

加速器制备⁶⁸Ge产额计算方法

高陶, 胡圣, 余伟

(中广核同位素科技(绵阳)有限公司, 绵阳 621000)

摘要: ⁶⁸Ga是最具临床应用价值的金属正电子核素之一, 通过⁶⁸Ge/⁶⁸Ga发生器生产⁶⁸Ga是一种比较便捷的方式, 而母体核素⁶⁸Ge主要由加速器生产, 其中使用较多的一种生产方式是通过质子辐照Ga-Ni合金靶件获得⁶⁸Ge。准确模拟⁶⁸Ge产额, 对于Ga-Ni合金靶件制备、加速器辐照方案选择和生产准备均有重要意义。本研究提出了一种基于蒙特卡罗方法的加速器生产⁶⁸Ge的理论产额计算方法, 计算了不同条件下质子束流轰击Ga-Ni合金靶件的能量损耗和⁶⁸Ge理论产额, 并通过加速器辐照实验验证了计算结果的可靠性。相关结果可为不同能量质子束流辐照条件下的Ga-Ni合金厚度设计提供参考, 对实验结果具有指导意义。

关键词: 产额计算; Ga-Ni合金; ⁶⁸Ge; ⁶⁸Ge/⁶⁸Ga发生器

中图分类号: TL5; O562.2

文献标志码: A

文章编号: 1000-7512(2024)02-0126-07

doi: 10.7538/tws.2024.37.02.0126

Calculation Method for Yield of ⁶⁸Ge Produced by Cyclotron

GAO Tao, HU Sheng, YU Wei

(CGN Isotope Technology (Mianyang) Co., Ltd, Mianyang 621000, China)

Abstract: ⁶⁸Ga is one of the most clinically valuable metal positron isotopes. Producing ⁶⁸Ga through a ⁶⁸Ge/⁶⁸Ga generator is a relatively convenient way, while the parent nuclide ⁶⁸Ge is mainly produced by cyclotrons. One of the most commonly used production methods is to obtain ⁶⁸Ge through proton irradiation of Ga-Ni alloy targets. Accurately simulating the ⁶⁸Ge yield is of great significance for Ga-Ni alloy target preparation, cyclotron irradiation plan making and production preparation. This paper proposes a method for calculating the theoretical yield of ⁶⁸Ge produced by cyclotrons based on the Monte Carlo method. The energy loss and ⁶⁸Ge theoretical yield of proton beam bombardment of Ga-Ni alloy targets under different conditions are calculated. The relevant results can provide reference for Ga-Ni alloy thickness design under different energy proton beam irradiation conditions. The experimental results match well with the calculated results. Finally, the reliability of the calculation results was verified through the cyclotron irradiation experiment, indicating that the theoretical calculation is instructive to the experimental results.

Key words: yield simulation; Ga-Ni alloy; ⁶⁸Ge; ⁶⁸Ge/⁶⁸Ga generator

正电子发射断层扫描技术(PET)的发展得益于正电子放射性核素的广泛应用。传统的正电子放射性核素以¹¹C、¹³N、¹⁵O和¹⁸F等经典放

射性轻核^[1]为代表, 近年来, 金属正电子核素如⁶⁴Cu、⁶⁸Ga、⁸⁶Y、⁸⁹Zr等逐渐引起关注^[2]。由于存在配位化学和成像特性多样等优点, 基于

⁶⁸Ga 等正电子金属类核素开发的放射性药物的研究受到广泛关注^[3-5], 并有多种药物已在欧美上市^[6], ⁶⁸Ga 的市场规模不断扩大。目前, ⁶⁸Ga 药物的开发得到了多项国际原子能机构(IAEA)协调研究项目(CPR)(例如, “为癌症和其他慢性病管理而开发⁶⁸Ge 基 PET 放射性药品”(F22050))的支持和多份出版物的倡议。⁶⁸Ga 既可通过回旋加速器直接生产^[7-8], 又可通过⁶⁸Ge/⁶⁸Ga 发生器获得^[9-11]。⁶⁸Ge/⁶⁸Ga 发生器的体积小、重量轻, 可使医院摆脱回旋加速器的束缚, 更方便获得⁶⁸Ga。目前, 在⁶⁸Ga 药物生产企业中, ⁶⁸Ge/⁶⁸Ga 发生器依然是获得⁶⁸Ga 的主要方式^[12]。

