



# بیست و یکمین کنفرانس هسته ای ایران

۷ و ۶ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

## بررسی کاربرد سرامیک در سیستمهای تولید انرژی هسته ای

فاطمه فروغی\*

سازمان انرژی اتمی ایران، پژوهشگاه علوم و فنون هسته ای، پژوهشکده مواد

### چکیده:

استفاده از سرامیکها و ترکیبات آنها برای سیستمهای انرژی مختلف و پیشرفته لازم و ضروری است. استفاده از مواد سرامیکی در سیستمهای انرژی باعث می شود تا کاربرد این سیستمها موثرتر، باصرفه تر، سالم تر و هماهنگ با حفظ محیط زیست باشد. موارد زیر از موارد کاربرد مواد سرامیکی در انرژی هسته ای می باشند: سرامیک برای پوشش سوخت و ماتریس سوختهای ساکن، کاربرد زیرکونیم و سایر پوششهای سوخت، مواد با ترکیبات بلوری و غیر بلوری برای ذخیره سازی پسمان های هسته ای، اثرات تشعشعی و محیطی (سپردهای سرامیکی ضد تشعشع)، مدیریت و بازفرآیند سوخت به منظور کنترل عناصر حاصل از شکافت هسته، سرامیک و ترکیبات کربنی برای راکتورهای با دمای بالا و... که در این مقاله به بررسی آنها پرداخته شده است.

### کلید واژه ها: سرامیک، انرژی هسته ای، مقاومت

**مقدمه.** در انرژی هسته ای مواد، نقش بسیار با اهمیت و طولانی را در طول تمام چرخه سوخت هسته ای از مرحله ساخت سوخت تا انتهای مرحله مدیریت پسمانهای هسته ای بازی می کنند. در طرح راکتورهای پیشرفته لازم است راکتور در دماهای بالا کار کند و این مورد مستلزم آن است که از مواد پایدار و مقاوم در برابر حرارت استفاده شود. همچنین از آنجا که جامعه جهانی به دنبال سیستمهای راکتور و چرخه سوخت پیشرفته ای که مقدار پسمانها را به حداقل برساند و از ازدیاد این پسمانها جلوگیری کند، می باشد، نقش مواد گسترده تر می شود و بسیاری کاربردهای دیگر به گونه ای که در تمام این مدت آلیاژها، سرامیکها و فرآیندهای مرتبط با سرامیک راه حلی برای مدیریت پسمانها و محصولات جانبی تولید شده در طول فرآیندها فراهم می کنند.



## بست و یکمین کنفرانس هسته‌ای ایران

۷ و ۶ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

روش کار. سرامیک برای پوشش سوخت و ماتریس سوخته‌های ساکن. دی اکسید اورانیم و دی اکسید پولوتونیم دارای خواص منحصر به فردی هستند که آنها را بعنوان سوخت هسته‌ای مناسب می‌سازد. از جمله این خواص می‌توان به موارد زیر اشاره نمود: این مواد بسیار مقاوم هستند. ساختار کریستالی باز اکسیدهای سرامیکی هسته‌ای باعث می‌شود تا این مواد بتوانند محصولات شکافت را در درون خود نگه دارند و نسبت بالای اکسیژن به فلز باعث اصلاح burn up می‌گردد. همچنین این مواد سرامیکی در مقابل اثرات نامطلوب تشعشع مقاوم هستند. از مزایای دیگر این سوخته‌ها میتوان عدم واکنش این نوع سوخته‌ها با خنک کننده، burn up بالا بدون ورم کردن سوخت و هزینه نسبتاً پایین این نوع از سوخته‌ها را نام برد. اما یکی از معایب این نوع از سوخته‌ها هدایت حرارتی کم آنهاست. از اینرو تحقیقاتی در جهت جایگزینی اکسید با کربیدها و یا نیتريد‌ها انجام شده است. خواصی از سوخته‌های هسته‌ای اکسیدی، کربیدی و نیتريدی در جدول ۱ با هم مقایسه شده است.

مواد با ترکیبات بلوری و غیر بلوری برای ذخیره سازی پسمان های هسته ای. در حال حاضر وجود دو شکل از پسمان برای بیشتر پسمانهای هسته ای، ایده آل به نظر می‌رسد: یکی سوخت هسته ای که به مصرف رسیده است (و دیگر خاصیت رادیواکتیو زیادی ندارد) و دیگری شیشه از نوع بوروسیلیکات. هیچکدام از این دو نوع پسمان بخاطر پایداری فیزیکی و شیمیایی شان طراحی و انتخاب نشده‌اند. بلکه این شکل از پسمانها در یک حصار چند لایه، تنها صورتی از پسمان هستند که باعث ایزولاسیون زمین شده و نمیگذارند رادیونوکلیدها به طبقه بیوسفر و منطقه زیستی زمین برسند. بطور کلی تمام ساختارهایی که پسمانها می‌توانند در قالب آنها قرار



