

<원저>

고 에너지 양성자 가속기에서 생성되는 2차 방사선의 효과적인 차폐에 관한 연구

배상일¹⁾·김정훈²⁾¹⁾동남권원자력의학원 방사선종양학과·²⁾부산가톨릭대학교 방사선학과

Study on Effective Shielding of Secondary Radiation Generated by High Energy Proton Accelerator

Sang-Il Bae¹⁾·Jung-Hoon Kim²⁾¹⁾Dept. of Radiation Oncology, Dongnam Institute of Radiological & Medical Science²⁾Dept. of Radiological Science, College of Health Sciences, Catholic University

Abstract High-energy proton accelerators continue to be increasingly used in medical, research and industrial settings. However, due to the high energy of protons, a large number of secondary radiation occurs. Among them, neutrons are accompanied by difficulties of shielding due to various energy distribution and permeability. So In this study, we propose a shielding method that can shield neutrons most efficiently by using multiple-shielding material used as a decelerating agent or absorbent as well as a single concrete shielding. The flux of secondary neutrons showed a greater decrease in the flux rate when heavy concrete was used than in the case of ordinary concrete, and the maximum flux reduction was observed at the front position when using multiple shields. Multiple shielding can increase shielding efficiency more than single shielding however, As the thickness of the multiple shielding materials increased, the decline in flux was saturated. The mixture material showed higher shielding results than the polyethylene when using boron carbonate.

Key Words : High energy proton accelerator, Neutron, Multiple shielding, Shielding efficiency, MCNPX

중심 단어 : 고 에너지 양성자 가속기, 중성자 차폐, 다중차폐, 차폐효율, MCNPX

I. 서 론

고 에너지 양성자 가속기는 의료, 연구 및 산업 현장에서 지속적으로 사용이 증가되고 있는 추세이며, 암 환자의 치료, 동위원소의 생산, 개발의 의료분야뿐만 아니라 기초과학연구에 이용되고 있다. 국내에서 양성자를 이용한 암 치료는 2007년부터였으며, 기존 선형가속기를 이용한 방사선 치료와 비교했을 때, 우수한 선량을 조사할 수 있는 동시에 정상조직의 부작용을 최소화할 수 있는 장점이 있다[1-2].

그러나 사용되는 양성자선의 높은 에너지로 인해 생성되

는 2차선이 기존 가속기 사용시설과는 다르게 주변 물질과 상호작용을 하여 중성자, 감마선 등 수 많은 핵종들을 방출한다. 이에 새로운 방식의 방사선 차폐와 출입자의 피폭에 대한 안전관리가 필요하다[3].

특히, 생성 2차 중성자의 경우 열중성자에서부터 수백 MeV까지 다양한 에너지를 생성한다. 또한, 전하를 띠지 않아 투과력이 강하고, 핵과의 반응으로 에너지 손실을 일으키기 때문에 관리 및 방사선차폐를 포함한 시설의 방호 측면에서 큰 문제점을 발생한다[4-5].

흔히 가속기 시설의 차폐체를 구성할 때 가장 보편적이고

This work was supported by the Dongnam institute of Radiological & Medical Sciences(DIRAMS) grant funded by the Korea government(MSIT) (No.50600-2020)

Corresponding author: Jung-Hoon Kim, Department of Radiological Science College of Health Sciences, Catholic University, 57, Oryundae-ro, Geumjeong-gu, Busan, 46252, Republic of Korea / Tel: +82-51-510-0583 / E-mail: donald@cup.ac.kr

Received 21 August 2020; Revised 7 October 2020; Accepted 17 October 2020

Copyright ©2020 by The Korean Journal of Radiological Science and Technology

경제적으로 사용되는 차폐물질은 콘크리트이다. 콘크리트의 경우 물질의 혼합에 따라서 서로 다른 밀도와 구성 성분을 가져 다양한 차폐효과를 기대할 수 있다. 중성자 차폐를 위하여 콘크리트와 탄소, 붕소 등 감속재를 추가한 다중차폐는 기존의 단일차폐에 비해서 생성되는 중성자 선속을 효과적으로 감소시키는 효과를 나타낸다. 하지만 중성자 차폐를 위해 감속물질을 지속적으로 증가시킬수록 콘크리트의 밀도 감소로 인해 역학적 성능이 저하되는 문제점이 발생한다[6-7].

