

몬테칼로법을 이용한 의료용 선형가속기 차폐벽의 방사화 특성 분석

Analysis of Radioactive Characterization in the Medical Linear Accelerator Shielding Wall Using Monte Carlo Method

이동연*, 박은태**

동남권 원자력의학원 방사선중양학과*, 인제대학교 부산 백 병원 방사선중양학과**

Dong-Yeon Lee(gymnlist@dirams.re.kr)*, Eun-Tae Park(linacpet@hanmail.net)**

요약

본 연구는 의료용 선형가속기를 차폐하고 있는 차폐벽에 대하여 방사화 분석을 함으로서 추후 선형가속기 시설의 해체 시 해체비용의 절반이상을 차지하는 차폐벽에 대하여 폐기물 준위를 평가하고 이에 따른 폐기물 처리방법을 분석함으로써 해체비용 측면에 있어서 이득을 얻을 수 있는 방법에 대하여 논의하고자 한다. 실험결과, 선형가속기에서 발생하는 중성자 양은 차폐벽을 방사화 시키기에 충분한 양이 측정되었으며, 방사화 분석 결과 약 20 개 이상의 핵종이 분석되었다. 이 중 ^{24}Na , ^{45}Ca , ^{59}Fe 핵종이 규제해제 농도를 초과하는 것으로 분석되었으며, 그 값은 차폐벽 깊이가 깊어질수록 농도는 줄어들었다. 이를 바탕으로 특정 세 구역(E,F,G)은 매립이나 재활용이 불가능한 것으로 평가되었으며, 나머지 구역은 일정 깊이 이상일 경우 매립이나 재활용이 가능한 것으로 평가되었다.

■ 중심어 : | 선형가속기 | 중성자 | 방사화 | 모의실험 | 콘크리트 |

Abstract

This study analyzed for the radioactive shielding wall, which shields the medical linear accelerator. This allows to evaluate the level of waste with respect to the shield wall, which accounts for more than half of the cost of dismantling later linac facility. In addition, by analyzing the waste processing method according we discuss the way to obtain the benefits in terms of dismantling cost.

Results of the simulate, the amount sufficient to screen the amount of neutron radiation occurring in the shielding wall linac was measured. And neutron activation analysis results were analyzed nuclides more than about 20. This analysis was in excess of that, ^{24}Na , ^{45}Ca , ^{59}Fe nucleus paper deregulation concentration. The value is reduced is greater the deeper the depth of the shielding wall concentration. Based on this, three specific areas (E, F, G) was estimated to be impossible to landfill or recycling. The rest area was estimated to be buried or recycled if possible more than a predetermined depth.

■ keyword : | Linear Accelerator | Neutron | Radioactivation | Simulation | Concrete |

I. 서론

방사선이용시설은 연구소 및 대학, 의료기관, 산업체 등 다양하게 분포하고 있으며, 일반적으로 발전소나 산업체보다 의료에서 사용하는 방사선의 위험성은 적다고 볼 수 있다[1]. 이에 따라 과거 의료분야에 있어서 방사선발생장치를 설치 시 누설선의 차폐가 중점이었으며, 방사선을 사용함으로써 2차적으로 일어날 가능성은 염두에 두지 않았던 것이 사실이다. 또한, 당시 인허가 서류를 보면, 사용하는 방사선으로 인해 발생할 수 있는 방사화 평가에 대한 부분은 명시되지 않았으며, 추후 시설을 해체함에 있어서 해체 계획, 해체 비용에 대한 부분 역시 세워지지 않았다[2]. 하지만 오늘날 의료분야에서 사용하는 장비는 기술의 발달로 인하여 방사선의 에너지가 높아졌으며, 이에 따라 2차적으로 일어나는 방사화 문제가 대두 되고 있다[3][4]. 이와 같이 발생하는 방사화는 장비를 사용하는 기간이 길수록 그 양은 늘어나며, 추후 장비 해체 시 작업자에 대한 피폭 문제와 더불어 해체 비용 측면에서 문제가 될 것이다. 그러므로 1970년대부터 미국이나 유럽 등에서는 시설 해체에 대한 연구가 진행 중이며, 특히 방사성폐기물 처리방법과 해체 비용에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다[5-8]. 또한, IAEA에서는 세계적으로 해체 사례들을 수집 및 분석하여 1999년 이후 지속적으로 의료용 소형 가속기 해체방안에 대한 권고안을 제시하고 있다[9].

