پیل‌های اتمی یا باطری‌های رادیوایزوتوپی

نوشتهٔ :

دکتر محمد رضا حمیدیان

استادیار گروه فیزیک دانشگاه تهران

چکیده :

در باطری‌های معمولی انرژی شیمیائی مستقیماً به انرژی الکتریکی تبدیل میگردد درصورتیکه در پیلهای اتمی یا رادیو ایزتوپی از انرژی تابشهای رادیوایزوتوپ برای تولید الکتریسیته استفاده میشود. برای تبدیل انرژی تابشهای رادیوایزوتوپ به انرژی الکتریکی روشهای مختلفی وجود دارد که عبارتنداز: شارژ مستقیم با ذرات تابش شده از رادیوایزوتوپها ، ترموالکتریک ، ترمویونیک و فتوالکتریک. باطریهای معمولی دارای عمر نسبتاً کوتاه بوده واغلب ولتاژ آنها در ضمن کارکاهش می‌یابد بعلاوه برای داشتن‌قدرت زیاد احتیاج به تعداد بسیاری از آنها میباشد ، در مواردیکه احتیاج به پایداری و طول عمر است استفاده از باطریهای معمولی امکان‌پذیر نمی‌باشد . مزیت باطریهای اتمی برباطریهای متداول دراین است که این باطریها دارای عمر طولانی‌وقدرت ویژه زیاد ، حدود $10^3 Kwh / Kg$ ، و ابعاد کوچک می‌باشند. معهذا باوجود امتیازات نامبرده بعلت اینکه باطریهای اتمی ساخته شده تا حال دارای قدرت محدود بوده و خیلی گران تمام میشوند در غالب موارد جایگزین پیلهای متداول نگردیده‌اند.

در حال حاضر از پیل‌های اتمی درسفاین فضائی ، در پزشکی (نظیر دستگاه تنظیم ضربان قلب Pacemaker) ، دربرجهای دریائی برای هدایت کشتیها درشب،برای بکار انداختن دستگاههای‌اندازه‌گیری در ایستگاههای هواشناسی دور دست و سایر مواردیکه احتیاج به باطریهای با عمر طولانی است استفاده میشود.

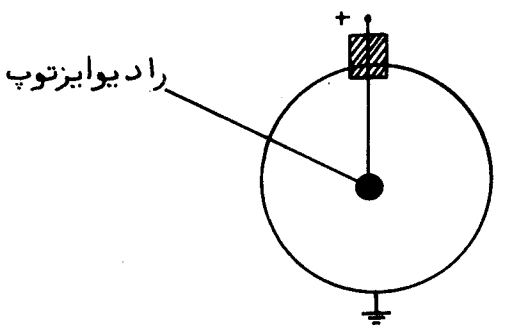
انتخاب رادیوایزوتوب مناسب برای اینگونه پیلها از نقطه نظر نیمه عمر، نوع تابش ، انرژی تابشی و فراوانی آن موضوع تحقیق در بسیاری از مراکز میباشد. این رادیوایزوتوپها را در راکتورهای اتمی بوسیله تابش نوترن و یا از پاره‌های فیسیون میله‌های سوخت (مصرف شده) راکتورها تهیه میکنند.

اساس ساختمان و طرز کار پیل‌های اتمی

بطوریکه اشاره شد تبدیل انرژی‌پرتوها به‌انرژی الکتریکی بروشهای مختلفی انجام میگیرد که در زیر باختصار شرح میدهیم.

۱- روش شارژ مستقیم

دراین روش رادیوایزوتوپ را در وسط یک محفظه فلزی خلاء قرار میدهند. رادیوایزوتوپ یک تابش کننده بتا است که باپرتاب الکترن محفظه فلزی‌را شارژ کرده و بدین ترتیب اختلاف سطح الکتریکی بوجود میآید (شکل ۱).



شکل ۱- اساس ساختمان پیل‌های اتمی که با روش شارژ مستقیم کار میکنند

مثلاً با استفاده از رادیوایزوتوپ استرنسیم ۹۰ با اکتیویته ۲۵۰ میلی کوری میتوان اختلاف سطح الکتریکی برابر ۳۶۵ کیلو ولت و جریانی حدود 10^{-9} آمپر بدست آورد، توان این باطری ۲ر. میلی‌وات و راندمان آن ۲۰ درصد است.

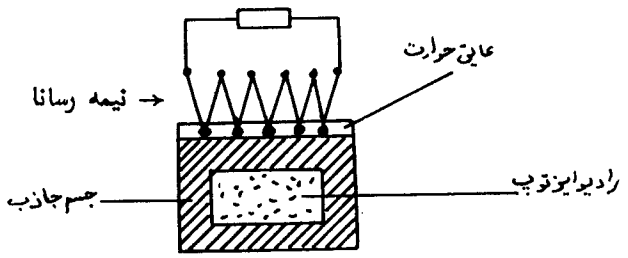
چون ایجاد خلاء داخل محفظه‌فلزی کار مشکلی است اخیراً در فضای بین رادیوایزوتوپ وجدار محفظه یک دی‌الکتریک جامد قرار میدهند در نتیجه حجم باطری خیلی کوچک میشود. دراین حالت ضخامت دی‌الکتریک با توجه به انرژی ذرات بتای رادیوایزوتوپ تعیین میشود.

۲- روش ترموالکتریک

دراین روش انرژی تابشها ابتدا به انرژی حرارتی تبدیل شده سپس بااستفاده از ترموکوپلهای نیمه هادی به انرژی الکتریکی تبدیل میشود (شکل ۲).

همانطورکه شکل نشان میدهد انرژی تابشها پس‌از جذب در یک جذب کننده به حرارت تبدیل شده اتصال هادی ترموکوپل راگرم میکند. جسم جاذب بوسیله یک عایق حرارت پوشیده میشود تا از

انتقال حرارت به اتصال‌های سرد ترموکوپل جلوگیری نماید. طبق پدیده Seebech اختلاف درجه حرارت دو اتصال ترموکوپل در مدار آن جریان الکتریسیته را بوجود میآورد.



