Archive of SID

مجله سنجش و ایمنی پرتو، جلد ۸، شمارهٔ ٤، ویژه‌نامه پرتوهای یون‌ساز، ۱۳۹۸، صفحه ۷۳–۷۸
پنجمین کنفرانس ملی سنجش و ایمنی پرتوهای یون‌ساز و غیریون‌ساز (مهرماه ۱۳۹۷)
تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۷/۰٦/۰۱، تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۰۷/۰۱

بررسی ضخامت مورد نیاز کسک سربی انتقال سوخت توریم پرتودیده بر حسب زمان‌های متفاوت مصرف سوخت و خنک‌شوندگی

زهره غلام‌زاده*، عطیه جزءوزیری و سید محمد میروکیلی

سازمان انرژی اتمی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده راکتور و ایمنی هسته‌ای
تهران، سازمان انرژی اتمی، گروه ایمنی پرتوی، کدپستی: ۱٤۳۹۹۵۱۱۱۳
پست‌الکترونیکی: cadmium_109@yahoo.com

چکیده

سوخت توریم به دلیل کاهش ذخایر اورانیوم جهان، فراوانی بیش‌تر آن در مقایسه با اورانیوم و نیز توانایی زایندگی در راکتورهای حرارتی و سریع مورد توجه محققان قرار گرفته است. در این کار، بررسی ایمنی پرتویی و میزان حفاظ‌سازی لازم برای نقل و انتقال سوخت توریمی پرتودیده در راکتور تحقیقاتی تهران هدف قرار گرفته است. برای محاسبات طیف گامای سوخت پرتودیده و دز سوخت قرار گرفته درون کسک از کدهای محاسباتی ORIGEN و MCNPX استفاده شد. نتایج محاسبات نشان داد در مقایسه با سوخت‌های اورانیومی مورد استفاده در راکتور تحقیقاتی تهران، سوخت توریمی مصرف شده به زمان‌های خنک‌شوندگی بیش‌تری قبل از نقل و انتقال توسط کسک سربی نیاز دارد. هم‌چنین ضخامت کسک مورد نیاز برای انتقال سوخت توریمی پرتودیده بیشتر از سوخت اورانیومی است.

کلیدواژگان: سوخت توریم مصرف شده، راکتور تحقیقاتی تهران، شبیه‌سازی توسط کد MCNPX، ضخامت کسک سربی انتقال.

۱. مقدمه

انرژی تا چند دهه آینده باشد. از این رو توسعه چرخه سوخت‌های پیشرفته برای حل مشکل ضروری می‌باشد [۱و ۲]. همچنین جرم بحرانی مورد نیاز ^{233}U حدود ۱۵ کیلوگرم، جرم بحرانی مورد نیاز ^{235}U حدود ۵۲ کیلوگرم و جرم بحرانی ^{239}Pu ۱۰ کیلوگرم است [۳]. گزارش‌های ثبت شده در مورد سوخت توریم پرتودیده نشان می‌دهد این سوخت هنگام نقل و انتقال به حفاظ‌گذاری بیش‌تر در مقایسه با سوخت اورانیوم پرتودیده نیاز دارد. در سال ۲۰۱۵ Srinivasan et al. سوخت اکسید توریم را به مدت ۵۰۸ روز در شار نوترون $n/s.cm^2$ 10^{14} تابش‌دهی نمودند. همچنین این گروه طی انجام آزمایش‌ها و نیز محاسباتی توسط کد ORIGEN نشان دادند که مقدار دز در میله سوخت اکسید توریم به علت سهم عناصری همچون ^{232}U، ^{228}Th، ^{224}Ra، ^{220}Rn، ^{216}Po، ^{212}Pb، ^{212}Bi و ^{208}Tl موجود در توریم تابش دیده است[٤]. همچنین به دلیل تجمع ^{208}Tl در سوخت توریمی که گامای ۲/٦ MeV گسیل می‌کند، طیف سوخت توریمی تابش دیده سخت‌تر از طیف سوخت اورانیومی خواهد بود[۵].

