Analysis of Activation Characteristics of Cyclotron Operating Facility by Concrete Type

Yong-In Cho[1], Sang-Il Bae[2,*]

[1]Department of Radiological Science, Catholic University of Pusan

[2]Department of Radiation Oncology, Dongnam Institute of Radiological & Medical Sciences Cancer Center

Received: October 23, 2024. Revised: November 05, 2023. Accepted: November 30, 2023.

ABSTRACT

Medical cyclotrons accelerate protons at high speeds to produce nuclear reactions for the production of radiopharmaceuticals. During this nuclear reaction, high-energy gamma rays and many neutrons are generated. However, it is reported that if exposed to the generated neutrons for a long period of time, the cyclotron accessories and shielding concrete will become radioactive and generate a large amount of radioactive waste when the facility is dismantled. Accordingly, this study aims to evaluate the radioactivity characteristics of different types of concrete used as shielding walls in cyclotron operating facilities. The experiment simulated GE's PETtrace 800 model and five types of concrete shielding walls using the FLUKA code based on Monte Carlo simulation. The simulated cyclotron was evaluated for its source term based on the manufacturer's standards, and the neutron fluence was evaluated according to the type of concrete shielding wall when the cyclotron was in operation. Afterwards, the sum of the radionuclides produced according to the type of concrete and the fraction of radionuclides produced according to the domestic radioactive waste disposal standards were analyzed. As a result, the reliability of the source term evaluation was secured with an error of less than 3%. The distribution of neutron fluence generated depending on the type of concrete when operating the cyclotron showed the highest result at the point of 0.02 eV. As a result of evaluating radionuclides generated depending on the type of concrete, concrete with high iron content tended to generate ^{54}Mn, and concrete with high oxygen content tended to generate ^{60}Co and ^{152}Eu. As a result of analyzing radioactivity characteristics according to the thickness of each type of concrete, concrete with high iron content showed a value below the allowable self-disposal concentration at 50 cm thick, and concrete with high oxygen content showed a value exceeding the allowable self-disposal concentration at 50 cm thick. It is believed that this study can be used as auxiliary data for preliminary radiological evaluation of concrete shielding walls when dismantling a cyclotron.

Keyword: Monte Carlo Simulation, Cyclotron, Radioactivity, Activation, Concrete, Radioactive Waste

I. INTRODUCTION

사이클로트론은 직류 자기장과 고주파 전기장을 이용하여 원형으로 하전입자를 가속하는 장치이다[1]. 1929년 Lawrence에 의하여 개발되었고, 현재는 의료, 생물, 산업 등 다양한 분야에 사용되고 있다[2]. 국내·외 사이클로트론 현황에 따르면, 국외에서는 약 1200대 이상, 국내에서는 51기의 사이클로트론이 설치되어 있다[3].

사이클로트론은 가속 에너지에 따라 대형(70 MeV 이상), 중형(36~50 MeV), 소형(20~30 MeV), 초소형(15 MeV 전후)으로 구분할 수 있다[2]. 그 중 소형 이하의 의료용 사이클로트론은 방사성의약품을 생산하기 위해 양성자를 고속으로 가속하여 핵반응을 일으키게 된다[4]. 이러한 과정에서 고에너지 감마선과 다수의 중성자가 발생하며, 사이클로

* Corresponding Author: Sang Il Bae E-mail: herose7777@naver.com Tel: ***-****-****
Address: Department of Radiation Oncology, Dongnam Institute of Radiological & Medical Sciences Cancer center, 40, Jwadong-gil, Jangan-eup, Gijang-gun, Busan, Republic of Korea

트론 운영 시설은 두꺼운 콘크리트 차폐벽의 설치가 필요하다[5]. 그러나, 사이클로트론 장치 내부 부속품 및 콘크리트 차폐벽이 핵반응으로 인한 중성자에 오랜 시간 노출될 경우, 부속품과 차폐벽 자체가 방사화되는 현상이 발생하게 된다[6].

기존 연구에서는 사이클로트론 가동으로 인한 물질의 방사화는 향후 사이클로트론의 해체 시 작업자의 방사선 피폭과 다량의 방사성폐기물을 발생시킬 것으로 보고되고 있다[7]. 사이클로트론의 기계적인 수명은 약 30년으로 예상되나 사용 목적의 변경, 장소 이전, 경제적인 문제 등의 사유로 조기 해체가 이루어지는 사례가 발생하고 있다. 이러한 해체 사례를 통해 사이클로트론 해체 과정에서 다량의 방사성폐기물과 처리 비용이 발생하는 것으로 보고되었다[8]. 해체 시 발생하는 방사성폐기물은 사이클로트론 장치의 구성품 및 차폐용 콘크리트의 물질 조성에 따라 방사화 정도가 달라지며, 콘크리트 종류에 따른 방사화 분석이 필요하다.

