

انتشارات پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای

www.nstp.nstri.ir

خوردگی زیر کونیم

گردآوری و تدوین

هادی عادل‌خانی

عنوان و نام پدیدآور: خوردگی زیرکونیم/ هادی عادل خانی Ph.D.

مشخصات نشر: تهران: پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، انتشارات پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای،

سال ۱۳۸۹، پروانه نشر ۹۵۸۳.

مشخصات ظاهری: ۲۹۴ ص: ج: مصور (بخشی رنگی)، جدول، نمودار

شابک: (ISBN: ۹۷۸-۶۰۰-۷۴۱۴-۵۸-۳)

وضعیت فهرست‌نویسی: فیپا، چاپ اول سال ۱۴۰۰

موضوع: زیرکونیا - خوردگی، فلزها - تردی هیدروژنی

رده‌بندی کنگره: TP ۲۴۵

رده‌بندی دیویی: ۶۶۱/۰۵۱۳

شماره‌ی کتابخانه ملی: ۸۴۹۷۹۷۷



انتشارات پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای

www.nstp.nstri.ir

خوردگی زیرکونیم

گردآورنده: هادی عادل خانی

ویراستار علمی، ادبی - فنی: ایوب بنوشی

ناظر علمی - فنی: سیدابوالفضل قاسمی

صفحه‌آرایی: شادی معماری‌آذر

طراح جلد: مریم رحیمی

طراح حروف: پروانه الهی

چاپ و صحافی: دیجیتال آبنوس

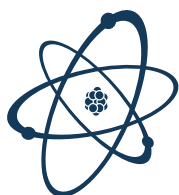
وزیری، ۲۹۴ صفحه، ۳۰ نسخه، چاپ اول، پاییز ۱۴۰۰

کلیه‌ی حقوق چاپ و انتشار این اثر متعلق به پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای است.

بها: ۶۰۰۰۰۰ ریال

ISBN: 978-600-7414-58-3

شابک: ۹۷۸-۶۰۰-۷۴۱۴-۵۸-۳



پیشگفتار ناشر

انتشارات پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای

پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای

یک ناشر تخصصی دولتی است که از سال ۱۳۸۶ فعالیت خود را آغاز کرده است و با توجه به تخصصی بودن موضوع، بیش‌تر کتب در حوزه‌ی علوم تئوری و تجربی، به‌ویژه آن‌هایی که به علوم و فنون هسته‌ای مربوط می‌شوند، منتشر می‌کند.

از سوی دیگر، انتشارات همتش را بر انتشار کتب به زبان فارسی، اعم از ترجمه، تألیف و گردآوری و تدوین معطوف ساخته است تا از این راه هم دانش هسته‌ای برای فارسی زبان‌ها به آسانی در دسترس و قابل استفاده باشد و هم با نشر واژه‌های معادل فارسی برای واژگان لاتین حوزه‌ی علوم و فنون هسته‌ای به غنای این زبان کمک کند.

اهداف مهم، انتشارات پژوهشگاه را می‌توان در چند محور بیان کرد:

- اعتلای دانش هسته‌ای کشور و ایجاد تعامل سازنده میان پژوهشگران، انتشار کتب تخصصی و ترویجی مرتبط با علوم و فنون هسته‌ای؛
- انتشار کتبی که از دیدگاه تاریخ علم اهمیت دارند؛
- انتشار کتب مشاهیر و دانشمندان بزرگ علوم و فنون هسته‌ای، از جمله برندگان جوایز نوبل و ...؛
- انتشار کتب در حوزه‌های مرتبطی که به هر دلیل در زبان فارسی مورد غفلت قرار گرفته است یا از آن‌ها یاد نشده است.

همچنین انتشارات در نظر دارد شماری از کتب را با حفظ حقوق مؤلفان و مترجمان، به صورت الکترونیکی، ارزان‌قیمت یا رایگان، در اختیار خوانندگان بگذارد. همه‌ی این اهداف تنها به‌کمک مؤلفان و مترجمان خبره و علاقه‌مند ممکن است که انتشارات پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای از همکاری ایشان استقبال می‌کند.

مسئولیت صحت مطالب این کتاب بر عهده‌ی نگارندگان آن است

فهرست

فصل اول

- ۱..... رآکتورهای اتمی
- ۱-۱ اجزای رآکتور اتمی شکافت ۲
- ۱-۱-۱ میله‌های کنترل ۲
- ۱-۱-۲ سامانه خنک‌کننده اولیه رآکتور ۳
- ۱-۱-۳ مواد کندکننده نوترون ۳
- ۱-۱-۴ مجتمع‌های سوخت ۴
- ۱-۱-۵ محفظه (دیگ) فشار رآکتور ۵
- ۲-۱ انواع رآکتورها ۵
- ۱-۲-۱ رآکتورهای آب تحت فشار (PWR) ۶
- ۲-۲-۱ رآکتورهای آب جوشان (BWR) ۶
- ۳-۲-۱ رآکتور خنک‌شونده با گاز (GCR) ۶
- ۴-۲-۱ رآکتور خنک‌شونده با آب سبک و کندکننده گرافیکی ۷
- ۵-۲-۱ رآکتور آب‌سنگین تحت فشار (CANDU) ۷
- ۶-۲-۱ رآکتورهای زاینده سریع با فلز مایع (LMFBR) ۷
- ۳-۱ اهمیت غلاف سوخت ۷