이에 본 연구는 의료분야에서 쓰이는 장비 중 사용빈도가 많으며, 상대적으로 고에너지를 사용하는 선형가속기를 대상으로 방사화 정도를 평가하여 시설해체에 있어서 방사성폐기물 처리방법과 처리 비용 측면에서 이득을 얻을 수 있는 방안에 대하여 논의하고자 한다.

II. 실험재료 및 방법

본 연구는 선형가속기 장비를 교체 없이 최대한 사용할 수 있을 것으로 유추되는 기간을 30년으로 설정하였고, 이 기간동안 지속적으로 가동한다는 가정 하에 모의실험을 진행하였으며, 선형가속기 장비 해체 시 폐

기물비용의 대부분을 차지하는 콘크리트 벽에 대한 방사화양을 벽 두께 깊이에 따라 평가하고자 하였다. 선형가속기에서 발생하는 광자와 차폐벽이 받는 중성자의 양을 MCNPX(Ver.2.5.0)을 사용하여 측정된 후, 측정된 중성자 플루언스값을 입력값으로 사용하여 FISPACT-2010 코드를 통해 방사화 정도를 평가하였다. [그림 1]은 본 실험에서 사용한 모의실험 프로그램과 방사화 평가방법에 대한 간략한 연구절차와 목표이다.

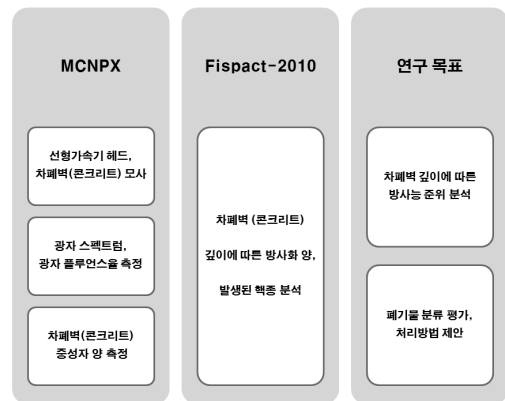


그림 1. 모의실험 프로그램과 방사화 평가방법 그리고 연구 목표

1. 선형가속기, 차폐벽의 기하학적 구조와 중성자 측정

본 연구에서 모사한 선형가속기의 경우 실제 임상에서 사용하는 장비를 단순화시켜 헤드부분만을 모사하였다. 모사한 부품은 타겟(Target), 1차 조리개(Primary collimator), 선속평탄여과판(Flattening filter), 2차 조리개(secondary collimator), 다엽조리개(Multi-leaf collimator)를 표현하였다. 이 때, 사용한 재질과 밀도는 Tungsten(¹⁸²W, ¹⁸³W, ¹⁸⁴W, ¹⁸⁶W), 19.4 g/cm³와 Copper(⁶³Cu, ⁶⁵Cu), 8.94 g/cm³를 이용하였다.

선형가속기를 차폐하고 있는 차폐벽에 대한 기하학적 구조는 IAEA에서 제시한 설계를 참고하였으며[10], 일반적으로 임상에서 적용하고 있는 미로형으로 모사하였다[그림. 2]. 이 때, 벽의 두께는 100 cm로 하였으며,

