نشریه علمی سازمان انرژی اتمی ایران
شماره ۱۵، صفحات ۴۹ - ۳۱، (۱۳۷۶)

ملزومات طراحی و ساخت سوختهای سرامیکی (مقاله مروری)

محمدکاظم رسولی* و منوچهر روشن‌ضمیر**
مرکزتکنولوژی هسته‌ای اصفهان*، مرکز تحقیقات هسته‌ای و دانشگاه صنعتی امیرکبیر**
سازمان انرژی اتمی ایران

چکیده

در این مقاله ابتدا به معیارهای اساسی در طراحی میله سوخت اشاره شده است. سپس عوامل و پارامترهای بنیادی که نقش تعیین‌کننده‌ای در کارایی و ایمنی سوخت رآکتورهای قدرت دارند، از جمله مشخصات هسته‌ای،شیمیایی، ساختاری و ابعادی سوخت توصیف شده‌اند.و در ادامه، ساختار بهینه سوخت معرفی و روش ارزیابی کارایی سوخت ساخته شده به عنوان آخرین مرحله معرفی شده است.

۱- مقدمه

طراحی و ساخت صحیح میله‌های سوخت رآکتورهای هسته‌ای قدرت یکی از مراحل مهم و اساسی طراحی و اجرا در این رآکتورهابشمار می‌رود. هرچند مبانی نظری، موضوع مهمی درکمک به این امر محسوب می‌شود ولی شناخت رفتار و عملکرد میله‌های سوخت در شرایط پایا وگذرای رآکتور سهم مهمی در تعیین مشخصات مطلوب و در نتیجه در طراحی و ساخت آنها داشته است. اهمیت موضوع از جهات ایمنی و حصول اطمینان از پایداری میله‌های سوخت، بویژه حفظ محصولات شکافت در شرایط عادی و اضطراری و حتی پس از وقوع حادثه در رآکتورها، در دو دهه اخیر، بسیار مورد توجه قرار گرفته است. از طرف دیگر پیش‌بینی و تبین نظری پدیده‌های پیچیده فیزیکی، مکانیکی و شیمیایی ذیربط مستلزم تجزیه و تحلیل ساختاری و عملکرد سوخت در رآکتورها بوده است. در این مطالعات عوامل مختلف و وابسته‌ای که نقش‌های تعیین کننده در کارآیی و ایمنی سوخت رآکتورهای قدرت دارند شناسایی شده‌اند. مشخصه‌های اصلی و تعیین‌کنندهٔ این امر عبارتند از مشخصات هسته‌ای، شیمیایی، ساختاری و ابعادی که به کیفیت اولیه پودر و فرایندهای سوخت‌سازی مربوط می‌شوند. در این مقاله مهمترین مقولات مربوط به کارآیی سوخت‌های اکسیدی شامل تورم و چروکیدگی، تغییرات و مشخصات ساختاری، رفتار شکافت‌پاره‌ها، اثرات متقابل سوخت و غلاف و ساختار بهینهٔ قرصهای سوخت به عنوان ملاحظات و ملزومات اولیه طراحی و ساخت سوختهای هسته‌ای مورد ارزیابی قرار خواهندگرفت.

۲- ملاحظات طراحی سوخت

طراحی سوخت‌های هسته‌ای مستلزم ملاحظات مختلفی از جهات کارآیی، ایمنی و همچنین اقتصادی و مدیریت سوخت می‌باشد. برای این منظور ابتدا ملزومات فیزیکی رآکتور را از لحاظ ابعاد و نسبت بین سوخت وکندکننده در نظر می‌گیرند، سپس توزیع مکانی و زمانی میزان مصرف سوخت (burn-up) و غنای آن را تعیین می‌کنند. آنگاه مشخصه‌های مکانیکی و شیمیایی را جهت تحلیل عملکرد سوخت در شرایط واقعی رآکتور ارزیابی می‌نمایند. اجمالاً می‌توان گفت هدف از طراحی سوخت رآکتور اطمینان از سلامت غلاف (بعنوان اولین سد مطمئن در برابر خروج محصولات پرتوزای ناشی از شکافت) در شرایط کار عادی و اضطراری رآکتور است و طراحی میله‌های سوخت باید به‌گونه‌ای انجام پذیرد که در شرایط مجاز بهره‌برداری (کار بهنجار رآکتور و حوادث با بسامد معتدل) امکان وقوع نقص‌های سیستماتیک در میله سوخت وجود نداشته باشد. در این راستا، نتایج حاصل از تحلیل ایمنی بویژه تحلیل کارآئی و ساختاری سوخت برای شرایط عادی بهره‌برداری و حادثه، به عنوان مثال حادثه از دست رفتن خنک‌کننده (LOCA)، تعیین کنندهٔ معیارهای طراحی می‌باشند. در جدول ۱ موارد مهمی که برای جلوگیری از وقوع نقص سیستماتیک در میله سوخت باید محدود شوند و معیارهای طراحی که برای هر یک از این موارد باید مشخص گردند آورده شده است [۱].

معیارهای تضمین کننده ایمنی رآکتور را می‌توان بصورت زیر خلاصه کرد [۲]:

۱- در طراحی باید نشان داده شود که امکان ذوب هستهٔ رآکتور در جریان کار رآکتور وجود ندارد، از این رو حداکثر دمای سوخت باید همواره پائین‌تر از دمای خط انجماد سوخت باشد.

۲- باید اطمینان داده شود که امکان وقوع نقص در غلاف سوخت در طی کار رآکتور وجود ندارد، و حاشیهٔ ایمنی «کرنش و تنش»[1] در غلاف برای حالت‌های پایا و گذرای تعریف شده (به عنوان مثال، جهش‌های قدرت در موقع بکار انداختن رآکتور، بارهای چرخه‌ای و جهش ناگهانی قدرت در طی کار بهنجار رآکتور) رعایت شده است.

علاوه بر این عملکرد بسیار خوب سوخت رآکتورهای آب سبک ضرورت تجدید نظر در طراحی سوخت بمنظور افزایش «میزان مصرف سوخت»، کاهش هزینه چرخه سوخت و انعطاف‌پذیرتر نمودن مدیریت سوخت را ایجاب کرده است. طبیعی است که افزایش میزان مصرف باعث می‌شود که حاشیه بعضی از معیارهای طراحی باریک‌تر گردد، از این رو ضرورت توسعه کدهای شبیه‌سازی میله سوخت برای پیش بینی عملکرد سوخت بیشتر شده است.

