



معرفی رادیو نانوکامپوزیت $[^{89}\text{Zr}]\text{Zr-CdTe QDs}$ به عنوان یک عامل تصویربرداری PET

شهزاد فیضی^{۱*}، سید یوسف فضائلی^۱، پرویز اشتری^۱، حکیمه زارع^۲، فاطمه بلوری نوین^۱
۱. پژوهشکده کاربرد پرتوها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، صندوق پستی: ۱۱۳۶۵-۳۴۸۶، تهران - ایران
۲. دانشکده فیزیک، دانشگاه یزد، صندوق پستی: ۸۹۱۵۸۱۸۱۱، یزد - ایران

*Email: sfeizi@aeci.org.ir

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۸/۲۱ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۱۰/۲۸

چکیده

مطالعه‌ی حاضر بر عملکرد و توزیع زیستی ترکیب نشان‌دار نقاط کوانتومی کادمیوم تلورید نشان‌دار شده با زیرکونیوم-۸۹ متمرکز است. سنتز و مشخصه‌یابی نقاط کوانتومی کادمیم تلورید، نشان‌دارسازی و کنترل کیفی و سپس مطالعات حیوانی شامل بررسی توزیع زیستی، تجمع در تومور، نحوه پاک‌سازی رادیودارو از بدن و تصاویر توموگرافی انتشار پوزیترون مورد مطالعه قرار گرفته است. نقاط کوانتومی کادمیم تلورید با اندازه ابعاد حدود ۳ نانومتر به روش شیمیایی سنتز شدند. واکنش نشان‌دارسازی با شروع از زیرکونیوم کلرید و نقاط کوانتومی CdTe QDs انجام شد. به منظور ارزیابی رفتار درون تنی $[^{89}\text{Zr}]\text{Zr-CdTe QDs}$ و مقایسه‌ی آن با کلرید زیرکونیوم-۸۹ ($[^{89}\text{Zr}]\text{Zr- Chloride}$) آزمایش‌های تصویربرداری PET طراحی و انجام شد. بلافاصله پس از هر تصویربرداری موش‌ها تشریح و توزیع زیستی رادیودارو در اندام‌ها بررسی شد. نتایج این بررسی حاکی از تجمع سریع و هدفمند این نانوذرات در تومور بود. با توجه به خواص برتر رادیوایزوتوپ زیرکونیوم-۸۹ و توزیع زیستی مناسب، این نانوذرات نشان‌دار به عنوان عوامل بالقوه تصویربرداری هسته‌ای معرفی گردید.

کلیدواژه‌ها: نقاط کوانتومی، زیرکونیوم-۸۹، نشان‌دارسازی، توموگرافی نشر پوزیترون

Introduction of radio nanocomposite $[^{89}\text{Zr}]\text{Zr-CdTe QDs}$ as a PET imaging agent

Sh. Feizi^{*1}, Y. Fazaeli¹, P. Ashtari¹, H. Zare², F. Bolori Novin¹

1. Radiation Application Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, P.O.Box: 11365-3486, Tehran – Iran
2. Faculty of Physics, Yazd University, P.O.Box: 8915818411, Yazd - Iran

Research Article

Received 12.11.2022, Accepted 18.1.2023

Abstract

The present study focuses on the performance and biodistribution of cadmium telluride quantum dots labeled with zirconium-89. Synthesis and characterization of cadmium telluride quantum dots, radiolabeling and quality control, and then animal studies including investigating biodistribution, tumor accumulation, how to clear up the radiopharmaceutical from the body and positron emission tomography images have been studied. Cadmium telluride quantum dots with 3 nm dimensions were chemically synthesized. The labeling reaction was performed starting with zirconium chloride and CdTe QDs. In order to evaluate the in vivo behavior of $[^{89}\text{Zr}]\text{Zr-CdTe QDs}$ and to compare it with zirconium-89 ($[^{89}\text{Zr}]\text{Zr-Chloride}$), PET imaging experiments were designed and performed. Immediately after each imaging, the mice were dissected and the biodistribution of the radiopharmaceutical to different organs was evaluated. The results indicated the rapid and targeted accumulation of these radionanoparticles in the tumor. Due to the superior properties of the zirconium-89 radioisotope and appropriate biodistribution, these labeled nanoparticles were introduced as potential nuclear imaging agents.

