



بررسی روش‌های تولید رادیوایزوتوپ کادمیم-۱۰۹ و تعیین واکنش بهینه

محمد میرزایی، مهدی صادقی*، زهره غلامزاده

پژوهشکده تحقیقات کشاورزی، پزشکی و صنعتی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، صندوق پستی: ۳۱۴۸۵-۴۹۸، کرج-ایران

چکیده: در این تحقیق تابع تحریک و واکنش‌های هسته‌ای $^{nat}\text{Ag}(p, n)^{109}\text{Cd}$ ، $^{nat}\text{Ag}(d, 2n)^{109}\text{Cd}$ ، $^{nat}\text{In}(p, pxn) \rightarrow ^{109}\text{In} \rightarrow ^{109}\text{Cd}$ ، $^{nat}\text{Cd}(p, pxn)^{109}\text{Cd}$ و $^{nat}\text{Pd}(\alpha, xn)^{109}\text{Cd}$ با استفاده از کد ALICE محاسبه گردید. ضخامت مورد نیاز هدف برای هر یک از واکنش‌های فوق توسط کد SRIM تعیین گردید. بهره‌ی تولید کادمیم-۱۰۹ با توجه به تابع تحریک محاسبه شد. مسئله‌ی انتقال حرارت هدف در مورد هر یک از واکنش‌های هسته‌ای فوق بررسی شد. بهترین واکنش هسته‌ای برای تولید این رادیوایزوتوپ در شتاب‌دهنده تعیین گردید.

واژه‌های کلیدی: کادمیم-۱۰۹، تابع تحریک، بهره تولید، انتقال حرارت، شتاب‌دهنده

Study of ^{109}Cd Production Methods and Determination of the Optimum Nuclear Reaction

M. Mirzaii, M. Sadeghi*, Z. Gholamzadeh

Agricultural, Medical and Industrial Research School, Nuclear Science and Technology Institute, P.O. Box: 31485-498, Karaj, Iran

Abstract: The excitation functions of $^{nat}\text{Ag}(p, n)^{109}\text{Cd}$ ، $^{nat}\text{Ag}(d, 2n)^{109}\text{Cd}$ ، $^{nat}\text{In}(p, pxn) \rightarrow ^{109}\text{In} \rightarrow ^{109}\text{Cd}$ ، $^{nat}\text{Cd}(p, pxn)^{109}\text{Cd}$ and $^{nat}\text{Pd}(\alpha, xn)^{109}\text{Cd}$ reactions for ^{109}Cd production were calculated using ALICE-91 code. The required thickness of the target was obtained by SRIM code for each reaction. The production yield of cadmium-109 was calculated by considering the excitation functions. The heat transfer of the target in each above mentioned nuclear reaction was investigated. The optimum reaction for production of ^{109}Cd by accelerators was determined.

Keywords: ^{109}Cd , Excitation Function, Production Yield, Thermal Conductivity, Accelerator



۱- مقدمه

با مطالعه‌ی سطح مقطع‌های تجربی داده شده در جداول خواص هسته‌ای و مقایسه‌ی آن‌ها با نتایج حاصل از محاسبات کد ALICE-91، نتیجه گرفته شد که اختلاف این سطح مقطع‌ها در انرژی‌های کم‌تر از ۳۰ MeV حدود ۱۰٪ یا کم‌تر است. سطح مقطع‌های محاسبه شده توسط کد نسبت به تجربی در برخی از انرژی‌ها بزرگ‌تراند [۲ و ۱۸ تا ۲۵].

۲- روش کار

۲-۱ محاسبه‌ی سطح مقطع با استفاده از کد ALICE-91

با استفاده از کد ALICE-91 [۱۶] تابع تحریک برای واکنش‌های $^{nat}Ag(p,n)^{110}Cd$ ، $^{nat}Ag(d,2n)^{110}Cd$ و $^{nat}Cd(p,pxn)^{110}Cd$ ، $^{nat}In(p,pxn) \rightarrow ^{110}In \rightarrow ^{110}Cd$ و $^{nat}Pd(\alpha, xn)^{110}Cd$ محاسبه شد. با استفاده از نتایج به دست آمده، نمودار تغییرات سطح مقطع بر حسب انرژی (تابع تحریک) برای هر دو هدف غنی شده و طبیعی رسم گردید.

۲-۲ محاسبه‌ی ضخامت مورد نیاز هدف

با توجه به این که انرژی پروتون ورودی با هدف کمینه کردن ناخالصی‌ها در مورد هر یک از واکنش‌های ذکر شده تعیین گردید، محاسبه‌ی ضخامت مورد نیاز هدف با استفاده از کد SRIM انجام شد (جدول ۱) [۱۷].

رابطه‌ی افت انرژی در واحد طول مسیر $\frac{dE}{dx}$ ، که گاهی توان ایستاندگی نیز نامیده می‌شود، در منابع مختلف داده شده است. این رابطه برای ذرات باردار سنگین‌تر از الکترون، به صورت زیر می‌باشد:

$$\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi z^2 e^4 NZ (3 \times 10^9) \rho}{mv^2} \left[\ln \frac{2mv^2}{I} - \ln \left(1 - \frac{v^2}{c^2} \right) - \frac{v^2}{c^2} \right] \quad (1)$$

که در آن Z عدد اتمی ذره، e بار الکتریکی بنیادی $(1.6 \times 10^{-19} C)$ ، m جرم سکون الکترون، v سرعت ذره، N تعداد اتم‌های ماده‌ی جاذب در واحد حجم، c سرعت سیر نور در خلاء و I میانگین پتانسیل یونش و برانگیزش اتم‌های جاذب است. مقدار I بر حسب eV برابر $I = (9.76 + 58.8Z^{-1/2})Z$ است. با انتگرال‌گیری معین از رابطه‌ی (۱) برای کلیه‌ی فواصل dx می‌توان به میزان افت انرژی ذره در داخل هدف پی برد. اما

