

اهداف رفتاری

از فراگیران انتظار می‌رود در پایان دوره بتوانند:

۱. با مفهوم رادیوایزوتوپ، رادیونوکلاید و رادیودارو و کاربردهای آن آشنا شوند.
۲. مشخصه‌های فیزیکی رادیوداروی مناسب در پزشکی را بشناسند.
۳. روش تولید رادیوایزوتوپ‌های رادیواکتیو را بشناسند.
۴. با ساختار و روش کار سیکلوترون آشنا شوند.
۵. با ساختار و روش کار ژنراتور رادیواکتیو آشنا شوند.
۶. با علت استفاده از رادیوداروها در پزشکی آشنا شوند.
۷. با رادیوداروهای رایج در پزشکی آشنا شوند.
۸. کاربرد رادیوداروهای مهم در پزشکی را بشناسند.
۹. با کاربردهای تشخیصی و درمانی رادیوداروها آگاه شوند.
۱۰. با سیستم پتاسکن آشنا شوند.

مقدمه

پزشکی هسته‌ای، یکی از مهم‌ترین شاخه‌های علم پزشکی است، که در تشخیص و درمان نقش مهمی را ایفا می‌کند. در این شاخه، از ترکیب‌های شیمیایی رادیواکتیو، به نام رادبودارو استفاده می‌شود؛ که عملکرد آنها در سیستم بیولوژیکی، متناسب با هدف تشخیصی یا درمانی، رفتاری مشابه مواد بیولوژیکی در داخل بدن داشته و به راحتی و بدون ایجاد تداخل، در چرخه‌ی بیوشیمیایی شرکت می‌کنند.

برای دسته‌بندی هر گروهی، وجود یک معیار خاص ضروری است. طبقه‌بندی عناصر و بررسی خصوصیات آنها نیز، از طریق یک‌سری کمیت‌های هسته‌ای مشخص، مانند عدد اتمی، عدد نوترونی و عدد جرمی امکان‌پذیر است. در جدول تناوبی، غالب عناصر، به‌صورت طبیعی، در چند شکل متفاوت هسته‌ای (ایزوتوپ، ایزومر، ایزوبار، ایزوتون) وجود دارند. برخی از آنها دارای عدد اتمی (Z) یکسان و عدد جرمی (A) متفاوتی هستند، که به آنها ایزوتوپ می‌گویند. تمام ایزوتوپ‌های یک عنصر، دارای خواص شیمیایی مشابهند. درعین‌حال، برخی از آنها پایدار و برخی ناپایدارند. اتم‌های ناپایدار، برای رسیدن به سطح پایداری، مقداری از مزاد انرژی خود را صرف گسیل تابش ذرات و فوتون‌ها می‌نمایند. کربن-۱۴ و پتاسیم-۴۰، که در طبیعت به‌وفور یافت می‌شوند، از جمله این عناصر هستند، که به آنها عناصر رادیواکتیو، ایزوتوپ رادیواکتیو، رادیونوکلئید یا رادیوایزوتوپ گفته می‌شود، و فرایند فوق را فروپاشی یا استحاله می‌نامند. پیدایش طبیعی این ایزوتوپ‌های رادیواکتیو، معمولاً درصد کمی از کل ایزوتوپ‌های غیررادیواکتیو هر عنصر را تشکیل می‌دهند. رادیوایزوتوپ‌ها، انرژی بیشتری از ایزوتوپ‌های غیررادیواکتیو داشته و نیمه‌عمر کوتاه دارند.

در این خصوص، بشر مشابه سایر دستاوردهای خود، باز از طبیعت درس گرفته، و سری رادیوایزوتوپ‌های مصنوعی را در راکتورهای هسته‌ای یا شتاب‌دهنده‌ها ساخته است. از رادیوایزوتوپ‌ها در بسیاری از علوم، تحقیقات و فن‌آوری‌های پزشکی و غیرپزشکی استفاده می‌شود.

رادیوایزوتوپ‌ها در علم پزشکی، بیشتر در شاخه‌ی رادیوتراپی، برای تراپی و پزشکی هسته‌ای به‌کار می‌روند. در این بین، پزشکی هسته‌ای بیش‌ترین مصرف را داشته، و از بخش‌های مهم و جدانشدنی علم پزشکی است. تولید رادبوداروها و ترکیبات آنها برای مصارف پزشکی هسته‌ای، بخش مهمی از فعالیت‌های هسته‌ای و رادیوشیمی را تشکیل می‌دهد. استفاده از این رادیونوکلئیدها در ساختار بیولوژیکی بدن، ویژگی‌های خاصی را طلب میکند، که علاوه بر فراهم آوردن مطلوب‌ترین نتیجه‌ی تشخیصی-درمانی ممکن، کم‌ترین ضرر و خطر را برای بیمار داشته باشد. بدیهی است، که مجاورت بافت زنده با تشعشع حاصل از واپاشی رادیونوکلئیدها، خالی از خطر نخواهد بود. به‌همین دلیل باید از مواد رادیواکتیو با نیمه‌عمر کوتاه و انرژی

متناسب با هدف درمانی مشخص، استفاده شود. توسعهی ژنراتورهای مولد رادیوداروها، امکان استفاده از رادیونوکلئیدهای با نیمه عمر کوتاه، در هر محل و زمانی، را ممکن ساخته است. سیستمها و ابزار جدید تصویربرداری نیز (SPECT و PET و...)، مطالعهی واکنشهای بیوشیمیایی و سینتیک رادیوداروها را در ارگانهای زندهی بدن انسان، ممکن ساخته است.

رادبودارو یا داروهای هسته‌ای

در حرفه‌ی پزشکی، دارو تعریف مشخصی دارد و به موادی گفته می‌شود، که قادر به معالجه، یا توقف بیماری و یا باعث رفع علائم بیماری، التیام بخش و کاهش درد باشد. در تعریف دارو می‌توان به ویتامینها و مواد معدنی ضروری، که برای اصلاح موارد کمبود آنها تجویز می‌شود نیز اشاره کرد. بنابر تعریف جامع‌تر: هر نوع مولکول کوچکی، که پس از ورود به بدن، با فعل و انفعالات در سطح ملکولی، عمل بدن را تغییر دهد دارو محسوب می‌شود. به‌طور خلاصه، دارو به موادی اطلاق می‌شود، که جهت پیش‌گیری، درمان، بهبودی، التیام و یا تشخیص یک بیماری استفاده می‌شود.

