

文章编号: 1007-4627(2014)02-0248-05

In-Zinerater 液态包层输运燃耗数值模拟

师学明¹, 杨俊云², 刘成安¹

(1. 北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100088;

2. 中国工程物理研究院北京研究生部, 北京 100088)

摘要: Z-Pinch 惯性约束聚变是未来一种有竞争力的能源候选方案。Z-Pinch 驱动的聚变裂变混合堆可高效地嬗变反应堆乏燃料中分离出的超铀元素。对美国 Sandia 国家实验室提出的 In-Zinerater 混合堆概念进行了中子学分析和数值模拟。在三维输运燃耗耦合程序 MCORGS 中增加了处理在线添加燃料与去除裂变产物的功能, 实现了对液态燃料燃耗过程的模拟。增加 ⁶Li 丰度和燃料初装量保持寿期初反应性不变, 可以减缓寿期内反应性下降趋势。逐步增加包层内超铀元素装量, 可以控制整个寿期内反应性基本恒定。聚变功率取 20 MW, 通过反应性控制, 5 年内包层能量放大倍数在 160~180 之间, 氦增殖比在 1.5~1.7 之间, 优于 In-Zinerater 基准设计方案。

关键词: Z-Pinch 惯性约束聚变; 裂变; 超铀元素; 嬗变

中图分类号: TL62 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.31.02.248

1 引言

核能发展中积累了大量乏燃料, 其处置问题是制约核能发展的重要因素之一。超铀元素(包括 Np, Pu, Am, Cm 等原子序数大于 92 的核素, 简称 TRU)的分离、嬗变是减少乏燃料储存体积, 降低衰变热和长期放射性的重要方法。美国 Sandia 国家实验室开展了 Z-Pinch^[1] 驱动的、以嬗变超铀元素为目的的聚变裂变混合堆(简称 In-Zinerater)概念设计^[2]。

由于混合堆是次临界系统, 包层内燃料可全部采用 TRU, 嬗变效率高于快堆。按每 MW 热功率每天可使 1.05 g TRU 裂变来计, 假设包层热功率为 3 000 MW, 则每年可嬗变超铀核素约 1 150 kg。快堆是临界系统, TRU 含量过高对缓发中子寿命、多普勒系数等反应堆安全参数有不利影响。由于快堆燃料中含大量 ²³⁸U, 嬗变 TRU 的同时还会产生新的 TRU, 嬗变效率不如混合堆。

In-Zinerater 利用 Z-Pinch 产生氘氘聚变, 每 10 s 打靶一次, 每次反应产生 200 MJ 能量, 等效聚变功

率 20 MW。聚变中子源驱动含 TRU 核素的包层, 燃料是锂的氟化物与铀系元素氟化物形成的熔盐。

In-Zinerater 基准设计目标^[2]是: 包层能量放大倍数 (M) 和氦增值比 (TBR) 分别为 150 和 1.2, 但美国 Sandia 国家实验室的设计方案只是在寿期初实现了设计目标, 考虑燃耗后实现 M 和 TBR 分别约 120 和 0.8, 还需加以改进。

2 包层中子学模型简介^[2]

Z-Pinch 聚变堆芯为半径 2 m, 高 5 m 的圆柱体。聚变中子源用位于圆柱中心的点源代替, 等效聚变功率为 20 MW。第 1 壁采用 5 cm 厚的 Hasteloy-N 钢。包层总厚度 107 cm, 燃料安插在靠近第 1 壁, 厚度为 57 cm 的区域内。燃料管分 6 排, 按六角形栅元布置, 栅距 9 cm, 燃料在管内流动。燃料管内外直径分别为 4.4 cm 和 4.8 cm, 管壁为 Hasteloy-N 钢。燃料区后面是厚度为 50 cm 的液态 Pb 层, 之后为 5 cm 的钢壁。包层上下端是厚度 20 cm 钢壁。基准设计中燃料的初始成份是 (LiF)₂-(AnF₃), ⁶Li 的丰度为 5%;

收稿日期: 2013-08-09; 修改日期: 2013-12-05

基金项目: 国家磁约束核聚变能研究专项(2012GB106001); 中国工程物理研究院基金资助项目(2011B0103030)

作者简介: 师学明(1978-), 男, 甘肃靖远人, 副研究员, 从事先进核能系统研究; E-mail: sxm.shi@iapcm.ac.cn.

