Journal of RADIATION INDUSTRY
Vol. 19, No. 1, pp. 33-42, 2025
https://doi.org/10.23042/radin.2025.19.1.33

Original article

PHITS-DCHAIN을 이용한 양성자치료 사이클로트론 방사화 및 감마선속 평가

정영선[1] · 이신동[1] · 김광표[1,*]

[1]경희대학교 원자력공학과

Evaluation of Cyclotron Activation and Gamma Flux in Proton Therapy Using PHITS-DCHAIN

Young Sun Jeong[1], Shin Dong Lee[1], and Kwang Pyo Kim[1,*]

[1]Department of Nuclear Engineering, Kyung Hee University, 1732, Deokyoungdae-ro, Giheung-gu, Yongin-si, Gyeonggi-do 17104, Republic of Korea

ABSTRACT The global demand for proton therapy has been increasing across various medical institutions due to advantages such as the Bragg peak effect. Currently, cyclotron-based proton therapy systems are widely used in medical institutions. However, during proton acceleration, a certain level of beam loss is inevitable inside the cyclotron, resulting in activation phenomena. Therefore, assessing activation within the cyclotron is crucial during maintenance work or component disposal. This study aims to evaluate the activation and gamma flux in proton therapy cyclotron components after operation cessation, considering cooling time, using the PHITS computational code. To accomplish this, the reliability of the PHITS code was verified, a cyclotron model was implemented in PHITS for simulation, and activation and gamma flux were calculated using the DCHAIN tally. First, the reliability of the PHITS computational code was verified by comparing the proton range in water obtained from PHITS with experimental data provided by international organization. The cyclotron modeling was based on the SC cyclotron, which serves as a reference model for proton therapy cyclotrons, and activation evaluations were conducted accordingly. Finally, changes in radioactivity and gamma flux according to the cooling time after cyclotron shutdown were assessed. The reliability verification demonstrated that the differences between the PHITS results and those reported by international organizations were all within 1%. The activation evaluation using the DCHAIN tally indicated that the highest activation occurred in the beam extraction component, where protons directly collide. Additionally, in the Dee, where activation is primarily induced by neutrons, the most significant decay occurred with increasing cooling time after beam termination. Moreover, copper-based components, including the beam extraction, Dee, and superconducting coil, exhibited significant reductions in radioactivity and gamma flux over time. In contrast, iron-based components, such as the cryostat, iron hill, and iron yoke, showed a decay of approximately twice the initial value even after 48 hours. The findings of this study can serve as valuable references for developing guidelines on future maintenance and component disposal.

Key words: DCHAIN, Activation, Proton Therapy, Cyclotron, PHITS

1. 서 론

양성자 치료에 대한 수요는 최초 연구 이후 해마다 증가하여, 미국의 경우 양성자치료 환자의 수는 2012년에 총 5,377명 2021년에 총 15,829명으로 10년 사이 약 3배 정도로 양성자치료를 받는 환자가 증가하였다[1-2]. 양성자치료의 이점은 특히 치료 부위에 중요 조직이 있는 경우 및 소아암 환자들에게 기존의 광자를 이용한 치료보다 양성자치료가 강조되고 있어 양성자치료 시설은 전세계적으로 늘어날 것으로 예상된다[3-4]. 양성자치료에 이용되는 가속기의 종류는 사이클로트론과 싱크로사이클로트론이 있으며, 현재 사이클로트론은 연속적인 입자 가속을 통해 높은 빔 전류를 제공하며 보다 정교한 주파수 제어가 가능

ISSN 1976-2402 **http://www.ksri.kr/**

Copyright© 2025 by Korean Society of Radiation Industry

***Corresponding author:** Kwang Pyo Kim
Tel: +82-31-201-2560, Fax: +82-31-273-3592, E-mail: kpkim@khu.ac.kr

Received 22 January 2025 **Revised** 18 March 2025 **Accepted** 19 March 2025

하다는 장점으로 인해 많은 제조사에서 사이클로트론 방식의 양성자치료기가 출시되어 국내외 많은 의료기관에서 사이클로트론 방식의 양성자치료기를 사용하고 있다. 다만 사이클로트론의 경우, 사용 전류의 20%가 beam extraction 부분과 충돌하여 비방사성물질이 핵변환을 통해 방사성물질로 변환되는 방사화 현상을 발생시켜, 사이클로트론의 방사화 평가는 필수적이다[5-6].

국내외에서는 양성자치료와 관련된 많은 방사화 평가 연구가 다수 진행되었다. 미국 국립방사선방호위원회(NCRP, National Council on Radiation Protection and Measurements) 에서는 감마 스펙트로미터를 이용하여 입자가속기 시설에 대한 방사선 차폐 및 방사화 평가에 대한 연구를 진행하여, Aluminum, Steel, Stainless steel, Copper 등 가속기의 주요 부품들이 입자 빔에 의해 방사화 되고, 많은 종류의 방사성핵종이 생성될 수 있음을 제시한 바 있다[7]. 또한, 양성자치료 시설에서 이용되는 양성자 빔에 의해 환자 내부 금속 물질이 방사화 될 수 있음을 일본의 남도호쿠 양성자치료센터에서 PHITS 전산 코드를 활용하여 연구를 진행하였으며, 벨기에 브뤼셀 자유대학교에서 BDSIM (Beam Delivery Simulation)과 FISPACT-ll를 이용하여 콘크리트에 대한 방사화 평가 연구를 진행하였다[8-9]. 그리고 양성자치료기 사이클로트론의 빔 손실 현상(Beam loss 현상)으로 인한 내부 금속 물질의 방사화에 대한 연구가 스위스 PSI (Paul Scherrer Institute)에서 MCNP (Monte Carlo N-Particle) 전산코드와 Genitron GammaTRACER, 고순도 게르마늄 검출기를 활용하여 진행되었다[10].

국내외의 많은 연구 및 의료기관에서 양성자치료 사이클로트론 시설의 방사화 평가가 이루어지고 있으나 유지보수 작업 시 참고할 만한 사이클로트론의 각 부품들에 대한 방사화 평가에 대한 정보는 부족한 상황이다. 실제 양성자치료 사이클로트론 시설에서 가장 방사화가 많이 이루어지고 있는 부분은 내부 Beam loss 현상이 발생하는 사이클로트론 및 사이클로트론 기술 특성 상 치료에 필요한 에너지로 감쇠 시키기 위한 에너지 선택 시스템(Energy Selection System) 부분이며, 해당 부품에서 방사화 현상으로 발생하는 다양한 방사성핵종으로 인해 유지보수 작업자가 방사선에 피폭될 가능성이 크다[6]. 특히, 사이클로트론은 대부분 금속으로 이루어져 있어 방사화 현상으로 인해 방사성핵종이 생성될 가능성이 높고, 이로 인해 유지보수 작업자의 방사선 노출 위험이 크다. 따라서 유지보수 과정에서 상당한 피폭이 우려되므로 이를 최소화하기 위해 방사성핵종에 대한 명확한 분석이 필수적이다.

