Archive of SID

علوم و تکنولوژی محیط زیست، دوره بیست و دوم، شماره یازده، بهمن ماه ۹۸

نسل جدید راکتورهای هسته ای، ADS

جواد کریمی [*۱]

javadkarimi235@yahoo.com

محمد مهدی فیروزآبادی [۲]

تاریخ دریافت: ۹۴/۷/۱۸ **تاریخ پذیرش:۹۵/۱/۲۵**

چکیده

زمینه و هدف: امروزه راکتورهای هسته ای به عنوان یکی از منابع اصلی تولید انرژی در دنیا به طور قابل توجهی در حال توسعه می باشد. از معایب اصلی راکتورهای هسته ای تولید زباله های هسته ای بوده که این زباله ها به دلیل نیمه عمر و مسمومیت پرتوی بالا دارای اثرات مخرب محیط زیستی هستند. در این تحقیق نسل جدیدی از راکتور های هسته ای با عنوان ADS معرفی می شود که در آن از زباله های هسته ای به عنوان سوخت استفاده می شود.

مواد و روش ها : با بررسی راکتور های هسته ای ADS ، مفهوم ADS و بخش های اصلی تشکیل دهنده این نوع از راکتور و نیز نحوه عمل کرد آن بیان می شود.

یافته ها: این نسل جدید از راکتورهای هسته ای (ADS) دارای این قابلیت بوده که زباله های هسته ای شامل عناصر فرا اورانیومی و پاره های شکافت هسته ای را به عناصری کم خطر و با نیمه عمر و مسمومیت پرتوی پایین تبدیل نماید. هم چنین مزیت مهم آن نسبت به سایر راکتور های هسته ای یعنی ایمن بودن آن بیان می شود.

بحث و نتیجه گیری: با توجه به اهمیت توسعه راکتور های هسته ای به عنوان یک منبع اصلی تولید انرژی، باید در مسیر توسعه فناوری صلح آمیز هسته ای در کشور از روش هایی استفاده شود تا میزان بازدهی آن حداکثر و در عین حال اثرات مخرب محیط زیستی آن به حداقل برسد. استفاده از نسل جدید راکتور های هسته ای (ADS) یکی از این روش ها است.

واژه های کلیدی: راکتور ADS، قلب زیر بحرانی، هدف تلاشی، تبدیل

۱-دانشجوی دکتری فیزیک هسته ای، دانشگاه جامع امام حسین(ع)[*](مسوول مکاتبات)

۲-دانشیار گروه فیزیک دانشگاه بیرجند

www.SID.ir

Archive of SID

J. Env. Sci. Tech., Vol 22, No.11, January, 2020

The new generation of nuclear reactors, ADS

Javad Karimi [1]*

javadkarimi235@yahoo.com

Mohammad Mehdi Firooz Abadi [2]

Admission Date:April 13, 2016 Date Received: October 10, 2015

Abstract

Background and Objective: Today, nuclear reactors as a major source of energy in the world, is developing considerably. The main disadvantage of nuclear reactors is producing nuclear waste. This waste is due to the half-life and high environmental impact is radiation poisoning. In this study a new generation of nuclear reactors as ADS introduced where the nuclear waste is used as fuel.

Method: Examining ADS nuclear reactors, the concept of ADS and the main components of this type of reactor and how it works are described.

Findings: This new generation of nuclear reactors (ADS) has the ability to convert nuclear waste, including meta-uranium elements and fragments of nuclear fission, into low-risk elements with low half-life and low beam toxicity. Its important advantage over other nuclear reactors is that it is safe.

Discussion and Conclusions: Given the importance of developing nuclear reactors as a major source of energy production, methods should be used to develop peaceful nuclear technology in the country to maximize its efficiency while minimizing its destructive environmental effects. . The use of a new generation of nuclear reactors (ADS) is one such method.

Key words: ADS Reactor, Subcritical Core, Spallation Target, Transmutation

1- PhD Student, Nuclear Physics, Imam Hossein Comprehensive University*(Corresponding Authours).
2- Associate Professor, Department of Physics, University of Birjand

www.SID.ir

Archive of SID

مقدمه

امروزه یکی از نگرانی های اصلی بشر درباره راکتورهـای هسـته ای، مسأله‌ی زباله های حاصل از آن ها بوده که بـه طـور چشـم گیری در حال افزایش است. این زباله‌ها دارای مسمومیت پرتوی بسیار بالایی بوده و برای انسان و سایر موجودات خطرناک انـد. هم چنین بعضی از عناصر موجود در ایـن زبالـه‌هـا دارای نیمـه عمرهای بسیار طولانی از مرتبه صد هزار سال و بالاتر هسـتند (۱). لذا اگر این زباله ها را بدون هیچ گونه تغییری مسقیماً دفن کنیم، مسلماً آثار زیان بار آن ها برای سال های طولانی متوجـه انسان و محیط زندگی او خواهـد بـود. بنـابراین لازم اسـت کـه پیش از دفن، با اعمال تغییراتی در ساختار این عناصر آن هـا را به عناصری کم خطرتر و با نیمه عمر پایین تبدیل نماییم. بـرای رفع این مشکل راه کارهایی پیشنهاد شده است که یکی از ایـن راه کارها استفاده از نسل جدید راکتورهای هسته ای بـا عنـوان ADS، به منظور تبدیل این زباله ها می باشـد(۲)کـه بـه طـور قابل توجهی مورد استقبال کشورهای مختلف قرار گرفته اسـت. در حال حاضر طراحی، ساخت و توسعه این نـوع از راکتـور هـا بطور گسترده در بعضی از کشورها در حال انجام اسـت. در ایـن تحقیق بـه معرفـی ایـن نسـل جدیـد از راکتورهـای هسـته ای پرداخته می شـود و بخـش هـای مختلـف آن، نحـوه عملکـرد، کاربرد ها و مزیت مهم آن نسبت به راکتورهـای امـروزی یعنـی ایمن بودن آن تشریح می شود.

