J. of Nuclear Sci. and Tech.
65, 2013, 76-81

مجله علوم و فنون هسته‌ای
۶۵، ۱۳۹۲، ۷۶-۸۱

Sci. and Tech. note
یادداشت علمی و فنی

بررسی محصول‌های شکافت، محصول‌های فعال‌سازی و آکتینیدها در قلب رآکتور پژوهشی تهران

نفیسه تهرانی*، صمد خاکشورنیا
پژوهشکده‌ی رآکتورها و شتاب‌دهنده‌ها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۸۳۶-۱۴۳۹۵، تهران ـ ایران

چکیده: عناصر پرتوزا در قلب رآکتور پژوهشی تهران با استفاده از کد محاسباتی ORIGEN ۲٫۱ بررسی شدند. ابتدا، برای اطمینان از نحوه‌ی مدل‌سازی، نتایج با نتایج «گزارش تحلیل ایمنی رآکتور پژوهشی تهران (SAR)» برای قلب مشابه، مقایسه شد. پس از اطمینان از درستی نتایج، محاسبه برای قلب C-۵۷ رآکتور، انجام شد. براساس نتایج حاصل و با استفاده از کدهای مربوطه، امکان ارزیابی اثرهای پرتوشناختی ناشی از آزاد شدن عناصر پرتوزا در صورت بروز حادثه‌ی فرضی محتمل در رآکتور پژوهشی تهران فراهم شد.

کلیدواژه‌ها: محصول‌های شکافت، محصول‌های فعال‌سازی، رآکتور پژوهشی تهران، کد محاسباتی ORIGEN ۲٫۱، اثرهای پرتو شناختی

Core Inventories Analysis of Tehran Research Reactor in Terms of Fission and Activation Products and Actinides

N. Tehrani*, S. Khakshournia
Reactors and Accelerators Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, P.O.Box: 14395-836, Tehran – Iran

Abstract: Core radionuclide inventories calculations were performed for Tehran Research Reactor (TRR) using computer code ORIGEN 2.1. At first a comparison was made between the present calculations and the existing results for the source terms of the equilibrium core that had already been presented in the Safety Analysis Report (SAR), which showed a good agreement. Then, the core radionuclide inventories calculations were carried out for a recent TRR core configuration. The resulting source terms may be used for the evaluation of radiological consequences of the corresponding accidental release of the radio nuclides from the TRR.

Keywords: ***Fission Products, Activation Products, Tehran Research Reactor, ORIGEN 2.1 Code, Radiological Consequences***

*email: nftehrani@aeoi.org.ir

تاریخ دریافت مقاله: ۹۱/۹/۲۰ تاریخ پذیرش مقاله: ۹۲/۷/۱۲

Archive of SID
www.SID.ir

۱. مقدمه

اولین گام در تحلیل ایمنی رآکتورهای پژوهشی، تعیین وقایع آغازگر پذیرفته شده[۱] برای آن رآکتورها است. این وقایع آغازگر نوع حوادثی را که در تحلیل ایمنی رآکتور باید در نظر گرفته شوند، مشخص می‌نمایند. به ازای هر واقعه‌ی آغازگر، در تحلیل ایمنی رآکتور لازم است جمله‌های چشمه‌ی[۲] مربوط، محاسبه و پی‌آمد زیست‌شناختی نظیر مطالعه شود. جمله‌های چشمه عبارت است از نوع و میزان عناصر پرتوزایی که در پی یک حادثه در رآکتور در محیط پخش می‌شوند [۱]. این عناصر پرتوزا عمدتاً به سه گروه محصول‌های فعال‌سازی[۳]، آکتینیدها[۴] و محصول‌های شکافت[۵] تقسیم می‌شوند. در کد محاسباتی ORIGEN این سه گروه چنین تعریف می‌شوند: محصول‌های فعال‌سازی شامل محصول‌های به دست آمده از فعال‌سازی نوترونی رادیونوکلیدهای طبیعی موجود در قلب رآکتور، و نیز عناصر تولید شده از واپاشی آن‌ها هستند. آکتینیدها شامل عناصر با عدد اتمی بین ۹۰ تا ۹۹ (توریم تا اینشتنیم) هستند و محصول‌های شکافت، عناصر پرتوزای تولید شده از شکافت آکتینیدها، و نیز محصول‌های ناشی از واپاشی بتا و گامایی آن‌ها را شامل می‌شوند [۲].