یک رادیودارو، ترکیب رادیواکتیوی است که برای تشخیص و درمان برخی از بیماریها استفاده می‌شود، و رفتار آن در محیط زنده، مشابه ترکیبات بیولوژیک است. در پزشکی هسته‌ای حدود ۹۵ درصد رادیوداروها، برای مقاصد تشخیصی به کار رفته و مابقی، برای اهداف درمانی مورد استفاده قرار می‌گیرند. رادیوداروها، معمولاً دارای حداقل اثر دارویی بوده، و بدلیل رادیواکتیو بودن آنها، در اکثر مواقع به مقدار بسیار جزئی، با احتیاط و رعایت جوانب ایمنی و حفاظتی، در برابر پرتو تجویز می‌شوند. رادیوداروهای تشخیصی بنابر نوع تشعشعی که ساطع می‌کنند، توسط آشکارسازهای ویژه‌ای شناسایی شده، و با شرکت در چرخه بیولوژیکی بدن، پزشک را از نوع عملکرد و وضعیت سلامت آن آگاه می‌سازند. در مصارف درمانی نیز، می‌توان از طریق اثرات مخرب تابش، موجب تخریب بافت بیمار شد. البته نباید فراموش کرد که رادیوداروها نیز به مانند سایر داروها دارای فواید و مضراتی هستند، که بنابر میزان اثری که بر بهبود بیماری و یا تشخیص آن دارند، برای بیمار تجویز می‌شوند. مواد رادیوشیمی را، به دلیل احتمال غیراستریل بودن و ایجاد تب، نمی‌توان برای مصارف انسانی به کار برد؛ بنابراین قبل از تجویز رادیوداروها، از استریل و غیرتب‌زا بودن آنها اطمینان حاصل می‌کنند، و مقدار اندازه و دوز لازم را نیز با محاسبات فیزیکی و بیولوژیکی و آزمونهای کنترل کیفی تعیین می‌نمایند.

یک رادیودارو، ممکن است عنصری رادیواکتیو، مانند گزنون ^{131}Xe باشد، یا ترکیبی نشاندار (ترکیب شیمیایی حامل ماده رادیواکتیو) مانند پروتئین یددار (^{131}I)، و یا کیت نشاندار شده با تکنسیم ($^{99\text{m}}\text{Tc}$) باشد.

یک رادیودارو دارای دو جزء است: جزء دارویی و جزء رادیونوکلید. مفید فایده بودن یک رادیودارو، با ویژگی‌های این دو جزء مشخص می‌گردد. در طراحی یک رادیودارو، ابتدا دارو براساس تمرکز ترجیحی در یک عضو معین، یا شراکت در فعالیت فیزیولوژیکی عضو انتخاب می‌شود. سپس رادیونوکلید مناسب به داروی انتخاب شده متصل می‌گردد. پس از مصرف رادیودارو و تجمع در ارگان هدف، تابش‌های گسیل شده از آن، بوسیله‌ی یک آشکارساز تابش، آشکار و ثبت می‌گردد. بدین ترتیب، با توجه به پاسخ ارگان هدف، ساختار مورفولوژی یا فعالیت فیزیولوژیکی عضو، قابل ارزیابی خواهد بود. داروی انتخابی باید دارای ویژگی‌های خاصی باشد. مهم‌ترین آن‌ها از این قرارند:

ایمن بوده و برای استفاده انسانی غیر سمی باشد. تابش‌های حاصل از رادیونوکلید انتخابی، باید از طرفی کم‌ترین مخاطره را برای بیمار دربر داشته و از طرف دیگر، به‌راحتی بوسیله دستگاه‌های آشکارساز، قابل درک و ثبت بوده و بنابر هدف تشخیصی یا درمانی حداقل زمان توقف در بدن را داشته باشد. اگر عمر (توقف یا احتباس) رادیودارو در بدن بیش از مدت ایمن باشد، بافت سالم را تخریب نموده و ما را از هدف درمانی دور می‌کند.

مشخصات رادیونوکلوئیدهای مورد استفاده در پزشکی

رادیوداروهای کاربردی در پزشکی باید دارای خصوصیات زیر باشند:

- ۱- حداقل پرتودهی را به بیمار داشته باشد.
- ۲- فاقد تابش‌های مزاحم و مخاطره‌آمیز باشد.
- ۳- نیمه‌عمر فیزیکی رادیودارو، باید بیش‌تر از مدت زمان فرایند تصویربرداری (از مرحله تولید، آماده سازی و انجام اسکن) باشد.
- ۴- نیمه‌عمر موثر رادیودارو، باید بیش‌تر از مدت آماده‌سازی بیمار و مدت زمان انجام اسکن باشد.
- ۵- رادیودارو، دارای ترکیب شیمیایی مناسب بوده (سازگار با سیستم بیولوژیکی) و پایدار باشد.
- ۶- درصد خلوص بالایی داشته باشد.
- ۷- استریل باشد.
- ۸- فاقد ترکیبات سمی باشد.
- ۹- در دسترس و ارزان باشد.
- ۱۰- اکتیویته و انرژی پرتوها و ذرات تابشی آن، برای هدف مورد (درمانی یا تشخیصی)، مناسب باشد.

نیمه عمر

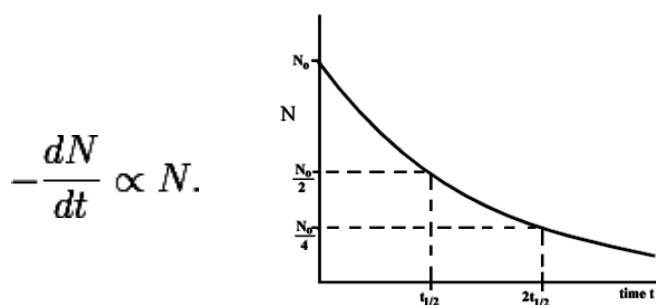
هر ماده‌ای در بدن انسان، از بدو ورود تا خروج آن، محدوده‌ی زمانی خاصی را سپری می‌کند؛ که در برخی کوتاه‌تر و در برخی موارد طولانی‌تر است. به خروج مواد از طریق سیستم بیولوژیکی بدن، دفع بیولوژیکی گفته می‌شود.

در رابطه با مواد رادیواکتیو، این موضوع کمی پیچیده‌تر است. در عناصر رادیواکتیو حاوی هسته‌های ناپایدار، رسیدن به سطح پایداری، با صرف انرژی و گسیل تابش‌های یونیزان و غیر یونیزان صورت می‌گیرد. به این عمل واپاشی گفته می‌شود؛ و در نتیجه‌ی این فرایند، اکتیویته کل کاهش می‌یابد.

بنابراین، مقدار اکتیویته هر رادیودارویی در داخل بدن، با گذشت زمان، از دو طریق بیولوژیکی و فیزیکی کاهش می‌یابد و اکتیویته باقی‌مانده، مقدار برآیند این دو خواهد بود. به عبارتی، برای مقدار تجویز رادیودارو سه تعریف حیاتی نیمه‌عمر فیزیکی، نیمه‌عمر بیولوژیکی و نیمه عمر موثر را خواهیم داشت.