⁶⁸Ge 一般可通过⁶⁶Zn(α , 2n)⁶⁸Ge、⁶⁹Ga(p, 2n)⁶⁸Ge 或^{nat}Ga(p, x)⁶⁸Ge 反应获得。鉴于^{nat}Ga(p, x)⁶⁸Ge 反应产生的放射性产物产额大, ^{nat}Ga 价格较低、易获得, 因此本研究探讨使用此反应生产⁶⁸Ge。通过仿真方法对^{nat}Ga(p, x)⁶⁸Ge 反应的产额进行模拟, 了解不同辐照条件下的⁶⁸Ge 产额, 对⁶⁸Ge 的实验室制备以及批量化生产具有指导意义。

本研究提出了一种使用 SRIM 程序和 Python 语言联合计算放射性同位素产额的方法, 对不同能量质子束流辐照 Ga-Ni 合金层的有效辐照厚度进行了计算, 并且进一步给出了既定厚度条件下不同能量质子束流辐照后的产额。同时, 使用模拟手段对实验条件下同位素产额进

行理论计算。最后, 通过加速器辐照 Ga-Ni 合金靶件实验对计算结果进行了验证, 结果表明, 实验结果与模拟计算结果匹配较好, 计算方法可靠。

1 计算方法

1.1 模型设置

天然金属镓的熔点约为 29.77 °C, 无法耐受辐照高温, 不能单独作为辐照固体靶材料使用, 所以一般选择镓的氧化物或者镓的相关合金作为加速器制备⁶⁸Ge 的固体靶材。对于镓的相关化合物和合金, 在熔点足够高的情况下, 理论上镓的含量越高越好, 同时要经济且易制备。天然镍的熔点为 1455 °C, 价格低廉且易获取。可以通过将金属镓和金属镍制成合金的方式, 综合两种金属的特性, 制备出符合辐照高温要求、镓含量较高的 Ga-Ni 合金固体靶材。图 1 给出了不同比例 Ga-Ni 合金的相图^[13], 通过对比分析, 认为适合加速器长时间辐照的 Ga-Ni 合金中镓的质量分数应控制在约 75%, 即以 Ga₇Ni₃ (熔点为 369 °C, Ga 质量分数为 74%) 合金形式存在, 使得 Ga-Ni 合金层在满足镓含量尽可能高的同时, 又能满足固体靶辐照时的耐高温要求。结合实际靶件生产情况以及现有的国内外生产资料, 选择 Ga₇Ni₃ 合金作为最终辐照靶材目标 Ga-Ni 比例。

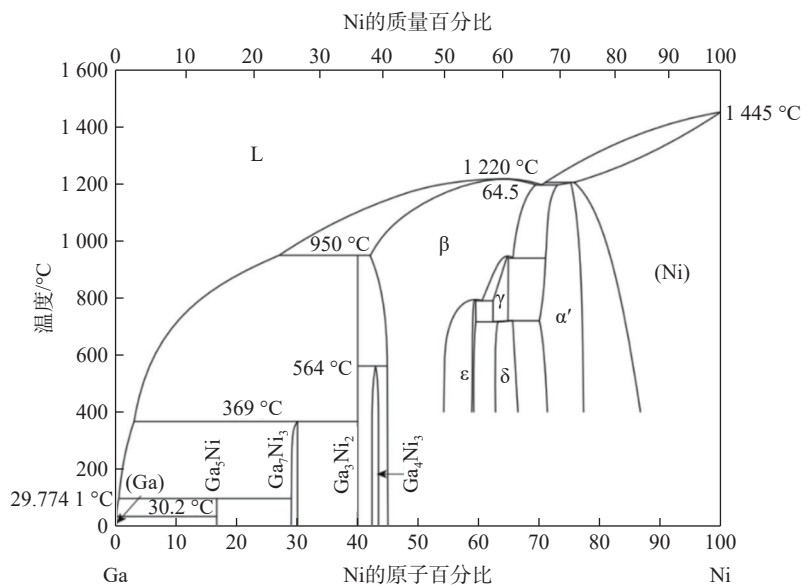


图 1 Ga-Ni 合金相图

Fig.1 Phase diagram of Ga-Ni alloy

参考实际生产所使用的铜基底 Ga-Ni(后文均指 Ga₇Ni₃合金)合金靶件尺寸,模拟中涉及的 Ga-Ni 合金固体靶件基本结构示于图 2,在尺寸为 110 mm(长)×29 mm(宽)×5 mm(厚)的铜基底上沉积尺寸为 100 mm(长)×19 mm(宽)×X μm(厚)的 Ga-Ni 合金层。靶件结构中铜基底

