

秦山二期长循环堆芯燃料管理方案设计及其经济性分析

姚红, 刘国明

(中国核电工程有限公司, 北京 100840)

摘要: 秦山二期目前采用 36 组富集度为 3.7% 的换料组件的 OUT-IN 年换料燃料管理策略, 从 2 号机组第 11 燃料循环开始第一个长循环过渡, 采用 44 组富集度为 4.45% 的换料组件的 IN-OUT 长循环燃料管理策略。文章以此为基础, 开展了秦山二期燃料管理方案设计, 共给出 2 个长循环燃料管理方案: 1 个采用 44 组富集度为 4.45% 的换料组件, 1 个采用 48 组富集度为 4.45% 的换料组件。然后对这 2 个燃料管理方案的平衡循环进行经济性分析计算, 逐一介绍发电量及燃料费用的计算, 以及停堆维修频率不一样而产生的对电站成本的影响。通过这 2 个燃料管理方案设计及其经济性分析, 推荐采用 48 组富集度为 4.45% 的长循环换料方案作为秦山二期长循环燃料管理策略的补充方案, 实用性较强。

关键词: 燃料管理; 方案设计; 经济性分析

中图分类号: TL384

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2016)03-0023-04

Fuel Management Study and Economic Analysis of Long-term Refueling for Qinshan-II NPP

YAO Hong, LIU Guoming

(China Nuclear Power Engineering Co., Ltd., Beijing 100840)

Abstract: The fuel management study on long-term refueling is presented for Qinshan-II NPP. The four units of Qinshan-II NPP adopt OUT-IN reloading pattern and annually refueling now, with 36 assemblies containing 3.7% enriched UO₂ fuel. For 18-month long term refueling, 44 assemblies with 4.45% enriched fuel and IN-OUT reloading pattern will be used. However, the cycle length of designed long-term reloading pattern is not enough, as a result, the NPP utilization is reduced. A fuel management strategy, employing 48 assemblies with 4.45% enriched fuel and IN-OUT reloading pattern, is introduced. The economic analyses of the three fuel management strategies, including the income of electricity generation, expenditure of fuel assembly cost and effect of NPP Outage frequency, are investigated. Several advantages are deduced by compare analysis. So the introduced strategy is recommended for the Qinshan-II NPP 18-month long term refueling.

Key words: fuel management; reloading pattern design; economic analysis

如何在满足核电厂能量需求的前提下, 在核电厂安全运行的设计规范和技术要求限制内, 尽可能地提高核燃料的利用率, 降低核电厂的单位能量成本, 是一个关系到核电厂安全性、经济性的重要研究方向。秦山二期燃料管理方案设计及其经济性分析是秦山二期最重要的堆芯方面的研究。

堆芯燃料管理方案设计包括各批次燃料组件富集度和数量的选取, 以满足核电站运行寿期的需求; 还包括燃料组件和控制毒物在堆芯内的布置, 以满足核安全限值要求。评价堆芯燃料管理方案设计主要从安全性和经济性两方面来考虑。评价安全性的指标有焓升因子、慢化剂温度系数、停堆裕量、卸料燃耗等, 简单的经济性比较可以从循环长度(满功率运行天数)、卸料燃耗等方面考虑。为了进一步综合反映设计方案的经济性, 本文主要考虑了核燃料费用和燃料管理方案设计不同时的核电站经济性。

收稿日期: 2016-05-01

作者简介: 姚红(1977), 女, 湖南岳阳人, 研究员级高级工程师, 学士, 主要从事核电站堆芯物理工作(e-mail) yaohong@cnpe.cc。

秦山二期核电站目前有 4 × 650 MW 级机组，即 1 号~4 号机组，目前正在运行的依次是第 11、第 10、第 4、第 3 燃料循环，均采用的是平衡循环为 36 组富集度为 3.7% 的换料燃料组件的年换料燃料管理策略。根据秦山二期业主对长循环堆芯燃料管理的要求，从 2 号机组第 11 燃料循环开始采用 44 组富集度为 4.45% 的换料燃料组件的长循环燃料管理策略。

本文对秦山二期即将实施的换料组件采用 44 组富集度为 4.45% 的长循环换料燃料管理策略进行设计分析，并设计换料组件采用 48 组富集度为 4.45% 的长循环换料燃料管理策略，共计两种燃料管理策略进行研究分析。

