

## نیروگاه‌های هسته ای

در مقابله با ذغال سنگ و [[نفت]]، ارزش انتقال سوخت هسته‌ای ناچیزاست بدلیل مقداراستعمال خیلی کم. یک نیروگاه ۱ GW در حدود ۲/۴۱ تن اورانیوم در هر هفته نیاز دارد. این مقایسه می‌شود بطور بسیار مطلوب با ۵۰۰۰۰ تن سوخت که در یک هفته در نیروگاه ذغال - سوختی سوزانده می‌شد. نیروگاه‌های هسته‌ای در حال حاضر تقریباً آب خنک بیشتری درمقایسه با نیروگاه‌های ذغال - سوختی و نفت - سوختی استفاده می‌کنند، بعلت کارایی و [[بازده]] پایین آنها. همه نیروگاه‌های هسته‌ای در بریتانیا، با یک چشم داشت، در ساحل واقع می‌شوند و از آب خنک دریا استفاده می‌کنند.

نیروگاه‌های هسته ای

ذوالفقار دانشی

نیروگاه‌های هسته‌ای حدود ۱۷ درصد برق را تأمین می‌کنند برخی کشورها برای تولید نیروی الکتریکی خود، وابستگی بیشتری به انرژی هسته‌ای دارند. براساس آمار آژانس انرژی اتمی، ۷۵ درصد برق کشور فرانسه در نیروگاه‌های هسته‌ای تولید می‌شود و در ایالات متحده، نیروگاه‌های هسته‌ای ۱۵ درصد برق را تأمین می‌کنند. بیش از چهارصد نیروگاه هسته‌ای در سراسر دنیا وجود دارد که بیش از یکصد عدد آنها در ایالات متحده واقع شده است. یک نیروگاه هسته‌ای بسیار شبیه به یک نیروگاه سوخت فسیلی تولید کننده انرژی الکتریکی است و تنها تفاوتی که دارد، منبع گرمایی تولید بخار است. این وظیفه در نیروگاه هسته‌ای برعهده رآکتور هسته‌ای است.

## رآکتور هسته ای

همه رآکتورهای هسته‌ای تجاری از طریق شکافت هسته‌ای گرما تولید می‌کنند. همانطور که می‌دانید، شکافت اورانیوم نوترون‌های زیادی آزاد می‌کند، بیشتر از آنکه لازم باشد. اگر شرایط واکنش مساعد باشد فرآیند به طور خود به خودی انجام می‌شود و یک زنجیره از شکافت‌های هسته‌ای به وجود می‌آید. نوترونهایی که از فرآیند شکافت آزاد می‌شوند، بسیار سریعند و هسته‌های دیگر نمی‌توانند آنها را به راحتی جذب کنند. از این رو در اکثر رآکتورها قسمتی به نام کند کننده نوترون وجود دارد که در آن از سرعت نوترونها کاسته می‌شود و در نتیجه نوترونها به راحتی جذب می‌شوند. چنین نوترونهایی آن قدر کند می‌شوند تا با هسته رآکتور به تعادل گرمایی برسند. نام گذاری این نوترونها به نوترونهای گرمایی یا نوترونهای کند هم از همین رو است .

مقدار انرژی گرمایی که در یک رآکتور پارامتر بحرانی است و با کنترل آن می‌توان رآکتور را در حالت عادی نگاه داشت. این کار با تنظیم تعداد میله‌های کنترل درون رآکتور صورت می‌گیرد. میله کنترل از

مواد جذب کننده نوترون ساخته شده است و با افزایش یا کاهش جذب نوترون، می‌توان گسترش واکنش زنجیره‌ای را کاهش یا افزایش داد. البته با استفاده از کند کننده‌های نوترون یا تغییر دادن نحوه قرار گیری میله‌های سوخت هم می‌توان انرژی خروجی رآکتور را کنترل کرد.