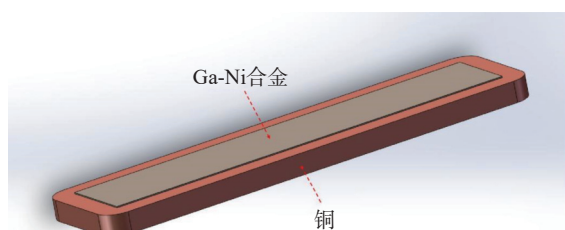


图 2 靶件基本结构

Fig.2 Structure of target

层主要起支撑、散热作用,防止辐照过程中温度过高引起靶件溶解; Ga-Ni 合金层为辐照层,用于生产所需的放射性同位素 ⁶⁸Ge。

质子束流辐照 Ga-Ni 合金,制备 ⁶⁸Ge 主要发生的核反应为 ^{nat}Ga(p, x)⁶⁸Ge,其核反应截面数据列于表 1,其分布示于图 3^[14]。发生 ^{nat}Ga(p, x)⁶⁸Ge 核反应的质子束流阈值能量为 10.7 MeV,而在质子束流能量 > 0 MeV 后,核反应截面较小,会造成大量的能量、资源浪费。本研究把从 Ga-Ni 镀层出射质子束流能量在核反应阈值附近的情况视为完全辐照。考虑到辐照过程中质子束流会发生一定的能量损耗,本研究在模拟过程中主要研究的人射质子束流能量为 15~55 MeV。

表 1 ^{nat}Ga(p, x)⁶⁸Ge 反应截面数据

Table 1 ^{nat}Ga(p, x)⁶⁸Ge reaction cross section

能量/MeV	截面/mb	能量/MeV	截面/mb	能量/MeV	截面/mb	能量/MeV	截面/mb
10.7	0.01±0.003	25.5	205.9±18.5	40.5	74.9±5.2	55.5	49.4±5.0
11.0	5.8±1.5	26.0	192.7±16.8	41.0	75.9±5.2	56.0	47.9±4.8
11.5	16.7±4.3	26.5	179.9±15.7	41.5	76.8±5.3	56.5	46.5±4.7
12.0	28.9±5.7	27.0	167.8±14.6	42.0	77.4±5.3	57.0	45.1±4.5
12.5	42.5±8.4	27.5	156.2±13.6	42.5	77.9±5.4	57.5	43.8±4.4
13.0	57.5±10.0	28.0	145.3±11.5	43.0	78.2±5.4	58.0	42.5±4.3
13.5	74.1±12.9	28.5	135.1±10.7	43.5	78.2±5.4	58.5	41.3±4.1
14.0	92.1±13.9	29.0	125.6±9.9	44.0	78.2±5.4	59.0	40.0±4.0
14.5	111.7±16.8	29.5	116.8±9.2	44.5	77.9±5.4	59.5	38.8±3.9
15.0	132.5±16.9	30.0	108.6±7.9	45.0	77.5±5.0	60.0	37.7±7.1
15.5	154.4±19.7	30.5	101.1±7.3	45.5	77.0±5.0	60.5	36.5±6.9
16.0	177.0±19.2	31.0	94.2±6.8	46.0	76.3±4.9	61.0	35.4±6.7
16.5	199.7±21.6	31.5	88.0±6.4	46.5	75.5±4.9	61.5	34.3±6.5
17.0	221.9±21.5	32.0	82.5±6.0	47.0	74.6±4.8	62.0	33.2±6.3
17.5	242.9±23.6	32.5	77.7±5.6	47.5	73.5±4.8	62.5	32.2±6.1
18.0	262.0±24.4	33.0	73.5±5.3	48.0	72.4±4.7	63.0	31.2±5.9
18.5	278.4±25.9	33.5	70.0±5.1	48.5	71.1±4.6	63.5	30.2±5.7
19.0	291.7±27.0	34.0	67.2±4.9	49.0	69.8±4.5	64.0	29.2±5.5
19.5	301.2±27.9	34.5	65.1±4.7	49.5	68.4±4.4	64.5	28.3±5.3
20.0	307.0±27.9	35.0	63.8±4.5	50.0	67.0±5.2	65.0	27.4±5.2
20.5	308.9±28.1	35.5	63.1±4.4	50.5	65.4±5.1	65.5	26.5±5.0
21.0	307.2±27.9	36.0	63.0±4.4	51.0	63.9±5.0	66.0	25.6±4.8
21.5	302.3±27.5	36.5	63.5±4.4	51.5	62.3±4.8	66.5	24.8±4.7
22.0	294.6±26.2	37.0	64.4±4.5	52.0	60.6±4.7	67.0	23.9±4.5
22.5	284.8±25.4	37.5	65.6±4.6	52.5	59.0±4.6	67.5	23.1±4.4
23.0	273.2±24.3	38.0	67.1±4.7	53.0	57.3±4.5	68.0	22.3±4.2
23.5	260.5±23.2	38.5	68.8±4.8	53.5	55.7±4.3	68.5	21.6±4.1
24.0	247.1±22.2	39.0	70.4±4.9	54.0	54.1±4.2	69.0	20.8±3.9
24.5	233.3±21.0	39.5	72.1±5.0	54.5	52.5±4.1	69.5	20.1±3.8
25.0	219.5±19.7	40.0	73.6±5.1	55.0	50.9±5.1	70.0	19.4±11.0