کادمیم-۱۰۹ با نیمه‌عمر ۴۶۲/۶ روز از طریق گیراندازی الکترون (EC)، ضمن گسیل پرتو گاما به انرژی ۸۸/۰۳ keV و با نسبت انشعاب ۳/۹۷٪ به رادیونوکلید ^{109m}Ag تبدیل می‌شود که به نوبه‌ی خود با گسیل پرتوهای ایکس مشخصه لایه‌ی K به انرژی متوسط ۲۲/۵۴ keV و با نسبت انشعاب ۱۰۲٪ به حالت پایه می‌رسد [۱]. از کادمیم-۱۰۹ برای تعیین نسبت بین نفت و آب در چاه‌های نفت به دلیل ضریب جذب متفاوت آن‌ها برای پرتوهای ایکس استفاده شده است [۲]. از این رادیوردیاب به عنوان یک چشمه‌ی کوچک پرتوهای ایکس با قابلیت حمل بسیار آسان برای یافتن طلا در معدن‌های شمال آفریقا نیز استفاده شده است [۳].

در صنعت ساخت آلومینیم به منظور آنالیز درجه‌ی خلوص آلومینیم و تعیین میزان آهن موجود در آن از چشمه‌های کادمیم-۱۰۹ استاندارد استفاده می‌شود. در این روش از نمونه‌های آلومینیم خالص به عنوان استاندارد استفاده می‌شود و قله‌ی کامپتون آن تعیین، و سپس نمونه‌ی مجهول آنالیز شده و قله‌های آن برای تعیین میزان آلودگی آهن با نمونه استاندارد مقایسه می‌شود [۴].

این رادیویزوتوپ به طور گسترده به عنوان یک چشمه‌ی فوتونی در وسایل آنالیز فلورسان پرتوهای ایکس به ویژه در صنعت، کالیبراسیون دستگاه‌های پزشکی هسته‌ای و سنجش سرب استخوان با روش EDXRF به کار می‌رود. همچنین فراوانی پرتوهای ایکس مناسب آن باعث گردیده است که به عنوان یک رادیوردیاب در زمینه‌های تحقیقات کشاورزی، سلامت اکوسیستم‌ها و تحقیقات فیزیولوژیکی موجودات زنده مورد استفاده قرار بگیرد. در سال‌های اخیر نیز در تحقیقات اثر کادمیم بر سلول‌های سرطانی پستان و کبد از این رادیویزوتوپ استفاده شده است [۵ تا ۱۵].

در این مقاله روش‌های ممکن برای تولید کادمیم-۱۰۹ در شتاب‌دهنده‌ها بررسی و مناسب‌ترین روش معرفی شده است.

هدف جامد مورد استفاده در شتاب‌دهنده به دو صورت قرص و هدف‌های آب‌کاری شده بر روی زیرلایه‌ی مسی تهیه شدند. هدف‌های به شکل قرص معمولاً پودرهای پرس شده هستند که پوشش‌دهی الکتروشیمیایی برای آن‌ها امکان‌پذیر نمی‌باشد. هدف‌های آب‌کاری شده بر روی زیرلایه‌ی مسی از لحاظ انتقال حرارت مناسب‌تر و دارای سطح مؤثر بزرگ‌تری هستند.



توان ایستاندگی هدف برحسب $(\text{MeV cm}^2/\text{g}^{-1})$ می‌باشد. این رابطه نشان می‌دهد که بهره‌ی تولید با افزایش انرژی پروتون، جریان و زمان بمباران، افزایش می‌یابد. بهره‌ی تولید کادمیم- ^{109}m از طریق واکنش‌های مختلف با استفاده از رابطه‌ی ۱ محاسبه شد (جدول ۲).

۲-۴ محاسبه‌ی انتقال حرارت هدف

انتقال حرارت هر یک از هدف‌های نقره، کادمیم، پالادیم و ایندیم که به روش لایه‌نشانی آماده شده‌اند با استفاده از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود

$$T_m - T_w = \left(\frac{10I}{2k_{\text{target}}} \cdot \frac{a}{s} \right) + \left(\frac{10I}{k_{\text{Cu}}} \cdot \frac{b}{s} + \frac{5I}{2k_{\text{Cu}}} \cdot \frac{b}{s} \right) + \left(\frac{15I}{k_{\text{Cu}}} \cdot \frac{c}{s} \right) + \left(\frac{15I}{hs} \right) \quad (۳)$$

که در آن، h ضریب انتقال حرارت به روش جابه‌جایی و برحسب $\text{J cm}^{-2} \text{K}^{-1} \text{s}^{-1}$ ، T_m درجه حرارت در لایه‌ی هدف، T_w دمای شاره‌ی خنک‌کننده‌ی هدف، a ضخامت هدف برحسب cm ، b ضخامت مس متوقف‌کننده‌ی پروتون خارج شونده از لایه‌ی هدف برحسب cm ، c ضخامت زیرلایه‌ی مسی برحسب cm ، s مساحت هدف برحسب cm^2 ، k ضریب انتقال حرارت هدف برحسب $\text{J cm}^{-1} \text{K}^{-1} \text{s}^{-1}$ و I شدت باریکه‌ی فرودی است.