روش بررسی

مفهوم ADS

از لحاظ تاریخی، اولین بار مفهوم راکتورهـای هسـته ای ADS در حدود ۵۰ سال قبل مطرح شده است(۳)، اما در آن زمان بـه دلیل کمبود امکانات از جمله شتاب دهنده هایی با انـرژی بـالا (شتاب دهنده از بخش های اصلی یک راکتور هسـته ای ADS است) به طور جدی دنبال نشده است. اما ایـن مفهـوم در سـال های بعد توسط دانشمندانی چونFurukawa، Bowman و Rubbiaدوباره پیگیری و احیاء شد و در حال حاضر نمونه های تحقیقاتی آن در کشورهای مختلف سـاخته شـده اسـت و تـیم های تحقیقاتی بزرگی در دنیا در حال تحقیق و بررسی روی این نمونه ها به منظور ساخت راکتورهای ADS در مقیاس بزرگ و صنعتی هستند(۳). راکتور ADS نسل جدیـدی از راکتورهـای هسـته‌ای اسـت کـه در آن ADS از عبـارت Accelerator Driven subcritical System گرفته شـده اسـت(۴) و بـه معنی سیستم های زیر بحرانی واداشته با شـتاب دهنـده اسـت. این راکتور ها با نام راکتورهای هیبریدی نیز شناخته می شوند، زیرا با استفاده از زباله های هسته ای حاصل از سایر راکتورها در ساختار میله های سوخت علاوه بر تولید انرژی، ایـن قابلیـت را دارند که این زباله‌ها را به عناصری کـم خطـر و بـا مسـمومیت پرتوی و نیمه عمر پایین تبدیل نمایند(۲). همان طور که بیـان شد از ویژگی های مهم این نـوع از راکتورهـای هسـته ای، زیـر بحرانی بودن آن ها است.

مفهوم زیر بحرانی بودن

در راکتورهای هسته ای پارامتری تحـت عنـوان ضـریب تکثیـر مؤثر (K_{eff}) به صورت زیر تعریف می شود:

نسبت تعداد نوترون های تولید شده در هر مرحله (i) از فرآینـد شکافت به تعداد نوترون هـای تولیـد شـده در مرحلـه (i-1) از فرآیند شکافت (۵).

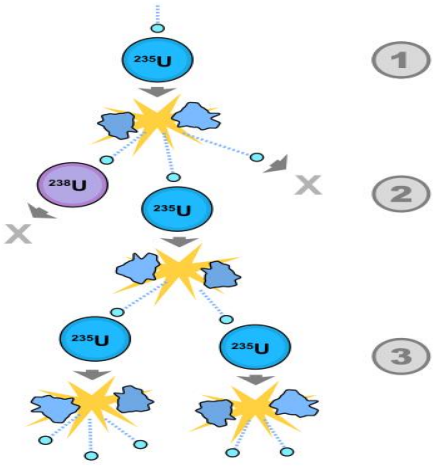
$$(K_{eff}) = \frac{\text{تعداد نوترون های تولیدشده در مرحله } (i) \text{ از فرایند شکافت}}{\text{تعداد نوترون های تولیدشده در مرحله } (i-1) \text{ از فرایند شکافت}}$$

ضریب تکثیر موثر

در واقع این پارامتر تغییرات جمعیت نوترون هـا را بـا گذشـت زمان و پیشرفت بر هم کنش های مختلف نوترون در قلـب یـک راکتور هسته‌ای نشان می دهد. نوترون های موجود در قلب یک راکتور هسته ای با برهم کنش های مختلفی مواجه مـی شـوند. بعنوان نمونه، شکل (۱) طرحی از فرایند شکافت اورانیـوم ۲۳۵ را به عنوان یک هسته شکاف پذیر در قلب یک راکتور هسته ای نشان می دهد. طبق این شکل در اولین گام یک نوترون توسـط اورانیوم ۲۳۵ گیر اندازی شده و هسته مرکب تشکیل می شـود. این هسته مرکب شـکافته شـده و در اثـر ایـن فرآینـد انـرژی،

www.SID.ir

پرتوهای گاما، پاره‌های شکافت و تعدادی نوترون تولید می شوند. این امکان وجود دارد که برای نوترون های تولید شده در شکافت اورانیوم ۲۳۵ فرآیند های گیر اندازی در عناصر موجود در قلب راکتور شامل گیر اندازی در اورانیوم ۲۳۸، گیراندازی توسط عناصر غیر سوختی مثل میله‌های کنترل، گیر اندازی در اورانیوم ۲۳۵ و نیز نشت به خارج از قلب راکتور اتفاق بیفتد که در فرآیند گیر اندازی توسط اورانیوم ۲۳۵، با احتمال زیاد فرآیند شکافت مجدد در قلب راکتور رخ می دهد و موجب افزایش جمعیت نوترون ها در قلب راکتور می شود. بنابراین وقوع چنین فرآیند هایی برای نوترون های تولید شده در هر مرحله از فرایند های زنجیره ای شکافت در قلب راکتور، می تواند جمعیت نوترون ها را تحت تاثیر قرار دهد(کاهش، افزایش و یا عدم تغییر در جمعیت نوترون ها).



شکل ۱- نحوه تکثیر نوترون در قلب یک راکتور هسته ای

Figure 1. neutron multiplication in the core of a nuclear reactor

با توجه به بر هم کنش های مختلف نوترون و میزان مصرف عناصر شکافای موجود در قلب یک راکتور هسته ای، برای ضریب تکثیر مؤثر سه حالت متفاوت را در نظر می گیریم(۵):

الف) حالت فوق بحرانی (K_{eff}> ۱): در این حالت مقدار ضریب تکثیر موثر بزرگتر از یک بوده و بدین معناست که با گذشت زمان و پیشرفت بر هم کنش های مختلف نوترون در قلب راکتور، جمعیت نوترون ها نسبت به حالت اولیه بیش تر می شود. در واقع در چنین وضعیتی با یک فرآیند انفجاری روبه رو هستیم. این وضعیت در بمب های هسته ای اتفاق می افتد. راکتور های معمولی نیز که به صورت بحرانی (K_{eff}= ۱) عمل می کنند ممکن است با چنین وضعیتی مواجه شوند. مثل حادثه نیروگاه هسته ای چرنوبیل در کشور اوکراین که در آوریل سال۱۹۸۶ اتفاق افتاد و به این علت که متصدیان راکتور برای انجام آزمایشی، سیستم ایمنی راکتور را غیر فعال کرده بودند (خارج کردن کند کننده های نوترون از قلب) راکتور به حالت فوق بحرانی و انفجاری رسیده و ایجاد انفجار موجب پخش مواد رادیو اکتیو و وقوع فاجعه انسانی و محیط زیستی شد، بطوری که مردم این مناطق با گذشت چندین سال هنوز هم از عوارض و بیماری های ناشی از این فاجعه رنج می برند(۶).

ب) حالت بحرانی (K_{eff}= ۱): در این حالت مقدار ضریب تکثیر موثر برابر یک و یا تقریباً برابر یک بوده، یعنی با گذشت زمان و پیشرفت برهم کنش‌های مختلف نوترون در قلب راکتور جمعیت نوترون ها تقریباً ثابت است. اکثر راکتورهای امروزی در وضعیت بحرانی عمل می کنند.

ج) حالت زیر بحرانی (K_{eff}<۱): در این حالت، مقدار ضریب تکثیر موثر کوچک تر از یک بوده، یعنی با گذشت زمان و پیشرفت بر هم کنش های نوترون در قلب راکتور جمعیت نوترون ها نسبت به حالت اولیه کاهش می یابد و در نهایت راکتور خاموش می شود.