در اثر وقوع یک حادثه‌ی محتمل در رآکتور، عناصر پرتوزا از قلب به محیط اطراف نشت کرده و نهایتاً در اتمسفر پخش می‌شوند. در تحلیل ایمنی رآکتور، ارزیابی پی‌آمد این حادثه برای افرادی که به نوعی در مجاورت رآکتور هستند، تحت عنوان دز پرتوشناختی جذب شده‌ی ناشی از آزاد شدن عناصر پرتوزا از قلب، حایز اهمیت است [۳]. کد محاسباتی ORIGEN به طور گسترده برای محاسبه‌ی جمله‌های چشمه‌ی قلب رآکتورهای پژوهشی مورد استفاده قرار گرفته است. به طور مثال، محصول‌های شکافت، فعال‌سازی و آکتینیدها در رآکتور HTR-۱۰ کره و نیز رآکتور PARR-۱ پاکستان با استفاده از کد محاسباتی ORIGEN محاسبه شده است [۴، ۵]. محاسبه‌های مشابهی برای رآکتور MNR کانادا و Krško اسلوونی با استفاده از کد محاسباتی ORIGEN به انجام رسیده است [۶، ۷]. در ارتباط با رآکتور تهران، در گزارش ایمنی رآکتور تهران [۸] نتایج محاسبه‌ی جمله‌های چشمه با استفاده از کد محاسباتی ORIGEN برای قلب اولیه‌ی رآکتور ارایه شده است. علاوه بر این، جمله‌های چشمه برای رآکتور تهران با سوخت اورانیم با غنای بالا (HEU) و اورانیم با غنای پایین (LEU) در قدرت ۵MW و نیز در حالت قدرت افزایش یافته‌ی ۱۰MW با کد محاسباتی ORIGEN محاسبه شده‌اند [۹]. ولی این محاسبه برای قلب با سوخت اورانیم با غنای پایین متشکل از عناصر سوخت متعارف[۶] (SFE) + میله‌های کنترل[۷] (CFE) + عناصر سوخت جزیی[۸] (PFE) انجام شده است که نتایج به دلیل تفاوت در چیدمان قلب انتخابی، با نتایج قلب متشکل از سوخت اورانیم با غنای پایین اولیه‌ی مورد مطالعه در گزارش ایمنی رآکتور تهران [۸] قابل مقایسه نیست.

در این مقاله، برای تعیین جمله‌های چشمه، به منظور ارزیابی اثرهای زیست‌شناختی ناشی از آزاد شدن عناصر پرتوزا از رآکتور پژوهشی تهران در صورت وقوع یک حادثه‌ی محتمل، با استفاده از کد محاسباتی ORIGEN ۲٫۱، تحلیل عناصر پرتوزا در قلب C-۵۷ رآکتور پژوهشی تهران، انجام شده است. بدین ترتیب که ابتدا برای اولین قلب تعادلی رآکتور پژوهشی تهران، فهرست عناصر پرتوزا و فعالیت پرتوزایی هر یک تعیین [۱۰]، و با نتایج گزارش تحلیل ایمنی رآکتور پژوهشی تهران [۱۱] در شرایط مشابه، مقایسه شده است. این کار، برای اطمینان از نحوه‌ی مدل‌سازی و اعتبار کد انجام، و سپس برای قلب C-۵۷ رآکتور پژوهشی تهران [۱۲]، تکرار شده است.

قلب تعادلی رآکتور پژوهشی تهران شامل ۲۲ میله‌ی سوخت متعارف و ۵ میله‌ی کنترل است [۸]. قلب C-۵۷، چیدمان فعلی قلب رآکتور پژوهشی تهران است که طرح‌واره‌ی آن در شکل ۱ آمده است. این قلب شامل ۲۸ میله‌ی سوخت متعارف و ۵ میله‌ی کنترل است [۱۳].