۳- بررسی واکنش‌های مختلف برای تولید ^{109}Cd

۳-۱ بررسی تابع تحریک واکنش هسته‌ای $^{109}\text{Cd}(p, n)^{109}\text{mAg}$

نمودار نتایج حاصل از محاسبات کد ALICE-91 برای کانال‌های مختلف واپاشی پس از پرتودهی پروتونی نقره‌ی طبیعی نشان می‌دهد که بهترین محدوده‌ی انرژی برای تولید کادمیم- ^{109}m بین ۵ تا 18MeV است (شکل ۱). هیچ ناخالصی رادیونوکلییدی قابل

آنچه انتگرال‌گیری را مشکل می‌سازد، ثابت نبودن سرعت (v) و یا انرژی ذره در هر فاصله‌ای از انتگرال‌گیری است. کدهای کامپیوتری متعددی برای محاسبه‌ی $\frac{dE}{dx}$ و همچنین برد ذره‌ی فرودی نوشته شده‌اند. منظور از برد، فاصله‌ای است که ذره پس از طی آن متوقف شده و انرژی جنبشی آن به صفر می‌رسد. از جمله‌ی این کدها می‌توان به SRIM^(۱) اشاره کرد. این کد، با استفاده از روش مونت‌کارلو به حل عددی معادله‌هایی از نوع رابطه‌ی (۱) می‌پردازد.

با استفاده از کد SRIM ضخامت مورد نیاز هدف به گونه‌ای محاسبه می‌گردد که پروتون فرودی با زاویه‌ی تابش صفر نسبت به هدف و با انرژی فرودی مورد نظر وارد هدف شده و با افت انرژی مورد نظر از آن خارج شود. ضخامت به دست آمده از طریق کد با توجه به زاویه‌ی تابش 6° پروتون‌های فرودی، در عدد 0.1 ضرب می‌شود. محدوده‌ی انرژی بهینه به گونه‌ای تعیین می‌شود که کم‌ترین ناخالصی‌های ایزوتوپی و رادیوایزوتوپی در آن ناحیه تولید شود و همچنین سطح مقطع واکنش تولید مناسب باشد (جدول ۱) [۲۶].

۲-۳ محاسبه‌ی بهره‌ی تولید

بهره‌ی تولید برحسب انرژی از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود [۱۸]

$$\text{Yield} = I * H(1 - e^{-\lambda t}) / M \int (\sigma(E) / S_p(E)) dE \quad (۲)$$

$(\text{mCi} / \mu\text{A} \cdot \text{h})$

که در آن، I شدت جریان باریکه‌ی فرودی برحسب میکروآمپر (μA)، H درصد فراوانی ایزوتوپی هدف، M جرم هدف برحسب گرم، $\sigma(E)$ سطح مقطع واکنش برحسب میلی بارن، t زمان پرتودهی برحسب ساعت، λ ثابت واپاشی برحسب بر ثانیه و $S_p(E)$

جدول ۱- ضخامت مورد نیاز هدف برای تولید کادمیم- ^{109}m .

واکنش	$^{109}\text{Ag}(p, n)^{109}\text{Cd}$	$^{109}\text{Ag}(d, 2n)^{109}\text{Cd}$	$^{110}\text{Cd}(p, pn)^{109}\text{Cd}$	$^{106}\text{Pd}(\alpha, n)^{109}\text{Cd}$	$^{113}\text{In}(p, p4n)^{109}\text{Cd}$
گستره‌ی انرژی	۵-۱۵	۷-۲۲	۱۹-۳۰	۱۲-۲۸	۲۲-۳۰
ضخامت توصیه شده برای هدف	۳۵	۷۹	۱۰۲	۹	۹۵

جدول ۲- بهره‌ی تولید کادمیم- ^{109}m در محدوده‌ی انرژی ۱ تا 30MeV .

واکنش	$^{109}\text{Ag}(p, n)^{109}\text{Cd}$	$^{109}\text{Ag}(d, 2n)^{109}\text{Cd}$	$^{110}\text{Cd}(p, pn)^{109}\text{Cd}$	$^{106}\text{Pd}(\alpha, n)^{109}\text{Cd}$	$^{113}\text{In}(p, p4n)^{109}\text{Cd}$
بهره‌ی نظری	۰,۱۴۴	۰,۹۰۲	۰,۰۰۱۲	۰,۱۶۷	$1,25 \times 10^{-6}$



جدول ۳- بیشینه جریان قابل تحمل به وسیله هدف.

هدف	^{109}Ag	^{110}Cd	^{106}Pd	^{113}In
نقطه ذوب ($^{\circ}\text{C}$)	۹۶۱	۳۲۱	۱۵۵۴	۱۵۷٫۶
رسانش گرمایی ($\text{J cm}^{-1}\text{K}^{-1}\text{S}^{-1}$)	۴٫۲۹	۰٫۹۶۸	۰٫۷۱۸	۰٫۸۱۶
جریان بیشینه (μA)	۲۹۶۲٫۹۶	۵۵۸٫۲۳	۴۵۰٫۱۶۰	۲۲۷٫۶۴

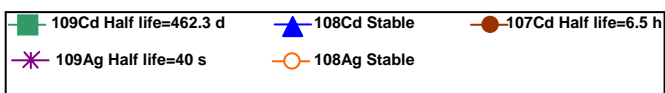
توجهی در محدوده انرژی ۱ تا 30MeV با توجه به نیمه عمر بلند محصول در مقایسه با سایر رادیونوکلیدهای تولید شده وجود ندارد (فعالیت کادمیم- ^{107}Cd با نیمه عمر ۶٫۵ ساعت پس از گذشت ۳ روز تقریباً به صفر می رسد).

