

Two Kinds of Pressurized Water Reactor Nuclear Fuel Cycle Models Analysis of the Economy*

Ping Hu, Fuyu Zhao, Zhenpeng Tang, Zhou Yan

School of Energy & Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an
Email: hyfhp@163.com

Received: May 18th, 2012; revised: May 28th, 2012; accepted: Jun. 5th, 2012

Abstract: This paper has established the mathematical modeling of nuclear fuel cycle model in two different pressurized water reactors. Comparative and sensitive analysis of costs of two nuclear fuel cycle models was conducted. With the combination of China's nuclear power development strategy, the result showed that disposal fuel circulation model can save about 14.7% of costs in the post-treatment cycle model. However, it's more economic for the post-treatment cycle model when the price of natural uranium rises up to 160 \$/kg U. Also, it greatly saves the storage room for the nuclear waste.

Keywords: Flue Cycle; Economic; Model

两种压水堆核燃料循环模式的经济性分析研究*

胡平, 赵福宇, 唐贞鹏, 严舟

西安交通大学, 能源与动力工程学院, 西安
Email: hyfhp@163.com

收稿日期: 2012年5月18日; 修回日期: 2012年5月28日; 录用日期: 2012年6月5日

摘要: 本文用对两种压水堆核燃料循环模式建立经济分析的数学模型, 结合我国核能发展战略, 对比分析了两种核燃料循环的费用及成本, 并对敏感参数进行了分析, 得出结论: 一次性通过燃料循环比进行后处理的燃料循环模式大约节约 14.7% 的资金, 当天然铀价格上涨至 160 \$/kg U 时, 对乏燃料进行后处理更加经济, 而且进行乏燃料后处理后为核废物的贮存节约了大量空间。

关键词: 核燃料循环; 经济性; 模型

1. 前言

对于压水堆燃料循环经济性的评价工作, 在上世纪八、九十年代已经有很多专家学者进行了相关的研究分析, 如上海交通大学的周法清研究了三种堆型核电厂经济性评价^[1], 北京核工程研究院的刘定钦设计了核燃料循环的计算程序^[2], 清华大学的李值华对核燃料循环系统进行了系统动力学分析^[3], 根据当时的技术进展及市场价格, 一般都认为燃料的一次通过不进行后

处理比较经济, 大约便宜近 10% 左右^[4], 因此有关燃料的后处理研究工作都先后进行了缩减或停顿。随着我国核电的大发展, 对铀资源的需求急速扩大, 对乏燃料进行后处理就显得非常迫切了, 对于我国来说, 核燃料循环走什么路线, 除了在技术上需做进一步的研究外, 也必须从经济上做论证比较, 以期从战略上对压水堆的燃料循环方式和途径做出合理的评价。

2. 单堆模型的经济性分析

关于核电站燃料循环费用的计算, 在国外有两种

*资助信息: 本研究受到 863 重点项目(2009AA050705)资助。

计算方法，一种是只计算核电厂运行中更换的燃料费用，堆芯首次装载的燃料费在初始投资成本中计及，另一种是将首次装载及运行更换的核燃料费用都计入燃料循环费。在进行不同燃料循环方式的经济性比较时，一般采用后一种方法^[5]。同时为了计算方便，我们采用单堆模型。

计算模型及条件假设

本文对我国压水堆核电燃料循环两种模式的经济性分析进行情景假设：

情景 1：假设乏燃料从压水堆卸出后，直接长期贮存，不进行后处理，即一次通过型燃料循环方式。

情景 2：假设我国 2025 年建成商用后处理厂，使我国 UO₂ 乏燃料总处理量达到 800 t/a，分离钚暂存不复用。

为了便于比较分析，我们假设堆型的性能参数如下：装机容量为 1 GW，采用的燃料元件的富集度为 4.45%，燃料为 50 GW·d/t。进行经济性比较，由于一些参数比较敏感，给计算带来困难，因此，本文通过大量调研，以 2011 年价格水平为准，查阅了燃料前端管理发生的费用取自网站 <http://www.uxc.com/> 提供的一些数据，其他只能采用国外公布一些数据作计算，国外报道的各种有关价格数据，其差别也很大，进行了综合比较之后选取了以下一组数据作为计算的依据(见表 1)。

