pISSN : 1976-0620, eISSN : 2384-0633
https://doi.org/10.7742/jksr.2017.11.4.197 "J. Korean Soc. Radiol., Vol. 11, No. 4, August 2017"

Analysis of the Photon Beam Characteristics by Medical Linear Accelerator According to Various Target Materials using MCNP-code

Dong-Yeon Lee,[1] Eun-Tae Park,[2] Jung-Hoon Kim[3,*]

[1]Department of Radiation Oncology, Dongnam Inst. of Radiological & Medical Science, Korea
[2]Department of Radiation Oncology, Busan Paik Hospital, Inje University, Korea
[3]Department of Radiological Science, College of Health Sciences, Catholic University of Pusan, Korea

Received: May 30, 2017. Revised: July 15, 2017. Accepted: August 31, 2017

Abstract

This study purpose is propose the basic data for selecting the optimal target material by analyzing the photon characteristics of various materials which was located in the head of medical linear accelerator. In this study, energy spectrum of 6, 15 MV photon beams were compared and analyzed for 13 target materials using MCNPX of Monte Carlo method. The mean energy for the 6 MV energy spectrum was 1.69 ~ 1.84 MeV and that for the 15 MV was 3.38 ~ 3.56 MeV, according to the target material. The flux for the 6 MV energy spectrum was 1.64×10^{-5} ~ 1.80×10^{-5} #/cm^2/e and that for the 15 MV was 1.76×10^{-4} ~ 1.85×10^{-4} #/cm^2/e. The analysis shows that the average energy and flux increase with higher atomic number of the target material. Based on this study, it is possible to present the basic data about the physical characteristics of the photon, and it will be possible to select the target later considering economic, efficiency and physical aspect.

Keywords: Target, MCNPX, Energy spectrum, Mean energy, Flux

Ⅰ. INTRODUCTION

방사선치료에 사용되는 의료용 선형가속장치(Linear Accelerator; LINAC)는 종양조직에 방사선 빔을 집속시킴으로써 종양조직에는 최대선량, 정상조직에는 최소선량을 가하는 방식을 사용한다.[1] 의료용 선형가속장치는 1930년대 연구가 시작되어 1952년에 최초로 8 MV 광자선을 이용한 방사선 치료가 시작되었으며 현재까지도 보편화되어 많은 분야에서 활용되고 있다.[2] 선형가속장치의 원리는 전자총에서 발생된 전자가 가속관을 통해 진행하여 타깃(Target)과 충돌하게 된다. 이때 타깃과 전자간의 상호작용에 의한 연속스펙트럼 형태의 제동방사선이 발생하게 된다.[3,4]

현재 의료용 선형가속장치의 두부(Head) 구성요소 중 하나인 타깃은 광자의 특성을 결정짓는데 큰 영향을 미치며,[5] 효율적인 타깃 재질의 선정을 위해서는 고원자번호의 재질을 사용하여 광자 발생 효율을 높여야 한다. 그리고 제동복사로 인해 발생하는 열을 견디기 위해서는 용융점이 높아야 하며, 높은 열로 인해 타깃이 녹는 것을 방지하기 위해 열전도율도 좋아야 한다. 또한 전자가 타깃 외에 공기와의 상호작용으로 이차선이 발생할 수 있으므로 선형가속장치 내부를 고진공도로 유지해야 하며, 괴산성도 낮아야 한다.[6] 적절한 타깃 재질을 선택하기 위해서는 다양한 인자들을 고려해야 한다.

대표적으로 많이 사용되고 있는 타깃 재질에는 텅스텐과 구리가 있다. 텅스텐은 고원자번호이고 높은 용융점과 저렴한 가격 등으로 저에너지 방사선 치료에 이용되고 있다. 구리의 경우에는 고에너지 방사선 치료 시 광중성자의 발생을 무시할 수 없으므로 많이 사용된다.[7] 그 외에도 타깃으로 사용 가능한 재질들은 다양하며 그 종류에 따라 광자의 특성은 다르게 나타난다.[8] 백금, 금과 같은 경

* Corresponding Author: Jung-Hoon Kim E-mail: donald@cup.ac.kr Tel: +82-51-510-0589
Address: Department of Radiological Science, College of Health Sciences, Catholic University of Pusan, Korea

