

CN110742

CN110742
SI7-012

中国核科技报告

托卡马克商用混合堆燃耗计算

BURNUP CALCULATION FOR A TOKAMAK
COMMERCIAL HYBRID REACTOR

(in Chinese)



原子能出版社

中国核情报中心

China Nuclear Information Centre

CNIC-00438 .

SIP-0042

托卡马克商用混合堆燃耗计算

冯开明 谢中友

(西南物理研究院,四川)

摘 要

研制了聚变-裂变混合堆燃耗计算程序 ISOGEN-III 和配套的燃耗数据库 BULIB。应用该程序完成了托卡马克商用混合堆(TCB)概念设计的燃耗计算。本文简要介绍了该程序和数据库,并给出了有关的计算结果。

BURNUP CALCULATION FOR A TOKAMAK COMMERCIAL HYBRID REACTOR

(In Chinese)

Feng Kaiming Xie Zhongyi

(SOUTHWEST INSTITUTE OF PHYSICS, SICHUAN)

ABSTRACT

A computer code ISOGEN-III and its associated data library BULIB have been developed for fusion-fission hybrid reactor burnup calculations. These are used to calculate burnup of a tokamak commercial hybrid reactor. The code and library are introduced briefly, and burnup calculation results are given.

引言

聚变-裂变混合堆是聚变过程和裂变过程的一种组合,使聚变和裂变的特点得以互相补充。这种堆概念的特点是:在燃料增殖区放置大量的重元素(U或Th),用聚变产生的中子把转换材料(^{232}Th 或 ^{238}U)转换成裂变材料(^{233}U 或 ^{239}Pu)。

燃耗计算是混合堆概念设计中一项十分重要的工作,它对于验证系统的中子学性能(燃料增殖率 F 、氙增殖率 T 和能量增益 M)、确定包层中燃料的最佳布置、燃料循环方案设计以及系统经济性分析有密切的关系。混合堆设计中,燃料增殖率 F 是一项重要指标,但是目前的中子学设计都是在假定系统为稳态的前提下进行的,而堆内材料成分和中子通量分布是随时间变化的。混合堆燃耗计算的主要目的就是确定堆运行过程中燃料成分的空间分布和随时间的变化,为堆的设计研究提供数据。

大家知道,裂变堆芯部能谱基本上与空间无关,可用一个能谱来描述。燃耗计算可采用简单的点堆(零维)模型,即忽略燃耗的空间分布,中子截面多采用单群。对于混合堆设计,由于几何条件复杂,当 14.1 MeV 的聚变中子穿过第一壁和较厚的包层时,中子通量和能谱变化较大,这种变化随不同的堆型设计而异。显然,裂变堆燃耗计算方法和计算机程序不能应用于混合堆设计,需研制空间多维、中子能量多群的混合堆燃耗计算程序和燃耗数据库。

由于目前国内尚无混合堆燃耗程序,为完善混合堆的设计研究,研制了混合堆燃耗程序 ISOGEN-III,应用该程序完成了托卡马克商用混合堆 TCB(Tokamak Commercial Breeder)设计^[1]的燃耗计算。

1 计算方法

1.1 ISOGEN-III 程序

ISOGEN-III 程序是以 ISOGEN^[2]为基础研制的一维燃耗程序。ISOGEN(Isotope Generation)程序是美国 TRW 公司研制的用于计算裂变堆内同位素的产生和衰化的程序,它采用矩阵指数方法求解核素密度平衡方程。程序的基本数学方法如下:

方程式:

$$\frac{dN}{dt} = \lambda N$$

解:

$$N(t) = N_0 e^{\lambda t}$$

展开式:

$$e^{\lambda t} = 1 + \lambda t + \frac{(\lambda t)^2}{2!} + \frac{(\lambda t)^3}{3!} + \dots + \sum_{m=0}^{\infty} \frac{(\lambda t)^m}{m!}$$