본 연구의 목적은 향후 유지 보수 작업자의 방사선량을 최소화하는 방안을 마련하기 위해 양성자치료기 사이클로트론의 사용 종료 후 냉각 시간에 따른 방사화 및 부품에서 발생하는 감마선속을 PHITS 전산 코드를 이용해 평가하는 것이다. 이를 위해 PHITS 전산 코드와 국제 기구에서 제시하는 결과값과의 비교를 통해 코드의 신뢰성에 대해 검증하였고, 사이클로트론의 기하구조 및 Beam loss 지점을 PHITS 전산 코드를 통해 구현하여 가속된 양성자 빔에 의한 방사화 평가를 시행하였다. 최종적으로 각 부품들의 냉각시간에 따른 방사능량 및 감마선속 값의 감쇠에 대한 결과를 제시하였다.

2. 재료 및 방법

본 연구에서는 PHITS-DCHAIN을 활용하여, 사이클로트론의 방사화 현상으로 생성되는 부품별 방사성핵종 및 감마선속의 냉각 시간별 변화량에 대한 연구를 수행하였다. 이를 위한 연구 과정은 다음과 같다. 첫 번째, 사용하려는 PHITS 전산 코드의 신뢰성을 검증하기 위해 국제 기구에서 제시하는 측정 데이터와 PHITS 전산 모사 결과값을 비교하였다. 두 번째, ACCEL 사와 PSI에서 양성자치료기 사이클로트론의 기준 모델로 제시된 Superconducting Cyclotron (SC 사이클로트론)의 기하구조를 모사하여 방사화 평가 및 방사능 값을 도출하였다. 세 번째로, 방사화 평가를 진행한 후 생성된 방사성핵종의 방사능 및 감마선속의 냉각 시간별 감쇠에 대한 결과를 도출하였다.

2.1. PHITS 전산 모사에 따른 신뢰성 검증

본 연구에서는 고에너지 입자가속기의 전산 모사에 널리 활용되는 PHITS 전산 코드와 방사화 평가에 이용되는 DCHAIN Tally를 사용하여 방사화 평가를 수행하였다[11]. 전산 모사 코드의 신뢰성을 검증하는 것은 시뮬레이션 결과의 타당성을 확보하기 위한 필수적인 과정이며, 일반적으로 전산 모사 값과 실험 결과를 비교하는 방법이 활용된다. 이러한 검증을 통해 전산 코드의 예측 값이 실제 물리적 현상을 얼마나 정확하게 반영하는지 확인할 수 있으며, 결과의 신뢰성을 높일 수 있다[12]. 이에 따라 본 연구에서는 PHITS 전산 코드의 양성자 수송 시뮬레이션 결과의 신뢰성을 검증하기 위해 물에서의 양성자 비정을 평가하였다. 이를 위해 PHITS T-Deposit Tally를 이용하여, 양성자 치료기 사이클로트론의 가속 에너지로 널리 사용되는 226, 230, 250 MeV의 양성자를 100 cm 정육면체 형태의 물에 조사하는 전산 모사를 수행하였으며, 그 결과를 NIST (National Institute of Standards and Technology)에서 제공하는 양성자의 비정 실험 데이터와 비교 분석하였다[13].

2.2. 양성자치료기 사이클로트론 방사화 평가

양성자치료기 사이클로트론의 경우, 의료 시장에서의 여러 법적 요건 및 시설의 안전에 필요한 요건들을 만족해야 하며, 간단하며 효율적인 가동이 가능해야 한다. 이를 위해 ACCEL 사와 PSI 등 다양한 연구기관이 협업하여 양성자치료기 사이클로트론의 기준을 마련하고자 SC 사이클로트론 모델을 제시하였다[14]. 따라서 본 연구에서는 여러 연구기관 및 의료기관에서 양성자치료를 위해 사용하고 있는 SC 사이클로트론 모델을 기준

Table 1. Specifications of the Cyclotron Model Used for Geometry and Proton Beam Simulation

Parameter	Values	Basis for parameter
Manufacturer	ACCEL / PSI	Reference [13, 2001]
Product	PROSCAN	Reference [13, 2001]
Extraction Energy	250 MeV	Reference [14, 2007]
Beam intensity	800 nA	Reference [14, 2007]
Height of Cyclotron	160 cm	Reference [14, 2007]
Diameter of Cyclotron	320 cm	Reference [14, 2007]
Extraction efficiency	80%	Reference [14, 2007]

으로 기하구조를 구현하였다.

Table 1에 본 연구에서 모사한 사이클로트론의 일반 사양을 나타내었다. 해당 사이클로트론의 경우 250 MeV의 양성자를 가속시켜 Energy Selection System에서 필요한 에너지 영역대로 감소시켜 사용하는 양성자치료기이다. Fig. 1에 본 연구에서 모사한 사이클로트론의 모습을 나타내었다. 중앙 부위에는 이온샘(Ion source)이 위치해 있으며, 나선형 모양의 Dee와 Iron Hill이 중심부에 위치해 있다. Dee와 Iron Hill의 바깥쪽에는 Liquid Helium과 Superconducting coil이 Cryostat steel에 감싸져 있다. 제일 바깥쪽에는 약 50 cm 정도 두께의 Iron yoke가 사이클로트론을 감싸고 있다[15]. 최종적으로 정확한 입자 수송 계산을 위해 기하구조에 중복하여 정의된 Cell이 있는 지 PHIG-3D 및 icntl 8번을 이용하여 확인하였다.

사이클로트론으로 가속되는 양성자는 에너지가 높아질수록 상대론적 효과에 의해 회전 궤도 주파수와 불일치하게 되는 경우가 발생하며, 빔 추출 반경에 벗어나는 양성자 빔이 발생하게 되어 이로 인해 사이클로트론의 방사화를 유발하는 Beam loss 현상이 발생하게 된다. 본 연구에서는 Beam extraction 지점에 충돌한 양성자에 의해 사이클로트론 구성품들의 방사화가 어떤 식으로 진행되는 지 확인하기 위하여 사이클로트론 내부의 양성자 빔을 Beam extraction 부분과 충돌시켰다. Beam loss 지점에서 충돌한 양성자 빔이 사이클로트론 내 각 부품들에 방사화 현상을 발생시켜 생성되는 방사성핵종의 종류와 그 방사능량에 대한 전산 모사를 수행하였다. 또한 양성자 빔이 이동하는 경로는 실제 사이클로트론 환경과 같게 진공 상태로 가정하였고, 최종적으로 DCHAIN Tally를 이용하여 사이클로트론 내부 구성부품에서 생성되는 가장 지배적인 핵종 5가지를 확인하였다. 사이클로트론의 가동 기간은 기존 논문을 참고하여 3년으로 설정하였고, 빔 사용량의 경우 보수적인 평가를 위하여 최대 사용량을 가정하여 평가하였다[10]. 해당 전산 모사는 신뢰할 수 있는 결과를 얻기 위해 총 1억번의 계산을 시행하였다.

