



امکان‌سنجی تولید رادیونوکلئید پزشکی برم-۷۶ با استفاده از یون سنگین ${}^7\text{Li}^+$

علی جمشیدی، مهیار نیروئی*

گروه مهندسی پرتو پزشکی، 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

چکیده

برم-۷۶ (نیمه‌عمر ۱۶٫۲ ساعت) رادیونوکلئیدی 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 ${}^{76}\text{Se}(p,n){}^{76}\text{Br}$ تولید می‌شود. هدف از این تحقیق، بررسی امکان تولید تجاری ${}^{76}\text{Br}$ از طریق بمباران هدف‌هایی از جنس ایزوتوپ‌های پایدار ژرمانیم با یون سنگین ${}^7\text{Li}^+$ است. با استفاده از کدهای مونت‌کارلو EMPIRE و LISEcute++، توابع برانگیختگی واکنش‌های ${}^{70}\text{Ge}({}^7\text{Li}^+,n){}^{76}\text{Br}$ ، ${}^{72}\text{Ge}({}^7\text{Li}^+,3n){}^{76}\text{Br}$ ، ${}^{73}\text{Ge}({}^7\text{Li}^+,4n){}^{76}\text{Br}$ ، ${}^{74}\text{Ge}({}^7\text{Li}^+,5n){}^{76}\text{Br}$ و ${}^{76}\text{Ge}({}^7\text{Li}^+,7n){}^{76}\text{Br}$ رسم شده و از مقایسه این توابع برانگیختگی، واکنش ${}^{72}\text{Ge}({}^7\text{Li}^+,3n){}^{76}\text{Br}$ در محدوده انرژی ۳۰ تا ۴۰ مگاالکترون‌ولت به‌عنوان واکنش برتر انتخاب شد. بیشینه بهره تولید تئوری در انرژی ۴۰ مگاالکترون‌ولت برای این کدها به ترتیب $32.46 \text{ MBq}/\mu\text{Ah}$ و $61.43 \text{ MBq}/\mu\text{Ah}$ و $506.61 \text{ MBq}/\mu\text{Ah}$ و $88 \text{ MBq}/\mu\text{Ah}$ است. بهره تئوری و تجربی واکنش ${}^{76}\text{Se}(p,n){}^{76}\text{Br}$ در انرژی ۱۶ مگاالکترون‌ولت به ترتیب $506.61 \text{ MBq}/\mu\text{Ah}$ و $88 \text{ MBq}/\mu\text{Ah}$ است. از مقایسه بهره تولید تئوری واکنش‌های ${}^{72}\text{Ge}({}^7\text{Li}^+,3n){}^{76}\text{Br}$ و ${}^{76}\text{Se}(p,n){}^{76}\text{Br}$ می‌توان این نتیجه را گرفت که واکنش ${}^{72}\text{Ge}({}^7\text{Li}^+,3n){}^{76}\text{Br}$ تنها زمانی مورد توجه قرار می‌گیرد که هدف ${}^{72}\text{Ge}$ یا ترکیبی از آن قابلیت پرتوگیری طولانی‌مدت (بدون ذوب شدن) را داشته باشد و از این طریق، اکتیویته ${}^{76}\text{Br}$ بیش‌تری را در عمل تولید کند.

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

Feasibility of bromine-76 medical radionuclide production by ${}^7\text{Li}^+$ 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 ${}^{76}\text{Se}(p,n){}^{76}\text{Br}$. This research investigates the possibility of obtaining commercial quantities of ${}^{76}\text{Br}$ by bombarding targets made of stable germanium isotopes with ${}^7\text{Li}^+$ heavy ion. The excitation functions of ${}^{70}\text{Ge}({}^7\text{Li}^+,n){}^{76}\text{Br}$ ، ${}^{72}\text{Ge}({}^7\text{Li}^+,3n){}^{76}\text{Br}$ ، ${}^{73}\text{Ge}({}^7\text{Li}^+,4n){}^{76}\text{Br}$ ، ${}^{74}\text{Ge}({}^7\text{Li}^+,5n){}^{76}\text{Br}$ and ${}^{76}\text{Ge}({}^7\text{Li}^+,7n){}^{76}\text{Br}$ reactions were drawn using the EMPIRE and LISEcute++ codes. From the comparison of these excitation functions, ${}^{72}\text{Ge}({}^7\text{Li}^+,3n){}^{76}\text{Br}$ in the energy range of 30 to 40 MeV was selected as the premier reaction. The maximum theoretical production yield in 40 MeV for these codes is $32.46 \text{ MBq}/\mu\text{Ah}$ and $61.43 \text{ MBq}/\mu\text{Ah}$ ، respectively. The analyzed and experimental yields of ${}^{76}\text{Se}(p,n){}^{76}\text{Br}$ at 16 MeV are $506.61 \text{ MBq}/\mu\text{Ah}$ and $88 \text{ MBq}/\mu\text{Ah}$ ، respectively. From the comparison of the theoretical production yield of ${}^{72}\text{Ge}({}^7\text{Li}^+,3n){}^{76}\text{Br}$ and ${}^{76}\text{Se}(p,n){}^{76}\text{Br}$ reactions, it can be concluded that the ${}^{72}\text{Ge}({}^7\text{Li}^+,3n){}^{76}\text{Br}$ reaction is considered only when the target of ${}^{72}\text{Ge}$ or a combination of them have long-term irradiation capability (without melting) and thus produce more ${}^{76}\text{Br}$ activity in practice.

