مجله علوم و فنون هسته ای، دوره ۴۵، شماره ۲، جلد ۱۰۸، تابستان ۱۴۰۳

Journal of Nuclear Science and Technology Vol. 45 (3), Serial Number 108, 2024



امکانسنجی تولید رادیونوکلئید پزشکی برم-۷۶ با استفاده از یون سنگین ⁺Li

علی جمشیدی، مهیار نیروئی* گروه مهندسی پرتوپزشکی، دانشکده فنی و مهندسی، واحد لاهیجان، دانشگاه آزاد اسلامی، صندوق پستی: ۱۶۱۶، لاهیجان – ایران

*Email: mnirouei@gmail.com

مقالهی پژوهشی تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۱۱/۵ - تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۳/۲

چکیدہ

برم-۷۶ (نیمهعمر ۱۶/۲ ساعت) رادیونوکلنیدی پوزیترونزا است که پتانسیل بالایی برای استفاده در پزشکی هستهای دارد؛ اما به دلیل دشواری تولید مقادیر تجاری آن، فقط در مطالعات آزمایشگاهی استفاده میشود. این رادیونوکلئید معمولاً از طریق واکنش ^{۷۶}Se(p,n)^{۷۶}Br تولید میشود. هدف از این تحقیق، بررسی امکان تولید تجاری ۳³ از طریق بمباران هدفهایی از جنس ایزوتوپهای پایدار ژرمانیم با یون سنگین ⁺Li^۷ است. با استفاده از کدهای مونتکارلو EMPIRE و ⁺⁺HISEcutel، توابع برانگیختگی واکنشهای ۳⁶Ce(^VLi⁺, n)⁹⁶Br سنگین ⁺Li^۷ است. با استفاده از کدهای مونتکارلو EMPIRE و ⁺⁺HISEcutel، توابع برانگیختگی واکنشهای ۳⁶Ce(^VLi⁺, n)⁹Br ⁻V⁰Ge(^VLi⁺, 7n)⁹Br ⁻V⁰Ge(^VLi⁺, 4n)⁹⁹Br ⁻V⁰Ge(^VLi⁺, 7n)⁹Br ⁻V⁰Ge(^VLi⁺, 7n)⁹Br واکنش ۳⁶Ce(^VLi⁺, 7n)⁹⁹Br ⁻V⁰Ge(^VLi⁺, 4n)⁹Ce (PAP⁰) و ۲۵⁴Ce(PAP⁰) است. بهره تئوری و تجربی واکنش انرژی ۴۰ مگالکترونولت برای این کدها به ترتیب ۴۳۵(PAP⁰ و ۳۲۵⁴۶۲ و ۲۵⁴PA⁰ است. این توابع برانگیختگی، انرژی ۲۰۰ مگالکترونولت برای این کدها به ترتیب ۴۸۵(PAP⁰ و ۳۲۵⁴۶۲ و ۲۵⁴PA⁰ است. بهره تئوری و تجربی واکنش واکنشهای ۳⁴⁹ در انرژی ۱۶ مگالکترونولت به ترتیب ۶۵⁴۶۲ و ۸۵۶⁴۶۱ MBq⁰AA است. از مقایسه بهره تولید تئوری در انرژی دو مگالکترونولت برای این کدها به ترتیب ۶۵⁴۶۵ MBq⁰AA و ۸۹⁴⁰۵⁴۶۲ است. بهره تئوری و تجربی واکنش مواکنشهای ۳⁴⁹ در انرژی ۱۶ مگالکترونولت به ترتیبه را گرفت که واکنش ۳³⁹⁰¹¹¹ تنها زمانی مورد توجه قرار میگیرد که هدف ^{10⁴0} یا ترکیبی از آن قابلیت پرتوگیری طولانیمدت (بدون ذوب شدن) را داشته باشد و از این طریق، اکتیویته ۳⁴¹⁴

کلیدواژدها: برم-۷۶، ژرمانیم، سلنیم-۷۶، شبیهسازی مونتکارلو، بهره تولید

Feasibility of bromine-76 medical radionuclide production by 7Li+ heavy ion

A. Jamshidi, M. Nirouei*

Department of Radiological Engineering, Faculty of Engineering, Lahijan Branch, Islamic Azad University, P.O.Box: 1616, Lahijan - Iran

Research Article Received 25.1.2023, Accepted 23.5.2023

Abstract

Bromine-76 (half-life = 16.2 hours) is a positron emitter radionuclide with a high potential for use in nuclear medicine; but due to the difficulty of producing commercial quantities, it is only used in laboratory studies. This radionuclide is usually produced through the reaction of 76Se(p,n)76Br. This research investigates the possibility of obtaining commercial quantities of 76Br by bombarding targets made of stable germanium isotopes with 7Li+ heavy ion. The excitation functions of 70Ge(7Li+,n)76Br, 72Ge(7Li+,3n)76Br, 73Ge(7Li+,4n)76Br, 74Ge(7Li+,5n)76Br and 76Ge(7Li+,7n)76Br reactions were drawn using the EMPIRE and LISEcute++ codes. From the comparison of these excitation functions, 72Ge(7Li+,3n)76Br in the energy range of 30 to 40MeV was selected as the premier reaction. The maximum theoretical production yield in 40MeV for these codes is 32.46MBq/ μ Ah and 61.43MBq/ μ Ah, respectively. The analyzed and experimental yields of 76Se(p,n)76Br at 16MeV are 506.61MBq/ μ Ah and 88MBq/ μ Ah, respectively. From the comparison of the theoretical production yield of 72Ge(7Li+,3n)76Br and 76Se(p,n)76Br reactions, it can be concluded that the 72Ge(7Li+,3n)76Br reaction is considered only when the target of 72Ge or a combination of them have long-term irradiation capability (without melting) and thus produce more 76Br activity in practice.

