Journal of RADIATION INDUSTRY
Vol. 19, No. 4, pp. 485-492, 2025
https://doi.org/10.23042/radin.2025.19.4.485

Original article

의료용 사이클로트론 방사화폐기물 내 방사능 장기운전 포화 특성 및 감쇠 평가

정영선[1] · 이신동[1] · 유승범[1] · 김광표[1,*]

[1]경희대학교 원자력공학과

Saturation Behavior and Decay of Radioactivity in Medical Cyclotron Activation Waste during Prolonged Operation

Young sun Jeong[1], Shin Dong Lee[1], Seung Beom Yoo[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 use of cyclotrons in medical institutions worldwide has continued to increase, and this trend has become more pronounced with the expanded deployment of proton therapy systems in radiation oncology. Due to inherent operational characteristics, cyclotrons inevitably experience beam losses during acceleration and extraction, which generate secondary radiation fields and induce activation of internal components. As a result, cyclotron components may be classified as radioactive waste during facility decommissioning, making a quantitative assessment of radionuclides within components essential. The purpose of this study is to systematically evaluate the types and inventories of radionuclides accumulated in a cyclotron under long-term operating conditions and to provide baseline data applicable to future waste management and disposal planning. To this end, the geometry of a 250 MeV superconducting cyclotron was modeled using the PHITS code. The PHITS results were coupled with the DCHAIN code to assess the dependence of activation on beam current and to establish the relationship between beam current, radionuclide production, and total activity. Beam currents of 800 nA and 30.8 nA were considered to examine current dependence. Subsequently, under long-term operation up to 20 years, the radionuclide composition and inventories accumulated in major internal components were estimated at selected operating times, and the activity decay behavior as a function of cooling time after beam shutdown was analyzed. The results showed that changing the beam current did not alter the types of radionuclides produced in the components, whereas the total activity increased linearly with beam current. Under long-term operation, short-lived radionuclides produced in Cu-based components, such as Cu-62, Cu-64, and Cu-66, reached saturation within 10 days of operation. In contrast, relatively long-lived radionuclides, including Mn-54, Fe-55, and Co-60, accumulated gradually as the operating period increased, and Mn-54 and Co-60 were identified as the dominant radionuclides for disposal considerations. In addition, assuming a 10-year cooling period after 20 years of operation, Co-60 remained above the self-disposal screening criterion in all components except the Iron Yoke. These findings are expected to serve as reference data for decommissioning and component disposal planning for proton therapy cyclotron facilities.

Key words: Activation, Radioactive Waste, Proton Therapy, Cyclotron, PHITS-DCHAIN

1. 서 론

의료 시설에서의 사이클로트론 사용은 치료·진단용 선원 생산과 방사선치료를 목적으로 설치가 증가하는 추세이다. 특히 양성자치료는 1946년 Robert Wilson에 의해 처음 제안된 이후 수요가 꾸준히 확대되었고, 이에 따라 양성자치료를 받는 환자도 계속해서 증가하고 있다[1-2]. 양성자치료기 중 사이클로트론 방식은 2011년 이후 급격히 보급되어 현재 임상에서 다수의 환자 치료에 활용되고 있다. 사이클로트론은 연속빔 운전으로 높은 빔 전류를 제공하고 주파수 제어가 용이하다는 장점으로 인해, 임상용 양성

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 21 November 2025 Revised 17 December 2025 Accepted 18 December 2025

Table 1. General Specifications of the ACCEL-PSI SC cyclotron

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

자 가속 방식의 주류를 형성하고 있다[3-4]. 다만, 사이클로트론은 기술적 특성상 가속·추출 과정에서 내부 빔 손실이 불가피하며, 이로 인해 주변 구성재의 방사화가 발생한다. 방사화된 부품은 시설 해체나 교체 시 방사성폐기물로 분류되어 별도 관리가 필요하므로, 장기 가동에 따른 방사화 평가는 필수적이다[5-6].

국내외에서는 고에너지 사이클로트론의 방사성폐기물 문제를 다룬 연구가 수행되어 왔다. 미국 국립방사선방호위원회(NCRP, National Council on Radiation Protection and Measurements)는 가속기 시설 방호 지침에서 알루미늄, 철, 구리 등 사이클로트론의 금속 구성재의 방사화 특성과 관리 필요성을 제시하며, 고에너지 가속 시설의 방사화 평가를 강조하였다[7]. 또한 사이클로트론 가동에 따른 방사화 분석 연구가 보고되었고[8-9], 양성자치료 시설의 방사화 평가에 관한 다양한 연구도 수행되었다[10-11]. 아울러 양성자치료기 사이클로트론의 빔 손실로 인해 장기 가동 시 생성될 수 있는 핵종을 MCNP(Monte Carlo N-Particle) 코드로 평가한 연구도 수행된 바 있다[12].

한편, 양성자치료용 사이클로트론이 보편화되면서 가동부터 해체까지 전 주기에 걸친 방사성폐기물 관리의 중요성이 커지고 있으나, 실제 임상 장비의 부품별 방사화 특성인 핵종 정보, 축적량, 시간 의존성에 대한 공개 정보는 여전히 제한적이다. 사이클로트론은 구조적 이유로 내부 빔 손실이 빔 추출부 등 국부 영역에서 집중적으로 발생하고, 여기서 발생한 2차 중성자장이 사이클로트론 내부 금속 부품을 방사화 시킨다. 이들 재질은 장반감기 핵종이 축적되기 쉬워, 해체·폐기 단계의 분류·처리·운반에 직접적인 영향을 미친다. 따라서 부품 해체 및 폐기 시에는 방사화로 생성되는 핵종의 종류와 양에 대한 정량 분석이 선행되어야 한다.