递推公式:

$$N^{n+1} = N^n e^{\lambda t}$$

式中, $N_i(t)$ 是核素浓度“矢量”, λ_i 是活化/衰变交换矩阵。ISOGEN 程序采用零维模型, 中子通量为两群(热群、共振群), 由输入数据提供。

所研制的 ISOGEN-III 程序采用了 ISOGEN 程序的基本数学方法, 根据混合堆设计的特点, 对原程序做了大量的改进和扩展。ISOGEN-III 程序的主要特点和功能如下:

- (1) 可详细计算空间一维、46 群中子的混合堆燃耗问题。
- (2) 适用于各种燃料循环的混合堆增殖包层设计的燃耗问题。
- (3) 研制了较完整的燃耗数据库 BULIB, 中子截面数据考虑了共振自屏效应。
- (4) 可连接 ANISN 中子输运计算程序, 也可直接输入中子通量数据。
- (5) 程序使用方便, 可用于微机。

原则上, 混合堆燃耗计算需采用三维多群输运燃耗程序, 但计算量太大。采用一维多群燃耗程序, 可很好地兼顾计算精确度和计算机时两个方面, 这对在混合堆概念设计阶段是很实用的。

1.2 燃耗数据库 BULIB

BULIB 库是为 ISOGEN-III 程序配套研制的燃耗数据库, 它包括了混合堆燃耗计算所必需的全部数据信息。中子截面数据来自 VITAMIN-C 库, 经 AMPX-III 程序处理得到计及共振自屏效应的 46 群中子截面。

燃耗计算中, 裂变产物的影响是必须考虑的。由于裂变堆能谱较软, 仅需单独考虑热中子吸收截面大的裂变产物, 比如 ^{135}Xe 、 ^{135}Sm 等。而混合堆能谱较复杂, 需对系统中中子能量范围内吸收截面大的裂变产物进行考虑。为了减少计算量, BULIB 库只对截面大、半衰期较长的裂变产物以集总方式进行处理。集总裂变产物 f 的吸收截面可表示为:

$$\sigma_a^f = \frac{\sum_i \gamma_i \sigma_a^i}{\sum_i \gamma_i}$$

式中, σ_a^i 和 γ_i 分别为第 i 种非饱和性裂变产物的吸收截面和裂变产额。集总是对每一能群, 最后得到 46 群的集总截面, 计算中令 f 的产额为 1。

1.3 计算模型

TCB 是一个以生产裂变燃料为主的托卡马克商用混合堆设计, 一维燃耗计算模型如图 1 所示。燃料区 I 厚度为 10cm, 分为 10 个间隔; 燃料区 II 厚度为 30cm, 分为 30 个间隔, 有关的计算参数见表 1。

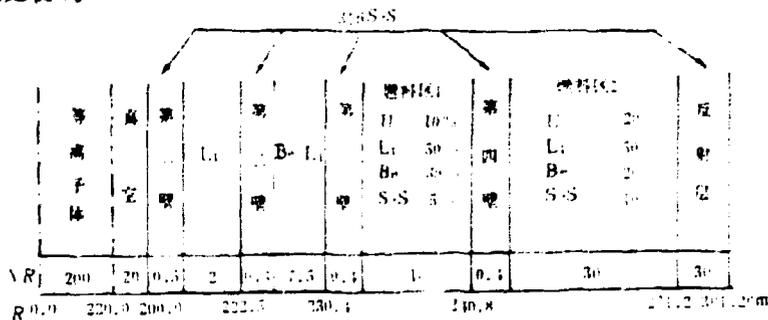


图 1 燃耗计算模型

表 1 有关计算参数

额定功率 P_n, MW	2000
中子增殖系数 $(k_{eff})_0, MW/m^3$	1.86
等效球体半径 $R/r, m/m$	6.40/2.0
燃料包层增殖率	0.67
金属铀装量, t	561
包层平均能量增益	3.31
燃料增殖区厚度, cm	40
^{239}Pu 平均卸料浓度, %	0.52
^{239}Pu 年产量, kg	4000
运行因子, %	70

