

راكتور ماژولار گويچه بستري¹

مقدمه:

راكتورهاي با خنك‌كننده گزي در ابتدا در كشورهاي انگلستان و فرانسه مورد استفاده قرار گرفتند. در اين راکتورها از گرافيت براي كند و منعكس كردن نوترونها و از دي‌اكسيدكربن و يا هليوم براي خنك كردن مجتمع‌هاي سوخت استفاده مي‌شود. چند گونه راکتور گزي تاكنون ساخته شده و مورد بهره‌برداري قرار گرفته اند كه مشهورترين آنها Magnox و AGR مي‌باشند.

در راکتورهاي گزي معمولاً قلب به شكل مكعب مستطيل، كره و يا استوانه مي‌باشد و گرافيت بصورت ديواره اجري در اطراف سوخت قرار مي‌گيرد. سوخت اين نوع راکتورها اورانيوم با درصد غناي پايين مي‌باشد كه در داخل غلاف قرار گرفته است.

در داخل قلب راکتور گاز دي‌اكسيدكربن و يا هليوم، تحت فشار از درون آن عبور كرده و پس از برداشت انرژي گرمايي، به سمت مولدهاي بخار جريان مي‌يابد. در مدار ثانويه، انرژي گرمايي باعث تبديل آب به بخار شده و انرژي خود را براي توربين و بالطبع آن ژنراتور، صرف مي‌نمايد.

راكتور ماژولار گويچه بستري PBMR، يكي از انواع راکتورهاي گزي مي‌باشد كه در دماي بالا كار كرده، داراي كند كننده گرافيتي و سيستم خنك كننده با گاز هليوم مي‌باشد. اين راکتور شامل يك مخزن تحت فشار از جنس استيل و بشكل استوانه مي‌باشد كه ديواره داخلي آن بوسيله آجرهايي از جنس گرافيت پوشانيده شده است.

سوخت راکتور، شامل تركيبات اكسيد اورانيوم غني شده با پوشش كار بيد سيليكون و كربن قرع مي‌باشد، اين اجزاء بشكل گويچه سوخت با روکش گرافيتي و اندازه تقريبي توپ تنيس ساخته خواهند شد.

در مرحله بهره‌برداري حرارت توليد شده در نتيجه واكنش هاي هسته‌اي، توسط سيال خنك كننده هليوم برداشت ميگردد. سيال با فشار وارد مخزن تحت فشار شده و پس از عبور از ميان گويچه‌هاي سوخت و برداشت حرارت بصورت گاز داغ شده، از سيستم خارج ميشود. اين گاز از سه دستگاه توربين گزي عبور

¹ Pebble Bed Modular Reactor (PBMR)

کردن و پس از دست دادن انرژی و پروسه‌های بعدی مجدداً در سیکل جریان می‌یابد. از سه دستگاه توربین یاد شده دو دستگاه بعنوان محرک‌های کمپرسورها و توربین سوم به ژنراتور الکتریکی متصل می‌باشد. از ویژگی‌های مهم و قابل ملاحظه این نوع راکتور می‌توان از بارگذاری همزمان با بهره برداری، کوچکی، راندمان سرمایه گذاری و تولید بالا، استفاده بهینه از سیستم‌های کمکی در مجتمع‌های چند واحدی، کاهش گازهای گلخانه‌ای و انباشت پسماند در داخل نیروگاه نام برد. خلاصه‌ای از مشخصات فنی و اطلاعات کلی به شرح زیر ارائه شده است.

ایده طرح اولیه :

در خلال سالهای ۱۹۵۰ دکتر رودولف شولتن^۲ (پدر راکتورهای گویچه بستری) تفکری بر این مبنا داشت که مخلوط فشرده کاربرد سیلیکون، ذرات اورانیوم را پوشانیده و در داخل یک توپ سخت بیلیارد مانند، کره یا گویچه بعنوان سوخت برای راکتورهای حرارت بالا با خنک‌کننده هلیوم، استفاده گردد. این ایده به مرور زمان شکل عملی بخود گرفت و اولین نوع از این راکتور با قدرت ۱۵ مگاوات در آلمان ساخته شد و بمدت ۲۱ سال با موفقیت کار می‌کرده است.