راکتورهای ADS نیز به صورت زیر بحرانی (K_{eff}<۱) عمل می کنند(۷)؛ یعنی با گذشت زمان جمعیت نوترون‌ها در قلب

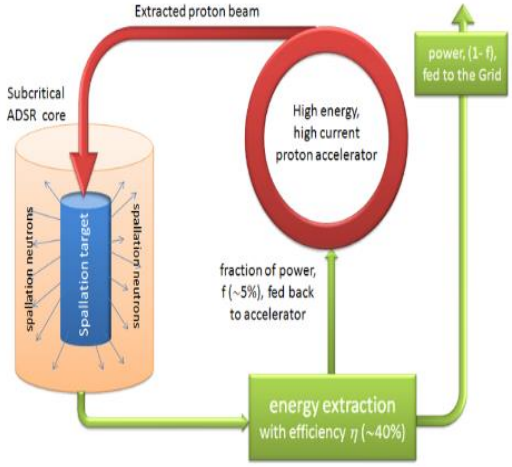
www.SID.ir

Archive of SID

راکتور کاهش می یابد. بنابراین برای جلوگیری از کاهش جمعیت نوترون ها و حفظ راکتور در وضعیت بحرانی باید قلب راکتور به وسیله یک چشمه نوترون خارجی تغذیه شود و این چشمه نوترون به وسیله فرآیند متلاشی شدن هدف واقع در مرکز قلب زیر بحرانی راکتور ایجاد می شود(۷).

بخش های اصلی یک راکتور هسته ای ADS

به طور کلی یک راکتور هسته ای ADS از دید فیزیکی شامل سه بخش مهم است که عبارتند از(۸):



شکل۲- سه بخش اصلی یک راکتور هسته ای ADS

Figure 2. The three main components of a nuclear reactor ADS

الف) شتاب دهنده

یکی از بخش های اصلی یک راکتور ADS، شتاب دهنده است و یکی از مشکلات پیش روی، به منظور توسعه این نوع از راکتورها، ساخت شتاب دهنده است، زیرا ساخت آن از لحاظ فنی مشکل و نیازمند به کارگیری تکنولوژی های روز دنیا است. شتاب دهنده ها به اشکال مختلف از جمله شتاب دهنده های خطی، سیکلوترون ها، سینکروترون‌ها و ... ساخته می شوند. در یک راکتور ADS از شتاب دهنده برای شتاب دادن و در نتیجه ایجاد باریکه ای از ذرات باردار مانند پروتون (P) و دوترون (D) استفاده می شود. این ذرات تا انرژی های بالا از مرتبه چند GeV، شتاب داده می شوند و در یک مسیر خلاء (برای جلوگیری از اتلاف انرژی) به سمت هدف تلاشی واقع در مرکز قلب زیر بحرانی هدایت می شوند(۹).

ب) هدف تلاشی

یکی دیگر از بخش های اصلی یک راکتور ADS، هدف تلاشی بوده که در مرکز قلب زیربحرانی قرار دارد(۱۰). در یک راکتور ADS پس از این که ذرات باردار توسط شتاب دهنده، شتاب داده شدند، به سمت هدف تلاشی واقع در مرکز قلب زیر بحرانی هدایت می شوند و در آن جا در اثر برخورد ذرات باردار پر انرژی (از مرتبه چند GeV) با هدف، فرآیند تلاشی رخ می دهد (شکل (۳)). در اثر این برخورد نوعی برهم کنش هسته‌ای موسوم به آبشار درون هسته ای اتفاق می افتد و به ازای هر ذره باردار شتاب دار فرودی (مثلاً پروتون) تعدادی نوترون، پروتون، پایون و سایر ذرات در فرایند تلاشی ایجاد می شوند که تعداد ذرات تولید شده به ویژه نوترون ها با افزایش انرژی ذره باردار شتاب دار فرودی افزایش می یابند. از طرفی این تعداد به نوع

الف) شتاب دهنده

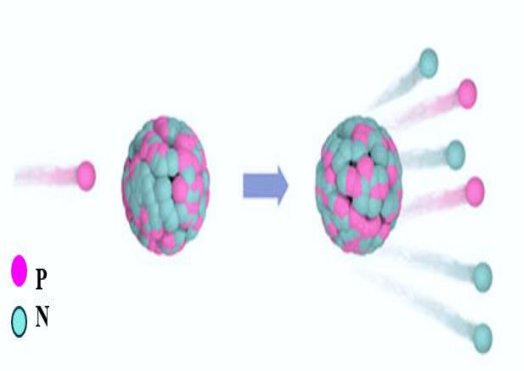
ب) هدف تلاشی

ج) قلب زیر بحرانی

شکل (۲) طرحی کلی از یک راکتور هسته ای ADS را نشان می دهد که در آن سه بخش اصلی یعنی شتاب دهنده، هدف تلاشی و قلب زیر بحرانی نمایش داده شده است.

www.SID.ir

ماده‌ی مورد استفاده به عنوان هدف نیز بستگی دارند. برای انتخاب هدف مناسب، تحقیقات گسترده‌ای در آزمایشگاه های بزرگ دنیا از جمله مرکز MEGAPIE در حال انجام است (۱۱).



شکل۳- فرایند تلاشی هسته هدف در اثر برخورد با پروتون شتاب داده شده

Figure 3. The process of spallation target in collisions with proton accelerated

ماده ای که به عنوان هدف در فرآیند تلاشی استفاده می شود باید دارای ویژگی‌های خاصی باشد از جمله اینکه(۱۱،۱۰):

۱. عنصری با عدد اتمی (Z) بالا باشد زیرا به ازای یک پروتون با انرژی مشخص هر چه هدف تلاشی سنگین تر باشد، تعداد نوترون بیش تری تولید می شود.

۲. در اثر برخورد ذرات باردار با هدف تلاشی، به علت بالا بودن انرژی ذره پرتابه (در حد چند GeV)، دما در ماده‌ی هدف بسیار بالا بوده و هدف می تواند ذوب شود. بنابراین باید در انتخاب ماده هدف از عنصری استفاده شود که دارای نقطه‌ی ذوب بالایی باشد.

۳. در اثر برخورد پروتون‌های پر انرژی با هدف، یک فرآیند هسته‌ای رخ می دهد و در اثر این بر هم‌کنش ماده‌ی سمی پلونیوم(polonium) و نیز برخی پرتوهای خطرناک تولید می شوند. بنابراین باید از عنصری استفاده شود که مقدار پلونیوم و تشعشات کم تری ایجاد نماید.

