

Билалодін^{1,2,*}, Г. Б. Супарта¹, А. Ерманто¹, Д. С. Палупі¹, Ю. Сарджоно³, Расіто⁴

¹ Кафедра фізики, факультет математики і природничих наук, університет Гаджа Мада, Джокьякарта, Індонезія

² Кафедра фізики, факультет математики та природничих наук, університет Джендерал Соедірман, Пурвокерто, Індонезія

³ Центр прискорювальної науки і техніки, Національне агентство з ядерної енергії, Джокьякарта, Індонезія

⁴ Центр науки і прикладних ядерних технологій, Бандунг, Індонезія

Відповідальний автор: bilalodin.unsoed@gmail.com

ОПТИМІЗАЦІЯ ТА АНАЛІЗ РОЗПОДІЛУ НЕЙТРОНІВ У ДВОШАРОВІЙ СИСТЕМІ ФОРМУВАННЯ ПУЧКА НА ЦИКЛОТРОНІ 30 МЕВ

Проектування та оптимізація пучка нейтронів за допомогою двошарової системи формування пучка (ДШСФП) проводилися з використанням коду MCNPX. Формування пучка здійснюється з конструкцією, яка зазвичай включає подвійний модератор, рефлектор, коліматор і фільтр. Оптимізація різних комбінацій матеріалів, що входять до модератора, рефлектора і фільтра, забезпечує якість і інтенсивність пучків, що відповідають вимогам бор-нейтронзахватної терапії. Для модератора використовуються алюміній і ViF_3 , для рефлектора – свинець і графіт, для коліматора – нікель і поліетиленборат, для фільтра – залізо і кадмій. Типовими параметрами пучка, вимірними на виході з коліматора, є потік епітермальних нейтронів $1,1 \cdot 10^9$ н/см²·с, відношення потоку епітермальних нейтронів до потоку теплових і швидких нейтронів відповідно 344 і 85, а також відношення дози від швидких нейтронів і гамма-квантів до потоку епітермальних нейтронів $1,09 \cdot 10^{-13}$ та $1,82 \cdot 10^{-13}$ Гр·см², відповідно. Аналіз потоку епітермальних нейтронів і спектра пучка нейтронів за допомогою коду PHITS показує, що розподіл епітермальних нейтронів розширюється в ДШСФП. Найбільша інтенсивність спостерігається в модераторі і знижується в коліматорі і фільтрі. Спектр нейтронного пучка має вузький викид із піком при 10 кеВ.

Ключові слова: оптимізація двошарового пучка нейтронів, розподіл нейтронів, код MCNPX, код PHITS.

Билалодін^{1,2,*}, Г. Б. Супарта¹, А. Ерманто¹, Д. С. Палупі¹, Ю. Сарджоно³, Расіто⁴

¹ Кафедра фізики, факультет математики і естественных наук, університет Гаджа Мада, Джокьякарта, Індонезія

² Кафедра фізики, факультет математики і естественных наук, університет Джендерал Соедірман, Пурвокерто, Індонезія

³ Центр ускорительной науки і техніки, Національне агентство по ядерной енергии, Джокьякарта, Індонезія

⁴ Центр науки і прикладних ядерних технологій, Бандунг, Індонезія

*Ответственный автор: bilalodin.unsoed@gmail.com

ОПТИМИЗАЦИЯ И АНАЛИЗ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НЕЙТРОНОВ В ДВУХСЛОЙНОЙ СИСТЕМЕ ФОРМИРОВАНИЯ ПУЧКА НА ЦИКЛОТРОНЕ 30 МэВ