Keywords: Bromine-76, Germanium, Selenium-76, Monte Carlo simulation, Production yield

Journal of Nuclear Science and Technology

Vol. 45 (3), Serial Number 108, 2024, P 91-99

مجله علوم و فنون هستهای دوره ۴۵، شماره ۲، جلد ۱۰۸، تابستان ۱۴۰۳، ص ۹۱–۹۹

امکانسنجی تولید رادیونوکلئید پزشکی برم-۷۶ با استفاده از ...

۱. مقدمه

رادیونوکلئیدها نقش مهمی در زندگی بشر ایفا میکنند و کاربرد آنها در پزشکی، کشاورزی و صنعت روزبهروز در حال افزایش است. پزشکی هستهای یکی از علوم کاربردی است که از طیف وسیعی از رادیونوکلئیدها برحسب نوع واپاشی، نیمهعمر مؤثر، پرتوهای ساطع شده از آن و انرژی این پرتوها، یا در امر تشخیص و یا در درمان بیماریها استفاده میکند. در بحث درمان، رادیونوکلئیدها به سه طریق رادیوتراپی سیستمیک، رادیوتراپی خارجی و براکیتراپی مورد استفاده قرار میگیرند. توموگرافی کامپیوتری گسیل تک فوتون (SPECT) و توموگرافی گسیل پوزیترون (PET) نیز دو بازوی قدرتمند تشخیصی در پزشکی هستهای هستند.

در روش تصویربرداری PET از خصوصیات واپاشی رادیونوکلئیدهای گسیلنده پوزیترون استفاده میشود. در این روش ترکیبات خاص حاوی رادیونوکلئید گسیلنده پوزیترون (رادیودارو) به بدن بیمار تزریق شده و بعد از تجمع آن در بافت مورد نظر، فرایند تصویربرداری شروع میشود. پس از تابش پوزیترون، دو فوتون ۵۱۱ کیلوالکترونولت ناشی از نابودی زوج الکترون- پوزیترون بهطور همزمان با زاویه ۱۸۰ درجه نسبت به هم ساطع شده که توسط دو آشکارساز بهطور همزمان آشکار میشوند و در تشکیل تصویر شرکت میکنند. آ^{۸۲} مهمترین رادیونوکلئید مورد استفاده در TET است که در طیف وسیعی از تصویربرداریها از رادیوداروهای آن استفاده میشود. علاوه بر ارگانهای خاص، از رادیونوکلئیدهای گسیلنده پوزیترون دیگری ارگانهای خاص، از رادیونوکلئیدهای گسیلنده پوزیترون دیگری نیز استفاده میشود که میتوان به ۲۰'، ۳۸'، ۵۵'، ۵۵'، ۱^{۲۲}

برم- ۷۶ (۳۳ الایونوکلئیدی با نیمهعمر ۱۶/۲ ساعت است که در ۵۴٪ از موارد با گسیل پوزیترون و در ۴۶٪ از موارد با گیراندازی الکترون به سلنیوم- ۷۶ (۶^۹۶») پایدار واپاشیده میشود. نیمهعمر ۲⁹^۶۳ باعث میشود که بتوان از آن بهعنوان ردیاب هستهای در مواردی که نیمهعمر بیولوژیکی یک یا دو روز است، مانند پادتنهای تک دودمانی، استفاده کرد. از ۳۳^{۹۷} سه طیف پوزیترون با حداکثر انرژی ۲۹/۸، ۲۱/۵ و ۱۹/۹ مگاالکترونولت گسیل میشود که انتشار پوزیترون با انرژی میکند. دختر هسته ۶^{۹۷} ناشی از دو طیف دیگر پوزیترون، در میکند. دختر هسته با که با که بازی از موام در بازه انرژی حالت برانگیخته بوده و با گسیل چندین پرتو گاما در بازه انرژی بالای

٩٢

پوزیترونهای گسیل شده از ^{۷۶}Br ممکن است تا حدی تصاویر حاصل از گسیل پوزیترون را تحت تأثیر قرار دهد و رزولوشن فضایی این تصاویر را کاهش دهد؛ با این حال، کاهش رزولوشن نسبت به تصاویر ناشی از ^۱۸F ناچیز است و میتوان از آن چشمپوشی کرد.

هرچند به نظر می رسد مهم ترین کاربرد Br در رادیوایمونوسنتی گرافی باشد؛ با این حال در بررسی تومورهای مغزی از آن نیز استفاده شده است. علاوه بر این، امکان استفاده از این رادیونوکلئید در فرم ساده (یون برمید) وجود دارد. به دلیل تشابه همولوگی ید با برم، مولکول متا-برمو-بنزیل-گوانیدین قابل سنتز و در تصویربرداری PET در تشخیص بدخیمیهای نورواندوکرین، قابل استفاده است.

رادیونوکلئید Br معمولاً از طریق بمباران هدفهایی از جنس سلنیوم طبیعی، آرسنیک طبیعی، برم طبیعی یا ایزوتوپهای غنیشده آنها با ذرات پروتون، دوترون، آلفا و ^۳He ایزوتوپهای غنیشده آنها با ذرات پروتون، دوترون، آلفا و ^۳He شتابیافته در سیکلوترونهای پزشکی یا متوسط، قابل تولید است. واکنشهای هستهای پزشکی یا متوسط، قابل تولید ^۷Se(p,۲n)^۷⁹Br [۱–۵]، ^۳Se(p,۲n)⁹⁹Br و ⁸Se(p,n)⁹⁹Br ^{nat}Br(d,xn)⁹⁹Kr⁹Br و ¹S⁹(۳He,۲n)⁹⁹Br ^{nat}Br(d,xn)⁹⁹Kr⁹Br [۱۶]، ¹As¹ [۶]، ¹As¹ [۱۸], ¹Br¹ (1۸], ¹Br¹(d,xn)⁹⁹Kr¹ ¹As¹ (¹As¹), ¹Br¹(1),

مهمترین چالشها در تولید رادیونوکلئید Br^{۹۶} با هدفهایی از جنس آرسنیک، سلنیوم و برم، اولاً تولید همیشگی ناخالصیهای ایزوتوپی این رادیونوکلئید یعنی Br^{۹۷} و Br^{۹۷} است که هر دو رادیونوکلئید بوده و نیمهعمرهای به ترتیب برابر با ۹۷ دقیقه و ۵۷ ساعت دارند؛ و دوماً بهره تولید پایین این رادیونوکلئید است که با توجه به هزینه تولید آن، امکان استفاده از آن بهعنوان یک رادیونوکلئید عملیاتی را میسر نمی کند.