2.3. 냉각시간에 따른 방사능 및 감마선속 변화량 도출

본 연구에서는 사이클로트론의 주 구성품인 Dee, Cryostat, Liquid Helium 등의 양성자에 의한 방사화 현상으로 생성되는 방사성핵종의 시간에 따른 방사능량 및 발생하는 감마선속을 구하여 냉각 시간별 감쇠 되는 정도를 확인하였다. 생성된 방사능량 및 감마선속은 사이클로트론 가동 3년 이후부터 냉각 30분 이후 시점과 1시간 이후 시점부터 매 1시간마다 6시간 이후의 시간까지 산출하였으며, 평일 치료가 종료된 후 주말 동안 유지보수 작업이 진행된다고 가정하고, 빔 종료 직후부터 최대 예상 냉각 대기 시간인 2일이 경과할 때까지의 변화를 산출하였다. 또

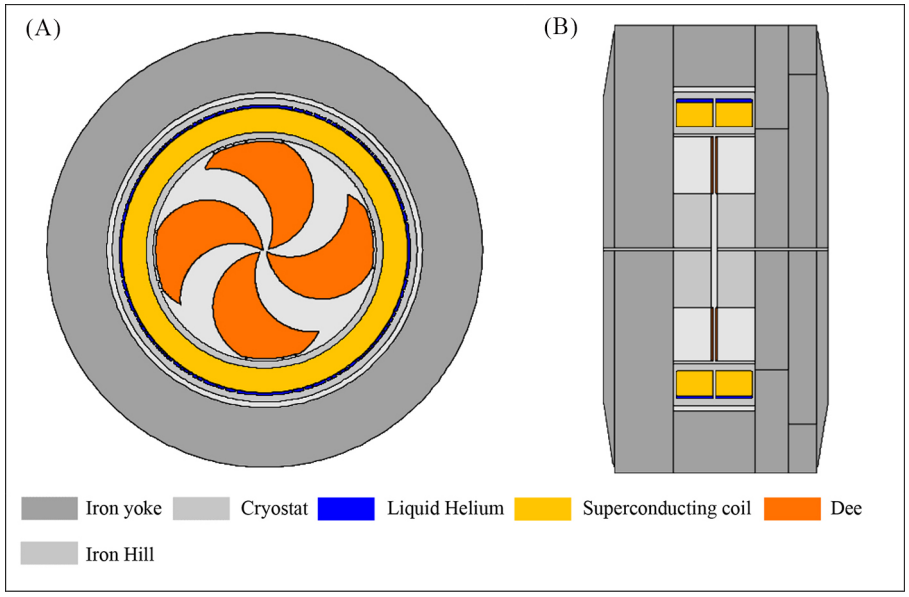

Fig. 1. Cyclotron Geometry using PHITS Code (A) x-y plane of Geometry (B) y-z plane of Geometry.

한, 각 냉각 시점별로 방사성핵종의 종류를 파악하기 위해 해당 시점에서 가장 지배적인 5가지 방사성핵종을 도출하였다.

3. 결 과

본 연구에서는 양성자치료기 사이클로트론의 방사화 현상으로 인해 생성되는 방사성핵종에 대한 평가를 수행하였다. 평가에 앞서 사용된 전산 코드의 계산 결과가 신뢰할 만한지 검증하였으며, 평가 대상 사이클로트론의 기하학적 구조를 모사한 후, PHITS-DCHAIN을 이용하여 방사화 평가를 진행하였다. 최종적으로, 빔 사용 종료 후 냉각 시간에 따른 방사성핵종의 방사능량 및 감마선속 변화에 대한 계산 결과를 제시하였다.

3.1. PHITS 전산 모사에 따른 신뢰성 검증

Table 2에 PHITS 전산 코드를 통해 평가된 양성자 빔 에너지별 물 속 비정과 NIST에서 제시하는 에너지별 물 속 비정 값을 비교하였다. PHITS 전산 코드의 결과값과 NIST에서 제공하는 값의 차이는 모두 1% 미만으로 매우 신뢰할 수 있는 결과인 걸 확인하였다. 이를 통해 PHITS 전산 코드에 대한 신뢰성을 확인하였다.

Table 2. Comparison of Proton water range values between PHITS and NIST

Proton energy (MeV)	Material	Range (cm)		Difference (%)
		PHITS	NIST	
226	Water	32.01	31.98	0.094
230	Water	32.85	32.95	0.303
250	Water	37.95	37.94	0.026

3.2. 양성자치료기 사이클로트론 방사화 평가

Fig. 2에 Dee와 Iron Hill 사이에서 양성자가 가속되는 진공공간을 둘러싸는 Beam extraction의 모습을 나타내었다. 해당 영역에서는 가속된 양성자의 Beam loss 현상이 발생한다. Fig. 3에 양성자가 Beam extraction에 충돌하여 중성자, 광자의 생성과 주변으로 퍼지는 정도를 시각적으로 나타내었다. 해당 상호작용의 결과, 상당한 양의 중성자와 광자가 발생하며, 중성자와 광자는 Iron yoke를 투과하여 사이클로트론 외부에서도 상당한 선속이 관찰된다. 이는 사이클로트론 전 영역에 걸쳐 방사화를 일으킬 수 있음을 시사한다.

Table 3에 방사화 현상으로 생성된 사이클로트론의 주요 구성품별 주요 방사성핵종 상위 5가지를 정리하였으며, 상위 5가지 핵종이 전체 방사성핵종의 대부분을 차지하는 것으로 나타났다. 그러나 나머지 핵종들도 일정한 기여도를 보이며, 이를 Table 4에 나타내었다. 방사화 평가에서는 보수적인 평가를 위해 총 3년간 양성자 빔이 최대 800 nA로 가동된 것으로 가정하였으며,

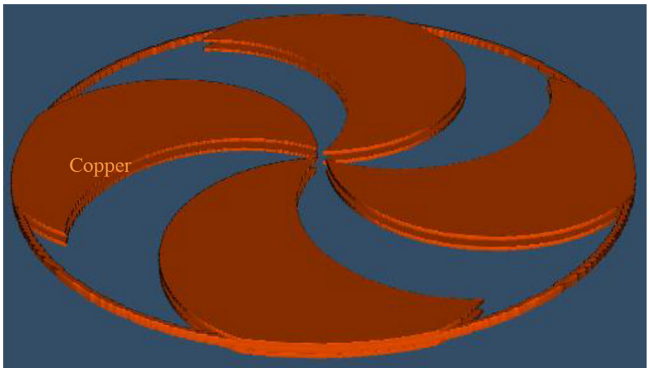

Fig. 2. Beam extraction in between Dee for estimating activation.