Проектирование и оптимизация пучка нейтронов с помощью двухслойной системы формирования пучка (ДССФП) проводились с использованием кода MCNPX. Формирование пучка осуществляется с конструкцией, которая обычно включает двойной модератор, рефлектор, коллиматор и фильтр. Оптимизация различных комбинаций материалов, входящих в модератор, рефлектор и фильтр, обеспечивает качество и интенсивность пучков, отвечающих требованиям бор-нейтронзахватной терапии. Для модератора используются алюминий и ViF_3 , для рефлектора – свинец и графит, для коллиматора – никель и полиэтиленборат, для фильтра – железо и кадмий. Типичными параметрами пучка, измеренными на выходе из коллиматора, является поток эпитермальных нейтронов $1,1 \cdot 10^9$ н/(см²·с), отношение потока эпитермальных нейтронов к потоку тепловых и быстрых нейтронов соответственно 344 и 85, а также отношение дозы от быстрых нейтронов и гамма-квантов к потоку эпитермальных нейтронов $1,09 \cdot 10^{-13}$ и $1,82 \cdot 10^{-13}$ Гр·см² соответственно. Анализ потока эпитермальных нейтронов и спектра пучка нейтронов с помощью кода PHITS показывает, что распределение эпитермальных нейтронов расширяется в ДССФП. Наибольшая интенсивность наблюдается в модераторе и снижается в коллиматоре и фильтре. Спектр нейтронного пучка имеет узкий выброс с пиком при 10 кеВ.

Ключевые слова: оптимизация двухслойного пучка нейтронов, распределение нейтронов, код MCNPX, код PHITS.

Bilalodin^{1,2,*}, G. B. Suparta¹, A. Hermanto¹, D. S. Palupi¹, Y. Sardjono³, Rasito⁴

¹ Department of Physics, Faculty of Mathematics and Natural Science, Gajah Mada University, Yogyakarta, Indonesia

² Department of Physics, Faculty of Mathematics and Natural Science, Jenderal Soedirman University, Purwokerto, Indonesia

³ Center for Accelerator Science and Technology, National Nuclear Energy Agency, Yogyakarta, Indonesia

⁴ Center for Science and Applied Nuclear Technology, Bandung, Indonesia

*Corresponding author: bilalodin.unsoed@gmail.com

OPTIMIZATION AND ANALYSIS OF NEUTRON DISTRIBUTION ON 30 MeV CYCLOTRON-BASED DOUBLE LAYER BEAM SHAPING ASSEMBLY (DLBSA)

Design and optimization of double layer Beam Shaping Assembly (DLBSA) has been conducted using the MCNPX code. The BSA is configured to comply with such a construction having typically a double moderator, a reflector, a collimator, and a filter. The optimization of various combinations of materials that compose the moderator, reflector, and filter yields such quality and intensity of radiation beams that conform to the requirements for Boron Neutron Capture Therapy. The composing materials are aluminum and BiF₃ for moderator, lead and graphite for the reflector, nickel and polyethylene borate for the collimator, and iron and cadmium for the filter. Typical beam parameters measured at the exit of the collimator are epithermal neutron flux of $1.1 \cdot 10^9$ n/(cm²·s), the ratio of epithermal neutron flux to thermal neutron and fast neutron flux 344 and 85, respectively, and the values of fast neutron and gamma dose to epithermal neutron flux $1.09 \cdot 10^{-13}$ Gy·cm² and $1.82 \cdot 10^{-13}$ Gy·cm², respectively. Analysis of epithermal neutron flux and neutron beam spectrum using the PHITS code reveals that the distribution of epithermal neutron spreads out in the DLBSA. The highest intensity is found in the moderator and decline downstream of the collimator and filter. The spectrum of neutron beams displays a narrow spike with that peaks at 10 keV.

Keywords: optimization of DLBSA, neutron particle distribution, MCNPX code, PHITS code.