이에 본 연구에서는 몬테카를로 전산모사를 통해 사이클로트론과 콘크리트 차폐벽을 모사한 후 콘크리트의 종류에 따른 중성자 분포를 평가하고, 방사화 특성 분석을 수행하였다. 이를 통해 향후 사이클로트론 시설 해체 시 콘크리트 방사성폐기물 발생량 예측을 위한 기초자료를 제공하고자 한다.

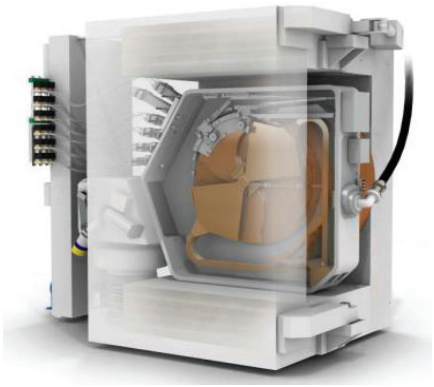
II. MATERIAL AND METHOD

1. 몬테카를로 전산모사(Monte Carlo Simulation)

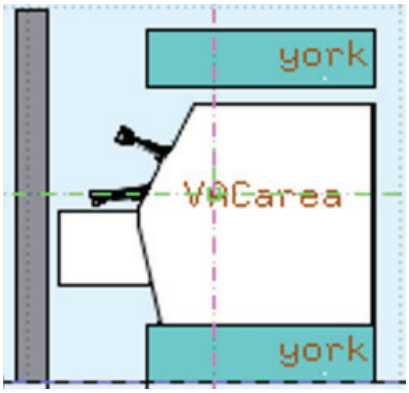
몬테카를로 전산모사는 정량적 분석과 의사결정 과정에서 위험을 설명할 수 있는 컴퓨터화 된 수학적 기법이다. 내재된 불확실성을 가진 모든 요인에 대해 다양한 값을 대입하여 가능한 결과의 모델을 구축함으로써 위험 분석을 수행한다. 본 연구에서는 입자 수송과 방사선과 물질과의 상호작용을 계산하기 위한 범용 도구인 FLUKA(FLUktuierende KAskade) 코드를 활용하였다[9].

1.1. 사이클로트론 모델

본 연구에서는 Fig. 1 - (A)와 같이 사이클로트론 장치의 전산모사를 위해 미국 GE Healthcare 사의 비자체차폐형 PETtrace 800 모델을 선정했다[10]. 이 모델은 현재 국내 운영 중인 사이클로트론 중 가장 많은 비중을 차지하고 있다. 기존 연구에서 모방한 사이클로트론 PETtrace 800 모델의 입력문을 기반으로 Fig. 1 - (B)와 같이 가상 공간 내 모사하였다.



(A) GE Healthcare cyclotron PETtrace 800



(B) PETtrace 800 simulated by FLUKA

Fig. 1. Monte carlo simulation of the cyclotron model.

1.2. 콘크리트 차폐벽

사이클로트론 시설을 구성하는 차폐벽은 MCNP (Monte Carlo N-Particle Transport)에서 제공하는 기본 콘크리트인 NBS03, NBS04와 철 성분이 함유되어 광자선 차폐에 특화된 Limonite & steel, Magnetite & steel과 Magnetite로 총 5가지 콘크리트를 선정하였으며 구성 성분은 Table 1과 같다[11]. 일반적으로 차폐용 콘크리트에는 불순물이 포함되며, 보수적인 평가를 위해 불순물 함량은 Table 2와 같이 기존 연구를 참조하여 최대치를 적용하였다[12].

Table 1. Density and ratio of constituent elements of concrete types

	Ordinary (NBS 03)	Ordinary (NBS 04)	Limonite and steel	Magnetite and steel	Magnetite
H	0.008485	0.005558	0.006840	0.002374	0.003113
C	0.050064	-	-	-	-
O	0.473483	0.498076	0.156222	0.137678	0.330504
Na	-	0.017101	-	-	-
Mg	0.024183	0.002565	0.001545	0.003669	0.009338
Al	0.036063	0.045746	0.006399	0.010358	0.023486
Si	0.145100	0.315092	0.014784	0.015753	0.025750
S	0.002970	0.001283	-	0.055675	0.001415
K	0.001697	0.019239	0.000883	-	-
Ca	0.246924	0.082941	0.057590	0.055675	0.071024
Ti	-	-	-	0.015969	0.054329
V	-	-	0.000883	0.000647	0.003113
Fe	0.011031	0.012398	0.754854	0.757877	0.474250
Mn	-	-	-	-	0.001981
Cr	-	-	-	-	0.001698
Total	1	1	1	1	1
Density (g/cm^3)	2.35	2.35	4.54	4.64	3.53

