

# CANDU-6 型反应堆中引入稍加浓铀的研究

张佶翱, 张少泓

(上海交通大学 机械与动力工程学院 核技术与核工程系, 上海 200030)

**摘要:** 为了比较稍加浓铀 (SEU) 与天然铀燃料的优劣, 寻找最优的稍加浓铀富集度水平, 本文利用 WIMS-AECL 和 ORIGEN 程序研究不同富集度的 CANDU-6 堆燃料在燃料循环成本、天然铀消耗量、高放废物积累等方面的表现。结果显示, 采用稍加浓铀可节约 20% 以上的天然铀, 乏燃料量减少 30% 以上, 燃料循环成本降低 50% 以上; 1.3% 是最优的富集度水平。

**关键词:** 稍加浓铀; CANDU-6 堆; 燃料循环; 天然铀

**中图分类号:** TL352.1      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-6931(2006)04-0429-04

## Study on Introducing Slightly Enriched Uranium Fuel Into CANDU-6 Reactor

ZHANG Ji-ao, ZHANG Shao-hong

(Department of Nuclear Science and Engineering, School of Mechanical Engineering,  
Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

**Abstract:** In order to compare the advantages and disadvantages between natural uranium and slightly enriched uranium, and determine the most optimized slightly enriched uranium level, the fuel cycle cost, natural uranium consuming and high-level waste accumulation are studied for CANDU-6 reactor with various enriched level fuel. The codes used in this study are WIMS-AECL and ORIGEN2. The results show that the slightly enriched uranium can save natural uranium of more than twenty percent, reduce spent fuel accumulation of more than thirty percent and cut down fuel cycle cost of fifty percent. The study indicates that 1.3% is the most optimized enriched level.

**Key words:** slightly enriched uranium; CANDU-6 reactor; fuel cycle; natural uranium

根据中国政府目前的燃料循环政策, 中国将采用闭合式燃料循环, 从反应堆卸出的乏燃料必须经过后处理。目前, 常用的后处理技术流程复杂, 环境恶劣, 因而成本高昂。由于堆型的特点, 燃烧 NU (天然铀) 的重水堆产生的乏

燃料比压水堆多得多, 因而, 燃烧 NU 的重水堆的后处理负担很重。

SEU 系指在 CANDU 型重水堆中燃烧稍加浓铀的方案。采用这一方案可大幅提高燃料的燃耗, 从而大幅减少乏燃料的生成量, 是一种

很有吸引力的燃料循环形式<sup>[1,2]</sup>。本文着重研究 SEU 在燃料循环成本、天然铀消耗方面的优势。

## 1 SEU 的优势

根据加拿大原子能公司(ACEL)的研究结果,在最大限度利用天然铀资源和燃料循环成本最低的条件下,CANDU 型重水堆的最佳富集度应为 0.9%~1.2%,且燃耗深度(以铀计,下同)可提高到 14 000~21 000 MW·d/t<sup>[1,3]</sup>。

本文研究对比相同发电量(1 GW·a,指 1 座功率为 1 GW 的电站 1 年内的发电量)的情况下,采用 SEU 与采用 NU 的 CANDU 堆在天然铀的消耗、经济性、放射性废物产生量等方面的差异。研究中涉及的 CANDU-6 型重水堆的相关参数如下:堆芯热功率 2 158 MW,电功率 728 MW,热效率 33.7%,平均比功率 24.8 W/g。不同富集度下的燃耗深度采用 WIMS-AECL 程序进行基本栅元计算确定。对应 0.9%、1.2%、1.3%、1.5% 的 SEU,卸料燃耗分别选定为 14 000、21 000、23 500、27 600 MW·d/t。

### 1.1 天然铀耗量

我国的铀矿资源不丰富,已探铀矿大多品位低,开采成本较高。因此,减少天然铀消耗对我国核电事业的持续发展和核电国产化的实现具有特别重要意义。1 座反应堆的年换料量<sup>[4]</sup>=反应堆热功率(MW)×年满功率日数(d)/卸料平均燃耗深度(MW·d/t),式中,未考虑容量因子,年满功率日数取为 365 d。

NU 的年需要量则由  $\frac{F}{P} = \frac{x_p - x_w}{x_f - x_w}$  得到<sup>[4]</sup>。

式中:F、P 分别为供料量、产品量; $x_f$ 、 $x_p$ 、 $x_w$  分别为供料、产品、尾料丰度,尾料丰度定为 0.25%<sup>[5]</sup>。天然铀耗量对比列于表 1。

由表 1 可知:天然铀耗量随富集度的提高而降低,富集度为 1.3% 时,天然铀耗量为最低,比 NU 方案减少了 26.5%;继续提高富集度,天然铀耗量反而增大。这是因为富集度越高,富集过程中产生的贫铀量相应越多,另外,由基本栅元计算可知,富集度达到 1.3% 后,再提高富集度,卸料燃耗的提高幅度没有富集度