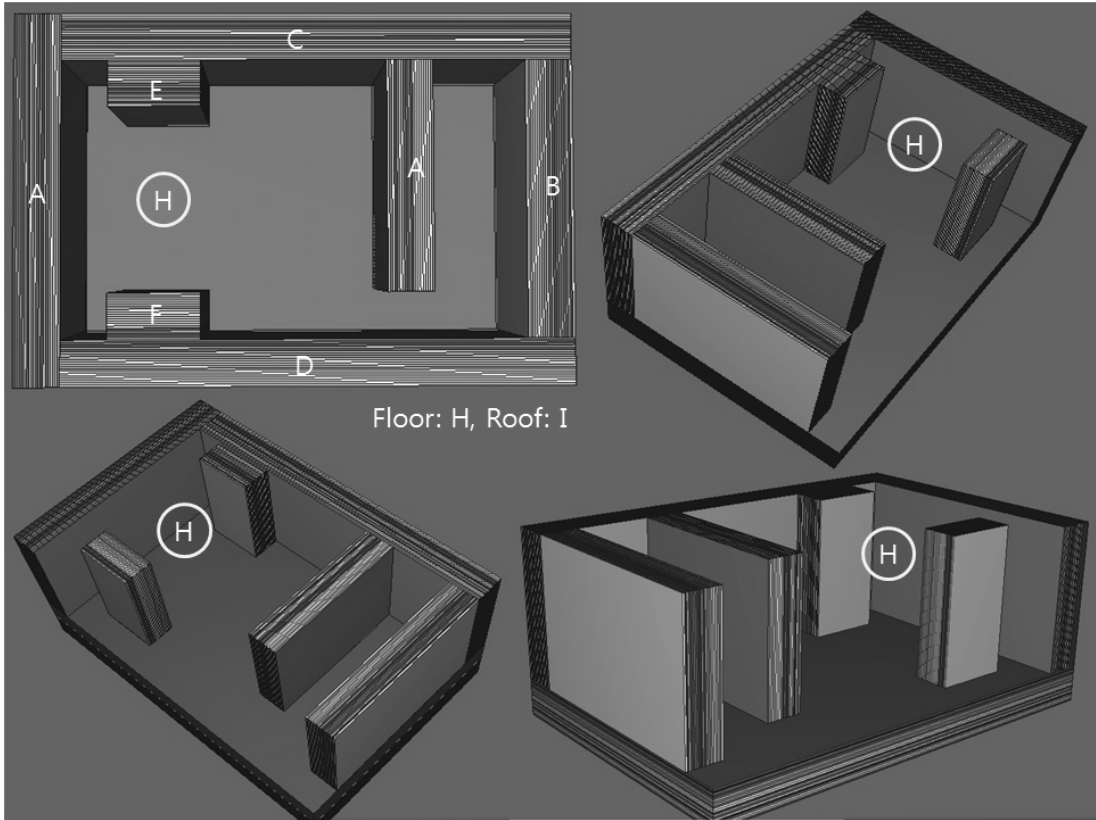


그림 2. MCNPX 프로그램을 이용해 모사한 미로형 차폐벽의 모습

선형가속기가 회전하면서 1차선이 조사되는 부분은 50 cm 두께의 콘크리트를 추가하였다. 다음으로 콘크리트 재질은 일반적으로 가장 많이 사용되고 있는 Ordinary(NBS03)를 사용하였으며, [표 1]에 밀도와 재질을 나타내었다. 이는 한국원자력연구원의 고에너지 차폐 방법에 대한 연구에서 보고된 콘크리트 재질이다 [11].

마지막으로 중성자의 측정은 [그림 2]와 같이 차폐벽을 A ~ I 까지 총 9 부분으로 나누어 각각의 벽을 두께 5cm 간격으로 분할하였다. 이 후, 5cm 간격으로 분할된 각각의 두께에 대하여 Tally F4번을 지정함으로써 중성자 플루언스율(neutron number/cm²·sec·e)을 측정하였으며, 분당 선량률은 6 Gy로 가정하고 초당 중성자 플루언스율(neutron number/cm²·sec)을 환산하여 FISPACT-2010 코드의 입력값으로 사용하였다.

표 1. 모의모사한 미로형 차폐벽 재질 [Partial density (g/cc)].

Element	Ordinary (NBS03)
H	0.020
O	1.116
Si	0.342
Ca	0.582
C	0.118
Mg	0.057
Al	0.085
S	0.007
K	0.004
Fe	0.026
Density	2.35

2. 광자 측정

본 연구에서 모사한 선형가속기에서 발생하는 광자에 대하여 스펙트럼과 플루언스율(photon number/cm²·sec·e)을 분석하였다. 이것은 모사한 선형가속기의 신뢰성 검증과 전자 1 개를 수송하였을 때를 기준으로 생성된 광자의 양과 중성자의 양을 비교, 평가하기 위한 것이다.

광자 측정 지점은 타겟 바로 아래 10 cm 인 지점에서 측정하였으며, Tally F5번을 사용, 반경 5 cm인 가상의 구형 디텍터를 통해 입사한 광자의 개수를 분석하였다.

이 때 스펙트럼은 10 keV 간격으로 나누어 측정하고 생성된 그래프, 평균에너지, 특성에너지를 평가하였다.

