

钍基先进 CANDU 堆燃料循环方式研究

申世飞¹, 王永刚¹, 王侃¹, 胡永明², 刘勇进¹

(1. 清华大学 工程物理系, 北京 100084; 2. 清华大学 核能与新能源技术研究院, 北京 100084)

摘要:在钍基先进 CANDU 堆的概念设计中, 钍燃料的循环利用方式是一重要问题。文章采用中心两圈为钍燃料、外面两圈为稍加浓缩铀燃料的 CANFLEX 燃料棒束, 通过对燃料棒束栅元物理特性的研究, 提出了一套切实可行的直接自身再循环的燃料棒束循环方案。

关键词:钍燃料; CANFLEX 燃料; 燃料循环

中图分类号: TL249

文献标识码: A

文章编号: 1000-6931(2007)02-0194-05

Research on Fuel Cycle of Thorium Advanced CANDU Reactor

SHEN Shi-fei¹, WANG Yong-gang¹, WANG Kan¹, HU Yong-ming², LIU Yong-jin¹

(1. Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Institute of Nuclear and New Energy Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The fuel cycle model is one of the most important problem in the concept design of Thorium Advanced CANDU Reactor (TACR). (Th-U)O₂ CANFLEX fuel bundle, with ThO₂ elements in the inner two rings and slightly enriched uranium (SEU) elements in the outer two rings, was used in the design of TACR. According to the research on the lattice physics of this fuel bundle, a feasible direct self-recycle method was researched for this Th-U fuel bundle.

Key words: ThO₂; CANFLEX fuel bundle; fuel cycle

CANDU 型反应堆具有较好的换料灵活性和较高的中子利用率, 可以方便地引入其他燃料。加拿大原子能公司(AECL)与清华大学工程物理系合作开展了钍基先进 CANDU 反应堆 TACR (Thorium Advanced CANDU Reactor) 的概念设计研究, 在 ACR 系统基础上, 采用轻水冷却, 重水慢化, 着重考虑钍燃料的应用和钍燃料循环。

由于对钍燃料的回收再循环的研究目前尚不成熟, 一次通过式 (OTT) 方案被视作较为可

行的方案。OTT 方案在 CANDU 堆中有两种实现途径^[1]: 1) 混合堆芯方案, 大部分燃料通道装驱动燃料 UO₂, 在小部分通道内装 ThO₂; 2) 混合棒束方案, 在棒束内部同时布置钍棒和铀棒。

本工作采用混合棒束方案中的直接自身再循环方式。在该方式中, Th 燃料棒束在经过 1 个辐照循环后, 将原有的 Th 棒束拆卸下来, 静置一段时间, 让其中的²³³Pa 尽可能地转化为²³³U, 直接与新的 SEU (稍加浓缩铀) 燃料棒再

次组合,形成新的混合棒束,再次放入反应堆中完成下1个循环,如此往复,直至可裂变燃料含量低于一定限值为止。目前,已经有可靠的技术和经验制造可拆卸的燃料棒束^[2]。

1 燃料栅元与燃料布置

研究采用 CANFLEX 43 根燃料元件的燃料棒束,燃料栅元采用轻水冷却剂、重水慢化剂(图1)。在中心棒以及第2圈中设置 ThO_2 燃料元件,在外面两圈的 35 根燃料棒中使用 SEU UO_2 燃料元件作为驱动燃料。栅元参数为:棒束长度 49.53 cm;燃料棒数量 43,其中,第1、2、3、4圈分别为 1、7、14、21根;栅元栅距 22.0 cm。

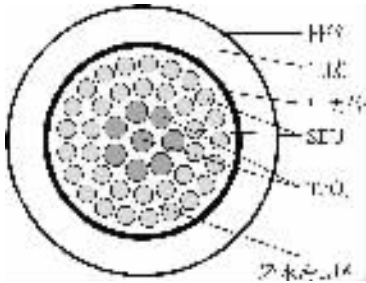


图1 TACR 燃料棒束截面图

Fig. 1 Cross section of TACR fuel bundles

2 参数的确定

2.1 铀消耗率

铀消耗率是指产生一定量电能的天然铀的需要量。在本文的计算中,天然铀浓缩后尾料的 ^{235}U 丰度(以质量分数计,下同)设定为 0.2%,电站总的热电转换效率设定为 36%。

