

انرژی اتمی

شکست یا پیوست اتمها
نیروگاههای اتمی، سوخت اتمی و غنی سازی
زباله‌های اتمی و آثار زیست محیطی مواد پرتوزا

علی افضل صمدی

چاپ سوم

دوره‌های

انرژی اتمی

اصول اساسی که منجر به شکست
و یا پیوست اتمها می شود
شکست یا پیوست اتمها
نیروگاههای اتمی، سوخت اتمی و غنی سازی
زباله های اتمی و آثار زیست محیطی مواد پرتوزا

از سری انتشارات

دانش و فن برای همه

۱

نوشته

دکتر علی افضل صمدی

انتشارات

جهان کتاب

سرشناسنامه: صمدی، علی افضل، ۱۳۱۷

عنوان و پدید آورنده:

انرژی اتمی: شکست یا پیوست اتم ها، نیروگاههای اتمی،

سوخت اتمی و غنی سازی، زباله های اتمی و آثار زیست

محیطی مواد پرتو زا/ علی افضل صمدی.

مشخصات نشر: تهران: مؤسسه فرهنگی - هنری جهان کتاب، ۱۳۸۷

مشخصات ظاهری: ۴۲ص: مصور، جدول.

شابک: ISBN : ۹۷۸۹۶۴۲۵۳۳۱۵۲

وضعیت فهرست نویسی: فیپا

موضوع: زباله های اتمی - تأثیر محیط زیست.

موضوع: نیروگاه های اتمی - تأثیر بر محیط زیست.

موضوع: آلودگی رادیو اکتیو.

رده بندی کنگره: ۸ الف ۸ ص/ ۸۹۸ TD

رده بندی دیویی: ۳۶۳/۷۳۸۹

شماره کتابشناسی ملی : ۱۰۹۴۴۵۷

انتشارات مؤسسه فرهنگی - هنری

جهان کتاب

انرژی اتمی

علی افضل صمدی

چاپ اول و دوم: ۱۳۸۷

چاپ سوم: ۱۳۸۸

چاپ چهارم به صورت اینترنتی و رایگان: ۱۳۹۱

فهرست

پیشگفتار چاپ چهارم.....	۶
فصل اول : شکست یا پیوست اتمها.....	۸
اصول اساسی که منجر به شکست و یا پیوست اتمها می شود.....	۸
مقدمه.....	۱۱
(۱) شناخت اتمها.....	۱۵
(۲) نیروهای حاکم بر طبیعت.....	۲۰
۳. انرژی پیوند هسته ای.....	۲۳
(۴) دلیل پیوست و یا شکست اتمها.....	۸۲
(۵) دلیل تجزیه مواد پرتو زا.....	۹۳
فصل دوم.....	۵۵
(۱) ساختار نیروگاههای اتمی.....	۵۷
(۲) دسته بندی نیروگاهها.....	۶۵
(۳) نیروگاههایی که با نوترون سریع کار می کنند.....	۷۰
(۴) نیروگاه اتمی نسل چهارم.....	۷۲
(۵) عمر نیروگاهها.....	۷۵
(۶) توان نیروگاهها.....	۷۶
(۷) فرآورده های حاصل از شکست.....	۷۷
(۸) منابع و چگونگی تهیه سوخت اتمی.....	۷۸
(۹) تخلیص میله های سوخته شده در نیروگاهها.....	۹۲
(۱۰) باز یافتی اورانیم و پلوتونیم از میله های سوختنی.....	۹۵
(۱۱) توقف یا از رده خارج کردن.....	۹۷
(۱۲) هزینه ساخت و پیاده سازی نیروگاهها.....	۱۰۰
فصل سوم.....	۱۰۵
زباله های اتمی و آثار زیست محیطی مواد پرتو زا.....	۱۰۶
(۱) زباله های حاصل از نیروگاهها.....	۱۰۶

- ۲) زباله های پرتوزا.....۱۰۷
- ۳) قانون مند کردن کنترل زباله های پرتوزا.....۱۱۶
- ۴) کشورهای دیگر چه می کنند۱۱۷
- ۵) اثر ایزوتوپهای پرتوزا بر موجودات زنده۱۲۱
- ۶) اثر پرتوها بر روی موجودات زنده.....۱۲۲
- ۷) قدرت نفوذ پرتوها۱۲۴
- ۸) واحد پرتوزایی یا دوزی متری.....۱۲۷
- ۹) تظاهرات بالینی حاصل از برخورد پرتوها۱۳۰
- ۱۰) اثر های آنی.....۱۲۸
- ۱۱) جراحتهای حاصل از تابش دهی کامل.....۱۳۵
- ۱۲) جراحتهای موضعی.....۱۳۶
- ۱۳) اثر پرتوها بر حسب نوع ایزوتوپ پرتوزا.....۱۳۶
- ۱۴) نوع تابش پرتوها و مقدار آن.....۱۳۶
- ۱۵) روشهای تابش پرتو بر بدن.....۱۳۷
- ۱۶) عناصر پرتوزا موجود در پوسته ی زمین.....۱۳۹
- ۱۷) ایزوتوپهای پرتوزایی که استنشاق و یا با مواد غذایی جذب می کنیم.....۱۴۰
- ۱۸) مثالهایی از مقدار مواد پرتوزای موجود در محیط زیست ما.....۱۴۱
- ۱۹) رادیو ایزوتوپهایی که در پزشکی مصرف می شوند:.....۱۴۳

پیشگفتار چاپ چهارم

در دو دهه نخست قرن بیستم نظریه نسبیت انشتین امکان تبدیل جرم به انرژی را به بشر آموخت. متاسفانه اولین کار برد این نظریه منجر به تولید بمبهای اتمی شد. در سال ۱۹۴۵ دولت امریکا با این بمبها شهرهای هیروشیما و ناگازاکی در ژاپن را به تلی از خاک تبدیل کرد و چند صد هزار نفر مردم عادی و غیر نظامی را کشت. اگر چه این عمل وحشیانه انزجار جهانیان را برانگیخت، ولی نباید پنهان داشت که در دراز مدت منشاء آثار مثبتی شد. از یک سو ترس از جنگ افزارهای اتمی را در دل قدرتمندان جهان ایجاد کرده و از آن زمان تا کنون به رغم گذشت ۶۸ سال و وقوع هزاران جنگ خانمان برانداز - در ابعادی کوچکتر از جنگهای اول و دوم جهانی - هیچ گاه بمبهای اتمی و یا هزاران بار مخربتر از آنها بمبهای هیدروژنی و نوترونی، به کار گرفته نشده اند. از سوی دیگر، کاربرد نظریه های انشتین که در ابتدا و با بودجه کلان صرف تهیه بمبهای اتمی شده بود، وسیله مهار این بمب ها را نیز به بشر آموخت. چندی بعد، نیروگاههای اتمی متکی بر پدیده شکست اتمها یکی بعد از دیگری - ابتدا در کشورهای پیشرفته و اکنون در کشورهای در حال توسعه - به وجود آمدند. بر اساس منابع موجود، در آوریل سال ۲۰۱۲ تعداد ۴۳۶ نیروگاه اتمی در ۲۸ کشور جهان مشغول بهره دهی هستند و نیز ۶۱ نیروگاه در حال ساخت وجود دارد. قدرت مجموع نیروگاههای فعال ۳۶۸۸۵۷ مگاوات است و در کشورهای مختلف جهان ۱۷ درصد (۱۵۶۴۶ تریون وات ساعت) انرژی الکتریکی مورد نیاز آنها را تأمین می کنند. درست است که اکنون با کشور ما در مورد کاربرد اتم برای صنعت مخالفت می کنند. ولی متاسفانه این صنعت به هر صورت در آینده در تمام کشورهای دیگر جهان عمومیت خواهد یافت و زباله پرتوزای این نیروگاهها که بسیار خطرناک است، آینده نسل بشر را به مخاطره خواهد انداخت. ولی خوشبختانه مبارزه مدافعان محیط زیست از یک سو به ویژه ترس به وجود آمده بعد از زمین لرزه و سونامی در ژاپن و انفجار ۴ نیروگاه این کشور و از سوی دیگر ترس قدرتمندان از توسعه سلاحهای اتمی، تولید نیروگاهها را کنترل و محدود کرده و خواهد کرد. البته نباید از یاد برد که کار برد صلح جویانه اتم کمک بسیار زیادی به سلامت بشر می کند. کار برد اتم و ایزوتوپهای پرتوزا روز به روز تشخیص و درمان بیماریها را بهتر و راحت تر ساخته و خدمت بزرگی به بشریت می کند.

برای عموم مردم - چه در دنیای غرب و چه در کشور ما - پرسشهای بسیاری در باره انرژی اتمی مطرح است.

(۱) انرژی اتمی چیست و چگونه به دست می آید؟

(۲) ساختار نیروگاههای اتمی چگونه است و مواد سوختی این نیروگاهها از کجا تأمین می شود؟

(۳) زباله های نیروگاهها از چه موادی تشکیل شده و آثار زیست محیطی این مواد بر روی بدن موجودات زنده چیست؟

(۴) چگونه می توان از انسان در مقابل آثار زیان بخش مواد پرتوزا محافظت کرد؟

(۵) حوادث نیروگاهها و آثارشان بر روی محیط زیست چه بوده است؟

(۶) کاربرد پرتوهای رادیو اکتیو در تشخیص بیماریها چگونه است و زیانهای که استفاده بیش از حد آنها بر بافتهای بدن بیمار دارد چیست؟

(۷) آیا نیروگاههای اتمی قادر به تأمین انرژی الکتریکی همه ساکنان کره زمین خواهند بود؟

(۸) آیا قیمت کیلو وات ساعت انرژی به دست آمده از این طریق ارزانتر از انرژیهای دیگر است؟

(۹) آیا ممکن نیست که فرآورده های حاصل از تخلیص مواد سوخته شده در نیروگاهها که مقدار قابل ملاحظه ای پلوتونیم ۲۳۹ دارند و به سهولت به کمک واکنشهای ساده شیمیایی از بقیه مواد جدا می شوند، به دست افراد ناباب و سود جو بیفتد تا از آن برای تهدید دیگران استفاده کنند؟

کوشش خواهیم کرد که در این کتاب برای این پرسشها، پاسخهای مختصر و قابل در کی ارائه کنم.

با توجه به اینکه در سالهای اخیر در ایران به کاربرد انرژی اتمی برای تأمین بخشی از الکتریسیته کشور توجه شده است و نیز با توجه به پیچیدگی فناوری ساخت نیروگاههای اتمی و عدم اطلاع عموم از این صنعت، لازم دیدم برخی از تجربیات شخصی خود را با بیانی ساده برای مردم کشورمان بیان دارم. فصل اول این کتاب را به انرژی اتمی یا در واقع اصول اساسی که منجر به شکست اتمها در نیروگاهها، یا در بمب اتمی و یا در پیوست اتمها و بمب هیدروژنی، اختصاص داده ام. در این فصل همچنین پرتوهای رادیوایزوتوپها را شرح می دهم. در فصل دوم، ساختار نیروگاههای اتمی و چگونگی تهیه سوخت اتمی و دلیل ضرورت غنی سازی اورانیم و کاربرد آب سنگین و چگونگی تهیه آنها را تشریح خواهم کرد. در فصل سوم آثار زیست محیطی مواد پرتوزا و زباله های حاصل از نیروگاهها را شرح داده و اشاره ای به چگونگی محافظت کارگران در محیط کار را تشریح خواهم کرد.

مطالب مطرح شده در متن کتاب برای اطلاعات عمومی افراد کافی است. ولی اگر افرادی مایل به اطلاعات بیشتر از سطح عمومی هستند، مطالعه زیر نویسهای اشکال و زیرنویسهای متن، اطلاعاتی بیشتر به دست می دهد. این کتاب در سال ۱۳۸۷ از سوی انتشارات مؤسسه فرهنگی - هنری جهان کتاب، چاپ شد و تا کنون سه بار تجدید چاپ شده است. اینک چاپ چهارم آن را که کاملاً به روز شده است را به صورت رایگان در وب سایت خودم و نیز در وبسایت گروههای عمومی و دانشگاهی و به ویژه در وبسایت فیزیکدانان جوان هوپا قرار خواهم داد. نسخه چاپی این کتاب در برخی از کتاب فروشیها وجود دارد و احتمالاً ناشر اگر مایل باشد می تواند نسخه به روز شده را نیز چاپ کند.

در اینجا لازم می دانم از دوستان عزیز دکتر فرج الله محمودی و دکتر مسعود حسن پور که قبل از انتشار چاپ چهارم یک بار مطالب این کتاب را خوانده و اشکالات چاپی آنرا گوشزد کرده و بر طرف نمودم، سپاسگزاری کنم. از خواننده عزیز تقاضا دارم اگر به اشتباهی علمی یا املائی برخورد کردند به آدرس اینترنتی که در زیر آورده شده به من اطلاع دهند. سپاسگزار خواهم بود. اگر سئوالی در مورد این کتاب و یا دیگر کتابهای اینترنتی و رایگان که در وب سایتم است دارید، با ایمیل با من تماس بگیرید.

aliafzalsamadi@yahoo.fr

<http://ali.afzal.samadi.free.fr/>

علی افضل صمدی

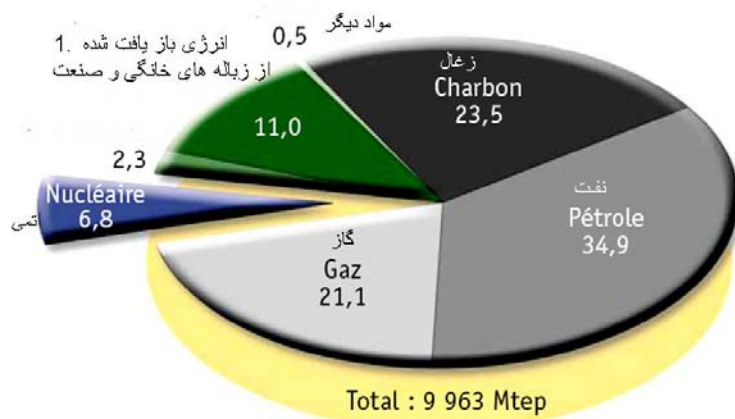
پاریس بهمن ماه ۱۳۹۱

فصل اول

اصول اساسی که منجر به شکست و یا پیوست اتمها می شود:

مقدمه: بشر از بدو آشنایی با آتش، همواره به دنبال انرژی حرارتی برای گرم کردن خود بوده است. در طی قرنهای متمادی، انسان برای گرم کردن خود از چوب یا زغال استفاده کرده است. ابتدا از زغال سنگ و سپس از نفت و مشتقات آن برای به حرکت در آوردن وسایل نقلیه (کشتی، قطار، خودرو، هواپیما و . . .) استفاده کرده و می کند. به ویژه در قرن بیستم و هم اکنون در قرن بیست و یکم افراط در مصرف سوختهای فسیلی و وضعیت خطرناکی بر روی کره زمین پدید آورده است. تولید گاز کربنیک و اکسیدهای گوگرد و ازت و گاز متان و گازهای سرد کننده یخچالها، حالت گلخانه ای را در زمین تشدید کرده و حفره ای در لایه آزون که محافظ بشر از پرتوهای خطرناک خورشیدی است به وجود آورده است. در نتیجه دمای زمین به تدریج بالا رفته و به زودی به میزان خطرناکی خواهد رسید. یخهای قطبی در حال ذوب شدن هستند، سطح آب دریاها بالا خواهد آمد، بخشی از زمین زیر آب خواهد رفت و پرتوهای خورشیدی ما را کباب خواهد کرد. از این رو دانشمندان به فکر نجات افتاده و قدرتمندان جهان را مجبور به چاره جویی کرده اند. از سال ۱۹۹۰ کنفرانسهای متعددی در نقاط مختلف جهان تشکیل شده و جلساتی به ویژه بین سران کشورهای پیشرفته در لندن، ریودوژانیرو، کیوتو، کپنهاگ و اخیراً در کانکون مکزیک، در این خصوص بر گزار شده است. در همه این نشستها، تصمیم به کاهش تولید گاز کربنیک و یا به عبارت بهتر، مصرف کمتر سوختهای فسیلی گرفته شده است و در تمام کنفرانسها، برخی از کشورها از جمله امریکا سرسختانه مخالفت کرده و حاضر به کاستن از مقدار تولید گاز کربنیک خود نشده اند. راههای تولید انرژی در جهان کم نیست، از خورشید، باد، آبشارها، جذر و مد دریاها، انرژی نهفته در اعماق زمین، مزارع تولید کننده انرژی سبز و به ویژه از پیوست اتمهای سبک می توان انرژی لازم برای زندگی را به دست آورد. ولی متأسفانه به دلیل وجود نظام اقتصادی و سرمایه داری حاکم بر جهان، رقابت در قیمت مانع از بهره برداری کامل از منابع مذکور می شود و بهای سوختهای فسیلی همواره پایین تر از قیمت تمام شده سوختهای دیگر است. در شکل (۱) در نموداری که ارائه شده، تولید انرژی در جهان را به روشهای متفاوت به نمایش گذاشته ام. در نمودار ارائه شده در شکل (۲) برق تولید شده بر حسب نسبت درصد مواد سوختی در جهان را آورده ام.

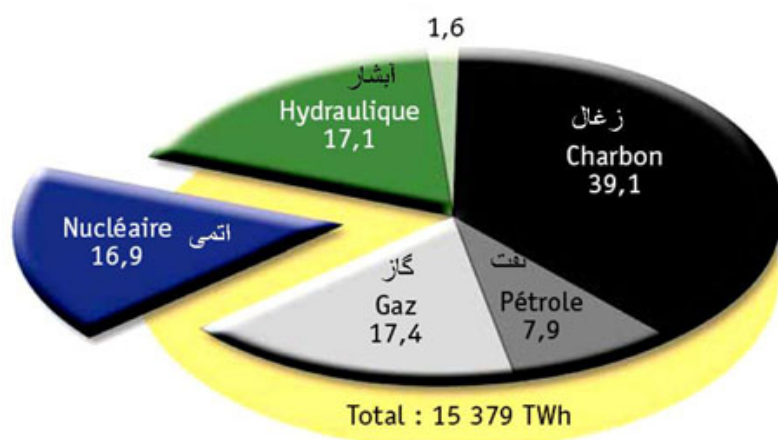
نسبت درصد انرژی های نوع اول تولید شده به وسیله سوخت های مختلف
تا سال 2000 میلادی در جهان



شکل (۱) نموداری از نسبت درصد انرژی نوع اول تولید شده به وسیله سوخت های مختلف در جهان تا سال ۲۰۰۰ میلادی. بشر بعد از شناخت آتش همواره به دنبال استفاده از انرژی بوده است. در آغاز تمدن، بشر از چوب درختان برای گرم کردن خود استفاده می کرده است. هزاران سال بعد از شناخت آتش، قیر، نفت، زغال سنگ و در نهایت گاز را برای تولید انرژی یافته، از این مواد برای گرم کردن منازل و کارهای صنعتی خود استفاده کرده است. در اواسط قرن بیستم بعد از شناخت پدیده شکست اتمها و تولید بمب های مخرب اتمی و هیدروژنی، توانست از این پدیده برای تولید انرژی استفاده کند. به علت خطرناک بودن این روش و امکان استفاده های نامشروع به وسیله افراد و یا قدرتهای مشکوک از یک سو و از سوی دیگر، وجود زباله های خطرناک حاصل از شکست اتمها و امکان حوادثی چون تریمیل آیلند، چرنوبیل و یا حادثه انفجار چهار نیروگاه ژاپن در اثر زمین لرزه و سونامی، سبب شده که این روش تولید انرژی همواره به زیر سؤال برده شود. تولید نیروگاه های اتمی تا سال ۲۰۰۰ میلادی چندان توسعه نیافت، و تا سال ۲۰۰۶ میلادی نیز بیشتر از مقدار مشخص شده در نمودار نشده است. بعد از این سال و در اثر افزایش بهای سوخت های فسیلی تمایل به ایجاد نیروگاه های اتمی در جهان بالا گرفت و تا سال ۲۰۱۱ تعداد طرح های اجرا شده و یا در حال اجرا از صد ها نیروگاه بیشتری گرفت. در اوایل این سال در اثر فاجعه زمین لرزه و در پی آن سونامی در ژاپن، که منجر به انفجار چهار نیروگاه از نیروگاه های ژاپن شد، بازهم مسئله کاربرد نیروگاه های اتمی برای تولید انرژی به زیر سؤال برده شد، به نحوی که دولت فدرال آلمان تصمیم به متوقف کردن نیروگاه های خود تا پایان سال ۲۰۲۲ را گرفت. بعد از آلمان سوئیس و سپس در سال گذشته ژاپن نیز تصمیم به متوقف کردن نیروگاه های خود در پایان عمر مفید آنها را گرفتند. امکان دارد در اثر فعالیت مخالفان کاربرد انرژی اتمی کشورهای دیگر نیز از آلمان، سوئیس و ژاپن پیروی کنند. یا نیروگاه های خود را متوقف و یا از ساخت نیروگاه های دیگر خودداری نمایند.

بنابر خبرنامه اینترنتی (Notre planète.info اول نوامبر ۲۰۱۲) بخش مهم انرژی مصرف شده در جهان به مقدار ۸۰ درصد از سوخت های فسیلی بوده که شامل ۲۲ درصد نفت ۲۱ درصد گاز و ۲۸ درصد زغال سنگ و نیز ۷ درصد اورانیوم بوده است. از ۲۶/۸ میلیون بشکه نفت مصرفی در جهان ۵۰ درصد آن صرف حمل و نقل و خودروها بوده است.

برق تولید شده در جهان بر حسب نسبت درصد ماده ی سوختی



شکل (۲) نموداری از برق تولید شده بر حسب نسبت درصد ماده سوختی به کار برده شده در جهان.

با افزایش قیمت نفت و گاز و زغال سنگ تمام روشهای تولید برق در جهان مورد استفاده ی بشر قرار خواهد گرفت. در حال حاضر روشهای تولید برق نمایش داده شده در فوق از نظر ارزش کیلووات ساعت برق تولید شده تقریباً با هم برابرند. اکنون در غرب استفاده از انرژی آب (آبشارها *Hydroélectrique*، سد بر روی رودخانه ها) باد و یا انرژی سبز حاصل از کشت گیاههای روغنی، از نظر قیمت معادل انرژی حاصل از نفت و یا گاز شده و نیز به مراتب ارزانتر از انرژی اتمی برای کشورهای اروپایی خواهد بود، و امید می رود که در آینده کار برد انرژیهای که حالت گلخانه ای زمین را تشدید نمی کنند بیشتر شود. در جدول (۱) بزرگترین نیروگاه های جهان را که همه هیدرو الکتریک (منشاء آبی) می باشند با نام کشور مربوطه آورده ام.

ردیف	نام و محل سد	کشور	MW	منبع انرژی
۱	Barrage des Trois-Gorges سد سه دهانه	Chine	۲۲ ۵۰۰	هیدرو الکتریک
۲	Barrage d'Itaipu سد ایتا پیو	Brésil Paraguay	۱۴ ۰۰۰	هیدرو الکتریک
۳	Barrage de Guri سد کوری	Venezuela	۱۰ ۲۰۰	هیدرو الکتریک
۴	Barrage de Tucuruí سد توکوری	Brésil	۸ ۳۷۰	هیدرو الکتریک
۵	Barrage Robert Bourassa سد ربرت بوراسا	Canada	۷ ۷۲۲	هیدرو الکتریک
۶	Barrage de Grand Coulee سد کولی بزرگ	United States	۶ ۸۰۹	هیدرو الکتریک
۷	Barrage de Longtan سد لونگتان	Chine	۶ ۴۲۶	هیدرو الکتریک
۸	Barrage de Krasnoïarsk سد کراسنویارسک	Russie	۶ ۰۰۰	هیدرو الکتریک

جدول (۱) اسامی بزرگترین نیروگاههای تولید برق در جهان. چنانکه دیده می شود بزرگترین نیروگاههای تولید برق در جهان همگی منشاء آبی دارند. بزرگترین نیروگاههای اتمی ساخته شده در جهان تنها تا ۱۵۰۰ مگاوات توان الکتریکی دارند.

می دانیم در اثر کار برد سوخت های فسیلی برای تولید برق و گرم کردن منازل و یا کارخانه ها، مقدار گاز کربنیک موجود در جو زمین زیاد شده و افزایش این گاز و گاز متان حاصل از دامداریها و باطلاحها، حالتی شبیه به گلخانه بر روی جو زمین ایجاد کرده است و مانع از خروج پرتوهای خورشیدی از زمین می شود. در اثر این پدیده دمای زمین روز به روز افزایش می یابد و اگر تولید این گازها تا سال ۲۱۰۰ همچنان ادامه یابد، پیش بینی می شود، در اثر ذوب یخهای قطبی، بخش عظیمی از سیاره به زیر آب رود و

زندگی برای موجودات زمینی غیر ممکن گردد. همانطور که در جدول فوق می بینید به مدد انرژی های برگشت پذیر نظیر آبشارها می توان بزرگترین نیروگاهها را ساخت بدون آنکه محیط زیست آلوده شود. خوشبختانه در اکثر کشورهای پیشرفته جهان به فکر استفاده از انرژی های تجدید پذیر مانند انرژی حاصل از باد، نور خورشید(انرژی فتوولتائیک) یا انرژی حاصل از جذر و مد دریاها و یا انرژی زیرزمینی (ژئوترمیک)، افتاده و امید می رود روز به روز سهمیه و کاربرد این انرژیها بیشتر شود. برای درک بیشتر این مسئله به کتاب:

جهان به کجا می رود؟ (سرنوشت سیاره زمین در صد سال آینده)

نوشته نگارنده ، از انتشارات مؤسسه فرهنگی - هنری **جهان کتاب** مراجعه نمایید. این کتاب نیز در سایت نگارنده به صورت رایگان ارائه خواهد شده است. <http://ali.afzal.samadi.free.fr/>

مقدمه

پس از طرح نظریه مهم انشتین در مورد تبدیل ماده به انرژی و یا برعکس، بشر پدیده شکست آنها را شناخت و بعد از جنگ دوم جهانی شروع به ساختن نیروگاههای اتمی کرد. این روش تولید انرژی حتی برای کشورهایی که سوخت فسیلی ندارند هنوز مقرون به صرفه نیست، ولی چون آنها را از نظر تولید انرژی مستقل تر از کشورهای دیگر می کند (بدون توجه به عواقب خطرناک افزوده شدن زباله های اتمی) آن را به کار می گیرند. اکنون ۲۸ کشور در روی زمین ۴۳۶ نیروگاه اتمی دارند. و اگر قرار باشد تمام کشورهای جهان انرژی الکتریکی خود را از راه شکست اتم تهیه کنند، به طور قطع زندگی برای نواذگان ما در اواخر قرن بیست و یکم غیر ممکن خواهد شد. خطر و زیان زباله های اتمی را مطالعه خواهیم کرد و خواهیم دید که حتی برخی از کشورها سعی کرده بودند این زباله ها را به وسیله سفینه هایی به سوی خورشید پرتاب کنند. این روش مقرون به صرفه نبود و از سوی دیگر امکان نا موفق شدن پرتاب و برگشت بر روی زمین و آلوده کردن محیط زیست را در بر داشت. کشور فرانسه که از دهه ۱۹۷۰ تا کنون بزرگترین تولید کننده الکتریسیته از طریق نیروگاههای اتمی است و بیش از ۵۸ نیروگاه با توان بالا دارد و ۸۰ درصد برق مصرفی خود را از این راه تامین می کند، هنوز نتوانسته تصمیمی قطعی برای زباله های پرتوزا حاصل از نیروگاههای خود بگیرد.

اما از سوی دیگر، بشر پدیده پیوست یا گداخت اتمهای سبک درون خورشید را شناخته و با آن بمب هیدروژنی را ساخته است. احتمال می رود که انسان در سنوات آینده به کمک نیروگاه آزمایشی بین المللی متکی بر پدیده پیوست اتمهای سبک (پیوست ترمونوکلر است) ^۱ موفق به کنترل این پدیده شود و احتمال دارد با این روش، انرژی الکتریکی فراوان و سالمی به دست آورد.

^۱ ITER= International Termonucléar expérimental

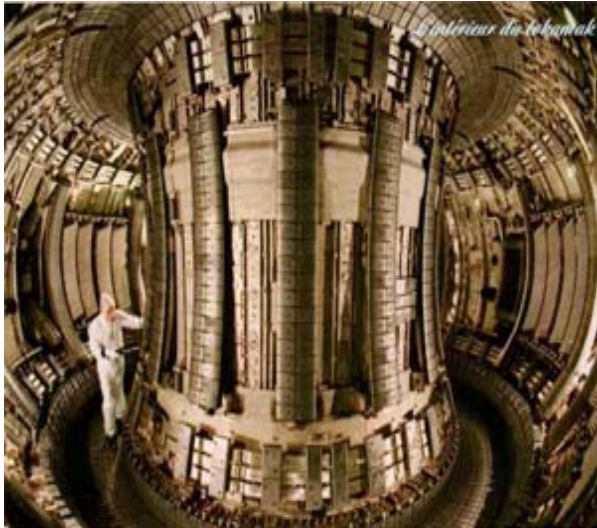
زیرا ماده لازم برای پیوست، اتمهای سبک است که به صورت آب سنگین و به مقدار یکدهم درصد در اقیانوسها و آبهای کره زمین وجود دارد و نیز عنصر لیتیم است که در طبیعت به طور نسبی فراوان است. اما مصارف صنعتی فراوان به ویژه در ساخت باطری ها دارد. این نیروگاه آزمایشی که در آینده در شرق فرانسه (در منطقه ای به نام کاداراش)، با همکاری اروپایی ها، آمریکا، کانادا و ژاپن در حال ساخت است، ممکن است در سال ۲۰۲۰ امکان کنترل واکنش پیوست و ساخت نیروگاه تولید الکتریسیته از این روش را فراهم سازد. بودجه این پروژه در آغاز ۱۰ میلیارد یورو پیش بینی شده بود. ولی تاکنون بیش از ۱۶ میلیارد یور هزینه برداشته است. در واقع اگر این طرح منجر به کنترل پدیده گداخت هسته ای شود، در نیمه دوم قرن بیست و یکم نگرانی بشر از کمبود انرژی تا حدی بر طرف خواهد شد. آن چنان که گفته اند این روش سالمترین روش تولید انرژی است و مواد لازم برای تولید انرژی از این طریق در طبیعت وجود دارد. در چنین نیروگاهی ایزوتوپ سنگین هیدروژن که دوتریم نام دارد و در آب دریاها موجود است مورد استفاد قرار می گیرد و از طریق الکترولیز آب، غلظت آن در ته ظرف الکترولیز افزایش می یابد.^۲ لیتیم نیز در معادن عناصر قلیایی وجود دارد، البته لیتیم مستقیماً^۳ وارد در واکنش پیوست نمی شود. لیتیم برای تولید تریتم ایزتوپ ناپایدار هیدروژن به کار برده می شود. در شکل (۳) نموداری ساده شده از نیروگاه توکاماک متکی بر پدیده پیوست اتم ها را ارائه کرده ام.

برای درک بهتر منابع تولید انرژی، توان انرژی زایی یک تن از مواد سوختنی متداول را که بر حسب یک میلیارد ژول مشخص شده در جدول شماره (۲) ارائه کرده ام.

نوع سوخت بر حسب تن	قدرت انرژی زایی بر حسب میلیارد ژول (GJ)
چوب	۱۴
زغال سنگ	۲۹
نفت	۴۲
گاز طبیعی و به صورت مایع	۴۶
یک تن اورانیم طبیعی معادل ۷۰ کیلوگرم اورانیم ۲۳۵	۶۳۰,۰۰۰

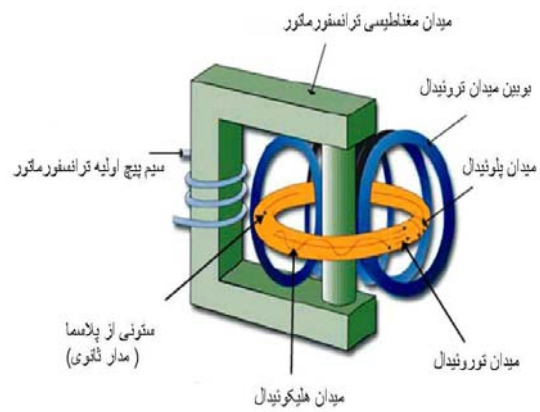
جدول (۲) قدرت انرژی زایی سوخت های مختلف.

^۲ در اواخر جنگ دوم جهانی آلمانی ها به قصد تهیه بمب اتمی با همین روش مقادیر بسیار زیادی آب سنگین در سوئد و نروژ تهیه کردند. انگلیسی ها که پی به مقصود آنها برده بودند مخازن آب سنگین را منفجر کردند و آلمان موفق به تهیه بمب اتمی نشد. در عوض آمریکایی ها با پروژه منهتن، ابتدا با غنی سازی اورانیم و سپس با ساخت نیروگاههایی برای تولید پلوتونیم ۲۳۹ توانستند بمب اتمی (یکی با اورانیم غنی شده از اورانیم ۲۳۵ و دو دیگر از پلوتونیم ۲۳۹) بسازند. یکی را برای آزمایش در الاموگوردو نیو مکزیک و دو بمب دیگر را بر سر ژاپنی ها در ناکازاکی و هیروشیما انداختند و بیش از صد ها هزار کشته و افراد سرطانی بجای گذاشتند.



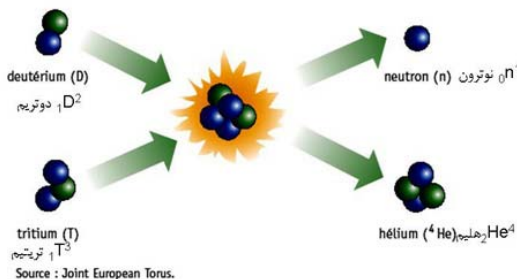
تصویری از درون نیروگاه در حال ساخت توکاماک (ITER)

نموداری ساده شده از نیروگاه توکاماک متکی بر پدیده پیوست اتمهای متکی



شکل (۳) نموداری از اصول نیروگاه متکی بر پدیده پیوست اتم ها را مشاهده می کنید. از آغاز سال ۲۰۰۶ میلادی کشورهای پیشرفته جهان تصمیم به ساخت نیروگاهی آزمایشی در منطقه کادراش فرانسه گرفتند. این نیروگاه که با کمک مالی بین المللی ساخته خواهد شد، نیروگاه عظیمی خواهد بود که برای ده سال اول ساخت آن ۵ میلیارد یورو و برای به کار اندازی آن در ده سال بعد ۵ میلیارد یوری دیگر پیش بینی شده است. چنانکه پیش نیز گفته شد، تا کنون ۱۶ میلیارد یورو هزینه ساخت این نیروگاه شده است. از سال ۱۹۵۰ میلادی که بشر موفق به ساخت بمب هیدروژنی شد، همواره سعی بر کنترل پدیده پیوست داشته است و روشهای متفاوتی به کار برده اند. موفق ترین روش دستگاه توکاماک بوده که اصول آن در شکل فوق مشاهده می شود. از همان سالها تا کنون در کشورهای مختلف دنیا مانند انگلستان فرانسه و ژاپن دستگاه های کوچکی مانند شکل فوق ساخته و توانسته اند تا حدود ۶ دقیقه واکنش پیوست اتمها را کنترل کنند. اکنون که مسئله کمبود انرژی در جهان بسیار حاد شده است، کشورهای غنی با تمایل فراوان در فکر کنترل این پدیده افتاده و حاضر به سرمایه گذاری در این راه شده اند و امید دارند که تا ۳۰ یا ۵۰ سال آینده این پدیده مانند نیروگاههای اتمی در کنترل بشر در آید. واکنش پیوست اتمها انرژی بی پایانی را به بشر وعده می دهد، ظاهراً در این پدیده زباله های رادیو اکتیو به وجود نخواهد آمد و مواد اولیه آن آب دریا (دوتریم یا هیدروژن سنگین) و تریتم است. تریتم را از تابش نوترون بر روی ایزوتوپ لیتیم ${}^6\text{Li}$ به دست می آورند. لیتیم در پوسته ی زمین یافت می شود. لیتیم مصارف صنعتی فراوان دارد. لیتیومی که در طبیعت یافت می شود متشکل از ایزوتوپ ۷ به نسبت بسیار و ایزوتوپ ۶ به نسبت کمتر است و ایزوتوپ ۶ است که در تولید تریتم به کار می رود. می توان با جدا سازی ایزوتوپی اشکال کمبود لیتیم را بر طرف کرد. در شکل (۴) نموداری از چگونگی این پیوست را آورده ام.

نموداری از پدیده پیوست اتمها



شکل (۴) نموداری از چگونگی پیوست ایزوتوپهای هیدروژن باهم

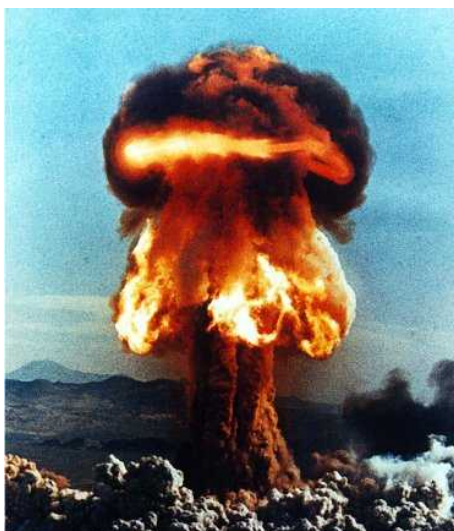
اخیراً نظریات متفاوتی در باره آینده این نیروگاه داده شده است. از یک سو بسیاری از فیزیک دانان اجراء و ادامه واکنش پیوست در این نیروگاه را عملی نمی دانند و ایراداتی بر آن دارند. مدافعان محیط زیست نیز محتاطانه به این پروژه می نگرند. از سوی دیگر مسئله اقتصادی این پروژه آن چنان نیست که در آغاز فکر می کردند. تاکنون (پایان سال ۲۰۱۲) سه سال تاخیر در مورد پایان ساخت این نیروگاه پیش آمده و پایان کار ساخت آن را به سال ۲۰۲۰ وعده داده اند. از طرف دیگر هزینه ساخت این نیروگاه بنا به اخبار بی. بی. سی. در سال ۲۰۰۹ دو برابر (۱۶ میلیارد یورو) شده است. این نیروگاه چنان که گفته شد آزمایشی است و برقی تولید نخواهد کرد. توان گرمایی آن ۵۰۰ مگاوات پیش بینی شده است. منظور اصلی از ساخت این نیروگاه به ویژه برای شناخت تکنولوژی و مقاومت مواد به کار برده شده در ساختار این نیروگاه است. به ویژه شناخت هزینه تولید سوخت است که دوتریم و تریتم می باشد. چنان که گفته شد دوتریم را از الکترولیز آب به دست می آورند. هزینه تولید یک کیلوگرم دوتریم ۵۰۰۰ دلار است و هزینه ساخت تریتم که ایزوتوپ ناپایدار هیدروژن است از طریق واکنشهای هسته ای هر کیلوگرم آن ۳۰۰۰۰۰ دلار تمام خواهد شد. روش ساده تر روش تابش نوترونهای خروجی از واکنش پیوست بر روی لیتیم ۶ است. نوترونهای خروجی از پلاسما ۱۴ میلیون الکترون ولت انرژی دارند. تابش نوترونها بر روی قشری از لیتیم، تریتم و ذره آلفا به وجود می آورد، بنابراین با قرار دادن قشری از لیتیم در اطراف پلاسمای قلب نیروگاه، تریتم به دست خواهد آمد. فکر می کنند این روش به صرفه تر باشد.

در جدول شماره (۲) یک تن اورانیم طبیعی را در نظر گرفته ام. باید در نظر داشت که نسبت در صد اورانیم شکست پذیر در اورانیم طبیعی که از معدن استخراج می شود، تنها ۰/۷ در صد است. انرژی منظور شده در جدول برای اورانیم را باید ضرب در ۹۹/۷ کرد و بر ۰/۷ تقسیم نمود، یا به عبارت ساده تر، باید انرژی منظور شده برای یک تن اورانیم ۲۳۵ را ۱۴۰ برابر مقدار داده شده در جدول در نظر گرفت. چون مقدار اورانیم شکست نا پذیر در این یک تن اورانیم طبیعی ۱۴۰ برابر بیشتر است.

اما اگر روزی بشر بتواند واکنش پیوست را کنترل کند، به ازای پیوستن همین جرم از دوتریم (هیدروژن سنگین با ایزوتوپ دیگر هیدروژن تریتم) مقدار انرژی که به دست خواهد آورد ۳۰ هزار بار بیشتر از شکست اورانیم خواهد بود. به همین دلیل است که بمب های هیدروژنی که در آنها تنها چند صد گرم عناصر سبک وجود دارد، قدرت تخریبی هزاران بار بیشتر از بمب اتمی دارند.

شکل (۵) قارچ انفجاری یکی از بمبهای اتمی امریکا را که در هیروشیما در (۶ اوت ۱۹۴۵) و ناکازاکی (۹ اوت ۱۹۴۵) منفجر شد نشان می دهد. بمبهایی که بر شهرهای ژاپن انداخته شد یکی از اورانیم غنی شده (اورانیم ۲۳۵) و دیگری از عنصر پلوتونیم ساخته شده بودند، ولی اکنون غالب بمب های موجود در زرادخانه های اتمی جهان، از پلوتونیم ساخته می شوند.

برای شناخت نیروگاههای اتمی و کاربرد آنها به عنوان مراکز تولید کننده الکتریسیته لازم است اطلاعات مختصری در باره دلیل شکست و یا پیوست اتمها داشته باشیم. همچنین باید اتمها و ایزوتوپهای ناپایدار و به ویژه آنهایی که بعد از شکست حاصل می شوند را بشناسیم. به همین دلیل اولین بخش این کتاب را به شناخت اتمهای ناپایدار و پرتو زایی این عناصر اختصاص داده ام.



شکل (۵) تصویری از اولین بمب اتمی آزمایشی آمریکا که در ۱۶ ژوئیه ۱۹۴۵ در کویر الاموگوردو واقع در نیو مکزیک منفجر شد. این بمب از رادیو عنصر پلوتونیم ساخته شده و نام آنرا ترینیتی گذارده بودند. از آن زمان تا سال ۱۹۹۸ تعداد ۲۰۵۳ بمب اتمی آزمایشی در سطح سیاره زمین منفجر شده اند. یعنی تقریباً " هر ۹ روز یک بمب طی ۵۴ سال سیاره زمین را آلوده به مواد رادیو اکتیو خطرناک کرده اند. می توانید فیلم شماتیک محل و زمان انفجار این بمب ها را بر روی زمین و اقیانوسها از سایت زیر ببابید.
http://www.dailymotion.com/video/xgmmhb_chronologie-des-essais-nucleaires-de-۱۹۴۵-a-۱۹۹۸_news

(۱) شناخت اتمها:

بر اساس پذیرفتنی ترین فرضیه ها، جهان و هر چه در آن است پس از انفجار عظیم نور که آنرا مهبانگ (بیگ بنگ) می گویند به وجود آمده است. در آغاز جهان بسیار متفاوت با امروز، بی نهایت گرم^۳ و بی نهایت کوچک بوده است. هسته اتمها، امها، ملکولها، ستارگان و حتی کهکشانها وجود نداشته اند. می توان تصور کرد که جهان نقطه هایی بسیار کوچک و فشرده و بسیار گرم و پراکنده در تمام فضا بوده که در آنها ذرات پر انرژی نور گرد هم قرار داشته اند. در یک لحظه تحولی ناگهانی در آنها روی داده است. تا کنون ابزارهای پژوهشی ما توانایی تشخیص آن لحظه و چگونگی انفجار آنها را ندارند و دانشمندان قادر به تعریف آن نیستند. از این رو این لحظه را که چند میلیاردیم ثانیه بیشتر طول نکشیده مهبانگ و حالت به وجود آمده را تکینگی (حالتی استثنایی) می نامند. این واقعه بازم بر اساس پذیرفتنی ترین نظریه ها ۱۳ میلیارد سال پیش روی داده است.

در سطرهای آینده از ذراتی نام می بریم که تشکیل دهنده دنیای مادی ما هستند. برای شناخت ساختار درونی ماده باید با الکترون، پروتون و نوترون و مشخصات آنها آشنا شد. پس از مهبانگ، جهان به تدریج سرد می شود و بر اثر این سرد شدن، ذرات نور تبدیل به ذراتی مادی به

^۳ دمای جهان در آن هنگام صدها میلیارد میلیارد درجه سانتیگراد بوده است.

نام کوارکها و الکترونها می شوند.^۴ تا کنون شش نوع کوارک شناخته شده است که هر یک اسامی خاصی دارند. در همان آغاز پیدایش جهان، از پیوستن دو کوارک (بالا) و یک کوارک (پایین) پروتون و از پیوستن دو کوارک (پایین) و یک کوارک (بالا) نوترون به وجود آمده است. هسته عناصر از پیوستن تعدادی پروتون و نوترون درست شده است. در واقع پروتون و نوترون سنگ بناهای تشکیل دهنده جهان مادی ما هستند. انجمن فیزیک و شیمی دانان جهان، جرم یک اتم کربن را برابر ۱۲ واحد جرم اتمی در نظر گرفته اند، بنابراین جرم یک پروتون آزاد معادل با $1/0.078$ و جرم یک نوترون آزاد معادل با $1/0.086$ واحد جرم اتمی خواهد بود. چرا به اتم کربن که از ۶ پروتون و ۶ نوترون تشکیل شده است، جرمی معادل با ۱۲ واحد جرم اتمی نسبت داده اند؟

در موقع تشکیل اتم کربن در کوره داغ ستارگان، مقدار $0/0.078$ واحد جرمی از هر پروتون و مقدار $0/0.086$ واحد جرم اتمی از هر نوترن طبق معادله انشتین تبدیل به انرژی شده و از ستاره به خارج منتشر شده است. بنابراین جرم پروتون و نوترون در درون عناصر کمتر از جرم آنها به حال آزاد است. (در ادامه به تفصیل در این باره صحبت خواهیم کرد.)

ساده ترین اتمها، هیدروژن است که تنها از یک پروتون و یک الکترون درست شده است. در اتم هیدروژن، الکترون با فاصله ای بسیار دور در مدارهایی به دور پروتون در گردش است. جرم الکترونها بسیار کم و تقریباً ۲۰۰۰ بار کمتر از جرم پروتون و یا نوترون است. الکترون بار منفی دارد و در تحولات هسته ای آنرا **بتای منفی** نیز می نامند. پروتون بار مثبت دارد و نوترون فاقد بار است. در اتمهای سنگین تر از هیدروژن، در مرکز هسته اتم و در کنار پروتونها، نوترونها قرار گرفته اند. وجود نوترون درون هسته هایی که بیش از یک پروتون دارند ضروری است، زیرا در این هسته ها بارهای مثبت پروتونها بر روی یکدیگر دافعه ایجاد می کنند و برای گاهش این دافعه وجود نوترون بدون بار لازم است. هر چه تعداد پروتون بیشتر باشد، باید تعداد نوترونها زیادتر شود، به نحوی که در عناصر بسیار سنگین، تقریباً "تعداد نوترونها $1/5$ برابر تعداد پروتونها است. یک عنصر میتواند تعداد متغیری نوترون داشته باشد. افزایش تعداد نوترون تأثیری در خاصیت شیمیایی عنصر ندارد و تنها از نظر جرم اختلافی در آنها به وجود می آورد. اتم هیدروژن معمولی تنها یک پروتون در هسته دارد ولی در برخی از اتمهای هیدروژن یک نوترون و یا حتی دو نوترون وجود دارد. این اتمهای مختلف هیدروژن را ایزوتوپهای هیدروژن می نامند. ایزوتوپ یک نوترونی هیدروژن را دوتریم و یا **هیدروژن سنگین** می نامند. جرم آن تقریباً "دو برابر جرم هیدروژن معمولی است و ترکیب آن با

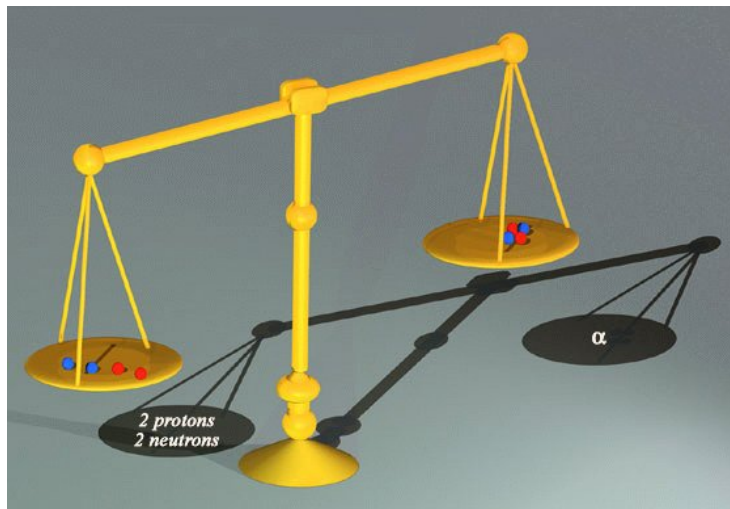
^۴ در ۴ ژوئیه ۲۰۱۲ دانش پژوهانی که در سرن (CERN) پژوهش می کردند اطلاع دادند که ذره بنیادی هگز را با اطمینان $99/99997$ درصد یافته اند که جرمی معادل $125 / C2$ ژیکا الکترون ولت دارد. این ذره به نام ذره الهی نیز لقب گرفته است. این ذره گویا در لحظات نخستین مهبانگ در میدانی که اطراف خود ایجاد می کرده به ذرات دیگر جرم منتقل می کرده است.

اکسیژن آب سنگین را به وجود می آورد که به مقدار ۰/۱ درصد در آبهای روی کره زمین یافت می شود. آب سنگین در نیروگاههای اتمی به مثابه نرم کننده و خنک کننده به کار برده می شود. ایزوتوپ دیگر هیدروژن، **تریتیم** نامیده می شود که در آن دو نوترون وجود دارد و بنابراین جرمش سه برابر هیدروژن معمولی است. چنان که گفته شد خواص شیمیایی این هر سه نوع هیدروژن یکی است و در کنشهای شیمیایی یکسان عمل می کنند. ایزوتوپها را به کمک خواص فیزیکی که همان اختلاف جرم است از هم جدا می سازند. تریتیم ایزوتوپ ناپایدار هیدروژن است و در طی زمان تجزیه شده و تبدیل به هلیوم سبک می گردد. در هسته این ایزوتوپ یکی از نوترونها که اضافی است تبدیل به پروتون می شود و چون **بقای بار** یکی از اصول اصلی در جهان است^۵ در نتیجه یک الکترون از هسته اتم خارج می شود. این روش دفع ناپایداری را **تجزیه بتا منفی** می نامند. زیرا در این پدیده یک نوترون تبدیل به پروتون می شود که بار مثبت دارد و باید الکترونی با بار منفی نیز تولید شود تا جمع جبری بارها معادل صفر گردد. الکترونی که با انرژی جنبشی بالا از اتم خارج می شود پرتو **بتا منفی** نام دارد که می تواند محیط اطراف خود را یونیزه کند (یعنی تولید یون منفی که همان الکترون است و یون مثبت که باقی مانده اتم است). پرتو بتای منفی در صورت اصابت به بافت های بدن سلولها را تخریب می کند (در آینده در این باره صحبت خواهیم کرد). بنابراین هسته به وجود آمده دو پروتون و یک نوترون و دو الکترون دارد که ایزوتوپی سبک از اتم هلیوم طبیعی است. هلیوم طبیعی دارای دو پروتون و دو نوترون و دو الکترون است.

فرایندی که در خورشید جریان دارد ترکیب پروتونها با یکدیگر برای تشکیل اتم هلیوم است. در واقع خورشید گلوله عظیمی از گاز هیدروژن (گاز هیدروژنی که الکترون خود را از دست داده) است. در اثر نیروی گرانشی هیدروژنهای موجود در خورشید، گرد یک مرکز جمع شده اند. در اثر فشار بی نهایت زیاد، اتمها آنقدر به هم نزدیک شده که دافعه بارهای مثبت بر روی یکدیگر اثر کرده و دمای درونی این گلوله را به شش تا ده میلیون درجه سانتیگراد بالا برده است. این حالت از ماده را پلاسما^۶ می گویند. در چنین حالتی الکترونها از اتمهای هیدروژن جدا شده و هسته اتمها که همان پروتون است با سرعتی نزدیک به سرعت سیر نور در درون خورشید در گردش هستند. پروتونها گاه با یکدیگر برخورد می کنند که در اثر آن بار مثبت یک پروتون از بین رفته و تبدیل به نوترون و مقدار زیادی انرژی می شود. در این حالت پروتون و نوترون دیگر نمی توانند جدا از هم باشند، چون جرم آنها کمتر از جرم پروتون و نوترون آزاد است. هسته به وجود آمده دوتریم است. در اثر برخورد تصادفی دو اتم دوتریم با هم، اتم هلیوم به وجود می آید. در این برخورد نیز مقداری از جرم دوتریمها

^۵ اصل بقای بار: همواره در جهان جمع جبری بارهای مثبت برابر است با جمع جبری بارهای منفی.
^۶ پلاسما حالتی از ماده است که در آن در دمای بالا، الکترونها از اتمها جدا شده اند.

از دست می رود و به صورت انرژی حرارتی درون خورشید منتشر می شود. در نتیجه چنین واکنشهایی است که تشعشعات گرم و دلپذیر خورشید به سوی سیاره ما سرازیر شده و زندگی را بر روی زمین به وجود آورده است. این فرایند پنج میلیارد سال است که ادامه دارد و با توجه به مقدار هیدروژن موجود در خورشید، تخمین زده اند که تا پنج میلیارد سال دیگر نیز ادامه خواهد داشت. در شکل (۶) به کمک ترازوی فرضی اختلاف جرم دو پروتون و دو نوترون را با اتم هلیم نمایش داده ام. اتمهای هلیم به وجود آمده دیگر نمی توانند حتی در دمای میلیون درجه ای خورشید از هم جدا شوند، چون جرم ذرات موجود در آنها کمتر از جرم نوترون و پروتون آزاد است. (هنگام تعریف انرژی پیوست در این باره بیشتر بحث خواهیم کرد).



شکل (۶) نموداری از تبدیل جرم به انرژی در تشکیل اتم هلیم. وزن دو پروتون و دو نوترون آزاد بیشتر از وزن هلیم است. هلیم در هسته اش دو پروتون و دو نوترون دارد. جرم پروتون $1/0.078$ و جرم نوترون $1/0.086$ و جرم هلیم $4/0.026$ می باشد. این اعداد بر حسب واحد جرم اتمی است، که بر مبنای جرم اتم کربن ۱۲ معادل ۱۲ واحد جرم اتمی تعریف شده است.

$$2m_p + 2m_n > m_{He} \quad 2 \times 1/0.078 + 2 \times 1/0.086 > 4/0.026$$

$$\Delta m = 4/0.026 - (2/0.156 + 2/0.172) = 0.0302$$

$$E = (M - m) C^2 \quad \text{بنا بر رابطه تبدیل جرم به انرژی انشتین}$$

در این رابطه M جرم مجموع دو پروتون و دو نوترون است و m جرم هلیم به وجود آمده می باشد و C سرعت سیر نور است که به توان ۲ می رسد. اگر جرم هسته اتم را که با حرف m مشخص می کنیم و جرم مجموع $(P + N)$ را M فرض کنیم، انرژی پیوست پروتونها به نوترونها با همان رابطه انشتین یعنی $E_b = (M - m) C^2$ به دست می آید که در آن انرژی پیوست مجموع پیوست P پروتون به N نوترون برای تشکیل هسته ای با عدد جرمی A به دست می آید. در فیزیک و یا شیمی اتمی غالباً "الکترون ولت و یا واحد بزرگتر از آن میلیون الکترون ولت را به جای جرم به کار می برند. یک الکترون ولت عبارتست از انرژی جنبشی که یک الکترون در اثر اختلاف پتانسیل یک ولت کسب کرده (انرژی جنبشی الکترون در مبدأ صفر فرض شده است). بنا به رابطه انشتین، اگر یک واحد جرم اتمی را ضرب در مجذور سرعت سیر نور کرده و برحسب الکترون ولت تبدیل کنیم، معادل ۹۳۱ میلیون الکترون ولت می شود. جرم یک پروتون معادل $938/2$ و جرم نوترون معادل $939/5$ و جرم الکترون معادل $0/511$ میلیون الکترون ولت است. و چون هر واحد جرم اتمی معادل ۹۳۱ میلیون الکترون ولت است لذا: در مورد تولید اتم هلیم انرژی حاصل از تبدیل دو پروتون و دو نوترون معادل $28/12 \text{ mev}$ میلیون الکترون ولت به دست می آید. $931 \times 0/0302 = 28/12 \text{ mev}$

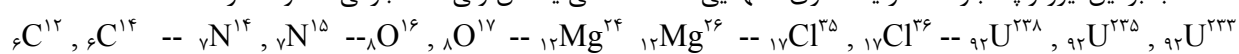
اگر عدد به دست آمده را بر تعداد مجموع ذرات موجود در اتم یعنی A که عدد جرم نامیده می شود، بخش کنیم انرژی پیوند به ازاء هر ذره به دست خواهد آمد. این مقدار همواره عدد مثبتی است. E_b/A برای هلیم برابر با $(28 \div 4 = 7)$ است ولی برای اتمهای

سبک نظیر دوتریم، تریتم، هلیوم سبک، لیتیم و برلیوم کمتر از ۷ میلیون الکترون ولت است. از اتم کربن به بعد این عدد افزایش می یابد و در خانواده آهن بیشترین مقدار را خواهد داشت. از خانواده آهن به بعد این عدد سیر نزولی دارد و برای خانواده اورانیوم کمتر از ۸ میلیون الکترون ولت خواهد بود. به همین دلیل است که عناصر سبک میل دارند با هم پیوست (گداخت هسته ای) حاصل کرده عنصری سنگین تر و در ناحیه وسط جدول تناوبی ایجاد کنند، برعکس عناصر سنگین شکسته می شوند تا عنصری سبک تر از خود تولید کنند و به ناحیه پایداری که در وسط جدول تناوبی است برسند.

در مورد اتم هلیوم دیدیم که دو پروتون و دو نوترون با هم پیوست حاصل کرده و اتم هلیوم را به وجود آورده اند بنابراین عدد اتمی که گفته شد تعداد پروتونها را مشخص می کند، در مورد هلیوم ۲ خواهد بود و عدد جرم که عبارت است از مجموع تعداد پروتونها و نوترونها عدد چهار خواهد بود. برای تمام عناصر و ایزوتوپ های آنها این اعداد را به صورت زیر می نویسند.



همانطور که مشاهده می کنید عدد اتمی یا تعداد پروتونها در سمت چپ و پایین علامت اختصاری عنصر و عدد جرمی در سمت راست و بالای علامت اختصاری عنصر نوشته می شود. هلیوم دو ایزوتوپ دارد ولی هیدروژن همانطور که دیدیم سه ایزوتوپ داشت. بنابر این ایزوتوپ عبارتست از یک سری اتمهایی که عدد اتمی یکسان ولی عدد جرمی متفاوت دارند.



همانطور که در فوق مشاهده می شود عناصر می توانند ایزوتوپهای متفاوتی داشته باشند چنانچه می بینید کربن ۲، ازت ۲، اکسیژن ۲، منیزیم ۲، کلر ۲ و اورانیوم ۳ ایزوتوپ دارند. برخی از عناصر حتی تا ۱۰ ایزوتوپ هم دارند مثلاً قلع ۱۰ ایزوتوپ دارد که همه پایدارند. ولی ۳ ایزوتوپهای اورانیوم ناپایدار می باشند.

عناصر دیگر هم ایزوتوپهای متفاوت دارند. مثلاً اتم اورانیوم سه ایزوتوپ دارد که هر سه ناپایدارند و با انتشار پرتو آلفا تجزیه می شوند. ایزوتوپهای اورانیوم از نظر خواص شیمیایی کاملاً شبیه به هم هستند و همگی ناپایدارند و در طی زمان تجزیه یا تخریب می شوند. آنها از نظر سرعت تجزیه با هم تفاوت دارند، یا به عبارت دیگر، نیمه عمرشان با هم متفاوت است. **زمان تجزیه** **نیمی از اتمهای رادیو ایزوتوپ را نیمه عمر گویند.** (در این باره نیز بعداً بیشتر صحبت خواهیم کرد.)

ایزوتوپ اورانیوم ۲۳۸ نیمه عمری معادل عمر زمین یعنی ۴/۵ میلیارد سال دارد و دارای ۹۲ پروتون و ۹۲ الکترون و ۱۴۶ نوترون است. اورانیوم ۲۳۸ به دلیل این نیمه عمر نسبتاً طولانی، به مقدار زیاد بر روی زمین باقی مانده است و نسبت در صد آن در سنگ معدن برابر ۹۹/۳ درصد است. حال آنکه اورانیوم ۲۳۵ که شکست پذیر است و در نیروگاهها به مصرف می رسد، نیمه عمری کوتاهتر دارد. در این ایزوتوپ ۹۲ پروتون و ۹۲ الکترون و لی ۱۴۳ نوترون وجود دارد. به عبارت دیگر سه واحد جرم اتمی سبکتر از ایزوتوپ قبلی است و چون نیمه عمر آن کوچکتر است (۷۰ میلیون سال) لذا در طی عمر زمین بیش از ۹۰ درصد آن تخریب شده و نسبت آن در سنگ معدن بسیار کم و معادل ۰/۷ درصد است. از این جهت مسئله غنی سازی برای این ایزوتوپ مطرح است. ایزوتوپ دیگر اورانیوم که دیگر در طبیعت یافت نمی شود، اورانیوم ۲۳۳ است که ۱۴۱ نوترون دارد و نیمه عمر آن ۱۶۰ هزار سال است. بعداً خواهیم گفت چگونه می توان این ایزوتوپ را در نیروگاه اتمی ساخت. این ایزوتوپ شکست پذیر تر از ایزوتوپ اورانیوم ۲۳۵ است.

۲) نیروهای حاکم بر طبیعت:

جهان و هر چه در آن است بر پایه و اساس کنش و واکنش بین چهار نیروی حاکم بر طبیعت به وجود آمده و هم اکنون تعادل کامل بین این نیروها وجود دارد. این نیروها به ترتیب عبارتند از: نیروی گرانشی، جاذبه عمومی یا جاذبه ثقل که تحت عنوان قانون نیوتون بیان می شود. نیروی جاذبه الکترومغناطیسی یا قانون کولمب. نیروی پیوند هسته ای قوی. نیروهای هسته ای ضعیف.

الف) نیروی گرانشی: داستان رایجی است که نیوتن از افتادن سیبی به زمین به این نتیجه رسید که اجرام نیرویی بر یکدیگر اعمال می کنند و این جاذبه را **نیروی گرانشی** نامید.



زمین ماه را به سوی خود می کشد و ماه زمین را. این فرایند در اثر تعادل بین نیروی گریز از مرکز و نیروی گرانشی اعمال شده بین آنها است. زمین بر روی مداری در فاصله ۱۵۰ میلیون کیلومتری از خورشید مستقر شده و هر سال یک بار به دور آن می چرخد و ۴/۵ میلیارد سال است که این تعادل برقرار است. نه تنها این دو سیاره، بلکه تمام سیارات و اقمار منظومه شمسی به حال تعادل و در گردش دائم به دور خود و به دور خورشید هستند و خورشید نیز با گردش خود به حول کهکشان راه شیری، در حال تعادل با بیش از یکصد میلیارد ستاره موجود در این کهکشان است. این نیرو سعی دارد اتمها و ذرات موجود در عالم را متراکم کرده و همه را در نقطه ای فشرده شبیه یک سیاهچاله متراکم سازد. خوشبختانه توده گازهای بسیار حجیم درون خورشید یا در واقع اتمهای درون آن بعد از تراکم، بر اثر نزدیکی زیاد به یکدیگر دافعه ای نسبت به هم اعمال می کنند و این دافعه مبارزه ایست علیه نیروی گرانشی و مانع از آن می شود که جهان و هر چه در آن هست تبدیل به نقطه کوری مانند سیاهچاله شود.

خورشید توده عظیمی از گاز هیدروژن است که به صورت پلازما است: یعنی دریایی از اتمهای بدون الکترون و بسیار نزدیک به هم و با دمای ۶ تا ۱۰ میلیون درجه سانتیگراد. چنان که پیشتر گفتیم، در این حالت اتمها بر اثر نزدیکی بسیار زیاد به یکدیگر گرم شده و با سرعتی نزدیک به

سرعت سیر نور در تحرک دائمی هستند. بر اثر اصابت هسته های اتم هیدروژن (پروتون)، ابتدا ۲ پروتون به هم اصابت کرده یکی از آنها تبدیل به نوترون می شود و این دو می توانند با یکدیگر پیوسته شوند و به صورت هسته هیدرون سنگین یعنی دوتریم باقی بمانند. سپس از برخورد دوتریم ها با هم هسته اتم هلیم که دو پروتون و دو نوترون دارد در درون پلاسما به وجود می آید. این پدیده را **گداخت هسته ای** و یا پیوست اتمها گویند و بشر با شناخت این فرایند بمب هیدروژنی را ساخته است. در درون خورشید این بمب متعادل و دائمی پنج میلیارد سال است که با نیروی گرانشی تعادلی برقرار کرده است. ولی دانشمندان هنوز کاملاً موفق به کنترل این فرایند نشده اند و همانطور که قبلاً اشاره شد ممکن است تا ده یا بیست سال آینده نیروگاهی متکی بر این پدیده بسازند.

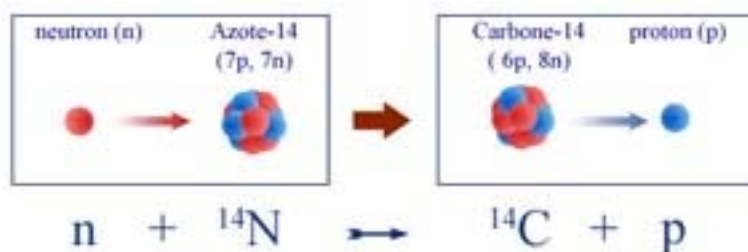
ب) نیروی جاذبه الکترو مغناطیسی: این نیرو که به قانون کولمب نیز مشهور است، با دافعه و یا جاذبه قطبهای همنام (دافعه) و غیر هم نام (جاذبه) تعریف می شود. الکترونها در درون اتمها به کمک این نیرو در فاصله های بسیار دور از هسته و در اطراف آن در گردش هستند. با بیانی غیر علمی می توان گردش الکترونها را به دور هسته اتم مشابه با گردش سیارات و ماهواره های آنها به دور خورشید تشبیه کرد. البته هدف از این شبیه سازی، نشان دادن فاصله بسیار زیادی است که بین هسته اتم و الکترونهاش وجود دارد و گرنه گردش الکترونها به دور هسته اتمها بسیار پیچیده تر از این است.

