



اندازه‌گیری رادیوزنون حاصل از شکافت با استفاده از روش طیف‌نگاری گاما

پونه طیبی^{*}، محسن طبسی، محمد قنادی مراغه

پژوهشکده چرخه سوخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۱۱۳۶۵-۸۴۸۶، تهران - ایران

*Email: ptayyebi@aeoi.org.ir

مقاله‌ی پژوهشی

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۴/۲۰ تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۲/۶/۱۵ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۶/۲۷

چکیده

یکی از محصولات شکافت هسته‌ای اورانیوم، رادیوایزوتوپ‌های زنون هستند. این رادیوایزوتوپ‌ها در فرایند انحلال هدف اورانیومی برای استحصال ^{99}Mo به صورت گاز، رهاسازی می‌شوند. هدف این پژوهش، اندازه‌گیری فعالیت رادیوایزوتوپ‌های زنون رها شده، می‌باشد. به این منظور، رادیوزنون با استفاده از جاذب کربن فعال از دیگر محصولات شکافت جدا گردیده و پس از عبور از الک کربنی، خالص می‌شود. رادیوزنون خالص، به درون محفظه اندازه‌گیری هدایت شده و با استفاده از آشکارساز HPGc اندازه‌گیری می‌شود. برای کالیبراسیون بازدهی آشکارساز از دو روش تجربی و شبیه‌سازی با کد MCNPX27c استفاده شده و اختلاف بین این دو روش کمتر از ۲۲ درصد بوده است. به این ترتیب میانگین فعالیت ۱۰۰ cc از گاز رادیوزنون، در لحظه پس از پایان پرتودهی برابر 54225 ± 2272 Bq حاصل شد.

کلیدواژه‌ها: شکافت اورانیوم، رادیوزنون، طیف‌نگاری گاما، آشکارساز HPGc، کربن فعال، الک مولکولی کربن

Fission based radioxenon measurement by gamma spectrometry

P. Tayyebi*, M. Tabasi, M. Ghannadi Maragheh

Nuclear Fuel Cycle Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, P.O.Box: 11365-8486, Tehran – Iran

Research Article

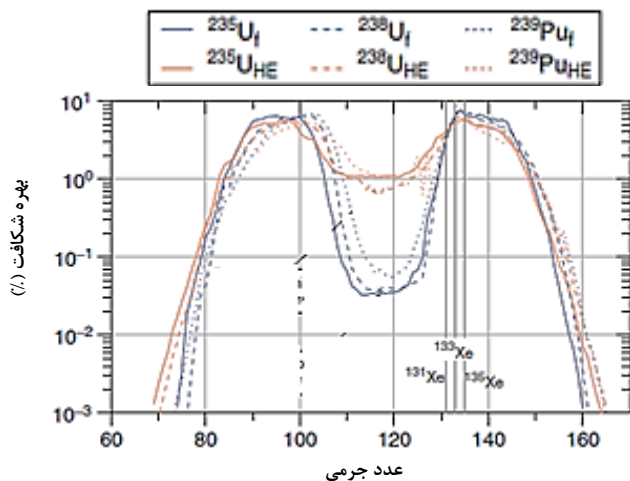
Received: 11.7.2023, Revised: 6.9.2023, Accepted: 18.9.2023

Abstract

Xenon radioisotopes are one of the products of uranium nuclear fission. These radioisotopes are released in the form of gas in the process of dissolving the uranium target to extract ^{99}Mo . This research aims to measure the activity of released xenon radioisotopes. For this, radioxenon is separated from other fission products using activated charcoal and purified after passing through a carbon molecular sieve. Pure radioxenon is directed into the measurement chamber and determined by an HPGc detector. Calibration of the detector efficiency has been performed via experimental and simulation (using MCNPX27e code) and the difference was less than 22%. In this way, the average activity of 100 cc of radioxenon gas at the moment after irradiation was equal to 54225 ± 2272 Bq.

Keywords: Uranium fission, Radioxenon, Gamma spectrometry, HPGc detector, Charcoal active, Carbon molecular sieve





شکل ۱. بهره شکافت برای هسته‌های ^{235}U ، ^{238}U و ^{239}Pu برای شکافت با نوترون‌های حرارتی f، و نوترون‌های با انرژی بالا، HE [۳].