본 연구의 목적은 의료용 사이클로트론의 장기운전에 따른 방사화폐기물의 방사능 포화 특성과 감쇠 거동을 평가하고, 시설 폐기 및 부품 교체 시 활용 가능한 부품별 방사성핵종 기초자료를 마련하는 것이다. 이를 위해 PHITS-DCHAIN 연계 계산으로 임상 사이클로트론의 빔 손실 상황을 모사하고, 구성 부품별 생성 핵종을 평가하였다. 아울러 가동 전류 변화에 따른 핵종 생성량과, 가동 기간에 따른 방사능 변화를 산정하였으며, 최종적으로 장기 가동 종료 후 냉각 시간에 따른 방사능 감쇠 경향을 제시하였다.

Table 2. Configured Beam Current and Number of Incident Protons

Beam Current	Number of Incident Protons
800 nA	9.9864×10^{11} protons/sec
30.8 nA	3.8448×10^{10} protons/sec

2. 재료 및 방법

본 연구에서는 의료용 양성자치료기 중 사이클로트론 방식을 이용하는 시설의 부품별 생성 핵종과 비방사능을 산정하고, 빔 전류와 가동 기간에 따른 변화를 평가하였다. 또한 장기 가동 후 냉각 시간에 따른 감쇠 거동을 정량적으로 분석하였다. 이를 위해 PHITS 전산코드 version 3.341과 DCHAIN 코드를 활용하였으며, 연구 과정은 다음과 같다. 첫 번째로, 가동 전류에 따라 생성되는 핵종의 종류와 비방사능의 양에 대한 비교를 진행하였다. 두 번째로 20년간 장기 가동되는 동안 사이클로트론 각 부품에서 생성되는 핵종과 비방사능 값에 대한 평가를 도출하였다. 세 번째로, 장기 가동 이후, 10년간 냉각시켰을 때 방사화폐기물의 감쇠 경향에 대한 결과를 제시하였다.

2.1. 빔 전류 의존성 평가

Table 1에는 본 연구에서 모사한 사이클로트론의 일반 사양을 제시하였다. 본 연구에서는 ACCEL-PSI의 초전도(SC) 사이클로트론을 대표 모델로 선정하여 분석을 수행하였으며, 해당 계열 장비는 PSI 및 RPTC 등에서 도입 및 운용 사례가 보고되어 있다[13-15]. 다만, 의료용 사이클로트론의 빔 사용량은 시설별로 상이하며, 이에 따라 각 시설의 사이클로트론의 방사화 규모 및 핵종의 조성도 달라질 수 있다. 이러한 전류 의존성을 분리 및 정량화하기 위해, 장비 사양에 명시된 최대 운전조건인 800 nA와 선행 임상 보고에서 제시된 임상 운용 수준인 30.8 nA를 대비 조건으로 설정하였다[12].

Table 2에는 본 연구에서 적용한 빔 전류 조건과, 빔 손실을 반영하여 산출한 충돌 양성자 수를 제시하였다. 전산 모사는 두 전류 조건 간에 기하 및 재질과 빔 에너지, 손실 위치 및 운전시간 등 변수를 모두 동일하게 유지하였다. SC 사이클로트론의 최대

빔 추출 효율이 80%인 점을 근거로 하여, 빔 추출부에서 총 양성자 빔의 20%가 손실되는 시나리오를 적용하였으며, 전류만을 단일 매개변수로 변화시켜 생기는 차이를 확인하였다. 이후 부품별 핵종 종류와 비방사능을 기준으로 비교를 수행하였다.

2.2. 방사능 포화 특성 평가

국제원자력기구(IAEA)가 사이클로트론의 평균 운전 수명을 약 20년으로 제시하고 있음을 고려하여[16], 본 연구는 의료용 양성자치료 시설 중 사이클로트론 방식을 대상으로 치료 목적의 가동 전류인 30.8 nA로 20년간 장기 가동될 때 나타나는 부품별 방사능 포화 특성을 평가하였다. 일반적으로 장기 운전 시에는 방사화로 생성된 핵종이 생성과 붕괴를 동시에 겪게 되므로, 가동 기간이 증가하더라도 방사능이 단순 누적 형태로 증가하지 않고, 각 핵종의 반감기와 생성률의 균형에 의해 결정되는 포화 현상을 보이게 된다. 이러한 포화 특성에 대한 체계적 이해는 향후 해체, 폐기 단계에서의 규제 평가와 실행 계획 수립에 있어 핵심 근거 자료로 기능한다.

이와 같은 배경 하에 본 연구는 사이클로트론의 주요 구성 부품인 빔 추출부, Dee 전극, 초전도 코일, Cryostat, Iron Hill, Iron Yoke를 분석 대상으로 선정하였다. 각 부품에 대하여 장기 가동 동안의 총 비방사능의 변화와 폐기 판단의 핵심 핵종인 Co-60의 축적량 변화를 산정하였으며, 시간 축은 1, 2, 5, 10일, 1, 2, 5, 10, 15, 20년을 평가 시점으로 구성하여 초기-중기-후기 운전 단계를 포괄하도록 설정하였다.

