  $^{11}\text{C}$ ,  $^{13}\text{N}$ ,  $^{15}\text{O}$ ,  $^{18}\text{F}$ 를 생산할 수 있다.<sup>[5]</sup> 국내 대한핵의학회 통계에 따르면 사이클로트론에서 생산되는 방사성동위원소 중 약 99%가  $^{18}\text{F}$ 로,  $^{18}\text{O}(p,n)^{18}\text{F}$  핵반응을 통해 생성되어진다.<sup>[4]</sup> 이

처럼 동위원소를 생산하는 핵반응 과정에서는 고에너지의 감마선과 많은 수의 중성자가 발생되고 사이클로트론실 내부는 고에너지의 방사선장(Radiation Field)이 형성되며,<sup>[6]</sup> 이러한 방사선을 차폐하기 위하여 Cyclotron 시설은 두꺼운 콘크리트 차폐벽이 필요하다.<sup>[7,8]</sup> 하지만, 콘크리트 차폐벽은 사이클로트론의 핵반응으로 발생된 중성자에 의해 방사화되어, 작업종사자 및 주변인의 방사선 피폭을 야기시킨다.<sup>[9]</sup> 이에 본 연구에서는 콘크리트의 종류별 방사화 분석 및 안전성을 비교 분석하고자 한다.

## II. MATERIAL AND METHOD

### 1. 몬테카를로 모의모사

#### 1.1 콘크리트 차폐벽

\* Corresponding Author: Sanghwa Shin

E-mail: sanghwashin@cup.ac.kr

Tel: +82-51-510-0782

사이클로트론실을 구성하는 콘크리트 차폐벽의 물성은 한국원자력연구원에서 제공하는 대표적인 콘크리트 구성성분 6 종류를 사용하였으며, 구성성분은 Table 1과 같다.<sup>[10]</sup>

콘크리트 차폐벽의 기준두께를 설정하기 위해 몬테카를로 모의 모사의 한 종류인 MCNPX를 이용하였으며, 핵반응 후 발생하는 방사선이 ‘방사선기기의 설계 승인 및 검사에 관한 기준’<sup>[11]</sup>에 따른 차폐선량 1  $\mu\text{Sv/hr}$  이하를 충족할 수 있는 차폐벽 두께별 선량을 획득하여 가상의 사이클로트론실을

제작하였다.

### 1.2 Targetry

가상의 사이클로트론실에서 핵반응에 따른 방사화를 분석하고자 몬테카를로 모의 모사의 한 종류인 FLUKA(FLUKtuierende KAskade) code<sup>[12]</sup>를 이용하여 Fig. 1 과 같은 Targetry를 모사하였으며, 모사된 Targetry의 기하학적 구조는 PETtrace 800 series (GE Healthcare, USA) 모델의 H<sub>2</sub><sup>18</sup>O Target을 참고하여 제작하였다.<sup>[9]</sup>

Table 1. Elements and weight percents in concrete.

	Atom Fractions					
	Ordinary (NBS 03)	Ordinary (NBS 04)	Magnetite	Barytes	Magnetite and Steel	Limonite and steel
H	0.149867	0.103586	0.082371	0.109602	0.086069	0.209640
C	0.074204					
O	0.526832	0.584810	0.551004	0.600189	0.314488	0.301631
Na		0.013974				
Mg	0.017713	0.001983	0.010248	0.001515	0.005516	0.001963
Al	0.023794	0.031850	0.023218	0.004777	0.014030	0.007326
Si	0.091972	0.210755	0.024455	0.011473	0.020499	0.016261
S	0.001649	0.000751	0.001177	0.103654		
K	0.000773	0.009244				0.000697
Ca	0.109680	0.038877	0.047270	0.038593	0.050769	0.044390
Ti			0.030275		0.012192	
V			0.001630		0.000464	0.000535
Cr			0.000871			
Mn			0.000962			
Fe	0.003516	0.004717	0.226519	0.026213	0.495972	0.417557
Ba				0.103983		
Density (g/cm <sup>3</sup> )	2.35	2.35	3.53	3.35	4.64	4.54