علاوه بر آلفا و یونهای سبکتر از آن، با گسترش شتابدهندههای یونهای سنگین، امکان تولید رادیونوکلئیدها با استفاده از این یونها از طریق واکنشهای هم جوشی تبخیر یون سنگین نیز وجود دارد که در بعضی از موارد، محصول تولید شده بهره بالاتری دارد و به لحاظ اقتصادی مقرون به صرفهتر است [۲۰-۲۲]. Li با درصد فراوانی ۹۲/۵٪، ایزوتوپ پایداری است که از آن میتوان بهعنوان یک یون سنگین در تولید



^{v*}Ge(^vLi⁺, ۷n) و ^{v*}Ge(^vLi⁺, ۵n) ،^{v*}Ge(^vLi⁺, ۴n) و mtaile

کد مونت کارلو EMPIRE یک کد هستهای است که توسط هرمان^۳ و همکاران در سال ۱۹۸۰ برای بررسی واکنشهای هستهای و ارزیابی دادههای هستهای در طیف وسیعی از انرژیها و ذرات فرودی طراحی شده است. در این کد ذراتی هم چون فوتون، نوکلئونها، دوترون، تریتون، آلفا، ⁺He و یونهای سبک و سنگین را می توان به عنوان پر تابه انتخاب کرد. محدوده انرژی ذرات پرتابه از اندکی بالاتر از ناحیه تشدید برای پرتابه نوترون تا چند صد مگاالکترونولت برای واکنشهای القایی با یونهای سنگین، قابل انتخاب است. این کد مدلهای هستهای متعددی از جمله مدل اپتيكى، واكنش مستقيم، مدل هسته مركب، شبيهسازی مونتکارلو هيبريدی (DDHMS)، دستور چندمرحلهای (ORION+TRISTAN)، کانالهای جفت شده و ESIS ۶۶ و OPTMAN)، مدل اکسیتون (PCROSS)، تركيب چندمرحلهای (NVWY) و نسخه كامل مدل "هاوزر - فشباخ ۴" را پوشش می دهد. آخرین نسخه این کد که در این مطالعه از آن استفاده شده، Empire-۳-۲-۲zv۲ است [۲۵].

کد هستهای ++LISEcute توسط تاراسف⁶ و بازین⁶ در سال ۱۹۸۶ در آزمایشگاه ملی سیکلوترون ابررسانا (NSCL) در دانشگاه ایالتی میشیگان طراحی شده و آخرین نسخه آن در آپریل ۲۰۲۲ ارائه شده است. هدف اصلی از طراحی این کد، شبیهسازی مدولار و کارآمد عملکرد یک بخش از خط انتقال پرتو، از جمله ترابرد پرتو از میان آن خط؛ و همچنین پیشبینی خواص پرتوهای هستهای رادیواکتیو تولید شده با برخورد پرتابه به هدف است. این کد دو ابزار جانبی به نامهای PACE۴ و GEMINI دارد که هر دو کد مونتکارلو هستند و با استفاده از آنها می توان به طور خاص محاسبات مدل آماری واکنشهای همجوشی تبخیر با پرتابههای سنگینتر از آلفا را شبیهسازی کرد. دقت این دو ابزار برای انجام آزمایش های امکان سنجی اولیه و مقایسه سطح مقطعها بین کانالهای واکنش جداگانه، کافی است. نتايج حاصل از GEMINI و PACE۴ با وجود ماهيت آماری بودن آنها، تقریباً با هم در توافق هستند. تفاوت اصلی GEMINI نسبت به PACE۴، سرعت بالاتر محاسبات و جزییات کمتر در خروجی است. این دو ابزار برای شبیهسازی

٩٣

رادیونوکلئیدها استفاده کرد. هاینیکه^۱و همکاران در سال ۱۹۶۷ دو چشمه عمومی برای شتابدهنده تاندون طراحی کردند که قادر بود طیف وسیعی از یونها از جمله ⁺Li⁺ را با شدت جریان خروجی A با ۱۰ تولید کند [۲۳]. علاوه بر آن، واسیلیف^۲ و همکاران در سال ۱۹۶۹ با استفاده از شتابدهنده سیکلوترون یون ^۷Li⁺⁺⁺ را تا انرژی MeV ۳۰ شتاب دادند [۲۴]. پس می توان نتیجه گرفت که می توان یون سنگین ^۲Li⁺ را با تغییر چشمه یونی در شتابدهندههای خطی و یا سیکلوترون، تا انرژیهای بالا شتاب داد. ژرمانیوم عنصری شبهفلز و جامد به رنگ نقرهای است که در حالت خالص ترکیبی از ۵ ایزوتوپ یایدار ^{۷۲}Ge (/.۲۱/۲۳) ^{۷۳}Ge (/.۲۱/۲۳) ^{۷۰}Ge یایدار ^{۷۴}Ge (۱۳۵/۹۴) و ۷/۴۴) است. بهعنوان یک روش جایگزین امیدوارکننده، در تحقیق حاضر امکان تولید رادیونوکلئید ⁹⁸' از طریق بمباران هدفهایی از جنس ایزوتوپهای پایدار غنی شده ژرمانیوم با یون سنگین ^۷Li⁺ مورد بررسی قرار گرفت. برای تحقق این امر، تابع برانگیختگی واکنشهای ^{٬٬۳}Ge([٬]Li⁺,۴n) ^{٬٬۲}Ge([٬]Li⁺,۳n) ^{٬٬}Ge([٬]Li⁺,n) واکنشهای و $^{ve}Ge(^{v}Li^{+}, \forall n)$ و $^{ve}Ge(^{v}Li^{+}, \forall n)$ و $^{ve}Ge(^{v}Li^{+}, \Delta n)$ مونت كارلو EMPIRE و +++ LISEcute بهدست آمده و بهره تئوری تولید بهترین واکنش محاسبه شده و نتایج حاصل از آن با نتایج شبیهسازی و تجربی ناشی از واکنش ^{vs}Se(p,n) مقایسه شد.