Keywords: Quantum dots, Zirconium-89, Labeling, PET imaging



۱. مقدمه

یکی از قابل توجه‌ترین رادیونوکلئیدهای فلزی گسیلنده‌ی پوزیترون که در توسعه ردیاب‌های رادیواکتیو مبتنی بر آنتی‌بادی در زمینه توموگرافی نشر پوزیترون (PET) نقش اساسی ایفا می‌کند، زیرکونیوم- ^{89}Zr است [۱-۵]. هنگامی که نیمه‌عمر فیزیکی رادیونوکلئید کاملاً با فارماکوکینتیک ترکیب مورد نظر مطابقت داشته باشد، رادیوداروهای ردیاب در توموگرافی گسیل پوزیترون به بهترین وجه طراحی می‌شوند. این مزیت را دارد که نیمه‌عمر فیزیکی آن در حد چند روز است که با طول دوره‌ی فعالیت آهسته برخی از مولکول‌های فعال زیستی بزرگ، مانند آنتی‌بادی‌ها و نانوذرات معادل است. یکی دیگر از جنبه‌های مطلوب ^{89}Zr این است که می‌توان آن را با تابش پروتون بر روی ترکیبات حاوی ایتريوم که به طور طبیعی تک ایزوتوپی هستند، توسط یک شتاب‌دهنده‌ی پزشکی با انرژی کم، در بازده‌های زیاد تولید کرد [۶].

اگرچه ^{89}Zr عمدتاً برای تصویربرداری درون تنی توموگرافی نشر پوزیترون استفاده می‌شود، اما استفاده از آن تنها به این مورد محدود نمی‌شود. مطالعات مختلفی استفاده از آن را در تصویربرداری درون تنی لومینسانس چرنکوف (CLI) نشان داده‌اند، اما هم‌چنان مهم‌ترین کاربرد آن تصویربرداری PET است. پپتیدها، مولتیم‌های پپتیدی، نانوذرات، میکروکره‌ها، نانولوله‌ها، لیپوزوم‌ها و پروتئین‌ها مولکول‌هایی هستند که تاکنون با زیرکونیوم- 89 نشان‌دار شده‌اند [۷].

ردیاب‌های تصویربرداری حاوی نقاط کوانتومی، یکی از حوزه‌های مهم و در حال گسترش در زمینه زیست پزشکی تشخیصی هستند. نقاط کوانتومی بلورهای منفرد و پراکنده و در تصویر نقاطی بسیار روشن و پایدار هستند. ابعاد آن‌ها از شعاع اکسیتون بور ماده در ابعاد توده کوچک‌تر است. ویژگی‌های نوری منحصربه‌فرد آن‌ها باعث می‌شود که تطابق و ادغام‌پذیری بی‌نظیری با علوم زیستی مانند تصویربرداری درون تنی، از تحقیقات سلولی گرفته تا مدل‌های حیوانی، داشته باشند [۸].

مرور پژوهش‌های پیشین نشان داد که تعدادی از مطالعات، نشان‌دارسازی رادیوایزوتوپ ^{89}Zr را با بازده عالی و پایداری بالا گزارش کرده‌اند. چنگ و همکاران استفاده از ذرات فوق ریز نقاط کوانتومی WS_2/WO_x را برای تصویربرداری PET از غدد لنفاوی با روش نشان‌دارسازی بدون شلاتور مناسب گزارش کرده‌اند [۹]. نانوفسفر $\text{Gd}_2\text{O}_3\text{:S:Eu}$ نشان‌دار شده با ^{89}Zr مشکل فواصل فضایی زیاد بین دو گونه در فرایند تزریق هم‌زمان، که کارایی RL را کاهش می‌دهد، در فرایند