خصوصیات و ویژگی‌های اصلی :

ویژگی‌های کلیدی راکتورهای ماژولار گویچه بستری بشرح زیر می‌باشند:

- ایده ساختار یکپارچه (ماژولار) :

راکتور PBMR بسته به نوع استفاده و نیاز می‌تواند با خواسته‌ها تطبیق داده شود. کوچک بودن فضای مورد استفاده در مقایسه با نیروگاه‌های آبی یا نیروگاه‌های قدرت فسیلی و نیز عدم وابستگی به محل خاص برای احداث آن، از مزایای مهم این نوع راکتور می‌باشد. بدلیل آنکه سیستم خنک‌کننده آن خشک می‌باشد، امکان ساخت راکتور در هر نقطه را مهیا می‌سازد. این نوع نیروگاه هم می‌تواند بعنوان بار پایه و هم بار متغیر، بسته به اندازه و توان آن، مورد استفاده قرار گیرد.

- کوچکی راکتور PBMR :

² Dr. Rudolf Shulten

راکتورهای PBMR ، براساس این فلسفه که راکتورهای هسته‌ای نسل جدید بایستی کوچک باشد با (توان تولید ۱۶۵ مگاوات) طراحی شده‌اند. به منظور افزایش در استفاده اشتراکی از سیستم‌های پشتیبان ، این نوع واحدها می‌تواند در مجتمع‌های دو ، چهار و هشت واحدی ساخته شده ، بدین ترتیب بهترین راندمان نسبت هزینه به محل و تجهیزات ، بدست می‌آید. ساختمان اصلی یک مازول نیروگاهی سطح زیر بنای ۱۵۰۰ متر مربع (۲۶×۵۶) را در بر می‌گیرد. بدین معنی که شکل ۴ تایی آن در یک زمین فوتبال جای می‌گیرد. ارتفاع ساختمان‌ها نیز ۴۷/۵ متر خواهد شد که نصف ارتفاع آن در زیر سطح زمین قرار می‌گیرد.

• راندمان هزینه :

بر طبق برآورد ، هزینه خروجی راکتور PBMR بطور متوسط $3/4^{\text{cent/kwh}}$ است که این هزینه شامل هزینه‌های از کار اندازی^۳ ، انبار بلند مدت پسماندهای رادیواکتیو و بیمه نیز می‌باشد. نیروگاه PBMR در مقایسه با دیگر مولدهای انرژی ارزانتر می‌باشد ، بدین صورت که قیمت نصب هر مگاوات آن برابر ۱ میلیون دلار بوده که در مقایسه با نیروگاه‌های ذغالسنگی آفریقای جنوبی برای هر مگاوات نهصد هزار دلار می‌باشد.

• خصوصیات ایمنی :

بدلیل طراحی ساده آن و سیستم ایمنی انفعالی و نیز دخالت کم عوامل انسانی در بهره‌برداری دارای ایمنی بالایی می‌باشد. در صورت بروز حادثه در زمان بهره‌برداری و در بدترین حالت ، حرارت در داخل راکتور طبق منحنی کاهش یافته و خسارتی به قلب وارد نمی‌آید و به طبع آن نشر مواد پرتوزا نیز در محیط بوجود نخواهد آمد.

• کاهش گازهای گلخانه‌ای^۴ :

بدلیل عدم انتقال دی‌اکسیدکربن ، دود یا هر گاز دیگر به خارج از سیستم ، راکتور PBMR دارای یک استراتژی اقتصادی در کاهش گازهای گلخانه‌ای می‌باشد. با توجه به این مسئله که در فرانسه ، بدلیل استفاده از صنعت هسته‌ای ، مقدار دی‌اکسیدکربن منتشر شده از واحدهای تولید قدرت طی سالهای ۱۹۸۰ تا ۱۹۸۷ ، ۸۰٪ درصد کاهش یافته است. و نیز بهمین دلیل در آلمان از سال ۱۹۶۱ تاکنون، از ورود بیش از دو میلیارد تن از دی‌اکسیدکربن به محیط زیست جلوگیری بعمل آمده است.