Table 2. Impurities in concrete [Unit: ppm]

	Mn	Zn	Ni	Li	Sc	Cs	Co	Eu
Weight fraction	620.16	302.13	30.99	34.45	8.02	4.68	15.25	0.94

가상의 콘크리트 차폐벽은 Fig. 2와 같이 사이클로트론의 양성자 빔이 발생하는 방향을 기준으로 전면, 후면, 좌측면, 우측면의 4가지 방향으로 구성하였다. 차폐벽은 총 100 cm 두께로 설정하였으며, 두께별 방사화 분석을 위해 10 cm 간격으로 세분화하여 모사하였다.

2. 실험방법

2.1. 사이클로트론에 대한 선원항 평가

PETtrace 800 사이클로트론 전산모사에 대한 신뢰성을 확보하기 위해 실제 사이클로트론과 모사된 사이클로트론 간의 선원항 평가를 시행하였다. PETtrace 800 모델은 제조사에서 제시한 성능 조건에서 생산되는 방사성핵종의 방사능을 Table 3과 같이 제시하고 있다. 본 연구에서는 제조사에서 권고하는 성능 조건과 동일한 조건에서 입자 수송을 수행하였으며, 생성되는 ^{18}F(Fluorine) 핵종의 방사능을 비교 분석하였다.

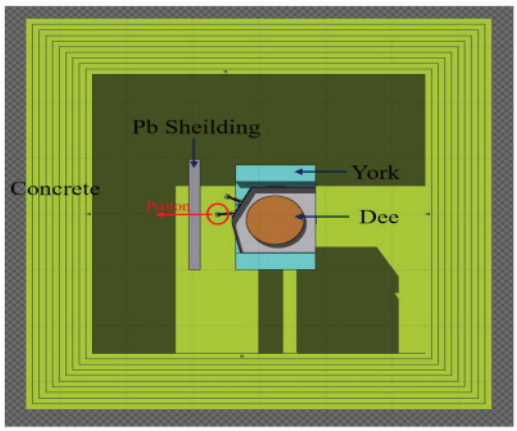


Fig. 2. Simulated cyclotron room structure using FLUKA.

Table 3. Generated radioactivity under cyclotron standard operating conditions

Manufacturer Performance Condition	
Radiation Source	Proton
Energy	16.5 MeV
Current	60 μA
Operating Time	2 h
Generative Reaction	$^{18}O(p, n)^{18}F$
Generated Radioactivity	240 GBq

2.2. 콘크리트 종류에 따른 중성자 선속 평가

사이클로트론 시설 내 차폐 콘크리트 종류에 따른 중성자 선속을 평가하기 위해 양성자 에너지 16.5 MeV, 전류 60 μA의 조건으로 하루 4시간씩 10년 가동, 1년 냉각 조건을 설정하였다. Fig. 3과 같이 전산모사를 통해 양성자 빔 조사 시 핵반응으로 인해 발생하는 중성자 선속을 평가하였다.

차폐 콘크리트의 종류별로 10 cm 두께에서 중성자 선속을 평가하였으며, 중성자의 에너지는 1 eV 이하에서 10 MeV까지 분류하여 실험을 진행하였다. FLUKA에서 사용된 output 카드는 USRTRACK 카드를 활용하였으며, 실험 결과에 대한 불확도(uncertainty)를 5% 이하로 하기 위해 10^8번 반복 시행되었다.

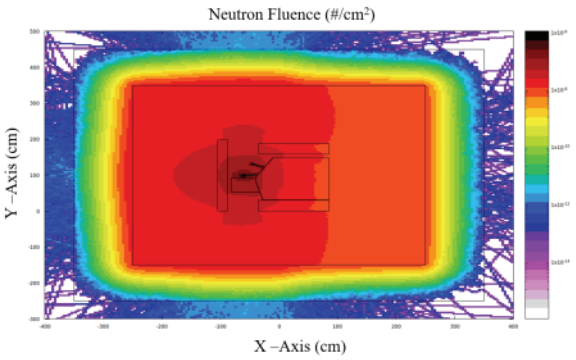


Fig. 3. Simulated cyclotron room structure using FLUKA.