تصویربرداری رادیولومینسانس برطرف کرده است [۱۰]. استفاده از سه نوع نقاط کوانتومی مادون قرمز بر روی ^{89}Zr نشان‌دارسازی شده با میسل‌های لیپیدی، نانومولسیون‌ها و نانوپلتفرم‌های پلیمری، به صورت نشان‌دارسازی دوگانه، با ره‌ایش هم‌زمان رادیونوکلئید و نقاط کوانتومی در یک فرایند تصویربرداری لومینسانس چرنکوف، کارایی طیفی را به حداکثر افزایش داده است [۱۱].

تحقیقات روی نانوساختارها و نقاط کوانتومی نشان‌دار شده با زیرکونیوم از نظر تکنیک‌های تصویربرداری، عمدتاً به تصویربرداری رادیولومینسانس و چرنکوف محدود شده‌اند. هدف این مقاله ارائه بینشی عمیق‌تر به قلمرو نقاط کوانتومی نشان‌دار شده با ^{89}Zr در تصویربرداری PET با تمرکز بر تولید، نشان‌دارسازی رادیواکتیو، مشخصه‌یابی، تصویربرداری هسته‌ای و توزیع زیستی $^{89}\text{Zr CdTe QDs}$ است.

۲. بخش تجربی

۱.۲ مواد و روش‌ها

پودر تلوریم (Te)، تیوگلیکولیک اسید (TGA)، سدیم بوروهیدرید (NaBH_4)، کادمیم سولفات ($\text{Cd}_3\text{O}_{12}\text{S}_{3.8}\text{H}_2\text{O}$)، سدیم هیدروکسید (NaOH)، ایتريم (III) تریس ایزوپروپوکسید ($\text{C}_9\text{H}_{21}\text{O}_3\text{Y}$)، آب دیونیزه و استون از شرکت مرک خریداری شده و بدون خالص‌سازی بیش‌تر مورد استفاده قرار گرفت. رادیونوکلئید زیرکونیوم- 89 از بمباران پروتونی اکسید ایتريم (Y_2O_3) در سیکلوترون کرج در سازمان انرژی اتمی ایران تهیه شد. کروماتوگرافی لایه نازک (RTLC) از $^{89}\text{Zr}\text{-Zr-Cl}$ و $^{89}\text{Zr}\text{-Zr-CdTe QDs}$ بر روی شیشه آغشته به سیلیکاژل (ITLC-SG) و فاز متحرک دی اتیلن تری آمین پنتااستیک اسید (DTPA) به وسیله دستگاه AR2000 Bioscan انجام شد. حیوانات آزمایشگاهی از انستیتو پاستور ایران و دانشگاه خوارزمی تهیه شدند. تعداد ۱۲ موش جهت تصویربرداری و بررسی توزیع زیستی استفاده شد. آنالیز رادیونوکلئیدی با گامااسپکترومتر با رزولوشن بالا (Canberra TM high-purity germanium HPGe) اندازه‌گیری اکتیویته نمونه‌ها با رادیومتر (CRC-15R Capintech) اندازه‌گیری شد. ثبت تصاویر PET موش‌ها با دوربین SMV Dual head coincidence gamma camera انجام شد.



