

بررسی انواع چرخه‌های سوخت هسته‌ای

۱- مقدمه

در جهان امروز انرژی هسته‌ای سهم مهمی در تولید انرژی و پیشرفت علوم و فنون دارد به طوری که تا ابتدای سال ۲۰۱۴ میلادی توان صنعت هسته‌ای در جهان بیش از ۳۷۰ گیگاوات انرژی الکتریکی بوده که این مقدار حاصل فعالیت بیش از ۴۳۰ راکتور در حال کار در ۳۱ کشور جهان است و این سهم در آینده رو به افزایش خواهد بود که بر طبق پیش‌بینی‌ها این رقم تا سال ۲۰۳۰ به حدود ۶۶۰ گیگاوات می‌رسد. ایران نیز از این قاعده مستثنی نبوده و در برنامه توسعه خود تولید بیست هزار مگاوات برق از نیروگاه‌های هسته‌ای را مد نظر قرار داده است. گسترش روز افزون نیروگاه‌های هسته‌ای کاملاً منوط به در نظر گرفتن سوخت‌های شکافت‌پذیر به عنوان منبع انرژی، در تأمین نیاز این واحدها می‌باشد. در این راستا دستیابی به فناوری و داشتن چرخه سوخت هسته‌ای امری ضروری می‌باشد.

از مهمترین و اساسی‌ترین فعالیت‌های مقدماتی در تدوین برنامه راهبردی توسعه چرخه سوخت هسته‌ای شناخت علمی و عملکرد متداول‌ترین و کارآمدترین چرخه‌های سوخت هسته‌ای در جهان است. که در دو گروه به شرح زیر طبقه‌بندی و از هم متمایز شده‌اند:

- گروه اول: چرخه سوخت اورانیومی
- گروه دوم: چرخه سوخت توریوم

۲- چرخه سوخت اورانیومی

اورانیوم پس از اکتشاف، استخراج و استحصال با فرمول شیمیایی U_3O_8 تحت عنوان کیک زرد، به تاسیسات فرآوری و تبدیل اورانیوم انتقال یافته و کیک زرد در این تاسیسات به هگزا فلورید اورانیوم طبیعی تبدیل می‌گردد. در تاسیسات غنی سازی هگزا فلورید اورانیوم طبیعی به هگزا فلورید اورانیوم غنی شده تبدیل می‌شود. در تاسیسات تولید بسته و مجتمع‌های سوخت با تبدیل هگزا فلورید اورانیوم به پودر دی‌اکسید اورانیوم و در نهایت ساخت قرص‌های سوخت و جاگذاری آنها در غلاف‌های مخصوص بسته‌ها و مجتمع‌های سوخت برای راکتورهای حرارتی آب سبک تولید می‌گردد. این سوخت‌ها در نیروگاه‌های هسته‌ای به منظور

تامین انرژی مورد استفاده قرار می‌گیرند. در عمل پس از پایان عمر مفید سوخت در نیروگاه، سوخت‌های مصرف شده از راکتور خارج شده و در محلی به صورت موقت برای کاهش پرتوزایی و سرد شدن نگهداری می‌شوند. سوخت‌های مصرف شده پس از سرد شدن و کاهش پرتوزایی به تاسیسات آماده سازی برای انبار دائم انتقال یافته و در محل‌های مخصوص که برای این منظور در نظر گرفته شده در دو حالت انبار دائم و یا نگهداری درازمدت انبار می‌شوند. کل این فرآیند را که از اکتشاف معادن اورانیوم آغاز می‌شود و تا انبار دائم سوخت‌های مصرف شده ادامه پیدا می‌کند، «چرخه سوخت هسته‌ای باز» می‌نامند. هریک از این تاسیسات به تنهایی و یا در مجموع می‌توانند قسمتی و یا کل فرآیند چرخه سوخت هسته‌ای باز را تحت پوشش قرار دهند.

در زیر شرح کلی هریک از فرآیندهای چرخه سوخت هسته‌ای باز به همراه مطالعه و ارزیابی وضعیت جهانی این تاسیسات به منظور کسب شناخت از عملکرد آنها آورده شده است.

۲-۱- شرح کلی فرآیند استخراج اورانیوم از سنگ معدن و تولید کیک زرد

اولین حلقه تولید سوخت هسته‌ای اکتشاف اورانیوم است، که لازم است طی عملیات معدن‌کاری و کانه‌آرایی سنگ معدن، این عنصر استخراج گردد. در حال حاضر بیش از ۸۰ کشور جهان در زمینه اکتشاف و ۲۰ کشور در زمینه تولید اورانیوم در جهان فعال هستند. توضیح اینکه ایران با تولید اکسید اورانیوم در سال ۲۰۰۶ در بندرعباس آخرین کشور از ۲۰ کشور فوق می‌باشد.

اکتشاف اورانیوم در جهان به صورت اصولی در اوایل سال ۱۹۴۰ شروع گردید. اکتشاف اورانیوم ابتدا اهداف نظامی را دنبال می‌نمود و از دهه ۱۹۵۰ با ساخت نیروگاه‌های اتمی اهمیت اکتشاف اورانیوم بیشتر نمایان گردید. اولین راکتور اتمی در سال ۱۹۵۷ در انگلستان با قدرت ۵۰ مگاوات ساخته شده است و تا سال ۲۰۱۴ به بیش از ۴۳۰ راکتور رسیده است. این اعداد اهمیت اکتشاف اورانیوم و به تبع آن تولید آن را در جهان نشان می‌دهد.