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



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. ^{18}F مهم‌ترین رادیونوکلئید مورد استفاده در PET است که در طیف وسیعی از تصویربرداری‌ها از رادیوداروهای آن استفاده می‌شود. علاوه بر ^{18}F ، در موارد اختصاصی و برای تصویربرداری از بعضی ارگان‌های خاص، از رادیونوکلئیدهای گسیلنده پوزیترون دیگری نیز استفاده می‌شود که می‌توان به ^{13}N ، ^{11}C ، ^{15}O ، ^{68}Ga ، ^{124}I ، ^{64}Cu و ^{76}Br اشاره کرد.

برم-۷۶ (^{76}Br) رادیونوکلئیدی 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 (^{76}Se) پایدار واپاشیده می‌شود. نیمه‌عمر ^{76}Br 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 ^{76}Br سه طیف پوزیترون با حداکثر انرژی ۳٫۶۸، ۳٫۱۵ و ۱٫۹ مگاالکترون‌ولت گسیل می‌شود که انتشار پوزیترون با انرژی ۳٫۶۸ مگاالکترون‌ولت، دختر هسته‌ای در حالت پایه را تولید می‌کند. دختر هسته ^{76}Se ناشی از دو طیف دیگر پوزیترون، در حالت برانگیخته بوده و با گسیل چندین پرتو گاما در بازه انرژی ۰٫۵۶ تا ۴٫۴۲ مگاالکترون‌ولت، به حالت پایه می‌رود. انرژی بالای

پوزیترون‌های گسیل شده از ^{76}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 ^{18}F ناچیز است و می‌توان از آن چشم‌پوشی کرد.

هرچند به نظر می‌رسد مهم‌ترین کاربرد ^{76}Br در رادیوایمونونوستی‌گرافی 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 ^{76}Br معمولاً از طریق بمباران هدف‌هایی از جنس سلنیوم طبیعی، آرسنیک طبیعی، برم طبیعی یا ایزوتوپ‌های غنی‌شده آن‌ها با ذرات پروتون، دوترون، آلفا و ^3He شتاب‌یافته در سیکلوترون‌های پزشکی یا متوسط، قابل تولید است. واکنش‌های هسته‌ای $^{76}\text{Br}(\alpha, n)^{76}\text{As}$ [۱-۵]، $^{76}\text{Br}(^3\text{He}, n)^{76}\text{As}$ [۶]، $^{76}\text{Br}(p, n)^{76}\text{Se}$ [۳، ۷-۱۵]، $^{76}\text{Br}(d, \alpha)^{76}\text{Kr}$ [۱۶]، $^{76}\text{Br}(p, xn)^{76}\text{Kr}$ [۱۷]، $^{76}\text{Br}(d, xn)^{76}\text{Kr}$ [۱۸]، $^{76}\text{Br}(^3\text{He}, n)^{76}\text{Kr}$ [۱۹]، واکنش‌هایی هستند که تا به امروز برای تولید ^{76}Br مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در این بین واکنش $^{76}\text{Se}(p, n)^{76}\text{Br}$ به دلیل بهره تولید بالاتر، سطح ناخالصی پایین‌تر و انرژی ذره فرودی کمتر، بیش‌تر از سایر روش‌ها در تولید ^{76}Br مورد استفاده قرار می‌گیرد.

مهم‌ترین چالش‌ها در تولید رادیونوکلئید ^{76}Br با هدف‌هایی از جنس آرسنیک، سلنیوم و برم، اولاً تولید همیشگی ناخالصی‌های ایزوتوپی این رادیونوکلئید یعنی ^{75}Br و ^{77}Br 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 نمی‌کند.

علاوه بر آلفا و یون‌های سبک‌تر از آن، با گسترش شتاب‌دهنده‌های یون‌های سنگین، امکان تولید رادیونوکلئیدها با استفاده از این یون‌ها از طریق واکنش‌های هم‌جوشی 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]. ^7Li با درصد فراوانی ۹۲٫۵٪، ایزوتوپ پایداری است که از آن می‌توان به‌عنوان یک یون سنگین در تولید



$^{76}\text{Ge}(^7\text{Li}^+, \gamma n)$ و $^{76}\text{Ge}(^7\text{Li}^+, \delta n)$ ، $^{73}\text{Ge}(^7\text{Li}^+, \epsilon n)$ استفاده شده است.

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 هم‌چون فوتون، نوکلئون‌ها، دوترون، تریتون، آلفا، $^3\text{He}^+$ و یون‌های سبک و سنگین را می‌توان به‌عنوان پرتابه 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 اپتیکی، واکنش مستقیم، مدل هسته مرکب، شبیه‌سازی مونت کارلو هیبریدی (DDHMS)، دستور چندمرحله‌ای (ORION+TRISTAN)، کانال‌های جفت شده و DWBA (ESIS-06 و OPTMAN)، مدل اکسیتون (PCROSS)، ترکیب چندمرحله‌ای (NVWY) و نسخه کامل مدل "هاوزر- فشیخ" را پوشش می‌دهد. آخرین نسخه این کد که در این مطالعه از آن استفاده شده، Empire-3-2-2zv2 است [۲۵].