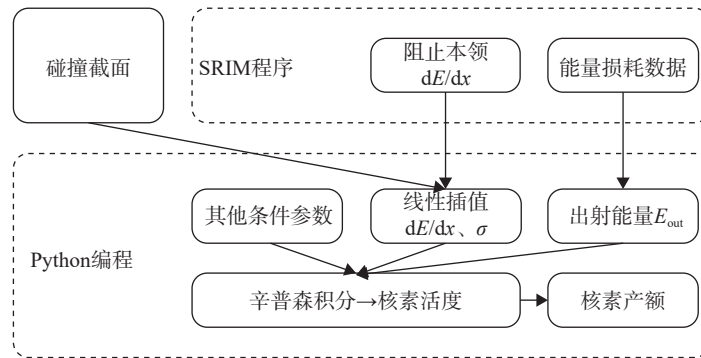


图3 SRIM 和 Python 程序计算核素产额流程

Fig.3 Process of nuclide yield calculation by SRIM and Python program

1.2 计算方法

质子束流辐照靶件过程中, 靶件内特定核素的产生率受诸多因素影响, 包括反应截面、入射质子能量、束流强度以及单位面积的靶核数等。对于给定时间 dt 内, 某一核素 i 的产生速率可用以下公式计算^[15]:

$$\frac{dN_i(t)}{dt} = \phi \times N_{\text{target}} \int_{E_{\text{in}}}^{E_{\text{out}}} \frac{\sigma_i(E)dE}{\frac{dE}{dx}} - \lambda_i \times N_i(t) \quad (1)$$

式中, dN_i 为 dt 时间内产生核素 i 的原子核的数量; σ_i 为生成核素 i 的核反应截面, cm^{-2} ; $\frac{dE}{dx}$ 为质子在靶材料中的碰撞阻止本领, MeV/cm ; E_{in} 为入射质子的能量, MeV ; E_{out} 为出射质子的能量, MeV ; λ_i 为核素 i 的衰变常数, s^{-1} ; ϕ 为入射到靶件上的质子注量率, n/cm^2 ; N_{target} 为单位体积靶材料中的靶核数量, cm^{-3} , 计算方法如下^[15]:

$$N_{\text{target}} = \frac{N_a \times H_j \times \rho}{A} \quad (2)$$

式中, N_a 为阿伏伽德罗常数; H_j 为靶核的同位素丰度比; ρ 为靶材料的密度, g/cm^3 ; A 为靶材料的摩尔质量, g/mol 。

对式(1)积分, 可得辐照时长 t 后, 靶件中核素 i 的数量^[15]:

$$N_i(t) = \frac{\phi \times N_{\text{target}}}{\lambda_i} \int_{E_{\text{in}}}^{E_{\text{out}}} \frac{\sigma_i(E)dE}{\frac{dE}{dx}} (1 - e^{-\lambda_i t}) \quad (3)$$