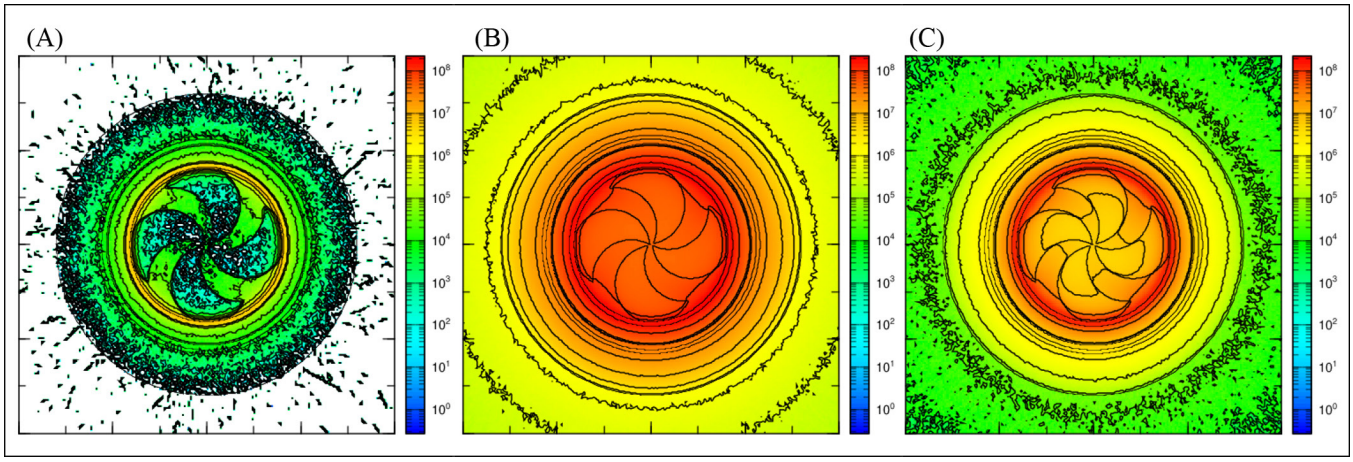

Fig. 3. Flux of radiation after beam loss. The unit of flux is radiation count per square centimeter (A) The Proton flux in Cyclotron Geometry, (B) The Neutron flux in Cyclotron Geometry, (C) The Photon flux in Cyclotron Geometry.

Table 3. Radionuclides produced from each cyclotron component based on simulation results immediately after beam termination. The top 5 radionuclides generated in each component are listed

Part	Main Radionuclides	Specific Activity (Bq/g)	Percentage of the total activity (%)	Half-life (s)	Rerr (%)
Beam extraction	Cu-62	7.46E+05	24.12	5.804E+02	0.10
	Cu-64	3.63E+05	11.76	4.572E+04	0.13
	Co-58	3.00E+05	9.72	6.122E+06	0.14
	Cu-61	2.66E+05	8.60	1.200E+04	0.17
	Co-57	2.52E+05	8.17	2.348E+07	0.17
Dee	Cu-64	4.25E+04	75.52	4.572E+04	0.22
	Cu-66	9.75E+03	17.30	3.072E+02	0.25
	Cu-62	2.72E+03	4.82	5.804E+02	0.92
	Cu-61	3.03E+02	0.54	1.200E+04	3.70
	Ni-65	1.60E+02	0.28	9.062E+03	3.57
Superconducting coil	Nb-94m	2.60E+04	43.87	3.758E+02	0.01
	Cu-64	2.02E+04	33.94	4.572E+04	0.03
	Cu-66	4.50E+03	7.58	3.072E+02	0.04
	Cu-62	2.29E+03	3.86	5.804E+02	0.12
	Sc-47	7.29E+02	1.23	2.894E+05	0.28
Liquid Helium	Be-8	2.94E+04	76.62	8.181E-17	0.16
	He-6	6.72E+03	17.55	8.067E-01	0.41
	Li-8	1.39E+03	3.63	8.399E-01	3.31
	H-3	6.44E+02	1.68	3.888E+08	2.11
	Li-9	1.79E+02	0.47	1.783E-01	11.44
Cryostat	Fe-55	1.01E+04	19.84	8.660E+07	0.04
	Mn-54	7.03E+03	13.75	2.696E+07	0.05
	Cr-51	5.21E+03	10.20	2.393E+06	0.10
	V-49	2.73E+03	5.35	2.850E+07	0.13
	Mn-52	2.56E+03	5.01	4.831E+05	0.10
Iron Hill	Cu-64	1.43E+03	18.29	4.572E+04	0.06
	Mo-99	1.22E+03	15.63	2.374E+05	0.05
	Fe-55	1.10E+03	14.11	8.660E+07	0.11
	Tc-99m	1.08E+03	13.83	2.165E+04	0.05
	Mn-54	4.68E+02	5.99	2.696E+07	0.25
Iron yoke	Fe-55	5.66E+02	63.92	8.660E+07	0.07
	Mn-54	1.38E+02	15.60	2.696E+07	0.31
	Mn-56	8.84E+01	9.99	9.284E+03	0.29
	Fe-59	5.53E+01	6.25	3.844E+06	0.05
	Cr-51	1.51E+01	1.71	2.393E+06	1.33

Beam loss 지점에 충돌한 양성자의 총 개수는 9.46E+19로 계산하였다[15].

3.3. 냉각시간에 따른 방사능 및 감마선속 변화량 도출

Table 5에 앞서 수행한 사이클로트론의 방사화 평가 결과를 바탕으로, 빔 종료 후 30분, 1시간부터 6시간까지 매 1시간 간격, 그리고 12, 24, 48시간 후 각 부품의 총 방사능량과 생성된 감마선속 변화를 나타내었다. 양성자와 직접 충돌하는 Beam extraction 부품이 가장 높은 방사능량과 감마선속을 생성하는 것으로 나타났으며, 중성자 등 2차 입자의 영향으로 방사화가 가

Table 4. Additional radionuclides with a fraction of 0.1% or higher, excluding those listed in Table 3

