

2050 年前中国压水堆核燃料循环几种假定情景分析

吴英¹, 穆强¹, 马续波¹, 曹博¹, 欧阳小平²

1. 华北电力大学核科学与工程学院, 北京 102206
2. 西北核技术研究所, 西安 710024

摘要 根据中国核电中长期发展战略目标, 以中国的两种主流堆型——大亚湾 M310 和三代 AP1000 为研究对象, 假定 2050 年前中国压水堆核燃料循环的几种情景并利用 DESAE 软件计算了假定情景的铀钚需求, 由中国拟建快堆的性质分析了假定情景的可行性。计算结果可为中国核能发展策略提供数据参考。计算结果的比较与分析表明, 天然铀的节省程度主要取决于装载 MOX 燃料的在运营压水堆规模。

关键词 压水堆; 闭式核燃料循环; MOX 燃料

中图分类号 TL249

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2012.21.001

Several Hypothetical Scenarios for Nuclear Fuel Cycle of PWR in China Before 2050

WU Ying¹, MU Qiang¹, MA Xubo¹, CAO Bo¹, OUYANG Xiaoping²

1. School of Nuclear Science and Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China
2. Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China

Abstract Based on the medium and long-term development targets of nuclear power in China, the mainstream reactor types M310 and AP1000 are taken as research object, the several scenarios of nuclear fuel cycle of PWR are assumed before 2050 and their feasibilities are analyzed based on the fact that the fast reactor is planning to be built in China. The resource requirements for Uranium and Plutonium in the hypothetical scenarios of nuclear fuel cycle are carried out by using DESAE program. The results could provide a data reference for the China's nuclear energy development strategy. The comparison and analysis of calculation results show that the amount of natural Uranium saving mainly depends on the scale of PWR using MOX fuel.

Keywords PWR; closed nuclear fuel cycle; MOX fuel

0 引言

在中国现阶段电源结构中, 火电所占比重过大, 这种格局不仅受到资源储量和开发的制约, 而且受到环境容量和运输能力的严重限制, 并且近些年煤、石油、天然气成本不断攀升, 因此中国和其他国家一样开始把目光转向核电, 核能利用技术进入了一个快速发展时期。目前, 全国已建和在建的核电机组共 41 个, 其中已建成 14 个, 总装机容量已经达到 1189 万 kW; 正在建设的机组共 27 个, 装机容量约为 2800 万 kW, 占世界核电在建机组台数的 42%, 建设规模居全球第一。

虽然 2011 年福岛核事故的发生引发了人们对核电安全的重新思考, 但中国在 2050 年前对能源的需求是巨大的, 在保证核能安全开发和利用前提下发展核能是必然的选择。

本文根据中国核能的中长期发展战略, 基于中国核燃料循环技术现状和未来发展目标, 提出了几种假定的压水堆核燃料循环情景, 计算了各种假定情景下所需的铀钚资源, 并由铀的供求结合中国拟建快堆的性质分析了假定情景的可行性。这些数据可以为中国商用核燃料循环体系的研究和建设提供参考。

收稿日期: 2012-05-21; 修回日期: 2012-07-04

基金项目: 国家高技术研究发展计划 (863 计划) 项目 (2009AA050701)

作者简介: 吴英, 副教授, 研究方向为核科学与技术, 电子信箱: w_y@ncepu.edu.cn

1 2050年前中国压水堆核燃料循环发展情景假定

1.1 压水堆模型及装机容量预测

由于中国现有和未来拟建的主流堆型是压水堆(PWR),因而本文仅考虑中国的两种主流堆型一大亚湾 M310 和三代 AP1000。中国已确定实施闭式核燃料循环策略,而发展 MOX 燃料是实施核燃料闭式循环策略的必然要求。由于换装 1/3 MOX 组件的反应堆运行的安全性、技术的可行性及组件制造费用的经济性等都是有所保证的,因而本工作中用到的 M310 和 AP1000 分别考虑了纯铀装料和 30%MOX 燃料装载两种情形。在纯铀装料及 30%MOX 燃料装载情形下的堆芯基本参数^[1-3]见表 1。MOX 燃料组件的组成参考文献[4],由 3 种不同