따라서 본 연구에서는 입자 가속기의 차폐분야에 활용되고 있는 몬테카를로 모의모사를 이용하여 양성자 가속기와 차폐물질 그리고 콘크리트 종류에 따른 중성자의 선속과 다중차폐 시 중성자 선속 등을 비교하고자 한다. 이를 바탕으로 고에너지 양성자 가속기 시설의 효과적인 차폐물질을 선정하고 다중차폐물질의 위치, 두께 등을 변화시켜 효과적인 중성자 차폐의 방법을 제시하고자 한다.

II. 대상 및 방법

본 연구는 고 에너지 양성자 가속기 시설의 2차 방사선을 효과적으로 차폐하기 위해 일반, 중량 콘크리트를 이용한 단일차폐에서부터 중성자 차폐에 효과적인 다중차폐를 비교하였다.

고 에너지 양성자와 상호작용으로 차폐체 내에 발생하는 2차선의 경우 실측의 한계가 있다. 또한, 생성되는 중성자의 경우 에너지에 따라서 그 상호작용의 과정이 상이하므로 이를 에너지에 따라 구분할 필요가 있다.

따라서 본 연구에서는 가속기 시설 구성단계에서 처분단계까지 널리 사용되는 몬테카를로 기법을 이용한 모의실험을 수행하였다.

1. 몬테카를로 법

본 실험에서는 몬테카를로법을 사용하는 MCNPX (Monte Carlo N-Particle Extended ver 2.7.0)를 사용하여 계산을 수행하였다. 몬테카를로법이란 무작위의 수를 이용하여 방정식이나 적분의 해를 찾는 통계적 방법으로 방사선분야의 선량측정, 계측, 차폐분야에 널리 활용되고 있다[8].

2. 가속기의 모의모사 및 선원항 평가

본 연구에서는 국내에 도입된(Ion Beam Application; IBA)사의 고에너지 양성자 가속기 노즐을 바탕으로 MCNPX-code

를 이용하여 모의모사 하였으며 양성자의 에너지는 220 MeV로 설정하였다[9].

실험에 앞서 모의모사의 신뢰도를 확보하기 위하여 양성자 가속기의 모의모사 된 Bragg peak를 양성자 비정에 대한 국제적으로 표준화된 자료를 제공 하고 있는 미국 표준 연구소(National Institute of Standards and Technology; NIST)자료와 비교하여 모의모사 된 양성자 치료기의 신뢰도를 확보하였다[10].

양성자 비정을 계산하는 방법은 물 팬텀(80 cm × 80 cm × 80 cm)을 0.1 cm 간격으로 관심영역을 지정한 후, 국제 방사선 단위 측정 위원회(International Commission on Radiation Units and Measurements; ICRU) publication 78(2007)에서 권고하는 있는 (Source Surface Distance; SSD) 300 cm인 지점에 위치시켜 양성자 에너지 150, 180, 200, 220, 250 MeV에 대한 비정을 획득하여 표준자료와 비교를 하였다[11].

Bragg peak energy spectrum을 구현하기 위하여 단위 질량당 흡수선량 (MeV/g)을 가지는 Tally 6을 사용하였으며 오차를 5% 이하로 줄이고 신뢰도를 확보하기 위하여 10⁸ 번의 반복실험을 하였다.

3. 차폐체의 모의모사

국제 방사선 단위 측정 위원회(International Commission on Radiation Units and Measurements; ICRU)에서 지정한 크기 30 cm × 30 cm × 15 cm slab phantom을 양성자 빔으로부터 50 cm거리에 위치시키고, 생성되는 중성자의 단일차폐 및 다중차폐 성능을 비교하기 위해서 팬텀의 후방에 차폐물질로 다중 차폐물질을 모의모사 하였다. 실험에 대한 개략도는 Fig. 1과 같다.