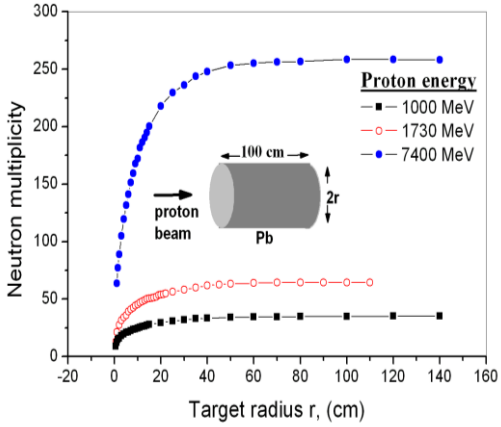
۴. عنصری انتخاب شود که در اثر برخورد پروتون‌های پر انرژی، کم تر دچار خوردگی شود تا در بازه‌های زمانی طولانی تر بتوان هدف تلاشی شده موجود در مرکز قلب زیر بحرانی را تعویض نمود.

در حال حاضر از تنگستن (W)، سرب-بیسموت (Pb-Bi) و سرب (Pb) به عنوان ماده هدف در فرآیند تلاشی استفاده می شود (۱۲).

شکل (۴) نمودار مربوط به شبیه سازی فرآیند تلاشی هدف سرب را نشان می دهد که این شبیه سازی با استفاده از کد محاسباتی هسته ای MCNPX انجام شده است(۱۳). در این شبیه سازی یک ساختار استوانه ای از جنس سرب بعنوان هدف در نظر گرفته شده است و برای پروتون هایی با انرژی های ۱۰۰۰، ۱۷۳۰ و ۷۴۰۰ مگا الکترون ولت (MeV) نمودار تعداد نوترون های تولیدی به ازای یک پروتون در فرآیند تلاشی (محور قائم) بر حسب شعاع هدف استوانه ای (محور افقی) رسم شده است. طبق این نمودار به طور کلی می توان گفت که با افزایش انرژی پروتون فرودی تعداد نوترون های تولیدی به ازای یک پروتون نیز در فرآیند تلاشی افزایش می یابد. بنابراین هرچه شتاب دهنده مورد استفاده در یک راکتور هسته ای ADS قوی تر باشد، مسلماً بازدهی راکتور نیز بیشتر خواهد بود. هم چنین تعداد نوترون های تولیدی در فرآیند تلاشی به شعاع ماده هدف استوانه ای (سرب) نیز بستگی دارد.

www.SID.ir

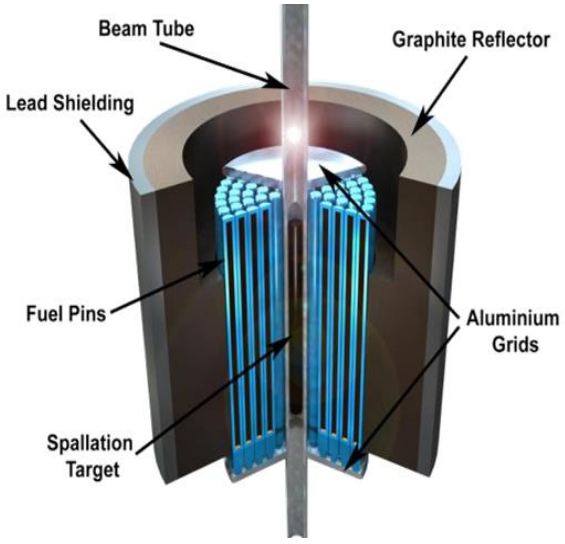
Archive of SID



شکل۴- نمودار تعداد نوترون های تولیدی به ازای یک پروتون فرودی با انرژی های ۱۰۰۰، ۱۷۳۰ و ۷۴۰۰ مگا الکترون ولت در فرایند تلاشی برای هدف سرب(۱۳)

Figure 4. Diagram number of neutrons produced per individual protons with energies of 1000, 1730 and 7400MeV in spallation process for lead target (13)

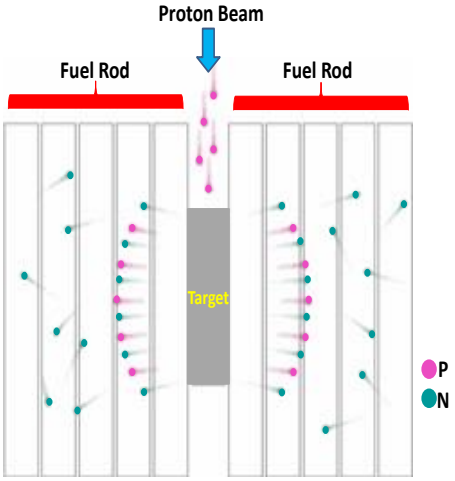
ج) قلب زیر بحرانی: یکی از مهم ترین بخش های یک راکتور ADS، قلب زیر بحرانی آن است که مطابق شکل (۵) در اطراف هدف تلاشی قرار می گیرد(۱۴). در ساختار قلب زیر بحرانی میله های سوخت درون خنک کننده راکتور قرار دارند طوری که در میله‌های سوخت از زباله های هسته‌ای به منظور تبدیل آن ها استفاده می شود. در اثر وقوع فرآیند تلاشی در ماده هدف، تعداد زیادی نوترون سریع تولید می شوند و این نوترون-های سریع در محیط خنک کننده و کند کننده (معمولا آب) پخش شده و به سمت میله‌های سوخت واقع در قلب زیر بحرانی حرکت می‌کنند (مطابق شکل (۶)).



شکل۵- ساختار قلب زیر بحرانی

Figure 5. Sructure of sub critical core

www.SID.ir



شکل۶- فرآیند تلاشی و حرکت نوترون‌های سریع به سمت قلب زیر بحرانی

Figure 6.The process of spallation and Moving fast neutrons to the sub critical core

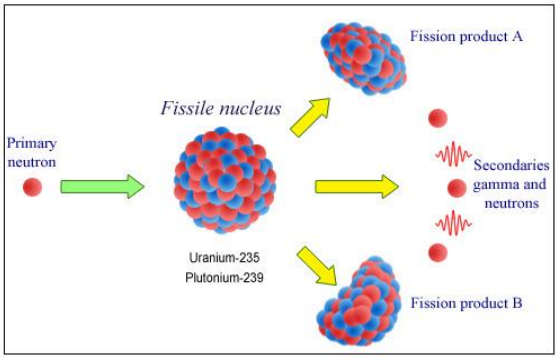
زباله های هسته ای

امروزه به کارگیری مواد رادیو اکتیو در پزشکی، مراکز تحقیقاتی، نیروگاه های هسته ای و نیز بازیافت سوخت های مصرف شده، منجر به تولید پسماند های رادیو اکتیو می گردد. این پسماند ها حاوی رادیو نوکلوییدها با نیمه‌عمر بالا و متوسط هستند(۱۵).