2 结果与分析

在 U-Pu 燃料循环的混合堆燃料增殖包层中, 重同位素的产生与消失链如图 2 所示。

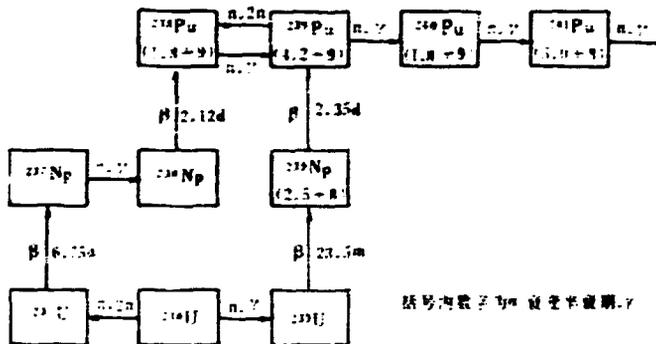
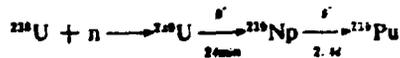


图 2 燃料区重同位素的产生和消失链

TCB 混合堆设计是以生产裂变燃料为主的抑制裂变型混合堆, 燃料增殖反应链为:



2.1 ^{239}Pu 核密度随运行时间的变化

在燃料增殖区, 主要核素的核密度变化见图 3。从图中可以看出, 出于 ^{238}U 和 ^{239}Np 的半衰期较短, 它们在堆运行数小时和数天后达到 1.21×10^{21} 和 1.73×10^{25} 的平衡浓度, 在 U 中相应的含量为 5.96×10^{-7} 和 8.15×10^{-5} 。增殖燃料 ^{239}Pu 在堆运行初期增长较快, 在 ^{239}Np 达到饱和浓度后增长趋于缓慢并呈近似线性增长。堆连续运行 150 天后停堆, ^{239}Pu 的平均卸料浓度为 0.52%。 ^{239}Pu 是由于 ^{239}Pu 吸收中子后的 γ 衰变而产生的, 它也是一种易裂变材

料,卸料时 ^{239}Pu 在 ^{238}Pu 中的含量为3.75%。裂变产物的浓度随运行时间的延长而不断增加,但多数裂变产物的半衰期都较短,计算结果表明,卸料时裂变产物在U中的含量为 9.80×10^4 。

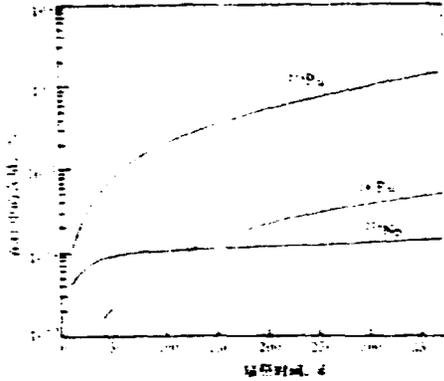


图3 核素浓度随辐照时间的变化

2.2 ^{239}Pu 生产量

裂变燃料的增殖性能是混合堆设计的一项重要指标,计算结果表明,堆连续运行150天后停堆卸料, ^{239}Pu 的平均浓度为0.52%,在U中的含量为2625.0kg。假定系统运行因子为70%,TCB设计的裂变燃料年生产能力为1515.7kg,满足设计指标。

不同的运行时刻,在裂变燃料区 ^{239}Pu 的平均浓度及燃料卸料量如表2所示。

表2 ^{239}Pu 在不同运行时刻的浓度与生产量,kg

运行时间,d	50	100	150	200	250	300	365
^{239}Pu 浓度,%	0.165	0.342	0.52	0.699	0.875	1.060	1.29
^{239}Pu 产量,kg	835.7	1731.0	2625.0	3517.0	4408.5	5297.1	6451.4