低于 1.3% 时的大,从而导致铀的耗量增大。

表 1 天然铀耗量对比

Table 1 Comparison of natural uranium consuming

| 燃料类型          | NU 耗量/t | 换料量/t |
|---------------|---------|-------|
| CANDU NU      | 144.4   | 144.4 |
| CANDU 0.9%SEU | 109.3   | 77.4  |
| CANDU 1.2%SEU | 106.6   | 51.6  |
| CANDU 1.3%SEU | 106.2   | 46.5  |
| CANDU 1.5%SEU | 107.6   | 39.6  |

### 1.2 燃料循环的经济性

有关燃料循环经济性的评估较为复杂。燃料循环涉及铀矿石购买、转化、富集、乏燃料运输、乏燃料后处理、高放废物处理等诸多环节。各个环节单价的确定较困难;由于技术发展水平、工业规模的不同,各国的单价存在差异。本文主要参考 OECD/NEA(经济合作发展组织/核能署)的相关研究成果<sup>[5]</sup>,同时假定 SEU 与 NU 的燃料元件加工费用相同以及它们的乏燃料后处理费用相同。另外,后处理回收的钚可制成 MOX 燃料在热堆中燃烧,也可用于快堆,因而具有一定的价值。该部分钚的单价同样取自 NEA。

燃料循环分为以下 8 个阶段:天然铀购买,铀转化,铀富集,燃料元件制造,乏燃料运输,乏燃料后处理,玻璃化高放废物地层处置,可裂变钚回收。除铀富集外,其他各阶段花费在每千克重金属上的费用依次为 50、8、110、65、13、720、90、5 \$,铀富集费用为每分离功 110 \$<sup>[5]</sup>。

在 1 GW·a 发电量情况下,3 种燃料循环的成本列于表 2。

由表 2 可见:在闭合式燃料循环下,后处理成本高,燃烧 NU 的 CANDU 堆的经济性不佳,SEU 燃料虽需富集,但经济性却得到了很大提高。这是因为:1) SEU 燃料元件减少,天然铀购买、转化和燃料元件的制造费用较 NU 少得多;2) 乏燃料生成量大为减少,后处理负担大为减轻。从表 2 还可看出,富集度提高,经济性随之改善。

表 2 CANDU 燃料循环各步成本

Table 2 Cost on every step of CANDU fuel cycle

| 燃料类型      | 天然铀购买/ \$ | 转化/ \$ | 富集/ \$ | 燃料元件制造/ \$ | 乏燃料运输/ \$ |
|-----------|-----------|--------|--------|------------|-----------|
| NU        | 722 万     | 116 万  | 0      | 939 万      | 188 万     |
| SEU(0.9%) | 598 万     | 95.7 万 | 182 万  | 550 万      | 110 万     |
| SEU(1.2%) | 613 万     | 98.0 万 | 388 万  | 385 万      | 77.1 万    |
| SEU(1.3%) | 531 万     | 84.9 万 | 380 万  | 302 万      | 60.5 万    |
| SEU(1.5%) | 538 万     | 86.1 万 | 461 万  | 257 万      | 51.5 万    |

| 燃料类型      | 乏燃料后处理/ \$ | 玻璃化高放废物<br>深地层处置/ \$ | 回收可<br>裂变钚/ \$ | 费用总额/ \$ | 燃料循环成本/<br>(美分·kW <sup>-1</sup> ·h <sup>-1</sup> ) |
|-----------|------------|----------------------|----------------|----------|--|
| NU        | 10 400 万   | 1 300 万              | -211 万         | 13 400 万 | 15.4   |
| SEU(0.9%) | 6 090 万    | 761 万                | -87.5 万        | 7 540 万  | 8.6  |
| SEU(1.2%) | 4 270 万    | 534 万                | -63.2 万        | 5 450 万  | 6.2  |
| SEU(1.3%) | 3 350 万    | 419 万                | -81.0 万        | 5 040 万  | 5.8  |
| SEU(1.5%) | 2 850 万    | 356 万                | -69.5 万        | 4 530 万  | 5.2  |

### 1.3 高放废物积累

乏燃料中含有大量的长寿命放射性核素。这些长寿命放射性核素主要可分为 MA(minor actinides, 指 Np, Am, Cm) 和 LLFP(长寿命裂变产物) 两类, 它们的放射性强、毒性大、半衰期长, 对环境的长期潜在危险性大。