1- strain and stness

جدول ۱- محدودیت‌های طراحی میله سوخت رآکتور با آب سبک (LWR)[۱]

کمیتی که باید محدود شود	سازوکار (مکانیسم)	انگیزه
۱- دمای مرکز سوخت	بر اثر ذوب و انبساط سوخت در غلاف ایجاد کرنش می‌شود	بی‌نقصی غلاف
۲- فشار گاز داخل میلهٔ سوخت	افزایش فشار داخلی میله براثر رهاشدن گازهای حاصل از شکافت	بی‌نقصی غلاف
۳- کرنش غلاف	بر هم‌کنش مکانیکی سوخت و غلاف (PCMI)[۲] در شرایط گذرا و یا بر اثر تورم سوخت	بی‌نقصی غلاف
۴- ضخامت قشر اکسید	ایجاد خوردگی در غلاف توسط خنک‌کننده	بی‌نقصی غلاف طی بهره‌برداری
۵- جذب هیدروژن	ایجاد خوردگی در غلاف توسط خنک‌کننده	بی‌نقصی غلاف حین جابجایی
۶- تنش در غلاف	اختلاف فشار داخل و خارج میله، گرادیان دما، نیروهای داخلی و خارجی، ارتعاش و غیره	بی‌نقصی غلاف

۳- معیارهای اولیه در انتخاب دی‌اکسید اورانیوم بعنوان سوخت و مشکلات کاربرد آن

معیارهای اصلی در انتخاب دی‌اکسید اورانیوم بعنوان سوخت [۳و۴] عبارتند از:

- **پائین بودن سطح مقطع جذب نوترون‌های حرارتی در اکسیژن**
- **پایداری در برابر تابش بعلت دارا بودن شبکهٔ بلوری مکعب شکل، با سطوح مرکزدار**
- **قابلیت نگهداری شکافت‌پاره‌ها و عدم تغییر فاز تا نقطه ذوب**
- **همسانگرد (ایزوتروپ) بودن ساختار قرص‌های «تفجوش شده»** [۳]

از این‌رو، علیرغم وجود مشکلات، دی‌اکسیداورانیوم تاکنون مناسبترین سوخت هسته‌ای است. در کاربرد دی‌اکسید اورانیوم مشکلاتی نیز وجود دارد که در زیر به آنها اشاره شده است:

۳-۱) *تشکیل ترک در سوخت*

در سوخت‌های اکسیدی وجود گرادیان دمای زیاد

۲- pellet clad mechanical interaction

۳- Sinter

در راستای شعاعی باعث ایجاد اختلاف انبساط در قرصهای سوخت شده که منجر به ترک‌خوردگی و گسترش سریع آن در سوخت می‌شود [۴و۵]. در توان‌های گذرا در اثر افزایش یاکاهش دما، ترک‌ها به علت اختلاف انبساط حرارتی بخشهای مختلف قرص باز می‌شوند [۴و۵و۶]. با ادامه یافتن کار رآکتور ممکن است بطور همزمان، ترک‌های جدیدی به وجود آیند و ترک‌های قبلی ترمیم یابند، بویژه طی مرحلهٔ خنک شدن، ترک‌های ترمیم یافته در مرکز سوخت منقبض و باعث تشکیل ترک محیطی شوند.

تشکیل ترک و تغییر شکل سوخت در جهت شعاعی باعث کاهش هدایت حرارتی سوخت و تغییر عرض شکاف بین سوخت و غلاف می‌شود. از این‌رو دمای سوخت و آهنگ رها شدن شکافت‌پاره‌های گازی از داخل سوخت افزایش می‌یابد. این پدیده باعث افزایش فشار داخلی میله سوخت و تغییر میزان خزش[۴] در غلاف می‌شود. همچنین پائین بودن هدایت حرارتی این گازهاکه در شکاف بین سوخت و غلاف جمع شده‌اند، بصورت پس‌خور باعث افزایش مجدد دما و نیز آهنگ رها شدن گازها می‌شود [۶].

۲-۳) *چگالی قرص*

چگالی قرص‌های تفجوش، به علت تخلخل، کمتر از چگالی نظری دی‌اکسید اورانیوم است. این تخلخل اثر متضادی بر عملکرد سوخت دارد. از طرفی سبب کاهش تورم در سوخت می‌شود و از طرف دیگر پدیده‌های نامطلوبی را در سوخت به وجود می‌آورد که در زیر به آنها اشاره می‌شود [۳]:

- تغییر خواص فیزیکی سوخت: هدایت حرارتی، استحکام خزش[۵] و مدول الاستیسیته در سوخت بعلت وجود تخلخل کاهش می‌یابد.
- تخلخل باعث جذب رطوبت و باقی ماندن گازها در خلل و فرج قرص‌های سوخت می‌شود [۳]، بطوریکه رابطهٔ تقریباً خطی بین چگالی قرص و مقدار رطوبت باقی مانده در آن وجود دارد و مقدار PPm رطوبت باقی مانده در حدود درصد خلل وفرج‌های باز می‌باشد [۷].

در شروع کار رآکتور، خطر جبران شدن بیش از حد تورم سوخت بعلت چروکیدگی سریع خلل و فرج کوچک و «چگالش»[۶] سوخت وجود دارد [۳].

۴- پارامترهای تعیین کننده عملکرد قرصهای تفجوش شده دی اکسید اورانیوم در رآکتور

مشخصه‌های اصلی قرصها راکه تعیین‌کننده کارآیی سوخت در رآکتورند می‌توان در چهار دسته طبقه‌بندی کرد:

- مشخصات هسته‌ای
- مقدار اورانیوم، خلوص شیمیایی، نسبت توازنی

۴- Creep Rate

۵- Creep Strength

۶- Densification

(استئوکئومتری)، گاز و رطوبت باقی مانده در سوخت.

- ساختار ریز قرصها
- ابعاد قرص و کیفیت سطوح

۱-۴) *مشخصات هسته‌ای*

عامل تعیین کننده در اقتصاد نوترونی رآکتور و حرارت تولید شده در واحد حجم سوخت، مقدار درصد ایزوتوپهای مختلف اورانیوم است و همچنین در رآکتورهای حرارتی، هم‌ارز بورکل ناخالصیها (TEBC)[۷] می‌باشد. بنابراین غلظت ایزوتوپ‌های اورانیوم در پودر سوخت باید بدقت کنترل شود. همچنین در رآکتورهای حرارتی هم‌ارز بورکل ناخالصیها بصورت تک‌تک با بکارگیری رابط زیر محاسبه کرد.

PPm ناخالصی × فاکتور EBC = EBC ناخالصی

$$\text{فاکتور EBC} = \frac{\text{سطح مقطع جذب ناخالصی} \times \text{وزن اتمی بور}}{\text{وزن اتمی ناخالصی} \times \text{سطح مقطع جذب بور}}$$

حاصل جمع EBC تک‌تک ناخالصیها = EBC کل

در رآکتورهای سریع محدودیت فوق وجود ندارد. در مرجع [۸] لیست عناصری که در محاسبه EBC منظور می‌شوند آورده شده است. در رآکتورهای حرارتی معمولاً از اکسید گادولینوم، که بطور همگن با سوخت دی‌اکسید اورانیوم آمیخته شده باشد، برای کنترل رآکتیویتهٔ رآکتور استفاده می‌شود. در اینصورت باید توزیع اکسید گادولینوم در داخل قرصها کاملاً همگن باشد زیرا ذرات بزرگ وبه هم چسبیده اکسید گادولینوم باعث خود حفاظی و در نتیجه مانع جذب نوترون توسط ذرات داخلی گشته و جذب نوترون در داخل سوخت کاهش می‌یابد و رآکتیویته تغییر می‌کند. در اینصورت باکاهش جذب نوترون، در میله سوخت پیک موضعی توان بوجود می‌آید [۹].