3. 방사화 평가

MCNPX(Ver.2.5.0)는 입자의 수송 계산에 있어서 다양한 종류의 입자를 적용할 수 있다는 점, 연산시간이 빠르다는 점, 또한 정확성이 높은 장점을 가지고 있다. 하지만 그에 반해 방사화에 대한 핵 데이터가 없는 단점을 가지고 있다. 이에 영국원자력공사(UKAEA)에서 MCNPX 프로그램과 연계하여 핵융합시설, 핵분열로 고에너지 가속기 등의 방사화 평가에 적용할 수 있는 코드인 FISPACT-2010을 개발하여 IAEA를 통해 배포하였다[12].

본 연구는 FISPACT-2010 코드를 통해 앞서 MCNPX를 이용해 측정된 중성자 플루언스율을 입력값으로 사용하여 방사화 정도를 분석하였다.

방사화 평가는 보수적인 평가를 위해 20 MV 광자선을 사용하였을 때 발생한 중성자 플루언스율을 적용하고 선형가속기의 가동 시간은 하루 8 시간을 기준으로 30 년 동안 쉬지 않고 가동한다는 가정 하에 평가를 진행하였으며, 발생한 핵종들에 대하여 Bq/kg으로 방사화량을 분석하였다.

4. 방사성 폐기물 분류 및 자체처분 기준

2009년 IAEA에서는 “IAEA GSG-1, Classification of Radioactive Waste, 2009”에 따라 방사성폐기물을 잠재 위험도와 처분방식을 고려하여 고준위, 중준위, 저준위,

극 저준위, 규제해제로 세분화 하였다. 또한 [표 2]는 IAEA 안전기준 RS-G 1.7에서 정한 기준 농도 또는 선량을 나타낸 것이며, 위 기준 이하의 모든 핵종에 대하여 규제해제를 도입하여 매립이나 재활용 등을 허용하도록 규정하였다[13][14].

이에 본 연구에서는 차폐벽을 5cm 두께별로 깊이에 따라 각각 구분하여 폐기물 준위를 분류하고 폐기물 처리방법에 대하여 평가하였다.

표 2. 방사성폐기물의 자체처분을 허용할 수 있는 방사성 핵종별 방사능 농도

방사성핵종	허용농도 (Bq/g)
I-129	0.01
Na-22, Sc-46, Mn-54, Co-56, Co-60, Zn-65, Cs-134 etc.	0.1
C-14, Na-24, Cl-36, Sc-48, V-48, Mn-52, Fe-59, Co-57, Co-58, Sr-85, Sr-90 etc.	1
Be-7, F-18, Cl-38, Ca-47, Mn-51, Mn-56, Fe-52, Co-55, Co-62m, Ni-65, Sr-91, Sr-92 etc.	10
H-3, S-35, K-42, Ca-45, Sc-47, Cr-51, Mn-53, Co-61, Ni-59, Ni-63, Cu-64, Sr-85m, Sr-87m etc.	100
Si-33, P-32, P-33, Fe-55, Co-60m, Zn-69, As-73, As-77, Sr-89 etc.	1,000
Co-58m, Ge-71, Rh-103m, Fm-254	10,000

III. 결과

1. 광자 특성 분석

[그림 3]은 전자선 20 MeV를 가속시켰을 때 제동복사로 인해 생성된 광자의 에너지 스펙트럼이다. 광자 플루언스율은 2.05E-02 개/cm²·sec·e로 측정되었으며, 특성 에너지는 0.512 MeV, 평균에너지는 3.75 MeV로 나타났다.

2. 중성자 특성 분석

[그림 4]는 차폐벽을 5cm간격으로 깊이에 따라 중성자 플루언스율을 측정하여 그래프로 나타낸 것이며, [표 3]은 이를 수치로 표현한 것이다. 이를 분석해 보면,

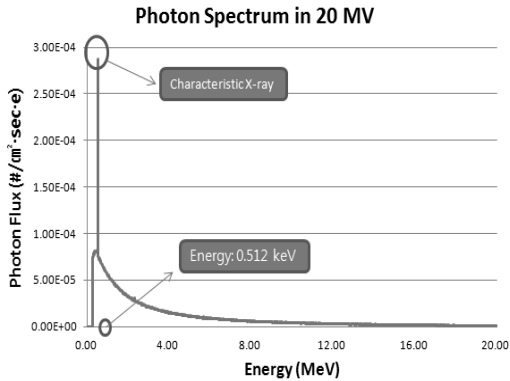


그림 3. MCNPX에서 측정된 20 MV 광자 스펙트럼

E, F, A, G, I, C, D, H 순으로 높은 중성자 양을 보였으며, 약 30 ~ 35 cm에서 중성자 양이 절반으로 줄어드는 것으로 나타났다. 이를 수치적으로 보면, 차폐벽 표면에서는 1422 ~ 22474 개/cm²·sec으로 나타났으며, 가장 깊은 100 cm에서는 6 ~ 3168 개/cm²·sec로 측정되었다.