جدول ۱. مشخصات رادیوایزوتوپ‌های زنون حاصل از شکافت حرارتی ^{235}U [۵]

ایزوتوپ	نیمه‌عمر	بهره شکافت (%)	انرژی فوتون (keV)	شدت (%)	انرژی بتا/الکترون تبدیل (keV)	شدت (%)
$^{131\text{m}}\text{Xe}$	۱۱٫۹۳ روز	۰٫۰۵	۲۹٫۶۲	۴۴٫۴	۱۲۹٫۴	۶۱
$^{131\text{m}}\text{Xe}$	۲٫۱۹ روز	۰٫۱۹	۲۹٫۶۲	۴۶٫۱	۱۹۸٫۷	۶۴
^{133}Xe	۵٫۲۴ روز	۶٫۷۲	۳۰٫۸۰	۴۰٫۹	۳۴۶٫۴	۹۹٫۲
^{135}Xe	۹٫۱۴ ساعت	۶۶۰	۳۰٫۸۰	۳۸٫۰	۴۵	۵۵٫۱
^{135}Xe			۲۴۹٫۷۷۰	۹۰٫۰	۲۱۳٫۸	۵٫۷

برای کنترل کیفی^۲ عملکرد این آشکارسازها، توانمندی آن-ها در اندازه‌گیری مقادیر کم‌فعالیت رادیوایزوتوپ‌های زنون (در حدود 1 mBq/m^3 ایزوتوپ زنون ۱۳۳) مورد بررسی قرار می‌گیرد. آزمایشگاه ملی آیداهو^۳ و آزمایشگاه سایبرزدورف^۴ از معدود آزمایشگاه‌هایی هستند که قادر به تهیه چشمه استاندارد گازی رادیوزنون برای QC می‌باشند [۸].

در معاهده CTBT، ۸۰ ایستگاه در سراسر جهان برای پایش ذرات پرتوزا در نظر گرفته شده که ۴۰ ایستگاه آن مجهز به اندازه‌گیری رادیوزنون برمبنای این روش‌های اندازه‌گیری هستند. در این ایستگاه‌ها، به‌طور پیوسته نمونه‌برداری از جو زمین انجام شده و پس از طیف‌نگاری، در صورت مشاهده نمونه ناهنجار، منشا گسیل آن با استفاده از مدل‌سازی ترابرد جوی^۵ مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۱. مقدمه

در طی شکافت حرارتی ^{235}U ، محصولات فراوانی تولید می‌شوند که در این میان، رادیوایزوتوپ‌های زنون با بهره شکافت ۶٪ در قله بهره شکافت قرار دارند (شکل ۱). رادیوایزوتوپ‌های زنون دو کاربرد اساسی دارند: در پزشکی هسته‌ای، رادیوایزوتوپ ^{133}Xe برای اندازه‌گیری پارامترهای فیزیولوژیکی ریه و تصویربرداری استفاده می‌شود. رادیوایزوتوپ‌های زنون در فرایند انحلال هدف اورانیومی برای استحصال ^{99}Mo به صورت گاز، رهاسازی می‌شوند. رادیوایزوتوپ $^{99\text{m}}\text{Tc}$ که حاصل واپاشی رادیوایزوتوپ ^{99}Mo است، مهم‌ترین رادیوداروی تشخیصی در پزشکی هسته‌ای محسوب می‌شود. نیاز به این رادیودارو در ایران حدود ۱۲۰ کوری در هفته است [۱]. عمده‌ترین روش برای تولید آن، پرتودهی هدف شامل ^{235}U با نوترون‌های حرارتی در رآکتور هسته‌ای می‌باشد [۲].

کاربرد دیگر رادیوایزوتوپ‌های زنون، ارزیابی پای‌بندی کشورهای عضو معاهده منع جامع آزمایش‌های هسته‌ای^۱ به معاهده است که از طریق اندازه‌گیری و پایش جوی چهار رادیوایزوتوپ زنون مندرج در جدول ۱ انجام می‌گیرد.

جو زمین حاوی 0.087 ppm از زنون پایدار است [۴]. زنون طبیعی شامل ۷ ایزوتوپ پایدار و دو ایزوتوپ پرتوزای ^{134}Xe و ^{136}Xe با نیمه‌عمرهای طولانی مدت می‌باشد. علاوه بر این‌ها، ^{136}Xe با نیمه‌عمرهای دیگر با نیمه‌عمرهای بیشتر از ۰٫۱ ثانیه کشف شده‌اند که تقریباً نیمی از آن‌ها محصول شکافت اورانیوم و پلوتونیوم و قسمت اعظم آن‌ها حاصل دست فعالیت‌های بشر هستند. بنابراین شناسایی آن‌ها نشان از یک فعالیت هسته‌ای مبنی بر شکافت، مانند رآکتورهای هسته‌ای، مراکز تولید رادیودارو و انفجارهای هسته‌ای دارد [۳، ۴].

ایزوتوپ‌های مندرج در جدول ۱، فوتون (ایکس یا گاما) همفرود با بتا یا الکترون‌های تبدیل گسیل می‌کنند. بر این اساس، دو روش برای اندازه‌گیری آن‌ها وجود دارد: روش همفرودی بتا-گاما و روش طیف‌نگاری گاما با قدرت تفکیک بالا. در روش همفرودی بتا-گاما، از یک آشکارساز NaI چاهک‌دار که درون آن آشکارساز سوسوزن پلاستیک قرار گرفته برای ثبت رویدادهای همفرودی حاصل از رادیوایزوتوپ‌های زنون استفاده و به این ترتیب زمینه به طور مؤثری حذف می‌شود. شناسایی ایزوتوپی در گستره انرژی ۳۰ keV با این روش قابل انجام است [۶].