۲. مواد و روش کار

در حالت کلی برای محاسبه بهره تولید یک واکنش هستهای، باید تابع برانگیختگی آن واکنش و توان ایستانندگی جرمی ماده هدف در برابر پرتابه فرودی به دست آید. آزمایش تجربی و شبیهسازی کامپیوتری دو روش اصلی برای به دست آوردن این دو تابع هستند که در این مطالعه از روش شبیهسازی کامپیوتری استفاده شده است.

۱.۲ محاسبه تابع برانگیختگی

در این مطالعه به دلیل بررسی شرایط تولید رادیونوکلئید Br^{۹۶} از طریق واکنش همجوشی تبخیر یون سنگین، از کدهای مونتکارلو EISEcute++ ،EMPIRE برای محاسبه تابع برانگیختگی واکنشهای (^۷Li⁺,n^{*})، (^۷Ge^{(۷}Li⁺,۳n

بنه عوم و قنون هست»ی ۵٫۵ ۴۵، شماره ۲، جلد ۱۰۸، تابستان ۱۴۰۳، ص ۹۱–۹۹



علی جمشیدی، مهیار نیروئی

^{3.} Herman

^{4.} Hauser-Feshbach Model

^{5.} Tarasov

^{6.} Bazin

Journal of Nuclear Science and Technology

Vol. 45 (3), Serial Number 108, 2024, P 91-99

^{1.} Heinicke

^{2.} Vasiliev

امکانسنجی تولید رادیونوکلئید پزشکی برم-۷۶ با استفاده از ...

واکنشهای همجوشی تبخیر، مدل کامل "هاوزر- فشباخ" و مدل "ویزکوف" را پوشش میدهند [۲۶].

۲.۲ محاسبه ضخامت ماده هدف و توان ایستانندگی آن

ذرات پرتابه هنگام ورود به هدف، به اتمهای آن برخورد می کنند و در هر برخورد مقداری از انرژی خود را از دست میدهند. میزان افت انرژی (dE) در یک مسافت معین (dX) را توان ایستانندگی مینامند که به جرم پرتابه و هدف، انرژی پرتابه، چگالی هدف و بار الکتریکی پرتابه بستگی دارد. ضخامت مورد نظر از هدف نیز باید به اندازهای باشد که این میزان افت انرژی در هدف را تأمین کند. برای به دست آوردن ضخامت ماده هدف و توان ایستانندگی آن، محدوده انرژی بهینه باید به گونهای انتخاب شود که در آن بازه، سطح مقطع تولید هدف بیشینه باشد و کمترین میزان ناخالصی نیز تولید شود.

محاسبه ضخامت ماده هدف و توان ایستانندگی آن با استفاده از کد محاسباتی SRIM انجام میشود که با روش مونتکارلو به حل عددی مسأله میپردازد. این کد توسط زیگلر^۱ و همکاران در سال ۱۹۸۵ نوشته شده و آخرین نسخه آن SRIM-۲۰۱۳ است. این کد ذراتی با انرژی ۱۰ الکترونولت تا ۲ گیگاالکترونولت را پوشش میدهد. در خروجی این کد میتوان برد ذرات پرتابه با انرژی مشخص در ماده هدف و توان ایستانندگی جرمی آن ماده را مشاهده کرد [۲۷].

۳.۲ محاسبه بهره توليد

بهره تولید رادیونوکلئید معیاری است که با استفاده از آن میتوان میزان کارآمدی واکنشهای مختلف در تولید یک رادیونوکلئید را با هم مقایسه کرد. در حالت کلی بهره تولید رادیونوکلئید در یک واکنش هستهای از رابطه زیر به دست میآید:

$$Y = \prod_{i} \cdots \prod_{k=1}^{H \times I} (1 - e^{-\lambda t}) \int_{E_E}^{E_I} \frac{\sigma(E)}{S_p(E)} dE$$
 (1)

که در آن Y بهره تولید رادیونوکلئید (mCi/ μ A.h)؛ I شدت جریان بیم فرودی (μ A)؛ H درصد فراوانی ماده هدف؛ M جرم مولی ماده هدف (gr/mol)؛ Λ ثابت واپاشی محصول ($^{(-1)}$)؛ tمدت زمان بمباران هدف (h)؛ $\sigma(E)$ تابع برانگیختگی ماده هدف (mbarn)؛ $S_P(E)$ توان ایستانندگی جرمی هدف هدف (MeV.cm^r/mgr))؛ E_E و E_I (MeV.cm^r/mgr)

1. Ziegler

و انتهایی ذره فرودی در حین عبور از لایه هدف است. با محاسبه تابع برانگیختگی و توان ایستانندگی جرمی هر کدام یک از واکنشها با استفاده از نتایج کدهای مونتکارلو LISEcute++ EMPIRE، میتوان بهره تولید هر واکنش را به دست آورد.