۲-۴) *مقدار اورانیوم، خلوص شیمیایی، نسبت توازنی (استئوکئومتری)، گاز و رطوبت باقی مانده در سوخت*

۱-۲-۴) مقدار اورانیوم موجود در پودر باید حداقل برابر ۸۷/۷ درصد وزنی بر پایه وزن خشک باشد [۸]. ولی عملاً مقدار اورانیوم بیشتر از مقدار فوق و در حدود ۸۸ درصد وزنی یا بیشتر تهیه می‌شود. بطور مثال، در RBU[۸] این مقدار برابر ۸۸/۱۳ درصد وزنی است. انتخاب مقدار اورانیوم برابر ۸۸/۱۳ درصد وزنی، وقتی که نسبت اکسیژن به فلز (O/M) برابر دو باشد، برای حفظ ناخالصیها در حد ۵۰۰PPm است [۹]. بالا بودن درصد وزنی اورانیوم در سوخت و در نتیجه کاهش ناخالصیها تاثیر

۷- Total Equivalent Born Content

۸- Reactor Brennelement Union

مهمی در افزایش سطح مقطع ماکروسکوپی شکافت، کاهش جذب پارازیتی نوترون توسط ناخالصیها و در نتیجه کاستن حجم سوخت و ابعاد رآکتور دارد. پس این پارامتر عامل مهمی در طراحی و کنترل کیفیت سوخت به شمار می‌رود.

۲-۲-۴) *ناخالصیها*

میزان و نوع ناخالصیهای سوخت، در ابعاد مختلف، نقش مهمی در عملکرد سوخت دارند. وجود عناصری مانند کلر، فلوئور، کربن، نیتروژن، هیدروژن، نیکل و آهن در سوخت امکان ایجاد نقص در میله سوخت را افزایش می‌دهند.

ناخالصیهای هالوژنی نظیر کلر، فلوئور و ید حاصل از شکافت، بطور موضعی بر قشر اکسید زیرکونیوم اثر کرده و باعث برداشته شدن این قشر و هیدرید شدن غلاف بر اثر جذب هیدروژن می‌شوند. فلوئور، ید، هیدروکسید سزیوم اثر کاتالیزوری شدید در تشکیل موضعی هیدرید دارند. احتمال دارد که این عناصر بر قشر اکسید اثر کنند و با تشکیل دادن کمپلکس اکسی هالوژن و یا زیرکونات، سبب برداشته شدن قشر اکسید و تشکیل موضعی هیدرید بر اثر جذب هیدروژن گردند.

آب به تنهایی اثر ناچیزی بر غلاف و سوخت دارد، ولی هنگامیکه با هالوژن‌های موجود در قرص مثلاً کلر ترکیب می‌شود، تولید HClO می‌نماید که به شدت خورنده است. چون هالوژنها در هیدرید شدن غلاف نقش کاتالیزور را دارند، لازم است میزان هالوژنها در پودر محدود شوند. از این‌رو در مرحله تبدیل هگزا فلوئوراید اورانیوم به دی‌اکسید اورانیوم، با عمل پیروهیدرولیز نمودن متوالی پودر، مقدار فلوئور به کمتر از ۱۰ PPm رسانده می‌شود [۹]. هیدروژن اتمی سبب هیدرید شدن غلاف زیرکالوی و شکنندگی آن می‌گردد.

آهن و نیکل بصورت ناخالصی ترکیبات غیرفلزی در داخل پودر، خطر هیدرید شدن غلاف را افزایش می‌دهند، زیرا تماس این ذرات با غلاف موجب تمرکز هیدروژن در مقاطع تماس می‌شود. همچنین سزیوم با اورانیوم، ترکیب اورانات سزیوم می‌دهد که این ترکیب فرار در مرز دانه‌ها و خلخل و فرجها جمع شده باعث تورم سوخت می‌شود. نیتروژن نیز سبب کاهش مقاومت خوردگی غلاف زیرکالوی شده و آهنگ هیدرید شدن آن را سریعتر می‌نماید [۱۰]. بنابراین، مقدار ناخالصیهای موجود در قرص نباید از مقادیر داده شده در ASTMC776-83 بیشتر باشد [۱۱].

۲-۲-۳) گازهای باقی مانده در قرص در اثر افزایش دمای رآکتور از داخل سوخت رها شده باعث افزایش فشار داخلی میله سوخت و کاهش ضریب انتقال حرارت بین سوخت و غلاف می‌شوند [۱۰]. از این‌رو حجم گازهای باقی مانده در قرص، به استثنای رطوبت، نباید در شرایط متعارفی از $0/05\ cm^3$ در هر گرم اورانیوم تجاوز نماید [۱۱].

۴ـ۲ـ۴) *نسبت توازنی*

کنترل نسبت O/M در قرص به دلایل زیر حائز اهمیت است:

- استحکام خزشی در اکسید «فوق نسبت توازنی» کمتر از اکسید استئوکئومتری است. این عامل باعث تورم سوخت در حدود ۱۰۰۰°C شود [۱۲].

- در دی‌اکسید اورانیوم «فوق استئوکئومتر» هدایت حرارتی کاهش می‌یابد.

- ضریب پخش در تعداد زیادی از اتمها و یونهای حاصل از شکافت که در شبکه فلوئوریت دی‌اکسید اورانیوم جاگرفته‌اند، متناسب با نسبت آنیون‌های اکسیژن به‌کاتیون‌های فلزی شبکه است، بطوریکه با افزایش این نسبت ضریب پخش نیز افزایش یافته و سبب می‌شود که آهنگ پخش گازهای ناشی از شکافت، که دارای قابلیت هدایت حرارتی پائین می‌باشند افزایش یابد. این گازها در شکاف بین سوخت و غلاف جمع شده و باعث کاهش انتقال حرارت از سوخت به غلاف و در نتیجه افزایش درجه حرارت سوخت می‌شوند [۱۲]. بویژه با افزایش میزان مصرف سوخت و تولید اکسیژن ناشی از شکافت، نسبت اکسیژن به فلز نیز افزایش می‌یابد. از این‌رو کنترل نسبت اکسیژن به فلز از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است [۱۴].

۳-۴) *چگالی و ساختار ریز قرصها*

۱ـ۳ـ۴) *چگالی، ساختار و توزیع تخلخل*

بسیاری از خواص بنیادی سوخت بویژه هدایت حرارتی، ثابت کشسانی، استحکام و مشخصه خزش قرصها به چگالی بستگی دارند. چگالی و ساختار تخلخل، دو پارامتر مهم هستند که بر تورم و چروکیدگی سوخت، آهنگ آزاد شدن گازهای حاصل از شکافت، مقدار رطوبت باقی مانده در قرص و برهم‌کنش سوخت و غلاف (PCI) تاثیر دارند. بنابراین باید چگالی، ساختار و توزیع تخلخل، ساختار دانه‌ها و ساختار فازی اکسیدها (مخلوط اکسیدها) کنترل و بهینه شود [۱۵و۹].

بهینه‌سازی چگالی با توجه به ملزومات زیر انجام می‌پذیرد [۹]:

۱- به منظور تمرکز هر چه بیشتر مواد قابل شکافت (افزایش سطح مقطع ماکروسکوبی شکافت)، تضمین هدایت حرارتی بالا در سوخت و به حداقل رساندن خروج پاره‌های شکافت افزایش چگالی ضروری است. قابل ذکر است که پائین بودن چگالی ناشی از بالا بودن حجم خلل و فرج است. در نتیجه، از یکطرف بر اثر افزایش حجم خلخل و فرج باز، میزان آزاد شدن گازهای حاصل از شکافت افزایش می‌یابد و از طرف دیگر وجود تخلخل در سوخت باعث کاهش هدایت حرارتی سوخت می‌شود.