우는 광자 발생 효율이 텅스텐보다 더 좋은 반면 상대적으로 낮은 용융점과 비싼 가격 등의 이유로 사용하는 데 있어서 제한적이다.[7] 따라서 적절한 타깃 선정을 위해서는 여러 구비조건을 고려하고 광자의 특성을 분석하여 평가해야 할 것이다.[9]

이와 같이 의료용 선형가속기의 물리적 특성을 분석하기 위한 연구는 계속해서 보고되고 있다. 대표적으로 Chibani et al.[10], Julian[11], Rawlinson et al.[12] 등의 연구가 있다. 하지만 위 연구들은 현재 임상에서 사용 중인 특정 장비를 대상으로 실측을 한 내용으로써 장비의 상태, 주변 환경의 영향 등을 고려하지 못하여 표준적인 데이터를 제시하지 못한 단점이 있다.

이를 보완하기 위한 방안으로써 몬테카를로 방법(Monte Carlo Method)을 이용한 모의실험이 있다.[13] 몬테카를로 방법은 수치의 확률적 분포를 반복 실험의 통계로부터 구하는 방법이다.[14,15] 대표적인 모의실험 코드로는 MCNPX, EGS4, GEANT4 등이 활용된다. 그 중에서 MCNPX는 윈도우 운영체제를 사용함으로써 접근성이 용이하며, 입자 수송 측면에서 장점이 있다.[16]

이에 본 연구에서는 MCNPX를 이용하여 의료용 선형가속장치에서 다양한 타깃 재질에 따른 광자선의 에너지스펙트럼을 산출하고 평균에너지, flux, 특성선 등 광자의 물리적 특성을 분석함으로써, 적절한 타깃 선정을 위한 기초 자료를 제시하고자 한다.

Ⅱ. MATERIAL AND METHODS

1. 실험재료

1.1 MCNPX(Monte carlo N-particle)

본 연구에서는 미국 Los Alamos National Laboratory에서 개발한 방사선 모의수송 코드인 'MCNPX (ver. 2.5.0)'을 사용했다. MCNPX 코드는 몬테카를로 방식을 이용한 계산코드의 하나이다. 다양한 기하학적 구조를 지원하고 다중 입자의 수송이 가능하며 직접 측정이 어려운 상황을 대체하여 계산을 수행할 수 있다. 또한 출력연산자(Tally)를 사용하여 flux, 에너지 분포, 에너지 흡수 등 다양한 물리량을 출력할 수 있다.[17]

1.2 선형가속장치 두부 구성

의료용 선형가속장치의 두부를 타깃, 일차 콜리메이터(Primary collimator), 선속 평탄 여과판(Flattering filter), 이차 콜리메이터(Secondary collimator), 다엽 콜리메이터(Multi leaf collimator)로 구성하였다. Fig. 1은 두부 모델링 외형이며, 대부분 텅스텐과 구리로 이루어져 있다.

타깃 재질은 여러 선행 연구들을 바탕으로 13가지 종류의 재질로 선정하였으며, Table 1은 각 재질별 원자번호와 밀도이다.[18-23] 실험에 사용된 모든 타깃 재질은 광자의 물리적 특성을 정확하게 분석하기 위해 단일 재질을 사용하였다.

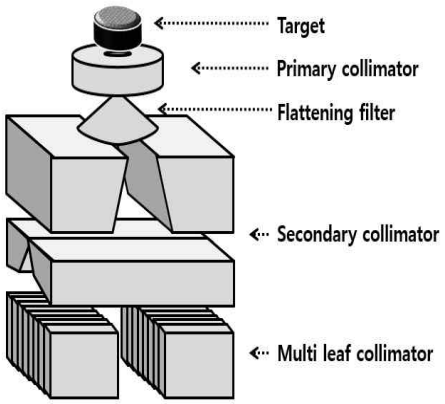

Fig. 1. Schematic representation of the linear accelerator head.