کد هسته‌ای LISEcute++ توسط تاراسف^۵ و بازین^۶ در سال ۱۹۸۶ در آزمایشگاه ملی سیکلوترون ابرسانا (NSCL) در دانشگاه ایالتی میشیگان طراحی شده و آخرین نسخه آن در آوریل 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 PACE^۴ و GEMINI دارد که هر دو کد مونت کارلو هستند و با استفاده از آن‌ها می‌توان به طور خاص محاسبات مدل آماری واکنش‌های هم‌جوشی تبخیر با پرتابه‌های سنگین‌تر از آلفا را شبیه‌سازی کرد. دقت این دو ابزار برای انجام آزمایش‌های امکان‌سنجی اولیه و مقایسه سطح مقطع‌ها بین کانال‌های واکنش جداگانه، کافی است. نتایج حاصل از GEMINI و PACE^۴ با وجود ماهیت آماری بودن آن‌ها، تقریباً با هم در توافق هستند. تفاوت اصلی GEMINI نسبت به PACE^۴، سرعت بالاتر محاسبات و جزئیات کم‌تر در خروجی است. این دو ابزار برای شبیه‌سازی

رادیونوکلئیدها استفاده کرد. هاینیکه^۱ و همکاران در سال ۱۹۶۷ دو چشمه عمومی برای شتاب‌دهنده تاندون طراحی کردند که قادر بود طیف وسیعی از یون‌ها از جمله $^7\text{Li}^+$ را با شدت جریان خروجی $10 \mu\text{A}$ تولید کند [۲۳]. علاوه بر آن، واسیلیف^۲ و همکاران در سال ۱۹۶۹ با استفاده از شتاب‌دهنده سیکلوترون یون $^7\text{Li}^{+++}$ را تا انرژی ۶۰ MeV شتاب دادند [۲۴]. پس می‌توان نتیجه گرفت که می‌توان یون سنگین $^7\text{Li}^+$ 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 پایدار ^{70}Ge (۲۱٫۲۳٪)، ^{72}Ge (۲۷٫۶۶٪)، ^{73}Ge (۷٫۷۳٪)، ^{74}Ge (۳۵٫۹۴٪) و ^{76}Ge (۷٫۴۴٪) است. به‌عنوان یک روش جایگزین امیدوارکننده، در تحقیق حاضر امکان تولید رادیونوکلئید ^{76}Br از طریق بمباران هدف‌هایی از جنس ایزوتوپ‌های پایدار غنی‌شده ژرمانیوم با یون سنگین $^7\text{Li}^+$ مورد بررسی قرار گرفت. برای تحقق این امر، تابع برانگیختگی واکنش‌های $^{70}\text{Ge}(^7\text{Li}^+, n)$ ، $^{72}\text{Ge}(^7\text{Li}^+, \epsilon n)$ ، $^{73}\text{Ge}(^7\text{Li}^+, \epsilon n)$ و $^{76}\text{Ge}(^7\text{Li}^+, \delta n)$ مونت کارلو EMPIRE و LISEcute++ به‌دست‌آمده و بهره‌مندی تولید بهترین واکنش محاسبه شده و نتایج حاصل از آن با نتایج شبیه‌سازی و تجربی ناشی از واکنش $^{76}\text{Se}(p, n)$ مقایسه شد.

۲. مواد و روش کار

در حالت کلی برای محاسبه بهره تولید یک واکنش هسته‌ای، باید تابع برانگیختگی آن واکنش و توان ایستاندگی 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 ^{76}Br از طریق واکنش هم‌جوشی تبخیر یون سنگین، از کدهای مونت کارلو EMPIRE، LISEcute++ برای محاسبه تابع برانگیختگی واکنش‌های $^{70}\text{Ge}(^7\text{Li}^+, n)$ ، $^{72}\text{Ge}(^7\text{Li}^+, \epsilon n)$

3. Herman
4. Hauser-Feshbach Model
5. Tarasov
6. Bazin

1. Heinicke
2. Vasiliev



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

۳. یافته‌ها

در این مطالعه پارامترهای تولید مستقیم ^{76}Br از طریق بمباران هدف‌هایی از جنس ایزوتوپ‌های پایدار ژرمانیوم با یون $^7\text{Li}^+$ تحت واکنش‌های $^7\text{Ge}(^7\text{Li}^+,n)$ ، $^{70}\text{Ge}(^7\text{Li}^+,3n)$ ، $^{72}\text{Ge}(^7\text{Li}^+,4n)$ و $^{74}\text{Ge}(^7\text{Li}^+,5n)$ با محاسبه تابع برانگیختگی این واکنش‌ها به وسیله کدهای مونت کارلو EMPIRE و LISEcute++ بررسی شد. برای هماهنگی بیشتر نتایج این دو کد، از مدل کامل "هاوزر-فشباخ" برای محاسبات استفاده شد. شکل‌های ۱ تا ۵ تابع برانگیختگی محاسبه شده این واکنش‌ها را نشان می‌دهند. از شکل‌های ۱ تا ۵ می‌توان این نتیجه را گرفت که نمودارهای به‌دست‌آمده از هر دو کد برای هر یک از رادیونوکلئیدهای برم، ظاهر مشابهی دارند و در یک محدوده انرژی قرار دارند؛ البته اختلاف ارتفاع این نمودارها چند صد میلی‌بارن است و نتایج به‌دست‌آمده از کد LISEcute++ در همه موارد بیش‌تر از نتایج حاصل از EMPIRE است.

در شکل ۱ سطح مقطع واکنش $^7\text{Ge}(^7\text{Li}^+,n)^{76}\text{Br}$ در انرژی‌های مختلف به حدی پایین است که می‌توان نتیجه گرفت که این واکنش، گزینه مناسبی برای تولید ^{76}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 ^{76}Br افزایش و سطح مقطع تولید کاهش می‌یابد. با افزایش انرژی پرتابه، میزان و نوع رادیونوکلئیدهای مزاحم تولید شده نیز افزایش می‌یابد. مهم‌ترین ناخالصی‌های رادیوایزوتوپی تولید شده، ^{75}Br (۱٫۶۱ ساعت)، ^{77}Br (۵۷ ساعت)، ^{78}Br (۶٫۴۶ دقیقه) و ^{80}Br (۱۷٫۶۸ دقیقه) هستند که به واسطه نیمه‌عمر ۱۶٫۲ ساعته ^{76}Br ، با سردسازی مناسب می‌توان به طور مؤثری ^{75}Br ، ^{78}Br و ^{80}Br را حذف کرد؛ اما ^{77}Br چون نیمه‌عمر بالاتری نسبت به ^{76}Br دارد، با سردسازی قابل حذف نیست و چون در انرژی‌های پایین‌تری نیز تولید می‌شود، با محدود کردن بازه انرژی بیم فرودی نیز قابل حذف نیست. پس تنها راه‌حل، انتخاب واکنشی است که پایین‌ترین بهره تولید ^{76}Br را داشته باشد. لازم به ذکر است که در واکنش $^{76}\text{Se}(p,n)^{76}\text{Br}$ نیز ^{76}Br

