راکتورهای اتمی قدرت
POWER REACTORS

از : مهندس مهدی صرام

یکی ازمهمترین کاربردهای راکتورهای اتمی استفاده ازآنها برای تولید برق می‌باشد . امروزه‌در ایالات متحده میلیونها نفر ازانرژی الکتریکی‌تولید شده بوسیله راکتورهای اتمی استفاده می کنند و نیز روزبروز میزان تولید برق بوسیله راکتورهای‌اتمی بیشترمیشود . درآینده نزدیکی میلیونها نفرمردم در سراسردنیا درمنازل خود ازانرژی الکتریکی‌استفاده خواهند نمود که بوسیله راکتورهای اتمی کـه هم اکنون دردست ساختمان هستند تولید میشود آنچه که دراین‌مورد جالب‌بنظرمیآید این است که تاچند سال قبل تولید برق بوسیله راکتورهای اتمی امری نامعلوم ومشکل بنظرمیرسید .

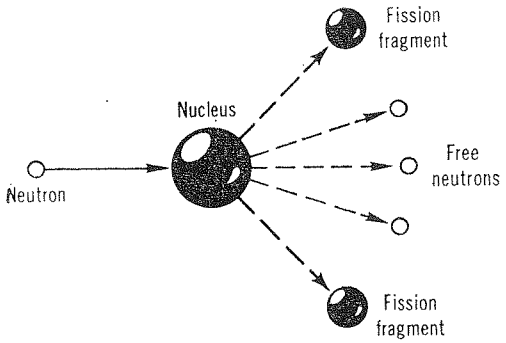
در دنیای امروزی احتیاجات بشر به انرژی الکتریکی باسرعتی بیش ازسرعت ازدیاد جمعیت در دنیاروبافزون‌است. پیش‌بینی ومحاسباتی که‌دانشمندان در مورد احتیاجات آینده بشربه انرژی الکتریکی نموده‌اندنشان میدهدکه بحکم اجبارمابایدازانرژی هسته‌ای بـرای این منظور استفاده نمائیم . در واقع باید گفت که در آینده استفاده از راکتورهای اتمی برای تولید برق امری ضروری بنظرمیرسد.

یك راکتوراتمی چگونه برق‌تولید می نماید؟ مخارج آن چقدر است ؟ دراین سری مقاله ها سعی میشود که باینگونه سؤالات پاسخ داده شود .

یك‌راکتوراتمی‌قدرت کاملاشبیه به یك کارخانه تولید برق معمولی است. درهریك ازاین دوکارخانه از بخار آب برای بحرکت درآوردن تربوژنراتور (turbo - Generator) استفاده میشود ، گرچه عمل فیزیکی‌توربین مستقل‌ازمنبع‌تولید بخارمی‌باشد ولی ازنظربحث‌مامهم‌است که بدانیم‌منبع بخارچیست ؟ زیرا درهمین نکته مهم است که کارخانـه برق اتمی با کارخانه برق معمولی فرق میکند بخار چگونـه تولیدمیشود؟کارخانه‌های برق‌معمولی برای‌تولیدبخار مورد نیازازانرژی احتراق نفت ، ذغال سنگ ، گاز وغیره استفاده می کنند .

در حالیکه در کارخانه‌های بـرق اتمی هیچ احتراقی صورت نگرفته و در عوض از شکسته شدن اتم‌های اورانیوم انرژی تولید میشود. برای تولید انرژی توسط مکانیزم فیسیون (Fission)احتیاج به یك هسته سنگین نظیراورانیوم می‌باشد. زیراوقتی تحت‌بمباران‌نترونهای کند(Thermal Neutron) قـرار گیرد بسهولت شکسته شده و انرژی تـولید می‌نماید .

هسته اتم اورانیوم پس از شکسته شدن چند نترون اضافی تولید نموده که این نترونها بنوبه خود میتوانند هسته‌های دیگراورانیوم راشکافته و انرژی بیشتر تولید نمایند و بدین ترتیب واکنش زنجیری هسته‌ای(Nuclear Chain Reaction) برقرار میگردد .