شکل ۲- اساس کار باطریهای اتمی ترموالکتریک

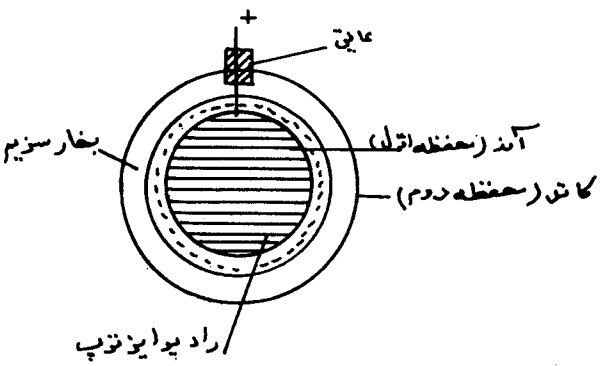
درایالات‌متحده‌امریکادرچارچوب‌برنامه SNAP (System for Nuclear Auxi Liary Power) از این نوع باطری بمقدار زیاد برای استفاده درنیروی دریائی ، سفینه های فضائی وایستگاههای هواشناسی ساخته شده است . دراین باطریها معمولاً از ترموکوپلهای Pb−Te استفاده میشود ، راندمان این باطریها از چند درصد تجاوز نمی کند. جدول (۱) مشخصات چند نوع از این باطریها را نشان میدهد.

جدول - ۱

کاربرد	توان الکتریکی (وات)	وزن (کیلوگرم)	وزن ویژه (گرم بروات)	طول عمر باطری	رادیوایزوتوپ	نیمه عمر رادیوایزوتوپ	اکتیویته رادیوایزوتوپ
مدل نمایشی	۲ر۵	۱ر۸	۷۲۰	۰ر۵ سال	^{210}Po	روز ۱۳۸	کیلوکوری۲ر۳
»	۲ر۷	۲	۷۴۰	۵ »	^{238}Pu	سال۸۹ر۶	» ۱ر۶
»	۱۴ر۵	۵ر۳۵	۳۷۰	۵تا۱۰ »	^{238}Pu	»	» ۸
»	۱۲۵	۹۰	۷۲۰	۱ »	$^{144}CeO_2$	روز ۲۸۴ر۷	» ۸۸۰
»	۱۸ر۶	۱۳ر۵	۷۲۵	۹۰ روز	^{242}Cm	» ۱۶۲	» ۳ر۵
»	۱۹	۷ر۵	۴۰۰	۱۰۰ »	^{242}Cm	»	» ۳ر۷
چراغ دریائی	۱۰	۵۴ر۵	۵۴۵۰	۱۰ سال	$^{90}Sr_2O_3$	سال ۲۸	» ۴۰
ایستگاه هوا شناسی	۵	۲۵	۵۰۰۰	۲ »	$^{90}Sr_2O_3$	»	» ۱۷ر۵

۳ـ روش ترمویونیک

در باطریهای ترمویونیک مانند باطریهای ترموالکتریک انرژی تابشها به انرژی حرارتی تبدیل میشود . دراین باطریها رادیوایزوتوپ در داخل محفظه‌ای قرار دارد که انرژی تابشها در آن به انرژی حرارتی تبدیل شده و در نتیجه گرم شدن از پوشش محفظه الکترن تابش میشود ، این الکترنها بوسیله محفظه دیگری که محفظه اول را دربر میگیرد جذب میگردد و بین ایندو اختلاف سطح الکتریکی بوجود میآید (شکل ۳) .



شکل ۳ـ اساس کار باطریهای ترمویونیک

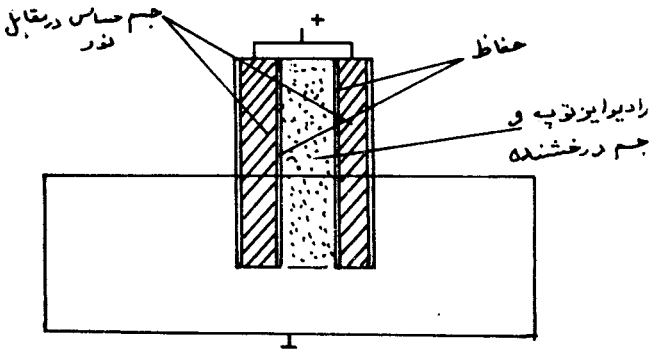
برای جلوگیری از یونیزاسیون هوای بین دو محفظه این فضا را از بخار سزیم پر میکنند . بخار سزیم بعلت دارا بودن قابلیت هدایت الکتریکی خوب از تجمع الکترنها جلوگیری مینماید .

درکشور آمریکا در برنامه SNAP باطریهائی‌از این نوع با علامت اختصاری SNAP—TIP (SNAP—Thermoionic Isotope Power) ساخته‌شده که درآن‌ازیک گرم اکسید کوریم(Cm_2O_3^{۲۴۲}) با اکتیویته ۳۳۰۰ کوری بعنوان چشمه حرارت بصورت ورقه استفاده میشود . پوشش رادیوایزتوپ(محفظه اول) از تنگستن ساخته میشود که درجه حرارت آن تا ۱۲۰۰°C میرسد . درجه حرارت کاتد باطری که در دو طرف آند بفاصله ۱۰ تا ۱۵ میکرن قرار میگیرد ۵۰۰°C میباشد . راندمان کل این نوع باطریها ۴٫۲ درصد و توان خروجی ۵ وات است . ازهرجفت آندوکاتد در این نوع باطری میتوان ولتاژی حدود ۰٫۷ ولت بدست آورد . وزن این باطری ۴۰۰ گرم است و نسبت به باطریهای ترموالکتریک وزن ویژه بمراتب کمتری دارد .

۴ـ روش فتوالکتریک

دراین نوع باطریهاانرژی پرتوها ابتدابانرژی نورانی تبدیل شده و سپس بااستفاده‌ازعناصرحساس در مقابل نور ، که با جذب انرژی نورانی الکترن تابش میکنند ، به انرژی الکتریکی تبدیل میشود ، نظیر

باطری خورشیدی ، (شکل ٤) . برای جلوگیری از خراب شدن عناصر حساس در اثر تابش ذرات بتای رادیوایزوتوپها ، آنها را بوسیله حفاظ شیشه‌ای از رادیوایزوتوپها جدا مینمایند .