۲- برای خنثی کردن تورم سوخت و دستیابی به میزان مصرف سوخت مورد نظر، وجود تخلخل در

داخل سوخت ضروری است.

از لحاظ نظری، ساختار وتوزیع بهینه تخلخل‌ها در داخل قرص ایجاب می‌نماید که:

۱) درصد تخلخل باز در قرص تا جایی که ممکن است به حداقل برسد، زیرا تخلخل باز باعث جذب و باقی ماندن رطوبت در قرص می‌گردد و اگر قرصها کاملاً خشک نشوند رطوبت باقی مانده سبب هیدرید شدن غلاف زیرکالوی می‌شود [۱۶]. همچنین تخلخل باز سبب می‌شود که گازهای حاصل از شکافت بطور مداوم از سوخت خارج شوند. بویژه در موارد گذرا (به عنوان مثال جهش قدرت)، که غلظت موضعی گازهای حاصل از شکافت و درجه حرارت افزایش می‌یابند، خروج گازها از جمله بخار ید و ترکیبات آن فزونی می‌یابد. این عنصر به صورت موضعی (مستقیماً و یا بعنوان کاتالیزور) قشر اکسید زیرکونیوم را مورد حمله قرار داده و باعث تخریب آن و متعاقباً جذب هیدروژن توسط زیرکالوی و در نتیجه هیدرید شدن موضعی غلاف شود.

افزایش حجم ناشی از هیدرید شدن ایجاد تنش و در نهایت ترک در غلاف می‌نماید[۹و۱۵].

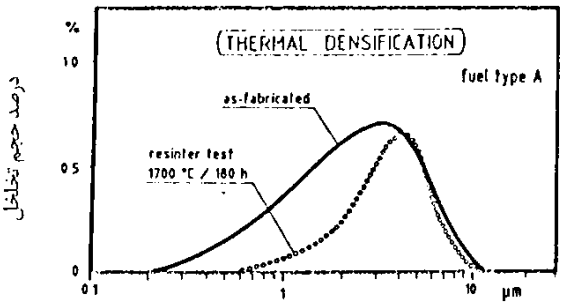
البته این امکان نیز وجود دارد که هلیوم به داخل تخلخل باز نفوذ کرده و باعث رقیق شدن گازهای شکافت و نیز کاهش پدیده پس خور حرارتی شود [۱۵].

۲) بمنظور جلوگیری از چروکیدگی سوخت در آغاز کار رآکتور، باید حجم خلخل و فرج کوچک ($\leq ۲\mu m$) در سوخت به حداقل برسد. زیرا خلخل و فرج ریز در اثر برهم‌کنش با پاره‌های شکافت، حتی در درجه حرارت‌های پائین، سریعاً محو می‌شوند. مثلاً تخلخل ریز با قطر کمتر از $۱\mu m$ زمانیکه میزان مصرف سوخت اتمهای قابل شکافت کمتر از ۱ درصد باشد بطور کامل محو می‌شود. تخلخل با قطر بین ۹ تا $۱۰\mu m$ به آهستگی محو می‌شود در صورتیکه تخلخل با قطر بزرگتر از $۱۰\mu m$ اساساً نسبت به پدیده برهم‌کنش با پاره‌های شکافت غیرحساس بوده و محو آنها تنها بر اثر تفجوش حرارتی و در دماهای بالاتر از $۱۴۰۰^{\circ}C$ انجام می‌پذیرد [۱۴]. چروکیدگی زیاد قرصها در آغاز کار سوخت باعث بهبود انتقال حرارت در سوخت و کاهش درجه حرارت مرکز سوخت می‌شود. ولی در صورتیکه میزان چروکیدگی زیاد باشد عرض شکاف بین سوخت و غلاف بیش از اندازه زیاد شده و در نتیجه باعث کاهش هدایت حرارتی بین سوخت و غلاف و افزایش دمای سوخت و متعاقباً آزاد شدن گازهای حاصل از شکافت می‌شود. این گازها دوباره باعث کاهش هدایت حرارتی بین سوخت و غلاف شده و بر اثر پس‌خور حرارتی مجدداً دمای سوخت را بالا می‌برند. انقباض محوری ستون سوخت نیز از یکطرف باعث افزایش چگالی قدرت و از طرف دیگر سبب ایجاد فضاهای خالی در ستون قرصها می‌شود که این پدیده خطر از بین رفتن غلاف بر اثر فشار خنک‌کننده را بدنبال دارد. [۱۴].

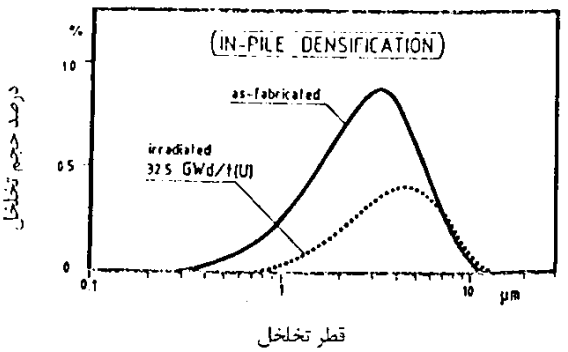
۳) برای جلوگیری از تورم سوخت در پایان عمر میله

سوخت، قرصها باید متخلخل باشند. حجم تخلخل بستگی به شرایط پرتودهی و میزان مصرف سوخت قابل انتظار دارد [۱۴].

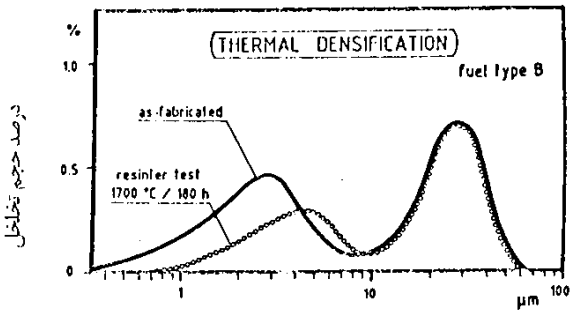
۴) تخلخل درشت نیز عاملی برای متورم شدن سوخت است، بنابراین حجم آن در هر قرص باید محدود شود، زیرا بر اثر تورم سوخت و در مواقع جهش قدرت، سوخت در تماس با غلاف قرار خواهد گرفت که منجر به برهم‌کنش مکانیکی بین سوخت و غلاف (PCMI) می‌شود. در شکل‌های ۱، ۲، ۳ و ۴ توزیع اولیه تخلخل در قرص و محو تخلخل ریز بر اثر تفجوشی مجدد و در شرایط داخل رآکتور نشان داده شده است [۱۷].