نیروی گرانشی در قرن ۱۷ و نیروی الکترومغناطیسی در اوایل قرن ۱۸ میلادی کشف شدند.

پ) نیروی پیوند هسته ای قوی: نیروی هسته ای قوی در آغاز قرن بیستم کشف شد. بر اساس این نیرو، ذرات بنیادی نظیر پروتون و نوترون در درون هسته اتمها کنار یکدیگر قرار گرفته و یا در واقع پیوند شده اند. باید گفت پروتون و نوترون پیوند شده در هسته اتمها جرم کمتری از پروتون و نوترون آزاد دارند.

ت) نیروهای هسته ای ضعیف: این نیروها مربوط به تغییر ترازهای انرژی بین پروتون و نوترون پیوند شده به هم در هسته اتمهای ناپایدار است. در واقع زمانی که جرم پروتون و نوترون موجود در هسته ای بیش از حد پایداری باشد، هسته مربوطه را ناپایدار و یا **رادایوایزوتوپ** می نامند و اگر این هسته مربوط به یک عنصر باشد آنرا **رادایو عنصر** می نامند. اتم کربن معمولی دارای ۶ پروتون و ۶ نوترون است ولی رادایوایزوتوپی از این عنصر می شناسیم که ۶ پروتون و ۸ نوترون دارد، این رادایوایزوتوپ در اثر پرتوهای بسیار قوی خورشید بر روی اتم ازت به وجود آمده است. به عبارت دیگر پرتو پر انرژی خورشیدی به هسته اتم ازت اصابت کرده، یکی از پروتونهای درون هسته را تبدیل به نوترون کرده است. (ازت ۷ پروتون و ۷ نوترون دارد). رادایو عنصر کربن که به آن کربن ۱۴ نیز

گویند در جو زمین وجود دارد و چون تولید آن به صورت دائمی به مدد پرتوهای خورشیدی انجام می‌گیرد، بنابراین نسبت در صد آن همواره ثابت است. شکل (۷) چگونگی تولید کربن ۱۴ را در جو زمین نمایش می‌دهد.



شکل (۷) چگونگی تولید کربن ۱۴ رادیو اکتیو در جو زمین. گاه گاهی یک نوترون رها شده از خورشید به اتم ازت موجود در جو زمین اصابت کرده جذب آن می‌شود و چون تعادل درونی اتم ازت از بین می‌رود لذا اتم ازت یک پروتون از خود دفع می‌کند. فرآورده این واکنش کربن ۱۴ است که ناپایدار می‌باشد و با تبدیل یکی از پروتونها به نوترون و انتشار یک پرتو بتا، دوباره اتم ازت طبیعی ۱۴ را به وجود می‌آورد.

پژوهشگران از این خاصیت استفاده کرده، و به کمک آن عمر چوبهای باقی مانده در آثار تاریخی را تشخیص میدهند. نیمه عمر این رادیو ایزوتوپ ۵۶۰۰ سال است.

از عنصر فرانسیم به عدد اتمی ۸۷ تا اورانیوم به عدد اتمی ۹۲ همه رادیو عنصر هستند و همگی ناپایدارند. این عناصر با انتشار پرتو آلفا که هسته اتم هلیم است و یا انتشار پرتوهای بتا تجزیه می‌شوند. (در این باره بیشتر صحبت خواهیم کرد).

لحظه بی نهایت کوتاهی بعد از مهبانگ تأثیر متقابل نیروهای چهارگانه یاد شده پدیدار و موجب شده که عناصر کم و بیش پایداری به وجود آیند. اگر یکی از این نیروها به تنهایی عمل می‌کرد، آینده تمام مجموعه جهان به نحوی دیگر رقم زده می‌شد:

- نیروی گرانشی به نحوی عمل می‌کند که گویی قصد دارد تمام اشیاء جرم دار را در هم فرو برد و از آن مجموعه بسیار بزرگ مهیبی شبیه به یک سیاهچاله ایجاد کند.

- نیروی الکترو مغناطیسی سعی دارد ملکولهای پایداری شبیه ملکول آب یا گاز کربنیک و یا متان و... بسازد و در نتیجه جهان تبدیل به مجموعه غم انگیزی شبیه توده ابرهای انبوه شود.

- نیروی هسته ای قوی و ضعیف سعی دارند از پروتونها و نوترونها هسته هایی بیش از ایش پدیدار بسازند تا در نهایت جهان به طور یکپارچه تبدیل به عناصر پایدار شبیه عناصر خانواده آهن شود. اما

با جهانی که تمام اجزای آن از آهن درست شده چه می‌توان کرد؟

خوشبختانه این چهار نیرو، به طور همزمان عمل می‌کنند، آنچه یکی می‌سازد دیگری خراب می‌کند و این بازی دائمی یعنی نو آوریها، دنیایی را پدید می‌آورد که در آن زندگی می‌کنیم.

۳) انرژی پیوند هسته ای

چنان که گفته شد، ذرات بنیادی نظیر پروتون و نوترون در درون کوره داغ ستارگان با سرعتی نزدیک به سرعت سیر نور در دمایی بیش از میلیونها درجه سانتیگراد با یکدیگر برخورد کرده و هسته اتمهای عناصر موجود در طبیعت را ایجاد کرده اند. هسته های به وجود آمده بعد از فروپاشی ستاره در فضا پراکنده شده است. یکی از این کوره های زرگری عالم، مادر خورشید ما بوده که در آغاز ستاره ای هزاران بار بزرگتر از خورشید کنونی بوده است. این ستاره پس از پایان یافتن مواد سوختنی اش، به شکل غول سرخ رنگی در آمده و چندی بعد منفجر شده و مواد به وجود آمده در قلب خود را به بیرون از ستاره پراکنده کرده است. این مواد با سرعت بسیار زیادی از درون خورشید به خارج پخش شده اند. نیروی گرانشی سعی به نگه داری آنها کرده و پس از مدتی هر تکه از مجموعه ها بر مدارهایی به دور هسته مرکزی گردش متعادلی را آغاز می کنند. در واقع بر اثر موج انفجار، گازهای هیدروژن موجود در کهکشان گرد یکدیگر متمرکز شده و خورشید کنونی را به وجود آورده اند. تکه های سنگین باقی مانده از خورشید نخستین، که چگالی بالا و حجم کم دارند، در فواصلی نزدیکتر، سیاراتی چون عطارد، زهره، زمین و مریخ را ایجاد کرده اند. تکه های گازی شکل و حجیم تر در مدارهای دورتر، سیارات مشتری، زحل، اورانوس و نپتون را تشکیل داده اند.^۷

در کره زمین ۹۲ عنصر می شناسیم که همه از فراورده های پیوست اولیه، یعنی هلیم حاصل شده اند. برای فهم پدیده شکست و یا پدیده پیوست اتم ها لازم است کمی در باره انرژی پیوست اتمها صحبت کنم.

تعریف و تشریح انرژی پیوند هسته ای و یا پیوند الکترونها در اتمها و یا انرژی پیوند اتمها به هم (برای ایجاد ملکولهایی نظیر آب، ترکیبات معدنی یا آلی مثل مشتقات نفت)، بخش مهمی از علم شیمی و فیزیک را به خود اختصاص داده است. در این مختصر می کوشم با بیانی ساده، انرژی پیوند درون هسته ای را شرح دهم.

زن و شوهر دلبسته به هم را در نظر بگیرید که اجبار زمان آنها را از هم جدا کرده است. فرض کنید شوهر بی قرار که در مشهد اقامت دارد می تواند سوار خودرو پیکان اش با ۵۰ لیتر بنزین شود و به سوی تهران حرکت کند. از سوی دیگر اتفاقاً زن هم از تهران خودروی پراید خود را با ۴۰ لیتر بنزین سوار می شود و به سمت مشهد حرکت می کند. این دو در شاهرود به یکدیگر ملحق می شوند. این زن و شوهر و خودروهای آنها را به پروتون (زن و پراید) و نوترون (مرد و پیکان) تشبیه

^۷ تا سال ۲۰۰۶ میلادی پلوتون نیز جزو سیارات منظومه خورشیدی در نظر گرفته می شد، ولی از این سال به بعد انجمن اختر شناسان جهان این سیاره و سیاره بزرگتر از آنرا که اریس نام دارد، سیاره کوتوله و خارج از منظومه خورشیدی ما می دانند.

می کنیم. سیستم زن و پراید ۴۰ لیتر بنزین (تقریباً ۳۵ کیلوگرم) سوزانده تا به شاهرود برسد و سیستم مرد و پیکان ۴۵ لیتر بنزین (تقریباً ۴۰ کیلوگرم) سوزانده تا به شاهرود برسد. این دو سیستم بطور مجموع ۷۵ کیلوگرم جرم از دست داده تا به هم برسند. برای جدا کردن این دو از هم، همین اندازه جرم به علاوه تمایل طبیعی دو فرد به این کار را باید به آنها داد تا به محل اولیه شان برگردند. این مقدار جرم ابتدا به صورت انرژی حرارتی در درون موتورها سوخته و سپس به صورت انرژی جنبشی در چرخها تبدیل به حرکت شده است. در این مثال، مرتب از سوختن صحبت کردیم و این کلمه به معنای ترکیب بنزین با اکسیژن است که یک پدیده شیمیایی است و حاصل آن گاز کربنیک و بخار آبی است که در فضا پراکنده شده است. طبق قانون لاوازیه^۸ باید جرم مواد اولیه و فراورده یکسان باشد و جرمی از دست نرفته باشد. (یعنی جرم گاز کربنیک به وجود آمده به علاوه جرم بخار آب به وجود آمده باید ۷۵ کیلوگرم باشد، اما چنین نیست و به مقدار جزئی Δm کمتر از این مقدار است). طبق رابطه انشتین^۹ در این معادله مقداری جرم تبدیل به انرژی شده که در مورد این مثال ΔM جرم از دست رفته است. جرم از دست رفته از این ۷۵ کیلوگرم را به سختی می توان حتی با دقیق ترین ترازوها اندازه گرفت. ولی به کمک رابطه انشتین به سهولت مقدار آن که در حدود 0.04 میلی گرم می باشد به دست می آید. $\Delta m = 0.04 \text{ m gr}$

چنان که گفته شد، درون خورشید بر اثر اصابت هسته های هیدروژن و یا دوتریم با یکدیگر عنصر هلیم به وجود می آید و گرمایی که از خورشید منتشر می شود، حاصل از دست رفتن مقداری از جرم پروتونها و نوترونهاست که تبدیل به انرژی شده است. این درست شبیه به مثال سیستم زن و شوهری است که در سفرشان به مقدار 0.04 میلی گرم جرم بنزین تبدیل به انرژی جنبشی گردید. برای تشکیل یک اتم گرم هلیم (یعنی ۴ گرم اتم هلیم) مقدار انرژی از دست رفته معادل با $4/26$ میلیارد کیلو ژول خواهد بود، یعنی انرژی ای به مراتب بیشتر از مصرف برق یک شبانه روز تهران بزرگ است. برعکس برای جدا کردن ذرات تشکیل دهنده هلیم باید $4/26$ میلیارد کیلو ژول ($4,260,000,000$ کیلو ژول) انرژی به درون اتم هلیم تزریق کرد تا پروتون و نوترونهای این عنصر از هم جدا شوند و به همین ترتیب برای جدا کردن آن زن و شوهر از هم و رساندن آنها به محل نخستین شان تنها 787000 کیلو ژول انرژی لازم است.

در درون خورشید در هر ثانیه 600 میلیون تن ($600,000,000,000$ کیلوگرم) هیدروژن تبدیل به هلیم می شود. با یک ثانیه فعالیت خورشید می توان شش میلیارد شهر بزرگ چون تهران را به مدت صد سال شب و روز روشن نگه داشت. از این 600 میلیون تن هیدروژن تنها 4 میلیون

^۸ Antoine Laurent Lavoisier (۱۷۹۴ - ۱۷۴۳)

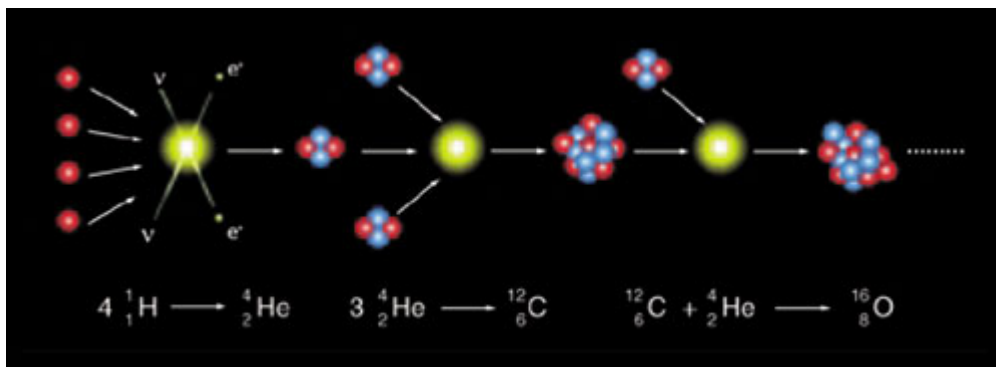
^۹ Albert Einstein (۱۹۵۵ - ۱۸۷۹)

تُن آن در هر ثانیه تبدیل به انرژی می گردد و به سوی سیارات و در فضای لایتناهی پراکنده می شود. بنابراین در خورشید در هر ثانیه ۵۹۶ میلیون تُن هلیوم به وجود می آید. حتماً می پرسید پس چرا به ناگاه تمام هیدروژن درون خورشید مانند یک بمب هیدروژنی منفجر نمی گردد؟ در مورد سیستم زن و شوهر و خودروهایشان راه مشخص است. جاده آسفالت آنها را به سوی یکدیگر هدایت می کند و در یک نقطه (شاهرود) به هم می رسند. ولی در درون خورشید با حجم بی نهایت زیادی که دارد^{۱۰} راههای مشخصی برای رسیدن پروتونها به هم وجود ندارد و این تنها تصادف است که باعث برخورد آنها به هم می شود. از سوی دیگر بار مثبت پروتونها مانند جوشنهای الکتریکی عمل می کنند و با نزدیک شدن آنها به هم دافعه ای به وجود می آورند. با وجود این، در مرکز خورشید گاه ممکن است سرعت پروتونی آنقدر زیاد شود که در موقع برخورد به پروتون دیگر بار مثبت آنها از بین برده و آن را تبدیل به نوترون کند و با آن هسته واحدی به صورت دوتریم بسازد. احتمال وقوع چنین واکنش پیوستی در داخل خورشید برای هر پروتون بسیار بسیار ناچیز است. در واقع هر پروتون به طور متوسط حداقل باید چهارده میلیارد سال صبر کند تا نوبتش برای انجام واکنش برسد. این زمان نجومی بی نهایت طولانی مقدار ذخیره هیدروژن (پروتون) را که در هر ثانیه ۶۰۰ میلیون تُن آن مصرف می شود برای ما معلوم می دارد. ۵ میلیارد سال است که خورشید در هر ثانیه ۶۰۰ میلیون تُن هیدروژن را تبدیل به هلیوم می کند و تخمین زده می شود که تا ۵ میلیارد سال دیگر ذخیره هیدروژن خورشید تمام شود. در آن زمان که تمام هیدروژن ها تبدیل به هلیوم گردید، به علت دافعه زیادتر هلیوم ها (هر هلیوم دو بار مثبت دارد) دمای خورشید بالا می رود و به صد میلیون درجه سانتیگراد خواهد رسید، در این زمان هسته های هلیوم با سرعت زیاد به یکدیگر اصابت کرده و عناصر سنگین تر از خود را می سازند.

نظام جهان به گونه ای است که گویی میل به تنوع و پیچیده گی در سرنوشت اشیاء و مواد از قبل رقم زده شده است. عنصر هلیوم میل ترکیبی ندارد و در کنشها و بر کنشهای شیمیایی وارد نمی شود و از قبل آن هیچ آینده ای نمی توان برای جهان در نظر گرفت. اگر تمام جهان از این عنصر که در کوره داغ ستارگان تشکیل می شود ساخته شود، جهانی بی معنی و خالی از تنوع خواهد بود. در آغاز گفتم اگر نیروی گرانشی و یا نیروهای دیگر به تنهایی عمل می کردند، جهان خالی از تنوع، بی بهره از زیبایی های طبیعت و خالی از وجود ما انسانها می شد. اما چون جهان باید متنوع باشد و به سوی پیچیدگی سوق یابد، اتمهای هلیوم بی اثر با هم گداخته (پیوست) می شوند و اتمهای کربن، ازت و اکسیژن را به وجود می آورند. از ترکیب این سه اتم و هیدروژن و مختصری از عناصری دیگر

^{۱۰} قطر استوایی خورشید ۱.۶۰۰.۰۰۰ کیلومتر و قطر استوایی زمین ۱۲.۷۵۶ کیلومتر است. یعنی می توان تقریباً دو میلیون سیاره زمین را در دل خورشید جای داد.

موجود در فضا، همهٔ ارگانهای زنده موجود در روی سیارهٔ زمین به وجود آمده اند و حال آنکه خود هلیوم هیچ گونه واکنش شیمیایی با عناصر دیگر ندارد. از پیوست ۴ هستهٔ اتم هیدروژن (پروتون) در زمان تعادل کنونی خورشید هستهٔ اتم هلیوم به وجود می آید. اما در زمانی که ذخیرهٔ اتم هیدروژن (پروتون) خورشید تمام شد، قبل از واپسین دم خورشید، از پیوست دو هسته هلیوم با هم، هسته عنصر برلیوم به وجود می آید که ۴ پروتون و ۴ نوترون دارد و یا از پیوست سه اتم هلیوم با هم اتم کربن که ۶ پروتون و ۶ نوترون دارد تولید می شود. از پیوست ۴ هستهٔ هلیوم با یکدیگر عنصر اکسیژن به وجود می آید که ۸ پروتون و ۸ نوترون دارد و یا از پیوست ۳ هستهٔ هلیوم و ۱ هستهٔ دوتریم (هیدروژن سنگین) اتم ازت به وجود می آید. بعد از پایان این پیوستها، عمر خورشید به پایان می رسد و شروع به فروپاشی خواهد کرد. نموداری از این تبدیلات را در شکل (۸) می بینید. این تصویر فهم پدیده پیوست اتمهای هلیوم با هم برای تولید کربن، ازت و اکسیژن را ساده ترمی کند. این پدیده در زمانی اتفاق می افتد که ذخیرهٔ هیدروژن خورشید تمام شده و عملاً "بخش عظیمی از هیدروژنها تبدیل به هلیوم شده باشند. ۵ میلیارد سال از عمر خورشید گذشته و پیش بینی می شود تا پنج میلیارد سال دیگر ذخیره هیدروژن خورشید تمام شود و خورشید تعادل خود را از دست دهد. این مرحله از زندگی خورشید کوتاه تر از مرحلهٔ قبلی است. در ابتدا خورشید در دوره ای کوتاه در حدود یک میلیون سال با نیروی گرانشی دست و پنجه نرم می کند تا به حالت تعادل جدیدی برسد. این تعادل حدود صد میلیون سال طول خواهد کشید و بدین ترتیب خورشید عمر کوتاه دو باره باز یافته ای پیدا می کند و باز هم تا مدتی دیگر به روی جهانیان لبخند خواهد زد. ولی این لبخند دیگر لبخند قبلی نیست و چهرهٔ خون آلود خورشید (ستاره ای در این حالت را «غول سرخ» می نامند) که چندین میلیون برابر بزرگتر از ایام شباب آن است، نموداری از واپسین مبارزه اش با نیروی وحشتناک گرانشی است. در جدول (۳) نمونه واکنشهایی که در خورشید اتفاق می افتد و خواهد افتاد را آورده ام.



↑ واپسین دم زندگی خورشید ↑ دوران تعادل مجدد خورشید ↑ دوران تعادلی خورشید (زمان حال)

شکل (۸) نموداری از تبدیل ۴ پروتون به هلیوم در طول عمر خورشید (ده میلیارد سال، دوران تعادلی خورشید). در واپسین دم زندگی خورشید، از اتحاد سه اتم هلیوم با هم عنصر کربن و از برخورد یک اتم هلیوم با هسته اتم کربن، اتم اکسیژن به وجود می آید. در این

دوران خورشید به تعادل جدیدی می رسد که صد میلیون سال طول خواهد کشید(دوران تعادل مجدد خورشید). بعد از این دوران واپسین دم خورشید شروع می شود که به سرعت به فروپاشی خورشید منجر می گردد. اعدادی که در بالا و سمت چپ علامت اختصاری نام عنصر نوشته شده، معرف **عدد جرم** و یا تعداد مجموع پروتونها و نوترونهای عنصر است و اعدادی که در پایین و سمت چپ علامت اختصاری نام عنصر نوشته شده، **عدد اتمی** است که تعداد پروتونها و یا الکترونهای عنصر را مشخص می سازد. در این کتاب برای سهولت شناخت مختصات عناصر، عدد اتمی را در سمت چپ و پایین و عدد جرم را سمت راست و در بالای علامت اختصاری عنصر قرار داده ام، مانند ${}_{94}^{239}\text{Pu}$, ${}_{92}^{235}\text{U}$, ${}_{2}^4\text{He}$.

${}_1^1\text{P} + {}_1^1\text{P} + {}_1^1\text{P} + {}_1^1\text{P} \rightarrow {}_2^4\text{He}^\xi$	هلیوم
${}_2^4\text{He}^\xi + {}_2^4\text{He}^\xi \rightarrow {}_4^8\text{Be}^\wedge$	برلیوم
${}_2^4\text{He}^\xi + {}_2^4\text{He}^\xi + {}_2^4\text{He}^\xi \rightarrow {}_6^{12}\text{C}^\vee$	کربن
${}_2^4\text{He}^\xi + {}_2^4\text{He}^\xi + {}_2^4\text{He}^\xi + {}_1^2\text{D}^\gamma \rightarrow {}_7^{14}\text{N}^\zeta$	ازت
${}_2^4\text{He}^\xi + {}_2^4\text{He}^\xi + {}_2^4\text{He}^\xi + {}_2^4\text{He}^\xi \rightarrow {}_8^{16}\text{O}^\eta$	اکسیژن

جدول (۳) واکنشهایی پیوسته یا گداخت هسته ای که در خورشید اتفاق می افتد. سطر اول جدول مربوط به زمان تعادلی خورشید است که از ۵ میلیارد سال پیش شروع شده و تا ۵ میلیارد سال دیگر ادامه خواهد داشت. زمانی که ذخیره هیدروژن (پروتون) خورشید تمام شود خورشید تبدیل به غول سرخی خواهد شد که شعاع آن تمام سیارات تلوریک(عطارد، زهره، زمین و مریخ) را در بر خواهد گرفت. در این مرحله از عمر خورشید تعادل جدیدی شروع خواهد شد که یک میلیون سال طول خواهد کشید. در این دوران در درون خورشید واکنشهایی که در سطور بعد آورده شده اند اتفاق خواهد افتاد. در این مرحله از عمر خورشید هلیوم تبدیل به عناصر برلیوم، کربن، ازت و اکسیژن خواهد شد. زمانی که ذخیره هلیوم خورشید تمام شود، خورشید فروپاشی خواهد کرد.

درون ستارگان به مراتب بزرگتر از خورشید هسته اتمهای سنگین تر به وجود می آید، از برخورد هسته اکسیژن با اکسیژن عنصر گوگرد با ۱۶ پروتون و ۱۶ نوترون تولید می شود. از برخورد عنصر اخیر با هسته عنصر منیزیم (دارای ۱۲ پروتون و ۱۳ نوترون) هسته عنصر آهن با ۲۶ پروتون و ۲۹ نوترون به وجود می آید و در اثر این برخورد دو پروتون به خارج پرتاب می شود. عنصر آهن پایدارترین عنصر جدول تناوبی است. به همین دلیل بعد از هیدروژن و هلیوم، آهن فراوانترین عنصر در طبیعت است. مرکز کره زمین و یا سیارات جامد دیگر منظومه شمسی از آهن و یا عناصر خانواده آهن تشکیل شده است. در هسته عنصر آهن ۳ نوترون بیشتر از پروتون ها وجود دارد. هر چه تعداد پروتونها زیادتر شود نیروی دافعه بیشتری خواهند داشت. برای متعادل کردن این نیرو باید تعداد نوترونها بیشتر باشد. با نگاهی به جدول تناوبی عناصر می بینیم که در عناصر بعد از آهن نسبت نوترون ها به پروتون ها به تدریج از عنصری به عنصر دیگر افزایش می یابد. برای مثال عنصر قلع در مقابل ۵۰ پروتون ۶۰، ۶۱، ۶۲، ۶۳، ۶۴، ۶۵، ۶۶ . . . و یا حتی ۷۰ نوترون دارد (عنصر قلع ۱۱ ایزوتوپ پایدار دارد) در عنصر اورانیم - همانطور که قبلاً دیدیم - در مقابل ۹۲ پروتون ۱۴۱، ۱۴۳ و یا ۱۴۶ نوترون وجود دارد. (یعنی تقریباً نسبت نوترون به پروتون ۱/۵ برابر است).

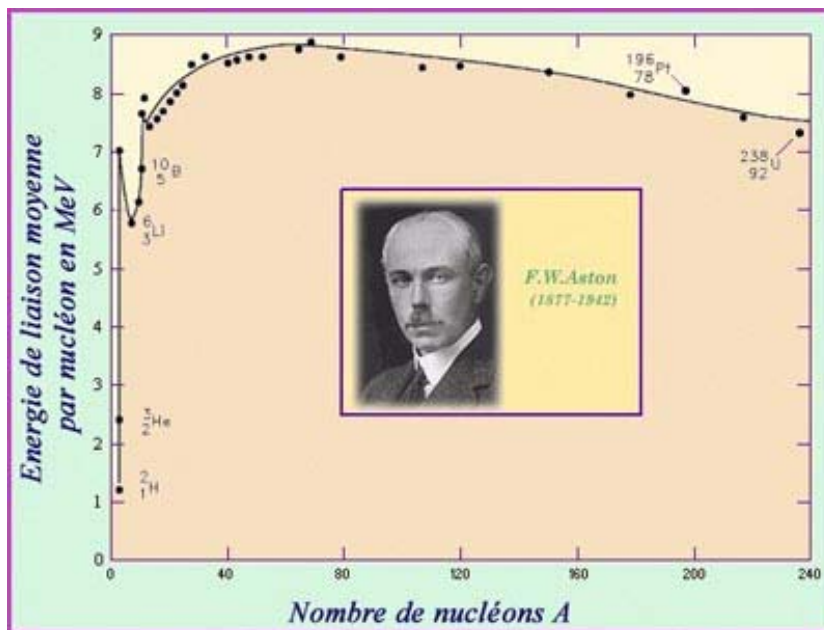
۴) دلیل پیوست و یا شکست اتمها:

پیشتر دیدیم که انرژی اتصال اتم هلیوم به وجود آمده در درون خورشید معادل ۲۸ میلیون الکترون ولت است. (زیر نویس شکل (۶) صفحه ۱۸ مراجعه شود). اگر برای عناصر دیگر، جرم واقعی عنصر را از جرم مجموع پروتونها و نوترونهای آن کم کنیم و عدد حاصل را ضرب درمجدور سرعت سیر نور کنیم، انرژی پیوند عنصر به دست خواهد آمد. برای مثال در اتم کربن $95/4$ و یا در اتم اکسیژن $128/2$ و در اتم آهن $467/5$ و در اتم اورانیم 235 معادل 1715 میلیون الکترون ولت می شود. اگر این اعداد را بخش بر تعداد ذرات موجود در هر یک از این عناصر کنیم، به ترتیب برای هلیوم عدد 7 و برای کربن عدد $7/95$ و برای اکسیژن $8/01$ و برای اتم آهن $8/5$ و نهایتاً برای اتم اورانیم 235 عدد $7/3$ میلیون الکترون ولت به ازای هر ذره موجود در آنها به دست می آید. بنابراین متوجه می شویم که پایداری ذرات به هم پیوسته شده در اتم اورانیم 235 به مراتب کمتر از پایداری پیوست اتمها در اتم آهن است. در نتیجه اتم اورانیم میل دارد شکسته شده و به دو عنصر سبکتر از خود تبدیل شود که در وسط جدول تناوبی عناصر قرار دارند. به همین دلیل است که با ورود یک نوترون کم انرژی به داخل هسته اتم اورانیم، آن را تبدیل به اورانیم 236 می کند و در نتیجه انرژی پیوند اتم اخیر که یک نوترون نیز بیشتر دارد کمتر از عدد $7/3$ به ازای هر ذره می شود. اتم به وجود آمده بدین ترتیب نمی تواند این ناپایداری جدید را تحمل کند و بعد از چند هزارم ثانیه نوساناتی در آن ایجاد می گردد و به دو تکه تقسیم می شود. این عمل را شکست اتمی گویند.

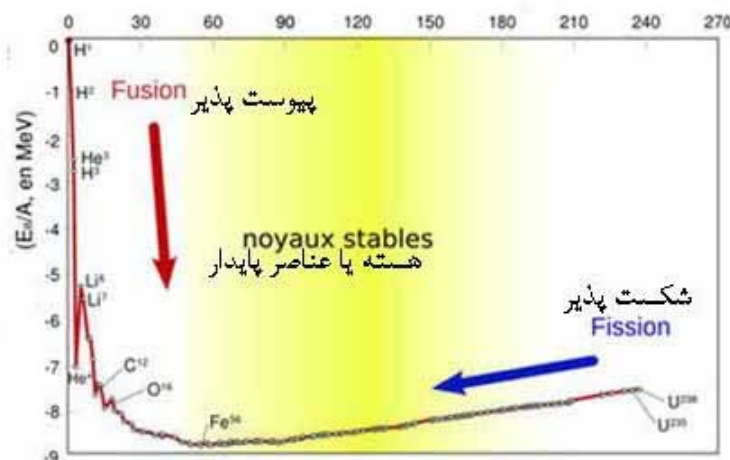
اگر اعداد مربوط به تمام عناصر موجود در جدول تناوبی را حساب کرده و بر حسب عدد جرمی عناصر بر روی محورهای مختصات قرار دهیم، منحنی شبیه شکل (۹) به دست می آید. عناصر سبک نظیر دو تریتم و لیتیم و تریتم با هم پیوست حاصل می کنند تا عنصری سنگین تر از خود مانند هلیوم را بسازند و عناصر بسیار سنگین نظیر اورانیم میل دارند شکسته شوند تا عناصر سبک تر از خود را که نزدیک به خانواده آهن اند تولید کنند. پدیده اول را پیوست یا گداخت هسته ای (فیوژیون) گویند و پدیده دوم را شکست هسته ای (فیسین) گویند.

در این منحنی اعداد همه مثبت است، حال آنکه پیشتر دیدیم بعد از برخورد دو نوترون و دو پروتون در درون خورشید 28 میلیون الکترون ولت انرژی بیرون آمد. همچنین دیدیم انرژی پیوند به ازای هر نوکلئون در هلیوم 7 میلیون الکترون ولت است. یعنی پس از تشکیل هسته هلیوم از هر نوکلئون آن این مقدار انرژی خارج شده است. در بازار وجهی که از صندوق خارج می شود را با علامت منفی مشخص می کنند و نیز به وجهی که وارد صندوق می شود علامت مثبت می دهند. در ترمودینامیک هم این گونه دخل و خرج انرژی را در نظر می گیرند. هرگاه نظامی انرژی از دست

دهد، ارزش آنرا منفی و اگر انرژی کسب کند ارزش آنرا مثبت نمایش می دهند. بنا براین ارزش واقعی انرژی پیوست نوکلئونها منفی است. زیرا هر نوکلئون در پیوست با نوکلئونهای دیگر انرژی از دست داده است. لذا باید منحنی را به صورت نمودار موجود در شکل (۱۰) نمایش داد.



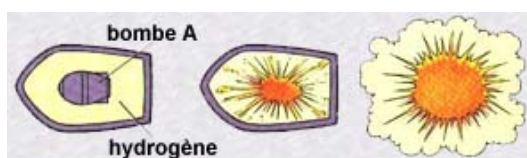
شکل (۹) تغییرات انرژی پیوند هر نوکلئون برحسب عدد جرمی عناصر موجود در جدول تناوبی عناصر. ترسیم این منحنی بسیار ساده است، جرم واقعی هر عنصر در جدولهای تناوبی (جدول مندلیف) آمده است. کافی است تعداد پروتونها و نوترونهای موجود در عنصر را بدانیم. جمع جبری جرم تعداد کل این ذرات را محاسبه کرده و جرم واقعی عنصر را از آن کم می کنیم، سپس جرم به دست آمده را ضرب در مجذور سرعت سیر نور می کنیم، و با تبدیل واحد ها برحسب میلیون الکترون ولت به دست می آوریم. به این ترتیب انرژی مجموع پیوند عنصر به دست می آید. پیشتر گفتیم اگر انرژی مجموع را بخش بر تعداد پروتونها و نوترونهای موجود در عنصر کنیم، انرژی پیوست عنصر به ازای هر ذره یا نوکلئون E_b/A به دست خواهد آمد. اگر در محور طولها مجموع تعداد پروتونها و نوترونهای عنصر را که عدد جرمی A می نامند برده و انرژی به ازاء هر نوکلئون را که به دست آورده ایم در محور عرضها بریم منحنی فوق به دست خواهد آمد.



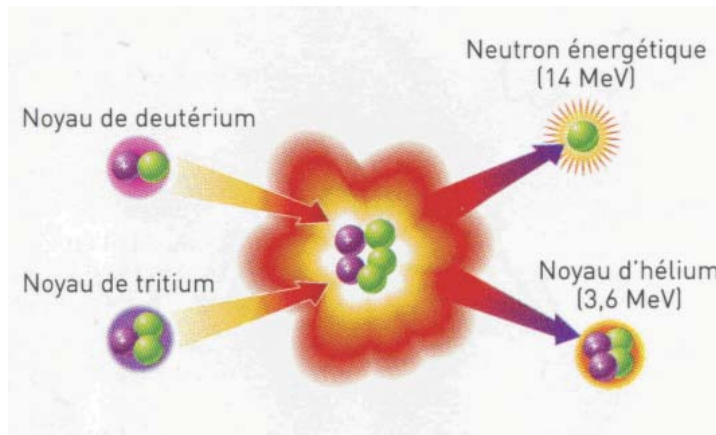
تصویر (۱۰) نمودار تغییرات انرژی پیوند به ازای هر ذره یا نوکلئون. چنانچه که ملاحظه می شود، این اعداد ارزش منفی دارند و مشخص کننده کمبود جرم عناصر مربوطه نسبت به ذره پایدار تشکیل دهنده آنها است. برای پروتون و نوترون آزاد این ارزشها معادل صفر است. عناصری که در طرف چپ منحنی واقع شده اند انرژی پیوند کمتری دارند (البته قدر مطلق اعداد را باید در نظر

گرفت) و نسبتاً نا پایدارتر بوده و میل دارند با هم پیوست کنند تا به جرم کمتر و یا پایداری بیشتری برسند. این فرایند را پیوست یا گداخت اتمی می نامند. بر عکس عناصری که در طرف راست منحنی قرار دارند (عناصر خانواده اورانیم) میل دارند شکسته شده و تبدیل به عناصر سبکتر از خود شوند. این فرایند را شکست اتم گویند. در واقع در طبیعت، همهٔ اشیاء و یا اجسام و حتی موجودات میل دارند به جرم کمتری برسند و این یکی از اصول اساسی ترمودینامیک است.

الف) پیوست اتمها (گداخت هسته ای Fusion): پیشتر دیدیم که در درون خورشید در حین تشکیل هستهٔ اتم هلیم پایدار، پروتونها و نوترونها مقداری جرم از دست دادند که به صورت انرژی از خورشید خارج شد. مقدار انرژی ایجاد شده برای تشکیل یک اتم هلیم را انرژی پیوند گویند، که مقدار آنرا برحسب میلیون الکترون ولت و برای هر ذرهٔ موجود در اتم بیان می دارند. برای مثال در اتصال یک پروتون به یک نوترون برای تولید ایزوتوپ هیدروژن سنگین، (یعنی دوتریم)، مقدار انرژی آزاد شده $2/4$ میلیون الکترون ولت است که برای هر یک از ذرات $1/2$ میلیون الکترون ولت می شود. اما در هستهٔ هلیم، جرم تبدیل شده به انرژی به مراتب بیشتر از این مقدار است و اگر آنرا طبق رابطهٔ انشتین بر حسب انرژی بیان کنیم، آنچنان که از پیش محاسبه کردیم معادل ۲۸ میلیون الکترون ولت برای ۴ نوکلئون و برای هر ذره یک چهارم این مقدار، یعنی ۷ میلیون الکترون ولت می شود. بنابراین هستهٔ اتم هلیم به مراتب پایدار تر از هستهٔ دوتریم است و به همین دلیل اتمهای سبک نظیر دوتریم سعی دارند با هم ترکیب شوند و هستهٔ پایدارتری چون هلیم تولید کنند. این پدیده را پیوست (یا گداخت هسته ای) می نامند. در بمب هیدروژنی همین واکنش اتفاق می افتد و انرژی ای چند صد برابر بمب اتمی ایجاد می کند. اما برای ایجاد چنین واکنشی دمایی بالا و نزدیک به ۶ میلیون درجهٔ سانتیگراد لازم است. به همین دلیل همواره برای انفجار یک بمب هیدروژنی، اول باید بمب اتمی منفجر شود تا عناصر سبکی را که در مرکز آن نهاده اند به میزان ۶ میلیون درجهٔ سانتیگراد گرم کند. سپس اتمهای سبک در این دما با هم ترکیب می شوند و انفجار دوم که به مراتب مهیب تر از اولی است اتفاق می افتد. در موقع انفجار بمب هیدروژنی دو قارچ انفجاری مشاهده می شود. شکل (۱۱) اجزای درونی یک بمب هیدروژنی را مشخص می کند. در شکل (۱۲) چگونگی پیوست اتم های دوتریم را می بینیم و در شکل (۱۳) انفجار آزمایشی یک بمب هیدروژنی را ارائه کرده ام.



شکل (۱۱) نمایش اجزای درونی یک بمب هیدروژنی.



شکل (۱۲) پیوست اتمهای سبک. در درون خورشید و یا در مرکز یک بمب هیدروژنی، از پیوست دوتریم (${}^2\text{D}$) ایزوتوپ سنگین (هیدروژن) و تریتم (${}^3\text{T}$ ایزوتوپ ناپایدار اتم هیدروژن)، اتم هلیم (${}^4\text{He}$) و یک نوترون و انرژی معادل ۲۸ میلیون الکترون ولت تولید می گردد. هر یک از اتمهای هلیم به وجود آمده با دفع انرژی حرارتی بسیار زیاد به حالت پایدار می رسند. همین انرژی است که از خورشید به سوی زمین تابیده می شود و زندگی را بر روی زمین ممکن می سازد. شعله هایی که در اطراف هسته هلیم می بینید همان ۲۸ میلیون الکترون ولت انرژی است که از اختلاف جرم مجموع ۲ پروتون و ۲ نوترون با جرم هلیم طبق رابطه اینشتین ($E = \Delta MC^2$) محاسبه شده است و از اتم به صورت پرتوهای گاما، ایکس، فرا بنفش و پرتوهای نوری خارج می گردد.



شکل (۱۳) انفجار یک بمب هیدروژنی. چنان که دیده می شود این انفجار شامل دو قارچ است. قارچ اول که در سطح زمین است، مربوط به انفجار بمب اتمی است و قارچ دوم که در سطح فوقانی است مربوط به گداخت اتمهای سبک است.

ب) شکست اتمها (فیسینون): لیز مایتنر^{۱۱} یکی از چهره های بزرگ علم جهان است. او برای اولین بار پدیده شکست اتم اورانیم را به وسیله نوترون تفسیر کرد. این خانم اتریشی پژوهشهای خود را در آلمان شروع کرد و یکی از دستیاران ماکس پلانک^{۱۲} و نیز استاد دانشگاه برلن بود. او کاشف عنصر اکتینیم به عد اتمی ۸۹ است. این رادیو عنصر خود بخود در طبیعت یافت نمی شود و تنها در سنگ معدن اورانیم به صورت فرآورده حاصل از تجزیه اتم اورانیم با انتشار پرتو آلفا و بتا به وجود می آید و نیمه عمری معادل ۲۲ سال دارد.

^{۱۱} Lise Meitner (۱۸۷۸-۱۹۶۸)

^{۱۲} Max Planck (۱۸۵۸-۱۹۴۷)

لیزمایتنر در اوائل جنگ جهانی دوم از ترس نازی ها به سوئد فرار کرده بود در ضمن پژوهش خود مشاهده کرد که بعد از ورود یک نوترون به درون هسته اورانیم، این عنصر شکسته شده و به دوتکه که در ۱۸۰ درجه از هم می گریزند و تعدادی نوترون تبدیل می شود و از این فرایند مقداری انرژی حاصل می گردد.

مایتنر که از خانواده ای یهودی بود، به خاطر ترس از نازی ها، به کمک همکارانش به سوئد گریخت. در آنجا به همراهی خواهر زاده اش اوتوپریش^{۱۳} پژوهش در باره پدیده شکست هسته اورانیم را ادامه داد و در سال ۱۹۳۹ کشف خود را تحت عنوان شکست اورانیم به وسیله نوترون^{۱۴} انتشار داد و برای اولین بار این پدیده را شکست نامید.

اوتو هان^{۱۵} که با لیز مایتنر و فریدریش استراسمن^{۱۶} در باره پدیده شکست اتم اورانیم کار می کردند، در سال ۱۹۳۸ ضمن بمباران هسته اورانیم ۲۳۵ متوجه شد که این ایزوتوپ به سادگی در اثر ورود یک نوترون کم انرژی شکسته می شود. در سال ۱۹۳۹ گروهی از پژوهشگران فرانسوی از جمله فردریک و ایرن ژولیو کوری^{۱۷} (داماد و دختر پیر و ماری کوری) متوجه شدند که از شکستن اتم اورانیم انرژی تولید می شود و واکنشی زنجیره ای انجام می گیرد. در ۲ دسامبر ۱۹۴۲ اولین واکنش زنجیره ای کنترل شده توسط انریکو فرمی^{۱۸} و گروه پژوهشگرانی که با او کار می کردند به دست آمد.

در ۱۶ ژوئیه ۱۹۴۵ در کویر الاموگوردو واقع در نیو مکزیکو اولین بمب اتمی که از رادیو عنصر پلوتونیم ساخته شده بود و نام آنرا ترینیتی گذاشته بودند منفجر شد، چند هفته بعد در ۶ اوت ۱۹۴۵ در ساعت هشت و پانزده دقیقه، بمبی مشابه، شهر ۴۰۰ هزار نفری هیروشیما را با خاک یکسان کرد، ظرف چند ثانیه ۹۰ درصد شهر بکلی از بین رفت. این انفجار ۱۵۰ هزار قربانی داد که ۸۰ هزار نفر آنها بلافاصله در گذشتند و کاش بقیه نیز بلافاصله از بین می رفتند، زیرا اغلب این ۷۰ هزار نفر با درد های جانسوز سرطان به تدریج مردند. چند روز بعد (۹ اوت) شهر ناکازاکی به وسیله بمب اتمی دیگری نابود شد. قدرت هریک از این بمب ها معادل ۲۰,۰۰۰ تن تی. ان. تی بود. در شکل (۱۴) تصویر اولین بمب اتمی امریکا که در الاموگوردو منفجر شد آورده شده است.

^{۱۳} Otto Prisch (۱۹۰۴ - ۱۹۷۹)

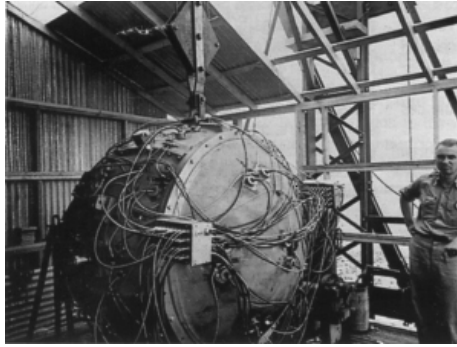
^{۱۴} Fission of Uranium by Neutron

^{۱۵} Otto Hahn (۱۸۷۸ - ۱۹۶۸) et Lise Meitner (۱۸۷۹ - ۱۹۶۸)

^{۱۶} Friedrich Wilhelm Strassman (۱۹۰۲ - ۱۹۸۰)

^{۱۷} Irene Joliot-Curi (۱۹۰۰ - ۱۹۵۸), Frédéric Joliot-Curie (۱۸۹۷ - ۱۹۵۶)

^{۱۸} Enrico Fermi (۱۹۰۱ - ۱۹۵۴)

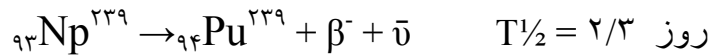
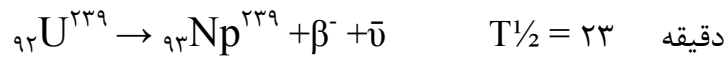
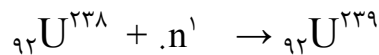


شکل (۱۴) ولین بمب اتمی امریکا که از رادیو عنصر پلوتونیم ساخته شده و در ۱۶ ژوئیه ۱۹۴۵ در کویرالاموگادو (نیو مکزیکو) منفجر شد.

در سال ۱۹۵۱ اولین نیروگاه اتمی آمریکا در ایالت متحده آمریکا شروع به کار کرد. چنان که در منحنی شکل (۱۰) مشاهده شد، عناصر سنگین حتی با ورود یک ذره نوترون کم انرژی شکسته می شوند. برای شکست برخی دیگر از عناصر، ذراتی با انرژی بالاتر لازم است. یک نوترون کم انرژی ایزوتوپ اورانیم ۲۳۵ را می شکند، ولی ایزوتوپ ۲۳۸ نوترون را جذب کرده و تبدیل به ایزوتوپ ناپایدار اورانیم ۲۳۹ می شود که با انتشار پرتو بتا منفی بعد از چند ساعت رادیو عنصر نپتونیم را به وجود می آورد. رادیو عنصر نپتونیم هم ناپایدار است و با انتشار پرتو بتای منفی در چند روز رادیو عنصر پلوتونیم را تولید می کند. برای تفهیم بیشتر معادله های این تبدیلات را به صورت اختصار می نویسم:



در معادله فوق یک نوترون وارد اورانیم ۲۳۵ شده و آنرا شکسته دو فراورده حاصل از شکست به نام فراورده های فیسوون ۱ و ۲ (FF۱ و FF۲) و ۳ عد نوترون و ۲۰۰ میلیون الکترون ولت انرژی تولید کرده است. و اما در مورد اورانیم ۲۳۸ فرایند جذب نوترون به صورت زیر انجام می گیرد.



در این تبدیلات اورانیم ۲۳۹ با انتشار یک پرتو بتا که همان الکترون است تبدیل به رادیو عنصر نپتونیم با نیمه عمری^{۱۹} معادل ۲۳ دقیقه می شود و سپس این رادیو عنصر نیز با انتشار یک پرتو بتا و نیمه عمری معادل ۲/۳ روز تبدیل به رادیو عنصر پلوتونیم می گردد. در این تبدیلات عدد جرم ثابت مانده و فقط عدد اتمی یا تعداد پروتونها است که تغییر کرده اند. (در بخش ۵ از همین فصل در مورد پرتوزایی عناصر، این تبدیلات را شرح خواهیم داد). رادیو عنصر پلوتونیم که به مراتب

^{۱۹} نیمه عمر یعنی زمان لازم برای اینکه نیمی از عنصر و یا ایزوتوپ پرتوزا تجزیه شود. عملاً بعد از زمانی معادل ده نیمه عمر ۹۹/۹ در صد ماده پرتوزا تجزیه می شود. درسطور آینده بیشتر در باره انواع تجزیه ایزوتوپهای پرتوزا و نیمه عمر آنها بیان خواهیم کرد.

شکست پذیر تر از اورانیوم ۲۳۵ است، در داخل نیروگاه به وجود می آید. نسبت در صد تبدیلات یک بر صد است. یعنی زمانی که صد اتم اورانیوم ۲۳۵ شکسته می شود یک اتم پلوتونیم به وجود می آید. جرم بحرانی^{۲۰} برای انفجار اتمی، در مورد اورانیوم ۲۳۵ معادل ۵۰ کیلو گرم و در مورد پلوتونیم ۱۰ کیلوگرم است. البته بستگی به درجه غنی سازی اورانیوم دارد. امریکایی ها ۱۲ کیلوگرم اورانیوم بسیارغنی شده (Highly enriched uranium (HEU)) را جرم بحرانی می دانند و حال آنکه جرم بحرانی برای انفجار بمبی از پلوتونیم را ۴ کیلوگرم می دانند. غنی سازی اورانیوم ۲۳۵ از اورانیوم طبیعی بسیار مشکل و مخارج زیادی در بر دارد. زیرا نسبت درصد اورانیوم شکست پذیر (۲۳۵) در اورانیوم طبیعی تنها ۰/۷ درصد است. به همین دلیل است که بمب هایی که در زرادخانه های کشورهای که بمب اتمی دارند، اغلب از نوع پلوتونیم می باشند نه از اورانیوم غنی شده. برای تهیه پلوتونیم نیروگاههای ویژه ای از اورانیوم طبیعی می سازند. در این نیروگاه ها باید میله های سوخت را هر سه ماه یک بار از راکتور اتمی خارج کرد، بعد از حل میله های سوخت در اسید، با روش شیمیایی معمولی پلوتونیم را از اورانیوم جدا می سازند. در سطور بعد بیشتر در این باره صحبت خواهیم کرد. اولین بمب اتمی که در آمریکا ساخته شد و آنرا ترینیتی نام گذاری کردند از پلوتونیم ۲۳۹ ساخته شده بود که در ۱۶ ژوئیه ۱۹۴۵ در آلاموگوردو در نیومکزیک بر روی برجی از چوب به ارتفاع ۷۰۰ متر قرار دادند. سوخت اتمی این بمب از پلوتونیم ۲۳۹ و قدرت انفجاری آن معادل ۱۹ کیلو تن تی. ان. تی (TNT) بود. قارچ انفجاری این بمب را در مقایسه با برج ایفل فرانسه در شکل (۱۵) ببینید.

^{۲۰} جرمی از عنصر شکست پذیر را بحرانی گویند که در آن واکنش زنجیره ای شکست به صورت تصاعدی ایجاد شود و در نهایت منجر به انفجار تمامی توده سوخت هسته ای گردد. اندازه گیری جرم بحرانی به کمک رابطه: $(K = f - I)$ میسر می باشد که در آن f تعداد متوسط نوترونهای آزاد شده در هر شکست است. (تعداد متوسط نوترونهای آزاد شده بعد از شکست اتم اورانیوم ۲۳۵ برابر با ۲/۴۸ و برای پلوتونیم ۲۳۹ معادل ۲/۹ نوترون در هر شکست است.) و I تعداد متوسط نوترونهایی است که بهبوده از دست رفته اند. (یا به دلیل سرعت زیادشان از محیط توده سوختنی خارج شده اند و یا جذب اتمهای جاذب نوترون مانند اتم اورانیوم ۲۳۸ شده اند.) بنا براین درجه خلوص توده سوخت و یا احاطه شدن آن به وسیله عناصر منعکس کننده نوترون، تعیین کننده جرم بحرانی است. به هر صورت زمانی که K کوچکتر از واحد است جرم را زیر بحرانی گویند و زمانی که K بزرگتر از واحد است، جرم بحرانی می باشد. در غیاب عناصر منعکس کننده نوترون جرم بحرانی اورانیوم ۲۳۵ معادل ۵۰ کیلو گرم و جرم بحرانی پلوتونیم ۲۳۹ برابر با ۱۰ کیلو گرم است. برعکس در حضور عناصر منعکس کننده جرم بحرانی اورانیوم را ۱۲ کیلوگرم و جرم بحرانی پلوتونیم را ۴ کیلوگرم می توان در نظر گرفت.



شکل (۱۵) مقایسه قارچ انفجاری اولین بمب آزمایشی آمریکا به نام (Trinity) با ارتفاع برج ایفل فرانسه. ارتفاع این قارچ را ۱۲ کیلومتر تخمین زده اند، موج انفجاری تا ۱۶۰ کیلومتری احساس شد. ربرت اوپنهایمر^{۲۱} پدر بمب اتمی آمریکا، که در فاصله ۹ کیلومتری از محل انفجار بود بی اختیار کلمه ای از کتاب مقدس هندووان (*Bhagavad-Gîtâ*)^{۲۲} را با صدای بلند در برابر ۲۶۰ پژوهشگرانی که حضور داشتند، بر زبان آورد: «*Now, I am become Death, the destroyer of worlds*» (اکنون من مرگ شده ام "نابود کننده جهان"). در این جمله کلمه مرگ اشاره به خدای برهمنی ها، شیوا است که خدای خراب کننده و باز سازنده جهانی بهتر است. کنت بدینبرج^{۲۳} سرپرست این برنامه آزمایش انفجار اتمی، جمله دیگری بر زبان آورد: «*Now we are all sons of bitches*» (اکنون همه ما روسپی زاده هستیم)!

رادیو عنصر پلوتونیم برای اولین بار در سال ۱۹۴۱ به وسیله گلن سیبرگ^{۲۴} دانشمند آمریکایی، از طریق پرتاب ایزوتوپ سنگین هیدروژن (دوتریم) بر روی اورانیم به دست آمد. آمریکایی ها برای مخفی نگه داشتن این کشف کوشیدند نام رمزی به این عنصر و عنصر ماقبل آن یعنی عنصر نپتونیم بدهند. از این رو نپتونیم یا عنصر ۹۳ را نقره و پلوتونیم عنصر ۹۴ را مس نامیدند. ولی بعد از دستیابی به بمب اتمی و از بین رفتن قدرت آلمان نازی، دیگر مشکلی در نامگذاری این عناصر نبود. از آنجا که عنصر اورانیم ۱۵۰ سال قبل کشف شده بود و نام سیاره اورانوس را به او داده بودند، نام نپتون را به عنصر ۹۳ (نپتونیم) و نام پلوتون، سیاره بعدی را به عنصر ۹۴ (پلوتونیم) دادند. گلن سیبرگ کاشف بسیاری از عناصر بعد از اورانیم است. برای اولین بار در زمان حیات دانشمندی، عنصری را با نام آن دانشمند نامگذاری کردند و آن عنصر ۱۰۶ است.

رادیو عنصر پلوتونیم را می توان به سهولت با واکنش شیمیایی از توده سوخت جدا کرد، حال آنکه اورانیم ۲۳۵ را باید به کمک خاصیت فیزیکی آن که اختلاف جرم مختصری (۳ واحد در ۳۵۲ واحد^{۲۵}) است به کمک هزاران سانتریفوژ بسیار قوی و با مخارج کلان جدا ساخت. شکل (۱۶) نموداری از شکست اورانیم ۲۳۵ پس از ورود یک نوترون حرارتی یا ترمیک به درون آن را ارائه می

^{۲۱} Robert Oppenheimer (۱۹۰۴ - ۱۹۶۷) سرپرست پروژه اتمی منتهن پدر بمب اتمی آمریکا.

^{۲۲} *Bhagavad-Gîtâ* کتاب اسطوره مذهبی هندوان است که غربی ها تاریخ پیدایش آنرا بین قرن پنجم تا دوم قبل از میلاد تخمین زده اند. در حقیقت هندویسم بر پایه ی چند خدایی بنا شده است. در راس مثلث خدای برهما- ویشنو و شیوا قرار دارند.

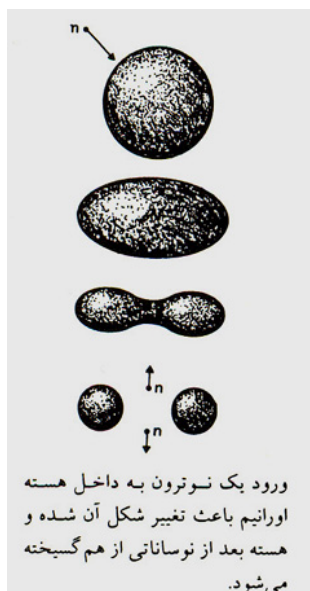
^{۲۳} Kenneth Bainbridge (۱۹۰۴ - ۱۹۹۶)

^{۲۴} Glenn Theodore Seaborg (۱۹۱۲ - ۱۹۹۹)

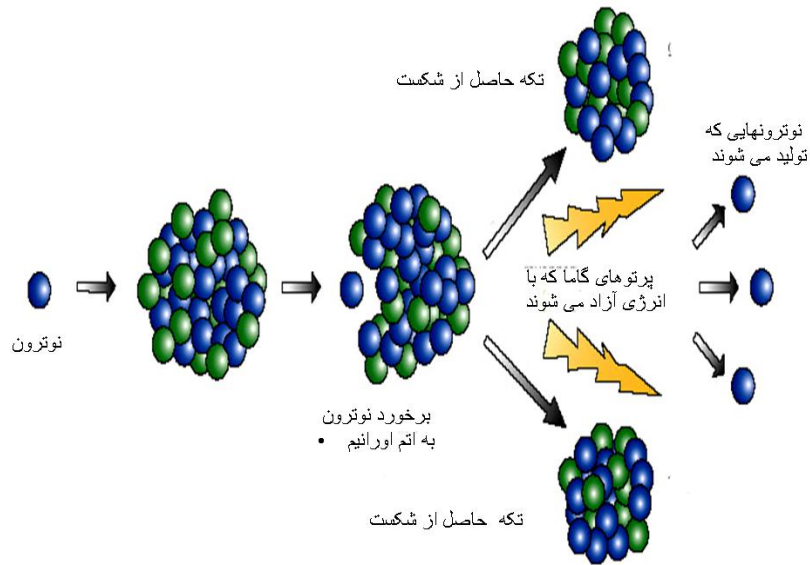
^{۲۵} برای غنی سازی اورانیم از ترکیب این عنصر با فلوتور استفاده می کنند. چون اورانیم همگرا فلوتورور (UF_۶) گازی است و جرم ملکولی مجموع ۳۵۲ است.

دهد. چنان که مشاهده می کنید، بعد از ورود نوترون هسته اورانیم ابتدا تحریک شده و نوساناتی کرده، سپس در وسط آن فرو رفتگی ایجاد شده و نهایتاً تبدیل به دو اتم سبکتر می شود. نوترونها و اتم های تولید شده ۲۰۰ میلیون الکترون ولت انرژی حاصل از شکست را به صورت انرژی جنبشی با خود می برند و در اثر برخورد با اتمهای دیگر و توقف درون ماده سوختنی این انرژی را به صورت انرژی حرارتی از دست می دهند. در شکل (۱۷) بطور شماتیک شکست اتم اورانیم بعد از جذب یک نوترون نشان داده شده است. در این شکل بعد از ورود یک نوترون هسته اتم اورانیم ۲۳۶ تولید می شود و به علت ناپایداری بعد از چند میلیونیم ثانیه تحولاتی در درون آن آغاز می گردد.

از شکست اتم اورانیم، عناصری که در وسط جدول تناوبی وجود دارند تولید می شوند که شامل دو دسته از عناصرند که عدد جرمی دسته اول بین ۷۵ تا ۱۱۰ و دسته دوم بین ۱۲۰ تا ۱۶۰ است. این عناصر فرآورده های شکست (FF۱ و FF۲) نام دارند.



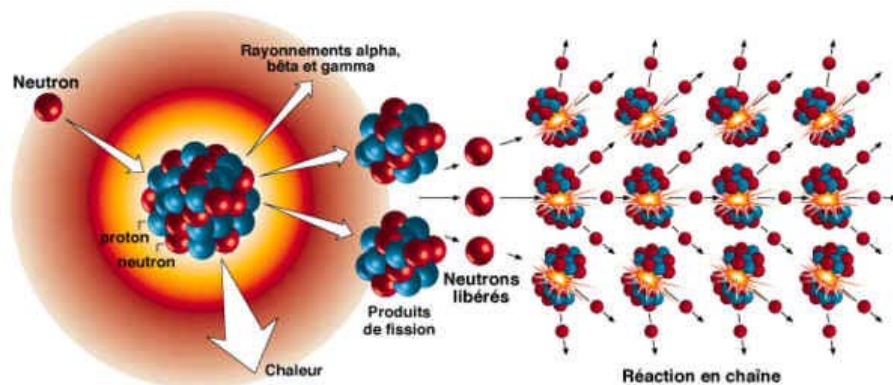
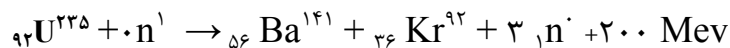
شکل (۱۶) نموداری از شکست اورانیم در اثر ورود یک نوترون. نوترون کم انرژی (حرارتی) وارد هسته اورانیم ۲۳۵ می شود. هسته نمی تواند وجود نوترون اضافی را تحمل کند نوساناتی بخود می دهد، ابتدا به شکل توپ رکیبی در آمده و بعد از چند میلیونیم ثانیه به شکل دو قطره بهم چسبیده و در نهایت به صورت دو قطره جدا از هم شکسته می شود.



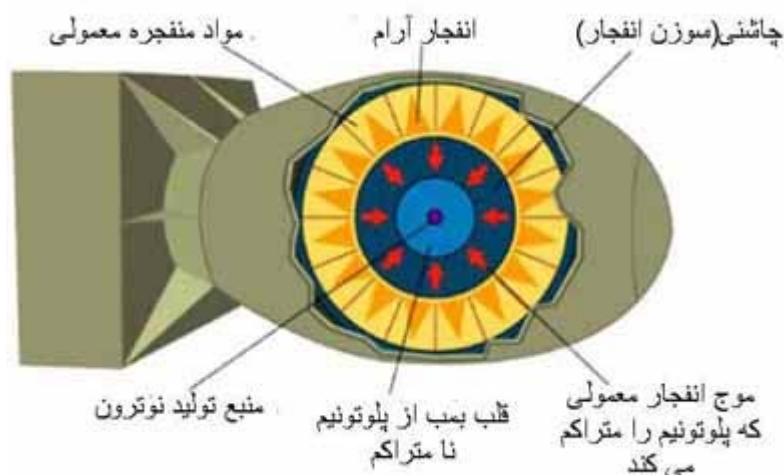
شکل (۱۷) نموداری از شکست اتم اورانیم ۲۳۵.

اگر نوترونهايي حاصل از شکست بتوانند اتمهای اورانیم دیگر را نیز بشکنند واکنش زنجیره ای کنترل ناپذیر به وجود خواهد آمد. این شکست زنجیره ای که در یک بمب اتمی اتفاق می افتد را به طور شماتیک در شکل (۱۸) و در شکل (۱۹) نموداری از چگونگی ساخت یک بمب اتمی ارائه شده است.

واکنش شکست را می توان به صورت زیر خلاصه کرد..



شکل (۱۸) چگونگی شکست زنجیره ای اورانیم. در اثر ورود یک نوترون اورانیم ناپایدار شده و بعد از لحظه بسیار کوتاهی تبدیل به دو هسته با جرمهای متفاوت و سه نوترون می شود. در این تصویر فرآورده های حاصل از شکست اورانیم، باریوم ۱۴۱ با عدد اتمی ۵۶ و کریپتون ۹۲ با عدد اتمی ۳۶، فرض شده است. اما در واقع عناصر حاصل از شکست اورانیم بسیار متنوع و شامل اغلب عناصر واقع در وسط جدول تناوبی می باشد. سه نوترون تولید شده می توانند دو یا حتی سه اتم اورانیم را بشکنند و بدین ترتیب تعداد شکستهها به صورت تابع نمایی بالا خواهد رفت و به ناکهان و در چند میکرو ثانیه تمام توده سوخت منفجر خواهد شد.



شکل (۱۹) تصویری فرضی از یک بمبی اتمی از پلوتونیم. ساختار درونی این بمب در نمودار مشخص شده است. در مرکز بمب منبع تولید کننده نوترون قرار دارد که هم زمان با انفجار معمولی، شروع به انتشار نوترون خواهد کرد. مواد منفجره معمولی ممکن است از TNT یا دینامیت باشد، در اطراف توده ای از پلوتونیم نا متراکم قرار داده شده است. در اثر انفجار این بمب و موج انفجاری حاصل از آن، توده پلوتونیم متراکم خواهد شد و حجم بحرانی برای شکست زنجیره ای پلوتونیم تأمین می گردد. اتمها یکی بعد از دیگری به صورت زنجیره ای شکسته خواهند شد. چون در هر شکست به طور متوسط ۲/۹ نوترون تولید می شود، تعداد آنها و در نتیجه تعداد اتمهای شکسته شده پلوتونیم به صورت تابع نمایی در کمتر از چند هزارم ثانیه به میلیاردها خواهد رسید و تمام اتمهای پلوتونیم را خواهند شکست و از آنجا انفجار وحشتناک این بمب مخوف ظاهر می شود.

انرژی جنبشی نوترونهای آزاد شده بین ۱۰ تا ۱۴ میلیون الکترون ولت است و همانطور که گفته شد آنها می توانند اتمهای دیگر را بشکنند، به ویژه اگر توده سوخت از اورانیم ۲۳۵ خالص و یا پلوتونیم ۲۳۹ باشد. ولی در درون اورانیم طبیعی که متشکل از ۰/۷ درصد اورانیم ۲۳۵ است نمی توانند واکنش زنجیره ای را ایجاد کنند و نیز احتمال شکست اتمهای ۲۳۵ هم با نوترونهای پر انرژی بسیار کم است. در نتیجه باید این نوترونها را وادار به تصادف با عناصر سبکی کرد تا بدون آنکه جذب این عناصر شوند انرژی اضافی خود را از دست بدهند. بنابراین باید در ساختمان نیروگاه و در کنار توده های سوخت عناصر سبکی را قرار داد که به آنها **نرم کننده** می گویند و انرژی نوترونها را پایین می آورند. از سوی دیگر تکه های حاصل از شکست که به مراتب بزرگتر از نوترونها هستند و انرژی جنبشی بسیار زیادی دارند، با برخورد به اتمهای اورانیم و مواد ساختمانی نیروگاه انرژی جنبشی خود را از دست داده و انرژی حرارتی ایجاد می کنند. در اثر این گونه برخوردها جدار میله های سوخت گرم خواهند شد. برای خارج ساختن این گرما به موادی به نام **خنک کننده** در درون نیروگاه احتیاج است. البته این خنک کننده ها نیز نباید جاذب نوترون باشند. خنک کننده ها که در اثر گرمای گرفته شده از میله های سوخت به صورت بخار در آمده اند و با فشار بالا به تبدیل کننده ها منتقل می شوند. تبدیل کننده ها نیز با فشار زیادی که در اثر کسب دما پیدا کرده اند توربینها و نهایت ژنراتورها را به حرکت در می آورند و از آنجا شکست اتم اورانیم منجر به تولید الکتریسیته خواهد شد. در نیروگاه علاوه بر مواد سوختنی و مواد نرم کننده و خنک کننده باید مواد جاذب

نوترون هم وجود داشته باشد تا از افزایش ناگهانی تعداد نوترونها جلوگیری کنند. این مواد را **مه‌ار کننده** می‌نامند. یک نیروگاه نیاز به پمپهای بسیار قوی دارد تا مواد خنک کننده و نرم کننده را که دمای بسیار بالایی دارند به بیرون و درون تبدیل کننده ببرند.