Table 1. Target materials of medical linear accelerator

Target material	Chemical symbol	Atomic number	Density [g/cm^3]
Beryllium	Be	4	1.85
Carbon	C	6	2.27
Aluminum	Al	13	2.70
Titanium	Ti	22	4.50
Iron	Fe	26	7.87
Copper	Cu	29	8.94
Molybdenum	Mo	42	10.2
Silver	Ag	47	10.5
Tantalum	Ta	73	16.7
Tungsten	W	74	19.3
Platinum	Pt	78	21.5
Gold	Au	79	19.3
Lead	Pb	82	11.4

2. 실험방법

2.1 스펙트럼 분석

본 연구에서는 임상에서 저에너지와 고에너지로 사용하는 6, 15 MV를 대상으로 에너지스펙트럼을 분석하기 위하여 MCNPX 코드를 이용한 몬테카를로 시뮬레이션을 사용하였다. 그리고 MCNPX 프로그램의 출력 연산자인 tally specification card는 F5 tally를 이용하였으며, 선원-표면간 거리(Source-Surface Distance; SSD) 100 cm, 10 × 10 cm^2 의 검출기를 통과한 Flux를 산출함으로써 에너지스펙트럼을 측정하였다. F5 tally는 가상의 공간에 검출기를 설치하여 입사하는 광자수를 산출하는 출력연산자이다. 본 연구에서 시행한 모든 모의모사는 오차율을 3% 이내로 하여 신뢰성과 정확성을 확보하기 위해 10^8 번 반복 시행하였다.

2.2 광자 특성 분석

광자 특성을 분석하기 위해 6, 15 MV 광자선 및 타깃 재질에 따른 에너지스펙트럼을 산출하고 생성된 광자의 평균에너지와 flux를 분석하였으며, 특성선이 방사선 치료에 미치는 영향을 알아보기 위해 타깃 재질에 따른 특성선 flux의 백분율을 비교 및 분석하였다.

Ⅲ. RESULT

1. 스펙트럼 분석

Fig. 2, 3은 몬테카를로 계산 방법을 이용하여 획득한 13가지 타깃 재질별 6, 15 MV 광자선의 에너지스펙트럼 분포이다. 그림과 같이 타깃 재질에 따른 광자선의 에너지스펙트럼은 유사한 분포를 나타내었다.

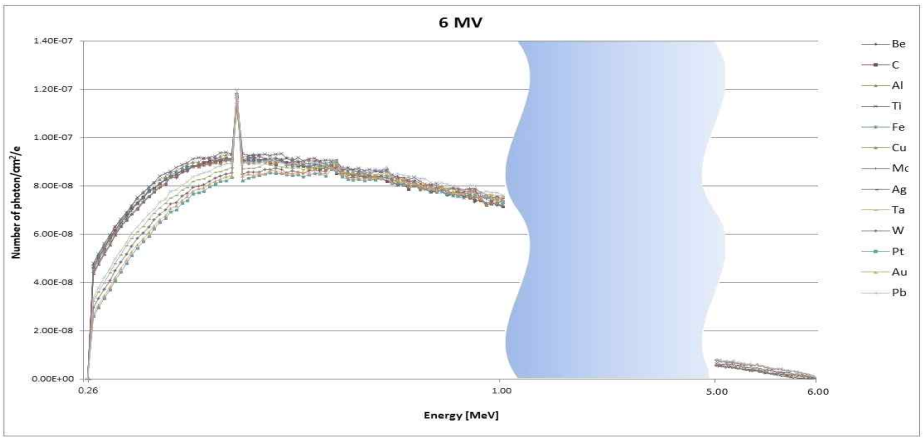

Fig. 2. 6 MV photon energy spectrum calculated with Monte Carlo according to the target materials.