شکل ٤- اساس کار باطریهای فتوالکتریک

در یکی از این نوع باطریها رادیوایزوتوپ از ^{147}Pm و CdS بعنوان جسم درخشنده و از Si بعنوان جسم حساس در مقابل نور استفاده میشود . دراین نوع باطریها بااستفاده از رادیوایزوتوپ با اکتیویته ویژه ۱۰۰ کوری برگرم توانسته‌اند توان الکتریکی برابر ۷ره میکرو وات بازاء هرسانتی‌متر مربع جسم حساس تولید نمایند . ولتاژ این باطری یک ولت و راندمان آن یک درصد است .

انتخاب رادیوایزوتوپ

دربین ۱۰۰۰ رادیوایزوتوپ مختلفی که تاحال شناخته شده‌اند عملاً تعداد کمی در تهیه قدرت قابل استفاده می‌باشند . در انتخاب رادیوایزوتوپ اولاً تابش آن از نقطه نظر قدرتی که مورد نیاز می‌باشد مؤثر است ثانیاً در تهیه رادیوایزوتوپ قیمت تمام شده درنظر گرفته میشود تا از لحاظ اقتصادی بهای این نوع پیلها در مقایسه با پیلهای متداول قابل رقابت باشد . بنابراین در انتخاب رادیوایزوتوپ بین تعداد زیادی رادیوایزوتوپهای موجود شرایطی‌را بایستی درنظر گرفت که محققاً این شرایط برای کار بردهای صنعتی متفاوت یکسان نمیباشد .

شرایط انتخاب

برای انتخاب رادیوایزوتوپها در تهیه قدرت مشخصات آنها را میتوان از دو لحاظ بررسی نمود :

(الف) مشخصات باطنی که عبارتند از : نیمه عمر ، نحوه تجزیه، قدرت بازاء واحدجرم ، کل انرژی ذخیره‌ای و مسایل حفاظتی .

(ب) مشخصات قابل ترمیم : فراوانی ، حالت شیمیائی و فیزیکی و بالاخره قیمت تمام شده . با

درنظرگرفتن مشخصات‌فوق میتوان رادیوایزوتوپ مناسب‌را انتخاب نمود که ضمناً این انتخاب بایستی‌تابع شرایط‌کار و قدرت مولد و همچنین رقابت با مولدهای معمولی باشد.

نیمه عمر

هریک از رادیوایزوتوپهاتحت‌قانون‌خاصی تجزیه شده تابش مینماید وشدت‌تابش بوسیله‌هیچ یک ازعوامل فیزیکی قابل تغییر نمی‌باشد. قدرت ناشی از تجزیه رادیوایزوتوپها را نمی‌توان متوقف ساخت و این قدرت طبق قانون اکسپنانسیل کاهش می‌یابد. بنابراین نیمه عمر سوخت ایزوتوپی مولدهای اتمی بایستی بادرنظرگرفتن زمان پیش‌بینی شده برای کار مولد انتخاب گردد. بدین ترتیب رادیوایزوتوپهائی که نیمه عمرشان کمتر از چند ماه (مثلاً سه ماه) میباشد عملاً مورد استفاده قرار نمی‌گیرند. از طرف دیگر رادیوایزوتوپهائی که‌دارای نیمه عمر خیلی زیاد هستند (بیش‌از یکصد سال) بواسطه اینکه قدرت ویژه‌شان کم است نیز مناسب نمی‌باشند.

نحوه تجزیه

در انتخاب رادیوایزوتوپ نه‌تنها مقدار انرژی درهرتجزیه و تابش مورد نظر است بلکه مقدار انرژی که در جذب کننده انرژی جذب میشود نیز اهمیت دارد. تابش کننده‌های آلفا بیشترین ارجحیت را از این نقطه‌نظر دارند زیرا ذرات‌آلفادر ضخامتی حدود چند دهم میلیمتر از یک ماده جامد جذب میگردند. ذرات بتا نیز براحتی در مواد جذب میشوند ولی مقداری از انرژی حاصل از تجزیه هسته تابش کننده بتا بصورت انرژی نوترینو از محیط خارج میشود. مقدار زیادی از انرژی تابش کننده‌های گاما بخارج ازمحیط جذب کننده نفوذ می‌نماید و بقدرت تبدیل نمی‌شود. بنابراین سوخت ایزوتوپی مولدهای اتمی از تابش کننده‌های آلفا و بتا تشکیل میگردد و رادیوایزوتوپهائی که فقط گاما تابش میکنند مورد استفاده قرار نمی گیرند.

قدرت ویژه

قدرت ویژه رادیوایزوتوپ که بعنوان سوخت در پیل های اتمی بکار می‌رود قدرت بازاء یک گرم (وات بر گرم) بیان میشود و ابعاد پیل کاملاً بستگی بآن دارد. در اغلب موارد که ابعاد پیل بایستی کوچک باشند رادیوایزوتوپ باید دارای قدرت‌ویژه خیلی زیاد باشد که البته در اینگونه موارد برای‌داشتن درجه حرارت کم‌در سطح پیل انتخاب سیستم تبدیل کننده انرژی حرارتی به انرژی انکتریکی اهمیت‌زیادی

دارد . عملاً حداقل قدرت‌ویژه حرارتی رادیوایزوتوپ‌برای انتخاب‌آن‌در پیل های اتمی یکدهم وات‌برگرم درنظر گرفته میشود .

ذخیره انرژی

ذخیره انرژی رادیوایزوتوپ برابر کل انرژی است ، برحسب کیلووات ساعت ، که رادیو ایزتوپ در تمام طول‌عمر خود میتواند پس دهد . ذخیره‌انرژی رادیوایزوتوپ تابع نیمه عمر وقدرت ویژه آن‌است . ذخیره انرژی فاکتور بسیار مهمی است که در محاسبه ارزش پیل نقش مهمی دارد و تا آنجا که ممکن است بایستی بزرگ باشد .