نیمه‌عمر فیزیکی

مدت زمانی که طول می‌کشد که مقدار اکتیویته ماده پرتوزا، از طریق فیزیکی به نصف مقدار اولیه‌اش برسد را، نیمه‌عمر فیزیکی می‌نامند. از طرفی، تعداد اتم‌های اولیه‌ی رادیواکتیو (N_0)، با تعداد اتم‌های رادیواکتیو باقی مانده (N)، نسبت مستقیم داشته و مقدار آن پس از گذشت زمان (t) قابل محاسبه است.



نمایش نسبت تعداد اتم‌های اولیه (N_0) و تعداد اتم‌های

باقی مانده (N) پس از گذشت زمان t و $2t$ نیمه عمر

یعنی، اگر در ابتدا یک گرم ماده رادیواکتیو داشته باشیم، پس از یک نیمه‌عمر، نصف و پس از دو نیمه‌عمر، یک چهارم، و پس از سه نیمه‌عمر، یک هشتم مقدار اولیه را خواهیم داشت. نیمه‌عمر مواد مختلف، مقداری مشخص ولی متفاوت از یکدیگر است. نیمه‌عمر مواد رادیواکتیو، دارای گستره و تنوع زیادی است، بطوریکه در مقایسه حدود چند میلیاردیوم ثانیه تا چندین میلیارد سال تغییر می‌کند. برای مثال، نیمه‌عمر اورانیوم $4/5$ میلیارد سال است. نیمه‌عمر رادیوم 1590 سال، و نیمه‌عمر اکتانیوم کمتر از 10 هزارم ثانیه است.

از ایزوتوپ‌های رادیواکتیو عناصر استفاده‌های زیادی می‌شود. یکی از این ایزوتوپ‌های مهم، کربن 14 است. اتم کربن 14 ، با نیمه‌عمر 5730 سال، معیار مناسبی برای تخمین عمر ماده در تحقیقات باستان‌شناسی است. این عنصر، که بطور طبیعی در مواد مختلف، خصوصاً موجودات زنده، به مقدار مشخصی یافت می‌شود، این مقدار در اثر تبادل گازهای اکسیژن و دی‌اکسید کربن، بین موجودات زنده و جو زمین جذب شده است. وقتی یک گیاه یا حیوان می‌میرد، این تبادل متوقف شده، و میزان کربن تجمعی آن بدلیل فروپاشی فیزیکی کربن 14 ، کاهش می‌یابد. این فروپاشی، با آهنگ ثابتی انجام می‌شود. پس با اندازه‌گیری میزان تابش، و در دست داشتن نیمه‌عمر کربن 14 ، دانشمندان می‌توانند زمان مرگ موجود مورد نظر، تاریخ مومیایی شدن، یا حتی سن زمین را محاسبه کنند.

مقایسه نیمه عمر برخی از عناصر

نام عنصر	نیمه عمر
اورانیوم ۲۳۸	۵ میلیارد سال
اورانیوم ۲۳۵	۷۰۰ میلیون سال
پلوتونیوم ۲۳۹	۲۴۰۰۰ سال
کربن ۱۴	۵۶۰۰ سال
ید ۱۳۱	۸ روز
طلای ۱۹۸	۳ روز
سدیم ۲۴	۱۵ ساعت
فلوئور ۱۷	۱ دقیقه
پولونیوم ۲۱۴	$3/0000000$ ثانیه

نیمه عمر بیولوژیکی

نیمه عمر بیولوژیکی، مدت زمانی است که طول می کشد تا مقدار یک ماده مشخص، پس از ورود به سیستم داخلی بدن، با توجه به فرایند بیولوژیکی (مکانیسم طبیعی بدن)، به نصف مقدار اولیه اش کاهش یابد. این کمیت، هیچ ارتباطی به رادیواکتیو بودن ماده مورد نظر (غذا، هوای تنفسی، داروی خوراکی، تزریقی و استنشاقی و ...) ندارد. برای درک بهتر در جدول زیر نیمه عمر بیولوژیکی برخی مواد آورده شده است. مقایسه نیمه عمر بیولوژیکی برخی از عناصر و مواد، پس از ورود به داخل بدن

نام عنصر یا ماده	نیمه عمر
آب	عادی
	۷ تا ۱۴ روز
	در صورت مصرف الکل، تحرک و تغییرات محیطی تغییر می کند
سزیم	۱ تا ۴ ماه
جیوه (متیل جیوه)	۶۵ روز
پولونیم	۳۰ تا ۵۰ روز
سرب (در استخوان)	۱۰ سال
پولوتنیم (در استخوان)	۱۰۰ سال
پولوتونیم (در کبد)	۴۰ سال

نیمه عمر مؤثر

مدت زمانی که طول می کشد، تا مقدار اکتیویته رادیودارو، از نظر بیولوژیکی و فیزیکی، به نصف مقدار اولیه اش برسد را نیمه-عمر مؤثر می گویند. رابطه نیمه عمر مؤثر (t_e) با نیمه عمر فیزیکی (t_p) و نیمه عمر بیولوژیکی (t_b) بدین قرار است:

$$\frac{1}{t_e} = \frac{1}{t_p} + \frac{1}{t_b} \quad \text{و} \quad t_e = \frac{(t_p)(t_b)}{t_p + t_b}$$

مدت زمانی که در آن دارو مفید است، بستگی به نیمه‌عمر فیزیکی و نیمه‌عمر بیولوژیکی دارد. یعنی مدت زمانی که دارو در بدن می‌ماند، قبل از آنکه بوسیله‌ی فرآیندهای متابولیکی، از فعالیت افتاده یا از سیستم بدن خارج شود.

نیمه‌عمر فیزیکی رادیوداروهایی که معمولاً در پزشکی هسته‌ای بکار می‌روند، به خوبی شناخته شده‌اند، ولی رفتار بیولوژیکی و زمان ماندن مولکولی که در آن رادیوداروی خاص وجود دارد، به خوبی مشخص نشده‌است.

این مقادیر، در محاسبه‌ی روند تولید، حمل آن به مراکز تشخیصی-درمانی، مقدار تجویز رادیودارو، مراقبت‌های پس از آن و حتی پسمانداری (مواد غیرقابل استفاده آلوده کننده) و دفن پسماندها، بسیار مهم هستند. برای مثال، در مورد رادیونوکلوئیدهای با نیمه‌عمر کوتاه، مثل کربن-۱۱، مراحل ساخت و ترکیب رادیودارو، باید هر چه سریع‌تر و تا اندازه‌ی ممکن، بدون دخالت دست و اتوماتیک باشد.