برای ارزیابی اثرهای پرتوشناختی ناشی از آزاد شدن عناصر پرتوزا، نتایج این محاسبه‌ها، به عنوان ورودی کدهایی نظیر HOTSPOT و PC-CREAM مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

Archive of SID

www.SID.ir

9	IR Box	GR Box	GR Box	GR Box	IR Box	GR Box
8	A 132	AS 31	A 118	A 76	A 124	A 129
7	A 114	A 104	A 101	A 105	*AS 22*	A 113
6	A 127	*AS 23*	*A 145*	IR Box	A 72	A 123
5	A 108	A 103	*A 136*	A 146	AS 30	A 122
4	A 109	A 110	AS 32	A 117	A 107	A 128
3	A 130	A 125	A 119	IR Box	A 131	IR Box
2	GR Box	GR Box	N.S	GR Box	GR Box	GR Box
1	GR Box	GR Box	GR Box	GR Box	GR Box	GR Box
	A	B	C	D	E	F

A : میله‌ی سوخت متعارف
AS : میله‌ی کنترل
N.S : چشمه‌ی نوترون
GR-Box : جای‌گاه گرافیک
IR-Box: جای‌گاه پرتودهی

شکل ۱. چیدمان قلب C-۵۷ رآکتور پژوهشی تهران.

۲. معرفی کد ORIGEN ۲٫۱ و روش انجام محاسبه‌ها

کد ORIGEN ۲٫۱ یک کد کامپیوتری چند منظوره برای محاسبه‌ی مصرف سوخت، واپاشی و فعالیت عناصر پرتوزا در قلب رآکتور است. سطح مقطع برهم‌کنش‌ها، بهره‌ی محصول‌های شکافت، داده‌های واپاشی محصول‌های شکافت و فعال‌سازی، و نرخ گسیلش فوتون در چندین گروه انرژی ناشی از واپاشی این محصول‌ها در کد موجود هستند و یا با استفاده از اطلاعات موجود در کتاب‌خانه‌ها در طول اجرای کد قابل محاسبه‌اند. فایل ورودی کد بسیار انعطاف‌پذیر است و به استفاده‌کننده اجازه می‌دهد میزان مصرف سوخت و فهرست عناصر پرتوزا را به صورت تابعی از زمان بهره‌برداری از رآکتور و هم‌چنین در بازه‌های زمانی مشخص پس از خاموشی رآکتور محاسبه نماید. این کد، عناصر پرتوزا را به سه گروه محصول‌های فعال‌سازی، آکتینیدها و محصول‌های شکافت طبقه‌بندی و در خروجی، فهرست هر یک از عناصر این سه گروه را همراه با سهم فعالیت مربوط به طور جداگانه چاپ می‌نماید [۲، ۱۴].

در فایل ورودی کد، کتاب‌خانه‌های اطلاعات واپاشی، اطلاعات فوتون، اطلاعات سطح مقطع‌ها و محصول‌های شکافت داده می‌شوند. این کتاب‌خانه‌ها در کد موجود هستند، کتاب‌خانه‌ی سطح مقطع‌ها و محصول‌های شکافت با توجه به نوع رآکتور انتخاب می‌شوند. برای رآکتورهای پژوهشی گرمایی معمولاً کتاب‌خانه‌های رآکتورهای آب سبک (LWR) مناسب‌ترین انتخاب هستند. در محاسبه‌های حاضر در این مقاله نیز از آن استفاده شده است. در انتهای فایل ورودی، جرم مربوط به سوخت موجود در قلب و ناخالصی‌های آن، و هم‌چنین جرم غلاف سوخت و سایر متعلقات موجود در عنصر سوخت داده می‌شوند.