2.3. 냉각 시간에 따른 방사능 감쇠 평가

본 연구에서는 20년 가동 후 운전을 종료한 사이클로트론의 주요 구성 부품에 축적된 방사성핵종의 냉각 과정을 정량화하고, 냉각 시점별로 폐기 및 자체처분 판단에 유용한 기초자료를 제공하였다. 이를 위해 최대 10년의 냉각 구간을 설정하고, 빔 종료 직후부터 장기 냉각에 이르기까지의 비방사능 감쇠 거동을 평가하였다. 냉각 평가는 빔 종료 후 1, 2, 3, 5, 10, 50, 100, 200일, 1, 2, 3, 5, 10년의 총 13개 시점에서 수행하였다. 이러한 시점들은 초기 급감 구간과 중·장기 냉각 과정을 분리 관찰하기 위한 것으로, 비방사능과 자체처분 판단의 핵심 핵종인 Co-60, Mn-54의 변화를 연속적으로 추적할 수 있다.

3. 결 과

본 연구에서는 양성자치료기 사이클로트론의 장기 가동에 따른 방사화 현상을 대상으로, 1) 주요 부품에 축적되는 방사성핵종 조성, 2) 장기 운전에 따른 방사능 포화 특성, 3) 운전 종료 후 냉각에 따른 방사능 감쇠 경향을 정량적으로 분석하였다. 먼저, 가동 전류 조건이 다른 현장에서도 적용 가능하도록 방사화의 빔 전류 의존성(dependence)을 평가하여 전류와 생성 핵종 및 방사능 간의 관계를 확인하였다. 이어 장기 가동 조건에서 각 시점별로 부품별 총 비방사능량을 산출하고, 냉각 시간에 따른 감쇠 곡선을 도출하였다. 최종적으로, 부품별 방사화폐기물에 대해 자체 처분 가능성을 검토하여, 폐기 및 해체 단계의 판정 근거를 제시하였다.

3.1. 빔 전류 의존성 평가

Table 3에 PHITS-DCHAIN 연계 계산을 활용하여 사이클로트론을 3년간 가동했다고 가정했을 때, 각 부품에서 생성된 상위 10개 핵종을 나타내었다. 계산 결과, 800 nA와 30.8 nA 조건 간에 부품별 생성 핵종의 종류와 상대 조성은 본질적으로 동일했으며, Dee 전극의 저분율 핵종인 Co-61과 Co-57을 제외하면 모든 항목의 통계적 오차는 5% 미만이었다. 또한, Table 4에 부품별 총 비방사능을 나타내었다. 두 전류 조건을 비교하면, 빔 추출부와 초전도 코일에서는 약 26.2배, Dee 전극, Cryostat, Iron Hill, Iron Yoke에서는 약 26.1배 차이를 보였으며, 빔 전류 증가에 따라 비방사능이 거의 선형적으로 비례함을 확인하였다.

3.2. 방사능 포화 특성 평가

Fig. 1에 사이클로트론 주요 부품의 가동 1일부터 20년까지 시간에 따른 비방사능을 나타내었다. 빔 추출부의 경우 비방사능이 전 기간에 걸쳐 지속적으로 증가하였으며, 특히 가동 3년 시점의 총 비방사능이 가동 20년 시점 대비 약 90%에 근접하였다. Dee 전극에서는 Cu-61, Cu-62, Cu-64, Cu-66과 같은 단반감기 핵종이 가동 초기에 이미 포화에 도달하여, 이후 20년 시점까지 총 비방사능의 추가 증가는 제한적이었다. 초전도 코일 역시 단반감기 핵종의 기여가 지배적이어서, 가동 5일 시점에 이미 20년 시점 총 비방사능의 약 90%에 도달하였다. Cryostat과 Iron Hill은 Mn-54, Fe-55 등 장반감기 핵종이 지속적으로 축적되면서, 가동 5년 시점에 20년 시점 총 비방사능의 약 90% 수준에 이르렀다. 반면 Iron Yoke는 Fe-55 핵종의 기여가 지배적이어서, 장기간에 걸쳐 완만한 증가가 관찰되었다.

Table 5에 폐기 판단에서 핵심 지표가 되는 Co-60의 시점별 비방사능을 나타내었다. 반감기 5.27년의 Co-60은 장기적으로 비방사능이 축적되는 특성으로 인해 가동 기간이 늘어날수록 비방사능이 포화 경향 없이 증가하는 양상을 보였다. Iron Yoke를 제외한 모든 부품에서 가동 1년 시점에 Co-60의 비방사능이 자체처분 판단 기준인 0.1 Bq/g을 초과하는 것으로 나타났다. Iron Yoke의 경우에는 Co-60보다 Mn-54의 축적이 상대적으로 우세하여, 시점별로 Mn-54의 비방사능이 Co-60 대비 약 1.82×10^{9}배에서 2.06×10^{16}배까지 높게 평가되었다. 또한 가동 10일 시점의 Mn-54의 비방사능은 0.127 Bq/g으로 산출되어, 국내 Mn-54 자체처분 판단 기준인 0.1 Bq/g을 상회하는 결과를 보였다. 모든 계산에서 통계 오차는 5% 미만으로 확인되었다.