ناخالصی ایزوتوپ‌های پایدار با سطح مقطع بسیار بالا در این محدوده وجود خواهد داشت. به منظور حذف کامل تولید این ایزوتوپ‌های پایدار می توان انرژی پروتون فرودی را 9MeV انتخاب نمود. البته، کاهش انرژی پروتون فرودی باعث کاهش قابل ملاحظه‌ی بهره‌ی تولید خواهد شد.

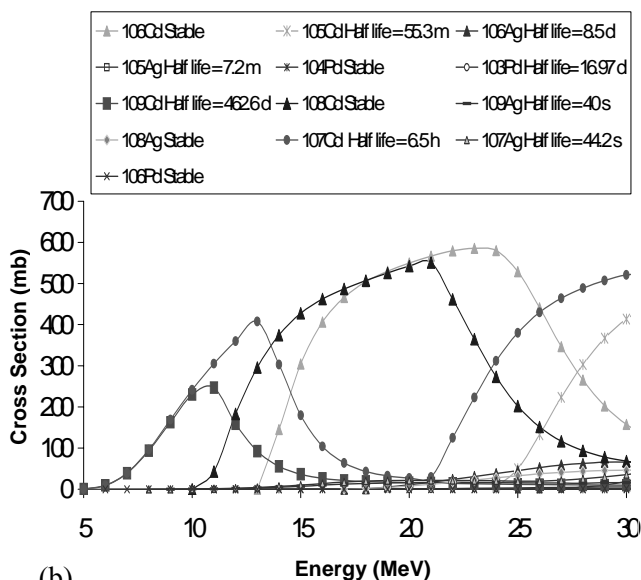
افزایش انرژی تا بیش از 15MeV تأثیر چندانی بر افزایش بازده تولید نخواهد داشت، ضمن این که ضخامت مورد نیاز پوشش نقره را نیز افزایش خواهد داد (شکل ۱).

انرژی پروتون خروجی از هدف در حال پرتو دهی 5MeV است، این پروتون در زیرلایه‌ی مسی دارای سطح مقطع حدود $244,26\text{mb}$ برای تولید ^{65}Zn است. بنابراین ^{65}Zn با نیمه عمر $244,26$ روز مهم ترین آلودگی رادیونوکلیدی در این روش تولید کادمیم- 109 محسوب می شود. میزان تولید آلودگی ^{65}Zn به زمان پرتو دهی و جریان باریکه‌ی پروتونی بستگی خواهد داشت. با افزایش ضخامت لایه‌ی نقره‌ی آب کاری شده می توان تا حدودی این آلودگی را حذف نمود. البته هنگام اسیدشویی هدف پرتو دهی شده به دلیل آن که پنجره‌ی سیستم جداسازی دقیقاً بر سطح هدف آب کاری شده منطبق نمی باشد و در نتیجه زیرلایه‌ی مسی در اثر تماس با اسید به طور ناخواسته خورده می شود، حضور روی و مس در محلول حاصل از اسیدشویی نقره‌ی بمباران شده اجتناب ناپذیر خواهد بود.

به منظور دستیابی به محصول کادمیم- 109 بدون آلودگی‌های شیمیایی و رادیوشیمیایی روش‌های مختلفی برای جداسازی عناصر از یکدیگر وجود دارد. از آنجایی که



(a)



(b)

شکل ۱- نمودار تولید کادمیم- 109 از طریق (a) $^{109}\text{Ag}(p, n)^{109}\text{Cd}$ ، (b) $^{nat}\text{Ag}(p, n)^{109}\text{Cd}$.

این روش‌های شیمیایی قادر به جداسازی ایزوتوپ‌های کادمیم از یکدیگر نمی باشند، برای استفاده‌های خاص لازم است از تولید آن‌ها ضمن پرتو دهی هدف جلوگیری به عمل آورد.

۳-۲ بررسی تابع تحریک واکنش هسته‌ای $^{109}\text{Cd}(d, n)^{109}\text{Ag}$

نتایج به دست آمده از کد نشان می دهد که در محدوده انرژی ۷ تا 22MeV برای پرتابه‌ی دوترون، تولید کادمیم بیشینه است. استفاده از هدف نقره‌ی طبیعی باعث ایجاد ناخالصی‌های ایزوتوپی کادمیم- 106 ، کادمیم- 108 و کادمیم- 110 در تمام



۳-۳ بررسی تابع تحریک واکنش هسته‌ای $^{109}\text{Cd}(p, pxn)^{109}\text{Cd}$

محاسبات کد ALICE نشان می‌دهد که پرتودهی پروتونی هدف کادمیم طبیعی باعث ایجاد ناخالصی‌های رادیونوکلیدی دراز-عمر و ایزوتوپ‌های پایدار در تمام محدوده‌ی تولید کادمیم-۱۰۹ می‌گردد، علاوه بر این، کادمیم-۱۰۹ دارای سطح مقطع تولید بسیار کوچک‌تری نسبت به این ناخالصی‌ها است. تولید کادمیم-۱۰۹ تقریباً از انرژی ۲۲ MeV شروع و تا بیش از ۹۰ MeV ادامه می‌یابد.