2.3. 콘크리트 종류 및 두께에 따른 방사화 특성 평가

사이클로트론 가동에 따른 차폐 콘크리트의 방사화 특성 분석을 위하여 양성자 에너지 16.5 MeV, 전류 60 μA의 조건으로 하루 4시간씩 10년 가동, 1년 냉각 후 콘크리트 종류에 따라 발생한 방사성핵종을 평가하였다. 콘크리트 종류별 두께에 따른 특성 평가를 위해 콘크리트 두께별 비방사능(Bq/g)을 산출하여 비교 분석하였다.

또한 차폐용 콘크리트의 자체처분 가능 여부를 평가하기 위해 콘크리트 두께별 생성 핵종의 비방사능과 자체처분 허용농도 비의 합인 총 분율을 계산하여 평가하였다[13]. FLUKA에서 사용된 output 카드는 RESNUCLEI 카드를 활용하였으며 실험 결과에 대한 불확도(uncertainty)를 5% 이하로 하기 위하여 10^8번 반복 시행되었다.

III. RESULT

1. 사이클로트론에 대한 선원항 평가

전산모사를 통해 사이클로트론의 $H_2{}^{18}O$ 타겟에 16.5 MeV, 60 μA 양성자를 2시간 조사한 결과, Fig. 4와 같이 ^{18}F의 방사능은 247 GBq이 생성되었다. 전산모사에 대한 불확도는 3.27%이며, 제조사 성능과의 오차는 2.9%로 평가되었다.

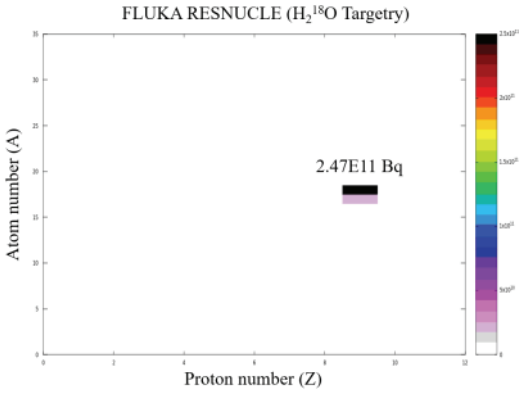


Fig. 4. Production amount of ^{18}F radionuclide through FLUKA simulation.

2. 중성자 선속 분포에 대한 평가

사이클로트론 10년 가동 시 5가지 종류의 차폐 콘크리트에 생성되는 중성자 선속 분포를 에너지별로 분리하여 Table 5와 Fig. 5로 나타내었다.

전산모사에서 차폐 콘크리트 내 관측되는 중성자의 에너지는 약 0.0001 eV에서 최대 10 MeV까지

나타났다. NBS03과 NBS04 콘크리트는 1 eV 이하의 중성자가 전체의 44.1%, 37.5%로 가장 높은 비율을 보였다. 이에 반해 Limonite+Steel, Magnetite+Steel, Magnetite 콘크리트는 1 keV ~ 10 MeV의 중성자가 전체 중의 57.9%, 65.0%, 61.2%로 높은 비율을 나타내었다.

모든 콘크리트에서 중성자 선속의 최대값은 중성자 에너지가 0.02 eV 지점에서 나타났다. 콘크리트 종류별 중성자 발생 정도는 NBS03, NBS04 콘크리트에서 최대값이 Magnetite+Steel에 비하여 약 16배, 약 13배 높게 나타났다. 그 외 Limonite+Steel과 Magnetite는 Magnetite+Steel에 비해 약 2배 정도의 높은 분포를 나타내었다.

Table 5. Generation rate depending on neutron energy in concrete [Unit: %]

Concrete type	≤ 1 eV	1 eV ~ 1 keV	1 keV ~ 10 MeV
NBS03	44.1	16.0	39.8
NBS04	37.5	18.4	44.2
Limonite +steel	18.6	23.6	57.9
Magnetite +steel	9.7	25.3	65.0
Magnetite	13.2	25.6	61.2

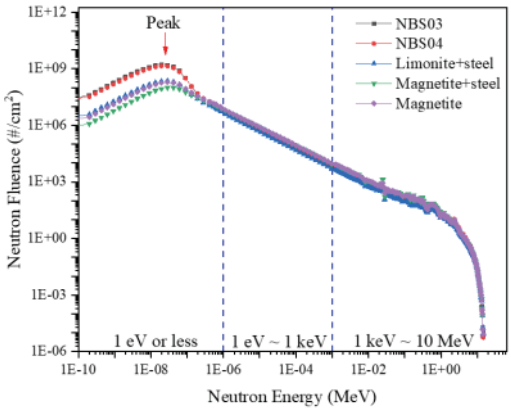


Fig. 5. Neutron energy spectrum according to concrete type.

