



بیست و یکمین کنفرانس هسته ای ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

محاسبات نوترونیکی و ترموهیدرولیکی استفاده از سوخت های سرامیکی جایگزین در

راکتور US-APWR

محسن خردمندسعدی^۱؛ بشیر بشیری^۲

^۱گروه مهندسی هسته ای، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران-ایران
^۲دانشگاه اصفهان، دانشکده علوم و فناوری های نوین، گروه مهندسی هسته ای، اصفهان، ایران

چکیده:

در سال های اخیر توجه شرکت های طراحی به سمت افزایش طول سیکل و سطح توان حرارتی راکتورها معطوف گردیده است. افزایش طول سیکل قلب، افزایش مصرف سوخت را به همراه داشته و افزایش سطح توان سبب افزایش راندمان و کاهش بهای تمام شده برق تولیدی می گردد. یکی از راه های دست یابی به این مهم، تغییر حالت شیمیایی سوخت می باشد که در دستور کار شرکت میتسوبیشی به عنوان طراح راکتور پیشرفته US-APWR قرار گرفته است. در تحقیق حاضر اثرات نوترونیکی و ترموهیدرولیکی استفاده از سایر سوخت های سرامیکی نظیر UN، UC و UN¹⁵ بجای سوخت معمول UO₂ در افزایش طول سیکل و سطح توان راکتورهای آب سبک مورد بررسی قرار گرفته است. این موضوع مشخص شد که تغییر سوخت از UO₂ به UN¹⁵ تأثیر بسزایی در افزایش طول سیکل راکتور دارد، بنحوی که مدت زمان کارکرد نیروگاه و تولید برق را با ضریب ۱/۶ افزایش می دهد که کاملاً به لحاظ اقتصادی سودمند است. همچنین به منظور انجام محاسبات ترموهیدرولیکی از کد COBRA-EN استفاده شد و به منظور مدل سازی سایر سوخت ها زیرروال MATPRO در این کد مورد بازنویسی قرار گرفت. نتایج بیانگر این حقیقت است که با استفاده از سوخت UN¹⁵ دمای مرکز سوخت به شدت کاهش می یابد در حالیکه معیار DNBR تغییر چندانی پیدا نمی کند. دلیل این امر شش بودن ضریب هدایت حرارتی این سوخت در مقایسه با سوخت UO₂ است. نتیجه آنکه با استفاده از این ترکیب سوخت جایگزین می توان توان حرارتی راکتورهای نسل فعلی را نیز بنحو قابل ملاحظه ای افزایش داد.

واژه های کلیدی: راکتور US-APWR، طول سیکل، سوخت سرامیکی، مصرف سوخت (Burn up)، ضریب هدایت حرارتی



بیست و یکمین کنفرانس هشتای ایران

۷ و ۶ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

مقدمه

توسعه نسل چهارم راکتورهای آب سبک از سال ۲۰۰۸ در دستور کار شرکت صنایع سنگین میتسویشی قرار گرفت [۱]. بر اساس نقشه راه ارائه شده، بایستی طراحی پایه این نسل از راکتورهای آب سبک تا سال ۲۰۱۶ به پایان رسیده و بهره‌برداری عملی از آنها تا سال ۲۰۳۰ میسر گردد. قلب راکتور در این نسل جدید دارای بهره‌وری نوترونیکی و ترموهیدرولیکی بسیار بالایی است. متوسط مصرف سوخت تا حد 90 GWD/THM و طول سیکل به ۲۴ ماه افزایش می‌یابد، بگونه‌ای که در نتیجه افزایش مصرف سوخت، مقدار سوخت مورد نیاز راکتور در طول عمر نیروگاه در حدود ۲۰٪ کاهش می‌یابد [۱]. دستیابی به چنین مصرف سوخت بالایی به دو طریق امکان‌پذیر است: نخست افزایش غنای سوخت مورد استفاده و دیگری استفاده از ترکیبات سوخت و مواد غلاف جدید به منظور افزایش تولید و مصرف درجای پلوتونیوم. استفاده از راهکار اول بنا به محدودیت‌های مرتبط با مسائل منع گسترش، دارای مقدار ماکزیمم ۵٪ برای راکتورهای آب سبک است بگونه‌ای که با این سقف از غنا نمی‌توان به مصرف سوخت بسیار بالا دست یافت. با این وجود، استفاده از روش دوم دست‌یافتنی‌تر بنظر می‌رسد. در حال حاضر بررسی انواع مواد سوخت و غلاف که دارای پتانسیل استفاده در قلب راکتور هستند در دست مطالعه است. یکی از امیدبخش‌ترین این طرح‌ها، امکان‌سنجی استفاده از سوخت‌های سرامیکی تک لیگاندی بجای سوخت معمول UO_2 می‌باشد. مهمترین این سوخت‌های سرامیکی جایگزین بر اساس پیشنهادات دیگر کارها و نیز پیشینه استفاده در راکتورهای تحقیقاتی عبارتند از: UC، UN، و ^{15}UN [۳، ۲]. این سوخت‌های سرامیکی جایگزین دارای این ویژگی مهم هستند که در مقایسه با UO_2 چگالی بالاتری دارند. این ویژگی سبب می‌گردد تا نسبت هیدروژن به فلز سنگین کاهش یافته و زایش پلوتونیوم مؤثرتر گردد. در مقاله حاضر سعی شده است تا با مطالعه این چهار نوع سوخت سرامیکی، اثرات نوترونیکی و ترموهیدرولیکی تغییر حالت شیمیایی سوخت در راکتور US-APWR مورد بررسی قرار گیرد.