Table 3. Top 10 radionuclides by cyclotron component at beam termination

part	Main Radionuclides (fraction, %)	Specific Activity at 30.8 nA (Bq/g)	Specific Activity at 800 nA (Bq/g)	Main Radionuclides (fraction, %)	Specific Activity at 30.8 nA (Bq/g)	Specific Activity at 800 nA (Bq/g)
Beam extraction	Cu-62(24.12)	2.86×10^{4}	7.46×10^{5}	Mn-54(5.24)	6.20×10^{3}	1.62×10^{5}
	Cu-64(11.76)	1.39×10^{4}	3.63×10^{5}	Fe-55(3.95)	4.67×10^{3}	1.22×10^{5}
	Co-58(9.72)	1.15×10^{4}	3.00×10^{5}	Cr-51(3.45)	4.08×10^{3}	1.07×10^{5}
	Cu-61(8.60)	1.02×10^{4}	2.66×10^{5}	Co-56(2.42)	2.87×10^{3}	7.48×10^{4}
	Co-57(8.17)	9.67×10^{3}	2.52×10^{5}	Zn-62(2.03)	2.40×10^{3}	6.27×10^{4}
Dee	Cu-64(75.52)	1.63×10^{3}	4.25×10^{4}	Co-58(0.28)	6.05	1.58×10^{2}
	Cu-66(17.30)	3.73×10^{2}	9.75×10^{3}	Co-60m(0.25)	5.29	1.38×10^{2}
	Cu-62(4.82)	1.04×10^{2}	2.72×10^{3}	Co-60(0.22)	4.81	1.26×10^{2}
	Cu-61(0.54)	1.16×10^{1}	3.03×10^{2}	Co-61(0.20)	4.23	1.10×10^{2}
	Ni-65(0.28)	6.11	1.60×10^{2}	Co-57(0.12)	2.57	6.70×10^{1}
Superconducting coil	Nb-94m(43.87)	9.98×10^{2}	2.60×10^{4}	Nb-92m(1.18)	2.69×10^{1}	7.03×10^{2}
	Cu-64(33.94)	7.72×10^{2}	2.02×10^{4}	Sc-46(0.72)	1.65×10^{1}	4.30×10^{2}
	Cu-66(7.58)	1.72×10^{2}	4.50×10^{3}	Cu-64(0.64)	1.46×10^{1}	3.81×10^{2}
	Cu-62(3.86)	8.78×10^{1}	2.29×10^{3}	Nb-93m(0.63)	1.44×10^{1}	3.76×10^{2}
	Sc-47(1.23)	2.79×10^{1}	7.29×10^{2}	Co-58(0.51)	1.15×10^{1}	3.01×10^{2}
Cryostat	Fe-55(19.84)	3.88×10^{2}	1.01×10^{4}	Co-57(4.55)	8.90×10^{1}	2.32×10^{3}
	Mn-54(13.75)	2.69×10^{2}	7.03×10^{3}	Co-56(3.96)	7.75×10^{1}	2.02×10^{3}
	Cr-51(10.20)	2.00×10^{2}	5.21×10^{3}	Mn-56(3.17)	6.21×10^{1}	1.62×10^{3}
	V-49(5.35)	1.05×10^{2}	2.73×10^{3}	Co-58(3.04)	5.95×10^{1}	1.55×10^{3}
	Mn-52(5.01)	9.80×10^{1}	2.56×10^{3}	V-48(2.85)	5.58×10^{1}	1.46×10^{3}
Iron Hill	Cu-64(18.29)	5.47×10^{1}	1.43×10^{3}	Co-58(5.69)	1.70×10^{1}	4.45×10^{2}
	Mo-99(15.63)	4.68×10^{1}	1.22×10^{3}	Tc-101(4.73)	1.41×10^{1}	3.69×10^{2}
	Fe-55(14.11)	4.22×10^{1}	1.10×10^{3}	Mo-101(4.73)	1.41×10^{1}	3.69×10^{2}
	Tc-99m(13.83)	4.14×10^{1}	1.08×10^{3}	Mn-56(3.96)	1.19×10^{1}	3.09×10^{2}
	Mn-54(5.99)	1.79×10^{1}	4.68×10^{2}	Cu-66(3.50)	1.05×10^{1}	2.74×10^{2}
Iron yoke	Fe-55(63.92)	2.17×10^{1}	5.66×10^{2}	Mn-52(0.60)	2.02×10^{-1}	5.27
	Mn-54(15.60)	5.29	1.38×10^{2}	Fe-53(0.49)	1.65×10^{-1}	4.30
	Mn-56(9.99)	3.39	8.84×10^{1}	V-49(0.33)	1.11×10^{-1}	2.90
	Fe-59(6.25)	2.12	5.53×10^{1}	Cr-55(0.28)	9.66×10^{-2}	2.52
	Cr-51(1.71)	5.79×10^{-1}	1.51×10^{1}	Mn-57(0.18)	5.99×10^{-2}	1.56