سنگ‌های معدنی اورانیوم براساس فراوانی اورانیوم در آنها عیار بندی می‌شوند. معمولاً عیار سنگ‌های معدنی اورانیوم را با واحدی تحت عنوان ppm می‌سنجند (یک ppm عبارت است از: یک گرم اورانیوم در یک تن سنگ معدن). عیار متوسط اورانیوم ppm ۴ ~ ۲ است، که در منابع مختلف میزان آن متفاوت است. جدول ۱_ میزان متوسط اورانیوم در منابع مختلف را نشان داده است: از حدود ۲۰۰ نوع کانی اورانیوم، کانی‌های دارای کاربرد تجاری در اکتشاف و معدن‌کاری در جدول ۲_ نشان داده شده‌اند.

جدول ۱: غلظت اورانیوم در منابع مختلف طبیعی

منبع	غلظت (ppm)
کربنات	۲/۲
ماسه سنگ	۰/۵
شیل	۳/۷
گرانیت	۳
بازالیت	۱
آب دریا	۰/۰۱

جدول ۲: کانی‌های تجاری اورانیوم

نوع کانی	اجزاء
اکسید اورانیوم	اورانینیت، نشبلاند، گامیت، بکرلیت
اکسید اورانیوم	برانریت، دیویدیت، پیروکلر
سیلیکات‌های اورانیوم	کافی نیت، اورانوفان، اورانوتوریت
فسفات‌های اورانیوم	آتونیت، توربرنیت
وانادات‌های اورانیوم	کارنوتیت، تیوامیت
مواد کربن دار اورانیوم	توکولیت، کمیکس آرانینیت با مواد کربن دار

اورانیوم عنصری است که به صورت گسترده در پوسته زمین پراکنده شده و معمولاً به عنوان ماده اولیه تولید سوخت هسته‌ای در نیروگاه‌های هسته‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد. مهمترین ایزوتوپ‌های این عنصر به صورت طبیعی از ایزوتوپ اورانیوم ۲۳۸ به میزان ۹۹/۳ درصد و اورانیوم ۲۳۵ به میزان ۰/۷ درصد می‌باشد، که ایزوتوپ اورانیوم ۲۳۵ آن به دلیل شکافت پذیری و احتمال بالای شکافت در اثر جذب نوترون حرارتی، در صنعت تولید سوخت هسته‌ای کاربرد فراوان دارد.

روش فرآوری و تولید کیک زرد در جهان معمولاً برحسب نوع سنگ‌های معدنی متغیر و متفاوت است. در عمل فرآیند مذکور را به دو دسته عمده تقسیم می‌کنند:

- استحصال اورانیوم از انواع سنگ معدن آن
- استحصال اورانیوم از سنگ معدن‌های فسفاته

در هر یک از این فرآیندها بر حسب نوع سنگ‌های معدنی، می‌توان روش‌های مختلف استخراج و استحصال اورانیوم را بکار برد.

- فرآیند استخراج و استحصال اورانیوم از سنگ‌های معدنی

فرآیند استخراج تجاری و صنعتی اورانیوم از سنگ‌های معدنی با عیار تقریباً مناسب در سه گروه به شرح زیر طبقه‌بندی می‌شود:

- گروه اول: معادن زیر زمینی
- گروه دوم: معادن روی سطحی
- گروه سوم: فروشوئی برجا

فرآیند استخراج اورانیوم از معادن زیر زمینی معمولاً به صورت سنتی با حفر تونل‌های عمودی و افقی در زمین و استخراج و انتقال سنگ معدن به سطح زمین صورت می‌گیرد. استخراج اورانیوم از معادن سطحی نیز به همین صورت و با هزینه‌های به مراتب کمتر انجام و سنگ معدن حاوی اورانیوم به سطح زمین انتقال

داده می‌شود. در هر دو فرآیند سنگ معدن به تاسیسات جداسازی اورانیوم از سنگ معدن ارسال می‌گردند. در عوض در روش فروشوئی برجا لازم نیست سنگ معدن به محل دیگری انتقال یابد، بلکه در محل، فرآیند جداسازی اورانیوم از سنگ معدن با اضافه کردن حلال انجام می‌گیرد. بطور کلی و در مجموع برای استحصال اورانیوم از سنگ معدن لازم است، فرآیندهای زیر به ترتیب انجام گیرد:

الف) سنگ شکنی و آسیاب کردن سنگ معدن

ب) فروشوئی در اسید و یا قلیا

پ) تغلیظ شیمیائی و جداسازی اورانیوم از محلول

ت) تولید کیک زرد U_3O_8

– فرآیند استخراج اورانیوم از ترکیبات فسفات

از دیگر طرق تامین اورانیوم مورد نیاز نیروگاه‌های هسته‌ای، استخراج و استحصال اورانیوم از ترکیبات فسفات و اسید فسفریک است، که به صورت گسترده در کودهای شیمیائی مورد استفاده قرار می‌گیرد. به این ترتیب با استحصال اورانیوم از این ترکیبات علاوه بر جلوگیری از ورود اورانیوم به چرخه طبیعت، می‌توان به میزان حدود ۱۰٪ از تقاضای جهانی اورانیوم را از این طریق تولید کرد. در زمینه استخراج و استحصال اورانیوم از ترکیبات فسفات، روش‌های مختلفی ابداع و بعضاً به صورت تجاری و صنعتی به شرح زیر مورد استفاده شده است:

• فرآیند استحصال از اسید فسفریک

• فرآیند استحصال از اوکتیل پیروفسفریک اسید

• فرآیند استحصال از اوکتیل فنیل فسفریک اسید

فرآیند استحصال اورانیوم از اسید فسفریک مرطوب، متداول‌ترین است. استحصال اورانیوم به طریق صنعتی است، که در دو سیکل عمل جداسازی اورانیوم انجام می‌شود. فرآیند استحصال اورانیوم از ترکیبات فسفات به دلیل هزینه نسبتاً زیاد در مقایسه با استحصال اورانیوم از سنگ معدن در حال حاضر تقریباً تعطیل شده است.