شکل ۱- عمل شکسته شدن اتم اورانیوم بوسیلهٔ نترون

پایداری واکنش زنجیری بسیار مهم می باشد زیرا برای تولید یك وات قدرت حدود ۳۰ بلیون هسته اتم اورانیوم باید شکافته بشود

$$1^{ev} = 1.6 \times 1-0^{12} \quad erg$$

$$1^{Mev} = 1.6 \times 10^{-6} \quad erg = 1.6 \times 10^{-13} \quad Watt\ Sec.$$

$$200^{Wev} = 3.2^{-11} \times Watt\ sec.$$

$$\text{تعداد فیسیون برای تولید یك وات قدرت} = \frac{1}{3.2 \times 10^{-11}} = 3.1 \times 10^{10}$$

بایدتوجه نمود که هراتم اورانیوم که شکسته میشود حدود ۲۰۰ Mev انرژی تولید میشود .

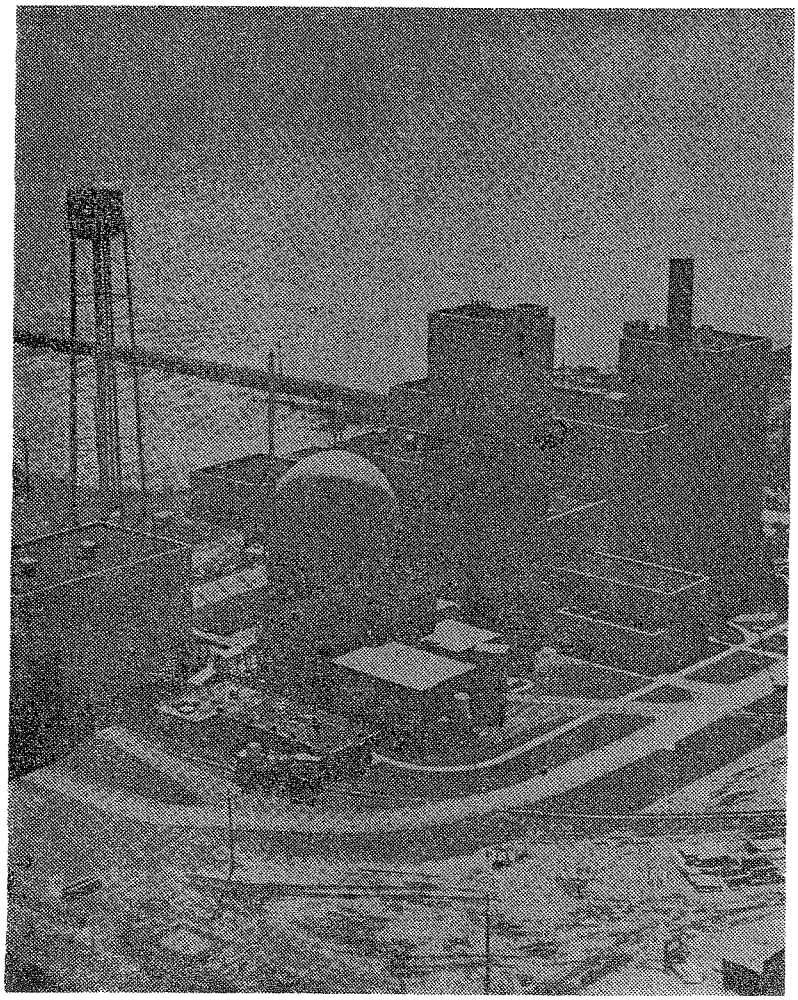
اگر بخواهیم یك واکنش زنجیری هسته‌ای مفید واقع شود باید سرعت شکسته شدن اتم‌ها را کنترل نموده و بطریق معینی حرارت ایجاد شده را ازراکتورخارج نمائیم .

عمل راکتوراتمی را درتولید برق باین‌ترتیب میتوان بیان نمود که راکتوراتمی محل مناسبی‌است که در آن شکسته شدن‌اتم‌های‌اورانیوم صورت گرفته و نیز در این محل میتوان بسرعت واکنش زنجیری هسته‌ای را کنترل نموده و حرارت ایجاد شده را با ماکزیمم راندمان برای تولید برق بکاربرد.