<http://www.npr.ac.cn>

An 代表铀系核素, 其成份: 初始富集度为 4.03% 的压水堆燃料燃烧至 60 GWd/tU 的燃耗深度后, 再冷却 50 年后其中所含的 TRU。熔盐燃料物性参数缺少实测值, 理论估计熔点约 675°, 沸点高于 1400°, 密度为 4.0 g/cm³。运行中添加的 TRU 成份和初始燃料相同。

采用自编的辅助程序确定燃料管的中心位置并建立了中子学计算模型。为了节省计算时间, 建立了 30° 扇形模型, 其中布置了 95 个燃料管, 扇形两侧采用对称边界条件。计算模型参见图 1, 该模型寿期初有效增殖系数 $K_{\text{eff}} = 0.983$ 。

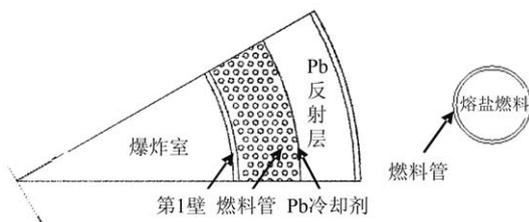


图 1 中子学计算模型 (XY 视图)

3 数值模拟

本文采用 MCORGS 程序^[4]模拟包层运输燃耗过程。中子输运部分采用 MCNP^[5], 配备从 JENDL3.1 制作的点连续截面数据库。燃耗部分采用 ORIGENS^[6], 参与输运计算的 340 余种核素的各种转换截面由 MCNP 统计得到, 剩余核素的转换截面采用 ORIGENS 自带的快堆谱截面。计算中燃料区核素采用温度为 1200 K 的截面, 冷却剂 Pb 采用温度为 600 K 的截面再经自由气体模型修正到 950 K。MCORGS 通过了一系列基准题的考核, 但尚不具备液态燃料模拟能力。本文利用 ORIGENS 可以求解非齐次常微分方程组的特点, 增加了在线添加燃料及去除裂变产物的模拟能力。实际上, 燃料添加率和裂变产物去除率就是方程的非齐次项。

3.1 计算原理

裂变产物去除速率在 ORIGENS 中用等效衰变常数来模拟, 取衰变常数为 1 即表示产生的裂变产物全部在线去除。本模拟中采用了持续去除裂变产物, 与计算步初始时刻瞬时去除相比, 更为准确。

TRU 的添加速率由具体设计目标决定。若 TRU 总量保持不变, 则添加率等于消耗率。但为了保持包层放能恒定, 燃料含量应该随燃耗加深而增加。一种

实现方式是不改变燃料成份, 但逐步增加燃料区的体积。由于液态燃料在管内流动, 可以事先在燃料区外围布置一些空管, 在需要时向其中注入燃料。另一种方式是保持燃料区体积不变, 逐步改变燃料成份。假设燃料成份为 $(\text{LiF})_{1-x}(\text{AnF}_3)_x$, x 的取值应该逐渐增加。本文采用一种简化模拟方式: 假设燃料成份和体积不变, 通过人为增加燃料的密度改变燃料装量。

图 2 是 MCORGS 的计算流程图, 虚线部分是本文新增加的反应性控制模块。该模块采用了二分法来搜索燃料添加率, 保持包层反应性和功率稳定。计算中假设当前燃耗步内能谱不发生变化, 反应性控制的收敛准则是当前步结束时包层 K_{eff} 维持在 0.982 ± 0.002 。

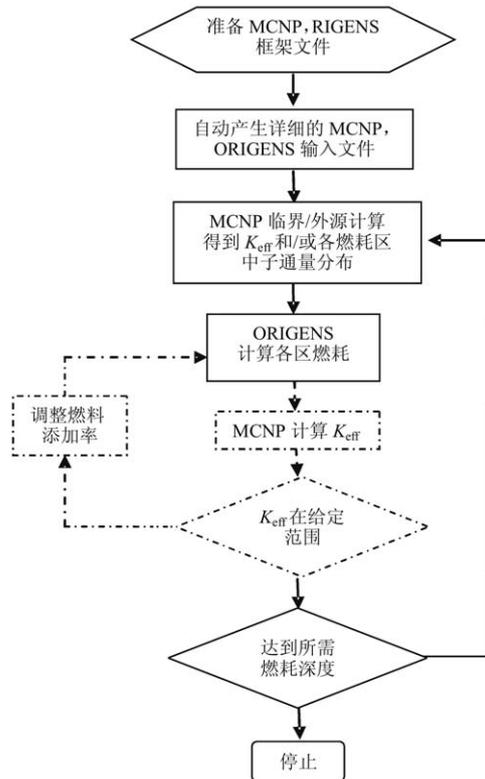


图 2 MCORGS 计算流程图

3.2 维持 TRU 总量不变时的燃耗情况

基准设计方案寿期初 $K_{\text{eff}} = 0.983$, $M = 183$, $\text{TBR} = 1.78$ 。随着燃耗加深, TRU 会不断消耗, 导致反应性下降。调节燃料添加率, 使每个燃耗步长首尾的 TRU 总量保持不变。取时间步长 20 d, 共计算了 1800 d 的燃耗。输运计算中投入 50000 个源粒子, 通量和能量沉积误差都保持在 2% 以内。熔盐燃料中