Table 4. Comparison of Total Specific Activity by Operating Beam Current

Component	Total Specific Activity (Bq/g)*	
	800 nA	30.8 nA
Beam extraction	$3.09\times10^{6}\pm1.45\times10^{3}$	$1.18\times10^{5}\pm5.68\times10^{1}$
Dee	$5.63\times10^{4}\pm1.04\times10^{2}$	$2.16\times10^{3}\pm3.91\times10^{0}$
Superconducting coil	$5.94\times10^{4}\pm8.12\times10^{1}$	$2.27\times10^{3}\pm3.91\times10^{-1}$
Cryostat	$5.11\times10^{4}\pm1.01\times10^{2}$	$1.96\times10^{3}\pm5.01\times10^{-1}$
Iron Hill	$7.81\times10^{3}\pm2.87\times10^{0}$	$2.99\times10^{2}\pm1.08\times10^{-1}$
Iron yoke	$8.85\times10^{2}\pm7.40\times10^{-1}$	$3.39\times10^{1}\pm2.89\times10^{-2}$

*Errors denote Relative Error

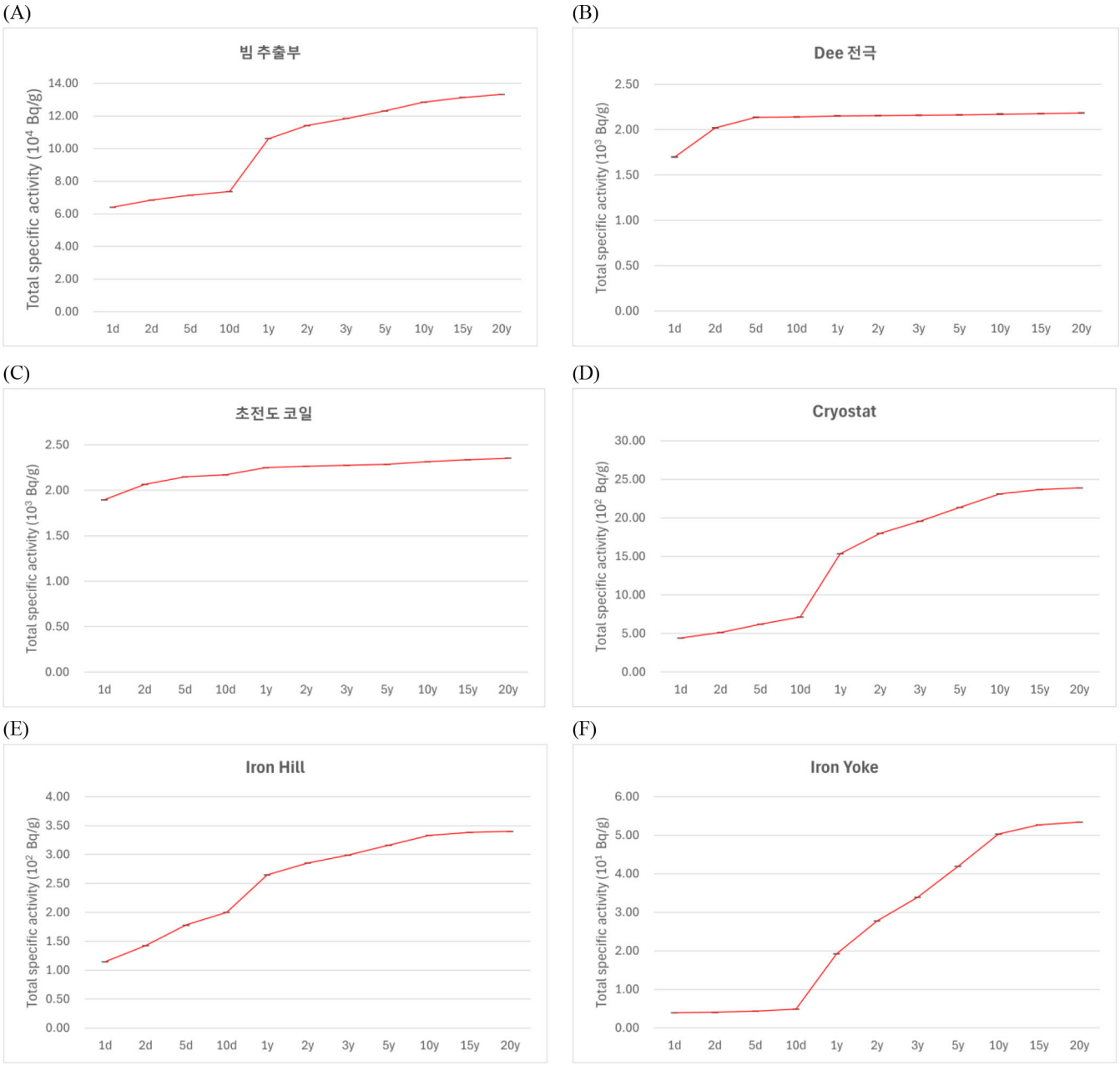

Fig. 1. Temporal Evolution of Specific Activity in the Cyclotron main components during Long-Term Cyclotron Operation. (A) Beam extraction, (B) Dee, (C) Superconducting Coil, (D) Cryostat, (E) Iron Hill, (F) Iron Yoke