## بیست و یکمین کنفرانس هشتای ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

جدول ۱. بعضی از خواص سوخت های سرامیکی [2]

Selected properties of ceramic nuclear fuels\*

ceramic fuel	density (gm/cm <sup>3</sup> )	thermal conductivity (W • m <sup>-1</sup> • K <sup>-1</sup> )**	melting point (°C)
urania (UO <sub>2</sub> )	10.97	2.8	2,847
urania/plutonia (UO <sub>2</sub> /PuO <sub>2</sub> )	11.06	2.8	2,787
uranium carbide (UC)	13.51	21.7	2,507
uranium nitride (UN)	14.32	24.5	2,762

\*Reprinted from H. Tsai, "Carbide and Nitride Nuclear Fuels," in Michael B. Bever (ed.), *Encyclopedia of Materials Science and Engineering* (1986), pp. 493–495, with permission from Elsevier Science.

\*\*At approximately 1,000 °C.

گیرند، ماتریسهایی پیچیده هستند، اما سرامیک های بلورین یا سرامیکهای شیشه ای بسیار پایدار هستند و رادیونوکلئیدها در ساختارهای فازهای بلورین آنها آمیخته شده اند. در حال حاضر تکنولوژی ذخیره سازی و نگهداری از مواد قابل شکافت و قابل استفاده در تسلیحات هسته ای (پولوتونیم) بصورت سرامیکی، تکنولوژی برتر می باشد. در بعضی از روشها، پسمانها بصورت سرامیک های شیشه ای در می آیند، بطوریکه قسمت زیادی از رادیونوکلئیدها بویژه اکتینیدها، در فازهای کریستالی ترکیب می شوند [2].

**اثرات تشعشی و محیطی (سپرهای سرامیکی ضد تشعشع).** ماده ایده آلی که بتواند بعنوان یک سپر در مقابل تشعشعات رادیواکتیو عمل کند باید دارای این خواص باشد: مقاوم در برابر حرارت، پخش حرارتی خوب، حفظ ساختار بعد از قرار گرفتن در مقابل تشعشع به مدت طولانی، توانایی در جذب نوترونهای سریع و نوترونهای حرارتی، ضرایب کاهش اشعه گاما، قیمت کم، قابلیت شکل پذیری توسط قالب، حفظ پیوستگی ساختار و غیره. این یک لیست طولانی از خواصی است که یک ماده بعنوان سپر در برابر تشعشعات باید داشته باشد. بنابر این



# بیست و یکمین کنفرانس هشتای ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

متداول است که ساختار این مواد بصورت چند لایه طراحی شود. این مواد به راحتی تنظیم پذیر، محکم، قابل به کاربردن در صنایع مختلف و کاملاً غیر حساس به شرایط دمای خیلی بالا می باشند. جدول ۲ یک تصویر عمومی از ضرایب مربوط به مواد سرامیکی و غیر سرامیکی را می دهد. از جدول ۳ میتوان نتیجه گیری کرد که ترکیبات سرامیکی بسیار قوی تر از سیمانهای سنتی حتی بعد از ۱۰۰۰ ساعت قرار گرفتن در دماهای بسیار بالا هستند. این مسئله بویژه در مورد استحکام در برابر خم شدن و پیچش مواد به علت ساختار کروی و استوانه ای

جدول ۲ ضرایب کاهنده اندازه گیری شده و محاسبه شده که فقط توسط اندازه گیری دامنه های فوتوالکتریک به دست آمده اند. اندازه گیریها با استفاده از منابع  $0.661 \text{ MeV}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  به دست آمده اند [2].

	Lead	Iron	Aluminum	Graphite	Water
Theory $P_{\text{int}}$ ( $\text{cm}^{-1}$ )	0.102	0.0718	0.0763	0.079	0.085
Experiment $P_{\text{int}}$ ( $\text{cm}^{-1}$ )	$0.092 \pm$	$0.0718 \pm$	$0.070 \pm$	$0.0720 \pm$	$0.0680 \pm$
	0.001	0.001	0.002	0.0002	0.0001

جدول ۳ ضرایب استحکام، اتساع و ترم بودن ترکیبات سرامیکی و سیمانی. اعدادی که برای سیمان آمده است برای محدوده ای از ترکیبات سیمان می باشد [2].