3. 방사화 평가

앞서 측정된 중성자 플루언스율을 보면, 6 ~ 22474 개/cm²·sec의 양을 보였다. 이에 방사화 평가는 중성자

플루언스율이 20000, 15000, 10000, 5000, 2500, 1000, 500, 300, 150, 50 개/cm²·sec 일 경우에 대하여 평가를 하였다. 그 결과, 생성된 핵종은 ³H, ¹⁴C, ²⁴Na, ³¹Si, ^{32,33}P, ³⁵S, ^{36,38}Cl, ^{42,43}K, ^{45,47}Ca, ^{46,47,48}Sc, ⁵¹Cr, ⁵⁶Mn, ^{55,59}Fe, ⁶⁰Co으로 나타났다. 생성된 핵종 대부분 자체처분을 가능하게 할 수 있는 규제해제 이하의 농도로 측정되었으나, ²⁴Na, ⁴⁵Ca, ⁵⁹Fe 핵종은 규제해제 농도를 초과하는 것으로 나타났다.

농도를 초과한 3 가지 핵종을 분석해 보면, ²⁴Na는 중성자 플루언스율이 500 개/cm²·sec 일 때, 971 Bq/kg으로 규제해제 농도를 만족하였으며, ⁴⁵Ca는 1000 개/cm²·sec 일 때 54800 Bq/kg, ⁵⁹Fe는 1000 개/cm²·sec 일 때 410 Bq/kg으로 규제해제 농도 이하를 만족시키는 것으로 나타났다. 이에 대한 자세한 수치를 [표 4]로 나타냈다.

IV. 고찰

본 연구는 의료용 선형가속기 해체에 있어서 가장 큰 비용을 차지하는 차폐벽에 대한 연구로서, 방사화로 인해 발생하는 핵종과 방사화 정도를 예측, 분석하고자 하였다.

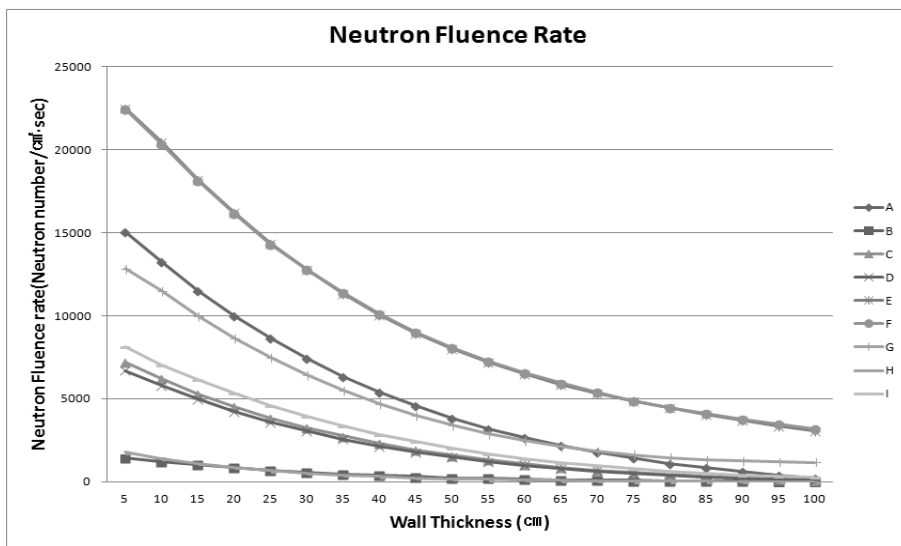


그림 4. 9 부분으로 나눈 차폐벽 깊이에 따라 받은 중성자 플루언스율

표 3. 각 차폐벽 두께에 따른 중성자 플루언스율 (unit: neutron number/cm²sec)