1 设计目标和准则

1) 换料组件类型: 长循环换料采用富集度为 4.45% 的 AFA3GAA 燃料组件; 年换料采用富集度为 3.7% 的 AFA3G 燃料组件。

2) 堆芯装载模式: 长循环换料采用 IN-OUT 低泄漏模式。

3) 燃料组件的燃耗限值: 燃料组件的最大燃耗 < 52 000 MWd/tU。

4) 长循环换料燃料组件的焓升因子 $F_{\Delta H} \leq 1.60$ (其中包括 9.2% 的不确定性); 年换料燃料组件的焓升因子 $F_{\Delta H} \leq 1.55$ (其中包括 9.2% 的不确定性)。

5) 慢化剂温度系数 ≤ 0 pcm/°C。

6) 长循环换料寿期末最小停堆裕量 $\geq 2\ 200$ pcm。

2 堆芯描述

秦山二期反应堆堆芯由 121 组燃料组件组成，堆芯核功率为 1 930 MW，电功率为 650 MW，堆芯冷却剂总流量为 48 580 m³/h，压力为 15.5 MPa，活性区高度为 3.658 m，平均线功率密度为 16.09 kW/m。

长循环的燃料管理是从 2 号机组的第 11 燃料循环开始过渡的，采用 IN-OUT 低泄漏装载模式，即大部分或全部新燃料组件不再布置在堆芯外圈。由于堆芯内区布置了较高富集度的新燃料组件，引起寿期初的堆芯内区中子通量密度高，加大了堆芯的功率不均匀系数，引起较大的功率峰因子，所以使用了含钐燃料棒中的钐毒物来降低功率峰。含钐燃料棒中的 Gd₂O₃ 与 UO₂ 均匀弥散在芯块中，Gd₂O₃ 的

重量百分比为 8%，²³⁵U 富集度为 2.5%。根据含钐燃料棒在组件中的数量又分为含有 4、8、12 根等。

3 燃料管理方案描述

两种燃料管理方案都是从 2 号机组的第 11 燃料循环开始过渡，方案 1 采用 44 组富集度为 4.45% 的换料组件的 IN-OUT 长循环换料燃料管理模式，方案 2 采用 48 组富集度为 4.45% 的换料组件的 IN-OUT 长循环换料燃料管理模式。

方案 1 经过三次换料，第 14 循环达到平衡，图 1 给出了方案 1 的平衡循环堆芯装载图; 方案 2 经过三次换料，第 14 循环达到平衡，图 2 给出了方案 2 的平衡循环堆芯装载图。表 1 给出了 2 个方案平衡循环的燃料管理主要计算结果。

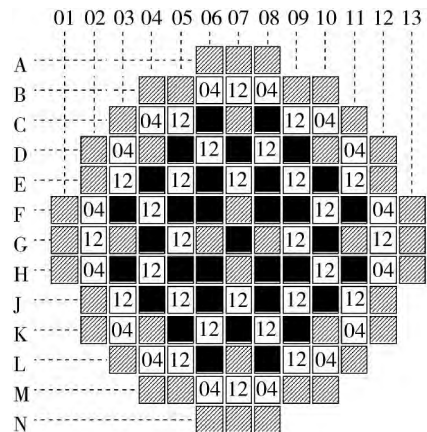


图 1 方案 1 的平衡循环堆芯装载图

Fig. 1 Equilibrium cycle core reloading pattern of No. 1 scheme

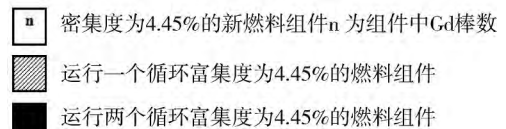
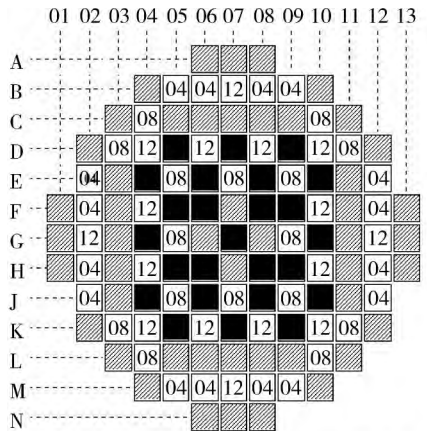