۲.۲ سنتز نقاط کوانتومی

فرایند سنتز CdTe QDs طبق مطالعه پیشین منتشر شده با تغییرات جزئی انجام شد [۱۲]. دستورالعمل کلی به شرح ذیل است: ۰/۱۱ گرم پودر تلوریم و ۷ میلی‌لیتر آب دیونیزه به یک فلاسک ته گرد سه دهانه اضافه شد. سپس ۰/۲۷۶ گرم NaBH_4 به مخلوط حاصل تحت جریان جو بی‌اثر اضافه شد. مخلوط واکنش به مدت ۳ ساعت به شدت هم زده شد و NaHTe در ظرف تشکیل شد. پس از آن، محلول به دست آمده صاف شد و محلول صاف‌شده به یک فلاسک جداگانه حاوی ۵۰ میلی‌لیتر آب دیونیزه منتقل شد. در مرحله بعد، ۳/۹۲ میلی‌مول تیوگلیکولیک اسید به ۱۵۰ میلی‌لیتر محلول آبی کادمیم سولفات حاوی ۱۶ میلی‌مولار CdSO_4 اضافه شد و pH با محلول ۴ میلی‌مولار NaOH روی ۹/۵ تنظیم شد. سپس محلول حاوی NaHTe به آرامی به محلول Cd-TGA تزریق شد و به مدت ۱۰ ساعت رفلکس شد. مرحله رسوب‌گیری توسط سیستم دوحلالی حلال استون-آب انجام شده است. در نهایت، CdTe QD های به دست آمده سانتریفیوژ و چندین بار شسته شدند و مجدداً در ۱۵۰ میلی‌لیتر آب دیونیزه توزیع شدند. غلظت محلول نهایی نقاط کوانتومی حاصل ۱ میلی‌گرم بر میلی‌لیتر است.

۳.۲ تهیه کلرید زیرکونیوم-۸۹

برای تهیه زیرکونیوم-۸۹، مطابق مطالعه اخیر این گروه تحقیقاتی، از طریق واکنش هسته‌ای $^{89}\text{Y}(p,n)^{89}\text{Zr}$ یک نمونه اکسید ایتريوم خالص از هیدرولیز هیدروترمال ایتريوم (III) تریس (ایزوپروپوکسید) و به دنبال آن کلسیناسیون آن تهیه شد [۱۳]. پودر اکسید ایتريوم خالص در یک محفظه مسی دیسک مانند با روکش طلا با قطر داخلی ۱ سانتی‌متر قرار داده شد و با یک جک هیدرولیک فشرده شد. قطر دیسک داخلی ۱ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. ضخامت هدف، که باید متناسب با انرژی پروتون‌های فرودی باشد، با استفاده از کد SRIM-2013 محاسبه شد. تابش با استفاده از سیکلوترون ۳۰ مگاالکترون‌ولت (IBA، Cyclone-30، بلژیک) انجام شد. هدف دیسک Y_2O_3 (قطر ۱ سانتی‌متر، ضخامت ۷۵۴ میکرومتر بر اساس محاسبه با کد SRIM-2013 برای اتلاف انرژی ۱۵ تا ۵ مگا الکترون‌ولت، ۰/۲۹۶ گرم) برای تولید زیرکونیوم-۸۹ از طریق واکنش هسته‌ای $^{89}\text{Y}(p,n)^{89}\text{Zr}$ مورد استفاده قرار گرفت. جداسازی شیمیایی زیرکونیوم-۸۹ از ایتريوم با استفاده از رزین هیدروکسامات تجاری موجود (رزین ZR) خریداری شده از شرکت تریس‌کم، طبق پروتکل ارائه شده در دیتاشیت آن، با

تغییرات جزئی انجام شد [۱۳]. از نظر شیمی کیلاسیون، زیرکونیوم کلرید یا زیرکونیوم اگزالات می‌تواند به عنوان منابع فلزی برای تهیه کمپلکس‌های $[^{89}\text{Zr}]\text{Zr-CdTe QDs}$ استفاده شوند. اما، بازده واکنش تشکیل کمپلکس تحت تأثیر قرار خواهد گرفت. $[^{89}\text{Zr}]\text{Zr-chloride}$ برتر از $[^{89}\text{Zr}]\text{Zr-oxalate}$ است [۱۴]. برای این تبدیل از یک ستون آماده تبادل آنیونی Sep-Pack، استفاده شد و کارتریج با ۶ میلی‌لیتر MeCN ، ۱۰ میلی‌لیتر سالین ۰/۹٪ و ۱۰ میلی‌لیتر آب، پیش‌آماده‌سازی شد. سپس کارتریج با $[^{89}\text{Zr}]\text{Zr-oxalate}$ بارگیری شده و با HCl ۱/۰ مولار شسته شده و $[^{89}\text{Zr}]\text{Zr-chloride}$ جمع‌آوری شد.