بنابراین ساختار یک نیروگاه احتیاج به موادی دارد که باید با دقت و اطلاع کافی از علم فیزیک و شیمی اتمی انتخاب شوند. برای ساختن یک نیروگاه علم و صنعت بسیار پیشرفته ای لازم است و پیش از هر چیز باید فرهنگ کار با مواد رادیو اکتیو را به کارگران آموخت. چون بروز کوچکترین اشتباه ممکن است منجر به فاجعه ای نظیر انفجار نیروگاه چرنوبیل روسیه شود. در زمین لرزه ژاپن با وجود قدرت بسیار زیاد زمین لرزه (۹ ریشتر) نیروگاهها آسیب مختصری دیدند. در اثر سونامی و بالا آمدن آب دریا جریان برق قطع شد و توربینهای منتقل کننده گرما از کار افتادند. در اثر دمای زیاد حاصل از واکنش شکست اورانیم، میله های سوخت ذوب شده و آب را به اکسیژن و هیدروژن تبدیل کردند. توده گازهای هیدروژن متراکم شده در نیروگاه، منفجر شد و مواد رادیو اکتیو را به خارج از نیروگاه منتقل کرد. در حادثه چرنوبیل هم انفجار هیدروژن سبب بیرون راندن مواد رادیو اکتیو به خارج از نیروگاه شد. و انفجارهای تولید شده در این نیروگاه منحصر^{۲۶} به خاطر از کار افتادن چند لحظه ای یکی از چهار پمپ نیروگاه بود.

۵) دلیل تجزیه مواد پرتوزا:

الف) پرتوزایی یا رادیو اکتیویته: پدیده رادیو اکتیویته یا پرتوزایی نخستین بار در ۱۸۹۶ به وسیله هانری بکرل^{۲۷} کشف شد. این فیزیک دان فرانسوی که پرتوهای ایکس را مطالعه و اثر آنها را بر روی مواد مختلف به کمک کلیشه های عکاسی بررسی میکرد. به طور تصادفی متوجه شد که برخی از فیلمهای عکاسی در کشوی میزی که در آن سنگ معدن اورانیم قرار داشته نور دیده اند.

در تاریخ علم بارها تصادفاتی پیش آمده که دانشمندان را به تفکر وا داشته است. رونتگن^{۲۸} کاشف پرتو ایکس در واقع به دنبال کشف پرتو ایکس نبود و به طور تصادفی آنرا شناخت، بگرل هم در پی کشف پرتوزایی نبود و به طور تصادفی دید که فیلمهای عکاسی اش نور دیده اند و متوجه پرتو افشانی سنگ معدن اورانیم شد. نیوتن هم افتادن سیب را دید و متوجه نیروی ثقل شد. . . و بسیاری مثالهای دیگر. این اکتشافها را تصادفی می‌نامیم، ولی دانشمندانی که چنین بخت و اقبال عظیمی داشته اند شرایط رسیدن به آن را در خود جمع کرده و به دنبال حقایق پنهانی جهان بودند.

^{۲۶} در کتاب "ستارگان، زمین و زندگی" به تفصیل حادثه نیروگاه چرنوبیل را شرح داده ام. این کتاب هم به صورت رایگان در سایت <http://ali.afzal.samadi.free.fr/> قرار دارد.

^{۲۷} Becquerel Henri (۱۸۵۲ - ۱۹۰۸)

^{۲۸} Roentgen Wilhem Honrad (۱۸۴۵ - ۱۹۲۳)

از هنگامی که پرتو ایکس کشف شد و پرتوزایی عناصر شناخته شد و یا از روزی که به نیروی ثقل پی بردیم و مکان خود را در جهان شناختیم، زندگی بشر در اثر این اکتشافها، شاید به اندازه کشف تصادفی آتش به وسیله انسانهای نخستین، تحول یافت. به کمک پرتوهایی که از ماده منتشر می شود، چه بسیار بیمارها که شفا یافته اند و یا کاربرد پرتوهای پر انرژی چه بسیار افراد بشر را از مرگ نجات داده و یا منجر به مرگ آنها شده است! شناخت منظومه شمسی و شناخت جهان تا چه حد دید ما را از دنیا عوض کرده و باورهای خرافی را از ما دور کرده است!

هانری بکرل پژوهش درباره پدیده پرتوزایی را به دانشجوی جوانی که رساله دکترای خود را نزد وی تهیه می گرد واگذار نمود، او دختر جوانی از اهالی لهستان بود و ماری اسکلودووسکا^{۲۹} نام داشت و چون همسر آقای پیر کوری شد به ماری کوری شهرت یافت. پیر^{۳۰} و ماری کوری با زحمت فراوان و با هزینه شخصی صدها تن سنگ معدن اورانیم را در انباری که آن را تبدیل به آزمایشگاه خود کرده بودند تخلیص کردند و برای اولین بار متوجه عنصری با عدد اتمی ۸۴ شدند. این عنصر که بسیار ناپایدار بود، نیمی از اتمهایش طی ۱۳۴ روز تخریب می شد. این تخریب و پرتوهای حاصل از آن، کنجکاو آنها را برانگیخت تا عنصر مادر را که رادیوم بود در توده های تخلیص شده از سنگ معدن اورانیم شناختند. بعدها نام عنصر ۸۴ را به افتخار این کشف مهم ماری کوری، که از اهالی پلویین (لهستان) بود پلونیوم نهادند.

پیر و ماری کوری با تلاش بسیار توانستند از سنگهای معدن اورانیم مقدار لازم از عنصر رادیوم را به دست آورند تا به کمک طیف نگار جرمی بتوانند جرم اتمی این رادیو عنصر را که ۲۲۶ است به دست آورند. نام رادیو اکتیویته که معادل فارسی آن پرتوزایی است از نام عنصر رادیوم که برای اولین بار این پدیده در آن شناخته شده بود، گرفته شده است.

ب) پرتو زایی طبیعی: برخی از ایزوتوپهای عناصر و یا خود عناصر به طور دائم پرتوهایی از خود نشر می دهند. چنین ایزوتوپهایی را **ایزوتوپ پرتوزا** و عمل آنها را **پرتوزایی** می گویند. در ابتدای

^{۲۹} Marie Sklodowska - Curi (۱۸۶۷ - ۱۹۳۴)

^{۳۰} Pierre Curie (۱۸۵۹ - ۱۹۰۶)

پیر کوری استاد کرسی شیمی و فیزیک در دانشگاه سوربن فرانسه بود. او کاشف پدیده پیزو الکتریسیته بود. Piezo-électricité فشار بر روی کوارتز اختلاف پتانسیلی الکتریکی در آن ایجاد می کند).

در سال ۱۸۹۵ با ماری اسکلودووسکا ازدواج کرد. در سال ۱۹۰۶ پیر کوری بر اثر تصادف با کامیونی در گذشت و ماری کوری جانشین وی در کرسی شیمی و فیزیک شد. ماری کوری در سال ۱۹۰۳ برنده جایزه نوبل فیزیک شد. در سوربن پژوهشهایش را متوجه خواص شیمیایی رادیوم کرد و در سال ۱۹۱۱ جایزه نوبل شیمی را نیز به دست آورد. او اولین دانشمندی است که دو بار جایزه نوبل را دریافت کرده است.

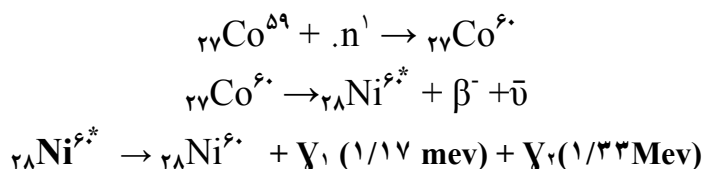
کشف پرتوزایی، به نظر می‌رسید که فقط برخی از عناصر سنگین دارای این خاصیت هستند، ولی در سال ۱۹۳۴ آشکار شد که عناصر سبک نیز می‌توانند ایزوتوپ پرتوزا داشته باشند. با توسعه و تکمیل سیکوترون و واکنشهای هسته‌ای در درون نیروگاهها، ساختن و تهیه ایزوتوپهای پرتوزا برای اغلب عناصر جدول تناوبی میسر و معمول گردید. تا کنون بیش از ۲۵۰۰ هسته یا اتم شناخته شده اند که در حدود ۲۲۱۳ عدد از آنها ایزوتوپ پرتوزا هستند. هسته ایزوتوپهای پرتوزا ناپایدارند و در درون آنها تحولاتی صورت می‌گیرد. به طور کلی یک هسته ناپایدار همواره سعی دارد با از دست دادن پرتوهای خود را به حالت یک هسته پایدار در آورد، یعنی می‌کوشد از حالت ناپایداری که ممکن است ناشی از زیادت انرژی درونی و یا زیادت یکی از ذرات تشکیل دهنده اش باشد خارج شود. خاصیت پرتوزایی به شرایط خارجی از قبیل دما، فشار جو، مقدار رطوبت و یا وضعیت شیمی - فیزیکی بستگی ندارد و تنها تابع خواص درونی هسته اتم ناپایدار است. بنابراین ایزوتوپهای پرتوزای یک عنصر در ترکیبات شیمیایی، مانند خود عنصر عمل می‌کنند و به همین دلیل می‌توان از خواص آنها به آسانی در کنشها و واکنشهای تجربی شیمی و بیوشیمی و یا بیولوژی استفاده کرد. به ویژه می‌توان به طریق ردیابی، بسیاری از کارهای تجزیه و ترکیب و کیفیتهای تغذیه و یا جذب مواد دارویی (مثلاً کاربرد رادیو اکتیو در عملکرد غده تیروئیدی) و یا تشخیص عمل فتو سنتز گیاهان را مطالعه کرده و روشهای های مناسب برای درمان بسیاری از بیمارها را یافت.

پ (رادیو ایزوتوپهای مصنوعی): پیشتر اشاره شد عناصری که عدد اتمی آنها برابر و یا بیشتر از ۸۴ است همه پرتوزا هستند و رادیو عنصر نامیده می‌شوند. پولونیم ۸۴، استاتین ۸۵، رادن ۸۶، فرانسیم ۸۷، رادیم ۸۸، اکتینیم ۸۹ و تمام عناصر خانواده اکتینیم که تا عنصر ۱۰۳ ادامه دارد همه رادیو عنصر هستند، همچنین تمام عناصر مصنوعی از عنصر نپتونیم به عدد اتمی ۹۳ تا عنصر ۱۱۸ ununoctium که هنوز به نحو قطعی نامگذاری نشده است، پرتوزا هستند. این عناصر در طبیعت یافت نمی‌شوند همه آن‌ها در نیروگاههای اتمی و یا در سیکلوترونها به کمک سنتز به دست آمده اند. مهمترین آنها همان عنصر ۹۴ یا پلوتونیم است که اولین بار به وسیله گلن سیبرگ در سال ۱۹۴۱ سنتز شد. پیشتر اشاره مختصری به چگونگی سنتز این عنصر در درون نیروگاهها بیان کردم. با قرار دادن عناصر مختلف در درون نیروگاهها، رادیوایزوتوپهای آنها در اثر جذب نوترون به دست می‌آید. به کمک ماشینهای شتاب دهنده نیز می‌توان ذرات و یا اتمهایی را شتاب داد و به سوی هدفهایی متشکل از عناصر مختلف پرتاب کرد تا رادیو ایزوتوپ مطلوب را که مثلاً در پزشکی یا صنعت بدان نیاز است به دست آورد. در جدول (۴) اسامی و علامت اختصاری ای دو دسته از عناصر را که دسته اول اکتینیدها است و دسته دوم ترانس اکتینیدها نام دارند آورده ام.

Actinides	اکتینیدها	TrensActenids	ترانس اکتینیدها
۹۳ N <u>neptunium</u>	○	۱۰۴ <u>Rutherfordium</u> , Rf	
۹۴ Pu <u>plutonium</u>	○	۱۰۵ <u>Dubnium</u> , Db	
۹۵ Am <u>americium</u>	○	۱۰۶ <u>Seaborgium</u> , Sg	
۹۶ Cm <u>curium</u>	○	۱۰۷ <u>Bohrium</u> , Bh	
۹۷ Bk <u>berkelium</u>	○	۱۰۸ <u>Hassium</u> , Hs	
۹۸ Cf <u>californium</u>	○	۱۰۹ <u>Meitnerium</u> , Mt	
۹۹ Es <u>einsteinium</u>	○	۱۱۰ <u>Darmstadtium</u> , Ds	
۱۰۰ Fm <u>fermium</u>	○	۱۱۱ <u>Roentgenium</u> , Rg	
۱۰۱ Md <u>mendelevium</u>	○	۱۱۲ <u>Copernicium</u> , Cn	
۱۰۲ No <u>nobelium</u>	○	۱۱۳ <u>Ununtrium</u> , Uut*	
۱۰۳ Lr <u>lawrencium</u>	○	۱۱۴ <u>Flerovium</u> , Fl	
		۱۱۵ <u>Ununpentium</u> , Uup*	
		۱۱۶ <u>Livermorium</u> , Lv	
		۱۱۷ <u>Ununseptium</u> , Uus*	
		۱۱۸ <u>Ununoctium</u> , Uuo*	

جدول (۴) خانواده عناصر ترانس اکتینیدها و عناصر اکتینیدها را مشخص می کند. برخی از ترانس اکتینیدها هنوز به طور رسمی نامگذاری نشده اند.

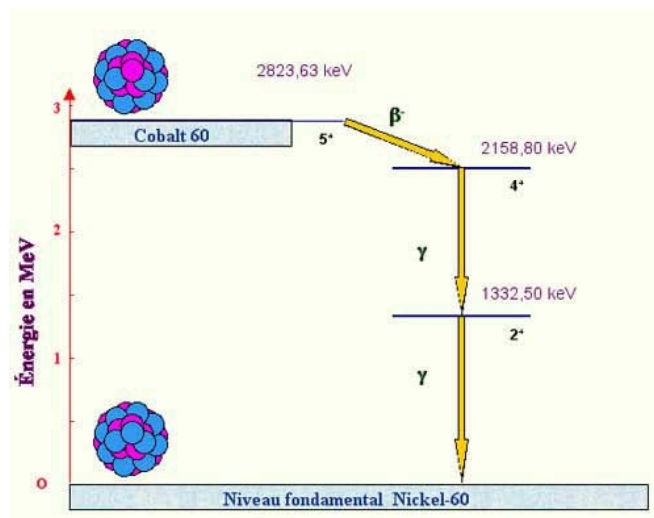
یکی از رادیو ایزوتوپهایی که در پزشکی، صنعت و نیز برای نگهداری مواد غذایی مصرف فراوان دارد کبالت ۶۰ است که از قرار دادن ایزوتوپ پایدار کبالت ۵۹ درون نیروگاه اتمی و در اثر جذب یک نوترون به دست می آید.



در رابطه فوق و در داخل نیروگاه اتمی، عنصر کبالت به عدد جرمی ۵۹ و عدد اتمی ۲۷ یک نوترون جذب می کند و تبدیل به رادیوایزوتوپ کبالت ۶۰ می شود که ناپایدار است. کبالت ۶۰ ناپایداری خود را با نشر یک پرتو بتای منفی و یک نوترینو دفع کرده تبدیل به ایزومری از نیکل ناپایدار با عدد جرمی ۶۰ و عدد اتمی ۲۸ می گردد. ایزومر ناپایدار نیکل نیز با انتشار دو پرتو گاما در لحظه ای بسیار کوتاه تبدیل به نیکل پایدار می شود:

پرتو بتای منفی منتشره از کبالت چندان مهم نیستند و یک صفحه نازک آلومینمی قادر به جذب آنها است. ولی پرتوهای گاما با انرژی های ۱/۱۷ و ۱/۳۳ میلیون الکترون ولت بسیار قابل نفوذند و می توانند موجودات ذره بینی و یا سلولهای سرطانی را از بین ببرند. همانطور که در معادله فوق مشخص شده پرتوهای گاما از ایزومر ناپایدار نیکل خارج می شوند و با اشتباهی که مصطلح شده است، آنرا به کبالت ۶۰ نسبت می دهند.

در شکل (۲۰) چگونگی انتشار پرتوهای بتا و گامای کبالت ۶۰ آورده شده است. از کبالت ۶۰ در گاما گرافی در پزشکی و یا صنعت و همچنین برای از بین بردن باکترهای موجود در میوه جات و مواد غذایی بسیار استفاده می کنند.



شکل (۲۰) نمودار تخریب (تجزیه) رادیو ایزوتوپ کبالت ۶۰ و تبدیل آن به نیکل پایدار. در محور عرضها تراز انرژی کبالت ۶۰ آورده شده است. چنان که دیده می شود کبالت پرتو زا در سطحی از انرژی در حدود ۲۸۲۳ کیلو الکترون ولت قرار دارد. با انتشار یک پرتو بتای منفی با نیمه عمری معادل با ۵/۲۷۲ سال تبدیل به نیکل ناپایدار می شود و رادیو ایزوتوپ نیکل در لحظه بسیار کوتاهی با انتشار دو پرتو گاما به حالت پایدار می رسد.

ت) پایداری و ناپایداری هسته اتمها: امروزه به کمک طیف نگار جرمی و روشهای جدید جدا کردن ایزوتوپها توانسته اند نسبت در صد کلیه ایزوتوپهای پایدار عناصر موجود در طبیعت را به دست آورند. برای ۸۳ عنصر پایدار موجود در روی سیاره زمین، ۲۸۴ ایزوتوپ پایدار شناخته اند. برخی از عناصر (۲۰ عنصر) تک ایزوتوپی هستند، مانند سدیم، آلومینیم، فسفر، طلا و . . . ولی ۶۳ عنصر دیگر چند ایزوتوپی اند. دیدیم که هیدروژن دو ایزوتوپ پایدار دارد: هیدروژن سبک و هیدروژن سنگین (دوتریم) و یا عنصر قلع ۱۱ ایزوتوپ پایدار و عنصر کلر ۲ ایزوتوپ پایدار دارند.

یکی از ویژگیهای اصلی ایزوتوپها، پایداری و یا ناپایداری آنها است. سطح انرژی درونی برخی از ایزوتوپها و یا حتی عناصر ممکن است بالا باشد و همانطور که قبلاً هم اشاره شد تمام مواد و یا ترکیبات و حتی موجودات عالم همواره سعی دارند در سطحی پایین تر از سطح انرژی درونی خود قرار گیرند، در نتیجه تجزیه می شوند. آهن خود بخود در هوای مرطوب اکسید می شود، چون اکسید آهن نسبت به آهن و اکسیژن از نظر انرژی در سطحی پایین تر قرار دارد. زغال یا چوب و یا ملکولهای موجودات زنده در آتش می سوزند و تبدیل به گاز کربنیک و بخار آب می شوند. این مواد یا موجودات بر اثر سوختن به سطح پایین تری از انرژی می رسند. گاز کربنیک و بخار آب، به مراتب پایدار تر از چوب یا زغال یا ملکولهای سازنده بدن ما هستند. این تبدیلات شیمیایی است و ارتباط

با آرایش ساختمانی اتم عناصر و یا ملکولهای به وجود آمده از ترکیب عناصر دارد. ولی در مورد هسته اتمها، تبدیلات در درون هسته اتمها با انتشار پرتوهایی پر انرژی انجام می گیرد.

در مورد ایزوتوپهای ناپایدار نیز چنین وضعیتی حاکم است. این ایزوتوپها پرتو هایی از خود منتشر می کنند تا به حالت پایداری، یعنی سطح انرژی پایین تر برسند. گاهی از اوقات ممکن است در برخی از ایزوتوپ های عناصر تعداد نوترونها و یا پروتونها از حد لازم پایداری عنصر بیشتر باشد. در این حال ایزوتوپ ناپایدار است و باید یکی از این ذرات اضافی تبدیل به ذره دیگر شود. برای مثال نوترون تبدیل به پروتون و یا برعکس پروتون تبدیل به نوترون شود.

اگر تعداد پروتونها و نوترونهای تمام عناصر پایدار و یا ایزوتوپهای ناپایدار آنها را بر روی محورهای مختصات ببریم به نحوی که تعداد پروتون هر عنصر در محور عرضها و تعداد نوترونهای مختلف هر عنصر بر روی محور طولها قرار گیرد، ناحیه پایداری عناصر در زیر نیمساز محورهای مختصات قرار خواهد گرفت. زیرا همواره تعداد نوترونها به جز برای چند عنصر سبک، بیشتر از تعداد پروتونها است. $(N \geq Z)$ منحنی که در شکل (۲۱) دیده می شود نخستین بار توسط سگر^{۳۱} تهیه شد و همچون کتاب مقدس برای پژوهشگران فیزیک و شیمی اتمی اهمیت دارد. در این منحنی رنگ مشکی نمودار عناصر و یا ایزوتوپهای پایدار عناصر است که تعداد آنها ۲۸۷ است. ۲۸۵۲ ایزوتوپ پرتوزا به رنگهای مختلف اند که هر رنگ نمودار نوع تجزیه آنها است. تعداد ایزوتوپهای هر عنصر به صورت خطی موازی محور طولها خواهد بود. نواحی مرکزی این منحنی گسترده تر است و تعداد ایزوتوپهای عناصر واقع در این ناحیه بیشترند، به نحوی که برای عنصری با عدد اتمی ۵۰ خطی بین ۶۰ تا ۷۰ است که معرف ۱۰ ایزوتوپ پایدار است.

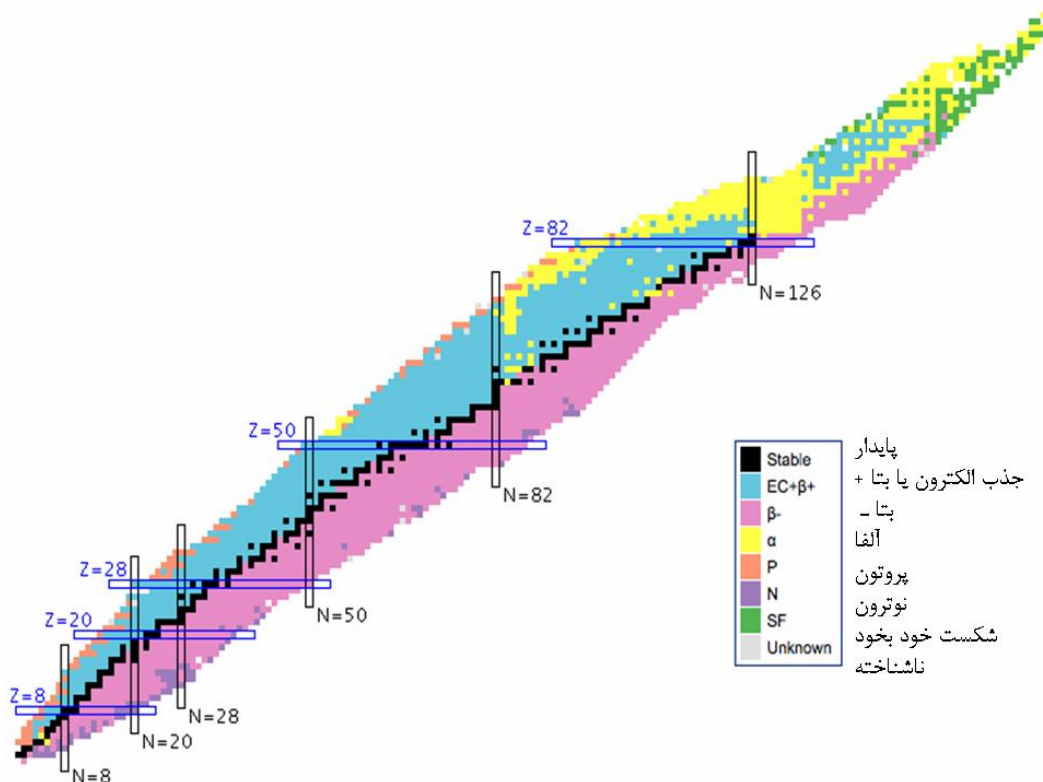
ایزوتوپ هسته هایی را گویند که عدد اتمی مشابه دارند. مانند ایزوتوپهای اورانیم و یا هیدروژن و یا کلر که پیش از این معرفی کردیم.

ایزوبار به هسته هایی که عدد جرمی یکسان دارند گفته می شود. مانند: فسفر و گوگرد عدد جرمی مساوی دارند و نیز کروم، ونادیم و تیتان ایزوبارند. ${}_{22}^{50}\text{Ti}$ ، ${}_{23}^{50}\text{V}$ ، ${}_{24}^{50}\text{Cr}$ ، ${}_{16}^{32}\text{S}$ ، ${}_{15}^{32}\text{P}$

ایزوتون هسته هایی را گویند که در تعداد نوترون یکسان باشند مانند عناصر زیر:



^{۳۱} E.Segre (۱۹۰۵ - ۱۹۸۹)

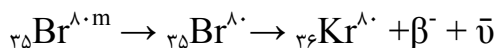


شکل (۲۱) نمودار ایزوتوپهای پایدار و ناپایدار عناصر. این جدول در آزمایشگاه های فیزیک و شیمی اتمی در ابعاد بزرگ (۱ سانتیمتر مربع برای هر ایزوتوپ) وجود دارد و پژوهشگران همواره به آن می نگرند تا مختصات رادیو ایزوتوپیایی را که در کنشهای هسته ای در درون نیروگاه اتمی و یا شتاب دهنده، تولید کرده اند با آن مقایسه کنند. برای مشاهده این جدول به سایت زیر مراجعه کنید:

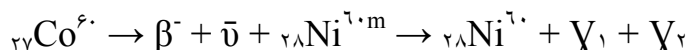
[http://en.wikipedia.org/wiki/Table_of_nuclides_\(segmented,_narrow\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Table_of_nuclides_(segmented,_narrow))

مشخصات بسیاری از عناصر پایدار و ناپایدار در این نمودار گنجانده شده است و به کمک این جدول می توان نوع تجزیه رادیوایزوتوپها و نیمه عمر آنها را شناخت. در این جدول عناصر و رادیو ایزوتوپیایی که مشخصات مشترکی در تعداد نوکلئیده دارند مشخص می شود.

ایزومر به هسته هایی گویند که در آنها عدد جرم و عدد اتمی و تعداد نوترونها یکسان باشند، تنها از نظر انرژی درونی باهم اختلاف دارند. معمولاً هسته ای که انرژی بیشتری دارد با انتشار پرتو ایکس و یا گاما تبدیل به عنصر پایدار و یا ناپایدار می شود. ایزوتوپ ناپایدار اخیر با انتشار پرتو به حالت پایدار می رسد.



همانطور که در مورد تجزیه کبالت ۶۰ دیدیم که با انتشار بتا منفی تبدیل به ایزومری از نیکل و این ایزومر هم با انتشار ۲ پرتو گاما به حالت پایداری رسید.



هسته ها یا نوکلئید های پایدار را به چهار دسته تقسیم می کنند:

- (۱) هسته هایی که در آنها تعداد پروتونها و نوترونها عدد زوج است مانند: ${}_{6}\text{C}^{12}$, ${}_{8}\text{O}^{16}$, ${}_{16}\text{S}^{32}$, ${}_{20}\text{Ca}^{40}$
- (۲) هسته هایی که در آنها تعداد پروتونها P زوج و تعداد نوترونها N فرد باشد: ${}_{12}\text{Mg}^{20}$, ${}_{16}\text{S}^{33}$, ${}_{28}\text{Ni}^{61}$
- (۳) هسته هایی که تعداد نوترونها N زوج ولی تعداد پروتونها P فرد باشد: ${}_{13}\text{Al}^{27}$, ${}_{17}\text{Cl}^{37}$, ${}_{20}\text{Mn}^{55}$
- (۴) هسته هایی که تعداد پروتونها P فرد و تعداد نوترونها N فرد باشد: ${}_{1}\text{H}^1$, ${}_{3}\text{Li}^7$, ${}_{5}\text{B}^{10}$, ${}_{7}\text{N}^{14}$

با توجه به جدول عناصر پایدار متوجه می شویم که تعداد عناصری که تعداد پروتونها و نوترونهای زوج دارند تقریباً دو برابر مجموع عناصر پایدار می باشند و آنهایی که هر دو فرد هستند تنها چهار عنصر می باشند، در جدول (۵) نموداری از این وضعیت را آورده ام.

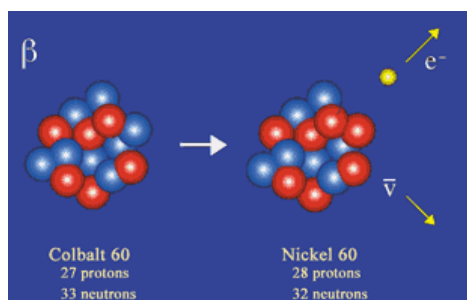
↓P پروتون →N نوترون	زوج	فرد
زوج	۲۰۱	۶۹
فرد	۶۱	۴

جدول (۵) نموداری از زوج و فرد بودن هسته های پایدار، مشاهده می شود تعداد هسته هایی که پروتون و نوترون زوج و زوج دارند از همه بیشتر و نیز زوج یا فرد بودن یکی از آنها نیز پایداری نسبتاً بیشتری ایجاد می کند ولی اگر هر دو فرد باشند تنها چهار هسته پایدار در طبیعت یافت می شود که شامل هیدروژن سبک H، لیتیم Li، بور B و ازت N است. این جدول مشخص می کند زوج بودن نوکلئون ها (پروتون یا نوترون) نقش اساسی در پیوست هسته ها دارد و به کمک رابطه نیمه نظری پایداری عناصر را مشخص کرده اند. این رابطه بسیار پیچیده و از حوصله این کتاب خارج است..

پرتوزایی بتای منفی: در فوق دیدیم که ورود یک نوترون به درون یک اتم کبالت ۵۹ آنرا تبدیل به کبالت ۶۰ می کند. ورود نوترون به درون کبالت ناپایداری در آن ایجاد می کند، زیرا در درون اتم کبالت ۶۰ انرژی زیادتر از حد معمول و تعداد نوترونها نیز بیشتر از حد معمول است، در نتیجه این رادیوایزوتوپ با تبدیل نوترون به پروتون و آزاد ساختن انرژی به صورت پرتوهای بتای منفی و گاما به نیکل ناپایدار تبدیل می شود. و سپس در لحظه بسیار کوتاهی، نیکل با انتشار دو پرتو گاما تبدیل به نیکل پایدار می گردد. چون یک نوترون به پروتون تبدیل شده، به اجبار باید یک ذره با بار منفی از اتم خارج شود تا بقای بارها حفظ گردد، از این رو یک الکترون منفی از اتم خارج می شود و نام این تحول را به این دلیل پرتوزایی بتای منفی می نامند.



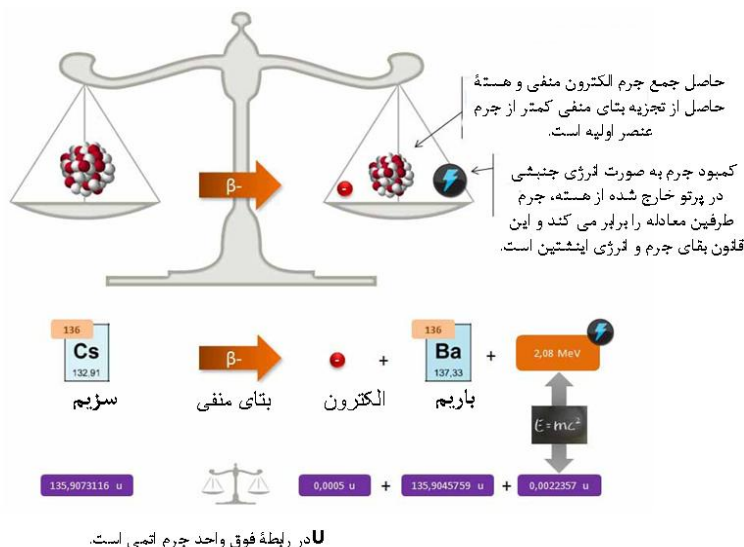
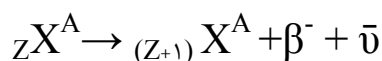
در شکل (۲۲) این تبدیل نمایش داده شده است.



شکل (۲۲) چگونگی تبدیل کبالت ۶۰ به ایزومری از نیکل ۶۰. ایزومر نیکل با انتشار دو پرتو گاما تبدیل به نیکل پایدار می گردد. در این تصویر تعداد پروتونها و نوترونها در داخل هسته کبالت و نیکل مشخص شده است. کبالت ۶۰ دارای ۲۷ پروتون و ۳۳ نوترون است، حال آنکه نیکل ۶۰ تعداد ۲۸ پروتون و ۳۲ نوترون دارد. توجه کنید جمع جبری تعداد پروتونها و نوترونها در این تبدیل تغییر نکرده است.

در این عمل عدد اتمی عنصر به وجود آمده یک واحد اضافه شده و در جدول تناوبی عناصر یک درجه ترقی می کند، یعنی یک خانه به بالای جدول منتقل می شود، ولی عدد جرمی که عبارت است

از مجموع تعداد پروتونها و نوترونها تغییری نمی کند، همچنین بقای جرم و انرژی طبق نظریه انشتین، در پرتوزایی بتای منفی برقرار است، و این حقیقت به صورت نمودار در شکل (۲۳) در مورد تجزیه سزیم ۱۳۶ ناپایدار به باریوم ۱۳۶ پایدار با انتشار پرتو بتای منفی آورده شده است. به صورت کلی این تحول را به صورت زیر نمایش میدهند.

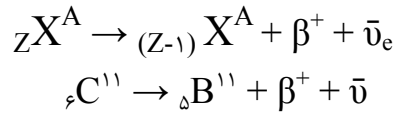


شکل (۲۳) نموداری از پرتو زایی بتای منفی در مورد سزیم پرتوزا ۱۳۶ که با انتشار یک الکترون منفی و مقدار ۲/۰۸ میلیون الکترون ولت انرژی تبدیل به باریوم ۱۳۶ پایدار می گردد. در این نمودار تجزیه سزیم پرتوزا و تبدیل آن به باریوم را با انتشار یک پرتو بتا و نموداری از بقای جرم و انرژی را در ترازویی فرضی آورده ام.

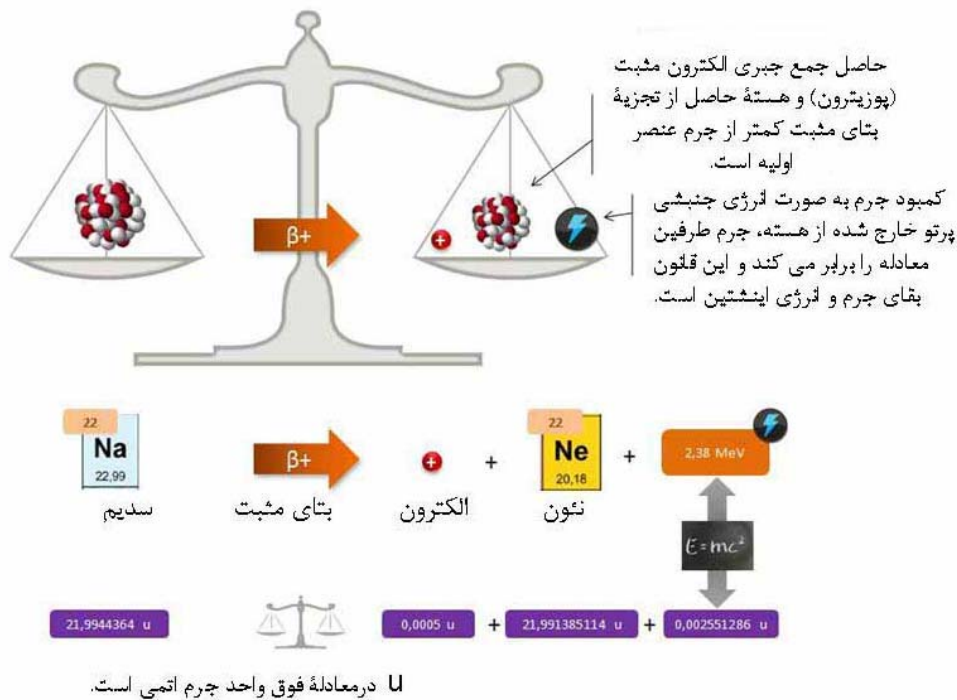
ایزوتوپ پرتوزای ${}_Z X^A$ با انتشار یک پرتو بتای منفی (که همان الکترون است) و یک نوترینو و مقداری انرژی تبدیل به عنصر و یا رادیو ایزوتوپی از عنصر می شود با عدد اتمی بالاتر $(Z+1) X^A$ و همانطور که گفته شد محاسب در جدول تناوبی عناصر یک درجه بالا می رود. گاهی فرآورده حاصل نیز ناپایدار است که با انتشار پرتو گاما نا پایداریش را دفع می کند، مانند نیکل که با انتشار دو پرتو گاما به حالت پایدار می رسد.

پرتوزایی بتای مثبت: گاه تعداد پروتونها بیشتر از تعداد نوترون ها است. در این حالت اگر سطح انرژی رادیو ایزوتوپ خیلی بالا باشد، یکی از پروتونها تبدیل به نوترون می شود، پیشتر گفتم که همواره باید بقای بارها در تبدیلات هسته ای حفظ شود، لذا در تبدیل یک پروتون که یک بار مثبت دارد، باید آن بار به صورت ذره ای که بار مثبت دارد خارج شود و این ذره یک الکترون مثبت است که بتای مثبت و یا ضد الکترون نیز نامیده می شود. مثالی در این مورد کربن رادیو اکتیو با عدد اتمی ۶ و عدد جرمی ۱۱ است که در مقابل ۶ پروتون تنها ۵ نوترون دارد. در نتیجه یکی از پروتونها

اضافی است و باید تبدیل به نوترون شود، لذا الزام بقای بارها حکم می کند که هسته اتم در این پدیده یک پروتو بتای مثبت از خود منتشر کند. این تحول را به صورت زیر برای تمام رادیو ایزوتوپهای نشر دهنده بتای مثبت می نویسند.



انرژی + نوترینو + بتای مثبت (الکترون مثبت) + ایزوتوپ پایدار بور ۱۱ → کربن رادیو اکتیو ۱۱
 بر اثر این عمل، عنصری به وجود می آید که یک عدد اتمی کمتر دارد و مکان آن در جدول تناوبی عناصر تنزل می یابد و یک خانه به پایین باز می گردد. در این تبدیل نیز عدد جرمی ثابت می ماند. این تبدیل را پرتوزایی بتای مثبت می گویند. در شکل (۲۴) پرتوزایی بتای مثبت را در مورد تبدیل سدیم ناپایدار به نئون پایدار با انتشار یک الکترون مثبت (پوزیترون) 32 آورده ایم. در این نمودار به کمک ترازوی فرضی حقیقت بقای جرم و انرژی در پرتوزایی بتای مثبت بنا بر نظریه انشتین بهتر تشریح شده است.

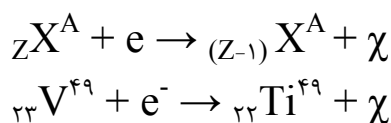


شکل (۲۴) نموداری از پرتوزایی بتای مثبت در مورد سدیم پرتوزا ۲۲ که با انتشار یک الکترون مثبت و ۲/۳۸ میلیون الکترون ولت انرژی تبدیل به نئون پایدار ۲۲ می گردد. در این نمودار به کمک ترازوی فرضی حقیقت بقای جرم و انرژی در پرتوزایی بتای مثبت بنا بر نظریه انشتین بهتر تشریح شده است.

32 الکترون مثبت یا پوزیترون ضد الکترون نامیده می شود. الکترون مثبت نمی تواند در طبیعت وجود داشته باشد بعد از انتشار و در لحظه ای که انرژی جنبش اش صفر می شود، با یک الکترون منفی برخورد کرده و تبدیل به دو پرتو گاما که در جهت مخالف از هم در حرکتند و هر یک ۰/۵۱۱ میلیون الکترون ولت انرژی خواهند داشت، می شوند.

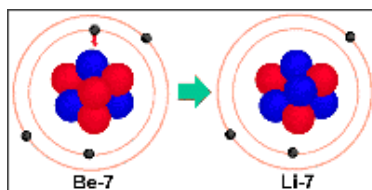
$$\bar{e} + e^+ \rightarrow \gamma_1(0/511) + \gamma_2(0/511)$$

جذب الکترونی: گاهی از اوقات جرم پروتون هسته اتمی (که همواره کمتر از جرم نوترون است) قادر نیست یک نوترون و یک بتای مثبت بدهد. در این حالت یکی از پروتونها، یک الکترون از قشر الکترونی اتم را جذب کرده و تبدیل به نوترون می گردد. این عمل را جذب الکترونی گویند و بدین ترتیب یکی از پروتونهای اتم تبدیل به نوترون می شود و عنصر به وجود آمده یک خانه در جدول تناوبی عناصر تنزل نموده و به پایین کشیده می شود. الکترون کنده شده به وسیله یکی از الکترونهای قشر بالاتر جانشین می شود. در مقابل این جایگزینی، اتم یک پرتو ایکس از خود منتشر خواهد کرد. این نوع تبدیل را **جذب الکترونی** گویند. برای مثال عنصر وانادیم تبدیل به عنصر تیتانیوم می شود:



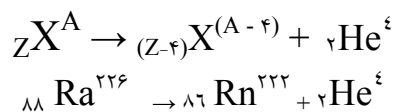
پرتو ایکس + تیتانیوم (۲۲ پروتون و ۲۷ نوترون) → یک الکترون (از قشر K الکترونی اتم) + وانادیم (۲۳ پروتون و ۲۶ نوترون)

در سه پدیده تجزیه عناصر، (بتای منفی، بتای مثبت و یا جذب الکترونی) همواره عدد جرم ثابت می ماند. در شکل (۲۵) پرتوزایی به وسیله فرایند جذب الکترونی در مورد تجزیه برلییم و تبدیل آن به لیتیم پایدار نمایش داده شده است.



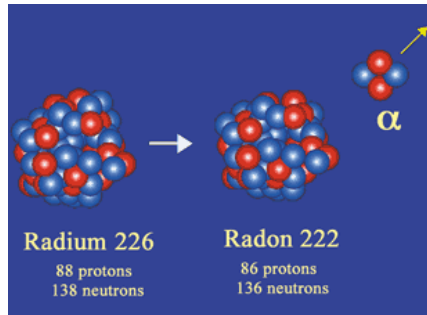
شکل (۲۵) نموداری از پرتوزایی به روش جذب الکترونی در تبدیل رادیو ایزوتوپ برلییم ۷ به لیتیم پایدار ۷. آن چنان که در این نمودار مشاهده می شود، یکی از الکترونهای قشر اتمی برلییم جذب هسته می گردد و در اثر این فرایند تعداد پروتونها یک واحد کاهش می یابد. رادیو ایزوتوپ برلییم که ۴ پروتون (رنگ سرخ) و ۳ نوترون (رنگ آبی) دارد تبدیل به لیتیم با ۳ پروتون و ۴ نوترون می شود.

تحول به وسیله تقسیم: در عناصر بسیار سنگین نظیر پلونیوم، رادیم، اورانیوم و پلوتونیوم، ناپایداری هسته با انتشار یک ذره آلفا انجام می گیرد. در این حالت عدد اتمی رادیو ایزوتوپ ناپایدار ۲ واحد تنزل می کند، یعنی در جدول تناوبی دو خانه به پایین بر می گردد و چون ذره آلفا هسته اتم هلیم است و ۲ پروتون و ۲ نوترون دارد، در نتیجه عنصر حاصل ۴ واحد جرم اتمی از عنصر مادر کمتر خواهد داشت و دو خانه به سمت چپ جدول منتقل می شود. این تحول را به صورت زیر برای تمام رادیو ایزوتوپهای نشر دهنده ذره آلفا که در واقع هسته اتم هلیم است نمایش می دهند.



ذره آلفا (۲ پروتون و ۲ نوترون) + رادون (۸۶ پروتون و ۱۳۶ نوترون) → رادیم (۸۸ پروتون و ۱۳۸ نوترون)

این پدیده را تحول به وسیله تقسیم می گویند. در این تحول عنصر دو خانه به سمت چپ در جدول تناوبی تنزل می کند. نموداری از این تحول در شکل (۲۶) آورده شده است..



شکل (۲۶) تحول به وسیله تقسیم در مورد عنصر رادیم که تبدیل به گاز رادون می شود. گاز رادن در معدن اورانیم وجود دارد. اگر کارگران معدن آن را استنشاق کنند حتماً به سرطان ریه مبتلا خواهند شد. اگر به شکل ۲۷ توجه کنید، متوجه خواهید شد که گاز رادن یکی از فرزندان خانواده اورانیم ۲۳۸ می باشد. اگر چه نیمه عمر گاز رادن کوتاه است، (۳/۸۲ روز) و به وسیله تقسیم و انتشار چندین پرتو آلفا و بتای منفی نهایت بعد از ۳۸/۲ روز تبدیل به رادیو سرب (به عدد اتمی ۸۲ و عدد جرمی ۲۱۰) می گردد. سرب نیز ناپایدار است و نیمه عمری معادل با ۲۲ سال دارد. یعنی باید ۲۲۰ سال صبر کرد تا اتمهای سرب حاصل از گاز رادن نشست بر روی ریه ها، با دو بار انتشار پرتو بتای منفی مبدل به پلونیوم ۲۱۰ شوند. پلونیوم ۲۱۰ نیز پرتوزا است و نیمه عمری نسبتاً طولانی (۱۳۸/۳ روز) دارد. باید برای از بین رفتن پلونیوم نیز ۱۳۸۳ روز صبر کرد تا تمام اتمهای پرتوزای آن از بین بروند و تبدیل به سرب پایدار ۲۰۶ شوند. مسلماً مشخص است که قسمت اعظم این تحولات در داخل گور شخص آلوده به گاز رادن انجام خواهد گرفت! باید اذعان کرد که کار در معدن اورانیم خطرناک است و قبل از هر چیز باید فرهنگ بر خورد با مواد پرتوزا را به کارگران آموخت.

تحول با انتشار پرتو آلفا در خانواده های عناصر سنگین طبیعی نظیر اورانیم ۲۳۸ و اورانیم ۲۳۵ و یا توریم ۲۳۲ بسیار مهم است. به ویژه در موقع استخراج اورانیم طبیعی کارگران باید متوجه شوند چه رادیو ایزوتوپهایی (نشر دهنده آلفا و یا نشر دهنده بتا و گاما) در داخل سنگ معدن وجود دارند. و چگونه باید درمقابل این پرتوها که از این عناصر و فرزندان آنها منتشر می شود، از خود محافظت کنند. بدین منظور در شکل (۲۷) نموداری از تجزیه و تحول خانواده اورانیم ۲۳۸ را تا رسیدن به سرب پایدار و نیز در این نمودار مشخصات و نیمه عمر اورانیم ۲۳۸ و فرزندان او را آورده ام. باید اضافه کنم علاوه بر پرتوهای بتا و آلفای مشخص شده در نمودار پرتوهای گامای متعددی نیز همراه با این تحولات از هسته برخی از این رادیو ایزوتوپها خارج می شود. و نیز باید توجه داشت پرتوزایی هر یک از این عناصر با هم برابر و معادل با پرتوزایی رادیو ایزوتوپ مادر است. چون مادر با فرزندانش در طول عمر زمین به تعادل مادام العمری رسیده اند. یعنی تا زمانی مادر پرتوزایی دارد هریک از فرزندان نیز همان اندازه پرتوزایی دارد.

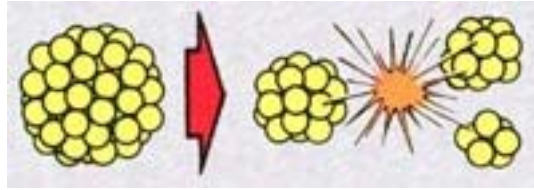
عدد اتمی (تعداد پروتونها)

جرم	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93
146												
145												
144												
143												
142												
141												
140												
139												
138												
137												
136												
135												
134												
133												
132												
131												
130												
129												
128												
127												
126												
125												
124												

شکل (۲۷) چگونگی تجزیه اورانیوم ۲۳۸ و تولید فرزندان پرتوزا. در این شکل می بینیم که اورانیوم ۲۳۸ با نشر یک پرتو آلفا تبدیل به توریم ۲۳۴ با عدد اتمی ۹۰ می شود و توریم نیز با انتشار پرتو بتا منفی تبدیل به پروتاکتینیم ۲۳۴ با عدد اتمی ۹۱ می گردد. عنصر اخیر نیز با انتشار یک پرتو بتای منفی دوباره تبدیل به اورانیوم ۲۳۴ می گردد. این رادیو ایزوتوپ نیز با نشر پی در پی ۵ ذره آلفا به سرب رادیو اکتیو ۲۱۴ با عدد اتمی ۸۲ می رسد. همچنین عمل تجزیه بانشر دو بتای پی در پی و یک آلفا و دوباره دو بتای منفی نهایت به سرب پایدار ۲۰۶ با عدد اتمی ۸۲ تبدیل می شوند. چون نیمه عمر اورانیوم ۲۳۸ تقریباً برابر عمر زمین است، درون معدن تمام این رادیو ایزوتوپها وجود دارند. پرتوزایی همه رادیو ایزوتوپهای نمایش داده شده در تصویر، با هم برابر و برابر با پرتوزایی اورانیوم ۲۳۸ است.

تحول دیگر به وسیله تقسیم، همان پدیده شکست اتمهای سنگین است که در اورانیوم و یا پلوتونیم مشاهده شد. دیدیم که شکست با ورود یک نوترون به درون هسته انجام می گیرد. ولی در عناصر بسیار سنگین تر خانواده اورانیوم، که به صورت سنتز ساخته می شوند، عمل شکست خود بخود انجام می گیرد و تبدیل به دو هسته تقریباً مساوی شده و تعدادی نوترون تولید می کنند. تحول آنها را نیز تحول به وسیله تقسیم می نامند.

چنان که پیشتر گفتم، در نیروگاه اتمی ایزوتوپ اورانیوم ۲۳۸ یک نوترون جذب می کند و تبدیل به ایزوتوپ اورانیوم ۲۳۹ می گردد که با ۲ تجزیه بتای منفی پی در پی تبدیل به پلوتونیم ۲۳۹ خواهد شد. تعدادی از اتمهای این ایزوتوپ نوترون جذب می کنند و ایزوتوپ پلوتونیم ۲۴۰ به وجود می آید. پلوتونیم ۲۴۰ خود بخود شکسته می شود. این نوع شکست را شکست خود بخود گویند در شکل (۲۸) شکست خود بخود پلوتونیم ۲۴۰ نمایش داده شده است.



شکل (۲۸) شکست خود بخود اتمهای پلوتونیم ۲۴۰. در درون نیروگاه اتمی - یا در پلوتونیم هایی که ممکن است افراد ناشی از تخلیص میله های سوخت مخفیانه به دست آورده اند - پلوتونیم خود بخود شکسته می شود. ساخت پلوتونیم نظامی کاملاً متفاوت با ساخت پلوتونیم به عنوان ماده سوخت نیروگاه است. در پلوتونیم نظامی نباید غلظت یا نسبت در صد پلوتونیم ۲۴۰ بیشتر از ۶ درصد باشد. اگر از این مقدار بیشتر باشد با شکست خود به خود پس از کوتاه مدتی، تمامی توده پلوتونیم - چه پلوتونیم ۲۴۰ و چه پلوتونیم ۲۳۹ - شکست پیدا می کند و تبدیل به بمب اتمی نا خواسته ای می شود. برای ساخت پلوتونیم نظامی نباید توده اورانیم ۲۳۸ بیشتر از سه ماه تحت تأثیر نوترونهای درون نیروگاه باشند. به همین دلیل نیروگاههایی که در آنها پلوتونیم نظامی تهیه می شود کاملاً متفاوت از نیروگاههای تولید کننده الکتریسیته هستند. کره شمالی با نیروگاه ده مگاواتی (یعنی نیروگاهی که ۳۰۰ برابر کوچکتر از نیروگاه بوشهر است) سالانه ۲ کیلو گرم پلوتونیم می سازند و با دو نیروگاه به این کوچکی می توانند هر سال یک بمب اتمی تولید کنند. کره شمالی سومین آزمایش بمب اتمی اش را در ۱۱ فوریه ۲۰۱۳ با یک بمب اتمی مینیاتوری در عمق یک متری زمین انجام داد. مقامات امریکایی قدرت این بمب را نصف قدرت بمبی که بر روی هیروشیما رها کرده بودند تخمین زدند. و نیز زمین لرزه ای که از انفجار این بمب ایجاد شد معادل ۵ ریشتر تخمین زده شد.

وجود پلوتونیم ۲۴۰ در ساختار بمب اتمی همواره مسئله ساز بوده است. در پلوتونیمی که در ساختار بمب های اتمی به کار برده می شود، همواره مقداری کمتر از ۶ درصد پلوتونیم ۲۴۰ وجود دارد، وجود بیش از این مقدار، خطر انفجار بمب را با شکست خود بخود بالا می برد و حتی اگر این نسبت در صد ۰/۱ درصد بالا رود انفجار خود بخود صورت خواهد گرفت. به همین دلیل اگر پلوتونیم به دست افرادی که چنین شناختی را ندارند بیفتد، فاجعه بار خواهد بود. پلوتونیمی که در نیروگاهها مصرف می شود ۶۰ درصد ایزوتوپ ۲۳۹ دارد و بقیه آن ایزوتوپهای سنگین تر، از جمله ۲۵ درصد ۲۴۰ است. غنی سازی پلوتونیم به وسیله نفوذ گازی و یا سانتریفوژ برای رساندن نسبت در صد آن به ۹۴ درصد، به نظر ساده تر از غنی سازی اورانیم ۲۳۵ می باشد که نسبت در صد آن فقط ۰/۷ درصد است، ولی در عمل غیر ممکن است زیرا پرتو زایی پلوتونیم که دهها میلیون بار بیشتر از اورانیم ۲۳۸ است مانع از چرخش پلوتونیم هکزافلورور در ستونهای گازی یا در سانتریفوژها خواهد بود. برای تهیه پلوتونیم نسبتاً خالص باید زمان اقامت اورانیم ۲۳۸ را در نیروگاهها کوتاه کرد. چون هرچه زمان اقامت اورانیم ۲۳۸ بیشتر باشد تعداد نوترونهایی که جذب آن می شوند (یعنی تشکیل ایزوتوپ ۲۴۰) بیشتر خواهد بود. در زمان جنگ سرد، برای تهیه بمبهای اتمی، میله های سوخت را فقط ۴ ماه در نیروگاه نگه می داشتند و بدین صورت امکان تشکیل پلوتونیم ۲۴۰ را کمتر می کردند.

در برخی از نیروگاهها که با اورانیم طبیعی و آب سنگین کار می کنند (مانند نیروگاههای کانادایی و یا پاکستانی) چون می توان بدون توقف نیروگاه میله های سوخت آنها را عوض کرد، به سادگی می توان در آنها پلوتونیم ۲۳۹ نسبتاً خالص تولید کرد. در تهیه پلوتونیم نظامی از

نیروگاههایی استفاده می شود که توان کم دارند. برای مثال در نیروگاهی که تنها ۱۰ مگاوات توان دارد هر سال ۲ کیلوگرم پلوتونیم مناسب برای بمب اتمی می توان تولید کرد. کره شمالی از همین روش برای ساخت بمب اتمی استفاده می کند.

ث) سرعت تحولات مواد پرتوزا: توانایی پرتوزایی رادیو ایزوتوپها به طور دائم در طی زمان کاهش پیدا می کند. پیشتر گفتیم که عناصر ناپایدار میل دارند خود را به حالت سکون و آرامش یعنی سطحی پایین تر از انرژی سوق دهند، لذا تعداد اتمهای ناپایدار با مرور زمان کاهش خواهند یافت. برای مثال اگر یک میلی گرم عنصر منگنز را در مقابل چشمه ای (منبع تولید نوترون) از نوترون به مدت چند ساعت قرار دهیم. منگنز که در آغاز عدد جرمی ۵۵ داشت بر اثر جذب یک نوترون تبدیل به رادیوایزوتوپ منگنز ۵۶ خواهد شد. این رادیو ایزوتوپ نمی تواند زیادی نوترون را تحمل کند، در نتیجه با پدیده پرتوزایی بتای منفی تجزیه خواهد شد. لحظه ای که منگنز را از مقابل چشمه نوترونی بیرون می آوریم لحظه صفر فرض کنید. در این لحظه تعداد اتمهای رادیو اکتیو مقدار ماکزیمم خود را دارند. حال اگر آنرا در مقابل یک شمارشگر پرتو ها قرار دهید، شمارشگر تعدادی ضربه در ثانیه نمایش می دهد، برای مثال ۱۰,۰۰۰ ضربه در ثانیه. این به معنی آن است که در هر ثانیه ۱۰,۰۰۰ اتم منگنز رادیو اکتیو تخریب شده و عنصر آهن ۵۶ پایدار را به وجود می آورند. این عدد را رادیو اکتیویته (پرتوزایی) منگنز می نامند و آنرا با حرف A نمایش می دهند که برابر است با حاصلضرب تعداد اتمهای منگنز پرتوزای موجود در نمونه N ضرب در ضریبی که آنرا ثابت پرتوزایی می نامند و آنرا با حرف λ نمایش می دهند.^{۳۳}

$$A = \lambda N$$

تعداد اتم های پرتوزا که به کمک چشمه نوترونی در منگنز به وجود آورده ایم، بی نهایت نیستند و چون در هر ثانیه تعداد ۱۰,۰۰۰ تای آنها تخریب می شود، پس به ناچار تعداد اتمهای

^{۳۳} قانون تجزیه مواد رادیو اکتیو: در هر لحظه تعداد اتمهایی که تجزیه می شوند متناسب با تعداد اتمهای پرتوزای موجود در نمونه

است. اگر N تعداد اتمهای پرتوزا در زمان t باشد تعداد اتمهایی که در زمان بسیار کوتاه dt تجزیه می شوند عبارتند از:

$$dN = \lambda N dt \quad (۱) \quad \text{یا} \quad (۲) \quad dN/N = -\lambda dt$$

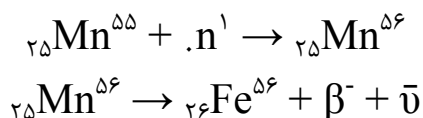
λ عددی ثابت است و ثابت پرتوزایی نامیده می شود و نیز مشخص کننده احتمال تجزیه یک هسته در واحد زمان است. λ به طور کلی مستقل از کلیه عوامل فیزیکی و شیمیایی و محیط است. رابطه (۲) را می توان به صورت: $(dN/dt = -\lambda N)$ نوشت. سرعت تجزیه عبارتست از حاصلضرب N در λ که آن را فعالیت یا پرتوزایی (رادیواکتیویته) گویند. در واقع عبارتست از: $(\lambda N = A)$ تعداد تجزیه در واحد زمان. در مورد مثال منگنز موقعی که منگنز را از زیر چشمه نوترونی خارج می کنیم، فعالیت و یا پرتوزایی آن $A = 10,000$ تجزیه در ثانیه است. اگر از رابطه (۲) انتگرال بگیریم، خواهیم داشت: $\ln N/N_0 = -\lambda t + \text{Constant}$ و می توان نوشت:

$$N = N_0 \cdot e^{-\lambda t}$$

بدین ترتیب قانون نزولی پرتوزایی به دست می آید که در آن N_0 تعداد اتمهای پرتوزا در زمان $t = 0$ و N تعداد اتمهای باقی مانده در زمان t است.

پرتوزای باقی مانده به تدریج کم خواهد شد. اگر نیم ساعت بعد به شمارشگر نگاه کنید می بینید مثلاً " ۹۰۰۰ ضربه در ثانیه را نمایش می دهد. اگر یک ساعت بعد دوباره به شمارشگر نگاه کنید باز می بینید که عدد کوچکتری را نشان می دهد. در مورد این رادیو ایزوتوپ اگر طی ۲/۵۸ ساعت به طور مرتب تعداد ضربه های شمارشگر را نگاه کنید خواهید دید که تعداد ضربه ها بعد از این زمان نصف شده اند. در این حالت می گوییم نیمی از اتمهای پرتوزا از بین رفته اند و شمارشگر عدد ۵۰۰۰ را نمایش می دهد. این زمان را نیمه عمر گویند. بنابراین تعریف نیمه عمر عبارتست از:

زمان لازم برای آنکه نیمی از اتمهای یک رادیو ایزوتوپ از بین بروند. اگر باز ۲/۵۸ ساعت دیگر صبر کنید شمارشگر عدد ۲۵۰۰ را نشان خواهد داد. و اگر باز ۲/۵۸ ساعت دیگر صبر کنید شمارشگر عدد ۱۲۵۰ را نشان خواهد داد. یعنی بعد از یک نیمه عمر یک دوم و بعد از دو نیمه عمر یک چهارم و بعد از سه نیمه عمر یک هشتم و بعد از چهار نیمه عمر یک شانزدهم و بعد از پنج نیمه عمر یک سی و دوم از اتمهای پرتوزا باقی می ماند. اگر از لحظه بیرون آوردن منگنز ۲۵/۵۸ ساعت بگذرد شمارشگر ۱ ضربه در ثانیه نمایش خواهد داد. عملاً" بعد از ده نیمه عمر، تمام اتمهای رادیو منگنز از بین رفته و مطابق رابطه زیر تبدیل به آهن پایدار شده اند.



منگنز ۵۶ ناپایدار → انوترون + منگنز ۵۵

نوترینو + بتای منفی + آهن پایدار (۵۶) → منگنز ۵۶ ناپایدار

در این تحول بعد از جذب یک نوترون به وسیله اتم منگنز، در آن ناپایداری به وجود می آید و تراز انرژی درونی اش بالا می رود، هسته اتم برای کم کردن انرژی درونی یکی از نوترونها را تبدیل به پروتون می کند. چنان که قبلاً" هم گفته شد، باید بقای بارها منظور شود، در نتیجه نوترونی که تبدیل به پروتون گشته، برای تساوی بارها یک الکترون منفی از خود بیرون خواهد داد، یعنی عنصری که به وجود می آید آهن است، که در جدول تناوبی محلی بالاتر از منگنز خواهد داشت. در این تحول یک الکترون منفی از اتم بیرون خواهد آمد، به این دلیل آنرا تحول بتای منفی می نامند.

در مورد تجزیه، رادیوم پرتوزا که نیمه عمرش ۱۶۰۰ سال است باید ۱۶,۰۰۰ سال صبر کرد تا تمام پرتوزایی اش از بین رود. ولی عملاً" بعد از ۵ نیمه عمر تعداد اتمهای پرتوزای باقی مانده قابل صرف نظر کردن اند. در شکل (۲۹) نموداری از تحول تخریب اتم رادیوم را با انتشار پرتو آلفا در طی زمان نمایش داده ایم. در واقع ساخت منگنز پرتوزا به کمک ذرات نوترونی نوعی "کیمیگری" است، منتها در اینجا از عنصر منگنز عنصر آهن ساخته شده است. به همین سهولت می توان عنصر طلا را

هم ساخت، با این تفاوت که عنصری که باید در مقابل چشمه نوترونی قرار گیرد پلاتین است که از طلا با ارزشتر است.

نیمه عمر رادیم ۲۲۶ برابر ۱۶۰۰ سال است



شکل (۲۹) تخریب (تجزیه) رادیم با نشر پرتو آلفا، با نیمه عمری معادل ۱۶۰۰ سال، بعد از چهار نیمه عمر رادیو اکتیویته رادیوم به یک هشتم مقدار اولیه رسیده است.

تا اینجا تا حدودی با طبیعت هسته ها و انرژی پیوند و رادیو ایزوتوپها آشنایی پیدا کردیم. در فصل بعد نیروگاههای اتمی و چگونگی تهیه سوخت هسته ای را تشریح خواهیم کرد. آنچه تا کنون گفتیم ما را در درک کار کرد نیروگاهها و شناخت رادیو ایزوتوپهایی که در آنها تشکیل می شود کمک خواهد کرد.

فصل دوم

نیروگاههای اتمی

سوخت اتمی

و

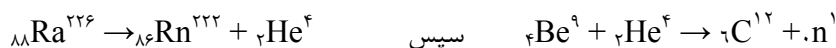
غنی سازی اورانیم

۱) ساختار نیروگاه اتمی:

چنان که پیشتر به اختصار اشاره شد، یک نیروگاه اتمی متشکل از اجزای مختلفی است که همگی نقش اساسی در تعادل و ادمه حیات آن دارند. این اجزاء عبارتند از:

الف) ماده سوختنی: ماده سوختنی که در نیروگاهها به کار می رود ممکن است از اورانیم طبیعی باشد. - که آن را از معدن استخراج و سپس تخلیص می کنند - در این صورت مقدار اورانیم 235 موجود در آن فقط $0/7$ درصد است و $99/3$ درصد آن اورانیم 238 است که شکست نا پذیر است. در چنین حالتی اولاً "حجم ماده سوختنی باید بسیار زیاد باشد به نحوی که تا حد ممکن نوترونها نتوانند به سهولت از توده سوختنی فرار کنند. چون در این سوخت هسته ای یک اتم از هر 140 اتم شکست پذیر است و با وجود آنکه هر شکست به طور متوسط $2/5$ نوترون تولید می کند، بیلان نوترونی زیاد بالا نیست و باید کاری کرد تا به ازای هر شکست، اتم اورانیم دیگری شکسته شود. این کار یا در حجم زیاد ماده سوختنی میسر است و یا باید منبع تولید کننده نوترونی به نیروگاه افزود. ^{۳۴} در آغاز شناخت کاربرد شکست اتم برای تهیه الکتریسیته، نیروگاههایی که ساخته می شد

^{۳۴} (۱) عنصر رادیوم از تجزیه اتمهای اورانیم 238 در درون معدن تولید شده و فعالیت پرتوزایی آن در سنگ معدن به حال تعادل با فعالیت پرتوزایی اورانیم 238 است. اولین بار پیر و ماری کوری به وجود آن پی بردند و برای اثبات وجود عنصر رادیم 226 و اثبات پرتوزایی مواد رادیو اکتیو، ناچار شدند صدها تن سنگ معدن اورانیم را با هزینه شخصی و در شرایطی بسیار دشوار، ابتدا تخلیص کنند و سپس به روشهای شیمیایی دشوارتر، یک گرم ایزوتوپ رادیم 226 را که نیمه عمری معادل 1600 سال دارد از آن به دست آورند. این مقدار رادیم در هر ثانیه 37 میلیارد ذره آلفا تولید می کند. این عدد را در آغاز شناخت پرتوزایی، واحد رادیو اکتیویته یا واحد پرتوزایی نام نهادند و آن را یک کوری (به نام خانم کوری) نامیدند. بعد از کشف رادیوم چادویک (۲) فیزیک دان انگلیسی اثر این عنصر بر روی عنصر برلیم را شناخت و از آنجا ذره نوترون را کشف کرد.