پسماند های پرتوزا حاوی رادیو ایزوتوپ ها هستند و رادیو ایزوتوپ ها آرایشی از عناصرند که واپاشی می کنند و تابش یونی دارند و برای انسان و محیط زیست خطرناک می باشند. این ایزوتوپ ها انواع و سطوح مختلفی از تابش دارند که در یک بازه زمانی تابششان ادامه دارد. میزان پرتوزایی پسمان های پرتوزا از مقادیر کم(در حد مقادیر پرتوزایی طبیعی) تا مواد با پرتوزایی بالا که در باز فرآوری سوخت مصرف شده حاصل می شوند تغییر می کند. در حال حاضر مهم ترین زباله های هسته ای موجود از راکتورهای هسته ای حاصل می شوند و عبارتند از:

۱. پاره های شکافت

در راکتور در اثر گیراندازی نوترون توسط عناصر شکافا مانند اورانیوم ۲۳۳، اورانیوم ۲۳۵ و پلوتونیوم ۲۳۹، هسته‌ی مرکب تشکیل شده و در نهایت این هسته مرکب شکافته می شود. به ازای هر شکافت انرژی، دو پاره شکافت، تعدادی نوترون آنی و تاخیری و پرتوهای گاما گسیل می شوند (مطابق شکل (۷)). برخی از پاره های شکافت با مسمومیت پرتوی و نیمه عمر بالا عبارتند از(۳): ^{99}Tc, ^{129}I, ^{93}Zr



شکل۷- فرایند شکافت اورانیوم ۲۳۵

Figure 7. U-235 fission process

۲. عناصر فرا اورانیومی

عناصری با اعداد جرمی بالاتر از سنگین ترین عنصر طبیعی (اورانیوم) را به عنوان عناصر فرا اورانیومی می شناسیم. این عناصر در اثر گیراندازی های متوالی نوترون توسط اورانیوم در قلب یک راکتور هسته ای به وجود می آیند. بعضی از این عناصر دارای میزان مسمومیت پرتوی و نیمه عمر بسیار بالا

www.SID.ir

Archive of SID

بوده و آن ها را به عنوان زباله هسته ای می شناسیم. برخی از این عناصر عبارتند از(۳):

^{240}Pu, ^{241}Pu, ^{241}Am, ^{243}Am, ^{243}Cm, ^{244}Cm

در جدول ۱ نیمه عمر و میزان اکتیویته بعضی از ایزوتوپ ها بیان شده است.

جدول۱- نیمه عمر و اکتیویته تعدادی از عناصر فرا اورانیومی و پاره های شکافت(۵)

Table 1. The half-life and activity of transuranic elements and fission fragment (5)

Isotope	Half time(Year)	Activity(Bq)
^{93}Zr	1.53×10^{6}	1.33×10^{15}
^{99}Tc	2.13×10^{5}	1.03×10^{16}
^{126}Sn	1.00×10^{5}	0.43×10^{15}
^{129}I	1.57×10^{7}	0.24×10^{14}
^{235}U	7.04×10^{8}	1.64×10^{13}
^{236}U	2.34×10^{7}	1.95×10^{14}
^{237}Np	2.14×10^{6}	0.21×10^{15}
^{238}Pu	8.77×10^{1}	1.94×10^{18}
^{239}Pu	2.41×10^{4}	0.26×10^{18}
^{241}Am	4.42×10^{2}	0.52×10^{18}
^{243}Am	7.38×10^{3}	1.51×10^{18}
^{245}Cm	8.53×10^{3}	0.35×10^{15}

در حال حاضر یکی از بزرگ ترین مشکلات راکتورهای هسته ای امروزی، مشکل پسمانداری زباله های حاصل از آن ها است. این زباله ها معمولا بسیار خطرناک و سمی بوده و اگر آن ها را مستقیماً و بدون هیچ تغییری در ساختار آن ها دفن کنیم، مسلماً به دلیل نیمه عمرهای طولانی و تابش دهی زیاد، خطرات زیادی برای انسان و محیط زیست خواهند داشت. یکی از راه کارهای ممکن، تبدیل این زباله ها پیش از دفن آن ها است.

نحوه‌ی عمل کرد یک راکتور هسته ای ADS به طور مختصر

همان طور که بیان شد یک راکتور هسته ای ADS از سه بخش اصلی تشکیل شده است: ۱. شتاب دهنده ۲. هدف تلاشی ۳. قلب زیر بحرانی

در راکتور ADS ابتدا ذره‌ی باردار، توسط شتاب دهنده تا انرژی های بالا (از مرتبه GeV) شتاب داده می شود. سپس این باریکه از ذرات باردار شتاب دار، به سمت هدف تلاشی واقع در مرکز قلب زیر بحرانی هدایت می شود (برای جلوگیری از اتلاف انرژی ذرات باردار شتاب دار، این ذرات در یک مسیر خلاء به سمت هدف هدایت می شوند). در اثر برخورد ذرات باردار پر انرژی (مثل پروتون ها) با هدف، فرآیند تلاشی اتفاق می افتد و به ازای هر پروتون تعدادی نوترون تولید می شود که تعداد و انرژی نوترون های تولید شده به نوع و انرژی ذره باردار شتاب دار و نیز نوع هدف تلاشی بستگی دارد. نوترون های تولید شده به سمت قلب زیر بحرانی که در اطراف هدف تلاشی قرار دارد حرکت می کنند. در ساختار قلب زیر بحرانی میله‌های سوخت قرار دارند، طوری که عناصر مورد استفاده در ساختار میله های سوخت عبارتنداز (۵):

۱. عناصر غیر شکافای اورانیوم ۲۳۸ و توریوم ۲۳۲:

این عناصر در راکتور های حرارتی به دلیل پایین بودن سرعت نوترون ها کارایی ندارند، اما در راکتور های هسته ای ADS به دلیل وجود چشمه خارجی تولید نوترون های سریع، قابلیت تبدیل به عناصر شکافا را دارند.

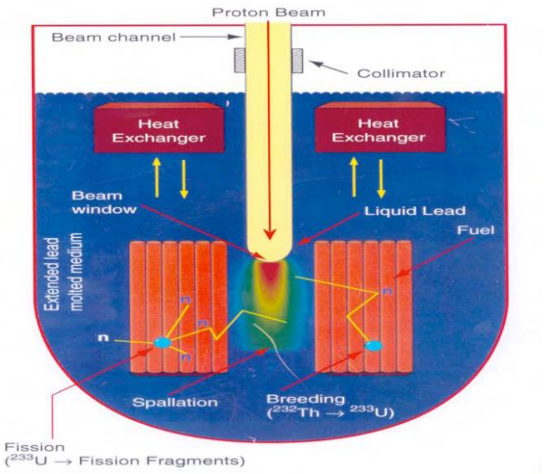
۲. استفاده از زباله های هسته ای از نوع عناصر فرا اورانیومی با هدف تبدیل و تولید انرژی از آن ها.

www.SID.ir

۳. به کارگیری زباله های هسته ای از نوع پاره های شکافت به منظور تبدیل این عناصر به عناصری با نیمه عمر پایین در میله‌های سوختی که بیش ترین فاصله را از مرکز قلب راکتور دارند. در واقع سطح مقطع گیراندازی نوترون های با انرژی پایین توسط پاره ای شکافت زیاد بوده و از طرفی با افزایش فاصله از مرکز قلب راکتور، انرژی نوترون ها ی موجود در قلب نیز به تدریج کاهش می یابد. بنابراین بهترین محل برای قرارگیری و تبدیل پاره های شکافت نقاطی است که بیش ترین فاصله را از مرکز قلب راکتور دارند.