۴.۲ نشان‌دارسازی و کنترل کیفی

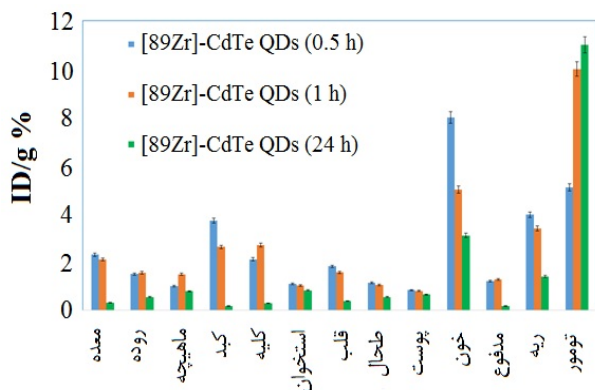
به محلول حاوی ۶ میلی‌کوری $[^{89}\text{Zr}]\text{Zr-chloride}$ مقادیر مناسب از استات سدیم ۰/۱ مولار افزوده شد تا pH روی ۴/۵-۶ تنظیم گردید، سپس ۱۰۰ میکرولیتر از محلول ذخیره‌ی نقاط کوانتومی CdTe QDs با غلظت 1 mg/cm^3 در یک ویال مخروطی اضافه شد. بعد از هم زدن محلول به مدت ۳۰ دقیقه، سوسپانسیون با یک صافی استریل با اندازه مش ۰/۲۲ میکرومتر صاف شد. تعیین خلوص رادیوشیمیایی (RCP) با کروماتوگرافی لایه نازک (ITLC) انجام شد. شیشه آغشته به سیلیکاژل (ITLC-SG) و دی اتیلن تری آمین پنتاستیک اسید (DTPA) ۰/۱ مولار، به ترتیب به عنوان فاز ثابت و فاز متحرک در کروماتوگرافی استفاده شدند (در حالی که نانوذرات $[^{89}\text{Zr}]\text{Zr-CdTe QDs}$ در نقطه لکه‌گذاری ($R_f=0$) باقی ماندند، نمونه زیرکونیوم کلرید تا انتهای لایه سیلیکاژل مهاجرت نمود ($R_f=1$)). موش‌های از نوع بالب سی با تزریق سلول‌های سرطانی رده ۴T۱ به قسمت پایین شکم این حیوانات تهیه شده بودند. این رده سلولی یکی از چندین رده سلولی سرطانی است که قادر است متاستاز بسیار مؤثری را در اندام‌های این حیوانات بعد از گذشت بیش از دو هفته ایجاد کند.

۵.۲ مطالعه پراکنش زیستی در موش‌های توموری

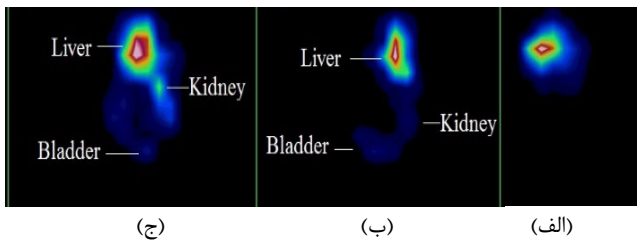
به منظور ارزیابی رفتار درون تنی $[^{89}\text{Zr}]\text{Zr-CdTe QDs}$ ، آزمایش‌های تصویربرداری PET طراحی و انجام شد. مطالعات توزیع زیستی بر روی موش‌های بالب سی حاوی تومور سرطان سینه انجام شد. توزیع بیولوژیکی نانوکامپوزیت نشان‌دار شده در اندام‌ها بلافاصله پس از تصویربرداری تعیین شد. مقدار کل رادیواکتیویته تزریق شده به هر موش (حدود ۱۰۰ میکروکوری) با شمارش اکتیویته‌ی سرنگ ۱ سانتی‌متر مکعبی، قبل و بعد از تزریق با استفاده از یک دز کالیبراتور با هندسه ثابت اندازه‌گیری