مخلوطی از یک گرم رادیم و مقدار نسبتاً زیادی از عنصر برلیم می تواند چشمه ای (سورس) از نوترون معادل $10^7 \times 1/3$ نوترون در ثانیه تولید کند. این نوترونها بسیار پر انرژی هستند. تمایل اورانیم برای شکست با نوترونهای سریع پایین است، اگر نوترونهای حاصل را از قشری از پارافین به ضخامت 4 سانتیمتر عبور دهیم، تبدیل به نوترون کم انرژی که به آن نوترون ترمیک می گویند می شود. تمایل اورانیم 235 برای جذب (مقطع مؤثر) چنین نوترونهایی زیاد است. بعد از عبور نوترونها از پارافین تعداد آنها عبارتست از: $8/5 \times 10^4$ یا 85000 نوترون در ثانیه. این تعداد از نوترون می تواند واکنش شکست را در نیروگاه اتمی که (ادامه مطلب در صفحه ۵۸)

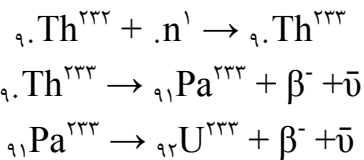
از اورانیم طبیعی به عنوان ماده سوختنی استفاده می کردند و هنوز هم در جهان تعداد زیادی از این گونه نیروگاهها وجود دارد. در دو دهه ۱۹۷۰ و ۱۹۸۰ نیروگاههایی که ساخته می شدند اغلب از اورانیم غنی شده تا حد ۳ و یا ۵ درصد استفاده می کردند. نیروگاهها همچنین می توانند از مخلوط اورانیم طبیعی همراه با چند درصدی از رادیو ایزوتوپ پلوتونیم ۲۳۹ استفاده کنند. بعداً خواهیم گفت که نیروگاههایی وجود دارند که به آنها سورژنراتور می گویند. سوخت این نیروگاهها اورانیم طبیعی است و توده سوختنی را غشایی از عناصر زاینده در بر می گیرد که از آنها ماده لازم برای تهیه بمب اتمی به سهولت تهیه می شود. این عناصر می تواند ایزوتوپ اورانیم ۲۳۸ و یا عنصر توریم باشد. چنانکه قبلاً هم گفتم رادیو عنصر اورانیم ۲۳۸ یکی از نوترونهای حاصل از شکست را جذب کرده و تبدیل به ایزوتوپ بسیار ناپایدار اورانیم ۲۳۹ می شود که با انتشار دو پرتو بتای منفی پی در پی تبدیل به پلوتونیم ۲۳۹ می گردد. رادیو عنصر توریم به عدد اتمی ۹۰ و عدد جرمی ۲۳۲ ماده

در آن چندین تن اورانیم طبیعی وجود دارد، شروع کند. در این نیروگاه نوترونهای اضافی جذب اورانیم ۲۳۸ می شود تا عنصر پلوتونیم را بسازد. در هندوستان، پاکستان و کره شمالی نیروگاههایی به همین صورت کار می کنند. در کره شمالی نیروگاههایی مختص تولید پلوتونیم درست کرده اند و هر سه ماه یک بار میله های سوخت را بیرون می آورند. بعد از حل کردن میله سوخت در اسید، پلوتونیم تولید شده در آنها را به روش های شیمیایی جدا می سازند. ۴ تا ۵ کیلوگرم پلوتونیم یک بمب اتمی می دهد. نیروگاه یونگیون Yongbyon به همین روش پلوتونیم ۲۳۹ سنتز می کند. تا کنون ۳ بمب اتمی - با وجود ممنوعیت این نوع آزمایشات از طرف سازمان ملل - منفجر کرده اند. دومین آزمایش اتمی آنها به قدرت ۱۰ کیلوتن در ۲۵ مه ۲۰۰۹ انجام گرفت. پیش از این نیز گفتم در ۱۲ فوریه ۲۰۱۳ آخرین بمب اتمی آنها به قدرت ۶ کیلوتن در عمق یک متری زمین منفجر شد و زمین لرزه ای به قدرت ۵ ریشتر ایجاد کرد(۳). در واقع به کمک اورانیم طبیعی می توان نیروگاه اتمی ساخت. بعداً خواهیم گفت چگونه به سهولت می توان پنج کیلو گرم پلوتونیم در نیروگاهی به قدرت ۱۰ مگاوات می توان بمب اتمی ساخت. و این همان کاری است که در آغاز شناخت پدیده شکست در سال ۱۹۴۴ میلادی با تکنولوژی آن زمان که بسیار پیش رفته هم نبود انجام دادند و بمبهایی از پلوتونیم ساختند. یکی را به عنوان آزمایش در نیو مکزیک منفجر نمودند و بمب دیگر را بر سر مردم ناکازاکی رها کردند. آلمانها در زمان جنگ نیز با تهیه آب سنگین قصد داشتند بدین ترتیب بمب اتمی بسازند. انگلیسی ها به قصد آنها پی بردند و مخازن آب سنگین آنها را بمباردمان کردند. در پاکستان، کانادا و هندوستان نیروگاههایی که با اورانیم طبیعی و آب سنگین کار می کنند وجود دارند. بدون توقف این نیروگاه ها، می توان میله های سوخت را هر زمان که خواستند عوض کنند.

(۲) Sir James Chadwick(۱۸۹۱-۱۹۷۴).

http://en.wikipedia.org/wiki/North_Korean_nuclear_test۲۰۱۳ (۳)

پرتوزایی است با نیمه عمر بسیار بالا: ۱۶ میلیارد سال (یعنی سه برابر عمر زمین، و بنابراین در طبیعت فراوان یافته می شود). این عنصر نیز یک نوترون جذب کرده و تبدیل به رادیو ایزوتوپ بسیار ناپایدار توریم ۲۳۳ می گردد که با انتشار دو پرتو بتای پی در پی تبدیل به رادیو ایزوتوپ اورانیم ۲۳۳ شده که از اورانیم ۲۳۵ شکست پذیر تر است.

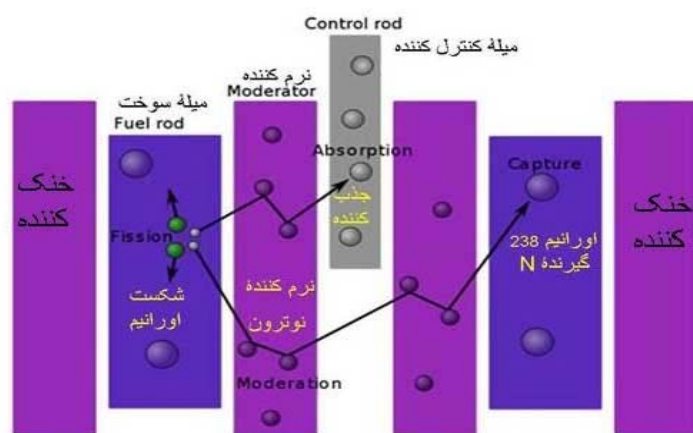


تجزیه توریم و تبدیل آن به اورانیم ۲۳۳ نیمه عمری معادل ۲۷ روز دارد، بنابراین در این زمان می توان توریم را که عنصری متفاوت از اورانیم است به روشهای ساده شیمیایی از توده سوخت جدا کرده و سپس صبر کنند تا توریم های جدا شده با تجزیه بتای منفی تبدیل به اورانیم ۲۳۳ گردد. پلوتونیم تولید شده در داخل توده های اورانیم نیز به سهولت با روشهای متداول شیمیایی از توده سوختنی جدا می شود. وزن بحرانی اورانیم ۲۳۳ نزدیک به وزن بحرانی پلوتونیم، یعنی تقریباً ۵ کیلوگرم است. بمبهایی که در زرادخانه های آمریکا و روسیه وجود دارند به مراتب سنگین تر از این مقدار و در نتیجه مخربترند. خوشبختانه به تازگی این دو کشور تعدادی از بمبهای اتمی خود را خنثی کرده اند و قرار است از مواد سوخت اتمی آنها در نیروگاههایی که خواهند ساخت استفاده کنند. در نیروگاههای پژوهشی از اورانیم غنی شده (گاه تا میزان ۲۰ درصد) استفاده می کنند که البته حجم و قدرت این نیروگاه ها چندان بزرگ نیست.

ب) نرم کننده یا مدراتور: چنان که اشاره شد، احتمال انجام واکنش شکست اتمهای اورانیم ۲۳۵ با نوترونهای سریعی که از واکنش شکست تولید می شوند بسیار کم است. در اغلب نیروگاههای موجود در جهان برای انجام واکنش شکست اورانیم در قلب نیروگاه از نوترون کند که غالباً به آنها نوترون حرارتی یا ترمیک Thermique می گویند استفاده می شود. برای کم کردن انرژی نوترونهای حاصل از شکست که ۱۰ تا ۱۴ میلیون الکترون ولت انرژی دارند، از موادی به نام **نرم کننده** و یا **مدراتور** استفاده می شود. نرم کننده ها باید عناصر و یا ترکیباتی از عناصر سبک باشند که پس از برخورد نوترون به آنها، مقدار زیادی از انرژی نوترون به عنصر یا ترکیب ضربه خورده منتقل شود. هر چه عدد جرمی نرم کننده پایین تر باشد، انرژی که از نوترون می گیرد بیشتر است. از سوی دیگر نرم کننده نباید تمایلی به جذب نوترون داشته باشد. در شروع پیدایش صنعت هسته ای از آب سنگین به عنوان نرم کننده استفاده می کردند و هنوز هم در برخی از نیروگاه ها (مثلاً در کانادا، هندوستان و پاکستان) از آب سنگین به عنوان نرم کننده استفاده می شود. آب سنگین از ترکیب ایزوتوپ سنگین هیدروژن که دوتریم نامیده می شود با اکسیژن به وجود آمده است. غلظت آب

سنگین در آب معمولی ۰/۱ در صد است و می توان آن را از الکترولیز آب به دست آورد. بعد از الکترولیز آب، آب سنگین در ته ظرف باقی می ماند و اگر عمل الکترولیز را به کرات ادامه دهند و سپس ته مانده ظرف را که نسبت درصد آب سنگینش زیاد شده به داخل دستگاه سانتریفوژ وارد کنند، آب سنگین تقریباً خالص به دست می آید. عمل جداسازی ایزوتوپی در این مورد به مراتب ساده تر از غنی سازی اورانیوم است، زیرا اختلاف جرم در مورد آب سنگین ۲ واحد بر ۲۰ است (جرم ملکولی آب معمولی ۱۸ است و جرم ملکولی آب سنگین ۲۰ است) و حال آنکه در مورد اورانیوم ۳ واحد بر ۲۳۵ (در اورانیوم به صورت ترکیب با ۶ اتم فلوتور) می باشد. پیشتر گفتیم که آلمانها در جنگ دوم جهانی قصد داشتند از نیروگاهی اتمی که نوترونهایش با آب سنگین نرم و خنک می شد برای ساختن عنصر پلوتونیم استفاده کنند. آنها می خواستند در سوئد و نروژ که آبشارهای زیادی وجود داشت و به سادگی با آنها برق تولید می کردند از الکترولیز آب، آب سنگین تهیه کنند. اما متفکین از قصد آنها با خبر شدند و مخازن آب سنگین آلمانی ها را بمباران کردند. امریکا در همان زمان در برنامه ای بسیار وسیع به نام "پروژه منهن" اولین نیروگاه اتمی را تأسیس کرد و سپس بمبهایی را ساخت که در آلاموگوردو و ناکازاکی منفجر شدند. بعد از اولین آزمایش بمب اتمی که در الاموگاردو واقع در نیو مکزیکو انجام گرفت، دانشمندانی چون انشتین، اپن هایمر و زیلارد یعنی بنیان اصلی تهیه نیروگاه اتمی و ۵۰ نفر از دانشمندان دیگر که در این پروژه شرکت داشتند، از قدرت انفجاری این بمب اتمی به وحشت افتادند. قبل از انفجار بمب ها بر روی شهرهای ژاپن، نامه ای با امضاء تمام دانشمندان شرکت کننده در پروژه منهن به رئیس جمهور امریکا نوشتند. این نامه هیچگاه به دست رئیس جمهور امریکا نرسید و بمب ها در هیروشیما و ناکازاکی منفجر و جهانیان را به وحشت انداخت. بعد از انفجار بمبها به اپن هایمر مسئول واقعی تولید اولین بمب اتمی جهان (پدر بمب اتمی آمریکا) نسبت کمونیست بودن را دادند و او را از خدمت در دانشگاه محروم کردند. امروز در اغلب نیروگاهها از آب معمولی هم به عنوان خنک کنند و هم به عنوان نرم کننده استفاده می شود. در این نیروگاهها باید غلظت اورانیوم ۲۳۵ در توده سوختی بیشتر از نسبت در صد طبیعی آن باشد. در تعدادی از نیروگاهها از گرافیت و یا گاز کربنیک به عنوان نرم کننده استفاده می شود. از سدیم مذاب و یا سرب مذاب هم به عنوان نرم کننده در نیروگاههایی که در آنها با نوترون سریع واکنش شکست اورانیوم انجام می گیرد استفاده می کنند. در شکل (۳۰) یک سلول نیروگاه اتمی و نقش عناصر نرم کننده و کنترل کننده نیروگاه اتمی را آورده ام. در این نمودار میله های سوخت اتمی، خنک کننده، نرم کننده و نیز کنترل کننده نیروگاه آورده شده است. ۲ ستون چپ و راست محل عبور مواد خنک کننده راکتور است که می تواند، آب معمولی، آب سنگین، گاز کربنیک و یا کرافیت باشد. بعد از این لوله ها، میله های سوخت وجود دارند. این میله می تواند از

اورانیم طبیعی، اورانیم غنی شده تا ۵ درصد و یا مخلوطی از اورانیم طبیعی و پلوتونیم باشند. در طرفین این میله های سوخت اتمی لوله های نرم کننده قرار دارند. درون این لوله ها عناصر و یا ترکیباتی از عناصر سبک، مانند آب سنگین، گاز کربنیک، کرافیت و حتی برخی اوقات سدیم مذاب و یا سرب مذاب جریان دارد، که این دو عنصر اخیر در نیروگاههایی که با نوترون سریع پدیده شکست در آنها انجام می گیرد به کار برده می شوند. در وسط، میله های کنترل و یا مهار کننده نیروگاه قرار دارد. این میله ها که در نمودار به رنگ خاکستری نشان داده شده از عناصری تشکیل شده اند که میل زیاد به جذب نوترون دارند. از کادمیم یا بور که مقطع مؤثر جذب نوترون ترمیک در آنها بسیار بزرگ است استفاده می شود.



شکل (۳۰) نموداری از یک سلول راکتور اتمی و نقش هر یک از میله های واقع در آن.

پ) **میله های مهار کننده:** این میله ها از مواد جاذب نوترون ساخته شده اند و وجود آنها در داخل نیروگاههای اتمی الزامی است. اگر این میله ها کار اصلی خود که جذب نوترون اضافی در درون نیروگاه است انجام ندهند، در زمانی کمتر از چند هزارم ثانیه قدرت نیروگاه چند برابر شده و در آن **حالت انفجاری** یا **دیورژانس** پدید می آید. به ازای هر صد اتم اورانیم که شکسته می شود به طور متوسط ۲۴۷ نوترون به وجود می آید. بخشی از این نوترون ها در حین برخورد با مواد ساختمانی نیروگاه و یا نرم کننده ها جذب شده و از دایره عمل خارج می شوند. اگر تعداد باقی مانده کمتر از ۱۰۰ باشد واکنش زنجیره ای در توده سوخت ادامه نخواهد یافت و بعد از مدتی نیروگاه متوقف خواهد شد. ولی اگر تعداد نوترونهای مؤثر خیلی بیشتر از ۱۰۰ باشد، وضعیت نیروگاه را **حالت بحرانی** می نامند. در این حالت شکستهای پی در پی و یا زنجیره ای به صورت تابع نمایی بالا خواهد رفت و نیروگاه وضعیت انفجاری به خود خواهد گرفت. میله های مهار کننده برای حفظ حالت تعادلی نیروگاه به کار می روند.

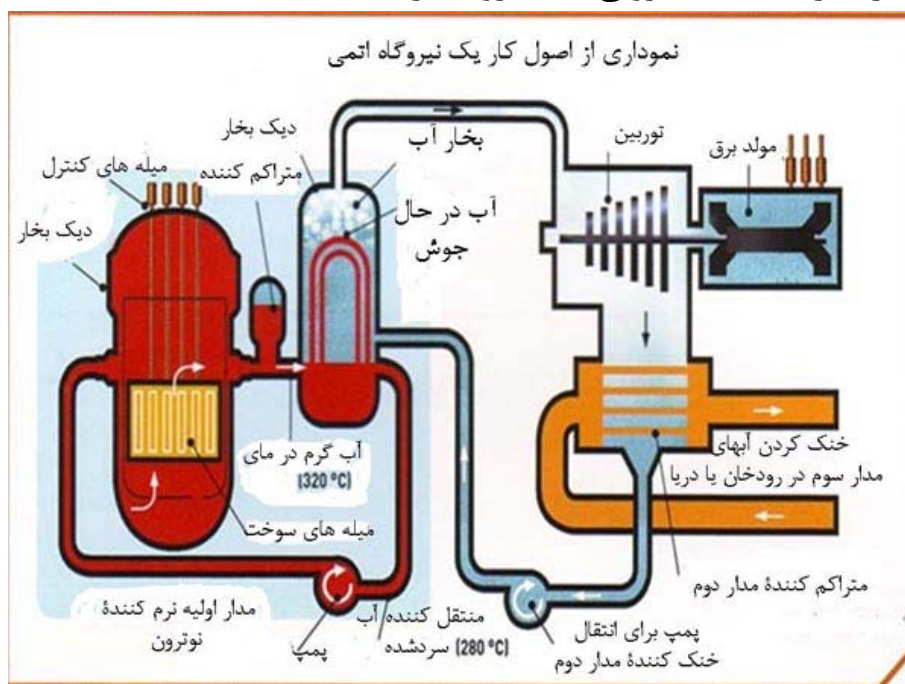
معمولاً "ضریب تولید نوترون را در درون نیروگاه معادل با عدد $1/0.001$ قرار می دهند و این عدد را تعداد نوترونهای مؤثر نیروگاه می نامند، $0/0.001$ نوترون اضافی صرف واکنشهای جانبی در

نیروگاه می شود. مثلاً" برای تولید رادیو ایزوتوپهای مصنوعی که در پزشکی و یا صنعت مصرف دارند. اگر این ضریب $1/0001$ به $1/00012$ تبدیل شود نیروگاه تعادل خود را ازدست می دهد و در زمان کوتاهی حالت دیورژانس پیدا خواهد کرد، در نتیجه باید به سرعت مازاد نوترون از درون توده سوخت جمع آوری شود. برای این کار رایانه های بسیار حساس در سالن کنترل نیروگاه وجود دارند که با میله های مهار کننده در ارتباط هستند. در شرایط بحرانی این میله ها را به طور اوتوماتیک به داخل نیروگاه فرو برده و نوترونهای اضافی را جذب می کنند. در شکل (۳۰) محل این مهار کننده ها را که در وسط میله های سوخت و خنک کننده قرار داشت دیدیم. چنانکه گفته شد این میله ها غالباً از عنصر کادمیم و یا بور ساخته می شوند که تمایل بسیاری به جذب نوترون حرارتی دارند. چنانکه پیشتر گفتیم، نوترونهای حاصل از شکست اورانیم بسیار پر انرژی هستند، انرژی آنها گاهی به ۱۴ میلیون الکترون ولت هم می رسد. مقطع مؤثر یا به عبارت ساده تر تمایل به شکست در اتمهای اورانیم ۲۳۵ با ازای نوترنهایی کم انرژی ($0.25/0$ الکترون ولت) حد اکثر است. بنابراین باید نوترونهای حاصل از شکست اورانیم هزاران بر خورد با میله های نرم کننده داشته باشند، تا نهایت انرژی آن ها به $0.25/0$ الکترون ولت برسد. نوترنهای کند شده را نوترن حرارتی یا ترمیک گویند چون سرعت آنها به حد سرعت ملکولهای گاز در فضای آزاد و 20 درجه سانتیگراد رسیده است. یعنی سرعتی برابر 220 متر در ثانیه دارند.

در حادثه نیروگاه چرنوبیل بر اثر از کار افتادن یکی از چهار پمپ گرداننده خنک کننده نیروگاه، دمای درونی به سرعت بالا رفت و تعدادی از میله های مهار کننده در اثر دمای زیاد قلب نیروگاه، خم شده بودند و به سهولت به داخل میله های سوخت نفوذ نکردند. به همین دلیل فاجعه چرنوبیل روی داد.

د) مواد خنک کننده: این مواد انتقال دهنده انرژی حرارتی تولید شده در توده سوخت هستند و انرژی حاصل از شکست اورانیم و دمای به وجود آمده از برخورد تکه های حاصل از شکست با جدار میله های محافظ سوخت را از درون نیروگاه خارج می سازند. دمای ایجاد شده غالباً بسیار بیشتر از نقطه جوش آب است. آبی که در جدار میله های سوخت در جریان است تحت فشار بسیار بالا و حتی دمای 300 درجه سانتیگراد به صورت مایع است. این آب دمای نیروگاه را به کمک پمپهای قوی به محل توربین ها می برد و در آنجا به صورت بخار و با فشار بسیار زیاد، توربین و سپس ژنراتور مولد برق را به حرکت در می آورد. بسیاری از نیروگاهها با آب معمولی خنک می شوند. در انگلستان بیشتر نیروگاه ها به کمک گاز کربنیک خنک می شوند. در نیروگاههایی که با نوترون سریع کار می کنند مواد خنک کننده می تواند از سدیم مذاب باشد، در این حالت سدیم مذاب در مدار کاملاً مسدود، در اطراف قلب نیروگاه و به کمک پمپهای بسیار قوی در جریان است و دمای

خود را در یک تبدیل کننده بدون آنکه با آن تماس بگیرد از دست می دهد. سدیم، فلزی با تمایل شیمیایی بسیار زیاد است و تماس آن با محیط خارج و یا آب منجر به اشتعال آن خواهد شد. در شکل (۳۱) نموداری از تشکیلات درونی یک نیروگاه ارائه شده است.

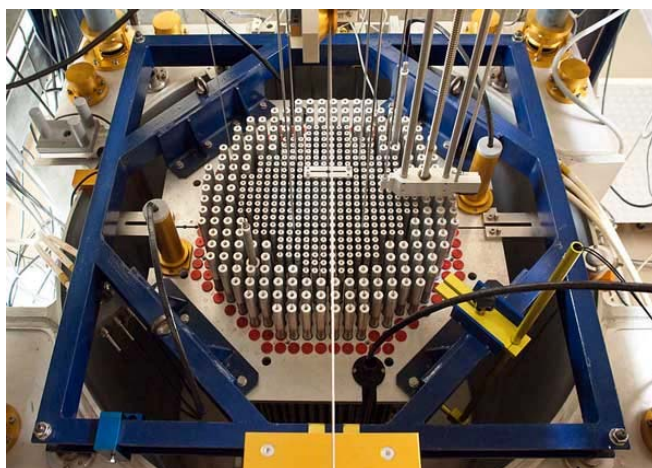


شکل (۳۱) نموداری از تشکیلات ساختمانی یک نیروگاه با آب تحت فشار قوی. آن چنان که در نمودار مشاهده می کنید این نیروگاه سه مداره می باشد. یک مدار مستقل با جریان دایم برای نرم کردن نوترونها است که در اطراف قلب راکتور جریان دارد. مداری دیگر برای خنک کردن نیروگاه و انتقال دما و به جریان انداختن توربین بخار و به حرکت در آوردن ژنراتور مولد برق است. و سرانجام مدار سوم برای خنک کردن مایع خنک کننده راکتور است.

ه (میله های نگه دارنده ماده سوخت: میله های نگه دارنده مواد سوختنی غالباً "لوله هایی از آلیاژ و یا عنصر زیرکینیم به عد اتمی ۴۰ و عدد جرمی ۹۰ تا ۹۲ هستند. این عنصر بسیار سخت است، به نوعی که نقطه ذوب ۱۸۵۲ و نقطه جوش آن ۳۵۸۰ درجه سانتیگراد است. به ویژه تمایل جذب نوترون حرارتی آن بسیار کم است و برعکس می تواند مانند یک منعکس کننده عمل کرده و نوترونها را به داخل توده سوخت منعکس کند. طول این میله ها برحسب نوع نیروگاه می تواند تا ۴ متر و قطر آنها در حدود یک سانتیمتر باشد. در برخی از نیروگاهها به ویژه در انگلستان از آلیاژ منیزیم به عنوان میله های نگه دارنده مواد سوختنی استفاده می شود.

در درون این میله ها اکسید اورانیوم طبیعی یا غنی شده از اورانیوم ۲۳۵ تا حد ۳ یا حداکثر ۵ در صد و یا مخلوطی از اکسید اورانیوم طبیعی با چند در صد اکسید پلوتونیم ۲۳۹ (مخلوط اخیر را مِکس می نامند) قرار می دهند. ماده سوختنی را به صورت قرصهایی مدور به ارتفاع یک سانتیمتر و قطری کمتر از یک سانتیمتر تهیه می کنند. وزن هر یک از این قرصها در حدود ۷ گرم است و هر یک از این قرصها می تواند معادل یک تن ذغال سنگ انرژی تولید کند.

در نیروگاهی به قدرت الکتریکی ۹۰۰ مگاوات (۹۰۰ میلیون وات) به حدود ۴۰,۰۰۰ میله سوخت (که به آنها مداد های سوختنی نیز می گویند) نیاز است. میله های نگهدارنده سوخت را به صورت دسته های ۲۶۴ میله ای به نحوی کنار یکدیگر قرار می دهند که سطح مقطع مربعی شکل، به ابعاد ۱۵ در ۱۵ سانتیمتر داشته باشد. برای چنین نیروگاهی تعداد ۱۵۷ دسته ۲۶۴ میله ای لازم است، که درون میله ها را با ۱۱ میلیون قرص ۷ گرمی سوخت پر کرده اند. (وزن مجموع ماده سوختنی ۷۷ تن خواهد بود) شکل (۳۲) تصویری از قلب یک نیروگاه اتمی را نمایش می دهد. مجموعه میله های سوخت و ترتیب قرار گرفتن آنها را در درون نیروگاه مشاهده می کنید. میله های سوخت با نظمی کنار یکدیگر قرار گرفته اند تا فرار نوترونها از درون راکتور حد اقل باشد. میله های مهار کننده راکتور هم به نحوی قرار گرفته اند که در کوتاه ترین زمان ممکن بتوان نیروگاه را متوقف کرد.



شکل (۳۲) تصویری از قلب یک نیروگاه اتمی به نام کروکوس واقع در سوئیس. (EPFL CROCUS) Suisse



شکل (۳۳) در حال جا بجا کردن یک خوشه از میله های سوخت. این مجموعه متشکل از یک خوشه به ابعاد ۱۵ در ۱۵ سانتیمتر که از ۲۶۴ میله سوخت تشکیل شده است. همانطور که در شکل ۳۲ می بینید قلب راکتور از ۱۵۷ مجموعه میله های سوخت تشکیل شده است. آنچه در تصویر ۳۳ دیده می شود، مربوط به میله های سوختی است که برای اولین بار وارد نیروگاه می شوند. توجه کنید بعد از توقف سه یا چهار ساله ی این خوشه نزدیک شدن به فاصله ۱۰۰ متری آن در کمتر از چند دقیقه کشنده است. لذا میله های سوخته شده در نیروگاه را نمی توان با دست بیرون آورد و از دستگاههایی که از فاصله دور هدایت می شوند (به آنها تله منی پولاتور می گویند) بیرون می آورند. این تصویر از گزارش سالانه نیروگاههای سوئیس بر گرفته شده است:

[Rapport annuel sur la sécurité nucléaire et la radio protection dans les installations nucléaires en suisse](#)

(۲) دسته بندی نیروگاهها:

از سال ۲۰۰۱ دسته بندی نیروگاهها را برحسب سال ساخت و کارآیی آنها مشخص کرده اند. ابتدا به صورت اختصار این دسته بندی را بیان کرده و سپس دسته بندی بر اساس مواد ساختاری نیروگاه که اصولی تر است را شرح خواهیم داد.

(۱) اولین نسل از نیروگاهها قبل از سال ۱۹۷۰ بودند، که اکنون بیشتر آنها متوقف شده یا فعال نیستند. مانند نیروگاه UNGG (اورانیم طبیعی گرافیت و گاز) در فرانسه که در حال پیاده کردن آنها می باشند.

(۲) دومین نسل بین سالهای ۱۹۷۰ تا ۱۹۹۸ ساخته شدند از نوع PWR^{۳۵} راکتور با آب معمولی تحت فشار، هم اکنون برخی از این نیروگاهها فعال هستند.

(۳) سومین نسل، نیروگاههایی با فن آوریهای پیشرفته تر ولی غالباً مشتق از فن آوری های به کار برده شده در نسل اول و دوم ساخته شده و کار برد آنها را در بین سالهای ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۰ در نظر گرفته اند. برخی از آنها هم اکنون فعال می باشند، مانند راکتورهای تحت فشار با آب در فرانسه و یا راکتور کره ای کیکو^{۳۶} و یا نیروگاه توشیبا وستینگ هوس^{۳۷}.

(۴) چهارمین نسل که در حال ساخت هستند و با همکاری و پژوهش ۶ گروه بین المللی که قرار است به تدریج تا سال ۲۰۳۰ ساخته و فعال شوند.

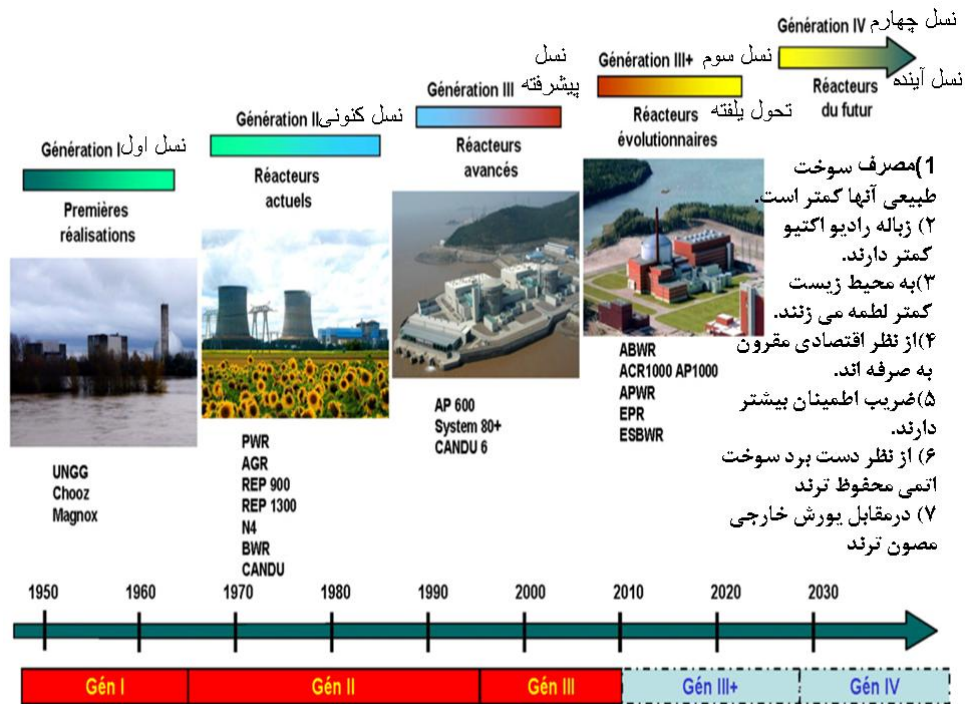
در شکل (۳۴) نموداری از این نوع دسته بندی ارائه شده است. نیروگاه ها را غالباً بر حسب مواد تشکیل دهنده آنها دسته بندی می کنند. با وجود این، روش متداول دسته بندی، بر حسب نوع خنک کننده های نیروگاهها ست.

۸۰ درصد نیروگاههای موجود در جهان به وسیله آب معمولی خنک می شوند و در اغلب موارد نرم کننده ای که برای کم کردن سرعت نوترونها به کار می برند نیز عبارت از آب معمولی است. این نیروگاهها خود به دو دسته تقسیم می شوند.

^{۳۵} PWR / *pressurized water reactor*

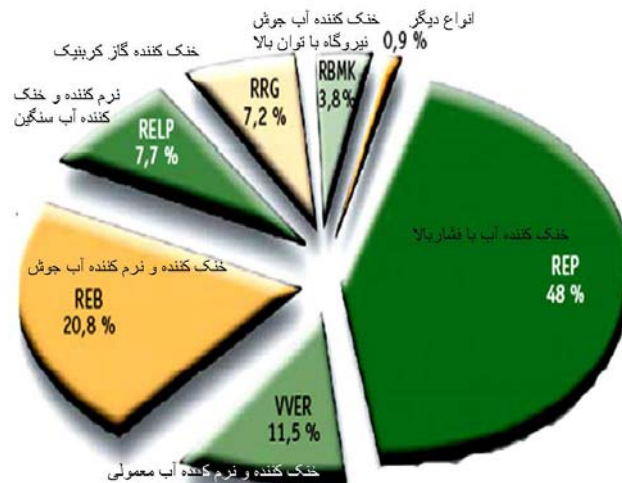
^{۳۶} APR۱۴۰۰ du Coréen Kepco

^{۳۷} AP۱۰۰۰ de Toshiba/Westinghouse.



شکل (۳۴) انواع نیروگاهها برحسب سال ساخت و نیز نام اختصاری آنها که نوع و دمای خنک کنند و نرم کننده را مشخص می کند، در زیر هر تصویر آورده است.

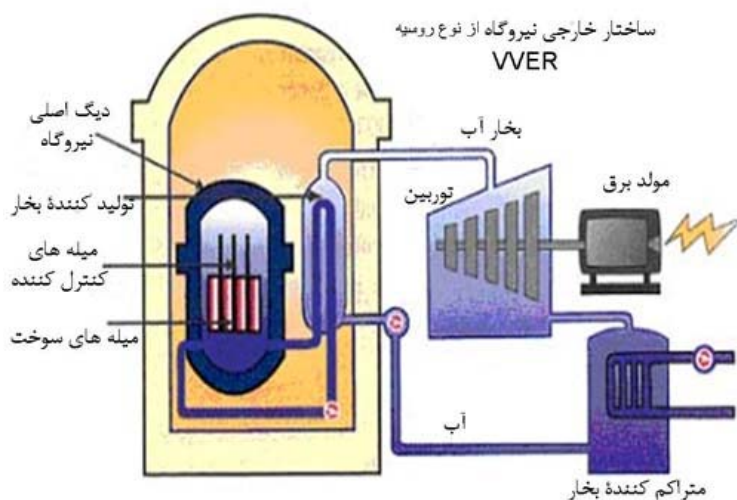
نسل اول نیروگاههایی هستند که در آنها آب تحت فشار بالا در مدار مسدودی اطراف قلب نیروگاه در جریان است. این نیروگاه را نیروگاه با آب تحت فشار نام گذاری کرده اند. نوعی از این نیروگاه را روسها ساخته اند که با نسل اول فرق مختصری دارد. نسل دوم را نیروگاه با آب جوشان نامگذاری کرده اند. غالباً ۲۰ درصد بقیه نیروگاه های جهان یا با آب سنگین و یا گاز کربنیک خنک می شوند. در شکل (۳۵) انواع نیروگاه ها و نسبت در صد آنها در جهان آورده شده است.



شکل (۳۵) انواع نیروگاهها و نسبت در صد آنها در جهان. در این نمودار بیشتر از اصطلاحات فرانسوی برای نام گذاری نیروگاه استفاده شده است. در موقع معرفی هر نوع از نیروگاهها نامگذاری خلاصه شده آنها به زبان فرانسه و انگلیسی ارائه شده است. REP به معنی راکتور با آب تحت فشار است که انگلیسی آن PWR است. یا REB راکتور با آب جوش و انگلیسی آن BWR است.

الف) نیروگاه با آب تحت فشار بالا (مدل فرانسوی REP یا PWR): در حال حاضر در کشورهای مختلف جهان تعداد ۲۱۲ نیروگاه وجود دارد که خنک کننده و نرم کننده آنها بخار آب تحت فشار ۱۵۵ جو است. این فشار زیاد برای آن است که آب در درون نیروگاه و در دمای ۳۰۰ درجه سانتیگراد به صورت مایع و نیز درمداری بسته حول قلب نیروگاه در حرکت باشد. سپس آب تحت فشار، حرارتی را که از درون نیروگاه گرفته در یک تبدیل کننده به مدار مسدود بعدی منتقل می کند که در آنجا به شکل بخار آب تحت فشار بسیار بالا در آمده، توربین و سپس آلترناتور را به حرکت در می آورد. بدین ترتیب انرژی حاصل از شکست ابتدا تبدیل به انرژی گرمایی و سپس در آلترناتورها تبدیل به انرژی الکتریکی می گردد. گفتنی است که از این ۲۱۲ نیروگاه تعداد ۱۵۰ واحد آن در فرانسه، آمریکا و ژاپن وجود داشت. در اثر زمین لرزه و سپس سونامی نیروگاههای ژاپن متوقف شده اند. نموداری از این نیروگاهها در شکل (۳۱) صفحه ۶۲ آورده شده است.

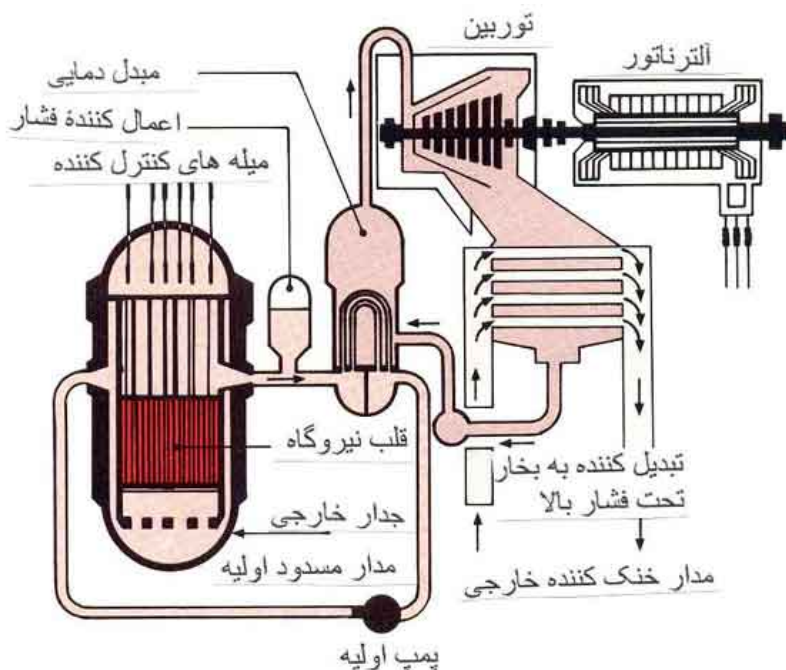
ب) نیروگاه های مدل شوروی (VVER): از این نیروگاهها ۵۱ واحد فعال می باشند که ۲۶ واحد آن در روسیه و اوکراین مستقر است و مابقی در کشورهای ارمنستان، بلغارستان، فنلاند و در جمهوری چک قرار دارند. این نیروگاهها در اصل به وسیله روسها ساخته شده و مفهوم علامت اختصاری آن: خنک کننده و نرم کننده آب معمولی است. این نیروگاهها جزو اولین دسته از نیروگاههایی است که به وسیله روس ها ساخته شدند و باید در آنها با صرف مخارج زیاد تغییراتی داده شود تا ضرایب ایمنی آنها معادل نیروگاههای غربی و قابل قبول برای آژانس بین المللی انرژی اتمی گردد. نموداری از این نوع نیروگاه در شکل (۳۶) ارائه شده است.



شکل (۳۶) نموداری از تشکیلات درونی نیروگاههای روسی.

برخی از کشورها نظیر بلغارستان و جمهوری اسلواکی نیروگاههای خود را که چنین ساختاری دارند تعطیل کرده اند.

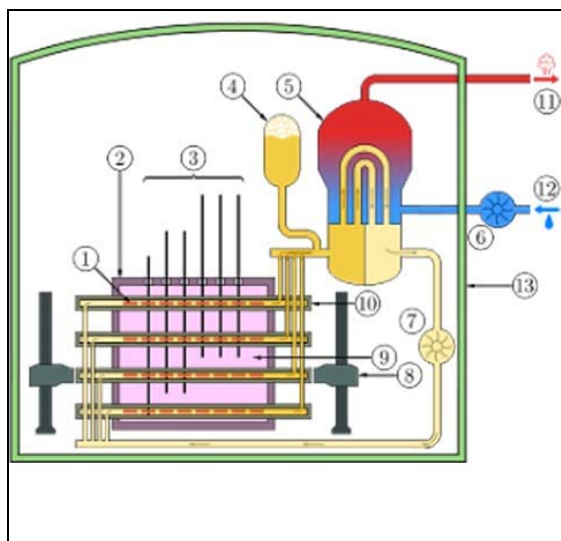
پ) نیروگاه هایی که با آب جوش خنک می شوند (REB یا BWR): در حال حاضر ۹۲ نیروگاه در ۹ کشور جهان از این دسته هستند، یعنی خنک کننده و نرم کننده آنها آب جوش است. ۶۴ واحد آنها در ژاپن و آمریکا فعال اند. مانند نیروگاههای قبلی، آب تحت فشار ۷۰ اتمسفر در مدار مسدود به صورت مایع در اطراف قلب نیروگاه جریان دارد و در همین مدار مسدود هنگامی که به توربین می رسد تبدیل به بخار می شود و توربین و سپس آلترناتور را به حرکت در آورده، الکتریسیته تولید می کند. بعد از توربین یک دستگاه کمپرس کننده، بخار را به فشار ۷۰ اتمسفر رسانده و در نتیجه دو باره آب مایع در جدار قلب نیروگاه دو عمل مهم یعنی نرم کردن نوترونها (پایین آورنده انرژی نوترون) و در همان حال خنک کردن نیروگاه را انجام می دهد. فرق عمده این نیروگاه با نیروگاه فرانسوی ها این است که در این نیروگاه مدار خنک کننده سوم وجود ندارد. در شکل (۳۷) نموداری از این نیروگاه آورده شده است.



شکل (۳۷) نموداری از نیروگاهی که آب، خنک کننده و نرم کننده آن است. آب با فشار ۷۰ اتمسفر فقط در یک مدار مسدود دمای درون نیروگاه را به توربین منتقل می کند. یک مدار خنک کننده خارجی دمای آب خروجی از توربین را پایین می آورد.

ت) نیروگاه با آب سنگین (RELAP یا PHWR): در ۶ کشور جهان ۳۲ نیروگاه با آب سنگین فعال هستند. ۱۴ واحد آنها در زادگاه اصلی این نیروگاهها، یعنی کانادا قرار دارند و به همین دلیل نام این نیروگاه را کندو (Candu) گذاشته اند. بقیه نیروگاهها در کشورهای آرژانتین، هندوستان، پاکستان و جمهوری کره شمالی مشغول به کارند. چنان که پیشتر گفته شد، آب سنگین از ترکیب اکسیژن با دوتریم یعنی ایزوتوپ سنگین هیدروژن به وجود آمده است. آب سنگین به مقدار ۱/۱ درصد در آب معمولی و آب اوقیانوسها یافت می شود و در موقع الکترولیز آب ته ظرف الکترولیز باقی می ماند. در حین الکترولیز، اکسیژن خالص و هیدروژن به دست می آید که مصرف صنعتی دارند. اگر چه تهیه

آب سنگین مخارج زیادی دارد، ولی چون لازم نیست در نیروگاه اورانیوم غنی شده به کار برند، در نتیجه مقداری از هزینه های نیروگاه کاسته می شود. در شکل (۳۸) نموداری از این نوع نیروگاه ارائه شده است.



- | | |
|-----------------------------------|---------------------------------------|
| ۱. میله های سوخت | ۸. ماشین تنظیم کننده سوخت |
| ۲. منعکس کننده | ۹. آب سنگین به عنوان نرم کننده نوترون |
| ۳. میله های کنترل | ۱۰. کانالهای عبور آب سنگین |
| ۴. متراکم کننده | ۱۱. بخار آب با دمای بالا |
| ۵. بخار آب معمولی | ۱۲. ورود آب با فشار بالا |
| ۶. پمپ ورودی آب معمولی | ۱۳. دیواره خارجی نفوذ ناپذیر |
| ۷. پمپ انتقال دهنده بخار آب سنگین | |

شکل (۳۸) نموداری از نیروگاه کندو که هم اکنون در کانادا، هندوستان و پاکستان فعال می باشند

در این نیروگاه، آب سنگین در مدار مسدود اطراف قلب نیروگاه با فشاری بسیار زیاد در جریان است و دمای نیروگاه را به مدار ثانوی که از آب معمولی است منتقل می کند. آب بخار شده مدار ثانوی توربین و ژنراتور مولد برق را به حرکت در می آورد. مزیت دیگر این نوع نیروگاه آن است که برای تعویض میله های سوخت لازم نیست نیروگاه را متوقف کنند. حال آنکه در نیروگاههای دیگر برای تعویض میله های سوخت، نیروگاه باید مدتی متوقف شود و در این مدت جریان برق قطع شده و حتی برای گرداندن پمپها و خنک نگه داشتن قلب نیروگاه باید جریان برق را از خارج وارد نیروگاه کرد.

ث) نیروگاههایی که با گاز کربنیک خنک می شوند (GRR): در جهان ۳۳ نیروگاه فعال که ماده خنک کنند، آنها گاز کربنیک است وجود دارد. در برخی از این نیروگاهها همین گاز به عنوان نرم کنند، نوترون به کار می رود. این نیروگاهها تمامشان در انگلستان مستقرند به دو دسته تقسیم می شوند: دسته اول را مینوکس $Mgno_x$ می نامند. این نامگذاری به دلیل ماهیت آلیاژ منیزیومی است که جدار میله های سوخت از آن ساخته شده است. دسته دوم نیروگاههایی است که خنک کننده آنها از گاز کربنیک و نرم کننده آنها از گرافیت (نوعی زغال سنگ) است. چنانچه گفته شد، برخی از این نیروگاهها را پیاده کرده و نیز در حال پیاده سازی بقیه می باشند. این نیروگاهها چندان مطمئن نیستند و راندمان انرژی دهی آنها بسیار پایین و کمتر از ۳۰ درصد است.

دسته اول مانند نیروگاههای کانادایی (کند و) با اورانیم طبیعی به عنوان سوخت کار میکنند، حال آنکه دسته دوم باید اورانیم غنی شده را به عنوان سوخت به کار برند. برای تعویض میله های سوخت در این نیروگاهها لازم نیست آنها را متوقف کنند.

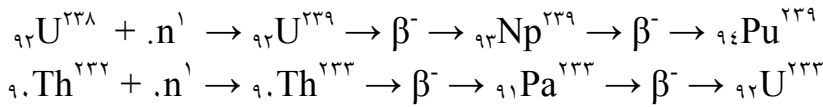
ج (نیروگاه هایی با توان بالا و با آب جوش (RBMK): ۱۷ نیروگاه با توان بالا و با آب جوش کار می کنند. تعداد ۱۵ واحد آنها در روسیه و ۲ واحد دیگر در لیتوانی فعال اند. در این نیروگاهها از آب معمولی جوشان به عنوان خنک کننده و گرافیت به عنوان نرم کننده نوترون استفاده می شود. مانند نیروگاههای قبلی که با آب جوشان کار می کردند، آب در مداری مسدود اطراف قلب نیروگاه جریان دارد و در انتهای مسیر به بخار تبدیل شده و توربوژنراتور را به حرکت در می آورد. این نیروگاهها در اوایل کار صنعت هسته ای برای تولید الکتریسیته ساخته شده اند و ضرایب ایمنی آنها معادل با ضرایب ایمنی نیروگاه های کنونی نیست. در سال ۱۹۸۶ در نوعی از همین نیروگاهها بود که حادثه چرنوبیل اتفاق افتاد. کشورهای اروپایی خاطره تلخی از این نیروگاهها دارند و نگران باقی مانده آنها هستند. بالا بردن ضرایب ایمنی این نوع نیروگاهها بسیار پرهزینه است. اروپایی ها حتی حاضر ند بخشی از بودجه لازم برای ایمن ساختن و یا توقف فعالیت این نیروگاهها را پردازند. ولی اقدام صحیح و مقرون به صرفه آن است که این نیروگاهها را که عمر نسبتاً بالایی هم دارند تعطیل کنند.

۳ (نیروگاههایی که با نوترون سریع کار می کنند (surgénérateur): این نیروگاهها را معمولاً "سورژنراتور می نامند زیرا در آنها ماده سوخت بیش از مقداری که مصرف می کنند تولید می شود. این نیروگاهها با نوترون سریع کار می کنند. چنانچه پیشتر گفته شد نوترونهای حاصل از شکست اورانیم انرژی جنبشی زیادی دارند و در یک نیروگاه همواره تعداد آنها ده تا صد برابر نوترونهای کند است. تمایل عناصر ساختمانی نیروگاه به نوترونهای سریع بسیار پایین است و در نتیجه نوترونهای کمتری جذب این مواد خواهند شد. از آنجا تعداد شکست اتمها با این نوترونها بیشتر است و می توان نوترونهای اضافی را برای تولید سوخت جدید (با جذب در اورانیم ۲۳۸) به کار برد.^{۳۸}

پیشتر گفتیم ایزوتوپ اورانیم ۲۳۸ بعد از جذب یک نوترون تبدیل به ایزوتوپ ۲۳۹ می شود. عنصر اخیر بسیار ناپایدار است و ظرف چند روز با انتشار دو پرتو بتای منفی تبدیل به پلوتونیم ۲۳۹ می شود که به مراتب شکست پذیر تر از اورانیم ۲۳۵ است. رادیو عنصر توریم ۲۳۲ عنصر باروری

^{۳۸} تمایل به جذب نوترون تابع مقطع مؤثری است که عناصر برای جذب و ورود نوترون از خود نشان می دهند که خود بحث مفصلی در علم فیزیک اتمی است و در این مختصر نمی توان در باره آن توضیح بیشتری داد.

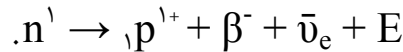
است که در داخل این گونه نیروگاهها نوترون جذب کرده و بعد از تحولاتی مبدل به اورانیم ۲۳۳ می شود که آنهم شکست پذیر تر از اورانیم ۲۳۵ است.



پلوتونیم ۲۳۹ → بتامنی → نپتونیم ۲۳۹ → بتامنی → اورانیم ۲۳۹ → نوترون ۱ + اورانیم ۲۳۸

اورانیم ۲۳۳ → بتا منفی → پروتاکتینیم ۲۳۳ → بتا منفی → توریم ۲۳۳ → نوترون ۱ + توریم ۲۳۲

چنان که پیش از این گفتیم در این روابط بتا منفی الکترونی است که از تبدیلات درونی هسته حاصل شده و با انرژی بالا از اتم خارج می شود. در واقع در درون هسته هایی که نوترون اضافی دارند یکی از نوترونها تبدیل به پروتون می شود و چون باید بقای بارها برقرار باشد، در نتیجه در این گونه تحولات یک الکترون منفی از هسته خارج می شود که به آن بتای منفی گویند.

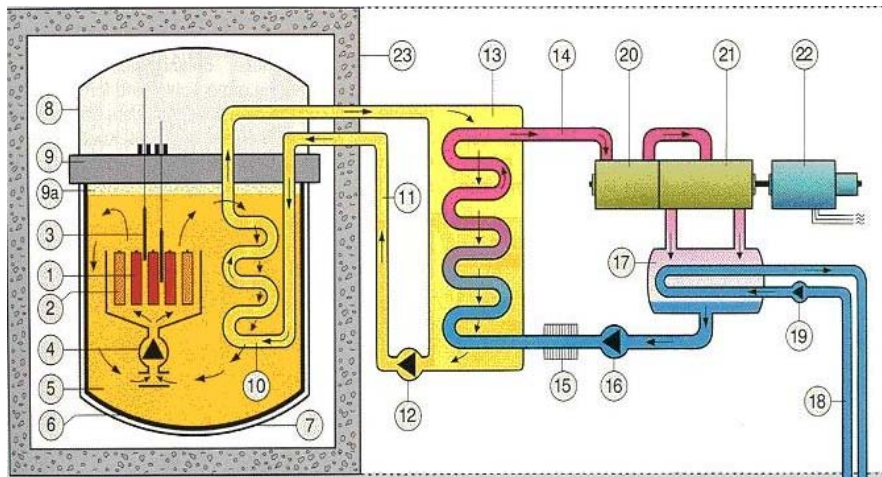


انرژی + نوترینو $\bar{\nu}_e$ + الکترون منفی (بتا) + پروتون → نوترون

به این ترتیب در این نیروگاه ها سوخت جدید به دست خواهد آمد و با ساخت چنین نیروگاههایی عمر منابع سوخت اتمی جهان ۵۰ درصد افزایش خواهد یافت. اگر قرار باشد در جهان همواره از شکست اتمها برای تولید الکتریسیته استفاده شود، این نوع نیروگاهها نگرانی کمبود اورانیم را جبران خواهند کرد. چون ذخیره جهانی اورانیم ۲۳۸ و توریم ۲۳۲ زیاد است و از قبل این گونه تبدیلات، ماده شکست پذیر به وجود می آید.

نوترونها در نیروگاههای سوژراتور سریع هستند و دارای قابلیت نفوذ فراوان، بنابراین نباید از نیروگاه به خارج نفوذ کنند. در نتیجه حجم این نیروگاهها باید بسیار بزرگ باشد. قلب نیروگاه را با قشری از اورانیم ۲۳۸ (فقیر شده - باقی مانده از کارخانه های غنی سازی اورانیم -) همراه با قشر دیگری از توریم ۲۳۲ می پوشانند. تعداد این نیروگاهها در جهان کم است و تا سال ۲۰۰۲ تنها تعدادی در فرانسه، هندوستان، ژاپن و روسیه وجود داشته اند. شکل (۳۹) نموداری از یک نیروگاه با نوترون سریع را مشخص می کند.

^{۳۹} باید گفت هم زمان با انتشار پرتوهای بتای منفی و یا بتای مثبت همواره یک ذره بنیادی به نام نوترینوی الکترون $\bar{\nu}_e$ از هسته اتم ناپایدار بیرون می آید. قبلاً "جرمی به آنها داده نمی شد ولی اخیراً" جرم نسبت داده شده به آنها را معادل ۲/۵ الکترون ولت در نظر گرفته اند (یک واحد جرم اتمی ۹۳۱ میلیون الکترون ولت است از آنجا ناچیز بودن جرم نوترینو را مجسم کنید) و اسپین $spin$ یا چرخش آنها به دور خود ۱/۲ است. بنا براین نوترینو ها از خانواده الکترون و پروتون و نوترون (یعنی فرمیون) می باشند و انتشار آنها در موقع تجزیه بتای منفی و یا بتای مثبت برای برقراری اصل بقای اسپین الزامی است. نوترینوها می توانند از تمام اجسام به سهولت عبور کنند. از پرتوهای خورشیدی در هر ثانیه میلیاردها میلیارد نوترینو خارج می شود و به سهولت از سیارات منظومه خورشیدی عبور می کنند و در فضا بخش می شوند. بنابراین اندازه گیری آنها به دشواری انجام می گیرد.



شکل (۳۹) نموداری از یک نیروگاه اتمی سوژرناتور (تولید کننده سوخت). مواد تشکیل دهنده این نیروگاه به ترتیب شماره ها عبارتند از: (۱) میله های سوخت به رنگ قرمز از اورانیم غنی شده (تا ۵ درصد اورانیم ۲۳۵). (۲) میله های عناصر جاذب نوترون نظیر اورانیم ۲۳۸ و توریم ۲۳۲ که بعد از جذب نوترون تبدیل به سوخت می شوند. (۳) میله های مهار کننده نیروگاه. (۴) پمپ انتقال سدیم مذاب. (۵) سدیم مذاب درون دیگ. (۶) دیگ نیروگاه از فولاد ضخیم. (۸) سرپوش اطمینان. (۹) سرپوش دیگ از فولاد قطور. (۹a) اتمسفری از گاز محافظ (آرگون). (۱۰) یکی از ۴ تبدیل کننده گرما. (۱۱) دومین جریان سدیم مذاب. (۱۲) پمپ دومین مدار مسدود سدیم مذاب. (۱۳) مخزن انتقال دمای سدیم به آب در یکی دیگر از ۴ تبدیل کننده. (۱۴) بخار آب در درون مدار مسدود سوم. (۱۵) تبدیل کننده. (۱۶) پمپ برای انتقال آب در مدار سوم و تبدیل شدن آن به بخار در مخزن سدیم مذاب بسیار گرم. (۱۷) متراکم کننده که در آن بخار به آب تبدیل می شود. (۱۸) مدار باز چهارم. آبی که از رودخانه یا دریا گرفته شده در این مدار، بخار و یا آب مدار مسدود سوم را خنک می کنند و سپس به رودخانه و یا دریا بازگشت می کند. (۱۹) پمپ آب سرد. (۲۰) توربین با فشار بالا. (۲۱) توربین با فشار پایین. (۲۲) مولد برق. (۲۳) ساختمان بتونی با قطر بسیار زیاد اطراف نیروگاه.

۴) نیروگاه اتمی نسل چهارم (چهارمین ژنراسیون)^{۴۰}

با ابتکار اداره کل انرژی ایالات متحده آمریکا، پیشنهاد همکاری بین المللی در باره توسعه و تکوین نظام انرژی هسته ای، بنیادی به نام گروه تکوین بین المللی GIF^{۴۱} چهارم تشکیل شد. این گروه از سال ۲۰۰۶ شروع به مطالعه برای ساخت نیروگاههایی با ضرایب ایمنی بیشتر و کار برد بهتر مواد سوخت اتمی نمودند. نیروگاههایی که اکنون در جهان فعال می باشند، همه از نوع نسل (ژنراسیون) ۲ و ۳ می باشند. ساخت نسل چهارم هنوز به طور قطعی تمام نشده است و قرار است در سالهای ۲۰۲۰ تا ۲۰۳۰ تجارتي شوند. اگرچه برخی از کشورها از آن جمله فرانسه با کشورهای دیگر قرار داد پیش فروش و ساخت چنین نیروگاههایی را امضاء کرده اند. ضرایب ایمنی که در این نیروگاهها باید در نظر گرفت شود از قرار زیر است:

۱) بهتر کردن ضرایب ایمنی نسبت به نیروگاههای نسل ۲ و ۳

^{۴۰} http://fr.wikipedia.org/wiki/G%C3%A9n%C3%A9ration_de_r%C3%A9acteur_nucl%C3%A9aire

^{۴۱} Generation IV International Forum - GIF

۲) بهتر کردن کنترل ماده سوخت (پلوتونیم ۲۳۹ و اورانیوم ۲۳۳) که در نیروگاه تولید می شوند و غیر ممکن ساختن خروج و یا فروش این مواد در تجارت، به دلیل خطرات احتمالی انتشار این مواد در دست افراد سود پرست و یا قدرت طلب.

۳) به حد اقل رساندن زباله های خطرناک حاصل از شکست و یا حاصل از جذب نوترونی بر روی عناصر دیگر. الزام در تبدیل و باز سازی ایزوتوپهای خطرناک به ایزوتوپهای پایدار و یا تبدیل آنها به عناصر شکست پذیر باید در نظر گرفته شود. به ویژه تبدیل عناصر خانواده اکتینیدها به عناصر شکست پذیر در درون نیروگاه.

۴) به حد اقل رساندن مصرف سوخت طبیعی، چون مقدار عناصر شکست پذیر موجود در سیاره زمین نا محدود نمی باشند. و اگر قرار باشد همه کشورهای این مواد را از بطن زمین استخراج و به مصرف برسانند، ذخیره طبیعی عناصر شکست پذیر بزودی پایان خواهد یافت.

۵) تقلیل هزینه های ساخت نیروگاهها و به ویژه پایین آوردن هزینه های پیاده سازی نیروگاهها بعد از پایان عمر مؤثر آنها. و نیز پایین آوردن ارزش کیلوات ساعت انرژی تولید شده در این نوع نیروگاه نسبت به منابع دیگر تولید انرژی.

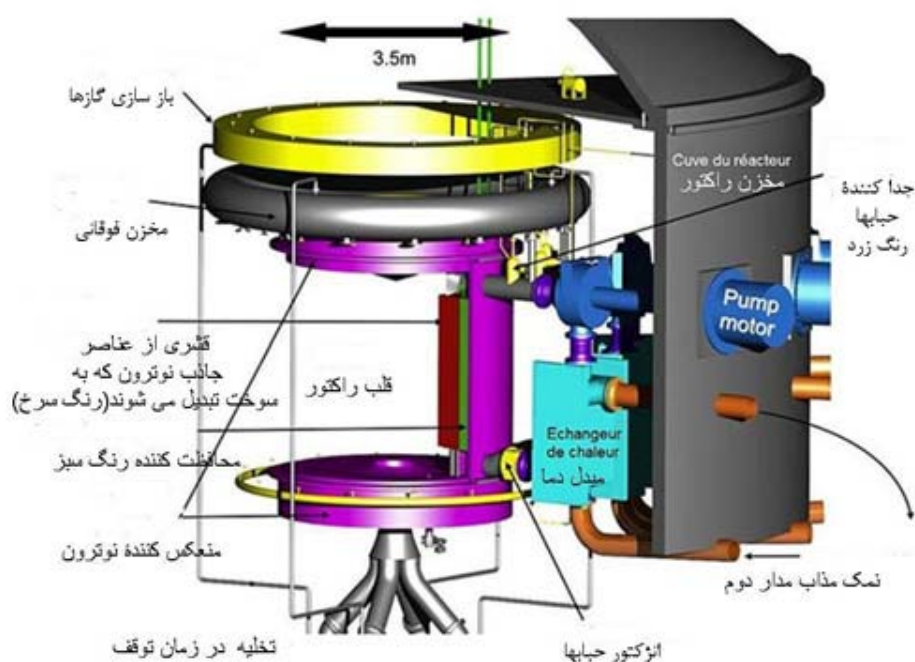
۶) بهتر کردن راندمان انرژی دهی این نیروگاهها. نیروگاههای نسل ۳ و ۲ حد اکثر راندمانی که داشته اند ۳۳ درصد انرژی تولید شده در راکتور اتمی را تبدیل به برق می کنند. مهندس های ساخت نیروگاههای نسل جدید فکر می کنند بتوانند راندمان انرژی زایی این نیروگاهها را به ۴۶ درصد برسانند. نوع ویژه ای از نیروگاه نسل ۴ به نام TDN از سال ۲۰۰۷ در سوئیس تحت مطالعه و بررسی است و قرار است در این نیروگاه زباله های نیروگاههای دیگر را تغییر ماهیت دهند و رادیو اکتیویته خطرناک آنها را پایین آورند. ساخت و به راه اندازی این نیروگاه قرار است در سال ۲۰۲۰ تمام شود و به بهره برداری برسد.

در سال ۲۰۱۰ انواع جدیدی از نیروگاههای نسل چهارم به وسیله مرکز ملی مطالعات علمی^{۴۲} (CNRS) فرانسه واقع در شهر گرونوبل Grenoble در جنوب شرقی فرانسه پیشنهاد شده است، که مزایای بسیاری دارد و عملاً تمام مشخصات لازم برای نیروگاه های نسل چهارم را که در فوق به آنها اشاره شد در بر دارند. این نوع نیروگاه که MSR^{۴۳} نام دارند. در نوعیروگاه از نمکهای مذاب به عنوان منتقل کننده دما استفاده می شود. در نوعی که با نوترون حرارتی کار می کند گرافیت برای نرم کننده نوترون به کار برده می شود. نوعی دیگر از این نیروگاهها که قرار است عمل شکست به وسیله نوترون سریع انجام گیرد، نرم کننده نوترون لازم ندارد. در این نوع نیروگاهها ماده سوخت

^{۴۲} Le Centre national de la recherche scientifique

^{۴۳} molten salt reactor : MSR

تولید خواهد شد. این نیروگاهها درحالیکه برق تولید می کنند قادرند بازمانده سوخت نیروگاههای نسل دوم و سوم را که مقدار قابل ملاحظه ای از اکتنیدهای شکست پذیر دارند، (^{241}Pu , ^{243}Am) (کوریم، آمریسیم، پلوتونیم و نپتونیم) را به عنوان سوخت اولیه و شروع کننده عمل شکست در راکتور مصرف کنند. سپس اورانیم و توریم که به صورت محلول مذاب در داخل نمکهای مذاب قرار دارند ماده سوخت جدید را به وجود خواهند آورد (^{233}U ; ^{239}Pu). توان پیش بینی شده برای این نوع از نیروگاه ها ۱۰۰۰MWe مگاوات الکتریکی خواهد بود. در این نیروگاهها از لیتیم فلوئورور LiF و یا برلیم فلوئورور BeF_2 که در دمای بین ۵۰۰ تا ۹۰۰ درجه سانتیگراد ذوب می شوند استفاده خواهد شد. در شکل (۴۰) نموداری از این نیروگاه ارائه شده است.



شکل (۴۰) نیروگاهی با نوترون سریع که خنک کننده آن از نمکهای مذاب است.