قبل ازآغاز گفتگو درباره انواع راکتورهای قدرت لازم است که مختصری درباره سوخت هسته‌ای راکتورها صحبت کنیم واضح است که اساس کاریك راکتوراتمی برای هرمنظوری که باشد بستگی کامل بسوخت هسته‌ای ونوع آن دارد و باید توجه نمود که منابع اورانیوم طبیعت‌غیرمحدود نمی‌باشند واگر قرارمیبود که راکتورهای اتمی باسرعت نسبتاً زیاد سوخت‌هسته‌ای‌موجود درطبیعت رامصرف نمایندیگر راکتورهای اتمی فایده چندانی برای بشر نداشتند . آنچه که درباره راکتورهای‌اتمی‌چندان واضح‌نیست این است که اختلاف مهمی درمیان راکتورهای‌اتمی در مورد میزان مصرف خالص سوخت هسته‌ای آنها می‌باشد . بعضی راکتورها هستند که دارای مصرف سوخت‌نسبتاًزیادی می‌باشند. دیگرانواع‌راکتورهای اتمی هستند کـه دارای مصرف سوخت نسبتاً کمی می‌باشند ومسائل‌این راکتورهااکنون دردست‌تحقیق بوده‌ومتخصصین‌امیدوارند که‌درآینده‌ازاین‌راکتورها استفاده بیشتری بشود .

بالاخره مهمترین نوع راکتور اتمی از نظر مصرف سوخت هسته ای راکتوری است بنام راکتور زاینده (Breeder Reactor) کـه دارای مصرف سوخت هسته‌ای منفی می‌باشد (Negative Fuel Consumption) یعنی این راکتور با وجودیکه درحال‌کاربوده وانرژی الکتریکی تـولید می‌نماید قادراست سوخت‌هسته‌ای بیشترازآن مقدار که‌مصرف می کند تولیدنماید.ازاین‌نوع راکتورتعدادمحدودی درایالات متحده وسایر ممالك ساخته شده ومورد‌بهره برداری قرار گرفته‌اند.

باید توجه نمود که مسائل بسیاری در مورد راکتورهای زاینده هنوز دردست تحقیق بوده وبرای ۱۰ تا ۲۰ سال آینده پیش‌بینی میشود کـه این نوع



شکل ۲- راکتور اتمی زاینده Fermi درشهردترویت (آمریکا)

راکتورمتداول‌ترین راکتور ازنظرتکنیك واقتصادی برای تولید برق ، آب شیرین دراغلب ممالك دنیا بشود. ازاین نوع راکتوریکی بنام‌راکتور Fermi درنزدیکی شهردترویت(Detroit) امریکاساخته‌شده است که‌مخارج‌اولیه‌آن‌آنقدرزیاد بود که ۲۵ کمپانی معروف امریکا باهمکاری یکدیگرسرمایه‌ای حدود ۱۰۰ میلیون دلارجمع‌آوری نموده وموفق به‌ساختن وبهره برداری ازاین راکتورشدند .

حال به بررسی مختصری درباره تهیه سوخت جدید اتمی بوسیله راکتورهای زاینده میپردازیم .

سنگهای اورانیوم طبیعت فقط دارای ۰/۷۰/۰ اورانیوم۲۳۵می‌باشند که مهمترین‌ماده قابل فیسیون برای تولید انـرژی در راکتورهای اتمی می‌باشد .

بقیه درصداورانیوم طبیعت را ایزوتوپ ۲۳۸اورانیوم تشکیل میدهد که آنرا مـاده مفید نـام نهاده‌اند (Fertile Material) . قابلیت شکسته شدن این ایزوتوپ اورانیوم باندازه ایزوتوپ ۲۳۵ اورانیوم نبوده ولی در اثـر بمباران نترونها بطور غیر مستقیم این ایزوتوپ پس از تکمیل واکنش های هسته ای زیر تبدیل به مـاده مهم پلوتونیم ۲۳۹ می شود (pu^{239}) که خود ماده ای قـابل فیسیون بوده ومیتوان ازآن درسایر راکتورهای اتمی برای تولید انرژی ویادرسلاحهای هسته‌ای استفاده نمود .

وقتی یك اتم اورانیوم شکسته میشود بطور متوسط ۲/۵ نترون از ایـن واکنش هسته‌ای تـولیـد میشود. برای‌حفظ وبرقراری واکنش‌های‌زنجیره‌ای