۳. یافتهها

در این مطالعه پارامترهای تولید مستقیم Br^{9%} از طریق بمباران هدفهایی از جنس ایزوتوپهای پایدار ژرمانیوم با یون $^{+}Li^{+}$ هدفهایی از جنس ایزوتوپهای پایدار ژرمانیوم با یون $^{+}Li^{+}$ هدفهایی از جنس ایزوتوپهای پایدار ژرمانیوم با یون $^{+}Li^{+}$ محت واکنشهای ($^{-}VGe(^{+}Li^{+}, n)$) $^{-}V^{+}Ge(^{+}Li^{+}, n)$ و $^{-}VGe(^{+}Li^{+}, n)$ محاسبه تابع برانگیختگی این واکنشها به وسیله کدهای فشباخ" برای محاسبات استفاده شد. شکلهای ۱ تا ۵ تابع فشباخ" برای محاسبات استفاده شد. شکلهای ۱ تا ۵ تابع مکلهای ۱ تا ۵ میده. از مدل کامل "هاوزر- فشباخ" برای محاسبه شده این واکنشها را نشان میدهند. از فشباخ" برای محاسبه شده این واکنشها را نشان میدهند. از محلیهای ۱ تا ۵ می وان این نتیجه را گرفت که نمودارهای برم، شکلهای ۱ تا ۵ می وان این نتیجه دا گرفت که نمودارهای برم، فاهر مشابهی دارند و در یک محدوده انرژی قرار دارند؛ البته اختلاف ارتفاع این نمودارها چند صد میلیبارن است و نتایج ایدستآمده از که بیش تر از تایج این ده محدوده انرژی قرار دارند؛ البته اختلاف ارتفاع این نمودارها چند صد میلیبارن است و نتایج ایدستآمده از که بات ده می موارد بیش تر از نتایج است.

در شکل ۱ سطح مقطع واکنش ^{۷۰}Ge(^vLi⁺,n)^{۷۶}Br در انرژیهای مختلف به حدی پایین است که می توان نتیجه گرفت که این واکنش، گزینه مناسبی برای تولید ^{۹۶}Br نیست. علاوه بر این، در شکلهای ۲ تا ۵ به وضوح قابل مشاهده است که با افزایش عدد جرمی ژرمانیوم، انرژی لازم برای تولید ^{۷۶}Br افزایش و سطح مقطع تولید کاهش می یابد. با افزایش انرژی پرتابه، میزان و نوع رادیونوکلئیدهای مزاحم تولید شده نیز افزایش می یابد. مهم ترین ناخالصی های رادیوایزو توپی تولید ho_{1} (۲) ho_{1} ho_{1} ho_{2} ho_{2} دقیقه) و ^{۸۰}Br (۱۷٬۶۸ دقیقه) هستند که به واسطه نیمهعمر ۱۶٫۲ ساعتی ^{۷۶}Br، با سردسازی مناسب میتوان به طور مؤثری ^{۷۵}Br ، ^{۷۵}Br و ^{۲۲} را حذف کرد؛ اما ^{۷۲}Br چون نیمهعمر بالاتری نسبت به ⁹⁸^r دارد، با سردسازی قابل حذف نیست و چون در انرژیهای پایین تری نیز تولید می شود، با محدود کردن بازه انرژی بیم فرودی نیز قابل حذف نیست. پس تنها راهحل، انتخاب واکنشی است که پایینترین بهره تولید ^{۷۷}Br را داشته $^{\gamma\gamma}\mathrm{Br}$ باشد. لازم به ذکر است که در واکنش $\mathrm{Se}(\mathrm{p,n})^{\gamma\varsigma}\mathrm{Br}$ نیز $\mathrm{Se}(\mathrm{p,n})^{\gamma}\mathrm{Se}(\mathrm{p,n})$

Journal of Nuclear Science and Technology Vol. 45 (3), Serial Number 108, 2024, P 91-99





با استفاده از کد SRIM، ضخامت و توان ایستانندگی هدف در بازه انرژی • تا ۱۰۰ مگاالکترونولت برای واکنشهای ^{۷۶}Ge(^vLi⁺,xn) و Se(p,xn)^۷ محاسبه شد. با استفاده از نرمافزار محاسباتی MATLAB، تابع توان ایستانندگی هدف و تابع برانگیختگی این واکنشها به دست آمد و با انتگرالگیری مستقیم از معادله ۱، بهره تئوری تولید Br^{۹۶} و

Journal of Nuclear Science and Technology Vol. 45 (3), Serial Number 108, 2024, P 91-99 در انرژی پایین تری نسبت به Br^{۹۶} تولید می شود و عملاً قابل حذف نیست (شکل ۶ را ببینید). لازم به یادآوری است که در این واکنش ها علاوه بر رادیوایزو توپ های برم، رادیو نوکلئیدهای عناصر سلنیم، آرسنیک، ژرمانیوم، گالیم، روی، مس، نیکل، کبالت، آهن، منگنز، کروم و وانادیم نیز تولید می شود که می توان به روش های شیمیایی مؤثر آن ها را حذف کرد.



مجله علوم و فنون هستهای دوره ۴۵، شماره ۲، جلد ۱۰۸، تابستان ۱۴۰۳، ص ۹۱–۹۹

98



شکل ۸. بهره تولید Br[%] و ^{۷۷}Br تحت واکنش (^{۷۲}Ge(^۷Li⁺,xn^{*}

شکل ۱۱. بهره تولید B۲° و ^{۷۲}۳ تحت واکنش (Se(p,xn^۷).

Journal of Nuclear Science and Technology Vol. 45 (3), Serial Number 108, 2024, P 91-99

مهمترین ناخالصی آن یعنی ^{vy}Br محاسبه شد که در شکلهای ۷ تا ۱۱ قابل مشاهده است.

از مقایسه شکلهای ۲ تا ۱۰ میتوان دید که بهره تئوری تولید ^{γν}Br تحت واکنش ^{γγ}Ge(^γLi⁺,xn) در کل محدوده انرژی ۲۰ تا ۶۰ مگاالکترونولت برابر با ۱٬۱۸ MBq/μA.h تا کمترین مقدار ممکن است که نسبت به سه واکنش دیگر، کمترین مقدار ممکن است. با وجود اینکه بهره تئوری تولید ^γBr تحت واکنش دیگر ^γGe(^γLi⁺,xn) از سه واکنش دیگر کمتر است؛ این واکنش به دلیل کمترین بهره تولید ^{γγ}Br مناسبترین واکنش برای تولید ^γBr از طریق بمباران ژرمانیوم با یون سنگین ⁺Li⁺ است.