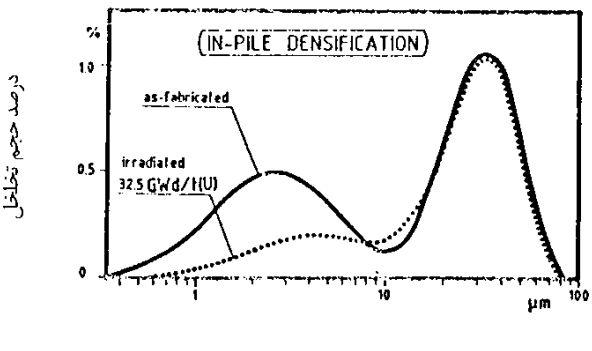
شکل ۱- توزیع تخلخل اندازه‌گیری شده قبل و بعد از تفجوش حرارتی مجدد (توزیع تک‌مُدی) [۱۷]



شکل ۲- توزیع تخلخل اندازه‌گیری شده قبل و بعد از پرتودهی (توزیع تک‌مُدی)



شکل ۳- توزیع تخلخل اندازه‌گیری شده قبل و بعد از تفجوش حرارتی مجدد (توزیع دومُدی)



شکل ۴- توزیع تخلخل اندازه‌گیری شده قبل و بعد از پرتودهی (توزیع دومُدی)

۵- شکل تخلخل

هدایت حرارتی سوخت نه تنها به حجم تخلخل حساس است، بلکه به شکل تخلخل نیز بستگی دارد نتایج آزمایشگاهی نشان داده است، که تخلخل کروی باعث بهبود هدایت حرارتی سوخت می‌شود. تخلخل کروی را می‌توان از افزودن محتاطانه مواد فنا شونده کروی شکل (به قطر ۵۰ میکرون) به پودر دی‌اکسیداورانیوم در هنگام ساخت قرص ایجاد نمود [۱۴]. براساس آنچه گفته شد، بهترین نوع توزیع تخلخل در قرص، توزیعی است همگن، کاملاً «کاتوره‌ای»[۹] و «تک مُدی»[۱۰] که شکل تخلخل نیز کروی باشد. این نوع توزیع دارای ویژگیهایی به شرح زیر است [۹].

۱) در صورتی که توزیع تخلخل به صورت تک مُدی تنظیم شود بین اندازه‌های ۱ تا ۱۰μm می‌توان تورم و چروکیدگی سوخت را خنثی کرد.

۲) ساختار همگن تخلخل باعث می‌شود که استحکام قرص‌ها یکنواخت و احتمال ایجاد ترک در آنها کمتر بوده و قرصهای تفحوش نیز فاقد عیبهای سطحی باشند.

۳) به وسیلهٔ مدلهای نظری می‌توان به آسانی ابعاد سوخت دارای ساختار تخلخل همگن را در رآکتور پیش‌بینی و تبیین نمود.

۴) تخلخل تا حد ممکن کروی سبب بهبود هدایت حرارت در سوخت می‌شود.

بهینه کردن توزیع تخلخل، در قرص‌هائیکه دارای توزیع «چند مُدی»[۱۱] و غیرهمگن می‌باشند نیز با تلاش زیاد امکان‌پذیر است [۹]. در شکل ۵ توزیع تک مُدی و «دو مُدی»[۱۲] تخلخل در قرص، برای مقایسه، نشان داده شده است [۱۵].

۱-۵) ساختار دانه‌ها و توزیع اندازه آنها

ساختار و اندازه دانه‌ها اثر ناچیزی بر چروکیدگی و تورم سوخت دارند. با وجود این، دانه‌های بیش از اندازه بزرگ یاکوچک باعث ایجاد ناهنجاریهایی در سوخت می‌شوند. به عنوان مثال، اگر متوسط قطر دانه‌ها ۵۰μm باشد، سرعت خزش در محدوده تنش‌های پائین، تقریباً صد برابر کمتر از حالتی است که متوسط قطر دانه‌ها حدود ۵μm است [۹]. از طرف دیگر وجود دانه‌های بزرگ باعث کاهش خاصیت «مومسانی»[۱۳] سوخت و در نتیجه، افزایش مؤلفه مکانیکی PCI می‌شود. [۹و۱۹]. در صورت کوچک بودن متوسط اندازه دانه‌ها، خروج گازهای شکافت در حالت‌های پایا و گذرا افزایش می‌یابد. بویژه هنگام جهش ناگهانی توان رآکتور که توام با افزایش دمای سوخت است، مرز دانه‌ها جابجا می‌شوند و دانه‌های ریز سریعاً رشد می‌نمایند. رشد ناگهانی دانه‌ها باعث می‌شود که میزان خروج گازها و متعاقباً مؤلفه

۹- randon

۱۰- Monomodal

۱۱- Multimodal

۱۲- Bimodal

۱۳- Plasticity

شیمیایی PCI افزایش یابد [۹و۱۵]. بنابراین، متوسط قطر دانه‌ها باید در گستره‌ای بین ۲ الی ۳۰μm باشد. ساختار دانه‌ها نیز باید همگن و فاقد فضاهای خالی سیستماتیک، ترک و ناخالصیهای غریبه باشد. از این‌رو ساختار بهینه دانه‌ها دو مُدی می‌باشد که اصطلاحاً «ساختار سنگ در ماسه»[۱۴] نامیده می‌شود. این ساختار با ترکیبی از دانه‌های درشت (≥۲۰μm) و دانه‌های ریز (≤۵ μm) بااینکه ساختاری غیرمتعارف برای قرصهای دی‌اکسید اورانیوم است، دارای مزایایی بشرح زیر می‌باشد [۱۸].

۱) وجود دانه‌های ریز باعث مومسان شدن سوخت و کاهش مؤلفه مکانیکی PCI می‌شود.

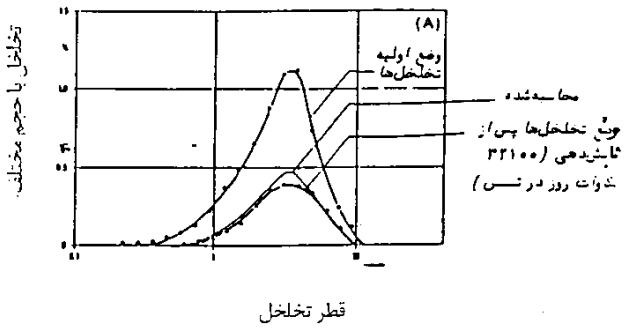
۲) وجود دانه‌های درشت سبب کاهش خروج گازهای حاصل از شکافت می‌شود، علاوه بر این تخلخل ریز در ساختار درشت دانه دیرتر محو می‌گردد.

۲-۵) ارزیابی پایداری قرص‌ها در رآکتور

قبل از استفاده از سوخت در رآکتور، باید حداکثر تراکم آن ارزیابی شود [۱۸]. این ارزیابی به یکی از دو روش زیر و یا با هر دو روش تواماً صورت می‌گیرد [۱۷].

۱) تحلیل کمی از چگالی و ساختار تخلخل با استفاده از مدل‌های نظری، یا بعبارت دیگر، تعیین روابط مناسب بین بیشینه تراکم سوخت از یکطرف و چگالی و ساختار ریز سوخت از طرف دیگر

۲) آزمون پایداری حرارتی بر روی قرص‌ها (تفجوش حرارتی مجدد) و یافتن رابطه‌ای بین تغییرات چگالی اندازه‌گیری شده با این روش و تراکم قرص در رآکتور. آزمون پایداری حرارتی در خارج از رآکتور عبارتست از عملیات حرارتی بر روی قرصها بمنظور تعیین حداکثر چروکیدگی آنها. در این آزمون، درجه حرارت،



شکل ۵) توزیع قطر تخلخل (A) تک مُدی، (B) دو مُدی

محیط آزمایش و مدت زمان تفجوشی و همچنین حداکثر تراکم مجاز از پیش تعیین می‌شود. در صورتیکه تغییر چگالی قرصها پس از تفجوشی

۱۴- Rock-in -sand structure

مجدد در محدوده مورد نظر باشد، می‌توان سوخت را در رآکتور بکار برد [۹].