³ Decommissioning

⁴ Green house Gas

• توليد پسماند و دفع آن :

بزرگترين برتري اين سيستم ، حجم توليد بسيار كم پسماند در مقايسه با ديگر نيروگاهها مي‌باشد. براي مثال، يك كيلوگرم اورانيوم معادل ۱۷ تن ذغال سنگ انرژي توليد مي‌نمايد كه ۴۰٪ اين ذغالسنگ به خاكستر تبديل خواهد شد. ذخيره سازي پسماند در اين نوع نيروگاه بسيار ساده‌تر از ساير نيروگاههاي هسته‌اي بوده و پسماندهاي پرتوزا در مخازني كه در واحد نيروگاه قرار دارند ، ذخيره مي‌شوند و در مدت عمر مفيد نيروگاه (۴۰ سال) ، هيچ پسماندي از نيروگاه و سايت خارج نمي‌شود.

چگونگي عملکرد راکتور ماژولار گويچه بستري:

راكتور نوع PBMR، راکتوري با دماي كار بالا ، كندكننده گرافيتي و سيستم خنك‌كننده هليوم كه شامل يك مخزن تحت فشار^۵ از جنس استيل و از نوع عمودي به قطر ۶ و طول ۲۰ متر مي‌باشد. ديواره‌هاي داخلي مخزن تحت فشار بوسيله آجرهايي از جنس گرافيت به ضخامت ۱ متر پوشانيده شده كه بعنوان لايه خارجي منعكس‌كننده نوترون و محيط انفعالي انتقال حرارت عمل مي‌نمايد. اين ديواره آجري داراي حفره‌هاي عمودي است كه محل قرارگيري المانهاي كنترلي مي‌باشند. در اين نوع راکتور ، از تركيبات اكسيد اورانيوم غني شده با پوشش كاربيد سيكيلون^۶ و كربن‌قرع^۷ استفاده مي‌شود. اين اجزاء به شكل گويچه سوخت با روکش گرافيتي و اندازه تقريبي توپ تنيس مي‌باشد. و نيز از هليوم بعنوان سيال خنك‌كننده و محيط انتقال انرژي استفاده مي‌شود.

در بار كامل تعداد ۴۵۶۰۰۰ گويچه سوخت در قلب راکتور ريخته مي‌شوند. ناحيه سوخت بشكل استوانه‌اي بوده و گويچه‌ها در اطراف مجتمع گرافيت مركزي قرار مي‌گيرند.

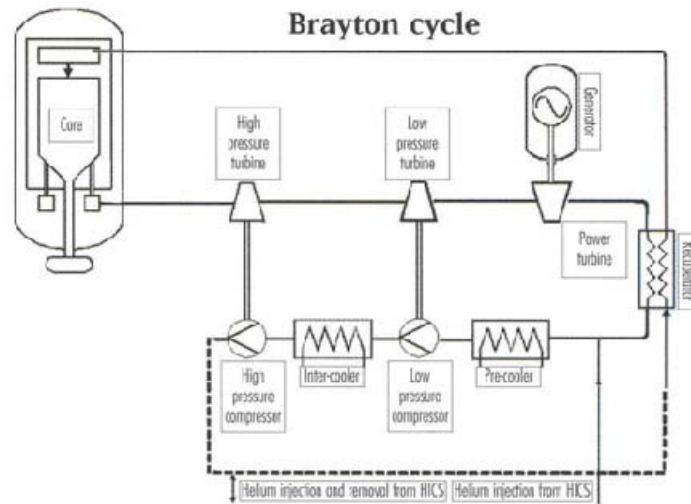
به منظور برداشت حرارت توليد شده ، منتج از واكنشهاي هسته‌اي ، هليوم خنك شده در دماي 500°C و فشار 9MPa وارد مخزن راکتور مي‌شود ، اين گاز رو به پايين حركت كرده ، از ميان گويچه‌هاي داغ سوخت عبور و پس از برداشت حرارت ، با دماي 900°C از مخزن خارج مي‌گردد. سپس گاز داغ شده وارد اولين سري از سه دستگاه توربين گازی مي‌شود ، اولين و دومين توربين بعنوان محرک كمپرسورها و انرژي