در این مقاله، ابتدا فهرست سه گروه عناصر پرتوزا برای اولین قلب تعادلی عناصر سوخت اورانیمی با غنای پایین رآکتور پژوهشی تهران به وسیله‌ی کد محاسباتی ORIGEN ۲٫۱ محاسبه شده است. به منظور مقایسه با نتایج گزارش تحلیل ایمنی رآکتور تهران، در ورودی کد، شرایط مشابه برای بهره‌برداری از رآکتور پژوهشی تهران در توان ۵MW به مدت ۲۹۵ روز به طور پیوسته برای قلب تعادلی شبیه‌سازی شده است. این مدت زمان معادل مصرف سوخت متوسط ۴۰۰۰۰ MWd/TU است. سپس با مقایسه‌ی نتایج با نتایج نظیر گزارش تحلیل ایمنی رآکتور پژوهشی تهران و اطمینان از صحت محاسبه‌ها، در مرحله‌ی دوم، محاسبه‌ی عناصر پرتوزای موجود در قلب C-۵۷ رآکتور پژوهشی تهران انجام شد. با در نظر گرفتن چیدمان سوخت در این قلب، تاریخچه‌ی دقیق پرتودهی هر عنصر سوخت از دفتر کار رآکتور[۹] استخراج شد. به این ترتیب که ابتدا مشخص شد هر سوخت در چه قلب‌هایی حضور داشته است، سپس با در نظر گرفتن زمان پرتودهی و زمان خاموشی هر قلب (از قلب ۱ تا قلب C-۵۷)، و بسته به حضور هر سوخت در قلب‌های متفاوت، زمان پرتودهی و زمان واپاشی برای هر سوخت به طور جداگانه محاسبه شد. هم‌چنین با استفاده از اطلاعات ثبت شده در رآکتور، توان متوسط هر عنصر سوخت با توجه به توزیع شار و مکان آن در قلب‌های مختلف محاسبه شد.

با استفاده از این اطلاعات، فایل‌های ورودی برای کد محاسباتی ORIGEN ۲٫۱ طراحی شد. بدین‌ترتیب که برای هر عنصر سوخت، فایل ورودی جداگانه‌ای طراحی شد که در آن کتاب‌خانه‌های مورد استفاده، مقدار اورانیم اولیه، مقدار آلومینیم موجود در عنصر سوخت شامل غلاف و نگه‌دارنده‌ی آلومینیمی سوخت‌ها، ناخالصی‌های سوخت، زمان پرتودهی و زمان واپاشی مورد نظر به طور جداگانه تعریف شد. با اجرای کد محاسباتی ORIGEN ۲٫۱، فهرست محصول‌های شکافت، محصول‌های فعال‌سازی و آکتینیدها برای هر یک از عناصر سوخت تعیین شدند. فهرست عناصر پرتوزای کل قلب، جمع فهرست عناصر پرتوزا در عناصر سوخت هستند [۲]. بنابراین برای محاسبه‌ی فعالیت قلب مورد نظر، ابتدا فعالیت هر یک از عناصر سوخت موجود در قلب محاسبه، و سپس از جمع آن‌ها فعالیت کل قلب حاصل شد.

Archive of SID
www.SID.ir

تاریخچه‌ی توان و میزان مصرف سوخت متفاوت عناصر سوخت از ویژگی‌هایی هستند که در داده‌های ورودی کد مشخص می‌شوند. برای این منظور کل مدت زمان حضور و توان تولیدی هر عنصر سوخت در قلب محاسبه، و برای ورودی کد ORIGEN ۲٫۱ مورد استفاده قرار گرفت.

۳. نتایج محاسبه

خروجی کد محاسباتی ORIGEN ۲٫۱، دربرگیرنده‌ی اطلاعات مربوط به فعالیت تمام عناصر پرتوزای موجود در اولین قلب تعادلی و قلب C-۵۷ رآکتور تهران است. در جدول ۱ نتایج محاسبه‌ی فعالیت محصول‌های فعال‌سازی، آکتینیدها و محصول‌های شکافت موجود در اولین قلب تعادلی رآکتور پژوهشی تهران (مرحله‌ی اول) [۱۰] و قلب C-۵۷ رآکتور پژوهشی تهران (مرحله‌ی دوم) [۱۲] همراه با نتایج گزارش تحلیل ایمنی رآکتور تهران [۱۱] داده شده است. از توافق نسبتاً خوبی که بین این نتایج دیده می‌شود، از درستی محاسبه‌ها اطمینان حاصل شد.

