

Makalah Ilmiah Populer

Studi Perbandingan Fluks Neutron yang Dihasilkan dari Iradiasi Berkas Proton pada Target Mo-100 dan Y-89 pada Energi 10-30 MeV Menggunakan Simulasi PHITS



Poltek Nuklir

Disusun pada tanggal 30 Juni 2026 oleh :
Gilas Gethar Prawoto / Elektronika Instrumentasi / 022300023

Dosen Pengampu/Pembimbing :

Prof. Dr. Imam Kambali

**POLITEKNIK TEKNOLOGI NUKLIR INDONESIA
BADAN RISET DAN INOVASI NASIONAL
YOGYAKARTA
2026**

**LEMBAR PERSETUJUAN
MAKALAH ILMIAH**

**STUDI PERBANDINGAN FLUKS NEUTRON YANG DIHASILKAN DARI
IRADIASI BERKAS PROTON PADA TARGET MO-100 DAN Y-89 PADA ENERGI
10-30 MEV MENGGUNAKAN SIMULASI PHITS**

Disusun oleh
Gilas Gethar Prawoto / Elektronika Instrumentasi / 022300023

Telah diperiksa dan disetujui pada tanggal 7 Juli 2026 oleh:

Dosen Pembimbing/Dosen Pengampu Matakuliah



Prof. Dr. Imam Kambali
NIP. 198005052002121005

STUDI PERBANDINGAN FLUKS NEUTRON YANG DIHASILKAN DARI IRADIASI BERKAS PROTON PADA TARGET MO-100 DAN Y-89 PADA ENERGI 10-30 MEV MENGGUNAKAN SIMULASI PHITS

COMPARATIVE STUDY OF NEUTRON FLUX PRODUCED BY PROTON BEAM IRRADIATION ON MO-100 AND Y-89 TARGETS AT ENERGIES OF 10-30 MEV USING PHITS SIMULATION

Gilas Gethar Prawoto

Politeknik Teknologi Nuklir Indonesia, Jl. Babarsari Kotak POB 6101/YKKB, Kabupaten Sleman, DI Yogyakarta 55281

gilas.g.prawoto@gmail.com

ABSTRAK

STUDI PERBANDINGAN FLUKS NEUTRON YANG DIHASILKAN DARI IRADIASI BERKAS PROTON PADA TARGET MO-100 DAN Y-89 PADA ENERGI 10-30 MEV MENGGUNAKAN SIMULASI PHITS

Radioisotop seperti Tc-99m dan Zr-89 memiliki peran penting dalam kedokteran nuklir, yang masing-masing dapat diproduksi melalui iradiasi proton pada target Mo-100 dan Y-89. Selain menghasilkan radioisotop yang diinginkan, proses iradiasi ini juga menghasilkan neutron sekunder yang perlu dikarakterisasi untuk kepentingan keselamatan radiasi. Penelitian ini bertujuan membandingkan fluks neutron yang dihasilkan dari iradiasi berkas proton pada target Mo-100 dan Y-89 pada rentang energi 10-30 MeV menggunakan simulasi Monte Carlo PHITS versi 3.36. Simulasi dilakukan pada geometri target silinder (radius 0,5 cm, tinggi 1,0 cm) dengan lima variasi energi proton untuk masing-masing target, menggunakan tally [T-Track] dengan mesh region. Hasil simulasi menunjukkan bahwa fluks neutron total meningkat signifikan seiring kenaikan energi proton pada kedua target, dan target Mo-100 secara konsisten menghasilkan fluks neutron lebih tinggi dibandingkan Y-89 pada seluruh variasi energi, dengan selisih relatif berkisar 36,7% hingga 63,8%. Kenaikan fluks paling signifikan terjadi pada rentang energi rendah (10-15 MeV), kemudian melambat pada energi yang lebih tinggi. Spektrum energi neutron pada kedua target menunjukkan dominasi neutron berenergi rendah (0-2 MeV), sesuai karakteristik neutron evaporasi pada reaksi nuklir yang diinduksi proton. Perbedaan fluks neutron antara kedua target dikaitkan dengan perbedaan nomor massa dan penampang lintang reaksi nuklir. Hasil penelitian ini dapat menjadi acuan pertimbangan aspek keselamatan radiasi pada fasilitas iradiasi proton berbasis siklotron untuk produksi radioisotop medis.