$$_{92}U^{238} + {}_{0}n \rightarrow {}_{92}U^{239} + \text{انرژی}$$

$$_{92}U^{239} \rightarrow {}_{93}Np^{239} + e$$

$$_{93}Np^{239} \rightarrow e + {}_{94}Pu^{239} \quad \text{سوخت جدید اتمی}$$

$$_{90}Th^{232} + {}_{0}n^{1} \rightarrow {}_{90}Th^{233} + \text{انرژی}$$

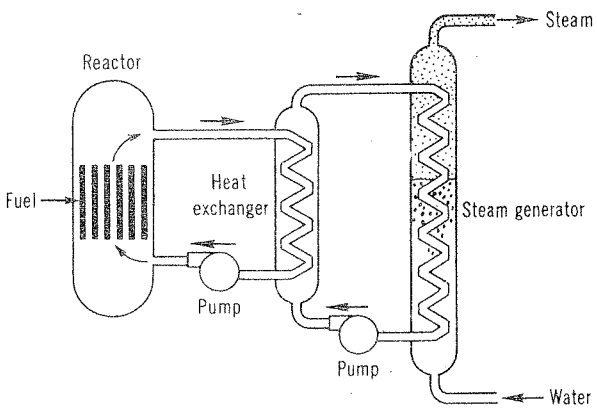
$$_{90}Th^{233} \rightarrow e + {}_{91}Pa^{233}$$

$$_{91}Pa^{233} \rightarrow e + {}_{92}U^{233} \quad \text{سوخت جدید اتمی}$$

حداقل به‌یکی‌ازاین‌نترونها احتیاج است وازبقیه‌آن میتوان برای‌تولید سوخت‌اتمی‌جدید طبق‌فرمولهائی که قبلا داده شد استفاده نمود.

معمولا درراکتورهای زاینده ازاورانیوم۲۳۵ بعنوان سوخت اصلی استفاده نموده و دراطراف هسته مرکزی راکتورلایه‌هائی (Blanket) ازاورانیوم ۲۳۸ قرار میدهند نترونهای اضافی پس ازواکنش‌های هسته‌ای ماده مفید اورانیوم ۲۳۸ رابه پلوتونیم ۲۳۹ تبدیل می کنند .

یك پارامترمهم که دراصطلاح فیزیکی در باره راکتورهای‌اتمی‌زاینده بکارمیرود پارامترزمان‌دوبل (Doubling Time) می‌باشد که‌عبارتست ازمدت زمانی که‌یك راکتورزاینده درطی‌آن میتواندسوخت اتمی معادل دوبرابرمقداراصلی تولید نماید . برای راکتورهای زاینده معمولی این زمان دوبل پیش‌بینی میشود که درحدود ۱۵ تا۲۰ سال باشد.

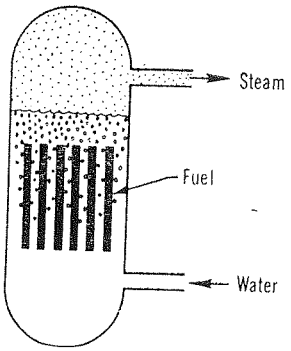


شکل۳- سیستم تبادل‌حرارت برای راکتوری که بافلزات مایع سرد میشود

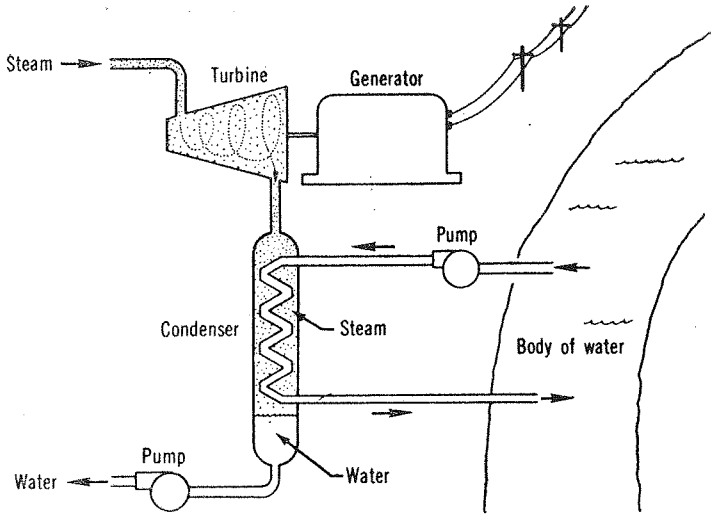
یکی از انواع راکتورهای زاینده که کلیه آزمایشات انجام شده روی پارامترهای مختلف آن تاکنون موفقیت‌آمیز بوده است راکتوری است که بافلزات مایع سردمیشود بکاربردن فلزمایع بعنوان سردکننده دراین راکتوربخاطرآنست که فلز مایع دارای‌خواص بسیارمناسبی برای‌انتقال‌حرارت‌میباشد