۴. به کارگیری عناصر شکافا هم چون اورانیوم ۲۳۵ در ساختار میله ها ی سوخت به منظور راه اندازی قلب راکتور در ابتدای شروع فعالیت آن.

شکل (۸) طرحی از قلب یک راکتور هسته ای ADS را نشان می دهد که در آن وقوع فرآیند تلاشی و حرکت نوترون های سریع تولید شده به سمت قلب زیر بحرانی نمایش داده شده است. در این راکتور از سرب مذاب به عنوان خنک کننده استفاده شده است .



شکل۸- قلب راکتور هسته ایADS

Figure 8. ADS nuclear reactor core

نتایج

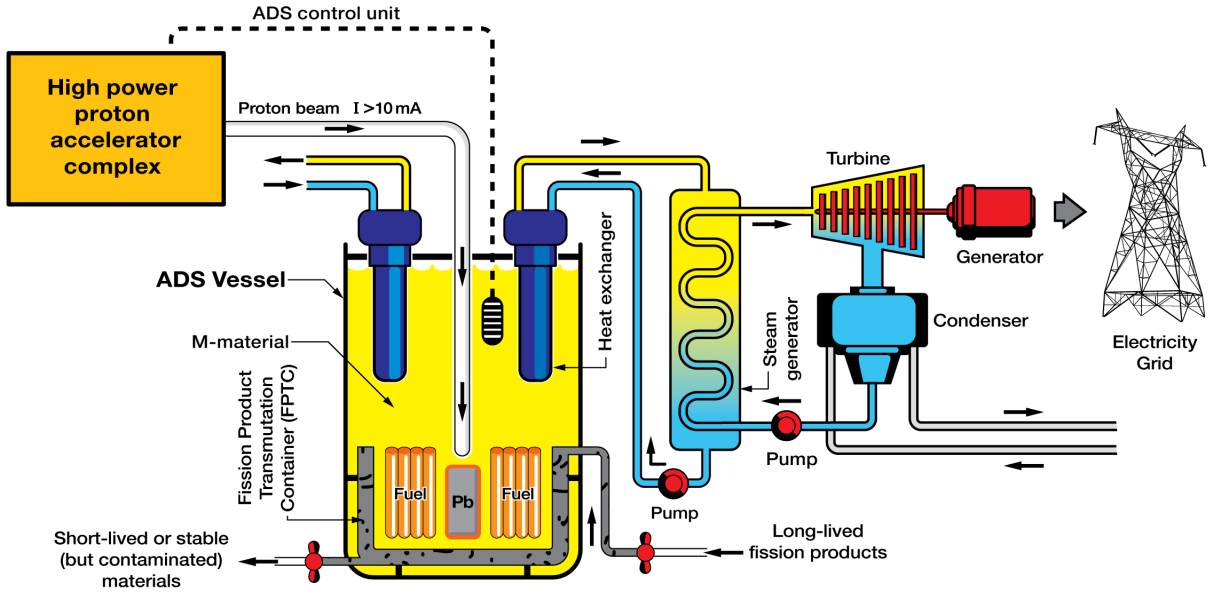
کاربرد های اصلی راکتور هسته ای ADS

الف) تولید الکتریسیته

در این راکتور نیز مانند همه‌ی راکتورهای هسته‌ای دیگر، در اثر گیراندازی نوترون در مواد شکافا و وقوع فرآیند شکافت، انرژی تولید می شود. این انرژی به خنک کننده منتقل شده و باعث افزایش دمای آن می شود. در نهایت در اثر چرخش خنک کننده (آب) بین داخل و خارج قلب راکتور و بخار شدن آن، توربین ها به چرخش در آمده و انرژی الکتریسیته تولید می‌شود (مطابق شکل (۹)).

www.SID.ir

Archive of SID



شکل۹- طرح یک نیروگاه هسته ای ADS (۱۳)

Figure 9. The design of a ADS nuclear power plant (13)

ب) تبدیل زباله های هسته ای

همان طور که بیان شد نگه داری زباله های هسته ای حاصل از نیروگاه ها به دلیل مسمومیت پرتوی و نیمه عمر بالا مشکلی بزرگ است که علاوه بر آثار محیط زیستی، دفن آن ها نیز نیازمند صرف هزینه های زیادی است. از ویژگی های مهم راکتورهای ADS، تبدیل زباله های هسته ای به عناصری کم خطرتر و با نیمه عمر کوتاه می باشدکه با توسعه این نوع راکتورها از اثرات سوء این زباله ها روی محیط زیست و نیز هزینه های حاصل از پسمانداری آن ها کاسته می شود.

ج) استفاده از عناصر غیر شکافا به عنوان سوخت

در راکتور هسته ای ADS، به دلیل وجود چشمه‌ی نوترون سریع خارجی حاصل از فرآیند تلاشی، می توان از عناصر غیر شکافای اورانیوم ۲۳۸ و توریوم ۲۳۲ که در راکتور های حرارتی کارایی ندارند، به عنوان سوخت استفاده نمود. در واقع این عناصر با گیراندازی نوترون و واپاشی β^- مطابق فرآیند های زیر به ترتیب به پلوتونیوم ۲۳۹ و اورانیوم ۲۳۳ تبدیل می شوند که عناصری شکافا هستند، یعنی عناصری که با گیر اندازی نوترون حرارتی قابلیت شکافت دارند (نوترون با انرژی ۰،۰۲۵ eV را حرارتی می گویند). علاوه بر این می توان این عناصر شکافای تولید شده (اورانیوم ۲۳۳ و پلوتونیوم ۲۳۹) در قلب راکتور را با روش های شیمیایی تفکیک و به عنوان سوخت در راکتورهای حرارتی به کار برد.