## طراحی یک رآکتور

رآکتورهای هسته‌ای برای انجام واکنش‌های هسته‌ای در مقیاس وسیع طراحی می‌شوند. گرما، اتمهای جدید و تابش بسیار شدید نوترون، محصولات واکنش انجام شده در رآکتور هستند و بسته به استفاده‌ای که از رآکتور می‌شود، از یکی از محصولات استفاده می‌شود. در یک نیروگاه هسته‌ای تولید برق از انرژی گرمایی تولید شده برای چرخاندن توربین و در نهایت تولید انرژی الکتریکی استفاده می‌شود. در برخی رآکتورهای نظامی و آزمایشی بیشتر از باریکه نوترون پر انرژی استفاده می‌شود تا مواد ساده را به عناصر کم یاب و جدیدی تبدیل کنند.

هدف از رآکتور هر چه باشد، برای به دست آوردن این محصولات لازم است یک واکنش هسته‌ای زنجیره‌ای به طور پیوسته ادامه یابد. برای ادامه یک واکنش زنجیره‌ای هم رآکتور باید در حالت بحرانی یا فوق بحرانی قرار داشته باشد. کند کننده و وسیله کنترل در فراهم آوردن چنین شرایطی نقش بسیار مهمی برعهده دارند.

رآکتوری که از کند کننده استفاده می‌کند، رآکتور گرمایی یا رآکتور کند نامیده می‌شود. این رآکتورها با توجه به نوع کند کننده‌ای که مورد استفاده قرار می‌گیرد طبقه بندی می‌شوند. آب معمولی (آب سبک)، آب سنگین و گرافیت، مواد رایج کند کننده هستند. البته گرافیت مشکلات فراوانی را به وجود می‌آورد و بسیار خطرآفرین است، مانند حادثه انفجار چرنوبیل یا آتش سوزی وانیدسکیل.

رآکتورهایی که از کند کننده‌ها استفاده نمی‌کنند، رآکتورهای سریع خوانده می‌شوند. در این نوع رآکتورها فشار ذرات نوترون بسیار بالا است و از این رو می‌توان برخی واکنش‌های هسته‌ای را در آنها انجام داد که ترتیب دادن آنها در رآکتور کند بسیار مشکل است. شرایط خاصی که در رآکتورهای سریع وجود دارد، سبب می‌شود بتوان هسته اتم توریوم و برخی ایزوتوپ‌های دیگر را به سوخت هسته‌ای قابل استفاده تبدیل کرد. چنین رآکتوری می‌تواند سوختی بیش از حد نیاز خود را تولید کند و به همین دلیل به آن رآکتور سوخت ساز هم گفته می‌شود.

در همه رآکتورها، قلب رآکتور که دمای بسیار زیادی دارد باید خنک شود. در یک نیروگاه هسته‌ای، سیستم خنک ساز به نوعی طراحی می‌شود که از گرمای آزاد شده به بهترین شکل ممکن استفاده شود. در اغلب این سیستمها از آب استفاده می‌شود. اما آب نوعی کند کننده هم محسوب می‌شود و از این رو نمی‌تواند در رآکتورهای سریع مورد استفاده قرار گیرد. در رآکتورهای سریع از سدیم مذاب یا نمک‌های

سدیم استفاده می‌شود و دمای عملیاتی خنک ساز بالاتر است. در رآکتورهایی که برای تبدیل مورد طراحی شده اند، به راحتی گرمای آزاد شده را در محیط آزاد می‌کنند. در یک نیروگاه هسته ای، رآکتور کند منبع آب را گرم می‌کند و آن را به بخار تبدیل می‌کند. بخار آب توربین بخار را به حرکت در می‌آورد، توربین نیز ژنراتور را می‌چرخاند و به این ترتیب انرژی تولید می‌شود. این آب و بخار آن در تماس مستقیم با رآکتور هسته‌ای است و از این رو در معرض تابش‌های شدید رادیواکتیو قرار می‌گیرند. برای پیشگیری از هر گونه خطر مرتبط با این آب رادیواکتیو، در برخی رآکتورها بخار تولید شده را به یک مبدل حرارتی ثانویه وارد می‌کنند و از آن به عنوان یک منبع گرمایی در چرخه دومی از آب و بخار استفاده می‌کنند. بدین ترتیب آب و بخار رادیواکتیو هیچ تماسی با توربین نخواهند داشت.