图 2 方案 2 的平衡循环堆芯装载图

Fig. 2 Equilibrium cycle core reloading pattern of No. 2 scheme

表 1 平衡循环主要计算结果

Tabl. 1 Fuel management main result comparison of equilibrium cycle of two schemes

| 参数及单位 | 方案 1 | 方案 2 |
|--------------------------------|--------|--------|
| 换料组件数/组 | 44 | 48 |
| 换料组件的 ²³⁵ U 初始富集度/% | 4.45 | 4.45 |
| 循环长度/EFPD | 479 | 508 |
| 停堆时间/d | 35 | 35 |
| 电站可利用率/% | 0.932 | 0.936 |
| 循环燃耗/(MWd/tU) | 16 693 | 17 671 |
| 焓升因子 $F_{\Delta H}^*$ | 1.571 | 1.552 |
| 含钐燃料棒根数/根 | 400 | 384 |
| EOC 平均卸料燃耗/(MWd/tU) | 45 888 | 44 515 |
| 最大的慢化剂温度系数/(pcm/°C) | -4.461 | -1.685 |
| 组件最大燃耗/(MWd/tU) | 50 690 | 50 934 |
| 寿期末的停堆裕量/pcm | 2 440 | 2 398 |

注: * 考虑了 9.2% 的不确定性。

从表 1 可以看出, 方案 1 即秦山二期目前采用 44 组富集度为 4.45% 的换料组件的长循环 IN-OUT 的燃料管理策略的组件燃耗性能表现优越, 该方案的组件平均卸料燃耗最大, 且与组件最大燃耗的差值最小, 说明该方案的组件燃耗充分和均匀, 组件的利用率较高。方案 2 即采用 48 组富集度为 4.45% 的换料组件的长环 IN-OUT 的燃料管理策略的经济性能表现优越, 该方案不仅循环长度最长, 而且电站的可利用率最大。

4 经济性分析

本文仅考虑 2 种燃料管理策略下的平衡循环的经济性分析比较。

电价已定的情况下, 发电量越多, 核电站的发电收入越多; 在电站额定功率运行的情况下, 电站发电量又取决于燃料管理策略中的循环长度。由于电站的一个换料周期分为运行期和停堆维修期, 所以电站的可利用率(循环长度与换料周期的比值)越大, 经济效益越好。

核电站总费用包括投资费用、运行维护费用、燃料费。运行维护费用又分为工资、材料费用和停堆维修费用。燃料费用包括采购天然铀的费用、天然铀提纯转化费用、铀浓缩费用、燃料元件加工费用、运输费用、中间贮存费用和废物处置费用等。图 3^[1] 给出了发电成本的基本构成因素。

下面逐一介绍关系到电站收益的发电量计算、关系到核电站成本的燃料费用的计算以及由于换料周期的不一样导致的停堆维修频率不一样而产生的对电站成本的影响。

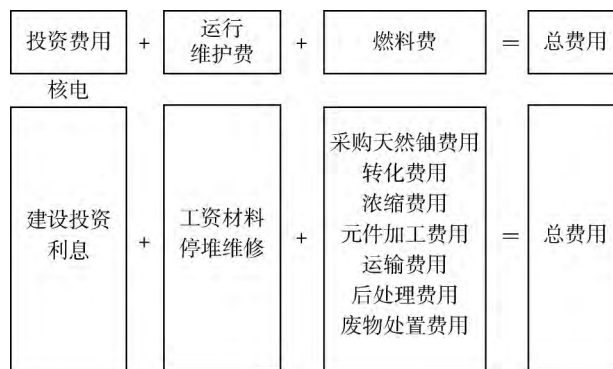


图 3 发电成本的基本构成因素图

Fig. 3 Generate electricity cost factor

4.1 发电量的计算

根据参考文献 [1] 中提供的发电量的计算为:

$$E = 365 \times 24 \times L'KT' = 8\ 760 L'KT' \quad (1)$$

式中: L' 为反应堆负荷因子(%), 核电站在一个运行期内实际生产的电与核电站在该期内以设计额定负荷能力连续运行生产的电之比, 国内核电站的负荷因子基本为 100%; K 为电功率, MWe; T' 为循环长度, 年。