进而可得靶件中核素 i 的放射性活度 $A_i(t)$,

Bq:

$$A_i(t) = \phi \times N_{\text{target}} \int_{E_{\text{in}}}^{E_{\text{out}}} \frac{\sigma_i(E)dE}{\frac{dE}{dx}} (1 - e^{-\lambda_i t}) \quad (4)$$

蒙特卡罗(MC)方法是一种基于概率解决物理和数学问题的统计数值方法, 这种方法适用于模拟具有随机相的物理现象^[16]。目前 MC 方法广泛应用于反应堆物理、核探测和医学物理等各类场景中^[17]。

靶件辐照过程中, 质子束流的整体行为和其表现出的物理性质符合物理统计规律, 但单个质子的运动及其与靶原子的碰撞具有一定的概率性和随机性, 适合使用 MC 方法进行研究。因此, 本研究使用基于 MC 方法的 SRIM 程序组结合 Python 语言编写程序对目标同位素产额的理论产额进行计算。

SRIM 是采用 MC 方法^[18], 用于模拟离子在特定靶材中的能量损失和位置能量分布的程序组, 可以模拟监视大批入射粒子的运动行为, 记录粒子的位置、能量损失以及次级粒子的各种参数, 计算得到所需物理量的期望值和统计误差。

综合考虑 SRIM 程序和 Python 语言的特点和使用领域, 为了计算出特定辐照条件下, 特定放射性核素的辐照产额, 给出了使用 SRIM 程序和 Python 语言计算核素产额的具体流程(图3)。

1.3 能量损耗计算

在进行产额计算之前, 模拟计算不同能量的质子束流辐照不同厚度 Ga-Ni 合金层过程中的能量损耗情况, 获取不同能量质子束流能够完全辐照的 Ga-Ni 合金层厚度, 用于指导 Ga-Ni 合金镀层的实验制备, 减少束流能量和 Ga-Ni 合金层的浪费。

使用 SRIM 的“TRIM Calculation”程序, 对不同情况下质子束流辐照 Ga-Ni 合金的能量损耗进行计算, 分别计算了质子束流能量为 15~

55 MeV(能量间隔 5 MeV)情况下辐照不同厚度的 Ga-Ni 合金层后出射能量大小。结合计算结果,给出每种能量的质子束流能完全辐照的 Ga-Ni 合金层厚度参数。质子束流在 Ga-Ni 合金层中的能量损耗计算过程如下。

(1)使用 SRIM 中的“TRIM Calculation”程序进行计算,入射质子束流能量设置为 15~55 MeV,入射方向与靶面法线之间的夹角为 84° ,如图 4 所示,目标靶件设置为 Ga_7Ni_3 合金层,设置一定厚度,计算出质子束流在不同入射深度的能量损耗。

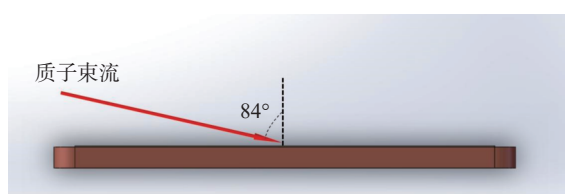


图 4 束流入射
Fig.4 Beam inject

(2)将计算得到的能量损耗数据导出后,使用 Python 语言对能量损耗分布进行积分,得出质子在轰击靶件 Ga-Ni 合金层过程中的总能量损耗 E_{loss} ,与质子入射能量作比较求出质子束流通过 Ga-Ni 合金层的出射能量 E_{out} 。

1.4 产额计算

实际实验使用的回旋加速器粒子能量能维持约 19 MeV,且该加速器理论上最高能够将质子束流加速至 25 MeV。参照表 2 和图 5 给出的数据,需要至少 $100\ \mu\text{m}$ 厚的靶件才能完全利用加速器输出的质子束流能量。因此,在制备 Ga-Ni 合金镀层时,镀层厚度控制在约 $100\ \mu\text{m}$ 。

为了对回旋加速器制备 ^{68}Ge 的实际产额进行提前研判,使用模拟手段计算了质子束流能量分别为 19~25 MeV(能量间隔 1 MeV)时辐照 $100\ \mu\text{m}$ 厚 Ga-Ni 合金得到的 ^{68}Ge 产额。计算方法如下。

(1)使用 SRIM 计算 $100\ \mu\text{m}$ Ga-Ni 合金层对不同能量入射质子束流的阻止本领,导出数据待用。

(2)使用 SRIM 计算不同能量质子束流以与 $100\ \mu\text{m}$ Ga-Ni 合金层法线呈 84° 角入射辐照过程中的能量损失分布,得到质子束流出射能量,待用。