Table 1. Price parameters^[6]
表 1. 价格参数^[6]

名称	单位	范围	取值
天然铀	\$/kg	46.8~110	55.25
铀的转化	\$/kg	3~13	9
贫化铀	\$/kg	-	12
铀元件制造	\$/kg	100~330	300
铀元件运输	\$/kg	25~47	40
铀元件后处理	\$/kg	250~1000	550
MOX 元件制造	\$/kg	1000~2560	2215
MOX 元件运输	\$/kg	25~47	40
MOX 元件后处理	\$/kg	1000~2000	1500
钚价格	\$/kg	-	15,000
高放废物固化	\$/kg	-	800
废物永久贮存	\$/kg	72~322	150
铀的浓缩	\$/sw	100~150	110
乏燃料暂存	\$/kg·a	400~600	470
钚的贮存	\$/kg·a	600~2000	1200

3. 两种模式的核燃料循环经济性模型及分析

3.1. 一次通过不进行后处理时的经济性分析

图 1 给出了一次性通过不进行后处理时的投入产出模型。从天然铀开始，经过转化，浓缩，铀元件制造，进入反应堆中燃烧，最后卸出乏燃料，经过中间贮存后进行永久贮存。

根据图 1 可以建立如下的计算模型：

设 1 GW 压水堆核电站每年消耗富集度为 X_p ，重量为 M 的燃料元件，这批燃料元件制造费 V_1 ，UF₆ 的浓缩费 V_2 ，UF₆ 的转化费 V_3 以及天然铀的购买费 V_4 的计算模型如下：

$$V_1 = C_1 M / r \quad (3-5)$$

$$V_2 = C_2 M \left[(M_F - 1) V_{(X_r)} + V_{(X_p)} - M_F V_{(X_{nat})} \right] / r^2 \quad (3-6)$$

$$V_3 = C_3 \cdot M_F \cdot M / r^2 \quad (3-7)$$

$$V_4 = C_4 \cdot M_F \cdot M / r^3 \quad (3-8)$$

燃料的运输费用 V_5 ，乏燃料的中间贮存费用 V_6 ，乏燃料的永久贮存费用 V_7 的计算模型如下：

$$V_5 = C_5 \cdot M \quad (3-9)$$

$$V_6 = C_6 M \cdot t (1 + i_n)^t \quad (3-10)$$

$$V_7 = C_7 M \quad (3-11)$$

燃料循环过程中产生的副产品—贫化铀的价值 W_t 的计算模型如下：

$$W_t = C_t M \cdot \frac{X_p - X_{nat}}{X_{nat} - X_t} / r^2 \quad (3-12)$$

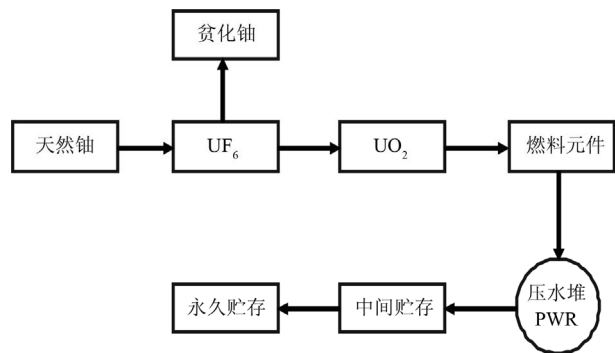


Figure 1. Nuclear fuel cycle one through the input-output model
图 1. 一次性通过时的投入产出模型

上述各式中:

C_1 为单位质量的燃料元件的制造费用; C_2 为对 UF_6 进行浓缩的费用; C_3 为单位量的天然铀转化为 UF_6 的费用; C_4 为单位量的天然铀的价格; C_5 为单位质量的燃料元件的运输费用; C_6 为单位质量的乏燃料的中间贮存费用; C_7 为单位质量的乏燃料永久贮存的费用; C_8 为单位质量的贫化铀的价值; r 为转化和燃料制造过程中 U 的回收率, 取值为 99.5%; M_F 为质量因子, 其中 $M_F = \frac{X_p - X_t}{X_{nat} - X_t}$, X_{nat} 、 X_p 、 X_t 分别为进料天然铀、浓缩铀和尾料的 ^{235}U 的富集度; $V_{(x)}$ 为含铀浓度为 X 的价值函数, 通常取

$$V_{(x)} = (2X - 1) \ln \left(\frac{X}{1 - X} \right) [5]; t$$

为乏燃料的中间贮存时间, 在此计算时取平均值为 3 年; i_n 为名义利率, 为了方便计算, 在实际计算中忽略这个参数的影响。根据图 1 的循环流程以及上述每一部分详细的经济性计算模型可以得到燃料循环前端 S_f , 燃料循环后端 S_{b1} 以及总循环 S_1 的投入产出的计算模型如下:

$$S_f = V_1 + V_2 + V_3 + V_4 + V_5 - W_t \quad (3-13)$$

$$S_{b1} = V_5 + V_6 + V_7 \quad (3-14)$$

$$S_1 = S_f + S_{b1} \quad (3-15)$$

结合表 1 中的价格参数以及经济性计算模型, 得到单堆模型下一次性通过循环模型各个流程的具体费用如表 2。

Table 2. Once through the cycle model of the specific cost schedule
表 2. 一次通过循环模型的具体费用表

循环模型中的各流程	每年需要的费用(\$)
燃料元件制造费 V_1	566.83 万
UF_6 的浓缩费 V_2	1267.2 万
UF_6 的转化费 V_3	173.01 万
天然铀的购买费 V_4	1062.1 万
燃料元件的运输费用 V_5	75.2 万
贫化铀的价值 W_t	207.78 万
燃料循环前端的费用 S_f	2936.5 万
乏燃料的运输费用 V_5	75.2 万
乏燃料的中间贮存费用 V_6	883.6 万
乏燃料的永久贮存费用 V_7	282 万
燃料循环后端的费用 S_{b1}	1240.8 万
燃料循环的总费用 S_1	4177.3 万

对上表的数据进行分析可知: 1) 在一次通过循环模型中循环的费用主要集中在燃料循环的前端, 约占 82.2%; 2) 随着核电的大发展天然铀的价格势必会持续上涨, 而天然铀的费用在总费用中占据的比例非常大, 约为 28%, 这样燃料循环的总费用增加导致的核电成本的增加会使核电的竞争力下降。

3.2. 回收 U 复用、回收 Pu 暂存不复用时的经济性分析

图 2 给出了回收 U 复用、回收 Pu 暂存不复用时的投入产出模型。模型的前端与一次性通过时相同, 区别主要在于乏燃料不永久贮存而是进行后处理, 回收的铀资源进行复用。

由于模型的前端与一次性通过时相同, 在此就不做重复的分析计算, 根据上图得到回收 U 复用、回收 Pu 暂存不复用时的投入产出模型的后端的计算模型如下:

1) 导出的乏燃料的后处理费用 V_8 的计算模型:

$$V_8 = C_8 \cdot M \quad (3-16)$$

2) 回收铀复用时收益 W_U 的计算模型:

$$W_U = C_p \cdot M \cdot r^3 / M_{Fd} - C_4 \cdot M_{Fd} \cdot M \cdot r^2 - C_3 \cdot M_{Fd} \cdot M \cdot r - C_2 \left[(M_{Fd} - 1) V_{(X_t)} + V_{(X_p)} - M_{Fd} V_{(X_k)} \right] \quad (3-17)$$

式中:

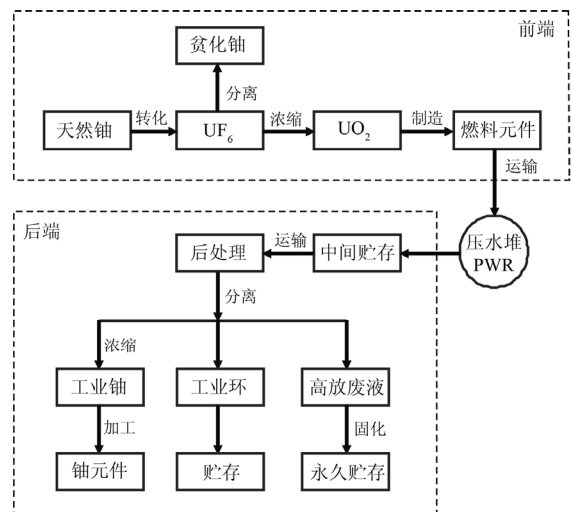


Figure 2. The input-output model which recycling U reuse, recycle Pu temporary
图 2. 回收 U 复用、回收 Pu 暂存不复用时的投入产出模型

$$C_p = C_{UF_6} \frac{X_p - X_t}{X_{nat} - X_t} + C_2 \cdot S \quad (3-18)$$

3) 回收铀暂存时收益 W_{Pu} 的计算模型:

$$W_{Pu} = C_{Pu} \cdot M_{Pu} \cdot r \quad (3-19)$$

4) 高放废物的最终处理费用 V_9 的计算模型:

$$V_9 = (C_9 + C_{10}) \cdot M_h \quad (3-20)$$

上述各式中:

C_8 为单位质量的乏燃料的后处理费用; C_p 为单位质量浓缩铀的价格; M_{Fd} 为质量因子,

$$M_{Fd} = \frac{X_p - X_t}{X_k - X_t}, \text{ 其中 } X_k \text{ 为乏燃料中铀的浓度; } C_{UF_6}$$

为 UF_6 的价格; S 为产生单位质量的浓缩铀所需的分离功。 C_{Pu} 为工业铀的价格; M_{Pu} 为 1 GW 压水堆电站每年可回收的工业铀的质量; C_9 、 C_{10} 分别为单位质量的高放废物固化和贮存的费用; M_h 为 1 GW 核电站每年产生的高放玻璃固化废物, 取值为 5 t。

综合上述计算模型得到回收铀复用, 回收铀不复用时的燃料循环的后端处理的费用 S_{b2} 的计算模型:

$$S_{b2} = V_8 + V_9 - W_U - W_{Pu} \quad (3-21)$$

结合一次性通过的投入产出模型与回收 U、Pu 复用时的投入产出模型的经济性分析, 把两种模型详细的计算结果进行对比(均是在单堆模型下进行计算的结果), 如表 3 所示。

由表 3 可以计算得出, 燃料一次通过不进行后处理比较经济, 大约便宜近 14.7%, 因此在上世纪八、九十年代有关燃料的后处理研究工作都先后进行了

Table 3. 1 GW PWR in two kinds of model under the economical comparison

表 3. 1 GW 压水堆核电站在两种模型下的经济性比较

每年投入或产出(\$)	一次性通过	U、Pu 复用
循环前端的投入	2936.5 万	2949.5 万
贫化铀的价值	172.4 万	172.4 万
乏燃料的运输费用	75.2 万	75.2 万
乏燃料的中间贮存费用	883.6 万	883.6 万
乏燃料的永久贮存费用	282 万	-
乏燃料的后处理费用	-	1504 万
回收铀浓缩的费用	-	138.9 万
回收产生的工业铀价值	-	74.6 万
回收产生的工业铀价值	-	344.8 万
高放废物固化贮存费用	-	475 万
总支出	4177.3 万	4791.2 万

缩减或停顿, 分析其主要原因是由于天然铀价格太低和后处理价格贵所致。

3.3. 天然铀价格和后处理价格对乏燃料处置的影响

结合表 2 和表 3 的相关数据, 根据下列等式:

乏燃料的永久贮存费用 V_7 = 乏燃料的后处理费用 V_8 - 回收铀的价值 W_U - 工业铀的价值 W_{Pu} + 高放废物固化贮存费用 V_9

进行计算后, 考虑铀价格的增长和高放废物处置技术的进步后进行修正(假设铀价格与天然铀的价格成正比, 高放废物处置的费用与后处理的费用成正比)^[6], 可以得到天然铀价格和后处理价格对乏燃料处置的影响, 如图 3 所示。