جدول ۲ فعالیت محاسبه شده برای بعضی از ایزوتوپ‌های مهم قلب C-۵۷ رآکتور پژوهشی تهران را که برای ارزیابی اثرهای زیست‌شناختی مورد توجه هستند، نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود در بین ایزوتوپ‌های بررسی شده، ^{133}I و ^{133}Xe بیش‌ترین فعالیت را دارا هستند.

شکل‌های ۲، ۳ و ۴ توزیع فعالیت، به ترتیب، محصول‌های شکافت، محصول‌های فعال‌سازی و آکتینیدها را در چیدمان قلب C-۵۷ رآکتور پژوهشی تهران نشان می‌دهند. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، عمده چشمه‌ی پرتوزایی در قلب رآکتور، محصول‌های شکافت هستند که در سوخت رآکتور قرار دارند. برای قلب C-۵۷ با توجه به تاریخچه‌ی پرتودهی هر عنصر سوخت که از دفتر کار رآکتور استخراج شد [۱۳]، فعالیت ناشی از محصول‌های شکافت، $۲٫۲۰\times۱۰^{۷}$ Ci است که در مقایسه با فعالیت محصول‌های فعال‌سازی و آکتینیدها مقدار قابل توجهی است. در رآکتور تهران محصول‌های فعال‌سازی در غلاف سوخت، آلومینیم به کار رفته در ساختار عنصر سوخت رآکتور و نیز در ناخالصی‌های موجود در سوخت تولید می‌شوند. هم‌چنین آکتینیدها عمدتاً با گیراندازی نوترون به وسیله ایزوتوپ‌های موجود در سوخت رآکتور تهران به ویژه ^{238}U و نیز واپاشی محصول‌های آن‌ها تولید می‌شوند. توزیع نایکنواخت محصول‌های شکافت، محصول‌های فعال‌سازی و آکتینیدها در قلب C-۵۷ رآکتور تهران به دلیل تاریخچه‌ی قدرت متفاوت هر یک از عناصر سوخت به کار رفته در چیدمان قلب است که در این کار به طور جداگانه محاسبه و در ورودی کد ORIGEN داده شده است.

جدول ۱. فعالیت (برحسب کوری) رادیونوکلیدهای موجود در قلب رآکتور پژوهشی تهران در توان ۵MW (خروجی کد ORIGEN ۲٫۱)

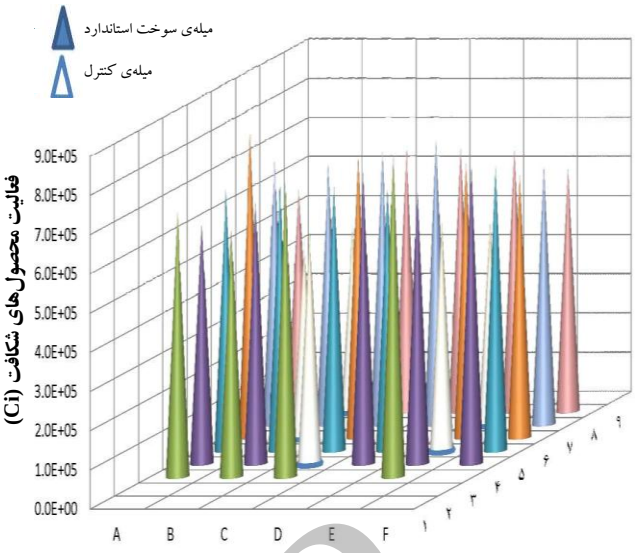
	اولین قلب تعادلی [۱۱]	اولین قلب تعادلی، محاسبه‌ی حاضر	قلب C-۵۷، محاسبه‌ی حاضر
محصول‌های فعال‌سازی	$۳٫۰\times۱۰^{۵}$	$۳٫۲۶\times۱۰^{۵}$	$۳٫۲۵\times۱۰^{۵}$
آکتینیدها	$۸٫۰\times۱۰^{۵}$	$۸٫۲۷\times۱۰^{۵}$	$۸٫۶۸\times۱۰^{۵}$
محصول‌های شکافت	$۲٫۳۷\times۱۰^{۷}$	$۲٫۳۸\times۱۰^{۷}$	$۲٫۲۰\times۱۰^{۷}$