کادمیم-۱۰۹ از دو کانال کادمیم-۱۱۰ با نسبت انشعاب ۱۲/۴۹٪ و کادمیم-۱۱۱ با نسبت انشعاب ۱۲/۸٪ تولید می‌شود. برای افزایش بهره‌ی تولید می‌توان از هدف غنی شده‌ی کادمیم استفاده کرد. با توجه به این که تولید کادمیم-۱۰۹ از طریق پرتودهی هدف کادمیم-۱۱۰ از انرژی ۱۹ MeV شروع می‌شود، استفاده از آن برای سیکلوترون‌های کم انرژی مناسب‌تر است. محدوده‌ی انرژی ۱۹ تا ۳۰ MeV به لحاظ دستیابی به بیش‌ترین بهره‌ی تولید می‌تواند برای پروتون‌های خروجی انتخاب شود. نیمه‌عمر آلودگی‌های تولید شده پس از بمباران هدف کادمیم-۱۱۰ در مقایسه با محصول بسیار کم‌تر است و پس از چند روز به طور کامل حذف می‌شوند. برای حذف آلودگی ایزوتوپی کادمیم-۱۰۸ می‌توان انرژی پروتون ورودی را ۲۷ MeV انتخاب نمود (شکل ۳).

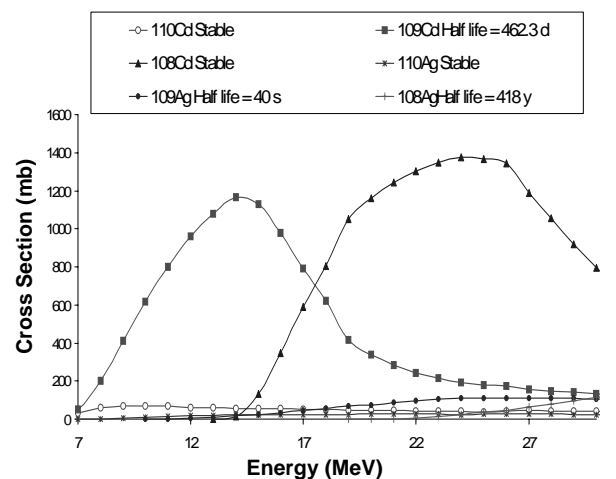
۴-۳ بررسی تابع تحریک واکنش هسته‌ای $^{109}\text{Cd}(p, pxn)^{109}\text{Cd}$

این‌دیم طبیعی دارای دو ایزوتوپ ایندیم-۱۱۳ با فراوانی ایزوتوپی ۴/۳٪ و ایندیم-۱۱۵ با فراوانی ایزوتوپی ۹۵/۷٪ است. کادمیم-۱۰۹ فقط می‌تواند از پرتودهی پروتونی ایندیم-۱۱۳ تولید شود.

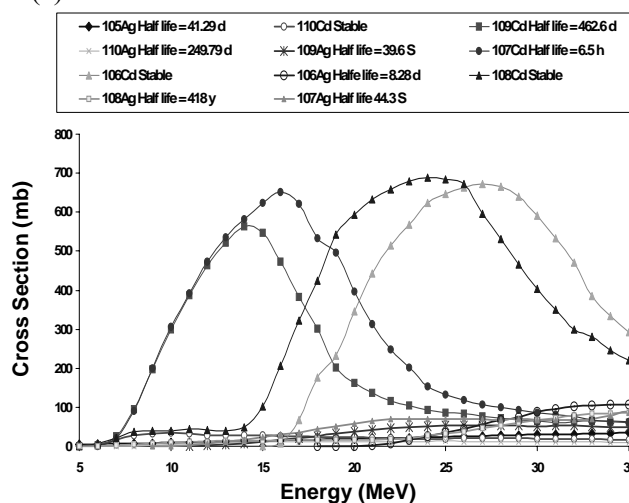
در محدوده‌ی انرژی ۱ تا ۴۰ MeV، بیش‌ترین مقدار سطح مقطع تولید کادمیم-۱۰۹ با استفاده از پرتودهی ایندیم-۱۱۳ غنی شده ۵/۷۰۸ mb است؛ در تمام این محدوده‌ی انرژی آلودگی قلع-۱۱۳ (نیمه‌عمر ۱۱۵/۰۹ روز) با سطح مقطع تولید بیش از ۱۰۰۰ mb وجود خواهد داشت. از آنجایی که انرژی آستانه برای تولید کادمیم-۱۰۹، ۲۲ MeV است، بهره‌ی تولید ناخالصی روی ۶۵- نیز با به کارگیری این روش افزایش می‌یابد (شکل ۴).

محدوده‌ی تولید کادمیم-۱۰۹ خواهد شد. نیمه‌عمر سایر ناخالصی‌های رادیوایزوتوپی به جز ۲۴۹/۷۹ روز برای ^{110}mAg در مقایسه با محصول بسیار کم‌تر است و در نتیجه چند روز پس از تولید از محلول اسیدشویی هدف حذف می‌شوند. رادیونوکلید ^{110}mAg دارای سطح مقطع تولید بیشینه ۱۲ mb در تمام محدوده‌ی انرژی بمباران است.

با استفاده از نقره-۱۰۹ غنی شده به جای نقره‌ی طبیعی ناخالصی ایزوتوپی کادمیم-۱۰۶ حذف می‌شود، ولی ناخالصی کادمیم-۱۱۰ در تمام محدوده‌ی تولید کادمیم-۱۰۹ همچنان وجود خواهد داشت. با انتخاب انرژی فرودی ۱۳ MeV می‌توان از تولید ناخالصی ایزوتوپی کادمیم-۱۰۸ نیز جلوگیری به عمل آورد (شکل ۲).