其关系为线性关系, 把上述公式进行简化后为:

$$C_8 = 4.2C_4 + 128 \text{ \$/kg} \cdot U \quad (3-22)$$

根据图 3 可知, 假设目前后处理价格维持在 800 $\text{\$/kg} \cdot U$ 不变, 天然铀的价格上涨到 160 $\text{\$/kg} \cdot U$ 左右, 进行后处理比燃料一次通过更加经济。

4. 结论

综合上述分析可知: 一次性通过燃料循环比进行后处理的燃料循环从经济角度来讲更加划算, 大约节约了 14.7% 的资金; 进行后处理的燃料循环的费用的增加主要在于后处理的费用, 随着后处理技术的进步, 这部分的费用会逐渐减少, 从而使后处理的经济性增强。进行后处理后 1 GW 压水堆核电站每年产生

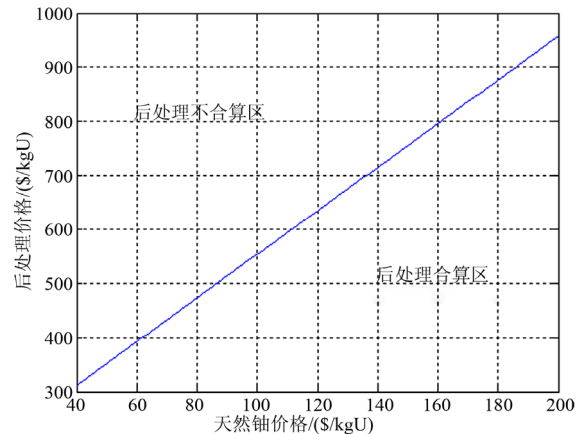


Figure 3. Natural uranium prices and post-treatment for spent fuel disposal costs influence
图 3. 天然铀价格和后处理费用对乏燃料处置的影响

的高放废物经过固化后的质量为 5 t 左右^[7], 而一次性通过需要贮存的乏燃料的质量为 18.8 t, 这样就为核废物的贮存节约了大量空间。回收铀、钚复用于热堆的燃料循环方式比一次通过的核燃料循环方式节省天然铀约 28.2%左右, 根据法国等采用乏燃料后处理燃料循环方式的国家的经验, 对乏燃料进行后处理后大约能够节约 20%~30%的天然铀^[8,9], 因此计算的最终结果符合实际情况。从资源的角度考虑, 大大降低了铀资源的浪费, 考虑到我国核电发展的形势, 对铀资源的需求将急速扩大, 本着可持续发展、节约铀资源的原则, 对乏燃料进行后处理也是势在必行。

参考文献 (References)

[1] 周法清, 叶丁. 三种堆型核燃料循环经济性比较[J]. 核动力

- 工程, 1993, 14(2): 130-143.
- [2] 刘定钦. 压水堆核燃料循环的经济分析程序介绍[J]. 核动力工程, 1989, 10(3): 18-23.
- [3] 李植华, 陈新. 我国核燃料良性循环动态模型[J]. 核动力工程, 1989, 10(4): 5-9.
- [4] 戴为智, 万春荣, 胡熙恩等. 高温气冷堆燃料循环模型及优化(I)单堆模型[D]. 清华大学核能所, 1990.
- [5] A. H. 贝科夫等著(苏). 徐秀华, 蒋铮民译. 核动力技术经济计算方法[M]. 北京: 原子能出版社, 1988.
- [6] 刘学刚, 徐景明, 朱永毅. 我国核电发展与核燃料循环情景研究[J]. 科学导报, 2006, 24(6): 22-25.
- [7] 杨欣, 戴为智, 朱永毅. 轻水堆发展规划的核燃料循环模型及优化[J]. 原子能科学技术, 1992, 26(1): 68-74.
- [8] 戴为智, 赵建军. 高温气冷堆燃料循环模型及优化(II)多堆模型[M]. 北京: 原子能出版社, 1991.
- [9] 顾茂忠. 钚的利用与核裂变能的可持续性发展[J]. 核科学与工程, 2003, 23(2): 178-183.