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

۲.۲ محاسبه ضخامت ماده هدف و توان ایستاندگی آن

ذرات پرتابه هنگام ورود به هدف، به اتم‌های آن برخورد می‌کنند و در هر برخورد مقداری از انرژی خود را از دست می‌دهند. میزان افت انرژی (dE) در یک مسافت معین (dX) را توان ایستاندگی 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 ایستاندگی 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 ایستاندگی آن با استفاده از کد محاسباتی SRIM انجام می‌شود که با روش مونت کارلو 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 ایستاندگی جرمی آن ماده را مشاهده کرد [۲۷].

۳.۲ محاسبه بهره تولید

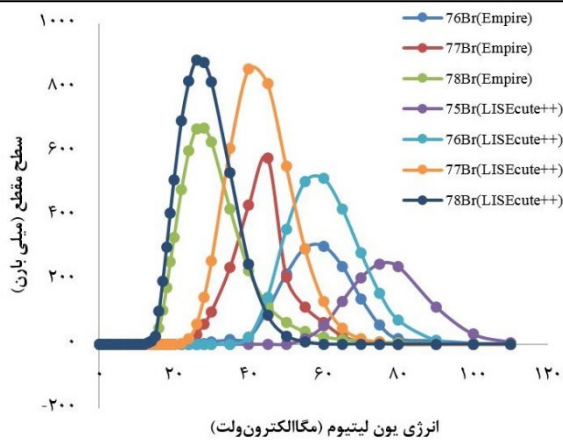
بهره تولید رادیونوکلئید معیاری است که با استفاده از آن می‌توان میزان کارآمدی واکنش‌های مختلف در تولید یک رادیونوکلئید را با هم مقایسه کرد. در حالت کلی بهره تولید رادیونوکلئید در یک واکنش هسته‌ای از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$Y = 0.102 \frac{H \times I}{M} (1 - e^{-\lambda t}) \int_{E_E}^{E_I} \frac{\sigma(E)}{S_p(E)} dE \quad (1)$$

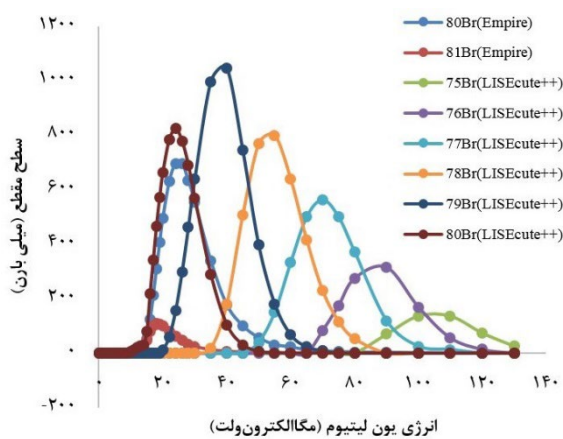
که در آن Y بهره تولید رادیونوکلئید (mCi/μA.h)؛ I شدت جریان بیم فرودی (μA)؛ H درصد فراوانی ماده هدف؛ M جرم مولی ماده هدف (gr/mol)؛ λ ثابت واپاشی محصول (h^{-1})؛ t مدت زمان بمباران هدف (h)؛ $\sigma(E)$ تابع برانگیختگی ماده هدف (mbarn)؛ $S_p(E)$ توان ایستاندگی جرمی هدف ($\text{MeV.cm}^2/\text{mgr}$)؛ E_I و E_E (MeV) به ترتیب انرژی ابتدایی

1. Ziegler

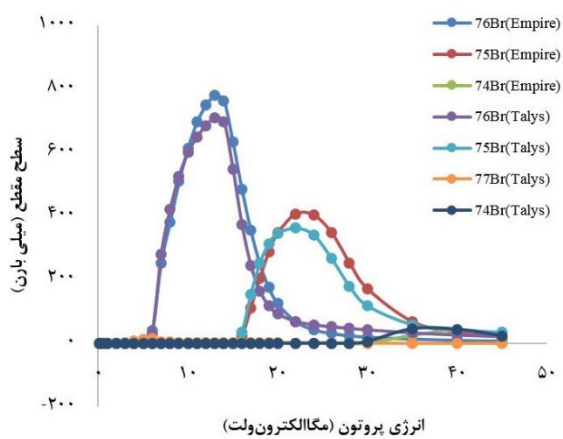




شکل ۴. تابع برانگیختگی واکنش ${}^{76}\text{Ge}({}^7\text{Li}^+, \Delta n){}^{76}\text{Br}$



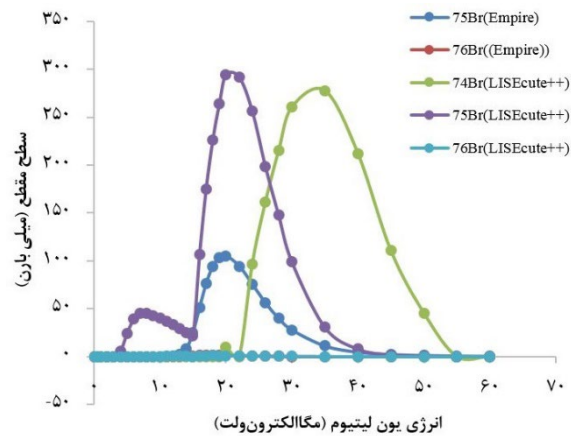
شکل ۵. تابع برانگیختگی واکنش ${}^{76}\text{Ge}({}^7\text{Li}^+, \gamma n){}^{76}\text{Br}$