تولید رادیوداروها

یکی از ویژگی‌های مهم رادیوداروها، در دسترس بودن آنهاست. رادیوایزوتوپ‌های رادیواکتیو، همواره دختر یک رادیوایزوتوپ ناپایدار مادر هستند. به عبارت دیگر، می‌توان گفت که برای تولید یک ایزوتوپ رادیواکتیو، باید به دنبال هسته‌ی ناپایدار مولد (مادر) آن بود، که برخی در طبیعت وجود دارند و برخی بنا بر ضرورت و تناسب آن با اهداف مورد نظر، ساخته دست بشر هستند. جهت تولید مصنوعی رادیوداروها از دستگاه‌ها و تجهیزات پیشرفته‌ای مانند: ژنراتورهای رادیواکتیو، سیکلوترون، سینکروترون، بتاترون، شتاب‌دهنده، راکتور و ... استفاده می‌شود. در این دوره، با توجه به کاربردها (در پزشکی)، فقط به ساختار و روش تولید ایزوتوپ‌ها در ژنراتور و سیکلوترون اشاره می‌شود (ضروری‌ترند).

ژنراتورهای مواد رادیواکتیو

یک ژنراتور رادیواکتیو که به آن گاو رادیواکتیو هم گفته می‌شود، از یک رادیویزوتوپ مادر، که نیمه‌عمر طولانی دارد، و یک رادیویزوتوپ دختر با نیمه‌عمر کوتاه، که کاربرد پزشکی دارد، استفاده می‌شود. عمل برداشت دختر رادیواکتیو از ژنراتور را نیز، اصطلاحاً دوشیدن می‌نامند. نمونه‌هایی از این ژنراتورها بدین قرارند:

مادر	نیمه عمر مادر	دختر	نیمه عمر دختر
مولیبدن ۹۹	۶۷	تکنسیم ۹۹m	۶ ساعت
ریبیدیم ۸۱	۴/۵ ساعت	کریپتون ۸۱	۱۳/۵ ثانیه
ژرمانیم ۶۸	۲۷۵ روز	گالیم ۶۸	۶۸/۳ دقیقه
استرانسیم ۹۰	۲۹ سال	ایتریم ۹۰	۶۴ ساعت
تلریم ۱۳۲	۷۸ ساعت	ید ۱۳۲	۲/۳ ساعت

ژنراتور مولیبدن - ۹۹ / تکنسیم - m۹۹

ژنراتور مولیبدن - ۹۹ / تکنسیم - m۹۹، سیستمی متشکل از این دو رادیویزوتوپ بوده، که رایج‌ترین و پرمصرف‌ترین مولد رادیودارو در پزشکی هسته‌ای محسوب می‌گردد. نیمه‌عمر رادیویزوتوپ دختر (Tc) در این ژنراتور، حدود ۶ ساعت، و عنصر مادر (Mo) ۶۷ ساعت است.

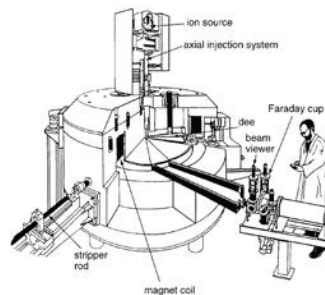
اساس کار این ژنراتورها، بر مبنای جداسازی مولیبدن و تکنسیم از یکدیگر، در ستون‌های کروماتوگرافی (ستونی از اکسید آلومینیوم Al_2O_3 یا آلومینا) بکار رفته در آنها می‌باشد. عنصر دختر، یعنی تکنسیم - m۹۹ توسط فرآیند شستشو یا دوشیدن (milking Cow) ژنراتور با ویال شیشه‌ای حاوی نرمال سالین و ویال خلاء، از مادر خود، مولیبدن ۹۹، جدا می‌شود.

این ژنراتور سبک بوده، حمل و نقل آن آسان است و به راحتی در مراکز درمانی و بیمارستان‌های دور از محل مرکز تولید اصلی، قابل استفاده و در دسترس می‌باشد.

سیکلوترون Cyclotron

این دستگاه، نوعی شتاب‌دهنده است که از دو آهنربای مغناطیسی بزرگ و توخالی به شکل D، برای تولید میدان مغناطیسی یکنواخت استفاده می‌کند. به دلیل شکل آنها به نام D ها خوانده می‌شوند. هوای داخل D ها، تا حد زیادی تخلیه شده است و بین دو قطب یک مگنت، جریان مستقیم که تولید میدان مغناطیسی ثابت می‌نماید قرار دارند .

جهت شتاب دادن پروتونها، یک جریان متناوب بین D ها اعمال می‌شود. ذرات با بار مثبت مثل پروتون‌ها و یا دوتریوم‌ها، از مرکز محفظه به داخل سیکلوترون تزریق می‌شوند. تحت تأثیر میدان مغناطیسی، ذرات در یک مدار دایره‌ای چرخش می‌نمایند. فرکانس ولتاژ متناوب به گونه‌ای تنظیم می‌شود، که ذرات از یک D به D با قطر بزرگ‌تر، ضمن چرخش، منتقل شوند. در هر چرخش، با توجه به آن که زمان چرخش ثابت، و مدار چرخش افزایش می‌یابد، ذرات باردار دارای انرژی بیشتری می‌شوند. بنابراین، با چرخش‌های زیادی که ذرات باردار می‌نمایند، انرژی جنبشی آنها افزایش می‌یابد، تا مثلاً به ۳۰ Mev (میلیون الکترون ولت) می‌رسند. این ذرات شتاب‌دار، می‌توانند بسته به طرح شتاب‌دهنده، از چند کیلو الکترون ولت تا چندین میلیارد الکترون ولت انرژی جنبشی بگیرند. در نهایت ذرات باردار به وسیله‌ی یک انحراف‌دهنده یا شکست‌دهنده، از میان یک پنجره به بیرون از شتاب‌دهنده شکست می‌یابند، و یک دسته پرتوی خارجی تشکیل می‌شود.



نمایش ساختمان یک سیکلوترون

زمانی که هدف‌هایی از جنس عناصر پایدار، در مسیر پرتوی خارجی ذرات شتاب داده شده، یا در مسیر پرتوهای درونی، در شعاعی خاص در درون شتاب‌دهنده قرار داده شوند، ذرات شتاب‌دار با هسته‌های هدف برخورد می‌کنند و واکنش‌های هسته-ای رخ می‌دهد. در یک واکنش هسته‌ای، ذره‌ی برخورد نموده، بسته به انرژی خود، ممکن است ذره‌ی هدف را ترک نموده، بخشی از انرژی خود را در آن باقی بگذارد و یا ممکن است، کاملاً در هسته جذب شود. در هر صورت، هسته‌ای با انرژی برانگیختگی تشکیل می‌شود و انرژی برانگیختگی، با گسیل ذره‌های هسته‌ای (یعنی پروتون‌ها و نوترون‌ها) آزاد می‌شود.