سوخت سرامیکی

سوخت سرامیکی مورد استفاده در قلب راکتورهای هسته‌ای، UO_2 می‌باشد. دو لیگاندی بودن این ترکیب سبب شده است تا چگالی فلز سنگین اورانیوم در این ترکیب بشدت کمتر از سایر سوخت‌های سرامیکی باشد. چگالی اورانیوم در ترکیب UO_2 برابر $9/6 \text{ vgr/cm}^3$ می‌باشد در حالیکه چگالی اورانیوم در ترکیب UN و UC به ترتیب برابر $13/52 \text{ vgr/cm}^3$ و $12/95$ می‌باشد. بدین ترتیب ملاحظه می‌گردد که تنها با تغییر شکل شیمیایی سوخت از حالت اکسیدی به نیتریدی یا کربیدی میزان فلز سنگین موجود در سوخت تا ۴۰٪ افزایش یافته و در نتیجه کسر زایش می‌تواند تا حد بسیار زیادی افزایش پیدا کند. ترکیب شیمیایی UN^{15} کاملاً مشابه UN می‌باشد که در آن نیتروژن مورد استفاده بین ۹۹/۵٪ تا ۹۹/۹٪ از N^{15} غنی شده است. N^{15} بر خلاف N^{14} دارای سطح مقطع گیراندازی



بیست و یکمین کنفرانس هشتای ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

نوترونی بسیار پائینی است. سوخت‌های نیتریدی و کربیدی دارای مزایای متعددی هستند و پیش از این به عنوان سوخت پیشنهادی در راکتورهای سریع با خنک کننده سدیم و نیز راکتورهای قدرت فضایی در نظر گرفته شده- اند چراکه این دو نوع سوخت بر خلاف UO_2 با خنک کننده فلز مایع هیچ گونه برهمکنشی ندارند [۲]. دمای ذوب، ضریب هدایت حرارتی و نیز چگالی فلز سنگین آنها در مقایسه با سوخت‌های اکسیدی بسیار بالاتر است (جدول ۱) و بر خلاف UO_2 ضریب هدایت حرارتی آنها با افزایش دما افزایش می‌یابد [۳]. این نکته به لحاظ ترموهیدرولیکی بسیار حائز اهمیت است، چراکه افزایش این ضریب سبب افزایش نرخ انتقال حرارت و کاهش محسوس دمای مرکز سوخت می‌گردد.