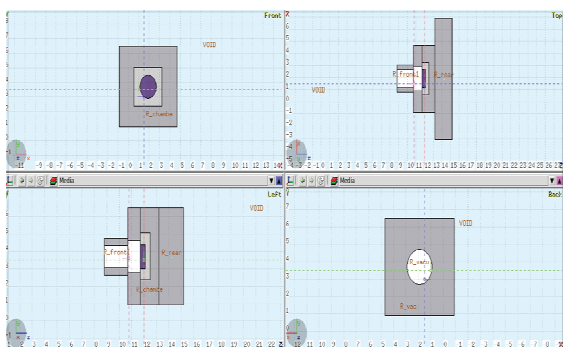


Fig. 1. Model of Cyclotron Targetry.

사이클로트론의 양성자 조건은 제작사의 권고에 따라 16.5 MeV, 60  $\mu\text{A}$ 의 양성자를 조사하였으며, 조사시간은 평균 사이클로트론의 가동시간으로 고려하여 1일 4시간, 주 5일, 1년 50주로 설정하였으며, 조사기간은 기계적 수명을 고려하여 30년으로 설정하였다. 방사화 분석은 FLUKA code에 내장된 RESNUCLEI를 통해 평가하였으며, 통계적 오차를 5% 이하로 줄이기 위해 1.0E10번 모의 추정하였다.

## 2. 선량평가 모델

FLUKA를 통해 획득한 방사화 결과를 토대로 미국 아르곤 연구소에서 개발된 RESRAD code를 사용하여 선량평가를 실시하였다. RESRAD는 피폭경로에 따라 다양한 모델을 적용할 수 있으며, 본 연구에서는 방사선에 오염된 건물이나 구조물을 평가하는데 사용되는 RESRAD-Build와 방사능 오염 부지에 대한 환경영향 평가를 위한 RESRAD-Offsite를 이용하였다.

## III. RESULT

가상의 사이클로트론실을 제작하기 위해 6종류의 콘크리트 구성성분을 이용하여 법적 기준에 맞는 차폐벽 두께를 설정한 결과 Table 2와 같이 나타났다. NBS03, NBS04와 같은 일반적인 콘크리트와 Ba이 포함된 Barytes(중정석)에서는 차폐체의 두께가 약 150 cm 이상 필요한 것으로 나타났으며, 약 200 cm 이상에서 방사선이 더 이상 검출되지 않았다. 철의 함유가 높은 Magnetite(자철석)의 경우 약 130 cm 이상의 차폐벽이 필요한 것으로 나타났으며, 약 170 cm에서 방사선이 검출 되지 않았다. Steel이 함유된 Magnetite와 Limonite(갈철석)의 경우 각각 120, 100 cm 이상의 차폐벽이 필요한 것으로 나타났으며, 약 180, 140 cm에서 방사선이 검출 되지 않았다.

보수적인 평가를 위해 법적 기준에 맞는 최소 벽 두께를 이용하여 가상의 사이클로트론을 제작하여 핵반응을 일으킨 결과 Fig. 2와 같이 방사화 핵종이

발견되었다. 콘크리트 종류에 따른 방사화 핵종은 다소 차이가 있었지만, 전반적으로  $^{45}\text{Ca}$ ,  $^{55}\text{Fe}$ ,  $^{56}\text{Mn}$ ,  $^{54}\text{Mn}$  4개의 핵종의 방사능이 높게 나타났으며, 방사능은 '방사성폐기물 분류 및 자체처분 기준에 관한 규정<sup>[13]</sup>과 비교하였을 때, 자체처분한도 미만으로 나타났다.