## انواع رآکتورهای گرمایی

در رآکتورهای گرمایی علاوه بر کند کننده، سوخت هسته‌ای (ایزوتوپ قابل شکافت القایی)، مخزن بخار و لوله‌های منتقل کننده آن، دیواره‌های حفاظتی و تجهیزات کنترل و مشاهده سیستم رآکتور نیز وجود دارند. البته بسته به این که این رآکتورها از کانالهای سوخت فشرده شده، مخزن بزرگ بخار یا خنک کننده گازی استفاده کنند، می‌توان آنها را به سردسته تقسیم کرد.

الف – کانالهای تحت فشار در رآکتورهای RBMK و CANDU استفاده می‌شوند و می‌توان آنها را در حال کار کردن رآکتور، سوخت رسانی کرد.

ب – مخزن بخار پرفشار داغ، رایج‌ترین نوع رآکتور است و در اغلب نیروگاه‌های هسته‌ای و رآکتورهای دریایی (کشتی، ناو هواپیمابر یا زیردریایی) از آن استفاده می‌شود. این مخزن می‌تواند به عنوان لایه حفاظتی نیز عمل کند.

ج – خنک سازی گازی: در این رآکتورها به جای آب، از یک سیال گازی شکل برای خنک کردن رآکتور استفاده می‌شود. این گاز در یک چرخه گرمایی با منبع حرارتی رآکتور قرار می‌گیرد و معمولاً از هلیوم برای آن استفاده می‌شود، هر چند که نیتروژن و دی اکسید کربن نیز کاربرد دارند. در برخی رآکتورهای جدید، رآکتور به قدری گرم تولید می‌کند که گاز خنک کن می‌تواند مستقیماً یک توربین گازی را بچرخاند، در حالی که در طراحی‌های قدیمی تر گاز خنک کن را به یک مبدل حرارتی می‌فرستادند تا در یک چرخه دیگر، آب را به بخار تبدیل کند و بخار داغ، یک توربین بخار را بگرداند.

## بقیه اجزای نیروگاه هسته ای

غیر از رآکتور که منبع گرمایی است، تفاوت اندکی بین نیروگاه هسته‌ای و یک نیروگاه حرارتی تولید برق با سوخت فسیلی وجود دارد.

مخزن بخار تحت فشار معمولاً درون یک ساختمان بتونی تعبیه می‌شود که این ساختمان به عنوان یک سد حفاظتی در برابر تابش رادیواکتیو عمل می‌کند. این ساختمان هم درون یک مخزن بزرگتر فولادی قرار می‌گیرد. هسته رآکتور و تجهیزات مرتبط با آن درون این مخزن فولادی قرار گرفته‌اند و کارکنان می‌توانند رآکتور را تخلیه یا سوخت رسانی کنند. وظیفه این مخزن فولادی، جلوگیری از نشت هر گونه گاز یا مایع رادیواکتیو از درون سیال است.

در نهایت این مخزن فولادی هم به وسیله یک ساختمان بتونی خارجی محافظت می‌شود. این ساختمان به قدری محکم است که در برابر اصابت یک هواپیمای جت مسافربری (مشابه حادثه یازده سپتامبر) هم تخریب نمی‌شود. وجود این ساختمان حفاظتی دوم برای جلوگیری از انتشار مواد رادیواکتیو در اثر هرگونه نشت از حفاظ اول ضروری است. در حادثه انفجار چرنوبیل، فقط یک ساختمان حفاظتی وجود داشت و همان موجب شد مواد رآکتیو در سطح اروپا پخش شود.

## رآکتورهای هسته‌ای طبیعی

در طبیعت هم می‌توان نشانه‌هایی از رآکتور هسته‌ای پیدا کرد، البته به شرطی که تمام عوامل مورد نیاز به طور طبیعی در کنار هم قرار گرفته باشند. تنها نمونه شناخته شده یک رآکتور هسته‌ای طبیعی دو میلیارد سال پیش در منطقه اوکلو در کشور گابون (قاره آفریقا) فعالیتش را آغاز کرده است. البته دیگر چنین رآکتورهایی روی زمین شکل نمی‌گیرند، زیرا واپاشی رادیواکتیو این مواد (به خصوص U-235) در این زمان طولانی (۴/۵ میلیارد ساله (سن زمین)، فراوانی U-235 را در منابع طبیعی این رآکتورها بسیار کاهش داده است، به طوری که مقدار آن به پایین تر از حد مورد نیاز آغاز یک واکنش زنجیره‌ای رسیده است.