در شکل ۱۱ میتوان به وضوح دید که بهره تولید Br^{۷۷} تحت واکنش (P,xn)^{۷۶}Se(p,xn بسیار ناچیز است و بیشترین مقدار آن در حدود NBq/μA.h است. بهره تولید ^{۷۶}Br در انرژی MeV ۲۵ بیشترین مقدار خود را دارد؛ اما در این انرژی ناخالصی رادیوایزوتوپی ^{۷۵}Br با نیمهعمر ۱/۶۱ ساعت تولید میشود که برای حذف آن به ۸ تا ۱۶ ساعت سردسازی نیاز است. نیمهعمر ^{۷۶}Br برابر با ۱/۶۲ ساعت است و با این سردسازی تقریباً نصف بهره تولید ^{۱۹۶۲} از بین میرود؛ پس بهتر است که بیشترین انرژی بیم فرودی ۱۶^{۹۷} باشد تا هم ^{۷۵}Br تولید نشود و هم بهره تولید ^{۱۹}

در جدول ۱ دادههای مربوط به محاسبات حاصل از ^{۷۶}Se(p,n)^{۷۶}Br و ^{۷۲}Ge(^۷Li⁺,۳n)^{۷۶}Br در بهترین محدوده انرژی با کمترین میزان ناخالصی تولیدی، مقایسه شده است.







على جمشيدى، مهيار نيروئي					
جدول ۱ . مقایسه محاسبات حاصل از شبیهسازی و نتایج تجربی دو واکنش Ge(^v Li ⁺ ,۳n) ^{vs} Br و Se(p,n) ^{vs} Br (بهره تولیدی برحسب MBq/µAh)					
بهره توليد تجربي	بهره تولید تئوری حاصل از ++LISEcute	بهره تولید تئوری حاصل از EMPIRE	ضخامت هدف (μm)	بازہ انرژی ایدہآل (MeV)	واكنش
	۶۱٬۴۳ – ۲۸٬۳۸	377,48 - 14,7V	۱۳۱٬۶۶ – ۸۳٬۸۳	۴۰ – ۳۰	$^{\vee \tau}Ge(^{\vee}Li^{+}, \tau n)^{\vee s}Br$
۵۰ (در MeV) ۵۰ ۸۸ (در ۱۶ MeV) [۱۴]		D+8181 - 88188	۱۰۵۰ - ۳۹۶٫۷۵	١۶ - ٩	^v ^s Se(p,n) ^v ^s Br

۴. نتیجهگیری

در این تحقیق امکان تولید رادیونوکلئید ^{ve}Br از طریق بمباران اهدافی از جنس ^{۷۶}Ge ،^{۷۲}Ge ،^{۷۲}Ge ،^{۷۲}Ge و ^{۷۶}Ge با بیمی از ^vLi⁺ به صورت تئوری مورد بررسی قرار گرفت. در ابتدا تابع برانگیختگی واکنشها با استفاده از کدهای هستهای EMPIRE و +++ LISEcute شبیهسازی شد و با استفاده از کد SRIM، ضخامت و توان ایستانندگی هدف در بازه انرژی ۰ تا ۱۰۰ مگاالکترونولت برای واکنشهای ^{۷۲}Ge(^vLi⁺,xn)، و واكنش ^{۷۴}Ge(^۷Li⁺,xn) و ^{۷۴}Ge(^۷Li⁺,xn) و واكنش رایج (^{v.}Ge(^vLi⁺,xn) محاسبه شد و واکنش ^{v.}Ge(^vLi⁺,xn) رایج دلیل سطح مقطع بسیار پایین تولید ^{۷۶}Br از محاسبات حذف شد. با استفاده از نرمافزار محاسباتی MATLAB، تابع توان ایستانندگی هدف و تابع برانگیختگی این واکنشها به دست آمد و با انتگرال گیری مستقیم از معادله ۱، بهره تئوری تولید ^{۷۶}Br و مهمترین ناخالصی آن یعنی ^{۷۷}Br محاسبه شد و در نهایت بر اساس بهره توليد ناخالصي ^{۷۷}Br، واكنش Ge(^۷Li⁺, ۳n)^{۷۶}Br در بازه انرژی ۳۰ تا ۴۰ مگاالکترونولت بهعنوان مناسبترین واكنش انتخاب شد. بيش ترين مقدار سطح مقطع محاسبه شده برای واکنش EMPIRE و ^{۷۲}Ge(^۷Li⁺,۳n)^{۷۶}Br توسط کدهای ++ LISEcute به ترتیب برابر با ۴۱۵٬۶ و ۷۳۸٬۱ میلیبارن است که با وجود اختلاف زیاد ۳۲۲٬۵ میلیبارنی، هر دو در انرژی ۳۰ مگاالکترونولت قرار دارند و همچنین نتایج این دو کد تابع برانگیختگیهای مشابهی را نشان میدهند که در برآورد اولیه محدوده انرژی بیم فرودی برای آزمایشهای تجربی اهمیت بالایی دارد. بیشترین بهره تولید تئوری بهدستآمده در انرژی ۴۰ مگاالکترونولت با هدفی از جنس ^{۷۲}Ge غنی شده به ضخامت ۱۳۱٬۶۶ میکرومتر برای تابع برانگیختگی حاصل از کدهای EMPIRE و +++ LISEcute به ترتیب برابر با ۳۲٬۴۶ MBq/μAh و ۶۱٬۴۳ MBq/μAh است. بهره تئوری و تجربی واکنش Se(p,n)^{vs}Br در انرژی ۱۶ مگاالکترونولت به ترتیب برابر با ۸۸ MBq/µAh و ۵۰۶٬۶۱ MBq/µAh (برای هدفی از جنس CoSe) است. از مقایسه بهره تولید تئوری این دو واکنش میتوان به وضوح دید که بهره تولید واکنش ^{۷۶}Se(p,n)^{۷۶}Br بیش تر از واکنش Se(^۷Li⁺,۳n)^{۷۶}Br است.