Part	Radionuclides (Fraction, %)	Total fraction (%)
Beam extraction	Mn-54(5.24%), Fe-55(3.95%), Cr-51(3.45%), Co-56(2.42%), Zn-62(2.03%), V-49(2.0%), Zn-63(1.74%), H-3(1.58%), Co-61(1.51%), Mn-52(1.46%), Cu-60(1.32%), Co-60(1.09%), Mn-56(1.02%), V-48(0.92%), Cu-66(0.56%), Zn-65(0.51%), Co-55(0.44%), Ni-57(0.44%), Sc-46(0.39%), Cr-49(0.36%), Fe-59(0.35%), Co-62(0.33%), V-52(0.32%), Sc-47(0.31%), Fe-53(0.31%), Mn-51(0.27%), Mn-57(0.24%), Sc-44(0.23%), Zn-61(0.22%), He-6(0.2%), V-47(0.18%), Li-8(0.17%), Ni-65(0.16%), Co-63(0.15%), Cu-59(0.15%), Cu-59(0.15%), Co-60m(0.14%), Sc-48(0.12%), Ti-45(0.12%), Be-7(0.11%)	36.51
Dee	Co-58(0.28%), Co-60m(0.25%), Co-60(0.22%), Co-61(0.2%), Co-57(0.12%), Ni-63(0.11%)	1.18
Superconducting coil	Nb-92m(1.18%), Sc-46(0.72%), Cu-61(0.64%), Nb-93m(0.63%), Co-58(0.51%), Y-89m(0.47%), Zr-89(0.46%), Y-88(0.4%), Sc-48(0.34%), Co-61(0.34%), Co-57(0.23%), Co-60(0.2%), Ni-65(0.19%), Y-87(0.19%), Zr-90m(0.19%), Nb-90(0.17%), Ca-45(0.15%), Sc-44(0.15%), Co-62(0.12%), Ti-45(0.1%), Co-60m(0.1%)	7.73
Cryostat	Co-57(4.55%), Co-56(3.96%), Mn-56(3.17%), Co-58(3.04%), V-48(2.85%), Fe-53(2.61%), Cu-64(2.1%), Co-55(1.8%), Ni-57(1.79%), Mo-99(1.78%), Tc-99m(1.58%), Cr-49(1.45%), Mn-51(1.19%), Sc-46(0.69%), Sc-44(0.68%), H-3(0.67%), V-47(0.65%), Mo-101(0.51%), Cu-62(0.5%), V-52(0.49%), Ti-45(0.43%), Sc-47(0.39%), Cu-66(0.36%), Mn-52m(0.31%), Ni-56(0.3%), Y-89m(0.28%), Zr-89(0.28%), Fe-52(0.26%), Y-88(0.26%), Nb-90(0.25%), Co-54(0.24%), Cr-48(0.23%), Mo-91(0.23%), Zr-88(0.22%), Zr-90m(0.22%), Nb-95(0.18%), Sc-43(0.17%), Cr-55(0.17%), Cu-61(0.16%), Y-87(0.15%), Sc-48(0.12%), Mn-50(0.12%), Nb-97(0.12%), Y-86(0.11%), Zr-87(0.11%), Nb-90m(0.11%), Nb-96(0.11%), Tc-95(0.11%), K-42(0.1%), Ca-45(0.1%), Fe-59(0.1%), Y-87m(0.1%), Mo-90(0.1%)	42.56
Iron Hill	Co-58(5.69%), Mo-101(4.73%), Tc-101(4.73%), Mn-56(3.96%), Cu-66(3.5%), Cr-51(3.33%), Co-57(1.74%), Fe-59(0.86%), Al-28(0.58%), V-52(0.27%), Ni-57(0.23%), V-49(0.2%), Mn-52(0.2%), Co-56(0.19%), Ni-65(0.18%), Fe-53(0.17%), Cu-62(0.17%), Cr-55(0.15%), Mg-27(0.1%)	30.98
Iron yoke	Mn-52(0.6%), Fe-53(0.49%), V-49(0.33%), Cr-55(0.28%), Mn-57(0.18%), V-52(0.17%)	2.05

장 많이 발생하는 부품은 Dee로 확인되었다.

Fig. 4에 방사화가 가장 크게 발생하는 Beam extraction과 Dee의 총 비방사능 감쇠 그래프를 나타내었다. Beam extraction의 경우 빔 사용 종료 직후의 초기 총 비방사능은 3.09E+06 Bq/g으로 나타났으며, 빔 종료 후 30분이 지난 시점에는 2.28E+06 Bq/g으로 1.36배 감쇠하여 시간 대비 가장 큰 감쇠 폭을 보였으며, 48시간 이후에는 초기 비방사능 대비 총 2.38배 감쇠하는 것으로 나타났다. Dee의 경우 빔 사용 종료 직후의 초기 총 비방사능은 5.63E+04 Bq/g으로 나타났으며, 빔 종료 후 30분이 지난 시점에는 4.30E+04 Bq/g으로 총 1.31배 감쇠하여 시간 대비 가장 큰 감쇠 폭을 보였으며, 48시간 이후에는 초기 비방사능 대비 총 15.7배 감쇠하는 것으로 나타났다.

4. 고 찰

본 연구에서는 PHITS 전산 코드를 이용해 양성자치료기 사이클로트론의 Beam loss 현상으로 인해 사이클로트론 부품들이 방사화가 됨을 보였다. 특히, 양성자 빔과 직접적인 충돌이 없는 Dee, Superconducting coil, Liquid Helium, Cryostat, Iron Hill, Iron yoke 에서도 상당한 양의 방사성핵종이 생성되는 걸 확인할 수 있다. 이상의 결과는 양성자치료 시설의 유지보수 등의 방사선작업을 위해 사이클로트론 내부의 방사화 평가의 필요성을 보여주는 결과이다.

양성자치료 사이클로트론에서 구리로 구성된 Beam extraction의 자체 전산 모사 코드를 이용한 방사화 평가 결과, 방사성핵종의 비율은 Cu-62가 24.12%, Cu-64가 11.76%, Co-58이 9.72%, Cu-61이 8.60%, Co-57이 8.17%로 나타났다. 반면, Dee에서는 Cu-64가 75.50%, Cu-66이 17.30%, Cu-62가 4.82%, Cu-61이 0.54%, Ni-65가 0.28%를 차지하였다. 같은 구리로 구성되었음에도 이러한 차이가 발생하는 이유는 Beam extraction의 경우 양성자와 직접 상호작용하여, 자연상태의 안정 동위원소인 Cu-63과 Cu-65가 각각 (p, 2n), (p, 3n) 반응을 통해 주로 Cu-62를 생성하는 것으로 예상된다. 반면, 양성자와 직접 상호작용하지 않는 Dee에서는 Cu-63이 (n, r) 반응을 통해 주로 Cu-64를 생성하는 것으로 판단된다. 또한, 양성자 충돌 지점과 유사한 거리에 있는 Dee와 Iron Hill을 비교할 때, 철로 구성된 Iron Hill보다 구리로 구성된 Dee에서 방사화 현상이 더 크게 나타났다. 이는 일반적으로 구리가 철보다 양성자 및 중성자에 대한 핵반응 단면적이 더 크기 때문으로 판단된다. 이러한 이론에 부합하는 계산 결과는 방사화 평가 전산 모사의 신뢰성과 효

Table 5. Simulated Time-Dependent changes in total specific Activity and Gamma flus after beam termination