مخالفین کاربرد انرژی هسته ای که گروه ویژه و با اهمیتی را در جهان تشکیل می دهند،^{۴۴} همواره با کار برد اتم برای تولید برق مخالفت می کنند. اصلاحات منظور شده در نیروگاههای نسل چهارم را نوعی خیمه شب بازی و برای پوشاندن معایب تولید برق از اتم می دانند. آنها باور دارند که تمام نیروگاهها خطر مشترک دارند که آن هم آلوده کردن محیط زیست با زباله های رادیو اکتیو از یک سو و احتمال حوادثی چون چرنوبیل و فوکوشیما از سوی دیگر است.^{۴۵} به ویژه در فرانسه این گروه همواره فعال بوده و با کاربرد انرژی هسته ای مخالفت می کنند. و اما دولت فرانسه چندان به گفتار آنها توجهی نمی کند. بعد از زلزله ژاپن و به دنبال آن سونامی ، نیروگاههای فوکوشیما^{۴۶} ،

^{۴۴} Le Réseau Sortir du nucléaire

^{۴۵} <http://reacteur.generation4.free.fr/>

^{۴۶} http://en.wikipedia.org/wiki/Fukushima_Daiichi_nuclear_disaster

مسئولین حکومتی این کشور در ۱۴ سپتامبر ۲۰۱۲ تصمیم گرفتند که ۲۲ نیروگاه دیگر این کشور را به تدریج تا سال ۲۰۴۰ متوقف کنند.^{۴۷}

آلمان نیز تصمیم گرفته ۱۷ نیروگاه خود را تا پایان سال ۲۰۲۲ تعطیل کند.^{۴۸} ولی فرانسه که ۵۸ نیروگاه اتمی دارد و نزدیک به ۷۵ درصد انرژی مصرفی خود را از این نیروگاهها تأمین می کند، توجهی به مخاطرات این نیروگاهها ندارد و زباله های رادیو اکتیو در این کشور روز به روز بر روی یکدیگر انباشته می شوند. تا کنون در این کشور تصمیم قطعی برای از بین بردن این زباله ها گرفته نشده است. با این وجود شرکت برق فرانسه مشغول به ساخت نیروگاههایی در جهان می باشد، این تجارت همواره توأم با زیان برای کشور فرانسه بوده است.^{۴۹}

فرانسه از سال ۲۰۰۵ مشغول به ساخت نیروگاهی از نوع PWR در فنلاند است. قرار داد امضاء شده در آغاز ۳ میلیارد یورو بوده و اما تاکنون ساخت این نیروگاه بیشتر از ۶ میلیارد یورو هزینه برده است که مابه التفاوت را فرانسویان باید با پرداخت مالیات یه پردازند. در سال ۲۰۰۷ دو نیروگاه از همین نسل به کشور چین به مبلغ ۵ میلیارد دلار فروخته شد، با این شرط که کشور فرانسه تنها ساختار درونی نیروگاه را بسازد و چینی ها ساختار خارجی نیروگاه را تکمیل کنند. این قرار داد چون با زیان برای فرانسوی ها انجام گرفته بود، قرار داد را با فروش اورانیم غنی شده و با زیان بسیار برای فرانسه، با مبلغ ۸ میلیارد یورو بزرگ کردند. در جریان مسافرت رئیس جمهور فرانسه سرکوزی به هند، در دسامبر ۲۰۱۰ قرار داد ساخت دو نیروگاه با هم از نوع نسل سوم به وسیله شرکت فرانسوی آروا AREVA با شرکت محلی هند NPCIL به امضاء رسید و قرار بر این شد پس از ساخت این دو نیروگاه، چهار نیروگاه دیگر برای هند ساخته شود. تمام این قراردادهای بعد از زلزله و سونامی ژاپن معلق شده و حتی رئیس جمهور جدید فرانسه قبول کرده تا پایان دوره ریاست جمهوری یک نیروگاه را در فرانسه تعطیل کند و تا سال ۲۰۲۵ تولید انرژی از منبع اتمی را از ۷۵ درصد به ۵۰ درصد تقلیل دهند.^{۵۰} در باره خطرات انرژی هسته ای در فصل مربوط به حوادث نیروگاهها بیشتر صحبت خواهیم کرد.

۵) عمر نیروگاه ها:

هنوز چند واحد از اولین نیروگاه های ساخته شده در آغاز کشف و کار برد شکست اتم (از نوع مینوکس با آلیاژ فلز منیزیم) در انگلستان فعال اند. اگرچه به آخر عمر مفید خود که ۳۵ سال در نظر گرفته شده بود رسیده اند. بسیاری از نیروگاههای موجود در جهان در سالهای ۱۹۷۰ تا ۱۹۸۰

^{۴۷} http://fr.wikipedia.org/wiki/Accident_nucl%C3%A9aire_de_Fukushima

^{۴۸} http://www.lemonde.fr/europe/article/2011/05/30/Allemagne-une-sortie-du-nucleaire-progressive_1529625_3214.html

^{۴۹} <http://observ.nucleaire.free.fr/avant-japon.htm>

^{۵۰} http://www.lemonde.fr/politique/article/2011/09/19/hollande-et-le-nucleaire-pas-de-geste-pour-les-ecologistes_1573021_823448.html

میلادی ساخته شده اند و تا سال ۲۰۱۵ میلادی عملاً" به ۴۰ سال فعالیت مفید می رسند. ولی مطالعات جدید و دخل و تصرفهایی که در این نیروگاهها شده، امکان طولانی تر کردن عمر مفید آنها را میسر ساخته است. به ویژه در مورد نیروگاههایی که با آب تحت فشار ۱۵۵ اتمسفر و یا با آب جوشان کار می کنند، با تعویض برخی از مواد ساختمانی و جانشین کردن آنها با مواد بهتر، می توان عمر این نیروگاه ها را طولانی تر کرد. در ژانویه ۲۰۰۳ مسئولین ایمنی نیروگاههای آمریکا اجازه بهره برداری از ده نیروگاه این کشور را تا ۶۰ سالگی صادر کردند، یعنی عملاً" ۲۰ سال افزایش عمر. کشورهای دیگر منجمله روسیه قصد دارند عمر مفید نیروگاههای خود را بیشتر کنند. در بسیاری از کشورها وضعیت ایمنی نیروگاهها را بررسی کرده و پس از مطالعه و تجزیه برخی از مواد درونی آنها و جایگزین کردنشان با مواد ایمن تر اجازه تدریجی افزایش عمر نیروگاه را صادر می کنند.

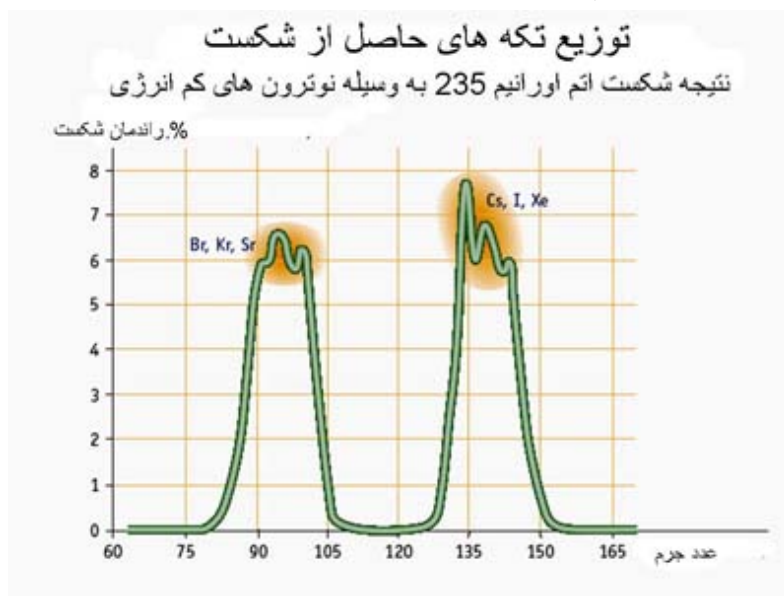
۶) توان نیروگاهها:

توان یک نیروگاه تابع مقدار ماده سوختنی، و حجم قلب نیروگاه و به ویژه عناصر ساختمانی آن است. معمولاً" نامگذاری توان نیروگاهها را باید برحسب مگاوات (میلیون وات الکتریسیته) بیان کنند. ولی غالباً" در عمل توان حرارتی نیروگاه بیان می گردد و آن را مگاوات حرارتی نیروگاه (یعنی توان برحسب میلیون وات حرارتی) می نامند. در واقع منطقی تر این است که توان نیروگاه بر حسب مقدار برق مفیدی که تولید می کند در نظر گرفته شود. چون فلسفه وجودی نیروگاه تولید انرژی الکتریکی است. در این حال باید بازده تبدیل حرارتی به انرژی الکتریکی را در نظر گرفت، چون مقداری از الکتریسیته تولید شده صرف گرداندن پمپ ها و تأسیسات نیروگاه می شود. در یک نیروگاه که با آب خنک می شود و نرم کننده نوترونها نیز آب معمولی است، اگر توان حرارتی معادل ۳۳۰۰ میلیون وات باشد، توان الکتریکی آن تنها ۱۰۰۰ میلیون وات خواهد بود که مقداری از آن صرف تأسیسات و پمپ های نیروگاه می شود. برای مثال به تازگی در فرانسه نیروگاهی از نوع خنک کننده آب معمولی با فشار ۱۵۵ جو ساخته شده است، که توان الکتریکی ای معادل ۱۵۱۶ میلیون وات دارد ولی توان الکتریکی مفید آن ۱۴۵۰ میلیون وات است و مقدار ۶۶ میلیون وات صرف پمپها و تأسیسات ساختمانی نیروگاه می گردد.

۷) فراورده های حاصل از شکست:

شکست هسته اورانیم همواره متقارن (سیمتریک) نیست. بعد از ورود نوترون به داخل هسته اورانیم ۲۳۵ و یا پلوتونیم ۲۳۹ نوساناتی در داخل هسته به وجود می آید و بعد از چند میلیونیم ثانیه هسته مانند قطره آبی به دو نیمه می شود، این دو نیمه همواره مشابه هم نخواهند بود و یک دسته از عناصر سبک تر که در وسط جدول تناوبی قرار دارند به وجود می آیند. در این عناصر

همواره تعداد نوترونها بیشتر از تعداد پروتونها است. زیرا در عناصر سنگین مثل اورانیم و یا پلوتونیم نسبت نوترون به پروتون $1/5$ است و حال آنکه در مورد عناصر وسط جدول تناوبی به علت کم بودن تعداد پروتونها (پایین بودن دافعه پروتون بر پروتون) این نسبت کمتر و در حدود $1/3$ تا $1/4$ است. در نتیجه فراورده های حاصل از شکست به دلیل مازاد تعداد نوترونها نسبت به پروتونها بسیار ناپایدار هستند و همه آنها با انتشار پرتوهای بتای منفی و پرتوهای گاما با انرژی بالا تجزیه می شوند. معمولاً از شکست عنصر اورانیم، حدود پنجاه رادیو ایزوتوپ مختلف حاصل می شود. این رادیوایزوتوپها شامل دو دسته از عناصر وسط جدول تناوبی هستند. دست اول اعداد جرمی بین ۷۵ تا ۱۱۰ را دارند و اعداد جرمی دسته دوم ۱۲۰ تا ۱۶۰ است. راندمان فراورده های حاصل از شکست را معمولاً به صورت منحنی نمایش می دهند در شکل (۴۱) این منحنی ارائه شده است. چنان که مشاهده می شود در رأس منحنی اول عناصری نظیر برم، کریپتون و استرانسیم، قرار دارند که در بین آنها استرانسیم از همه خطرناک تر است و نیمه عمری معادل با ۲۸ سال دارد، یعنی باید دست کم ۲۸۰ سال صبر کرد تا ۹۹ درصد رادیو اکتیویته آن از بین برود. در رأس منحنی دوم رادیو ایزوتوپهای سزیم، ید و کزنون نسبت در صد بیشتری دارند که در این دسته رادیو ایزوتوپ سزیم ۱۳۷ از همه خطرناکتر است و نیمه عمری معادل ۳۰ سال دارد. یعنی برای از بین رفتن ۹۹ درصد رادیو اکتیویته این رادیو ایزوتوپ باید ۳۰۰ سال صبر کرد.



شکل (۴۱) منحنی راندمان اتم های به وجود آمده بعد از شکست اتم اورانیم ۲۳۵ به وسیله نوترون کم انرژی (نوترون حرارتی). در محور طولها عدد جرم فراورده های حاصل از شکست برده شده است و در محور عرضها نسبت درصد و یا راندمان شکست آورده شده است. این منحنی دو کوهانه مربوط به نیروگاههای طبیعی است که در آنها با نوترون کند شده عمل شکست انجام می گیرد. چنان که مشاهده می شود در رأس این منحنی رادیو ایزوتوپهای پرتوزایی با نیمه عمر بالا مانند سزیم، استرانسیم و ید ... وجود دارند که نیمه عمر آنها بالا است و دست کم ۳۰۰ سال طول می کشد تا پرتوزایی آنها از بین برود. چنانچه مشاهده می شود عناصری چون ^{87}Br ، کریپتون ^{86}Kr و استرانسیم ^{88}Sr در رأس منحنی اول و سزیم ^{137}Cs ، ید ^{131}I و کزنون ^{135}Xe در رأس منحنی دوم قرار دارند.

در این عناصر چنانچه گفتیم، تعداد نوترونها خیلی زیادتر از تعداد پروتونهای لازم برای پایداری عنصر است، در نتیجه یک یا چند نوترون طبق رابطه ای که قبلاً هم ارائه شد، تبدیل به پروتون می شوند.

$$n^1 \rightarrow p^1 + \bar{e} + \bar{\nu} + E$$

انرژی + نوترینو + الکترون منفی + پروتون → نوترون

با هر الکترونی که از هسته اتم بیرون می آید، عنصر جدیدی حاصل می گردد که یک بار مثبت بیشتر دارد و در نتیجه در جدول تناوبی عناصر یک خانه جلوتر (از چپ به راست) می رود. پرتوهای بتای منتشره چندان خطرناک نیستند و با یک صفحه آلومینیومی به قطر چند میلی متر می توان مانع از بیرون آمدن آنها از ظرف محتوی این رادیو ایزوتوپها شد ولی متأسفانه همزمان با این تحولات و انتشار پرتو بتا، این رادیو ایزوتوپها پرتوهای گامای پر انرژی نیز از خود منتشر می سازند که جداره های سربی بسیار ضخیم هم نمی تواند از نفوذ آنها به خارج ممانعت کند. در جدول (۶) با زباله های خطرناک نیروگاههای اتمی آشنا می شوید.

نوع	نیمه عمر رادیو ایزوتوپ	رادیو ایزوتوپ
فراورده حاصل از شکست	۳۰ سال	سزیم ۱۳۷
فراورده حاصل از شکست	۲/۳ میلیون سال	سزیم ۱۳۵
فراورده حاصل از شکست	۲۹ سال	استرانسیم ۹۰
فراورده حاصل از شکست	۲۱۰۰۰۰ سال	تکنسیوم ۹۹
فراورده حاصل از شکست	۱۶ میلیون سال	ید ۱۲۹
حاصل از جذب نوترون (اکتینید)	۴۳۰ سال	آمریسیوم
حاصل از جذب نوترون (اکتینید)	۲,۱ میلیون سال	نپتونیم ۲۳۷

جدول (۶) فراورده های خطرناک و با عمر طولانی حاصل از شکست

و یا حاصل از جذب نوترون در درون نیروگاههای اتمی.

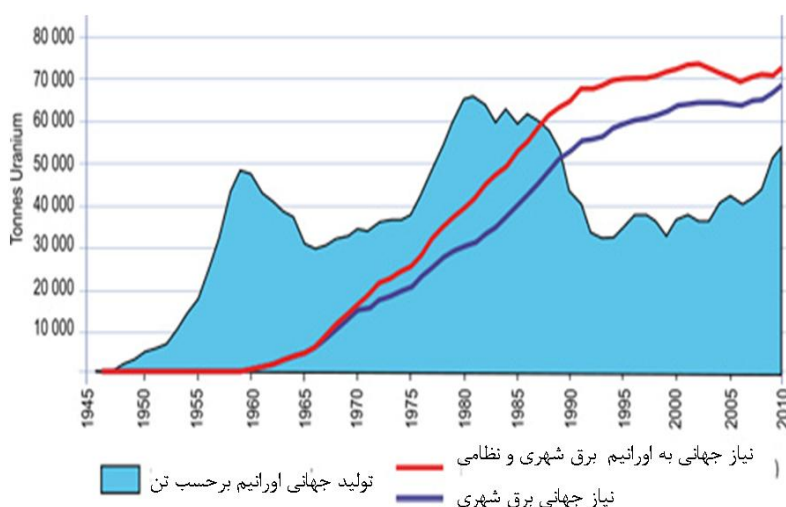
۸) منابع و چگونگی تهیه سوخت اتمی:

دوره تهیه سوخت اتمی فرایند زنجیره ای بسیار پیچیده ای است که از استخراج سنگ معدن ، تخلیص ، سپس غنی سازی و در پی آن تبدیل اورانیم خالص به صورت اکسید و قرار دادن آن در درون میله های نگهدارنده، شروع می شود و سپس این فرایند بعد از چهار سال اقامت میله های سوخت در نیروگاه و بیرون آوردن و قطعه قطعه کردن آنها به ابعادی در حدود سانتیمتر و انحلال اورانیم نیم سوخته و فراورده های حاصل از شکست در اسید و نهایتاً "دوباره سازی اکسید اورانیم و برگشت آن به صورت میله های سوختی جدید، ادامه می یابد.

الف) منابع اورانیم در جهان: اورانیم عنصری نسبتاً فراوان در روی پوسته زمین است (تقریباً معادل روی و یا قلع) و می توان گفت فراوانی نسبی آن ۵۰ بار بیشتر از جیوه و ۱۰۰۰ بار بیشتر از طلا است. در معدن هیچ گاه به صورت خالص و به شکل فلزی یافت نمی شود، بلکه همواره به

صورت ترکیب با عناصر دیگر وجود دارد. غنی ترین سنگ معدن آن را اورانیفر (سنگهایی که اورانیم دارند) گویند، نظیر اورانیت یا پچبلند که غالباً از اکسید سه گانه اورانیم، متشکل از ۳ اتم اورانیم و ۸ اتم اکسیژن است. معادن معروف و با نسبت درصد قابل استخراج در استرالیا، کانادا، قزاقستان (تا سال ۲۰۰۴) و نیز در ایلات متحد آمریکا، آفریقا و جنوب روسیه وجود دارند. اورانیم به مقدار ۳ میلی گرم در هر لیتر در آب دریا ها نیز وجود دارد. برای مثال رودخانه رون در فرانسه حدود ۱۰۰ تن اورانیم را درسال با خود می برد، که حاصل از شسته شدن خاک گوهها بر اثر باران است. استخراج اورانیم از آب دریا امکان پذیر است ولی فعلاً صرفه ندارد.^{۵۱}

در اوایل سال ۲۰۰۱ تعداد ۲۱ کشور جهان تولید کننده اورانیم بودند که ده تای آنها (از جمله آفریقای جنوبی، استرالیا، کانادا، آمریکا، قزاقستان، روسیه، و اوکراین) بیش از ۹۰ درصد تولید جهانی را داشته اند. ۵۰ درصد از این مقدار مربوط به کانادا و استرالیا بوده است. در شکل (۴۲) نمودار تولید اورانیم در دنیا از آغاز پیدایش صنعت اتمی سال ۱۹۴۵ تا سال ۲۰۱۰ میلادی را بر حسب تن آورده ایم.



نموداری از تولید اورانیم از بدو پیدایش صنعت اتمی سال ۱۹۴۵ تا سال ۲۰۱۰ میلادی

شکل (۴۲) نمودار تولید و نیاز جهان به اورانیم طی سالهای ۱۹۴۵ تا ۲۰۱۰ میلادی.

^{۵۱} در ۱/۸ میلیارد سال پیش در گبون واقع در آفریقا نیروگاه اتمی طبیعی وجود داشته و اتمهای اورانیم ۲۳۵ به صورت زنجیره ای همانند یک نیروگاه به مدت ۶۰۰ هزار سال در آن شکسته می شده است. در آغاز نسبت در صد اورانیم ۲۳۵ در این نیروگاه طبیعی ۳,۰۷ درصد بوده است (مانند یک نیروگاه امروزی که با ۳ در صد اورانیم غنی شده کار می کند). ولی امروز در این معدن نسبت در صد اورانیم ۲۳۵ تنها ۰/۰۰۴ درصد است و حال آنکه در معادن دیگر این نسبت ۰/۷ در صد است. از این اختلاف و از وجود فراورده های حاصل از شکست اورانیم متوجه وجود این نیروگاه شده اند.

پس از حادثه چرنوبیل از سرعت احداث نیروگاههای اتمی جدید کاسته شد تا آنجا که تعداد نیروگاههای ساخته شده تا سال ۲۰۰۰ میلادی ناچیز بود. در سال ۲۰۰۵ نیاز دنیا به اورانیم بالغ بر ۷۰,۰۰۰ تن بود و حال آنکه کمتر از ۵۵,۰۰۰ تن از معدن استخراج می شد. کمبود اورانیم از تخلیص میله های سوخت استفاده شده در نیروگاهها که از سال ۱۹۸۰ در استخرهای آب سرد نگهداری شده اند به دست آمده است.

در نیروگاهها هر چهار سال یک بار میله های سوخت را از قلب نیروگاه خارج می کنند و برای آنکه از میزان پرتوزایی آنها کاسته شود و یا به اصطلاح خنک شوند، آنها را به مدت طولانی در استخرهای بسیار بزرگ مملو از آب قرار می دهند. مقدار اورانیم موجود در این استخرها در حدود ۵۰۰,۰۰۰ تن تخمین زده می شود. همچنین بخشی از کمبود اورانیم از طریق پیاده کردن ۵۰۰ تن پلوتونیم و اورانیم بسیار غنی موجود در بمبهای اتمی روسیه تأمین شد. این کار از سال ۱۹۹۳ شروع شده و تا سال ۲۰۱۳ قادر است در مجموع ۹۰۰۰ تن اورانیم طبیعی را جایگزین کند.

تولید اورانیم در فرانسه که در آغاز صنعت بسیار مهمی به شمار می رفت، از سال ۲۰۰۱ میلادی متوقف شده است. در فرانسه تا سال ۱۹۹۵ صد و هفتاد معدن اورانیم وجود داشته که از آنها مقدار ۷۲۸۰۰ تن اورانیم طبیعی استخراج کرده اند. برای تهیه این مقدار اورانیم ۵۲ میلیون تن سنگ معدن استخراج شده است. برای هر تن از این سنگها دست کم ۹ تن سنگهای دیگر جا به جا شده اند که کم و بیش پرتوزا بوده اند. ولی اکنون فرانسه از طریق شرکت فرانسوی کوجما (Cogema) ذخیره ای بالغ بر ۱۴۲۰۰۰ تن اورانیم دارد. این شرکت تنها در سال ۲۰۰۴ به میزان ۶۱۲۵ تن اورانیم از کشورهای خارج از فرانسه به دست آورده است. و این مقدار تولید از سهام شرکت فرانسوی کوجما در کشورهای دیگر به دست آمده است.^{۵۲}

ب) تهیه سوخت اتمی: تهیه سوخت اتمی ابتدا از استخراج سنگ معدن اورانیم دار شروع می شود. این سنگ معدن از معادن باز و یا در معادن موجود در اعماق زمین، که با راهروهای زیر زمینی به آنها دسترسی می یابند به دست می آید. غلظت اورانیم در سنگ معدن معمولاً بسیار پایین است برای مثال در فرانسه از هر تن سنگ معدن یک تا پنج کیلو گرم اورانیم به دست می آمده، یعنی

^{۵۲} سهام شرکت کوجما در خارج از فرانسه با کشورهای دیگر و مقدار اورانیم تولید شده در این کشورها در سال ۲۰۰۴ برحسب تن داخل پرتانتز: ۶۵/۴ درصد در نیجریه (۱۲۷۷ تن)، ۳۴ درصد در کانادا (۲۰۰۵ تن)، ۷۰ درصد در شرکت کانادایی مک کلین لاک (۲۳۱۰ تن)، ۳۰ درصد، در استرالیا (۷۲۰۰ تن) در سال بوده است. همچنین فرانسه در سال ۲۰۰۱ با شرکت کاتکو در قزاقستان به نسبت ۵۱ درصد شریک شده اند که تولید اورانیم آن ۱۵۰۰ تن در سال پیش بینی شده است.

نسبت در صد اورانیم در این سنگ معدن در حدود ۰/۱ تا ۰/۵ در صد بوده است. هم اکنون این درصد در معادن باقی مانده کمتر از ۰/۰۲ است که استخراج آن به صرفه نیست. روشهای های متفاوتی برای خارج ساختن اورانیم از سنگ معدن وجود دارد.

روش اول: در این روش استخراج اورانیم از سنگ معدن در فضای باز و یا زیر زمین انجام می گیرد که ۶۹ درصد اورانیم جهان با این روش به دست می آید. (۲۸ درصد در فضای باز و ۴۱ درصد زیر زمین). در این روش مشابه استخراج فلزات دیگر عمل می کنند. ابتدا سنگ معدن اورانیم دار را از معدن خارج می سازند و آن را به کمک اسیدهای قوی خرد می کنند تا به صورت گرد بسیار نرمی در آید. سپس به روشهای شیمیایی مناسب، غلظت اورانیم را در سنگ معدن بالا می برند. فرآورده حاصل از این عملیات خمیر به اصطلاح زرد رنگی است که به آن کیک زرد (Yellowcake) گویند، که متشکل از اکسید سه گانه اورانیم است^{۵۳}. در روشهای پیشرفته رنگ اکسید حاصل قهوه ای یا خاکستری است

روش دوم: این روش شامل شستشوی زیر زمینی سنگ معدن است. ۲۰ درصد اورانیم جهان از این روش تأمین می شود و ۱۱ درصد باقی مانده اورانیم از زیر فرآورده معادن دیگر به دست می آید. در روش اخیر اورانیم به غلظتهای متفاوت در پساب کارخانه های استخراج فلزات دیگر یافت می شود که با رسوب دادن و یا ثبت بر روی رزین تعویض کننده یونها، اورانیم را از سایر ناخالصی ها جدا می سازند. در روش شستشوی زیر زمینی حلال مناسبی در اعماق زمین تزریق می شود تا اورانیم را به حالت محلول در آورد. سپس محلول را از چاه معدن با پمپاژ بیرون می آورند، البته این روش در صورتی قابل استفاده است که بستر طبیعی معدن از سنگهای غیر قابل نفوذ تشکیل شده باشد، و گرنه مواد رادیو اکتیو به آبهای زیر زمینی نشت کرده و آنها را آلوده خواهد ساخت.

معادنی قابل بهره برداری هستند که نسبت در صد اورانیم آنها بیشتر از ۰/۰۲ درصد است. در روش اول سنگ معدن خورد شده را در مخازنی که جدار داخلی آنها کائوچوئی است و گنجایشی در

^{۵۴} کیک زرد پودر غلیظ شده اورانیم است که ۸۰ درصد اورانیم دارد و در ۲۸۷۸ درجه سانتیگراد ذوب می شود. کیک زردی که در صنایع پیش رفته به دست می آید برخلاف نامش زرد رنگ نیست، بلکه قهوه ای و یا حتی سیاه رنگ می باشد. کیک زرد در ابتدای صنعت استخراج اورانیم وجود داشته و به دلیل ناخالص بودن رنگ آن زرد بوده و این نام بدان علت می باشد. کیک زرد متشکل از اکسید سه گانه اورانیم است، که در ۷۰۰ درجه سانتیگراد به دست می آید.



برای تهیه کیک زرد دو روش وجود دارد: روش اسیدی یا روش قلیایی

(۱) روش اسیدی: سنگ معدن را در سولفوریک اسید همراه با سدیم کلرات NaClO_3 حل می کنند.

(۲) روش قلیایی: سنگ معدن را با سدیم کربنات Na_2CO_3 همراه با آهک (CaO) که همان کلسیم اکسید است و به مخلوط سیدریت یا بیرون کربنات FeCO_3 و گاز اکسیژن O_2 در فضای بسته (اتوکلاو) وارد میکنند. در دمای ۱۴۰ درجه سانتیگراد و تحت فشار ۶ اتمسفر اورانیم اکسید به دست می آورند.

حدود چندین تن دارند قرار می دهند. سپس بر روی آن محلولی از سولفوریک اسید (۵۵ تا ۶۵ کیلوگرم به ازاء هر تن) و سدیم کلرات به عنوان اکسید کننده (۱ تا ۲ کیلوگرم برای هر تن) در دمای ۶۰ درجه سانتیگراد ریخته و به مدت سه ساعت بهم می زنند. با این کار اورانیم موجود در سنگ معدن به درجه اکسید اسیون ۴ و ۶ می رسد. با افزودن آب اکسیژنه و منگنز بی اکسید به محلول، به دلیل وجود یونهای فریک موجود در سنگ معدن، کاتیون کمپلکسی از اورانیم در محلول تشکیل می شود، در هر لیتر از محلول بین ۰/۵ تا ۵ گرم اورانیم وجود خواهد داشت. کمپلکس اورانیم به سهولت جذب رزین های تعویض کننده یونها می شود. آبی که از ستون رزین ها خارج می شود همچنان مقدار بسیار کمی اورانیم دارد که قابل بهره بر داری نیست. باید آن را تبخیر کرده و مانده تبخیر نیز زباله رادیو اکتیو است و باید آن را در محلی غیر قابل دسترس (مثلا) در معادن عمیق) دفن کنند.

اگر رزین را با محلول اسیدی مناسبی شستشو دهند اورانیم از روی آن کنده خواهد شد. بر روی محلول به دست آمده منیزم اکسید اضافه می کنند. با این کار رسوبی به دست می آید که پس از تبخیر آبهای اضافی، خمیر مانند خواهد شد. معمولا" خمیر به دست آمده ۷۵ در صد اورانیم اکسید دارد. این خمیر قابل استفاد در نیروگاه اتمی نیست زیرا ناخالصی های موجود در آن غالبا" جاذب نوترون هستند و بیلان نوترونی را در درون نیروگاه پایین می آورند. از سوی دیگر این ناخالصی ها بعد از جذب نوترون تبدیل به رادیوایزوتوپهای خطرناک می شوند و پرتو زایی نیروگاه را بالا می برند. در نتیجه باید تا حد صد در صد اورانیم فلزی خالص تهیه کرد و سپس در مجاورت اکسید کننده ها دو باره تبدیل به اکسید نمود.

در برخی از معادن، سنگهای معدن را به صورت کلوخه های کوچکی خرد کرده، آنها را به صورت تپه هایی متشکل از ۵۰۰۰ تا ۱۵۰۰۰ تن و به ارتفاع ۳ تا ۳/۵ متر بر روی سطحی شیب دار و نفوذ ناپذیر قرار می دهند. سپس این تپه ها را با محلولی از سولفوریک اسید رقیق آب پاشی می کنند و این عمل را به مدت سه ماه ادامه می دهند. لازم است آبهای حاصل از شست و شو را که حاوی اورانیم به غلظت بسیار کم است تبخیر کرد تا غلظت اورانیم به حد ۰/۵ تا ۵ گرم در لیتر برسد. سپس تمام عملیاتی را که پیشتر گفتیم بر روی آن انجام می دهند تا خمیر کیک زرد حاصل شود.

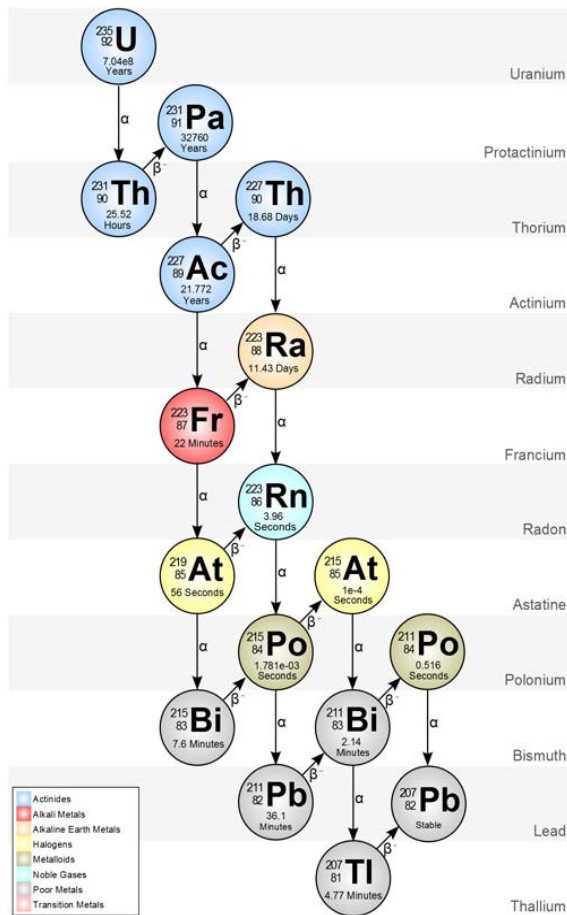
در روش دوم نیز محلول سولفوریک اسید همراه با اکسید کننده ای نظیر سدیم کلرات را به معدن زیر زمینی تزریق می کنند و محلول را بعد از گذشت چند ماه از درون معدن با پمپاژ بیرون می آورند. سپس عملیات یاد شده در بالا را بر روی آن انجام می دهند. روشهای متعدد دیگری نیز برای استخراج وجود دارند که جزو اسرار مگوی شرکتها به شمار می رود.

در مرحله استخراج و تخلیص اولیه اورانیم زباله های مختلفی تولید می شود که برخی خطرناک هستند. در این زباله ها مقداری اورانیم پرتوزا با نیمه عمر طولانی وجود دارد که استخراج آن مقرون به صرفه نیست. در مرحله تغلیظ نیز زباله هایی به وجود می آید که مواد پرتوزا (فرزندان خانواده اورانیم ۲۳۸ و خانواده اورانیم ۲۳۵) دارند.

برای شناخت رادیو ایزوتوپهای موجود در زباله ها ناچاریم چگونگی تجزیه اورانیم ۲۳۸ را که مقدار آن در آغاز پیدایش سیاره زمین دو برابر مقدار کنونی بوده بشناسیم. نمودار تجزیه و تخریب این خانواده ($4n+2$) در شکل (۲۷) صفحه ۵۱ آورده شد است. چنانچه پیش از این اشاره شد، در طی ۴/۵ میلیارد سال نیمی از اورانیم ۲۳۸ موجود در زمین تجزیه شده و فرزندان رادیو اکتیو آن نظیر اورانیم ۲۳۴ با نیمه عمر ۲۵۰۰۰۰ سال و توریم ۲۳۰ با نیمه عمر ۸۰۰۰۰ سال و رادیم ۲۲۶ با نیمه عمر ۱۶۲۰ سال و رادیو ایزوتوپ سرب ۲۱۰ با نیمه عمر ۲۲ سال همه با هم و با یک سری رادیوایزوتوپهایی نظیر پلونیوم ۲۱۰ که نیمه عمری معادل با ۱۳۸ روز دارد در حال تعادل مادام العمری هستند. همه این رادیو ایزوتوپها در زباله ها باقی می مانند.

رادیو ایزوتوپهای بسیاری نیز از خانواده اورانیم ۲۳۵ ($4n+3$) به وجود می آید و چون نیمه عمر این رادیو ایزوتوپ (۷۱۰ میلیون سال) و به مراتب کمتر از عمر زمین است، لذا فرزندان این خانواده نسبت در صد چندانی ندارند و چون این خانواده با از دست دادن ۷ ذره آلفا به سرب ۲۰۷ ختم می شود، از این طریق مقدار اولیه اورانیم ۲۳۵ در بدو تشکیل زمین مشخص می گردد. در شکل (۴۳) نموداری از تجزیه خانواده اورانیم ۲۳۵ را که به خانواده ($4n+3$) نامگذاری شده است آورده ام.

در هر صورت موادی که پس از استخراج اورانیم باقی می مانند هم حجم بسیار زیادی دارند و هم حاوی رادیو ایزوتوپهای خطرناک با عمر بسیار بالا هستند. جدا سازی فرزندان پرتوزای اورانیم موجود در هزاران تن باقی مانده از سنگهای معدن مخارج زیادی دارد و تا آنجا که مقرون به صرفه باشد و یا کاربرد داشته باشد (مثل رادیم) این کار صورت می گیرد. اما باز هم توده عظیمی از مواد آلوده کننده محیط زیست در آن باقی می ماند که آن را در اعماق زمین دفن می کنند. شاید روزی این مواد به واسطه آبهای زیر زمینی شسته شوند و در نهایت به دریاها و اقیانوسها راه یابند. این مواد در بدن موجودات دریایی ذخیره می شوند و ممکن است نواذگان ما آنها را مصرف کنند. ولی خطرناکتر از همه این مواد، گاز رادن است که در زمان بیرون آوردن اورانیم از معدن و به هنگام خرد کردن تکه های سنگ معدن در فضا رها می شود.



شکل (۴۳) نموداری از تجزیه خانواده اورانیم ۲۳۵ همانطور که در این نمودار مشاهده می شود، در این خانواده ۱۲ پرتو آلفا و ۹ پرتو بتا از رادیوایزوتوپهای مختلف منتشر می شود. تمام این رادیوایزوتوپها در سنگ معدن وجود دارند. ولی چون نسبت اورانیم ۲۳۵ در سنگ معدن تنها ۰/۷ درصد است، بنابراین پرتو زایی اورانیم و فرزندانش که در تعادل مادام العمری هستند چندان زیاد نیست. در نمودار رنگها معرف خانواده عناصر در جدول تناوبی است. رنگ آبی اکتینیدها، رنگ زرد هالوژنها، رنگ سرخ فلز قلیایی، رنگ خاکستری فلز و در نهایت رنگ آبی کم رنگ شبه فلز است. مقدار سرب پایدار موجود در معدن، معرف مقدار اولیه اورانیم ۲۳۵ است.

در اینگونه تجزیه مواد رادیو اکتیو کلمه مادام العمری، به این معنی است: تا زمانی که مادر یا پدر خانواده وجود دارد، پرتو زایی فرزندان معادل پرتو زایی والدین است. والدین را فرانسوی زبانان مادر و انگلیسی زبانان پدر می نامند.

در حادثه چرنوبیل که غربی ها در باره آن بسیار اغراق کردند، رادیو اکتیویته منتشره در فضا فقط ۰/۰۰۲ میلی سیورت^{۵۴} بوده است، و حال آنکه مقدار گاز رادن موجود در جو زمین - چه ناشی از تخریب اورانیم موجود در آب دریا ها و چه آن مقداری که ناشی از استخراج و عملیات شیمیایی صورت گرفته بر روی اورانیم است - در حدود ۱/۲ میلی سیورت می باشد.^{۵۵} یعنی ۶۰۰۰ بار بیشتر است.

حجم سنگهای معدن لازم برای تولید یک تن اورانیم طبیعی، تابع نسبت در صد اورانیم موجود در آن است. مثلاً اگر نسبت در صد اورانیم بین ۰/۱ تا ۰/۰۵ در صد حجمی باشد، حجم زباله ها تعجب آور خواهد بود. برای مثال معدن شیرلی (shirley) در آمریکا که از بدو پیدایش صنعت هسته ای تا کنون ۹۴۶۰ تن اورانیم تولید کرده است و نسبت در صد اورانیم در این معدن ۰/۱۴۵ درصد بوده، مقدار ۷/۱ میلیون تن زباله آلوده به مواد پرتوزا تولید کرده است. امریکایی ها این زباله ها را در سطحی به مساحت ۱۰۶ هکتار پراکنده کرده اند.

^{۵۴} Sievert(Sv) واحد را دیو اکتیویته با تأثیر بیولوژیکی آن بر روی بدن در باره آن در فصل بعد بیشتر صحبت خواهیم کرد.

^{۵۵} UNSCER. Source and Effects of Ionizing Radiation

در فرانسه تا سال ۱۹۹۲ که معدنها فعالیت کامل خود را داشتند و کنترل دقیقی از طرف دولت و مدافعان محیط زیست بر آنها اعمال نمی شد. رویهمرفته بیش از ۴۷/۵ میلیون تن سنگ معدن استخراج و از آن ۶۰,۰۰۰ تن کیک زرد حاصل شده بود. ۲۶ میلیون تن مازاد سنگهای خرد شده این معادن بسیار نرم بوده که به صورت گل و لای از کارخانه خارج شده است. در شکل (۴۴) تصویر گرد و غبار ها و گل و لای معدن اورانیم دیده می شود.



شکل (۴۴) دو تصویر از معدن فعال اورانیم به صورت باز، در یکی گرد و غبار و در دیگری گل و لای دیده می شود.

۱۷ میلیون تن دیگر مازاد کلوخه ای بوده است. در گل و لای ها ۳۰۰۰ تن و در کلوخه ها ۱۴۰۰ تن اورانیم هنوز وجود دارد ولی قابل استخراج نیست. چنان که گفته شد رادیو ایزوتوپ رادیم یکی از فرزندان پرتوزای خطرناک اورانیم است، که در حال تعادل با اورانیم موجود در معدن است. در گل و لای باقی مانده معدن اورانیم در هر ثانیه ۷۰۰,۰۰۰ میلیارد بگرل رادیو اکتیویته وجود دارد. یعنی در هر ثانیه ۷۰۰,۰۰۰ میلیارد اتم رادیم تجزیه شده و همین تعداد ذره آلفا تولید می گردد و تبدیل به گاز رادن ۲۲۲ با پرتوزایی معادل ۷۰۰,۰۰۰ بکرل می شود و سپس در فضا منتشر می گردد. در شکل (۴۷) تصویرهای دیگری از معدن باز و بسته اورانیم را آورده ام.

با توجه به اینکه نیمه عمر رادیم ۱۶۲۰ سال است یعنی باید ۱۶۲۰۰ سال صبر کرد تا پرتوزایی رادیم از بین برود. اگرچه نیمه عمر فرزندش رادن کوتاه (۳/۸ روز) است. ولی این گاز برای انسان، به ویژه ساکنان منطقه بسیار خطرناک است و همراه باد تا نقاط دور دست منتقل می شود. گاز رادان با انتشار ۴ پرتو آلفا و ۴ پرتو بتا تبدیل به پلونیوم ۲۱۰ می شود. جذب گاز رادن توسط ریه ها باعث بروز سرطان می شود^{۵۶}.

^{۵۶} گاز رادن بر روی سلولهای ریه نشسته و در آنجا با نیمه عمر کوتاه خود (۳/۸ روز) و با نشر ۳ پرتو آلفا و ۲ پرتو بتا و تولید رادیو ایزوتوپهایی با نیمه عمر بسیار کوتاه در نهایت تبدیل به سرب ۲۱۰ می گردد که نیمه عمری معادل ۲۱/۴ سال دارد. سرب ۲۱۰ نیز با انتشار دو پرتو بتا تبدیل به پلونیوم ۲۱۰ با نیمه عمر ۱۳۶ روز می شود که نشر دهنده آلفا با انرژی ۵/۳ میلیون الکترون است. یعنی در واقع بعد از نشست یک سری اتمهای رادن بر روی سلولهای ریوی، ۴ پرتو آلفا با انرژی بالا و ۴ پرتو بتا با انرژی بین ۱ تا ۳ میلیون الکترون ولت به مدت صد ها سال در درون ریه انسان یا حیوان، به پرتو افشانی ادامه خواهند داد. (دنباله مطلب پایین صفحه ۸۶)



شکل (۴۶) نمونه ای از بشکه های حاوی مواد رادیو اکتیو رها شده در طبیعت.

برای مقایسه، مقدار بکرل مجاز در آبها $0/37$ بکرل در لیتر است. یعنی در هر 3 لیتر آب فقط یک تجزیه رادیو اکتیو مجاز است، آن هم نه رادیم، بلکه رادیو اکتیویته طبیعی نظیر تریتم و یا کربن 14 که در اثر پرتوهای کیهانی تولید می شوند و انرژی پرتوهای منتشره از آنها کم و چندان خطرناک نیستند.

می توان یک تکه بزرگ فلز اورانیم را در دست گرفت آسیبی به دست وارد نمی کند، زیرا پوست مرده دست مانع از نفوذ پرتوهای آلفا می شود. ولی اگر اورانیم به صورت گازی و هگزافلئورور باشد و یا اتمهای گاز رادن آزاد باشند و بر روی نسوج ریه جذب شوند، سالهای سال در آنجا پرتو افشانی خواهند کرد. مثال زیر این پدیده را تشریح می کند.

جذب یک میلیاردیم گرم ($0/000,000,001$ گرم) گاز رادن 222 بر روی ریه کارگری که در معدن اورانیم کار می کند، در هر ثانیه یک میلیارد (10^9) اتم آن تخریب شده و تبدیل به سرب 210 می شود، که بر روی نسوج ریه با نیمه عمر 22 سال باقی می ماند. بعد از $38/2$ روز (یعنی ده نیمه عمر رادیو ایزوتوپ رادن) تمام اتمهای رادن از بین می روند و تبدیل به سرب خواهند شد. تعداد اتمهای سرب باقی مانده بر روی نسوج فرد آلوده، معادل $38/2$ روز ضرب در 24 ساعت و ضرب در 60 دقیقه و باز ضرب در 60 ثانیه برابر با ($4,000,000,000,000,000$) یا (4×10^{15}) یعنی چهار میلیون میلیارد اتم سرب است. این تعداد اتم سرب در هر ثانیه 4 میلیون ذره آلفا تولید می کند و هر ذره هم می تواند 4000 زوج یون مثبت و یون منفی در داخل پلاسما سلولها ایجاد کند. این فعالیت تازه بعد از 22 سال نصف خواهد شد. آیا به نظر شما چنین شخصی زنده خواهد ماند؟

به همین دلیل است که مدافعان محیط زیست که غالباً "تحصیل کرده و آینده خطرناک جهان را با شرایط کنونی به خوبی پیش بینی می کنند. و نیز بخوبی می دانند کاربرد سوخت های فسیلی برای محیط زیست زمین خطرناک است. زیرا گرمایش زمین را بالا برده و در اثر ذوب یخ های قطبی سطح دریاها بالا خواهد آمد و زندگی میلیاردها نفر تباه خواهد شد. با این وجود اکثر آنها با کار برد نیروگاههای اتمی مخالفند. در فرانسه تا سال 1992 که معدنها فعالیت کامل خود را داشتند کنترل دقیقی از طرف دولت و مدافعان محیط زیست بر آنها نبود. در شکل (۴۶) نمونه ای از بشکه های حاوی مواد رادیو اکتیو رها شده در طبیعت منطقه مارینیاک در هوت وین (Margnac Haute Vienne) ارائه شده است. اینها بخشی از مجموعه 82088 بشکه ای است که در فاصله سالهای $89 - 1975$ توسط کارخانه تخلیص اورانیم کمورهکس ملووزی نزدیک ناربن Comurhex - Malvesi (Narbonne) رها شده بودند. در این بشکه ها مقدار زیادی اورانیم طبیعی و به ویژه فرزندان خانواده اورانیم 238 باقی مانده است. این مواد به طور مرتب گاز رادن تولید می کنند و از تخریب اتمهای این گاز، سرب 210 با نیمه عمر $21/4$ سال تولید می شود که نشر دهنده پرتو آلفا است. نزدیک شدن به این بشکه ها - حتی در فاصله 500 متری - بسیار خطرناک است.



شکل (۴۷) دو تصویر از معدن باز (Bellezane عکسی از یک معدن اورانیم در فضای باز واقع در ناحیه بلزان فرانسه) و قابل شستو شو با آبهای اسیدی و نیز تصویری از یک معدن بسته زیر زمینی دیده می شود.

ت) تبدیل کیک زرد به اورانیم هگزافلوئورور: این عملیات در چند کارخانه محدود انجام

می گیرد. اسامی این کارخانه ها در جدول (۷) آورده شده است. کیک زرد تهیه شده در معادن اورانیم را به صورت بازار آزاد بعد از تنظیم قرار داد به یکی از کارخانه هایی که در جدول نامبرده ایم می فرستند.

اورانیم اکسید موجود در کیک زرد را در نیتریک اسید حل می کنند تا محلولی که غلظت اورانیم در آن بین ۴۰۰ تا ۴۵۰ گرم در لیتر است تبدیل شود. با روشهای متداول در شیمی، ناخالصی های آنرا برطرف می سازند. یکی از روشها کار برد کمپلکس آلی به نام فسفات تری بوتیل است که با اورانیم کمپلکسی (اورگانو متالیک) تشکیل می دهد. بعد از این عملیات، با تخریب ترکیب آلی در ۳۰۰ درجه سانتی گراد و یا شست و شوی ترکیب آلی با محلولی اسیدی، اورانیم به فاز آبی بر می گردد. سپس عملیات با رسوب دادن و احیاء اکسید ۶ ظرفیتی با هیدروژن و تبدیل آن به اکسید ۴ ظرفیتی خاتمه می یابد. این اکسید را در نیروگاههایی که با اورانیم طبیعی کار میکنند به صورت قرصهای ۷ گرمی در آورده، به درون میله های سوخت وارد می کنند.

ولی اگر بخواهند اورانیم را غنی سازی کنند، باید اورانیم اکسید را با فلئوریدریک اسید ترکیب کنند تا اورانیم تترافلوئورور به دست آید. در عمل اخیر برای هر کیلوگرم اورانیم، ۳۴۰ گرم فلئوریدریک اسید لازم است. ترکیب اخیر متشکل از ۴ اتم فلئور و یک اتم اورانیم است. برای عمل غنی سازی باید اورانیم تترافلوئورور را به اورانیم هگزافلوئورور (6UF_6 یک اتم اورانیم و ۶ اتم فلئور) تبدیل کنند. برای این کار لازم است که اورانیم تترافلوئورور را با گاز فلئور ترکیب کنند.

اورانیم هگزافلوئورور در دمای عادی جامدی است که می توان آنرا از محلی به محل دیگر حمل کرد. معمولاً آن را در سیلندرهایی که قطر آن ۱۲۲ سانتیمتر و ظرفیت آنها ۱۲۰۰۰ کیلوگرم است به کارخانه های غنی سازی منتقل می کنند.

نام کشور	نام کارخانه های تبدیل کننده
کانادا	کیک زرد به اورانیم هگزافلوئورور اونتاریو، پورت هوب، بلین ریور Ontario, port Hope, Blin River
امریکا	ایلینویز و متروپولیس Illinois, Metropolis
فرانسه	مالوزی و پیرلات Pierrelatte, Malvés
انگلستان	اسپرینگفیلد و لانکشاير Lancashire, Springfields
روسیه	آنگارسک و اکاترین بورگ Ekaterinburg, Angarsk

جدول (۷) نام کشورها و کارخانهای تخلیص اورانیم.

تعداد این کارخانه ها در جهان محدود است و تحت کنترل دائمی آژانس بین المللی انرژی اتمی اند. در جدول (۸) نام کشورها و روش غنی سازی آنها را آورده ایم.

در نیروگاههایی که از اورانیم غنی شده تا حد ۳ تا ۵ درصد استفاده می کنند، اورانیم هگزافلوئورور را به کارخانه غنی کننده می برند. انتقال و حمل و نقل آن خود مسئله مهمی است. اورانیم هگزافلوئورور در دمای عادی حتی تا دمای ۵۶ درجه سانتیگراد جامد است. اورانیم هگزافلوئورور در کارخانه غنی سازی در دمای بالا تر از نقطه جوش آب به گاز تبدیل می شود و در آنجا اورانیم را تا حد مورد نیاز غنی می کنند. این ماده بسیار خطرناک است و در صورت استنشاق چند میلیون میلیاردیم (10^{-15}) گرم از این گاز، ابتلای به سرطان حتمی است. چنان که گفتیم تمام فرزندان اورانیم ۲۳۸ همه رادیو اکتیوند و تا ده نسل پی در پی ذره آلفا تولید می کند و ۸ پرتو بتا نیز از این فرزندان منتشر می شود. در شکل (۲۷) صفحه ۵۱ تسلسل پدر فرزندی اورانیم ۲۳۸ ارائه شده است.

غنی سازی به دو روش در جهان متداول است. در آمریکا و فرانسه از روش دیفوزیون گازی یا روش گراهام استفاده می شود و تقریباً دو سوم اورانیم جهان با این روش غنی می شود. بقیه کارخانه های غنی سازی از روش سانتریفوژ استفاده می کنند.

در روش دیفوزیون از اختلاف سرعت ملکولهای اورانیم ۲۳۵ نسبت به اورانیم ۲۳۸ استفاده می شود. در واقع ملکول اورانیم هگزافلوئورور ۲۳۵ جرمی معادل ۳۴۹ و مولکول اورانیم هگزافلوئورور ۲۳۸ جرمی معادل ۳۵۲ دارد. بنابر قانون گراهام، سرعت نفوذ ملکولها متناسب با عکس ریشه دوم جرم

دو ملوکول اورانیم هگزافلوئورور نسبت به هم است. که در این صورت نسبت نظری این رابطه که ضریب جدا سازی نامیده می شود و با α^{57} نمایش داده می شود، ضریب جدا سازی برای این دو ایزوتوپ $1/0.043$ است. ولی در عمل این نسبت بیش از $1/0.02$ نیست. یعنی سرعت ملکولهای اورانیم 235 فقط $1/0.02$ برابر بیشتر از ملکول اورانیم 238 است. برای آنکه اورانیم 235 که نسبتش در اورانیم طبیعی که 0.7% در صد است به 3% در صد برسد، باید از تعداد زیادی ستونهای خلل و فرج دار عبور کند.

محل کارخانه	اسم کشور	روش غنی سازی
Gronau گرونائو	آلمان	سانتریفوژ
Lanzhou- Shaanxi لانژو- شانخی	چین	سانتریفوژ
Paducah پادوکا	آمریکا	دیفوزیون گازی روش گراهام
Tricastin تریکاستین	فرانسه	دیفوزیون گازی روش گراهام
Rokkasho-mura روکاشو - مورا	ژاپن	سانتریفوژ
Almelo آلملو	هلند	سانتریفوژ
Capenhurst کاپن هرست	انگلستان	سانتریفوژ
Krasnoyarsk Angarsk-Seversk-Ekaterinburg اکاترین بورگ، سیورسک، آنگارسک، کراسنویارسک	روسیه	سانتریفوژ

جدول (۸) مهمترین کارخانه های غنی سازی اورانیم در جهان.

برای تهیه یک کیلوگرم اورانیم غنی شده (3% درصد اورانیم 235 و 97% درصد اورانیم 238) مقدار $6/2$ کیلوگرم اورانیم طبیعی لازم است که بعد از غنی سازی، $5/2$ کیلوگرم اورانیم فقیر شده باقی می گذارد که مصرف چندانی ندارد و فاقد ارزش تجارتي است. برای به دست آمدن این مقدار، 4 واحد جداسازی لازم است. بنابراین برای نیروگاهی که 1300 مگاوات الکتریکی توان دارد تعداد 100000 واحد جدا سازی در سال لازم است. جدار خلل و فرج دار از نیکل یا آلومین برشته شده ساخته می شود که شامل 100 میلیارد حفره به قطر 0.1 میلیون میلی متر در هر سانتیمتر مربع است. کارخانه غنی سازی تریکاستین فرانسه شامل 1400 طبقه پی در پی با 120 میلیون غشاء است که مجموع سطح آن 4 میلیون متر مربع غشاء خلل و فرج دار است. در شکل (۴۸) چند سلول از کارخانه غنی سازی اورانیم با روش نفوذ از جدارخلل و فرج دار (دیفوزیون گازی یا قانون گراهام) ارائه شده است.

⁵⁷ در مخلوط گازی شکل و در حال تعادل انرژی جنبشی متوسط ملکولها با هم برابر و مقدار ثابتی است.

$$v = \sqrt{2KT/m} , \quad \frac{1}{2} mv^2 = \frac{2}{3} KT$$

$$(v = \text{constant}/\sqrt{m}) \text{ از این رابطه } (\frac{1}{2} mv^2 = \text{constant})$$

و در نتیجه برای دو ملکول اورانیم هگزافلوئورور می توانیم بنویسیم:

$$(\alpha = \sqrt{m^{238}UF_6/m^{235}UF_6} \quad \alpha = \sqrt{352/349} = 1/0.043)$$



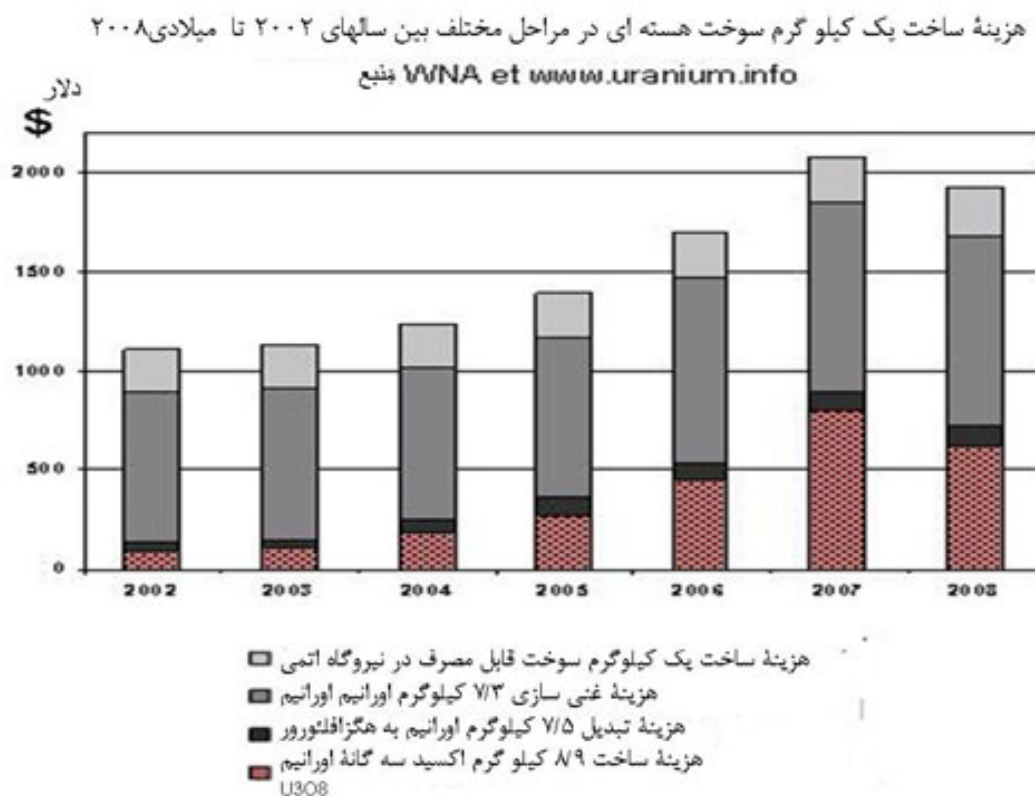
شکل (۴۸) چند سلول از کارخانه غنی سازی اورانیم با روش نفوذ از جدارخلل و فرج دار.

مصرف برق لازم برای این کارخانه ۶۰ درصد مخارج غنی سازی را در بر می گیرد. به عبارت دیگر برای فعالیت کارخانه غنی سازی تریکاستین فرانسه چهار نیروگاه اتمی که هر یک ۹۰۰ مگاوات الکتریکی توان دارند اختصاص یافته است که منحصرًا "برق تولید شده از آنها به مصرف این کارخانه می رسد. در واقع ۱۰ درصد کیلو وات ساعت برق تولید شده در نیروگاه های فرانسه صرف این کارخانه می شود.

در این کارخانه عمل غنی سازی معمولاً تا حد ۳ تا ۵ درصد انجام می گیرد. گفتیم که فراورده ثنوی این کارخانه ها اورانیم فقیر شده است که مصرف چندانی ندارد و تا پایان سال ۱۹۹۹ مقدار ۱/۲ میلیون تن از آن تنها در کارخانه هایی که با نفوذ گازی کار می کنند تولید شده است. این مواد هنوز تا مقدار ۰/۰۳ درصد اورانیم ۲۳۵ دارند. معمولاً این فراورده را در روسیه و آمریکا در مخازنی مشابه با مخازن هگزافلئورور نگه می دارند که کار خطرناکی است. هگزافلئورور ترکیب شیمیایی قابل نفوذی است که می تواند مخازن خود را خورده، سوراخ کند و به خارج نشت کند. اما در فرانسه هگزافلئورور را تبدیل به اکسید و سپس انبار می کنند تا شاید روزی بتوانند از آن در سوژنراتورهایی که با نوترون سریع کار می کنند استفاده کنند. ولی چند سالی است که ادامه کار این نیروگاهها مورد تردید قرار گرفته است، چون نیروگاههای خطرناکی به شمار می روند. چند وقت پیش دولت فرانسه بزرگترین این نیروگاهها را که سوپر فنیکس نام داشت متوقف کرد و انتظار نمی رود که مدافعان محیط زیست نیز اجازه دهند چنین نیروگاههایی در اروپا برپا شود. چنانچه پیشتر گفتم در سالهای اخیر نیروگاههای نسل چهارم بر اساس استفاده از اورانیم فقیر شده و توریم در دست ساخت است. زلزله در ژاپن و در پی آن سونامی که چهار نیروگاه فوکوشیما را منفجر کرد و از کار انداخت، اندیشه ساخت نیروگاههای نسل چهارم را نیز به زیر سؤال برده است.

در کارخانه تریکاستین فرانسه اورانیم هگزافلئورور را تبدیل به اکسید سه گانه اورانیم می کنند. سالانه ۱۴,۰۰۰ تن از این اکسید و ۷,۰۰۰ تن فلئوریدریک اسید در این کارخانه تولید می شود. کارخانه تریکاستین یکی از بزرگترین تولیدکننده گان فلئوریدریک اسید در جهان است. در آمریکا مقداری از فلز اورانیم فقیر شده را صرف ساخت گلوله های سلاحهای جنگی به ویژه گلوله های ضد تانک می کنند.

بهای اورانیم طبیعی در سال ۲۰۰۴ میلادی هر کیلو گرم در حدود ۸۰ دلار بوده است، با توجه به اینکه تقریباً از هر ۶/۲ کیلو گرم اورانیم طبیعی، یک کیلوگرم اورانیم غنی شده تا ۳ درصد به دست می آید و با توجه به عظمت کارخانه غنی سازی و سرمایه گذاری فراوان در آن و به ویژه همانطور که گفتیم مصرف برق زیاد، قیمت اورانیم غنی شده را حدث بزیند! در شکل (۴۹) هزینه ساخت سوخت هسته ای را بر حسب مراحل تهیه آن بین سالهای ۲۰۰۲ تا ۲۰۰۸ ارائه کرده ام.



شکل (۴۹) نموداری از هزینه ساخت سوخت هسته ای در مراحل مختلف آن بین سالهای ۲۰۰۲ تا ۲۰۰۸ میلادی که بر حسب دلار به روز شده را نمایش می دهد.

اما در روش غنی سازی به کمک اولتراسانتریفوژ مصرف الکتریسیته اش ۵۰ بار کمتر از روش نفوذ گازی است. سرعت محیطی سانتریفوژها بین ۴۰۰ تا ۷۰۰ متر در ثانیه و محدود به مقاومت ساختار سانتریفوژ است. کارخانه تریکاستین فرانسه پروژه ساخت اولترا سانتریفوژی برای سالهای ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۸ را در دست دارد.

برای تهیه سوخت هسته ای، اورانیم هگزافلورورور غنی شده را در آب می ریزند که تبدیل به اورانیم اکسی دیفلورورور و چهار ملکول فلوریدریک اسید می شود. سپس اکسی دی فلورورور را در گاز هیدروژن و در دمای ۷۰۰ تا ۸۰۰ درجه سانتیگراد احیاء می کنند و اورانیم دی اکسید به دست می آورند. در آخر اورانیم دی اکسید را تبدیل به قرصهای ۷ گرمی استوانه ای شکل می کنند. ۱۰ درصد نیروگاههای موجود در جهان اجازه دارند مخلوطی از اورانیم اکسید طبیعی و پلوتونیم اکسید مصرف کنند. پلوتونیم از باز سازی میله های سوخته شده در نیروگاهها به دست می آید. روسیه و آمریکا در نظر دارند سلاحهای اتمی خود را که از پلوتونیم درست شده پیاده کنند و در نیروگاه ها مخلوط با اورانیم اکسید به کار برند.

۹) تخلیص میله های سوخته شده در نیروگاهها:

مرحله نهایی زنجیره سوخت اتمی که در آغاز به آن اشاره شد، مربوط به خارج کردن میله های سوخته شده در نیروگاه بعد از کاربری سه تا چهار ساله آنها و مصرف مقداری از اورانیم ۲۳۵ موجود در آنهاست. این میله ها بعد از این مدت کار آیی خود را از دست داده و امکان ادامه واکنش زنجیره ای اتمهای اورانیم در آنها پایین می آید. از این رو پس از هر سه تا چهار سال (برحسب نسبت درصد اورانیم غنی شده) آنها را از درون نیروگاه خارج ساخته و با میله های جدید جانشین می کنند. در میله های سوخته شده هنوز مقدار قابل ملاحظه ای اورانیم شکست پذیر وجود دارد. از سوی دیگر، بر اثر جذب نوترون بر روی اتم اورانیم ۲۳۸ که نسبت در صد آن درون میله های سوخت ۹۵ تا ۹۷ درصد بوده است پلوتونیم ۲۳۹ که شکست پذیر است به وجود می آید که باز یافت آنها مقرون به صرفه است.

میله های سوخته شده بسیار پرتوزا و بسیار گرم اند. از یک سو فرآورده های حاصل از شکست شامل رادیوایزوتوپهایی چون سزیم، استرانسیم، ایتریم و... با نیمه عمر نسبتاً بالا و ۱۳۱ با نیمه عمر کوتاه (۸ روز) ولی پرتوزایی بسیار بالا^{۵۸} است و از سوی دیگر بر اثر جذب نوترونی بر روی ایزوتوپهای اورانیم، عناصری سنگین تر نظیر نپتونیم، پلوتونیم آمریسیم و کوریم در داخل میله های شکست به وجود می آیند. این عناصر همگی پرتوزا هستند و نیمه عمرهای طولانی دارند، که از هزاران تا میلیون ها سال تجاوز می کند (این عناصر را اکتینید گویند). بنابراین قبل از هر کار باید این میله ها خنک شوند و پرتوزایی آنها کاهش یابد. از این رو آنها را در آغاز به مدت سه، پنج و یا

^{۵۸} شدت پرتوزایی رادیو ایزوتوپها نسبت عکس با نیمه عمر آنها دارد. در جرم مساوی هر قدر نیمه عمر رادیو ایزوتویی کوتاهتر باشد رادیو اکتیویته آن بیشتر است و برعکس.

حتی ده سال در استخرهای آبی که در نزدیک نیروگاه وجود دارد قرار می دهند. بدین ترتیب آب استخر مانع از خروج پرتوها به محیط خارج شده و نیز دمای ایجاد شده از اصابت پرتوهای آلفا، بتا و گاما بر روی دیواره فلزی نگهدارنده (که غالبا" از آلیاژ زیرکونیم است) را جذب می کند. آب استخر در مداری مسدود جریان دارد و در تبدیل کننده ها دما را به خارج از استخر منتقل می کند. بعد از توقف اولیه، یا میله ها را برای باز یافت اورانیم و پلوتونیم به کارخانه های ویژه این کار می برند و یا آنها را به عنوان زباله پرتوزا، در انبارهایی با دیواره بتونی و پوشیده از سرب در محل هایی دور از دسترس نگه می دارند. البته همواره جریان دائمی هوا در این انبارها باید وجود داشته باشد. شکل (۵۰) نمونه ای از این انبارها را ارائه می دهد.