جدول ۱: خواص سوخت‌های سرامیکی مختلف

UC	UN-UN ¹⁵	UO ₂	
۱۳/۶	۱۴/۳۲	۱۰/۹۶	چگالی تئوریک gr/cm ³
۱۲/۹۵	۱۳/۵۲	۹/۶۷	چگالی فلز سنگین gr/cm ³
۲۳۵۰	۲۷۰۰	۲۸۰۰	نقطه ذوب (°C)
۲۲/۴ (در ۲۰۰ °C)	۱۲ (در ۲۰۰ °C)	۷/۱۹ (در ۲۰۰ °C)	هدایت حرارتی (W/mK)
۲۳/۱ (در ۱۰۰۰ °C)	۲۰ (در ۱۰۰۰ °C)	۳/۳۵ (در ۱۰۰۰ °C)	

راکتور US-APWR

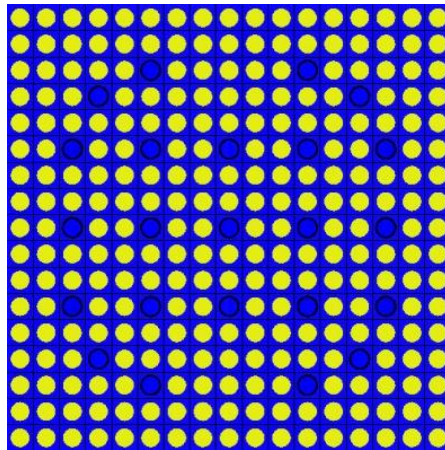
شرکت صنایع سنگین میتسویشی در راستای نیل به چشم انداز طراحی نسل جدید راکتورهای آب سبک (نسل چهارم)، در سال ۲۰۱۱ طراحی راکتور US-APWR به عنوان یک راکتور پیشرفته نسل سوم را به پایان رساند و مدارک کنترل طراحی را جهت بازبینی و اخذ پروانه به کمیسیون نظام هسته‌ای آمریکا (US-NRC) ارائه کرد [۴]. توان حرارتی این راکتور ۴۴۵۱ MW بوده و افزایش دمای خنک کننده در خروجی قلب در کنار افزایش بازده مولد بخار و توربین، بازده ۳۸٪ را برای این نیروگاه رقم زده است [۴]. قلب این راکتور از ۲۵۷ مجتمع سوخت تشکیل یافته است که توسط یک بازتابنده محوری از جنس استیل ضد زنگ احاطه شده است. میله‌های سوخت هر مجتمع در یک آرایش مربعی ۱۷×۱۷ چیده شده‌اند. هر مجتمع سوخت شامل ۲۶۴ میله سوخت، ۲۴ کانال هدایت کننده میله کنترل و یک محل قرار گیری ابزار اندازه‌گیری می باشد. شرح مفصل مشخصات یک مجتمع سوخت نوعی به همراه نمایی از آن به ترتیب در جدول ۲ و شکل ۱ نمایش یافته است.



بیست و یکمین کنفرانس هفتاد و یکمین کنفرانس هسته ای ایران

۷ و ۸ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

جدول ۲: مشخصات مجتمع سوختو غیر راکتور US-APWR



شکل ۱: نمایی از مجتمع سوخت نوعی راکتور US-APWR

۱۷×۱۷ مربعی	آرایش میله های سوخت
۲۶۴	تعداد میله های سوخت
	نوع سوخت
دی اکسید اورانیوم غنی شده	
$10.628(\text{gr}/\text{cm}^3)$	چگالی سوخت
$0.819(\text{cm})$	قطر قرص سوخت
$0.8358(\text{cm})$	قطر داخلی غلاف
$0.95(\text{cm})$	قطر خارجی غلاف
ZIRLO	جنس غلاف
$1/26(\text{cm})$	گام شبکه
$21/42(\text{cm}) \times 21/42(\text{cm})$	ابعاد مجتمع سوخت
$420(\text{cm})$	ارتفاع مجتمع سوخت