تعیین حداکثر چروکیدگی سوخت و توصیف تحلیلی آن به دلائل زیر از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است [۱۹].

۱) کاهش قطر قرصها بر اثر چروکیدگی باعث افزایش شکاف بین سوخت و غلاف می‌شود که کاهش هدایت حرارتی در شکاف و افزایش دمای سوخت را به دنبال دارد.

۲) انقباض طولی قرصها باعث افزایش آهنگ تولید خطی حرارت می‌شود.

۳) کاهش طول ستون قرصها بر اثر چروکیدگی، باعث ایجاد فضاهای خالی و پیک توان در طول ستون سوخت شده و امکان بالقوهٔ فروپاشیدگی غلاف را فراهم می‌سازد.

در گذشته کوششهای بسیار، به منظور یافتن رابطه‌ای بین تراکم حرارتی قرص درکوره و تراکم بر اثر پدیده شکافت در رآکتور انجام گرفته است، ولی نتایج بدست آمده به دلایل زیر رضایت‌بخش نبوده است [۹].

۱) تراکم حرارتی، به مقدار انحراف از حالت استئوکئومتری و فشار جزئی اکسیژن در محیط تفجوشی مجدد بستگی داشته و امکان یکنواخت نگهداشتن محیط تفجوشی (خلوص گاز، دبی و نوع کوره) وجود ندارد. البته همانند تراکم سوخت در رکتور، در اینجا نیز تغییراتی در ساختار تخلخل بوقوع می‌پیوندد. رابطهٔ کاربردی زیر برای تبیین تراکم حرارتی تخلخل ارائه شده است [۱۷]:

$$\frac{\Delta V}{V_0} = -\sum_i P_{oi} \frac{\beta t}{\pi_{oi}^3} \qquad (۱)$$

که در آن، t مدت زمان تفجوشی (برحسب ساعت)، P_{oi} درصد تخلخل گروه i، π_{oi} شعاع تخلخل گروه i، β پارامتر ثابت نیمه‌تجربی برابر $۵/۰\times۱۰^{-۳}\ \mu m^3/h$ است که از کالیبره کردن نتایج آزمایش تفجوشی مجدد بدست آمده است.

هر گروه تخلخل زمانی محو می‌شود که t برابر با π_{oi}^3/β شود.

۲) چروکیدگی بر اثر شکافت به گونه‌ای پیچیده به درجه حرارت پرتوها بستگی دارد [۹]. اساساً تغییرات نسبی حجم سوخت بر اثر چروکیدگی تخلخل را به کمک مدل‌های نظری تعیین می‌نمایند. رابطه زیر برای توصیف تغییرات حجم سوخت به صورت تابعی از میزان مصرف سوخت داده شده است [۱۷]:

$$\frac{\Delta V}{V_0} = -\sum P_{oi} \{۱-(۱-\frac{\alpha.Bu}{\pi_{oi}})^3\} \qquad (۲)$$

در این رابطه

$\frac{\Delta V}{V_0}$ تغییرات نسبی حجم (%)، π_{oi} شعاع تخلخل گروه i (μm)،

P_{oi} حجم تخلخل گروه i (%)،

α برابراست با $۱/۰۸\times۱۰^{-۵}$ $(\mu m/(MWd/ton)$

Bu میزان‌مصرف‌سوخت burn-up (MWd/ton) است.

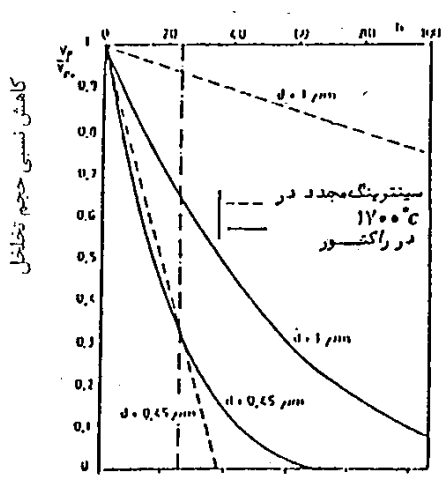
پارامتر α یک ثابت نیمه‌تجربی است که از کالیبره کردن نتایج آزمایشگاهی بدست آمده است. هر یک از خلل و فرج‌ها وقتی محو می‌شود که در رابطه (۲) مقدار مصرف سوخت (Bu) برابر با π_{oi}/α شود.

۳) سرعت چروکیدگی در دماهای مختلف یکسان نیست.

۴) تراکم حرارتی قرصها همسانگرد (ایزوتروپ) است، ولی تراکم در رآکتور ناهمسانگرد می‌باشد [۱۹]. از این‌رو، زمان، درجه حرارت، و استئوکئومتری را نمی‌توان به‌گونه‌ای تنظیم کرد، که تراکم ناشی از عملیات حرارتی و تراکم ناشی از شکافت برای انواع رده‌های تخلخل کاملاً یکسان باشند. بعنوان مثال، در شکل ۶، پارامترهای تفجوشی مجدد طوری انتخاب شده‌اندکه مقدار کاهش حجم تخلخل با قطر اولیه ۰/۴۵μm بعد از عملیات حرارتی و نیز در مقدار مصرف سوخت، ۱۳۰۰ MWd/ton کاملاً یکسان باشد. اما با توجه به همین شکل، تحت شرایط کاملاً مشابه چنین رفتاری در مورد تخلخل با قطر اولیه ۱μm صادق نیست [۹]. با وجود مشکلات ذکر شده، آزمون پایداری حرارتی تنها روشی است که بمنظور اطمینان از عدم وجود تخلخل ریز غیرمجاز در سوخت، بر روی قرصها صورت می‌گیرد [۹]. قبلاً گفته شدکه سرعت تراکم سوخت در آزمایش تفجوشی مجدد با سرعت تراکم در داخل راکتور تفاوت دارد ولی در هر مورد مقدار تراکم با افزایش میزان مصرف سوخت و یا مدت تفجوشی مجدد افزایش می‌یابد. از این‌رو می‌توان با استفاده از روابط (۱) و (۲) مدت تفجوشی مجدد، متناظر با هر مقدار مصرف سوخت را بدست آورد. بعبارت دیگر، با استفاده از رابطهٔ زیر می‌توان مقدار تراکم سوخت در داخل راکتور را با استفاده از مدت تفجوشی مجدد در خارج از رآکتور شبیه‌سازی نمود [۱۷].

$$t = (\pi^2/\beta)\ \{1-(1-\frac{\alpha.\beta Bu}{\pi})^2\} \qquad (۳)$$

رابطه تحلیلی فوق فقط برای یک دسته از تخلخل صادق است.



شکل ۶- مقایسه چروکیدگی تخلخل براثر عملیات حرارتی و در رآکتور [۹].