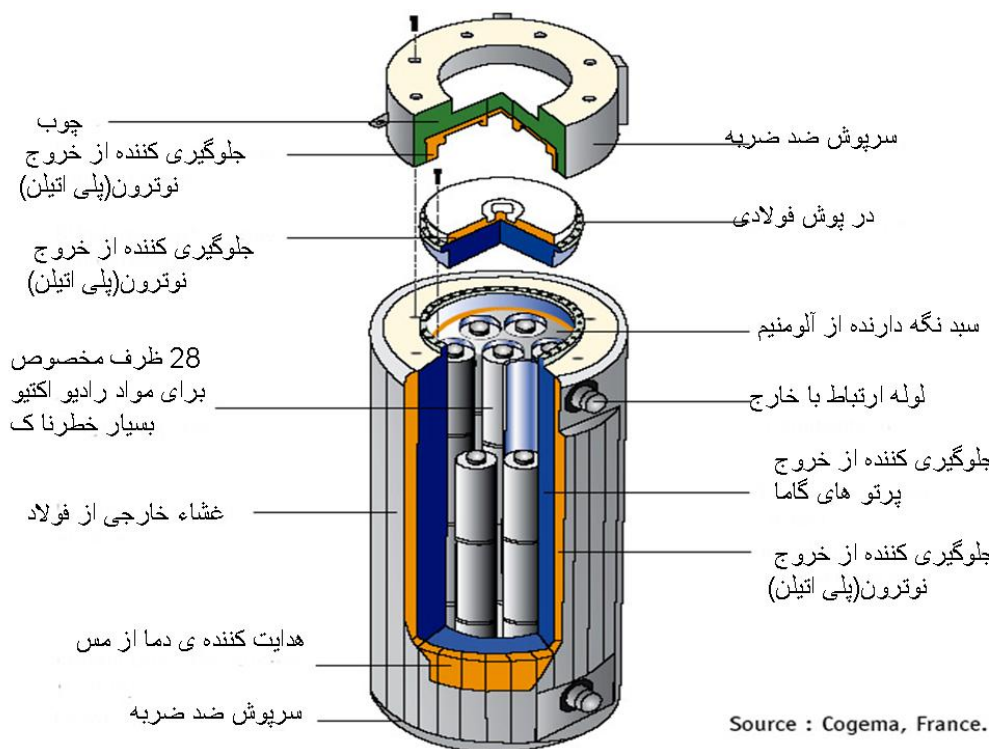
برخی از کشورها مانند امریکا و سوئد، عمل بازیافت را بر روی این میله ها انجام نمی دهند. در سال ۲۰۰۵ مجموع میله های سوخته شده و باز یافت نشده در جهان بالغ بر ۱۲۰۰۰۰ تن بوده و هر سال مقدار ۶۵۰۰ تن بر آن افزوده می شود. غالب این زباله های سنگین صنعت اتمی در استخرهای نزدیک به نیروگاه قرار دارند و مقدار آن ها تا پایان عمر نیروگاههای موجود ۴۴۷۰۰۰ تن تخمین زده می شود که ۱۸/۳ درصد آن مربوط به امریکا، ۱۶/۶ درصد انگلستان، ۱۵/۴ درصد کانادا، ۱۴/۹ درصد فرانسه ۹/۹ درصد کشورهای بلوک شرق سابق، ۷/۶ درصد ژاپن و در نهایت ۳/۶ درصد آلمان خواهد بود.



شکل (۵۰) ظرف مخصوص انبار کردن زباله های رادیو اکتیو خطرناک. این ظرف از سرب ساخته شده است که مانع از خروج پرتوهای پر انرژی می شود. منافذی در قاعده و در سقف این ظروف وجود دارد تا جریان هوا دمای ایجاد شده را به بیرون منتقل کند. برخی از کشورها مانند فرانسه، انگلستان، ژاپن، روسیه و هندوستان کارخانه هایی با مخارج بسیار بالا ساخته اند و در آنها عمل باز یافت را انجام می دهند. برخی دیگر از کشورها مانند، آلمان،

سوئیس، بلژیک و . . . میله های انبار شده در استخرها را بعد از مدتی به کشورهای دیگری که کارخانه باز یافت دارند می فرستند. البته این کار تحت نظارت مطلق آژانس بین المللی انرژی اتمی صورت می گیرد، زیرا در این میله ها عنصر پلوتونیم وجود دارد که تنها با ۵ کیلوگرم آن می توان یک بمب اتمی خطرناک ساخت. خطرناک به این دلیل که نسبت در صد پلوتونیم ۲۴۰ در میله ها بالا است و چون این عنصر خود به خود شکسته می شود، هر آن ممکن است در دست افراد غیر مطلع خود بخود منفجر شود و فاجعه به بار آورد.

رادیوایزوتوپهای خطرناک چه از نظر پرتوایی و چه از نظر ایمنی را باید با دقت و در بشکه های سربی قرار دهند. در موقع حمل و نقل این گونه مواد پرتوزا از کشوری به کشور دیگر یک گروه از افراد پلیس تا مقصد محموله را همراهی و مراقبت می کنند. در شکل (۵۱) نمونه ای از این گونه بشکه ها را ارائه داده و در شکل (۵۲) تصویر وسیله حمل این رادیوایزوتوپها را آورده ام.



شکل (۵۱) ظرف مخصوص برای انتقال زباله های بسیار پرتوزا و خطرناک. همانطور که مشاهده می شود این ظرف باید ایمنی بسیار بالایی داشته باشد، به ویژه در جاده های عمومی باید احتمال تصادف و انتشار مواد پرتوزا را به نظر گرفت. به همین دلیل این ظروف از مواد بسیار مقاوم تهیه می شوند.



شکل (۵۲) وسیله حمل و نقل ویژه مواد رادیو اکتیو.

تعداد کارخانه های تخلیص کننده میله های سوخت در جهان محدود به چند کشور است که در جدول (۹) اسامی آنها آورده شده است.

کشور	محل کارخانه	سال تأسیس کارخانه	نوع نیروگاه
چین	Diwopu(Ganzu) دیوایو (گانزو)	۲۰۰۲	آب معمولی
فرانسه	La Hague لاهاگ	۱۹۷۶	آب معمولی
هندوستان	Kalpakkam, Tarapur کالپاکام - تاراپور	۱۹۹۸ / ۱۹۷۴	آب تحت فشار بالا
ژاپن	Rokkasho-mura توکائی - مورا	۲۰۰۵ ۱۹۷۷	آب با فشار بالا Atr
انگلستان	B205/Sella field Thorp/Sella field	۱۹۶۴ ۱۹۹۴	Magnox, RRG گاز کربنیک و آب
روسیه	Tcheliabinsk-۶۵ چلیابینسک - مایاک ۶۵	۱۹۸۴	آب معمولی Wer

جدول (۹) کارخانه های باز یافت کننده میله های سوخته شده در نیروگاهها.

۱۰) بازیافتی اورانیم و پلوتونیم از میله های سوخت:

میله های سوخته شده که در آغاز بین ۳ تا ۵ در صد اورانیم غنی شده داشتند، بعد از خروج از نیروگاه در آنها حدود ۱ درصد اورانیم ۲۳۵ باقی مانده است. چون این مقدار نسبت به اورانیم طبیعی بیشتر است، در نتیجه باز یافت اورانیم از آنها با صرفه است. با عملیات باز یافت میله های سوخته، احتیاج جهانی به اورانیم طبیعی به میزان ۱۰ تا ۱۵ درصد کاهش خواهد یافت و این به ویژه به دلیل پلوتونیم تولید شده در توده سوخت است. همانطور که قبلاً هم گفته شد، برخی از نیروگاهها مجازند مخلوط اکسید اورانیم و پلوتونیم را به عنوان ماده سوختنی مصرف کنند.

عملیات باز یافت، پیورکس Purex نامیده می شود که مخفف کلمه استخراج پلوتونیم و اورانیم به وسیله حلال های آلی - و بدین ترتیب جدا سازی آنها از فراورده های شکست - است. برای انجام این عملیات، میله های سوخت باید به اندازه کافی سرد شده باشند. در اینجا منظور از سرد شدن، پائین آمدن پرتوزایی است، زیرا پرتوهای رادیو اکتیو در مقیاس بالا ملکولهای ترکیبات آلی را که به عنوان حلال استخراج کننده به کار برده می شوند تخریب خواهند کرد. در جدول (۱۱) فراورده های حاصل از شکست یک نیروگاه با آب تحت فشار را که در آن اورانیم اکسید غنی شده تا حد ۳/۵ درصد در آن وجود داشته می بینید. این نیروگاه در هر روز ۳۳,۰۰۰ مگاوات انرژی حرارتی ایجاد کرده است. در جدول (۱۰) به ازای هر تن اورانیم موجود در نیروگاه و فراورده های حاصل از شکست آن را برحسب کیلوگرم آورده ایم. این جدول مواد باقی مانده در داخل میله های سوخت را مشخص میکند که به مدت ۳ سال در استخر آب خنک شده اند.

عنصر	کیلوگرم/تن	نیمه عمر سال	عنصر	کیلوگرم/تن	نیمه عمر سال
اورانیم	۹۵۵	۴/۵ میلیارد	Y(Lantanid لانتانیدها	۱۰	کوتاه
پلوتونیم ۲۳۸	۰/۱۷	۸۶	gaz(Kr,Xe) گازهای نادر	۵	کوتاه
پلوتونیم ۲۳۹	۵/۷۲	۲۴,۴۰۰	سزیم و ربیدیم Rb , Cs	۴	۱۳۷ Cs ۳۰ سال
پلوتونیم ۲۴۰	۲/۲۱	۶,۶۰۰	زیر کونیم Zr ید ^{۱۳۱} I	۴	کوتاه کوتاه
نپتونیم ۲۳۷	۰/۴۲	۲,۱۴۰,۰۰۰	خانواده پلاتین Ru,Rh,Pd	۴	کوتاه کوتاه
آمریسیم ۲۴۱	۰/۲۲	۴۳۲	مولیبدن Mo	۳	کوتاه
آمریسیم ۲۴۳	۰/۱	۷۳۸۰	فلزات قلیایی خاکی Ba ,Sr	۲	Sr ^{۸۷} استرانسیم ۲۸ سال
کوریم ۲۴۵	۰/۰۰۱	۸۵۳۲	تکنسیم ^{۹۹} Tc	۰/۸	۲۰۰,۰۰۰ سال

جدول (۱۰) مواد موجود در میله های سوخته شده بعد از ۳ سال توقف در استخر آب و پایین آمدن رادیو اکتیو آنها.

این میله ها حاصل از نیروگاهی است که توان انرژی برقی آن ۱۳۷۵ مگاوات در ساعت بوده است. میله های سوخت ۴ سال در نیروگاه فعالیت داشته اند. در جدول نیمه عمر عناصر به وجود آمده نیز ارائه شده است. عناصری که نیمه عمرشان کم تر از یک سال بوده است، به صورت نیمه عمر کوتاه نوشته شده و در سه سال توقف در استخر پرتوزایی آنها در میله های سوخت عملاً^{۵۹} از بین رفته است.

عمل باز یافتی با برش و تکه تکه کردن میله های سوخت و تبدیل آنها به قطعات ۲۵ تا ۳۵ میلیمتری در محیط بسته آغاز می شود. سپس بر روی این قطعات نیتریک اسید می ریزند تا اورانیم اکسید و پلوتونیم اکسید و سایر فراورده های حاصل از شکست در آن حل شود. ولی جدارهای نگهدارنده میله ها که از آلیاژ زیرکونیم است حل نمی شوند.

این جداره ها را جزو زباله های رادیو اکتیو جمع آوری می کنند. بعد از رقیق کردن، محلول اسیدی به دست می آید که غلظت اورانیم در آن در حدود ۲۵۰ تا ۳۰۰ گرم در لیتر و غلظت پلوتونیم ۲/۵ تا ۳ گرم در لیتر است. بر روی این محلول ماده ای آلی به نام تری بوتیل فسفات^{۵۹} اضافه می کنند و مدت زمانی آن را به هم می زنند. این مجموعه شامل دو فاز کاملاً جدا شده از هم است (فاز آبی در زیر و فاز آلی در رو). در این مرحله فاز آبی را از محیط خارج می کنند، این فاز محتوی تمام عناصر پرتوزای خطرناک حاصل از شکست اورانیم است. معمولاً آن را تبخیر کرده و ماده باقی مانده از تبخیر را که حجم چندانی ندارد در شیشه مذاب وارد ساخته، در بشکه های فلزی ضد زنگ قرار داده و سپس در انبارهای زیر زمینی پنهان می سازند. شکل (۵۳) این بشکه ها و طرز انبار کردن آنها را نمایش می دهد. دیوارهای انبار از صفحاتی از سرب پوشیده است و عملیات جابجایی مطلقاً باید به کمک ربات ها و از راه دور انجام گیرد.

عمل جدا کردن دو فاز، دکانتاسیون نامیده می شود. اورانیم و پلوتونیم و اکتینیدها (پلوتونیم، نپتونیم، آمریسیوم و کوریم) در فاز آلی هستند و با شست و شوی این فاز با محلولی مناسب، اورانیم و سایر عناصر این خانواده را به فاز آبی بازگردانده، بعد از تبخیر و اکسید کردن به درون میله های سوخت جدید وارد می کنند.

^{۵۹} Tributyl phosphate. TBP با فرمول $(\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{O})_3\text{PO}$ اولین بار به سال ۱۹۴۵ به وسیله امریکایی ها

برای جدا سازی پلوتونیم به وجود آمده بر اثر شکست اورانیم در نیروگاه آزمایشی پروژه منهتن، مورد استفاده قرار گرفت. از سال ۱۹۵۴ در اغلب کارخانه های جهان استفاده از این ماده آلی به صورت صنعتی برای استخراج اورانیم و پلوتونیم متداول شد.



شکل (۵۳) محل نگهداری بشکه هایی با پرتوزایی بسیار بالا. در این عملیات بشکه ها را باید به وسیله رباتها جا به جا کرد.

عمل باز یافت را نمی توان همواره انجام داد، زیرا بعد از چند بار بازیافت، غلظت اکتیدها افزایش یافته و رادیو اکتیویته میله های سوخت را بالا می برند. آمریسیم ۲۴۱ با انتشار یک پرتو آلفا و کوریوم ۲۴۵ با انتشار ۲ پرتو آلفا تبدیل به نپتونیم ۲۳۷ می شوند که نیمه عمری معادل ۲/۱۴ میلیون سال دارد. در نیروگاهی که ۱۳۰۰ مگاوات ساعت توان الکتریکی دارد در هر سال ۱۴ کیلوگرم نپتونیم تولید می شود.

۱۱) توقف یا از رده خارج کردن:

هنگامی که قرار است فعالیت تأسیسات اتمی (اعم از معدن، کارخانه تخلیص، غنی سازی، بازیافت و یا حتی نیروگاه) متوقف شود، باید به نحوی این کار صورت گیرد که کوچکترین خطری به وجود نیآورد، چه برای کارگران و چه برای محیط زیست. این عملیات را از رده خارج کردن می نامند (Upsetting).

در ژانویه ۲۰۰۳ میلادی بیش از ۱۲۰ نیروگاه اتمی در جهان متوقف شد که اکنون هر یک در مرحله ای از پیاده سازی هستند. میله های سوخته شده چنان که قبلاً" گفته شد، بعد از سرد شدن در استخرها می مانند، انبار و یا باز یافت می شوند. کار در تأسیسات بهره برداری متوقف شده و درهای خروجی معادن، کارخانه های تخلیص یا باز سازی و نیروگاهها مسدود می شوند. در مورد نیروگاهها هوا و دما با دقت بیشتری کنترل خواهد شد و نظارتی دائمی در آنها برقرار می گردد. اگر قرار باشد کارخانه و یا نیروگاه را برای فعالیت دیگری به کار برند باید عملیات پاکسازی دقیقی را به انجام برسانند. در شرایطی که رادیو اکتیویته زیاد نباشد، ابتدا به شست و شوی سطح با آب محتوی مواد جاذب عناصر و یا ترکیبات شیمیایی می پردازند و سپس اگر لازم باشد به روشهای مکانیکی مانند تراشیدن سطح، آلودگی مواد رادیو اکتیو را بر طرف می سازند. سپس تأسیسات مربوط به کارخانه یا نیروگاه را پیاده می کنند. پس از کنترل و اثبات نبود رادیو اکتیویته، این

تأسیسات را در محل‌های دیگری به کار خواهند برد. و در صورت آلوده بودن، آنها را جزو زباله های رادیو اکتیو قرار می دهند. تنها ساختار درونی نیروگاه که شامل قلب نیروگاه و به ویژه مخزن اصلی با غشاء فلزی و جداره های بتون آرمه است در محل باقی می ماند. در صورتی که محل نیروگاه به خاطر ارزش اقتصادی آن مورد نظر باشد و دیواره های بتنی و یا غشاء فلزی پرتوزایی زیادی نداشته باشد، دستور تخریب آن داده خواهد شد. فلزات و مواد بتونی جزو زباله های پرتوزا قرار خواهند گرفت و اجازه داده می شود تا به انبار زباله ها منتقل شوند. بعد از انجام آزمایشهای دقیق در محوط و اثبات نبود کوچکترین آلودگی، اجازه داده خواهد شد تا از محل نیروگاه برای فعالیت دیگری استفاده شود.

برخی از اوقات زمان لازم از بدو توقف نیروگاه تا کاربری مجدد محل آن، سالها و یا حتی نزدیک به یک قرن خواهد بود. مثلاً در آمریکا نیروگاه تروجان (Trojan) با قدرت ۱۱۸۰ مگاوات الکتریکی که با آب تحت فشار کار می کرد، در سال ۱۹۹۳ میلادی متوقف شد. تبدیل کننده ها و پمپ ها در سال ۱۹۹۵ پیاده شدند، قلب نیروگاه در سال ۱۹۹۹ پیاده شد و برای تخریب ساختمان بتونی محافظ و غشاء فلزی آن باید تا سال ۲۰۱۸ صبر کرد. و نیز نیروگاه رانچو-سکو (Rncho-Seco) در آمریکا با توان ۹۱۳ مگاوات الکتریکی که آن نیز با آب تحت فشار کار می کرد، در سال ۱۹۸۹ متوقف شد و تمام تشکیلات آن زیر پوششی شبیه پیله ابریشم قرار گرفت. این نیروگاه تا سال ۲۰۰۸ باید تحت کنترل دائمی باشد و سپس ممکن است اجازه تخریب آن داده شود. در سال ۱۹۹۰ در فرانسه و در منطقه شینون (Chinon) سه نیروگاه با قدرتهای پایین (۷۰ ، ۲۱۰ و ۴۸۰ مگاوات) که با گاز خنک می شدند متوقف شدند و تخریب نهایی آنها برای ۵۰ سال بعد پیش بینی شده است.

موضوع حد مجاز رادیو اکتیویته در مواد ساختمانی باقی مانده از ساختار نیروگاههای اتمی، در حال حاضر مورد بحث در محافل علمی بین المللی محافظت از محیط زیست است. زیرا بهداشت عمومی در آن مطرح است و این حد از یک سو نباید آن چنان زیاد باشد که خطری برای مردم داشته باشد. و از سوی دیگر نباید آنقدر پایین گرفته شود که انتقال میلیونها تن مواد ساختمانی این مؤسسه ها، هزینه را آنقدر بالا برد که مانع از تخریب این نیروگاهها گردد. در زمانی که این نوشته ها را به روز می کنم مسئله پیاده سازی نیروگاهها و مخارج هنگفت آنها مطرح است. گروه مخالف کاربرد انرژی اتمی اذعان می دارند که مخارج پیاده سازی نیروگاهها صد ها بار بیشتر از آن میزانی است که در آغاز ساخت نیروگاهها پیش بینی شده است. بنابراین بهای کیلوات ساعت برق محاسبه شده به مراتب بیشتر از انرژی های فسیلی (نفت و گاز) و یا در حد انرژی های تجدید پذیر (انرژی

باد و یاحرارتی - استفاده از حرارت خورشید - و یا فتوولتائیک.) خواهد شد. این مطلب را در هزینه ساخت و پیاده سازی نیروگاهها بر رسی خواهیم کرد.

در برخی از موارد مقدار پرتوایی درجداره بتونی نیروگاهها چندان قابل اهمیت نیست. کما اینکه برخی اوقات در سنگهای ساختمانی به ویژه از نوع گرانیت که در منازل خود به کار میبریم، پرتوایی طبیعی موجود در آنها بیشتر از بتن های به جا مانده از نیروگاههاست.

۱۲) هزینه ساخت و پیاده سازی نیروگاهها:

برآورد هزینه ساخت یک نیروگاه اتمی بسیار پیچیده و عملاً در برخی از موارد غیر ممکن است. در ساخت یک نیروگاه باید فاکتورهای مهمی را در نظر گرفت. ابتدایی ترین محاسبه مربوط به زمان لازم برای ساخت نیروگاه است، که معمولاً بیش از ده سال طول می کشد. در این زمان نیروگاه علاوه بر اینکه تولیدی ندارد، باید بهره سرمایه در نظر گرفته شده را در محاسبه هزینه آن وارد کرد. عمر نیروگاهها در حدود چهل سال است ولی اخیراً با هزینه های بسیار زیاد ایمنی نیروگاهها را بیشتر کرده و سعی دارند که عمر مفید نیروگاه تا ۶۰ سال ادامه یابد. برخی از اوقات هزینه ایمن کردن نیروگاههای ساخته شده در آغاز صنعت اتمی، از ارزش اولیه آنها بیشتر است. فاکتور مهمی که هزینه زیادی در بر دارد، پیاده سازی نیروگاه است. این عمل در دو مرحله انجام می گیرد. مرحله ابتدایی زمان سرد شدن نیروگاه است. (منظور از سرد شدن پایین آمدن پرتوایی مواد ساختاری نیروگاه می باشد). این زمان در مورد نیروگاه های بسیار عادی ۲۰ سال و در برخی از نیروگاهها ممکن است بیش از ۱۰۰ سال طول بکشد. بیرون آوردن میله های سوخت و تخریب نیروگاه عملاً ده سال طول می کشد. بنابراین باید تمام این محاسبات را با ارزش پول در زمان انجام هر یک از عملیات فوق در نظر گرفت. این فاکتور اخیر همواره غیر قابل پیش بینی است.

نیروگاههایی با توان ۱۰۰۰ مگاوات الکتریکی (یک میلیون کیلو وات) در سال ۷ میلیارد کیلووات ساعت برق تولید می کنند. چنین نیروگاههایی در برنامه تولید برق از اتم، در فرانسه از ۲۵ سال پیش اجرا شده و تا کنون ۵۸ نیروگاه در این کشور وجود دارد که ۷۵ درصد برق این کشور را تأمین می کنند. هزینه ساخت چنین نیروگاههایی از طرف شرکت برق فرانسه بین ۲/۵ تا ۳/۵ میلیارد یورو تا سال ۲۰۰۳ در نظر گرفته می شد. قرار داد ساخت نیروگاه نسل سوم در فنلاند به مبلغ ۳ میلیارد دلار تنظیم شد. ولی چنان که پیش تر ازین گفتم تا کنون بیش از ۶ میلیارد یورو هزینه برده است. این زیان را باید مردم فرانسه بپردازند. این سرمایه گذاری مهم از نظر دولت فرانسه اقتصادی و به صرفه می نمود، و وزیر صنعت وقت فرانسه بر آن صحنه گذاشته بود.

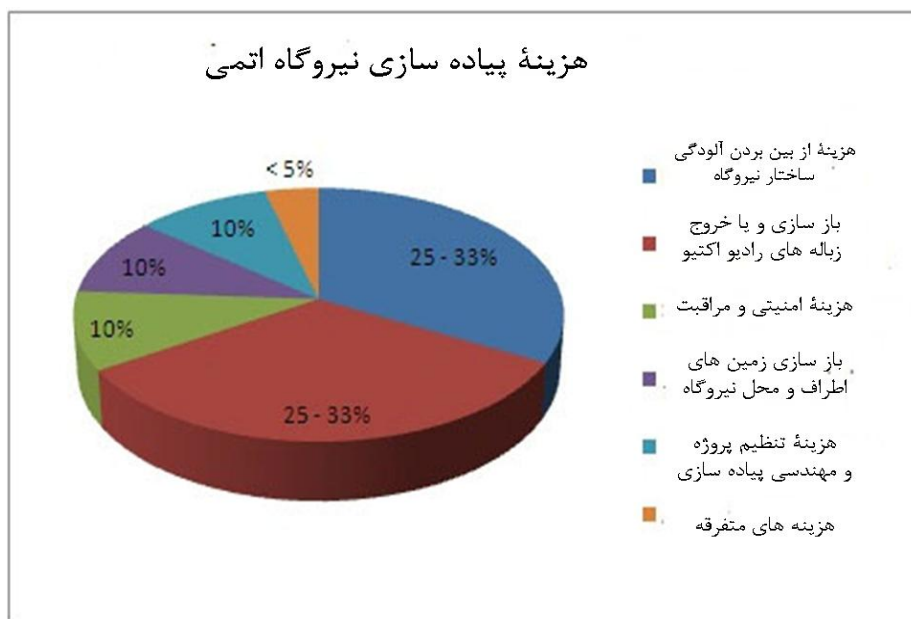
در جمع هزینه ساخت نیروگاه باید: ارزش اورانیم به کار برده شده در آن، هزینه بهره برداری، پیش بینی هزینه های لازم در حین تولید برق، هزینه لازم برای انبار کردن زباله های سوخت نیروگاه در ۴۰ سال عمر مفید آن و در نهایت هزینه پیاده سازی و نگه داری مواد پرتوزای بسیار خطرناک را در بر گیرد. با این محاسبات شرکت تولید برق فرانسه ارزش کیلووات ساعت برق تولید شده را ۴ سانتیم یورو به حساب می آورد. در زمانی که بهای گاز پایین ترین ارزش خود را داشته باشد، ارزش کیلو وات ساعت برق به دست آمده از نیروگاهی که با سوخت گازی برق تولید می کند ۴ سانتیم به ازای هر کیلووات ساعت است. با توجه به برآورد ارزش ساخت و نگه داری و پیاده سازی نیروگاههای هسته ای و نیز با توجه به اینکه ارزش گاز مرتب در حال افزایش است، روش تولید برق به وسیله نیروگاههای اتمی به صرفه به نظر می رسد. و نیز باید گفت نیروگاه اتمی بعد از استهلاک سرمایه گذاری اولیه، ارزش کیلووات ساعت برق تولیدی در آنها حتی به ۱ سانتیم یورو در کیلو وات ساعت هم نمی رسد. با توجه به این استدلال کشورهای فرانسه، روسیه و به ویژه امریکا با هزینه بسیار برای ایمنی بیشتر نیروگاهها، عمر نیروگاههای خود را ۲۰ سال بالا برده اند.

پژوهش های اخیر به ویژه با توجه به حادثه چرنوبیل و انفجار ۴ نیروگاه فوکوشیمای ژاپن، پس از زلزله و سپس سونامی و نیز با توجه به افزایش پیش از پیش زباله های رادیو اکتیو، منطق کار برد نیروگاههای اتمی برای تولید برق به زیر سؤال برده شده است. به ویژه مدافعان محیط زیست و مخالفین کار برد نیروی اتمی، ارزش واقعی کیلووات ساعت برق تولید شده را بیش از آنچه مسئولین کشورهای دارای نیروگاه اتمی اظهار می کنند، می دانند. پیش از این نیز گفتم که کشور فرانسه ۷۵ درصد برق خود را از نیروگاههای اتمی به دست می آورد. ارزش کیلووات ساعت برق در فرانسه ۲۵ درصد کمتر از کشورهای دیگر اروپایی است. این به آن دلیل است که نیروگاههای فرانسوی بیش از ۲۵ سال قدمت دارند و سرمایه اولیه ساخت نیروگاهها را استهلاک کرده اند. کشور بلژیک که بعد از فرانسه بیشترین تولید کننده برق از اتم است (۵۲ درصد مصرف برق کشور)، ارزش کیلووات ساعت برق تولید شده اش از تمام کشورهای اروپایی بالاتر است

بنا به اظهارات ژان ماری شوالیه استاد دانشگاه پاریس، ارزش کیلووات ساعت برق شرکت برق فرانسه (EDF) به طور مصنوعی ثابت نگه داشته شده است. ارزش کیلووات ساعت واقعی برق فرانسه با توجه به نگه داری زباله های رادیو اکتیو و پیاده سازی نیروگاههایی که به پایان عمر خود رسیده اند بیش از ۴۶ یورو به ازاء هر مگاوات ساعت برق است. عملاً ۴۸ درصد بیشتر از پولی است که مردم فرانسه برای مصرف برق خود می پردازند (۳۰/۹ یورو مگاوات ساعت). با توجه به اخباری که مرتب از هزینه ساخت نیروگاه فلامانویل فرانسه که از نسل سوم است می رسد، می توان پیش بینی کرد که ارزش برقی که در آینده (سال ۲۰۱۷ میلادی) از این نیروگاه به دست خواهد آمد، بیش از

۶۰ یورو در هر مگاوات ساعت خواهد بود. در اواخر فوریه (اسفند) ۲۰۱۳ شرکت برق فرانسه اظهار داشت تا سال ۲۰۱۷ به تدریج ارزش کیلووات ساعت برق برای مشتریان ۳۰ درصد افزایش خواهد یافت.

سخنگوی گروه صلح سبز (green peace) می گوید: شرافت و صداقت در گفتار و رفتار کار گزاران نیروگاه های اتمی در جهان وجود ندارد. خطر انفجار و افزایش مواد پرتوزا آینده نوادگان ما را به خطر خواهد انداخت. اضافه می کند که دفن مواد پرتوزا در مؤز (Meuse) ناحیه ای در بیور (Bure) فرانسه، ۱۵ میلیارد یورو پیش بینی شده بود، اکنون دست اندرکاران پرونده دفن زباله های رادیو اکتیو، از رقم ۳۵ میلیارد یورو سخن می گویند. و نیز هزینه پیاده سازی نیروگاهها به مراتب بیش از آن چیزیست که در آغاز ساخت پیش بینی کرده بودند. اکنون این هزینه ها را باید با ارزش پول در زمان پیاده سازی نیروگاهها در نظر گرفت. در شکل (۵۴) نموداری از چگونگی توزیع هزینه های پیاده سازی یک نیروگاه را ارائه کرده ام.



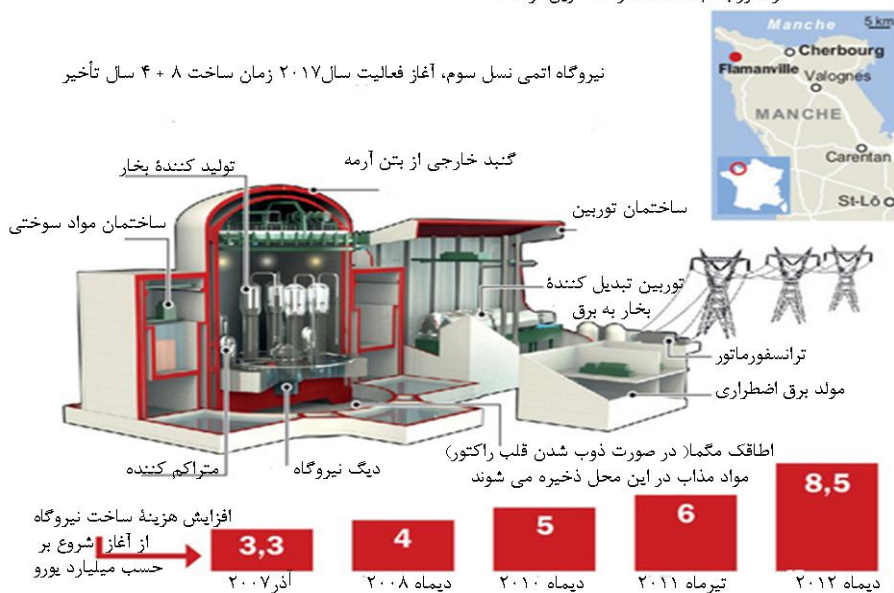
شکل (۵۴) هزینه های مختلفی که در پیاده سازی نیروگاه باید در نظر گرفت.

چنان که پیش از این گفتم هزینه ساخت نیروگاهی که فرانسوی ها به مبلغ ۳ میلیارد یورو در سال ۲۰۰۵ به فنلاند فروخته بودند اکنون به ۶ میلیارد یورو رسیده و این زیان را باید مردم فرانسه از طریق مالیات به پردازند. نمونه دیگر افسانه هزینه ساخت نیروگاهی از همین نوع که از سال ۲۰۰۷ در نزدیکی شهر فلامان ویل فرانسه در حال ساخت است، عدم شفافیت و صداقت مسئولین انرژی اتمی فرانسه را آشکار می سازد. در اوایل دسامبر (آذر) ۲۰۱۲ روزنامه لوموند فرانسه آشکار ساخت که هزینه ساخت این نیروگاه از ۳/۳ به ۸/۵ میلیارد یورو رسیده است. نموداری از این نیروگاه و افزایش هزینه سال به سال آنرا در شکل (۵۵) آورده ام.

آژانس بین‌المللی انرژی اتمی (IAEA)^{۶۰} بعد از پژوهش‌های بسیار نشان داده است که هیچ یک از تکنولوژی‌های تولید انرژی در جهان مزیتی بر دیگری ندارند و حداکثر اختلاف ارزش کیلووات ساعت انرژی به دست آمده از ۵ درصد تجاوز نمی‌کند. همچنین یاد آور شده است که نیروگاه‌های نسل سوم پیشنهاد شده از طرف فرانسوی‌ها، بیشتر از ۵ تا ۶ میلیارد یورو هزینه ساخت دارند. اظهار نظر آنها در سال ۲۰۱۰ با توجه به نیروگاه فنلاند است. چنان که در شکل (۵۵) دیدیم هزینه ساخت نیروگاهی مشابه، اکنون در فرانسه از ۸/۵ میلیارد یورو بیشتر شده است. ساخت این نیروگاه به همین دلیل ۴ سال به تأخیر افتاده است. پژوهش‌های گسترده‌ای در رابطه با مقایسه ارزش کیلووات ساعت برق به دست آمده از روش‌های موجود در جهان، با سوخت‌های مختلف، زغال سنگ، گاز و یا سوخت اتمی انجام گرفته است. مختصری از این پژوهش‌ها را در شکل (۵۶) آورده‌ام.

Réacteur EPR de Flamanville : راکتور با آب تحت فشار فلامانویل فرانسه

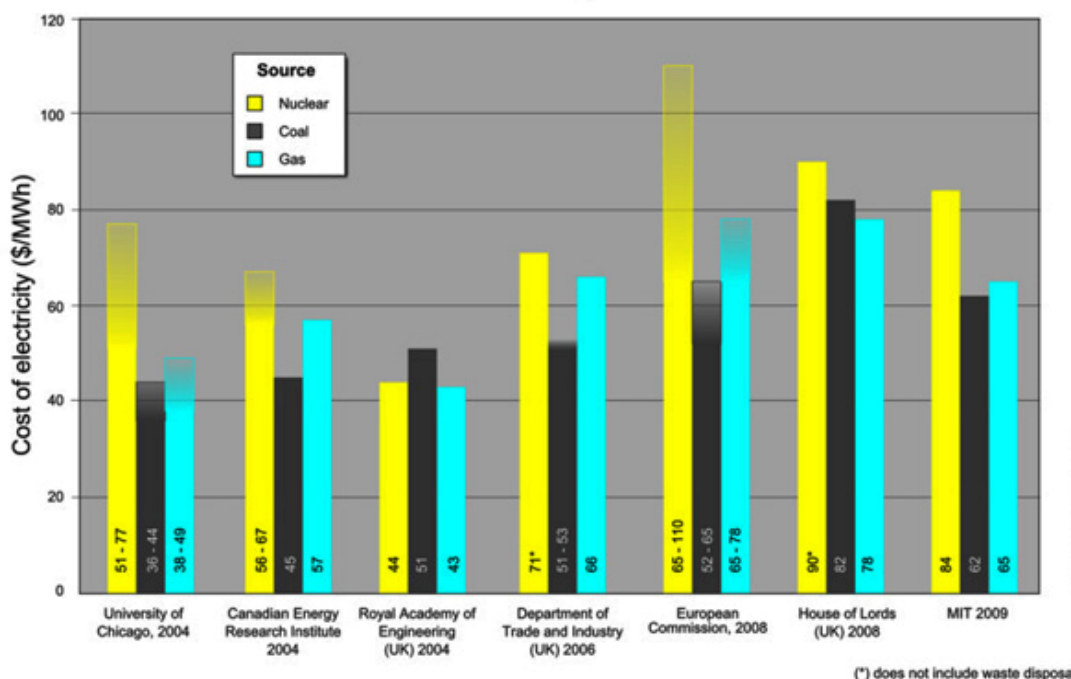
نیروگاه اتمی نسل سوم، آغاز فعالیت سال ۲۰۱۷، زمان ساخت ۸ + ۴ سال تأخیر



شکل (۵۵) نموداری از نیروگاه نسل سوم از نوع خنک کننده و نرم کننده با آب معمولی و با فشار بالا. در این نمودار به ویژه افزایش هزینه ساخت این نیروگاه را بین سالهای ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۲ آورده‌ام.

^{۶۰} International Atomic Energy Agency (IAEA)

Levelised costs of electricity for different studies



شکل (۵۶) نموداری از پژوهشهای متفاوت انجام گرفته در مورد هم ترازای ارزش تمام شده کیلووات ساعت برق از کار برد سه سوخت مختلف: هسته ای، زغال سنگ و گاز بر حسب دلار برای هر مگاوات ساعت برق تولید شده. در تمام این پژوهشها مشاهده می شود که سوخت هسته ای گرانتر از دیگر سوخت ها می باشد. به ویژه پژوهشهای کمیسیون انرژی اروپا هر مگاوات ساعت انرژی هسته ای را در سال ۲۰۰۸ در حدود ۱۱۰ دلار پیش بینی کرده است.

ساختار نیروگاهها و چگونگی تهیه مواد سوختنی آنها را شناختیم و نیز به طور مختصر زیانهایی که پرتوهای مواد پرتوزا بر روی کارگران و محیط زیست ایجاد می کنند را بیان داشتیم. در فصل بعد بیشتر در باره اثر این مواد در محیط زیست صحبت خواهیم کرد. ولی نتیجه ای که از این مختصر به دست آمده این است که داشتن یک یا دو نیروگاه در هر کشوری لازم است. چه از نظر دست یافتن به یک تکنیک پیش رفته و چه از نظر پرستیز. به ویژه با توجه به کاربرد مواد پرتوزا در پزشکی و مستقل بودن کشورها نسبت به فراورده هایی که در این نیروگاهها می توان به دست آورد (مانند کبالت و ید پرتوزا برای مصرف در معالجه بیماری ها و یا نگه داری مواد غذایی).
 اما تولید برق برای تمام ساکنین جهان از این طریق، به نظر نگارنده روشی خطرناک و آینده مجهولی را برای نسلهای بعد تدارک می بیند و باید مانع از عمومیت یافتن این روش شد. از سوی دیگر کشورهایی که امکان تولید برق به طور کلی انرژی را به کمک روشهای دیگر دارند، تولید انرژی با ساخت نیروگاههای اتمی برای آنها مقرون به صرفه نمی باشد.^{۶۱}

^{۶۱} <http://www.assemblee-nationale.fr/۱۳/budget/plf۲۰۱۲/b۳۸۰۰-tiii-a۱۴.asp>

فصل سوم

زباله های اتمی

و

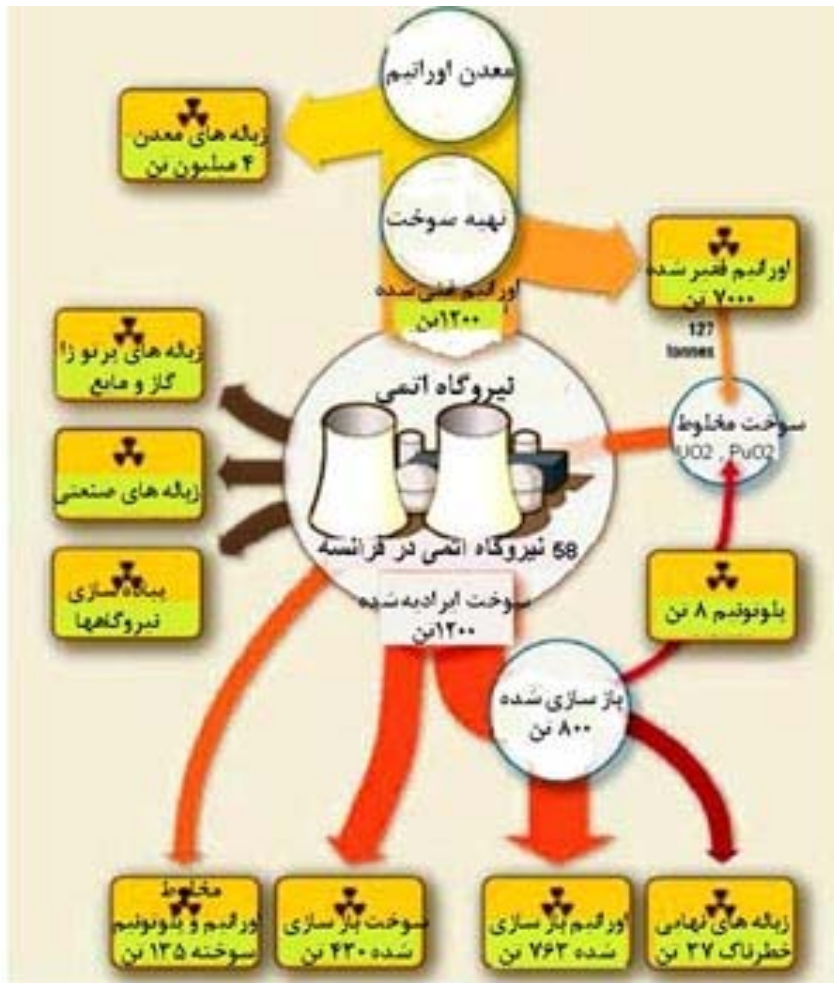
آثار زیست محیطی مواد پرتوزا

۱) زباله های حاصل از نیروگاهها:

همان طور که تا کنون ملاحظه شد، صنعت تولید الکتریسیته از طریق شکست اتمهای اورانیم همواره توأم با تولید فراورده هایی است که از خود پرتوهای مختلفی منتشر می کنند و بدین سبب آنها را عناصر و یا ایزوتوپهای پرتوزا (رادیو اکتیو) می نامند. پیشتر با آنها آشنا شدیم و در اینجا با فواید و یا مخاطراتی که ایجاد می کنند آشنا خواهیم شد. ابتدا از زباله های نیروگاهها صحبت خواهیم کرد و خواهیم دید که محل نگهداری این زباله ها غالباً " بر حسب نیمه عمر آنها تعیین و دسته بندی می شوند. سپس آثار زیست محیطی این زباله ها را بررسی می کنیم.

باید توجه داشت اعداد و ارقامی که کشورهای مختلف در مورد زباله های پرتوزای خود ارائه می دهند همواره واقعیت ندارد. تعریف زباله پرتوزا از نظر دولتها کاملاً " متفاوت با تعریفی است که مدافعان محیط زیست ارائه می دهند. دولتها مقدار پلوتونیم به وجود آمده را جزو زباله های خطرناک به حساب نمی آورند و آن را نوعی محصول برای تولید بمب های اتمی در نظر می گیرند. حال آنکه این مواد خطرناک چه در روی زمین و چه در زراد خانه های نظامی، پرتوزا هستند و مقدار پرتوزایی سیاره زمین را در مجموع بالا می برند. آنها همچنین زباله های حاصل از استخراج سنگ معدن را نادیده می گیرند و حال آنکه این مواد حاوی فرزندان خانواده اورانیم ۲۳۸ است که همگی در درون معدن با رادیو ایزوتوپ مادر در حال تعادل بوده و اکنون در سطح زمین، هوا و یا رودخانه ها پراکنده شده اند. از سوی دیگر دولتها آینده نگر نیستند و با توجه به اینکه عمر نیروگاههای موجود در جهان تقریباً " به پایان رسیده و یا در بیست سال آینده به پایان خواهد رسید، زباله های پیاده سازی این نیروگاهها را بحساب در نمی آورند

گروههای مدافع محیط زیست، به ویژه گروه صلح سبز (green peace) و نیز گروهی دیگر به نام "خروج از اتم" Sortir du nucléaire بسیار فعال اند و معتقدند که در غالب موارد آمار ارائه شده توسط دولتها را باید در ۵۰ و گاه حتی ۱۰۰ ضرب کرد. در شکل (۵۷) نموداری از انواع زباله هایی ارائه شده که در صنایع اتمی فرانسه، به وسیله ۵۸ نیروگاه و برای تولید ۷۸٫۵ درصد برق این کشور به وجود می آید آورده ایم. این ارقام به سهولت مشخص می کند اگر قرار باشد همه کشورهای جهان برق خود را از اتم به دست آورند چه مقدار زباله خطرناک اتمی بر روی زمین باقی خواهد ماند.



شکل (۵۷) نموداری از مقدار و چگونگی زباله های پرتوزای ۵۸ نیروگاه اتمی در کشور فرانسه. همچنانکه در نمودار مشخص می شود تنها ۴ میلیون تن زباله معدن تولید می شود که تمام فرزندان پرتوزای اورانیم ۲۳۸ را در بر دارد. به شکل (۲۷) صفحه ۵۰ تسلسل خانوادگی اورانیم ۲۳۸ مراجعه کنید. و نیز در این نمودار به ۳۷ تن زباله های نهایی خطرناک با پرتوزایی بالا، که پس از بازسازی میله های سوخت تولید می شوند، در پایین تصویر دقت کنید.

۲) زباله های پرتوزا:

زباله های پرتوزا از منابع مختلفی تولید می شوند:

نخست از صنعت تولید برق به وسیله شکست اتمهای اورانیم و پلوتونیم یا در واقع تهیه سوخت برای نیروگاهها و سپس فراورده های حاصل از شکست اتمها، که بخش بسیار مهمی از زباله های پرتوزا و خطرناک برای ساکنان کره زمین را تشکیل می دهند.

سپس زباله های حاصل از کار برد ایزوتوپهای پرتوزا در صنعت و در مرحله نهایی زباله های حاصل از کار برد رادیوایزوتوپها در پزشکی است.

زباله های حاصل از استخراج سنگ معدن بخش مهمی از زباله های پرتوزا را تشکیل می دهند. به طور کلی زباله های حاصل از صنایع اتمی را به سه گروه تقسیم می کنند:

گروه اول: زباله هایی با پرتوزایی نسبتاً پایینی ولی حجم بسیار زیاد و نیمه عمر کوتاه که غالباً از اجسام و یا لباسهایی تشکیل شده اند که به نحوی با مواد رادیو اکتیو در تماس بوده و به آن آلوده شده اند. مانند دستکش ها، بلوزهای آزمایشگاهی، ظروفی که مواد پرتوزا با نیمه عمر کوتاه در آنها حمل و نقل شده و یا از همه حجیم تر، مصالح ساختمان خارجی نیروگاهها. طولانی ترین نیمه عمر در این مواد می تواند سزیم و ایتريم، اسکاندیم و استرانسیم پرتوزا باشد که نیمه عمر آنها از ۳۰ سال تجاوز نمی کند و بعد از ۳۰۰ سال بکلی محو می شوند. و چون پرتوزایی آنها چندان نیست، دمای زیادی ایجاد نمی کنند و می توان آنها را در سطح زمین و در نقاط دور از دسترس و فاقد ارزش زراعی و یا ساختمانی به صورت بسته های بسیار فشرده نگه داشت. این زباله ها بعد از فشرده شدن، حجمی در حدود میلیونها متر مکعب در سال اشغال خواهند کرد که فقط ۱۵ درصد آنها واقعاً زباله پرتوزا و ۸۵ درصد بقیه مواد به کار رفته در بسته بندی و یا لوازم بهداشتی هستند.

گروه دوم: این گروه شامل موادی با پرتوزایی متوسط است و حرارت تولید شده از آنها چندان زیاد نیست و مقدار مختصری از رادیو ایزوتوپهایی با نیمه عمر نسبتاً بالا دارند و به همین دلیل نمی توان آنها را در سطح زمین انبار کرد. این مواد بیشتر از کارخانه های باز یافتی میله های سوخت به دست می آیند. این زباله ها را در مرکز قالب هایی قرارداده و بر روی آنها بتن می ریزند به نحوی که به صورت قطعات بتنی به ابعاد یک متر مکعب درآیند. تا یافتن محلی مطمئن و همیشگی برای این زباله ها، فعلاً آنها را در محلهایی مطمئن در نزدیک نیروگاهها و به ویژه در استخرهای عمیق نکه می دارند. در سالهای اخیر در کشورهای که نیروگاه اتمی دارند، قوانین و مقرراتی بسیار جدی وضع شده است. باید گفت از آغاز کاربرد اتم برای تولید برق (۱۹۵۰ میلادی) تا دهه ۱۹۸۰ و بلکه تا سال ۱۹۹۰ کنترل جدی در مورد مواد زاید نیروگاهها و زباله های پرتوزا وجود نداشت. غالباً این زباله ها را در نواحی دور افتاده و خارج از دید مردم رها می کردند و حتی فراموش می کردند که زباله ها را کجا ریخته اند. در سالهای اخیر مدافعان محیط زیست این تخلف کاری ها را آشکار ساخته اند. و گزارشهایی همراه با تصویر محل این زباله ها در رسانه های عمومی منتشر کرده اند.

در فصل دوم یک نمونه از ۸۸۰۸۲ بشکه رها شده در طبیعت را که حاصل از زباله های استخراج اورانیم از معدن بود ارائه کردم. اما در سالهای اخیر این مواد را در بشکه های بتنی انبار می کنند.

چنانچه پیشتر گفتم اورانیم طبیعی و به ویژه فرزندان خانواده اورانیم ۲۳۸ باقی مانده از معدن مرتب گاز رادن تولید می کنند و از تخریب اتمهای گاز رادن، سرب ۲۱۰ با نیمه عمر ۲۲ سال تولید می شود که نشر دهنده پرتو آلفا است. باید توجه داشت که نزدیک شدن حتی به فاصله ۵۰۰ متری این بشکه ها بسیار خطرناک است. در شکل (۵۸) تصویر تعدادی از این بشکه های بتونی را ارائه کرده ام.



شکل (۵۸) تصویر تعدادی از بشکه های بتونی محتوی مواد پرتوزای خطرناک. باید گفت در بتون این بشکه ها مقدار زیادی از املاح سرب برای جلوگیری از نشر پرتوهای خطرناک وارد کرده اند.

در فرانسه فعلاً این دسته از زباله ها را در لاهاک La Hague (Manche) ناحیه ای در غرب فرانسه و در مارکول Marcoule (Gard) (در جنوب فرانسه) نگه می دارند. حجم این مواد در بتن ۰/۳۲ مترمکعب به ازای هر تن اورانیم به کار رفته در نیروگاه است.

گروه سوم: این دسته از زباله ها، پرتوزایی بسیار بالا و نیمه عمرهای بسیار طولانی دارند و در حدود ۹۲ درصد پرتوزایی تولید شده به وسیله صنایع اتمی را تشکیل می دهند. بخشی از این زباله ها شامل میله های سوخت اتمی مصرف شده ولی باز یافت نشده در نیروگاههاست. برای مثال نیروگاههای آمریکایی، سویسی و یا سوئدی که حجمی معادل با ۱/۶ متر مکعب زباله به ازای هر تن اورانیم سوخته شده در نیروگاهها دارند، آنها را باز یافت نمی کنند. ولی اگر عمل باز یافت انجام گیرد، حجم آن بسیار کمتر و در حدود ۰/۱۳ متر مکعب به ازای هر تن اورانیم سوخته شده خواهد شد.

در فرانسه این زباله ها را به صورت استوانه های ۲۰۰ لیتری در می آورند که حجم مجموع آنها کمتر از ۲۰۰ متر مکعب در سال برای ۵۸ نیروگاه فعال است. در شکل (۵۹) نمونه ای از بشکه هایی که رادیو ایزوتوپهای بسیار خطرناک را در آنها نگه می دارند ارائه شده است.



شکل (۵۹) تصویری از بشکه‌هایی که زباله‌های بسیار خطرناک را در آن نگه می‌دارند. توجه شود این بشکه خالی است و کارگری که نزدیک آن ایستاده بشکه را به کمک تله کماند به اطاق زباله‌های بسیار خطرناک هدایت می‌کند.

برخی از رادیو ایزوتوپ‌هایی که در این دسته از زباله‌ها وجود دارند.

استرانسیم ۹۰ با نیمه عمر ۲۸ سال	سزیم ۱۳۷ با نیمه عمر ۳۰ سال
آمریسیم ۲۴۱ با نیمه عمر ۴۳۰ سال	آمریسیم ۲۴۳ با نیمه عمر ۷۴۰۰ سال
پلوتونیم ۲۳۹ با نیمه عمر ۲۴۰۰۰ سال	تکنسیم ۹۹ با نیمه عمر ۲۱۳۰۰۰ سال

این زباله‌های بسیار خطرناک را فعلاً^{۶۱} در انبارهای بتونی با دیواره‌های بسیار ضخیم مجهز به دستگاه‌های تهویه پرقدرت، نگه می‌دارند. چون این زباله‌ها دمای زیادی تولید می‌کنند، پمپ‌های تهویه باید به طور مداوم هوای سالن‌های نگهداری را خنک کنند. برنامه‌های پژوهشی بسیاری برای از بین بردن پرتوزایی این زباله‌ها در نظر گرفته شده و در مرکز اتمی فرانسه تا حدی به نتایج قابل قبولی دست یافته‌اند که مبتنی بر ایرادیه کردن این مواد به وسیله ذرات شتاب داده شده است که آنها را تبدیل به ایزوتوپ پایدار کنند.

مقدار زباله‌ای که هر فرد فرانسوی در سال تولید می‌کند - بنا به تخمین‌هایی که مرکز انرژی اتمی این کشور داده ۲۵۰۰ کیلوگرم در سال است^{۶۲} که ۱۰۰ کیلوگرم آن را جزو مواد سمی (پلاستیک، باتری‌های مصرف شده، مواد شوینده و غیره) می‌دانند. از سوی دیگر زباله اتمی فرانسه به ازای هر نفر فرانسوی یک کیلوگرم در سال است (البته پلوتونیم بسیار خطرناک تولید شده را که در زرادخانه‌های نظامی نگهداری می‌شود جزو زباله محسوب نمی‌کنند). بنا به نظر مرکز انرژی اتمی فرانسه، در این مقدار تنها ۱۰ گرم زباله خطرناک اتمی وجود دارد. با توجه به جمعیت فرانسه که در حدود ۶۵ میلیون نفر است، مقدار تولید زباله اتمی خطرناک ۶۵۰ تن در سال است. حال فرض کنید تمام جهانیان بخواهند مانند فرانسه عمل کنند و ۷۵ درصد الکتریسیته خود را از طریق انرژی اتمی تولید کنند. با جمعیت کنونی کره زمین و به فرض اینکه پلوتونیم تولید شده هم به عنوان سوخت اتمی در نیروگاهها مصرف شود، عدد ۱۰ گرم را باید در ۷ میلیارد نفر ضرب کرد. بنابراین ۷۰ هزار تن زباله پرتوزای بسیار خطرناک در هر سال بر روی کره زمین تولید خواهد شد، که نیمه عمر

^{۶۱} AREVA Combustible - Areva.com

متوسط آن از هزاران سال بیشتر است. بنابراین معتقدم که تولید الکتروسیسته به وسیله اتم برای همهٔ جهانیان غیر ممکن است و به همین خاطر کشورهای پیشرفتهٔ صنعتی نیز در پی یافتن راه حلی مناسب تر از انرژی هسته ای هستند.

چنانچه که پیشتر گفته شد، بی نظمی در کار انبار کردن زباله های پرتوزا اعتراض مدافعان محیط زیست را برانگیخته و آنها را به افشاگری در این باره واداشته است. در اینجا چند نمونه از این افشاگریها را ذکر می کنیم:

شرکت ملی برق فرانسه EDF اعتراف می کند که محلی برای انبار تریتم (ایزوتوپ پرتوزای هیدروژن) ندارد. رادیوایزوتوپ هیدروژن یک پروتون و دو نوترون دارد و ناپایدار است و نیمه عمری معادل با ۱۲/۳۳ سال دارد. این رادیو ایزوتوپ در آب آغشته به بور در مدار اولیه خنک کننده نیروگاهها تولید می شود. اصابت یک نوترون به ایزوتوپ سنگین هیدروژن موجود در آب، آن را تبدیل به تریتم پرتوزا می کند. شرکت ملی برق فرانسه به سادگی این مادهٔ پرتوزا را به آب رودخانه ها و یا دریا می ریزند و تصور می کنند چون نیمه عمر آن ۱۲/۳۳ سال است از بین خواهد رفت! در حالی که باید ۱۲۳ سال صبر کرد تا پرتوزایی آن از بین برود. مقدار تریتم ریخته شده در رودخانهٔ گارون (Garonne) واقع در ناحیه گلفش (Golfech) حاصل از دو نیروگاه به حدی بوده که در هر ثانیه ۲۲۰۰۰ میلیارد از اتمهایش تخریب می شده است. به عبارت دیگر باید این عدد را در ۶۰ ثانیه و ۶۰ دقیقه و ۲۴ ساعت و ۳۶۵ روز و ۱۲۳ سال ضرب کرد تا تعداد کل اتمهای رادیو اکتیو ریخته شده در رودخانه به دست آید! یعنی عدد ۸/۵ و ۲۳ صفر در مقابل آن. این تعداد اتم تنها معادل ۴/۲ گرم تریتم می باشد. پرتوزایی عناصر خطرناک با نیمه عمر بالا را با راندمان بالای تولید این رادیوایزوتوپها مجسم کنید.

در هر لیتر آب رودخانه بیش از ۱۰ بگرل رادیو اکتیویته وجود داشته که بخشی از آن مربوط به صدها میلیون بگرل کبالت و سزیم با نیمه عمرهایی به ترتیب ۵/۶ سال و ۳۰ سال است. جو زمین نیز از این رادیو ایزوتوپها محروم نبوده است، ۲۳ هزار میلیارد بگرل تریتم به صورت ملکول آب و ۱۵۰۰ میلیارد بگرل، گازهای نادر (کریپتون با نیمه عمر ۱۰/۷ سال) و هالوژنها (ید ۱۳۱ با نیمه عمر ۸ روز) در فضا پراکنده شده است. علاوه بر ید ۱۳۱، در اثر شکست اتم اورانیم، ید ۱۲۹ با نیمه عمر ۱۵/۷ میلیون سال و سلنیم ۷۹ با نیمه عمر ۲۹۵۰۰۰ سال به وجود می آید که هر دو آلوده کنندهٔ جو زمین اند. زیرا این عناصر به سهولت تصعید شده و در فضا پراکنده می شوند. راندمان تولید سلنیم به ازای هر هزار مگاوات ساعت برق ۵/۶ گرم و راندمان تولید ید ۱۲۹ به ازای همین مقدار برق تولید شده ۱۲۳ گرم است. یعنی در فرانسه که ۵۸ نیروگاه اتمی و به طور مجموع ۶۳۰۰۰ مگاوات توان الکتریکی دارد، در هر سال ۲۲۵ کیلو گرم سلنیم و ۹۵۰ کیلو گرم ید تولید می شود.

قلب یک نیروگاه اتمی بعد از یک سال فعالیت، معادل ۱۰۰۰ بمب اتمی که بر روی هیروشیما انداخته شد - صدها هزار نفر را کشت - مواد پرتوزا تولید می کند. حال تصور کنید میله های سوختی که به مدت ۳ تا ۴ سال در درون نیروگاه بوده اند در موقع خروج از نیروگاه چه پرتوزایی دارند و بعد از اقامت ۳ تا ۵ سال در استخرهای آب و از دست رفتن رادیو ایزوتوپهایی با نیمه عمر کوتاه هنوز چه مقدار رادیو ایزوتوپ سزیم ۱۳۷ با نیمه عمر ۳۰ سال و استرانسیم ۹۰ با نیمه عمر ۲۸ سال و تکنسیم ۹۹ با نیمه عمر ۲۱۳,۰۰۰ سال و ید ۱۲۹ با نیمه عمر ۱۵/۷ میلیون سال درون آنها باقی مانده است. باید گفت که راندمان تولید این عناصر در موقع شکست اورانیم از بقیه عناصر جدول تناوبی بیشتر است.

در یک شماره ویژه مجله فرانسوی پژوهش (La Recherche) در باره زباله های پرتوزای فرانسه آمده است: « یک سال تولید برق در فرانسه از طریق نیروگاههای اتمی ۳۰۷۷ بشکه ۵۲۰ کیلوگرمی زباله با پرتوزایی بالا و متوسط ایجاد می کند. برای انبار کردن آنها در لاهگ باید هر سال ۲۳۶ حلقه چاه عمیق حفر شود که در هر یک از آنها می توان ۱۳ بشکه را قرارداد. » البته هنوز این کار صورت نگرفته است و زباله هایی با پرتوزایی بالا در تمام دنیا در سطح انبار می شوند تا تصمیم نهایی در مورد آنها گرفته شود.

در باره حادثه چرنوبیل باید به طور جداگانه صحبت کرد^{۶۳}، ولی در اینجا به گزارش سازمان ملل در باره اثرات این حادثه توجه کنید. بنا براین گزارش یک میلیون نفر بر اثر حادثه چرنوبیل به مواد پرتوزا آلوده شده اند و بنا به گزارشی جدید تر^{۶۴} بیست سال بعد از حادثه چرنوبیل، گوسفند های انگلیسی هنوز آلوده به مواد پرتوزا هستند. وزیر بهداشت انگلستان اعلام داشت که ۲۰۰,۰۰۰ رئیس گوسفند انگلیسی در روی زمین هایی چرا می کنند که آلوده به زباله های پرتوزا است. این مواد پس از حادثه چرنوبیل به وسیله باد به این زمینها منقل شده است. اراضی ۳۷۵ دهکده به این مواد پرتوزا آلوده هستند: ۳۵۵ دهکده در ایالت گال (Galles) و ۱۱ دهکده در اکوس (Ecosse) و ۹ دهکده در خود انگلستان. هیچ یک از این گوسفند ها را بدون مجوز مخصوص نباید از این دهکده ها خارج کرد. گوسفندهایی که مقدار پرتوزایی موجود در بدنشان از حد مجاز بیشتر است، با نشانه مخصوصی مشخص می شوند و باید چندین ماه در چراگاههای غیر آلوده بچرند تا پرتوزایی بدن آنها به حد مجاز برسد و سپس وارد در زنجیره مواد غذایی انسانها شوند. این خبر در زمانی منتشر شده است که تونی بلر قصد داشت ساخت نیروگاههای اتمی جدیدی را به تصویب مجلس عوام انگلستان برساند. تمام نیروگاههای انگلستان فرسوده اند و همگی باید تا سال ۲۰۳۵ بر چیده شوند.

^{۶۳} به فصل هشتم کتاب ستارگان، زمین و زندگی نوشته نگارنده و موجود در وب سایت نگارنده مراجعه کنید.

^{۶۴} Resosol.org/infonuc/news/۲۰۰۶_news_nuc۰۶.htm

در بارهٔ حادثهٔ فوکوشیما به گزارشی از آخرین تحولات حادثهٔ نیروگاههای فوکوشیما توجه کنید.^{۶۵}

حادثهٔ نیروگاههای فوکوشیما ژاپن در ۱۱ مارس ۲۰۱۱ اتفاق افتاد و این حادثه شامل نیروگاههای ۱، ۲، ۳ و ۴ و استخر خنک کنندهٔ میله های سوخت می شد. با تشخیص گاز کزنون - یکی از گازهای نادر و جزو فراورده های حاصل از شکست اورانیم است - در فضای اطراف نیروگاهها، به نظر می رسد که زمین لرزه قبل از سونامی صدمه ای جدی به قلب نیروگاه ها وارد کرده است. سپس در اثر سونامی و در اثر قطع برق گروههای تولید کننده برق ایمنی و توقف پمپ های خنک کنندهٔ نیروگاه، دمای درونی نیروگاه بالا رفت. در دمای بالا آب خنک کنندهٔ نیروگاه و آب نرم کنندهٔ نوترونها، تجزیه شده، و از تجزیهٔ آنها هیدروژن و اکسیژن به وجود آمد. اولین انفجار در این نیروگاه انفجار گاز هیدروژن بود که سقف و مواد سوختنی درونی نیروگاه را با فشار زیاد به خارج پرت کرد. (در حادثه چرنوبیل نیز ابتدا گاز هیدروژن حاصل از تجزیهٔ آب منفجر شد.)

در اثر جهش و انتشار مواد پرتوزا در جو و محوطهٔ اطراف نیروگاه، ذرات ریز غبارمانندی متشکل از مواد رادیواکتیو در فضا پراکنده شدند. چندی بعد در اثر ریزش باران این مواد رادیواکتیو به صورت مواد محلول (ید) و نیز به صورت رسوباتی به ویژه متشکل از سزیم، تلور، باریم و فرزندانش آنها بر روی زمینها و آبهای سواحل نزدیک به نیروگاه وارد شد. به نحوی که در زمان حادثه و زمانی طولانی بعد از آن تا شعاع ۳۰ کیلومتری، اقامت چند ساعته منجر به مرگ افراد و جانوران می شد. به همین دلیل در حدود ۲۵۰ هزار نفر افراد از ساکنان حوالی نیروگاهها را از محیط دور کردند.

بنا بر گزارش انستیتو رادیوپروتکسیون و امنیت هسته ای (IRSN)^{۶۶} در ۱۲ آوریل ۲۰۱۱ در شعاعی در حدود ۳۰ کیلومتر از مرکز نیروگاهها، خاکهای اطراف تا عمق ۵ سانتیمتر آلوده به مواد رادیواکتیو بودند. این رادیو ایزوتوپها عبارتند از:

الف) ید ۱۳۱ و ید ۱۳۲

ب) سزیم رادیواکتیو ۱۳۷، ۱۳۴ و ۱۳۶

ت) تلور ۱۳۲ که بعد از تجزیه فرزندش ید ۱۳۲ به وجود می آید.