的 ${}^6\text{Li}$ 是用来产生氙的,同时可以看作是可燃毒物。 Li 的燃烧会补偿部分反应性损失。下面分别考察添加 TRU 的同时,是否补充 Li 对燃耗造成的影响。

3.2.1 同时补充 Li 和 TRU

图 3 给出了同时补充 Li 和 TRU 时的燃耗情况。 M , TBR 和 K_{eff} 逐渐下降,5 年后分别降至 70.3, 0.679 和 0.961。TBR 在 1.5 年开始低于 1.0, 无法保持氙自持。分析表明,尽管 TRU 总量保持不变,但易裂变核素,尤其是 ${}^{239}\text{Pu}$ 的消耗量是大于补充量的,因此系统反应性一直下降。反应性下降导致中子经济性变差, TBR 也随之变小。

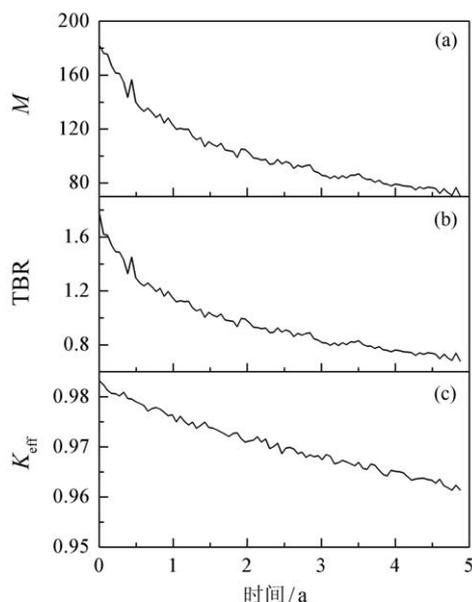


图 3 同时补充 TRU 和 Li 的燃耗情况

3.2.2 只补充 TRU

考虑只添加 TRU 而不添加 Li 的燃耗情况。5 年后, M , TBR 和 K_{eff} 分别降至 85.2, 0.646 和 0.962。从图 3 可见,不补充 Li 对能量放大有利, TBR 则略有减小。因此,后面的研究中都只补充 TRU 而不补充 Li 。

3.2.3 ${}^6\text{Li}$ 的丰度对燃耗的影响

美国 Sandia 国家实验室的研究中仅考察了寿期初 ${}^6\text{Li}$ 丰度对 TBR 的影响^[2],认为提高 ${}^6\text{Li}$ 丰度减少了系统的反应性,从而降低了 TBR。本文认为,提高 ${}^6\text{Li}$ 丰度的同时,可以增加系统内 TRU 的总量,使寿期初的 K_{eff} 保持不变。TRU 的总量增加后,相同时间内 TRU 的相对消耗量有所减少,反

应性的下降趋势也变缓。例如,当 ${}^6\text{Li}$ 丰度为 10% 和 20% 情况下,为保持寿期初 K_{eff} 维持在 0.983, 此时燃料的装量分别比基准方案提高了 7.1% 和 23.8%。由于初始反应性保持不变,增加 ${}^6\text{Li}$ 丰度后 TBR 显著增加,整个寿期内均能实现氙自持, M 的下降趋势也变慢。上述两种情况下,寿期初 TBR 分别为 3.18 和 6.7, M 分别为 180 和 193; 5 年后 TBR 分别为 1.41 和 3.77, M 分别为 96.7 和 134。

3.3 控制反应性,稳定包层功率

在前面的研究中,反应性是在不断下降的,这对传热和能量输出是不利的。要控制反应性保持平稳可采取两种方式。第一种以 3.2.3 节中提高寿期初 ${}^6\text{Li}$ 丰度的设计为基础,当燃耗过程中反应性低于设定值后减少 ${}^6\text{Li}$ 丰度,使 K_{eff} 保持在设定范围。如果当无法实现氙自持时, K_{eff} 仍低于设定值,则这种控制方式失效。采用这种方式时,燃料维持时间非常有限。