3. 콘크리트 종류에 따른 방사화 특성 평가

콘크리트 차폐벽에서 중성자에 의해 생성되는 방사화 핵종 중 반감기, 에너지, 자체처분 허용농도를 고려하여 핵종을 선별한 후 Table 6과 Fig. 6에 나타내었다. 콘크리트 차폐벽 내 주요 생성 핵종은 ^{54}Mn, ^{60}Co, ^{152}Eu, ^{134}Cs, ^{154}Eu이며, 총 5가지 핵종에 대해 콘크리트 10 cm 지점 내 생성되는 방사성핵종의 비방사능(Bq/g)을 평가하였다.

그 결과, 생성된 핵종의 전체 비방사능은 Magnetite+Steel 3.61 Bq/g, Limonite+Steel 3.27 Bq/g, NBS03 2.93 Bq/g, NBS04 2.83 Bq/g, Magnetite 2.58 Bq/g의 순으로 나타났다. Magnetite+Steel, Limonite+Steel, Magnetite의 방사성핵종 생성 비율은 ^{54}Mn, ^{60}Co, ^{152}Eu, ^{134}Cs, ^{154}Eu 순으로 나타났으며, 이 중 ^{54}Mn가 60%, 55%, 40%로 가장 높은 생성 비율을 보였다. NBS03, NBS04의 방사성핵종 생성 비율은 ^{60}Co, ^{152}Eu, ^{134}Cs, ^{154}Eu, ^{54}Mn의 순서로 나타났으며, ^{60}Co의 비율이 약 45%, ^{152}Eu의 비율이 약 40%로 가장 높은 생성 비율을 보였다.

5가지 종류의 콘크리트 차폐벽에서 공통적으로 생성되는 핵종 중 ^{134}Cs의 경우 약 10%, ^{154}Eu의 경우 약 5% 이하의 생성 비율을 나타내었다.

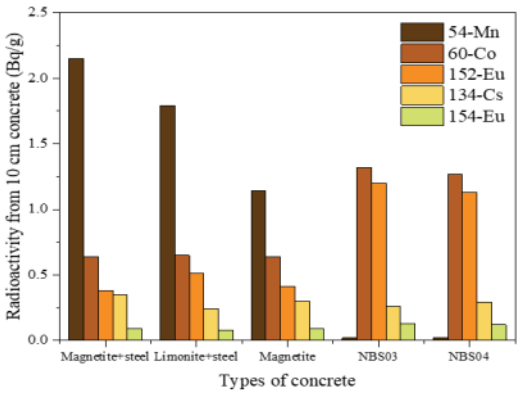


Fig. 6. Specific radioactivity of radionuclides produced by concrete type.

Table 6. Specific radioactivity of radionuclides produced within 10 cm of concrete thickness [Unit: Bq/g]

Nuclide	Magnetite +Steel	Limonite +Steel	Magnetite	NBS03	NBS04
^{54}Mn	2.15	1.79	1.14	0.02	0.02
^{60}Co	0.64	0.65	0.64	1.32	1.27
^{152}Eu	0.38	0.51	0.41	1.21	1.13
^{134}Cs	0.35	0.24	0.3	0.26	0.29
^{54}Eu	0.09	0.08	0.09	0.13	0.12
Total	3.61	3.27	2.58	2.93	2.83

4. 콘크리트 차폐벽 두께에 따른 방사화 특성 평가

콘크리트 종류에 따른 생성된 방사성핵종 분율의 합을 콘크리트 두께에 따라 분류하여 Table 7과 Fig. 7에 나타내었다.

그 결과, 차폐 콘크리트 표면부터 10 cm 깊이에서 가장 높은 분율 값을 나타내었으며 콘크리트 두께가 증가함에 따라 분율의 합이 점차 감소하는 경향을 나타내었다.

Magnetite+Steel, Limonite+Steel, Magnetite의 경우, 콘크리트 깊이에 따라 급격한 감쇠를 보였으며, 50 cm 두께에서 자체처분 허용농도 미만의 값을 나타내었다. 그에 반해 NBS03, NBS04 콘크리트의 경우, 두께에 따라 완만한 감쇠를 보였으며, 50 cm 두께에서도 자체처분 허용농도를 초과하는 값을 나타내었다.