این رآکتورهای طبیعی زمانی شکل گرفتند که معادن غنی از اورانیوم به تدریج از آب زیرزمینی یا سطحی پر شدند. این آب به صورت کند کننده عمل کرد و واکنش‌های زنجیره‌ای شدیدی به وقوع پیوست. با افزایش دما، آب کند کننده بخار می‌شد و رآکتور خاموش شد. پس از مدتی، این بخارها به مایع تبدیل می‌شدند و دوباره رآکتور به راه می‌افتاد. این سیستم خودکار و بسته، یک رآکتور را کنترل می‌کرد و برای صدها هزار سال، این رآکتور را فعال نگاه می‌داشت.

مطالعه و بررسی این رآکتورهای هسته‌ای طبیعی بسیار ارزشمند است، زیرا می‌تواند به تحلیل چگونگی حرکت مواد رادیواکتیو در پوسته زمین کمک کند. اگر زمین شناسان بتوانند را از این حرکت‌ها را شناسایی کنند، می‌توانند راه‌های جدیدی برای دفن زباله‌های هسته‌ای پیدا کنند تا روزی خدای ناکرده، این ضایعات خطرناک به منابع آب سطح زمین نشت نکنند و فاجعه‌ای بشری به بار نیآورند.

## انواع رآکتورهای گرمایی

الف – کند سازی با آب سبک:

a- رآکتور آب تحت فشار (PWR) Pressurized Water Reactor

b- رآکتور آب جوشان (BWR) Boiling Water Reactor

c- رآکتور D2G

ب- کند سازی با گرافیت:

a- ماگنوس Magnox

b- رآکتور پیشرفته با خنک کننده‌ی گازی (AGR) Advanced Gas-Coaled Reactor

c- RBMK

d- PBMR

ج – کند کنندگی با آب سنگین:

a – SGHWR

b – CANDU

## رآکتور آب تحت فشار، PWR

رآکتور PWR یکی از رایج‌ترین رآکتورهای هسته‌ای است که از آب معمولی هم به عنوان کند ساز نوترون‌ها و هم به عنوان خنک ساز استفاده می‌کند. در یک PWR، مدار خنک اولیه از آب تحت فشار استفاده می‌کند. آب تحت فشار، در دمایی بالاتر از آب معمولی به جوش می‌آید، از این دو چرخه خنک ساز اولیه را به گونه‌ای طراحی می‌کنند که آب با وجود آنکه دمایی بسیار بالا دارد، جوش نیاید و به بخار تبدیل نشود. این آب داغ و تحت فشار در یک مبدل حرارتی، گرما را به چرخه دوم منتقل می‌کند که یک نوع چرخه بخار است و از آب معمولی استفاده می‌کند. در این چرخه آب جوش می‌آید و بخار داغ تشکیل می‌شود، بخار داغ یک توربین بخار را می‌چرخاند، توربین هم یک ژنراتور و در نهایت ژنراتور، انرژی الکتریکی تولید می‌کند.

PWR به دلیل دارا بودن چرخه ثانویه با BWR تفاوت دارد. از گرمای تولیدی در PWR به عنوان سیستم گرم کننده در نواحی قطبی نیز استفاده شده است. این نوع رآکتور، رایج‌ترین نوع رآکتورهای هسته‌ای است و در حال حاضر، بیش از ۲۳۰ عدد از آنها در نیروگاه‌های هسته‌ای تولید برق و صدها رآکتور دیگر برای تأمین انرژی تجهیزات دریایی مورد استفاده قرار می‌گیرند.