REFERENCES

1. W.A.G. Sauerwein. *Neutron Capture Therapy* (New York: Springer, 2012).
2. H. Tanaka et al. Experimental verification of beam characteristics for cyclotron-based epithermal neutron source (CBENS). *Applied Radiation and Isotopes* 69(12) (2011) 1642.
3. Y. Hashimoto, F. Hiraga, Y. Kiyonagi. Effects of proton energy on optimal moderator system and neutron-induced radioactivity of compact accelerator-driven ⁹Be(p, n) neutron sources for BNCT. *Physics Procedia* 60 (2014) 332.
4. A. Burlon et al. Design of a beam shaping assembly and preliminary modeling of a treatment room for accelerator-based BNCT at CNEA. *Applied Radiation and Isotopes* 69 (1) (2011) 1688.
5. M. Monshizadeh et al. MCNP design of thermal and epithermal neutron beam for BNCT at the Isfahan MNSR. *Progress in Nuclear Energy* 83 (2015) 427.
6. F.S. Rasouli, S.F. Masoudi. Design and optimization of a beam shaping assembly for BNCT based on D–T neutron generator and dose evaluation using a simulated head phantom. *Applied Radiation and Isotopes* 70(12) (2012) 2755.
7. C. Dao-Wen et al. Designing of the 14 MeV neutron moderator for BNCT. *Chinese Physics C* 36(9) (2012) 905.
8. M. Adib. Simulation study of accelerator based quasi-mono-energetic epithermal neutron beams for BNCT. *Applied Radiation and Isotopes* 107 (2016) 98.
9. M. Asnal, T. Liamsuwan, T. Onjun. An Evaluation on the Design of Beam Shaping Assembly Based on the D-T reaction for BNCT. *Journal of Physics: Conference Series* 611 (2015) 012031.
10. Y. Kasesaz, H. Khala, F. Rahmani. Optimization of the beam shaping assembly in the D–D neutron generators-based BNCT using the response matrix method. *Applied Radiation and Isotopes* 82 (2013) 55.
11. S.F. Masoudi, F.S. Rasouli. BNCT of skin tumors using the high-energy D-T neutrons. *Applied Radiation and Isotopes* 122 (2017) 158.
12. International Atomic Energy Agency. *Current Status of Neutron Capture Therapy* (Vienna, 2001).
13. D.B. Pelowitz. *MCNPX™ User Manual version 2.6.0*. (Los Alamos National Laboratory, 2008).
14. Y. Sato et al. Particle and Heavy Ion Transport code System, PHITS, version 2.52. *Journal of Nuclear Science and Technology* 50 (2013) 913.
15. K. Ono. Experience of BNCT by KUR and start of clinical BNCT by small Cyclotron Based Neutron Generator in KURRI. Intern. Symp. the Application of Nuclear Technology to Support National Sustainable Development. 2015. Solotiga.
16. T. Mitsumoto et al. BNCT System Using 30 MeV H⁻ Cyclotron. *Proceedings of Cyclotron* (2010) p. 430.
17. S.V. Ivakhin et al. Modeling of Filters for Formation of Mono-Energetic Neutron Beams in the Research Reactor IRT MEPhI. In: *Proc. of GLOBAL. Makuhari, Japan, 2011, paper No. 392341*.
18. C.W. Ma et al. Neutron-induced reactions on AlF₃ studied using the optical model. *Nuclear Instruments and*

[Methods in Physics Research B 356-357 \(2017\) 42.](#)

19. J.G. Fantidis. Optimised BNCT facility based on a compact D-D neutron generator. [International Journal of Radiation Research 11\(4\) \(2013\) 207.](#)
20. Y. Osawa et al. Development of An Epi-thermal Neutron Field for Fundamental Researches for BNCT with A DT Neutron Source. [EPJ Web of Conferences 153 \(2017\) 04008.](#)
21. F. Faghihi, S. Khalili. Beam shaping assembly of a DT neutron source for BNCT and its dosimetry simulation in deeply-seated tumor. [Radiation Physics and Chemistry 89 \(2013\) 1.](#)
22. D.A. Allen, T.D. Beynon. A design study for an accelerator-based epithermal neutron beam for BNCT. [Phys. Med. Biol. 40 \(1995\) 807.](#)
23. J.C. Yanch et al. Accelerator-based epithermal neutron beam design for neutron capture therapy. [Med. Phys. 9\(13\) \(1992\) 709.](#)

Надійшла 02.09.2018

Received 02.09.2018