دراین‌نوع راکتورنظر باینکه‌فلزمایع درمدار اولیه خود ازهسته مرکزی راکتور میگذرد بمیزان قابل ملاحظه‌ای رادیو اکتیو میشود بنابراین این راکتوربادوسیستم‌تبادل حرارت ساخته میشود . مدار ثانویه نیز برای‌انتقال حرارت ازفلزمایع ممکن‌است استفاده نماید که معمولا سدیم ویا مخلوطی ازسدیم و پتاسیم می‌باشد . فلزمایع درمدارثانویه حرارت خود را دریك‌دستگاه تبادل‌حرارت، مجزا به‌مسیری ازآب داده و آنرا تبدیل به‌بخارمی‌نماید . فلزمایع که‌بعنوان سردکننده دراین نوع راکتورها بکارمیرود اغلب‌تا درجه حرارتهائی حدود ۵۰۰ درجه سانتیگراد گرم شده که بنوبه خود میتواند بخار با درجه حرارت ۴۵۰ درجه سانتیگراد برای‌استفاده در توربین تولید نماید .

متداول‌ترین نوع راکتور که برای‌تولیدبرق در ممالك مختلف از آن استفاده شده است راکتور نوع جوشان است (Boiling Water Reactor) همانطور که ازاسم این راکتور پیدا است آب ازقسمت پائین تانك راکتوربه سیستم‌سوخت هسته‌ای واردشده ودرحین گذشتن‌ازآن گرم شده وتبدیل به‌بخارمیشود که در قسمت فوقانی تانك راکتور جمع میگردد . بخارحاصل شده دراین ناحیه پس ازمدتی ازلوله‌های تعبیه شده درتانك‌راکتورعبور کرده و به‌دستگاه‌تبادل حرارت‌میرود وآب حاصله‌ازسیستم‌سرد کننده مجدداً توسط پمپ مخصوصی به‌تانك راکتوربرمیگردد . آب



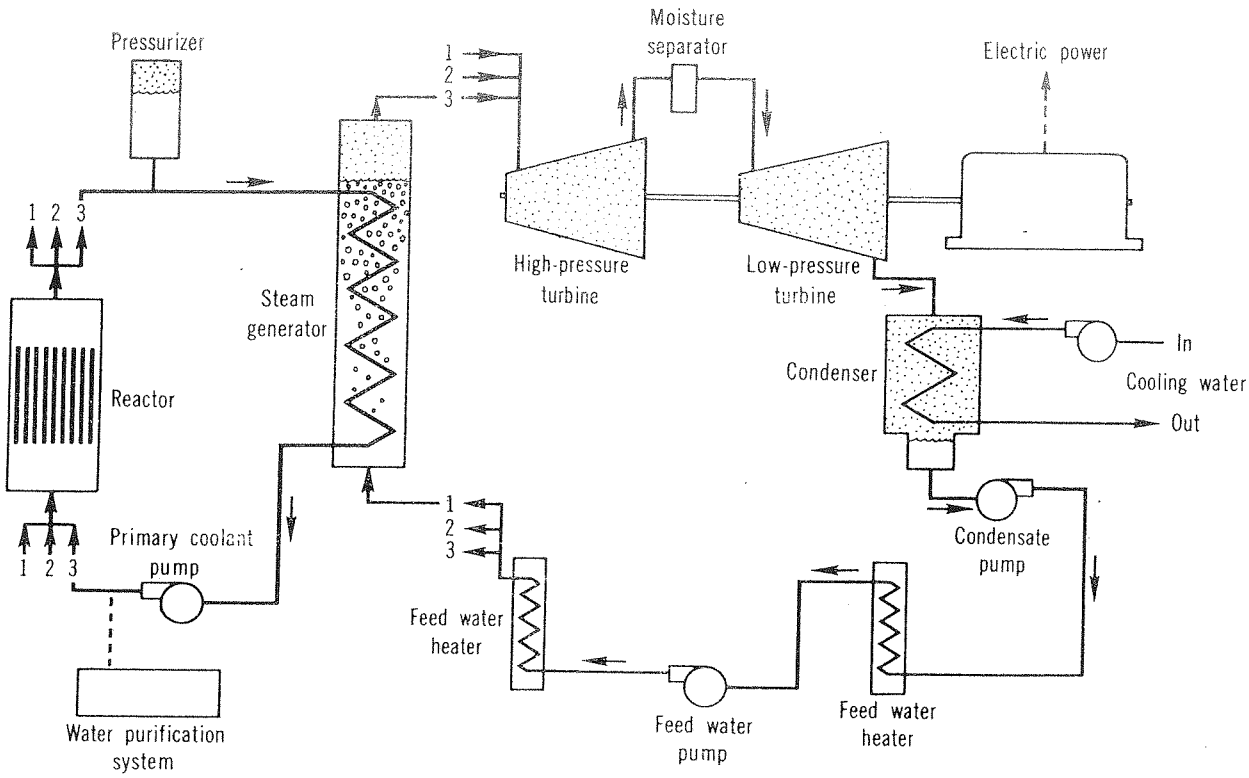
شکل۴- سیستم تبادل حرارت برای راکتور نوع جوشان