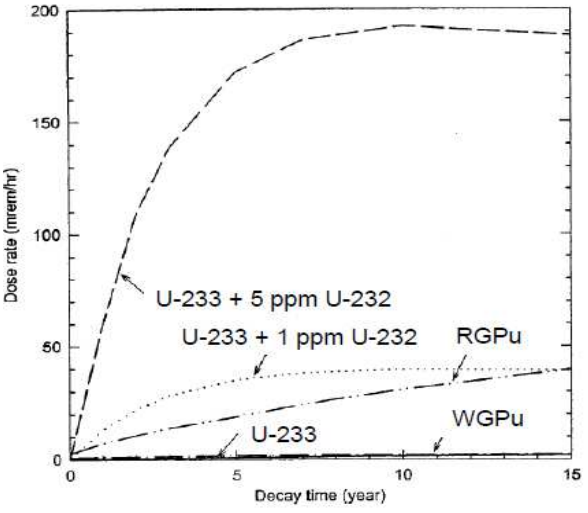
Downloaded from rsm.kashanu.ac.ir at 12:57 +0330 on Wednesday December 9th 2020

www.SID.ir

Archive of SID

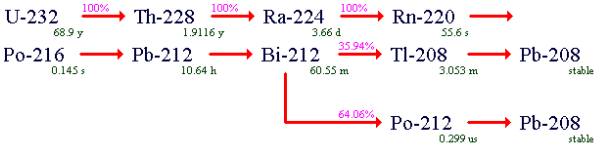
Downloaded from rsm.kashanu.ac.ir at 12:57 +0330 on Wednesday December 9th 2020

لازم به ذکر است در سوخت توریمی مصرف شده به دلیل واپاشی رادیوایزوتوپ‌های مختلف به ^{232}U دز دسته سوخت در زمان خنک‌شوندگی به کندی کاهش می‌یابد. طبق مطالعات انجام شده سایر محققان، در شکل ۱ مقایسه میزان حضور ^{232}U درون سوخت و تاثیر آن بر دز دسته سوخت مقایسه شده است. هم‌چنان‌که ملاحظه می‌گردد در صورت تغییر میزان ^{232}U از ppm ۱ به ppm ۵ دز بر حسب زمان خنک‌شوندگی بسیار بیش‌تر خواهد بود.



شکل (۱): تاثیر تجمع رادیوایزوتوپ اورانیوم-۲۳۲ بر دز دسته سوخت توریمی [۴].

در زنجیره واپاشی ^{233}U به خوبی مشاهده می‌شود تجمع ^{208}Tl و ^{212}Po بر حسب زمان خنک‌شوندگی سوخت توریمی مصرف شده زیاد می‌گردد. این موضوع باعث می‌شود دز دسته‌های سوخت توریمی مصرف شده در مقایسه با سوخت اورانیومی مصرف شده به کندی بر حسب زمان خنک‌شوندگی کاهش یابد.



برای انتقال سوخت‌های مصرف شده الزاماتی وجود دارد و کسک انتقال طراحی شده باید دارای ویژگی‌های به شرح زیر باشد. به‌طورکلی برای جلوگیری از نقص سوخت، دمای پوشش سوخت درون کسک باید کمتر از ۴۰۰ °C و فشار درون کسک کم‌تر از ۹۰ MPa باشد. دز نواحی اشغال اطراف کسک باید کم‌تر از ۲ mSv/h باشد و دز تمام بدن نواحی مرزی ناحیه تحت کنترل برای عموم مردم کم‌تر از mSv/y ۰/۲۵ باشد. آهنگ نشت گازهای رادیواکتیو باید کم‌تر از 1×10^{-6} Pa/cm^3.s باشد. ضریب تکثیر موثر کسک باید کم‌تر از ۰/۹۵ باشد. هم‌چنین تمام محاسبات و بررسی‌ها باید در شرایط معمولی، غیر معمولی و حادثه در SAR کسک ارائه گردد [۶-۸].

با توجه به مزایای استفاده از سوخت توریم و نیز چالش‌های دز سوخت توریمی پرتودیده، در این کار، ضخامت مورد نیاز کسک سربی انتقال سوخت توریمی پرتودیده در راکتور تحقیقاتی تهران به روش شبیه‌سازی بررسی خواهد شد.