ث) باریم ۱۴۰ که بعد از تجزیه فرزندش لانتان رادیواکتیو ۱۴۰ به وجود می آید.

همهٔ این رادیو ایزوتوپها پرتو گاما تولید می کنند که سبب افزایش مقدار دوز رادیواکتیو در محیط می شود.

۱) قبل از ۱۵ مارس مقدار دوز در محیط برابر با ۰/۰۵ میکروسیورت در ساعت و متر مکعب بود و این مقدار دوز برابر با رادیواکتیویتهٔ طبیعی موجود قبل از حادثه می باشد.

^{۶۵} Estimation des doses reçues au Japon par ... - La radioactivité

^{۶۶} Institut de Radioprotection de sureté nucléaire

۲) ۱۵ و ۱۶ مارس پیک حد اکثر مقدار دوز به ۱/۵ میکرو سیورت در ساعت رسید و در نتیجه مخلوط رادیوایزوتوپها ابتدا در فضا پراکنده شده و سپس همراه باران به زمینها و آبهای اطراف راه یافتند.

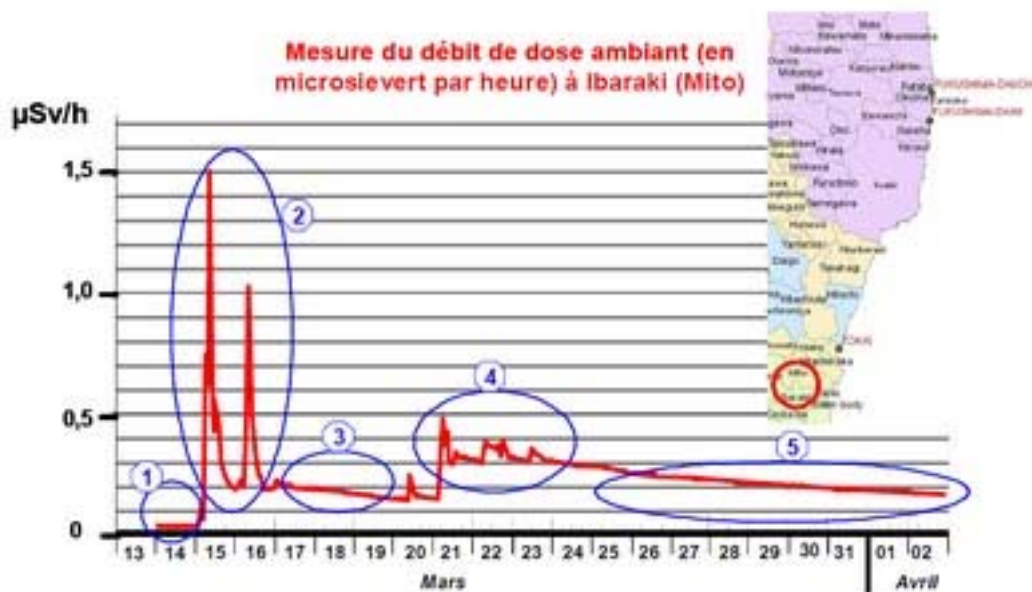
۳) از روز ۱۷ مارس به صورت دائمی پیک مقدار دوز در حدود ۰/۲ میکروسیورت در ساعت و در متر مکعب ثابت ماند. یعنی مقدار آن بیشتر از دوز در ۱۴ مارس بود. این مقدار دوز مربوط به پرتوهای منتشره از رسوبات مواد پرتوزا بر روی زمین بود. این کاهش جزئی پرتوزایی مربوط به از بین رفتن رادیوایزوتوپهایی بود که نیمه عمر کوتاه داشتند (تلور ۱۳۲، ید ۱۳۲ و ید ۱۳۱).

۴) از ۲۰ تا ۲۳ مارس پیک حداکثری دیده شد که مربوط به جهش دوباره رادیواکتیویته درون نیروگاههای فوکوشیما بود. اگر چه اهمیت کمتری از پیک قبلی مربوط به انفجار ۱۵ مارس داشت ولی سبب افزایش مقدار دوز تا ۰/۳ میکروسیورت در ساعت شد. در نتیجه رسوبات جدیدی با ریزش باران بر روی زمین نشست.

۵) بعد از ۲۴ مارس مقدار دوز در محیط به حالت اولیه خود برگشت. ولی در اثر این حادثه زمینهای اطراف نیروگاه تا شعاع ۳۰ کیلومتری و تا عمق ۵ سانتیمتر آلوده به رادیوایزوتوپ های بسیار خطرناک نظیر سزیم ۱۳۷ شده و جانوران موجود در این نواحی و در دریا نیز آلوده به مواد پرتوزا شده بودند. به نحوی که حتی تا اوایل ژانویه ۲۰۱۳ ماهی هایی که در حوالی فوکوشیما صید می شد، بنا به گزارش شرکت برق ژاپن توپکو (Tepco)^{۶۷} دوز موجود در بدن آنها ۲۵۰۰ بار بیشتر از دوز استاندارد بود. بنا به گزارش این شرکت مقدار دوز موجود در نوعی از ماهی های صید شده به نام پرشه (Perche) نه چندان دور از نیروگاههای فوکوشیما ۲۵۴۰۰۰ بکرل در هر کیلوگرم رادیواکتیویته سزیم ۱۳۷ را داشته است^{۶۸}. چنان که پیش از این گفتم یک بکرل معادل یک تجزیه در ثانیه است.) و حال آنکه پرتوزایی رادیو ایزوتوپهای طبیعی در بدن این نوع ماهی ها باید ۱۰۰ بکرل به ازای هر کیلوگرم باشد. در شکل (۶۰) نموداری از تحولات آلودگی محیط در اثر حادثه فوکوشیما را ارائه کرده ام.

^{۶۷} The Tokyo Electric Power Company, Incorporated

^{۶۸} http://french.ruvr.ru/۲۰۱۳_۰۱_۱۸/Le-poisson-toujours-contamine-par-la-radioactivite-de-Fukushima



شکل (۶۰) تحولات مقدار دوز رادیواکتیویته بعد از حادثه نیروگاههای فوکوشیما ژاپن از روز ۱۳ مارس تا ۳ آوریل ۲۰۱۱.

در فرانسه تا پایان سال ۲۰۰۴ میلادی بیش از یک میلیون متر مکعب زباله پرتوزا وجود داشته است. این زباله ها از نیروگاههای تولید کننده برق و آزمایشگاههای پژوهشی دانشگاهی و نظامی و نیز از مواد پرتوزای به کار برده در پزشکی حاصل شده اند. در سال ۱۹۷۹ میلادی کشور فرانسه برای به نظم در آوردن و کنترل زباله های پرتوزا آژانسی به نام آندرا^{۶۹} (آژانس ملی برای کنترل زباله های پرتوزا) تاسیس کرد. این آژانس موظف است که هر سه سال یک بار وضعیت موجودی زباله های پرتوزای کشور را گزارش کند. بنا به گزارش این آژانس در ۷ مارس ۲۰۰۶ میلادی، زباله های پرتوزا تا پایان سال ۲۰۰۴ میلادی بالغ بر یک میلیون متر مکعب بوده است در این گزارش آمده است:

«اگر چه ۹۱/۶۸ در صد پرتوزایی خطرناک در این زباله ها وجود دارد، ولی حجم کلی آنها کمتر از ۰/۲ در صد کل حجم زباله ها است. یعنی این زباله های بسیار خطرناک منحصراً ۱/۸۵۱ متر مکعب حجم دارند. این مواد را زباله با پرتوزایی بسیار بالا می نامند. هر گرم از این زباله ها یک میلیارد تجزیه در ثانیه دارند که مربوط به ایزوتوپهای پرتوزا با نیمه عمر نسبتاً بالاست (یعنی در هر ثانیه یک میلیارد از اتمهای پرتوزای موجود در آن با انتشار پرتوهای آلفا یا بتا و یا گاما تخریب می شوند). در فرانسه فعلاً این زباله ها را در منطقه لاهاک شمال غربی و یا در مارکول نگهداری می کنند.

^{۶۹} Agence National pour la Gestion des déchets Radioactifs (Andra)

زباله هایی با پرتوزایی متوسط که بعد از ۳۰ سال نیمی از پرتوزایی آنها کاسته می شود و یا بعد از ۳۰۰ سال به کلی از بین می روند نیز در این مناطق نگه داری می شوند. این دو دسته از مواد ۹۰ درصد مجموع پرتوزایی زباله های نیروگاههای فرانسه را تا پایان سال ۲۰۰۴ میلادی تشکیل می داده اند.»

بنا به گزارش آندرا غیر از دو محل یاد شده، ۹۰۰ محل دیگر در فرانسه وجود دارند که از نظر گنجایش، ظرفیت کمتری دارند و محل نگهداری زباله هایی با پرتوزایی بسیار پایین اند که در دسته اول زباله های سبک پرتوزا قرار دارند. پرتوزایی این زباله ها در حدود چند صد هزار بگرل به ازای هر گرم است. این زباله ها اغلب از محل های پژوهشی علمی و صنعتی و یا بیمارستانها آورده شده اند. معمولاً "زباله های بیمارستانی حجم بسیار ولی پرتوزایی اندک دارند و در طی زمان به سرعت پرتوزایی آنها از بین می رود. زیرا در پزشکی از رادیو ایزوتوپهایی که نیمه عمر کوتاه دارند استفاده می شود. این زباله ها در محلهای مخصوص و تحت کنترل نگهداری می شوند و بعد از چند ماه که پرتوزایی آنها به کلی از بین رفت با زباله های شیمیایی آزمایشگاه ها مخلوط می شوند.

۳) قانون مند کردن و کنترل زباله های پرتوزا:

چنان که گفته شد تا سال ۱۹۸۶ میلادی کنترل دقیقی بر زباله های پرتوزا در کشور های جهان که نیروگاه اتمی دارند، وجود نداشت. فاجعه چرنوبیل آگاهی وسیعی از خطرات آلاینده های مواد پرتوزا به وجود آورد و وجدان خفته مسئولان کشورهای پیشرفته را بیدار کرد. اغلب این کشورها کوشیدند نظارت و کنترل بر زباله های پرتوزا را قانون مند سازند و عملاً از آن زمان به بعد بر تعداد نیروگاههای جهان چندان اضافه نشد.

در ۳۰ دسامبر سال ۱۹۹۱ دولت فرانسه قانونی موسوم به قانون بتای (Christian Bataille^{۷۰}) با هدف پژوهش و یافتن راه حلی برای نگهداری زباله های پرتوزا تصویب کرد. طی این قانون مجلس شورای ملی فرانسه فرصتی ۱۵ ساله به اورگانهای وابسته به انرژی اتمی، به ویژه به کمیساریای انرژی اتمی فرانسه داد تا طی پژوهشهای گسترده، راه حل نهایی برای تعیین محل و چگونگی نگهداری زباله های تولید شده بیابند. باید توجه داشت که فرانسه بعد از آمریکا دومین کشوری است که بیشترین نیروگاه اتمی جهان را دارد و اولین کشوری است که بخش اعظم برق خود را از اتم

^{۷۰} Christian Bataille نام نماینده فعالی در مجلس فرانسه که در مورد قانون مند کردن، حفظ و نگهداری مواد رادیو اکتیو خطرناک پا

فشاری می نمود.

تهیه می کند(تقریباً" ۷۵ درصد برق فرانسه از طریق انرژی اتمی تولید می شود). بنابراین مسئله زباله های پرتوزای آن هم بیشتر است.

پانزده سال پژوهش راه حل‌های مناسبی به دست داده است، از جمله کم کردن حجم مواد پرتوزای بسیار خطرناک و حتی بمباردمان اتمهای پرتوزا به وسیله ذرات شتاب داده شده و تبدیل آنها به ایزوتوپهای پایدار. این روش را که آ.د. ت. اس A.D.T.S^{۷۱} نامیده می شود، عبارت است از سیستم تبدیل به وسیله شتاب دهنده ها. در این عمل پروتونها را شتاب داده و بر روی هدف هایی از سرب می تابانند تا نوترون تولید شود. نوترونها در مواد رادیو اکتیو، به ویژه آنهایی که نیمه عمر طولانی دارند (نظیر عناصر بعد از اورانیم که اکتید نامیده می شوند) نفوذ کرده و آنها را تبدیل به ایزوتوپ پایدار و یا ایزوتوپی با نیمه کوتاهتر می کند. در نهایت پیشنهاد شد که این مواد در سالنهایی که در اعماق ۵۰۰ متری و در قشرهای نفوذ ناپذیر زمین،(مثلا گرانیتی) حفر می شوند و امکان دسترسی به آنها و تهویه مداومشان در نظر گرفته شده، نگهداری شوند.

نتیجه این تحقیقات برای نخستین بار در ۱۲ آوریل سال ۲۰۰۶ میلادی در جلسه ای در حضور ۲۰ نماینده مجلس ارائه شد. این بی توجهی نمایندگان به مسئله پر اهمیت زباله های پرتوزا اعتراض مدافعان محیط زیست و گروهی دیگر به نام «خروج از اتم» را برانگیخت. گروه اخیر در ۱۶ آوریل همین سال به تعداد ۳۰۰۰۰ نفر برای یاد آوری بیستمین سالگرد فاجعه چرنوبیل در شربورگ (شمال شرقی فرانسه) و مخالفت با تصمیم دولت فرانسه برای ساخت یک نیروگاه اتمی جدید، اجتماع کرده بودند و به طور کلی اعتراض و مخالفت عمومی با توسعه کار برد اتم برای تولید برق را اعلام داشتند، بیش از یک میلیون نفر اعتراض خود را از این عمل بر روی اینترنت اعلام داشتند. قانون دفن زباله های پرتوزا در اعماق ۵۰۰ متری زمین در ۲۸ ژون ۲۰۰۶ میلادی به تصویب مجلس شورای فرانسه رسید.^{۷۲}

۴) کشورهای دیگر چه می کنند؟

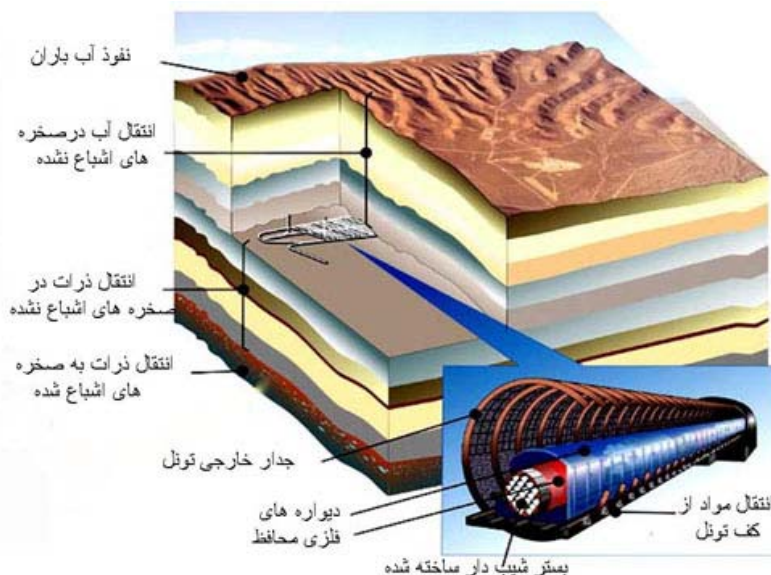
آمریکا: آمریکا ۱۰۴ نیروگاه اتمی به توان ۷۹۰۰۰۰ مگاوات دارد. در نتیجه مسئله زباله های پرتوزا برای آنها بیشتر از نقاط دیگر جهان است. ولی آمریکا با وسعت بسیار زیاد سرزمینش، محل‌های بسیاری برای دفن زباله ها در لایه های عمیق زمین در اختیار دارد. در سال ۱۹۹۹ آمریکا محلی در اعماق زمین و در قشرهای نمکی برای مدفون کردن زباله های نظامی در نظر گرفت. نام این پروژه

^{۷۱} A.D.T.S (Système de Transmutation Assistée par Accélérateur)

^{۷۲} loi n°۲۰۰۶-۷۳۹ du ۲۸ juin ۲۰۰۶ de programme relative à la gestion durable des matières et déchets radioactifs.

http://fr.wikipedia.org/wiki/Loi_Bataille

ویپ بود.^{۷۳} آمریکا همچنین در حال مطالعه برای دفن دائمی زباله های بسیار پرتوزا و با عمر زیاد است. متخصصان امریکایی قصد دارند از تشکیلات آتش فشانی خلل و فرج دار در ناحیه یوکا (در نوادا) برای این کار استفاده کنند. در شکل (۶۱) تصویری از این ناحیه را ارائه کرده ام.



شکل (۶۱) نموداری از پروژه دفن مواد رادیو اکتیو خطرناک در قشرهای زیر زمینی کوهستان یوکا در (Nevada) Yucca

بلژیک: در بلژیک ۷ نیروگاه با توان ۵۷۰۰ مگاوات وجود دارد. مطابق برآوردهایی در ابتدای سال ۲۰۰۱، مقدار زباله های این کشور تا سال ۲۰۷۰ میلادی به این صورت تخمین زده شده است: ۷۰۵۰۰ متر مکعب زباله هایی با پرتوزایی بسیار زیاد و خطرناک با نیمه عمر های بسیار طولانی، ۸۹۰۰ متر مکعب زباله هایی با پرتوزایی متوسط و نیمه عمر متوسط. ۲۱۰۰ تا ۴۷۰۰ متر مکعب زباله هایی با پرتوزایی کم. دسته اخیر در سطح زمین نگهداری خواهند شد و برای بقیه در صدد تهیه آزمایشگاه هایی در اعماق بسیار زیاد زمین و در خاک رس (آرژیل) هستند. هم اکنون یکی از این آزمایشگاهها که ۲۰ سال قدمت دارد در ناحیه مول (Mol) وجود دارد.

سوئیس: سوئیس ۵ نیروگاه اتمی دارد که ۳۶ درصد برق کشور را تولید می کنند. این نیروگاهها هر سال ۷۰۰ کیلوگرم پلوتونیم تولید می کنند. این کشور میله های سوخت نیروگاههای اتمی خود را به فرانسه (کارخانه باز یافت اورانیم لاهگ Lahague) و نیز به انگلستان (کارخانه باز یافت اورانیم سلافیلد Sellafield) می فرستد و کاری با زباله های پرتوزای آن ندارد، با وجود این حجم زباله های پنج نیروگاه سوئیس قابل ملاحظه است. دولت سوئیس در ۲۵ ماه می ۲۰۱۱ اعلام داشت: زمانی که عمر مفید نیروگاههایش به ۵۰ سال برسد آنها را متوقف خواهد کرد. اولین نیروگاه در سال ۲۰۱۲

^{۷۳} (Wipp)-Waste Isolation pilot. Plan

متوقف شد و به ترتیب دومین در ۲۰۱۹ و سومین در ۲۰۲۲ و چهارمی در ۲۰۲۹ و در نهایت آخرین نیروگاه سوئیس در سال ۲۰۳۴ متوقف خواهند شد.^{۷۴}

سوئد: سوئد قرار است تا سال ۲۰۱۵ میلادی آزمایشگاههایی در اعماق زمین و در تشکیلات گرانیتهی به سازد. سوئدی ها در حال حاضر آزمایشگاههای زیر زمینی در منطقه هارل دو آسپو (Harl de Aspo) و نیز در ناحیه کلاب (Clab) دارند که زباله های خطرناک خود را در آن جا می دهند. این آزمایشگاهها هم اکنون به حالت اشباع رسیده است.

آلمان: آلمان ۱۸ نیروگاه با توان ۲۰۶۰۰ مگاوات دارد. در آلمان قرار است در شهر کوچکی در ناحیه گورلبن (Gorleben) واقع در شمال شرقی آلمان آزمایشگاههای زیر زمینی برای نگهداری زباله های خطرناک تهیه کنند. قشرهای زیر زمینی در نظر گرفته شده برای این کار از تشکیلات نمکی است. بعد از فاجعه فوکوشیما (Fukushima) در ژاپن، خانم مارکل صدر اعظم آلمان اعلام کرد که تا سال ۲۰۲۲ تمام نیروگاههای اتمی آلمان را متوقف خواهند کرد. هم اکنون در آلمان پروژه استفاده از انرژی خورشیدی تا مقدار ۲۵۰۰۰ مگاوات در دست اجرا است و این مقدار انرژی بیشتر از انرژی تولیدی ۲۰ نیروگاه فعال این کشور خواهد بود. از ماه آوریل ۲۰۱۱ تصمیم گرفته شده که ۱۷ نیروگاه تا سال ۲۰۲۱ متوقف شوند و سه نیروگاه جدیدتر این کشور تا پایان سال ۲۰۲۲ متوقف شوند و انرژی خورشیدی نیاز الکتریسیته این کشور را تأمین خواهد کرد.^{۷۵}

کانادا: کانادا مهم ترین کشور تولید کننده اورانیم در جهان است. عملاً یک سوم اورانیم تولید شده در جهان در کانادا استخراج می شود. کانادا ۲۲ نیروگاه اتمی با توان ۱۵۰۰۰ مگاوات دارد که همه از نوع « کندو » است و اورانیم طبیعی به عنوان سوخت در آنها به کار می رود. ۲۰ نیروگاه در ایالت اونتاریو (Ontario) و یک نیروگاه در منطقه کبک (Quebec) و دیگری در منطقه نوبرونسوین (Nouveau-Brunswick) قرار دارد.

اورانیم استخراج شده از معادن کانادا ۵۰۰ میلیون دلار در آمد ارزی دارد و برای ۱۰۰۰ نفر شغل ایجاد می کند. زباله های پرتوزا از دهه ۷۰ تا ۸۰ میلادی برای کانادا مسئله ساز شده است. و دولت کانادا واقف است که روشهای به کار برده شده در سالهای یاد شده چندان مناسب نبوده و باید راه حل قطعی برای زباله های پرتوزای بسیار خطرناک و زباله هایی با پرتوزایی متوسط یافت. و این راه حل باید به نحوی باشد که در آن سلامت محیط زیست و انسانها و به ویژه نسلهای آینده در نظر گرفته شود. دولت کانادا اعتراف می کند که در مورد نگهداری و کنترل زباله های پرتوزا تا حد زیادی اهمال شده است. و در اغلب موارد مشخص نبوده که مخارج حمل و نقل این زباله ها و

^{۷۴} Suissinfo.ch - International Service of the Swiss Broadcasting Corporation

^{۷۵} Le prisien ۲۰ decembre ۲۰۱۲

کنترل آنها در دست چه شرکتی بوده است. در ماه مه ۱۹۹۵ میلادی از طرف دولت کانادا یک ناظر عالی مأمور کنترل و باز رسی کلیه زباله های تولید شده در سطح کشور شد. تمام شرکتهای تولید کننده اورانیم و نیروگاهها ناگزیر از اطاعت از دستورات این ناظر هستند. در سال ۱۹۹۶ میلادی سیاستی کلی در این مورد در نظر گرفته شد:

۱) دولت فدرال باید مراقب خارج ساختن و حمل و نقل مطمئن این زباله های اتمی باشد.
۲) دولت فدرال باید امرکنترل و مراقبت بر تولید کنندگان زباله ها را در دست داشته باشد و زباله ها طبق قوانین دولت فدرال کانادا در محلهایی مطمئن و تصویب شده از طرف دولت انبار شوند.
۳) طبق قانون عمومی که « آلوده کننده باید پرداخت کننده باشد » مخارج حمل و نقل و نگهداری زباله های اتمی به عهده تولید کنندگان آنهاست.

زباله های سوخت اتمی در کانادا غالباً از میله های سوخته شده در نیروگاه حاصل می شود. چنانکه پیشتر گفتیم، نیروگاههای کانادا اورانیم طبیعی مصرف می کنند. مقدار اورانیم شکست پذیر (اورانیم ۲۳۵) در میله های سوخت در آغاز ۰/۷ درصد بوده و بعد از ۴ سال توقف در نیروگاه مقدار اورانیم شکست پذیر باقی مانده به ۰/۲ درصد رسیده است. ولی در عوض مقداری پلوتونیم در آن به وجود آمده است و نیز فراورده های شکست که بسیار پرتوزا هستند در آنها انباشته شده است، لذا از نظر پرتوزایی بسیار فعال و خطرناکند. در کانادا و آمریکا این میله ها را بازیافت نمی کنند و تمامی آنها را به عنوان زباله خطرناک انبار می کنند. نیروگاههای کانادا متعلق به شرکتهای خصوصی است و این شرکت ها مسئول حمل و نقل و پرداخت هزینه های آن و به ویژه هزینه نگهداری زباله ها هستند. شرکت اونتاریو - پاور - ژنراسیون (Ontario Power Generation- OPG) عملاً ۹۰ درصد زباله های اتمی کانادا را تولید می کند. این زباله ها به صورت خوشه های میله سوخت است، که سطح مقطع آنها ۱۵ در ۱۵ سانتیمتر و هر یک شامل ۲۶۴ میله سوخت است. در فصل مربوط به ساختار نیروگاهها و تشریح میله های سوخت شکل (۳۳) تصویری از قرار دادن یک خوشه از میله های سوخت را ارائه کردم.

در کانادا تقریباً یک میلیون خوشه سوختی انبار شده در استخر هایی در نواحی نزدیک به نیروگاه وجود دارد که به مدت ده سال در آنجا باقی می ماند و هر سال ۶۰۰۰۰ خوشه بر آنها افزوده می شود. مجموع نیروگاههای کانادا سالانه ۲۰۰۰ تن زباله دارند. از سال ۱۹۸۸ میلادی برنامه ای پژوهشی برای یافتن انبارهای زیر زمینی بسیار عمیق شروع شد و نتایج پژوهشها مورد قبول قرار گرفت و در سال ۲۰۰۲ میلادی به صورت قانون تصویب شد. در این پروژه تمام جنبه های

آینده نگری و تضمین سلامت نسلهای آتی و نیز کار برد احتمالی این خوشه ها در زمانی که ذخیره اورانیم تمام می شود مدّ نظر بوده است.^{۷۶}

ژاپن: ژاپن ۵۵ نیروگاه دارد و مسئله زباله های رادیو اکتیو در جزایر ژاپن حاد تر از سایر کشورها است. در حال حاضر ژاپن در حال تهیه دو آزمایشگاه زیر زمینی برای نگه داری زباله های خطرناک است یکی در بزرگترین جزیره ژاپن هانشو (Honshu) در لایه های متبلور زیر زمینی و دیگری در جزیره هوکایدو (Hokkaido) و در درون لایه های رسوبی غیر روسی است. ژاپن ۱۸ ماه بعد از فاجعه فوکوشیما که بعد از حادثه چرنوبیل پر اهمیت ترین حادثه اتمی جهان بود، در ۱۴ سپتامبر ۲۰۱۲ (Le Monde.fr avec AFP) اعلام کرد که نیروگاههای اتمی خود را به تدریج تا سی سال آینده متوقف خواهد کرد. ژاپن بعد از آلمان و سوئیس سومین کشوریست که قصد خود را برای خروج از نیروی اتمی اعلام داشته است. با وجود این مدافعان محیط زیست و گروه خروج از نیروی هسته ای در ژاپن بسیار فعالیت می کنند تا مسئله خروج از انرژی هسته ای هر چه زودتر انجام گیرد. متأسفانه هنوز پروژه های تولید انرژی از روشهای دیگر قادر به تأمین برق لازم برای این کشور نیستند.

۵) اثر رادیو ایزوتوپهای پرتوزا بر موجودات زنده

پرتوزایی ایزوتوپهای پرتوزا بخشی از محیط زیست ما را تشکیل می دهند. از یک سو خواص آنها کاربردهای فراوان در پزشکی و صنعت دارد و از سوی دیگر خطرات آنها بسیار وسیع است. از این رو همواره باید از این مواد اجتناب کرد و در مقابل پرتوهایی که از آنها منتشر می شود پیشگیریهای مناسب را انجام داد. پژوهش در این باره به طور وسیع انجام گرفته و روز به روز وسایل لازم برای پیشگیری از اثرات زیان بخش این مواد کاملتر می شود. به ویژه سعی بسیار می شود که تا حد ممکن افرادی که با این مواد سر و کار دارند، در ضمن کاربرد این مواد آسیبی نبینند.

در طبیعت و یا در نیروگاهها و به ویژه در زباله های معادن و نیروگاهها، پرتوهای متفاوتی از این مواد منتشر می شود که از نظر توان و تأثیر بر روی سلولهای موجودات زنده، برخی بسیار خطرناک و برخی کم تأثیرند. برای مثال میله های سوخت استفاده نشد، اورانیم را می توان به راحتی با دستکش معمولی در دست نگه داشت، چرا که پرتوهای آلفایی که ایزوتوپهای مختلف اورانیم منتشر می کنند - باوجود آنکه بیش از ۵ میلیون الکترون ولت انرژی دارند - حتی از قشر مرده پوست دست هم عبور نمی کنند. ولی برعکس، اگر همین ایزوتوپها به صورت مولکول گازی باشند و بر روی نسوج ریه انسان بنشینند، پرتوهای آلفای منتشر شده از آنها در سیتوپلاسم سلولها

^{۷۶} ICEM Oxford ۲۱-۲۳ Septembre ۲۰۰۳ (Nouvelle Loi Sur Dechets Radioactif

نفوذ کرده و در آنجا با ایجاد رادیکالهای آزاد ۷۷ و تولید آب اکسیژنه، سلولها را تبدیل به سلول سرطانی خواهند کرد.

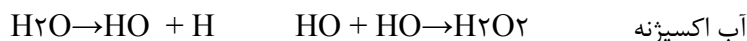
پیشتر گفته شد که فراورده های حاصل از شکست اورانیم همواره مزاد نوترون دارند و در نتیجه ناپایداری آنها. برای خروج از این حالت ناپایداری ابتدا با تبدیل نوترون به پروتون و انتشار پرتوهای بتا و سپس با انتشار پرتوهای گامای پر انرژی به حالت پایدار می رسند. عمل پیش گیری از خطر پرتوهای مواد پرتوزا را رادیوپروتکسیون (Radioprotection) گویند.

۶) اثر پرتوها بر روی موجودات زنده:

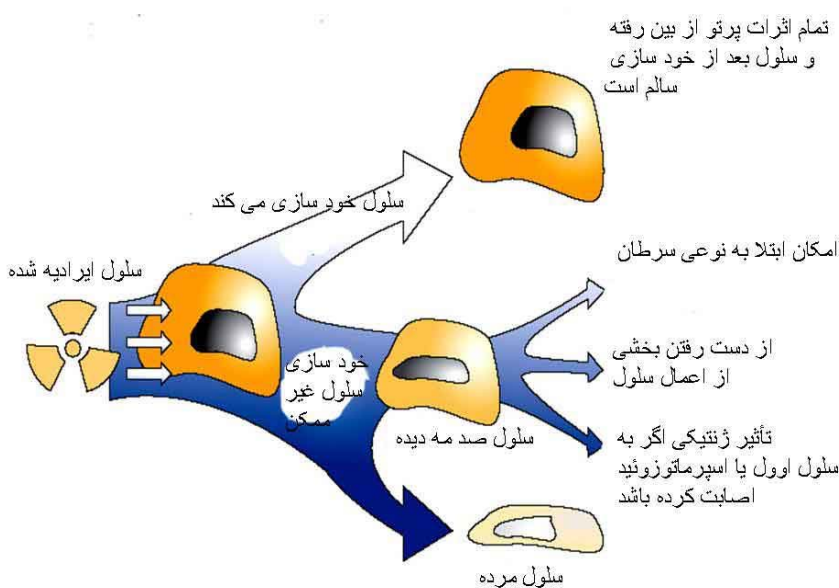
تمام جهان و تمام مواد موجود در آن، از جمله سیارات منظومه شمسی و نیز سیاره زمین و موجودات زنده ای که در آن زندگی می کنند، دائماً تحت تأثیر پرتوهایی که از مواد پرتوزا منتشر می شوند قرار دارند. از اواخر قرن نوزدهم بشر شناختی از مواد پرتوزا و پرتوهایی که منتشر می کنند به دست آورد و از همان زمان کاربردهایی متفاوت برای آنها یافت.

پرتوها به صورت طبیعی در محیط زیست ما وجود دارند، چه در معادن به صورت ترکیبات متفاوت عناصر پرتوزای طبیعی و چه در جو زمین و بر اثر پرتوهای کیهانی که از ستاره گان و به ویژه خورشید به سوی ما تابیده می شود. این پرتوها بر روی اندامهای موجودات زنده تأثیراتی می گذارند. می توان گفت بخش اعظم تحولات و دگرگونیهایی که در ژنومهای موجودات زنده اتفاق افتاده و تکامل و تنوع موجودات کره زمین را پدید آورده، بر اثر ورود یک پرتو آلفا، بتای منفی یا مثبت، پرتو ایکس و یا گاما بوده است. این پرتوها در رشته نردبانی شکل ملکول دی. ان. آی (DNA) کروموزومهای موجودات زنده دگرگونیهایی پدید آورده است. یعنی در نحوه قرار گرفتن ملوکولهای چهار گانه بر روی این نردبان در نسلهای بعدی تحولی به جود آورده است. این دگرگونیها همواره ادامه داشته و ادامه خواهد داشت. تأثیر این پرتوها، تحولی در نسلهای بعدی موجودات ایجاد کرده و نیز در آینده خواهد کرد. چند تحول از این قبیل در خانواده پستانداران، شاخه های مختلف پستانداران را بر روی زمین ایجاد کرده است. ما پستانداران زمینی، انسان و یا میمون شاید فقط با

۷۷ رادیکال آزاد بخشی از مولکولی است که در اثر اصابت پرتوهای مواد پرتوزا، از مولکولی پایدار کنده شده است. مثلاً ملکول آب شکسته شده و تبدیل به اتم هیدروژن چسبیده به اکسیژن می شود (HO). یا ملکول دو اتمی هیدروژن که تبدیل به اتمهای هیدروژن آزاد می شوند که در واکنشها هزاران بار فعال تر از مولکول هیدروژن اند ($H_2 \rightarrow H + H$). و نیز از اتحاد دو مولکول (OH) آب اکسیژنه در محلول یا خون به وجود می آید.



یک تحول در ژنوم با یکدیگر اختلاف داریم . ما حتی با باکتریهای اولیه نسبت فامیلی بسیار نزدیکی داریم^{۷۸}. به گونه ای که مجموعه تمام جهش های به وجود آمده از ۶۰ تجاوز نمی کند و حاصل این دگرگونیها این بوده که باکتری به انسانی تبدیل شده که می خندد، گریه می کند، ابزار می سازد و به چگونگی تشکیل جهان می اندیشد. بخشی از این دگرگونیها را پرتوهای موجود در جو زمین و یا پرتوهای موجود در مواد تشکیل دهنده سیاره زمین ایجاد کرده اند. خوشبختانه این وجه از تأثیرات آنها مثبت بوده و تنوع را در کره زمین به وجود آورده است. ولی اثر پرتوهای با انرژی بالا بی خطر نیست و می تواند سلولهای سالم را سرطانی کنند و موجود را به هلاکت برسانند. شکل(۶۲)



شکل(۶۲) اصابت پرتو حاصل از ماده پرتوزا به یک سلول زنده. برخی اوقات سلول می تواند از خود واکنش نشان دهد و در نتیجه خود سازی کرده، سالم بماند. در غیر این صورت آسیبهایی بر آن وارد می شود که در شکل آمده است.

بنابراین پرتوها در ضمن آنکه برای بشر بسیار مفیدند و کاربردهای پزشکی یا صنعتی زیادی دارند و روز به روز کاربردهای بیشتری برای آنها شناخته می شود، ولی اگر مقدار آنها - به ویژه آنهایی که نیمه عمر طولانی و پرتوهای پر انرژی دارند - بر روی سطح و یا در جو زمین زیاد شود، ممکن است زندگی بر روی زمین را مختل کنند. مدافعان و پژوهشگران محیط زیست این خطر را پیش بینی می کنند و توصیه می کنند راه های دیگری برای تولید برق باید انتخاب کرد.

^{۷۸} به فصل پنجم کتاب افسانه زندگی نوشته نگارنده مراجعه کنید. این کتاب هم نظیر کتابهای دیگر به صورت رایگان در وب سایت نگارنده وجود دارد.

<http://ali.afzal.samadi.free.fr/>

۷) قدرت نفوذ پرتوها:

گفتیم که پرتوهای مواد پرتوزا، حاصل تبدیل ترازهای انرژی در درون مواد پرتوزا است. در این مواد به دلایل متفاوت، ترازهای انرژی درونی بالاتر از تراز انرژی ایزوتوپ پایدار همان عنصر است. چنانکه به تفصیل در فصل اول گفته شد، گاهی نوترونی تبدیل به پروتون و یا پروتونی تبدیل به نوترون می‌گردد. در اثر این تبدیل یک الکترون منفی یا مثبت از اتم خارج می‌شود و در پی آن نیز تعدادی پرتو گاما (γ) یا ایکس (χ) از رادیو ایزوتوپ باقی مانده خارج می‌شود. بهترین مثال در این مورد تبدیل کبالت ۶۰ به نیکل ناپایدار است. رادیو عنصر اخیر با انتشار دو پرتو گامای پر انرژی ($\gamma_1 = 1.17\text{Mev}$) و ($\gamma_2 = 1.33\text{Mev}$) از خود دفع ناپایداری می‌کند و به نیکل پایدار تبدیل می‌شود. این دو پرتو گاما در پزشکی و صنعت کاربرد بسیار دارند. زیرا بسیار پر قدرت اند و قابلیت نفوذ فراوان دارند. بر عکس پرتوهای بتا منفی (β^-) قدرت نفوذ چندانی نداشته و یک صفحه کاغذ می‌تواند مانع از نفوذ آنها شود.

به طور کلی رادیو ایزوتوپها دو نوع ذره از خود منتشر می‌کنند، این ذرات می‌توانند مادی باشند) مانند پرتو بتا منفی (β^-)، بتای مثبت (β^+) و یا ذره آلفا (α^{++}) (با جرمهای ۰/۵۱۱ میلیون الکترون ولت برای بتا ها و ۴/۰۲۸ میلیون الکترون ولت برای ذره آلفا^۹) و یا ذره فاقد جرم باشند که به آنها پرتوهای الکترو مغناطیسی و یا فوتون می‌گویند. اگر انرژی این پرتو ها بین چندین کیلو الکترون ولت (Kev) تا بلیون الکترون ولت (Bev) باشد به آنها پرتو گاما (γ) می‌گویند و اگر کمتر از این مقدار باشد (۱۰۰ الکترون ولت ev تا ۱۰۰ کیلو الکترون ولت Kev) آنها را پرتو ایکس (χ) می‌نامند.

اگر انرژی پرتوها - خواه مادی و خواه الکترو مغناطیسی - به اندازه ای باشد که بتوانند الکترونی را از اتمی که در مسیر آنها قرار دارد جدا سازند، آنها را پرتوهای یونیزه کننده می‌نامند. این پرتوها بر حسب انرژی جنبشی که دارند، تعداد یونهایی که در زمان عبور از مواد مختلف و یا بدن انسان ایجاد می‌کنند، متفاوت است. یک ذره آلفای (α) حاصل از تخریب یا تجزیه رادیم ۲۲۶ انرژی جنبشی معادل ۴/۷۸ میلیون الکترون ولت دارد ولی به علت داشتن جرم سنگین (ذره آلفا از دو پروتون و دو نوترون تشکیل شده) نمی‌تواند مسافت زیادی در ماده طی کند، یک برگ کاغذ معمولی و یا حتی قشر مرده پوست دست می‌تواند آنرا متوقف سازد. ولی اگر همین ذره وارد یک سانتیمتر مکعب محیط مایع (مثلاً خون و یا برخی از اندامهای زنده موجودات که بیش از ۹۰ در

^۹ این اعداد جرم ذره در حال سکون است. این پرتوها زمانی که از اتم یا رادیو ایزوتوپ نشر دهند خارج می‌شوند انرژی جنبشی فراوانی دارند. مثلاً مادامی که یک ذره آلفا از عنصر رادیم خارج می‌شود علاوه بر جرمش ۴/۷۸ میلیون الکترون ولت انرژی جنبشی دارد. یا ذره های بتا فراخور ناپایداری عنصر نشر دهنده انرژی جنبشی دارند مثلاً در تجزیه سدیم با انتشار بتای مثبت، پرتو بتای مثبت خارج شده از اتم ۲/۳۸ میلیون الکترون ولت انرژی دارد.

صد آنها آب است) شود، انرژی خود را به ملوکولها منتقل می کند و ۴۰۰۰ زوج یون مثبت و منفی ایجاد خواهد کرد. این وضعیت به ویژه در مورد خون که ۹۵ در صد آن از آب است صادق است. ملوکولهای آب نمی توانند این یونیزاسیون را تحمل کنند، شکسته شده و تبدیل به رادیکال آزاد OH می گردند. از اتحاد دو رادیکال آزاد، آب اکسیژنه (H₂O₂) تولید می شود. در نظر داشته باشید که وجود آب اکسیژنه درون خون چه زیانهای بسیاری به بار خواهد آورد و ملوکولهای ژنوم را تغییر خواهد داد. پرتوهای بتای منفی و یا مثبت، الکترون منفی و یا مثبت هستند و جرم آنها ۱۸۴۰ مرتبه کمتر از جرم یک پروتون و یا نوترون است.^{۸۰} این پرتوها به وسیله صفحه بسیار نازکی از فلز و یا پلاستیک متوقف می شوند و هر یک از این ذرات فراخور انرژی جنبشی که دارند در هر سانتیمتر مکعب از مایع بین ۱۰ تا ۱۰۰ یون مثبت و منفی ایجاد می کنند.

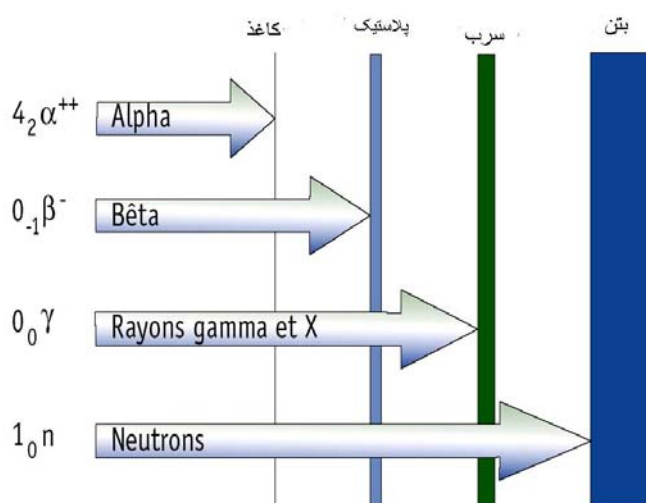
پرتوهای گاما و ایکس که امواج الکترو مغناطیسی یا به عبارت دیگر فوتونهایی بدون جرم و با انرژی متفاوت اند، قدرت نفوذی به مراتب بیشتر از پرتوهای قبل دارند. پرتوهای ایکس غالباً از قشر الکترونی اتم منتشر می شوند و حاصل از انتقال در ترازهای انرژی اتم هستند، حال آنکه پرتوهای گاما از انتقال ترازهای انرژی درون هسته اتمها خارج می شوند. این پرتوها چون بار ندارند و با اتمهای ماده ای که از آن عبور می کنند بر خورد کمتری دارند، لذا برای متوقف کردن آنها صفحه های سربی نسبتاً ضخیم لازم است. تعداد یونهایی که پرتوهای ایکس در محیطی مایع مانند آب یا خون ایجاد می کنند نسبتاً کم و بین ۱۰ تا ۵۰ یون در هر سانتی متر مکعب است. در مورد عبور پرتوهای گاما از درون ماده بر حسب انرژی آنها پدیده های مختلفی روی می دهد. اگر انرژی گاما حدود ۱۰۰ کیلو الکترون ولت باشد، یک الکترون از اتم ضربه خورده جدا ساخته و آن را تبدیل به یون مثبت می کند. الکترون جدا شده را الکترون فوتوالکتریک می نامند. اگر انرژی گاما بیشتر از این مقدار و کمتر از ۱/۰۲ میلیون الکترون باشد تعداد زیادی الکترون از اتمهای سر راه خود را جدا می سازد. الکترونهای جدا شده را در اصطلاح، الکترون کمپتون^{۸۱} می نامند. وقتی انرژی گاما به حدود ۱۰۰ کیلو الکترون ولت نزول کند، عمیق ترین الکترون اتم را که بر روی قشر K قرار دارد می کند، الکترون جدا شده را الکترون فوتوالکتریک می نامند. بعد از جدا شدن این الکترون قشرهای الکترونی اتم ضربه خورده تحولی خواهند کرد، الکترونهای قشرهای فوقانی به قشرهای عمیق تر می آیند و در نتیجه این تحول اتم از خود یک پرتو ایکس^{۸۲} منتشر می کند. اگر انرژی گاما بیش از ۱/۰۲ میلیون الکترون ولت باشد خود به خود در درون ماده تبدیل به دو الکترون مثبت و منفی می

^{۸۰} چنانچه پیشتر گفتیم در شیمی و فیزیک هسته ای جرم ذرات بنیادی را با در نظر گرفتن معادله انشتین ($E=MC^2$) بر حسب انرژی بیان می کنند: بنا براین: جرم الکترون ۰/۵۱۱ میلیون الکترون ولت است. و اما جرم پروتون یا نوترون به ترتیب ۹۳۸/۲ و ۹۳۹/۵ میلیون الکترون ولت یعنی تقریباً ۱۸۴۰ برابر جرم الکترون است.

^{۸۱} Compton effect.

شود. و این الکترونها تا زمانی که انرژی جنبشی دارند، اتمهای مایع مسیر خود را یونیزه می کنند و آنها را به یون مثبت و یون منفی مبدل می سازند. زمانی که انرژی جنبشی الکترون مثبت و منفی صفر شد با یکدیگر ترکیب شده و تبدیل به دو پرتو گاما می شوند که هر یک از آنها ۵۱۱ کیلو الکترون ولت انرژی دارند و آنها نیز اتمهای سر راه خود را یونیزه خواهند کرد. خاصیت اخیر، یعنی تبدیل گاما به الکترون مثبت و منفی و نیز تبدیل الکترونها به گاما در پزشکی کار برد فراوان دارد.^{۸۲}

نوترون ذره ای فاقد بار و مقداری سنگین تر از پروتون است که از واکنشهای هسته ای مهم مثلاً از پدیده شکست اتم اورانیوم و یا در اثر نفوذ ذره آلفای پرنرژی رادیم ۲۲۶ (به انرژی ۴/۷۸ میلیون الکترون ولت) بر روی برلیم به وجود می آید. نوترون تولید شده در این کنشها انرژی جنبشی بسیاری دارد و به علت نداشتن بار برخورد چندانی با هسته اتمهای سر راه خود ندارد و برای جلوگیری از نفوذ آنها صفحات قطور بتنی و به ویژه موادی که از هیدروژن غنی هستند (مانند آب یا روغن) لازم است تا مانع از خروج آنها از نیروگاه و یا محل تولیدشان شود. در شکل (۶۳) نموداری از قدرت نسبی نفوذ پرتوهای مختلف ارائه شده است.



شکل (۶۳) توان نفوذ پرتوها در ماده: ورقه نازکی از کاغذ مانع از نفوذ پرتو آلفا می شود. برگه نازکی از پلاستیک پرتوهای بتا را متوقف می کند. صفحه ی ضخیمی از سرب یا فلزات دیگر مانع از نفوذ پرتوهای گاما و یا ایکس می شوند، حال آنکه برای متوقف نمودن نوترونها دیوارهای بتنی قطور لازم است.

^{۸۲} تبدیل گاما هایی با انرژی بالاتر از ۱/۰۲ میلیون الکترون ولت را تبدیل انرژی به ماده و نیز اتحاد الکترون مثبت و منفی و تبدیل آنها را به دو گامای ۵۱۱ کیلو الکترون ولت تبدیل جرم به انرژی گویند.

۸) واحد رادیو اکتیویته یا دوزی متری:

واحد مطلق پرتوزایی در آغاز کشف این پدیده، به نام کاشف آن ماری کوری (Marie Curie) نامیده شد که معادل پرتوزایی یک گرم رادیم^{۸۳} و برابر با ۳۷ میلیارد تجزیه در ثانیه در نظر گرفته می شد. به عبارت دیگر یک کوری رادیواکتیویته (پرتوزایی) معادل تخریب ۳۷ میلیارد از اتمهای یک عنصر ناپایدار در ثانیه است. هر تجزیه در یک ثانیه یک بکرل (Becquerel) است.

با توجه به اینکه غالباً اثر پرتوها بر روی بافت های زنده مورد نظر است، لذا مقدار انرژی جذب شده به وسیله بافتهای زنده را با واحدی می سنجند که به آن دوز (Doses) می گویند. ارزش برابری دوز عبارتست از: مقدار پرتو جذب شده در ضریب قدرت نوع پرتو.

ضریب قدرت نوع پرتو عملاً برای پرتوهای بتا، گاما و ایکس معادل یک و برای پرتو آلفا معادل ۲۰ است. واحدی که ارزش برابری دوز را مشخص می کند معمولاً "رم (Rem) نامیده می شود که باید آن را بر حسب زمان تأثیر پرتو بر روی بافت زنده بیان کرد و آنرا **زمان ایراد یاسیون (Irradiation)** می نامند. بنابراین رم بر حسب مدت زمانی که پرتو به بدن اصابت کرده (ساعت/ رم) در نظر گرفته می شود.

یک رم برابر با یک راد ضرب در ضریب بیولوژیکی پرتو است، که برای پرتوهای متفاوت می باشد. یک راد برای پرتوهای گاما، بتا و ایکس معادل با یک رم است ولی برای پرتو آلفا، یک راد معادل ۲۰ رم است.

غالباً واحد دیگری در دوزی متری به کار می رود که گری (Gry) نامیده می شود. یک گری عبارتست از یک ژول انرژی منتقل شده به هر کیلو گرم بافت زنده. یک گری برابر ۱۰۰ راد است. غالباً بجای رم صد برابر آن را سیورت (Sieverts) جایگزین می کنند. برای پرتوهای گاما، ایکس و بتا یک سیورت برابر ۱۰۰ رم است و برای پرتو آلفا یک سیورت معادل ۲۰۰۰ رم می باشد.

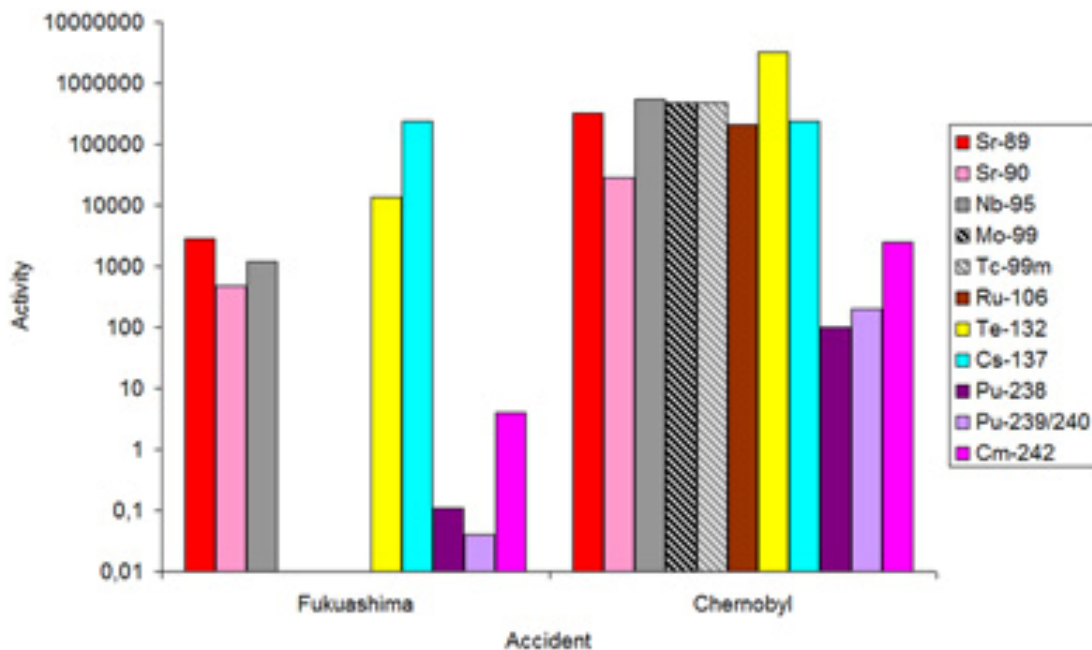
$$\text{Sieverts} = 1000 \text{ Millisieverts} = 100 \text{ Rem} \text{ برای پرتوهای گاما، ایکس و بتا}$$

$$\text{Sieverts} = 1000 \text{ Millisieverts} = 2000 \text{ Rem} \text{ برای پرتو آلفا}$$

مقدار تابش بمبهای اتمی منفجر شده به وسیله آمریکا در سال ۱۹۴۵ از چندین هزار رم تجاوز می کرده است. البته بمبهای اتمی و هیدروژنی کنونی دوزهایی چند هزار بار بیشتر از آنها دارند. در

^{۸۳} تعداد اتمهای رادیم ۲۲۶ موجود در یک گرم رادیم عبارتست از $226 / 226 \times 10^{23} = 6.03 \times 10^{23}$ و چون پرتوزایی عبارتست از $A = N \lambda$ لذا باید λ را حساب کرد که برابر است با $\lambda = 0.693 / T_{1/2}$ و چون نیمه عمر را دیم معادل ۱۶۰۰ سال است بعد از تبدیل به ثانیه برابر $T_{1/2} = 5.05 \times 10^4$ است. و از آنجا λ برابر است با $\lambda = 0.137 \times 10^{-4}$ در نتیجه پرتوزایی یک گرم رادیم برابر است با $A = 0.137 \times 10^{-4} \times 226 \times 10^{23} = 37,000,000,000$ و از آنجا $A = 37,000,000,000$ تجزیه در ثانیه است.

شکل (۶۴) مقایسه انواع رادیوایزوتوپهای پخش شده در فاصله ۵۰۰ متری دو حادثه مهم نیروگاههای اتمی چرنوبیل و فوکوشیما را ارائه داده ام.

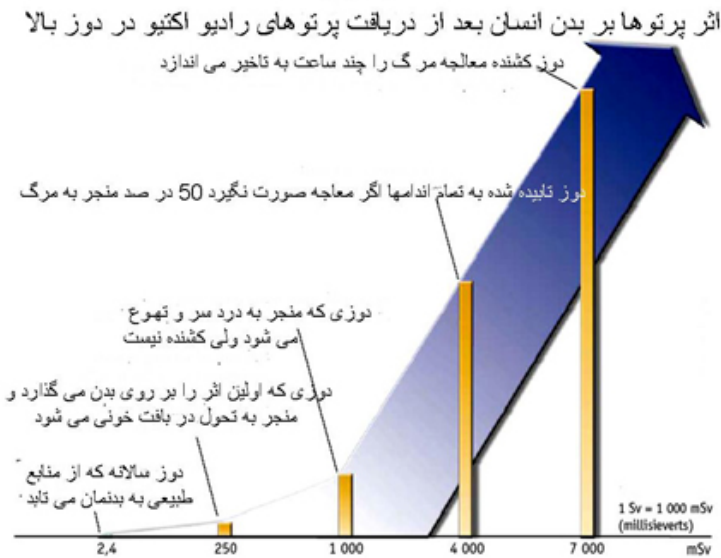


شکل (۶۴) در این نمودار مقدار رادیوایزوتوپهای منتشر شده در حادثه فوکوشیما (ژون ۲۰۱۱) در فاصله ۵۰۰ متری را با رادیوایزوتوپهای منتشر شده در حادثه چرنوبیل (آوریل ۱۹۸۶) مقایسه می کند. این اعداد از طرف OECD^{۸۴} داده شده است. در سمت راست این نمودار اسامی رادیوایزوتوپهای منتشر شده را با رنگ و علامت اختصاری و عدد جرمی آنها داده است.

۹) تظاهرات بالینی حاصل از برخورد پرتوها:

یک ایرادیاسیون کوتاه مدت با دوزی معادل ۵۰ رم (۵/۰ سیورت) بر روی بدن انسان و در نقاط مشخص و محدودی از بدن، می تواند ظرف چند دقیقه آسیبهایی وارد سازد. در شکل (۶۵) به صورت نمودار اثر مقادیر مختلف سیورت را بر روی اورگانهای بدن آورده ایم. در این نمودار مشاهده می کنید که دوز قابل قبول در سال نباید از ۲/۴ میلی سیورت تجاوز کند. در ۲۵۰ میلی سیورت، نخستین اثر پرتوها با تحولاتی در سلولها ظاهر می شود و به ویژه به سلولهای خونی صدمه می زند. در ۱ سیورت بیماری های موقت مانند سر درد و حالت تهوع ایجاد می شود. در ۴ سیورت تا ۵۰ درصد مرگ زودرس در غیاب معالجه روی خواهد داد. در ۷ سیورت مرگ ظرف چند ساعت اتفاق خواهد افتاد. در این مورد معالجه ممکن است مرگ را کمی به تأخیر اندازد، ولی در نهایت بی نتیجه است و مرگ قطعاً روی خواهد داد.

^{۸۴} The Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD)



شکل (۶۵) پرتوهای منتشره از مواد پرتوزا مقداری انرژی به بدن شخص پرتو دیده منتقل می‌کنند و این انرژی تحولاتی در ملوکولهای سلولهای زنده پدید می‌آورد. مقدار تحول، نسبت خطی با دوز تابیده شده به بدن دارد. واحد این دوز سیورت است. به طور طبیعی همواره مقداری پرتو به بدن ما تابیده می‌شود، این پرتوها از منابع کیهانی و یا مواد پرتوزای طبیعی موجود در پوسته زمین است. در قرن بیستم به دلیل آزمایشهای اتمی و یا ساخت نیروگاهها و حوادث آنها مقداری بر پرتوزایی موجود در زمین و جو آن اضافه شده است. مقدار دوز کم اثر بر بدن ما سالانه در حدود ۲/۴ میلی سیورت است. اگر از این مقدار بیشتر شود، چنان که در شکل نمایش داده شده ضایعاتی به وجود خواهد آمد. در شکل (۶۱) نیز اثر پرتو رادیو اکتیو را بر روی یک سلول زنده به صورت نمودار ارائه دادم. Source L'énergie nucléaire aujourd'hui (AEN – NEA)

بر روی زمین همواره تشعشعات پرتوزا که حاصل از منابع معدنی و یا کیهانی و نیز فعالیت های اتمی بشر است وجود دارد. می توان مقدار آنها بر حسب میلی رم و نیز زمان و مکان اندازه گرفت و اثر زیان بخش آنها را بر حسب دوز اصابت کرده به سلولهای زنده مورد بررسی قرار داد. پرتوهای مواد پرتوزا به درون ماده نفوذ کرده و انرژی خود را به ملوکولهای موجود در آن منتقل می کنند و چنان که گفتم، تغییراتی ایجاد می نمایند. بنابراین، تغییرات یاد شده متناسب با دوز و یا انرژی منتقل شده است. اثر پرتوهای یونیزه کننده شامل سلسله وسیعی از واکنشهای متفاوت در رابطه با مقدار دوز و توان اثر گذاری آن است که در برخی از موارد به کمک تظاهرات بالینی شخص پرتو دیده بررسی می شود. برای سهولت تشخیص، اثر پرتوها را در دو دسته مهم طبقه بندی می کنند.

(۱) اثرهای ژنتیکی که تظاهرات بالینی آن مدتها بعد نزد نسلهای بعدی شخص پرتو دیده ظاهر می شود.

(۲) اثرهای بدنی که مستقیماً در شخص پرتو دیده ظاهر می شود. این اثرها خود شامل دو دسته فرعی است. اول اثرهای آنی و سپس اثرهایی که در دراز مدت هویدا خواهند شد.

۱۰) اثر های آنی:

اثرهای آنی پرتوهای یونیزه کننده، به ویژه با کاهش تعداد سلولهای سازنده در بافت های ایرادیه شده مشاهده می شود. این امر در زمانی اتفاق می افتد که مقدار دوز بسیار بالا باشد و به همین دلیل این اثرها را جزو حوادث پیش بینی نشده و تصادفی نمی توان قرار داد. بر عکس، اثرهای دگرگون کننده و یا سرطان زایی پرتو ها را جزو پدیده های تصادفی و پیش بینی نشده قرار می دهند. ضایعه های اتفاقی آنهایی هستند که بر روی برخی از مولکولها در درون سلولهای ویژه ای از یک بافت مشخص ایجاد می شوند. افزایش تعداد مولکولهای دگرگون شده نسبت خطی با مقدار دوز جذب شده به وسیله شخص پرتو دیده دارد.

حوادث ناشی از اثر پرتو ها بر روی بافتهای زنده، در آغاز کشف پرتوزایی و کاربرد آن در پزشکی، به ویژه نزد افرادی دیده می شد که برای آنها رادیوتراپی تجویز شده بود. ولی اکنون با شناخت بهتر اثر پرتوهای یونیزه کننده و کاربرد صحیح آنها و در دست داشتن دستگاههای تشخیص بهتر، این حوادث بسیار کم شده است. با وجود این در زمان حاضر، در اغلب بیماران سرطانی که با ایرادیاسیون مستقیم مورد معالجه قرار می گیرند، علاوه بر تخریب سلولهای سرطانی، ضایعاتی نیز در سلولهای سالم آنها به وجود می آید که کمیت آن تابع دقت عمل پزشک در تعیین محل سلولهای سرطانی است. هم اکنون حوادث کاربردی رادیو ایزوتوپها، به دلیل توسعه کاربرد آنها، به مراتب بیشتر از حوادث نیروگاهها است. از سال ۱۹۴۵ تا ۱۹۸۷ میلادی بغیر از حادثه چرنوبیل، ۲۸۵ حادثه کم و بیش مهم در جهان اتفاق افتاد است که در آنها بیش از ۱۳۵۰ نفر ایرادیه شده اند. ۳۳ نفر از این عده مرده اند و دیگران در سالهای بعد مبتلا به سرطان شده و از بین رفته اند.

چنان که گفتیم وقوع حادثه در نیروگاه ها به هر حال کمتر از حادثه های کاربرد صنعتی و پزشکی مواد رادیو اکتیو است، ولی بر عکس بسیار فاجعه بار تر است و قربانیان بیشتری در پی دارد. کاربرد مواد رادیو اکتیو در صنعت و پزشکی باعث حوادث بسیاری شده و می شود، ولی چون در هر بار این آلودگی مربوط به یک یا چند نفر است، در رسانه ها کمتر از آنها نام می برند. ولی اگر از نظر آماری بررسی شوند ارقام بسیار بالاتر از ضایعات نیروگاهها خواهد بود. گاه گاهی برخی از حادثه ها را که اهمیت بیشتری دارند ذکر می کنند. مثلاً "یک دستگاه رادیوتراپی متشکل از چشمه ای از رادیو سزیم ۱۳۷ رها شده در ناحیه ای در برزیل (Goiânia) ده ها نفر را ایرادیه کرد و چهار نفر از این افراد مردند. و یا در بین سالهای ۲۰۰۱ تا ۲۰۰۶ در شهری در شمال شرقی فرانسه به نام اپینال ۴۵۰ نفر بر اثر خراب بودن دستگاه رادیوتراپی بیمارستان این شهر، تحت تأثیر دوز بیش از اندازه پرتو در موقع ایرادیاسیون پرستات واقع شدند. ۷ نفر از این افراد در اثر این حادثه فوت کردند.

دادگاههای فرانسه در اواخر ژانویه ۲۰۱۳ سه نفر از مسئولین این بیمارستان را محکوم به زندان کردند.^{۸۵}

بررسی بالینی تمام آسیبهای وارد شده و یا بر رسی اثر پرتو ها بر اشخاص پرتو دیده نیازمند شرح بسیاری است و در این مختصر نمی توان به دقت همه موارد را تشریح کرد. اما با توجه به اینکه شناخت مختصری از جراحتهای به وجود آمده بر اثر تابش پرتوها بر بافتهای بدن انسان ضروری است. و نیز با توجه به اینکه روز به روز کاربرد رادیو ایزوتوپها در صنایع (از جمله مواد غذایی) و پزشکی بیشتر می شود، لازم است که به طور خلاصه اثر پرتو ها را بر برخی از بافتهای مهم بدن تشریح کنم. در شکل (۶۷) اثر پرتوها را بر روی اندامهای یک انسان ارئه داده ام. در این تصویر ترجمه مطالب موجود در تصویر بر حسب حروف لاتین و شماره آنها در زیر شکل آورده شده است.

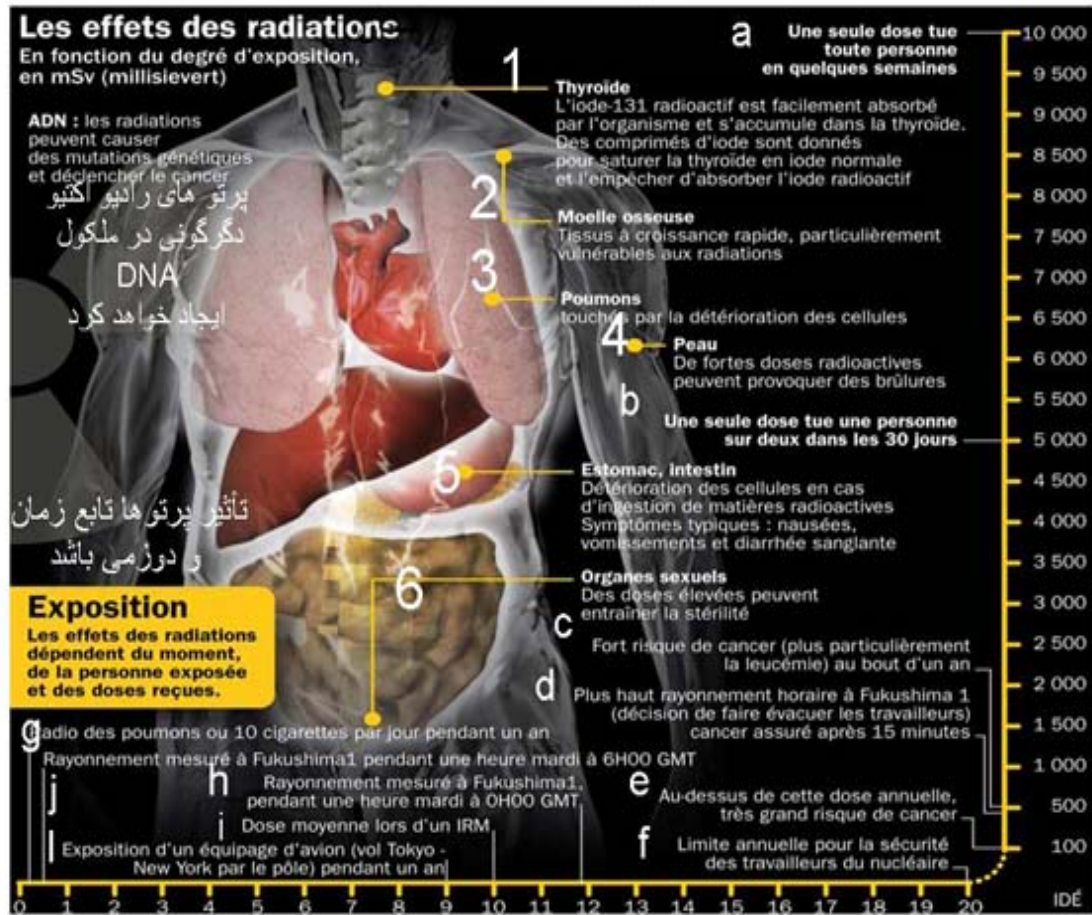
پوست: سلولهای قشر درونی پوست بدن نسبت به پرتوهای حاصل از مواد پرتوزا بسیار حساس اند. دوزی معادل ۶ سیورت (Sv) و در لحظه ای کوتاه، ناحیه پرتو دیده را سرخ خواهد کرد. این عوارض پوستی در همان روزی که شخص پرتو دیده است، ظاهر می شود و چند ساعت بعد از بین می رود. ولی دو تا چهار هفته ی بعد در بسیاری از نواحی پوست لکه های قرمز عمیق و پیوسته ای ظاهر خواهد شد و اگر دوز بین ۱۰ تا ۲۰ سیورت باشد در پی آن زخمهایی به وجود خواهد آمد. شکل (۶۶) سوختگی دست را بعد از تابش بیش از ۵ سیورت نشان می دهد.