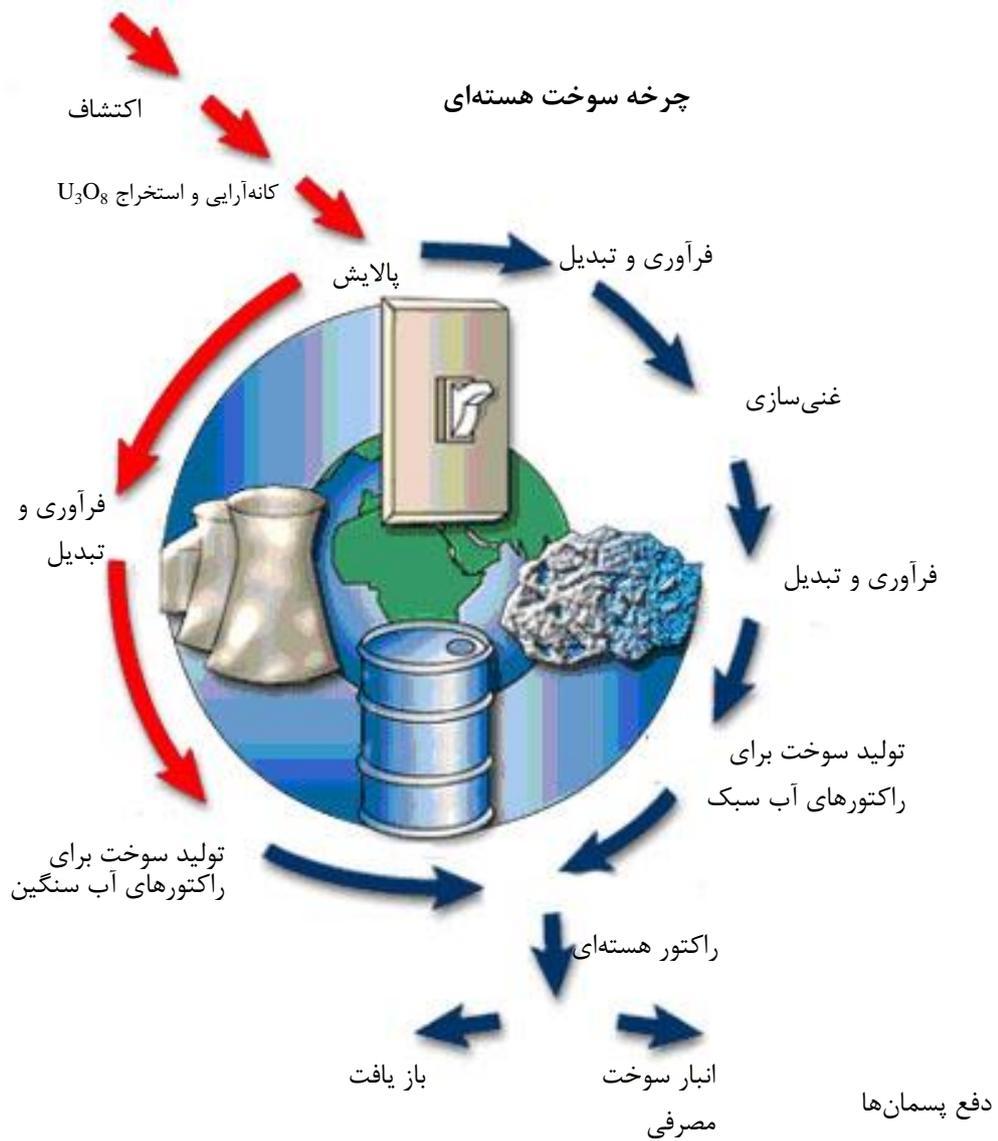
۲-۲- شرح کلی فرآوری و تبدیل اورانیوم

یکی از مهمترین تاسیسات در چرخه سوخت هسته‌ای تبدیل کیک زرد یا U_3O_8 به ترکیبات مختلف اورانیوم از قبیل: UF_6 ، UF_4 ، UO_2 ، اورانیوم فلزی، UO_3 می‌باشد. این ترکیبات به صورت غنی شده از ایزوتوپ اورانیوم ۲۳۵ و یا اورانیوم طبیعی در نیروگاه‌های هسته‌ای کاربرد دارند. کارخانجات تبدیل اورانیوم نقش مهمی در تاسیسات هسته‌ای ایفا می‌کنند و می‌توانند در صنعت و اقتصاد هر کشور تاثیرگذار باشند. کشورهای متعددی در این زمینه فعالیت‌های مختلفی انجام داده‌اند اما از میان آنها

تنها کشورهای محدودی به این دانش دست یافته‌اند. معمولاً این کارخانجات برای تولید سه نوع سوخت هسته‌ای به شرح زیر طراحی می‌شوند:

- پودر دی‌اکسید اورانیوم طبیعی؛
- پودر دی‌اکسید اورانیوم غنی شده؛
- سوخت‌های فلزی و آلیاژی اورانیوم طبیعی و بسیار غنی شده.

