

В. О. Желтоножський, Д. Є. Мизніков, А. М. Саврасов*, В. І. Слісенко, Н. В. Куліч

Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна

*Відповідальний автор: asavrasov@kinr.kiev.ua

ДОСЛІДЖЕННЯ АКТИВАЦІЇ ^{67}Cu В (γ, p) -РЕАКЦІЇ ПРИ $E_{\text{br}} = 19 \text{ MeV}$

Уперше виміряно середньозважений вихід (γ, p) -реакції на ^{68}Zn при граничній енергії гальмівних γ -квантів 19 MeV. Отримана величина дорівнює 624(56) мкб. Проведено моделювання отриманого виходу в рамках програмного пакета TALYS-1.96. Констатується значний внесок нестатистичного механізму в перебіг реакції $^{68}\text{Zn}(\gamma, p)^{67}\text{Cu}$ при граничній енергії 19 MeV. Показана висока економічна ефективність напрацювання ^{67}Cu на цинку, збагаченому ізотопом ^{68}Zn при величинах енергії електронів в області 20 MeV.

Ключові слова: ^{67}Cu , фотоактиваційний метод, середньозважений вихід, TALYS-1.96.

V. O. Zheltonozhsky, D. E. Myznikov, A. M. Savrasov*, V. I. Slisenko, N. V. Kulich

Institute for Nuclear Research, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

*Corresponding author: asavrasov@kinr.kiev.ua

STUDY OF ^{67}Cu ACTIVATION IN (γ, p) -REACTION AT $E_{\text{br}} = 19 \text{ MeV}$

For the first time, the flux-weighted average yield of the (γ, p) -reaction on ^{68}Zn was measured at a bremsstrahlung end-point energy of 19 MeV. The obtained value is 624(56) μb . The obtained yield was calculated within the framework of the TALYS-1.96 code. A significant contribution of the non-statistical mechanism for the $^{68}\text{Zn}(\gamma, p)^{67}\text{Cu}$ reaction is noted at a bremsstrahlung end-point energy of 19 MeV. High economic efficiency of ^{67}Cu production is shown on zinc enriched with the ^{68}Zn isotope at electron energy values in the region of 20 MeV.

Keywords: ^{67}Cu , photoactivation method, flux-weighted average yield, TALYS-1.96.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ / REFERENCES

1. National Nuclear Data Center (NNDC), Brookhaven National Laboratory. NuDat 3.0: Decay Radiation Search, ^{67}Cu .
2. P. Baberwal, S. Sonavane, S. Basu. The current status and promising potential of copper-based radiopharmaceutical development towards future theranostics: an overview. *Nucl. Med. Comm.* 46(9) (2025) 781.
3. J.Y. Lee et al. Theragnostic $^{64}\text{Cu}/^{67}\text{Cu}$ radioisotopes production with RFT-30 cyclotron. *Front. Med.* 9 (2022) 889640.
4. N.A. Smith, D.L. Bowers, D.A. Ehst The production, separation, and use of ^{67}Cu for radioimmunotherapy: A review. *Appl. Radiat. Isot.* 70(10) (2012) 2377.
5. S.A. Brühlmann et al. Cyclotron-based production of ^{67}Cu for radionuclide theranostics via the $^{70}\text{Zn}(p,\alpha)^{67}\text{Cu}$ reaction. *Pharmaceuticals* 16(2) (2023) 314.
6. G. Wang et al. Research on zinc electrodeposition for target preparation in medical isotope ^{67}Cu production. *Appl. Radiat. Isot.* 226 (2025) 112170.
7. J. Kozempel et al. Preparation of ^{67}Cu via deuteron irradiation of ^{70}Zn . *Radiochim. Acta* 100(7) (2012) 419.
8. Ye. Skakun, S.M. Qaim. Excitation function of the $^{64}\text{Ni}(\alpha,p)^{67}\text{Cu}$ reaction for production of ^{67}Cu . *Appl. Radiat. Isot.* 60(1) (2004) 33.
9. M. Eslami, D.G. Jenkins, M. Bashkanov. Unconventional ^{67}Cu production using high-energy bremsstrahlung and cross section evaluation. *Phys. Rev. C* 112 (2025) 054603.
10. G.N. Hovhannisyann, T.M. Bakhshian, R.K. Dallakyan. Photonuclear production of the medical isotope ^{67}Cu . *Nucl. Instrum. Methods B* 498 (2021) 48.
11. P. Polak et al. Photonuclear production of ^{67}Cu from ZnO targets. *Radiochim. Acta* 40(4) (1986) 169.
12. V.O. Zheltonozhsky et al. Study of the ^{67}Cu activation in (γ,p) -reaction. *Rad. Phys. Chem.* 241 (2026) 113533.
13. M.I. Romanyuk et al. Microtron M-30 for radiation experiments: Formation and control of irradiation fields. *Probl. At. Sci. Technol.* 3(139) (2022) 137.
14. V.V. Varlamov et al. New data on (γ,n) , $(\gamma,2n)$, and $(\gamma,3n)$ partial photoneutron reactions. *Phys. Atom. Nuclei* 76 (2013) 1403.
15. A. Veyssiere et al. Photoneutron cross sections of ^{208}Pb and ^{197}Au . *Nucl. Phys. A* 159 (1970) 561.
16. M.V. Strilchuk. The WinSpectrum Manual (Kyiv: Institute for Nuclear Research, 2000) 14 p. (Unpublished).
17. S. Agostinelli et al. GEANT4 – a simulation toolkit. *Nucl. Instrum. Methods A* 506 (2003) 250.
18. V.O. Zheltonozhsky et al. Investigation of (γ, xpn) -reactions on titanium, lutetium, nickel and chromium nuclei at $E_{\text{br}} = 37 \text{ MeV}$. *Rad. Phys. Chem.* 216 (2024) 111387.

19. В.О. Желтоножський та ін. Дослідження заселення ^7Be в реакціях на ядрах берилію та бору з гальмівними γ -квантами в широкому діапазоні величин енергії. *Ядерна фізика та енергетика* 21(4) (2020) 302. / V.O. Zheltonozhsky et al. Investigation of ^7Be population in reactions on nuclei of beryllium and boron with bremsstrahlung γ -rays in wide energy range. *Nucl. Phys. At. Energy* 21(4) (2020) 302. (Ukr)
20. National Nuclear Data Center, Brookhaven National Laboratory. NuDat 3.0: Nuclear Structure and Decay Data.
21. J.F. Briesmeister (Ed.) *MCNP – A General Monte Carlo N-Particle Transport Code*. Version 4B. Los Alamos National Laboratory Report LA-12625-M (Los Alamos, NM, USA, 1997) 497 p.
22. V.A. Zheltonozhsky, A.M. Savrasov. Population cross-section of $^{179\text{m}2}\text{Hf}$ from the reactions on hafnium and tantalum targets. *Nucl. Instrum. Methods B* 438 (2019) 20.
23. A.J. Koning, S. Hilaire, M.C. Duijvestijn. TALYS: Comprehensive nuclear reaction modeling. *AIP Conf. Proc.* 769 (2025) 1154.
24. K. Shoda. Isospin effect in photoproton reaction on heavy nuclei. *Phys. Rep.* 53 (1979) 341.
25. Л.А. Булавін, В.К. Тартаковський. *Ядерна фізика* (Київ, «Знання», 2005) 439 с. / L.A. Bulavin, V.K. Tartakovsky. *Nuclear Physics* (Kyiv: Znannia, 2005) 439 p. (Ukr)

Надійшла / Received 18.06.2026