در روش طیف‌نگاری گاما با قدرت تفکیک بالا از آشکارساز HPGe استفاده می‌شود. در این روش قله‌های شاخص رادیوایزوتوپ‌های زنون به خوبی قابل شناسایی هستند [۷].

1. Comprehensive Nuclear Test Ban Treaty (CTBT)

مجله علوم، مهندسی و فناوری هسته‌ای

دوره ۴۵، شماره ۳، جلد ۱۰۹، پاییز ۱۴۰۳، ص ۱۳۶-۱۴۲



2. Quality Control (QC)

3. Idaho National Laboratory

4. Seibersdorf Laboratory

5. Atmospheric Transport Modeling



شکل ۲. محفظه اندازه‌گیری رادیوزنون به همراه شیرهای ورودی و خروجی گاز.

۳.۲ جداسازی و خالص‌سازی رادیوزنون

به منظور تولید رادیوزنون، هدف اورانیومی در رآکتور تحقیقاتی تهران به مدت ۵ دقیقه در معرض شار نوترونی قرار گرفته و پس از سپری شدن زمان خنک‌سازی، فرایند انحلال در اسید نیتریک بر روی آن انجام شده است.

برای جداسازی رادیوزنون از دیگر محصولات گازی حاصل از شکافت هدف اورانیومی و همچنین گازهای ناکس، NO_x، تولید شده در طی فرایند انحلال، ابتدا کلیه گازها در یک مخزن موسوم به گازومتر جمع‌آوری شده، سپس به ترتیب فرایند اکیداسیون و خنثی‌سازی گازهای ناکس و تبدیل هیدروژن به آب بر روی آن‌ها انجام می‌شود.

در ادامه آزمایش، مابقی گازها از روی ستون جاذب کربن فعال در دمای اتاق عبور داده می‌شوند و در حین عبور، زنون پرتوزا بر روی جاذب جذب می‌شود. یک مینی اسپکت مدل GR-۱۳۰ Spec view در نزدیکی ستون جاذب قرار داده شد و در حین فرایند جذب که گاز به طور پیوسته جاری است در فواصل زمانی ۵ دقیقه، طیف نمونه جذب شده در ستون جاذب به مدت ۳۰ ثانیه ثبت شده است. روند ثبت طیف تا زمان به اشباع رسیدن مینی اسپکت ادامه پیدا کرد.

شکل ۳ طیف‌های شماره ۲۱ تا ۲۵ را نمایش می‌دهد. روند افزایشی از طیف شماره ۲۱ تا ۲۵ نشان می‌دهد که زنون در ستون کربن فعال در حال جذب شدن است. ناحیه نزدیک به انرژی ۸۰.۹۹ keV که متعلق به ایزوتوپ زنون ۱۳۳ می‌باشد در این شکل بزرگ‌نمایی شده است.

مراکز تولید رادیودارو، منابع بالقوه گسیل رادیوزنون هستند. بنابراین به منظور جلوگیری از تداخل رادیوزنون گسیلی از این مراکز با رادیوزنون ناشی از انفجار هسته‌ای، پیشنهاد شده است این مراکز، گسیل رادیوزنون روزانه خود را به 5×10^9 Bq/day کاهش دهند [۹]. این اقدام سبب کاهش زمینه جوی رادیوزنون شده و سهولت در تشخیص منبع گسیلی و تمایز بین منابع احتمالی را امکان‌پذیر می‌نماید.

از آنجایی که پرتودهی هدف اورانیومی در رآکتور تهران همواره با چالش‌هایی مواجه بوده تاکنون امکان انجام پژوهشی به منظور جداسازی رادیوزنون از محصولات شکافت در کشور وجود نداشته است. طبسی و همکاران [۱۰] برای جداسازی زنون، از هدف اورانیوم به صورت سرد استفاده کرده‌اند و با افزودن گاز پرتوزای زنون ۱۳۳ به محلول اورانیوم، ترکیبی را مشابه ترکیبات حاصل از انحلال هدف اورانیوم پرتودیده به وجود آورده‌اند.

در این تحقیق برای اولین بار در کشور، رادیوزنون حاصل از پرتودهی هدف اورانیومی در رآکتور تهران، پس از جداسازی از دیگر محصولات گازی، با استفاده از روش طیف‌نگاری گاما با قدرت تفکیک بالا اندازه‌گیری شده است.