فصل دوم

- ۹..... زیرکونیم
- ۱-۲ مشخصات عمومی ۹
- ۲-۲ ایزوتوپ‌ها ۱۶
- ۳-۲ آلیاژهای زیرکونیم ۱۷
- ۱-۳-۲ نمودار فازي زیرکونیم ۱۷
- ۱-۳-۲-۱ Zr-Nb ۱۸

۱۹.....	Zr-Sn ۲-۱-۳-۲
۲۰.....	Zr-H ۳-۱-۳-۲
۲۱.....	Zr-O ۴-۱-۳-۲
۲۳.....	Zr-N ۵-۱-۳-۲
۲۴.....	Zr-C ۶-۱-۳-۲
۲۴.....	Zr-Ni ۷-۱-۳-۲
۲۵.....	Zr-Cr ۸-۱-۳-۲
۲۶.....	Zr-Fe ۹-۱-۳-۲
۲۶.....	۲-۳-۲ اثر اندازه عناصر آلیاژساز و ناخالصی‌ها.....
۲۸.....	۳-۳-۲ اثر الکترونگاتیوی عنصر آلیاژساز.....
۲۹.....	۴-۳-۲ خواص مکانیکی - فیزیکی آلیاژهای زیرکونیم.....
۳۲.....	۵-۲ کاربرد زیرکونیم در صنعت هسته‌ای.....
۳۴.....	۶-۲ کاربرد زیرکونیم در سایر صنایع.....

فصل سوم

۳۷.....	الکتروشیمی زیرکونیم.....
۳۷.....	۱-۳ پتانسیل الکتروشیمیایی.....
۴۱.....	۲-۳ نمودار پوربه.....
۴۳.....	۳-۳ منحنی پلاریزاسیون.....
۴۴.....	۴-۳ سری‌های گالوانی.....
۴۶.....	۵-۳ روش‌های بیان سرعت خوردگی.....
۴۷.....	۶-۳ خوردگی زیرکونیم در محیط‌های مختلف.....

فصل چهارم

۵۳.....	تأثیر پرتوهای هسته‌ای بر مواد.....
۵۴.....	۱-۴ تأثیر پرتوهای هسته‌ای بر آب.....
۵۶.....	۲-۴ تأثیر پرتوهای هسته‌ای بر خواص فیزیکی و مکانیکی مواد.....
۵۶.....	۱-۲-۴ جدانشینی ناشی از تابش.....
۵۷.....	۲-۲-۴ نابجایی میکروساختاری.....
۵۷.....	۳-۲-۴ ایجاد حباب و حفره ناشی از تابش.....
۵۸.....	۴-۲-۴ پایداری فاز تحت تابش.....

۵۸.....	۵-۲-۴ سخت شدن در اثر تابش.....
۶۰.....	۶-۲-۴ خزش ناشی از تابش.....

فصل پنجم

۶۱.....	اکسیداسیون زیرکونیم.....
۶۱.....	۱-۵ ترمودینامیک اکسیداسیون زیرکونیم.....
۶۴.....	۲-۵ سازوکار اکسیداسیون زیرکونیم.....
۶۸.....	۳-۵ ساختارهای اکسید زیرکونیم.....
۷۰.....	۴-۵ سینتیک اکسیداسیون زیرکونیم.....

فصل ششم

۷۷.....	خوردگی یکنواخت.....
۷۸.....	۱-۶ عوامل مؤثر بر خوردگی یکنواخت زیرکونیم.....
۷۸.....	۱-۱-۶ ترکیب شیمیایی محیط.....
۷۸.....	۱-۱-۱-۶ اکسیژن.....
۷۸.....	۲-۱-۱-۶ pH.....
۸۱.....	۳-۱-۱-۶ LiOH.....
۸۱.....	۳-۱-۱-۶ الف غلظت بحرانی LiOH.....
۸۶.....	۳-۱-۱-۶ ب سازوکار اثر LiOH.....
۸۷.....	۴-۱-۱-۶ بور.....
۹۰.....	۵-۱-۱-۶ دما.....
۹۷.....	۶-۱-۱-۶ تشکیل رسوب.....
۹۸.....	۶-۱-۱-۶ الف منشأ رسوب.....
۹۹.....	۶-۱-۱-۶ ب اختلال در انتقال گرما.....
۱۰۲.....	۶-۱-۱-۶ ج خوردگی موضعی ناشی از دلمه (CILC).....
۱۰۳.....	۷-۱-۱-۶ زمان.....
۱۰۴.....	۸-۱-۱-۶ تابش.....
۱۱۰.....	۹-۱-۱-۶ فشار.....
۱۱۱.....	۲-۱-۶ عوامل متالورژی.....
۱۱۱.....	۱-۲-۱-۶ ذرات ترکیبات بین‌فلزی.....
۱۱۵.....	۲-۲-۱-۶ ترکیب آلیاژ.....
۱۱۵.....	۲-۲-۱-۶ الف قلع و نیوبیم.....