⁵ Steel Pressure Vessel

⁶ Silicon Carbide

⁷ Pyrolytic Carbon

مکانیکی توربین سوم به ژنراتور الکتریکی انتقال می‌یابد. در انتها گاز خنک‌شده و با دمای 500°C و فشار $2/6\text{MPa}$ از توربین آخر تخلیه شده و پس از سرد شدن و فشردگی، مجدداً به مخزن تحت فشار باز می‌گردد. چرخه ترمودینامیکی^۸ مورد استفاده یک چرخه برایتون^۹ با آب خنک شده، خنک کننده داخلی و پیش‌سرد کننده، می‌باشد و نیز، یک احیاکننده^{۱۰} با راندمان بالا پس از توربین قدرت قرار می‌گیرد. هلیوم از پیش‌سرد کننده عبور کرده و در احیاء کننده حرارت خود را از دست داده و سرد می‌شود، سپس بوسیله کمپرسورهای فشار بالا و فشار پایین تنظیم فشار شده و به مخزن تحت فشار باز می‌گردد. برداشت انرژی از قلب و بالطبع آن برداشت قدرت بوسیله هلیوم و انرژی منتشر شده در توربین قدرت، متناسب با نرخ شار جرم هلیوم در سیستم و در همان دما می‌باشد. نرخ شار جرم به فشار بستگی دارد، لذا توان (قدرت) می‌تواند بوسیله تغییر فشار در سیستم تنظیم شود. بدین ترتیب نقطه کار راکتور در دما و فشار بالا افزایش راندمان حرارتی متناسب را نتیجه می‌دهد.



در مقام مقایسه یک راکتور آب سبک معمولی دارای راندمان حرارتی برابر حدود ۳۳٪ می‌باشد (نسبت قدرت الکتریکی خروجی به قدرت حرارتی ورودی)، در صورتیکه برای طراحی اولیه راکتور PBMR، راندمان ۴۲٪ پیش‌بینی می‌شود. افزایش نقش سوخت همراه با بهینه سازی دیگر سیستمها امکان افزایش راندمان با ۴۷٪ را بدنبال خواهد داشت.

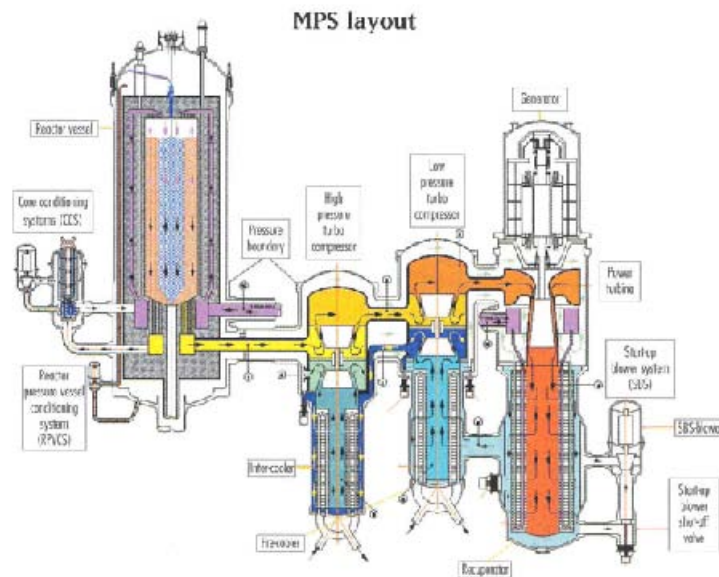
⁸ Thermodynamic

⁹ Brayton Cycle

¹⁰ Recuperator

يکي ديگر از خصوصيات کلیدی راکتور PBMR بارگذاري سوخت همزمان¹¹ با بهره‌برداري می‌باشد ، بدین ترتیب که در هنگام بهره‌برداري قدرت کامل ، عناصر سوخت تازه از بالای راکتور وارد شده و گویچه‌های سوخت مصرف شده از پایین بازگرفته می‌شوند. هدف از بارگذاري سوخت بصورت همزمان ، کارکرد و بهره‌برداري از راکتور به مدت شش سال بصورت مداوم و بدون انقطاع تا قبل از فرا رسیدن تعمیرات دوره‌ای و زمان‌بندی شده ، می‌باشد.

خاموشی¹² بوسیله میله‌های کنترلی¹³ صورت می‌گیرد و شروع بکار¹⁴ بوسیله ایجاد راکتور بحرانی¹⁵ با استفاده از گرم شدن¹⁶ هسته‌ای قلب و برداشت این حرارت در واحد تبدیل بوسیله سیستم چرخش گاز¹⁷ صورت می‌پذیرد.