همانطوری که مشاهده می‌شود پس از محلول‌سازی کیک‌زرد با اسید نیتریک، محلول نیترات اورانیوم از طریق خالص‌سازی، تبخیر و جامد سازی و رسوب گیری به آمونیوم اورانیل کربنات AUC تبدیل می‌گردد. فرآیند تبدیل AUC به UO_2 پیچیده بوده و مکانیزم واکنش نیز به طریق مختلف قابل انجام است. معمولاً از یک راکتور دوار جهت انجام واکنش تجزیه استفاده می‌شود و در نهایت پودر دی‌اکسید اورانیوم تولید می‌گردد. پودر حاصل (UO_2) به منظور تولید سوخت نیروگاه‌های آب‌سنگین و یا گرافیت گاز به تاسیسات تولید بسته‌ها و مجتمع‌های سوخت ارسال می‌گردد. همچنین از طریق احیا در مجاورت منگنز (Mg)، اورانیوم فلزی تولید خواهد شد. فرآیند تولید UF_4 توسط هیدروفلوریناسیون UO_2 با گاز HF (هیدروژن فلوراید)، انجام می‌شود. جهت انجام این واکنش از یک راکتور دو مرحله‌ای استفاده می‌شود. UF_4 و UO_2 در خلاف جهت وارد راکتور می‌گردند تا گرادیان دما و غلظت مناسب جهت تولید UF_4 حاصل شود. UF_4 تولید شده در داخل ظروف مخصوص تخلیه گردیده و به محل ذخیره سازی موقت فرستاده می‌شود. UF_4 تولیدی با گاز F_2 واکنش داده و هگزا فلوراید اورانیوم را تولید می‌کند. این ماده که محصول نهایی تاسیسات فرآوری اورانیوم است در سیلندرهای مخصوصی جمع‌آوری شده و به کارخانه غنی‌سازی ارسال می‌گردد، فرآیند تولید UF_6 مشتمل بر سه قسمت: فلوریناسیون، کندانس کردن و تصفیه گازهای آلوده می‌باشد. در شکل ۱ یک نمونه از چرخه سوخت هسته‌ای باز ارائه شده است. همانطوری که مشاهده می‌شود این چرخه از دو بخش تشکیل شده است، بخش اول - که به رنگ مشکی نشان داده شده است، قسمتی از فعالیت‌های مرتبط با چرخه سوخت هسته‌ای از جمله غنی‌سازی اورانیوم، تبدیل اورانیوم به دی‌اکسید اورانیوم و در نهایت ساخت مجتمع و بسته‌های سوخت را عهده‌دار است و بخش دوم - که به رنگ قرمز نشان داده شده است قسمت دیگری از فعالیت‌های مرتبط با چرخه سوخت هسته‌ای را عهده‌دار می‌باشد. بنابراین همانطوری که عنوان شد به منظور تبدیل کیک‌زرد (YC) به ترکیبات مختلف اورانیوم می‌توان تمام و یا بخشی از این عملیات را در یک محل و یا در چندین محل مجزا از هم، انجام داد.



شکل ۱: تاسیسات زیر مجموعه چرخه سوخت هسته‌ای باز به صورت منفرد از هم

۲-۳- شرح فرآیند غنی‌سازی اورانیوم

اورانیوم طبیعی - که از فرآیند فرآوری بدست می‌آید- حاوی تنها ۰/۷۱۱ درصد ایزوتوپ U_{235} است و بقیه آن را ایزوتوپ U_{238} و سایر ایزوتوپ‌ها تشکیل می‌دهند. برای تهیه سوخت اغلب راکتورها، از جمله راکتورهای آب سبک (آب تحت فشار PWR یا راکتور آب جوشان BWR) باید میزان ایزوتوپ U_{235} در سوخت به ۳~۴ درصد برسد. بنابراین افزایش درصد ایزوتوپ، مورد نیاز است. فرآیند افزایش ایزوتوپ U_{235} را غنی‌سازی اورانیوم می‌نامند.

بطور کلی برای انجام فرآیند غنی‌سازی می‌توان به روش‌های زیر اشاره نمود:

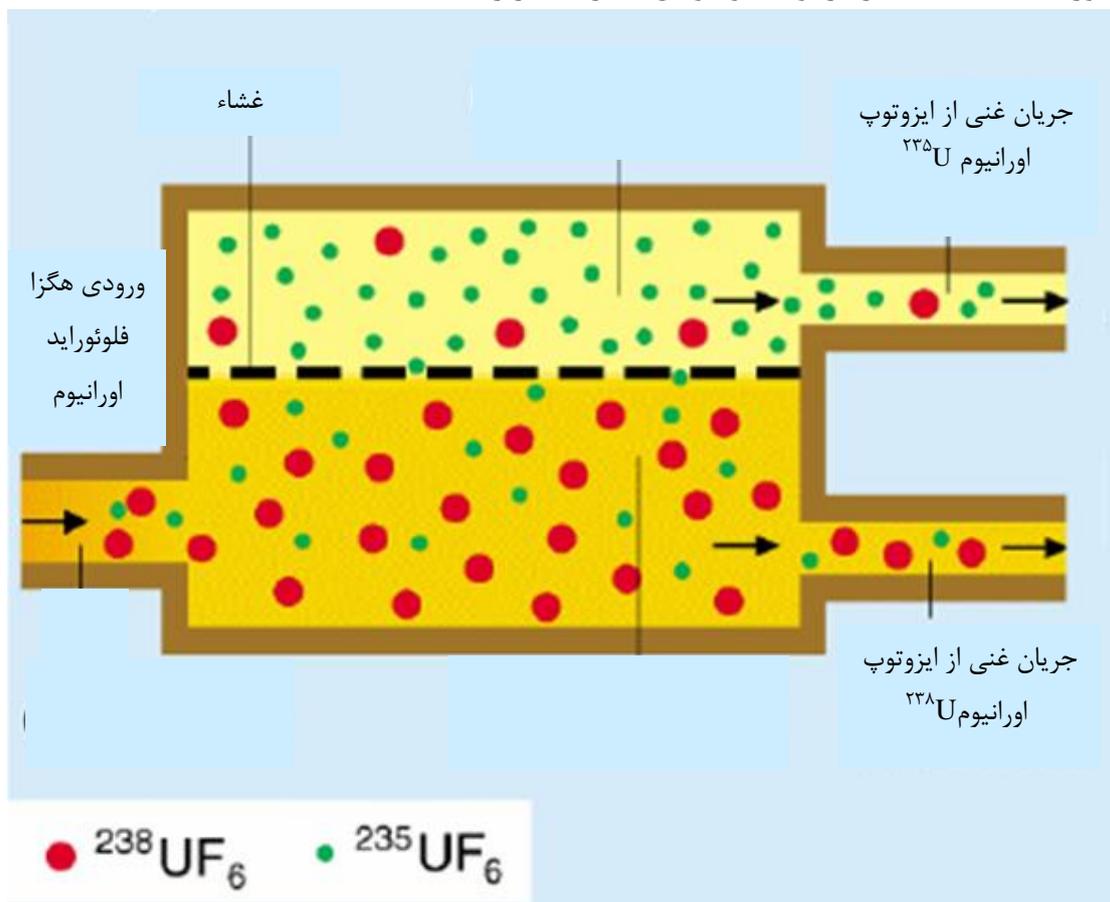
- روش سانتریفوژ گاز؛
- روش الکترو مغناطیسی؛
- روش پخش گازی؛