第二种方式以 3.2.2 节中较低 ${}^6\text{Li}$ 丰度的设计为基础,当燃耗过程中反应性低于设定值后,调整燃料的添加率。为减少计算时间,要求包层 K_{eff} 控制在 0.982 ± 0.002 之间,即认为反应性保持稳定。图 4 给出了此时的燃耗情况。可见 5 年内 M 维持在 160 ~ 180 之间, TBR 维持在 1.5 ~ 1.7 之间。寿期初熔盐密度为 $0.042/(\text{barn}\cdot\text{cm})$, 5 年后变为 $0.04237/(\text{barn}\cdot\text{cm})$, TRU 总量比寿期初增加 0.88%。

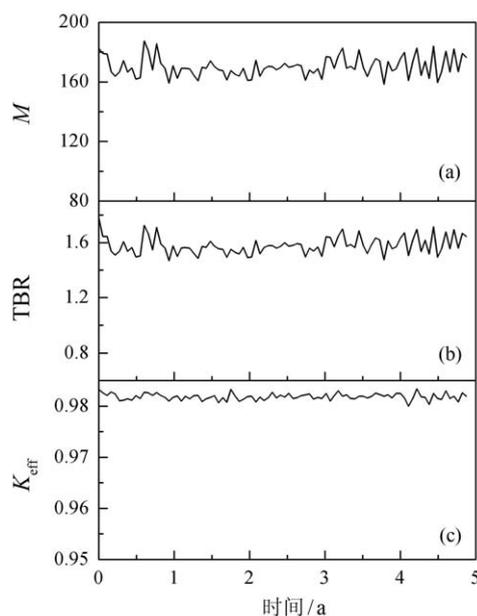


图 4 调节 TRU 添加速率控制反应性

与图 3 对比可见, 通过反应性控制, 整个寿期内 M 和 TBR 都比较平稳。为了减少 M 和 TBR 的波动, 可以设定更加严格的反应性控制收敛准则, 本文不作深入探讨。

图 5 给出了 Pu 同位素成份随燃耗的变化情况。 ^{239}Pu 的含量在不断降低, 其他同位素则在缓慢增长。限于篇幅, 其他 TRU 成份变化不再图示给出。 ^{241}Am 和 ^{237}Np 在缓慢下降, 而 ^{243}Am 基本保持恒定。Cm 的同位素除了 ^{242}Cm 先升后降外, 其他同位素都在增长。总的来看, TRU 在向着原子序数增加的方向转化。由于 ^{239}Pu 等易裂变核素对裂变放能起主要作用, 必须不断增加 TRU 添加速率才能保证包层内反应性稳定。

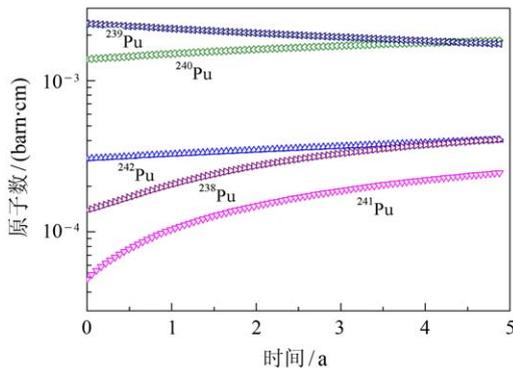


图 5 (在线彩图) Pu 的同位素成份随燃耗变化

3.4 脉冲功率作用下的包层能量沉积特性

Z-Pinch 是以脉冲方式运行的, 图 6 给出了基准设计方案寿期初时, 1 个聚变中子在包层内的能量沉积随时间变化特性。在 10 shake (1 shake = 10^{-8} s) 时, 聚变中子进入包层, 在 10^5 shake 内中子能量几乎全