به دنبال گسیل ذره، در زمانی که دیگر از نظر انرژی گسیل ذره ممکن نباشد، گسیل پرتوهای گاما روی می‌دهد. بسته به انرژی که با برخورد ذره تخلیه می‌شود، ذره‌های هسته‌ای متعددی، به گونه‌های تصادفی از هسته تابش گرفته‌ی هدف گسیل

می‌شود، که باعث تشکیل نوکلئیدهای گوناگون می‌گردد. با افزایش انرژی ذره‌ی تابش‌یافته، ذره‌های هسته‌ای بیش‌تری گسیل می‌شوند و بنابراین، گستره‌ی وسیع‌تری از نوکلئیدها تولید می‌شود.

شتاب‌دهنده‌های پزشکی، شتاب‌دهنده‌های فشرده‌ای هستند، که برای تولید رادیونوکلئیدهای با نیمه‌عمر کوتاه، به‌ویژه آن‌هایی که در برش‌نگاری گسیل پوزیترون (PET) استفاده می‌شوند، به کار می‌روند. در این شتاب‌دهنده، پروتون‌ها، دوترون‌ها و ذرات α با انرژی کم تا متوسط بکار می‌روند.

رادیو ایزوتوپ‌های محصول سیکلوترون

Carbon- 11 , Nitrogen- 13 , Oxygen- 15 , F- 18 : گسیل‌کننده پوزیترون هستند و در PET برای مطالعه فیزیولوژی مغز و پاتولوژی، بویژه مکان‌یابی کانون‌های صرعی، جنون و مطالعات روانپزشکی. همچنین نقشی مهم در مطالعات قلب دارند.

F- 18 در FDG دارای اهمیتی ویژه، در تشخیص سرطان و مشخص کردن شیوه درمان آنها بوسیله PET.

Cobalt- 57 (۲۷۲ d): در تخمین اندازه‌ی عضو و در لوازم in-vitro.

Gallium- 67 (۷۸ h): در عفونت‌ها و جراحات.

Indium- 111 (۲.۸ d): در تشخیص‌های تخصصی، مثل مطالعات مغز، عفونت و مطالعات عملکردهای عبوری روده.

Iodine- 123 (۱۳ h): منتشرکننده‌ی گاما، و برخلاف I- 131 بتا تولید نمی‌کند. بطور وسیع در مطالعات عملکرد تیروئید استفاده می‌شود.

Rubidium- 81 (۴.۶ h) و Krypton- 81m (۱۳ sec): گاز Kr- 81m عکس‌هایی از عملکرد تنفس ریه، مثل مریض-

های آسمی و به زودی در تشخیص بیماری‌های عملکرد کبد به کار می‌رود

Rubidium- 82 (۶۵ h): عکس PET مناسب از عضلات جداره‌ی قلب.

Strontium- 92 (۲۵ d): در ژنراتور، به عنوان مادر Rb- 82 است.

Thallium- 201 (۷۳ h): برای معاینه‌ی بیماری‌های عروق کرونری و عارضه‌های دیگر قلب، مثل سکته‌ی قلبی، و همچنین

برای موقعیت‌یابی غدد و بافت‌های لنفاوی کم‌اثر.

راديو ايزوتوپ های محصول راکتور

Molybdenum-99 (66 h): به عنوان هسته‌ی مادر، برای تولید ^{99m}Tc در ژنراتور.

^{99m}Tc (6 h): برای عکسبرداری اسکلت بدن و عضلات قلب، همچنین برای مغز، تیروئید، ریه (بصورت وریدی و استنشاقی)، کبد، طحال، کلیه (ساختمان و عملکرد)، کیسه صفرا، مغز استخوان، غدد بزاقی و اشکی و...

Bismuth-213 (46 min): برای روش درمان TAT.

^{51}Cr (28 d): برای نشان‌دار کردن گلبول‌های خون و مشخص کردن از دست دادن پروتئین در سیستم گوارشی.

Cobalt-60 (10.5 mth): معمولاً برای پرتودرمانی خارجی به کار می‌رود.

Copper-64 (13 h): برای مطالعه در مورد بیماری‌های ژنتیکی متابولیسم مس، مثل بیماری‌های Wilson's و Menke's.

Dysprosium-165 (2 h): به عنوان جمع کننده‌ی OH در درمان synovectomy آرتروز.

Erbium-169 (9.4 d): برای تسکین دردهای آرتروز در مفاصل.

Holmium-166 (26 h): برای تشخیص تومورهای کبد.

Iodine-125 (60 d): برای براچی‌تراپی (پروستات و مغز)، برای بررسی مقدار تصفیه‌ی کلیه و مشخص کردن لختگی خون در پا.

Iodine-131 (8 d): برای عکسبرداری تیروئید و عکسبرداری از آن، مشخص کردن عملکردهای غیرعادی کبد، انسداد جریان خون و مجاری ادراری در کلیه، یک منبع قوی منتشر کننده‌ی گاما، ولی برای درمان بوسیله‌ی بتا استفاده می‌شود.

Iridium-192 (74 d): به صورت سیم، در درمان داخلی سرطان استفاده می‌شود و بعد برداشته می‌شود.

Iron-59 (46 d): برای مطالعه‌ی متابولیسم آهن در طحال.

Lutetium-177 (6.7 d) (Lu-177): برای عکسبرداری و درمان همزمان. به اندازه‌ی کافی گاما منتشر می‌کند و در

همان حال منتشر کننده‌ی بتا نیز می‌باشد (برای درمان تومورهای کوچک مثل غدد درون‌ریز).

Palladium-103 (17 d): برای براچی‌تراپی (براکی‌تراپی) سرطان پروستات که در مراحل اولیه باشد.

Phosphorus-32 (14 d): منتشر کننده‌ی بتا و در درمان سرطان خون به کار می‌رود.

Potassium-42 (12 h): برای محاسبه‌ی تبادل پتاسیم در عروق کرونری قلب.

(۳.۸ d) ^{186}Re : جهت کم کردن دردهای سرطان استخوان، منتشرکننده‌ی بتا همراه با گامای ضعیف برای عکسبرداری.

(۱۷ h) ^{188}Re : برای پرتوافکنی بتا، در یک بالن آنژیوگرافی در شریان کرونر قلب.

(۴۷ h) ^{153}Sm : ^{153}Sm منتشر کننده‌ی بتاست. یک مسکن مؤثر برای سرطان‌های ثانویه‌ی مستقر شده در استخوان است. همچنین برای سرطان پروستات و سرطان سینه مؤثر است.