شکل (۶۵) اثر پرتو ها بر روی دست

^{۸۵} http://www.lepoint.fr/societe/irradies-d-epinal-l-heure-du-jugement-۳۰-۰۱-۲۰۱۳-۱۶۲۱۶۹۹_۲۳.php

اثر پرتوها بر اندامهای انسان



شکل (۶۵) تصویری از بدن و اندامهای یک انسان و اثر پرتوها بر آنها، برحسب اعداد و حروف لاتین داده شده در تصویر، اثر پرتوها را بررسی می‌کنیم. **(a)** مقدار دوزتابیده شده به فردی که او را در طی چند هفته خواهد کشت. **(۱) غدد تیروئیدی**، ید رادیو اکتیو به سهولت جذب این غدد می‌شود. اگر در لحظه حادثه قرص ید عادی به افراد نزدیک به محل حادثه دهند، غدد تیروئیدی آنها از ید اشباع خواهد شد و ید پرتوزا کمتر وارد غدد تیروئیدی آنان می‌شوند. **(۲) مغز استخوان** سلولهای حساس و با رشد سریع اند و در نتیجه نسبت به پرتوهای رادیو اکتیو چندان مقاوم نیستند. **(۳) ریه‌ها**، سلولهای ریوی سریع از بین می‌روند و در دوزهای بالا به پنومونی (ذات الریه) مبتلا خواهند شد و در دراز مدت فیبروز ریوی به وجود خواهد آمد. **(۴) پوست**، در دوزهای بالا ابتدا سرخ و چندی بعد سوختگی در آن به وجود خواهد آمد. **(b)** در این مقدار دوز از هر دو نفر پرتو دیده حد اقل یک نفر در طی ۳۰ روز بعد از حادثه خواهد مرد. **(۵) معده و روده‌ها**، در صورت خوردن مواد پرتوزا سمپتوم (نشانگان) تهوع، استفراغ و اسهال خونی ظاهر می‌شود. **(۶) غدد جنسی**، دوزهای بالا عقمی به وجود خواهد آورد. **(c)** در ۵۰۰ میلی سیورت احتمال ایجاد سرطان به ویژه لوسمی در طی یک سال ظاهر خواهد شد. **(d)** مقدار پرتوهای بالای ساعت اولیه حادثه نیروگاه فوکوشیمای ۱ ژاپن در روز جمعه ۱۱ مارس ۲۰۱۱ که در پی آن ساکنان اطراف را تخلیه کردند. ابتلا به سرطان در توقف ۱۵ دقیقه ای در اطراف نیروگاه حادثه دیده قطعی است. **(e)** بیش از این مقدار دوز سالانه احتمال زیاد ابتلا به سرطان وجود دارد. **(f)** حد مجاز سالانه اصابت پرتو به افراد. **(g)** معادل یک رادیوگرافی از ریه‌ها و یا تدخین ده سیگار در روز و در طول سال. **(j)** پرتوهای فوکوشیما اندازه گیری شده به مدت یک ساعت در ساعت ۶ (GMT) روز سه شنبه ۱۵ مارس. **(h)** ۱۲ میلی سیورت پرتوهای اندازه گیری شده در فوکوشیما در لحظه صفر (GMT). **(i)** دوز متوسط در یک ام. آر. ای (MRI) مقدار دوز دریافت شده توسط خدمه هواپیمایی که از توکیو و از طریق قطب به نیویورگ می‌روند در طی یک سال پرواز.

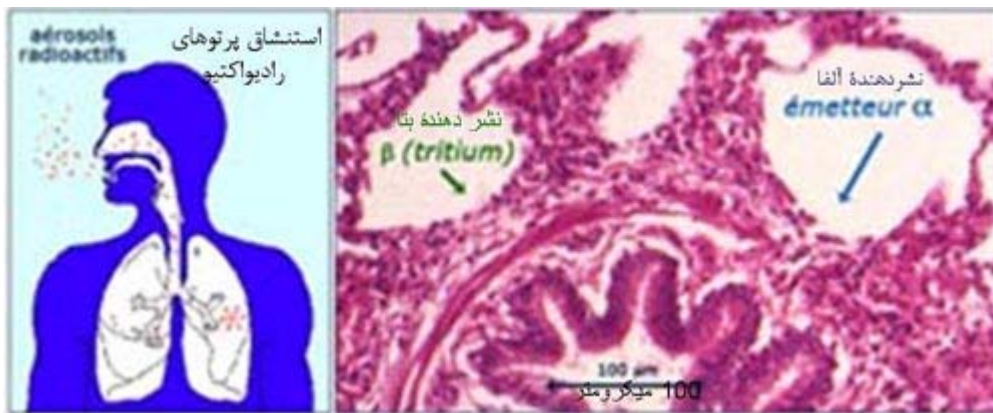
مغز استخوان و اندامهای لنفاوی: لنفوسیت ها نسبت به پرتوها بسیار حساس اند. دوزی معادل ۲ تا ۳ سیورت اگر به تمام بدن اصابت کند در کمتر از چند ساعت قادر به کشتن شمار بسیاری از لنفوسیت ها خواهد بود و می تواند واکنشهای دفاعی بدن را کاملاً متوقف سازد. سلولهای سازنده کلوبولهای قرمز (Hematopoietiques) مغز استخوان نیز نسبت به پرتوها بسیار حساس اند و در اثر دوزی مشابه، تعدادشان به حدی کاهش خواهد یافت که ظرف سه تا پنج هفته گرانولوسیتوپنی (Granulocytopenie) و نیز ترمبوسیتوپنی (Thrombocytopenie) ایجاد خواهد کرد. این کاهش تعداد گرانولوسیت ها و پلاکت ها می تواند آنقدر مهم باشد که منجر به خونریزی و عفونت کشنده شود.

روده ها: سلولهای قشر سطحی روده ها نسبت به پرتو ها بسیار حساس اند. اثر چند لحظه ای ۱۰ سیورت پرتو می تواند تعداد آنها را به حدی کاهش دهد که ناحیه ای وسیع از سلولهای سطحی را از بین ببرد و منجر به نوعی اسهال خونی (Dysenterie) شدید و ناگهانی شود که به سرعت شخص پرتو دیده را خواهد کشت.

غدد جنسی: اسپر ماتوزوئید بالغ می تواند دوزی معادل ۱۰۰ سیورت را تحمل کند، ولی غدد سازنده اسپر ماتوزوئید نسبت به پرتوها بسیار حساسند و دوزی معادل ۰/۱۵ سیورت تابیده به بیضه ها بیماری اولیگواسپرمی (Oligospermie) را ایجاد می کند. اگر دوز بین ۲ تا ۴ سیورت باشد منجر به عقیم شدن شخص پرتو دیده خواهد شد. اووسیت یا تخمکها نیز نسبت به پرتو ها بسیار حساس اند. اثر تابش بسیار کوتاه مدتی از ۱/۵ تا ۲ سیورت به تخمدان، عقیمی موقت ایجاد خواهد کرد و اگر دوز بیشتر از ۲ سیورت و زمان اصابت آن کمی طولانی تر باشد، بنا به سن زن پرتو دیده، نازایی دائمی به وجود خواهد آمد.

دستگاه تنفسی: ششها نسبت به پرتو ها خیلی حساس نیستند ولی اگر در معرض دوزهایی بین ۶ تا ۱۰ سیورت قرار گیرند ظرف سه چهار ماه در ناحیه ای که پرتو دیده است پنومونی (ذات الریه) ایجاد می شود. حجم زیادی از بافت های ریوی آسیب می بینند و شخص پرتو دیده دچار ناراحتی های تنفسی می شود و در هفته ها و یا ماههای بعد مبتلا به فیبروز ریوی می گردد. کارگرانی که در معدن اورانیم کار می کنند همواره در معرض استنشاق گاز رادن قرار دارند و باید تا حد ممکن مانع از نفوذ این گاز به ریه های آنها شود. استنشاق گاز رادن بر روی ریه های کارگران معدن و یا کسانی که با اورانیم کار می کنند، آلودگی درونی بر روی ریه ها به وجود می آورد. این آلودگی به دلیل به وجود آمدن فرزندان گاز رادن است که همگی نشر دهنده پرتو آلفا هستند. پرتوهای آلفایی که از فرزندان گاز رادن منتشر می شوند از غشاء ریه عبور کرده و بر روی سلولهای حساس برنشها وارد می شوند و در دراز مدت در آنجا سرطان ریه به وجود خواهند آورد.

پرتوهای بتای حاصل از تجزیه تریتیم (رادیوایزوتوپ هیدروژن طبیعی که در اثر پرتوهای خورشیدی و در جو تولید می شود) نیز بر روی ریه ها نشسته و در آنها سرطان ریه به وجود خواهد آورد. در شکل (۶۸) اثر پرتوها را بر روی ریه نمایش می دهد.



شکل (۶۸) اثر پرتوهای را بر روی ریه نمایش می دهد.

عدسی چشم: سلولهای درونی عدسی چشم (Épithélium) که در طول زندگی مرتب با تقسیم سلولی باز سازی می شوند نسبت به پرتوها حساس اند. بنابراین تابش پرتوهای در حدود ۱ سیورت در زمانی بسیار کوتاه منجر به کدر شدن میکروسکپی عدسی در ماههای آینده خواهد شد. اگر دوز بین ۲ تا ۳ سیورت در لحظه بسیار کوتاه و یا دوزهایی کوچک ولی به طور مجموع معادل ۵/۵ تا ۱۴ سیورت در مدت چند ماه به تدریج به چشم تابیده شوند، آب مروارید (Cata rat) نزد شخص پرتو دیده ایجاد خواهند کرد.

بافتهای دیگر: در مقایسه با بافتهای ذکر شده، سایر بافتهای بدن نسبت به پرتوها حساسیت کمتری دارند، البته به استثنای جنین و یا بافتهای در حال رشد کودکان. چکیده این آسیب شناسی ها (پاتولوژیها) را در شکل (۶۹) ارائه کرده ام و می توان با یک نگاه مختصر تأثیر تابش پرتوهای مواد پرتو زا را بر روی نقاط مختلف بدن در دو حالت متفاوت، تابش مختصر و کوتاه و نیز در تابش قوی و طولانی مشاهده کرد.



شکل (۶۸) تأثیر تابش پرتو ها بر بدن انسان. در دو حالت مختلف، تابش مختصر و کوتاه مدت و نیز تابش قوی و طولانی مدت.

۱۱) جراحی های حاصل از ایراد یاسیون کامل:

ایراد یاسیون مهمی در بخشی از بدن با دوزی معادل و یا بیشتر از یک گری (Gry) می تواند سندروم رادیو اکسیپوزیسیون حاد را ایجاد کند.

۱) مرحله اول: با ناراحتی هایی از قبیل بی اشتهايي و حالت تهوع ظاهر می شود.

۲) مرحله انتظار: باید منتظر پیش آمد عوارض آتی بود.

۳) مرحله دوم: که مرحله اصلی است و در آن بیماری ظاهر می شود.

۴) مرحله نهایی: درمان یا مرگ است.

مرحله اصلی که با ظهور بیماری همراه است، بر حسب آنکه بخش مهم پرتو ها به چه بخشی از بدن اصابت کرده باشد می تواند به اشکال مختلف زیر ظاهر شود.

۱) بیماری خونی.

۲) بیماری معده و روده ای.

۳) بیماری مغزی.

۴) بیماری ریوی.

۱۲) جراحی های موضعی:

تابش مستقیم و خارجی پرتو ها تظاهرات بالینی بسیار آشکار و فوری بر روی بافت های بدن دارند، ولی برعکس در تابش درونی که رادیوایزوتوپها به درون بدن نفوذ کرده و پرتو خود را در اندامها منتشر می کنند، تظاهرات بالینی بسیار مختصر دیده می شود و بر حسب مقدار و نیمه عمر رادیوایزوتوپ نفوذ کرده، در برخی از اوقات خطرناکترند و در دراز مدت امکان ایجاد سرطان در بافتی که رادیو ایزوتوپ در آن مستقر شده وجود دارد.

۱۳) اثر پرتوها بر حسب نوع رادیو ایزوتوپ:

برخی از رادیو ایزوتوپهای پرتوزا نظیر تریتم (ایزوتوپ پرتوزای هیدروژن) یا کربن پرتوزا (که به آن کربن ۱۴ می گویند) و یا سزیم ۱۳۷ (که فراورده حاصل از شکست اورانیم است)، بعد از ورود به بدن انسان، در تمام اندامها منتشر می شوند و ایرادیاسیون کلی در تمام اندامهای بدن ایجاد می کنند. این رادیوایزوتوپها تا مدتها در بدن باقی می مانند و اگر مقدار آنها زیاد باشد ضایعاتی در اغلب اندامها به وجود می آورند. نیمه عمر این سه رادیو ایزوتوپ بالا است (ترتیب ۱۲/۳۳ سال کربن ۱۴، ۵۷۳۰ سال و سزیم ۳۰ سال) برخی دیگر از رادیوایزوتوپها در اندامهای ویژه ای مستقر می شوند و در آنها ضایعه موضعی ایجاد می کنند. مثلاً "رادیم ۲۲۶ و استرانسیم ۹۰ به ویژه در استخوان ها جذب شده و پرتو و انرژی خود را به سلولهای مغز استخوان منتقل می کنند (نیمه عمر این دو نیز بسیار بالا است اولی ۱۶۲۰ سال و دومی ۲۸ سال). ید رادیو اکتیو به تیروئید رفته و در آنجا ضایعاتی ایجاد خواهد کرد. خوشبختانه نیمه عمر ید ۱۳۱ فقط ۸ روز است و می توان با تزریق و یا تجویز داروهای ید دار نیمه عمر بیولوژیکی آن را به مراتب کمتر از این مقدار کرد^{۸۶}

۱۴) نوع تابش پرتو ها و مقدار آن:

برای تشخیص خطر واقعی پرتوهای ایزوتوپهای پرتوزا بر بدن انسان لازم است ابتدا مقدار دوز و نوع پرتو را معلوم کرد. دوز مجاز و در واقع بی خطری که اداره بهداشت عمومی فرانسه تعیین کرده ۰/۶۶ تا ۰/۸۳ میلی سیورت در سال است. باید توجه داشت که یک آزمایش رادیو لوژی معمولی حدود ۳۵ درصد و اسکنوگرافی ۴۰ درصد مقدار فوق، پرتو به بدن منتقل می کنند. بنابراین دو تا سه رادیوگرافی در سال حد فوق را می پوشانند. در مورد عملیات رادیولوژی و پزشکی هسته ای

^{۸۶} راندمان تولید ید در نیروگاه ها نسبتاً زیاد است و این عنصر می تواند به صورت بخار در هوا منتشر شود. بعد از حادثه چرنوبیل مقدار ید ۱۳۱ در شیر دامها بسیار زیاد شد، به نحوی که در همان هفته های اول وقوع حادثه میلیونها لیتر شیر آلوده را به دریا ریختند و به کارمندان و کودکان نزدیک محل حادثه مقدار زیادی قرصهای ید دادند.

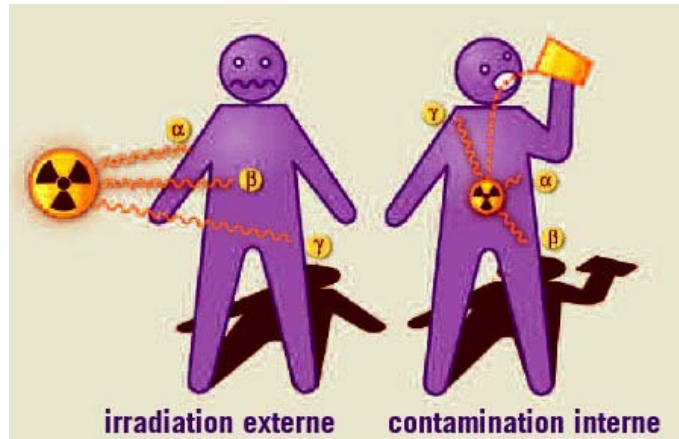
حدود ۲۰ تا ۲۵ در صد مقدار فوق به بدن بیمار تابیده می شود (البته همان طور که در شکل (۶۴) دیده می شود، مقدار دوز واقعا "خطرناک از ۲/۵ میلی سیورت شروع می شود).

۱۵) روشهای تابش پرتو به بدن

تابش پرتو ها به بدن انسان به دو روش صورت می گیرد:

۱) **تابش خارجی:** تابش خارجی به بدن در موقعی اتفاق می افتد که چشمه اصلی نشر دهنده پرتو (از منشاء صنعتی یا پزشکی) خارج از بدن و یا در محیط اطراف (به صورت توده موادی بر روی زمین و یا ابر مانند در هوا) پراکنده باشد و یا اینکه پرتو از یک چشمه مخصوص رادیوگرافی به بدن تابیده شود. تابش خارجی ممکن است به تمام اندامها و یا بخش ویژه ای از بدن اصابت کند. زمانی که شخص دیگر در مسیر تابش چشمه نشر دهنده پرتو نیست اثر پرتو متوقف می شود. در تمام آزمایشهای رادیولوژی تابش پرتو لحظه ای و بر روی نقطه ویژه ای از بدن انجام می گیرد. مثلاً" برای رادیوگرافی استخوانهای شکسته و یا تشخیص بیماریهای ریوی، در لحظه کوتاهی پرتو را بر بدن شخص مورد آزمایش می تابانند و سپس چشمه پرتوزا را از او دور می کنند. این نوع تابش اگر در آن افراط نشود ضایعاتی به بار نخواهد آورد.

۲) **تابش درونی:** تابش درونی در حالتی اتفاق می افتد که چشمه نشر دهند، پرتو در درون اندامهای بدن شخص قرار داشته باشد. در این حالت ماده پرتوزا، پرتوهای خود را به درون اندامی که در آن مستقر شده، نشر می دهد. مثلاً" بر اثر استنشاق مواد پرتوزای گازی شکل این مواد ابتدا به درون ریه نفوذ می کند و از آنجا به اندامی که عنصر اصلی (ایزوتوپ پایدار رادیو عنصر) در آن ذخیره می شود می رود. برای مثال ممکن است پرتوزای موجود در هوای نیروگاه حادثه دیده و یا در موقع تعویض میله های سوخت نیروگاهها، به وسیله ساکنان و یا کارگران نیروگاه استنشاق شده باشد. اتمهای ید از طریق خون به غدد تیروئیدی که همواره ید معمولی در آن ذخیره می شود، می روند و یا سزیم و استرانسیم از طریق خون به مغز استخوانها می روند. سزیم هم خانواده با سدیم و پتاسیم است. رادیو ایزوتوپ استرانسیم که از خانواده عناصر قلیایی خاکی (خانواده کلسیم) است به صورت فسفات در استخوان ذخیره می شود. در حادثه چرنوبیل حجم زیادی از ید و استرانسیم و سزیم با شدت به بیرون از نیروگاه منتشر شد. این رادیو ایزوتوپها به وسیله باد از شمال اروپا به حرکت در آمده، حتی تا جنوب فرانسه انتشار یافتند. بر اثر این حادثه افراد زیادی به سرطان خون لوسمی (Leucémie) مبتلا شدند. در شکل (۶۹) چگونگی این دو نوع تابش پرتو رادیو اکتیو را به صورت نمودار و با تشریح این دو حالت آورده ام.



ایراد یاسیون خارجی است. چشمه پرتوزا در بیرون قرار دارد و تمام بدن در زمان محدودی در معرض پرتو است.

آلودگی به ماده رادیو اکتیو داخلی است. ذرات ماده پرتوزا به درون اندامها نفوذ کرده و می تواند همواره در آنجا باقی بماند.

شکل (۶۹) چگونگی تابش پرتو ها به بدن انسان: بر اثر آلودگی محیط اطراف به طور تصادفی ممکن است هوا و یا زمین به مواد رادیو اکتیو آغشته شده باشد. پرتوهای حاصل از این مواد به اندامهای شخص حاضر در محل اصابت میکنند و به مجرد آنکه این فرد از محل حادثه دور شود و یا آلودگی را برطرف کنند، تابش پرتو متوقف می شود. این نوع تابش را ایرادیاسیون خارجی می نامند. پرتونگاری به کمک پرتوهای گاما و یا ایرادیاسیون غدد سرطانی به وسیله پرتوهای گاما با انرژی بالا از این قبیل می باشند.

برعکس اگر شخصی مواد رادیو اکتیو را استنشاق کند ، یا بنوشد و یا به وسیله تزریق ماده پرتوزا وارد بدنش شود، این عمل را آلودگی داخلی به ماده رادیو اکتیو می نامند. در پزشکی در برخی از موارد ماده رادیو اکتیو با نیمه عمر غالباً کوتاه را به بیمار تزریق می کنند. مثلاً "ید پرتوزا" را برای تشخیص بیماری غدد تیروئیدی، در تصویر نگاری از ید ۱۲۳ استفاده می کنند. این رادیوایزوتوپ ید نیمه عمر نسبتاً کوتاه دارد ۱۳/۳ ساعت به کار می برند این ایزوتوپ پرتوزا به روش جذب الکترونی تجزیه می شود و پرتوگامایی برابر با ۱۵۹ کیلو الکترون ولت دارد که زیاد مخرب نیست. برای از بین بردن سلولهای سرطانی غده تیروئید از ید ۱۳۱ با نیمه عمر برابر ۸/۰۲ روز استفاده می کنند. این ید بعد از جذب به وسیله غدد تیروئیدی با رادیاسیون درونی سلولهای سرطانی را از بین می برد. مقدار این ید بعد از ۸ روز نصف و بعد از ۱۶ روز یک چهارم و عملاً بعد از ۴۰ روز از بین می رود. و در این زمان اکثر سلولهای بسیار فعال غدد تیروئید را از بین برده است.

در پزشکی در مواردی برای تشخیص برخی از بیماریها، مواد پرتوزا را از طریق تزریق به بدن بیمار وارد می کنند. مثلاً "برای تشخیص کارکرد غده های تیروئیدی، ید رادیو اکتیو ۱۲۳ را به بدن بیمار تزریق می کنند و به کمک دستگاههای تشخیص دهنده پرتو، مسیر ید را در بدن او رد یابی می نمایند.

تابش ماده پرتوزا زمانی پایان می یابد که این ماده از بدن شخص بیرون آمده باشد و یا اگر نیمه عمر کوتاه دارد خود به خود از بین برود. تمام رادیو ایزوتوپها به صورت طبیعی و از طریق ادرار دفع نمی شوند. برخی در کبد و یا در استخوان باقی می مانند و بر حسب نیمه عمر خود تخریب می شوند و از بین می روند. در برخی از موارد با تزریق عنصر پایدار از رادیوایزوتوپ پرتوزا، سعی در رقیق کردن ماده رادیو اکتیو می کنند. در پزشکی همواره می کوشند از رادیو ایزوتوپهایی استفاده کنند که نیمه عمر کوتاه دارند. برای هر ایزوتوپ پرتوزا که به صورت تصادفی و یا عمدی وارد اندامهای انسان شده باشد، علاوه بر نیمه عمر معمولی، یک نیمه عمر بیولوژیکی نیز در نظر می

گیرند. نیمه عمر بیولوژیکی عبارت است از زمانی است که نیمه ای از مادهٔ رادیو اکتیو از بدن دفع شده باشد و مسلماً این نیمه عمر کوتاه تر از نیمه عمر واقعی عنصر است. برای مثال به کارگران و ساکنین منطقه ای که حادثه ای از قبیل چرنوبیل یا فوکوشیما اتفاق افتاده بود مقدار زیادی ید معمولی دادند تا یدهای پرتوزای بدن آنها زودتر دفع شود و بدین ترتیب نیمه عمر بیولوژیکی ید را پایین آوردند. برای سایر عناصر پرتوزا کم و بیش تا حد ممکن همین روش را به کار می برند.

۱۶) عناصر پرتوزای موجود در پوسته ی زمین:

پرتو های منتشره از مواد پرتوزای موجود در قشرهای مختلف و پوستهٔ زمین، همواره به بدن ما اصابت می کنند. در حدود پنجاه رادیو عنصر طبیعی در پوسته و اعماق زمین وجود دارند که اغلب آنها از سه خانوادهٔ رادیو عنصرهای طبیعی مشتق می شوند. این سه خانواده عبارتند از: خانوادهٔ توریم، خانوادهٔ اورانیوم و خانوادهٔ اکتینیم. مقدار توریم موجود در قشرهای مختلف زمین بیشتر از دو خانوادهٔ دیگر است و به طور متوسط ۱۰ کیلو گرم در هر هزار تن وجود دارد. عنصر بعدی اورانیوم است که به طور متوسط ۲ تا ۳ کیلوگرم در هر هزار تن مواد موجود در قشر زمین غلظت دارد. گذشته از این سه خانواده، رادیو ایزوتوپ پتاسیم نیز به صورت طبیعی همراه پتاسیم پایدار موجود در زمین به نسبت ۰/۱۱ در صد وجود دارد. نیمه عمر این رادیو ایزوتوپ ۱/۲۶ میلیارد سال می باشد. غلظت این عنصر را بر حسب تعداد تجزیه و یا پرتوزایی آن محاسبه می کنند و مقدار رادیو اکتیویته آن بین ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ تجزیه در ثانیه و در هر کیلوگرم خاک و یا مواد تشکیل دهندهٔ قشر زمین تخمین زده می شود. این رادیو عنصر با انتشار پرتو بتای مثبت و انتشار پرتو گاما تجزیه می شود. پتاسیم معمولی و رایوایزوتوپ آن در انواع مواد غذایی که مصرف می کنیم وجود دارد. پتاسیم در گیاهان انباشته شده، همراه گیاه در بافتهای حیوان ذخیره می گردد. ما هم از محصولهای گیاهی و هم از فراورده های حیوانی استفاده می کنیم. در هر لیتر شیر گاو ۶۰ پرتو در هر ثانیه از پتاسیم موجود در آن منتشر می شود و این عدد همواره ثابت می ماند چون نیمه عمر پتاسیم طولانی است. مقدار دوزی که به بدن ما تابیده می شود بر حسب نوع زمین، از ناحیه ای به ناحیهٔ دیگر تفاوت دارد. در فرانسه مقدار دوزی که به بدن افراد تابیده می شود به طور متوسط در حدود ۰/۳ میلی سیورت در سال است، با وجود این در این کشور نیز بر حسب ترکیبات قشر زمین، این مقدار از ناحیه ای به ناحیهٔ دیگر اختلاف فاحش دارد. در مناطق غربی فرانسه مقدار دوز ۲ تا ۳ برابر نواحی اطراف مرکزی فرانسه است. در سواحل شمال غربی هندوستان مثلاً" در کرالا (Kerala) مقدار دوز از ۳۰ میلی سیورت در سال تجاوز می کند، یعنی صد برابر مقدار دوز متوسط در فرانسه است. باید یاد

آور شد که بخشی از دمای موجود در اعماق زمین ناشی از پرتوزایی طبیعی موجود در قشرهای عمیق زمین است، زیرا پرتوهای منتشره شده، انرژی خود را در اعماق زمین رها می سازند.

۱۷) مواد پرتوزایی که استنشاق و یا با مواد غذایی جذب می کنیم:

از تجزیه اورانیم موجود در قشر زمین، گاز رادن تولید می شود که همواره بخشی از آن را استنشاق می کنیم، پتاسیم رادیو اکتیو در تمام گیاهان وجود دارد. با خوردن گیاهان و یا خوردن فراورده های حیوانی که آنها نیز پتاسیم موجود در گیاهان را خورده اند، همواره مقداری پتاسیم پرتوزا وارد در بدن ما می شود. این پتاسیم همواره در حال تعادل با مقدار پتاسیم موجود در طبیعت است. تنها زمانی این تعادل به هم می خورد که ما مرده باشیم و دیگر پتاسیم پرتوزا مصرف نکنیم. با مقایسه پرتوزایی پتاسیم اسکلت انسانی که چند میلیون سال پیش مرده با پرتوزایی اسکلت انسانی که به تازگی در گذشته، می توان با دقت کافی زمان مرگ انسانهای نخستین را تشخیص داد. زمان نابودی هر یک از دیناسورها (۱۵۰ میلیون سال پیش) را می توان به همین ترتیب از مقایسه مقدار پتاسیم (و یا رادیو عنصرهای دیگری که نیمه عمر های بالا دارند) و در اسکلت آنها باقی مانده به دست آورد.

مقدار پرتوهای که از پتاسیم پرتوزا و گاز رادن وارد بدن ما می شود در حدود ۱/۵۵ میلی سیورت در سال است. البته بیشتر این مقدار از گاز رادن است که از تجزیه اورانیم تولید می شود. می توان گفت یک سوم تابشهای موجود در کره زمین مربوط به همین گاز است که از تجزیه یکی از فرزندان اورانیم، یعنی رادیم ۲۲۶ تولید می شود. گاز رادن جزو عناصر گازهای نادری است که در آخرین ستون جدول تناوبی عناصر قرار دارند و چون قشرهای الکترونی این عناصر کامل است، میل ترکیبی با عناصر دیگر را ندارند و در نتیجه همواره به صورت گاز و در جو زمین منتشر می شوند. از تمام مواد ساختمانی تشکیل دهنده خانه های ما، از تمام آبهای روی زمین (دریاها، اقیانوسها و به ویژه رودخانه ها که از آب باران و سیلابهای کوهستانی تشکیل شده اند) گاز رادن ۲۲۲ متصاعد می شود. ارزش متوسط این گاز در فضای باز حدود ۲ بکرل (دو تجزیه در ثانیه) در هر متر مکعب و در ساختمانهای معمولی حدود ۲۰ بکرل در ثانیه و در هر متر مکعب است. در ساختمانهایی که از گرانیت (سنگ خارا) ساخته شده اند این رادیو اکتیویته هزار بار بیشتر است.

گاز رادن در ریه جذب شده و فرزندان آن که همه پرتوزا هستند در سلولهای ریه باقی می مانند. در آغاز پیدایش کره زمین ملکولها و اتمها در هم آمیخته شده و اولین آجرهای زندگی یعنی آمینو اسیدها به وجود آمدند. مادر همه موجودات زمینی یعنی طبیعت تلاش و انتخابی در جدا سازی عناصر و مواد اولیه لازمه در بدن موجودات را نکرد واز همه مواد موجود در روی سیاره، زندگی را در زمین به وجود آورد. بدن ما و اغلب موجودات از ترکیب چهار عنصر اصلی هیدروژن، اکسیژن، کربن و

ازت و مقدار مختصری از عناصر دیگر موجود در طبیعت نظیر آهن، فسفر، کلسیم، سدیم و پتاسیم و چند عنصر دیگر با نظمی مشخص میلیاردها میلیارد سلولهای بدن ما را ساخته اند. در بین این عناصر برخی از عناصر رادیو اکتیو طبیعی مانند پتاسیم ۴۰ که ایزوتوپی از پتاسیم معمولی ولی پرتوزا است، وجود دارد. در بدن یک فرد عادی به وزن ۷۰ کیلوگرم مقدار ۱۴۰ گرم پتاسیم وجود دارد که مقدار پتاسیم رادیو اکتیو طبیعی موجود در آن ۱/۶۸ میلی گرم بیش نیست، با این وجود همین مقدار پتاسیم در هر ثانیه ۶۰۰۰ پرتو گاما و الکترون از خود منتشر می کند. علاوه بر پتاسیم پرتوزا، کربن پرتوزا C^{14} و هیدروژن پرتوزا H^3 و حتی عنصر رادیوم پرتوزا نیز وجود دارند، که سهمیه آنها نیز در انتشار پرتو از ۶۰۰۰ تشعشع در ثانیه بیشتر است. بنابراین در بستری که با همسر خود خوابیده اید از شب تا صبح در هر ثانیه بیش از ۱۲۰۰۰ تشعشع گاما و الکترون به سوی یکدیگر پرتاب می کنید. خوشبختانه این رادیو ایزوتوپهای طبیعی در تمامی بدن پراکنده شده اند و آسیبی به اشخاص وارد نمی آورند. ولی اگر همه آنها در یک نقطه از بدن مثلاً در ریه متمرکز بودند مرگ شخص در کمتر از یک ساعت حتمی بود و یا حتی نوزاد بدنیا نیامده با وزن چند کیلو گرم هم مرده به دنیا می آمد.

۱۸) مثالهایی از مقدار مواد پرتوزای موجود در محیط زیست ما:

- ۱) آب باران ۰/۳ تا ۱ بکرل در ثانیه رادیو اکتیویته دارد.
 - ۲) آب رودخانه ۰/۰۷ بکرل در هر ثانیه و در هر لیتر فرزندان رادیم ۲۲۶ و ۰/۰۷ بکرل در ثانیه و در هر لیتر پتاسیم ۴۰ و ۱۱ بکرل در ثانیه و هر لیتر تریتم (رادیو ایزوتوپ هیدروژن) پرتوزایی دارد.
 - ۳) آب معدنی ۱ تا ۲ بکرل در ثانیه و در لیتر رادیم ۲۲۶ و رادن ۲۲۲ دارد.
 - ۴) شیر ۶۰ بکرل در ثانیه و در هر لیتر پرتوزایی دارد که قسمت اعظم آن مربوط به پتاسیم پرتوزایست که در گیاهان وجود دارد. حیوان گیاهان را می خورد و از این طریق پتاسیم وارد در شیرش می شود.
 - ۵) زمینهای رسوبی ۴۰۰ بکرل در هر ثانیه و هر کیلوگرم پرتوزایی دارند.
 - ۶) زمین و صخره های گرانیتی در حدود ۸۰۰۰ بکرل در ثانیه و در هر کیلوگرم پرتوزایی دارند. بنابراین در خانه هایی که کاملاً از سنگ خارا ساخته شده اند، مقدار تابش پرتو در آنها به مراتب بیشتر از خانه هایی است که با سایر مواد ساختمانی ساخته شده.
 - ۷) بدن انسان بالغ ۱۲۰۰۰ بکرل در ثانیه تابش پرتویی دارد که ۶۰۰۰ آن مربوط به پتاسیم ۴۰ و بخش مهم دیگر آن مربوط به تریتم (هیدروژن ۳) است. موهای بدن ما تریتم فراوان دارد.
- جدول (۱۱) چگونگی توزیع ترکیبات رادیو اکتیویته طبیعی را مشخص می کند. البته باید توجه داشت که ارقام ارائه شده، ارزش متوسط است. در برخی از نقاط دنیا این دوزها بیشتر و یا در برخی

دیگر کمتر از این حد است. به ویژه ترکیبات و نوع خاک یا صخره و ارتفاع از سطح دریا و اختلاف در عرض جغرافیای تفاوت هایی در آن به وجود می آورد.

تابش پرتو mSv/سال	چشمه نشر دهنده ی پرتو
۰/۳	پرتوهای کیهانی
۰/۳۲	پرتوهای زمینی
۰/۰۱	ایزوتوپهای کیهانی
۰/۱۷	پتاسیم ۴۰
۰/۵۵	رادن ۲۲۲ و فرزندانش
۰/۱۵	رادن ۲۲۰ و فرزندانش
۰/۰۶	پرتوهای از منابع دیگر
۱/۵۶	مجموع پرتوهای که به ما می تابند

جدول (۱۱) منبع پرتوهای موجود در سیاره زمین (در جو، یا در پوسته و یا اعماق زمین) را مشخص می کند.

برای شناخت بهتر رادیو ایزوتوپها، در جدول (۱۲) رادیو ایزوتوپهایی که پیشتر از آنها صحبت کرده ایم را ارائه کرده ام.

نوع پرتو	نیمه عمر	طرز تولید	اسم رادیو عنصر	علامت اختصاری
β^-	سال 12,33	nat, PFT	tritium	^3H
β^-	سال 5730	nat, PFT, PA	carbone 14	^{14}C
e^-, β^-, γ	سال $1,26 \cdot 10^9$	nat	potassium 40	^{40}K
e^-, γ, x	روز 312,2	PA	manganèse 54	^{54}Mn
β^-, γ	روز 70,78	PA	cobalt 58	^{58}Co
β^-, γ	سال 5,27	PA	cobalt 60	^{60}Co
β^-	روز 372,6	PF	ruthénium 106	^{106}Ru
β^-, γ	روز 249,8	PA	argent 110m	^{110m}Ag
e^-, β^-, γ	سال $1,57 \cdot 10^7$	PF	iode 129	^{129}I
e^-, β^-, γ	روز 8,0	PF	iode 131	^{131}I
β^-, γ	سال 2,07	PF	césium 134	^{134}Cs
e^-, β^-	سال 30,1	PF	césium 137	^{137}Cs
e^-, α, γ, x	سال $10,40 \cdot 10^9$	nat	thorium 232	^{232}Th
α, γ, x	سال $7,1 \cdot 10^8$	nat	uranium 235	^{235}U
α, γ, x	سال $4,5 \cdot 10^9$	nat	uranium 238	^{238}U
α, γ, x	سال $24,2 \cdot 10^3$	T	plutonium 239	^{239}Pu
α, γ, x	سال 432	T	américium 241	^{241}Am

nat: رادیو ایزوتوپ طبیعی

PF: فراورده حاصل از شکست اورانیم

PA: رادیو ایزوتوپ تهیه شده به کمک نوترون در نیروگاه

T: عناصر سنگین تر از اورانیم تولیدشده در نیروگاه

PFT: تولید شده در نیروگاه اتمی از نوترونهای حاصل از شکست

Cédérom * Recueil des résultats d'études financées par l'Agence de l'Eau Seine-Normandie *

جدول (۱۲) اسامی و مشخصات برخی از رادیو ایزوتوپها که در پزشکی و صنعت کاربرد دارند.

۱۹) رادیو ایزوتوپهایی که در پزشکی مصرف می شوند:

چنانکه پیش از این گفته شد در پزشکی از رادیوایزوتوپهایی استفاده می شود که نیمه عمر کوتاه دارند و بعلاوه بعد از تصویر برداری Medical imaging ترکیباتی پایدار - از رادیوایزوتوپ به کار برده شده در تصویر برداری درونی - را به شخص مورد آزمایش می دهند تا نیمه عمر بیولوژیکی ایزوتوپ پرتوزا را کوتاه کنند.

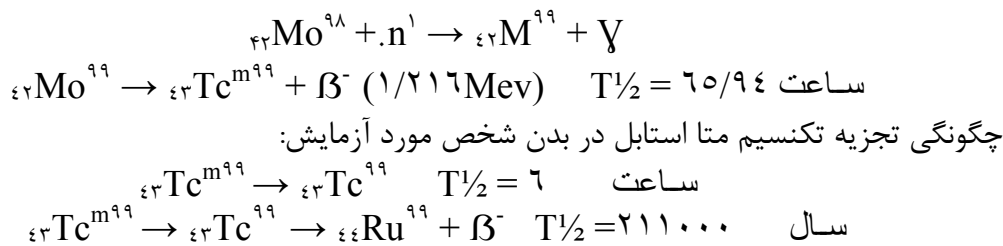
هم اکنون در اروپا بیش از ۱۲ میلیون برنامه کاربردی رادیوایزوتوپها برای تشخیص بیماری و یا برای معالجه (تراپی) در سال انجام می گیرد. بدین ترتیب روزی ۳۰۰۰۰ فرد مورد آزمایش و یا مداوا به وسیله رادیوایزوتوپها قرار می گیرند. این عدد مربوط به کاربرد رادیوایزوتوپهای مختلف در تصویر برداری درونی است و شامل رادیوگرافی ها و اسکنرها نمی شود. ۹۰ درصد عملیات فوق برای تشخیص بیماری و ۱۰ درصد برای مداوا است.

تولید رادیو ایزوتوپ برای تصویر برداری درونی و یا رادیوتراپی با رادیوایزوتوپهایی که نیمه عمر طولانی دارند (حدود چند روز) در مرکز اتمی و در درون نیروگاهها و یا در مرکز شتاب دهنده های بسیار قوی انجام می گیرد. ولی در مورد رادیوایزوتوپهایی با نیمه عمر کوتاه باید دستگاه تبدیل عنصر پایدار به رادیوایزوتوپ مربوطه، در نزدیکی بیمارستان موجود باشد تا به سرعت در دسترس پزشک قرار گیرد. بنابراین در بیمارستانهای ویژه ای که پزشکی هسته ای در آنها انجام می گیرد و مواد پرتوزا را به کار می برند باید چشمه تولید کننده نوترون و یا شتاب دهنده مناسب برای تبدیل عنصر پایدار به رادیوایزوتوپ پرتوزا وجود داشته باشد. بدین سبب بیمارستانهایی که تصویر برداری درونی می کنند و یا رادیوتراپی انجام می دهند، متفاوت از بیمارستانها معمولی است. در این نوع بیمارستانها بخش ویژه ای به نام ناحیه گرم برای تولید رادیوایزوتوپها باید وجود داشته باشد. (منظور از ناحیه گرم محلی که خطر تابش مواد پرتوزا در آن است). و با تصویر زیر این محل مشخص می شود.



به عنوان مثال رادیوایزوتوپ فلئور ۱۸ که نیمه عمری معادل ۱۰۹ دقیقه دارد باید در محل کاربرد آن تولید شود. یا تکنسیم که در ۷۰ درصد سنتیوگرافی ها کاربرد دارد در محل اجرای این آزمایش باید تولید شود. تولید این رادیوایزوتوپها به کمک دستگاههای بسیار ساده ای در خود بیمارستان و

در بخش گرم آن انجام می گیرد. تکنسیم پرتوزا را در خود بیمارستان از شستوشوی ستون گرومتوگرافی که به آن "ماده گاو پرتوزا" می گویند به دست می آید. بر روی ستون شیشه ای (شبه بورت آزمایشگاهی) که مملو از آلومین (اکسید آلومینیم Al_2O_3) است، محلولی از مولیبدن رادیو اکتیو را قبلاً وارد کرده اند. مولیبدن پرتوزا را با قرار دادن مولیبدن پایدار در درون راکتور اتمی و تابش نوترون به آن تولید می کنند. در جهان فقط در تعداد محدودی از نیروگاهها مولیبدن پرتوزا تولید می شود. (کانادا، بلژیک، آفریقای جنوبی، هلند و در مرکز مطالعات اتمی فرانسه و در راکتور اتمی اوزیریس Osiris) مولیبدن ایرادیه شده را به صورت محلول در آورده و بر روی ستون شیشه ای می ریزند. مولیبدن پرتوزا بر روی آلومین مستقر می شود. در هر هفته یک یا دو بار از این ستونها "ماده گاو پرتوزا" را به بیمارستان ویژه ارسال می دارند. در بیمارستان در موقع احتیاج به رادیویازوتوپ تکنسیم، محلولی نمکی بر روی ستون شیشه ای (بورت) ریخته و از انتهای بورت محلول نمکی فرزند مولیبدن که همان تکنسیم ۹۹ است خارج می شود. همواره بخشی از مولیبدن مادر بر روی ستون باقی می ماند. در صورت احتیاج باز هم با ریختن محلول نمکی این ماده گاو را می دوشند و عمل دوشیدن تا چهار نیمه عمر از مولیبدن اولیه ادامه خواهد یافت (حدود ۲۶۰ ساعت).



چنان که در رابطه فوق مشاهده می شود ایزومر تکنسیم تبدیل به تکنسیم ناپایدار می شود و تکنسیم ناپایدار با نشر پرتو بتای منفی تبدیل به روتنیم پایدار می گردد که نیمه عمری معادل ۲۱۱۰۰۰ سال دارد. پرتوزایی ${}_{43}\text{Tc}^{99}$ بسیار کم است و خطری برای شخص مورد آزمایش ندارد.^{۸۷}

^{۸۷} رابطه فعالیت پرتوزایی نسبت مستقیم با تعداد اتمهای پرتوزا و نسبت عکس با نیمه عمر آن دارد، هر قدر نیمه عمر رادیویازوتوپ پرتو زا کوتاه باشد پرتوزایی آن بیشتر است.

$$A = \lambda N \quad \text{زیرا } (\lambda = 0.693 / T_{1/2}) \text{ است و یا } (A = 0.693 N / T_{1/2}) \text{ است.}$$

در مورد ایزومر تکنسیم فرض کنید در موقع آزمایش محلولی که محتوی یک میلیارد بکرل (10^9) اتم ایزومر تکنسیم است را به فرد مورد آزمایش تزریق کرده باشند، این رادیویازوتوپ طبق نیمه عمر خود که ۶ ساعت است در بدن بیمار تخریب می شود و بعد از ۵ نیمه عمر یعنی ۳۰ ساعت تمامی اتم هایش تبدیل به تکنسیم ناپایدار (${}_{43}\text{Tc}^{99}$) می شود. تکنسیم اخیر با نیمه عمر ۲۱۱۰۰۰ سال تخریب و تبدیل به روتنیم پایدار (${}_{44}\text{Ru}^{99}$) می شود حال اگر پرتو زایی این رادیویازوتوپ (${}_{43}\text{Tc}^{99}$) را حساب کنیم:

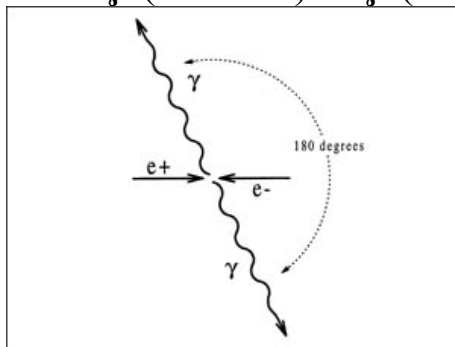
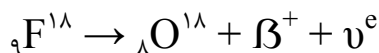
$$A = 1000,000,000 \times 0.693 / 211000 \times 365 \times 24 \times 60 \times 60$$

برابر 0.001 تجزیه در ثانیه و یا 0.062 تجزیه در دقیقه و یا 0.375 تجزیه در ساعت خواهد بود. و حال آنکه پتاسیم موجود در بدن این شخص ۶۰۰۰ تجزیه در ثانیه دارد.

تکنسیم ^{99m}Tc تکنسیم متا استابل (ایزومری از تکنسیم) که نیمه عمری معادل ۶ ساعت دارد، در تصویر برداری درونی به کار برده می شود. این ایزومر ناپایداری درونی خود را با نشر تنها یک پرتو گاما با انرژی ۱۴۰ کیلو الکترون ولت در بدن بیمار رها کرده و تبدیل به رادیوایزوتوپی از تکنسیم می شود. این مقدار انرژی آنقدر بالا نیست که به سلولهای بیمار آسیب زیادی وارد کند و از سوی دیگر با نیمه عمر کوتاه خود بزودی از بین می رود و تبدیل به تکنسیم پرتوزا با نیمه عمری طولانی می شود که شبیه پتاسیم ۴۰ در بدن انسان است. و چون نیمه عمری معادل ۲۱۱۰۰۰ سال دارد لذا پرتوزایی آن نسبت به تکنسیم اولیه بی نهایت کم است و برای بدن زیان بخش نمی باشد.

در دنیا در تصویر برداری (imagerie scintigraphique)، تکنسیم ۹۹ از همه رادیو ایزوتوپها بیشتر مورد استفاده قرار گرفته است. به نحوی که می توان گفت در سال ۲۰۱۰ بیش از ۳۵ میلیون تصویر برداری درونی در دنیا با تکنسیم ۹۹ انجام گرفته است.

فلئور ^{18}F این رادیو ایزوتوپ نشر دهنده بتای مثبت است. بتای مثبت منتشره از این رادیوایزوتوپ انرژی جنبشی زیادی ندارد. در لحظه ای که انرژی جنبشی اش به صفر رسید با یک الکترون منفی که در محیط فراون وجود دارد برخورد کرده و منهدم می شوند. نتیجه انهدام آنها، دو پرتو گاما به انرژی هریک ۵۱۱ کیلو الکترون ولت Kev است که در جهت مخالف یکدیگر (در ۱۸۰ درجه) منتشر می شوند. نیمه عمر فلئور ۱۰۹ دقیقه است.

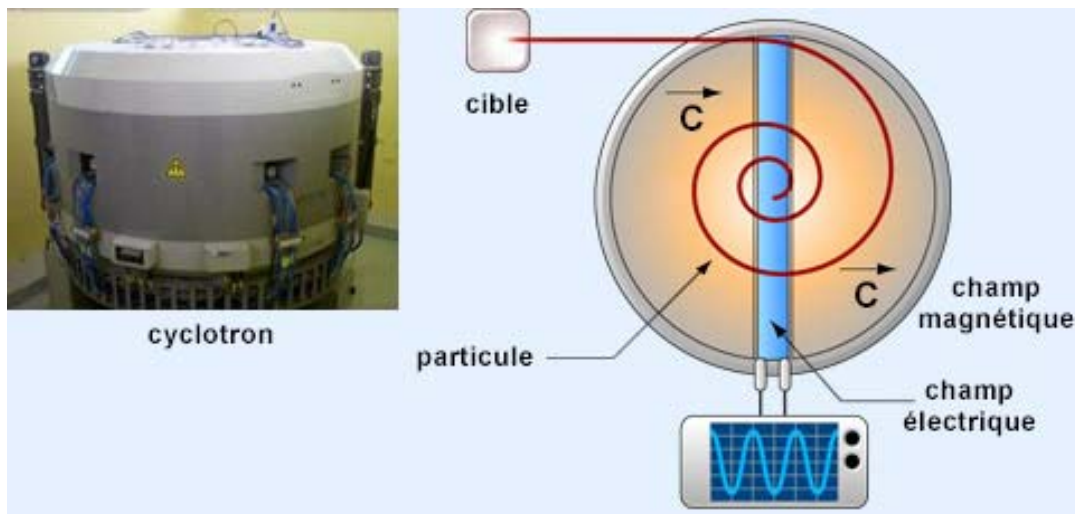
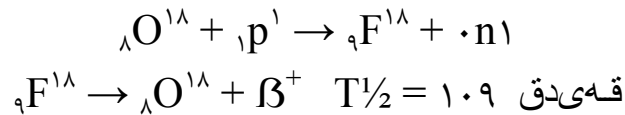


فلئور ۱۸ در نرولوژی (Neurologie)، کاردیولوژی (Cardilogie) و سرطان شناسی (Oncologie) برای تشخیص تومورهای بدخیم به کار برده می شود. و این نیمه عمر کوتاه کافی برای جذب او به وسیله گلوکز به صورت اکسی گلوکز فلئورور (^{18}F FDG) است که اجازه می دهد، در زمانی کوتاه تصویر برداری درونی از بیمار کرده و رادیوایزوتوپ پرتوزا از بین برود. این رادیو ایزوتوپ را به صورت اکسی گلوکز فلئورور به بیمار تزریق می کنند. گلوکز به وسیله سلولهای بسیار فعال سرطانی که در حال رشد سریع هستند جذب می شود. پس از جذب گلوکز پرتوزا دو دستگاه شمارشگر پرتو

^{۸۸} ^{18}F FDG, ou ${}^2-[^{18}\text{F}]\text{fluoro-}2\text{-désoxy-D-glucose}$

گاما را در طرفین بیمار قرار می دهند. تعداد پرتوهای شناخته شده به وسیله شمارشگر مشخص کننده محل جذب گلوکز پرتوزا می باشد.

فلوئور پرتوزا را به دلیل نیمه عمر کوتاهش باید در خود بیمارستان تولید کرد. برای ساخت ایزوتوپ فلوئور پرتوزا از نوعی سیکلوترون کوچک همانگونه که در شکل (۷۰) ارائه شده است استفاده می کنند. پروتون (هسته هیدروژن) را تحت تأثیر میدان الکتریکی و میدان مغناطیسی عمود بر هم شتاب می دهند. پروتون بعد از طی مداری که در شکل مشخص شده شتاب دورانی می گیرد و در انتهای مسیر به منبعی از آب که اکسیژن موجود در آن از ایزوتوپ اکسیژن ۱۸ غنی شده است تابیده می شود. (اکسیژن ۱۸ به نسبت ۰/۲ در صد در اکسیژن معمولی که ۱۶ است وجود دارد.) در اثر برخورد، پروتون وارد در هسته اکسیژن ۱۸ شده و یک نوترون از هسته ضربه خورده خارج می گردد. در اثر این فرایند اتم اکسیژن تبدیل به اتم فلوئور ۱۸ می شود که ناپایدار است و با نیمه عمری معادل ۱۰۹ دقیقه و با انتشار پرتو بتای مثبت دو باره تبدیل به اکسیژن پایدار ۱۸ می گردد.



شکل (۷۰) نموداری از دستگاه شتاب دهنده برای تولید رادیوایزوتوپ فلوئور پرتوزا. این سیکلوترون کوچک را می توان در اتاق گرم یک بیمارستان قرار داد و هر وقت که به فلوئور ۱۸ نیاز افتاد آنرا به کار می اندازند. پروتون شتاب گرفته به منبعی از آب که اکسیژن ۱۸ در آن غنی شده است تابیده می شود. در این فرایند پروتون وارد در هسته اکسیژن ۱۸ شده و آنرا تبدیل به فلوئور ۱۸ ناپایدار می کند.

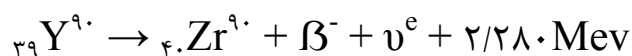
ید ${}^{131}_{53}\text{I}$: رادیوایزوتوپ ید پرتوزا را در تصویر برداری درونی غدد تیروئیدی به کار می برند. نیمه عمر آن ۱۳/۳ ساعت است و نشر دهنده پرتو گاما می باشد و با روش جذب الکترونی تبدیل به کزنون ${}^{131}_{54}\text{Xe}$ می گردد. انرژی پرتو گامای آن ۱۵۹ کیلو الکترون ولت است که آسیب زیادی به

سلولهای غدد تیروئیدی نمی زند. بعد از تصویر نگاری با تزریق ید معمولی مقدار این ید پرتو را می توان در غدد تیروئید کم کرد.

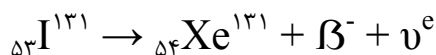
گالیم ^{67}Ga رادیوایزوتوپی از گالیم است که متابولیسمی شبیه به آهن دارد. در تصویر برداری درونی از آن برای تشخیص بیماری های مغز استخوان و شناخت برخی از عفونت ها، لنفومها و برخی تومورها استفاده می کنند. نیمه عمر گالیم ^{67}Ga ۳/۲۶ روز است و با روش جذب الکترونی تبدیل به ژرمنیم ^{67}Ge می شود. دو پرتو گاما از خود منتشر می کند یکی به انرژی ۱۸۵ کیلو الکترون ولت و دیگری به انرژی ۳۰۰ کیلو الکترون ولت است.

عناصر ذکر شده در فوق غالباً در تصویر برداری درونی (Medical imaging) کاربرد دارند. اگر قصد معالجه بیماری باشد (رادیوتراپی Radio Trérapie) در این صورت ایزوتوپ پرتوزا را به بیمار تزریق کرده و پرتوهای منتشره از رادیوایزوتوپ پرتو زا، سلولهای ویژه ای را از بین می برند.

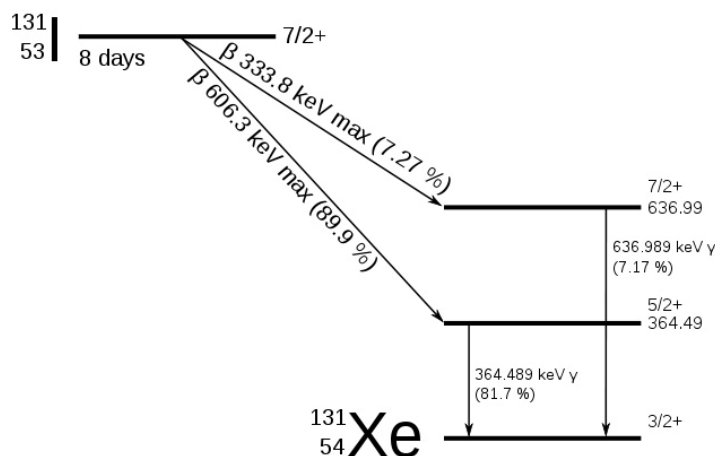
ایتیریم ^{90}Y این رادیو ایزوتوپ را به صورت نهفته شده در رزین به صورت گلوله های میکروسکوپی به بیمار می دهند. این گلوله های بی نهایت ریز در جدار کانالهای میکروسکوپی تومور های سرطانی کبد قرار می گیرند. ایزوتوپ ایتیریم ۹۰ این مزیت را دارد که منحصراً "نشر دهنده بتای منفی با انرژی بسیار (۲/۲۸۰ Mev) است. چنانچه پیش از این گفتم پرتوهای بتای منفی قدرت نفوذ چندانی ندارند و یک برگ پلاستیک مانع از عبور آنها می شود. ولی در کانالهای کبدی در شعاعی معادل ۵ میلیمتر نفوذ می کنند و سلولهای سرطانی را از بین می برند. نیمه عمر این رادیوایزوتوپ ^{90}Y ۲/۶۸ روز است، بنابراین بعد از ده تا حداکثر پانزده روز اتمهای پرتوزای این ایزوتوپ از بین خواهند رفت و در این مدت عملاً "بسیاری از سلولهای سرطانی را از بین برده اند. چنانچه گفته شد، به دلیل قدرت نفوذ بسیار کم پرتوهای بتای منتشره از این رادیوایزوتوپ، نزدیکی بیمار با اطرافیان هیچ گونه لطمه ای به آنها نمی زند.



ید ^{131}I : ید هم در تصویر برداری درونی و هم در معالجه غدد تیروئیدی کاربرد دارد. مکانیسم انتخابی ید بر روی سلولهای غدد تیروئیدی معالجه سرطان غدد تیروئیدی را میسر می سازد. این رادیو ایزوتوپ با نشر بتای منفی و گامای ضعیف و نیمه عمر ۸ روز، در از بین بردن سلولهای سرطانی غدد تیروئیدی در برخی موارد از برداشتن غدد تیروئیدی بهتر نتیجه داده است. ید با انتشار بتای منفی (۹۰ درصد) به انرژی ۶۰۶ و گاما با انرژی ۳۶۴ Kev تبدیل به کزنون ^{131}Xe پایدار می شود.



در شکل (۷۱) نمودار تجزیه ید ۱۳۱ را ارائه کرده ام این نوع نمودار را در موقع تشریح مشخصات رادیوایزوتوپها ترسیم می کنند تا چگونگی کامل تجزیه آنها مشخص شود. در این کتاب که برای همگان نوشته شده است بحث زیادی در مورد مشخصات عمیق رادیوایزوتوپ را بیش از این جایز ندانستم.



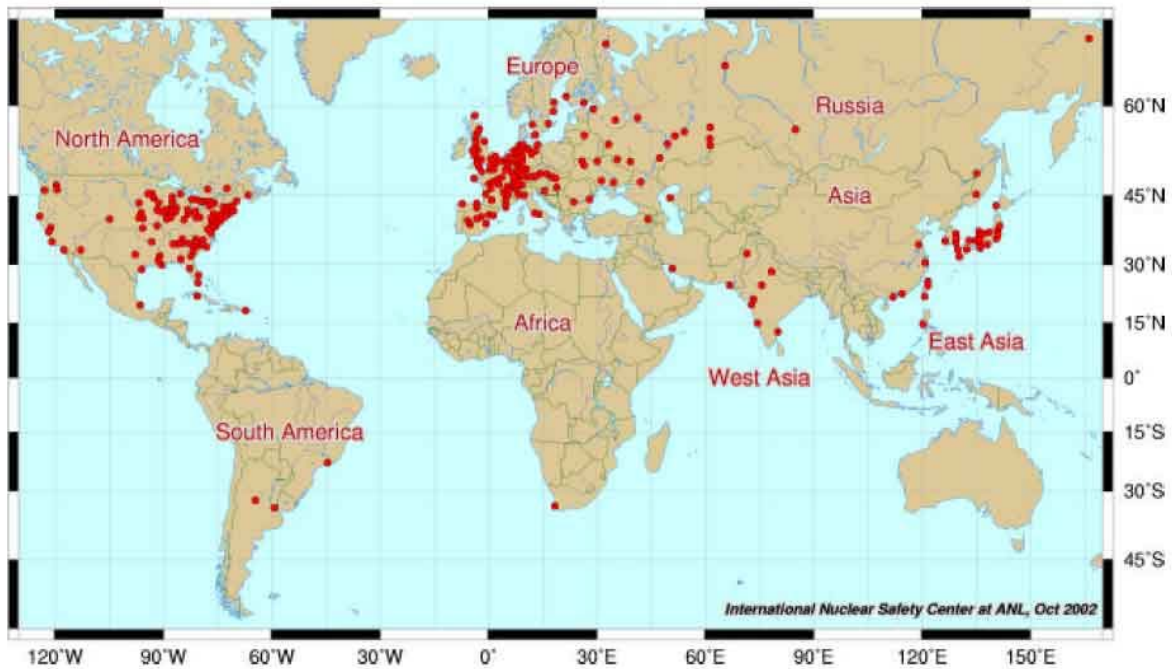
شکل (۷۱) نموداری از چگونگی تجزیه رادیوایزوتوپ ید ۱۳۱ همانطور که می بینید این رادیوایزوتوپ ابتدا با انتشار دو بتای منفی اولی به نسبت ۸۹/۹ در صد با انرژی ۶۰۶/۳ Kev و دومی با نسبت ۷/۲۷ در صد با انرژی ۳۳۳/۸ Kev به دو تراز انرژی از عنصر بعدی که کزنون است می رسد و در لحظه ای بی نهایت کوتاه کزنون با نشر دو پرتو گاما با انرژیهای ۶۳۶/۹۹ و ۳۶۴ Kev تبدیل به کزنون پایدار می شود.

رادیو ایزوتوپهای فراوانی در پزشکی و صنعت مصرف دارند، در این مختصر نمی توان از چگونگی تولید و کاربرد همه آنها صحبت کرد در جدول (۱۳) اسامی و مشخصات برخی از رادیو ایزوتوپهای مهم را ارائه کرده ام.

انرژی پرتو Kev	نیمه عمر	نوع تجزیه	علامت اختصاری	رادیوایزوتوپ تصویر نگاری
$\gamma_{2,011}$ و $\gamma_{1,011}$	۱۰۹/۷۷ دقیقه	β^+	${}^18_9\text{F}$	فلوئور
185γ	۳/۲۶ روز	جذب الکترون	${}^{67}_{31}\text{Ga}$	گالیم
190γ	۱۳/۱ ثانیه	ایزومری	${}^{m81}_{36}\text{Kr}$	کریپتون
$\gamma_{2,511}$ و $\gamma_{1,511}$	۱/۲۷ دقیقه	β^+	${}^{87}_{37}\text{Rb}$	روبیوم
140γ	۶/۰۱ ساعت	ایزومری	${}^{m99}_{43}\text{Tc}$	تکنسیم
245γ و 171γ	۸۰ روز	جذب الکترونی	${}^{111}_{49}\text{In}$	اندیم
159γ	۱۳/۳ ساعت	جذب الکترون	${}^{123}_{53}\text{I}$	ید
167γ و 81γ	۵/۲۴ روز	β^-	${}^{133}_{54}\text{Xe}$	کزنون
167	۳/۰۴ روز	جذب الکترون	${}^{201}_{81}\text{Tl}$	تالیم
				رادیوایزوتوپ برای Thérapie
$2/80\text{Mev}\beta^-$	۲/۶۷ روز	β^-	${}^{90}_{39}\text{Y}$	ایتیریم
182γ و $6.6\text{Kev}\beta^-$	۸/۰۲ روز	β^-	${}^{131}_{53}\text{I}$	ید

جدول (۱۳) اسامی و مشخصات برخی از رادیوایزوتوپها که در پزشکی کاربرد دارند.

برای اطلاع بیشتر از وضعیت نیروگاههای اتمی جهان، در شکل (۷۲) نقشه جهان را ارائه داده و محل نیروگاههای موجود با دایره ای به رنگ قرمز مشخص شده است.



شکل (۷۲) نقشه جهان و محل نیروگاه های کشورهای دارنده نیروگاه اتمی.

دانش و فن برای همه

۱

دکتر علی افضل صمدی

متولد ۱۳۱۷ در کرمانشاه،

دارای دکترای سیکل سوم در شیمی هسته‌ای از دانشکده علوم پاریس

و دکترای دولتی فرانسه در شیمی فیزیک هسته‌ای.

دکتر صمدی علاوه بر تدریس در دانشکده علوم دانشگاه مشهد (۵۱-۱۳۴۷ و ۵۹-۱۳۵۶)

سال‌هایی را نیز به تحقیق در بخش پژوهش‌های مرکز اتمی فرانسه اشتغال داشته است.

از او آثار متعددی به صورت کتاب و مقاله منتشر شده است.

کتاب/اصول شیمی (چاپ ششم، ۱۳۶۸) وی سال‌ها متن درسی شیمی عمومی

اغلب دانشگاه‌های کشور بود.

از دیگر کتاب‌های اوست: ستارگان، زمین و زندگی (۱۳۶۹)، افسانه زندگی (۱۳۷۳)،

شیمی عمومی (۱۳۷۷)، انرژی اتمی (۱۳۸۷)،

از بی‌نهایت بزرگ تا بی‌نهایت کوچک (۱۳۸۷) و جهان به کجا می‌رود؟ (۱۳۸۸)



چاه کتاب

ISBN: 978-964-2533-15-2



9 78 964 2 533 15 2