واکنش ^γSe(p,n)^γBr در حال حاضر رایجترین واکنش عملی برای تولید Br^γBr است که به دلیل نقطه ذوب پایین سلنیوم (۲۲۱ درجه سانتی گراد) و ترکیبات آن (Co^γSe طولانیمدت هدفها به خاطر ذوب شدن آنها، امکان تولید تجاری این رادیونوکلئید را فراهم نمی کند و همچنان در حد تولید آزمایشگاهی باقی مانده است؛ چون پرتودهی Co^γSe در انرژی ۱۶ مگاالکترونولت، تنها MBq/µAh بهره به دست می دهد.

ژرمانیوم عنصری با نقطه ذوب ۹۳۸٬۲۵ درجه سانتی گراد است که نقطه ذوب آن بیش از ۴ برابر سلنیوم است. علاوه بر این، ترکیباتی از ژرمانیوم مانند GeRu و GerRu نقطه ذوبی در محدوده ۲۵۰۰ تا ۱۶۰۰ درجه سانتی گراد دارند که می تواند امکان پرتودهی طولانی تر هدف را فراهم کند [۲۸]. البته باید به این موضوع اشاره کرد که در شبیه سازی بمباران Ru با یون ⁺¹ در محدوده انرژی ۳۰ تا ۴۰ مگالترون ولت، اثری از رادیوایزوتوپهای برم وجود ندارد و عمدتاً رادیوایزوتوپهای نقره با بهره تولید بسیار پایین مشاهده می شود که با روشهای شیمیایی می توان آنها را حذف کرد. از ترکیب ژرمانیوم با پارهای از عناصر دیرذوب مانند کروم، تیتانیوم، مولیبدنیم و پارهای از عناصر دیرذوب مانند کروم، تیتانیوم، مولیبدنیم و روتنیوم که قیمت پایینی دارند و در انرژی ذکر شده منجر به تولید رادیوایزوتوپهای برم نمی شوند؛ می توان نقطه ذوب هدف را تا حد زیادی بالا برد.

برای این که یک رادیوایزوتوپ به صورت تجاری قابل ارائه باشد، علاوه بر دسترسی به تأسیسات مورد نیاز و آگاهی از واکنش با بهره تولید بالا، باید تولید آن به لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه باشد. قیمت مواد اولیه از جمله قیمت هدف غنی شده یکی از فاکتورهای مهم در تولید مقرون به صرفه یک رادیوایزوتوپ است. در حال حاضر قیمت هر میلیگرم از هدف غنی شده ع⁹ برابر با ۲۷/۷ یورو و برای ⁹Ge بین ۶ تا ۷ یورو است [۲۹]. پس هدفی از جنس ⁹G^{۲۷} غنی شده، چهار برابر ارزان تر از ⁹S⁹ است.



٩٨

- Spahn I, Steyn G.F, Vermeulen C, Kovács Z, Szelecsényi F, Coenen H.H, Qaim S.M. New cross section measurements for production of the positron emitters ⁷⁵Br and ⁷⁶Br via intermediate energy proton induced reactions. Radiochim. Acta. 2009;97:535– 541.
- Hassan H.E, El-Azony K.M, Azzam A, Qaim S.M. Investigation of selenium compounds as targets for ^{76,77}Br production using protons of energies up to 34 MeV. Radiochim Acta. 2017;105(10):841–50.
- Breunig K, Spahn I, Spellerberg S, Coenen H.H. Production of no-carrier-added radiobromine: new nickel selenide target and optimized separation by dry distillation. Radiochim Acta. 2015;103:397–402.
- Ellison P.A, Graves S.A, Murali D, De Jesus O.T, Barnhart T.E, Thomadsen B.R, Speer T, Nickles R.J. Radiobromine production, isolation and radiosynthesis for the development of a novel prostate cancer radiotherapeutic agent. AIP Conf. Proc. 2017;1845:1–8.
- 14. Ellison P.A, Olson A.P, Barnhart T.E, Hoffman S.L.V, Reilly S.W, Makvandi M, Bartels J.L, Murali D, DeJesus O.T, Lapi S.E, Bednarz B, Nickles R.J, Mach R.H, Engle J.W. Improved production of ⁷⁶Br, ⁷⁷Br and ^{80m}Br via CoSe cyclotron targets and vertical dry distillation. Nucl. Med. Biol. 2020;80– 81:32–36.
- Paans A.M.J, Welleweerd J, Vaalburg W, Reiffers S, Woldring M.G. Excitation functions for production of bromine-75: a potential nuclide for the labeling of radiopharmaceuticals. Int. J. Appl. Radiat. Isot. 1980;31:267.
- 16. Scholten B, Takács S, Tárkányi F, Coenen H.H, Qaim S.M. Excitation functions of deuteron induced nuclear reactions on enriched ⁷⁸Kr with particular relevance to the production of ⁷⁶Br. Radiochim. Acta. 2004;92:203–207.
- Qaim S.M, Stöcklin G, Weinreich R. Excitation functions for the formation of neutron deficient isotopes of bromine and krypton via high energy deuteron induced reactions on bromine: Production of ⁷⁷Br, ⁷⁶Br and ⁷⁹Kr. Int. J. Appl. Radiat. Isot. 1977;28:947–953.
- De Villiers D, Nortier M, Richter W. Experimental and theoretical functions for ^{nat}Br(p,x) reactions. Appl. Radiat. Isot. 2002;57:907.
- De Jong D, Kooiman H, Veenboer J.T. ⁷⁶Br and ⁷⁷Br from decay of cyclotron produced ⁷⁶Kr and ⁷⁷Kr. Int. J. Appl. Radiat. Isot. 1979;30:786–788.
- McGuinness S.R, Ferran S.J, Wilkinson J.T, Loveless C.Sh, Anderson T, Blankstein D, Clark A.M, Henderson S.L, Nelson A.D, Reingold C.S, Skulski M, Lapi S.E, Peaslee G.F. Production of ⁵²Fe from symmetric complete fusion-evaporation reactions. Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. B Beam Interact. Mater. Atoms. 2021;493:15–18.
- Wilkinson J.T, Barrett K.E, Ferran S.J, McGuinness S.R, McIntosh L.A, McCarthy M, Yennello Sh.J, Engle J.W, Lapi S.E, Peaslee G.F. A heavy-ion production channel of ¹⁴⁹Tb via ⁶³Cu bombardment of ⁸⁹Y. Appl. Radiat. Isot. 2021.