2.2 卸料燃耗

由于 CANDU 堆采用不停堆换料,燃耗随时间的分布是连续的。因此,可采用积分 k_{∞} 的概念($\int k_{\infty}$)来表示全堆的反应性状态,其定义为:

$$\int k_{\infty} = \frac{\int k_{\infty} dt}{\int dt} \quad (1)$$

该参数使得基于燃料栅元计算的燃耗值可用于全堆的燃耗分析,全堆平均卸料燃耗可由它来确定。CANDU 型反应堆的积分 k_{∞} 一般

为 1.035~1.045,本文取 1.040,即当栅元的积分 k_{∞} 减小到 1.040 时,则认为该棒束需要换料,该时刻下的燃耗即为卸料燃耗。

2.3 参考栅元

将 ACR700 反应堆使用的全铀 CANFLEX 燃料棒束作为参考燃料。该棒束共有燃料棒 43 根,其中,中心棒为含铀 7.5% 的天然铀,其余 42 根棒为富集度 2.1% 的 SEU。对该参考栅元进行计算。积分 k_{∞} 达到 1.040 时,其结果如下:卸料辐照值为 3.55 kb^{-1} ($1 \text{ b} = 10^{-28} \text{ m}^2$);卸料燃耗(以金属铀计,下同)为 $22.46 \text{ MW} \cdot \text{d/kg}$;铀消耗率为 $127.1 \text{ Mg}/(\text{GW} \cdot \text{a})$;卸料时间达到 750 FPD (FPD 为满功率天数)。

3 含钍 CANFLEX 棒束及堆内循环方式

研究用 WIMS-AECL 程序对 3 种不同的钍燃料循环方案进行计算。计算使用的核数据库为 ENDF/B-V 库,计算全部采用定功率 30 W/g。结果表明:为了达到 $22.4 \text{ MW} \cdot \text{d/kg}$ 的参考栅元卸料燃耗,在第 1 循环时,含钍燃料棒束外 2 圈的 35 根驱动燃料的富集度应达到 2.70%;在第 1 循环结束后,燃料被卸出,静置 140 d,让钍燃料中产生的 ^{233}Pa ($T_{1/2} = 27 \text{ d}$) 较为充分地衰变为 ^{233}U ;中心的钍燃料棒被卸下,与新的铀燃料组合,为保持 $22 \text{ MW} \cdot \text{d/kg}$ 的卸料燃耗,新的铀燃料富集度应达到 2.18%;新的燃料棒束再次被放入堆中完成第 2 个循环,而后,依次完成 3、4、5 循环,每次新的铀燃料富集度均应保持为 2.18%。

3.1 循环方案 1

5 次循环均使用富集度为 2.18% 的 35 根铀驱动燃料。图 2 示出了 5 个循环中 k_{∞} 随燃耗的变化。每条曲线均截止于积分 k_{∞} 减少为 1.040 时。从图 2 可看出:由于 ^{233}U 的产生并参与裂变,燃料棒束的 k_{∞} 随循环次数依次递增,在第 4、5 循环趋于稳定;第 1 个循环结束时,燃料仅能提供 $13.5 \text{ MW} \cdot \text{d/kg}$ 的卸料燃耗,第 2 循环的卸料燃耗达到了 $19.3 \text{ MW} \cdot \text{d/kg}$,而第 3、4、5 循环的卸料燃耗均达到了 $22 \text{ MW} \cdot \text{d/kg}$ 。