表 1 堆芯基本参数

Table 1 Basic parameters for PWR core

堆芯基本参数	M310 纯铀燃料	M310-30%MOX 燃料	AP1000 纯铀燃料	AP1000-30%MOX 燃料
燃料组件类型	UO ₂	UO ₂ +MOX	UO ₂	UO ₂ +MOX
组件内燃料棒排列方式	17×17	17×17	17×17	17×17
堆芯燃料装载量/t	72.45	72.45	84.60	84.60
反应堆热功率/MW	2895	2895	3415	3415
负荷因子	0.85	0.85	0.90	0.90
电效率	0.33	0.33	0.33	0.33
燃料在堆芯的停留时间/d	1620	1620	1620	1620
每个寿期时间/d	540	540	540	540
卸料燃料/(MW·d·t ⁻¹ ·U ⁻¹)	45000	45000	50000	50000
循环燃料/(MW·d·t ⁻¹ ·U ⁻¹)	15000	15000	16667	16667
首循环堆芯布置方案	52 个	52 个	52 个	52 个
	3.1%的 UO ₂ 组件,	3.1%的 UO ₂ 组	4.45%的 UO ₂ 组件,	4.45%的 UO ₂ 组件,
	52 个	件,52 个	52 个	52 个
	2.4%的 UO ₂ 组件,	2.4%的 UO ₂ 组	3.40%的 UO ₂ 组件,	3.40%的 UO ₂ 组件,
	53 个	件,53 个	53 个	53 个
平衡循环装料方案	1.8%的 UO ₂ 组件	1.8%的 UO ₂ 组件	2.35%的 UO ₂ 组件	2.35%的 UO ₂ 组件
		新装入 36 个 4.45% 的 UO ₂ 组件和 16 个 MOX 组件	新装入 52 个 4.95% 的 UO ₂ 组件和 16 个 MOX 组件	新装入 36 个 4.95% 的 UO ₂ 组件和 16 个 MOX 组件

Pu 含量的 MOX 燃料元件构成,分别为:Pu 含量 9.0%的 MOX 燃料元件 72 根,Pu 含量 5.85%的 MOX 燃料元件 128 根,Pu 含量 4.05%的 MOX 燃料元件 64 根。表 2 给出了 MOX 燃料中所含 Pu 的各种同位素成分比^[5]。

表 2 MOX 燃料中钚同位素成分

Table 2 Content of Plutonium isotopes in MOX fuel

同位素	含量比值/%
²³⁸ Pu	2.5
²³⁹ Pu	54.5
²⁴⁰ Pu	25.2
²⁴¹ Pu	8.6
²⁴² Pu	7.9
²⁴¹ Am	1.3

2011 年 2 月 28 日在北京发布的由中国工程物理研究院提出的《中国核能中长期(2030—2050)发展战略研究》报告指出,2020 年核电总装机容量达到 7000 万 kW 的目标是可能实现的;2050 年,中国核电总装机容量将达到 4 亿 kW,核电成为电力工业的主流之一。核电发电量占总发电量的比重为 24%,核电装机容量占总装机容量的 16%。据此,本文采用的中国压水堆装机容量情形预测 1 如图 1 所示。

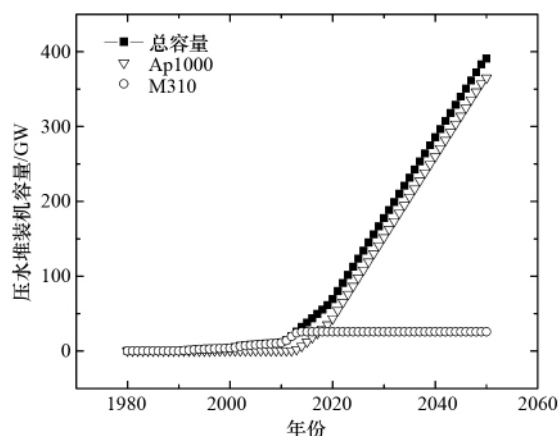


图 1 中国压水堆装机容量情形预测 1

Fig. 1 First assumption of PWR capacity in China

《中国能源中长期(2030—2050)发展战略研究》报告是中国工程物理研究院在日本福岛核事故发生之前提出的。福岛核事故使得社会各界对中国核电发展规模、速度、技术安全性等问题存有疑虑。国务院参事石定寰在 2011 年 9 月表示,日本福岛核事故会减缓中国对核电发展的规划,但作为清洁能源的核能,中国会坚定不移地慎重发展,以使技术更加成熟。

经过近些年的发展,中国核电在建和核准项目规模已突破 2006 年制定的规划,各方面对 2020 年核电装机规模的预

期普遍为达到或超过 7000 万 kW。而在《中国能源中长期(2030—2050)发展战略研究》报告出台之前,业内人士的预测是,到 2050 年,中国核电可达到 240GW,甚至更高。石定寰也曾表示,据初步预测,到 2050 年,中国核电约占电力总装机容量容量的 20%,相当于 2.4 亿 kW。据此,本文采用的中国压水堆装机容量情形预测 2 如图 2 所示。