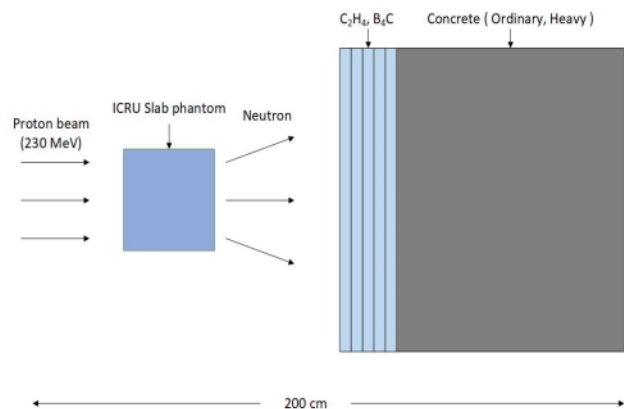


Fig. 1. schematic draw of shielding simulation setup

Table 1. Material of composition for MCNP simulation^[12]

Element	Weight Fraction (%)													Density (g/cc)
	H	O	Si	Ca	C	Mg	Al	S	K	Fe	Ti	V	B	
Ordinary Concrete	0,008	0,473	0,145	0,246	-	0,024	0,036	0,003	0,001	0,011	-	-	-	2,35
Heavy Concrete	0,002	0,138	0,016	0,055	-	0,003	0,01	-	-	0,75	0,016	0,001	-	4,64
Polyethylene	0,14	-	-	-	0,96	-	-	-	-	-	-	-	-	0,00118
Polyethylene + borated	0,13	-	-	-	0,77	-	-	-	-	-	-	-	0,1	1,00

Table 1에서는 실험재료의 구성성분과 밀도를 나타내었다.

차폐 비교를 위한 단일차폐체로는 일반 콘크리트, 중량 콘크리트를 모의모사 하였으며, 다중차폐체로는 산란 단면적이 높은 폴리에틸렌을 함유한 다중차폐 콘크리트 및 중성자 흡수 능력이 뛰어난 보론카보네이트를 함유한 다중차폐 콘크리트로 구성하였다. 다중차폐물질의 효과적인 배치를 위하여 50 cm 두께의 폴리에틸렌을 일반 콘크리트의 전면, 중간, 후면에 각각 위치시켜 중성자 선속을 산출하였다.

폴리에틸렌의 두께 10 cm와 보론카보네이트 두께 10 cm를 비교하기 위해 일반 콘크리트와 중량 콘크리트 전면에 모의모사를 통해 차폐효율의 차이를 비교하였으며, 폴리에틸렌의 경우 두께를 10 cm에서 60 cm까지 증가시키며 중성자 선속을 분석하였다. 본 실험을 위해서는 콘크리트의 전체 선속을 산출하기 위해서 Mesh Tally가 사용되었으며, 각 실험은 오차를 5% 이하로 줄이고 신뢰도를 확보하기 위하여 10^8 번 반복실험을 수행하였다.

III. 결 과

1. 선원향의 평가

모의모사를 통해 얻어진 Bragg peak spectrum은 미국 표준연구소(National Institute of Standards and Technology; NIST)의 양성자 비정 자료와 비교하였다[10].

Fig. 2는 본 실험에서 획득한 양성자 비정을 나타내었으며, Table 2에서는 모의모사 된 양성자 비정과 미국 표준연구소(National Institute of Standards and Technology; NIST)의 비정을 비교한 결과이다. 비교 결과 150~200 MeV의 실험 에너지에서 5% 이내의 일치율을 나타내었다.

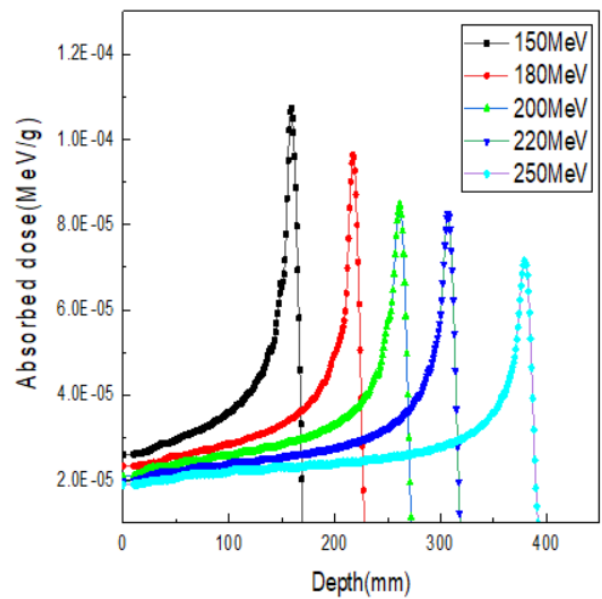


Fig. 2. Spectrum of bragg peak energy range 150 to 250 MeV proton in water phantom