表 2 不同能量质子束流辐照 Ga-Ni 合金后的出射能量

入射能量/MeV	Ga-Ni合金层厚度/ μm	出射能量/MeV
55	800	5.10
	700	8.39
	643	10.81
	600	13.37
50	600	7.33
	550	9.63
	530	10.71
	500	12.65
45	450	9.12
	430	10.23
	420	10.80
	400	12.22
40	350	9.30
	328	10.81
	320	11.45
	35	250
245		10.65
240		11.06
30		175
	173	10.69
	170	11.19
	25	120
117		10.05
111		10.85
20		70
	65	10.31
	63	10.68
	60	11.23
15	25	10.74
	20	11.82

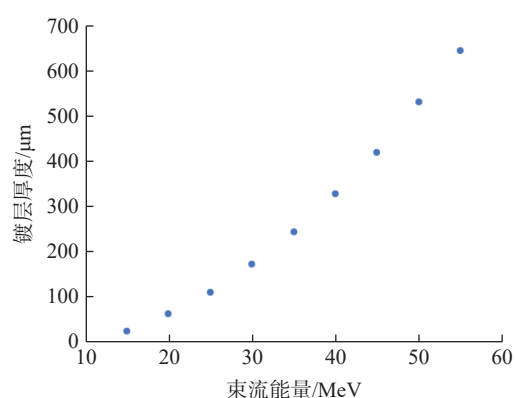


图 5 不同能量质子束流的完全辐照 Ga-Ni 合金层厚度
Fig.5 Thickness of the totally irradiated Ga-Ni alloy layer for different energy proton beams

(3)导出表 1 所示的 $^{nat}\text{Ga}(p, x)^{68}\text{Ge}$ 核反应数据。

(4)使用 Python 语言对 1.2 节中的公式(4)进行积分运算,得到 ^{68}Ge 的放射性活度及其对应产额数据。计算过程中需注意, Ga_7Ni_3 靶的材料密度 ρ 为 $6.80\ \text{g}/\text{cm}^3$, Ga_7Ni_3 靶材的摩尔质

量为 243 g/mol, ⁶⁸Ge 的半衰期为 270.8 d。在对活度公式进行积分计算前, 应该先对阻止本领的数据进行插值, 使其与反应截面数据点匹配, 然后在有效的能量范围内对方程进行辛普森积分, 方可得到目标核素活度数据。最后根据辐照束流强度、辐照时间和目标核素活度, 计算目标核素的理论产额。

由表 2 不同能量质子束流辐照不同厚度的 Ga-Ni 合金镀层后的出射能量数据, 可以得出不同能量质子束流能够实现完全辐照所需的 Ga-Ni 合金层厚度数据, 相关束流能量对应的镓镍合金层完全辐照厚度示于图 5, 能量越大的质子束流能够实现完全辐照所需的 Ga-Ni 合金层厚度越大。

表 3 给出了 1 μA 不同能量的质子束流辐照 100 μm Ga-Ni 合金后 1 h 后得到的⁶⁸Ge 的 EOB (end of beam) 产额数据(⁶⁸Ge 未衰变), ⁶⁸Ge 的产额随着质子束流能量的增加而逐渐增大。

表 3 不同能量质子束流下的⁶⁸Ge 产额

Table 3 ⁶⁸Ge yields at different energy proton beams

束流能量/MeV	⁶⁸ Ge产额/μCi
19	6.66
20	8.69
21	10.85
22	13.04
23	15.18
24	17.20
25	18.91

2 实验验证

为了验证上述计算结果的可靠性, 使用已有回旋加速器对 Ga-Ni 合金靶件进行辐照研究。

基于回旋加速器的实际情况, 辐照选择质子束流能量为 19 MeV, 束流强度为 100 μA。辐照靶件为图 6 所示的铜基 Ga-Ni 合金靶件, 经 X 射线荧光(XRF)分析, Ga-Ni 合金层中 Ga-Ni 金属摩尔比约为 7 : 3, 厚度约为 100 μm。铜基层厚度 5 mm, 背部中间开槽以方便辐照过程中对靶件的冷却。质子束流入射方向与靶平面法线呈 84°夹角, 辐照时间为 5 h。