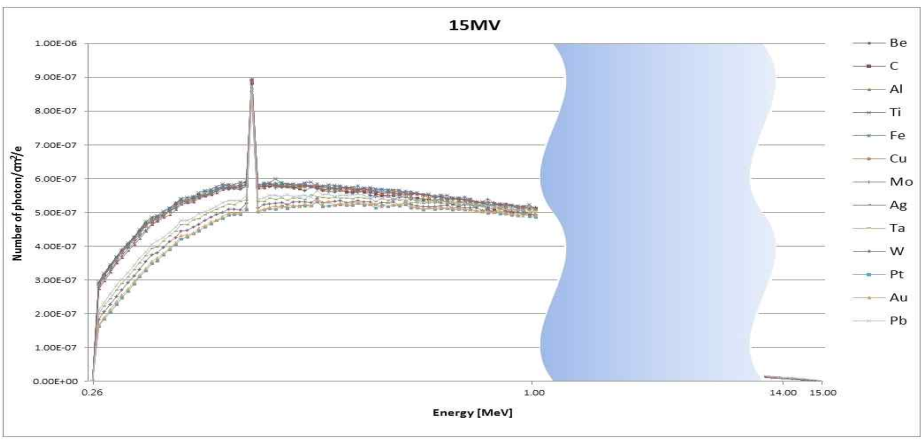

Fig. 3. 15 MV photon energy spectrum calculated with Monte Carlo according to the target materials.

2. 광자 특성 분석

Table 2는 6, 15 MV의 에너지스펙트럼을 바탕으로 산출한 평균에너지 결과이다. 타깃 재질의 원자번호가 증가할수록 평균에너지는 점차적으로 증가하는 경향을 보였으며, 특히 백금(Pt)과 금(Au)에서 가장 높은 값이 나타났다.

Table 2. The average energy of 6, 15 MV according to the target materials [Unit : MeV]

	6 MV	15 MV
Be	1.70	3.40
C	1.69	3.38
Al	1.70	3.40
Ti	1.70	3.40
Fe	1.71	3.40
Cu	1.75	3.41
Mo	1.76	3.44
Ag	1.76	3.46
Ta	1.82	3.53
W	1.83	3.54
Pt	1.84	3.56
Au	1.84	3.56
Pb	1.83	3.54

Table 3은 6, 15 MV의 타깃 재질에 따른 광자선의 flux 결과이다. 표와 같이 타깃 재질의 원자번호가 높아질수록 광자 flux가 증가하는 경향을 보였다. 그 중 6 MV는 납(Pb)에서 가장 높은 값이 나타났고, 15 MV에서는 몰리브덴(Mo)과 은(Ag)이 가장 높게 나타났다.

Table 3. The number of photon flux of 6, 15 MV according to the target materials [Unit : #/cm^2/e]

	6 MV	15 MV
Be	1.65×10^{-5}	1.76×10^{-4}
C	1.64×10^{-5}	1.78×10^{-4}
Al	1.68×10^{-5}	1.80×10^{-4}
Ti	1.70×10^{-5}	1.83×10^{-4}
Fe	1.67×10^{-5}	1.83×10^{-4}
Cu	1.68×10^{-5}	1.83×10^{-4}
Mo	1.73×10^{-5}	1.85×10^{-4}
Ag	1.75×10^{-5}	1.85×10^{-4}
Ta	1.76×10^{-5}	1.81×10^{-4}
W	1.74×10^{-5}	1.79×10^{-4}
Pt	1.72×10^{-5}	1.77×10^{-4}
Au	1.74×10^{-5}	1.78×10^{-4}
Pb	1.80×10^{-5}	1.83×10^{-4}

Table 4는 타깃 재질에 따른 6, 15 MV 특성선의 광자 flux와 전체 광자 flux 대비 특성선의 백분율 결과이다. 6 MV 광자선의 특성선 광자 발생 수는 납(Pb)이 1.20×10^{-7} #/cm^2/e로 가장 높게 나타났고, 15 MV는 은(Ag)이 8.96×10^{-7} #/cm^2/e로 가장 높은 결과를 보였다. 6 MV 광자선에서 특성선 flux의 백분율은 0.657 ~ 0.715%, 15 MV는 0.478 ~ 0.500%를 보이며 전체적으로 1% 미만으로 나타났다.