۱۲۰.....	۶-۲-۲ ب پلاتین و پالادیم.....
۱۲۱.....	۶-۲-۲ ج نقره.....
۱۲۲.....	۶-۲-۲ د نیتروژن.....
۱۲۴.....	۶-۲-۲ هـ کربن.....
۱۲۵.....	۶-۱-۳ روئین شدگی.....
۱۲۶.....	۶-۱-۴ خوردگی وصله‌ای یا یکنواخت تسریع شده.....

فصل هفتم

۱۲۹.....	خوردگی سایه‌ای (دودی).....
۱۳۰.....	۷-۱ سازوکار خوردگی سایه‌ای.....
۱۳۰.....	۷-۱-۱ تشکیل پیل گالوانی.....
۱۳۱.....	۷-۱-۲ تحت تابش بودن پیل گالوانی.....
۱۳۴.....	۷-۲ عوامل مؤثر بر خوردگی سایه‌ای.....
۱۳۴.....	۷-۲-۱ نوع فلز.....
۱۳۵.....	۷-۲-۲ فاصله.....
۱۳۷.....	۷-۲-۳ زمان.....
۱۳۹.....	۷-۲-۴ نوع رآکتور.....
۱۴۰.....	۷-۲-۵ توان رآکتور.....
۱۴۰.....	۷-۳ مطالعات شبیه‌سازی در زمینه خوردگی سایه‌ای غلاف سوخت.....

فصل هشتم

۱۴۱.....	خوردگی گره‌ای.....
۱۴۳.....	۸-۱ سازوکار خوردگی گره‌ای.....
۱۴۷.....	۸-۲ عوامل مؤثر بر خوردگی گره‌ای.....
۱۴۷.....	۸-۲-۱ ذرات ترکیبات بین‌فلزی.....
۱۴۸.....	۸-۲-۲ ترکیب آلیاژی.....
۱۴۹.....	۸-۲-۳ ترکیب فازی.....
۱۵۰.....	۸-۲-۴ اکسیژن.....
۱۵۴.....	۸-۲-۵ زمان.....
۱۵۸.....	۸-۲-۶ نوع و توان رآکتور.....

فصل نهم

خوردگی شیاری و خوردگی حفره‌ای.....	۱۶۱
۱-۹ خوردگی شیاری.....	۱۶۱
۲-۹ خوردگی حفره‌ای.....	۱۶۴
۱-۲-۹ اثر نوع هالید.....	۱۶۶
۲-۲-۹ اثر غلظت هالید.....	۱۶۸
۳-۲-۹ اثر ترکیب محیط.....	۱۷۰
۴-۲-۹ ضخامت لایه اکسیدی.....	۱۷۱

فصل دهم

خوردگی در مرزدانه و خوردگی تنشی.....	۱۷۳
۱-۱۰ خوردگی مرزدانه‌ای.....	۱۷۴
۲-۱۰ ترک خوردگی خوردگی - تنشی (SCC).....	۱۷۵
۱-۲-۱۰ نوع و شدت تنش.....	۱۷۶
۲-۲-۱۰ دما.....	۱۷۷
۲-۱۰ ترکیب شیمیایی محیط.....	۱۷۹
۴-۲-۱۰ ترکیب آلیاژ.....	۱۸۵
۵-۲-۱۰ عوامل متالورژی.....	۱۸۶
۶-۲-۱۰ تابش.....	۱۸۶

فصل یازدهم

آسیب‌های هیدروژنی.....	۱۸۹
۱-۱۱ منشأ هیدروژن.....	۱۸۹
۲-۱۱ انواع آسیب هیدروژنی.....	۱۹۱
۳-۱۱ عوامل مؤثر بر ضریب (کسر) هیدروژن‌گیری.....	۱۹۲
۱-۳-۱۱ ترکیب آلیاژ.....	۱۹۳
۲-۳-۱۱ حضور اکسیژن.....	۱۹۹
۳-۳-۱۱ نوع عملیات حرارتی.....	۲۰۲
۴-۳-۱۱ فشار هیدروژن.....	۲۰۴
۵-۳-۱۱ ترکیب محیط.....	۲۰۴
۶-۳-۱۱ حضور در رآکتور.....	۲۰۵