شکل۵- سیستم تولید برق در یك راکتور اتمی قدرت

و بخاریك راکتوراز نوع جوشان دارای فشاری حدود ۶۵ آتمسفر بوده ودارای درجه حرارتی حدود ۲۸۰ درجه سانتیگراد می‌باشد . یك کارخانه برق اتمی که ازراکتورنوع جوشان برای تولید ۵۰۰۰۰۰ کیلووات برق استفاده میکندبایددارای تانکی برای جوشاندن آب بوده که قطر آن حدود ۷ متر و ارتفاع آن حدود ۲۰ متر باشد .

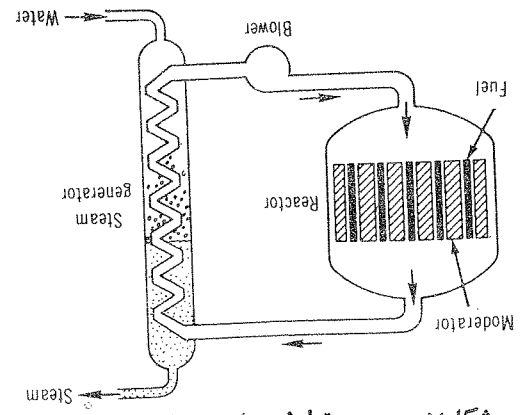
از دیگر انواع راکتور های اتمی قدرت راکتور اتمی تحت فشار(Pressurised Reactor) میباشد. این‌راکتور درشرایطی کارمیکند که وقتی آب از داخل تانك راکتور عبور نموده بجوش نمیآید فشار در داخل تانك این‌نوع راکتور حدود ۱۳۵