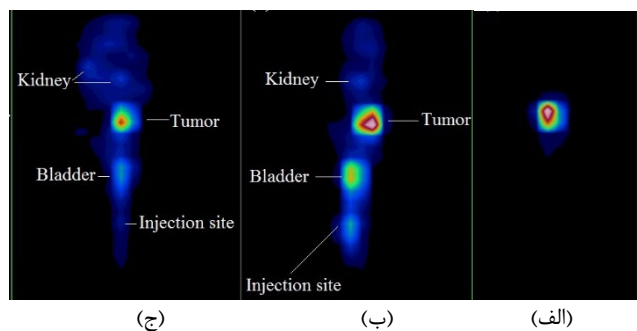
توزیع در تومور جذب می‌شود. این الگو تا ۲۴ ساعت پس از تزریق نیز باقی می‌ماند. نمودار $ID/g/$ رادیوداروی $[^{89}Zr]Zr-CdTe$ QDs در میان اندام‌های حیاتی موش‌های حامل تومورهای سرطان سینه نشان داد که تجمع عمده رادیاب پس از تزریق، در تومور، خون، کبد، ریه و کلیه است و با گذشت زمان تجمع در تومور پایدار می‌شود (شکل ۳). الگوی تجمع نقاط کوانتومی $[^{89}Zr]Zr-CdTe$ QDs با دیگر ترکیبات نشان‌دار نظیر $[^{68}Ga]Ga-CdTe$ QDs در مطالعات پیشین تطابق دارد و در هر دو مورد جذب بالا در تومور و خروج سریع از کبد مشاهده شد [۱۲].



شکل ۱. توزیع بیولوژیکی $[^{89}Zr]Zr-CdTe$ QDs در ارگان‌های موش توموری در زمان‌های ۰٫۵، ۱ و ۲۴ ساعت پس از تزریق.



شکل ۲. الف) تصاویر توموگرافی نشر پوزیترون (PET) صفحه افقی، ب) صفحه میانی، ج) صفحه تاجی، در موش نرمال ۳۰ دقیقه پس از تزریق $[^{89}Zr]ZrCl$.



شکل ۳. الف) تصاویر توموگرافی نشر پوزیترون (PET) صفحه افقی، ب) صفحه میانی و ج) صفحه تاجی، در موش‌های توموری در ۳۰ دقیقه پس از تزریق $[^{89}Zr]Zr-CdTe$ QDs.

شد. حیوانات در زمان‌های مشخصی بعد از تزریق (۰٫۵، ۱ و ۲۴ ساعت) قربانی و تشریح شدند. بافت‌ها (خون، قلب، ریه، مغز، روده، مدفوع، پوست، معده، کلیه‌ها، کبد، ماهیچه، استخوان و تومور) وزن شدند، با نرمال سالین شستشو (به جز بافت مغز و خون) و خشک شدند. سپس، اکتیویته ویژه آن‌ها با آشکارساز HPGe به عنوان درصد دز تزریقی در هر گرم بافت $ID/g/$ تعیین شد (معادله ۱). در هر مجموعه از آزمایش‌های توزیع زیستی، گروه‌های سه تایی موش مورد بررسی قرار گرفتند. ثبت تصاویر طبق جدول زمانی یکسان با بررسی توزیع زیستی، یعنی در زمان‌های ۰٫۵، ۱ و ۲۴ ساعت بعد از تزریق انجام شد. داده‌های توزیع زیستی $[^{89}Zr]Zr-CdTe$ QDs در موش‌های حامل تومورهای سرطان سینه در شکل ۱ ارائه شده‌اند.