Table 7. Sum of fractions according to concrete type and thickness

Concrete thickness	Magnetite +Steel	Limonite +Steel	Magnetite	NBS03	NBS04
10 cm	36.19	32.71	25.82	29.04	28.31
30 cm	4.57	1.88	4.46	10.06	12.03
50 cm	0.44	0.09	0.48	1.74	2.42

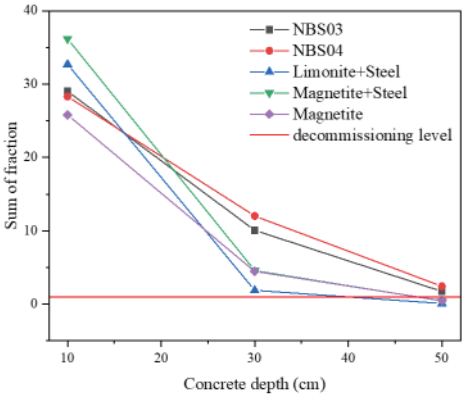


Fig. 7. Sum of fractions according to concrete thickness and clearance levels.

IV. DISCUSSION

사이클로트론은 가동 시 핵반응으로 인해 생성된 중성자는 본체 구성품과 콘크리트 차폐벽과의 상호작용을 통해 방사화가 발생하며, 이는 해체 시 작업자의 피폭선량 증가와 더불어 방사성폐기물 발생의 원인이 된다. 또한, 사이클로트론 장치의 본체 부속품과 차폐용 콘크리트의 종류 및 불순물 함량에 따라 방사화되어 생성되는 방사성핵종의 광범위한 차이가 발생할 수 있다. 이에 본 연구에서는 사이클로트론 시설 내 차폐 콘크리트의 종류에 따라 생성되는 중성자 분포 및 방사화 특성 분석을 수행하고자 하였다.

본 연구에서는 GE 사의 PETtrace 800 모델의 선원항 평가를 통해 ^{18}F 생성량은 제조사의 권고량 대비 3% 이내 오차를 나타내어 전산모사에 대한 신뢰성을 확보하였다. 사이클로트론 시설의 콘크리트 차폐벽은 45% 이상의 산소의 함유량을 가진 일반 콘크리트인 NBS03, NBS04, 철의 함유량이 75% 이상인 Limonite+Steel, Magnetite+Steel, 산소 33%, 철 47%의 함유량을 가진 Magnetite를 각각 선정하여 중성자 선속 분포 및 방사화 특성 분석을 수행하였다.

차폐 콘크리트 내 중성자 선속 분석을 통해 NBS03과 NBS04 콘크리트의 경우 1 eV 이하의 중성자가 상대적으로 높은 비중을 나타내었으며, Limonite+Steel, Magnetite+Steel, Magnetite 콘크리트의 경우 1 keV 이상의 중성자가 상대적으로 높은 비중으로 나타났다. 이는 산소 함유 콘크리트의 경우 원자번호가 낮은 산소에 의하여 중성자의 감속이 더 높게 일어난 것으로 사료된다. 이는 S.T Abdulrahman et al.[14]의 선행연구에서 제시한 낮은 원자번호에 의해 중성자 감속이 일어나는 것과 상응한 결과를 나타내었다.

콘크리트 차폐벽 내 생성되는 방사성핵종 중 ^{54}Mn, ^{60}Co, ^{152}Eu, ^{134}Cs, ^{154}Eu 총 5가지 주요 핵종에 대한 방사화 특성 분석을 통해 콘크리트 10 cm 내 비방사능의 경우 철 성분 함유 콘크리트가 높게 나타난 것을 확인하였다. 이는 철의 함유량이 높은 콘크리트에서는 $^{55}Fe(p, n)^{54}Mn$ 반응에 의하여 ^{54}Mn의 생성량이 높고, 산소의 함유량이 높은 콘크리트에서는 불순물에 포함된 물질의 $^{59}Co(n, \gamma)^{60}Co$, $^{151}Eu(n, \gamma)^{152}Eu$ 반응으로 ^{60}Co과 ^{152}Eu의 생성량이 높게 발생한 것으로 추정된다. 이는 장동근 등[15]의 연구에서 제시한 ^{60}Co 핵종의 생성 비율과 상응한

결과를 나타내었다.

콘크리트 차폐벽의 종류 및 두께에 따라 생성된 방사성핵종 분율의 합에 대한 분석 결과를 통해 모든 콘크리트에서 두께 증가에 따른 중성자 선속 감소로 방사성핵종의 분율이 감소하는 경향을 나타내었다. 산소 함유 콘크리트의 경우 깊이에 따라 완만한 감쇠를 보이는 반면, 철 함유 콘크리트는 급격한 변화를 보였다. 이는 깊이에 따라 생성된 ^{54}Mn의 생성량이 줄어드는 것과 관련이 있는 것으로 추론된다.