Kata kunci: fluks neutron, iradiasi proton, Mo-100, Y-89, simulasi PHITS, Monte Carlo, produksi radioisotop

ABSTRACT

COMPARATIVE STUDY OF NEUTRON FLUX PRODUCED BY PROTON BEAM IRRADIATION ON MO-100 AND Y-89 TARGETS AT ENERGIES OF 10-30 MEV USING PHITS SIMULATION.

Radioisotopes such as Tc-99m and Zr-89 play an important role in nuclear medicine and can be produced through proton irradiation on Mo-100 and Y-89 targets, respectively. In addition to producing the desired radioisotopes, this irradiation process also generates secondary neutrons that need to be characterized for radiation safety purposes. This study aims to compare the neutron flux produced from proton beam irradiation on Mo-100 and Y-89 targets at energies ranging from 10-30 MeV using PHITS Monte Carlo simulation version 3.36. Simulations were performed on cylindrical target geometry (radius 0.5 cm, height 1.0 cm) with five proton energy variations for each target, using the [T-Track] tally with region mesh. The simulation results show that the total neutron flux increases significantly with increasing proton energy for both targets, and the Mo-100 target consistently produces higher neutron flux compared to Y-89 across all energy variations, with relative differences ranging from 36.7% to 63.8%. The most significant flux increase occurs in the lower energy range (10-15 MeV), then slows at higher energies. The neutron energy spectra for both targets show a dominance of low-energy neutrons (0-2 MeV), consistent with the characteristics of evaporation neutrons in proton-induced nuclear reactions. The difference in neutron flux between the two targets is attributed to differences in mass number and nuclear reaction cross sections. These findings can serve as a reference for radiation safety considerations in cyclotron-based proton irradiation facilities for medical radioisotope production.

Keywords: neutron flux, proton irradiation, Mo-100, Y-89, PHITS simulation, Monte Carlo, radioisotope production

PENDAHULUAN

Radioisotop merupakan salah satu produk penting teknologi nuklir yang memiliki peran krusial dalam bidang kedokteran nuklir, khususnya untuk keperluan diagnosis dan terapi penyakit. Kebutuhan global akan radioisotop medis terus meningkat seiring berkembangnya layanan kedokteran nuklir di berbagai negara [1], [2]. Salah satu radioisotop medis yang paling banyak digunakan adalah Teknesium-99m (Tc-99m), yang dapat diproduksi melalui reaksi nuklir pada target Molibdenum-100 (Mo-100) dengan menggunakan berkas proton dari siklotron melalui reaksi $^{100}\text{Mo}(p,2n)^{99\text{m}}\text{Tc}$ [1], [3]. Selain Mo-100, isotop Itrium-89 (Y-89) juga menjadi perhatian sebagai target iradiasi proton karena dapat menghasilkan Zirkonium-89 (Zr-89), sebuah radioisotop yang semakin banyak digunakan untuk pencitraan PET (*Positron Emission Tomography*) dalam kedokteran nuklir [4], [5].

Proses iradiasi berkas proton pada target tidak hanya menghasilkan radioisotop yang diinginkan, tetapi juga disertai dengan produksi neutron sekunder sebagai produk sampingan reaksi nuklir. Neutron yang dihasilkan dari proses ini berpotensi memberikan paparan dosis radiasi yang signifikan terhadap personel dan lingkungan sekitar fasilitas, serta mempengaruhi desain perisai radiasi pada fasilitas siklotron [6], [7]. Pemahaman yang baik mengenai fluks neutron yang dihasilkan dari iradiasi proton pada berbagai target menjadi sangat penting untuk keperluan keselamatan radiasi dan optimasi desain fasilitas iradiasi [8].