(a)



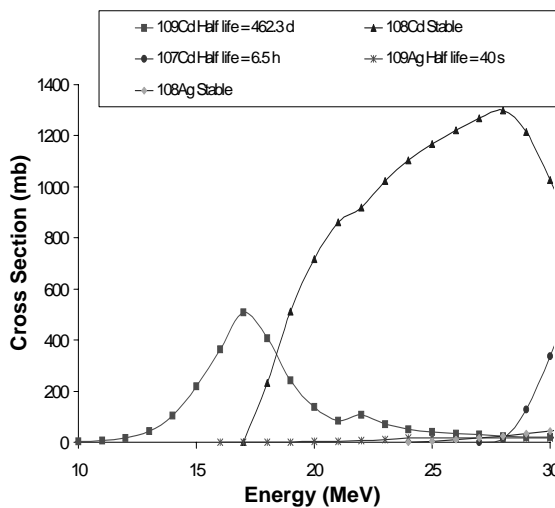
(b)

شکل ۲- نمودار تولید کادمیم-۱۰۹ از طریق (a): $^{109}\text{Ag}(d, \gamma)^{109}\text{Cd}$; (b): $^{nat}\text{Ag}(d, \gamma)^{109}\text{Cd}$

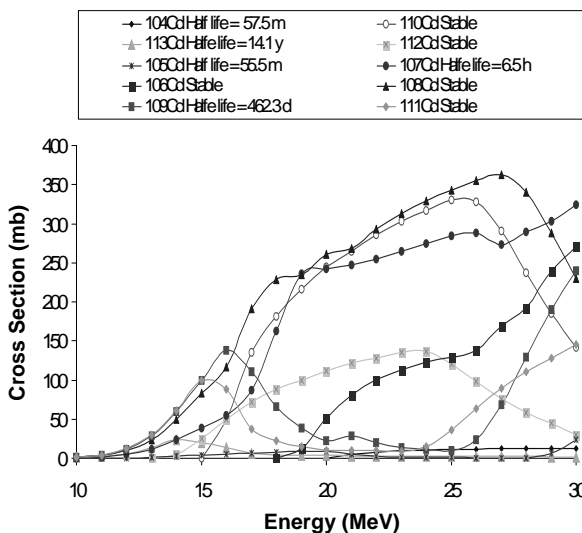


۳-۵ بررسی تابع تحریک واکنش هسته‌ای $^{nat}Pd(\alpha, xn)^{1-1}Cd$ استفاده از پالادیم طبیعی برای تولید کادمیم-۱۰۹ بر طبق محاسبات کد ALICE-91 آلودگی رادیونوکلیدی دراز-عمر ایجاد نخواهد کرد و پس از یک روز آلودگی‌های کوتاه-عمر تولید شده حذف می‌شوند.

آلودگی ایزوتوپی با سطح مقطع بسیار بالا در تمام محدوده‌ی تولید کادمیم-۱۰۹ وجود خواهد داشت. با استفاده از هدف پالادیم-۱۰۶ غنی شده می‌توان آلودگی‌های ایزوتوپی کادمیم-۱۱۱ و کادمیم-۱۱۳ را حذف نمود، برای حذف آلودگی کادمیم-۱۰۸ می‌توان انرژی باریکه پرتونی را ۱۷ MeV انتخاب نمود (شکل ۵).

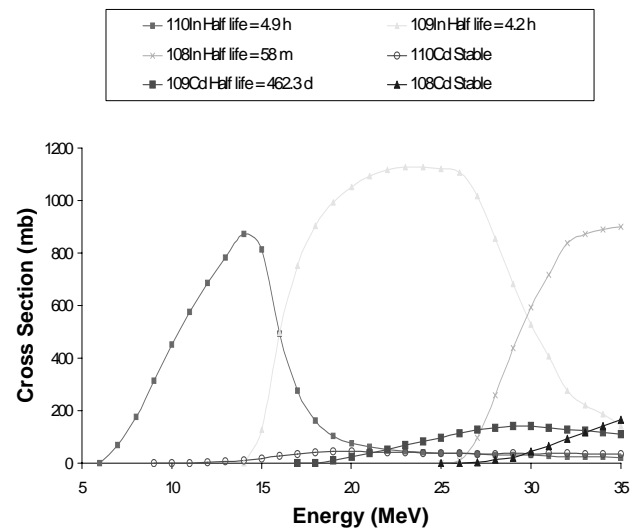


(a)

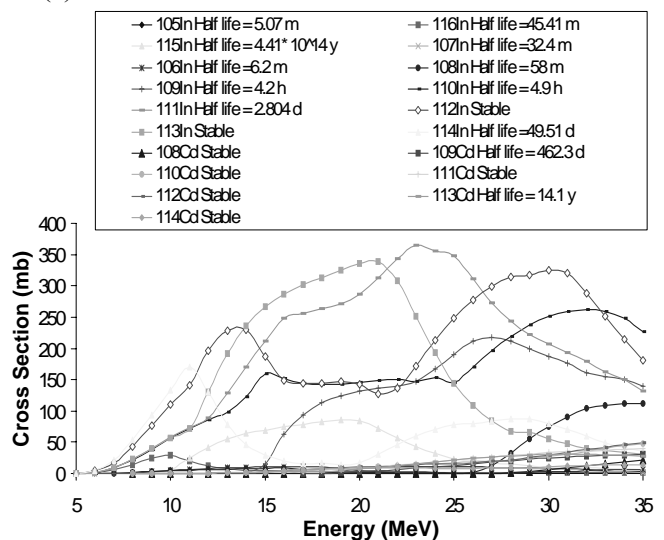


(b)

شکل ۵- نمودار تولید کادمیم-۱۰۹ از طریق (a): $^{109}Pd(\alpha, n)^{109}Cd$ ، (b): $^{nat}Pd(\alpha, xn)^{1-1}Cd$