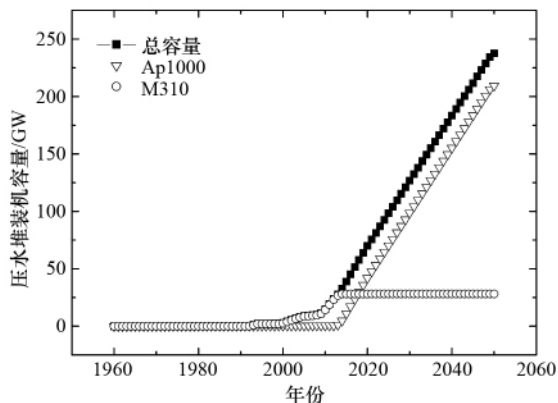


图 2 中国压水堆装机容量情形预测 2

Fig. 2 Second assumption of PWR capacity raising in china

1.2 核燃料循环情景假定

目前国内核燃料循环技术的发展相对重视核电站建设、铀矿资源开发,而对核电发展下游重视程度不够。中国尚未建设商业化的后处理厂,而后续的 MOX 燃料厂、商业运行的快堆、快堆乏燃料的后处理厂等也都未有大的进展。2010 年底中国第一座动力堆乏燃料后处理中试厂热调试成功,说明中国已经掌握后处理技术。然而,一个乏燃料后处理的中试厂建设最短需要 15 年。预计 2025 年前后,中国将建成第一个商用乏燃料后处理厂及其配套的 MOX 燃料制造厂。

对于中国这样一个需要大规模发展核能来替代常规能源的国家,当热堆发展具有一定规模时,就应考虑启用增殖快堆,以使铀资源获得最大程度的利用,并利用快堆嬗变压水堆积累的长寿命废物。中国原子能研究院在国家 863 高技术计划领导下,提出中国快堆工程技术分 3 步发展的建议:第一步,中国实验快堆,热功率 6.5 万 kW,电功率 2 万 kW,目前已实现临界和并网;第二步,中国示范快堆,电功率约 60 万 kW,计划 2025 年左右运行,目前正处在规划建议阶段;第三步,中国商业快堆,电功率 100 万—150 万 kW,建议 2030 年左右建成,2035 年批量推广运行。

基于中国核燃料循环技术现状与发展趋势,本工作假定 2050 年前中国压水堆核燃料循环的几种情景如下。

情景 A1 2024 年前采用一次性通过的核燃料循环方式,之后采用闭式核燃料循环方式(假定 2025 年之后中国建成的商用乏燃料后处理厂每年能处理 800t 乏燃料,乏燃料被

处理之前的冷却时间不少于 8 年)。由于中国的商业快堆预计在 2035 年批量推广,因而假定 2034 年前压水堆均采用纯铀装载方式,以便于将从乏燃料中提取的 Pu 全部用于增殖快堆,扩大增殖快堆的初始装机容量。假定 2035—2050 年正在运营的压水堆中,10%的压水堆采用 30%MOX 燃料装载方式,其余 90%的在运营压水堆均采用纯铀装料。

情景 B1 同情景 A1 相比差别仅在于,2025 年后中国建成的乏燃料后处理厂的处理能力足够大,使得之前积累的冷却时间已够 8 年的乏燃料都能得到及时处理(假定乏燃料后处理前的冷却时间至少 8 年)。

情景 C1 同情景 A1 相比差别仅在于,2025 年后中国建成的乏燃料后处理厂的处理能力足够大,使得之前积累的冷却时间已够 5 年的乏燃料都能得到及时处理(假定乏燃料后处理前的冷却时间至少 5 年)。

情景 A2 2024 年前采用一次性通过的核燃料循环方式,之后采用闭式核燃料循环方式(假定 2025 年之后中国建成的商用乏燃料后处理厂每年能处理 800t 乏燃料,乏燃料被处理之前的冷却时间不少于 8 年)。假定 2035—2050 年正在运营的压水堆中 40%的压水堆采用 30%MOX 燃料装载方式,其余 60%的在运营压水堆均采用纯铀装料。

情景 B2 同情景 A2 相比差别仅在于,2025 年后中国建成的乏燃料后处理厂的处理能力足够大,使得之前积累的冷却时间已够 8 年的乏燃料都能得到及时处理(假定乏燃料后处理前的冷却时间至少 8 年)。

情景 C2 同情景 A2 相比差别仅在于,2025 年后中国建成的乏燃料后处理厂的处理能力足够大,使得之前积累的冷却时间已够 5 年的乏燃料都能得到及时处理(假定乏燃料后处理前的冷却时间至少 5 年)。