(۱۲۰ d) ^{75}Se : در نوعی از seleno-methionine در مطالعه‌ی تولید آنزیم گوارشی.

(۱۵ h) ^{24}Na : مطالعه‌ی الکتروولیت داخل بدن.

(۵۰ d) ^{89}Sr : منتشرکننده‌ی بتاست. در تسکین دردهای سرطان پروستات و سینه بسیار مؤثر است.

(۵ d) ^{133}Xe : در مطالعات تنفسی ریه.

(۳۲ d) ^{169}Yb : برای مطالعات مایع مغزی نخاعی مغز.

(۱.۹ h) ^{177}Yb : جد ^{177}Lu است.

(۶۴ h) ^{90}Y : منتشرکننده‌ی بتاست. در براچی‌تراپی و تسکین دردهای مفاصل بزرگ در آرتروز.

رادپوایزوتوپ‌هایی مثل سزیوم و طلا و روتنیوم در براچی‌تراپی بکار می‌روند.

رادپوداروهای مهم در پزشکی هسته‌ای

کاربرد رادپوداروها باید تحت نظارت و رعایت نکات ایمنی و به مقداری که فیزیست یا متخصص تجویز نموده است، صورت پذیرد. در اهداف تشخیصی و درمانی استفاده از مواد رادپوآکتیو، باید بهینه‌ترین حالت ممکن را انتخاب نمود. یعنی با کم-خطرترین تابش و با حداقل مقدار ممکن، مطلوب‌ترین نتیجه را بدست آورد. رادپوایزوتوپ‌های رادپوآکتیو، سدیم، فسفر، استرانسیم، گالییم، تالیوم و گزنون از جمله عناصر مهم و رایج در پزشکی هستند، که در جدول زیر بعضی از انواع شیمیایی و کاربردهای آنها را در پزشکی هسته‌ای و به عنوان رادپودارو ارائه شده است.

کاربرد	شکل شیمیایی	راديو نوکلید
مغز، تیروئید، غدد بزاقی، عکس برداری استخر خونی، مکان یابی، جفت جنین	پرتکنات سدیم	^{99m}Tc
جگر، طحال، عکس برداری مغز استخوان	کلوئید آلومین	^{99m}Tc
عکس برداری استخوان	اتی درونات EHDHP	^{99m}Tc
عکس برداری مغز، ریزش کلیوی، عکس برداری تنفس شش	پنتتات DTPA	^{99m}Tc
عکس برداری استخوان، عکس برداری آرواره	پیروفسفات PPI	^{99m}Tc
تشخیص کار تیروئید، عکس برداری تیروئید	یدید سدیم	^{131}I
تعیین حجم خون و پلاسما، بررسی های تیروئید	آلبومین	^{125}I
تشخیص کار تیروئید، عکس برداری تیروئید	یدید سدیم	^{123}I
عضلات قلب، گردش خون	کلرید تالوس	^{201}Tl
عکس برداری تنفسی، مطالعات جریان خون	گاز	^{133}Xe
عکس برداری تومور	سیتراک گالیم	^{67}Ga

تکنسیم (^{99m}Tc)

^{99m}Tc ، رادیونوکلیدی است که در روش های تشخیص پزشکی هسته ای، بیش تر از همه ی رادیونوکلیدها مورد استفاده قرار گرفته است. تکنسیم دارای خواصی است، که کاربرد آن را در تشخیص امراض مناسب می سازد. نیمه عمر آن ۱/۰۶ ساعت است و پرتوی گامایی با انرژی ۱۴۲/۷ گسیل می دارد. پرتوی گاما و نیمه عمر آن، برای تصویربرداری بسیار مطلوب است (آنقدر طولانی نیست که بیمار، پرتوگیری غیرضروری داشته باشد). به علاوه، هزینه ی تولید آن نیز مقرون به صرفه است. ^{99m}Tc دختر مولیبدن ۹۹ است، که امکان تولید آن توسط ژنراتور مولیبدن-۹۹ / تکنسیم-۹۹m در محل تصویربرداری مقدور است.

ید I

تنها سه ایزوتوپ از عنصر ید وجود دارد که برای تصویربرداری تشخیصی بکار می‌روند. این ایزوتوپها عبارتند از ^{131}I ، ^{125}I ، ^{123}I .

جذب بالای ید در تیروئید، باعث استفاده‌ی رایج آن در روش‌های تشخیصی و درمانی از این غده شده است. این رادیوایزوتوپها معمولاً بطرق شیمیایی به محلولی از یدید سدیم تبدیل می‌شوند.

نکته: در مورد شیر دهی، ید رادیواکتیو تجویز شده در درمان تیروئید، می‌تواند از طریق شیر سینه مادر به داخل بدن کودک انتقال یابد. در نتیجه ید رادیواکتیو در غده‌ی تیروئید کودک نیز تجمع می‌یابد و ممکن است تغییری در عملکرد غده‌ی تیروئید یا حتی رشد نودول‌های تیروئید یا تومورهای دیگری را در سالهای بعد عمر کودک بوجود آورد. پس در صورت نیاز به ید درمانی (رادیواکتیو) مادر، تا زمانی که ید رادیواکتیو در شیر او وجود دارد، باید شیردهی را متوقف نماید.

تالیوم ^{201}Tl

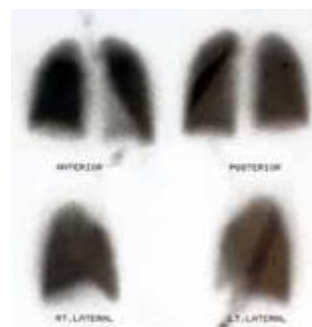
^{201}Tl از فروپاشی ^{210}Pb بدست می‌آید. **سرب** ابتدا بوسیله‌ی بمباران پروتونی، به فلز **تالیوم** تبدیل شده و تالیوم نیز به جیوه ^{201}Tl پایدار با نیمه‌عمر ۷۹.۹ ساعت فروپاشی می‌کند. با توجه به این که یون $^{201}\text{Tl}+$ از نظر شیمیایی، مشابه $\text{K}+$ است (**پتاسیم** در فعالیت عادی قلب در هنگام انجام فعالیت‌های بدنی و استرس در عضله‌ی قلب جمع می‌شود)، ^{201}Tl بیشتر برای تصویربرداری از **قلب** استفاده می‌شود.

گزنون ^{133}Xe

این گاز بی‌اثر از نظر شیمیایی، یک محصول جانبی از **شکافت** هسته‌ای است. با توجه به این که ^{133}Xe **گاز** است، می‌تواند از طریق استنشاق وارد ریه‌ها شده، و برای تصویربرداری از ریه‌ها و بررسی تهویه موضعی شش‌ها مورد استفاده قرار گیرد.