국내 방사성폐기물 분류 및 자체처분 기준에 관한 규정에 따르면, 다수의 방사성핵종이 혼합되어 있다면 방사성핵종의 분율의 합은 1을 초과하지 않도록 규정하고 있다[13]. 이러한 규정에 따라 본 연구에서 분석한 철 함유 콘크리트는 50 cm 이하의 두께에서 자체처분이 고려되어야 할 것이며, 산소 함유량이 높은 콘크리트는 50 cm 이상에서 자체처분을 고려해야 할 것으로 사료된다.

본 연구에서는 국내에서 가장 많은 비중을 차지하고 있는 GE 사의 PETtrace 800 모델 가동 시 콘크리트 차폐벽에 대한 방사화 평가에 대해 수행하였으며, 국내 모든 사이클로트론 시설에 적용하기에는 한계가 있다. 이에 따라 다양한 사이클로트론 모델을 대상으로 본체 부속품 및 콘크리트 차폐벽에 대한 방사화 평가가 필요할 것으로 사료된다. 향후 국가의 장기적인 방사성폐기물 관리 측면에서 사이클로트론을 포함한 가속기 시설 신규 설치 시 운영 과정에서 발생할 수 있는 방사화를 고려한 시설 및 차폐 설계가 이뤄질 필요가 있을 것으로 판단된다.

V. CONCLUSION

본 연구에서는 몬테카를로 전산모사를 통해 사이클로트론 운영 시설 내 콘크리트 차폐벽 종류에 따라 생성된 중성자 선속 분포와 방사화로 인해 생성된 방사성핵종의 특성 분석을 수행하였다. ^{60}Co, ^{152}Eu의 생성량에 따라 5종의 콘크리트 중 steel 계열 콘크리트, Magnetite, 일반 콘크리트 순으로 방사화 정도가 낮은 것을 확인하였다. 본 연구에서 선정된 5종의 차폐 콘크리트는 국내 방사성폐기물에 대한 자체처분 기준에 근거하여 50 cm 전후로 자체처분을 고려할 수 있을 것으로 판단된다. 본 연구를 통해 사이클로트론 해체 시 콘크리트 차폐벽의 예비 방사화 평가 측면에서 보조자료로 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

Acknowledgement

이 논문은 2024년도 부산가톨릭대학교 교내연구비에 의하여 연구되었음

Reference

[1] S. Y. Hwang, Y. J. Kim, S. W. Lee, "Evaluation of residual radioactivity and dose rate of a target assembly in an IBA cyclotron", Journal of Radiological Science and Technology, Vol. 39, No. 4, pp. 643-649, 2016. http://dx.doi.org/10.17946/JRST.2016.39.4.22

[2] D. G. Jang, S. S. Kang, C. S. Kim, J. H. Kim, "Analysis of Air Activation in PET Cyclotron Facility", Journal of the Korean Society of Radiology, Vol. 10, No. 7, pp. 489-494. 2016. http://dx.doi.org/10.7742/jksr.2016.10.7.489

[3] Cyclotrons used for Radionuclide Production Accelerator Knowledge Portal, IAEA Accelerator Knowledge Portal, From URL; https://nucleus.iaea.org/sites/accelerators/Pages/Cyclotron.aspx

[4] D. G. Jang, D. H. Kim, "A Study of Targetry Activation and Dose Analysis of PET Cyclotron Using Monte Carlo Simulation", Journal of the Korean Society of Radiology, Vol. 12, No. 5, pp. 565-573, 2018. http://dx.doi.org/10.7742/jksr.2018.12.5.565

[5] D. G. Jang, S. S. 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. http://dx.doi.org/10.7742/jksr.2019.13.1.73

[6] B. N. Lee, J. S. Lee, J. Y. Min, J. H. Lee, "Development of Low-activation Cement for Decreasing the Activated Waste in Nuclear Power Plant", Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute, Vol. 5. No. 3, pp. 223-229,

2017. https://doi.org/10.14190/JRCR.2017.5.3.223

[7] R. N. Woo, Y. M. Kim, M. C. Song, D. H. 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 and Research, Vol. 38, No. 2, pp. 91-99, 2013. http://dx.doi.org/10.14407/jrp.2013.38.2.091

[8] R. N. Woo, Y. M. Kim, "A Study on the Method of Cost Estimation for the Decommissioning Plan by the Analysis of Domestic Cyclotron Dismantling Practices", Journal of the Korean Society of Radiology, Vol. 8, No. 3, pp. 97-103. 2014.