Beberapa penelitian terdahulu telah mengkaji karakteristik produksi neutron dari iradiasi proton pada berbagai material target. Guérin. [1] memaparkan potensi siklotron sebagai alternatif produksi Tc-99m berbasis Mo-100 untuk mengatasi krisis pasokan radioisotop medis. Schaffer et al. [3] secara khusus membahas produksi langsung Tc-99m melalui reaksi $^{100}\text{Mo}(p,2n)$ pada siklotron medis skala kecil dengan rentang energi proton yang relevan dengan penelitian ini. Amjed et al. [5] melakukan evaluasi penampang lintang reaksi nuklir pada target Y-89 untuk optimasi produksi Zr-89. Di sisi pemodelan komputasi, Sato et al. [9] mengembangkan code PHITS (*Particle and Heavy Ion Transport code System*) yang telah divalidasi secara ekstensif untuk berbagai aplikasi transport partikel. Studi benchmark PHITS yang dilakukan oleh Iwamoto et al. [10] menunjukkan bahwa PHITS mampu mereproduksi data eksperimen dengan baik untuk reaksi yang diinduksi oleh proton maupun ion berat. Aplikasi PHITS dalam perhitungan fluks neutron dari fasilitas berbasis akselerator proton juga telah didemonstrasikan dalam desain fasilitas neutron spalasi J-PARC [7], yang menjadi acuan validasi pendekatan simulasi yang digunakan dalam penelitian ini.

Penelitian ini bertujuan untuk melakukan studi perbandingan fluks neutron yang dihasilkan dari iradiasi berkas proton pada dua jenis target yang berbeda, yaitu Mo-100 dan Y-89, menggunakan simulasi Monte Carlo dengan code PHITS versi 3.36 [9], [11]. Variasi energi proton yang digunakan mencakup rentang 10 MeV hingga 30 MeV dengan interval 5 MeV, sehingga diperoleh lima titik data untuk masing-masing target. Ruang lingkup penelitian dibatasi pada perhitungan fluks neutron total dan distribusi spektrum energi neutron yang dihasilkan di dalam volume target iradiasi. Geometri target diasumsikan berbentuk silinder dengan radius 0,5 cm dan tinggi 1,0 cm untuk kedua target, dengan densitas Mo-100 sebesar 10,2 g/cm³ dan Y-89 sebesar 4,47 g/cm³. Berkas proton diasumsikan monoenergetik dengan distribusi spasial berbentuk silinder dan arah tegak lurus terhadap permukaan target. Hasil simulasi diharapkan dapat memberikan gambaran komprehensif mengenai karakteristik produksi neutron dari kedua target serta menjadi dasar pertimbangan dalam aspek keselamatan radiasi pada fasilitas iradiasi berbasis siklotron.

METODOLOGI

Penelitian ini menggunakan perangkat lunak simulasi Monte Carlo PHITS versi 3.36 sebagai alat utama perhitungan [9], [11]. PHITS merupakan code simulasi transport partikel yang dikembangkan oleh *Japan Atomic Energy Agency* (JAEA) dan telah divalidasi secara ekstensif untuk berbagai aplikasi fisika nuklir, termasuk simulasi reaksi induksi proton pada target [10]. Perangkat keras yang digunakan adalah komputer dengan sistem operasi Windows 11 64-bit. Material target yang digunakan terdiri dari dua jenis isotop, yaitu Mo-100 dengan nomor atom 42 dan densitas 10,2 g/cm³, serta Y-89 dengan nomor atom 39 dan densitas 4,47 g/cm³. Sumber partikel yang digunakan adalah berkas proton monoenergetik dengan variasi energi 10, 15, 20, 25, dan 30 MeV.

Geometri target didefinisikan sebagai silinder tegak (*Right Circular Cylinder*, RCC) dengan jari-jari 0,5 cm dan tinggi 1,0 cm yang ditempatkan pada koordinat pusat (0, 0, 0) dengan sumbu silinder searah sumbu-z positif. Di luar target didefinisikan satu region void berbentuk RCC dengan jari-jari 2,0 cm dan tinggi 3,0 cm sebagai ruang simulasi, serta satu region outside sebagai batas terluar simulasi. Sumber proton dikonfigurasi dengan tipe silinder

(s-type = 1), jari-jari berkas 0,5 cm, dan ditembakkan dari posisi z = 0 searah sumbu-z positif (dir = 1.0) tegak lurus terhadap permukaan target.