فرآیند های تولید پلوتونیوم ۲۳۹ و اورانیوم ۲۳۳ در قلب راکتور هسته ای ADS (۱۶):

فرآیند تولید پلوتونیوم ۲۳۹

$$n + {}^{238}U \rightarrow {}^{239}U\ (23\ min),\quad [\text{neutron capture}] \qquad (۱-۱)$$

$${}^{239}U\ (23\ min) \rightarrow {}^{239}Np\ (2\ day),\quad [\text{decay } \beta^-] \qquad (۱-۲)$$

$${}^{239}Np\ (2\ day) \rightarrow {}^{239}Pu,\quad [\text{decay } \beta^-] \qquad (۱-۳)$$

فرآیند تولید اورانیوم ۲۳۳

$$n + {}^{232}Th \rightarrow {}^{233}Th\ (22\ min)\ ,\ [\text{neutron capture}] \qquad (۲-۱)$$

$${}^{233}Th\ (22\ min) \rightarrow {}^{233}Pa\ (27\ days),\ [\text{decay } \beta^-] \qquad (۲-۲)$$

www.SID.ir

$^{233}Pa\ (27\ days) \rightarrow ^{233}U,\ [decay\ \beta^-]$ (۲-۳)

چگونگی وقوع فرآیند تبدیل زباله های هسته ای در یک راکتور ADS

از اهداف اصلی طراحی و ساخت راکتور های هسته ای ADS، تبدیل زباله های هسته ای می باشد. در این جا منظور از تبدیل، یک فرآیند هسته ای است که در طی آن می توان یک عنصر که آن را به عنوان زباله هسته ای می شناسیم و به دلیل نیمه عمر طولانی و مسمومیت پرتوی بالا برای انسان، سایر موجودات و محیط زندگی آنها خطرناک است، را به عنصری با نیمه عمر کوتاه و کم خطر تبدیل کنیم(۱۷). همان طور که بیان شد مهم ترین زباله های هسته ای توسط راکتورهای هسته ای امروزی ایجاد می شوند و دو دسته اند:

دسته اول: پاره های شکافت که این عناصر در قلب یک راکتور هسته ای ADS در فرآیند تبدیل، با گیراندازی نوترون و واپاشی های بتا و گاما به عناصری کم خطر و با نیمه عمر کوتاه تبدیل می شوند. به عنوان مثال مطابق فرآیندهای زیر (۱۸):

ید ۱۲۹:

$n + ^{129}I\ (1.57 \times 10^{7}\ years) \rightarrow ^{130}I\ (12.36\ hours)$ (۳-۱)

$^{130}I\ (12.36\ hours) \rightarrow ^{130}Xe\ (stable),\ [decay\ \beta^-]$ (۳-۲)

تکنتیوم۹۹(Technetium 99):

$n + ^{99}Tc\ (2.11 \times 10^{5}\ years) \rightarrow ^{100}Tc^*\ (unstable)$ (۴-۱)

$^{100}Tc^*(unstable) \rightarrow ^{100}Tc\ (15.8\ sec),\ [decay\ \gamma]$ (۴-۲)

$^{100}Tc\ (15.8\ sec) \rightarrow ^{100}Ru^*(unstable),\ [decay\ \beta^-]$ (۴-۳)

$^{100}Ru^*(unstable) \rightarrow ^{100}Ru\ (stable),\ [decay\ \gamma]$ (۴-۴)

دسته دوم: عناصر فرا اورانیومی که این عناصر در قلب راکتور ADS با گیراندازی نوترون، مستقیماً شکافته شده و یا در مرحله اول به عناصری شکافت پذیر تبدیل شده و در نهایت شکافته می شوند و علاوه بر تولید انرژی، از آن ها عناصری با نیمه عمر کوتاه و مسمومیت پرتوی پایین به وجود می آید. از سویی بعضی از این عناصر با گیراندازی نوترون و گسیل پرتوهای آلفا و بتا به عناصری با نیمه عمر کوتاه تبدیل می شوند. به عنوان مثال مشابه فرآیند های زیر (۱۹):

پلوتونیوم ۲۳۹:

$n + ^{239}Pu\ (24000\ years) \rightarrow$
$^{134}Cs\ (2\ years) + ^{104}Ru\ (stable) + 2\ n + 200\ MeV,\ [fission]$ (۵-۱)

پلوتونیوم ۲۴۰:

$n + ^{240}Pu\ (6600\ years) \rightarrow ^{241}Pu\ (14\ years)$ (۶-۱)

$n + ^{241}Pu\ (14\ years) \rightarrow$
$^{134}Xe\ (stable) + ^{105}Rh(35\ hours) + 3\ n + 200\ MeV,\ [fission]$ (۶-۲)

امریسیوم۲۴۱(Americium):

$n + ^{241}Am\ (432\ years) \rightarrow ^{242}Am\ (16\ hours),\ [neutron\ capture]$ (۷-۱)

$^{242}Am\ (16\ hours) \rightarrow ^{242}Cm\ (163\ days),\ [decay\ \beta^-]$ (۷-۲)

$^{242}Cm\ (163\ days) \rightarrow ^{238}Pu\ (88\ years),\ [decay\ \alpha]$ (۷-۳)

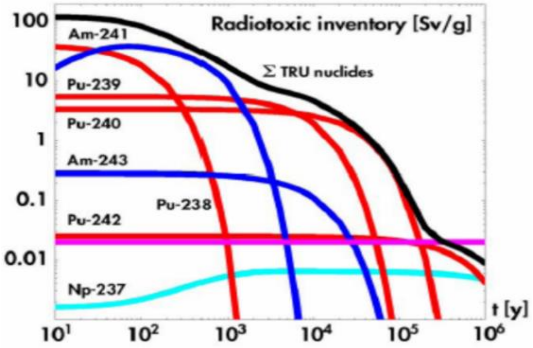
$n + ^{238}Pu\ (88\ years) \rightarrow$

www.SID.ir

Archive of SID

^{142}Ce (stable) + ^{95}Zr (64 days) + 2 n + 200 MeV, [fission] (۷-۴)

در شکل (۱۰) نمودار میزان مسمومیت پرتوی برخی از زباله-های هسته ای (عناصر فرا اورانیومی) بر حسب نیمه عمر آن ها نمایش داده شده است که در آن محور افقی نیمه عمر برحسب سال و محور قایم میزان مسمومیت بر حسب (سیورت/گرم) است. طبق این نمودار به طور طبیعی با گذشت زمان، میزان تابش دهی این عناصر کاهش می یابد و نیز مشاهده می شود که بعضی از این عناصر دارای نیمه عمرهای طولانی از مرتبه $۱۰^{۵}$ سال و بالاتر هستند (۵).