Table 4. The Characteristic X-ray and percentage of characteristic X-ray flux of 6, 15 MV according to the target materials [Unit : #/cm^2/e]

	6 MV Number of Photon (%)	15 MV Number of Photon (%)
Be	1.18×10^{-7} (0.715)	8.77×10^{-7} (0.498)
C	1.17×10^{-7} (0.713)	8.84×10^{-7} (0.500)
Al	1.18×10^{-7} (0.702)	8.92×10^{-7} (0.496)
Ti	1.17×10^{-7} (0.688)	8.94×10^{-7} (0.488)
Fe	1.12×10^{-7} (0.671)	8.87×10^{-7} (0.485)
Cu	1.12×10^{-7} (0.667)	8.87×10^{-7} (0.485)
Mo	1.14×10^{-7} (0.659)	8.93×10^{-7} (0.483)
Ag	1.15×10^{-7} (0.657)	8.96×10^{-7} (0.484)
Ta	1.17×10^{-7} (0.665)	8.65×10^{-7} (0.478)
W	1.17×10^{-7} (0.672)	8.58×10^{-7} (0.479)
Pt	1.16×10^{-7} (0.674)	8.48×10^{-7} (0.480)
Au	1.17×10^{-7} (0.672)	8.47×10^{-7} (0.476)
Pb	1.20×10^{-7} (0.667)	8.75×10^{-7} (0.478)

Ⅳ. DISCUSSION

본 연구에서는 최적의 타깃 재질을 선정하고자 MCNPX를 이용하여 다양한 타깃 재질에 따른 6, 15 MV 광자선의 에너지스펙트럼을 산출하였다. 산출된 스펙트럼을 바탕으로 평균에너지, flux, 특성

선 등 광자의 물리적 특성을 분석하였다.

실험 결과 타깃 재질의 원자번호가 증가할수록 평균에너지와 flux는 증가하는 경향을 보였다. 이것은 타깃과 전자와의 상호작용으로 인한 광자 발생 효율이 타깃의 원자번호에 비례한 결과로 사료된다. B. J. Patil 등의 선행 연구에서는 여러 가지 타깃 재질에 따른 평균에너지를 분석하였다.[22] 타깃 재질의 원자번호가 증가할수록 평균에너지가 증가한다고 보고하였으며 이것은 본 연구와 부합하는 결과이다. 또한 V. N. Bhorasker 등의 연구에서는 타깃의 특정 두께에서 고원자번호일수록 flux가 증가하는 결과를 보이며 본 연구와 같은 경향성을 보였다.[24]

6 MV에서는 납이 가장 높은 flux를 보였고 15 MV 에서는 고원자번호인 납보다 몰리브덴과 은에서 광자 발생 효율이 근소하게 높은 것으로 나타났다. 그러나 현재 임상에서 많이 사용되고 있는 텅스텐 타깃과 비교하였을 때, 상대적으로 약 3% 정도로 유효한 차이를 보이지는 않았다. 일반적으로 의료용 선형가속장치는 타깃 재질로 텅스텐과 구리를 주로 이용한다. 저에너지에서는 텅스텐이 고원자번호이고 3,387 ℃의 높은 용융점과 상대적으로 저렴한 가격 등의 장점으로 많이 이용되고 있다. 또한 10 MV 이상의 고에너지에서는 광중성자의 발생을 고려해야 하므로 상대적으로 저원자번호이며 1,084 ℃의 용융점을 가진 구리의 활용도가 높다.[7] 하지만 구리에 비해 텅스텐은 용융점은 높지만 상대적으로 열전도율은 낮은 단점이 있다. 따라서 높은 열로 인해 타깃이 손상될 수 있기 때문에 상대적으로 열전도율이 좋은 구리를 조합하여 텅스텐의 단점을 개선시킬 수 있다.[18] 이처럼 상호보완적인 효과를 기대할 수 있는 새로운 타깃의 조합을 연구한다면 실제 임상에서 유용하게 사용될 수 있을 것으로 사료된다.

한편 고에너지 엑스선 치료 시, 타깃 재질의 원자번호가 증가할수록 광중성자의 발생도 증가하게 된다. 이렇게 광핵반응으로 발생되는 광중성자는 방사선방호의 대상이 된다.[25] 따라서 차후에는 이런 위해를 고려하여 저원자번호의 타깃 관련 연구가 이어져야 할 것이다.

Ⅴ. CONCLUSION

의료용 선형가속장치에서 최적의 타깃 선정을 위한 기초적인 자료를 제시하고자 13가지 타깃 재질을 선정하여 광자의 물리적 특성을 분석하였다.