Part	Cooling time (h)	Main radionuclides	Total specific Activity (Bq/g)	Gamma flux (/cm^3 s)
Beam extraction	0	Cu-62, Cu-64, Co-58, Cu-61, Co-57	3.09E+06	3.69E+07
	0.5	Cu-64, Co-58, Co-57, Cu-61, Mn-54	2.28E+06	2.33E+07
	1	Cu-64, Co-58, Co-57, Cu-61, Mn-54	2.12E+06	2.08E+07
	2	Cu-64, Co-58, Co-57, Cu-61, Mn-54	2.00E+06	1.91E+07
	3	Cu-64, Co-58, Co-57, Mn-54, Cu-61	1.92E+06	1.81E+07
	4	Co-58, Cu-64, Co-57, Mn-54, Fe-55	1.86E+06	1.74E+07
	5	Co-58, Cu-64, Co-57, Mn-54, Fe-55	1.80E+06	1.68E+07
	6	Co-58, Cu-64, Co-57, Mn-54, Fe-55	1.76E+06	1.63E+07
	12	Co-58, Co-57, Cu-64, Mn-54, Fe-55	1.58E+06	1.45E+07
	24	Co-58, Co-57, Mn-54, Fe-55, Cr-51	1.42E+06	1.32E+07
	48	Co-58, Co-57, Mn-54, Fe-55, Cr-51	1.30E+06	1.23E+07
Dee	0	Cu-64, Cu-66, Cu-62, Cu-61, Ni-65	5.63E+04	2.04E+05
	0.5	Cu-64, Cu-62, Cu-61, Cu-66, Co-58	4.30E+04	1.49E+05
	1	Cu-64, Cu-61, Co-58, Co-60, Ni-65	4.13E+04	1.40E+05
	2	Cu-64, Cu-61, Co-58, Co-60 Ni-65	3.90E+04	1.31E+05
	3	Cu-64, Cu-61, Co-58, Co-60, Ni-65	3.69E+04	1.24E+05
	4	Cu-64, Co-58, Cu-61, Co-60, Co-57	3.49E+04	1.17E+05
	5	Cu-64, Co-58, Co-60, Cu-61, Co-57	3.31E+04	1.11E+05
	6	Cu-64, Co-58, Co-60, Cu-61, Co-57	3.13E+04	1.05E+05
	12	Cu-64, Co-58, Co-60, Cu-61, Co-57	2.26E+04	7.63E+04
	24	Cu-64, Co-58, Co-60, Cu-61, Co-57	1.20E+04	4.19E+04
	48	Cu-64, Co-58, Co-60, Cu-61, Co-57	3.59E+03	1.50E+04
Superconducting coil	0	Nb-94m, Cu-64, Cu-66, Cu-62, Sc-47	7.47E+03	1.57E+05
	0.5	Cu-64, Nb-94m, Sc-47, Nb-92m, Sc-46	3.38E+03	1.16E+05
	1	Cu 64, Sc 47, Nb-92m, Sc-46, Nb-93m	3.14E+03	1.10E+05
	2	Cu 64, Sc 47, Nb-92m, Sc-46, Nb-93m	2.97E+03	1.04E+05
	3	Cu 64, Sc 47, Nb-92m, Sc-46, Nb-93m	2.83E+03	9.92E+04
	4	Cu 64, Sc 47, Nb-92m, Sc-46, Nb-93m	2.70E+03	9.51E+04
	5	Cu 64, Sc 47, Nb-92m, Sc-46, Nb-93m	2.58E+03	9.13E+04
	6	Cu 64, Sc 47, Nb-92m, Sc-46, Nb-93m	2.46E+03	8.80E+04
	12	Cu-64, Nb-92m, Sc-47, Sc-46, Nb-93m	1.91E+03	7.25E+04
	24	Cu-64, Nb-92m, Sc-47, Sc-46, Nb-93m	1.24E+03	5.44E+04
	48	Cu-64, Nb-92m, Sc-47, Sc-46, Nb-93m	6.85E+02	3.88E+04
Liquid Helium	0	Be-8, He-6, Li-8, H-3, Li-9	2.64E+05	1.85E+00
	0.5	H-3, Be-7, Y-86, Be-10, Ni-59	4.57E+03	1.30E+00
	1	H-3, Be-7, Y-86, Be-10, Ni-59	4.57E+03	1.27E+00
	2	H-3, Be-7, Y-86, Be-10, Ni-59	4.57E+03	1.22E+00
	3	H-3, Be-7, Y-86, Be-10, Ni-59	4.57E+03	1.18E+00
	4	H-3, Be-7, Y-86, Be-10, Ni-59	4.56E+03	1.13E+00
	5	H-3, Be-7, Y-86, Be-10, Ni-59	4.56E+03	1.09E+00
	6	H-3, Be-7, Y-86, Be-10, Ni-59	4.56E+03	1.05E+00
	12	H-3, Be-7, Y-86, Be-10, Ni-59	4.56E+03	8.53E-01
	24	H-3, Be-7, Y-86, Be-10, Ni-59	4.56E+03	5.86E-01
	48	H-3, Be-7, Y-86, Be-10, Ni-59	4.55E+03	3.47E-01