Table 2. Range in water compared to reference data for proton beam

Energy (MeV)	Range (cm)		Difference(%)
	NIST	This study	
150	15,7	16,4	4,4
180	21,6	22,2	2,7
200	25,9	26,5	2,7
220	30,5	31,1	1,9
250	37,9	38,2	0,8

2. 다중 차폐체의 최적위치 결정방법

다중차폐의 위치에 따른 콘크리트 전체의 선속은 콘크리트 전면에 위치시킬 경우에 3×10^{-8} #/ cm² / p, 중간에 위

치시킬 경우 2.4×10^{-7} #/ cm^2 /p, 후면에 위치시킬 경우 1.22×10^{-7} #/ cm^2 /p으로 전면에 위치시킬 경우 가장 낮은 중성자 투과 선속을 나타낸다.

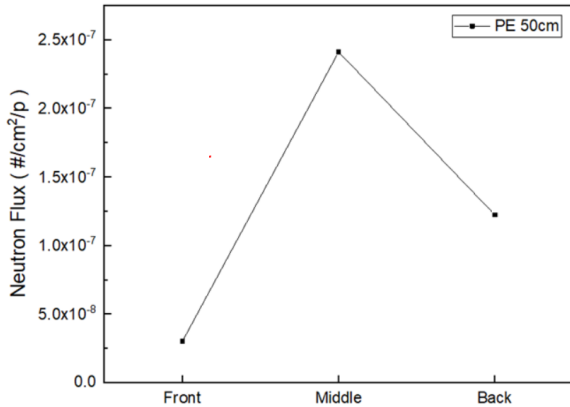


Fig. 3. Location of shielding material

3. 다중차폐에 대한 결과

Table 3에서 일반 콘크리트의 경우 2.4×10^{-7} #/ cm^2 /p의 중성자 선속을 중량 콘크리트의 경우 9.7×10^{-8} #/ cm^2 /p의 선속을 보였으며 일반 콘크리트에 비해 중량 콘크리트의 사용 시 약 72.1%의 중성자 선속이 줄어드는 것으로 나타났다.

Table 3. Results of neutron flux by thickness with polyethylene added to ordinary concrete and heavy concrete

Thickness (cm)	Ordinary Concrete+polyethylene	Heavy Concrete+polyethylene
	Neutron Flux [Unit : #/cm ² /particle]	
Reference	2,38E-07	9,79E-08
10 cm	1,60E-07	6,74E-08
20 cm	1,17E-07	5,01E-08
30 cm	9,58E-08	4,16E-08
40 cm	8,02E-08	3,51E-08
50 cm	6,83E-08	3,01E-08
60 cm	5,88E-08	2,60E-08

Table 4. Comparison the results of adding boron carbide and polyethylene to ordinary concrete and heavy concrete

Material	Ordinary Concrete	Heavy Concrete
	Neutron Flux [Unit : #/cm ² /particle]	
Concrete	2,38E-07	9,79E-08
Added 10 cm Boron	1,48E-07	6,26E-08
Added 10 cm PE	1,60E-07	6,74E-08

일반 콘크리트와 폴리에틸렌의 다중차폐의 경우 10 cm, 20 cm, 30 cm, 40 cm, 50 cm, 60 cm의 추가 시에 폴리에틸렌이 없는 상태와 비교하여 33%, 52%, 59%, 63%, 72%, 76%의 선속의 감쇠를 보였으며 점차 포화되는 경향을 나타냈다. 중량 콘크리트와 폴리에틸렌의 다중차폐의 경우 10 cm, 20 cm, 30 cm, 40 cm, 50 cm, 60 cm의 폴리에틸렌의 추가 시에 폴리에틸렌 차폐체가 없는 상태와 비교하여 31%, 49%, 57%, 64%, 69%, 72%의 감쇠를 보였으며 점차 포화되는 경향을 나타냈다.

Table 4에서 폴리에틸렌과 보론 카보네이트의 다중차폐 비교실험에서는 일반 콘크리트 단일 차폐에 비해 보론 카보네이트의 추가 시에는 약 62.1%, 폴리에틸렌 추가 시에는 약 67.2%의 중성자 선속의 감쇠를 보였다. 중량 콘크리트에 보론 카보네이트 추가 시 다중차폐물질은 약 63.9%, 폴리에틸렌 다중차폐물질은 약 68.8%의 중성자 선속의 감쇠를 나타내었다. 일반 콘크리트와 중량 콘크리트에 보론 카보네이트와 폴리에틸렌을 혼합 시 중성자 선속이 확연하게 감소하는 것을 보였고, 보론 카보네이트 다중차폐의 경우가 폴리에틸렌보다 중성자 선속의 감소가 나타났으나 그 차이는 미비했다.