사이클로트론 핵반응으로 인해 발생된 방사화 핵종의 방사능을 토대로 사이클로트론실에 근무하는 종사자들에게 미치는 영향을 알아보기로 자 RESRAD-Build를 이용한 결과 Table 3과 같이 나타났다. 콘크리트 종류에 따라 NBS 03, 04 그리고 Barytes에서는 약  $10\text{E}-7 \mu\text{Sv/hr}$ 의 피폭선량이 발생하였으며, Magnetite와 Magnetite and Steel 그리고 Limonite and steel의 경우 약  $10\text{E}-5 \mu\text{Sv/hr}$ 의 피폭선량이 발생하였다. 피폭의 주요원인은  $^{54}\text{Mn}$ 으로 나타났으며, 피폭선량  $0.01 \mu\text{Sv/hr}$  미만의 핵종은 생략하였다.

자체처분 한도 이하인 방사화된 콘크리트를 처분방법을 알아보기 위해 RESRAD-Offsite를 이용하여 토양에 매립할 경우 발생하는 주변 방사선피폭에 대해 분석하였다. 분석 결과 Table 4와 같이 나타났다. 1 m 매립한 콘크리트로 받게 되는 피폭선량이 약  $3\text{E}-2 \mu\text{Sv}$ 로 매립하지 않은 경우에 비해 매우 높은 방사선 피폭을 발생시키는 것으로 나타났다. 피폭을 유발 하는 원인을 찾기 위해 핵종별 세부선량을 비교한 결과 Table 5와 같이 나타났으며, 방사선 피폭의 주원인은  $^{14}\text{C}$ 로 나타났다. 반감기가 30일 이하의 핵종은 실험에서 제외 하였다.

Table 2. Dose rate according to thickness of concrete wall.

cm	Unit : $\mu\text{Sv/hr}$													
	10	20	...	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190
Ordinary (NBS03)	34819	15886		49.7	22.9	11.6	4.12	1.88	1.08	0.25	0.10	0.04	0.03	0.01
Ordinary (NBS04)	30649	15672		107	54.0	26.1	14.4	5.23	2.00	0.73	0.31	0.30	0.16	0.02
Magnetite	20594	9626		25.7	10.6	4.49	1.94	0.82	0.23	0.05	0.01	0.00	0.00	0.00
Barytes	17511	8587	...	45.9	21.5	11.0	5.73	2.46	1.02	0.41	0.12	0.09	0.08	0.05
Magnetite + Steel	15260	6606		16.4	6.81	2.71	0.89	0.38	0.15	0.07	0.02	0.01	0.00	0.00
Limonite + Steel	18863	6398		1.55	0.40	0.09	0.06	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