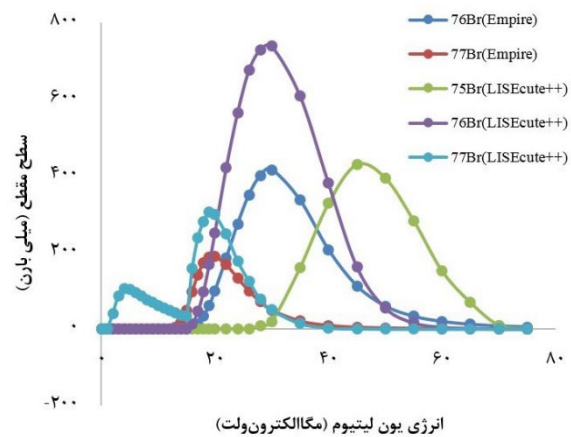
شکل ۶. تابع برانگیختگی واکنش ${}^{76}\text{Se}(p, n){}^{76}\text{Br}$

با استفاده از کد SRIM، ضخامت و توان ایستاندگی هدف در بازه انرژی ۰ تا ۱۰۰ مگاالکترون ولت برای واکنش‌های ${}^{76}\text{Ge}({}^7\text{Li}^+, xn)$ تا ${}^{76}\text{Ge}({}^7\text{Li}^+, \Delta n){}^{76}\text{Br}$ و ${}^{76}\text{Se}(p, xn)$ محاسبه شد. با استفاده از نرم‌افزار محاسباتی MATLAB، تابع توان ایستاندگی هدف و تابع برانگیختگی این واکنش‌ها به دست آمد و با انتگرال گیری مستقیم از معادله ۱، بهره تئوری تولید ${}^{76}\text{Br}$ و

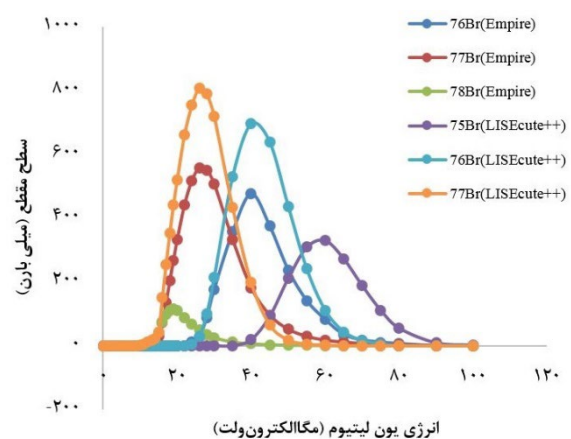
در انرژی پایین‌تری نسبت به ${}^{76}\text{Br}$ تولید می‌شود و عملاً قابل حذف نیست (شکل ۶ را ببینید). لازم به یادآوری است که در این واکنش‌ها علاوه بر رادیویازوتوپ‌های برم، رادیونوکلیدهای عناصر سلنیم، آرسنیک، ژرمانیوم، گالیم، روی، مس، نیکل، کبالت، آهن، منگنز، کروم و وانادیم نیز تولید می‌شود که می‌توان به روش‌های شیمیایی مؤثر آن‌ها را حذف کرد.



شکل ۱. تابع برانگیختگی واکنش ${}^{70}\text{Ge}({}^7\text{Li}^+, n){}^{76}\text{Br}$

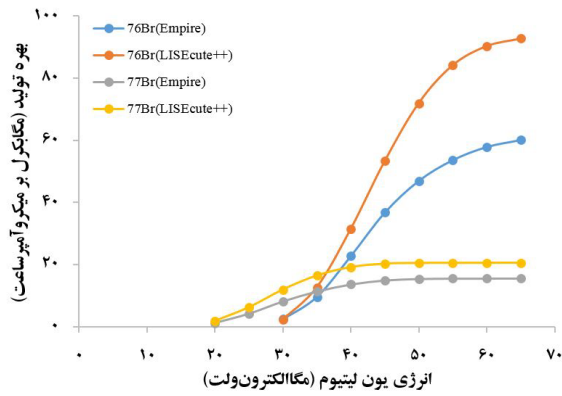


شکل ۲. تابع برانگیختگی واکنش ${}^{73}\text{Ge}({}^7\text{Li}^+, 3n){}^{76}\text{Br}$

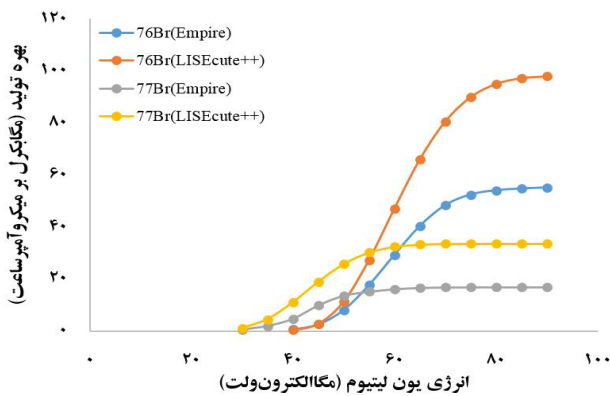


شکل ۳. تابع برانگیختگی واکنش ${}^{73}\text{Ge}({}^7\text{Li}^+, 4n){}^{76}\text{Br}$