تهویه ریوی نامناسب



نرمال

و

تصویربرداری از ریه :

گالیم^{۶۷}Ga

^{67}Ga بصورت ترکیب سترات در بسیاری از [انواع تومورها](#) مورد استفاده قرار گرفته و برای نشان دادن تومورهای نسوج نرم بکار می‌رود. ایزوتوپ ^{67}Ga بیشتر توسط نسوج اسکلتی جذب می‌شود و برای اسکن کردن تومورهای استخوانی بکار رفته است.

فسفر^{۳۲}P

رادبوداروی ^{32}P از طریق عمل جراحی یا به طور موضعی برای درمان به توده سرطانی کبد تزریق می‌شود. در درمان التهاب‌های مفصلی نیز با تزریق مستقیم، پاسخ خوبی را ارائه نموده است.

کاربرد رادبوداروها در پزشکی هسته‌ای (تشخیص)

طیف رادیونوکلویدهای در دسترس برای استفاده در علوم طبیعی، با اختراع سیکلوترون توسط لورنس در سال ۱۹۳۰ میلادی و امکان تولید رادیونوکلویدها در مقیاس بزرگ در راکتورهای هسته‌ای، در اواخر دهه ۱۹۴۰، به‌طور قابل ملاحظه‌ای وسعت پیدا کرد. به عنوان مثال، کاربرد رادیوایزوتوپ تریتم و کربن-۱۴، مهم‌ترین فرآیندهای بیوشیمیایی مثل فتوسنتز گیاهان را توضیح می‌دهد.

امروزه پزشکی هسته‌ای یک بخش مهم و وابسته به علوم پزشکی شده است. تولید رادبوداروها و ترکیبات آنها برای کاربرد در پزشکی هسته‌ای، یک بخش مهم فعالیت‌های هسته‌ای و رادیوشیمی را تشکیل می‌دهد. توسعه ژنراتورهای دارویی، امکان استفاده از رادیونوکلویدهای با نیمه‌عمر کوتاه را در هر زمان در پزشکی ممکن ساخته است.

در پزشکی هسته‌ای، با استفاده از تشعشع مواد رادیواکتیو اطلاعات مفیدی را راجع به عملکرد عضو خاصی از بدن بدست می‌آوریم. بدیهی است که جهت دستیابی به درمان مطلوب، باید علاوه بر بررسی سابقه بیماری و معاینات کلینیکی، از روش تشخیصی مناسب نیز استفاده نمود. در بسیاری از موارد فقط اطلاع از ساختار آناتومیکی بیمار کافی نیست، و اطمینان از صحت عملکرد اندام‌ها نیز در تصمیم‌گیری پزشک مؤثر است. به کمک رادیوایزوتوپ‌ها می‌توان با ضریب اطمینان قابل توجهی، از اعضای از بدن مانند: تیروئید، استخوان‌ها، قلب، کبد و غیره، تصویربرداری نمود و اختلال عملکرد آنها را آشکار ساخت. یا حتی می‌توان با تجویز رادبودارو از تابش هسته‌ای این مواد، در درمان تومورهای بدخیم استفاده نمود.

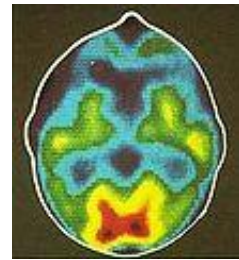
به عبارتی، پزشکی هسته‌ای شاخه‌ای از علم پزشکی است که توسط روش‌های ایمن و حساب شده، راه تشخیصی و درمانی مطلوب را برای برخی از بیماری‌ها فراهم می‌سازد. امروزه پزشکی هسته‌ای، روش‌هایی را ارائه می‌کند که طیف تخصص‌های پزشکی، از کودکان تا بیماری‌های قلبی و معالجه امراض روانی را در بر می‌گیرد.

روش‌های تشخیص زنده INVIVO

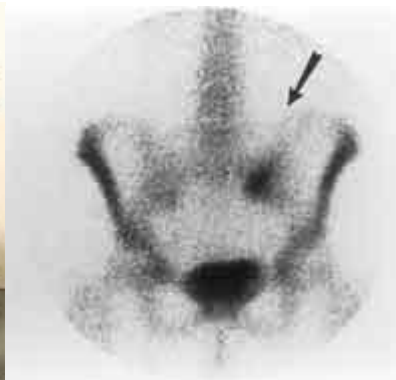
روش‌های تشخیص زنده، روش‌هایی هستند که در آن‌ها یک رادیودارو در سیستم زنده‌ی بیمار از طریق خوردن، تزریق یا استنشاق وارد می‌گردد. در این روش تشخیصی، ماده‌ی پرتوزا، ترجیحاً از طریق وریدی وارد بدن بیمار می‌شود و سپس از عضو یا اعضای از بدن، به‌منظور تعیین میزان جذب ماده پرتوزا تصویربرداری می‌شود. با ردیابی و آشکارسازی پرتوهای ساطع‌شده، مسیر حرکت، محل استقرار و علایم به‌جامانده از این عناصر، مورد مطالعه قرار می‌گیرد، و ویژگی‌های فیزیولوژیک و بیوشیمیایی هر عضو، بررسی می‌شود.



اسکن تیروئید با تکنسیوم m^{99}



تصویری از مغز توسط پت اسکن



بیمار در درون دستگاه اسکن قرار گرفته است یک تصویر اسکن رادیوایزوتوپ

روش‌های تشخیص غیرزنده INVITRO

روش‌های غیرزنده، مربوط به آزمون‌هایی است که روی نمونه‌های برداشته شده از بیمار انجام می‌گیرد. مهم‌ترین مورد در این روش‌ها، رادیوایمونواسی (RIA) می‌باشد. در این روش تشخیصی، از رادیوایزوتوپ‌ها به عنوان ردیاب، جهت نشان‌دار کردن نمونه‌های گرفته شده از بیمار نظیر خون، ادرار، سرم و ... استفاده می‌شود. با روش رادیوایمونواسی، اندازه‌گیری مقادیر بسیار کم هورمون‌ها و مواد داخل مایعات بدن، امکان‌پذیر است. RIA بطور گسترده‌ای در آزمایشگاه‌های پزشکی، برای تعیین هورمون‌ها، داروها، ویروس‌ها و دیگر گونه‌های آلی بکار می‌رود.