Table 5. Continued

Part	Cooling time (h)	Main radionuclides	Total specific Activity (Bq/g)	Gamma flux (/cm^3 s)
Cryostat	0	Fe-55, Mn-54, Cr-51, V-49, Mn-52	6.52E+03	4.60E+05
	0.5	Fe-55, Mn-54, Cr-51, V-49, Mn-52	5.98E+03	3.98E+05
	1	Fe-55, Mn-54, Cr-51, V-49, Mn-52	5.83E+03	3.81E+05
	2	Fe-55, Mn-54, Cr-51, V-49, Mn-52	5.68E+03	3.64E+05
	3	Fe-55, Mn-54, Cr-51, V-49, Mn-52	5.59E+03	3.55E+05
	4	Fe-55, Mn-54, Cr-51, V-49, Mn-52	5.52E+03	3.48E+05
	5	Fe-55, Mn-54, Cr-51, V-49, Mn-52	5.47E+03	3.42E+05
	6	Fe-55, Mn-54, Cr-51, V-49, Mn-52	5.43E+03	3.37E+05
	12	Fe-55, Mn-54, Cr-51, V-49, Mn-52	5.25E+03	3.19E+05
	24	Fe-55, Mn-54, Cr-51, V-49, Co-57	5.05E+03	2.98E+05
	48	Fe-55, Mn-54, Cr-51, V-49, Co-57	4.81E+03	2.73E+05
Iron Hill	0	Cu-64, Mo-99, Fe-55, Tc-99m, Mn-54	9.96E+02	4.18E+04
	0.5	Cu-64, Mo-99, Fe-55, Tc-99m, Mn-54	8.78E+02	3.49E+04
	1	Cu-64, Mo-99, Fe-55, Tc-99m, Mn-54	8.41E+02	3.24E+04
	2	Cu-64, Mo-99, Fe-55, Tc-99m, Mn-54	8.10E+02	3.07E+04
	3	Cu-64, Mo-99, Fe-55, Tc-99m, Mn-54	7.92E+02	2.99E+04
	4	Mo-99, Cu-64, Fe-55, Tc-99m, Mn-54	7.77E+02	2.93E+04
	5	Mo-99, Fe-55, Cu-64, Tc-99m, Mn-54	7.64E+02	2.88E+04
	6	Mo-99, Fe-55, Tc-99m, Cu-64, Mn-54	7.51E+02	2.83E+04
	12	Fe-55, Mo-99, Tc-99m, Cu-64, Mn-54	6.93E+02	2.63E+04
	24	Fe-55, Mo-99, Tc-99m, Mn-54, Co-58	6.14E+02	2.39E+04
	48	Fe-55, Mo-99, Tc-99m, Mn-54, Co-58	5.22E+02	2.08E+04
Iron yoke	0	Fe-55, Mn-54, Mn-56, Fe-59, Cr-51	1.13E+02	4.10E+03
	0.5	Fe-55, Mn-54, Mn-56, Fe-59, Cr-51	1.10E+02	3.88E+03
	1	Fe-55, Mn-54, Mn-56, Fe-59, Cr-51	1.09E+02	3.77E+03
	2	Fe-55, Mn-54, Fe-59, Mn-56, Cr-51	1.06E+02	3.59E+03
	3	Fe-55, Mn-54, Fe-59, Mn-56, Cr-51	1.05E+02	3.46E+03
	4	Fe-55, Mn-54, Fe-59, Mn-56, Cr-51	1.04E+02	3.36E+03
	5	Fe-55, Mn-54, Fe-59, Mn-56, Cr-51	1.03E+02	3.28E+03
	6	Fe-55, Mn-54, Fe-59, Mn-56, Cr-51	1.02E+02	3.22E+03
	12	Fe-55, Mn-54, Fe-59, Cr-51, Mn-52	1.00E+02	3.06E+03
	24	Fe-55, Mn-54, Fe-59, Cr-51, Mn-52	9.95E+01	3.01E+03
	48	Fe-55, Mn-54, Fe-59, Cr-51, Mn-52	9.92E+01	2.98E+03

용성을 뒷받침해준다.

기존 연구에서 SC 사이클로트론 내 Beam loss 현상으로 인한 방사화 평가가 진행되었다[10]. 해당 연구에서는 운행 중인 사이클로트론 내 특정 지점에 구리와 철을 배치하여 양성자와 충돌로 생성되는 방사성핵종을 Gamma ray spectra를 이용하여 측정하였다. 빔 종료 후 1시간 시점에서, 구리에서는 Cu-64, Cu-61, Co-58, Co-56, Zn-65 순으로 방사성핵종이 생성되었고, 철에서는 Mn-54, Mn-56, Mn-52, Cr-51, V-48 순으로 방사성핵종이 생성되었다, 구리의 경우, 빔 조사 직후 1시간 경과 시점에서 본 연구의 결과와 대부분 일치하는 결과를 보였다. 그러나 철의 방사화 현상에 있어, G. Steen 등의 연구에서는 Mn-54가 가장 많이 생성된 핵종으로 관찰된 반면, PHITS 전산 코드로 수행한 계산에서는 Fe-55가 주요 생성 핵종으로 평가되었다. 이는 Gamma ray spectra 측정 방식으로는 전자 포획을 통해 약 5~7 KeV의 X선을 방출하는 Fe-55를 검출하지 못했기 때문으로 판단된다.

구리로 구성되었거나 대부분 구리로 이루어진 사이클로트론

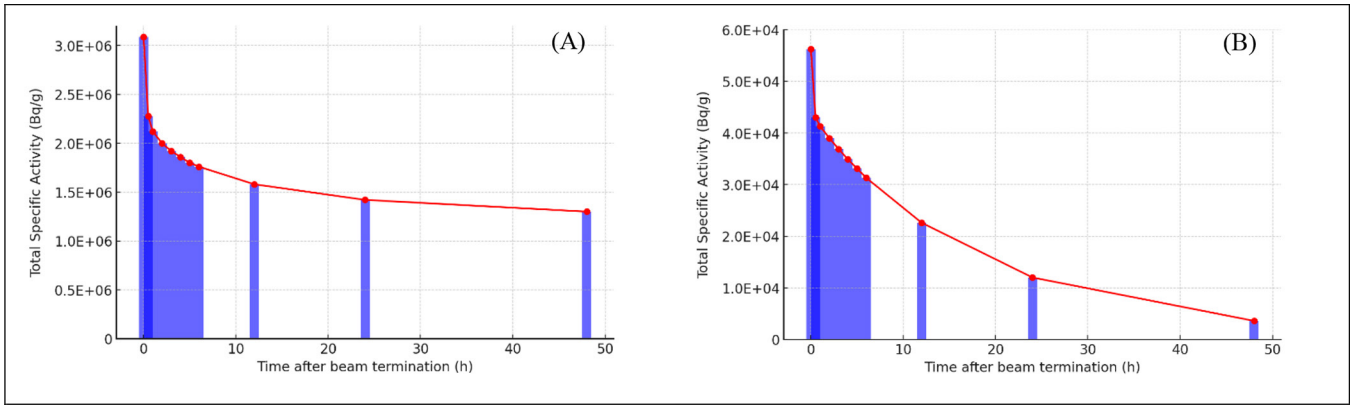

Fig. 4. Total Specific Activity Over Time (A) Beam extraction (B) Dee.

부품인 Beam extraction, Dee, Superconducting coil과, 대부분 철로 구성된 Cryostat, Iron Hill, Iron yoke에서 냉각 시간에 따른 방사능과 감마선속 변화량에 큰 차이가 있음을 확인하였다. Beam extraction의 경우 빔 사용 종료 직후와 48시간 후의 총 방사능이 2.37배, 감마선속이 3배 감소하였고, Dee는 각각 15.7, 13.6배, Superconducting coil은 각각 10.9, 4.05배 감소한 반면 Cryostat, Iron Hill, Iron yoke에서는 각각 2배 수준 이하의 감소량만 확인되었다. 이러한 차이는 구리의 경우 양성자 조사와 방사화로 인해 주로 생성되는 단반감기 핵종(Cu-62, Cu-64, Cu-66)이 빔 사용 종료 후 빠르게 감소하는 데 기인한 것으로 판단된다. 반면, 철은 비교적 주로 장반감기 핵종(Fe-55, Mn-55, Cr-51)이 생성되어 짧은 시간 내 감쇠가 크게 이루어지지 않기 때문으로 판단된다.

5. 결　　론

본 연구에서는 PHITS 전산 코드를 사용하여 ACCEL 사와 PSI가 협력하여 양성자치료 사이클로트론의 표준 모델로 제시한 SC 사이클로트론을 모델링하고, DCHAIN Tally를 활용하여 방사화 평가를 수행하였다. 이를 통해 각 부품에서 발생하는 방사성핵종과 감마선속의 냉각 시간에 따른 변화를 분석하였다.