情景 X1 2024 年前采用一次性通过的核燃料循环方式,之后采用闭式核燃料循环方式(假定 2025 年之后中国建成的商用乏燃料后处理厂每年能处理 800t 乏燃料,乏燃料被处理之前的冷却时间不少于 5 年)。假定 2034 年前压水堆均采用纯铀装载方式,2035—2050 年正在运营的压水堆中 10%的压水堆采用 30%MOX 燃料装载方式,其余 90%的在运营压水堆均采用纯铀装料。

情景 Y1 同情景 X1 相比差别仅在于,2025 年后中国建成的乏燃料后处理厂的处理能力足够大,使得之前积累的冷却时间已够 5 年的乏燃料都能得到及时处理(假定乏燃料后处理前的冷却时间至少 5 年)。

情景 X2 2024 年前采用一次性通过的核燃料循环方式,之后采用闭式核燃料循环方式(假定 2025 年之后中国建成的商用乏燃料后处理厂每年能处理 800t 乏燃料,乏燃料被处理之前的冷却时间不少于 5 年)。假定 2034 年前压水堆均采用纯铀装载方式,2035—2050 年正在运营的压水堆中 40%的压水堆采用 30%MOX 燃料装载方式,其余 60%的在运营压水堆均采用纯铀装料。

情景 Y2 同情景 X2 相比差别仅在于,2025 年后中国建成的乏燃料后处理厂的处理能力足够大,使得之前积累的冷却时间已够 5 年的乏燃料都能得到及时处理(假定乏燃料后处理前的冷却时间至少 5 年)。

上面假定的核燃料循环情景 A1、B1、C1、A2、B2、C2 中的压水堆装机容量都是基于图 1 所示的中国压水堆装机容量情形预测 1,核燃料循环情景 X1、Y1、X2、Y2 中的压水堆装机容量则是基于图 2 所示的中国压水堆装机容量情形预测 2。

2 铀钚需求的计算与分析

本文针对 2050 年前中国压水堆核燃料循环的各种假定情景由核能发展情景动态分析软件 DESAE[®](Dynamic of Energy System-Atomic Energy)进行铀资源的需求、钚资源的供求等量的计算。IAEA 提供的 DESEA 程序用于建立核能系统模型,给出投资、铀需求量、乏燃料的同位素质量、放射性等信息,为下一步对核能系统进行经济、环境、防核扩散等方面的评价分析提供数据。DESAE 程序包括 7 种类型的反应堆模

型,4 种核燃料循环模型。在每种类型的反应堆模型中,定义了 38 个参数和一个备用参数(材料方面),这些参数主要包括反应堆功率、燃耗、负荷因子、堆芯装载量、装卸料成分等信息。本工作用 DESAE[®]软件计算时需要输入的堆型参数是由通用的点燃耗及放射性衰变计算程序 ORIGEN-2[®]计算得到的,并用 DRAGON 组件计算程序[®]进行了校核,所涉及的核燃料循环模型主要是输入假定的乏燃料后处理能力信息。DESAE[®]软件的正确性已为参考文献[6]、[9]所证实。

2.1 天然铀、钚分离功的需求

表 3、表 4 分别是根据压水堆发展预测,由 DESAE[®]软件计算得到的中国每年所需的天然铀和钚分离功。图 3、图 4 为累积所需天然铀和钚分离功。计算结果表明,在如图 1 所示的压水堆装机容量情形预测下,2012—2050 年间,A1、B1、C1 3 种情景下所需的天然铀总量分别约为 140 万、136 万和 134 万 t,所需的总分离功大约都是 88 万 t;2012—2050 年间,A2、B2、C2 3 种情景下所需的天然铀总量分别约为 133 万、129 万和 127 万 t,所需的总分离功大约都是 82 万 t。在图 2 所示的

表 3 压水堆核电站每年对天然铀的需求量/(t·a⁻¹)

Table 3 Volume of demand for natural Uranium for PWR per year

情景类别	年份											
	2012	2013	2015	2020	2024	2025	2026	2030	2035	2040	2045	2050
A1	5119	6929	9057	16994	24671	25578	27466	34789	42960	52151	61071	66299
B1	5119	6929	9057	16994	24671	21209	27382	34303	41551	49382	56695	60836
C1	5119	6929	9057	16994	24671	18197	27018	33817	40919	49109	56625	61959
A2	5119	6929	9057	16994	24671	25578	27466	34789	40058	44586	51122	56759
B2	5119	6929	9057	16994	24671	21209	27382	34303	39119	43532	48331	52328
C2	5119	6929	9057	16994	24671	18197	27018	33817	38698	41859	47891	52825
X1	5119	5826	9057	14479	18315	18276	19309	23189	28050	31950	36645	38251
Y1	5119	5826	9057	14479	18315	15631	17213	22533	26996	30502	34354	35373
X2	5119	5826	9057	14479	18315	18276	19309	23189	28276	29136	33365	34755
Y2	5119	5826	9057	14479	18315	15631	17213	22533	27573	27800	31280	31991