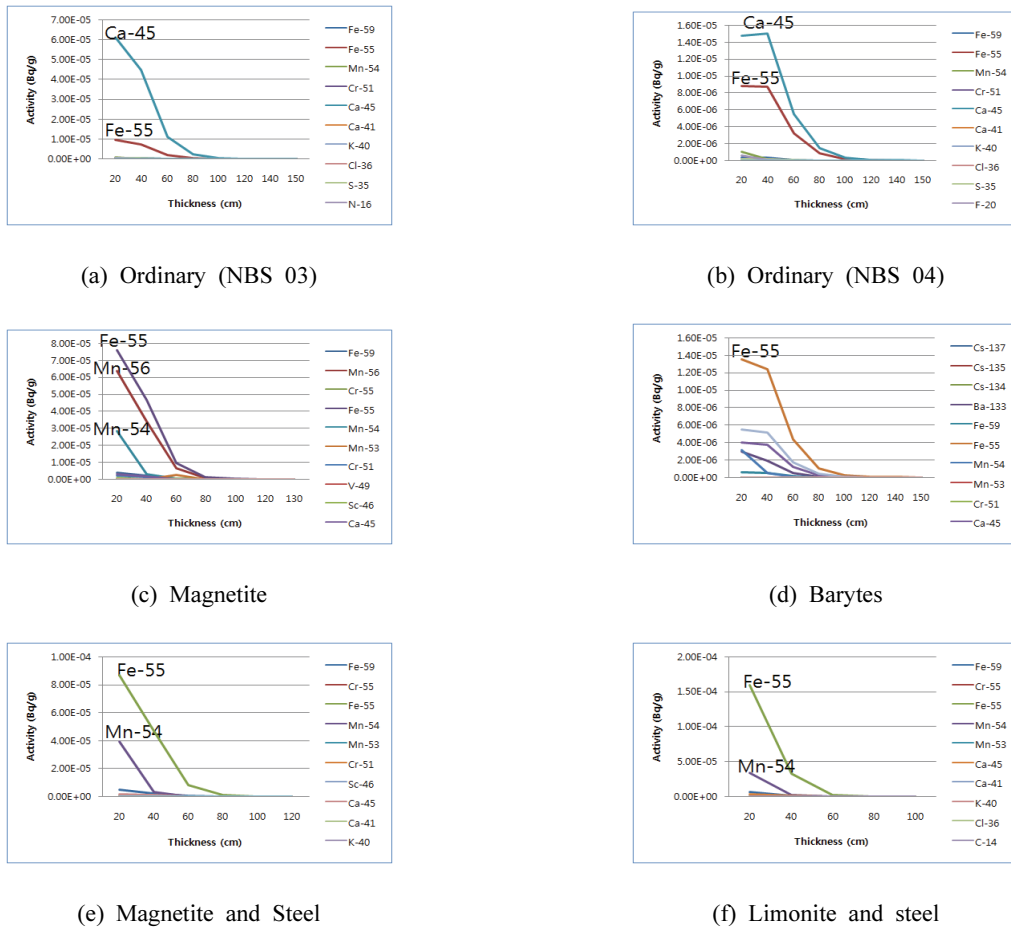


Fig. 2. Radioactive Radionuclides and Radiation According to Concrete Types.

Table 3. Exposure of workers by type of concrete.

Concrete Type	Isotope	<sup>35</sup> S	<sup>59</sup> Fe	<sup>45</sup> Ca	<sup>55</sup> Fe	<sup>54</sup> Mn	<sup>41</sup> Ca	Total	
		μSv/hr	1.37E-11	4.59E-12	6.1E-10	6.7E-11	8.59E-08		4.56E-12
	%	0.02	0.01	0.71	0.08	99.19	0.01		
Concrete Type	Isotope	<sup>45</sup> Ca	<sup>55</sup> Fe	<sup>54</sup> Mn				Total	
		μSv/hr	1.92E-10	7.74E-11	1.23E-07				1.24E-07
	%	0.16	0.06	99.82					
Concrete Type	Isotope	<sup>53</sup> Mn	<sup>55</sup> Fe	<sup>54</sup> Mn				Total	
		μSv/hr	7.35E-07	7.14E-10	3.26E-06				4.01E-06
	%	18.35	0.02	81.52					
Concrete Type	Isotope	<sup>35</sup> S	<sup>45</sup> Ca	<sup>133</sup> Ba	<sup>137</sup> Cs	<sup>134</sup> Cs	<sup>55</sup> Fe	<sup>54</sup> Mn	Total
		μSv/hr	1.76E-10	5.21E-11	5.29E-10	3.05E-11	1.35E-10	1.59E-10	
	%	0.05	0.01	0.14	0.01	0.04	0.04	99.74	
Concrete Type	Isotope	<sup>55</sup> Fe	<sup>54</sup> Mn						Total
		μSv/hr	1.01E-09	4.36E-06					
	%	0.02	99.84						
Concrete Type	Isotope	<sup>55</sup> Fe	<sup>54</sup> Mn						Total
		μSv/hr	1.33E-09	3.74E-06					
	%	0.04	99.89						

Table 4. Radiation effects of buried depth.