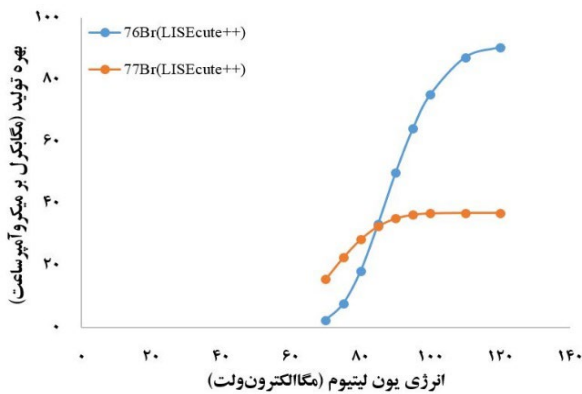




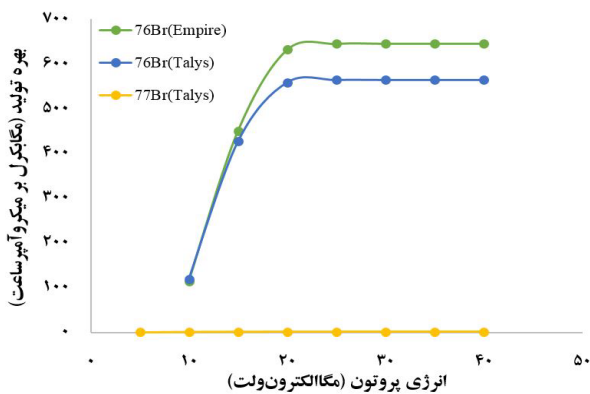
شکل ۸. بهره تولید ^{76}Br و ^{77}Br تحت واکنش $^{76}\text{Ge}(\text{Li}^+, \text{xn})$.



شکل ۹. بهره تولید ^{76}Br و ^{77}Br تحت واکنش $^{76}\text{Ge}(\text{Li}^+, \text{xn})$.



شکل ۱۰. بهره تولید ^{76}Br و ^{77}Br تحت واکنش $^{76}\text{Ge}(\text{Li}^+, \text{xn})$.



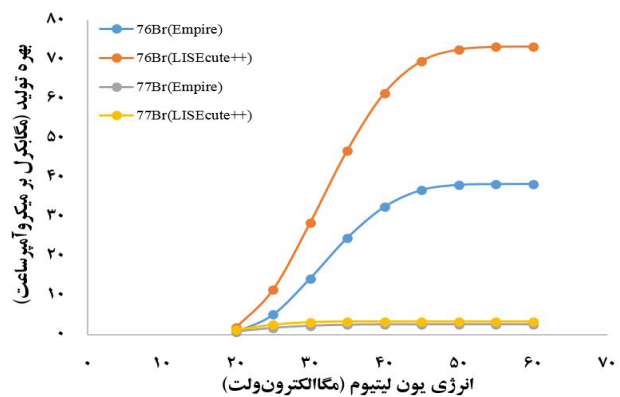
شکل ۱۱. بهره تولید ^{76}Br و ^{77}Br تحت واکنش $^{76}\text{Se}(\text{p}, \text{xn})$.

مهم‌ترین ناخالصی آن یعنی ^{77}Br محاسبه شد که در شکل‌های ۷ تا ۱۱ قابل مشاهده است.

از مقایسه شکل‌های ۷ تا ۱۰ می‌توان دید که بهره تئوری تولید ^{76}Br تحت واکنش $^{76}\text{Ge}(\text{Li}^+, \text{xn})$ در کل محدوده انرژی ۲۰ تا ۶۰ مگاالکترون‌ولت برابر با $1.18 \text{ MBq}/\mu\text{A.h}$ تا $3.25 \text{ MBq}/\mu\text{A.h}$ است که نسبت به سه واکنش دیگر، کم‌ترین مقدار ممکن است. با وجود این‌که بهره تئوری تولید ^{76}Br تحت واکنش $^{76}\text{Ge}(\text{Li}^+, \text{xn})$ از سه واکنش دیگر کم‌تر است؛ این واکنش به دلیل کم‌ترین بهره تولید ^{77}Br مناسب‌ترین واکنش برای تولید ^{76}Br از طریق بمباران ژرمانیوم با یون سنگین $^7\text{Li}^+$ است.

در شکل ۱۱ می‌توان به وضوح دید که بهره تولید ^{76}Br تحت واکنش $^{76}\text{Se}(\text{p}, \text{xn})$ بسیار ناچیز است و بیش‌ترین مقدار آن در حدود $1.4 \text{ MBq}/\mu\text{A.h}$ است. بهره تولید ^{76}Br در انرژی ۲۵ MeV بیش‌ترین مقدار خود را دارد؛ اما در این انرژی ناخالصی رادیویزوتوپی ^{75}Br با نیمه‌عمر ۱/۶۱ ساعت تولید می‌شود که برای حذف آن به ۸ تا ۱۶ ساعت سردسازی نیاز است. نیمه‌عمر ^{76}Br برابر با ۱۶/۲ ساعت است و با این سردسازی تقریباً نصف بهره تولید ^{76}Br از بین می‌رود؛ پس بهتر است که بیش‌ترین انرژی بیم فرودی ۱۶ MeV باشد تا هم ^{75}Br تولید نشود و هم بهره تولید ^{76}Br بیش‌تری به دست آید.

در جدول ۱ داده‌های مربوط به محاسبات حاصل از شبیه‌سازی دو واکنش $^{76}\text{Ge}(\text{Li}^+, \text{xn})^{76}\text{Br}$ و $^{76}\text{Se}(\text{p}, \text{n})^{76}\text{Br}$ در بهترین محدوده انرژی با کم‌ترین میزان ناخالصی تولیدی، مقایسه شده است.