- روش فرآیند جت؛
- روش فرآیند تبادل یونی؛
- روش غنی سازی با لیزر.

از روش‌های اشاره شده در فوق دو روش به صورت صنعتی در جهان متداول شده و مورد استفاده قرار گرفته است. این دو روش عبارتند از:

- روش پخش گازی

مطابق شکل ۲ اگر محفظه‌ای را در نظر بگیریم که از مخلوطی از گازها پر شده و با محیط در حال تعادل گرمایی باشد، انرژی جنبشی تمام مولکول‌های گاز موجود در محفظه مساوی خواهد بود، ولی سرعت مولکول‌های سبک‌تر بیشتر از مولکول‌های سنگین‌تر خواهد بود. مولکول‌های سبک بیشتر از مولکول‌های سنگین به جداره‌های محفظه برخورد می‌کنند. اگر جداره محفظه دارای سوراخ‌های بسیار ریزی باشد، که مولکول‌ها بتوانند تک‌تک از آن عبور کرده و جریان گاز به صورت توده امکان‌پذیر نباشد، گازی که از منفذها عبور می‌کند بیشتر دارای مولکول‌های سبک خواهد بود تا مولکول‌های سنگین - در فرآیند پخش گازی عبور مولکول‌ها از منفذها به فشار گاز بستگی زیادی دارد و به همین جهت باید فشار گاز را در هر مرحله بوسیله کمپرسور افزایش داد. مصرف انرژی برق در کارخانجات پخش گازی نه تنها به علت وجود تعداد زیاد کمپرسور بلکه اصطکاک گاز در لوله‌ها و عوامل دیگر، بسیار زیاد است.