Buried at depth 0 m								
Time(yr)	0	1	3	10	30	100	300	1000
Ordinary (NBS 03)	5.65E-07	1.14E-08	6.70E-15	3.52E-13	1.23E-09	1.65E-10	3.86E-13	7.42E-15
Ordinary (NBS 04)	5.65E-07	1.14E-08	6.19E-15	4.58E-13	1.44E-08	1.91E-10	4.00E-13	7.69E-15
Magnetite	6.02E-07	1.14E-08	1.01E-13	2.04E-14	3.67E-12	9.67E-12	9.55E-14	1.84E-15
Barytes	5.69E-07	1.14E-08	1.76E-14	2.88E-14	4.89E-12	1.29E-11	7.38E-14	1.42E-15
Manetite and steel	6.14E-07	1.14E-08	1.33E-13	1.97E-14	3.56E-12	9.36E-12	6.49E-14	1.25E-15
Limonite and steel	6.11E-07	1.14E-08	1.47E-13	2.50E-14	4.19E-10	1.11E-11	6.26E-14	1.20E-15
Buried at depth 1 m								
Time(yr)	0	1	3	10	30	100	300	1000
Ordinary (NBS 03)	3.32E-02	3.32E-02	3.32E-02	3.32E-02	3.32E-02	3.32E-02	3.32E-02	3.32E-02
Ordinary (NBS 04)	3.32E-02	3.32E-02	3.32E-02	3.32E-02	3.32E-02	3.32E-02	3.32E-02	3.32E-02
Magnetite	3.33E-02	3.32E-02	3.32E-02	3.32E-02	3.32E-02	3.32E-02	3.32E-02	3.32E-02
Barytes	3.32E-02	3.32E-02	3.32E-02	3.32E-02	3.32E-02	3.32E-02	3.32E-02	3.32E-02
Manetite and steel	3.33E-02	3.33E-02	3.32E-02	3.32E-02	3.32E-02	3.32E-02	3.32E-02	3.32E-02
Limonite and steel	3.33E-02	3.33E-02	3.32E-02	3.32E-02	3.32E-02	3.32E-02	3.32E-02	3.32E-02

Table 5. Detailed dose of nuclear species at landfill.

Unit : mSv/yr

	Ordinary(NBS 03)	Ordinary(NBS 04)	Magnetite	Barytes	Manetite and steel	Limonite and steel
<sup>133</sup> Ba				4.09E-09		
<sup>14</sup> C	3.32E-05	3.32E-05	3.32E-05	3.32E-05	3.32E-05	3.32E-05
<sup>41</sup> Ca	1.39E-14	3.40E-15	7.38E-16	9.27E-16	4.12E-16	7.83E-16
<sup>45</sup> Ca	2.93E-11	7.09E-12	1.51E-12	1.94E-12	8.24E-13	1.63E-12
<sup>134</sup> Cs				2.35E-12		
<sup>135</sup> Cs				1.50E-20		
<sup>137</sup> Cs				2.54E-13		
<sup>36</sup> Cl	3.92E-17	4.81E-16				1.39E-17
<sup>55</sup> Fe	3.66E-12	3.35E-12	2.89E-11	5.14E-12	3.30E-11	6.05E-11
<sup>59</sup> Fe	5.99E-10	5.51E-10	5.93E-09	9.11E-10	7.64E-09	1.08E-08
<sup>40</sup> K	9.94E-16	1.03E-15	2.46E-16	1.90E-16	1.67E-16	1.61E-16
<sup>53</sup> Mn			1.29E-20	2.17E-21	2.13E-20	1.95E-20
<sup>54</sup> Mn	1.96E-09	2.75E-09	7.64E-08	8.48E-09	1.06E-07	9.18E-08
<sup>35</sup> S	9.85E-14	3.38E-14	7.33E-15	1.09E-12		
<sup>46</sup> Sc			2.26E-09		6.17E-10	
<sup>49</sup> V			5.71E-18			
Total	3.32E-05	3.32E-05	3.33E-05	3.32E-05	3.33E-05	3.33E-05