图 3 示出了燃料棒束第 2 圈中的 7 根钍燃料棒中 ^{233}U 质量百分比随燃耗的变化趋势,各条曲线截止于积分 k_{∞} 减少为 1.040 时。从图

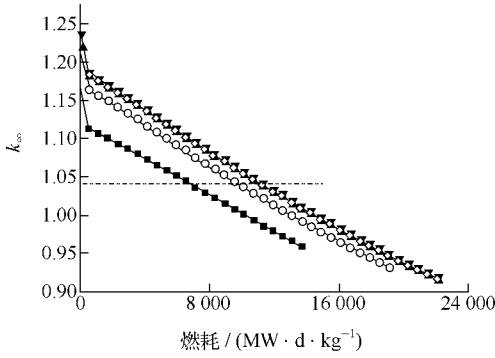


图2 各循环 k_{∞} 随燃耗的变化

Fig. 2 k_{∞} with burnup in every cycle

■——第1次循环;○——第2次循环;▲——第3次循环;
▼——第4次循环;◇——第5次循环

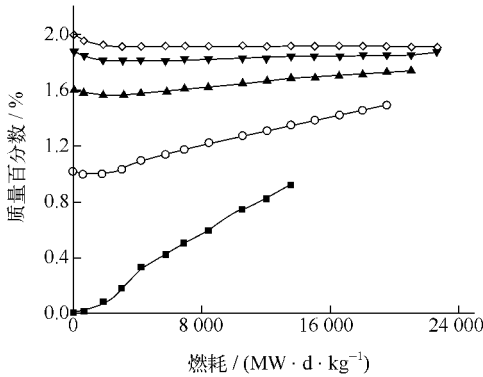


图3 各循环第2圈钷燃料中 ^{233}U 含量随燃耗的变化

Fig. 3 Content of ^{233}U with burnup in the 2nd circle fuel in every cycle

■——第1次循环;○——第2次循环;▲——第3次循环;
▼——第4次循环;◇——第5次循环

3 可看出,在后4个循环中, ^{233}U 的含量在逐渐增长,但增长幅度逐渐减小,循环之间钷燃料静置 140 d 能够有效增加 ^{233}U 含量,到了第5循环, ^{233}U 的质量百分比在开始阶段微弱减小后基本保持不变,最终保持在 1.94% 左右。各循环的平均卸料燃料、铀消耗率及累积铀消耗率列于表 1。

从表 1 可看出:由于钷燃料的参与,除第 1、2 个循环外,其余 3 个循环的铀消耗率均小于参考全铀燃料,但整个循环的累积铀消耗率仍比参考全铀燃料略多。

3.2 循环方案 2

在该方案的 5 次循环中,燃料棒束外 2 圈

的驱动燃料富集度为 2.70%。各循环 k_{∞} 随燃耗变化示于图 4。

从图 4 可看出,第 1 个循环的卸料燃耗(以重元素计,下同)和作为参考的全铀燃料同为 22.6 MW·d/kg,之后,由于 ^{233}U 迅速增加且达到饱和,使得第 2、3、4、5 循环的燃耗 k_{∞} 曲线基本重合,且都能够达到 30 MW·d/kg 左右的卸料燃耗值。而图 5 则显示了由于驱动燃料富集度的提高, ^{233}U 的含量在 1 个循环中就快速增加,经过第 1 次放置衰变后, ^{233}U 的质量百分比已经达到了 2.0%,并且在之后的 4 个循环中基本保持不变。

表 1 富集度为 2.18%SEU 元件条件下各循环的平均卸料燃耗、铀消耗率以及累积铀消耗率

Table 1 Average discharge burnup, uranium consumption, integral uranium consumption in every cycle for SEU element with enrichment of 2.18%

循环序号	燃耗 ¹⁾ / (MW·d·g ⁻¹)	铀消耗率 ²⁾ / (Mg·GW ⁻¹ ·a ⁻¹)	累积铀消耗率 ²⁾ / (Mg·GW ⁻¹ ·a ⁻¹)
1	13.5	171.7	171.7
2	19.3	133.2	147.8
3	21.7	121.3	137.2
4	22.3	118.2	131.7
5	22.3	116.6	128.3

注:1) 以重元素计(下同)

2) 以电功率计(下同)