۲. تجهیزات و روش کار

۱.۲ آشکارساز ژرمانیوم

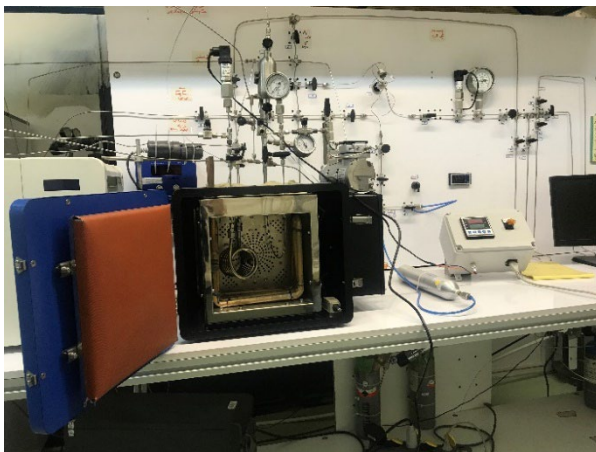
برای اندازه‌گیری رادیویزوتوپ‌های زنون از آشکارساز HPGe نوع p با بازده نسبی ۳۰٪ و قدرت تفکیک ۱/۸ keV (در انرژی ۱/۳۳۲ MeV چشمه کبالت ۶۰) استفاده شده است. قطر و طول کریستال ژرمانیوم به ترتیب برابر ۵۶/۷ و ۶۸/۵ میلی‌متر می‌باشد. ثبت داده‌های طیف با نرم‌افزار MAESTRO انجام شده است. برای طیف‌نگاری از تقویت‌کننده Silena ۷۶۱۴، منبع تغذیه ORTEC ۴۵۹ و مبدل آنالوگ به دیجیتال و تحلیل‌گر چند کاناله ORTEC استفاده شده است.

۲.۲ محفظه اندازه‌گیری

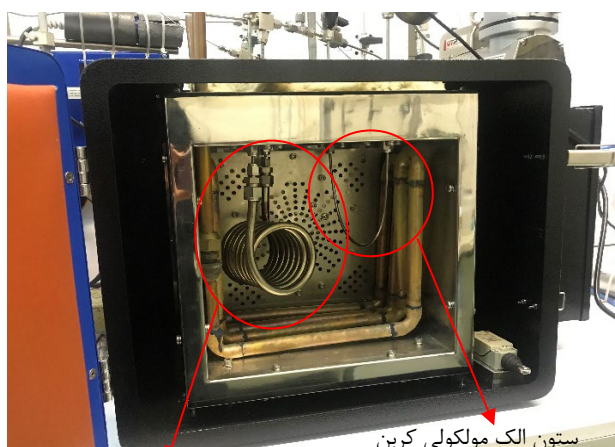
برای اندازه‌گیری رادیوزنون از محفظه‌ای از جنس پلی‌اتیلن با حجم ۱۰۰ cc مجهز به دو عدد شیر ورودی و خروجی گاز استفاده شده است (شکل ۲). ارتفاع و قطر آن به ترتیب برابر ۶/۲ و ۵/۸ سانتی‌متر است. این محفظه مخصوص نگهداری و اندازه‌گیری گاز پرتوزا بوده و قدرت تحمل فشار ۱۰ PSIG را دارد. جنس و ضخامت این محفظه اثر تضعیفی روی گامای ۸۱ keV زنون ۱۳۳ ندارد [۱۱]. فاصله این محفظه تا سطح آشکارساز برای اندازه‌گیری رادیوزنون (به عنوان نمونه) و گاز رادون (به عنوان چشمه استاندارد رک بخش ۴.۲) برابر ۱ cm بوده است.



مواردی که چشمه رادیواکتیو استاندارد عیناً مانند نمونه (به لحاظ ترکیب شیمیایی، چگالی، شکل و اندازه) وجود داشته باشد به راحتی می‌توان از چشمه استاندارد برای کالیبراسیون بازدهی استفاده کرد. اما معمولاً چشمه استاندارد دقیقاً مانند نمونه در آزمایشگاه‌های متداول اندازه‌گیری وجود ندارد. بنابراین یا باید چشمه استاندارد خریداری شود یا در آزمایشگاه تولید شود. تولید چشمه استاندارد در آزمایشگاه بسیار هزینه‌بر و وقت‌گیر است و برای هر نوع چیدمان هندسی نیز میسر نمی‌باشد. با استفاده از روش‌های شبیه‌سازی می‌توان بازدهی را برای هرگونه ترکیب از چشمه و آشکارساز به دست آورد. مطالعات مختلف در این حوزه، سازگاری بین نتایج تجربی و شبیه‌سازی با مقادیر بین ۵ تا ۲۰ درصد را نشان داده‌اند [۱۸-۱۲].