表 4 压水堆核电站每年所需的钚分离功/(t·a⁻¹)

Table 4 Separation work needed for PWR per year

情景类别	年份											
	2012	2013	2015	2020	2024	2025	2026	2030	2035	2040	2045	2050
A1	2812	3942	5381	10180	14996	16146	17320	21988	26946	32696	38326	41877
B1	2812	3942	5381	10180	14996	16081	17320	21995	26940	32427	37982	41481
C1	2812	3942	5381	10180	14996	16081	17326	22003	26924	26924	37985	41511
A2	2812	3942	5381	10180	14996	16146	17320	21988	24309	26447	30760	34138
B2	2812	3942	5381	10180	14996	16081	17320	21995	24306	26433	30782	34187
C2	2812	3942	5381	10180	14996	16081	17326	22003	24295	26507	30800	34201
X1	2812	3367	5381	8789	11210	11809	12419	14865	17709	20233	23168	24295
Y1	2812	3367	5381	8789	11210	11907	12530	14990	17777	20271	23158	24246
X2	2812	3367	5381	8789	11210	11809	12419	14865	17071	18001	20572	21482
Y2	2812	3367	5381	8789	11210	11907	12530	14990	17116	18041	20588	21484

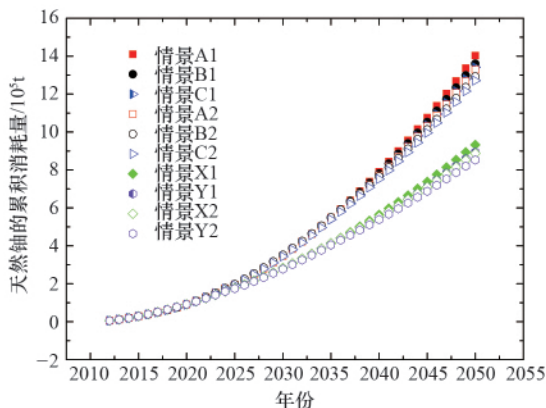


图3 天然铀的累积消耗

Fig. 3 Accumulative consumption amount of natural Uranium needed for PWR

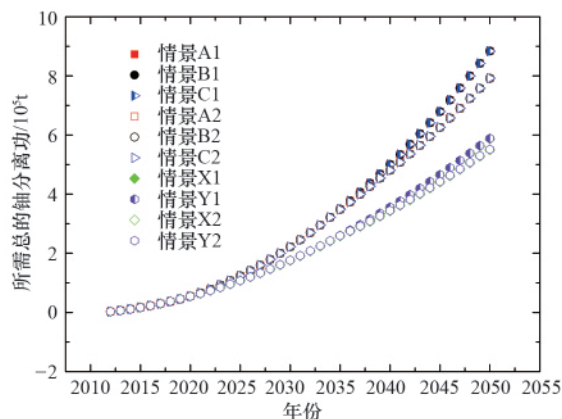


图4 压水堆核燃料循环假定情景下轴分离功的总需求量

Fig. 4 Total volume of demand for the separation work of PWR

压水堆装机容量情形预测下,2012—2050年间,X1、Y1两种情景下所需的天然铀总量分别约为93.2万、89.4万t,所需的总分离功大约都是59万t;2012—2050年间,X2、Y2两种情景下所需的天然铀总量分别约为88.7万、85.2万t,所需的总分离功大约都是55万t。可见,增大装载MOX燃料的压水堆规模可以更有效节省天然铀。在装载MOX燃料压水堆规模保持不变的前提下,提高乏燃料后处理能力对铀资源节省的效果有限。

2.2 钚的累积与需求

表5是根据压水堆核电发展预测,由DESAR[®]软件计算得到的与本文核燃料循环各情景假定对应的5种乏燃料后处理情形下(表5中A、B、C三种后处理情形对应图1所示的压水堆装机容量。后处理情形A是2025年之后中国建成的