۴-۱۱ عوامل مؤثر بر تشکیل هیدرید.....	۲۰۷
۱-۴-۱۱ زمان.....	۲۰۷
۲-۴-۱۱ دما.....	۲۰۹
۳-۴-۱۱ غلظت هیدروژن.....	۲۱۰
۵-۱۱ جهت‌گیری هیدریدها.....	۲۱۲
۶-۱۱ تاول‌زدگی هیدروژنی.....	۲۱۳
۷-۱۱ تردی هیدروژنی.....	۲۱۵

فصل دوازدهم

روش‌های پایش خوردگی زیرکونیم.....	۲۲۱
۱-۱۲ آماده‌سازی نمونه‌ها.....	۲۲۲
۱-۱-۱۲ پرداخت مکانیکی.....	۲۲۲
۲-۱-۱۲ چربی‌زدایی.....	۲۲۲
۳-۱-۱۲ اسیدشویی (اچ کردن).....	۲۲۳
۲-۱۲ روش‌های آنالیز.....	۲۲۳
۱-۲-۱۲ تغییرات وزن.....	۲۲۳
۲-۲-۱۲ مورفولوژی سطح و ضخامت لایه اکسیدی.....	۲۲۴
۳-۲-۱۲ آزمون‌های الکتروشیمیایی.....	۲۲۵
۱-۳-۲-۱۲ آزمون پلاریزاسیون.....	۲۲۵
۲-۳-۲-۱۲ آزمون امپدانس الکتروشیمیایی.....	۲۲۷
۳-۱۲ آزمون خوردگی در دما و فشار بالا آزمایشگاهی.....	۲۲۸
۱-۳-۱۲ انواع اتوکلاو.....	۲۲۹
۱-۱-۳-۱۲ اتوکلاو ایستا.....	۲۲۹
۲-۱-۳-۱۲ اتوکلاو پویا.....	۲۳۱
۲-۳-۱۲ نحوه قرارگیری نمونه در داخل اتوکلاو.....	۲۳۱
۳-۳-۱۲ شرایط آزمون خوردگی.....	۲۳۵
۴-۳-۱۲ آزمون‌های الکتروشیمیایی.....	۲۳۸
۵-۳-۱۲ آزمون خوردگی موضعی در نمونه‌های اکسیدشده در دما و فشار بالا.....	۲۳۹
۶-۳-۱۲ آزمون خوردگی در آب فوق بحرانی.....	۲۴۰
۴-۱۲ آزمون خوردگی اتمسفری دما بالا.....	۲۴۳

۲۴۳.....	۱۲-۵ آزمون خوردگی در نمک مذاب
۲۴۴.....	۱۲-۶ آزمون خوردگی در شرایط تحت تابش
۲۴۵.....	۱۲-۶-۱ تابش‌های UV
۲۴۶.....	۱۲-۷ آزمون خوردگی در شرایط واقعی کار رآکتور
۲۴۶.....	۱۲-۷-۱ آزمون خوردگی در قلب رآکتور
۲۴۸.....	۱۲-۶-۲ آزمون خوردگی خارج از قلب رآکتور
۲۵۰.....	۱۲-۷ خوردگی سایه‌ای
۲۵۰.....	۱۲-۸ آزمون خوردگی گره‌ای
۲۵۱.....	۱۲-۹ آزمون خوردگی شیاری و حفرهای
۲۵۱.....	۱۲-۱۰ آزمون ترک‌خوردگی خوردگی - تنشی (SCC)
۲۵۴.....	۱۲-۱۱ آزمون آسیب هیدروژنی
۲۵۴.....	۱۲-۱۱-۱ روش الکتروشیمیایی
۲۵۵.....	۱۲-۱۱-۲ روش دما بالا
۲۵۷.....	منابع

فصل اول

رآکتورهای اتمی

رآکتور اتمی وسیله‌ای است که در آن با انجام یک واکنش هسته‌ای کنترل‌شده، انرژی هسته‌ای به انرژی گرمایی تبدیل می‌شود. براساس واکنش هسته‌ای که در درون رآکتور اتفاق می‌افتد، رآکتورهای هسته‌ای به رآکتورهای شکافت و رآکتورهای هم‌جوشی (گداخت) هسته‌ای تقسیم‌بندی می‌شوند [۱].