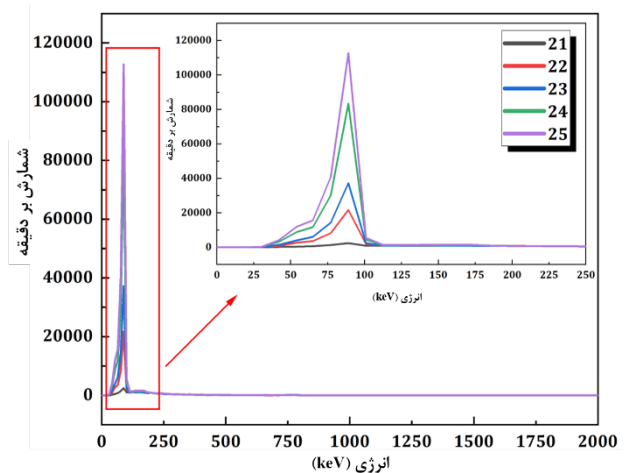
(الف)



ستون جاذب کربن فعال

(ب)

شکل ۴. (الف) چیدمان جداسازی و خالص‌سازی زنون، (ب) ستون جاذب کربن فعال و الک مولکولی کربن.



شکل ۳. طیف رادیوزنون اندازه‌گیری شده با مینی اسپکت در فواصل زمانی ۵ دقیقه از یکدیگر.

برای خالص‌سازی رادیوزنون از گاز حامل هلیوم (به عنوان گاز حامل) و باقی‌مانده دیگر محصولات گازی، از الک مولکولی کربن ۵A (CMS)^۱، استفاده شده است. در واقع هنگام عبور گاز از الک مولکولی کربن در دمای اتاق، رادیوزنون جذب شده و هلیوم و باقی‌مانده گازها به مسیر خروجی هدایت می‌شوند. سپس با افزایش دما تا ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد، رادیوزنون از الک مولکولی و جذب شده و به محفظه اندازه‌گیری (شکل ۲) که از قبل خلأ شده هدایت شده و برای شمارش با آشکارساز HPGe آماده می‌شود.

شکل ۴ نمایشی از چیدمان آزمایش را نشان می‌دهد. ستون جاذب کربن فعال و ستون الک مولکولی کربن در شکل مشاهده می‌شوند.

۴.۲ کالیبراسیون آشکارساز

کالیبراسیون آشکارساز به دو منظور انجام می‌شود:

- ۱- کالیبراسیون انرژی به منظور شناسایی ایزوتوپ‌ها
 - ۲- کالیبراسیون بازدهی به منظور تعیین فعالیت آن‌ها
- برای کالیبراسیون انرژی از چشمه‌های نقطه‌ای ^{137}Cs و ^{60}Co استفاده شده است. در این کالیبراسیون، هندسه چشمه و آشکارساز روی نتایج تأثیرگذار نیست.

برای اندازه‌گیری فعالیت رادیوایزوتوپ‌های زنون، باید بازدهی آشکارساز برحسب انرژی مشخص باشد. بازدهی یک آشکارساز علاوه بر مشخصات ذاتی آن به هندسه نمونه و مشخصات فیزیکی و شیمیایی ماتریس نمونه نیز بستگی دارد. بنابراین برای هر نمونه، باید کالیبراسیون بازدهی انجام شود. در



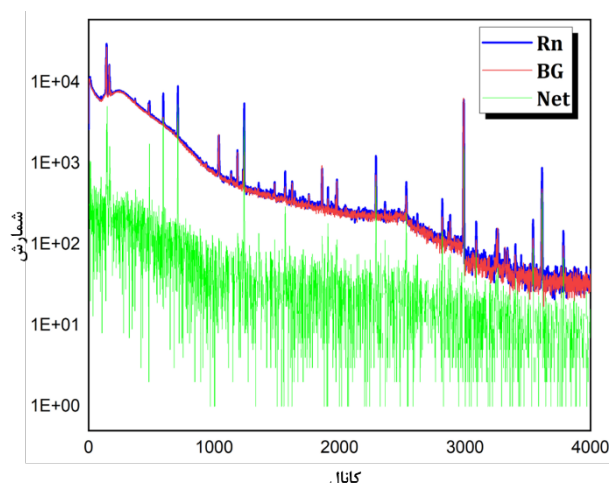
این محفظه به مدت ۳ روز تحت شمارش قرار گرفت. تصحیح نیمه‌عمر دخترهسته‌ها در حین شمارش در محاسبات لحاظ شده است. شکل ۵ طیف رادون، زمینه و شمارش خالص را نشان می‌دهد. بازدهی تجربی آشکارساز، e در انرژی‌های مندرج در جدول ۲ با استفاده از معادله ۲ حاصل شد.

$$e = N / fAt \quad (2)$$

که در آن، N شمارش خالص زیر قله، f نسبت شاخه‌ای، A فعالیت برحسب Bq، t زمان برحسب ثانیه می‌باشد.