. روش محاسبات

۱،۱. شبیه سازی با کد ORIGEN

کد ORIGEN 2.1 یک کد کامپیوتری Point-depletion برای محسبات واپاشی مواد رادیواکتیو و مورد استفاده در شبیه سازی چرخه های سوخت هسته ای است که در آزمایشگاه ملی ORNL اوائل دهه ی ۱۹۷۰ توسعه داده شده است. این کد برای راکتورهای موجود، از جمله راکتورهای تحت فشار، راکتورهای آب جوشان، راکتورهای زاینده نمک مذاب و راکتورهای دوتریم-اورانیوم استفاده می شود [۹].

در ابتدا مصرف دسته های سوخت اکسید توریم در زمانهای مختلف و توان میانگین ۴ MW با استفاده از کد ORIGEN محاسبه گردید. طیف فوتون دسته های سوخت مصرف شده بر حسب زمان مصرف متفاوت(MWD متفاوت) و نیز زمانهای خنک شوندگی متفاوت بررسی شد.

www.SID.ir

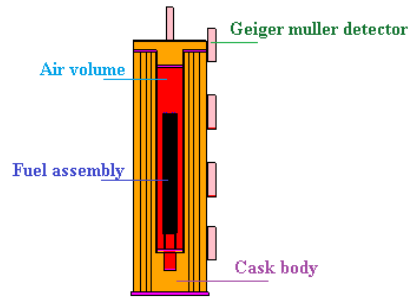
Archive of SID

Downloaded from rsm.kashanu.ac.ir at 12:57 +0330 on Wednesday December 9th 2020

۲،۲.شبیه‌سازی با کد MCNPX

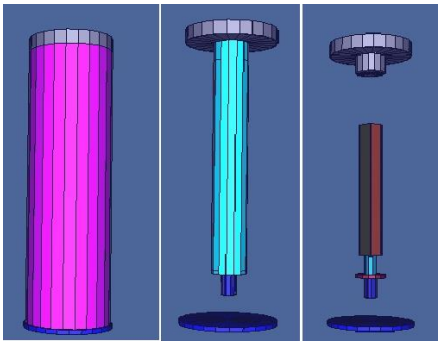
کد MCNPX قادر به ترابرد ۳٤ ذره به روش مونته کارلو و نیز شبیه سازی انواع موضوعات مرتبط با راکتورهای هسته ای، شتابدهنده ها، بررسی تولید رادیوایزوتوپها، تصویربرداری های نوترون و گاما و بسیاری از موارد دیگر است[۱۰]. در این کار، با استفاده از طیف فوتون استخراج شده از کد ORIGEN که به عنوان چشمه در ورودی کد MCNPX تعریف می گردد دز دسته های سوخت توریم بر روی سطح کسک سربی مدل شده توسط کد MCNPX در زمانهای خنک شوندگی متفاوت و نیز مصرف سوخت متفاوت محاسبه و با یکدیگر مقایسه شد. همچنین ضخامتهای مختلف کسک سربی برای انتقال دسته های سوخت توریمی پرتودیده بحث و بررسی گردید.

در شکل ۲ یک مجتمع سوخت توریمی درون کسک حمل و نقل شبیه سازی شده است.



شکل (۲): شماتیک دسته سوخت مدل شده در کسک حمل و نقل سربی.

در شکل ۳ نمای سه بعدی کسک مدل شده مشاهده می گردد.

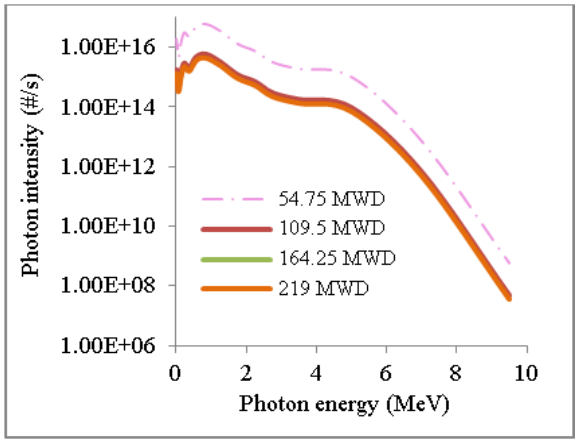


شکل (۳): شماتیک سه بعدی کسک مدل شده، از سمت چپ به ترتیب: بدنه کسک، بدنه کانال قرارگیری سوخت و مجتمع سوخت.