타깃 재질의 원자번호가 증가할수록 평균에너지와 flux는 증가하는 경향성을 나타냈다. 그러나 현재 임상에서 사용되고 있는 텅스텐과 비교하였을 때, 평균에너지와 flux는 다른 타깃 재질과 상대적으로 큰 차이를 보이지는 않았다. 그러므로 광자의 물리적 특성뿐만 아니라 경제성과 효율성, 광핵반응으로 인한 중성자 발생 등의 다양한 인자를 고려한 적절한 타깃 선정이 필요할 것이다.

Acknowledgement

이 논문은 2016년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단-원자력연구개발사업부의 지원을 받아 수행된 연구임(No.NRF-2016M2B2A9A02944626)

Reference

[1] E. T. Park, “Study on the Characteristics of Photoneutron Produced in Medical Linear Accelerators,” Dept. of Radiological Science, Graduate School, Catholic University of Pusan, 2015.

[2] D. I. Thwaltes, J. B. Tuohy, “Back to the Future : the History and Development of the Clinical Linear Accelerator,” Physics in Medicine and Biology, Vol. 51, pp. 343-362, 2006.

[3] K. R. Seo, S. A. Kim, B. S. Kang, “Monte Carlo Simulation for Photon Spectrum of 6 MeV Electron Accelerator with different Target/Filter in thickness,” Journal of the Korean Society of Radiology, Vol. 9, No. 1, pp. 145-149, 2015.

[4] J. O. Lee, D. H. Jeong, S. R. Mun, “Calculation of Photon Spectra from the Tungsten Target for 10 MeV Electron Beam,“ Korean Journal of Medical Physics, Vol. 10, No. 1, pp. 55-62, 1999.

[5] J. O. Lee, D. H. Jeong, “Calculation of Energy Spectra for 6 MeV Electron Beam of LINAC Using MCNPX,” Korean Journal of Medical Physics, Vol. 17,

No. 4, pp. 224-231, 2006.

[6] S. S. Kang, D. K. Kweon, K. K. Kim, *Radiation Equipment 2nd edition*, Chunggu munhwasa, 2013.

[7] S. S. Kang, Y. H. Ko, K. J. Kim, *Radiation Therapeutics 3rd edition*, Chunggu munhwasa, 2014.

[8] N. Juntong, K. Pharanphan, "The Optimized X-ray Target of Electron Linear Accelerator for Radiotherapy," JACoW of IPAC 2016, pp. 1933-1935, 2016.

[9] J. K. Kim, J. H. Kim, B. K. Kim, "Energy Distribution of X-rays from Medical Linear Accelerator," Korean Journal of Medical Physics, Vol. 2, No. 1, pp. 29-35, 1991.

[10] Chibani O, MA CMC, "Photonuclear dose calculations for high-energy photon beams from Simens and Varian linacs". Medical Physics, Vol.30, No.8, pp.1990−.2000, 2003.

[11] Julian B, "Simulation of neutron production at a medical linear accelerator", Institute of Experimental Physics University of Hamburg, 2007.

[12] Rawlinson, J.A., Islam, M.K., Galbraith, D.M., "Dose to radiation therapists from activation at high-energy accelerators used for conventional and intensity-modulated radiation therapy" Medical Physics, Vol.29, No. 4, pp.598−.608, 2002.

[13] S. J. An, C. L. Lee, C. H. Baek, "Monte Carlo Simulation of a Varian 21EX Clinac 6 MV Photon Beam Characteristics Using GATE6," Journal of radiological science and technology, Vol. 39, No. 4, pp. 571-575, 2016.

[14] D. Sheikh-Baghen, D. W. O. Rogers, "Monte Carlo calculation of nine megavoltage photon beam spectra using the BEAM code," Medical Physics, Vol. 29, No. 3, pp. 391-402, 2002.

[15] E. T. Park, S. J. Ko, J. H. Kim, S. S. Kang, "Evaluation of Photoneutron Energy Distribution in the Radiotherapy Room," Journal of radiological science and technology, Vol. 37, No. 3, pp. 223-231, 2014.

[16] Y. H. Kim, "Dose Distribution Calculation Using MCNPX Code in the Gamma-ray Irradiation Cell," Department of Nuclear & Energy Engineering Graduate School Cheju National University, 2008.