به منظور بررسی صحت بازدهی به‌دست آمده از روش تجربی، از کد MCNPX استفاده شد. چیدمان آزمایش تجربی شامل محفظه اندازه‌گیری حاوی گاز رادون، آشکارساز HPGe، حفاظ سربی و موقعیت قرارگیری آن‌ها شبیه‌سازی شد. مد مسئله برای فوتون و الکترون انتخاب شد. توزیع ارتفاع پالس آشکارساز و بازدهی آن، با استفاده از تالی FA محاسبه و از کارت GEB برای شبیه‌سازی پهن‌شدگی گاوسی انرژی استفاده شده است. به منظور حصول عدم قطعیت آماری نسبی کمتر از ۱٪ برای انرژی‌های مورد نظر، تعداد فوتون‌های گسیلی از چشمه برابر ۱۰۰ میلیون ذره در نظر گرفته شد.

نتایج شبیه‌سازی نیز در جدول ۲ آمده است. مقدار بازدهی در انرژی ۸۰/۹۹ keV رادیوایزوتوپ زنون ۱۳۳ برابر $0.70 \pm 9.66\%$ درصد حاصل شد و از همین مقدار برای محاسبه اکتیویته آن استفاده گردید.



شکل ۵. طیف رادون (آبی)، زمینه (قرمز) و شمارش خالص (سبز).

هم‌چنین می‌توان معادل ماتریس و هندسه نمونه را با استفاده از چشمه‌های موجود، به طور مثال چشمه نقطه‌ای، معادل‌سازی کرد و علاوه بر اندازه‌گیری تجربی از شبیه‌سازی نیز کمک گرفت [۱۹].

در این پژوهش برای کالیبراسیون آشکارساز از چشمه استاندارد گازی رادون RN-۱۰۲۵ ساخت شرکت Pylon استفاده شد. این چشمه حاوی پودر خشک ^{226}Ra بوده که به طور ۱۰۰٪ مقادیر مشخصی از ^{222}Rn را با نرخ ثابت ۱ l/min و غلظت فعالیت $13.45 \pm 0.54 \text{ Bq/l}$ تولید می‌کند. از آنجایی که نیمه‌عمر ^{226}Ra برابر ۱۶۰۰ سال و نیمه‌عمر دختر آن یعنی ^{222}Rn برابر ۳/۸۲ روز است، بنابراین مادر و دختر در تعادل رادیواکتیویته قرار دارند.

برای استفاده از این گاز به عنوان چشمه استاندارد، محفظه اندازه‌گیری در مسیر گردش آن قرار گرفت و گاز به مدت ۱۰ دقیقه در آن جاری گردید. این مدت زمان، برای حصول اطمینان از رسیدن تعادل ترمودینامیکی گاز رادون در محفظه می‌باشد. در این حالت تعادل، پایداری جریان گازی برقرار است و تعداد هسته‌های رادون و اکتیویته درون محفظه قابل محاسبه است.

پس از گذشت این زمان، محفظه با بستن شیرهای ورودی و خروجی از مسیر خارج شد. فعالیت رادون در لحظه جدایی از مادرش در این محفظه از معادله ۱ حاصل می‌شود که برابر 13.45 Bq است. به این ترتیب دختر هسته‌های رادون شامل ^{214}Pb و ^{214}Bi در لحظه جدایی از مادر خود فعالیتی معادل 13.45 Bq دارند. نیمه‌عمر آن‌ها به ترتیب برابر ۲۶/۸ و ۱۹/۹ دقیقه می‌باشد و شناسایی آن‌ها با انرژی‌های مندرج در جدول ۲ انجام شده است.

$$A_{\text{Cell}} (\text{Bq}) = C (\text{Bq/l}) \times V_{\text{Cell}}$$

$$A_{\text{Cell}} (\text{Bq}) = 13.45 (\text{Bq/l}) \times 100 (\text{cc})$$

$$A_{\text{Cell}} = 13.45 \text{ Bq} \quad (1)$$

جدول ۲. بازدهی آشکارساز در انرژی‌های شاخص رادون

ایزوتوپ	انرژی	شمارش خالص زیر قله	بازدهی تجربی (%)	بازدهی شبیه‌سازی (%)
^{214}Bi	۷۹/۶۰۷ (۰/۹۳)	217.4 ± 10.5	11.49 ± 0.41	10.11 ± 0.87
^{214}Pb	۲۴۱/۹۹۵ (۰/۷۴۳)	110.25 ± 90.4	7.32 ± 0.59	5.71 ± 0.33
^{214}Pb	۲۹۵/۲۲۳ (۰/۱۸۴۲)	2677.0 ± 126.4	5.70 ± 0.34	4.92 ± 0.48
^{214}Pb	۳۵۱/۹۳۲ (۰/۳۵۶۰)	3889.8 ± 158.1	5.39 ± 0.22	4.22 ± 0.49
^{214}Bi	۶۰۹/۳۲۰ (۰/۴۵۴۹)	2347.5 ± 132.7	2.54 ± 0.14	2.42 ± 0.89