在靶件辐照完成 90 d 后再对靶件的 Ga-Ni 合金镀层进行溶解处理。经分离纯化后, 考



图 6 Ga-Ni 合金层

Fig.6 Ga-Ni alloy layer

虑回收过程中的损耗, 实际获得⁶⁸Ge 产额 (2.47±0.12) mCi。根据表 3 计算结果, 100 μA、19 MeV 的质子束流辐照 100 μm Ga-Ni 合金层 5 h 后获得⁶⁸Ge 产额为 3.33 mCi, 经过 90 d 衰变后剩余⁶⁸Ge 产额约为 2.64 mCi。

经分析, 理论计算获得的⁶⁸Ge 产额 2.64 mCi 与实际获得的 2.47 mCi 产额误差为 6.88%, 综合考虑实验中的不确定因素和实验误差(如不同厚度镀层 Ga-Ni 比例均一性、取样稀释误差、高纯锗测量误差等), 认为理论计算结果对实验结果具有一定指导性。使用本研究提出的 SRIM 程序和 Python 语言计算核素产额的方法, 可以对加速器生产放射性核素的实际产额进行有效预测。

3 结论

本研究提出了一种基于蒙特卡罗方法, 使用 SRIM 程序和 Python 语言进行加速器辐照固体靶生产⁶⁸Ge 的理论产额计算方法。使用该方法计算了不同能量大小的质子束流辐照不同厚度的 Ga-Ni 合金层后的能量损耗, 得到了不同能量质子束流能够实现完全辐照所需的 Ga-Ni 合金层厚度, 相关结果可以为用于加速器辐照的 Ga-Ni 靶件制备提供参考。同时, 对不同能量质子束流辐照 100 μm Ga-Ni 合金层生产⁶⁸Ge 进行了理论计算, 给出了 1 μA·h 不同能量的质子束流辐照 100 μm Ga-Ni 合金层后的⁶⁸Ge 产额, 为后续加速器辐照实验结果提供参考。

本研究利用能量 19 MeV、束流强度 100 μA 的质子束流, 以与靶件平面法线呈 84°角入射, 辐照平均厚度 100 μm 左右的 Ga₇Ni₃ 合金 5 h, 停束 (end of beam, EOB) 90 d 后, 获得⁶⁸Ge 产额约为 2.47 mCi, 与理论产额误差为 6.88%。考虑到实验过程中, 靶件 Ga-Ni 合金层存在厚度分布不

均、加速器输出束流能量稳定性不足,束斑大小不可控等不稳定因素的影响,认为理论计算获得的 2.64 mCi 产额与实际产额具有较好的符合性,理论计算方法对实验具有一定的指导性。

考虑到发生完全辐照时,质子束流会与 Ga-Ni 合金层中的 Ni 发生核反应,产生杂质核素。同时,质子束流从 Ga-Ni 合金层的出射能量依然有约 10.7 MeV,与靶件铜衬底发生核反应,也会产生杂质核素。后续可继续使用此模拟方法,对辐照过程中产生的杂质核素活度进行计算,以指导分离纯化过程。

参考文献:

- [1] 杜名, 辛军. PET/CT 应用现状及进展[J]. 中国临床医学影像杂志, 2021, 32(12): 898-901.
Du Ming, Xin Jun. Current status and process of PET/CT[J]. Chin Clin Med Imaging, 2021, 32(12): 898-901 (in Chinese).
- [2] 陈文, 魏洪源, 周志军, 等. 金属正电子核素⁶⁴Cu, ⁶⁸Ga, ⁸⁶Y 和 ⁸⁹Zr 的 PET 标记药物研究进展[J]. 同位素, 2017, 30(1): 78-88.
Chen Wen, Wei Hongyuan, Zhou Zhijun, et al. Positron emission radiometals ⁶⁴Cu, ⁶⁸Ga, ⁸⁶Y and ⁸⁹Zr labeled PET drugs[J]. Journal of Isotopes, 2017, 30(1): 78-88 (in Chinese).
- [3] Lapa C, Lücknerath K, Kleinlein I, et al. ⁶⁸Ga-pentixafor-PET/CT for imaging of chemokine receptor 4 expression in glioblastoma[J]. Theranostics, 2016, 6(3): 428-434.
- [4] 平措云旦, 古宇帆, 韩凯, 等. ⁶⁸Ga-FAPI PET/CT 在肥厚型心肌病的初步探索性研究[J]. 心肺血管病杂志, 2023, 42(2): 158-162.
Ping Cuoyundan, Gu Yufan, Han Kai, et al. ⁶⁸Ga-FAPI PET/CT in hypertrophic cardiomyopathy: a pilot study[J]. Journal of Cardiovascular and Pulmonary Diseases, 2023, 42(2): 158-162 (in Chinese).
- [5] 王安波, 何丽萌, 邓颖, 等. ⁶⁸Ga-FAPI-04 PET/CT 在胰腺癌与胰腺炎鉴别诊断中的价值[J]. 现代肿瘤医学, 2022, 30(23): 4344-4348.
Wang Anbo, He Limeng, Deng Ying, et al. Application of ⁶⁸Ga-FAPI-04 PET/CT in differential diagnosis of pancreatic cancer and pancreatitis[J]. Journal of Modern Oncology, 2022, 30(23): 4344-4348 (in Chinese).
- [6] Carlucci G, Ippisch R, Slavik R, et al. ⁶⁸Ga-PSMA-11 NDA approval: a novel and successful academic partnership[J]. Journal of Nuclear Medicine, 2021, 62(2): 149-155.
- [7] Rodnick M E, Sollert C, Stark D, et al. Synthesis of ⁶⁸Ga-radiopharmaceuticals using both generator-derived and cyclotron-produced ⁶⁸Ga as exemplified by [⁶⁸Ga]Ga-PSMA-11 for prostate cancer PET imaging[J]. Nature Protocols, 2022, 17(4): 980-1003.
- [8] Pandey M K, Byrne J F, Jiang H, et al. Cyclotron production of ⁶⁸Ga via the ⁶⁸Zn(p, n)⁶⁸Ga reaction in aqueous solution[J]. American Journal of Nuclear Medicine and Molecular Imaging, 2014, 4(4): 303-310.
- [9] Romero E, Martínez A, Oteo M, et al. Development and long-term evaluation of a new ⁶⁸Ge/⁶⁸Ga generator based on nano-SnO₂ for PET imaging[J]. Scientific Reports, 2020, 10: 12756.
- [10] Satpati D. Recent breakthrough in ⁶⁸Ga-radiopharmaceuticals cold kits for convenient PET radiopharmacy[J]. Bioconjugate Chemistry, 2021, 32(3): 430-447.
- [11] Wang J, Gao R, Cao S, et al. Production of medical isotope ⁶⁸Ge based on a novel chromatography separation technique and assembling of ⁶⁸Ge/⁶⁸Ga generator[J]. Applied Radiation and Isotopes, 2023, 192: 110599.
- [12] 李龙, 周赛, 丁颂东, 等. 医用⁶⁸Ge-⁶⁸Ga 发生器研究进展[J]. 同位素, 2023, 36(2): 247-258.
Li Long, Zhou Sai, Ding Songdong, et al. The current development status of ⁶⁸Ge-⁶⁸Ga generators for medical use[J]. Journal of Isotopes, 2023, 36(2): 247-258 (in Chinese).
- [13] Okamoto H. Ga-Ni (gallium-nickel)[J]. Journal of Phase Equilibria and Diffusion, 2010, 31(6): 575-576.
- [14] Hermanne A, Tárkányi F T, Ignatyuk A V, et al. Evaluated and recommended cross-section data for production of radionuclides with emerging interest in nuclear medicine imaging. Part 1: Positron emission tomography (PET)[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 2023, 535: 149-192.
- [15] Mahmodi M, Sadeghi M, Tenreiro C. Prediction of palladium-103 production using the Monte Carlo code MCNPX[J]. Annals of Nuclear Energy, 2013, 57: 195-198.
- [16] 汤晓斌. 基于蒙特卡罗方法的仿真体模辐射剂量计算研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2009.
- [17] 李静文. 基于 Open CASCADE 的蒙特卡罗粒子输运程序前处理方法研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2022.
- [18] 戴智博, 杜静宜, 周敏, 等. 基于 SRIM 程序两种模式计算石墨在离子辐照下的损伤程度[J]. 炭素技术, 2021, 40(4): 25-30.
Dai Zhibo, Du Jingyi, Zhou Min, et al. Calculation of damage degree of graphite under ion irradiation based on two models of SRIM program[J]. Carbon Techniques, 2021, 40(4): 25-30 (in Chinese).