روش کار

به منظور بررسی رفتار سوخت های سرامیکی مختلف، یک مجتمع سوخت راکتور US-APWR انتخاب گردیده و با در نظر گرفتن شرایط مرزی تناوبی در راستای X-Y اثر استفاده از سوخت های مختلف در افزایش طول سیکل راکتور توسط کد مونت کارلوی MCNPX2.6 شبیه سازی شد. سوخت اصلی مورد استفاده در این مجتمع سوخت از نوع UO_2 با غنای ۲/۰۵٪ می باشد. بنابراین به هنگام مدل سازی غنای سوخت تغییری نکرده و صرفاً جنس سوخت تعویض می گردد. همچنین سطح توان حرارتی این مجتمع $17/319\text{MW}$ در نظر گرفته شده که متوسط توان حرارتی تولیدی توسط هر مجتمع می باشد. از آنجائیکه به منظور انجام محاسبات ترموهیدرولیکی نیازمند محاسبه توان حرارتی هر میله سوخت می باشیم، توان حرارتی تولید شده در هر میله با استفاده از تالی F6 محاسبه گردید. همچنین به منظور لحاظ کردن اثر توزیع توان محوری، هر میله در این راستابه ۱۰ قسمت تقسیم شد. در ادامه با انتخاب مناسبترین سوخت سرامیکی به لحاظ نوترونیکی، محاسبات ترموهیدرولیکی سوخت انتخابی با استفاده از مدل سازی SUB-CHANNEL در کد COBRA-EN صورت می گیرد. از آنجائیکه کتابخانه این کد تنها شامل خواص حرارتی سوخت UO_2 می باشد، به منظور مدل سازی سایر سوختها زیرروال MATPRO در این کد مورد بازنویسی قرار گرفته است.

نتایج

در شکل ۲ نمودار تغییرات ضریب تکثیر مؤثر در طول یک دوره ۷۲۰ روزه نشان داده شده است. همانگونه که انتظار می رود به دلیل مصرف سوخت، این نمودار با شیب هایی متفاوت برای تمامی انواع سوخت ها، رفتاری خطی و نزولی دارد. همچنین مقادیر راکتیویته اضافی سوخت تازه در جدول ۳ نمایش داده شده است. همانگونه که ملاحظه می گردد، دو نوع سوخت UN^{15} و UO_2 دارای راکتیویته اضافی بیشتری در ابتدای سیکل هستند. این موضوع



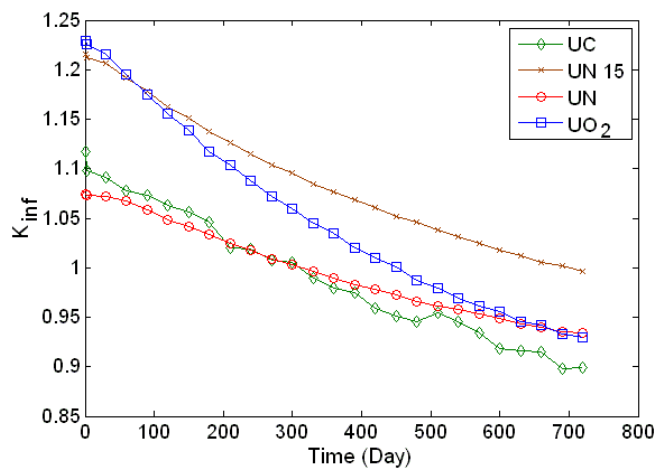
بیست و یکمین کنفرانس هشتای ایران

۱۷ و ۱۸ شهریور ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

بخصوص در مورد دو نوع سوخت UN و UN^{15} حائز اهمیت است، چرا که تفاوت این دو نوع سوخت تنها به میزان غنای ایزوتوپ N^{15} در اتم نیتروژن بکار برده شده برمی گردد. طول سیکل مربوط به سوخت های مختلف نیز در جدول ۴ نمایش یافته است. در اینجا طول سیکل، به صورت مدت زمانی که طول می کشد تا مقدار ضریب تکثیر بینهایت به زیر حد یک برسد تعریف می گردد. همانگونه که ملاحظه می شود، طول سیکل مربوط به سوخت UN^{15} بنحو قابل ملاحظه ای از دیگر سوخت ها بیشتر است. بگونه ای که می توان گفت طول سیکل در مقایسه با سوخت معمول UO_2 طول سیکل $1/6$ برابر شده است.

جدول ۳: مقدار راکتیویته اضافی با پایداری سیکل

نوع سوخت	راکتیویته اضافی ($m \frac{\Delta K}{K}$)
UO_2	۱۷۷/۰
UN^{15}	۱۸۶/۷
UN	۶۹/۰
UC	۱۰۴/۷