如图 4 所示, 此发电量 E 是这批核燃料元件 U/n 在三次燃料循环(图中示意 $n=3$) 中发出电量的总和, 即 $E = e_1 + e_2 + e_3$ 。

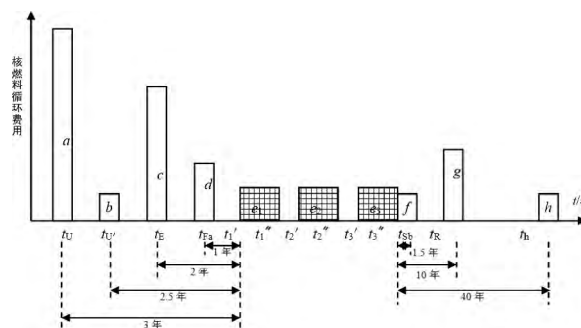


图 4 核燃料循环费用和预购时间

Fig. 4 Fuel cost and purchase in advance

核燃料费用在发电中分摊的份额应为 e_1/E 、 e_2/E 和 e_3/E 。发电所需时间为 $(t_1'' - t_1')$ 、 $(t_2'' - t_2')$ 和 $(t_3'' - t_3')$ 之和, 且中间有两次停堆换料的时间为 $(t_2' - t_1'')$ 、 $(t_3' - t_2'')$ 。根据货币的时间价值观念, 因而引出不同时间发出的电量, 由于核燃料

费用货币化之后不同时间的单位核燃料价格相应作不同的价格计算，因此要对所发出的电力进行贴现。贴现因子 PWE 为：

$$PWE = (1 - d'IRT) / (d'IRT) \quad (2)$$

式中： $d' = \ln(1 + d)$ ； d 为贴现率。

表 2 给出了两种燃料管理策略平衡循环一批料的发电量。

表 2 两种方案平衡循环一批料的发电量

Tab. 2 Generate electricity of a set fuel of equilibrium cycle

| 参数及单位 | 方案 1 | 方案 2 |
|-----------------|-----------------------|-----------------------|
| 电功率 K/MWe | 650 | 650 |
| 热功率 P/MWt | 1 930 | 1 930 |
| 循环长度/d | 479 | 508 |
| 停堆时间/d | 35 | 35 |
| 反应堆负荷因子 $L'/\%$ | 100 | 100 |
| 循环长度 $T'/$ 年 | 1.312 3 | 1.391 8 |
| 发电量 E/MWh | $7.472 4 \times 10^6$ | $7.924 8 \times 10^6$ |
| 滞留时间 $IRT/$ 年 | 3.776 7 | 3.654 3 |
| 贴现率 d | 0.05 | 0.05 |
| 贴现率 d' | 0.048 8 | 0.048 8 |
| 贴现因子 PWE | 0.913 3 | 0.915 9 |
| 发电量的贴现量/MWh | $6.824 4 \times 10^6$ | $7.258 5 \times 10^6$ |
| 年发电量的贴现量/MWh | $4.846 1 \times 10^6$ | $4.879 1 \times 10^6$ |

4.2 燃料费用的计算

如图 4 所示^[1]，核燃料的整个流程为： a 为购买天然铀，需支付天然铀的费用 F_1 ； b 为转化成 UF_6 ，需支付天然铀的转化成本 F_2 ； c 为铀 235 的浓缩，需支付铀的浓缩成本 F_3 ； d 为元件加工，需支付燃料元件加工费 F_4 ； e 为元件在堆芯中“燃烧”发电，售电得到收入； f 为乏燃料在核电厂贮存； g 为化工后处理，需支付乏燃料元件的运输费用 F_5 和后处理或中间贮存费用 F_6 ； h 为废物处置，需支付玻璃固化高放废物处置或乏燃料封装/处置的费用 F_7 。 $a \sim d$ 这四部分为核燃料循环前段(亦称前端)。 $g \sim h$ 这两部分为核燃料循环后端。