두께 (cm)	A	B	C	D	E	F	G	H	I
5	15028	1422	7180	6695	22474	22413	12822	1767	8135
10	13229	1215	6192	5806	20464	20361	11484	1394	7047
15	11520	1023	5289	4976	18195	18139	9986	1103	6131
20	9989	842	4522	4240	16187	16154	8663	860	5321
25	8649	695	3845	3601	14349	14320	7474	682	4597
30	7428	572	3266	3045	12758	12778	6422	531	3945
35	6350	470	2754	2573	11336	11371	5513	413	3374
40	5412	383	2301	2152	10045	10121	4705	316	2858
45	4567	310	1917	1787	8961	9012	4007	245	2419
50	3824	251	1594	1475	8028	8072	3417	183	2025
55	3203	201	1311	1213	7196	7257	2908	141	1690
60	2666	162	1075	993	6496	6560	2480	109	1403
65	2191	132	870	805	5892	5955	2134	81	1158
70	1788	104	709	649	5351	5382	1860	60	955
75	1424	82	564	516	4877	4886	1640	43	781
80	1120	62	440	404	4461	4481	1458	31	636
85	855	47	335	307	4055	4122	1331	24	515
90	626	33	242	223	3716	3790	1246	18	414
95	417	21	164	150	3377	3477	1193	11	332
100	221	11	87	79	3062	3168	1171	6	267

표 4. 중성자 플루언스율에 따른 방사화 농도

핵종	기준농도 (Bq/Kg)	중성자 플루언스율 (neutron number/cm ² · sec)									
		20000	15000	10000	5000	2500	1000	500	300	150	50
²⁴ Na	1000	38820	29120	19410	9706	4853	1941	971	582	291	97
⁴⁵ Ca	100000	1095000	821300	547600	273800	136900	54760	27380	16430	8213	2738
⁵⁹ Fe	1000	8201	6151	4101	2050	1025	410	205	123	62	21

먼저 본 연구에서 모사한 선형가속기의 신뢰성을 확보하기 위해 측정된 광자 플루언스율과 스펙트럼의 경우 기존의 이[15]등의 연구와 비교하면, 에너지 스펙트럼의 경우 약 4 MeV 이하에서 대부분의 광자들이 발생하는 것이 유사하였다. 하지만 본 연구에서는 특성에너지 피크가 확실하게 나타나며 차이를 보였다. 이는 에너지 스펙트럼을 나눈 구간의 차이 때문인 것으로 분석되며, 본 연구에서 구간을 더 세분화 하였기에 더욱 정확한 스펙트럼을 분석할 수 있었던 것으로 평가된다.

다음으로 차폐벽이 받은 중성자 양을 보면, 선형가속기 헤드를 중심으로 거리가 이격될수록 중성자 플루언스율이 낮아지는 것으로 분석되었다. 이와 같은 결과는

치료실 내 위치별 중성자양을 평가한 박[16]의 연구와 유사한 결과를 보였다. 또한, 차폐벽 중 E,F가 다른 지점에 비해 높은 값이 측정되었으며, G의 경우 헤드를 중심으로 먼 거리를 유지함에도 불구하고 상대적으로 높은 값을 나타냈다. 이는 중성자를 받을 수 있는 표면적이 영향을 미친 것으로 E,F,G의 경우 다른 벽에 비해 3 면이 중성자에 노출이 되어있기 때문인 것으로 분석된다.

마지막으로 방사화를 분석해 보면, 중성자 플루언스 양이 낮을수록 방사화양은 낮게, 핵종의 종류는 적게 측정되었다. 이 때, 핵종은 약 20 종 이상이 발생되었으며, 이 중 규제해제 농도를 초과하는 핵종은 ²⁴Na, ⁴⁵Ca,

^{59}Fe 로 분석되었다. 하지만, 중성자 플루언스율이 500 ~ 1000 개/cm²·sec로 줄어들면 핵종 모두 규제해제 농도 이하로 줄어드는 것을 확인할 수 있었다. 또한 20 종류 이상의 핵종이 발생하는 것은 차폐벽을 이루고 있는 콘크리트의 재질 때문인 것으로 각 재질에서 중성자를 흡수함으로서 여러 핵종이 발생하는 것으로 사료된다.

V. 결론

본 연구는 선형가속기 해체 시 해체비용의 절반 이상을 차지하는 차폐벽에 대한 내용으로서 30년을 가동하였다는 가정 하에 차폐벽이 받는 중성자 양을 평가한 후, 방사화 정도를 분석하였다.

평가 결과, 차폐벽이 받는 중성자의 양은 방사화를 일으키기에 충분한 양이 측정되었으며, 방사화로 인해 발생한 핵종은 약 20가지 이상으로 나타났다.