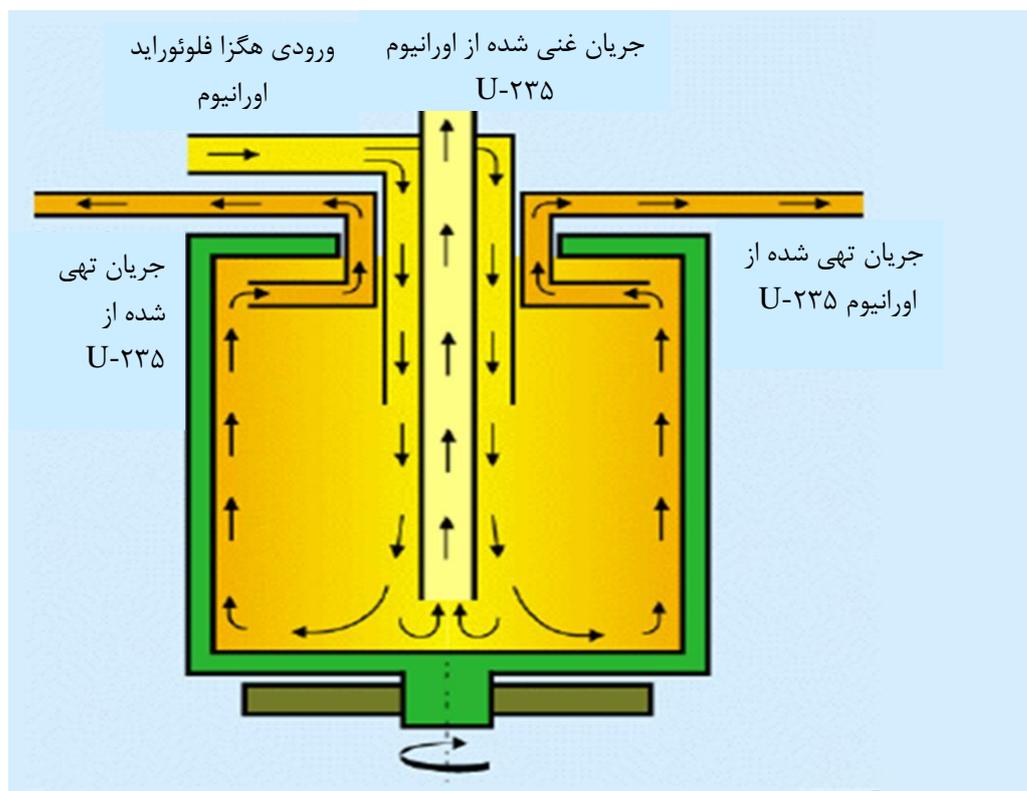


شکل ۲: نمائی از فرآیند جداسازی ایزوتوپ اورانیوم ۲۳۵ در روش پخش گازی

– روش جداسازی از طریق گاز سانتریفیوژ

استفاده از سانتریفیوژ برای جداسازی ایزوتوپی گازها، از یک صد سال پیش شروع شده است. محفظه اصلی سیستم سانتریفیوژها در خلأ قرار می‌گیرند تا از حرکات لرزشی و جریانات انتقال گرما جلوگیری شود. این محفظه با سرعت نزدیک به ۶۰۰۰۰ دور بر دقیقه توسط موتورهای (روتور) به گردش در می‌آید. مطابق آنچه که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، در سانتریفیوژ ماده تغذیه از وسط محور چرخشی دستگاه وارد شده و با حرکت در طول محور و جداره در دو جهت مختلف، موجب ایجاد اختلاف غلظت ایزوتوپی در جهت محور می‌شود. در نتیجه می‌توان ایزوتوپ‌های سبک و سنگین را در دو انتهای محور و در نزدیک جداره سانتریفیوژ برداشت کرد.

روش سانتریفیوژ هنوز اهمیت خود را حفظ کرده و با بکار گرفتن مواد با استقامت و خواص بهتر، بازده آن افزایش یافته و رقابت اقتصادی آن در سطح وسیع ممکن شده است. هم اکنون سه کشور: هلند، آلمان و انگلستان شرکت یورنکو را برای توسعه این فرآیند و عرضه سرویس غنی‌سازی به بازار بین‌المللی تشکیل داده‌اند. همچنین استفاده از این فرآیند در کشورهای آمریکا، فرانسه، ژاپن، استرالیا و چند کشور دیگر نیز در مقیاس صنعتی، نیمه صنعتی و آزمایشگاهی بکار گرفته شده است.



شکل ۳: نمائی از یک ماشین سانتریفیوژ برای جداسازی ایزوتوپ اورانیوم ۲۳۵

۲-۴- شرح فرآیند ساخت مجتمع و بسته‌های سوخت

سوخت مورد نیاز نیروگاه‌های هسته‌ای برحسب نوع نیروگاه متفاوت است. معمولاً سوخت راکتورهای هسته‌ای متداول که در نیروگاه‌های مختلف به منظور تأمین برق از آنها در سطح دنیا در حال حاضر استفاده می‌شوند، به چهار گروه به شرح زیر تقسیم می‌گردند:

- سوخت‌های فلزی و آلیاژی؛

- سوخت‌های سرامیکی؛

- سوخت‌های پراکنده؛

- سوخت‌های مایع.

سوخت‌های فلزی و آلیاژی معمولاً در راکتورهای نظامی و تحقیقاتی کاربرد دارند و همچنین سوخت‌های مایع و سوخت‌های پراکنده نیز کاربردهای خاص خود را دارند. در عمل سوخت‌های سرامیکی به‌عنوان متداول‌ترین سوخت در نیروگاه‌های هسته‌ای در جهان مورد استفاده قرار گرفته است و اغلب تاسیسات تولید مجتمع‌های سوخت در حال حاضر در این زمینه فعالیت دارند.

سوخت‌های سرامیکی به سه دسته به شرح زیر تقسیم می‌شوند:

- سوخت اکسید اورانیم کمی غنی شده برای راکتورهای آب تحت فشار شامل: PWR و BWR های غربی، VVER های روسی، راکتورها با خنک کننده گازی دما بالا آلمانی، بریتانیایی و آمریکایی، راکتورهای مولد بخار با خنک کننده آب سنگین بریتانیایی و راکتورهای آب-گرافیت روسی؛
- سوخت اکسید اورانیم طبیعی برای راکتورهای گازی بریتانیایی و راکتورهای آب سنگین تحت فشار کانادایی؛
- سوخت مخلوط اکسید اورانیم و اکسید پلوتونیم.

میله سوخت، یک جزء جابجا شدنی در قلب راکتور است. ماده سوخت در آن به‌صورت قرص یا به شکل‌های دیگر در داخل غلاف از جنس زیرکونیوم و یا فولاد ضد زنگ قرار داده می‌شود. در راکتورهای مختلف، شکل میله سوخت از نظر قطر و طول و ظواهر آن متفاوت است. در بعضی از راکتورها، میله‌ها به‌صورت انفرادی در راکتور جایگزین می‌شوند (راکتورهای گازی)، درحالی که در بعضی دیگر تعدادی از میله‌ها در کنار هم قرار گرفته و ساختاری بنام مجتمع سوخت را تشکیل می‌دهند. در بعضی از راکتورهای آزمایشی سوخت به‌صورت صفحه و در بعضی دیگر به‌صورت گلوله نیز بکار گرفته شده‌اند (راکتورهای گازی با حرارت بالا).

۳- بررسی وضعیت جهانی کشورهای دارای چرخه سوخت هسته‌ای باز

براساس مدارک آژانس بین‌المللی انرژی اتمی، کشورهای صاحب دانش فنی و فناوری فرآوری اورانیوم به ۸ کشور و صاحب فناوری غنی‌سازی اورانیوم به ۱۰ کشور محدود می‌شوند. در مجموع، اسامی کشورهای دارای تمام و یا بخشی از چرخه سوخت هسته‌ای باز در جدول ۳ آورده شده است. همانطوریکه از جدول ۳ مشاهده می‌شود بعضی از این کشورها فقط در یک بخش (تولید مجتمع‌های سوخت) و برخی در دو بخش (استخراج و استحصال اورانیوم و تولید بسته‌های سوخت) و تعدادی در سه بخش از چرخه سوخت هسته‌ای

(غیر از استخراج و استحصال اورانیوم) در حال فعالیت و بهره‌برداری می‌باشند. جمعاً فقط پنج کشور در هر چهار بخش از چرخه سوخت هسته ای باز فعالیت دارند.