## IV. DISCUSSION

국내에서는 1986년 한국원자력의학원에서 50 MeV의 Cyclotron MC-50을 시작으로, 1995년 서울 대학교병원과 삼성의료원이 18 MeV와 16 MeV Cyclotron을 도입하여 사용하고 있으며, 그 후 아산 병원, 연세의료원, 국립암센터 등 국내 유수의 병원들이 Cyclotron을 도입하여 사용하고 있다. 이처럼 국내에 도입된 Cyclotron들은 대부분 약 15~20년의 장시간 가동되어 왔으며, 현재 방사화가 진행되고 있다. 방사화는 사이클로트론이 운영됨에 따라 종사자들에게 가장 큰 피폭을 발생시키는 원인으로<sup>[14]</sup> IAEA에서는 1996년부터 사이클로트론처럼 소형 의료용 가속기에 해체에 대한 논의가 진행되었으며,<sup>[15]</sup> 국내에서는 2010년도 이후 Cyclotron의 방사화 및 해체에 대한 연구가 대두 되고 있는 실정이다.<sup>[16]</sup> 이에 본 연구에서는 사이클로트론 가동에 따른 방사화 및 방사화된 콘크리트가 미치는 영향에 대해 알아보하고자 하였다.

첫째, ALARA(As Low as Reasonably Achievable) 관점에서 차폐 설계 기준으로 원자력안전법에 정해진 선량제한치의 1/2를 차폐 목표치로 한다면 방사선작업종사자의 경우 연간 50 mSv를 기준으로 12.5  $\mu$ Sv/hr(25 mSv/yr) 또는 연간 20 mSv를 기준으로 5  $\mu$ Sv/hr(10 mSv/yr)를 넘지 말아야 하며, 국내 원자력위원회 고시 제 1장 16조에 따르면 "방사선 기기의 외부에 형성되는 방사선장이 시간당 1  $\mu$ Sv(2 mSv/yr)를 초과하지 않아야 한다." 라고 명시하고 있다.<sup>[11]</sup> 방사선구역의 설계선량률 기준은 일반대중구역이 0.25  $\mu$ Sv/hr 이하, 작업종사자구역의 경우 0.25~12.5  $\mu$ Sv/hr를 만족하여야 하며,<sup>[17]</sup> 본 연구에서는 1  $\mu$ Sv/hr를 기준으로 차폐벽을 설계하였다. 둘째, 사이클로트론실의 차폐벽은 Fe의 함유량에 따라 차폐율이 크게 작용하는 것으로 확인되었으며, 셋째, 차폐벽의 방사화는 자체처분한도 미만으로 방사성폐기물 아닌 일반폐기물로 폐기물 관리법<sup>[18]</sup>에 따라 처리되어야 함을 알 수 있었다. 넷째, 방사화된 콘크리트가 종사자에게 미치는 영향을 분석한 결과 콘크리트 종류와 무관하게 매우 미미하였으며, 차폐효과가 우수할수록(철의 함유량이 높을수록) 방사화로 인해 종사자가 받게 되는 피폭

또한 증가하는 것으로 나타났다.

이는  $^{56}\text{Fe}(n,2np)^{54}\text{Mn}^{191}$  반응에 따른 결과로 사료된다.  $^{54}\text{Mn}$ 은 835 keV의 감마선방출체이며, 312일의 반감기를 갖는다. 다섯째, 사이클로트론 해체 시 발생하는 콘크리트 폐기물이 주변 환경에 미치는 영향을 분석한 결과 복도에 매립할 경우 콘크리트에 포함된  $^{14}\text{C}$ 로 인하여 사람에게 매우 높은 방사선피폭을 주는 것으로 나타났다.  $^{14}\text{C}$ 는 고속중성자에 의한  $^{16}\text{O}(n,^3\text{He})^{14}\text{C}$  반응으로 발생되며,<sup>[20]</sup> 고속중성자의 에너지 감소로 인해 콘크리트 전면에서 주로 발생되며, 깊이가 깊어질수록  $^{14}\text{C}$ 의 방사화는 일어나지 않는다. 탄소(C)는 모든 식물이 성장하는데 매우 중요한 요소로  $^{14}\text{C}$ 가 포함된 콘크리트를 매립할 경우 생태계 대사를 통해 인체 내부에 유입되어 내부피폭을 발생시키지만 매립하지 않을 경우  $^{14}\text{C}$  157 keV의  $\beta$ 선 방출체로 외부피폭을 고려하지 않아도 된다. 이처럼  $^{14}\text{C}$ 는 생태계에 방사능 위험도 평가를 위한 핵종 중 하나로 낮은 크기의 에너지를 방출하여 주변 동식물 내에 모두 흡수되게 된다.<sup>[21]</sup> 하지만  $^{14}\text{C}$ 의 반감기가 5730년으로 매우 길어 붕괴가 거의 일어나지 않아 누적시간에 따른 피폭량의 변화는 발생하지 않았다.