خطرات و حفاظت در مقابل‌آن

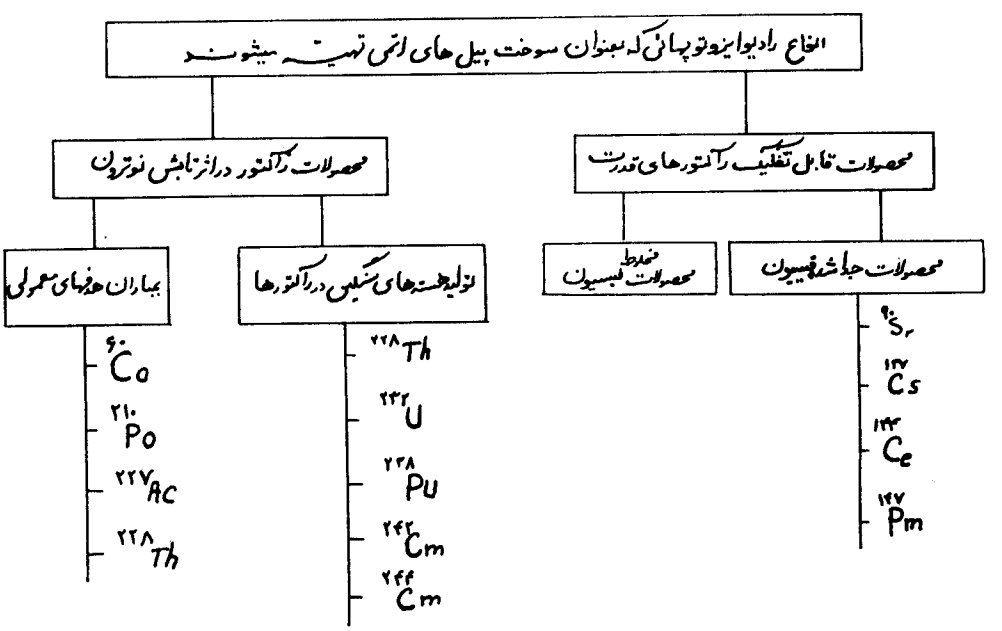
مواد رادیواکتیو از خود اشعه نافذ تابش میکنند که خطرناك هستند . سمیت رادیواکتیویته‌ای مواد رادیواکتیو بیش‌از سمیت شیمیائی هرنوع سم متداول میباشد ولی میتوان با قرار دادن حفاظ مناسب در اطراف سوخت رادیوایزوتوپی در پیل های اتمی و یا باایجاد شرایط مناسب ، از این خطرات محفوظ ماند . بهرحال هرچه سمیت رادیوایزوتوپ از نقطه نظر تابش های آن کمتر باشد مشکلات تکنیکی حفاظ در پیل کمتر خواهد بود .

برای تعیین اندازه خطرات تابشهای رادیوایزوتوپها نه تنها بایدکیفیت و کمیت آنها را درنظر گرفت بلکه بایستی به‌اثرات ناشی از نفوذ آنها در قسمتهای مختلف‌پیل وهمچنین محیط اطراف توجه‌نمود . بهمین دلیل مثلاً هنگام استفاده از رادیوایزوتوپی که فقط آلفا تابش میکند ، چون رادیوایزوتوپ معمولاً بصورت یک قطعه با ابعاد نسبتاً زیاد بکار میرود ، تابشهای ثانویه مانند نوترن وگاما که در نتیجه‌برخورد ذرات آلفا با عناصر سبک بوجود میآیند نیز بایستی درنظر گرفته شوند . همچنین درمورد تابش کننده‌های خالص بتا چون نتیجه برخوردابن ذرات با محیط مادی همراه با تابش گاما میباشد(پدیده اشعه ترمزی) اثر گاما نیز مطرح خوا هد بود . بنابراین مسئله حفاظت حتی در مورد تابش کننده‌های آلفا یا بتای خالص بایستی با درنظرگرفتن تابشهای ثانویه حل شود . از آنجا که ضخامت حفاظ بایستی آنقدر باشد تا شدت تابشها را باندازه دز مجاز در اطراف پیل پائین آورد وزن حفاظ و درنتیجه وزن پیل تابع قدرت ویژه ، انرژی و نوع تابشها خواهد بود . بدین ترتیب از نقطه نظر حفاظت در مقابل تابشها ، رادیوایزتوپهائی که گامای پر انرژی تابش می‌نمایند در پیل های اتمی مورد استفاده قرار نمی گیرند مگر در حالتی که زیادی وزن پیل اهمیتی نداشته باشد .

مشخصات قابل ترمیم

یک رادیوایزتوپ با مشخصات با طنی مناسب درصورتی بعنوان سوخت در ساختمان پیلهای اتمی مورد استفاده قرار میگیرد که تهیه آن بمقدار زیاد با قیمت مناسب امکان‌پذیر بوده و امکان اینکه آنرابحالت فیزیکی‌وشیمیائی معینی ، متناسب با شرایط، درآورند وجود داشته باشد. در طبیعت مواد رادیواکتیوی که از لحاظ خواص باطنی برای استفاده در پیل های اتمی مناسب هستند زیاد وجود دارد ولی تهیه آنها بمقدار کافی بطور خالص آنقدر مشکل است که عملاً مورد استفاده واقع نمی‌شوند ، بنابراین رادیوایزوتوپهای پیل های اتمی بطور مصنوعی تهیه میگردند.

در بین رادیوایزوتوپهای مصنوعی آنهائی که تهیه‌شان‌بوسیله تابش نوترن‌در راکتورها امکان‌پذیر نیست ، بدلیل امکانات تکنیکی عصر حاضر ، بعنوان سوخت پیلهای اتمی مورد استفاده قرار نمی گیرند. رادیوایزوتوپهای ساخته شده در راکتورها ممکن است یا در اثر تابش نوترنها روی یک هدف معین‌بوجود آمده باشند یا اینکه این رادیوایزوتوپها در اثر تبدیلات هسته‌ای مواد سوختنی راکتورهای قدرت ایجاد شوند. طریقه سومی نیزبرای تهیه رادیوایزتوپهاوجود دارد که دراین طریقه ماده سوخت راکتورهاتبدیل به عناصر رادیوایزوتوپ میگردد. شکل زیر مثال هائی را از این سه روش نشان میدهد.