核燃料循环各个环节所需费用支付时间如图 4 所示。由于发电量的贴现时间坐标在 t_1' ，因而核燃料循环各个环节费用支付的贴现时间标准统一到时间 t_1' 。

本文根据参考文献^[1]中提供的关于燃料费用的计算方法，并依据参考文献^[2]中提供的相关燃料费用信息，完成了燃料费用的计算。表 3 列出了这些

燃料费用计算项的单位价格。

根据表 3 给出的价格计算了上述 2 个燃料管理方案的核燃料组件费用，见表 4。

折合到一个年度内，表 5 给出了这 2 个方案的发电收入和燃料费用情况。

表 3 燃料费用计算项和单位价格

Tab. 3 Calculation item and unit price of fuel costs

| 项目 | 天然铀 价格 | 铀转化 | 铀浓缩 | 元件 加工 | 运输 | 中间 贮存 | 废物 处置 |
|----------|--|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 价格 单位 | 美元/ 1bU ₃ O ₈ | 美元/ kgU | 美元/ SWU | 美元/ kgU | 美元/ kgU | 美元/ kgU | 美元/ kgU |
| 价格 数据 | 65 | 12.5 | 160 | 400 | 30 | 1 000 | 1 000 |

表 4 2 个方案的核燃料组件费用

Tab. 4 Fuel assembly costs and generate electricity incomes of two schemes

| 参数及单位 | 方案 1 | 方案 2 |
|----------------------------|------------|------------|
| 批换料组件数/组 | 44 | 48 |
| 换料组件富集度/ $\%$ | 4.45 | 4.45 |
| 每次换料天然铀的总费用 F_1 /美元 | 36 838 387 | 40 187 331 |
| 天然铀的转化费用 F_2 /美元 | 2 659 067 | 2 900 800 |
| 浓缩铀费用 F_3 /美元 | 24 547 083 | 26 778 636 |
| 元件加工费 F_4 /美元 | 8 568 806 | 9 347 789 |
| 运输费用 F_5 /美元 | 310 037 | 340 248 |
| 后处理或贮存费用 F_6 /美元 | 10 334 551 | 11 341 603 |
| 高放或封装费用 F_7 /美元 | 2 391 182 | 2 624 191 |
| 燃料总费用 $F_1 \sim F_7$ /美元 | 85 649 113 | 93 520 598 |
| 汇率/(元·美元 ⁻¹) | 6.28 | 6.28 |
| 燃料费用/亿元 | 5.378 8 | 5.873 1 |
| 组件费用/(万元·组 ⁻¹) | 1 222 | 1 224 |

表 5 两种方案电站寿期内的发电收入和燃料费用

Tab. 5 Fuel assembly costs and generate electricity incomes of two schemes in NPP life

| 参数及单位 | 方案 1 | 方案 2 |
|---------------------------|-----------------------|-----------------------|
| 寿期/年 | 40 | 40 |
| 循环长度/d | 479 | 508 |
| 停堆时间/d | 35 | 35 |
| 电价/(元·kWh ⁻¹) | 0.43 | 0.43 |
| 年均发电量的贴现量/MWh | $4.846 1 \times 10^6$ | $4.879 1 \times 10^6$ |
| 年均收入/亿元 | 20.838 2 | 20.980 2 |
| 燃料费用/亿元 | 5.378 8 | 5.873 1 |
| 年均燃料费用/亿元 | 3.819 6 | 3.947 8 |
| 年均去除燃料费用的 电站收入/亿元 | 17.018 6 | 17.032 3 |

(上转第 15 页 Continued on Page 15)

产, 另外, 由于电力产能过剩严重, 该阶段的新开工项目迅速减少; (2) 2021 - 2025 年, 由于电力产能过剩严重, 核电建设基本处于停滞期; (3) 2025 - 2040 年, 电力过剩形势逐步缓解, 火电退役替代和新增需求显现, 核电建设重启。在“核能低值”模型中, 该阶段核电新增装机容量将达到 63.471 GW; 在“核能高值”模型中, 该阶段核电新增装机容量将达到 133.055 GW。