	Porous Matrix Ceramic Composite	SiC composite	Concrete
Flexural Strength at $1000^\circ \text{C}$ (MPa)	No Data	$\approx 500$ [5]	2-5
Tensile Strength at $1000^\circ \text{C}$ (MPa)	$\approx 130$ [6]	No Data	40 - 80

شکل راکتورهای هسته ای، در طراحی آنها دارای اهمیت بسیار زیادی است. مشاهده می شود که مواد سرامیکی بویژه ترکیباتی که از کربن ساخته می شوند بسیاری از خواص ساختاری دلخواه برای محیط های فشرده و با دانسیته زیاد مشابه آنچه که در راکتورهای هسته ای به کار می رود، را دارند. این مواد باید به آرامی سرعت



# بیست و یکمین کنفرانس هسته‌ای ایران

۷ و ۶ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

نوترونها را کم کنند و اشعه های گاما را کاهش دهند. همهء اینها برای رسیدن به خواص ساختاری خاص لازم است تا میزان مصرف شدن این مواد در حین کار (burn up) و همچنین احتمال میزان جذب موثر این مواد مورد بررسی قرار گیرند. بدون توجه به نتایج، این مواد باید به عنوان لایه های میانی در طراحی راکتور در نظر گرفته شوند تا نوترونها را به نوترونهاى حرارتی تبدیل کنند و از انتشار حرارت به بیرون جلوگیری کنند [1].

**مدیریت و بازفرآیند سوخت به منظور کنترل عناصر حاصل از شکافت هسته.** در روشهای حاضر سوخت های مصرف شده در آغاز به مدت چند دهه در استخرهای ذخیره سازی در زیر آب نگهداری می شوند. پسمانها یا باید در یک محلول بسته و یا بصورت تکه های رادیواکتیو در درون کپسول قرار گیرند. با گذشت زمان و در اثر تشعشع ترکیب و شکل پسمان خراب می شود. به همین منظور طراحی این پسمانها باید به گونه ای باشد که در برابر تماس و شستشوی آبهای زیرزمینی مقاومت داشته باشند. در بیشتر کشورهایی که از انرژی هسته ای استفاده می نمایند، اولین شکل از تولید شکل حالت جامد پسمانهای با اکتیویتهء بالا (HLW)، شیشه کردن این پسمانها از نوع بوروسیلیکات است. برای مرحلهء دوم شکل دادن به پسمانها پیشرفته ترین شکل برای پسمان جامد حالت سینروک می باشد. سینروک یک سنگ ترکیبی سرامیکی می باشد که شامل انواع فازهای معدنی اسید نمک تیتانیم است و توانایی تشکیل حلالهای جامد با اکثر تکه های رادیواکتیو موجود را دارد.

**کاربرد زیرکونیم و سایر پوششهای سوخت.** برای اینکه راکتورهای با دمای خیلی بالا (VHTR) با دمای بسیار بالا بتوانند به عنوان تولیدکنندهء انرژی هسته ای به کار روند، باید بتوانند محصولات شکافت (چه بصورت گاز و چه بصورت فلز) که در طول تشعشع در دی اکسیداورانیم بوجود می آیند را در خود نگه دارند. [3] این امر مستلزم آن است که عناصر لازم بصورت لایه ای بر روی سطوح مورد نظر رسوب کنند و به این ترتیب سطح کاربرد زیرکونیم اضافی بصورتی که در ذرات سوختی که بصورت پیشرفته، دارای پوشش شده اند، تولید شود. لایهء اضافه



# بیست و یکمین کنفرانس هسته‌ای ایران

۷ و ۸ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

شده ZrC بعنوان یک گیرنده اکسیژن عمل می کند تا از خراب شدن مکانیزم یکسانی خواص ساختاری یا TRISO که شامل افزایش فشار در درون ذرات و حرکت هسته ها در درون ذرات است جلوگیری کند.

**نتیجه گیری.** در کاربردهای هسته ای، سرامیک ها از اهمیت خاصی برخوردار هستند. از همان آغاز تولید انرژی هسته ای، با استفاده از سرامیکهای اکسیدی که بر اساس استفاده از فلزات شکافت پذیر اورانیم و پولوتونیم ساخته می شوند، برای راکتورهای با خنک کننده آب و راکتورهای با خنک کننده فلز مایع، قرص های سوخت معتبر تولید شده است. سرامیکها همچنین می توانند در ذخیره سازی پسمانهای هسته ای مورد استفاده قرار گیرند. تبدیل کردن پسمانها به شیشه روشی ایده آل برای نگهداری پسمانهای هسته ای است. در همه کاربردهای هسته ای، مواد سرامیکی مورد نیاز هستند. علاوه بر همه اینها در شرایطی که حرارت بسیار بالا است و نیروهای رانشی شیمیایی داریم، سرامیک های هسته ای برای دزهای تشعشعی بالا مورد استفاده قرار میگیرند.

## مراجع

- 1- Radiation Effects in Crystalline Ceramics for Immobilization of High-level Nuclear Waste and Plutonium, W.G.Weber, Pacific Northwest National Laboratory, Richland, Washington, 99352, 1998
- 2- Advanced ceramic materials for next-generation nuclear applications, John Marra 2011 *IOP Conf. Ser.: Mater.*
- 3- Performance of ZrC-Coated Particle Fuel in Irradiation and Postirradiation Heating Tests, [Toru Ogawa](#), Japan Atomic Energy Research Institute, 2005