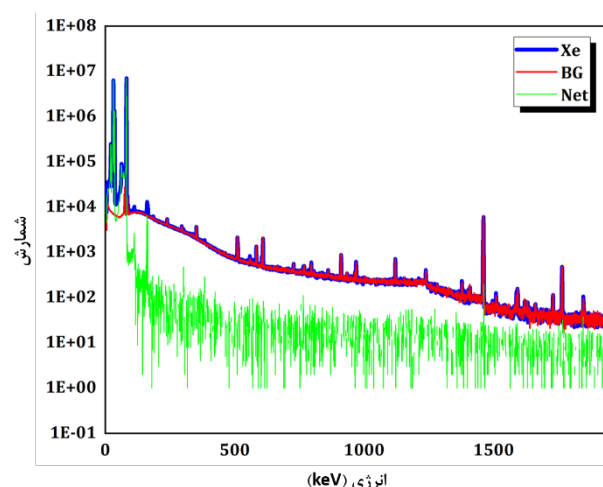


۵.۲ اندازه‌گیری رادیوزنون

نمونه رادیوزنون و زمینه آزمایشگاه هرکدام به مدت ۵ دقیقه شمارش شدند. طیف خالص نمونه رادیوزنون پس از کم کردن اثر زمینه به دست آمد. این طیف‌ها در شکل ۶ نشان داده شده است.

قله‌های انرژی مشاهده شده عبارتند از انرژی $80/99 \text{ keV}$ و $163/9 \text{ keV}$ که به ترتیب متعلق به زنون ۱۳۳ و زنون ۱۳۱ هستند. در ناحیه انرژی 30 keV نیز قله‌های انرژی مشاهده می‌شوند اما به دلیل این‌که هر چهار ایزوتوپ زنون در این ناحیه انرژی دارای قله هستند، جداسازی سهم آن‌ها با استفاده از این آشکارساز امکان‌پذیر نیست. بنابراین برای محاسبه فعالیت از این قله‌ها استفاده نشده است.

به منظور بررسی دقیق‌تر فعالیت نمونه رادیوزنون، اندازه‌گیری طیف آن در سه روز مختلف انجام شد و فعالیت نمونه‌ها دقیقاً در لحظه انتهای پرتودهی به عنوان زمان مرجع به دست آمد. نتایج برای رادیوایزوتوپ زنون ۱۳۳ (انرژی $80/99 \text{ keV}$) در جدول ۳ آمده است. به این ترتیب با میانگین‌گیری از داده‌ها، غلظت اکتیویته رادیوزنون (برای 100 cc) معادل $542/25 \text{ Bq/cc}$ حاصل می‌شود.



شکل ۶. طیف زنون (آبی)، زمینه (قرمز) و شمارش خالص (سبز).

جدول ۳. فعالیت اندازه‌گیری شده ایزوتوپ زنون ۱۳۳

فاصله زمانی بین پرتودهی و اندازه‌گیری	فعالیت در روز اندازه‌گیری (Bq)	فعالیت در لحظه اتمام پرتودهی (Bq)
۱۸ روز	۵۰۵۹۶۸	54664 ± 3966
۲۳ روز	۳۰۰۹/۱۸	55168 ± 4009
۲۶ روز	۱۶۰۰/۷۲	52842 ± 3829
میانگین		54225 ± 2272

۳. نتایج و بحث

مقایسه نتایج بازدهی آشکارساز HPGe در جدول ۲ نشان می‌دهد که اختلاف بین شبیه‌سازی و تجربی کمتر از ۲۲ درصد می‌باشد که نزدیک به گستره نتایج کار دیگران (۱۰ تا ۲۰ درصد) قرار می‌گیرد [۱۲-۱۸].

با توجه به طیف‌های شناسایی شده توسط مینی اسپکت و آشکارساز HPGe، به وضوح مشخص است که در مدت زمان ۵ دقیقه پرتودهی، رادیوایزوتوپ زنون ۱۳۳ تولید شده است. دیگر قله‌های موجود در طیف مربوط به زمینه هستند. تفاوت بین نتایج اندازه‌گیری فعالیت زنون ۱۳۳ در روزهای مختلف پس از پرتودهی، کمتر از ۴/۴٪ است.

تحلیل قله‌های واقع در ناحیه انرژی 30 keV به دلیل همپوشانی با یک‌دیگر و عدم تفکیک، با این آشکارساز امکان‌پذیر نیست.

۴. نتیجه‌گیری

در این پژوهش برای اولین بار در کشور، چیدمانی ارائه شده است تا رادیوایزوتوپ‌های زنون حاصل از پرتودهی هدف اورانیومی در رآکتور تهران را از دیگر محصولات گازی شکافت جدا، خالص‌سازی و اندازه‌گیری نماید. ایزوتوپ‌های پرتوزای زنون که از شکافت هسته‌ای تولید می‌شوند به عنوان شاخصی از فعالیت‌های بشر در حوزه شکافت هسته‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرند. منابع گسیل مختلفی برای این ایزوتوپ‌ها وجود دارد و شناسایی منبع گسیل، منوط به توانایی اندازه‌گیری رادیوزنون موجود در جو می‌باشد. مراکز تولید رادیوداروی ^{99m}Tc از منابع بالقوه گسیل رادیوزنون هستند و گسیل رادیوزنون در آن‌ها در حین انحلال هدف اورانیومی رخ می‌دهد. با ایجاد توانمندی اندازه‌گیری رادیوزنون، می‌توان مقدار گسیل آن را در طی فرایند تولید این رادیودارو تعیین و میزان رهاسازی آن را کنترل نمود.

