

cosSOURCE软件与ORIGEN程序燃耗计算功能对比分析

陈泽玉¹, 宋文^{2,3}, 付亚茹¹, 杨韵颐^{2,3}

¹上海核工程研究设计院股份有限公司, 上海

²国家电投集团科学技术研究院有限公司, 北京

³国家能源核电软件重点实验室, 北京

收稿日期: 2024年6月13日; 录用日期: 2024年6月21日; 发布日期: 2024年7月18日

摘要

堆芯积存量是核电厂设计中最基础的辐射源之一, 它在确保反应堆安全运行、预防潜在风险、确保辐射防护和废物管理的合规性等多个方面都非常关键。本文以第三代压水堆的工程例题为基准, 针对核电厂设计中常被关注的几组核素, 将国家电投集团科学技术研究院有限公司研发的cosSOURCE软件的中子活化及燃耗分析模块与工程上常用的ORIGEN程序计算结果进行了对比分析, 对比结果显示两者计算结果符合性较好。

关键词

源项, 堆芯积存量, cosSOURCE, ORIGEN, 压水堆

Comparison of Burnup Calculation Results between cosSOURCE and ORIGEN

Zeyu Chen¹, Wen Song^{2,3}, Yaru Fu¹, Eing Yee Yeoh^{2,3}

¹Shanghai Nuclear Engineering Research & Design Institute Co. Ltd., Shanghai

²State Power Investment Corporation Research Institute, Beijing

³National Energy Key Laboratory of Nuclear Power Software, Beijing

Received: Jun. 13th, 2024; accepted: Jun. 21st, 2024; published: Jul. 18th, 2024

Abstract

Core inventory is one of the most basic source terms in the design of nuclear power plants. It is

文章引用: 陈泽玉, 宋文, 付亚茹, 杨韵颐. cosSOURCE 软件与 ORIGEN 程序燃耗计算功能对比分析[J]. 核科学与技术, 2024, 12(3): 185-189. DOI: 10.12677/nst.2024.123019

crucial in ensuring the safe operation of a reactor, preventing potential risks, and ensuring compliance with radiation protection and waste management. This article uses an engineering benchmark case of a third-generation pressurized water reactor to compare the results from the neutron activation and burnup analysis module in cosSOURCE software, developed by the State Power Investment Corporation Research Institute, with the results from commonly used ORIGIN code. The comparison results show that the calculation results of both are generally consistent.

Keywords

Source Term, Core Inventory, cosSOURCE, ORIGIN, PWR

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

核电厂堆芯积存量是核电厂设计中最基础的辐射源之一，在确保反应堆安全运行、预防潜在风险、确保辐射防护和废物管理的合规性等多个方面都非常关键。国家电投集团科学技术研究院有限公司(以下简称“国家电投中央研究院”)牵头自主研发了我国首套拥有完全自主知识产权的核电厂安全分析与工程设计一体化软件包 COSINE，实现了“自无到有”的重大突破。其中的 cosSOURCE 软件作为 COSINE 屏蔽源项系统软件的一部分，其中子活化及燃耗分析模块能够对堆芯积存量开展计算分析。本文以第三代压水堆的工程例题为基准，针对核电厂设计中常被关注的几组核素，将 cosSOURCE 软件与工程上常用的 ORIGIN 程序计算结果进行了对比分析。

2. 软件简述

2.1. cosSOURCE

cosSOURCE 软件为国家电投中央研究院牵头研发的 COSINE 屏蔽源项系统软件的一部分，其功能包括堆芯积存量(燃耗)计算、结构材料活化源项计算、主回路冷却剂系统裂变产物源项(经验)分析和设计基准二次侧冷却剂源项分析等，其主要应用目标为第三代压水堆核电厂。