## خنک کننده

همان طور که می‌دانید، برخورد نوترونها با سوخت هسته‌ای درون میله‌های سوخت، موجب شکافت هسته اتمها می‌شود و این فرآیند هم به نوبه خود، گرما و نوترونهای بیشتری آزاد می‌کند. اگر این حرارت آزاد شده منتقل نشود، ممکن است میله‌های سوخت ذوب شوند و ساختار کنترلی رآکتور از بین برود (و البته خطرهای مرگ آوری که به دنبال آن روی می‌دهند). در PWR، میله‌های سوخت به صورت یک دسته در ساختاری، ترسیمی قرار گرفته‌اند و آب از کف رآکتور به بالا جریان پیدا می‌کند. آب از میان این میله‌های سوخت عبور می‌کند و به شدت گرم می‌شود، به طوری که به دمای ۳۲۵ درجه سانتی‌گراد می‌رسد. درمبدل حرارتی، این آب داغ موجب داغ شدن آب در چرخه دوم می‌شود و بخاری با دمای ۲۷۰ درجه سانتی‌گراد تولید می‌کند تا توربین را بچرخاند.

## کند کننده

نوترونهای حاصل از یک شکافت هسته‌ای بیش از آن حدی گرمند که بتوانند یک واکنش شکافت هسته‌ای را آغاز کنند. انرژی آنها را باید کاهش داد تا با محیط اطراف خود به تعادل گرمایی برسند. محیط اطراف نوترونها (قلب رآکتور) دمایی در حدود ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد دارد. در یک PWR، نوترونها در پی برخورد با مولکولهای آب خنک‌ساز، انرژی جنبشی خود را از دست می‌دهند؛ به طوری که پس از ۸ تا ۱۰ برخورد (البته به طور متوسط) با محیط هم‌دمای می‌شوند. در این حالت، احتمال جذب نوترونها از سوی هسته U-235 بسیار زیاد است و در صورت جذب، بالافاصله هسته U-236 جدید دچار شکافت می‌شود. مکانیسم حساسی که هر رآکتور هسته‌ای را کنترل می‌کند، سرعت آزاد سازی نوترونها در طول یک فرآیند شکافت است به طور متوسط از هر شکافت، دونوترون و مقدار زیادی انرژی آزاد می‌شود. نوترونهای آزاد شده اگر با هسته U-235 دیگری برخورد کنند، شکافت دیگری را سبب می‌شوند و در نهایت یک واکنش زنجیره‌ای روی می‌دهد. اگر تمام این نوترونها در یک لحظه آزاد شوند، تعدادشان به قدری زیاد می‌شود که باعث ذوب شدن رآکتور خواهد شد. (تعداد ذرات پر انرژی، دمای یک سیستم را تعیین می‌کند. معادله بوتنرمن، این ارتباط را توصیف می‌کند.) خوشبختانه برخی از این نوترونها پس از یک بازه زمانی نه چندان کوتاه (حدود یک دقیقه) تولید می‌شوند و سبب می‌شوند دیگر عوامل کنترل کننده از این تاخیر زمانی استفاده کرده، اثر خود را داشته باشند. یکی از مزیت‌های استفاده از آب در PWR، این است که اثر کند سازی آب با افزایش دما کاهش می‌یابد. در حالت عادی، آب در فشار ۱۵۰ برابر فشار یک اتمسفر قرار دارد (حدود ۱۵ مگا پاسکال) و در قلب رآکتور به دمای ۳۲۵ درجه سانتی‌گراد می‌رسد. درست است که آب با فشار پانزده مگا پاسکال در این دما جوش نمی‌آید، ولی به شدت از خاصیت کند کنندگی اش کاسته می‌شود، بنابراین آهنگ