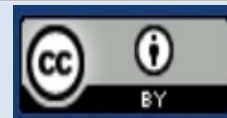


مراجع

1. Tabasi M, Bahrami Samani A, Shirvani Arani S, Ghannadi Maragheh M, Mohammadi A. Assessment of Mo-99 radioisotope supply chain using LEU in Iran. *Journal of Nuclear Science and Technology*. 2021;97(4):104-110 [In Persian].
2. IAEA, Non-HEU Production Technologies for Molybdenum-99 and Technetium-99m. *Technical Report No. NF-T-5.4*, Vienna, 2013.
3. Paul R.J. Saey. The influence of radiopharmaceutical isotope production on the global radionuclide background. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2009;100:396-406.
4. Paul R.J. Saey. *Xenon: radionuclides*. DOI: 10.1002/0470862106.ia725.
5. ENSDF. *Evaluated Nuclear Structure Data File*. 2009.
6. Ringbom A, Larson T, Axelsson A, Elmgren K, Johansson C. SAUNA—a system for automatic sampling, processing, and analysis of radioactive xenon. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*. A 2003;508:542–553.
7. Fontaine J.-P., Pointurier F, Blanchard X, Taffary T, Atmospheric xenon radioactive isotope Monitoring. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2004;72:129–135.
8. Gohla H, Auer M, Cassette P, Hague R.K, Lechermann M, Nadalut B. Radionuclide standards used in laboratory inter-comparisons. *Applied Radiation and Isotopes*. 2016 March; 109:24-29.
9. Bowyer T.W, Kephart R, Eslinger P.W, Friese J.I, Miley H.S, Saey P.R. Maximum reasonable radionuclide releases from medical isotope production facilities and their effect on monitoring nuclear explosions. *J Environ Radioact*. 2013 Jan;115:192-200.
10. Separation of ^{133}Xe from ^{99}Mo , ^{131}I and uranium, and removal of impurities using gas chromatography. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 2005;264(3):679-686.
11. <http://www.ga-maassociates.com/products/gas-beakers/3-radiogas-containers/>.
12. Debertin K, Grosswendt B. Efficiency calibration of semiconductor detectors by primary standard sources and Monte Carlo calculations. *Nucl. Inst. Methods*. 1982;203:343.
13. Sánchez F, Navarro E, Ferrero J.L, Moreno A, Roldán C, Baeza A, Paniagua J. A Monte Carlo based method of including gamma self-absorption for the analysis of environmental samples. *Nucl. Inst. Methods*. B 1991;61:535.
14. Boson J, Agren G, Johansson L. A detailed investigation of HPGe detector response for improved, Monte Carlo efficiency calculations. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*. A 2008;587:304–314.
15. Decombaz M, Gostely J.J, Laedermann J.P. Coincidence-summing corrections for extended sources in gamma-ray spectrometry using Monte Carlo simulation. *Nucl. Inst. Methods*. A 1992;312:152.
16. Overwater M.W, Bode P, De Goeij J. Gamma-ray spectroscopy of voluminous sources: corrections for source geometry and self-attenuation. *Nucl. Inst. Methods*. A 1993;324:209.
17. Huy N.Q, Bihn D.Q, An V.X. Study on the increase of inactive germanium layer in a high-purity germanium detector after a long-time operation applying MCNP code. *Nucl. Instr. and Meth*. A 2007;573:384.
18. Andreotti E, Hult M, Marissens G, Lutter G, Garfagnini A, Hemmer S, VonSturm K. Determination of dead-layer variation in HPGe detectors. *Appl Rad Isotop*. 2014;87:331-335.
19. Tayyebi P, Davani F.A, Tabasi M, Afarideh H. A novel technique for detection efficiency determination of HPGe. *Radiation Physics and Chemistry*. 2017;133:86-90.

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

طیعی، پونه، طیبی، محسن، قنادی مراغه، محمد. (۱۴۰۳)، اندازه‌گیری رادیوزنون حاصل از شکافت با استفاده از روش طیف‌نگاری گاما. *مجله علوم، مهندسی و فناوری هسته‌ای*. دوره ۴۵، شماره ۳، جلد ۱۰۹، پاییز ۱۴۰۳، ص ۱۳۶-۱۴۲. URL: https://jonsat.nstri.ir/article_1602.html .DOI: <https://doi.org/10.24200/nst.2023.1403.1917>