商用乏燃料后处理厂每年能处理800t乏燃料,乏燃料被处理之前的冷却时间不少于8年,即情景A1、A2采用的后处理情形;后处理情形B是2025年之后中国建成的商用乏燃料后处理厂后处理能力足够大,冷却时间达到或超过8年的乏燃料都能得到及时处理,即情景B1、B2采用的后处理情形;后处理情形C是2025年之后中国建成的商用乏燃料后处理厂后处理能力足够大,冷却时间达到或超过5年的乏燃料都能得到及时处理,即情景C1、C2采用的后处理情形。表5中X、Y两种后处理情形对应图2所示的压水堆装机容量。后处理情形X是2025年之后中国建成的商用乏燃料后处理厂每年能处理800t乏燃料,乏燃料被处理之前的冷却时间不少于5年,即情景X1、X2采用的后处理情形;后处理情形Y是2025年之后中国建成的商用乏燃料后处理厂后处理能力足够大,

表5 2035年前压水堆核电站后处理厂从乏燃料中累计提取的钚量/t

Table 5 Accumulative Plutonium in PWR spent fuel before 2035

情形类别	年份									
	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034
后处理情形 A	4.9	9.8	14.7	19.6	24.5	29.4	34.3	39.2	44.1	49
后处理情形 B	27.1	31.6	36.7	42.4	48.9	56.4	64.9	74.3	84.8	96.2
后处理情形 C	42.4	48.9	56.4	64.9	74.3	84.8	96.2	108.6	122.0	136.4
后处理情形 X	4.9	9.8	14.7	19.6	24.5	29.4	34.3	39.2	44.1	49
后处理情形 Y	39.1	45.6	53.1	61.6	71.0	81.5	93.3	103.0	113.2	123.8

冷却时间达到或超过5年的乏燃料都能得到及时处理,即情景Y1、Y2采用的后处理情形),2035年前从乏燃料中累计提取的钚量。表6为核燃料循环情景假定下为满足2035—2050年部分在运营压水堆装载30%MOX燃料每年所结余或还需要另外提供的钚量。

由DESAR[®]软件计算钚的累积与需求的结果表明,假定的核燃料循环情景B1、C1、X1、Y1和Y2明显具有可行性。如采用核燃料循环情景A1、A2、B2、C2和X2,则2035—2050年

还需要的钚累计分别约为10.2、356、114、83和143t,与其在2025—2034年间积累的钚量(49、49、96.2、136.4和49t)相比,显然核燃料循环情景A2、B2和X2不可行。因而,如不考虑快堆的建设,具有可行性的7种核燃料循环情景A1、B1、C1、C2、X1、Y1和Y2在2050年积累的钚依次约为38.8、280.9、378、53.4、72、312和157t。

如果考虑快堆的建设,假定2035年中国拟批量运营的商业快堆堆型采用中国原子能研究院设计的增殖比为1.2的

表 6 2035—2050 年间假定情景下压水堆运行每年所需要的钚量/(t·a⁻¹)

Table 6 Plutonium demand for PWR per year under the condition of assumption scenarios from 2035 to 2050

情景类别	年份															
	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042	2043	2044	2045	2046	2047	2048	2049	2050
A1	1.4	0.5	0.3	0.1	-0.1	-0.3	-0.5	-0.5	-0.7	-0.9	-1.1	-1.3	-1.5	-1.7	-1.9	-2.1
B1	8.8	8.9	9.7	10.5	11.3	12.1	12.9	13.9	14.4	16.0	16.8	17.7	18.5	19.3	20.1	21.0
C1	11.7	11.9	12.7	13.5	14.5	14.9	16.6	17.4	18.2	19.1	19.9	20.7	21.5	22.3	23.2	24.0
A2	-8.2	-11.7	-12.4	-13.2	-13.9	-14.7	-15.4	-15.5	-27.7	-28.5	-29.7	-30.8	-31.9	-33.0	-34.2	-35.3
B2	-2.1	-4.6	-4.3	-4.1	-3.8	-3.5	-3.3	-2.2	-15.2	-10.3	-10.2	-10.1	-10.1	-10.1	-10.1	-9.8
C2	0.8	-1.6	-1.3	-1.1	-0.1	-11.9	-6.9	-6.9	-6.9	-6.7	-6.8	-6.8	-6.8	-6.6	-6.7	-6.7
X1	2.6	2.0	1.9	1.8	1.8	1.7	1.6	1.5	1.4	1.3	1.2	1.0	0.9	0.8	0.7	0.6
Y1	8.8	8.8	9.2	9.6	10.1	10.3	11.2	11.7	12.1	12.5	12.9	13.4	13.8	14.2	14.6	15.1
X2	-4.5	-6.8	-6.2	-7.6	-7.5	-8.0	-8.2	-8.6	-9.1	-9.5	-9.9	-10.4	-10.8	-11.2	-11.7	-12.0
Y2	1.7	-0.1	0.1	0.1	0.8	-0.1	2.2	2.4	2.6	2.8	2.9	3.1	3.2	3.5	3.5	4.0