۳-۵) *شکل، ابعاد و کیفیت سطح قرصها*

۱-۳-۵) *کیفیت سطح*

قرص‌هائیکه دارای سطح صاف و فاقد عیبهای سطحی‌باشند در عمل پایدارترند. صاف بودن سطح قرص سبب بهبود هدایت حرارتی در شکاف بین سوخت و غلاف و نیز مقاوم شدن غلاف در مقابل لغزشهای محوری می‌شود. نتایج آزمایشگاهی نشان داده‌اندکه زبری سطحی $R_a = 1/5\mu m$ مقدار مناسبی برای قرصها برآورد شده است [۲۰] . در قرص‌هائی که به صورت توگود فشرده شده‌اند. پخ کردن لبه‌های قرص و یا شیب‌دارکردن شانه‌های گودی سبب می‌شودکه از تصادم و فشردگی لبه‌ها در موقع ستون کردن قرص‌ها و یا هنگام کار رآکتور، که خطر لب‌پریدگی قرص را بدنبال دارد، ممانعت به عمل آید [۲۱]. در مورد عیبهای سطحی قرص، مانند ترک، لب‌پریدگی و غیره استاندارد فراگیر و حد قابل قبولی وجود ندارد، ولی تجربه نشان داده است که نقص اغلب در مکانی از میله سوخت پدیدارمی‌شود که قرصهای موجود در آن ناحیه دارای عیبهای سطحی باشند [۹].

۲-۳-۵) *شکل و ابعاد*

قرصهای استوانه‌ای شکل سوخت دارای دو انتهای مسطح یا توگود می‌باشند. توگودکردن بمنظورکاهش انبساط محوری ستون قرصها و فراهم آوردن فضای کافی برای تجمع و مخلوط شدن گازهای حاصل از شکافت است [۲۰].

میزان اغماض متداول در قطر قرصهای سایش داده شده حدود $\pm 10\mu m$ است. نسبت طول قرص به قطر آن (L/D) از لحاظ عملکرد سوخت در رآکتور نیز اهمیت دارد، زیرا هر چه نسبت L/D کوچکتر باشد تمرکز تنش در محل اتصال قرصها به یکدیگر کمتر است. با افزایش نسبت L/D کرنش محوری در غلاف و همچنین گرادیان چگالی در قرص زیادتر می‌شود و با افزایش قطر قرص تولید خطی حرارت[۱۵] افزایش می‌یابد. بهرحال نسبتهای خیلی‌کوچک یا بزرگ L/D مناسب نیستند [۹].

۶- اندرکنش سوخت و غلاف (PCI)

در طراحی‌های مختلف میله‌های سوخت، آستانه بروز عیب بر اثر PCI، کاملاً شناخته شده است، ولی هنوز در مورد سازوکار ایجاد عیب بر اثر PCI، مدل مکانیستیکی تعریف نشده است [۲۱].

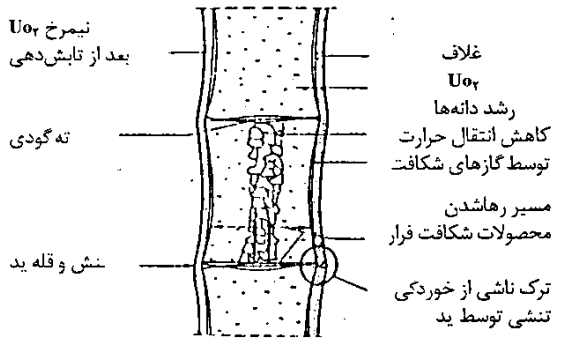
در شکل ۷، مدل عرضه شده توسط KWU برای میله‌های سوخت رآکتورهای آب سبک نشان داده شده است. در این مدل، مؤلفه‌های مکانیکی و شیمیایی PCI و پدیده پس‌خور حرارتی منظور شده‌اند [۲۱] . جهش ناگهانی قدرت باعث افزایش تولید خطی حرارت و در نتیجه افزایش دمای مرکز سوخت می‌شود. این افزایش دما موجب انبساط

۱۵- Linear Heat generation

حرارتی و افزایش قطر قرصها می‌گردد به گونه‌ای که پدیدهٔ لبه‌دار شدن قرص[16] بوضوح تشخیص داده می‌شود. چون انبساط حرارتی غلاف در مقایسه با انبساط قرصها کمتر است، سوخت در تماس با غلاف قرار می‌گیرد و اصطکاک بین سوخت و غلاف باعث ایجاد تنش و کرنش در غلاف بویژه در نواحی مقابل سطوح جدایی قرصها و ترک‌های شعاعی می‌شود [۲۱و۲۲]. افزایش دمای سوخت نیز باعث آزاد شدن گازهای حاصل از شکافت (کریپتون و زینان) و نیز محصولات فرار ناشی از شکافت (مانند ید) می‌گردد، به ویژه در صورتیکه همزمان با این پدیده‌ها رشد سریع دانه‌ها نیز بوقوع بپیوندد، پدیده آزاد شدن گازها تشدید شده و سبب افزایش فشار داخلی میله و در نتیجه ایجاد کرنش در غلاف و تمرکز تنش در آن می‌شود [۲۱و۲۲]. خروج محصولات شیمیایی حاصل از شکافت، مخصوصاً ید و سزیوم، باعث تخریب قشر اکسید و هیدرید شدن غلاف بر اثر جذب هیدروژن و در نهایت منجر به ایجاد ترک ناشی از خوردگی تنشی[17] می‌شود. بنظر می‌رسد که این نوع ترک محتمل‌ترین عیب بر اثر پدیده PCI در غلاف زیرکالوی باشد [۲۱و۲۲].

بمنظور فائق آمدن بر مشکل PCI، راه‌حل‌های زیر ارائه شده است [۱۴]:

- محدودکردن آهنگ افزایش قدرت در رآکتور
- طراحی سوخت به‌گونه‌ای که چگالی قدرت تولید شده در آن پائین باشد
- ته‌گود نمودن دو انتهای قرصهای سوخت
- استفاده از یک لایه زیرکونیوم یا گرافیت در فصل مشترک سوخت و غلاف.



شکل ۷- مدل PCI برای میله‌های سوخت رآکتورهای آب سبک که توسط شرکت آلمانی KWU پیشنهاد شده است [۲۱].

۷- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در استراتژی دفاع در عمق، شبکه بلورین سوخت و غلاف اولین و دومین سدّ در برابر رها شدن شکافت‌پاره‌ها می‌باشند. بنابراین، طراحی میله سوخت به‌گونه‌ای انجام می‌گیرد که ضمن باقی ماندن قسمت عمدهٔ شکافت‌پاره‌ها در شبکه بلورین سوخت، استحکام و بی‌نقصی غلاف در شرایط مختلف بهره‌برداری تضمین شود. از این‌رو در جریان تولید پودر و ساخت نیز می‌توان با کنترل و بهینه‌سازی مشخصات هسته‌ای، شیمیایی،

۱۶- hourglassing

۱۷- Stress Corrosion Cracking

ساختاری و ابعاد سوخت، کارآیی میله‌های سوخت در رآکتور را بهبود بخشید.

در ارتباط با مشخصات هسته‌ای سوخت عوامل تعیین‌کننده در اقتصاد نوترونی رآکتور عبارتند از: چگالی قدرت، درصد ایزوتوپهای مختلف اورانیوم و هم‌ارز بور کل ناخالصیها. همچنین بالا بودن درصد وزنی اورانیوم در سوخت باعث کاهش ناخالصیها، افزایش سطح مقطع ماکروسکوپی شکافت، کاهش جذب پارازیتی نوترون و در نتیجه، موجب کاهش دادن حجم سوخت و ابعاد رآکتور می‌شود. ناخالصیهایی نظیر کلر، فلوئور، کربن، نیتروژن، هیدروژن، نیکل و آهن در سوخت امکان ایجاد نقص در میله سوخت را افزایش می‌دهند. از این‌رو مقدار این ناخالصیها در سوخت باید بدقت کنترل شود.