Table 5. Co-60 Specific Activity by Operating Time

Components	Co-60 Specific Activity by Operating Time (Bq/g)									
	1 d	2 d	5 d	10 d	1 y	2 y	5 y	10 y	15 y	20 y
Beam extraction	1.42×10^{0}	2.85×10^{0}	7.12×10^{0}	1.42×10^{1}	4.88×10^{2}	9.16×10^{2}	1.91×10^{3}	2.90×10^{3}	3.41×10^{3}	3.67×10^{3}
Dee	5.29×10^{-3}	1.06×10^{-2}	2.65×10^{-2}	5.30×10^{-2}	1.82×10^{0}	3.41×10^{0}	7.11×10^{0}	1.08×10^{1}	1.27×10^{1}	1.37×10^{1}
Superconducting Coil	5.09×10^{-3}	1.02×10^{-2}	2.55×10^{-2}	5.09×10^{-2}	1.75×10^{0}	3.28×10^{0}	6.83×10^{0}	1.04×10^{1}	1.22×10^{1}	1.32×10^{1}
Cryostat	1.62×10^{-3}	3.24×10^{-3}	8.09×10^{-3}	1.62×10^{-2}	5.54×10^{-1}	1.04×10^{0}	2.17×10^{0}	3.29×10^{0}	3.87×10^{0}	4.17×10^{0}
Iron Hill	2.32×10^{-4}	4.64×10^{-4}	1.16×10^{-3}	2.32×10^{-3}	7.95×10^{-2}	1.49×10^{-1}	3.11×10^{-1}	4.72×10^{-1}	5.55×10^{-1}	5.98×10^{-1}
Iron Yoke	6.23×10^{-19}	5.01×10^{-18}	7.77×10^{-17}	6.11×10^{-16}	1.12×10^{-11}	5.07×10^{-11}	3.12×10^{-10}	1.07×10^{-9}	2.06×10^{-9}	3.18×10^{-9}

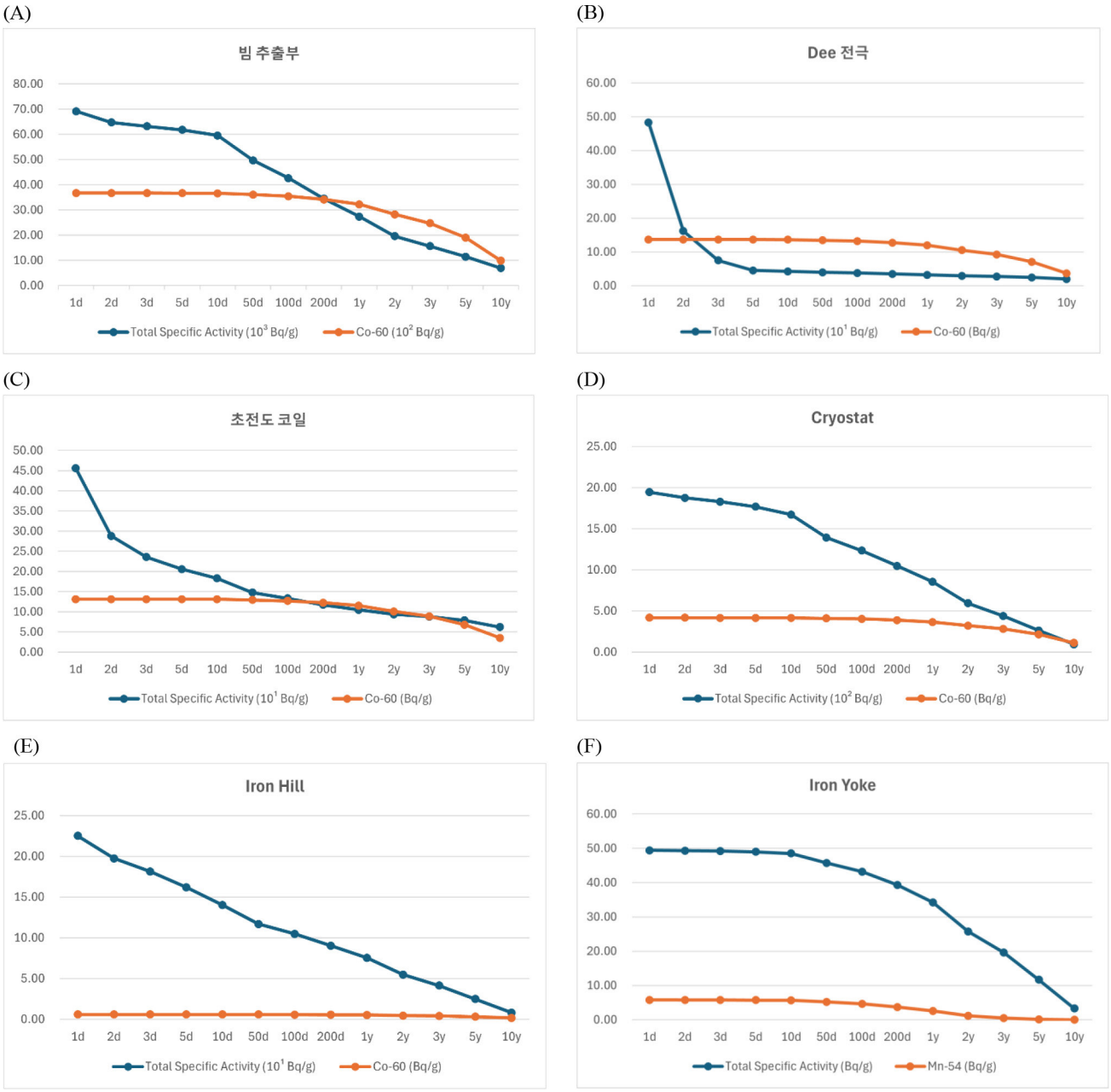

Fig. 2. Decay trends of total specific activity and key radionuclides for major cyclotron components. (A) Beam extraction, (B) Dee, (C) Superconducting Coil, (D) Cryostat, (E) Iron Hill, (F) Iron Yoke