본 연구는 RESRAD-Offsite 전산모델을 이용하여 실험을 진행하였기 때문에 섭취하는  $^{14}\text{C}$ 의 방사능이 일정하여 콘크리트 종류에 따라  $^{14}\text{C}$ 의 방사능이 차이가 있음에도 불구하고 모두 동일한 선량값을 나타냈다. 이처럼  $^{14}\text{C}$ 가 포함된 콘크리트의 경우 처리 시 토양에 매립이 아닌 도로 보수와 같이 표층에 사용되어야 방사선에 대한 영향을 줄일 수 있을 것으로 사료되었다.

본 연구는 가속기 시설에 사용되는 대표적인 콘크리트 물성 6종류를 이용하였으며, 이 6종류의 콘크리트 물성은 방사선 차폐를 기준으로 작성되어 ppm 단위의 불순물은 생략되어 있다. 하지만 콘크리트에 중성자 방사화가 일어날 경우 ppm 단위의 불순물이 방사선 피폭의 주 원인으로 작용하며,<sup>[9]</sup> 본 연구의 결과 보다 더욱 높은 방사선 피폭이 발생될 것이다. 앞으로 콘크리트와 같이 중성자 차폐가 필요한 경우 반드시 ppm 단위의 불순물까지 고려되어야 할 것이다.



## V. CONCLUSION

사이클로트론에서 발생하는 핵반응은 주변 물질인 콘크리트 벽을 방사화시키게 된다. 하지만 관련 종사자들이 방사화 핵종들로부터 받게되는 방사선 피폭은 매우 미미하다.

사이클로트론 해체 시 많은 양의 콘크리트 폐기물이 발생하며, 국내법 기준으로 자체처분한도 미만으로 일반폐기물로써 처리가 가능하다. 방사화된 콘크리트를 처리하는 방법으로 주변 환경에 영향을 미치지 못하도록 매립을 금지하여야 하며, 도로 보수와 같은 표면에 재활용하여야 한다.