انتخاب ماده‌ای که بعنوان هدف در بمباران بوسیله نوترن راکتورها مورد استفاده قرار میگیرد تابع قدرت مورد نظر باطری میباشد. مقدار محصولات متنوع فیسیون تابع قدرت راکتور است که بهرحال در بین این محصولات رادیوایزوتوپهای مناسب بسیاری برای تهیه سوخت باطری وجود دارند. بهای‌مواد سوختنی باطری‌ها ، که برحسب قیمت بازاء قدرت حرارتی برحسب وات بیان میشود ، تابع قیمت بازاء گرم و

قدرت ویژه آن میباشد که ایندوفاکتور مسلماً تابع امکانات تکنیکی در تهیه مقدار نسبتاً زیاد رادیوایزوتوپ و همچنین وضع شیمیائی آن از نقطه نظر ساختن شکل ظاهری مناسب با شرایط کار باطری خواهد بود. درهرصورت مهمترین فاکتوری که قیمت رادیوایزوتوپ را معلوم میکند مقدار انرژی حاصل از باطری میباشد (برحسب قیمت بازاء کیلووات ساعت) که تابع قیمت تمام شده درتهیه رادیوایزوتوپ و نیمه عمر آن ، زمان کار و همچنین امکان اینکه مجدداً آنرا ترمیم نمود میباشد. در اغلب موارد رادیوایزوتوپی که بعنوان سوخت در پیل بکار میرود باید قابلیت جامد شدن با دانسیته جرمی خیلی زیاد را داشته باشد و ضمن کار در شرایط پیل ، تغییری در آن بوجود نیاید.

از بحث فوق نتیجه میگیریم که وقتی یک ماده بعنوان سوخت پیل های اتمی درنظر گرفته میشود که حتی‌الامکان شرایط زیر را دارا باشد.

۱- نیمه عمر بین ۱۰۰ روز تا ۱۰۰ سال.

۲- قدرت ویژه حرارتی (W_t/g) بیش از یکدهم.

۳- انرژی ذخیره شده بیش از ۵ کیلووات ساعت (حرارتی) بازاء یک گرم.

٤- حداقل حفاظ خارجی را ایجاب نماید.

۵- حداقل سمیت رادیواکتیویته را داشته باشد.

٦- قابل تهیه بمقدار زیاد با قیمت مناسب.

۷- ترکیب شیمیائی پایدار در شرایط کار باطری.

سوخت باطری‌های اتمی

شرایط ذکر شده در انتخاب مواد سوختنی پیل های اتمی تعداد رادیوایزوتوپهای مفید را بمقدار خیلی کم کاهش میدهد. بررسی‌های زیادی برای انتخاب رادیوایزتوپهای مناسب در آزمایشگاههای تحقیقاتی اروپا و امریکا انجام شده است ، جدول(۲) مشخصات مناسبترین رادیوایزوتوپها را نشان میدهد.

کبالت ٦۰

کبالت ٦۰ را با بمباران نمودن کبالت طبیعی بوسیله نوترن در راکتورها تهیه میکنند :

$$^{۵۹}CO + n \longrightarrow {}^{٦۰}CO$$

بااین روش کبالت ٦۰ خالص بوجود نمی‌آید مگر اینکه روش خاصی برای غنی کردن کبالت ٦۰ اجرا گردد. فراوانی کبالت ٦۰ ایجاد شده تابع فلوی نوترن راکتور و مدت زمان تابش دهی و همچنین وزن کبالت ۵۹ میباشد. این عوامل را میتوان طوری انتخاب نمود که اکتیویته ویژه(اکتیویته بازاء یک گرم)

جدول - ۲

رادیوایزوتوپ	قدرت‌ویژه (قدرت‌حرارتی برحسب وات بر گرم)	نیمه عمر (سال)	حفاظ لازم	خطرات بیولوژیکی در مقایسه با کبالت ۶۰	قیمت تقریبی (دلار بازاء یک وات حرارتی)
کبالت ۶۰	۱۷٫۴	۵٫۳	سنگین	۱	۶٫۴
استرونسیم ۹۰	۰٫۹۵	۲۸	»	۱۰	۵۲
سزیم ۱۳۷	۰٫۴۲	۳۰	»	۰٫۶	
سریم ۱۴۴	۲۵	۰٫۷۸	»	۱٫۵	
پرمتیم ۱۴۷	۰٫۳۳	۲٫۵	سبک	۰٫۱۵	
پولونیم ۲۱۰	۱۴۰	۰٫۳۸	»	۱٫۵	۳۶ — ۲۱
اکتینیم ۲۲۷	۱۴٫۳	۲۱	متوسط	$۱٫۵ \times ۱۰^{۳}$	۱۵۰۰ — ۱۰۰۰
توریم ۲۲۸	۱۷۰	۱٫۹	سنگین	»	»
اورانیم ۲۳۲	۴٫۴	۷۴	»	۳×۱۰^{۲}	۱۰۰۰ — ۵۰۰
پلوتونیم ۲۳۸	۰٫۵۶	۸۹	سبک	۴×۱۰^{۳}	۱۸۰۰ — ۱۰۰۰
کوریم ۲۴۲	۱۲۰	۰٫۴۵	متوسط	۷۵	۲۰۰۰
کوریم ۲۴۴	۲٫۸	۱۸	»	$۱۰^{۳}$	

باندازه کافی برسد تا مقدار کبالت ۶۰ بوجود آمده برای سوخت پیل کافی باشد. جدول (۳) مشخصات کبالت ۶۰ حاصل را در شرایط مختلف نشان میدهد.

جدول - ۲

حداقل شرایط تابش دهی		اکتیویته کبالت ۶۰ (کوری بازاء یک گرم)	قدرت ویژه (وات بازاء یک گرم)	دانسیته قدرت (وات برسانتیمترمکعب)
فلوی نوترن نوترن برسانتیمتر مربع برثانیه	زمان (سال)			
۵×۱۰^{۱۳}	۱٫۵	۱۰۰	۱٫۶	۱۴
$۱۰^{۱۵}$	۲	۲۰۰	۳٫۱	۲۷
۲×۱۰^{۱۴}	۲٫۵	۴۰۰	۶٫۲	۵۵
$۱۰^{۱۵}$	۱٫۵	۷۰۰	۱۱	۹۶

درحال‌حاضر کبالت ۶۰ بمقدار نسبتاً زیاد و با قیمت مناسب قابل تهیه میباشد ، قیمت متداول در کشور امریکا حدود ۶٫۴ دلار بازاء هروات است.

یکی از اشکالات عمده استفاده کبالت ۶۰ بعنوان سوخت پیلهای اتمی ضخامت زیاد حفاظ لازم برای کاهش تابش‌های با نفوذ آن(گاما) میباشد ، ولی میتوان با انتخاب کبالت ۶۰ با اکتیویته ویژه‌زیاد ابعاد آن و در نتیجه حفاظ لازم را کاهش داد.