采用通用程序 ORIGEN2 分析了乏燃料中各种核素的含量。在 1 GW·a 发电量下, 计算出的 MA 和 LLFP 积累量示于图 1。

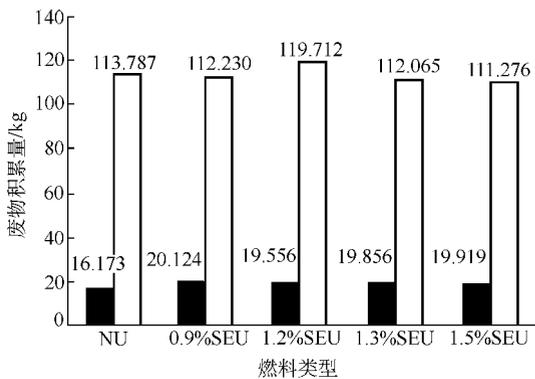


图 1 高放废物的积累

Fig. 1 Accumulation of high-level waste

□——长寿命裂变产物; ■——MA

由图 1 可知, 与 NU 方案相比, SEU 方案积累的 LLFP 量与之极为相近, 而 MA 的积累量则约增加 1/5。

### 1.4 对反应堆运行的影响

改用 SEU 后, 燃料的燃耗加深使得反应堆的换料工作量有一定程度的下降, 这对减轻换料工作负担、改善反应堆运营效益有一定助益。

### 1.5 用于提升反应堆的功率

当反应堆拥有剩余的热传递能力时, SEU 还能用来帮助提升反应堆的功率。而且, 通过径向功率的展平, 并不会超越设计给定的最大棒束功率和燃料通道功率的限制。对于电站来说, 这意味着更高的经济回报。

综合以上分析, 1.3% 左右的 SEU 在天然铀的消耗、经济性、长寿命高放废物积累 3 个方面的综合表现较好, 可认为是较优的富集度水平区间。

## 2 从 NU 过渡到 SEU 的可行性<sup>[1,6]</sup>

1) 堆芯采用管道式设计, 管道间有大量重水慢化剂, 使进入管道的中子均具有充分的慢化能谱, 不受相邻管道燃料形式的影响。因此, 可在不同区的管道内装载不同形式和富集度的燃料, 而彼此间的相互影响和对堆芯的影响均极小, 这一点与 LWR 截然不同。

2) 在线连续双向换料给燃料管理提供了极大灵活性。沿轴向及径向的反应性及功率分布变化可通过改变换料位置、方向及频率来加以控制, 因而, 容易适应不同燃料形式及富集度

引起的变化,且容许在功率运行下实现从一种燃料循环向另一种燃料循环的过渡和改变。

3) 良好的中子经济性允许使用低浓燃料,并允许燃料耗升到更高水平,使得多种燃料循环形式(包括 SEU, RU(压水堆回收铀), DUPIC(压水堆乏燃料直接在 CANDU 中燃烧))可运用在 CANDU 型反应堆中。

4) 简单的燃料组件的设计加强了燃料循环的灵活性。在同一个组件中,核燃料成分及含量可以每圈不同,以达到设计目标。

上述特点使得 CANDU 堆的堆芯不需作重大改变,仅借助改变燃料在芯部各区管道的布置和棒束内各圈元件的燃料成分和含量以及通过双向连续换料,即可从一种燃料或富集度过渡到另一种燃料和富集,这是 CANDU 堆所特有的优点。可见,实现从 NU 向 SEU 的转变是比较方便的。

### 3 结论

与采用 NU 的 CANDU 燃料循环相比,SEU 循环具有节约铀资源 1/5 以上、降低乏燃料量 1/3 以上、降低燃料循环成本 1/2 以上等优点。高放废物的积累不会带来明显的负面影响。就天然铀资源不够丰富、使用闭合式燃料循环而言,该方案具有很强的吸引力。1.3%左右的富集度具有最优的表现。

CANDU 堆在燃料循环方面的灵活性可方便地实现从 NU 向 SEU 的过渡,不需对堆芯和反应性机构的布置做改动,也不会影响反应堆的正常商业运行。

### 参考文献:

- [1] IAEA. Heavy water reactors: Status and projected development[M]. Vienna: IAEA, 2002: 320-543.
- [2] 谢仲生. 关于 PWR 及 CANDU 堆先进燃料管理策略的研究[J]. 核动力工程, 2000, 21(1): 56-62. XIE Zhongsheng. Study of advanced in core fuel management strategy for PWR and CANDU nuclear power plants[J]. Nucl Power Eng, 2000, 21(1): 56-62(in Chinese).
- [3] VEEDER J, DIDSBURY R. A catalogue of advanced fuel cycles in CANDU-PHW reactors [R]. Canada: AECL, 1985.
- [4] 连培生. 原子能工业[M]. 北京: 原子能出版社, 1997: 68-80.
- [5] OECD/NEA. The economics of the nuclear fuel cycle[R]. France: OECD/NEA, 1994.
- [6] 谢仲生, BOCZAR P. CANDU 堆先进燃料循环的展望[J]. 核动力工程, 1999, 20(6): 560-565. XIE Zhongsheng, BOCZAR P. Advanced CANDU fuel cycle vision[J]. Nucl Power Eng, 1999, 20(6): 560-565(in Chinese).