종합적으로 차폐벽의 폐기물 처리방법을 평가하면, 차폐벽 E,F,G 부분은 규제해제 농도 기준을 만족하지 못함으로 저준위 폐기물로 분류하여 처리를 해야 하며, 나머지 부분에서는 일정 깊이 이상이 되면 규제해제 농도 기준이하를 만족하여 매립이나 재활용 등을 할 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구는 차폐벽에 대한 핵종과 방사능 재고량을 정확하게 분석하여 기준을 제시함으로써 추후 선형가속기 시설의 해체에 있어서 폐기물 재활용 가능성을 파악함으로써 비용적인 측면에서 이득을 얻을 수 있을 것으로 생각된다.

참고 문헌

- [1] 조운갑, 송민철, 김용민, 박병현, 김우란, 방사선 이용시설 국내 운영현황 및 국외 해체사례 분석, 한국원자력안전기술원, 2014.
- [2] 이재호, 사이클로트론 시설 방사성 콘크리트 폐기물 발생량 평가 및 감축기법 개발, 한양대학교 대학원, 석사학위논문, 2016.
- [3] H. W. Fischer, B. E. Tabot, and B. Poppe, "Activation processes in a medical linear accelerator and spatial distribution of activation products," *Phys. Med. Biol.*, Vol.51, pp.N461-N466, 2006.
- [4] Y. Z. Wang, M. D. C. Evans, and D. B. Podgorsak, "Characteristics of induced activity from medical accelerators," *Med. Phys.*, Vol.32, No.9, pp.2899-2910, 2005.
- [5] European Commission Nuclear Safety and the Environment, *Evaluation of the Radiological and Economic Consequences of Decommissioning Particle Accelerators*, Leuxembourg, 1999.
- [6] E. T. Cheng and G. Saji, "Activation and waste management considerations of fusion materials," *Journal of nuclear materials*, Vol.212-215, No.1, pp.621-627, 1994.
- [7] Bob Major, *Pet cyclotron Design for Decommissioning and Waste Inventory Reduction*, The American Society of Mechanical Engineers, 2009.
- [8] R. Calandrino, A. del Vecchino, A. Savi, S. Todde, V. Griffoni, S. Brambilla, R. Parisi, G. Simone, and F. Fazio, "Decommissioning Procedures for an 11 MeV Self-shielded Medical Cyclotron After 16 Years of Working Time," *Health Phys.*, Vol.90, No.6, pp.588-596, 2006.
- [9] International Atomic Energy Agency, *Decommissioning of Medical, Industrial and Research Facilities*, IAEA in Austria, 1999.
- [10] International Atomic Energy Agency, *Safety Report Series No.47 Radiation Protection in the Design of Radiotherapy Facilities*, 2006.
- [11] Korea Atomic Energy Research Institute, *Shielding Technology for High Energy Radiation Production Facility*, 2004.
- [12] R. A. Forrest, *FISPACT-2007: User manual*,

UKAEA FUS 534, 2007.

- [13] International Atomic Energy Agency, *IAEA GSG-1: Classification of Radioactive Waste*, IAEA in Vienna, 2009.
- [14] International Atomic Energy Agency, *Safety guide RS-G-1.7: application of the concepts of Exclusion, Exemption and clearance*, IAEA in Austria, 2004.
- [15] 이정옥, 정동혁, 강정구, “24MV 의료용 선형가속기의 중성자 발생에 관한 연구,” 의학물리학회, Vol.16, No.2, 2005.
- [16] 박은태, “MCNPX를 이용한 방사선 치료실의 광중성자 선량 평가,” 한국콘텐츠학회논문지, Vol.15, No.6, 2015.

저 자 소 개

이 동 연(Dong-Yeon Lee)

정회원



- 2014년 2월 : 부산가톨릭대학교 방사선학과(이학석사)
- 2014년 3월 ~ 현재 : 부산가톨릭대학교 방사선학과 박사과정
- 2011년 3월 ~ 현재 : 동남권원자력의학원 방사선종양학과 재직

<관심분야> : 방사선치료물리학, 선량평가, 방사화학

박 은 태(Eun-Tae Park)

정회원



- 2015년 2월 : 부산가톨릭대학교 대학원 방사선학과(이학박사)
- 2000년 5월 ~ 현재 : 인제대학교 부산백병원 방사선종양학과

<관심분야> : 방사선치료 선량 및 측정