رادیوایزوتوپهای حاصل از فیسیون

تهیه محصولات فیسیون اعم ازاینکه بصورت مخلوط و یا جدا شده (استرنسیم ۹۰ ، سزیم ۱۳۷ ، سریم ۱۴۴ و پرمتیم ۱۴۴) باشند مستقیماً تابع قدرت راکتور میباشد مقدار رادیو ایزوتوپهائی که بعنوان محصولات فیسیون در یک راکتور قدرت بدست میآید همچنین بستگی به امکانات موجود در حل مشکل پس ماند رادیواکتیو حاصل دارد.

افزایش سریع تعداد راکتورهای قدرت ، بصورت نیروگاههای برق اتمی در سالهای اخیر ، نه‌تنها برای جبران کمبود الکتریسیته ممالک پیشرفته مؤثر بوده بلکه بدین‌ترتیب ظرفیت تهیه محصولات فیسیون را نیز بالا برده است. جدول (۴) مقدار چهار ایزوتوپ مورد توجه راکه بطور سالیانه درکشور فرانسه بدست میآید نشان میدهد.

جدول - ٤

رادیوایزوتوپ	قدرت بازاء کیلووات (حرارتی)	
	تاسال ۱۹٦۷	تاسال ۱۹۷۰
استرونسیم ۹۰	۳۰	۹۸
سزیم ۱۳۷	۲۲	۷۲
سریم ۱٤٤	۱۹۰	٥۹۰
پرمتیم ۱٤۷	۲٫۷	۹

پولونیم ۲۱۰

پولونیم ۲۱۰ یکی از عناصری است که در سری اورانیم ۲۳۸ وجود دارد ولی مقدار آن در سنگ معدن اورانیم آنقدر کم است که از لحاظ اقتصادی جدا نمودن پولونیم ۲۱۰ از سنگ معدن بصرفه نمی‌باشد. بنابراین پولونیم ۲۱۰ که بعنوان چشمه حرارتی در پیل‌های اتمی یا در سایر موارد بکار میرود بطریق مصنوعی با تابش دادن بیسموت ۲۰۹ در راکتور بدست میآید :

$$^{209}Bi + n \longrightarrow {}^{210}Bi \xrightarrow{\beta^-} {}^{210}PO$$

پولونیم ۲۱۰ یکی از آیزوتوپهائی است که اولین بار بعنوان چشمه حرارتی مورد استفاده قرار گرفت. زیرا اولاً قدرت ویژه آن نسبتاً زیاد و برابر ۱٤۱ وات حرارتی بازاء یک گرم است ثانیاً چون تقریباً یک تابش کننده آلفای خالص است حفاظ زیادی لازم ندارد. در سالهای اخیر تهیه پولونیم ۲۱۰ مورد توجه بوده و یکی از چند رادیو ایزوتوپی است که در پیل های اتمی با سیستم تبدیل کننده ترمویونیک بقدرت چندین صدوات حرارتی مورد استفاده قرار میگیرد. باید توجه داشت که بهره واکنش هسته‌ای فوق کم است بهمین دلیل باید مقدار بیسموت زیادی در راکتور بعنوان هدف قرار داد تا پولونیم حاصل برای استفاده بعنوان سوخت پیل کافی باشد. تابش دهی معمولاً در راکتورهائی که با سیستم خنک کننده گاز بوده و کند کنندهٔ گرافیت دارند انجام میگیرد تا بدین ترتیب قیمت پولونیم حاصل در سطح قابل قبول قرار گیرد.

اکتینیم ۲۲۷

از نقطه نظر دانسیته قدرت اکتینیم ۲۲۷ یکی از چشمه های حرارت جالب است. نیمه عمراین رادیوایزوتوپ (حدود ۲۲ سال) باندازه کافی کوتاه است تا اکتیویته ویژه زیاد را دارا باشد در عین حال بمقدار کافی طولانی است که بمدت چند سال یک چشمه حرارت با قدرت پایدار باشد. اکتینیم ۲۲۷ ضمن تجزیه متوالی وپنج بارتابش آلفابه سرب ۲۰۷ پایدار تبدیل میشود که از این لحاظ باتمام رادیوایزوتوپهائی که آلفا تابش مینمایند و بعنوان یک چشمه حرارت بکار میروند ارجحیت دارد. تمام هسته های حاصل از تجزیه اکتینیم ۲۲۷ دارای نیمه عمر کوتاه هستند بطوریکه پس از ۳۰۰ روز تعادل رادیواکتیو برقرار میشود و بدین ترتیب قدرت ویژه اکتینیم خالص از ۴۵۰ ر. وات بازاء یک گرم به ماکزیممی برابر ۱۴۵۰ وات میرسد. این خاصیت اکتینیم اولاً مشکلات مربوط به تخلیص اکتینیم را از لحاظ حفاظت در طی مراحل مختلف کاهش میدهد. ثانیاً چون شدت تابش گامای اکتینیم خالص تا رسیدن به تعادل رادیواکتیو کم است سوار کردن پیل از لحاظ مسایل حفاظتی خیلی آسان میباشد (در گامای یک گرم اکتینیم خالص صفر بوده ولی پس از ۲۰۰ روز در فاصله یک متر به ۲۶ رنتگن برساعت میرسد). یکی از مزایای اکتینیم ۲۲۷ قدرت ویژه زیاد آن میباشد که کاملاً برای سیستم تبدیل کننده ترمویونیک مناسب است.

باوجودیکه اکتینیم ۲۲۷ یکی از هسته های سری اورانیم ۲۳۵ میباشد ولی در سنگ معدن اورانیم مقدار اکتینیم آنقدر نیست که جدا نمودن آن از سنگ معدن از لحاظ اقتصادی بصرفه باشد. بنابراین اکتینیم ۲۲۷ را با تابش دادن رادیم ۲۲۶ بوسیله نوترن در راکتور تهیه میکنند و در پیل های اتمی بعنوان چشمه حرارت بکار میبرند:

$$^{226}Ra + n \longrightarrow {}^{227}Ra \xrightarrow{\beta^-} {}^{227}AC$$

این واکنش فوری میباشد زیرا نیمه عمر ^{227}Ra برابر ۴۱ دقیقه است. گرچه بواسطه سطح مقطع زیاد اکتینیم ۲۲۷ در جذب نوترن حرارتی مقداری از آن از بین میرود ولی چون هسته حاصل (توریم ۲۲۸) خود یک چشمه حرارتی جالب است این واکنش ثانویه باعث کاهش راندمان کار نمیشود. برای اینکه تاحدامکان از رادیم موجود درتبدیل به اکتینیم استفاده شود باید فلوی نوترن حرارتی تا آنجا که ممکن است زیاد باشد.