[9] C. W. Oh, "A Study on the Radiation Characteristics of Long-Term Linear Accelerators by Decommissioning Components Using FLUKA Monte Carlo Simulation", Pukyong National University, Doctor of engineering, 2023.

[10] PETtraceTM 800 cyclotron series, From URL; https://www.gehealthcare.com/-/jssmedia/feature/gehc/products/cyclotrons/pt800-cyclotron-system-data-sheet-rev6.pdf?rev=-1&srsltid=AfmBOorRCClYM9PU47RaBnjxrl-FMDwFfZMHzxaKIghWdtD5UvQ2mfMh

[11] R. S. Detwiler, R. J. McConn, T. F. Grimes, S. A. Upton, E. J. Engel, "Compendium of Material Composition Data for Radiation Transport Modeling", Richland, WA: Pacific Northwest National Laboratory, 2021.

[12] H. S. Lee, "Final Report on Development of Domestic Cyclotron Safety Assessment-Based Dismantling/ Disposal Procedures", Nuclear Safety and Security Commission, R&D/1603005, 2018.

[13] Nuclear Safety and Security Commission Notice, Regulations on classification and self-disposal standards for radioactive waste, 2023-No.7, 2023.

[14] S.T Abdulrahman, Z. Ahmad, S. Thomas et al., *Micro and Nanostructured Composite Materials for Neutron Shielding Applications*, Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering, pp. 1-23, 2020.

[15] 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. 335-341. 2017. http://dx.doi.org/10.7742/jksr.2017.11.5.335

사이클로트론 운영 시설의 콘크리트 종류에 따른 방사화 특성 분석

조용인[1], 배상일[2,*]

[1]부산가톨릭대학교 보건과학대학 방사선학과
[2]동남권원자력의학원 방사선종양학과

요 약

의료용 사이클로트론은 방사성의약품 생산을 위해 양성자를 고속으로 가속하여 핵반응을 일으킨다. 이러한 핵반응 과정에서 고에너지의 감마선과 다수의 중성자가 발생한다. 이러한 중성자에 의해 장기간 노출될 경우, 사이클로트론 부속품 및 차폐 콘크리트가 방사화되어 시설 해체 시 다량의 방사성폐기물을 발생시킬 것으로 보고되고 있다. 이에 본 연구에서는 사이클로트론 운영 시설 내 차폐벽으로 사용되는 콘크리트의 종류에 따른 방사화 특성을 평가하고자 한다. 실험은 몬테카를로 전산모사 기반의 FLUKA 코드를 이용하여 GE사의 PETtrace 800 모델과 5종류의 콘크리트 차폐벽을 모사하였다. 전산모사 된 사이클로트론은 제조사 기준에 근거하여 선원항을 평가하였고, 사이클로트론 가동 시 콘크리트 차폐벽 종류에 따른 중성자 선속 분포를 평가하였다. 이후 콘크리트 종류에 따라 생성되는 방사성핵종과 국내 방사성폐기물 자체처분 기준에 따른 생성 핵종 분율의 합을 분석하였다. 그 결과, 선원항 평가는 3% 이내의 오차로 신뢰성을 확보하였다. 사이클로트론 가동 시 콘크리트 종류에 따라 생성되는 중성자 선속 분포는 0.02 eV 지점에서 가장 높은 결과를 보였다. 콘크리트 종류에 따라 생성되는 방사화 핵종 평가 결과, 철 함유량이 높은 콘크리트는 ^{54}Mn, 산소 함유량이 높은 콘크리트는 ^{60}Co, ^{152}Eu 핵종이 높게 생성되는 경향을 보였다. 콘크리트 종류별 두께에 따른 방사화 특성 분석 결과, 철 함유량이 높은 콘크리트는 50 cm 두께에서 자체처분 허용농도 미만의 값을 보였고, 산소 함유량이 높은 콘크리트는 50 cm 두께에서 자체처분 허용농도를 초과하는 값을 나타내었다. 본 연구를 통해 사이클로트론 해체 시 콘크리트 차폐벽의 예비 방사화 평가에 대한 보조자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

중심단어: 몬테카를로 전산모사, 사이클로트론, 방사화, 콘크리트, 방사성폐기물

연구자 정보 이력

	성명	소속	직위
(제1저자)	조용인	부산가톨릭대학교 보건과학대학 방사선학과	조교수
(교신저자)	배상일	동남권원자력의학원 방사선종양학과	방사선사