*100%运行因子

2.3 ^{239}Pu 浓度的空间分布

^{239}Pu 的浓度空间分布是很不均匀的,图3所示为卸料时 ^{239}Pu 浓度沿径向分布曲线,计算结果表明,堆连续运行150天后卸料时,在径向 $R=0$ 的附近, ^{239}Pu 的最高浓度为4.26%,而在靠近 $R=10\text{cm}$ 的位置, ^{239}Pu 的浓度仅0.049%,相差两个数量级。在 ^{239}Pu 浓度高的地方,功率密度也大,计算表明,在上述两个位置处,功率密度分别为 $37.7\text{W}/\text{cm}^3$ 和 $6.3\text{W}/\text{cm}^3$ 。功率密度的严重不均匀性将给堆的热工设计增加困难,同时对结构材料的选择、安全性能设计提出了更严格的要求。

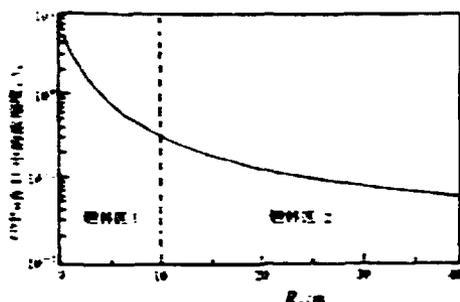


图4 燃料区 ^{239}Pu 浓度的径向分布

2.4 裂变燃料装量及燃耗深度

在每一燃料循环周期的初始,金属铀的总装量为56t,金属铀在燃料区的消耗主要通过两种核反应途径,即 (n, f) 和 (n, γ) 反应,前者对系统的主要贡献是裂变能,后者的贡献是增殖裂变燃料 ^{239}Pu 。

燃耗计算结果表明,卸料时金属铀的总消耗为0.79%,其中14.7%通过 (n, f) 反应产生裂变。卸料时,燃料区裂变燃料的平均燃耗深度为 $120\text{MW} \cdot \text{D}/(U+\text{Pu})$,这个深度仅相当于目前裂变堆燃耗的1%。由于TCB设计的燃耗较浅,因而乏燃料中裂变产物的积累少(仅980ppm),因而可降低乏燃料后处理的工艺要求,也有利于堆的环境和安全问题。

3 结论和讨论

1. 对于托卡马克混合堆TCB设计, ^{239}Pu 的浓缩度达到0.52%需连续辐照150天, ^{239}Pu 的年生产能力为1515kg。

2. ^{239}Pu 浓缩度沿包层径向分布呈严重的不均匀性,所引起的问题在工程设计中应予以充分地考虑。

3. TCB混合堆卸料时燃耗很浅,因而裂变产物的含量较低,这对燃料的后处理、堆的安全和环境问题是有利的。

目前,对混合堆燃耗问题的研究尚在探索阶段,有些工作有待进一步深入,比如,多维输运燃耗程序的研制,如何降低燃料浓缩度和功率的非均匀分布,以及与燃耗有关的堆内燃料管理问题等。

参考文献

- [1] 黄锦华等,“托卡马克混合堆概念设计”,西南物理研究院报告,SWIP-TR-C-4,1989
- [2] H. H. Van Tuyt, ISOGEN-A Computer Code for Radiotope Generation Calculations, U.S. AEC Report, HW-33745, 1964

托卡马克商用混合堆燃耗计算

原子能出版社出版

(北京 2108 信箱)

原子能出版社激光照排中心排版

北京市海淀区三环快速印刷厂印刷

☆

开本 787×1092 1/16·印张 3·字数 5 千字

1990 年 8 月北京第一版·1990 年 8 月北京第一次印刷

ISBN7-5022-0386-9

TL·182

CHINA NUCLEAR SCIENCE & TECHNOLOGY REPORT

ISBN7-5022-0386-9
TL • 182

P.O.Box 2103

Beijing, China

China Nuclear Information Centre