Jumlah partikel yang disimulasikan ditetapkan sebesar 10.000.000 histories dengan konfigurasi maxcas = 1.000.000 partikel per batch dan maxbch = 10 batch. Jumlah histories yang besar ini dipilih untuk memperoleh nilai statistik yang rendah dan hasil fluks yang konvergen [11]. Seluruh parameter simulasi dimasukkan melalui file input berformat teks (.inp) yang dibuat secara terpisah untuk setiap kombinasi target dan energi proton, sehingga total terdapat sepuluh file input independen.

Fluks neutron dihitung menggunakan tally [T-Track] dengan tipe mesh region (mesh = reg) yang difokuskan pada cell nomor 1, yaitu seluruh volume target iradiasi. Penggunaan mesh region memberikan nilai fluks neutron yang terintegrasi di seluruh volume target secara langsung tanpa perlu mendefinisikan grid spasial xyz [11]. Rentang energi neutron yang dideteksi ditetapkan dari $1,0 \times 10^{-9}$ MeV hingga 30,0 MeV dengan pembagian 50 bin energi secara linear (e-type = 2), sehingga dapat menangkap neutron dari energi termal hingga neutron cepat. Output tally dikonfigurasi dengan axis = eng untuk menghasilkan distribusi spektrum energi neutron, dengan satuan fluks 1/cm²/source yang merepresentasikan jumlah neutron per satuan luas per satu partikel sumber yang ditembakkan.

Setiap file output PHITS (.out) yang dihasilkan kemudian diekstrak nilai fluks total neutronnya dari baris "sum over" pada bagian akhir file, yang merupakan penjumlahan fluks di seluruh bin energi. Nilai-nilai tersebut disusun dalam tabel perbandingan antara target Mo-100 dan Y-89 pada masing-masing energi proton. Data spektrum energi neutron dari seluruh sepuluh simulasi selanjutnya diekstrak dan diolah menggunakan bahasa pemrograman Python dengan pustaka Matplotlib untuk menghasilkan grafik gabungan spektrum energi neutron pada masing-masing target, sehingga dapat terlihat tren perubahan bentuk spektrum dan besar fluks seiring meningkatnya energi proton. Perbandingan fluks total antara kedua target dilakukan pada setiap tingkat energi proton dengan menghitung selisih relatif dan persentase kenaikan fluks untuk menentukan target mana yang menghasilkan fluks neutron lebih besar.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Simulasi Monte Carlo menggunakan PHITS 3.36 telah berhasil dilakukan untuk sepuluh kombinasi target dan energi proton. Hasil perhitungan fluks neutron total yang diperoleh dari tally [T-Track] dengan mesh region pada seluruh volume target disajikan pada Tabel 1. Secara umum, terlihat bahwa nilai fluks neutron total meningkat secara signifikan seiring dengan kenaikan energi proton pada kedua target, serta target Mo-100 menghasilkan fluks neutron yang lebih besar dibandingkan target Y-89 pada seluruh variasi energi yang diujikan.

Perbandingan fluks neutron antara kedua target dilakukan menggunakan dua metrik. Selisih relatif antara Mo-100 dan Y-89 pada Tabel 1 dihitung menggunakan Persamaan (1), yang menyatakan seberapa besar fluks Mo-100 lebih tinggi dibandingkan Y-89 pada setiap tingkat energi proton yang sama:

$$\text{Selisih Relatif (\%)} = \left| \frac{\Phi_{Mo-100} - \Phi_{Y-89}}{\Phi_{Y-89}} \right| \times 100\% \quad (1)$$

di mana Φ_{Mo-100} merupakan fluks neutron total pada target Mo-100 dan Φ_{Y-89} merupakan fluks neutron total pada target Y-89, keduanya dalam satuan 1/cm²/source, pada tingkat energi proton yang sama.