注:表中正数表示假定情景下压水堆运行该年能结余的 Pu 量,负数表示为假定情景的压水堆运行该年还需由之前的积累或快堆提供的 Pu 量。

Notes: Positive numbers indicate the amount of Pu can be balanced under the assumed scenarios of nuclear fuel cycle of PWR this year. Negative numbers indicate this year the amount of Pu required to be provided by the prior to the accumulation amount of Pu or proliferation of the fast reactor.

CFR1000, 快堆采用冷却时间达 2 年的乏燃料都能被及时处理的闭式核燃料循环方式, 则由中国原子能研究院提供的 CFR1000 快堆参数, 用 DESAE-2⁶ 软件可算得对应压水堆乏燃料后处理情形 A、B、C、X 和 Y, 2034 年从乏燃料中累积提取的 49、96、136、49 和 123.8t 钚可使 2035 年开始运营的快堆当年最大装机容量分别达到约 10、19、27、10 和 25GW, 相应装机容量的 CFR1000 每年能提供的增殖钚分别约为 0.7、1.4、2.0、0.7 和 1.7t。结合表 6 的数据可见, 实施这种技术路线则假定的核燃料循环情景 A1、B1、C1、X1、Y1 和 Y2 具有可行性, 而情景 A2、B2、C2 和 X2 都不具有可行性。

3 结论

假定 2020 年中国压水堆总装机容量达到 7000 万 kW, 2050 年中国压水堆总装机容量达到 4 亿 kW, 用 DESAE 程序计算了 6 种假定的核燃料循环情景 A1 和 A2(2024 年前为一次性通过的核燃料循环方式, 2025 年之后采用年后处理能力为 800t 的闭合循环, 乏燃料后处理前的冷却时间不低于 8 年。2034 年前压水堆均采用纯铀装载方式, 2035—2050 年正在运营的 10% 或 40% 压水堆采用 30%MOX 燃料装载方式, 其余的压水堆采用纯铀燃料)、情景 B1 和 B2(2024 年前为一次性通过的核燃料循环方式, 2025 年之后采用后处理能力足够大的闭合循环, 乏燃料后处理前的冷却时间不低于 8 年。情景 B1 和 B2 在 2050 年前压水堆燃料的装载方式和规模分别等同于情景 A1 和 A2)、情景 C1 和 C2(2024 年前为一次性通过的核燃料循环方式, 2025 年之后采用后处理能力足够大的闭合循环, 乏燃料后处理前的冷却时间不低于 5 年。情景 C1 和 C2 在 2050 年前压水堆燃料的装载方式和规模分别等同于情景 A1 和 A2) 下钚钚资源的需求; 假定 2020 年中国压水堆总装机容量达到 7000 万 kW, 2050 年中国压水堆总装机

容量达到 2.4 亿 kW, 用 DESAE 程序计算了假定的核燃料循环情景 X1 和 X2 (2024 年前为开式核燃料循环, 2025 年之后采用年后处理能力为 800t 的闭合循环, 乏燃料后处理前的冷却时间不低于 5 年。2034 年前压水堆均采用纯铀装载方式, 2035—2050 年正在运营的 10% 或 40% 压水堆采用 30%MOX 燃料装载方式, 其余的压水堆采用纯铀燃料)、情景 Y1 和 Y2 (2024 年前为开式核燃料循环, 2025 年之后采用后处理能力足够大的闭合循环, 乏燃料后处理前的冷却时间不低于 5 年。情景 Y1 和 Y2 在 2050 年前压水堆燃料的装载方式和规模分别等同于情景 X1 和 X2) 下钚钚资源的需求。

由不同情景下钚的积累和需求可知, 假定的核燃料循环情景 A2、B2 和 X2 不具可行性。2012—2050 年间, 与本文压水堆装机容量情形预测 1 相对应的可能的核燃料循环情景是 A1、B1、C1 和 C2, 它们对天然铀的累积需求分别为 140、136、134 和 127 万 t; 而与本文压水堆装机容量情形预测 2 相对应的可能的核燃料循环情景是 X1、Y1 和 Y2, 它们对天然铀的累积需求分别为 93.2、89.4 和 85.2 万 t。在 2050 年前如采用本文假定的核燃料循环情景, 则只要装载 MOX 燃料的压水堆规模一定, 中国压水堆对铀浓缩能力的总需求相差不大, 但对 2034 年从乏燃料中累积获取的 Pu 量和 2035 年后压水堆由于装载 30%MOX 燃料而对 Pu 的需求量差异显著。如采用具有可行性的核燃料循环情景 A1、B1、C1、C2、X1、Y1、Y2, 不考虑快堆, 则到 2050 年从卸出的乏燃料中累积提取的 Pu 量依次约为 38.8、280.9、378、53.4、72、312 和 157t。本文计算结果的比较与分析表明, 天然铀的节省程度主要取决于装载 MOX 燃料的在运营压水堆规模。