در رآکتور هسته‌ای (از نوع شکافت) فرایند شکافت هسته‌ای به‌صورت کنترل‌شده انجام می‌شود. معمولاً واکنش هسته‌ای در این نوع رآکتورها عبارت است از تابش نوترون به هسته اورانیوم ۲۳۵، شکافت اورانیوم و آزاد شدن مقدار فراوانی انرژی. در رآکتور گداخت هسته‌ای، به‌واسطه فرایند هم‌جوشی انرژی آزاد می‌شود. در فرایند هم‌جوشی، دو ایزوتوپ اتم هیدروژن (دوتریم و تریتیم) با یکدیگر ترکیب و اتم سنگین‌تری مانند هلیم تولید و مقدار قابل‌توجهی انرژی آزاد می‌شود. انرژی حرارتی به‌دست آمده از این طریق برای تبخیر آب و به گردش درآوردن توربین‌های بخار و ژنراتورهای الکتریکی مورداستفاده قرار می‌گیرد. رآکتورهای هم‌جوشی هم‌اکنون در مرحله تحقیقاتی و راه‌اندازی آزمایشگاهی هستند و کاربرد صنعتی برای تولید برق پیدا نکرده‌اند؛ اما رآکتورهای هسته‌ای از نوع شکافت نقش مهمی در تولید انرژی دارند و در تولید برق و ایجاد نیروی محرکه استفاده می‌شوند. در این کتاب تمرکز بر رآکتورهای هسته‌ای از نوع شکافت است و هر جا که صحبت از رآکتور اتمی می‌شود، منظور رآکتور شکافت هسته‌ای است.

هم‌اکنون حدوداً ۴۰۰ نیروگاه هسته‌ای در سرتاسر جهان فعال هستند که تقریباً ۱۷٪ کل برق مصرفی جهان را تأمین می‌کنند. از دیگر استفاده‌های رآکتورهای هسته‌ای می‌توان به نمک‌زدایی آب دریا (آب شیرین‌کن) و تأمین انرژی برای حرکت کشتی‌ها و یا زیردریایی‌ها اشاره کرد. به دلیل چگالی انرژی بالا در سوخت هسته‌ای (اکسید اورانیوم) ساخت رآکتورهای هسته‌ای از نظر اقتصادی

مقرون به صرفه است. در این نوع رآکتورها، قیمت واحد انرژی تولیدشده بسیار کم تر از قیمت واحد انرژی تولیدشده با استفاده از روش سوخت های فسیلی است. به عنوان مثال مقدار انرژی تولیدشده از یک کیلوگرم اورانیم (با غنای ۳٪ اورانیم ۲۳۵) برابر با 5.2×10^9 KJ است در حالی که یک تن سوخت فسیلی در حدود 4×10^7 KJ انرژی تولید می کند. در جدول ۱-۱ مقایسه ای بین انواع سوخت های فسیلی و هسته ای برای تولید حدود ۱۰۰۰ MW برق ارائه شده است. در صورت استفاده از ۲۸ تن سوخت هسته ای اکسید اورانیم، می توان همان مقدار انرژی تولید کرد که با مصرف ۲/۷ میلیون تن زغال سنگ و ۱/۹ میلیون تن نفت. در رآکتورهای گداخت علی رغم مقدار کم سوخت مورد نیاز (۱۰۰ کیلوگرم دوتریم و ۱۵۰ کیلوگرم تریتم) برای تولید ۱۰۰۰ MW برق، هنوز کار در مراحل تحقیقاتی است.

جدول ۱-۱. مقدار انواع سوخت های فسیلی و هسته ای برای تولید ۱۰۰۰ MW برق [۲].

نوع سوخت	مقدار سوخت
زغال سنگ	۲,۷۰۰,۰۰۰ تُن
نفت	۱,۹۰۰,۰۰۰ تُن
شکافت	۲۸ تُن اکسید اورانیم (UO_2)
گداخت	۱۰۰ kg دوتریم (D) و ۱۵۰ kg تریتم (T)

۱-۱ اجزای رآکتور اتمی شکافت

یکی از مهم ترین قسمت های رآکتور اتمی قلب رآکتور است. اجزای مهم قلب رآکتور عبارت اند از میله های کنترل، سامانه خنک کننده، مواد کندکننده نوترون، مجتمع های سوخت (شامل سوخت و غلاف سوخت). این اجزا در درون محفظه (دیگ) فشار رآکتور قرار گرفته اند. در این بخش هر یک از این اجزا به صورت اجمالی معرفی می شوند.

۱-۱-۱ میله های کنترل^۱

برای دستیابی به فرایند شکافت کنترل شده و یا متوقف کردن فرایند شکافت پس از شروع، لازم است که از سامانه ای استفاده شود که بتواند نوترون ها را جذب کند. این کار توسط میله های کنترل

1. Control rod

انجام می‌شود. این میله از ماده‌ای ساخته شده که سطح مقطع جذب نوترون^۱ بالایی دارد (کادمیم). از نظر ایمنی و بهره‌برداری، میله‌های کنترل از حساس‌ترین اجزای رآکتور اتمی هستند. میله‌های کنترل در مواردی مانند راه‌اندازی رآکتور، کنترل قدرت حرارتی رآکتور در حال بهره‌برداری و خاموش کردن رآکتور در خاتمه دوره بهره‌برداری یا در حالات اضطراری به کار گرفته می‌شوند. از ترکیبات بور در مایع خنک‌کننده (به صورت اسید بوریک) نیز به عنوان کنترل‌کننده نوترون استفاده می‌شود.