사이클로트론 부품 중 방사화가 가장 크게 발생하는 부분은 양성자 빔과 직접 충돌하는 Beam extraction 부분으로 확인되었으며, 방사화 영향이 가장 적은 부분은 비교적 원자번호가 낮은 물질로 구성된 Liquid Helium 부품이었다. 또한, 구리로 구성된 Beam extraction, Dee, Superconducting coil에서는 주로 Cu-62, Cu-64, Cu-66 등의 단반감기 방사성핵종이 생성되었으며, Beam extraction에서는 48시간 후 방사능량과 감마선속이 각각 2.37, 3배 감소하였다. Dee의 경우 15.7, 13.6배, Superconducting coil의 경우 10.9, 4.05배 감소하는 것으로 확인되었다. 반면, 철로 구성된 Cryostat, Iron Hill, Iron yoke는 Fe-55, Mn-54, Cr-51과 같은 비교적 장반감기 방사성핵종이 주로 생성되어, 48시간 후에도 총 방사능량과 감마선속의 감소가 2배 수준 이하에 그쳤다.

Beam loss 현상으로 인한 사이클로트론의 방사화는 유지보수 작업이나 부품 교체 시 작업자의 피폭 위험을 증가시킬 수 있으며, 폐기 시 방사성 준위를 초과할 가능성이 있으므로 적절한 관리와 명확한 작업 지침이 필요하다. 본 연구에서는 양성자 치료기의 표준 모델로 제시된 SC 사이클로트론의 기하구조를 활용하여 전체 구조에 대한 방사화 평가를 PHITS-DCHAIN을 이용하여 수행하였다. 이를 통해 향후 양성자치료 사이클로트론의 유지보수 및 부품 폐기 시 참고 자료로 유용하게 활용될 수 있을 것이다.

향후 보다 합리적인 양성자치료기 사이클로트론의 방사화 평가를 위해서는 실제 의료 현장의 빔 사용량을 반영한 방사화 계산이 필요하며, 방사화 된 사이클로트론 부품으로 인한 유지보수 작업자의 방서샨량을 최소화하기 위한 추가 연구도 수행되어야 한다.

사　　사

본 연구는 한국에너지기술평가원에서 주관하는 에너지 기술개발사업의 일환으로 수행된 연구입니다(No. 2021171020001B).

참고문헌

1. Robert R. Wilson. 1946. Radiological Use of Fast Protons. *Radiology* **47**(5):487-491. https://doi.org/10.1148/47.5.487.
2. William F. Hartsell, Charles B. Simone, Deborah Godes, Jennifer Maggiore, Minesh P. Mehta, Steven J. Frank, James M. Metz, J. Isabelle Choi. 2024. Temporal Evolution and Diagnostic Diversification of Patients Receiving Proton Therapy in the United States: A Ten-Year Trend Analysis (2012 to 2021) From the National Association for Proton Therapy. *International Journal of Radiation Oncology Biology Physics* **119**(4):1069-1077. https://doi.org/10.1016/j.ijrobp.2023.12.041.

3. Radhe Mohan, David Grosshans. 2017. Proton therapy – Present and future. *Advanced Drug Delivery Reviews* **109**:26-44. https://doi.org/10.1016/j.addr.2016.11.006.
4. Dongryul oh. 2019. Proton therapy: the current status of the clinical evidences. *Precision and Future Medicine* **3**(3):91-102. https://doi.org/10.23838/pfm.2019.00058.
5. Jacobus Maarten Schippers. 2017. Cyclotrons for Particle Therapy. *CERN Yellow Reports: School Proceedings* **1**:165-175. https://doi.org/10.23730/CYRSP-2017-001.165.
6. Mukherjee, Bhaskar. 2012. Radiation safety issues relevant to proton therapy and radioisotope production medical cyclotrons. *Radiation Protection and Environment* **35**(3-4):126-134. https://doi.org/10.4103/0972-0464.117668.
7. NCRP. 2003. Radiation Protection for Particle Accelerator Facilities. NCRP Publication 144.
8. Ryohei Kato, Takahiro Kato and Masao Murakami. 2024. Radioactivation effects of titanium caused by clinical proton beam: a simulation study. *Biomedical Physics & Engineering Express* **10**(2):025001. https://doi.org/10.1088/2057-1976/ad17fa.
9. E. Ramoisiaux, C. Hernalsteens, R. Tesse, E. Gnacadja, N. Pauly and F. Stichelbaut. 2023. Hybrid monitoring and measurement of concrete shielding activation at the ProtherWal proton therapy centre. *EPJ Techniques and Instrumentation* **10**(1):9. https://doi.org/10.1140/epjti/s40485-023-00095-4.
10. G. Steen, B. Amrein, N. Frey, P. Frey, D. Kiselev, M. Kostezer, R. Lüscher, D. Mohr, O. Morath, A. Schmidt, M. Wohlmuther, J.M. Schippers. 2010. ACTIVATION OF A 250 MEV SC-CYCLOTRON FOR PROTON THERAPY. Proceedings of the 19th International Conference on Cyclotrons and their Applications 2010:72-74.
11. Hunter N. Ratliff, Norihiro Matsuda, Shin-ichiro Abe, Takamitsu Miura, Takuya Furuta, Yosuke Iwamoto, Tatsuhiko Sato. 2020. Modernization of the DCHAIN-PHITS activation code with new features and updated data libraries. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms* **484**:29-41. https://doi.org/10.1016/j.nimb.2020.10.005.
12. Aafke Christine Kraan. 2015. Range verification methods in particle therapy: underlying physics and Monte Carlo modeling. *Frontiers in Oncology* **5**:150. https://doi.org/10.3389/fonc.2015.00150.
13. M.J. Berger, J.S. Coursey, M.A. Zucker and J. Chang. 2017. Stopping-Power & Range Tables for Electrons, Protons, and Helium Ions. NIST Standard Reference Database 124. National Institute of Standards and Technology. Gaithersburg, MD. https://dx.doi.org/10.18434/T4NC7P.
14. M. Schillo, A. Geister, A. Hobl, H. U. Klein, D. Krischel, M. Meyer-Reumers, C. Piel, H. Blosser, J-W. Kim, F. Marti, J. Vincent, S. Brandenburg, J. P. M. Beijers. 2001. Compact superconducting 250 MeV proton cyclotron for the PSI PROSCAN proton therapy project. *Proceedings of the 16th International Conference on Cyclotrons and their Applications* **600**(1):37-39.
15. H.-U. Klein, A. Geisler, A. Hobl, D. Krischel, H. Rocken, J.H. Timmer. 2007. Design, Manufacturing and Commissioning of Compact Superconducting 250 MeV Cyclotrons for Proton Therapy: A Short Report from the Field. IEEE/CSC & ESAS EUROPEAN SUPERCONDUCTIVITY NEWS FORUM **2**:1-6.