Tabel 1. Perbandingan fluks neutron total target Mo-100 dan Y-89 pada variasi energi proton 10-30 MeV

Energi Proton (MeV)	Fluks Neutron (1/cm ² /source)		Selisih Relatif (%)
	Mo-100	Y-89	
10	$2,0999 \times 10^{-4}$	$1,4954 \times 10^{-4}$	40,4
15	$1,1567 \times 10^{-3}$	$7,0593 \times 10^{-4}$	63,8
20	$2,8498 \times 10^{-3}$	$2,0847 \times 10^{-3}$	36,7
25	$5,5743 \times 10^{-3}$	$4,0757 \times 10^{-3}$	36,7
30	$9,1414 \times 10^{-3}$	$6,6175 \times 10^{-3}$	38,1

Pada energi proton 10 MeV, fluks neutron total target Mo-100 sebesar $2,0999 \times 10^{-4}$ 1/cm²/source, lebih tinggi 40,4% dibandingkan target Y-89 yang hanya menghasilkan $1,4954 \times 10^{-4}$ 1/cm²/source. Perbedaan ini semakin besar pada energi 15 MeV, di mana Mo-100 menghasilkan fluks $1,1567 \times 10^{-3}$ 1/cm²/source, atau 63,8% lebih tinggi dari Y-89 sebesar $7,0593 \times 10^{-4}$ 1/cm²/source. Pada rentang energi 20-30 MeV, selisih relatif antara

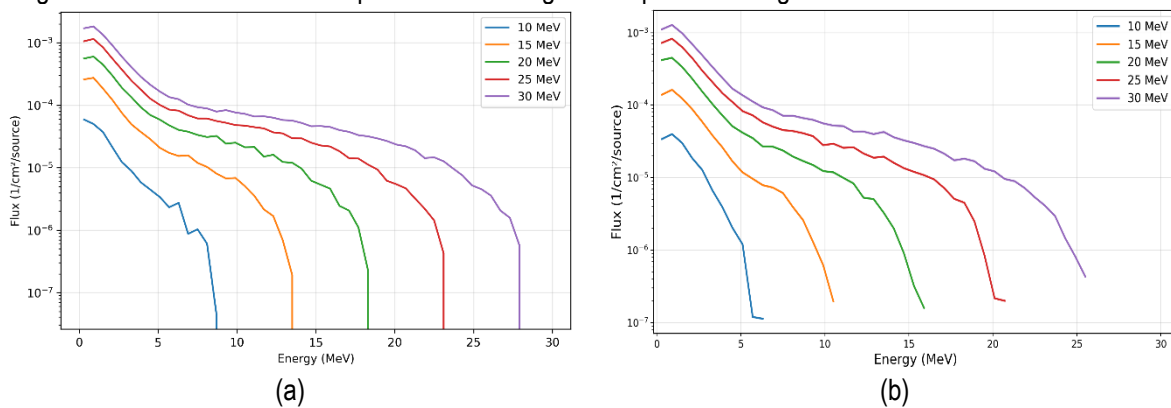
kedua target menjadi lebih stabil di kisaran 36-38%, menunjukkan bahwa perbedaan respons produksi neutron antara kedua target mulai konvergen pada energi proton yang lebih tinggi.

Ditinjau dari tren kenaikan fluks terhadap energi proton pada target yang sama yang dihitung menggunakan Persamaan (2):

$$\text{Kenaikan Fluks (\%)} = \left| \frac{\phi_{E_2} - \phi_{E_1}}{\phi_{E_1}} \right| \times 100\% \quad (2)$$

di mana Φ_{E_1} merupakan fluks neutron total pada tingkat energi proton yang lebih rendah dan Φ_{E_2} merupakan fluks neutron total pada tingkat energi proton berikutnya yang lebih tinggi, pada target yang sama. Kenaikan paling signifikan pada target Mo-100 terjadi dari 10 MeV ke 15 MeV, yaitu sebesar 451%, diikuti kenaikan sebesar 146% dari 15 ke 20 MeV, lalu semakin melambat menjadi 96% (20-25 MeV) dan 64% (25-30 MeV). Pola serupa juga terjadi pada Y-89, dengan kenaikan tertinggi sebesar 372% dari 10 ke 15 MeV, kemudian 195% (15-20 MeV), 95% (20-25 MeV), dan 62% (25-30 MeV). Fenomena ini mengindikasikan bahwa pada energi proton lebih rendah, penambahan energi memberikan dampak yang jauh lebih besar terhadap produksi neutron dibandingkan pada energi proton yang sudah tinggi.