به منظور محاسبه دز محوری، آشکارسازهای گایگر مولر در موقعیت های مکانی مطابق شکل ۲ قرار داده شدند. ماده آشکارساز هوا و حجم آن مطابق حجم حساس آشکارسازهای موجود تعریف گردید همچنین یک آشکارساز بر روی درب کسک قرار گرفته است. ابعاد حجم حساس آشکارساز های استوانه ای ٤/٥×۱۸/٥ cm است. برای انجام محاسبات از ضرایب تبدیل شار به دز ICRP 21 استفاده شد. از تالی F4 به همراه کارت های DE/DF موجود در کد MCNPX برای محاسبه دز قرائت شده آشکارسازها استفاده شد.

۳. نتایج محاسبات

در شکل ٤ طیف فوتون یک مجتمع سوخت اکسید توریم بر حسب مقدار مصرف متفاوت (MWD) بلافاصله پس از پایان سیکل (پایان پرتودهی) ارائه گردیده است.



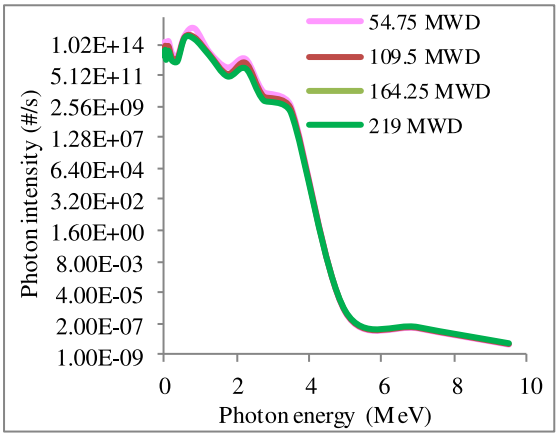
شکل (۴): مقایسه طیف فوتون دسته سوخت توریم پرتودیده با مصرف متفاوت

همچنان‌که در شکل ٤ ملاحظه می‌گردد، برای دسته‌های سوخت با مصرف تقریبا بیش از ۱۰۰ MWD طیف فوتون بلافاصله پس از پایان پرتودهی چندان با یک‌دیگر متفاوت نیست. حال آنکه در زمان‌های متفاوت خنک‌شوندگی به دلیل تغییر غلظت رادیوایزوتوپ‌های گسیلنده گاما، تفاوت طیف دسته‌های سوخت با مصرف متفاوت محسوس‌تر خواهد شد (شکل ۵).

www.SID.ir

Archive of SID

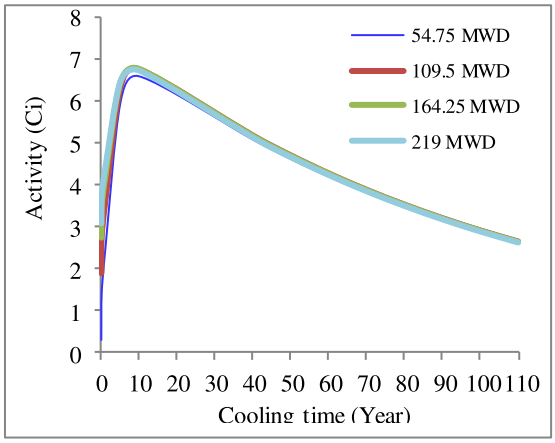
Downloaded from rsm.kashanu.ac.ir at 12:57 +0330 on Wednesday December 9th 2020



شکل (۵): مقایسه طیف فوتون دسته سوخت توریم پرتودیده با مصرف متفاوت پس از حدود ۶ ماه خنک شوندگی