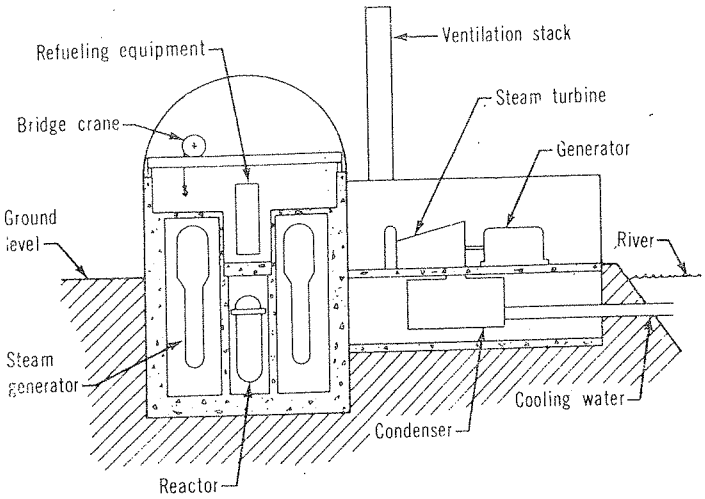
شکل۶- سیستم کامل راکتور نوع تحت فشار

آتمسفر بوده بعبارت دیگر حدود ۲ برابر فشار آب تانك راکتور نوع جوشان می‌باشد این فشار زیاد باعث میشود که بتوان آب را تا درجه حرارت حدود ۳۲۰ درجه سانتیگراد گرم نمود بدون آنکه بجوشد آب با این شرایط فشار و درجه حرارت زیاد به ژنراتور بخار میرود. درژنراتور بخار آب گرم‌را کتور ازلوله‌های مخصوصی گذشته که دراطراف این لوله‌ها آب قرار گرفته‌است و این آب پس از گرفتن حرارت ازلوله‌های فوق به بخار تبدیل میشود که به توربین رفته در حالیکه دارای درجه حرارتی حدود ۲۵۰ درجه سانتیگراد می‌باشد . آب راکتور پس از سرد شدن در ژنراتور بخار مجدداً بوسیله یك پمپ مناسب به تانك راکتور برمیگردد وسیکل‌فوق تکرارمیشود برای تولید ۵۰۰٬۰۰۰ کیلووات برق توسط یك راکتور اتمی ازنوع تحت فشار باید راکتور طوری ساخته شود که دارای تانك آبی بقطر ۵ متر وارتفاع ۱۳ متر باشد و یاد آور میشویم که برای تولید همین مقدار انرژی الکتریکی توسط یك راکتوراتمی‌نوع جوشان باید این‌راکتور را با تانك آبی بقطر ۷ متر وارتفاع حدود ۲۰متر ساخت .

از دیگر انواع راکتور های قدرت راکتور گازی می باشد (Gas Cooled)-این نوع راکتور شباهت زیادی به راکتورهای اتمی تحت فشاردارند و اساس‌کار این دونوع راکتور یکسان می‌باشد. درهر



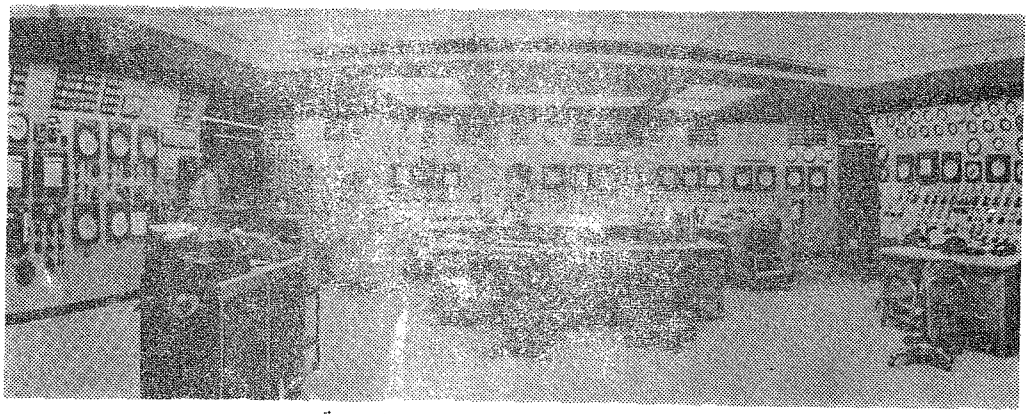
شکل۷ـ سیستم تبادل‌حرارت برای راکتورگازی



شکل۸- سیستم‌های‌مختلف یك راکتور ومحل‌های‌مربوطه

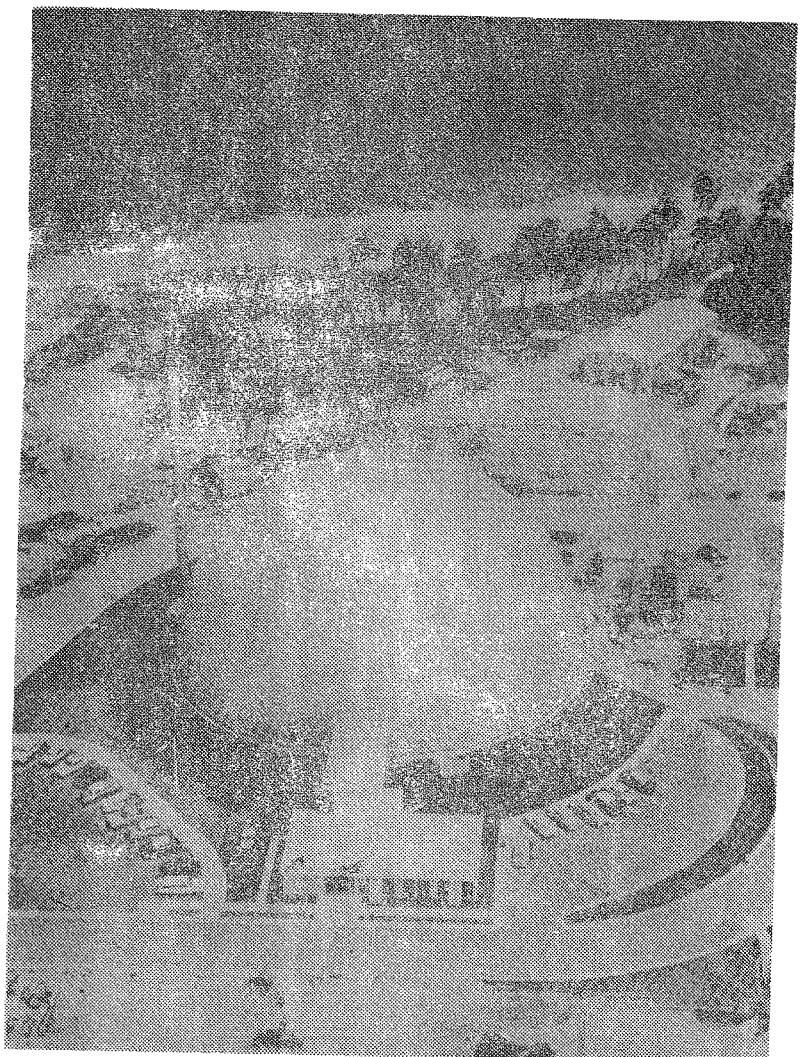
دونوع راکتور یك ماده سرد کننده انرژی حرارتی تانك راکتور را به ژنراتور بخار منتقل می نماید . بدلایل فنی معمولا گازی که در راکتورهای گازی از آن بعنوان سرد کننده استفاده میشود هلیوم و یا اکسیددو کربن می‌باشد. گاز بافشارحدود ۲۰ آتمسفر ازتانك‌راکتورعبور نموده‌وحرارت‌حاصله‌رابه‌ژنراتور بخار میبرد .