6) 根据世界铀矿经济可采储量、勘探开采及新增资源量、核能发电的增长情况、快堆技术研发及商业应用等情况, 本文给出了世界铀资源储用比的预测数据。同时, 在快堆大规模应用前, 若因铀资源储用比因素导致铀矿价格上涨, 本文给出了四种变量以平抑铀矿价格。总体来看, 世界拥有充足的铀矿资源储备, 可满足“铀基”核能的长期发展。本文预测, 2040 年之前的铀矿资源价格将难以回到 2007 年的高位。本文用核能消费量与铀资源消费量的比值定义了铀资源转化比指标, 以衡量各国铀资源的转化效率, 并对世界主要经济体的铀资源转化效率进行了比较。结果表明, 中国铀资源转化比仅为世界平均值的 56.6%, 需要在乏燃料处理及燃料循环利用方面提升技术水平和处理能力。

参考文献:

- [1] International Atomic Energy Agency. The power reactor information system [DB/OL]. <https://www.iaea.org/pris/>.
- [2] International Atomic Energy Agency. Advanced reactors information system [DB/OL]. <https://aris.iaea.org/>.

- [3] BP P L C. Statistical review of world energy 2016 [DB/OL]. <http://www.bp.com/>.
- [4] The World Bank. World Bank national accounts data [DB/OL]. <http://databank.shihang.org/>.
- [5] International Monetary Fund. Gross domestic product, constant prices [DB/OL]. <http://www.imf.org/>.
- [6] European Union. On the limitations of certain pollutions into the air from large combustion plants, directive 2001/80/EC of the European parliament and of council [R]. Brussels: European Union, 2006.
- [7] U. S. Energy Information Administration. World gross domestic product (GDP) by region expressed in purchasing power parity [DB/OL]. <http://www.eia.gov/>.
- [8] United Nations. World Population Prospects(2015) [R]. New York: United Nations, 2015.
- [9] U. S. Energy Information Administration. International energy outlook 2016 [R]. Washington: U. S. Energy Information Administration, 2016.
- [10] U. S. Energy Information Administration. Monthly energy review [DB/OL]. <http://www.eia.gov/>.
- [11] 中华人民共和国国家统计局. 综合能源平衡表 [DB/OL]. <http://data.stats.gov.cn/>.
- [12] 中华人民共和国国家统计局. 分行业增加值 [DB/OL]. <http://data.stats.gov.cn/>.
- [13] Destatis. Stromabsatz und erlöse der elektrizitätsversorgungsunternehmen: Deutschland, Jahre, Abnehmergruppen [DB/OL]. <https://www.destatis.de/>.
- [14] OECD, IAEA. Uranium 2014: Resources, Production and Demand [R]. Moulineaux, France: OECD&IAEA, 2014.
- [15] IAEA. Original resources of uranium deposits [DB/OL]. <https://www.iaea.org/>.
- [16] OECD, IAEA. Uranium 2011: resources, production and demand [R]. Moulineaux, France: OECD & IAEA, 2011.

(责任编辑 郑文棠)

(下接第 26 页 Continued from Page 26)

5 结论

从上面的燃料管理方案计算结果及其经济性分析结果来看, 有如下几点结论:

- 1) 秦山二期电站无论采用 44 组富集度为 4.45% 的长循环燃料管理策略还是采用 48 组富集度为 4.45% 的长循环燃料管理策略, 都满足安全限值 and 设计目标的要求, 都是优化和可行的。
- 2) 同为长循环换料设计的方案 1 和方案 2 比较, 方案 2 年均增加 137 万元。
- 3) 方案 2 的换料周期达到 543 天, 与 18 个月 (547.5 天) 的天数吻合较好。这个方案对电站计划

生产的影响小, 实用性强。而方案 1 的换料周期为 514 天, 平均下来 16.9 个月, 那么按照这个周期, 会发生停堆在用电高峰期, 而为了避开高峰期, 需要重新计划生产和根据生产需要调整换料策略; 亦或可以降功率运行 1 个月左右来达到 18 个月, 这样的经济性就受影响了。

综上所述, 推荐方案 2 作为秦山二期长循环燃料管理策略的补充方案, 实用性较强。

参考文献:

- [1] 王成孝. 核电站经济 [M]. 北京: 原子能出版社, 1997.
- [2] 任德曦, 胡泊. 全球核燃料产业与市场发展导向 [J]. 南华大学学报, 2012, 13(1): 1-7.

(责任编辑 张春文)