راکتور در سازه ای که یک پوسته مستحکم در اطراف سیستم های اصلی وجود دارد ، قرار گرفته است. ساختمان حوزه طرح که ساختار کامل واحد قدرت و سیستم‌های کمکی و تابعه را در بر دارد ، بگونه‌ای طراحی شده تا در مقابل نیروهای خارجی مانند سقوط هواپیما ، طوفان و تندباد مقاومت لازم را داشته باشد و

11 On-line
12 Shut-down
13 Control rods
14 Start-up
15 Reactor critical
16 Nuclear heat-up
17 Blower System

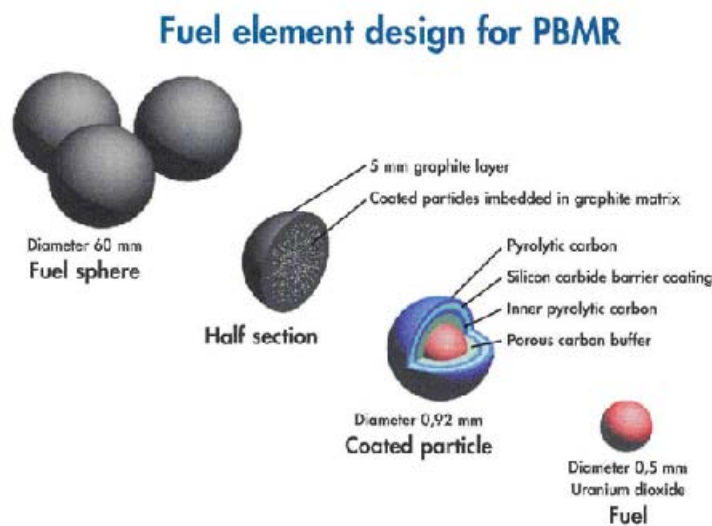
نيز مقاومت بالايي در مقابل انفجارهاي حاصل از خرابكاري را دارا است. بدين منظور ضخامت بتون تقويت شده سقف و ديوارهاي بالاي اين سازه ، يك متر در نظر گرفته شده است.

در داخل ساختمان طرح ، محفظه‌اي^{۱۸} از بتون تقويت شده قرار دارد كه مخزن تحت فشار و واحد تبديل قدرت^{۱۹} در آن جاي مي‌گيرند.

ضخامت ديواري اطراف مخزن تحت فشار ۲/۲ متر مي‌باشد. واحد تبديل قدرت در برگرينده واحدهاي توربوي فشار بالا و فشار پايين ، ژنراتور توربين قدرت ، احياء كننده و خنك كننده‌ها را در بر دارد.

ساختار عناصر سوخت راکتور PBMR

عناصر سوخت راکتور PBMR ، براساس طراحي موفق آلماني با كيفيت بالا ، شامل اورانيوم با درصد غناي كم^{۲۰} شامل سه لايه ايزوتروپيك (LEU-TRISO) در يك حجم كروي گرافيتي انجام شده است. هسته از جنس اكسيد اورانيوم بوده و پوشش چهار لايه‌اي اجزاء را بصورت روکش در بر مي‌گيرند. همانطوريكه در شكل زير نشان داده شده است.



براي مراحل ساخت ، ابتدا محلول نيترات اورانيوم بصورت ذرات كوچك پاشيده شده تا گويچه‌هاي بسيار ريز^{۲۱} را تشكيل دهند ، سپس ژله‌اي شده ، خشك و آهكي مي‌شوند و در حرارت بالا خشك شده تا هسته‌هاي سوخت اكسيد اورانيوم را توليد كند. در مرحله بعدي هسته‌ها از اجاق شيميايي بخار قابل رسوب^{۲۲} عبور داده

¹⁸ Containment

¹⁹ Power Conversion Unit (PCU)

²⁰ Low enriched uranium

²¹ Microsphere

²² Chemical Vapor Deposition (CVD)