3.3. 냉각 시간에 따른 방사능 감쇠 평가

Fig. 2는 사이클로트론의 주요 부품의 총 비방사능과, 폐기 판단의 핵심 지표인 핵종의 냉각 시간별 감쇠 경향을 비교하여 제시하였다. 빔 추출부는 20년 가동 후 냉각기간이 1일 대비 1년 시점에서 총 비방사능이 약 2.53배 감소하였다. 그러나 Co-60은 종료 1일에 3.67×10^3 Bq/g, 종료 10년 이후에도 9.87×10^2 Bq/g으로 평가되어, 자체 처분 기준 이상으로 나타났다. Dee 전극은 종료 후 1일에서 2일 구간에서 총 비방사능이 약 3배 급감한 뒤, 5일 뒤부터 10년까지의 추가 감소는 약 2.3배로 나타났다. Co-60은 10년 시점에도 3.68 Bq/g 수준으로 남아, 자체 처분 기준 이상인 것으로 나타났다. 종합적으로, Iron Yoke를 제외한 모든 부품은 냉각을 10년 유지하더라도 자체 처분 기준 이상인 것으로 나타났다. 반면 Iron Yoke는 폐기 판단의 지표로 평가되는 Mn-54의 경우 약 5년의 냉각으로 자체 처분 기준이 충족되는 것으로 나타났다.

4. 고 찰

본 연구에서는 PHITS-DCHAIN 연계 계산을 통해, 의료용 사이클로트론 방사화의 전류 의존성, 장기 가동 시 포화 특성, 그리고 냉각 초기의 급격한 감쇠를 정량적으로 확인하였다. 특히 사이클로트론의 주요 부품인 빔 추출부, Dee 전극, 초전도 코일, Cryostat, Iron Hill에서 총 비방사능의 빠른 포화 접근과 초기 냉각에서의 급격한 감쇠를 확인하였다. 이를 통해 양성자치료기 사이클로트론의 부품 교체 및 시설 해체 단계에서 방사화 평가가 필요할 것으로 판단된다.

전류 의존성 비교에서, 800 nA와 30.8 nA 조건 간 생성 핵종의 종류와 상대 조성은 본질적으로 유사하였으나, 총 비방사능은 빔 추출부와 초전도 코일에서 약 26.2배, Dee 전극, Cryostat, Iron Hill, Iron Yoke 에서는 약 26.1배 차이를 보였다. 이는 전류 증가에 따라 2차 중성자장 강도가 거의 선형적으로 증대한 결과로 해석되며, 시설별로 상이한 가동 전류를 방사화 결과에 선형적으로 매칭시켜 방사화 결과를 적용할 수 있음을 시사한다.

가동 기간별 부품별 방사능 축적 정도를 확인한 결과, Iron Yoke를 제외한 모든 부품에서 방사능 포화 곡선이 관찰되었다. 빔 추출부의 경우 비방사능이 전 기간에 걸쳐 완만히 증가하는데, 이는 Co-58, Co-60 등 상대적으로 긴 반감기 핵종의 누적 효과로 해석된다. Dee 전극에서는 Cu-61, Cu-62, Cu-64, Cu-66 등 단반감기 Cu 계 핵종이 수일 내 포화에 도달함에 따라, 장기적으로 총 비방사능의 추가 증가는 제한적이었다. 초전도 코일 역시 Cu 계 단반감기 핵종의 빠른 포화로 유사한 양상을 보였으며, 일부 Nb 계열의 핵종의 기여가 동반되었다. 반면 Iron Yoke는 주재질인 Fe에서의 (n, r), (n, 2n) 반응 등에 의해 Fe-55가 지배적으로 생성되어, 가동 기간이 증가할수록 비방사능이 거의 선형적으로 증가하는 경향을 보였다.

냉각 경향 평가에서는, 구리 기반 부품인 빔 추출부, Dee 전극, 초전도 코일의 비방사능이 초기 수일 내 급감하는 특성이 확인되었다. 특히 Dee 전극은 20년간 가동된 후 빔 종료 2일 내 약 3배의 총 비방사능 감소를 보였으며, 이는 단반감기 Cu 계열 핵종의 급격한 감쇠에 기인하는 것으로 판단된다. 반면, 철 기반 부품은 Cryostat, Iron Hill, Iron Yoke의 경우 Mn-54, Fe-55 등 장반감기 성분의 기여로 인해, 냉각 시간 증가에 따른 급격한 감쇠는 관찰되지 않았다. 자체처분 관점에서, Iron Yoke를 제외한 모든 부품은 Co-60으로 인해 냉각 시간 10년을 적용하더라도 기준 충족이 어려웠으며, Iron Yoke는 약 5년 냉각으로 자체처분 도달이 가능한 것으로 평가되었다. 또한 국내 중·저준위 방사성폐기물에 대해서는 전체 방사능의 95% 이상을 구성하는 핵종을 규명하도록 요구하므로, 자체처분이 곤란한 부품은 폐기 계획 수립 이전에 정밀 핵종분석과 몬테카를로 전산모사를 통해 핵종을 선제적으로 규명할 필요가 있을 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 PHITS-DCHAIN 연계 계산을 통해 ACCEL-PSI 계열 SC 사이클로트론의 빔 손실로 인한 내부 방사화를 부품 단위로 평가하였으며, 방사화의 빔 전류 의존성 확인을 위해 최대 빔 전류와 임상에서 이용되는 빔 전류 조건을 설정하여 비교 분석하였다. 또한, 가동 기간, 냉각 시간에 따른 방사화의 포화 특성과 감쇠 경향 분석을 수행하였다.