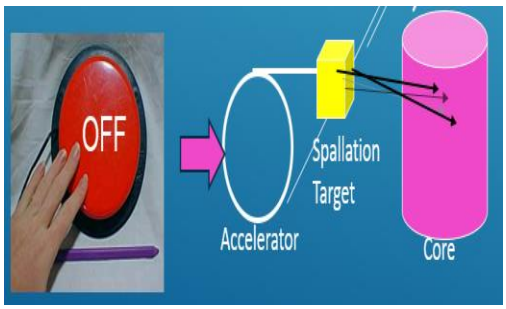


شکل۱۰- نمودار میزان مسمومیت برخی از زباله های هسته ای (عناصر فرا اورانیومی) بر حسب نیمه عمر

Figure 10. Diagram toxicity of nuclear waste (transuranic elements) in terms of half-life

مزیت مهم یک راکتور هسته ای ADS

مهم ترین مزیت یک راکتور هسته ای ADS نسبت به سایر راکتورهای هسته ای موجود در دنیا، ایمن بودن آن است. با توجه به این که این نوع از راکتورها در غیاب چشمه نوترون خارجی به صورت زیر بحرانی عمل می کنند و در آن ها برای پایداری واکنش های زنجیره ای شکافت در قلب راکتور از چشمه خارجی تولید نوترون استفاده می شود، بنابراین در حین فعالیت راکتور در صورت بروز حادثه می توان با خاموش نمودن شتاب دهنده، فرآیند تلاشی را متوقف نمود که این به منزله غیر فعال شدن چشمه نوترون خارجی است و با این کار راکتور در حالت زیر بحرانی (حالت اولیه در غیاب چشمه نوترون خارجی) قرار می گیرد و وقوع حادثه و انفجار عملاً غیر ممکن خواهد شد (شکل ۱۱).



شکل ۱۱- طرحی از ایمن بودن راکتور هسته ایADS

Figure 11. The design of safe nuclear reactors ADS

بحث و نتیجه گیری

با توجه به مزایای استفاده از فناوری صلح آمیز هسته ای در ابعاد وسیع، توسعه این فناوری برای کشورمان بسیار مهم و حایز اهمیت است. لذا بهتر است در مسیر توسعه این فناوری در کشور، از روش هایی استفاده شود که میزان بهره وری از این

www.SID.ir

فناوری را به حداکثر و اثرات سوء استفاده از آن را به حداقل برساند. یکی از روش های مفید در این مسیر، استفاده از نسل جدید راکتور های هسته ای، ADS است تا به وسیله آن بتوان علاوه بر تولید انرژی، زباله های هسته ای را به عناصر کم خطرتر و با نیمه عمر کوتاه تبدیل نمود که علاوه بر آثار زیست محیطی بسیار خوب از لحاظ اقتصادی نیز با صرفه بوده و هزینه های حاصل از نگه داری این زباله ها را کاهش می دهد. در راکتور های هسته ای ADS، به دلیل زیر بحرانی بودن آن ها احتمال وقوع سوانح هسته و در نتیجه وقوع فجایع محیط زیستی ناشی از آن بسیار پایین است. هم چنین در این نوع از راکتورها می توان از عناصر طبیعی اورانیوم ۲۳۸ و توریوم ۲۳۲ به عنوان سوخت استفاده نمود که نسبت به اورانیوم ۲۳۵ تهیه-ی آن ها آسان تر و فراوانی شان نیز بسیار بیش تر است. لذا امیدواریم در کشور ما نیز فعالیت های تحقیقاتی در زمینه‌ی ساخت این نسل جدید از راکتور های هسته ای آغاز گردد و ما نیز در کنار سایر کشور های دنیا به تکنولوژی ساخت چنین سیستم هایی دست یابیم و از مزایای آن ها بهره مند شویم.

Reference

1. Barros ,GP. , Pereira ,C. ,Veloso ,MA. ,Costa ,AL. ,Reis ,PA. , 2010. Neutron production evaluation from a ADS target utilizing the MCNPX 2.6. 0 code. Brazilian Journal of Physics , Vol. 40(2) ,pp. 414-418.
2. Bowman ,CD. , 1998. Accelerator-driven systems for nuclear waste transmutation. Annual Review of Nuclear and Particle Science , Vol. 48(2) ,pp.505-556.
3. Changizi ,S. , 2012. Neutronic Analysis of the Multipurpose Hybrid Research Reactor for High-tech Applications (MYRRHA) with a Monte Carlo Code SERPENT.
4. Committee ,NNS. , 2002. Accelerator-driven Systems (ADS) and Fast Reactor (FR) in Advanced Nuclear Cycles, A Comparative Study. Nuclear Energy Agency Organisation for Economic and Co-operation Development, ISBN:92-64.
5. Degweker ,S . , Ghosh ,B . , Bajpai ,A . , Paranjape ,S . , 2007. The physics of accelerator driven sub-critical reactors. Pramana , Vol.68(2) ,pp.161-171.
6. Dubrova ,YE . ,Nesterov , VN . , Krouchinsky ,NG . , Ostapenko ,VA, . , Neumann ,R . , Neil ,DL . ,Jeffreys , AJ. , 1996. Human minisatellite mutation rate after the Chernobyl accident.
7. Hall ,DE . , 2009. Modeling and validation of dosimetry measurement assumptions within the Armed Forces Radiobiology Research Institute TRIGA Mark F reactor and associated exposure facilities using Monte Carlo techniques.
8. Hashemi-Nezhad ,R . , Haywood ,S . , Stepanek ,P . , Lavers ,MP . , Uranium Mining, Processing and Nuclear Energy Review.
9. Herrera-Martinez ,A . , 2004. Transmutation of nuclear waste in accelerator-driven systems: University of Cambridge.
10. Kadi ,Y. , Revol ,J . ,2001. Design of an accelerator-driven system for the destruction of nuclear waste ,pp. 3-7.
11. Kiselev ,G. , 1996. Current status of scientific activity in Russia on high level radioactive waste transmutation and use of weapon grade and power plutonium in subcritical systems driven by proton accelerator. Nuclear engineering and design , Vol.165(4) ,pp.245-258.
12. Monti ,S. , 2000. Preliminary Neutronic Analyses of the Triga-ADS Demonstration Facility.

www.SID.ir

Archive of SID

13. Nifenecker ,H. , David ,S. , Loiseaux ,J. , Meplan ,O. , 2001. Basics of accelerator driven subcritical reactors. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment , Vol. 463(3) ,pp.428-467.
14. Nifenecker ,H. , Meplan ,O. , David ,S. , 2003. Accelerator driven subcritical reactors: CRC Press.
15. Rodriguez ,C. , Baxter ,A. , McEachern ,D. , Fikani ,M. , Venneri ,F. , 2003. Deep-Burn: making nuclear waste transmutation practical. Nuclear Engineering and Design , Vol.222(2) ,pp.299-317.
16. Rubbia ,C. , 2009. Sub-critical Thorium reactors. CERN, Geneva, Switzerland.
17. Seltborg ,P. , 2005. Source efficiency and high-energy neutronics in accelerator-driven systems.
18. Sobolev ,V. , Uyttenhove ,W. , Thetford , R. , Maschek , W. , 2011. Prognosis and comparison of performances of composite CERCER and CERMET fuels dedicated to transmutation of TRU in an EFIT ADS. Journal of Nuclear Materials , Vol.414(2) ,pp.257-264.
19. Woddi Venkat Krishna ,T. , 2006. Reactor accelerator coupling experiments: a feasability study: Texas A&M University.

www.SID.ir