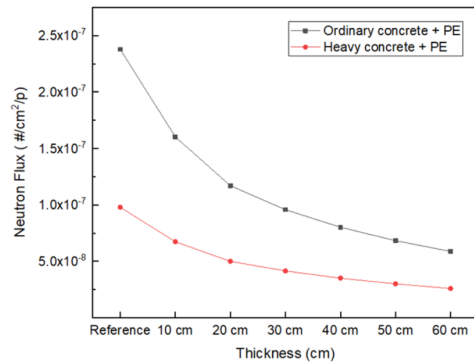


Fig. 4. Results of neutron flux by thickness with polyethylene added ordinary and heavy concrete

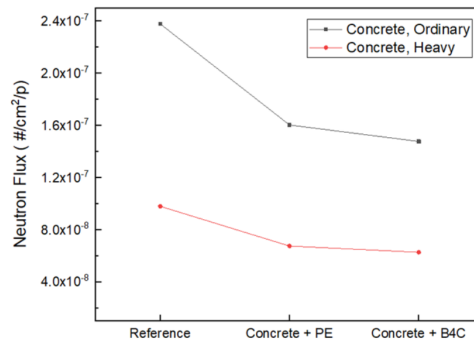


Fig. 5. Comparison results of polyethylene and boron carbide added to ordinary concrete and heavy concrete

IV. 고 찰

본 연구에 모의모사 된 양성자 가속기의 경우 국제 방사선 단위 측정 위원회(International Commission on Radiation Units and Measurements; ICRU)의 기준에 따라서 팬텀을 위치하고 그 결과를 미국 표준연구소(National Institute of Standards and Technology; NIST)의 비정정보와 비교하여 선원향을 평가하였으며, 그 결과 5% 이내의 비정 일치율을 나타냈다.

일반 콘크리트와 중량 콘크리트를 비교하였을 때, 중량 콘크리트에서 차폐효율이 높은 것으로 확인되었다. 이는 상대적으로 중량 콘크리트의 높은 밀도 특성과 원자번호가 높은 물질인 철의 함유량이 높기 때문인 것으로 사료된다[13].

단일차폐와 다중차폐의 비교 결과에서는 다중차폐의 활용이 중성자의 차폐효율을 높일 수 있는 것으로 나타났다 이는 Park J-Y(2018)의 논문과 동일한 결과를 나타내지만 중성자의 경우 이동 거동이 복잡하며 생성 에너지에 따라 차폐의 성능이 달라지므로 에너지에 따라서 데이터를 확보할 필요가 있을 것으로 사료된다[14-15].

이는 중성자 차폐를 위해서는 중성자의 반송도를 높일 수 있도록 1차적으로 중성자 에너지를 감속시킬 수 있는 원자번호가 낮은 물질의 함유가 영향을 준 것으로 사료된다.

또한, 다중차폐 위치는 콘크리트 전면에 위치 시 가장 큰 감쇠를 보였으므로, 건축의 제약점을 동반하지 않는다면 다중차폐 물질을 전면에 배치하는 것이 중성자의 선속을 효과적으로 감쇠시킬 수 있을 것으로 사료된다[16].

다중차폐 시 중성자를 효과적으로 줄일 수 있는 흡수제로 원자번호가 낮은 폴리에틸렌 및 보론 카보네이트가 일반적으로 제안되어왔으며, 이를 모의모사 실험으로 비교한 결과 보론 카보네이트에서 차폐효과가 높았으나 그 정도는 미미한 수준으로 분석되었다. 이는 폴리에틸렌은 중성자 산란을 일으켜 에너지를 감속시키는 역할을 하는 반면, 보론은 중성자를 산란함과 동시에 흡수하는 물질이기 때문인 것으로 추론된다[17-18].

V. 결 론

본 논문에서는 고 에너지 양성자 가속기 시설에서 발생하는 2차 방사선, 특히 중성자 차폐 관련 자료를 수집하고 다양한 중성자 차폐물질에 대한 중성자 선속의 감속 등을 계산하였다.