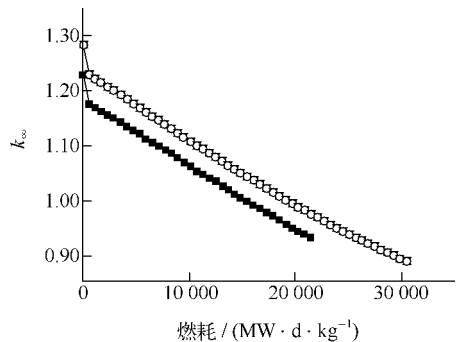


图4 富集度为 2.70%SEU 元件条件下各循环 k_{∞} 随燃耗的变化

Fig. 4 k_{∞} vs. burnup in every cycle

for SEU element with enrichment of 2.70%

■——第1次循环;○——第2次循环;▲——第3次循环;
▼——第4次循环;◇——第5次循环

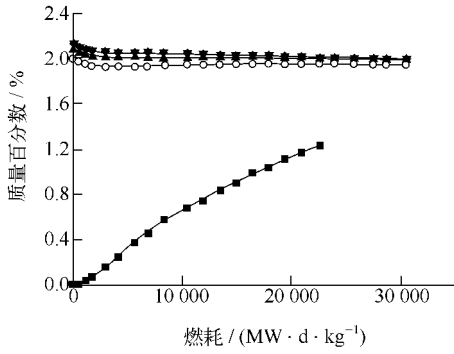


图5 富集度为 2.70%SEU 元件条件下
燃料棒束第 2 圈钍燃料中²³³U 含量
随燃耗的变化

Fig. 5 Content of ²³³U vs. burnup
in the 2nd circle fule in every cycle

for SEU element with enrichment of 2.70%

■——第 1 次循环;○——第 2 次循环;▲——第 3 次循环;
▼——第 4 次循环;◇——第 5 次循环

表 2 所列为各循环平均卸料燃耗、铀消耗率以及累积铀消耗率。从表 2 可看出:除第 1 循环外,其他 4 个循环的铀消耗率均小于参考全铀燃料的铀消耗率,也明显小于方案 1 中的铀消耗率,说明从第 2 个循环开始,钍燃料发挥了明显的作用,5 个循环结束后的累积铀消耗率比参考全铀燃料的累积铀消耗率减少了 5.3%,比方案 1 的累积铀消耗率减少了 6.2%。

3.3 循环方案 3

第 1 循环的燃料棒束外 2 圈的驱动燃料

表 2 富集度为 2.70%SEU 元件条件下
各循环平均卸料燃耗、铀消耗率
以及累积铀消耗率

Table 2 Average discharge burnup, uranium
consumption, integral uranium consumption in every
cycle for SEU element with enrichment of 2.70%

循环 序号	燃耗/ (MW · d · kg ⁻¹)	铀消耗率/ (Mg · GW ⁻¹ · a ⁻¹)	累积铀消耗率/ (Mg · GW ⁻¹ · a ⁻¹)
1	22.6	147.1	147.1
2	30.4	115.2	128.4
3	30.4	114.9	123.5
4	30.1	115.5	121.5
5	29.9	116.3	120.4

²³⁵U 富集度为 2.70%,第 2、3、4、5 循环均使用富集度为 2.18%的驱动燃料。各循环 k_{∞} 随燃耗的变化示于图 6。

从图 6 可看到,5 条循环曲线几乎完全重合,各循环的卸料燃耗均约为 22 MW · d/kg,各循环的燃耗变化特性也基本相同。这样的循环特性为燃料堆芯管理的安排提供了诸多方便。

图 7 为各循环燃料棒束第 2 圈钍燃料中

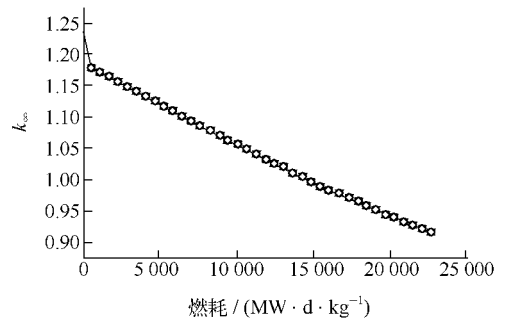


图 6 第 1 循环使用 2.70%SEU、
第 2~5 循环使用 2.18%SEU 元件时
各循环 k_{∞} 随燃耗的变化

Fig. 6 k_{∞} vs. burnup in every cycle
in case of 2.70%SEU element for 1 cycle
and 2.18% SEU element for 2-5 cycles

■——第 1 次循环;○——第 2 次循环;▲——第 3 次循环;
▼——第 4 次循环;◇——第 5 次循环

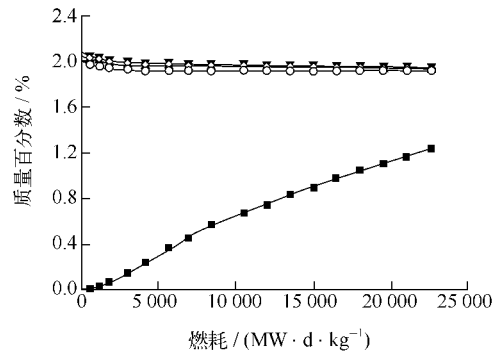


图 7 第 1 循环使用 2.70%SEU、第 2~5 循环
使用 2.18%SEU 元件时燃料棒束第 2 圈钍
燃料中²³³U 含量随燃耗的变化

Fig. 7 Content of ²³³U vs. burnup in the 2nd
circle fule in every cycle in case of 2.70%SEU element
for 1 cycle and 2.18% SEU element for 2-5 cycles