واکنش شکافت هسته‌ای کاهش می‌یابد، حرارت کمتری تولید می‌شود و دما پایین می‌آید. دما که کاهش یابد، توان رآکتور افزایش می‌یابد و دما که افزایش یابد توان رآکتور کاهش می‌یابد؛ پس خود سیستم PWR دارای یک سیستم خود تعادلی در رآکتور است و تضمین می‌کند توان رآکتور در کمترین میزان مورد نیاز برای تأمین گرمای سیستم بخار ثانویه است. در اغلب رآکتورهای PWR، توان رآکتور را در دوره فعالیت معمولی با تغییرات غلظت بورون (در شکل اسید بوریک) در چرخه خنک کننده اولیه کنترل اولیه کنترل می‌کنند سرعت جریان خنک کننده اول در رآکتورهای PWR معمولی ثابت است. بورون یک جذب کننده قوی نوترون است و با افزایش یا کاهش غلظت آن، می‌توان شدت فعالیت رآکتور را کاهش یا افزایش داد. برای این کار، یک سیستم کنترلی پیچیده شامل پمپ‌های فشار بالا که آب را در فشار ۱۵ مگا پاسکال از چرخه خارج می‌کند، تجهیزات تغییر غلظت اسید بوریک و تزریق مجدد آب به چرخه خنک ساز مورد نیاز است. یکی از اشکالات رآکتورهای شکافت، این است که حتی پس از توقف واکنش شکافت، هنوز هم واپاشی‌های رادیواکتیوی انجام می‌شود و حرارت زیادی آزاد می‌شود که می‌تواند رآکتور را ذوب کند. البته سیستم‌های حفاظتی و پشتیبانی متعددی برای جلوگیری از این واقعه وجود دارند، با این حال ممکن است در اثر پیچیدگی‌های این سیستم، برهمکنش‌های پیش بینی نشده یا خطاهای عملیاتی مرگ آفرینی در شرایط اضطراری روی دهند. در نهایت، هر رآکتور با یک حفاظ ساختمانی بتونی احاطه شده است که آخرین سد در برابر تشعشعات رادیواکتیو است.

### رآکتور آب جوشان، BWR

در رآکتور آب جوشان، از آب سبک استفاده می‌شود. آب سبک، آبی است که در آن فقط هیدروژن معمولی وجود دارد BWR. (اختلاف زیادی با رآکتور آب تحت فشار ندارد، غیر از اینکه در BWR فقط یک چرخه خنک کننده وجود دارد و آب مستقیماً در قلب رآکتور به جوش می‌آید. فشار آب در BWR کمتر از PWR است، به طوری که در بیشترین مقدار به ۷۵ برابر فشار جو می‌رسد (۷/۵ مگا پاسکال) و بدین ترتیب آب در دمای ۲۸۵ درجه سانتی گراد به جوش می‌آید.

رآکتور BWR به شکلی طراحی شده که بین ۱۲ تا ۱۵ درصد آب درون قلب رآکتور به شکل بخار در قسمت بالای آن قرار می‌گیرد. بدین ترتیب عملکرد بخش بالایی و پایینی هسته رآکتور با هم تفاوت دارند. در بخش بالایی قلب رآکتور، کند سازی کمتری صورت می‌گیرد و در نتیجه بخش بالایی کمتر است.

در حالت کلی دو مکانیسم برای کنترل BWR وجود دارد: استفاده از میله‌های کنترل و تغییر جریان آب درون رآکتور.

الف - بالا بردن یا پایین آوردن میله‌های کنترل، روش معمولی کنترل توان رآکتور در حالت راه اندازی رآکتور تا رسیدن به ۷۰ درصد حداکثر توان است. میله‌های کنترل حاوی مواد جذب کننده نوترون

هستند؛ در نتیجه پایین آوردن آنها موجب افزایش جذب نوترون در میله ها، کاهش جذب نوترون در سوخت و در نهایت کاهش آهنگ شکافت هسته‌ای و پایین آمدن توان رآکتور می‌شود. بالا بردن میله‌های سوخت دقیقاً نتیجه معکوس می‌دهد.

ب - تغییرات جریان آب درون رآکتور، زمانی برای کنترل رآکتور مورد استفاده قرار می‌گیرد که رآکتور بین ۷۰ تا صد درصد توان خود کار می‌کند. اگر جریان آب درون رآکتور افزایش یابد، حباب‌های بخار در حال جوش سریع تر از قلب رآکتور خارج می‌شوند و آب درون قلب رآکتور بیشتر می‌شود. افزایش مقدار آب به معنی افزایش کندسازی نوترون و جذب بیشتر نوترونها از سوی سوخت است و این یعنی افزایش توان رآکتور. با کاهش جریان آب درون رآکتور، حباب‌ها بیشتر در رآکتور باقی می‌مانند، سطح آب کاهش می‌یابد و به دنبال آن کندسازی نوترونها و جذب نوترون هم کاهش می‌یابد و در نهایت توان رآکتور کاهش می‌یابد.