بادبزنها (Blower) که برای حرکت دادن گاز سرد کننده دراین‌نوع راکتوربکار میروند خود سیستم عظیمی را تشکیل میدهد . انرژی لازم برای بحرکت درآوردن این‌بادبزنها دریك راکتور گازی که بخواهد ۵۰۰٬۰۰۰ کیلووات برق تولید نماید آنقدر زیاد است که با معادل این انرژی می‌توان ۲۵۰٬۰۰۰ بادبزن معمولی‌منزل را براه انداخت. در راکتور های گازی یك ماده اضافی در تانك راکتور بعنوان کند کننده نترونها وجود دارد . کند کننده (Moderator) نترون‌ماده‌ایست که‌ازانرژی‌نترونها کاسته و شرایطی را درهسته مرکزی راکتور بوجود میآورد که فیسیون اتم های اورانیوم بسهولت انجام گیرند. در راکتور های تحت فشار و جوشان که از آب معمولی‌بعنوان‌سرد کننده‌استفاده‌میکنند‌احتیاجی



شکل ۹ ـ اطاق کنترل یك راکتور اتمی قدرت

به اضافه نمودن کند کننده به تانك راکتور نمی‌باشد زیرا خود آب میتواند نقش کند کننده را بعهده بگیرد. درحالیکه در راکتور هائی که با گـاز سرد میشوند نظر باینکه گاز یك ماده کند کننده مناسبی نمی باشد لازم است که ماده کند کننده مناسبی به تانك راکتور اضافه شود . گرافیت (Graphite) معمولا بهترین ماده‌ایست که دراین نوع راکتورها بعنوان کند کننده بکارمیرود زیرامیتواند درجه حرارتهای زیاد راتحمل



شکل ۱۰ ـ نمای یك راکتور اتمی قدرت در «پرتوریکو» (۱۶،۵۰۰ کیلووات برق)

نماید. باید توجه نمود که درجه حرارت گاز در این نوع راکتورها بسیار زیاد بوده و بمیزان قابل ملاحظه‌ای از درجـه حرارت آب در راکتور های آبی (Water Reactors) بیشتر می‌باشد.

در بعضی راکتورهای گازی درجه حرارت گاز گاهی به ۷۷۰ درجه سانتیگراد میرسد از این درجه حرارت زیاد برای تولید بخار با درجه حرارت ۵۵۰ درجه سانتیگراد استفاده میشود.

پس ملاحظه میکنیم که راکتور های سرد شده توسط گاز دارای بهره بیشتری از نقطه بالا بردن درجه حرارت بخار دارند و بعلاوه دارای این خصوصیت مهم می‌باشند کـه دارای مصرف سوخت هسته‌ای کمتری درمقایسه باراکتور آبی هستند و این موضوع از نظر اقتصادی دارای اهمیت بسزائی است.