■——第 1 次循环;○——第 2 次循环;▲——第 3 次循环;
▼——第 4 次循环;◇——第 5 次循环

^{233}U 含量随燃耗的变化。该图所显示的变化趋势与全部使用 2.70%的方案极其相似,由于使用完全相同的燃料,第 1 循环的曲线完全一致,而后续的 4 个循环中,方案 2 中较高的驱动燃料富集度并未明显提供较高的 ^{233}U 含量,在该方案中,后续 4 个循环的 ^{233}U 质量百分比依然维持在 2.0%左右。表 3 所列为各循环平均卸料燃耗、铀消耗率以及累积铀消耗率。表 4 为积分 k_{∞} 达到 1.040 时,各循环的燃耗、堆内辐照值及堆内运行时间。

从表 3 可看到:与方案 2 类似,从第 2 个循环开始,铀消耗率均小于参考全铀燃料,整个循环的总累计消耗率比参考全铀燃料减少了 3.62%;在该方案下,铀累积消耗率少于方案 1,各循环的铀消耗率及铀累积消耗率都与方案 2 极为相近;方案 2 与方案 3 相比较可见,就后 4 个循环驱动燃料富集度的提高而言,两方案均未能有效提高 ^{233}U 的含量,同时,也未能明显提高各循环的铀消耗率以及整个循环的铀累积消耗率。

由表 4 可见,该方案下各循环卸料辐照值集中在 $3.30\sim 3.51\text{ kb}^{-1}$ 之间,堆内运行时间为 725~755 FPD,相差不大。这样,对各循环的入堆棒束可以平等看待,便于燃料管理方案的安排,且表 3 所列各值均与参考全铀燃料接近,使得含钍燃料棒束的燃料管理能够容易借鉴 ACR700 的燃料管理方案。

表 3 第 1 循环使用 2.70%SEU、第 2~5 循环使用 2.18%SEU 元件时各循环平均卸料燃耗、铀消耗率及累积铀消耗率

Table 3 Average discharge burnup, uranium consumption, integral uranium consumption in every cycle in case of 2.70%SEU element for 1 cycle and 2.18% SEU element for 2-5 cycles

循环 序号	燃耗/ ($\text{MW}\cdot\text{d}\cdot\text{kg}^{-1}$)	铀消耗率/ ($\text{Mg}\cdot\text{GW}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$)	累积铀消耗率/ ($\text{Mg}\cdot\text{GW}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$)
1	22.6	147.1	147.1
2	22.4	115.9	131.0
3	22.2	116.6	126.3
4	22.0	116.7	123.9
5	21.7	116.8	122.5

表 4 第 1 循环使用 2.70%SEU、第 2~5 循环使用 2.18%SEU 元件时积分 k_{∞} 达到 1.040 时各循环的燃耗、堆内辐照值及堆内运行时间
Table 4 Burnup, irradiation value and runtime at integral k_{∞} of 1.040 in every cycle in case of 2.70%SEU element for 1 cycle and 2.18% SEU element for 2-5 cycles

循环 序号	燃耗/ ($\text{MW}\cdot\text{d}\cdot\text{kg}^{-1}$)	辐照值/ kb^{-1}	堆内运行时间/ FPD
1	22.6	3.51	755
2	22.4	3.48	745
3	22.2	3.41	740
4	22.0	3.35	730
5	21.7	3.30	725

4 小结

本研究在已有的 CANDU 堆堆内钍燃料循环的基础上,以 ACR700 中应用的燃料棒束作为参考,选用一次通过式(OTT)混合棒束的循环方式,以积分 k_{∞} 为燃料需要换料的标志,研究了不同驱动燃料富集度时, k_{∞} 随燃料燃耗的变化以及 ^{233}U 的生成在各循环中的变化,同时对各循环方案的铀消耗率进行了比较。

保持各循环的卸料燃耗均与参考燃料相同的方案较其它方案有利于燃料的管理安排。与全部使用 2.18%铀驱动燃料的方案相比,该方案能充分利用钍燃料,各循环均有更好的铀消耗率,燃料利用更为充分,与使用 2.70%铀驱动燃料的方案相比,可在不增加驱动铀燃料富集度的前提下同样保证 ^{233}U 的产额,且可保证较好的各循环铀消耗率,是较为合理的堆内钍燃料循环方案。

参考文献:

- [1] CHAN P S W, BOCZAR P G, ELLIS R J, et al. Fuel-management simulations for once-through thorium fuel cycle in CANDU reactors [C]//Proceeding of IAEA Technical Committee Meeting on Fuel Cycle Options for LWRs and HWR. Vienna:IAEA, 1999:221-230.
- [2] BOCZAR P G, CHAN P S W, DYCK G R, et al. Recent advances in thorium fuel cycles for CANDU reactors[C]//IAEA TCM on Utilization of Thorium Fuel. Vienna:IAEA, 1999:17-19.