그 결과 다중차폐로 설계하고 콘크리트 재질은 중량 콘크

리트에 흡수제는 보론 카보네이트를 사용하는 것이 가장 효율적인 차폐 방안으로 판단된다.

그러나 이는 단순한 수치로 해석을 한 부분이며, 실제 설계에서는 차폐효율과 함께 시공성, 경제성 등을 고려하여야 하며, 특히 중성자의 경우 물질의 방사화를 일으킬 수 있기 때문에 차폐 재질 선택에 있어서 신중해야 할 것으로 사료된다.

본 연구를 바탕으로 양성자 가속기 시설의 차폐와 함께 중성자 차폐 설계에 있어서 기초적인 자료로서 사용될 수 있을 것으로 생각된다.

REFERENCES

- [1] Lee BC, Kim HI. Shielding technology for high energy radiation production facility. Korea Atomic Energy Research Institute; 2004.
- [2] Choi SG. Literature review of clinical usefulness of heavy ion particle as a new advanced cancer therapy. *Journal of Radiological Science and Technology*. 2019;42(6):413-22.
- [3] Hwang SY, Kim YJ, Lee SW. Evaluation of residual radioactivity and dose rate of a target assembly in an IBA cyclotron. *Journal of Radiological Science and Technology*. 2016;39(4):643-9.
- [4] Agosteo S, Birattari C, Caravaggio M, Silari M, Tosi G. Secondary neutron and photon dose in proton therapy. *Radiotherapy and Oncology*. 1998;48(3):293-305.
- [5] Howell RM, Burgett E. Secondary neutron spectrum from 250-MeV passively scattered proton therapy: Measurement with an extended-range Bonner sphere system. *Medical Physics*. 2014;41(9):092104.
- [6] Agosteo S, Magistris M, Mereghetti A, Silari M, Zajacova Z. Shielding data for 100-250 MeV proton accelerators: Double differential neutron distributions and attenuation in concrete. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*. 2007;265(2):581-98.
- [7] Yilmaz E, Baltas H, Kırıs E, Ustabas İ, Cevik U, El-Khayatt A. Gamma ray and neutron shielding properties of some concrete materials. *Annals of*

- Nuclear Energy. 2011;38(10):2204-12.
- [8] Waters LS. MCNPX user's manual. Los Alamos National Laboratory; 2002.
- [9] Smith AR. Proton therapy. Physics in Medicine & Biology. 2006;51(13):R491.
- [10] <https://www.ptcog.ch/>
- [11] Newhauser W. International commission on radiation units and measurements report 78: prescribing, recording and reporting proton-beam therapy. Oxford University Press; 2009.
- [12] McConn RJ, Gesh CJ, Pagh RT, Rucker RA, Williams III R. Compendium of material composition data for radiation transport modeling. Pacific Northwest National Lab.(PNNL), Richland, WA (United States); 2011.
- [13] Yang SK, Um TS, Lee JR, Kim YH, Wu SI, Kim TB. Properties of heavyweight concrete for radiation shielding. Proceedings of the Korea Concrete Institute Conference; 2008.
- [14] Park JY, Jee HS, Bae SC. Evaluation of neutron shielding performance of polyethylene coated boron carbide-incorporated cement paste using MCNP simulation. Journal of the Korea Institute of Building Construction. 2018;18(2):114-5.
- [15] Saryer D, Küçer R, Küçer N. Neutron shielding properties of concretes containing boron carbide and ferro-boron. Procedia-Social and Behavioral Sciences. 2015;195:1752-6.
- [16] Keshavamurthy R, Subramanian DV, Prasad RR, Haridas A, Mohanakrishnan P, Chetal S. Experimental measurements of neutron attenuation in the advanced shield material ferro boron in KAMINI reactor. Energy Procedia. 2011;7:273-8.
- [17] Martin JE. Physics for radiation protection. Wiley Online Library; 2013.
- [18] Abdullah Y, Mohamed AA. Properties of concrete/boron carbide as neutron shielding materials. Journal of Nuclear and Related Technologies. 2011;8(02):15-25.

구분	성명	소속	직위
제1저자	배상일	동남권원자력의학원	방사선사/대학원생(박사)
교신저자	김정훈	부산가톨릭대학교	교수