Journal of Nuclear Science and Technology

Vol. 45 (3), Serial Number 108, 2024, P 91-99

در نهایت تنها انجام عملی یک واکنش هستهای است که میتواند نشان دهد که آیا آن واکنش به لحاظ حداکثر اکتیویته تولیدی و قیمت تمام شده تولید، صرفه اقتصادی برای تولید تجاری را دارد یا نه؛ اما قیمت یکچهارمی و نقطه ذوب چهار برابری هدف غنی شده $Ge^{\gamma V}$ نسبت به Se^{γ} ، امکان تولید برابری هدف غنی شده $Ge^{\gamma V}$ نسبت به Se^{γ} ، امکان تولید ترکیبات $Ge^{\gamma V}$ با نقطه ذوب بالاتر نسبت به $Se^{\gamma V}$ و بهره تولید ترکیبات $Se^{\gamma V}$ با نقطه ذوب بالاتر نسبت به $Se^{\gamma V}$ و بهره تولید میتوانند فاکتورهای مهمی باشند که واکنش میتوانند فاکتورهای مهمی باشند که واکنش میتواند تبدیل آزمایش عملی تولید $Se^{\gamma V}$ در شتابدهندههای ذرات سنگین تبدیل میکند.

مراجع

- Way K, King R.W, McGinnis C.L. Nuclear Level Schemes A = 40-A = 92; AEC Report TID-5300. Washington D.C. 1955.
- Strominger D, Hollander J.M, Seaborg G.T, Table of Isotopes. Revs. Mod. Phys. 1958;30:585.
- Nozaki T, Iwamoto M, Itoh Y. Production of ⁷⁷Br by various nuclear reactions. Int J Appl Radiat Isot. 1979;30:79–83.
- Hermanne A, Sonck M, Van Hoyweghen J, Terriere D, Mertens J. Optimisation of radiobromine production from As-based targets through cross section determination. In: International conference on nuclear data for science and technology. Gatlinburg, Tennessee, USA. 1994;1039.
- 5. Breunig K, Spahn I, Hermanne A, Spellerberg S, Scholten B, Coenen H.H. Cross section measurements of $^{75}As(\alpha,xn)^{76,77,78}Br$ and $^{75}As(\alpha,x)^{74}As$ nuclear reactions using the monitor radionuclides ^{67}Ga and ^{66}Ga for beam evaluation. Radiochim Acta. 2017;105:431–439.
- 6. Alfassi Z.B, Weinreich R. The production of positron emitters ⁷⁵Br and ⁷⁶Br: excitation functions and yields for ³He and α particle induced reactions on arsenic. Radiochim. Acta. 1980;30:67–71.
- 7. Levkovskij V.N. Activation cross sections for the nuclides of medium mass region (A = 40–100) with protons and α –particles at medium (E = 10–50 MeV) energies. Experiment and systematics. INTER-VESTI, Moscow. 1991.
- Tolmachev V, Lövqvist A, Einarsson L, Schultz J, Lundqvist H. Production of ⁷⁶Br by a low-energy cyclotron. Appl Radiat Isot. 1998;49(12):1537–40.
- 9. Hassan H.E, Qaim S.M, Shubin Yu, Azzam A, Morsy M, Coenen H.H. Experimental studies and nuclear model calculations on proton-induced reactions on natSe, ⁷⁶Se and ⁷⁷Se with particular reference to the production of the medically interesting radionuclides ⁷⁶Br and ⁷⁷Br. Appl Radiat Isot. 2004;60:899–909.



علی جمشیدی، مهیار نیروئی

- 22. McGuinness S.R, Wilkinson J.T, Peaslee G.F. Heavy-ion production of ⁷⁷Br and ⁷⁶Br. Sci Rep. 2021;11:15749.
- Heinicke E, Bethge K, Baumann H. A universal ion source for tandem accelerators. Nuclear Instruments and Methods. 1968;58(1):125-133.
- 24. Vasiliev P.I, Venikov N.I, Zevjakin D.V, Ogloblin A.A, Khaldin N.N, Khoroshavin B.I, Chuev V.I, Chumakov N.I. Acceleration of lithium ions in a cyclotron. Nuclear Instruments and Methods. 1969;71(2):201-204.
- 25. Herman M, Capote R, Sin M, Trkov A, Carlson B.V, Oblozinsky P, Mattoon C.M, Wienke H. Hoblit S, Cho Y.-S, Nobre G.P.A, Plujko V, Zerkin V. EMPIRE-3.2 Malta Modular system for nuclear reaction calculations and nuclear data evaluation. report INDC (NDS)-0603, BNL-101378-2013. Vienna, Austria: International Atomic Energy Agency. 2013.

- Tarasov O.B, Bazin D. LISE++: Radioactive beam production with in-flight separators. Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. B Beam Interact. Mater. Atoms. 2008;266(8):4657-4664.
- Ziegler J.F, Ziegler M.D, Biersack J.P. SRIM-The Stopping and Range of Ions in Matter. Nucl. Instrum. Meth. B 2010;268:1818-1823.
- Perring L, Feschotte P, Gachon J.C. The germaniumruthenium system. JPE. 1996;17:101–106.
- 29. Price list of electromagnetically separated isotopes. https://en.institut-seltene-erden.de.



استناد به این مقاله

جمشیدی، علی، نیروئی، مهیار. (۱۴۰۳)، امکانسنجی تولید رادیونوکلئید پزشکی برم-۷۶ با استفاده از یون سنگین ^۲Li⁺. مجله علوم و فنون هستهای، ۱۰۸(۲)، ۹۱-۹۹. Url: https://jonsat.nstri.ir/article_1570.html .DOI: https://doi.org/10.24200/nst.2024.1570



Journal of Nuclear Science and Technology