전류 의존성 평가에서는 기하 구조, 재질, 빔 손실 조건을 동일하게 고정하고 빔 전류만을 변화시켜 800, 30.8 nA 조건에서 각각 방사화를 평가하였다. 그 결과, 생성 핵종의 종류와 상대 조성은 전류 조건 변화에 따라 실질적 차이가 없었다. 반면 비방사능은 빔 전류가 30.8 nA에서 800 nA로 약 25.97배 증가함에 따라, 빔 추출부와 초전도 코일에서는 약 26.2배, Dee 전극, Cryostat, Iron Hill, Iron Yoke에서는 약 26.1배 증가하는 경향을 보였다.

장기 가동 조건에서는 Cu 계 부품의 경우 Cu-62, Cu-64, Cu-66 등 단반감기 핵종과 Nb 계열의 단반감기 핵종에 의해 가동 초기부터 포화에 접근하는 특성이 확인되었다. 반면, Fe 계 부품의 경우 Mn-54, Fe-55 등 장반감기 성분의 누적으로 가동 기간에 따른 비방사능의 완만한 증가가 지속되었고, 특히 Iron Yoke는 Fe-55가 지배적으로 생성되어 가장 일정한 상승 곡선을 보였다. 전반적으로 Iron Yoke를 제외한 부품에서는 가동 1년에서 5년 사이에 가동 20년 대비 약 90% 수준의 비방사능에 도달하는 결과를 보였다.

냉각 평가에서는 Cu 계 부품의 총 비방사능이 종료 후 수일에서 수십일 내 급감하는 반면, Fe 계 부품은 장반감기 지배로 감쇠가 완만한 특징을 보였다. Iron Yoke를 제외한 모든 부품에서 자체처분 판단의 핵심 지표 핵종은 Co-60, Iron Yoke의 경우 Mn-54로 확인되었다. 다만, Iron Yoke를 제외한 모든 부품은 냉각기간 10년을 적용하더라도 자체처분 기준 충족이 어려웠으며, Iron Yoke는 약 5년 냉각으로 자체처분 기준 도달이 가능한 것으로 평가되었다.

향후 보다 현실성 있는 방사화 평가를 위해서는 실제 설비의 미량 불순물 및 합금 조성 정보를 확보 및 반영하는 등 현장 재질 특성을 몬테카를로 평가에 적용하여 연구가 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. *Radiolo-*

gy **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. J. M. Schippers. 2011. Emerging technologies in proton therapy. *Acta Oncologica* **50**(6):838-850. https://doi.org/10.3109/0284186X.2011.582513.
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. Riccardo Calandrino, Simone Manenti, Flavia Groppi, Francesco Broggi, Carlo Bergamaschi, Andrea Ferrari, Simona Manenti, Massimiliano Nizzi, Alessandro Loria, Antonella del Vecchio. 2021. Decommissioning procedure and induced activation levels, calculations and measurements in an 18 MeV medical cyclotron. *Journal of Radiological Protection*. **41**(4):1344. https://doi.org/10.1088/1361-6498/ac28f0.
9. Toshioh Fujibuchi, Takatoshi Toyoda, Shingo Baba, Yoshiyuki Umezu, Isao Komiya, Masayuki Sasaki, Hiroshi Honda. 2017. Evaluation of the distribution of activation inside a compact medical cyclotron. *Applied Radiation and Isotopes.* **124**:27-31. https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2017.02.045.
10. 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.
11. Claus Maximilian Backer, Christian Baumer, Marcel Gerhardt, Sedef Ibisi, Kevin Kroninger, Christian Nitsch, Jens Weingarten and Beate Timmermann. 2020. Evaluation of the activation of Brass apertures in proton therapy using gamma-ray spectrometry and Monte Carlo simulations. *Journal of Radiological Protection* **40**(3):848-860. https://doi.org/10.1088/1361-6498/ab9f42.
12. 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.
13. 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. 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. https://doi.org/10.1063/1.1435191.
14. 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, No. 2. 2007.
15. A.E. Geisler, J. Hottenbacher, H. -U. Klein, D. Krischel, H. Röcken, M.Schillo, T. Stephani, J.H. Timmer. 2007. COMMISSIONING OF THE ACCEL 250 MEV PROTON CYCLOTRON. 18th International Conference on Cyclotrons and Their Applications 2007:9-14.
16. IAEA. 2019. Methodologies for Assessing the Induced Activation Source Term for Use in Decommissioning Applications. Safety Reports Series No. 95.