۱-۱-۲ سامانه خنک‌کننده اولیه رآکتور^۲

گرمای حاصله از شکافت در محیط رآکتور باید به طریقی از قلب رآکتور خارج شود. در غیر این صورت افزایش دما باعث ایجاد مشکلات در میله‌های سوخت و قلب رآکتور می‌شود. براساس نوع رآکتور سامانه خنک‌کننده شامل دو یا سه مدار است که مدار اول تحت عنوان سامانه خنک‌کننده اولیه شناخته می‌شود. این سامانه گرمای تولیدشده در قلب رآکتور را به مدار دوم منتقل می‌کند. هدایت حرارتی مناسب برای انتقال مؤثر حرارت، پایداری شیمیایی و سطح مقطع جذب نوترون پایین از مهم‌ترین ویژگی‌های ماده خنک‌کننده^۳ مورد استفاده در سامانه خنک‌کننده اولیه است. از مایعات (آب، آب‌سنگین)، فلزات مذاب (سدیم) و گازها (دی‌اکسید کربن و هلیوم) به عنوان خنک‌کننده استفاده می‌شود.

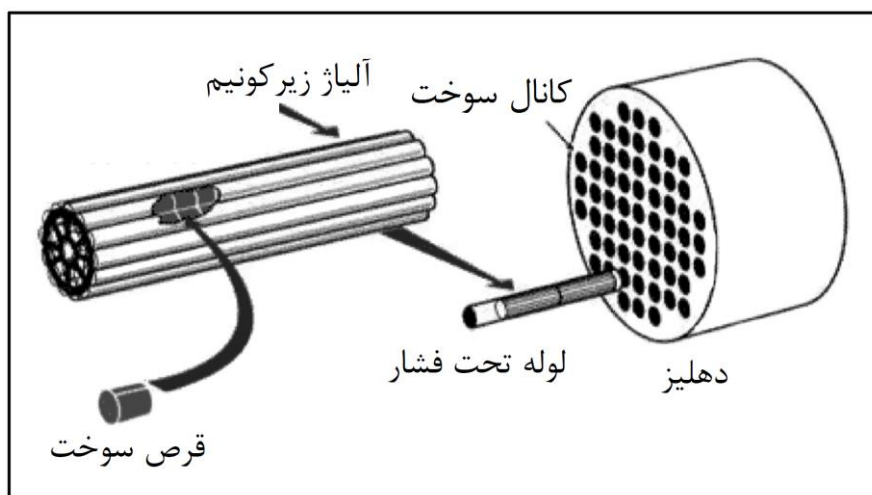
۱-۱-۳ مواد کندکننده نوترون

کندکننده ماده‌ای است که برای کند کردن نوترون یا تبدیل نوترون‌های سریع به نوترون‌های حرارتی به کار می‌رود. اتم‌های با جرمی نزدیک به جرم نوترون، بهترین کندکننده‌های نوترون هستند. کندکننده برای آنکه بتواند در رآکتور مورد استفاده قرار گیرد، باید سطح مقطع جذب پایینی برای نوترون داشته باشد (هیدروژن، دوتریم، کربن و بریلیم). از هیدروژن و دوتریم به شکل آب و آب‌سنگین و از کربن به شکل گرافیت به عنوان مواد کندکننده استفاده می‌شود. به دلیل سمی بودن بریلیم از این ماده به ندرت به عنوان کندکننده در رآکتور اتمی استفاده می‌شود.

-
1. Neutron adsorption cross section
 2. Reactor primary coolant system
 3. Coolant

۴-۱-۱ مجتمع‌های سوخت

معمولاً از اورانیوم غنی‌شده به‌صورت قرص اکسید اورانیوم (UO_2) به‌عنوان سوخت در راکتورها استفاده می‌شود. سوخت‌های هسته‌ای مستقیماً در داخل رآکتور قرار داده نمی‌شوند، بلکه به‌صورت پوشیده شده در یک غلاف مورد استفاده قرار می‌گیرند. یک میله سوخت از تعداد مشخصی قرص سوخت در داخل یک غلاف تشکیل می‌شود. میله‌های سوخت در بسته‌های چندتایی دسته‌بندی می‌شوند و مجتمع‌های سوخت را تشکیل می‌دهند (شکل ۱-۱). در قلب رآکتور مجموعه‌ای از مجتمع‌های سوخت در کنار یکدیگر قرار گرفته‌اند. مجتمع سوخت در درون رآکتور تحت شرایط سختی از نظر فشار، دما و تابش‌های هسته‌ای (نوترون، آلفا، گاما و بتا) قرار دارد. نکته مهم این است که این شرایط برای زمان طولانی است و غلاف سوخت باید که توانایی مقاومت در این بازه زمانی را داشته باشد. در این حال یکپارچگی غلاف سوخت به‌عنوان اولین سد دفاعی در جلوگیری از پخش مواد رادیواکتیو نقش بسیار مهمی دارد. غلاف سوخت کندکننده و یا خنک‌کننده را از سوخت جدا می‌کند. این امر از خوردگی سوخت محافظت و از پخش محصولات شکافت به محیط اطراف جلوگیری می‌کند. اغلب از زیرکونیم^۱ و آلیاژهای آن به‌عنوان یک ماده مقاوم در شرایط حاد کار رآکتور اتمی، در ساخت غلاف سوخت استفاده می‌شود. دیگر خاصیت مهم این ماده سطح مقطع جذب نوترون پایین آن است.