می‌شوند ، عملاً با استفاده از یک محیط آرگونی در دمای 1000°C لایه‌های شیمیایی بصورت خیلی دقیق بر روی هسته می‌نشینند. اولین لایه رسوب داده شده بر روی هسته کربن متخلل^{۲۳} می‌باشد که باعث ایجاد تولیدات شکافت بدون فشار مضاعف روکش اجزاء سوخت مجتمع می‌گردد و بدنبال آن یک لایه نازک از کربن قرع^{۲۴} (که شکل چگالتري از کربنهای فرآورده‌های حرارتی است) و سپس یک لایه از کاربید سیلیکون (یک ماده دیرگداز) و مجدداً یک لایه کربن قرع بر روی هسته نشانده می‌شوند . کربن مختلل باعث جلوگیری از هرگونه تغییر شکل هسته اکسید اورانیوم در مراحل ساخت سوخت بر اثر نفوذ تولیدات شکافت گازی شکل به خارج از هسته می‌شوند. لایه‌های کربن قرع و کاربید سیلیکون بعنوان سدهای غیر قابل نفوذ ، سوخت و تولیدات شکافت منتج شده از واکنشهای هسته‌ای داخل هسته را در بر می‌گیرد.

تعداد ۱۵۰۰۰ عدد از این اجزاء روکش شده با پودر گرانیات و یک رزین فنولیکی^{۲۵} مخلوط شده (ضخامت حدود ۱ میلی‌متر) سپس فشرده شده و بشکل گویچه‌هایی به قطر ۵۰ میلی‌متر در می‌آیند. یک لایه کربن سره^{۲۶} به ضخامت ۵ میلی‌متر به شکل یک ناحیه غیر سوخت^{۲۷} اضافه شده است. گویچه‌های حاصله سپس حرارت داده شده و بتدریج سرد می‌شوند تا سخت و بادوام گردند. و در انتها گویچه‌های سوخت ماشین کاری شده تا همگی به شکل یکسان و با قطر ۶۰ میلی‌متر به اندازه یک توپ تنیس گردند. هر گویچه سوخت حاوی ۹ گرم اورانیوم است و مجموع اورانیوم در هر بارگذاری ۲/۹۷ تن می‌باشد و کل جرم هر یک از گویچه‌های سوخت ۲۱۰ گرم است.

در هنگام عملکرد عادی به تعداد ۴۵۶۰۰۰ عدد گویچه سوخت در داخل قلب راکتور قرار داده می‌شود. در مرکز قلب راکتور یک ستون گرافیتی قرار دارد و گویچه‌های سوخت بصورت مدور در اطراف آن قرار می‌گیرند. دلیل استفاده از گرافیت به خاطر مشخصات ساختاری و قابلیت کندسازی نوترونها در سرعتهای مورد نیاز برای واکنشهای هسته‌ای می‌باشد. و این شکل هندسی در صورت از دست دادن خنک کننده ، حداکثر دما^{۲۸} را محدود می‌سازد. در گویچه‌های سوخت اورانیوم ۲۳۵ تا حدود ۹٪ غنی شده است تا واکنش زنجیره‌ای خودبخود صورت پذیرد.

²³ Porous Carbon

²⁴ Pyrolytic Carbon

²⁵ Phenolic Resin

²⁶ Pure Carbon

²⁷ Non-fuel

²⁸ Peak temperature

راكتور PBMR بصورت مستمر از گويچه‌هاي سوخت تازه انباشته و تخليه مي‌شود ، سوخت از بالاي راکتور وارد شده و از انتهاي آن خارج مي‌شود. گويچه‌هاي خارج شده از انتهاي راکتور بصورت مرتب اندازه‌گيري شده تا مقدار مواد قابل شکافت مصرف شده از آنها محاسبه گردد. اگر گويچه‌اي هنوز داراي مقدار قابل ملاحظه‌اي از مواد قابل شکافت باشد ، مجدداً از ورودی سر راکتور وارد مي‌شود. بصورت متوسط مدت زمان هر چرخه سوخت حدود ۴ ماه است.

هر گويچه سوخت حدود ۶ مرتبه از داخل راکتور عبور داده مي‌شود و اين روند تا سه سال ادامه مي‌يابد ، قبل از آنکه به پسماند تبديل شود. اين بدان معناست که هر راکتور در طول مدت عمر خود ، مجموعاً ۱۰ الی ۱۵ مرتبه بارگذاري مي‌شود.

This document was created with Win2PDF available at <http://www.daneprairie.com>.
The unregistered version of Win2PDF is for evaluation or non-commercial use only.