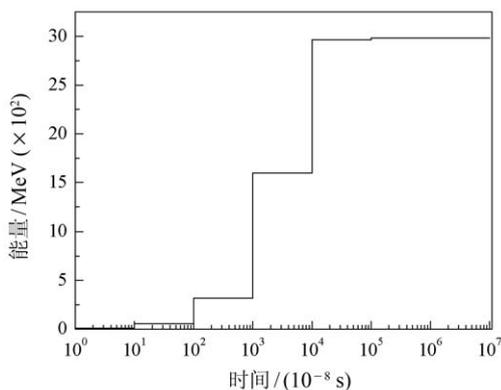


图 6 一个聚变中子在包层的能量沉积随时间的变化

部沉积在包层内。考虑到靶丸每次爆炸放能 200 MJ, 则包层内瞬间能量沉积高达 30 GJ。这对包层传热提出了非常高的要求。

4 小结

本文对 MCORGS 程序的功能进行了扩充, 使其可以模拟考虑液态燃料在线加料和去除裂变产物的燃耗过程。利用 MCORGS 程序研究了 In-Zinerater 的燃耗过程。在保持寿期初 K_{eff} 保持不变的前提下, 增加 ^6Li 的丰度可以提高 TBR 并减缓包层功率随燃耗加深的下降趋势。通过逐步增加燃料中 TRU 含量来控制反应性, 使包层功率维持在稳定水平。5 年内 M 维持在 160 ~ 180 之间, TBR 维持在 1.5 ~ 1.7 之间。5 年后 TRU 的总量比寿期初增加 0.88%。

In-Zinerater 每年可嬗变 TRU 约 1 150 kg, 嬗变效果优于快堆。但其 TRU 初装量达数十吨, 燃料的分离和储备是一个严重制约。另外, 由于 Z-Pinch 的脉冲运行特性, 在相同的稳态功率密度下, In-Zinerater 较快堆对传热的要求更高。

未来结合 TRU 以及 Li 的调节可更好地控制反应性。另外需要结合热工分析改进中子学设计, 才能得到一个可行的设计方案。

参考文献:

- [1] PENG Xianjue, HUA Xinsheng. Engineering Sciences, 2008, **10**(1): 61. (in Chinese)
(彭先觉, 华欣生. 中国工程科学, 2008, **10**(1): 61.)
- [2] CIPITI B B, CLEARY V D, COOK J T, *et al.* Fusion Transmutation of Waste: Design and Analysis of the In-Zinerator Concept[EB/OL]. [2013-09-05]. http://www.osti.gov/bridge/product.biblio.jsp?osti_id=895981.
- [3] SHI Xueming, ZHANG Ben'ai. Nuclear Power Engineering, 2010, **31**(3): 1. (in Chinese)
(师学明, 张本爱. 核动力工程, 2010, **31**(3): 1.)
- [4] JUDITH F. MCNP-A General Monte Carlo N-Particle Transport Code[EB/OL]. [2013-09-05]. <http://mightylib.mit.edu/Student%20Materials/books/mcnp4b.pdf>
- [5] HERMAN O W, WESTFALL R M. ORIGENS-S: SCALE System Module to Calculate Fuel Depletion, Actinide Transmutation, Fission Product Buildup and Decay and Associated Radiation Source Terms [R]. NUREG/CR-0200. Oak Ridge National Laboratory, 1998.

Transport and Burnup Numerical Simulation on the Liquid Blanket Burnup of In-Zinerater

SHI Xueming^{1, 1)}, YANG Junyun², LIU Cheng'an¹

(1. *Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100088, China;*

2. *Beijing Graduate School of China Academy of Engineering Physics, Beijing 100088, China*)

Abstract: Z-Pinch Inertial confinement fusion is a competitive candidate for future energy solution. A fusion-fission hybrid driven by Z-Pinch can be used to transmute transuranic elements from spent fuels of reactors efficiently. Analysis and numerical simulation of blanket neutronics of In-Zinerater, which is a fusion-fission hybrid concept design in Sandia National Laboratories, is given in this paper. Modification to the three dimension transport and burnup code MCORGS are done, so as to simulate continuous feeding and continuous chemical processing of the liquid fuel. Different combination of initial enrichment of ${}^6\text{Li}$ and fuels loading in the blanket are selected to keep the same reactivity at begin of core. By this way, the decreasing trend of reactivity at life of the core can be lowered. The reactivity can be maintained constant by increasing the fuel loading in the core gradually as the burnup deepens. Given a 20 MW fusion power, by reactivity control, the blanket energy multiplication is around 160 ~ 180 and tritium breed ratio 1.5 ~ 1.7 in 5 years, which is a better result than Sandia's original design.

Key words: Z-Pinch inertial confinement fusion; fission; transuranic element; transmutation

Received date: 9 Aug. 2013; **Revised date:** 5 Dec. 2013

Foundation item: National Magnetic Confinement Fusion Science Program in China(2012GB106001); Science and Technology Development Foundation of China Academy of Engineering Physics(2011B0103030)

1) E-mail: sxm.shi@iapcm.ac.cn.

<http://www.npr.ac.cn>