شکل ۱-۱. میله‌ها و مجتمع‌های سوخت [۱].

۱-۱-۵ محفظه (دیگ) فشار رآکتور^۱

مجموعه واکنش‌های هسته‌ای در درون قلب رآکتور^۲ اتفاق می‌افتد. اغلب قلب رآکتور و اجزای آن در درون محفظه (دیگ) فشار رآکتور قرار دارند. دیگ فشار رآکتور از دو قسمت فوقانی و تحتانی تشکیل شده است. قسمت فوقانی یا سرپوش دیگ^۳ از فولادی از جنس بدنه ساخته شده و از داخل با روکشی از فولاد زنگ‌نزن پوشانده شده است. حفره‌هایی در سرپوش برای حرکت چنگک‌های کنترل و لوازم اندازه‌گیری در نظر گرفته شده است. قسمت تحتانی دیگ حفره‌هایی برای اتصال کابل‌های مربوط به اندازه‌گیری شار نوترون و سایر کمیت‌های فیزیکی دارد. در جدار داخلی حفره‌هایی سرپوش و قسمت تحتانی از استوانه‌های از جنس آلیاژهای نیکل - کروم^۴ استفاده شده است. برای بررسی و مطالعه اثر تابش‌های هسته‌ای (آلفا، گاما، بتا و نوترون) بر فلزات سازنده دیگ رآکتور، نمونه‌هایی از این فلزات در داخل سبد تابش^۵ قرار گرفته و این سبد در داخل دیگ قرار می‌گیرد. هنگام تجدید سوخت و برداشت سرپوش دیگ، این سبد از داخل دیگ خارج و اثر شرایط کار رآکتور بر نمونه فلزات مطالعه می‌شود.

برای ساخت دیگ فشار از آلیاژهای فولاد با ترکیبی از منگنز، نیکل و مولیبدن استفاده می‌شود. اثر تابش‌های هسته‌ای (آلفا، بتا، گاما و نوترون) بر ساختار و خواص ماده، نیروهای اعمالی مانند وزن سازه‌های داخلی، نوع سوخت رآکتور و سازوکار (مکانیسم) کنترل از جمله عواملی هستند که در انتخاب ماده برای بدنه دیگ باید در نظر گرفته شوند. معمولاً بدنه داخلی دیگ با لایه‌ای از فولاد زنگ‌نزن^۶ پوشانده می‌شود تا از خوردگی فولاد بدنه در زمان کار رآکتور جلوگیری شود. آب مدار اولیه پس از ورود به دیگ و به قسمت پایین دیگ هدایت می‌شود. آب پس از عبور از کانال‌های مجتمع سوخت قسمتی از انرژی حرارتی میله‌های سوخت را جذب می‌کند و در قسمت بالایی قلب به سمت مدار خروج آب هدایت می‌شود.

۱-۲ انواع رآکتورها

برای رآکتورهای هسته‌ای دسته‌بندی‌های زیر ارائه شده است.

- براساس نوع فرایند شکافت: رآکتورهای حرارتی، سریع و میانی (واسطه)

1. Reactor pressure vessel
2. Reactor core
3. Reactor vessel head
4. Inconel
5. Irradiation basket
6. Stainless steel cladding

- براساس مصرف سوخت: رآکتورهای سوزاننده، مبدل و زاینده
- براساس نوع سوخت: رآکتورهای اورانیم طبیعی و اورانیم غنی شده
- براساس ماده خنک کننده: رآکتورهای خنک شونده با گاز (CO_2)، خنک شونده با مایع (آب، فلز مذاب)
- براساس کاربرد: رآکتورهای قدرت، تحقیقاتی و تولید مواد رادیواکتیو

۱-۲-۱ رآکتورهای آب تحت فشار^۱ (PWR)

در این رآکتورها از آب سبک (H_2O) با فشار بالا (حدود 15° اتمسفر) به عنوان ماده خنک کننده استفاده می شود. در این نوع رآکتور، میله سوخت حاوی قرص های دی اکسید اورانیم و آلیاژی از زیرکونیم غلاف این میله ها را تشکیل می دهد. حرارت تولید شده در قلب رآکتور توسط آب خنک کننده مدار اول به مدار دوم انتقال داده می شود.