在燃耗计算中，需要对计算过程中涉及的每一种核素建立其变化率的常微分方程。在给定的燃耗区和给定的燃耗时间步长内，对于燃耗问题就转变成为对一个大型、耦合的、一阶常系数微分方程组(如式(1))的求解过程。cosSOURCE 软件在计算中采用了较为先进的切比雪夫有理近似法(Chebyshev Rational Approximation Method, CRAM) (如式(2))，CRAM 方法无需对短寿命核素进行单独处理，且对步长要求较低。关于 CRAM 的具体描述可见参考文献[1]-[4]。相比下文(2.2 节)提到的矩阵指数法，CRAM 在大多数问题中的求解速度都要更快或基本相同，且在大多数情况下计算结果更准确、鲁棒性更高[5]。

$$\frac{dN_i(t)}{dt} = -(\lambda_i + \sigma_i \phi(t)) N_i(t) + \sum_{j \neq i} (\lambda_j \chi_{ij} + \sigma_{ij} \phi(t)) N_j(t) + S_{ik} \quad (1)$$

$$N(t) = e^{At} N_0 = N_0 \hat{r}_{k,k}(At) = \alpha_0 N_0 \prod_{l=1}^{k/2} \left(I + 2 \operatorname{Re} \left\{ \tilde{\alpha}_l (At - \theta_l)^{-1} \right\} \right) \quad (2)$$

式(1)中：

$N_k(t)\sigma_{ik}^f\phi(t)Y_{ik}$ $N_i(t)$ 为 t 时间下, 目标核素的核子密度, atoms/tUO₂;

t 为时间变量, s;

λ_i 为目标核素的衰变常数, s⁻¹;

σ_i 为目标核素与中子反应的吸收截面, barn;

$\phi(t)$ 为 t 时间下的中子通量, n·cm⁻²·s⁻¹;

λ_j 为核素 j 的衰变常数, s⁻¹;

χ_{ij} 为核素 j 通过衰变反应生成核素 i 的衰变分支比;

σ_{ij} 为核素 j 与中子发生反应生成核素 i 的微观反应截面, barn;

$N_j(t)$ 为 t 时间下, 核素 j 的核子密度, atoms/tUO₂;

$N_k(t)$ 为 t 时间下, 裂变核素 k 的核子密度, atoms/tUO₂;

σ_{ik}^f 为裂变核素 k 与中子发生裂变反应生成核素 i 的微观反应截面, barn;

Y_{ik} 为核素 k 与中子发生裂变反应生成核素 i 的裂变产额。

式(2)中:

N_0 为初始时刻的核子密度向量, $N(t)$ 为 t 时刻的核子密度向量, A 为相应的燃耗矩阵。

2.2. ORIGIN

ORIGIN 程序是由橡树岭国家实验室(Oak Ridge National Laboratory, ORNL)开发和维护的、用于计算放射性物质累积、衰变和处理的计算机程序。ORIGIN 程序在历史上有多次更新, 如 ORIGIN2.1 和 ORIGIN-S 等, 每次更新都引入了关于反应堆模型、截面、裂变产物产额、衰变数据和衰变光子数据等的更新。

ORIGIN2.1 和 ORIGIN-S 均采用了矩阵指数法对微分方程系统进行求解。矩阵指数法是一种常用于求解线性常微分方程组的数值方法, 它通过利用求解矩阵指数函数 e^{At} 来求解线性系统, 它的计算复杂度相对 CRAM 一般要更高。

在 ORIGIN2.1 中, 其数组尺寸已设定得足够大, 因此已可以处理几乎任何规模的问题, 使用大多数主机和基于 386/486 的 PC 上可用的虚拟内存功能。它为用户提供了大量框架, 必要时可以将一些数组用于不同用途, 调用执行所需操作的子程序, 并提供一种机制, 用单个作业执行多个 ORIGIN2 计算问题。

ORIGIN-S 是 SCALE6.0 软件系统中的燃耗和衰变模块。它可以从控制模块调用, 也可以作为独立程序运行。ORIGIN2.1 在使用时, 需要根据所要分析的系统预先制作并选择相应的数据库。而 ORIGIN-S 设计的主要目标是使燃耗计算能够利用从任何标准 ENDF/B 格式的核数据库处理的多能量组截面。这一功能已通过在 SCALE 软件系统或 AMPX 系统内执行物理代码实现。这些代码可以计算中子谱加权截面, 并将数据自动转换为 ORIGIN-S 可使用的截面库格式。这些中子谱加权截面是针对所需分析问题来确定的, 它可以代表指定的反应堆燃料组件内的状态。最终, 可以生成能够反映辐照期间该燃料成分随时间变化的截面库。此外, ORIGIN-S 还被转换成了 Fortran90 格式, 因此在可以在多种 UNIX 工作站以及基于 Linux 或 Window 系统的 PC 上进行配置并运行。