## Reference

- [1] E. O. Lawrence, "The Production of high speed light ions without use of high voltages," *Physical Review*, Vol. 40, No. 1, pp. 19-35, 1932.
- [2] IAEA, "Directory of Cyclotrons used for Radionuclide Production in Member States-2006 Update," IAEA-DCRP, 2006.
- [3] IAEA, "Cyclotron produced radionuclides. principles and practice," IAEA Technical Report Series 465, 2008.
- [4] The Korean Society of Nuclear Medicine, "Nuclear medicine scan statistics," 2017
- [5] Korea Institute of Nuclear Safety, "Development of advanced technology for evaluation and verification of radiation safety," KINS-RR-1027, 2013.
- [6] R. Barquero, R. Mendez, J. M. Marti-Climent, et al., "Monte carlo neutron doses estimatios inside a pet cyclotron vault room," *Radiation Protection Dosimetry*, Vol. 126, No. 1-4, pp. 477-481, 2007.
- [7] Korea Institute of Nuclear Safety, "Analytical evaluation of domestic operational reality for cyclotron and internal and external facility dismantling standard," KINS/HR-1269, 2013.
- [8] J. H. Lee, "Development of reduction technique and evaluation of radioactive concrete waste in cyclotron-facility," Master. diss., University of Hanyang, 2016.
- [9] D.G. Jang, D.Y. Lee, J. H. Kim, "Radioactivation Analysis of Concrete Shielding Wall of Cyclotron Room Using Monte Carlo Simulation," *The Korean Society of Radiology*, Vol. 11, No. 5 pp. 335-341, 2017.
- [10] B. C. Lee, H. I. Kim, "Shielding Technology, for High Energy Radiation Production Facility," Korea Atomic Energy Research Institute, 2004.
- [11] Nuclear Safety and Security Commission, Act on Standards for design approval and inspection of radiation devices, Article 16. 2018.
- [12] A. Ferrari, P. R. Sala, A. Fasso, et al., "FLUKA: a multi-particle transport code," CERN 2005-10 INFN/TC\_05/11, SLAC-R-773. 2005.
- [13] Nuclear Safety and Security Commission, Act on Regulations on classification of radioactive waste and criteria for self-disposal, Article 6, 2017.
- [14] United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, "Sources and Effects of Ionizing Radiation," UNSCEAR 2008 Report Vol. I, 2010.
- [15] IAEA, Decommissioning of Medical, Industrial and Research Facilities, No. WS-G-2.2, 1999.
- [16] D. G. Jang, "Evaluation of the Safety of Workers through Analysis of the Neutron Activation of the PET Cyclotron," Master. diss., Catholic University of Pusan, 2017.
- [17] Korea Atomic Energy Research Institute, "Radiation Shielding Technology Development for Proton Linear Accelerator," KAERI/RR-2583, 2005.
- [18] Ministry of Environment, Wastes control Act, Article 3, 2017.
- [19] J. K. Dickens, C. Y. Fu, D. M. Hetrick, D. C. Larson, J. H. Todd, "Experimental and Calculated Excitation Functions for Discrete-Line Gamma-Ray Production due to 1-40 MeV Neutron Interactions with  $^{56}\text{Fe}$ ," *Nuclear Data for Science and Technology*, pp. 13-17, 1991.
- [20] W. Davis, "Carbon-14 production in nuclear reactors," U.S. Nuclear Regulatory Commission, 1977.
- [21] Korea Atomic Energy Research Institute, "Internal and external dose conversion coefficient for domestic reference animals and plant," KAERI/TR-3767, 2009.

# 의료용 사이클로트론 해체 시 발생하는 방사화 콘크리트의 방사선학적 영향평가

장동근,<sup>1</sup> 신상화<sup>2,\*</sup>

<sup>1</sup>동남권 원자력의학원 핵의학과

<sup>2</sup>부산가톨릭대학교 보건과학대학 방사선학과

## 요 약

사이클로트론 가동 시 핵반응으로 인해 중성자가 발생되며, 발생한 중성자는 콘크리트벽에 흡수되어 방사화를 일으키게 된다. 이에 본 연구에서는 콘크리트 종류에 따른 방사화 분석과 방사화 핵종이 미치는 영향에 대해 알아보고자 하였다. 실험은 몬테카를로 시뮬레이션 및 RESRAD 모델을 사용하였다. 실험 결과 콘크리트의 Fe 함유량이 높을수록 차폐율이 증가하였으며, Fe은  $^{56}\text{Fe}(n, 2np)^{54}\text{Mn}$  반응으로 인하여 중성자에게 미치는 영향 또한 같이 증가하였다. 하지만, 방사화로 생성된 핵종의 방사능은 매우 낮게 나타나 중성자들에게 미치는 영향은 매우 낮은 것으로 나타났다. 방사화된 콘크리트 해체 처분 시 방사능이 자체처분 한도 미만으로 일반폐기물로써 처리되어야 하며,  $^{14}\text{C}$ 의 영향을 최소화하기 위해 매립이 아닌 도로 보수와 같은 표층에 재활용 되어야 할 것이다.

중심단어: 사이클로트론, 방사화, 콘크리트

## 연구자 정보 이력

	성명	소속	직위
(제1저자)	장동근	동남권원자력의학원 핵의학과	
(교신저자)	신상화	부산가톨릭대학교 방사선학과	교수