شکل ۷. بهره تولید ^{76}Br و ^{77}Br تحت واکنش $^{76}\text{Ge}(\text{Li}^+, \text{xn})$.



جدول ۱. مقایسه محاسبات حاصل از شبیه‌سازی و نتایج تجربی دو واکنش $^{76}\text{Se}(p,n)^{76}\text{Br}$ و $^{76}\text{Ge}(^7\text{Li}^+,3n)^{76}\text{Br}$ (بهره تولیدی بر حسب $\text{MBq}/\mu\text{Ah}$)

واکنش	بازه انرژی ایده‌آل (MeV)	ضخامت هدف (μm)	بهره تولید تئوری حاصل از EMPIRE	بهره تولید تئوری حاصل از LISECUTE++	بهره تولید تجربی
$^{76}\text{Ge}(^7\text{Li}^+,3n)^{76}\text{Br}$	۳۰ - ۴۰	۸۳,۸۳ - ۱۳۱,۶۶	۱۴,۲۷ - ۳۲,۴۶	۲۸,۳۸ - ۶۱,۴۳	۵۰ (در ۱۳ MeV)
$^{76}\text{Se}(p,n)^{76}\text{Br}$	۹ - ۱۶	۳۹۶,۷۵ - ۱۰۵۰	۶۶,۳۶ - ۵۰,۶۶۱	-----	۸۸ (در ۱۶ MeV)

[۱۴]

۴. نتیجه‌گیری

در این تحقیق امکان تولید رادیونوکلئید ^{76}Br از طریق بمباران اهدافی از جنس ^{70}Ge ، ^{72}Ge ، ^{73}Ge و ^{76}Ge با بیمی از $^7\text{Li}^+$ 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 ایستاندگی هدف در بازه انرژی ۰ تا ۱۰۰ مگاالکترون‌ولت برای واکنش‌های $^{76}\text{Ge}(^7\text{Li}^+,xn)$ ، $^{73}\text{Ge}(^7\text{Li}^+,xn)$ ، $^{72}\text{Ge}(^7\text{Li}^+,xn)$ و $^{70}\text{Ge}(^7\text{Li}^+,xn)$ محاسبه شد و واکنش $^{76}\text{Se}(p,xn)$ به دلیل سطح مقطع بسیار پایین تولید ^{76}Br از محاسبات حذف شد. با استفاده از نرم‌افزار محاسباتی MATLAB، تابع توان ایستاندگی هدف و تابع برانگیختگی این واکنش‌ها به دست آمد و با انتگرال‌گیری مستقیم از معادله ۱، بهره تئوری تولید ^{76}Br و مهم‌ترین ناخالصی آن یعنی ^{77}Br محاسبه شد و در نهایت بر اساس بهره تولید ناخالصی ^{77}Br ، واکنش $^{76}\text{Ge}(^7\text{Li}^+,3n)^{76}\text{Br}$ در بازه انرژی ۳۰ تا ۴۰ مگاالکترون‌ولت به‌عنوان مناسب‌ترین واکنش انتخاب شد. بیش‌ترین مقدار سطح مقطع محاسبه شده برای واکنش $^{76}\text{Ge}(^7\text{Li}^+,3n)^{76}\text{Br}$ توسط کدهای EMPIRE و 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 ^{76}Ge غنی‌شده به ضخامت ۱۳۱,۶۶ میکرومتر برای تابع برانگیختگی حاصل از کدهای EMPIRE و LISECUTE++ به ترتیب برابر با $32,46 \text{ MBq}/\mu\text{Ah}$ و $61,43 \text{ MBq}/\mu\text{Ah}$ است. بهره تئوری و تجربی واکنش $^{76}\text{Se}(p,n)^{76}\text{Br}$ در انرژی ۱۶ مگاالکترون‌ولت به ترتیب برابر با $50,661 \text{ MBq}/\mu\text{Ah}$ و $88 \text{ MBq}/\mu\text{Ah}$ (برای هدفی از جنس CoSe) است. از مقایسه بهره تولید تئوری این دو واکنش می‌توان به وضوح دید که بهره تولید واکنش $^{76}\text{Se}(p,n)^{76}\text{Br}$ بیش‌تر از واکنش $^{76}\text{Ge}(^7\text{Li}^+,3n)^{76}\text{Br}$ است.

واکنش $^{76}\text{Se}(p,n)^{76}\text{Br}$ در حال حاضر رایج‌ترین واکنش عملی برای تولید ^{76}Br است که به دلیل نقطه ذوب پایین سلنیوم (۲۲۱ درجه سانتی‌گراد) و ترکیبات آن (CoSe = ۱۲۰۰ درجه سانتی‌گراد) [۱۱، ۱۴] و عدم امکان پرتودهی طولانی‌مدت هدف‌ها به خاطر ذوب شدن آن‌ها، امکان تولید تجاری این رادیونوکلئید را فراهم نمی‌کند و هم‌چنان در حد تولید آزمایشگاهی باقی مانده است؛ چون پرتودهی Co^{76}Se در انرژی ۱۶ مگاالکترون‌ولت، تنها $88 \text{ MBq}/\mu\text{Ah}$ بهره به دست می‌دهد.