Karakteristik spektrum energi neutron dari kedua target ditampilkan pada Gambar 1 (Mo-100) dan Gambar 2 (Y-89). Pada kedua target, spektrum neutron menunjukkan pola yang serupa, yaitu fluks tertinggi berada pada rentang energi rendah (0-2 MeV) dan menurun secara eksponensial seiring meningkatnya energi neutron. Pola ini sesuai dengan karakteristik reaksi nuklir yang diinduksi proton, di mana sebagian besar neutron yang dihasilkan merupakan neutron evaporasi berenergi rendah [12]. Batas atas energi neutron pada masing-masing kurva mendekati nilai energi proton yang digunakan, sesuai dengan hukum kekekalan energi pada reaksi nuklir, di mana energi neutron maksimum tidak dapat melebihi energi kinetik proton datang.



Gambar 1. Spektrum energi neutron untuk variasi energi proton 10–30 MeV: (a) Mo-100, (b) Y-89

Perbedaan fluks neutron yang lebih tinggi pada Mo-100 dibandingkan Y-89 dapat dijelaskan melalui perbedaan penampang lintang reaksi (*cross section*) nuklir antara kedua isotop. Mo-100 memiliki nomor massa yang lebih besar ($A=100$) dibandingkan Y-89 ($A=89$), sehingga probabilitas interaksi inti (*nuclear interaction cross section*) Mo-100 secara umum lebih besar. Selain itu, Mo-100 memiliki lebih banyak jalur reaksi yang tersedia untuk menghasilkan neutron, termasuk reaksi (p,n), (p,2n), dan (p,pn), khususnya pada rentang energi 10-30 MeV [3], [4]. Hasil ini konsisten dengan penelitian Amjed et al. [5] yang menunjukkan bahwa penampang lintang reaksi Y-89(p,n) relatif lebih kecil dibandingkan reaksi proton pada target dengan nomor massa lebih besar pada rentang energi yang sama.

KESIMPULAN

Penelitian ini telah berhasil melakukan studi perbandingan fluks neutron yang dihasilkan dari iradiasi berkas proton pada target Mo-100 dan Y-89 pada rentang energi 10-30 MeV menggunakan simulasi Monte Carlo PHITS versi 3.36. Hasil simulasi menunjukkan bahwa fluks neutron total pada kedua target meningkat secara signifikan seiring dengan kenaikan energi proton, dengan kenaikan paling signifikan terjadi pada rentang energi rendah (10-15 MeV) dan melambat pada energi yang lebih tinggi (25-30 MeV). Target Mo-100 secara konsisten menghasilkan fluks neutron total yang lebih besar dibandingkan target Y-89 pada seluruh variasi energi yang diujikan, dengan selisih relatif berkisar antara 36,7% hingga 63,8%, tertinggi pada energi 15 MeV. Perbedaan ini disebabkan oleh nomor massa Mo-100 yang lebih besar serta lebih banyaknya jalur reaksi nuklir yang tersedia untuk menghasilkan neutron pada rentang energi proton yang diujikan. Spektrum energi neutron pada kedua target menunjukkan pola yang serupa, yaitu didominasi oleh neutron berenergi rendah (0-2 MeV) yang merupakan karakteristik neutron evaporasi pada reaksi nuklir yang diinduksi proton, dengan batas atas energi neutron yang