جدول ۲. فعالیت (برحسب کوری) محاسبه شده به وسیله‌ی کد ORIGEN ۲٫۱ به تفکیک ایزوتوپ‌ها برای قلب C-۵۷ رآکتور پژوهشی تهران در توان ۵MW

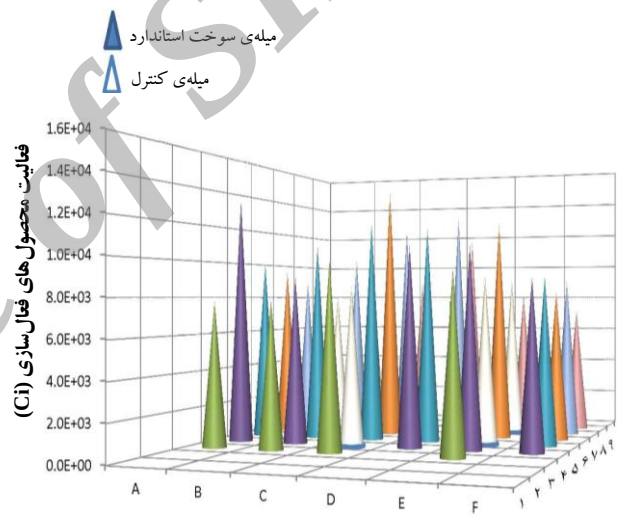
ایزوتوپ	^{137}Cs	^{134}Cs	^{106}Ru	^{132}Te	^{133}I	^{131}I	^{133}Xe	^{137}Xe	^{88}Kr
فعالیت	$۲٫۶\times۱۰^{۴}$	$۳٫۹\times۱۰^{۳}$	$۹٫۵\times۱۰^{۳}$	$۱٫۷\times۱۰^{۵}$	$۲٫۶\times۱۰^{۵}$	$۱٫۱\times۱۰^{۵}$	$۲٫۶\times۱۰^{۵}$	$۸٫۳\times۱۰^{۴}$	$۱٫۴\times۱۰^{۵}$

Archive of SID

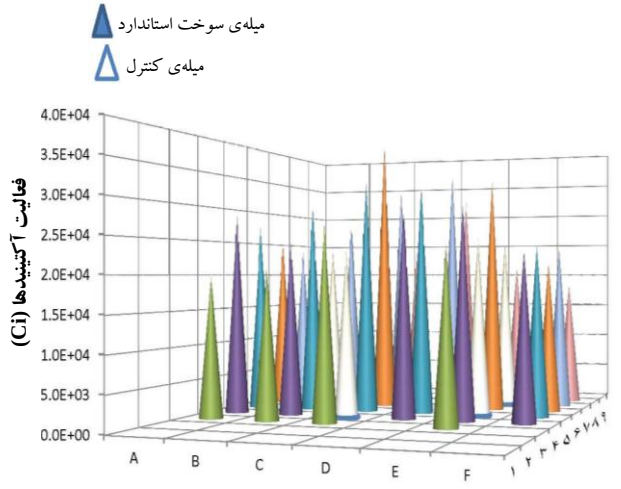
www.SID.ir



شکل ۲. توزیع فعالیت محصول‌های شکافت در قلب C-۵۷ رآکتور پژوهشی تهران.



شکل ۳. توزیع فعالیت محصول‌های فعال‌سازی در قلب C-۵۷ رآکتور پژوهشی تهران.



شکل ٤. توزیع فعالیت آکتینیدها در قلب C-۵۷ رآکتور پژوهشی تهران.