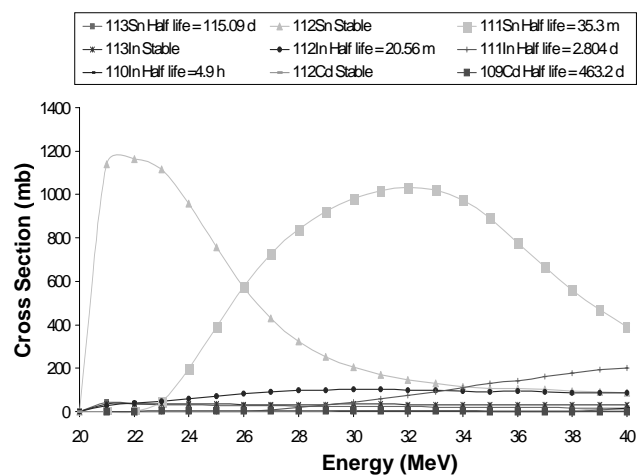


(a)



(b)

شکل ۳- نمودار تولید کادمیم-۱۰۹ از طریق (a): $^{110}Cd(p, pn)^{109}Cd$ ، (b): $^{nat}Cd(p, pxn)^{1-1}Cd$



شکل ۴- نمودار تولید کادمیم-۱۰۹ از طریق $^{113}In(p, p4n)^{1-1}Cd$



پی‌نوشت:

۱- SRIM: The Stopping and Range of Ions in Matter

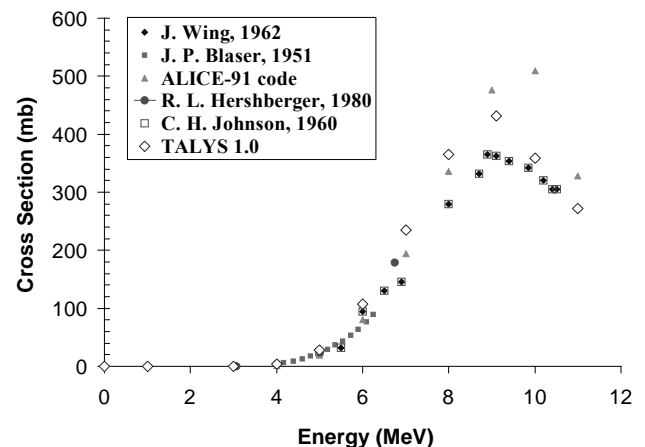
References:

1. E. Browne, R.B. Firestone, "Table of Radioactive Isotopes," V.S. Shirley (Ed.), John Wiley and Sons, New York (1996).
2. X. Peng, X. Long, F. He, M. Li, "Excitation function for $^{107}\text{Ag}(d,2n)^{107}\text{Cd}$, $^{109}\text{Ag}(d,2n)^{109}\text{Cd}$ and $^{109}\text{Ag}(d,p)^{110m}\text{Ag}$ reactions," Nucl. Inst. Meth. Phys. Res. B68, 145-148 (1992).
3. F.W.E. Strelow, "Improved separation of cadmium-109 from silver cyclotron targets by anion-exchange chromatography in nitric acid hydrobromic acid mixtures," Anal. Chim. Acta, 97, 87-91 (1978).
4. S.M. Lad, P.P. Kane, "EDXRF analysis of aluminium and apcolite paint with a ^{109}Cd radioactive source and standardization based on Compton peaks," Nucl. Inst. Meth. Phys. Res. B, 34(1), 113-117 (1988).
5. D.E.B. Fleming, T.A. Forbes, "Calibration and characterization of a digital X-ray fluorescence bone lead system," Appl. Radiat. Isot. 55, 527-532 (2001).
6. S. Yoshida, T. Ohsugi, "Application of Silicon strip detectors to X-ray computed tomography," Nucl. Inst. Meth. Phys. Res. A. 541, 412-420 (2005).
7. J. Roboco, M.L. Carvalho, A.F. Marques, F.R. Freire, D.R. Chettle, "Lead post mortem intake in human bones of ancient populations by ^{109}Cd - based X-ray fluorescence and EDXRF," Talanta. 70, 957-961 (2006).
8. V. Page, U. Fleer, "Selective transport of Zinc, Manganese, Nickel, Cobalt and Cadmium in the root system and transfer to the leaves in young wheat plants," Annals of Botany, 96, 425-434 (2005).
9. E.H. Larsson, H. asp, J.F. Bornman, "Influence of prior cd^{2+} exposure on the uptake of cd^{2+} and other elements in the phytochelatin-deficient mutant, *cad1-3*, of *Arabidopsis thaliana*," Experimental Botany, 53(368), 447-453 (2002).

۳- بررسی میزان هم‌خوانی نتایج کد ALICE با نتایج تجربی بسته به نوع واکنش و نوع هدف، میانگین اختلاف بین محاسبات سطح مقطع توسط کد ALICE-91 و نتایج تجربی معمولاً حدود ۱۵ تا ۳۰٪ می‌باشد (شکل ۶).