$$\%ID = \frac{[\text{radioactivity uptake by tissue (Bq)} \times 100]}{[\text{tissue net weight (g)} \times \text{total injection amount (Bq)}]} \quad (1)$$

۳. نتایج و بحث

۳.۱ توزیع زیستی

در موش‌های نرمال در ۳۰ دقیقه پس از تزریق $[^{89}Zr]Zr-CdTe$ QDs به ورید دمی بیش‌ترین غلظت دارو در خون مشاهده می‌شود. توزیع بیولوژیکی $[^{89}Zr]Zr-CdTe$ QDs در موش‌های توموری نشان می‌دهد نقاط کوانتومی نشان‌دار شده ورود خوبی به ارگان‌های مختلف مانند کبد، کلیه، قلب و ریه‌ها داشته است، به طوری که در ۳۰ دقیقه پس از تزریق بیش‌ترین غلظت در کبد مشاهده می‌شود، در زمان ۲۴ ساعت بعد از تزریق این دارو کاملاً از کبد دفع شده است که مؤید ماهیت آب‌دوست و محلول در آب بودن آن و این ویژگی علت عبور سریع رادیودارو از کبد است. مطالعات تصویربرداری مؤید نتایج حاصل از مطالعه توزیع بیولوژیکی است. در تصویر توموگرافی نشر پوزیترون موش‌های نرمال (شکل ۲) بیش‌ترین غلظت دارو در کبد و ریه مشاهده می‌شود که کاملاً مطابق با مطالعات پیشین این حوزه می‌باشد که حضور و به دام افتادن کلرید زیرکونیوم در کبد را تا ۸ ساعت پس از تزریق گزارش نموده‌اند [۱]. هم‌چنین با توجه به این‌که امکان نمونه‌برداری از ادرار و مثانه وجود ندارد، با این حال در تصاویر توموگرافی نشر پوزیترون دفع دارو از مثانه و کلیه‌ها در زمان ۳۰ دقیقه پس از تزریق مشخص است.

توزیع بیولوژیکی $[^{89}Zr]Zr-CdTe$ QDs در موش‌های توموری نتیجه‌ای دیگر در پی دارد. با وجود تومور در بدن، دفع کاهش یافته و $[^{89}Zr]Zr-CdTe$ QDs در ۳۰ دقیقه پس از



۴. نتیجه گیری

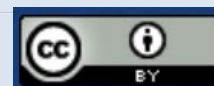
با توجه به خواص برتر نانو ساختارها و نقاط کوانتومی نشان دار شده در تجمع بالا در تومورها و همچنین خواص برتر زیرکونیوم-۸۹ از نظر تکنیک تصویربرداری PET و نیمه عمر بالای این رادیویزوتوپ نتایج این تحقیق عملکرد بالای این نقاط کوانتومی نشان دار شده با ^{89}Zr را در تصویربرداری PET نشان داد و امید است در آینده با تولید مقادیر بالای این رادیویزوتوپ در کشور راه برای تشخیص زودهنگام سرطان با تولید رادیوداروهای استاندارد و تحقیقات تکمیلی هموار گردد.