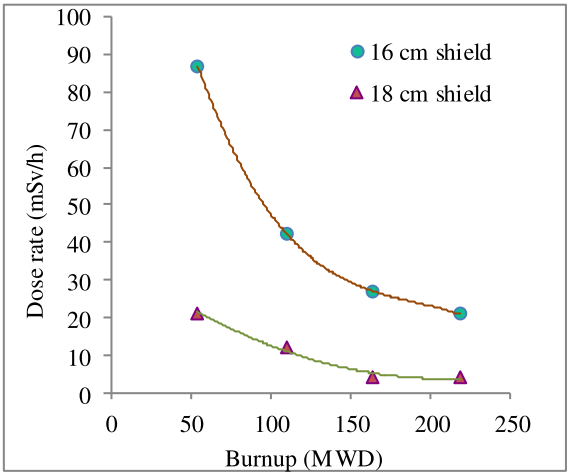
در واقع به تعادل رسیدن هریک از رادیوایزوتوپهای مهم گسیلنده گاما ذکر شده در بخش مقدمه در سوخت توریم در زمانهای مصرف متفاوت بر طیف و دز دسته سوخت توریم در زمانهای خنک شوندگی متفاوت تاثیرگذار خواهد بود.

همچنانکه اشاره شد یکی از رادیوایزوتوپهای مهمی که زمان خنک شوندگی و دز سوخت توریم را با سوخت اورانیوم پرتودیده متفاوت می کند ^{208}Tl **است** که تجمع آن در سوخت توریم پرتودیده و میزان تولید آن بر طیف فوتون مجتمع سوخت مصرف شده و نیز بر دز دسته سوخت مصرف شده بسیار موثر است. چنانچه شکل ٦ نشان می دهد، غلظت رادیوایزوتوپ ^{208}Tl تولید شده در سوخت های با مصرف بیشتر اندکی بیشتر است ولی در مورد همه آنها پس از زمان خنک شوندگی، تجمع ^{208}Tl درون سوخت به دلیل واپاشی رادیوایزوتوپهای دیگر به آن در حال افزایش است و پس از ۱۰ سال خنک شوندگی سوخت مصرف شده غلظت این رادیوایزوتوپ روند کاهشی از خود نشان می دهد. این موضوع برآورد می کند که دز سوخت توریمی مصرف شده بر حسب زمان خنک شوندگی با آهنگ کندتری نسبت به سوخت اورانیومی مصرف شده کاهش یابد.



شکل (۶): مقایسه تجمع ^{208}Tl در دسته سوخت توریم پرتودیده با مصرف متفاوت

لازم به ذکر است سوخت های اورانیومی راکتور تهران با مصرف MWD ۱۰۰ (مصرف ٥٤٪) بعد از حدود ۳ ماه با استفاده از کسک سربی با ضخامت ١٦ cm قادر به جابجایی هستند و دز بیشینه سطح کسک کمتر از mSv/h ۲ است[۱۱]. در شکل ۷ مقایسه دز بیشینه بدنه کسک که دقیقا مقابل وسط دسته سوخت مصرف شده است پس از ٦ ماه خنک شوندگی بر حسب ضخامت دیواره کسک سربی نشان داده شده است. طبق این شکل، ضخامت ١٦ cm برای انتقال هیچ یک از دسته های سوخت با مصرف متفاوت مناسب نمی باشد ولی ضخامت ۱۸ cm می تواند برای انتقال دسته های سوخت مصرف شده MWD ١٦٤/٢٥ و MWD ۲۱۹ مورد استفاده قرار گیرد.