کاربرد رادیوداروها در پزشکی هسته‌ای (درمان)

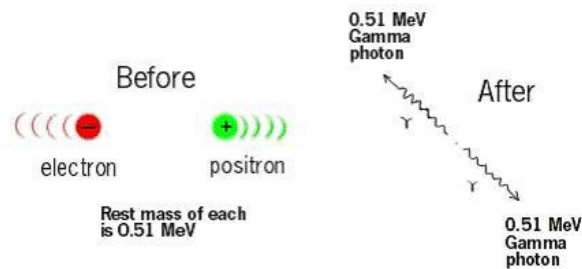
در پزشکی هسته‌ای، از بعضی از رادیوداروها هم در تشخیص و هم در درمان بیماری‌ها استفاده می‌شود. یکی از مهم‌ترین رادیوایزوتوپ‌ها در این زمینه، ید ۱۳۱ می‌باشد که کاربرد وسیعی در درمان پرکاری و سرطان تیروئید دارد. به عبارت کلی‌تر، در پزشکی هسته‌ای از پرتوهای گاما، جهت تصویربرداری از اعضاء بدن و از پرتوهای بتا، جهت درمان بیماری‌ها استفاده می‌شود.

در ابتدا، کاربرد رادیوایزوتوپ‌ها برای معالجه‌ی سرطان‌های استخوان، اصولاً بر پایه‌ی وضعیت مداوم یا غیرمداوم بیماری، مورد نظر بود. ایزوتوپ‌های کلسیم و استرانسیوم در پزشکی، برای درمان امراض استخوان، از ابتدای دهه ۱۹۴۰ مورد استفاده قرار گرفت. در نتیجه برنامه‌های تحقیقاتی در دهه‌ی بعدی، استفاده از این عوامل، روشی برای ترکیبات فسفر (^{32}P) را ارائه داد. در دهه‌ی ۱۹۷۰، ^{89}Sr بعنوان یک عامل مفید نشان‌دار، به منظور درمان کمکی درد برای متاستاز سرطانی مجدداً معرفی شد. اگر چه ^{32}P و ^{89}Sr نشان دادند که در کاهش درد توأم با متاستازهای پروستات و سینه مؤثر هستند، ولی این رادیوداروها برای کاربرد در سایر انواع سرطان‌ها مؤثر نیستند. همچنین خواص فیزیکی رادیواکتیو آنها اثرات مضر نامطلوبی بر سلول‌های مغز استخوان و متوقف کردن بازسازی مغز استخوان دارد.

روش تصویربرداری با گسیل پوزیترون (PET) یا پتاسکن

دستگاه تصویربرداری با گسیل پوزیترون، متشکل از هزاران دتکتور حساس به اشعه گاما است، که به صورت استوانه حول یک محور قرار گرفته است، و هنگام تصویربرداری، هدف تصویربرداری در محور قرار می‌گیرد.

در پتاسکن از رادیوداروهای تابش‌گر پوزیترون استفاده می‌شود. موادی که پوزیترون‌زا هستند، در هسته‌ی آن‌ها پروتون اضافی وجود دارد، که باعث ناپایداری هسته‌ی اتم، به واسطه دافعه ایجاد شدن بین بارهای مثبت، که اندکی از حالت معمولی زیادتر شده است، می‌گردد. به همین دلیل، در داخل هسته، یک پروتون تبدیل به نوترون می‌شود و بار پروتون به صورت ذره پوزیترون از هسته خارج می‌شود. پوزیترون‌ها ذراتی با بار مثبت و جرم معادل یک الکترون هستند، که بسیار ناپایدار بوده و پس از جدا شدن از هسته‌ی اتم، سریعاً با یک الکترون واکنش کرده و پدیده فنا رخ می‌دهد. طی این فرایند، هر دو ذره نابود شده و ۲ فوتون گامای ۵۱۱ کیلو الکترون ولت با زاویه ۱۸۰ درجه آزاد می‌گردد.



از آنجایی که برای آشکارسازی، تلاشی جفتی احتیاج به رادیو ایزوتوپ‌های با نیمه‌عمر کمتر از دو ساعت می‌باشد، پتاسکن را اغلب در مجاورت یک دستگاه شتاب‌دهنده نصب می‌کنند. پرمصرف‌ترین این ایزوتوپ‌ها فلور-۱۸ است، که نیمه‌عمر آن حدود ۱۱۰ دقیقه است. خرید و نصب اینگونه شتاب‌دهنده‌ها، از لحاظ فضای مورد نیاز و هم از نظر تأمین تجهیزات و لوازم مورد نیاز، پرهزینه است.



نمایی از یک دستگاه PET

هنگام نابودی پوزیترون، در هدف (عامل پوزیترون‌زا به بدن مریض تزریق شده‌است) دو پرتو گاما با انرژی ۵۱۱ کیلو الکترون ولت، در راستای هم و با زاویه ۱۸۰ درجه منتشر می‌شود. حال اگر منبع پوزیترون، دقیقاً در امتداد این محور قرار گیرد، زمان رسیدن به دتکتورها، که در دو جهت مخالف قرار دارد، مساوی است و مبدأ نشر پوزیترون، مرکز تشخیص داده می‌شود. اگر اندکی از مرکز فاصله گیرد، فاصله‌ی مبدأ نشر از دو طرف یکی نخواهد بود و زمان رسیدن دو پرتو با مبدأ یکسان، یکی نخواهد بود و دتکتورها با استفاده از اختلاف زمانی دو پرتو، تصویر سه‌بعدی از تمامی مبدأ پرتوها ایجاد می‌کند. به هر حال، چون نحوه‌ی توزیع رادیوداروها در بدن در بافتها متفاوت است، تصویر سه‌بعدی ایجاد شده، نشان‌دهنده‌ی نحوه‌ی توزیع رادیودارو در بدن است. نحوه‌ی توزیع و نتایج بیولوژیکی نیز، به ساختار شیمیایی رادیودارو ارتباط دارد. در این روش، یک ماده‌ی رادیواکتیو پوزیترون‌زا به بدن انسان تزریق می‌گردد و نحوه‌ی پخش ماده با تصویربرداری بررسی می‌گردد.

مشخصات برخی از رادیونوکلیدهای کاربردی در PET

واکنش تولید	نیمه عمر	بسامد	Eav (MeV)	E max (MeV)	نوکلید
$^{14}\text{N}(p,\alpha)$	۲۰/۵ دقیقه	۰/۹۹۸	۰/۳۸۶	۰/۹۶۰	^{11}C
$^{13}\text{C}(p,n)$	۹/۹۷ دقیقه	۰/۹۹۸	۰/۴۹۲	۱/۱۹۹	^{13}N
$^{16}\text{O}(p,\alpha)$	۱۲۲ ثانیه	۰/۹۹۹	۰/۷۳۵	۱/۷۳۲	^{15}O
$^{18}\text{O}(p,n)$	۱۱۰ دقیقه	۱/۰۰۰	۰/۲۵۰	۰/۶۳۴	^{18}F

"پایان دوره آموزشی"