باوجود امتیازات نامبرده دوفاکتور وجود دارد که تهیه اکتینیم را تحت تأثیر قرار میدهد. چون برای تهیه اکتینیم، رادیوم نسبتاً زیاد لازم است در کشورهائی نظیر کشور امریکا که در آن ذخیره این ماده گران قیمت و مشکل از لحاظ تهیه کم است اینکار در حجم زیاد اجرا نمی گردد. از طرف دیگر چون

اساساً شدت گامای اکتینیم بیشتر از سایر چشمه های حرارت مانند پولونیم ۲۳۸ و یا کوریم ۲٤٤ با قدرت حرارتی خروجی مشابه میباشد ، پیل های اتمی با اکتینیم ۲۲۷ حفاظ بیشتری لازم دارند. متذکر میگردد باوجود اشکال اخیر وقتی پیل برای سفینه های فضائی ساخته میشود استفاده از اکتینیم نسبت به پولوتونیم و کوریم ترجیح دارد چون پیل در ابتدا احتیاج به حفاظ زیادی ندارد و در نتیجه وزن آن کم تر است.

توریم ۲۲۸ و اورانیم ۲۳۲

توریم ۲۲۸ و اورانیم ۲۳۲ متعلق به یک سری از سریهای رادیو اکتیو طبیعی میباشند و توریم ضمن تجزیه اورانیم بوجود میآید. اورانیم ۲۳۲ نیز پس از چند تجزیه به یک عنصر پایدار (سرب ۲۰۸) تبدیل میشود و در سری تجزیه آن شش عنصر تابش کننده آلفا وجود دارد ، قدرت خروجی اورانیم ۲۳۲ از ۶۰ر. وات (زمان تخلیص بروش شیمیائی) افزایش یافته و پس از ده سال به پنج وات بازاء هرگرم میرسد. اورانیم ۲۳۲ بواسطه دارا بودن نیمه عمر طولانی دارای قدرت خروجی نسبتاً پایدار (بین ٤ر٥ تا ٥ وات بازاء هرگرم) ، در فاصله زمانی پنج تا بیست وپنج سال از زمان تخلیص ، میباشد. با توجه باینکه قدرت خروجی اورانیم ۲۳۲ پس از پنج سال قابل ملاحظه میشود بنظر میآید که کاربرد آن مناسب نیست اما معمولاً باافزودن مقداری توریم ۲۲۸ قدرت آنرا در ابتدا به حدود ٤ر٥ وات بازاء یک گرم میرسانند. اورانیم ۲۳۲ با خواصی که ذکر شد یکی از رادیوایزتوپهائی است که در بین چشمه های حرارتی با عمر طولانی حتی بامبدل ترمویونیک جالب می باشد ولی اشکالات عملی موجود در کاربرد آن باعث عدم پیشرفت در توسعه آن بعنوان چشمه حرارت شده است. دز خیلی زیاد گاما در اورانیم ۲۳۲ ، در حالت تعادل رادیو اکتیو با عناصر موجود در سری تجزیه آن و گامای پر انرژی بعضی از این عناصر باعث میشود که ضخامت حفاظ لازم حتی خیلی بیشتر از استرونیسیم ۹۰ با قدرت خروجی برابر باشد. از نقطه نظر حفاظ لازم اورانیم ۲۳۲ نمی تواند با اکتینیم ۲۲۷ و پولوتونیم ۲۳۸ و یا حتی استرونسیم ۹۰ رقابت نماید. ازطرف دیگر تهیه اورانیم ۲۳۲ بوسیله تابش دادن توریم ۲۳۰ ، بطوریکه واکنش زیر نشان میدهد ، نسبتاً پیچیده است.

$$^{۲۳۰}\mathrm{Th} + \mathrm{n} \longrightarrow {}^{۲۳۱}\mathrm{Th} \xrightarrow{\beta^-} {}^{۲۳۱}\mathrm{Pa}$$

$$^{۲۳۱}\mathrm{Pa} + \mathrm{n} \longrightarrow {}^{۲۳۲}\mathrm{Pa} \xrightarrow{\beta^-} {}^{۲۳۲}\mathrm{u}$$

توریم ۲۳۰ یکی از عناصر سری اورانیم ۲۳۸ میباشد بنابراین در سنگ معدن اورانیم وجود داشته و در تخلیص اورانیم نیز با آن وجود خواهد داشت ، اما عملاً تهیه توریم ۲۳۰ بطور خالص امکان پذیر نیست

ولی میتوان بااستفاده از روش غنی کردن ایزوتوپی مقدار درصد آنرا افزایش داد. حداکثر مقدار توریم ۲۳۰ در توریم حاصل از سنگ اورانیم حدود ۱۰ درصد نسبت به توریم ۲۳۲ میباشد بنابراین در تابش دهی توریم ۲۳۰ بایستی واکنش نوترن با توریم ۲۳۲ را نیز درنظر گرفت :

$$^{۲۳۱}\mathrm{Th}+\mathrm{n} \longrightarrow {}^{۲۳۳}\mathrm{Th} \xrightarrow{\beta^-} {}^{۲۳۳}\mathrm{Pa} \xrightarrow{\beta^-} {}^{۲۳۳}\mathrm{u}$$

علاوه بر اورانیم ۲۳۲ و اورانیم ۲۳۳ ایزوتوپهای سنگین‌تر اورانیم نیز بوجود میآیند زیرا سایر عناصر موجود نیز بشدت‌نوترن جذب می‌نمایند. بنابراین در بهترین شرایط مخلوطی از ایزوتوپهای اورانیم‌بوجود میآید که مجموعاً قدرت ویژه‌ای کمتر از قدرت ویژه استرنسیم ۹۰ بدست میآید.

درسال‌های اخیر برای تولید اورانیم ۲۳۲ با قدرت ویژه تا حدامکان نزدیک بمقدار تئوری ، پروتاکتینیم ۲۳۱ نسبتاً خالص را تحت تابش نوترن قرار میدهند.