3. 工程验证例题计算对比结果

3.1. 工程验证例题简介

反应堆在运行时, 燃料芯块中的放射性核素通过裂变和活化等机制产生。燃料裂变生成的裂变产物有复杂的组成, 其中包括稳定核素, 也包括半衰期不足一秒的短寿命核素, 其质量数分布很广。裂变产

物的组成是随时间变化的,随着燃料在堆芯中辐照时间的增加,长寿命核素的积存量一般会越来越多,而短寿命核素的量则一般会趋于平衡。在传统第三代压水堆工程设计中,一般会基于反应堆平衡循环堆芯换料方案,对关键核素在反应堆寿期末的积存量进行计算分析。计算中常用的输入参数一般包括各批次燃料组件燃料装量、燃料富集度、功率及辐照历史等。

碘、惰性气体和碱金属在核电厂事故分析中一般是主导核素,本文基于第三代压水堆工程设计,在相同计算输入的条件下,分别使用 cosSOURCE 软件和 ORIGEN 程序计算了这三组核素在反应堆平衡循环寿期末的积存量,并进行了对比。

3.2. 碘计算对比结果

cosSOURCE 和 ORIGEN 关于平衡循环寿期末碘积存量的计算结果对比可见图 1。

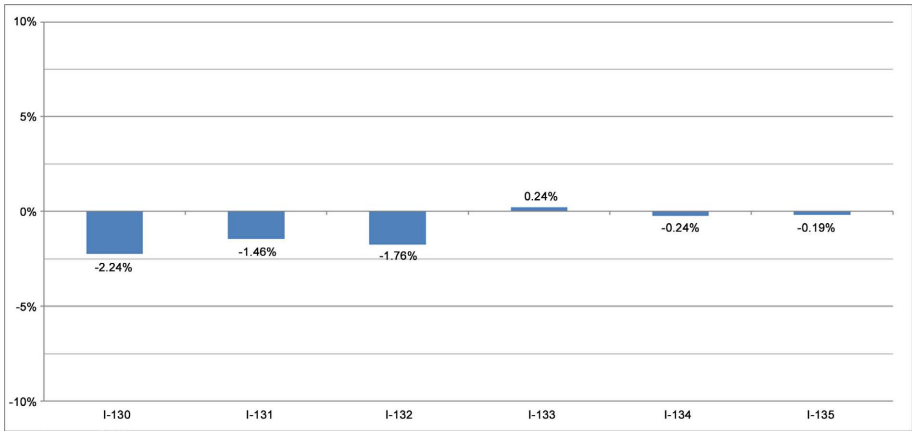


Figure 1. cosSOURCE and ORIGEN comparison on iodine inventory
图 1. cosSOURCE 和 ORIGEN 碘积存量计算结果对比图

从图 1 中可见,在使用了相同的输入参数情况下,cosSOURCE 程序与 ORIGEN 对于 I-130、I-131、I-132 的计算偏差在 2.25% 以下;对 I-133、I-133、I-132 的计算偏差在 0.25% 以下。

3.3. 惰性气体计算对比结果

cosSOURCE 和 ORIGEN 关于平衡循环寿期末惰性气体积存量的计算结果对比可见图 2。

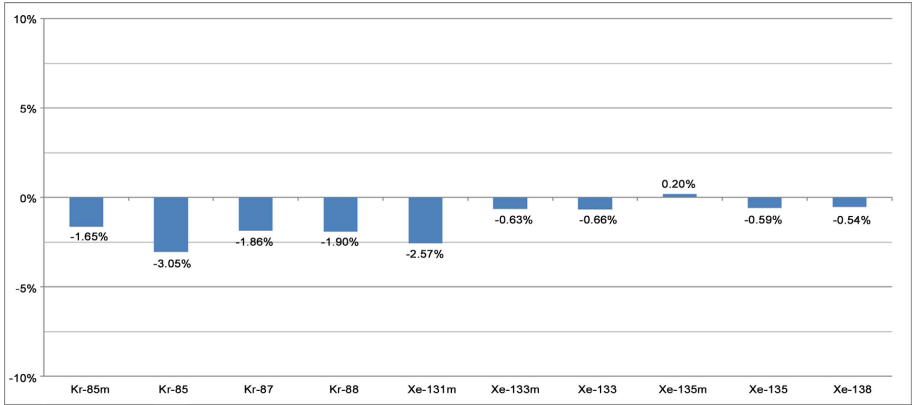


Figure 2. cosSOURCE and ORIGEN comparison on noble gas inventory
图 2. cosSOURCE 和 ORIGEN 惰性气体积存量计算结果对比图