مراجع

- Graves S.A, Kuttyreff C, Barrett K.E, Hernandez R, Ellison P.A, Happel S, Aluicio-Sarduy E, Barnhart T.E, Nickles R.J, Engle J.W. Evaluation of a chloride-based ^{89}Zr isolation strategy using a tributyl phosphate (TBP)-functionalized extraction resin. *Nuclear Medicine and Biology*. 2018;64-65:1-7.
- Fischer G, Seibold U, Schirmmacher R, Wängler B, Wängler C. ^{89}Zr , a radiometal nuclide with high potential for molecular imaging with PET: chemistry, applications and remaining challenges. *Molecules*. 2013;18(6):6469-6490.
- Gharghani S, Fazaeli Y, Zare H, Feizi S, Ashtari P, Shahedi Z. Gallium-68 labeled Gd-CdTe quantum dots: a novel nuclear imaging agent for detection of fibrosarcoma tumor. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 2021;330(3):1137-1145.
- Cheng L, Kamkaew A, Shen S, Valdovinos H, Barnhart T, Cai W, Liu Z. Chelator-Free ^{89}Zr -labeling of Ultra-small WS_2/WO_x Quantum Dots for PET Imaging. *Journal of Nuclear Medicine*. 2016;57(supplement 2):1208.
- Ai F, Goel S, Zhan Y, Valdovinos H.F, Chen F, Barnhart T.E, Cai W. Intrinsically ^{89}Zr -labeled Gd(2)O(2)S:Eu nanophosphors with high in vivo stability for dual-modality imaging. *American Journal of Translational Research*. 2016;8(12):5591-5600.
- Zhao Y, Shaffer T.M, Das S, Pérez-Medina C, Mulder W.J.M, Grimm J. Near-Infrared Quantum Dot and ^{89}Zr Dual-Labeled Nanoparticles for in Vivo Cerenkov Imaging. *Bioconjug Chem*. 2017;28(2):600-608.
- Fazaeli Y, Zare H, Karimi S, Rahighi R, Feizi S. Novel aspects of application of cadmium telluride quantum dots nanostructures in radiation oncology. *Applied Physics A*. 2017;123(8):1-9.
- Feizi S, Fazaeli Y, Ashtari P, Shirmardi S.P, Yousefnia H, Aslani G. A new targetry system for production of Zirconium-89 radioisotope with Cyclone-30 cyclotron. *Radiochimica Acta*. Just Accepted. 2023.
- Larenkov A, Bubenschikov V, Makichyan A, Zhukova M, Krasnoperova A, Kodina G. Preparation of Zirconium-89 Solutions for Radiopharmaceutical Purposes: Interrelation Between Formulation, Radiochemical Purity, Stability and Biodistribution. *Molecules (Basel, Switzerland)*. 2019;24(8):1534.
- Holland J.P, Sheh Y, Lewis J.S. Standardized methods for the production of high specific-activity zirconium-89. *Nucl. Med. Biol*. 2009;36(7):729-39.
- Guillou A, Earley D.F, Klingler S, Nisli E, Nüesch L.J, Fay R, Holland J.P. The influence of a polyethylene glycol linker on the metabolism and pharmacokinetics of a ^{89}Zr -radiolabeled antibody. *Bioconjugate Chemistry*. 2021;32(7):1263-1275.
- Zhang Y, Zhang Y, Lin Q, Wang T, Shi D, Fu Z, Si Z, Xu Z, Cheng Y, Shi H, Cheng D. Targeting infiltrating myeloid cells in gastric cancer using a pretargeted imaging strategy based on bio-orthogonal diels-alder click chemistry and comparison with ^{89}Zr -labeled anti-CD11b positron emission tomography imaging. *Molecular Pharmaceutics*. 2022;19(1):246-257.
- Hapuarachchige S, Si G, Huang C.T, Lesniak W.G, Mease R.C, Guo X, Gabrielson K, Artemov D. Dual-modality PET-SPECT image-guided pretargeting delivery in HER2(+) breast cancer models. *Biomacromolecules*. 2021;22(11):4606-4617.
- Chomet M, Van Dongen G.A.M.S, Vugts D.J. State of the Art in radiolabeling of antibodies with common and uncommon radiometals for preclinical and clinical immuno-PET. *Bioconjugate Chemistry*. 2021;32(7):1315-1330.

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

فیضی، شهزاد، فضالی، سیدیوسف، اشتری، پرویز، زارع، حکیمه، بلوری نوین، فاطمه. (۱۴۰۳)، معرفی رادیو نانوکامپوزیت $[^{89}\text{Zr}]\text{Zr-CdTe}$ QDs به عنوان یک عامل تصویربرداری PET. مجله علوم و فنون هسته‌ای، ۱۰۸(۲)، ۱۰۰-۱۰۴. DOI: <https://doi.org/10.24200/nst.2024.1535> Url: https://jonsat.nstri.ir/article_1535.html