گازهای باقی مانده در سوخت در دماهای بالا از داخل سوخت رها شده و باعث افزایش فشار داخلی میلهٔ سوخت و کاهش ضریب انتقال حرارت بین سوخت و غلاف می‌شود.

یکی از پارامترهای مهم در کیفیت سوخت نسبت O/M است بطوریکه با افزایش این نسبت از مقدار نسبت توازن، استحکام خزشی و هدایت حرارتی سوخت کاسته می‌شود و ضریب پخش و حجم گازهای رها شده در داخل سوخت افزایش می‌یابد. بدین جهت، دمای سوخت بالا می‌رود و پدیده‌های حرارتی و تجدید ساختار سوخت تشدید می‌شوند. بنابراین، در مرحله ساخت ، نگهداشتن نسبت O/M در محدوده نسبت توازن حائز اهمیت است.

چگالی و ساختار تخلخل نیز دو پارامتر مهم می‌باشند که بر تورم و چروکیدگی سوخت، آهنگ رها شدن گازهای حاصل از شکافت، مقدار رطوبت باقی مانده در قرص و غیره تاثیر می‌گذارند. بنابراین بهینه سازی چگالی قرص‌ها باید به گونه‌ای انجام پذیرد که ضمن تضمین هدایت حرارتی بالای سوخت و به حداقل رسیدن حجم گازهای رها شده، از تورم سوخت ممانعت بعمل آید.

از طرف دیگر بهترین نحوهٔ توزیع تخلخل در قرص، توزیعی است همگن، کاملاً کاتوره‌ای و تک‌مُدی که شکل تخلخل کروی و حجم خلل و فرج باز حداقل باشد. چنین توزیعی دارای مزایایی به شرح زیر می‌باشد.

- تخلخل باز باعث جذب رطوبت و باقی ماندن آن در قرص می‌شود و اگر قرصها کاملاً خشک نشوند، رطوبت باقی مانده باعث هیدرید شدن غلاف زیر کالوی می‌شود. از این‌رو درصد تخلخل باز باید حداقل ممکن باشد.
- بمنظور جلوگیری از چروکیدگی سوخت در ابتدای کار رآکتور، باید حجم تخلخل کوچک ($<2\mu m$) در سوخت حداقل باشد.
- تخلخل بزرگ هم یکی از عوامل تورم سوخت است، بنابراین، باید حجم آن در قرص نیز محدود شود.
- تخلخل کروی باعث بهبود هدایت حرارتی سوخت می‌شود.

از این قرار، ساختار مناسب برای دانه‌ها ترکیبی از دانه‌های درشت ($\geq ۲۰\mu m$) و دانه‌های ریز ($\leq ۵\mu m$) است. چنین ساختاری دارای مزایای زیر می‌باشد:

- وجود دانه‌های ریز باعث می‌شود که سوخت مومسان گردد و مؤلفه مکانیکی برهم‌کنش سوخت و غلاف کاهش یابد.
- وجود دانه‌های درشت سبب می‌شود که میزان رها شدن گازهای حاصل از شکافت کاهش یابد.

بعد از عملیات ساخت و بهینه‌سازی ساختارریز سوخت، برای ارزیابی کارآیی میله سوخت در شرایط بهره‌برداری، حداکثر تراکم سوخت در داخل رآکتور تعیین می‌شود. برای این منظور دو روش زیر را بکار می‌برند.

- تحلیل کمی چگالی و ساختار تخلخل با استفاده از مدل‌های نظری و تعیین رابطه‌ای بین حداکثر تراکم سوخت از یکطرف و چگالی و ساختارریز سوخت از طرف دیگر.
- عملیات حرارتی بر روی قرصها در خارج از رآکتور و یافتن رابطهٔ بین تغییرات چگالی اندازه‌گیری شده به این طریق و تراکم قرص در رآکتور.

با اتخاذ روشهای مناسب در تولید پودر و ساخت قرص و بهینه‌سازی ساختارریز سوخت به روشهای مقتضی، که در فرصتی دیگر به آن خواهیم پرداخت، می‌توان کارآیی میله سوخت در داخل رآکتور را بهبود بخشید.

References

1. R.Eberle etal. , Nucl. Eng. Des. 101 P.207-212, (1987).
2. H.J. Rit Shaupt-kleissl et al. , J. Nucl. Mat. 153 P.221-231, (1988).
3. H. Stehle et al. , Nucl. Eng. Des 33 P.230-260, (1975).
4. H. Stehle , J. Nucl. Mat. 153 P. 3-15, (1988).
5. A. Yu et al , Nucl. Eng. Des. 121 P. 53-58, (1990).
6. C. Bernaudat , Nucl. Eng. Des. 156 P.373-381, (1995).
7. T. sondermann . J. Nucl. Mat. 106 P. 45-52, (1982).
8. ASTMC-753-73 : Standard Specification For Nuclear Grade , Sinterable uranium Dioxide Powders
9. H. Assmann , H. Stehle , J. Nucl. Mat. 81 P. 19-30, (1979).
10. H. Bairiot , Summary Report , IAEA-SM 233/46
11. ASTMC 776-83 : Standard Specification For Sintered uranium Dioxidie Pellets
12. A. Blotix , Nuclear Reactor Fuel Elements , Metallurgy And Fabrication , Edited By Albert R. Kaufman
13. N. R Gradener , Nuclear Reactor Fuel Elements , Metallurgy And Fabrication , Edited By Albert R. Kaufman
14. J. H. Gittus et al , J. Nucl. Mat. 166 P. 132-150, (1989).
15. H. Assmann et al , Oxide Fuels With Controlled Microstructure , KWU , Erlangen , Germany
16. V. Gheata et al , IAEA-SM-233/41.
17. G. Maier et al , J. Nucl. Mat. 153 P. 213-220, (1988).
18. H. Assmann et al , J. Nucl. Mat. 140 P. 1-6, (1986).
19. Regulatory Guide 1.126 , U. S. Nuclear Regulatory.
20. D. White , IAEA , Technical Reports Series No.221

21. H. Assmann , H. Stehle , Material Science Monographs , 6 , Energy And Ceramics , 1980 , P. 893-912

22. F. Wunderlich et al , Nucl. Eng. Des. 56 P. 3-9, (1980).

23. F. Garzarolli et al , Kerntechnik 20 Jahrgang No. 10 , P. 463-466, (1987).

CERAMIC FUEL DESIGN AND FABRICATION REQUIREMENTS (Review Article)

M.K. Rassooly, M. Roshan Zamir***
*Esfahan Nuclear Technology Center**
*Nuclear Research Center, Amir Kabir University of Technology***
Atomic Energy Organization of Iran

Abstract

This paper describes the main criteria in fuel rod design and reviews the most important aspects of oxide fuel performance, which play basic role in power reactor safety. This aspects include nuclear, chemical, structural and geometrical characteristics of fuel. The optimized fuel microstructure, which is very important for in - service performance and evaluation procedure of fuel behaviour will be introduced.