ژرمانیوم عنصری با نقطه ذوب $938,25$ درجه سانتی‌گراد است که نقطه ذوب آن بیش از ۴ برابر سلنیوم است. علاوه بر این، ترکیباتی از ژرمانیوم مانند GeRu و Ge_2Ru_2 نقطه ذوبی در محدوده ۱۵۰۰ تا ۱۶۰۰ درجه سانتی‌گراد دارند که می‌تواند امکان پرتودهی طولانی‌تر هدف را فراهم کند [۲۸]. البته باید به این موضوع اشاره کرد که در شبیه‌سازی بمباران Ru با یون $^7\text{Li}^+$ در محدوده انرژی ۳۰ تا ۴۰ مگاالکترون‌ولت، اثری از رادیویزوتوپ‌های برم وجود ندارد و عمدتاً رادیویزوتوپ‌های نقره با بهره تولید بسیار پایین مشاهده می‌شود که با روش‌های شیمیایی می‌توان آن‌ها را حذف کرد. از ترکیب ژرمانیوم با پاره‌ای از عناصر دیرذوب مانند کروم، تیتانیوم، مولیبدنیم و روتنیوم که قیمت پایینی دارند و در انرژی ذکر شده منجر به تولید رادیویزوتوپ‌های برم نمی‌شوند؛ می‌توان نقطه ذوب هدف را تا حد زیادی بالا برد.

برای این‌که یک رادیویزوتوپ 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 رادیویزوتوپ است. در حال حاضر قیمت هر میلی‌گرم از هدف غنی شده ^{76}Se برابر با ۲۷,۷ یورو و برای ^{72}Ge بین ۶ تا ۷ یورو است [۲۹]. پس هدفی از جنس ^{76}Ge غنی شده، چهار برابر ارزان‌تر از ^{76}Se است.



10. 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 ^{75}Br and ^{76}Br via intermediate energy proton induced reactions. *Radiochim. Acta.* 2009;97:535–541.
11. Hassan H.E, El-Azony K.M, Azzam A, Qaim S.M. Investigation of selenium compounds as targets for $^{76,77}\text{Br}$ production using protons of energies up to 34 MeV. *Radiochim Acta.* 2017;105(10):841–50.
12. 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.
13. 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 ^{76}Br , ^{77}Br and $^{80\text{m}}\text{Br}$ via CoSe cyclotron targets and vertical dry distillation. *Nucl. Med. Biol.* 2020;80–81:32–36.
15. 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 ^{78}Kr with particular relevance to the production of ^{76}Br . *Radiochim. Acta.* 2004;92:203–207.
17. 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 ^{77}Br , ^{76}Br and ^{79}Kr . *Int. J. Appl. Radiat. Isot.* 1977;28:947–953.
18. De Villiers D, Nortier M, Richter W. Experimental and theoretical functions for $^{nat}\text{Br}(p,x)$ reactions. *Appl. Radiat. Isot.* 2002;57:907.
19. De Jong D, Kooiman H, Veenboer J.T. ^{76}Br and ^{77}Br from decay of cyclotron produced ^{76}Kr and ^{77}Kr . *Int. J. Appl. Radiat. Isot.* 1979;30:786–788.
20. 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 ^{52}Fe from symmetric complete fusion-evaporation reactions. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. B Beam Interact. Mater. Atoms.* 2021;493:15–18.
21. 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 ^{149}Tb via ^{63}Cu bombardment of ^{89}Y . *Appl. Radiat. Isot.* 2021.

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 ^{72}Ge نسبت به ^{76}Se ، امکان تولید ترکیبات ^{72}Ge با نقطه ذوب بالاتر نسبت به ^{76}Se و بهره تولید ^{77}Br تقریباً مساوی و ناچیز تحت پرتودهی هر دو هدف، می‌توانند فاکتورهای مهمی باشند که واکنش $^{72}\text{Ge}(^7\text{Li}^+, ^3\text{n})^{76}\text{Br}$ را به یک واکنش بالقوه برای آزمایش عملی تولید ^{76}Br در شتاب‌دهنده‌های ذرات سنگین تبدیل می‌کند.

مراجع

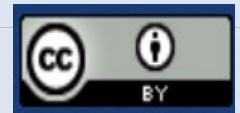
1. Way K, King R.W, McGinnis C.L. Nuclear Level Schemes A = 40-A = 92; AEC Report TID-5300. *Washington D.C.* 1955.
2. Strominger D, Hollander J.M, Seaborg G.T, Table of Isotopes. *Revs. Mod. Phys.* 1958;30:585.
3. Nozaki T, Iwamoto M, Itoh Y. Production of ^{77}Br by various nuclear reactions. *Int J Appl Radiat Isot.* 1979;30:79–83.
4. 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 $^{75}\text{As}(\alpha, xn)^{76,77,78}\text{Br}$ and $^{75}\text{As}(\alpha, x)^{74}\text{As}$ 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 ^{75}Br and ^{76}Br : 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.
8. Tolmachev V, Löqvist A, Einarsson L, Schultz J, Lundqvist H. Production of ^{76}Br 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, ^{76}Se and ^{77}Se with particular reference to the production of the medically interesting radionuclides ^{76}Br and ^{77}Br . *Appl Radiat Isot.* 2004;60:899–909.



22. McGuinness S.R, Wilkinson J.T, Peaslee G.F. Heavy-ion production of ^{77}Br and ^{76}Br . *Sci Rep.* 2021;11:15749.
23. 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.
26. 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.
27. 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.
28. Perring L, Feschotte P, Gachon J.C. The germanium-ruthenium system. *JPE.* 1996;17:101-106.
29. [Price list of electromagnetically separated isotopes.](https://en.institut-seltene-erden.de)

COPYRIGHTS

©2021 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers.



استناد به این مقاله

جمشیدی، علی، نیروئی، مهیار. (۱۴۰۳)، امکان‌سنجی تولید رادیونوکلئید پزشکی برم-۷۶ با استفاده از یون سنگین $^7\text{Li}^+$. *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>