[17] Pelowitz, Denise B., *MCNPX™ User's manual version 2.5.0*, Los Alamos National Laboratory, 2005.

[18] Qiang Gao, Hao Zha, Huaibi Chen, "Design and Optimization of the Target in Electron Linear Accelerator," JACoW of IPAC 2013, pp. 3663-3665, 2013.

[19] J. K. Baek, H. S. Jang, Y. K. Oh, "Monte Carlo Simulation of the Generation of 25 to 150 keV Photon Beams by Using GEANT4," New Physics: Sae Mulli, Vol. 66, No. 11, pp. 1450-1456, 2016.

[20] Xu Hai-Bo, Peng Xian-Ke, Chen Chao-Bin, "Monte Carlo simulation for bremsstrahlung and photoneutron yields in high-energy X-ray radiography," Chinese Physics B, Vol. 19, No. 6, 2010.

[21] M. Mamtimin, F. Harmon, V. N. Starovoitova, "Sc-47 Production from Titanium Targets using Electron linacs," Applied Radiation and Isotopes 102, pp. 1-4, 2015.

[22] V. N. Bhorasker, B. J. Patil, A. J. Patil et. al, "FLUKA simulation of 15 MeV linear accelerator based thermal neutron source for radiography," Indian Journal of Pure & Applied Physics, Vol. 50, pp. 814-817, 2012.

[23] A. R. Lipski, L. A. Orozco, M. R. Pearson et. al, "Gold and isotopocally enriched platinium targets for the production of radioactive beams of francium," Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 438, pp. 217-220, 1999.

[24] B. J. Patil, "Stuides on (ⅰ) Characterization of bremsstrahlung radiations for 6 to 18 MeV electron beam from different Z elements and (ⅱ) Devleopment of neutron source using MeV pulsed electron beam and their applications," The Partial Fulfillment for the Degree of Doctor of Philosophy in Department of Physics University of Pune, 2010.

[25] B. S. Park, J. H. Ahn, D. Y. Kwon, "The Effect of Photoneutron Dose in High Energy Radiotherapy," The journal of the korean society for radiotherapeutic technology, Vol. 25, No. 1, pp. 9-14, 2013.

pISSN : 1976-0620, eISSN : 2384-0633
"J. Korean Soc. Radiol., Vol. 11, No. 4, August 2017"

MCNP-code를 이용한 의료용 선형가속기의 타깃 재질에 따른 광자선 특성 분석

이동연,[1] 박은태,[2] 김정훈[3,*]

[1]동남권원자력의학원 방사선종양학과
[2]인제대학교 부산백병원 방사선종양학과
[3]부산가톨릭대학교 보건과학대학 방사선학과

요 약

의료용 선형가속장치의 두부 구성요소 중 광자 발생의 원인이 되는 타깃에 대한 연구로써, 타깃의 재질에 따른 광자를 분석하여 타깃 재질 별 발생하는 광자특성에 대한 기초자료를 제시하고자 한다. 본 연구에서는 몬테카를로 방식을 바탕으로 한 MCNPX를 사용하여 타깃 재질에 따른 6, 15 MV의 광자 특성을 비교 분석하였다. 타깃 재질 별 평균에너지는 6 MV에서 1.69 ~ 1.84 MeV, 15 MV에서는 3.38 ~ 3.56 MeV로 분석되었다. Flux는 6 MV에서 1.64×10^{-5} ~ 1.80×10^{-5} #/cm^2/e, 15 MV는 1.76×10^{-4} ~ 1.85×10^{-4} #/cm^2/e로 계산되었다. 결과를 분석하면, 타깃 재질이 고원자번호일수록 평균에너지와 Flux가 증가하는 것으로 평가다. 본 연구를 바탕으로 광자의 물리적 특성에 대한 기초적인 자료를 제시할 수 있었으며, 추후 타깃 선정 시 경제성, 효율성은 물론 물리적 측면을 고려할 수 있어 적절한 선택을 할 수 있을 것으로 판단된다.

중심단어: 타깃, MCNPX, 에너지스펙트럼, 평균에너지, 플럭스