جدول ۳: اسامی کشورهای دارای تمام و یا بخشی از چرخه سوخت هسته ای باز

استخراج و استحصال اورانیوم/سال	فرآوری UF6 تن اورانیوم/سال	غنی سازی (10 ⁶ SWU/a)	بسته و مجتمع سوخت تن اورانیوم/سال	بازیابی (tHM)	سوخت مصرف شده (AR+AFR) (tHM)	
۱۲۰	۶۲	۰/۰۲	۱۵۰		۶۵۰۰	آرژانتین
					۸۸	ارمنستان
۸۲۰۰						استرالیا
			۵۴۰		۲۰۰۰	بلژیک
۴۰۰	۸۰		۱۲۰		۳۱۸	برزیل
					۱۱۵۶	بلغارستان
۱۱۸۳۰	۱۲۵۰۰		۲۷۰۲		۳۲۲۷۱	کانادا
۷۴۰	۴۰۰	۱۱	۱۰۰		۴۲۰	چین
۶۸۰					۹۳۶	جمهوری چک
					۲۱۱۵	فنلاند
۶۰۰	۱۴۳۵۰	۱۰/۸	۱۰۹۰	۱۶۰۰	۲۵۷۶۲	فرانسه
		۱/۸	۶۵۰		۱۴۹۲۰	آلمان
					۵۰۰	مجارستان
۲۱۰			۵۱۰/۳	۲۶۰	۳۵۱۵	هندوستان
		۱/۲۵	۱۶۸۹/۳	۱۲۰	۱۱۵۲۱	ژاپن
۲۵۰۰					۳۰	قزاقستان
			۸۰۰		۸۷۳۸	کره جنوبی

					۲۱۰۱	لیتوانی
					۹۸۴	مکزیک
۱۵۰						مغولستان
۴۰۰۰						نامیبیا
		۱/۵			۸۶	هلند
۲۹۱۰						نیجر
۳۰		۰/۰۰۵	۲۰		۱۶۰	پاکستان
۱۷۰						پرتغال
۳۰۰			۱۱۰		۹۴۰	رومانی
۳۵۰۰	۳۴۰۰۰	۱۵	۲۵۷۱/۵	۴۰۱	۲۰۹۲۸	روسیه
					۱۰۵۰	اسلواکی
					۳۶۱	اسلوانی
۱۷۰۰			۱		۶۷۰	آفریقای جنوبی
۲۵۵			۳۰۰		۳۸۲۰	اسپانیا
			۶۰۰		۶۵۰۰	سوئد
					۹۰۴	سوئیس
۱۰۰۰					۵۱۵۰	اوکراین
	۶۰۰۰	۱/۳	۱۹۵۰	۲۷۰۰	۱۲۰۰۰	انگلستان
۳۷۶۱	۱۲۷۰۰	۱۸/۷	۳۹۰۰		۶۲۰۰۰	آمریکا
۲۳۰۰						ازبکستان

۴- چرخه سوخت توریمی

سوخت هسته‌ای در آینده باید سه مشخصه مهم را در برداشته باشد، که عبارتند از: حداکثر زمان استفاده در راکتور اطمینان از عدم تکثیر سلاح‌های اتمی و سادگی در دفع پسمان‌های هسته‌ای این سه مشخصه را می‌توان به طور یکجا در سوخت‌های توریمی یافت. بنابراین به نظر می‌رسد در آینده نه چندان دور کاربرد سوخت‌های توریمی در راکتورهای هسته‌ای نسل سوم و چهارم در سطح جهان توسعه چشمگیری یابد. از این رو توجه به این مسئله در زمینه توسعه چرخه سوخت هسته‌ای هر کشور، امری ضروری و اجتناب ناپذیر است.

عنصر توریم با فراوانی ۳ تا ۴ برابر اورانیوم به طور گسترده در طبیعت با قابلیت استخراج آسان در بسیاری از کشورها وجود دارد. بر خلاف اورانیوم طبیعی که ترکیبی از دو ایزوتوپ U_{238} (بارور) و U_{235} (شکافت‌پذیر) است، توریم طبیعی فقط از ایزوتوپ Th_{232} (بارور) و بدون ماده شکافت‌پذیر تشکیل شده است. چرخه سوخت توریمی از اواسط سال ۱۹۵۰ تا ۱۹۷۰ همزمان با پیشرفت‌های اولیه انرژی هسته‌ای، در کشورهایی که در برنامه طولانی مدت نیروگاه هسته‌ای با کمبود منابع سوخت اورانیومی مواجه بودند و ذخایر قابل قبولی از توریم داشتند، مورد توجه قرار گرفت.

همانطوری که عنوان شد، از عنصر توریوم به دلیل خاصیت باروری بالا، می‌توان به‌عنوان گزینه‌ای مناسب در تامین انرژی هسته‌ای نیروگاه‌های آتی در جهان بهره جست. این عنصر با جذب یک نوترون به رادیوایزوتوپ اورانیوم ۲۳۳ تبدیل می‌شود. رادیوایزوتوپ اورانیوم ۲۳۳ خاصیت شکافت‌پذیری بالائی در مقایسه با اورانیوم ۲۳۵ دارا است.

چرخه سوخت توریوم را نمی‌توان بدون در نظر گرفتن چرخه سوخت اورانیوم مورد بررسی، مطالعه و ارزیابی قرار داد، چراکه توریوم به خودی خود از خاصیت شکافت‌پذیری برخوردار نیست، بنابراین برای ایجاد محیطی مناسب برای تولید رادیوایزوتوپ شکافت‌پذیر اورانیوم ۲۳۳ لازم است این عنصر در کنار اورانیوم غنی‌شده و یا پلوتونیوم در راکتورهای حرارتی قرار گیرد.