پولوتونیم ۲۳۸

درحال حاضر پولوتونیم ۲۳۸ یکی از رادیوایزوتوپهائی است که بعنوان یک چشمه حرارتی در اغلب پیل‌های‌اتمی جدید برای مصارف فضائی‌و زمینی مورد استفاده قرار میگیرد. باوجودیکه پولوتونیم ۲۳۸ فوق‌العاده سمی بوده و قیمت آن زیاد میباشد بواسطه دارا بودن خواص مهم کار برد آن زیاد است. نیمه عمرپولوتونیم ۲۳۸ حدود ۹۰ سال بوده بنابراین قدرت آن در طول مدت استفاده ثابت میباشد ، قدرت ویژه آن در فرمهای معمولی (فلز یا اکسید) خیلی نزدیک به مقدار نظری میباشد و حفاظ لازم برای این رادیو ایزوتوپ خیلی کم است. پولوتونیم ۲۳۸ با تابش دادن نپتونیم ۲۳۷ بوسیله نوترن در راکتور بدست میآید :

$$^{۲۳۷}\mathrm{NP}+\mathrm{n} \longrightarrow \mathrm{NP} \xrightarrow{\beta^-} {}^{۲۳۸}\mathrm{Pu}$$

از آنجا که نپتونیم ۲۳۷ یکی از محصولات اورانیم در راکتور میباشد ، مقدار آن تابع مقدار قدرت راکتور، امکانات جداکردن محصولات سوخت راکتور و همچنین فلوی نوترن باندازه کافی زیاد برای تبدیل نپتونیم به پولوتونیم بمقدار کافی‌در زمان معین میباشد. درکشور امریکا کوششهای زیادی برای تولید پولوتونیم ۲۳۸ بعمل میآید و بطوریکه‌تخمین‌زده شده است تاسال ۱۹۸۰ مقدار تولید پولوتونیم ۲۳۸ بین ۰۵ تا ۲۲۰ کیلو وات حرارتی درسال خواهد رسید. با توجه به اطلاعاتی که ازکشورهای انگلستان ، فرانسه و مراکز اتمی سایرکشورهای اروپائی میرسد تهیه ۲۰ کیلوگرم نپتونیم بطور سالیانه در اروپا ممکن بنظر

میرسد ، بنابراین امکان تهیه ۰٫۱ کیلوگرم پولوتونیم در سال وجود دارد که معادل ۸٤۰ وات حرارتی است. ارزش یک گرم پولوتونیم بیشتر از ۱۰۰۰ دلار تخمین زده میشود.

کوریم ۲٤۲ و کوریم ۲٤٤

کوریم ۲٤۲ یکی از ایزوتوپهائی است که بواسطه دارا بودن قدرت ویژه زیاد و سمیت کم ، در مقایسه با سایر تابش کننده‌های آلفا ، برای مصارف کوتاه مدت مورد توجه میباشد . چون کوریم ۲٤۲ ایزوتوپ عنصری است که در طبیعت وجود ندارد بنابراین بعنوان سوخت پیل اتمی در برنامه NASA برای سفینه های‌فضائی بدون سرنشین که درسطح ماه بطورآرام فرود میآیند انتخاب گردید. زیرابدین‌ترتیب توزیع طبیعی ایزوتوپهای سطح ماه ، در صورت حوادث احتمالی ، بهم نمی‌خورد. شدت تابش نوترن (فیسیون‌خود بخود)وگامای کوریم ۲٤۲ خیلی بیش‌از پولونیم ۲۱۰ میباشد وبواسطه مشکلات دراستعمال از نقطه‌نظر تابش و حرارتی که بتدریج بوجود میآید فقط بصورت محلول رقیق بکار میرود. کوریم ۲٤۲ از تابش دادن آمرسیوم ۲٤۱ بوسیله نوترن در راکتور بوجود میآید :

$$^{۲٤۱}\mathrm{Am} - \mathrm{n} \longrightarrow {}^{۲٤۲}\mathrm{Am} \xrightarrow{\beta^-} {}^{۲٤۲}\mathrm{Cm}$$

آمرسیم ۲٤۱ خود یکی از رادیوایزوتوپهای مصنوعی است ، عنصر اولیه برای تهیه آن اورانیم ۲۳۸ میباشد که با تابش نوترن با فلوی زیاد در زمان نسبتاً طولانی قسمتی‌از آن ممکن است به پولوتونیم ۲٤۱ تبدیل گردد که این عنصر با تابش بتا به‌آمرسیوم تبدیل میشود. در ضمن تهیه آمرسیوم ۲٤۱ پولوتونیم ۲۳۹ نیز بعنوان‌هسته واسطه بوجود میآید ، در راکتورهای‌قدرت که سوخت آنها پولوتونیم میباشد کوریم ۲٤۲ بمقدار زیاد تولید میشود.

کوریم ۲٤٤ دارای نیمه عمر زیادتر وقدرت ویژه کمتر نسبت به کوریم ۲٤۲ است. کوریم۲٤۲ یک سوخت ایده‌آل در سیستم تبدیل کننده ترمویونیک میباشد ولی بواسطه فیسیون خود بخودی که درآن بوجود میآید حفاظ نسبتاًزیادی را ایجاب میکند بطوریکه وزن کلی پیل‌خیلی بیش‌از حالتی است که‌سوخت از اکتینیم ۲۲۷ با قدرت حرارتی خروجی برابر تشکیل میگردد.

کوریم ۲٤٤ از تابش پولوتونیم بوسیله نوترن بوجود میآید که در حقیقت این عمل پس‌از چند مرحله جذب نوترن و دو مرحله تابش بتا اجرا میشود. در اختیار بودن مقدار زیاد پولوتونیم و راکتور بافلوی زیاد و همچنین امکانات لازم برای مقابله با حرارت فوق‌العاده زیاد ، شرایط لازم در تهیه کوریم ۲٤٤ میباشند.

منابع

1) Review of isotope generator developments 1966 – 72 in the united , kingdom
By : E.R. Wiblin.

2) General Considerations of Radioisotopic power and its international aspects.
By : R.F. Cellini—K.B. Stadie·

3) A Review of radioisotopic power source development at atomic energy of Canada Limited.
By : K.J. Round.

4) Supply of Radioisotopes for Power
By : G. Dominguez , Junta De Energia Nuclear Madrid , Spain.

5) Nuclear Power in outer Space , William R· Corliss , Nucleonics , 18 : 58 (August 1960).