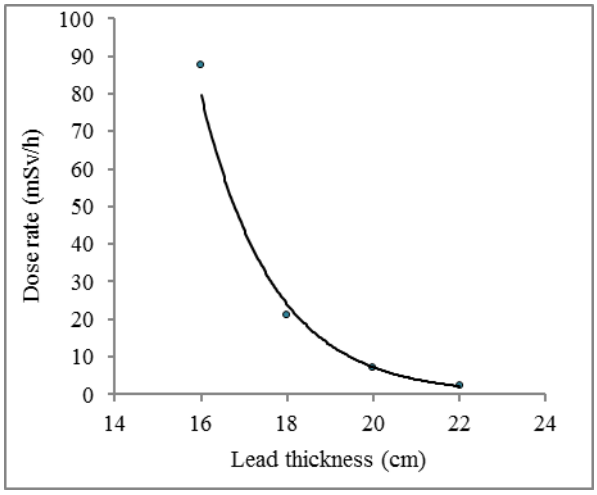
www.SID.ir

Archive of SID

Downloaded from rsm.kashanu.ac.ir at 12:57 +0330 on Wednesday December 9th 2020

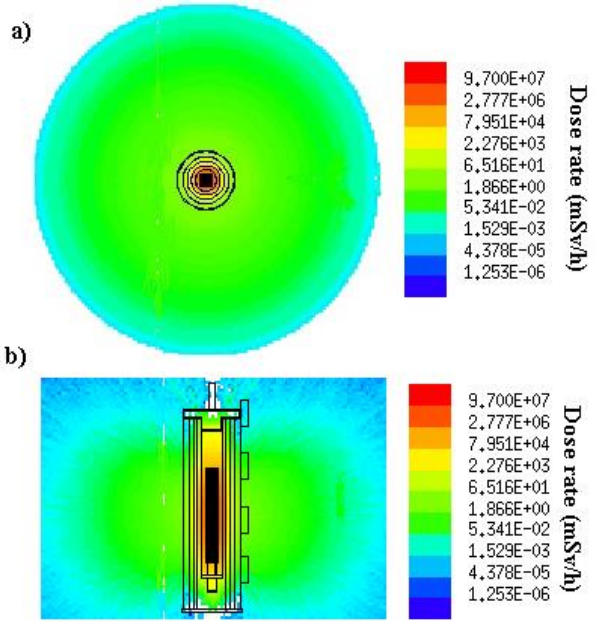
شکل (۷): ضخامت سرب مورد نیاز بدنه کسک برای انتقال دسته سوخت توریم پرتودیده با مصرف متفاوت.

همچنین شکل ۸ نشان می دهد برای دسته های سوخت دارای مصرف کمتر که رادیوایزوتوپهای گسیلنده گاما در اثر واکنش های تعادلی دیگر نظیر جذب از بین نرفته اند، در زمان خنک شوندگی ٦ ماه لازم است ضخامت بدنه کسک انتقال تا حدود cm ۱۸ افزایش یابد. این موضوع وزن کسک را از۲/٤۷ تن به ۳/۲۲ تن افزایش می دهد.



شکل (۸): ضخامت سرب مورد نیاز بدنه کسک برای انتقال دسته سوخت توریم پرتودیده با مصرف MWD ۵۴/۷۵.

شکل ۹ توزیع دز تا فاصله m ۱ از سطح کسک سربی با ضخامت cm ۱٦ برای حالت دسته سوخت توریم مصرف شده MWD ۵۴/۷۵ با خنک شوندگی ٦ ماه را نشان می دهد. طبق این شکل دز در فاصله m ۱ از سطح کسک به طور میانگین به کمتر از µSv/h ۲ کاهش می یابد درحالیکه در بدنه کسک به صورت میانگین حدود mSv/h ٦۵ است.



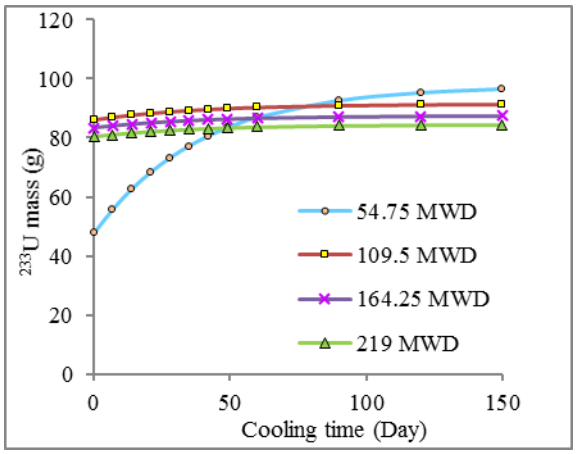
شکل (۹): توزیع دز اطراف کسک سربی با ضخامت cm ۱۶ برای انتقال دسته سوخت توریم پرتودیده با مصرف MWD ۵۴/۷۵ و پس از ۶ ماه خنک شوندگی.