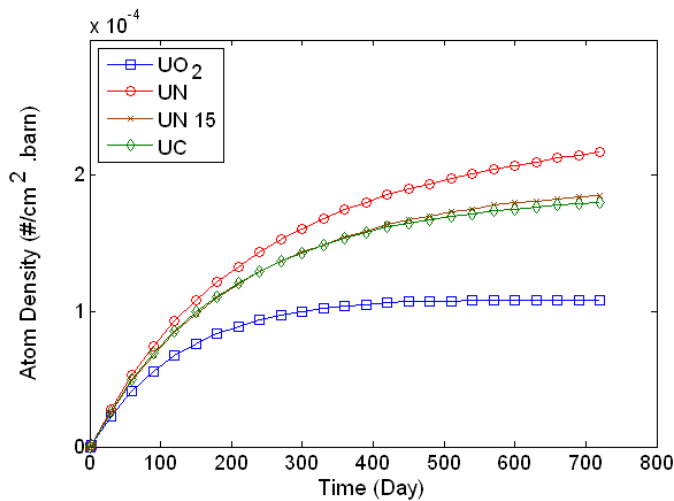
شکل ۲: تغییرات ضریب تکثیر بینهایت بر نسبت به زمان

این موضوع سبب می گردد تا به لحاظ نوترونیکی سوخت UN^{15} جهت ارزیابی ترموهیدرولیکی انتخاب گردد. در شکل ۳ تغییرات چگالی اتمی ایزوتوپ Pu^{239} بر اساس مصرف سوخت، نشان داده شده است. همانگونه که ملاحظه می گردد، نرخ تولید این ایزوتوپ شکافان در سوخت UN دارای بیشترین مقدار می باشد، درحالی که در مورد سوخت UN^{15} رفتاری میانی دارد. مقایسه این شکل با جدول ۴ این نکته را آشکار می سازد که علی رغم ماکزیمم نبودن نرخ تولید Pu^{239} در سوخت UN^{15} ، ارزش پلوتونیوم تولیدی در راکتور با این نوع سوخت بیشترین مقدار را دارد.



بیست و یکمین کنفرانس هشتای ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

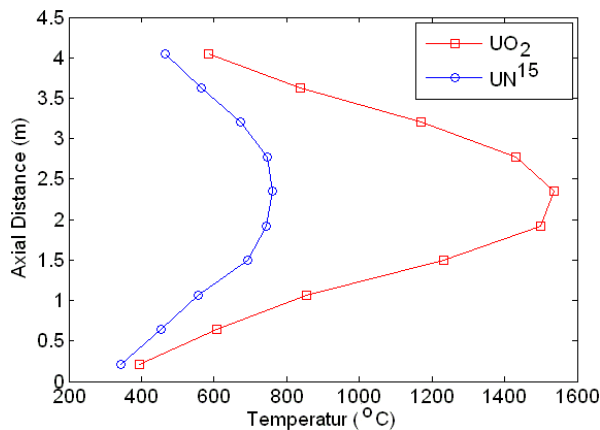


شکل ۳: تغییرات چگالی اتمی ایزوتوپ ²³⁹Pu با گذشت زمان

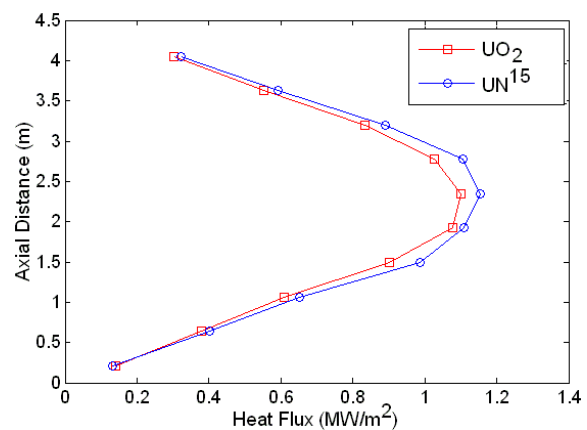
جدول ۴: مقادیر طول سیکل سوخت‌های مختلف

نوع سوخت	طول سیکل (روز)	مصرف سوخت (up)
UO ₂	۴۵۰	۲۶۱
UN ¹⁵	۷۲۰	۳۰/۰
UN	۳۳۰	۱۳/۶۷
UC	۳۰۰	۱۳/۰