٤. نتیجه‌گیری

هدف اولیه‌ی این کار، اطمینان از صحت محاسبه‌های انجام شده با کد کامپیوتری ORIGEN ۲٫۱ بود. لذا با در نظر گرفتن شرایط بهره‌برداری از رآکتور در تهیه‌ی داده‌های ورودی کد، تا حد امکان مشابه با شرایط مندرج در گزارش تحلیل ایمنی رآکتور تهران، محاسبه برای قلب تعادلی اولیه انجام شد. همان‌طور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود بین نتایج محاسبه شده و نتایج گزارش تحلیل ایمنی رآکتور توافق نسبتاً خوبی برقرار است و اختلاف جزیی موجود، ناشی از نحوه‌ی شبیه‌سازی و مشخص نبودن فرضیه‌های اولیه برای ورودی کد ORIGEN ۲٫۱ در گزارش تحلیل ایمنی رآکتور است. سپس، محاسبه‌ها برای قلب C-۵۷ رآکتور پژوهشی تهران انجام شد. با توجه به جدول ۱، فعالیت محصول‌های فعال‌سازی، آکتینیدها و محصول‌های شکافت در قلب C-۵۷ در مقایسه با قلب تعادلی، تقریباً ثابت مانده است. به این ترتیب امکان انجام این نوع محاسبه برای هر قلب دلخواه این رآکتور وجود دارد، و نهایتاً این که با استفاده از نتایج این محاسبه، می‌توان اثرهای زیست‌شناختی ناشی از آزاد شدن عناصر پرتوزا در حادثه‌ی فرضی از قلب C-۵۷ بر روی محیط زیست را با استفاده از کدهای مربوطه مطالعه نمود.

تشکر و قدردانی

از جناب آقای کیوانی، که اطلاعات مربوط به قلب و محاسبه‌های مربوط را در اختیار ما قرار دادند، کمال تشکر را داریم.

پی‌نوشت‌ها

۱. Postulated Initiating Events
۲. Source Terms
۳. Activation Products
۴. Actinides
۵. Fission Products
۶. Standard Fuel Element
۷. Control Fuel Element
۸. Partial Fuel Element
۹. Logbook

Archive of SID

www.SID.ir

مرجع‌ها

1. NRC, Glossary, Available at WWW.NRC.gov.
2. A. G. Crofft, A User's Manual for the ORIGEN 2.1 Computer Code, Rep. ORNL/TM-7175Oak Ridge National Laboratory, (July 1980).
3. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Research Reactor Core Conversion Guidebook, IAEA-TECDOC-643, Vol. 2, IAEA, Vienna (1992).
4. Hyedong Jeong & Soon Heung Chang, Estimation of the Fission Products, Actinides and Tritium of HTR-10, Korea Advanced Institute of Science and Technology, (Sep 2009).
5. Sana Ullahb, Saeed Ehsan Awana, Source Term Evaluation for the upgraded LEU Pakistan Research Reactor-1 under severe accidents, Nuclear Engineering and Design 240 (2010), 3740–3750, (Aug 2010).
6. Wm. J. Garland, Decay Heat Estimates for MNR, McMaster Nuclear Reactor-McMaster University Hamilton, Ontario, (Feb 1999).
7. Josip Vuković, Davor Grgić, Damir Konjarek, ORIGEN2.1 Cycle Specific Calculation of Krško Nuclear Power Plant Decay Heat and Core Inventory, the 8th International Conference on Nuclear Option in Countries with Small and Medium Electricity Grids Dubrovnik, Croatia, (May 2010).
8. T. R. R. Amendment to the Safety Analysis Report, Prov. de Rio Negro, Argent., (Sep 1989).
9. M. Shams, Evaluation of source term in accident of research reactors and its biological impacts, Mechanical Engineering Department, Sharif University of Technology (Shahrivar 1369).
10. N. Tehrani, Source term calculation in TRR (part 1: Equilibrium core), AEOI, Reactors and Accelerators Research School (Khordad 1390).
11. Atomic Energy Organization of Iran, Safety Analysis Report for Tehran Research Reactor, (January 2009).
12. N. Tehrani, Source term calculation in TRR (part 2: core # 57-C), AEOI, Reactors & Accelerators Research School (Mehr 1390).
13. AEOI, Tehran Research Reactor Logbooks (1389).
14. International Atomic Energy Agency, Safety Reports Series No. 53, Derivation of the Source Term and Analysis of the Radiological Consequences of Research Reactor Accidents, VIENNA (2008).

Archive of SID

www.SID.ir