محاسبات نشان می دهد با افزایش ضخامت کسک به cm ۲۲ دز بیشینه بدنه کسک دربردارنده سوخت توریم پرتودیده با مصرف MWD ۵٤/۷۵ و خنک شوندگی ٦ ماه به mSv/h ۲/۷ می رسد که این مسئله وزن کسک را به ٤/۰۵ تن افزایش می دهد. شکل ۱۰ میزان تجمع اورانیوم-۲۳۳ را پس از زمان خنک شوندگی، درون مجتمع سوخت اکسید توریم با مصرف متفاوت نشان می دهد. محاسبات انجام شده نشان می دهد به دلیل واپاشی پروتاکتانیوم-۲۳۳ به اورانیوم-۲۳۳ میزان این رادیوایزوتوپ شکافا درون سوخت پرتودیده به مدت ۱ سال در راکتور تحقیقاتی تهران (MWD ۵۴/۷۵) به شدت در حال افزایش است به گونه ای که پس از ۱۵۰ روز از خنک شوندگی دسته سوخت، مقدار آن به حدود ۹٦ گرم می رسد.

www.SID.ir

Archive of SID

Downloaded from rsm.kashanu.ac.ir at 12:57 +0330 on Wednesday December 9th 2020



شکل (۱۰): مقایسه تغییر غلظت 233U درون سوخت توریم پرتودیده با مصرف متفاوت بر حسب زمان خنک شوندگی

لذا چنین دسته های سوختی با مصرف MWD ۵۴/۷۵ لازم است تا قبل از ۳ ماه به کسک های نگهداری خشک با تعداد زیاد دسته سوخت منقل نشوند زیرا می تواند خطر افزایش ضریب تکثیر موثر کسک به بیش از ۰/۹۵ را ایجاد کند.

۴. نتیجه‌گیری

سوخت توریم به دلیل فراوانی بیشتر نسبت به ذخایر اورانیوم در جهان و نیز به دلیل زایندگی در شار نوترون حرارتی، فوق حرارتی و سریع مورد توجه خاص چرخه سوخت هسته ای قرار دارد. محاسبات انجام شده در این کار نشان داد سوخت توریم مصرف شده در مقایسه با سوخت اورانیومی مصرف شده به حفاظ بسیار قوی تری برای نقل و انتقال توسط کسک های سربی مخصوص انتقال سوخت نیاز دارد. همچنین زمان تاخیر انتقال سوخت به منظور خنک شوندگی کافی حداقل ۲ برابر سوخت اورانیوم مصرف شده با حداکثر مصرف در راکتور تحقیقاتی تهران است (سوخت اورانیومی با مصرف ۵٤٪). همچنین برای انتقال دسته های سوخت توریمی با مصرف کمتر از MWD ۱۰۰ نیاز است ضخامت کسک سربی مورد استفاده برای انتقال سوخت خنک شده به مدل ٦ ماه cm ٦ اضافه گردد که این موضوع وزن کسک را به ۲ برابر در مقایسه با کسک انتقال دسته سوخت اورانیومی پرتودیده با همین میزان مصرف افزایش می دهد.

۵. مراجع

[1] X.X. Li. X.Z. Cai. D.Z. Jiang. Y.W. Ma. J.F. Huang. C.Y. Zou. C.G. Yu. J.L. Han. J.G. Chen Analysis of thorium and uranium based nuclear fuel options in Fluoride salt-cooled High temperature Reactor, Prog. in Nucl. Energ.78 (2015) 285-290.

[2] J. Breza. P. Darˇílek. V. Necˇas. Study of thorium advanced fuel cycle utilization in light water reactor VVER-440, Annal. of Nucl. Energ. 37 (2010) 685–690.

[3] P. Srinivasan. S. Ganesan. D. N. Sharma. H. S. Kushwaha. Estimation of dose rates on the PHWR irradiated thorium oxide bundles based on BARC updated nuclear data, BARC Golden Jubilee DAE-BRNS National Workshop on Nuclear Data for Advanced Nuclear Systems, Nuclear Databases and Applications, NWND-2006, 8-11 November (2006).

[4] W. Rosenstock. O. Schumann. Thorium for Nuclear Energy – a Proliferation Risk? Fraunhofer-Institut für Naturwissenschaftlich-Technische Trendanalysen (INT), (2013)

[5] Perspectives on the Use of Thorium in the Nuclear Fuel Cycle, NUCLEAR ENERGY AGENCY, (2015).

[6] M. Bace. D. Grgic., Calculation of spent fuel storage cask parameters, Nuclear society of Slovenia, 2nd regional meeting, 11.Spe (1995).

[7] K.A. Gruss. G. Hornseth. M.W. Hodges. U.S. Nuclear Regulatory Commission acceptance

www.SID.ir