从图 2 中可见, 在使用了相同的输入参数情况下, cosSOURCE 程序与 ORIGEN 对于 Kr 和 Xe-131m 的计算偏差在 3.05% 以下; 对 Xe-133m、Xe-133、Xe-135m、Xe-135 和 Xe-138 的计算偏差在 0.66% 以下。

3.4. 碱金属计算对比结果

cosSOURCE 和 ORIGEN 关于平衡循环寿期末碱金属积存量的计算结果对比可见图 3。

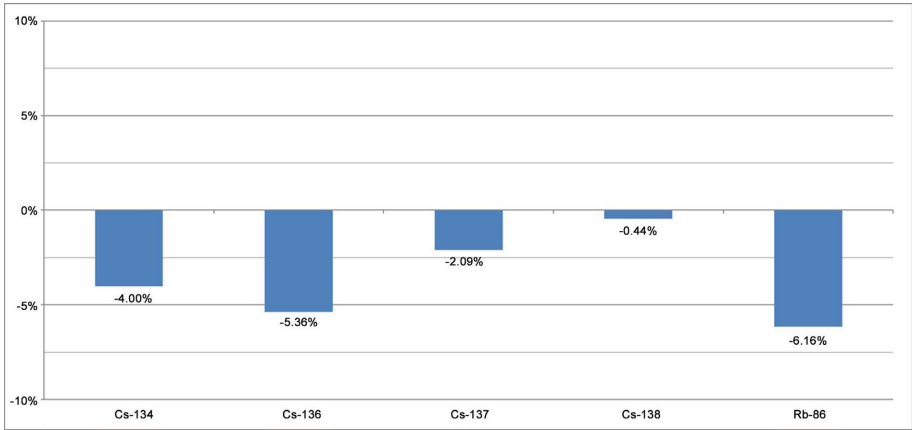


Figure 3. cosSOURCE and ORIGEN comparison on alkali metal inventory
图 3. cosSOURCE 和 ORIGEN 碱金属积存量计算结果对比图

从图 3 中可见, 在使用了相同的输入参数情况下, cosSOURCE 程序与 ORIGEN 对于 Cs-134、Cs-136、Cs-137 和 Rb-86 的计算偏差在约 2%~6%; 对 Cs-138 的计算偏差为 0.44%。

4. 总结与建议

基于对本文的工程例题的计算, 在使用了相同输入参数的情况下, 展开了 cosSOURCE 与 ORIGEN 关于碘、惰性气体和碱金属的积存量计算结果对比。由对比结果可知, cosSOURCE 软件与 ORIGEN 符合较好。

基金项目

本研究由“COSINE 屏蔽系统”(A-HN-202203)研究课题资助。

参考文献

- [1] Pusa, M. and Leppänen, J. (2010) Computing the Matrix Exponential in Burnup Calculations. *Nuclear Science and Engineering*, **164**, 140-150. <https://doi.org/10.13182/nse09-14>
- [2] Isotalo, A.E. and Aarnio, P.A. (2011) Comparison of Depletion Algorithms for Large Systems of Nuclides. *Annals of Nuclear Energy*, **38**, 261-268. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2010.10.019>
- [3] Pusa, M. (2011) Rational Approximations to the Matrix Exponential in Burnup Calculations. *Nuclear Science and Engineering*, **169**, 155-167. <https://doi.org/10.13182/nse10-81>
- [4] Pusa, M. (2013) Numerical Methods for Nuclear Fuel Burnup Calculations. Doctoral Thesis, Aalto University.
- [5] Rearden, B.T. and Jessee, M.A. (2018) SCALE Code System. Oak Ridge Natinal Laboratory.