۲-۲-۱ رآکتور آب جوشان^۲ (BWR)

رآکتور آب جوشان (BWR) شباهت زیادی به PWR دارد به جز این که یک مدار آب خنک کننده با فشار کم (حدود ۷۵ اتمسفر) دارد. در این شرایط دمای آب به حدود 285°C می رسد. طراحی این رآکتور به گونه ای است که همواره ۱۲٪ الی ۱۵٪ آب در بالای قلب به صورت بخار وجود دارد.

۳-۲-۱ رآکتور خنک شونده با گاز^۳ (GCR)

رآکتورهای خنک شونده با گاز (GCR) در کشور انگلستان ساخته شده و توسعه یافته است. در این نوع رآکتور گرافیت به عنوان کندکننده و دی اکسید کربن به عنوان خنک کننده در مدار اول نقش انتقال حرارت را به عهده دارد.

رآکتورهای^۴ AGCR نسل جدید رآکتورهای خنک شونده با گاز هستند. در این دسته از رآکتورها هم گرافیت به عنوان کندکننده و دی اکسید کربن به عنوان خنک کننده مورد استفاده قرار گرفته است. سوخت این رآکتورها، قرص های اکسید اورانیم با غنای ۳/۵-۲/۵٪ است. سوخت در غلافی از جنس فولاد زنگ نزن قرار می گیرد.

1. Pressurized water reactors, PWRs
2. Boiling water reactors, BWRs
3. Gas cooling reactor, GCR
4. Advanced gas-cooled reactor, AGCR

۱-۲-۴ رآکتور خنک‌شونده با آب سبک و کندکننده گرافیکی

در این نوع رآکتور، محفظه تحت فشار (قلب رآکتور) عمودی است و در آن از کندکننده‌های گرافیتی استفاده شده است. حرارت تولیدشده توسط آب جوشان (290°C)، به‌عنوان خنک‌کننده، منتقل می‌شود. این وضعیت تا اندازه زیادی شبیه به رآکتورهای BWR است. این رآکتورها در شوروی سابق طراحی شده و تحت عنوان RBMK^۱ شناخته می‌شوند.

۱-۲-۵ رآکتور آب‌سنگین تحت فشار^۲ (CANDU)

در رآکتورهای «کندو» از اورانیوم طبیعی به‌عنوان سوخت و از آب‌سنگین (D_2O) به‌منظور کندکننده و خنک‌کننده استفاده می‌شود.

۱-۲-۶ رآکتورهای زاینده سریع با فلز مایع^۳ (LMFBR)

در رآکتورهای PWR و BWR و دیگر انواع رآکتورها بخش عمده‌ای از واکنش شکافت بر روی ایزوتوپ اورانیوم ۲۳۵ اتفاق می‌افتد. در رآکتورهای زاینده سریع دو فرایند تولید انرژی و ساخته‌شدن هسته‌های جدید پلوتونیوم با هم اتفاق می‌افتد. قلب این رآکتور از دو قسمت تشکیل می‌شود. میله‌های سوخت که مخلوطی است، از دی‌اکسید پلوتونیوم و دی‌اکسید اورانیوم که در قسمت داخلی قرار دارند.

۱-۳ اهمیت غلاف سوخت

رآکتورهای آب تحت فشار (PWR) و آب جوشان (BWR) سهم مهم و عمده‌ای در رآکتورهای اتمی مورداستفاده دارند (حدود ۷۹٪). در این نوع رآکتورها معمولاً از غلاف‌های سوخت بر پایه زیرکونیوم یا آلیاژهای زیرکونیوم (M5، E110، ZIRLO و زیرکالوی^۴) استفاده می‌شود. از نظر ایمنی، غلاف سوخت نقش بسیار مهمی دارد، چراکه غلاف سوخت باید مانع از نفوذ مواد پرتوزا به ماده خنک‌کننده شود. همچنین این غلاف می‌تواند پشتیبان ساختاری سوخت باشد و در انتقال حرارت از سوخت به خنک‌کننده نیز مشارکت کند. ماده غلاف مانند خود سوخت باید خواص فیزیکی (هدایت حرارتی) و خواص مکانیکی (سختی، استحکام، مدول الاستیسیته، چقرمگی

1. Reaktor bolshoy moshchnosty kanalny, RBMK (high-power channel reactor)
2. Canada deuterium uranium, CANDU
3. Fast breeder reactor
4. Zircaloy

شکست، خستگی و خزش) مناسب داشته و از نظر شیمیایی نسبت به برهم‌کنش با سوخت و محیط پایدار باشد (مقاومت خوردگی بالا). همچنین لازم است غلاف سطح مقطع جذب نوترون پایین داشته و در برابر تشعشع مقاوم باشد. از نظر ویژگی‌های مدنظر برای غلاف سوخت (خواص فیزیکی، مکانیکی، شیمیایی) زیرکونیم و آلیاژهای آن خواص مناسبی دارند، از این‌رو در راکتورهای هسته‌ای از آن‌ها در ساخت غلاف سوخت استفاده می‌شود.