بنابراین چرخه سوخت توریوم با دیگر چرخه‌های سوخت اورانیوم کاملاً متفاوت است و در عمل دو حالت برای چرخه سوخت توریوم می‌توان متصور شد که عبارتند از:

- چرخه سوخت باز توریوم بر اساس پرتودهی توریوم ۲۳۲ در مجاورت سوخت‌های مخلوط اورانیوم و پلوتونیوم و تولید درجای رادیوایزوتوپ اورانیوم ۲۳۳ شکافت‌پذیر بدون جداسازی شیمیائی در راکتورهای آب سبک تحت فشار از نوع PWR و یا VVER؛

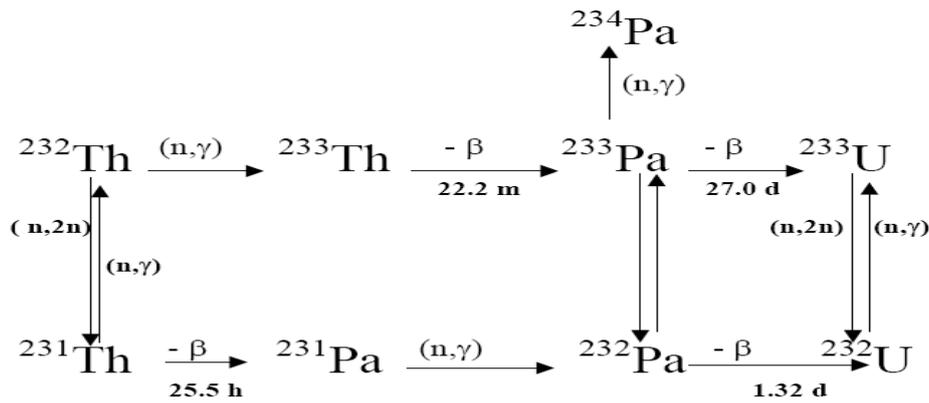
- چرخه سوخت بسته توریوم براساس جداسازی شیمیائی رادیوایزوتوپ اورانیوم ۲۳۳ از سوخت‌های پرتودیده توریومی و استفاده آن در ساخت سوخت‌های جدید.

در هر دو حالت فوق لازم است از اکسید توریوم در مجاورت انواع اکسیدهای اورانیوم با غنای مختلف و یا پلوتونیوم استفاده نمود. از آنجائیکه استفاده از مجتمع و بسته‌های سوخت توریوم در نیروگاه‌های هسته‌ای در مقایسه با بسته‌های سوخت اورانیوم و پلوتونیوم شباهت و در اغلب موارد از جمله طراحی قلب راکتور و مکانیزم میله‌های کنترل سازگاری، و دارد و نیاز به ایجاد تغییرات قابل ملاحظه‌ای در مجموعه راکتور نمی‌باشد؛ به نظر می‌رسد در آینده نزدیک با بکارگیری چرخه سوخت هسته‌ای توریوم در مجاورت سایر چرخه‌های سوخت هسته‌ای، این صنعت در جهان توسعه یابد.

– دلیل استفاده از توریوم به‌عنوان سوخت در راکتورهای هسته‌ای

در راکتورهای حرارتی توریوم در مقایسه با اورانیوم به مراتب بارورتر است چرا که سطح مقطع جذب حرارتی آن نزدیک به سه برابر سطح مقطع جذب حرارتی اورانیوم می‌باشد (۷/۴ barns برای توریوم و ۲/۷ barns برای اورانیوم).

مطابق نمودار ۱_ توریوم ۲۳۲ با جذب یک نوترون در راکتورهای حرارتی به اورانیوم ۲۳۳ که رادیوایزوتوپ شکافت‌پذیر است، تبدیل می‌شود.



نمودار ۱: نمودار فرآیند بارورسازی تورنیوم ۲۳۲ جهت تولید اورانیوم ۲۳۳ شکافت پذیر

در عمل در صورت استفاده همزمان از اورانیوم ۲۳۳ تولید شده در اثر جذب نوترون در بسته‌های سوخت حاوی تورنیوم، این چرخه را چرخه سوخت هسته‌ای باز می‌نامند و برعکس در صورت بازیابی سوخت تورنیومی مصرف شده و استحصال اورانیوم ۲۳۳ از آن، این فرآیند را چرخه سوخت هسته‌ای بسته می‌گویند. رادیو ایزوتوپ اورانیوم ۲۳۳ همانند رادیو ایزوتوپ اورانیوم ۲۳۵ از خاصیت شکافت پذیری مناسبی برخوردار است (۵۲۵، ۵۷۷ و ۷۴۲ بارن برای ^{233}U و ^{235}U و ^{239}Pu) علاوه بر آن سطح مقطع جذب این رادیو ایزوتوپ به مراتب کمتر از سطح مقطع جذب اورانیوم ۲۳۵ می‌باشد.

همچنین اکسید تورنیوم به مراتب پایدارتر و مقاوم‌تر از اکسید اورانیوم در برابر تشعشعات هسته‌ای است. ضمناً خصوصیات ترموفیزیکی این اکسید نیز در مقایسه با اکسیدهای اورانیوم به مراتب مناسب‌تر است. اکسید تورنیوم در دراز مدت خاصیت اکسیداسیون را بر عکس اکسیدهای اورانیوم (U_3O_8 و UO_3) از خود نشان نمی‌دهد در نتیجه نگهداری و انبار و یا دفن سوخت‌های مصرف شده تورنیومی به مراتب نسبت به سوخت‌های اورانیومی کم هزینه و ساده تر است.