بخار تولید شده در قلب رآکتور از شیرهای جدا کننده بخار و صفحات خشک کن (برای جذب هر گونه قطرات آب داغ) عبور می‌کند و مستقیماً به سمت توربین‌های بخار که بخشی از مدار رآکتور محسوب می‌شوند، می‌رود. آب اطراف رآکتور همواره در معرض تابش و آلودگی رادیواکتیو است و از آنجا که توربین هم در تماس مستقیم با این آب است، باید پوشش حفاظتی داشته باشد. اغلب آلودگی‌های درون آب عمر کوتاهی دارند (مانند  $Ni6$  که بخش اعظم آلودگی‌های آب را تشکیل می‌دهد و نیمه عمرش تنها ۷ ثانیه است)، بنابراین مدت کوتاهی پس از خاموش شدن رآکتور می‌توان به قسمت توربین وارد شد.

در رآکتور BWR، افزایش نسبت بخار آب به آب مایع درون رآکتور موجب کاهش گرمای خروجی می‌شود. با این حال، یک افزایش ناگهانی در فشار بخار، سبب بروز یک کاهش ناگهانی در نسبت بخار به آب مایع درون رآکتور می‌شود که خود، سبب افزایش توان خروجی می‌شود. این شرایط و دیگر حالت‌های خطرناک، موجب شده است از سیستم کنترلی اسید بوریک (بورون) نیز استفاده شود، بدین شکل که در سیستم پشتیبان خاموش کننده اضطراری، محلول اسید بوریک با غلظت بالا به چرخه خنک کننده تزریق می‌شود. خوبی این سیستم این است که اسید اوریک، یک خورنده قوی است و معمولاً در PWR سبب می‌شود تلفات ناشی از خوردگی قابل توجه باشد. در بدترین شرایط اضطراری که تمام سیستم‌های امنیتی از کار افتاد، هر رآکتور به وسیله یک ساختمان حفاظتی از محیط اطراف جدا شده است. در یک رآکتور BWR جدی، حدود ۸۰۰ دسته واحد سوخت قرار می‌گیرد و در هر دسته بین ۷۴ تا ۱۰۰ میله سوخت قرار می‌گیرد. این چنین حدود ۱۴۰ تن اورانیوم در قلب رآکتور ذخیره می‌شود.

## • رآکتور D2G



رآکتور هسته‌ای D2G را می‌توان در تمام ناوهای دریایی ایالات متحده می‌توان پیدا کرد D2G .

مخفف عبارت زیراست:

D=Destroyer-sized reactor رآکتور ناو جنگی

=Second Generation نس دوم

G= General – Electric built ساخت جنرال الکتریک

بدین ترتیب، D2G را می‌توان مخفف این عبارت دانست: رآکتور هسته‌ای نسل دوم ویژه ناوهای جنگی

ساخت جنرال الکتریک. این رآکتور برای تولید حداکثر ۱۵۰ مگا وات انرژی الکتریکی و عمر مفید ۱۵

سال مصرف معمولی طراحی شده است.

در این رآکتور، برای مخزن بخار دو رآکتور وجود دارد و طوری طراحی شده که بتوان هر دو اتاق توربین

را با یک رآکتور به راه انداخت. اگر هر دو رآکتور فعال باشند، ناو به سرعت ۳۲ گره می‌رسد. اگر یک

رآکتور فعال باشد و توربین‌ها متصل به هم باشند، سرعت ناو به ۲۵ تا ۲۷ گره خواهد رسید و اگر فقط

یک رآکتور فعال باشد ولی توربین‌ها جدا باشند، سرعت فقط ۱۵ گره خواهد بود.

[http://edu .tebyan.net/physics/nuclear-energy/09.htm](http://edu.tebyan.net/physics/nuclear-energy/09.htm)