致谢: 文中用 DESAE 软件计算时涉及的 CFR1000 快堆参数由中国原子能研究院提供; 感谢华北电力大学核科学与工程学院陆道纲教授为项目进行提供的大力支持和帮助。

参考文献 (References)

- [1] 广东核电培训中心. 900MW 压水堆核电站系统与设备[M]. 北京: 原子能出版社, 2005: 48-73.
Guangdong Nuclear Power Training Center. 900MW PWR nuclear power plant systems and equipment [M]. Beijing: Atomic Energy Press, 2005: 48-73.
- [2] 林诚格, 郁祖盛. 非能动安全先进压水堆核电技术(上册)[M]. 北京: 原子能出版社, 2010.
Lin Chengge, Yu Zusheng. Passive safety advanced pressurized water reactor nuclear power technology (volume one) [M]. Beijing: Atomic Energy Press, 2010.
- [3] Carbajo J J, Yoder G L, Propov S G, et al. A review of the thermophysical properties of MOX and UO₂ fuels [J]. *Journal of Nuclear Materials*, 2001, 299(3): 181-198.
- [4] 吴宏春, 局海涛, 姚栋. 复杂几何燃料组件的参数计算[J]. 原子能科学技术, 2006, 40(4): 433-438.
Wu Hongchun, Ju Haitao, Yao Dong. *Atomic Energy Science and Technology*, 2006, 40(4): 433-438.
- [5] Robert J F. AP1000 core design with 50% MOX loading [J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2009, 36(3): 324-330.
- [6] Tsubulskiy V F, Davidenko V D, Subbotin S A. The interactive model for quantitative assessment of nuclear energy system key indicators: Code DESAE [R]. Russian Research Center "Kurchatov Institute" Institute of Nuclear Power Development. IAEA, BC: 5380.170.3538.A2010221. IPINRFC.200341575, 2004.
- [7] Groff A G. Origen2.1: Isotope generation and depletion code matrix exponential method [R]. CCC-371. Oak Ridge, Tennessee: Oak Ridge National Laboratory, 1996.
- [8] Marleau G, Hebert A, Roy R. A user's guide for DRAGON 3.05B [R]. Technical Report ICE-174 Rev 6B. Montreal: Ecole Polytechnique de Montréal, 2006.
- [9] Untermeyer S, Weils J T. Heat generation in irradiated uranium [R]. ANL-4790. Argonne, IL: Argonne National Laboratory, 1952.

(责任编辑 马宇红, 代丽)

· 学术动态 ·



“第九届全国微波化学暨 第四届样品制备学术会议”征文

“第九届全国微波化学暨第四届样品制备学术会议”由中国电子学会微波分会微波化学专业委员会, 中国分析仪器学会样品制备分会主办, 定于 2012 年 11 月 9—11 日在昆明市召开。

征稿范围: (1) 微波化学研究及应用领域(①微波化学理论及应用研究进展; ②微波技术在化学、化工、食品科学、环境等领域中的研究和应用; ③微波在制药工业中应用及基本理论研究; ④微波在医药检测方面应用及研发; ⑤微波化学反应设备研制、开发和应用; ⑥微波化学及技术与绿色制备)。 (2) 样品制备及技术领域(①样品前处理理论及其技术的新进展; ②样品前处理专用仪器设备的研制、开发和应用; ③样品前处理技术和仪器在工业监测及分析中的应用; ④工业产品的样品前处理技术和仪器)。 (3) 微波冶金及微波材料处理领域(①微波在冶金工业中应用及基本理论研究; ②微波冶金设备研发及工业推广; ③微波在材料制备及研发领域应用研究)。 (4) 微波机理研究及微波设备研发(①微波腔体设计及计算; ②微波场模拟及温度测量; ③微波产业研发及应用研究)。

全文截稿日期: 2012 年 8 月 30 日。

联系电话: 0714-6515602, 6575919, 6531032。

电子邮箱: microwave2012@163.com。

大会网站: www.wlxy.hbnu.edu.cn/microwave2010。