۴- نتیجه‌گیری

تولید کادمیم-۱۰۹ با استفاده از واکنش‌های $^{110}\text{Cd}(p,pn)^{109}\text{Cd}$ و $^{113}\text{In}(p,pxn)^{109}\text{Cd}$ به دلیل بهره‌ی تولید بسیار پایین و همچنین نیاز به هدف‌های با ضخامت بالا مقرون به صرفه نخواهد بود. تولید کادمیم-۱۰۹ با استفاده از واکنش $^{106}\text{Pd}(\alpha,xn)^{109}\text{Cd}$ علی‌رغم بهره‌ی همچنین بالای آن نسبت به سایر روش‌ها به دلیل گران‌قیمت بودن هدف‌های غنی شده مقرون به صرفه نمی‌باشد، ضمن این‌که ساخت هدف‌های پالادیومی دارای چسبندگی مطلوب به زیرلایه بسیار مشکل است. بیش‌ترین بهره‌ی تولید کادمیم-۱۰۹ متعلق به واکنش $^{nat}\text{Ag}(d,2n)^{109}\text{Cd}$ است. آلودگی‌های رادیوایزوتوپی در این روش تولید نخواهند شد. به منظور حذف کامل تولید آلودگی‌های ایزوتوپی، واکنش $^{nat}\text{Ag}(p,n)^{109}\text{Cd}$ با پروتون‌های ۹ MeV می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. ساخت هدف‌های نقره با ویژگی‌های مورد نیاز پرتودهی امکان‌پذیر است. نقره دارای بیش‌ترین ضریب انتقال حرارتی در میان فلزات است که این موضوع امکان استفاده از جریان‌های بالا را فراهم می‌سازد. بنابراین واکنش‌های $^{nat}\text{Ag}(d,2n)^{109}\text{Cd}$ و $^{nat}\text{Ag}(p,n)^{109}\text{Cd}$ به عنوان مناسب‌ترین واکنش برای تولید کادمیم-۱۰۹ پیشنهاد می‌شوند.



شکل ۶- موافقت بین محاسبات سطح مقطع با استفاده از کد ALICE-91 و تجربه رضایت بخش است. اختلاف معمولاً در حدود ۱۵ تا ۳۰٪ است..



10. I. Cakmak, R.M. Welch, B. Erenoglu, V. Römheld, W.A. Norvell, L.V. Kochian, "Influence of varied zinc supply on re-translocation of cadmium (^{109}Cd) and rubidium (^{86}Rb) applied on mature leaf of durum wheat seedlings," *Plant and Soil*, 219, 279-284 (2000).
11. S. Liu, W.-X. Wang, "Feeding and reproductive responses of marine copepods in South China Sea to toxic and nontoxic phytoplankton," *Marine Biology* 140, 595-603 (2002).
12. D.F. Malley, P.S.S. Chang, R.H. Hesslein, "Whole lake addition of cadmium-109: radiotracer accumulation in the mussel population in the first season," *Sci. Total Environ.* 87-88, 397-417 (1989).
13. P. Moffatt, M. Marion, F. Denizeau, "Cadmium-2-acetylaminofluorene interaction in isolated rat hepatocytes," *Cell Biology and Toxicology*, 8(4), 277-290 (1992).
14. B. Florianczyk, L. Grzybowska, "Metallothionein Levels in Cell Fractions from Breast Cancer Tissues," *Acta Oncologica*, 39(2), 141-143 (2000).
15. W.Y. Chan, A.D. Garnica, O.M. Rennert, "Cell culture studies of Menkes kinky hair disease," *Clin. Chim. Acta*, 88(3), 495-507 (1978).
16. M. Blann, "ALICE-91; Statistical Model Code System with Fission Competition," RSIC Code Package PSR-146 (1991).
17. J.F. Ziegler, J.P. Biersack, U. Littmark, "The stopping and range of ions in matter," SRIM code. NY. USA (2006).
18. A. Vertes, S. Nagy, Z. Klencsar, "Handbook of Nuclear Chemistry," Kluwer Academic Publishers Netherlands 4: 4-9 (2003).
19. J. Wing, J.R. Huizenga, "(p,n) Cross sections of ^{51}V , ^{52}Cr , ^{65}Cu , ^{107}Ag , ^{109}Ag , ^{111}Cd , ^{114}Cd , and ^{139}La from 5 to 15.5 MeV," *Phy. Rev* 128(1), 280-290 (1962).
20. D.P. Dmitriev, I.O. Konstantinov, N.N. Krasnov, "Excitation function of the reactions $^{109}\text{Ag}(p,n)$; $^{109}\text{Ag}(d,2n)$; $^{107}\text{Ag}(\alpha,2n+pn)$ and yield of ^{109}Cd ," *At. Energ.* 22, 310-315 (1967).
21. M.S. Uddin, M. Baba, M. Hagiwara, F. Tarkanyi, F. Ditroi, S. Takacs, A. Hermanne, "Experimental studies of the deuteron-induced activation cross-sections on ^{nat}Ag ," *Appl. Radiat. Isot.* 64, 1013-1019 (2006).
22. F. Tarkanyi, B. Kiraly, F. Ditroi, S. Takacs, J. Csikia, A. Hermanne, M.S. Uddin, M. Hagiwara, M. Baba, T. Ido, Y.N. Shubin, S.F. Kovalev, "Activation cross-sections on cadmium: proton induced nuclear reactions up to 80 MeV," *Nucl. Inst. Meth. Phys. Res. B.* 245, 379-394 (2006).
23. F.M. Nortier, S.J. Mills, G.F. Steyn, "Excitation functions and production rates of relevance to the production of ^{111}In by proton bombardment of ^{nat}Cd and ^{nat}In up to 100 MeV," *Appl. Radiat. Isot.* 41, 1201 (1990).
24. F.M. Nortier, S.J. Mills, G.F. Steyn, "Excitation functions and production of ^{109}Cd , ^{109}In and ^{109}Sn in proton bombardment of Indium up to 200 MeV," *Appl. Radiat. Isot.* 42, 1105-1107 (1991).
25. P.H. Stelson, F.K. McGowan, "Cross sections for (alpha,n) reactions for medium weight nuclei," *Phy. Rev B*, 113, 911-919 (1964).
26. M. Mirzaee, M. Sadeghi, Z. Golamzadeh, S. Lahouti, "Thick silver electrodeposition on copper substrate for ^{109}Cd production," *Radioanal. Nucl. Chim.* 277(3), 645-650 (2008).