شکل‌های ۴ و ۵ به ترتیب توزیع شار حرارتی و توزیع درجه حرارت مرکز گرم‌ترین میله سوخت را در راستای محوری برای دو نوع سوخت نیتریدی و اکسیدی نشان می‌دهند. از مقایسه این دو شکل واضح است که علی‌رغم تولید شار حرارتی بیشتر در سوخت نیتریدی، دمای مرکز سوخت آن به مراتب کمتر از سوخت اکسیدی است. بیشترین دمای مرکز سوخت‌های UO₂ و UN¹⁵ به ترتیب ۱۵۳۶ و ۷۶۱ درجه سانتی‌گراد است. مهم‌ترین دلیل این مسئله می‌تواند ضریب انتقال حرارت هدایتی بالای سوخت نیتریدی نسبت به سوخت اکسیدی باشد. با این وجود نتایج محاسبات کد COBRA نشان می‌دهد که معیار DNBR با تعویض سوخت تغییر چندانی پیدا نمی‌کند. کمترین مقدار این کمیت در سوخت‌های UO₂ و UN¹⁵ به ترتیب ۱/۸۳۷ و ۱/۷۵ می‌باشد. در شکل ۶ گرادیان شعاعی دما برای سوخت‌های نیتریدی و اکسیدی نشان داده شده است. همانگونه که ملاحظه می‌گردد سوخت UO₂ نسبت به UN¹⁵ تحت گرادیان دمایی شدید تری قرار دارد.



شکل ۵: توزیع دمایی مرکز سوخت در راستای محوری، مربوط به گرم‌ترین



شکل ۴: توزیع شار حرارتی در در راستای محوری، مربوط به گرم‌ترین

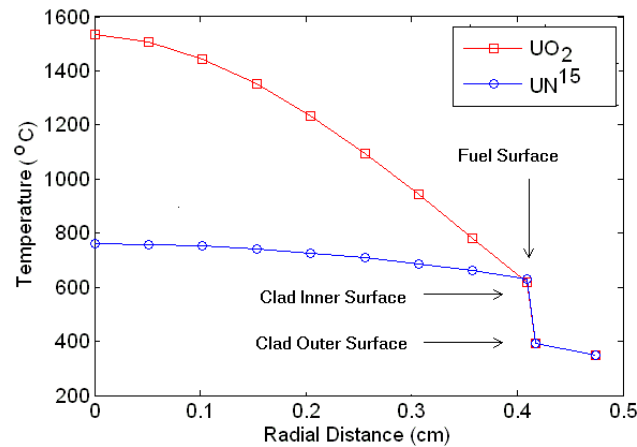


بیست و یکمین کنفرانس هشتای ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

میله سوخت

میله سوخت



شکل ۶: گرادیان شعاعی دما مربوط به گرم ترین میله سوخت

بحث و نتیجه گیری

استفاده از سوخت UN^{15} بجای سوخت معمول UO_2 بوضوح دارای تأثیر مثبتی در افزایش طول سیکل راکتور است، به نحویکه طول سیکل راکتور با فاکتور ۱/۶ افزایش خواهد یافت. ضریب هدایت حرارتی سوخت UN^{15} شش برابر بزرگتر از سوخت UO_2 است که در عملکرد ترموهیدرولیکی راکتور تأثیر بسزایی داشته و گرادیان دمایی قرص سوخت را بشدت کاهش می دهد درحالیکه معیار $DNBR$ کاهش چندانی پیدا نمی کند. این موضوع بدین معنی است که در صورت استفاده از سوخت جایگزین UN^{15} قادر خواهیم بود توان حرارتی راکتورهای نسل فعلی را نیز به مقدار قابل ملاحظه ای افزایش دهیم.

مراجع

- [1] M. Toyama; "Next-generation Pressurized Water Reactor (PWR)-Development of Environmentally- friendly, High effective, Economical, and 3S achievable automatic type plant Mitsubishi Heavy Industries Technical Review"; **44**, No. 4 (Dec.2009).
- [2] B. Feng, E. Shwageraus, B. Forget and M.S. Kazimi; "Light Water Breeding with Nitride fuel"; Prog.Nucl. Energy **53**, No. 7 (2011) 862-866.
- [3] M. T. Simnad; "Nuclear Reactor Materials and Fuels"; Prog.University of California, Sandiago (2005).
- [4] "Design Control Document for the US-APWR";, Mitsubishi Heavy Industries, LTD. Revision 3, Chapter 4 (2011), Tokyo, Japan. www.nrc.gov