mendekati energi proton yang digunakan sesuai hukum kekekalan energi. Dengan demikian, tujuan penelitian untuk membandingkan fluks neutron antara kedua target telah tercapai, dan hasil ini dapat menjadi bahan pertimbangan dalam aspek keselamatan radiasi serta desain perisai pada fasilitas iradiasi proton berbasis siklotron untuk produksi radioisotop medis Tc-99m dan Zr-89.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Prof. Dr. Imam Kambali selaku dosen pembimbing atas arahan, bimbingan, dan masukannya selama penyusunan makalah ini. Ucapan terima kasih juga ditujukan kepada institusi Politeknik Teknologi Nuklir Indonesia atas seluruh fasilitas dan dukungan akademik yang telah diberikan. Selain itu, penulis sangat mengapresiasi kebaikan dan bantuan dari rekan-rekan sejawat, yaitu Maulida Yusufarina Rahma, Theresa Anggreeni, dan Noor Fatih Farahat Parvez, yang telah bersedia meluangkan waktu untuk berdiskusi serta memberikan tutorial teknis mengenai penggunaan perangkat lunak simulasi PHITS.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] B. Guérin, "Cyclotron Production of ^{99m}Tc : An Approach to the Medical Isotope Crisis," *J. Nucl. Med. Technol.*, vol. 51, pp. 13–16, 2010, [Online]. Available: https://www.academia.edu/67509907/Cyclotron_production_of_99mTc_an_approach_to_the_medical_isotope_crisis
- [2] P. Martini *et al.*, "In-house cyclotron production of high-purity Tc-99m and Tc-99m radiopharmaceuticals," *Appl. Radiat. Isot.*, vol. 139, pp. 325–331, 2018, doi: 10.1016/j.apradiso.2018.05.033.
- [3] P. Schaffer *et al.*, "Direct Production of ^{99m}Tc via $^{100}\text{Mo}(p,2n)$ on Small Medical Cyclotrons," *Phys. Procedia*, vol. 66, pp. 383–395, 2015, doi: 10.1016/j.phpro.2015.05.048.
- [4] S. Yang, T. Song, Y. Lee, and G. Kim, "Production cross sections of proton-induced reactions on yttrium," *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. B Beam Interact. with Mater. Atoms*, vol. 398, pp. 1–8, 2017, doi: 10.1016/j.nimb.2017.03.021.
- [5] N. Amjed *et al.*, "Evaluation of nuclear reaction cross sections for optimization of production of the important non-standard positron emitting radionuclide ^{89}Zr using proton and deuteron induced reactions on ^{89}Y target," *Appl. Radiat. Isot.*, vol. 165, 2020, doi: 10.1016/j.apradiso.2020.109338.
- [6] S. MacLeod *et al.*, "Benchmarking Monte Carlo codes for the modelling of low-energy neutron production target reactions," *Comput. Phys. Commun.*, vol. 321, 2026, doi: 10.1016/j.cpc.2025.109998.
- [7] M. Harada, F. Maekawa, K. Oikawa, S. Meigo, H. Takada, and M. Futakawa, "Application and Validation of Particle Transport Code PHITS in Design of J-PARC 1 MW Spallation Neutron Source," *Prog. Nucl. Sci. Technol.*, vol. 2, pp. 872–878, 2011, doi: 10.15669/pnst.2.872.
- [8] M. S. Beni, K. N. Yu, M. R. Islam, and H. Watabe, "Development of PHITS graphical user interface for simulation of positron emitting radioisotopes production in common biological materials during proton therapy," *J. Radiat. Res.*, vol. 63, no. 3, pp. 385–392, 2022, doi: 10.1093/jrr/rrac010.
- [9] T. Sato *et al.*, "Features of Particle and Heavy Ion Transport code System (PHITS) version 3.02," *J. Nucl. Sci. Technol.*, vol. 55, no. 6, pp. 684–690, 2018, doi: 10.1080/00223131.2017.1419890.
- [10] Y. Iwamoto *et al.*, "Benchmark study of the recent version of the PHITS code," *J. Nucl. Sci. Technol.*, vol. 54, no. 5, pp. 617–635, 2017, doi: 10.1080/00223131.2017.1297742.
- [11] T. Sato *et al.*, "User's manual PHITS Ver. 3.36: English version," 2025. [Online]. Available: <https://phits.jaea.go.jp/manual/PHITS-en/index.html>
- [12] A. Kaplan, M. Şekerci, and B. Demir, "Neutron production cross-section calculations for some gamma and proton induced reactions on ^{89}Y ," *AIP Conf. Proc.*, no. 1, 2018, doi: 10.1063/1.5048145.