全球核燃料产业与市场发展导向

任德曦,胡　泊①
(南华大学 老科协,湖南 衡阳 421001)

[摘　要]　文章分 6 部分揭示全球核燃料产业、产业链的资源、生产、市场、价格及未来供需状况。铀资源潜力大,天然铀现有热堆可用 100 年,快堆可用千年,聚变能可用亿年;天然铀生产与供应平稳,产能大于需求,二次铀供应大于 20%,地浸采铀上升迅速,已占到 41%;铀转化、铀浓缩、元件的生产与供应均能适应市场的需求,至 2030 年可保证核电站发展需要;MOX 燃料使用,目前处于试用阶段,随着天然铀价格上升,快堆发展,其利用将增加。

[关键词]　核燃料;　产业链;　天然铀;　浓缩铀;　MOX
[中图分类号]　F416.23　[文献标识码]　A　　[文章编号]　1673－0755(2012)01－0001－07

核燃料产业是指裂变核燃料铀-235(^{235}U),钚-239(^{239}Pu),铀-233(^{233}U)和聚变核燃料氘($^{2}H.D$),氚($^{3}H.T$)、锂-6(^{6}Li)等核素的研究、开发、生产、安全、环保与市场供需。目前重点是铀产业(铀-钚产业)的生产与市场供需,其产业链是铀资源、天然铀、铀转化、铀浓缩、元件、氧化铀钚燃料(MOX)的发展与燃料循环。本文探讨集中在这方面。

一　全球铀资源

全球的铀资源分布在地域上极不均匀。根据经合组织核能机构(OECD/NEA)与国际原子能机构(IAEA)于 2010 年 7 月正式发布的 2009 年版铀红皮书《2009 年铀:资源、产量和需求》,截至 2009 年 1 月 1 日,全球开采费用低于 130 美元/kgU 的已查明铀资源总量为 540.4 万 tU,而前三大铀资源拥有国的总量占全球总量的 52%,前 14 大铀资源拥有国的总量占全球总量的 97%(见表 1)。

但成本低于 260 美元/kgU 的资源数量增至 630.63 万 tU,比 2007 年成本低于 130 美元/kgU 的资源增加 15.5%。以 2008 年消耗速度计算,全球查明资源总量足够全球核电工业使用 100 年以上。

截止到 2009 年 1 月 1 日,待查明资源总量超过 1040 万 tU,略少于 2007 年报告的统计数量。然而,需要指出的是,有些国家,包括拥有大量确定铀资源的主要生产国,未提供该资源的数据。

表 1　已知可开采的铀资源 * 分布

国　别	万 tU	全球份额
澳大利亚	167.3	31%
哈萨克斯坦	65.18	12%
加拿大	48.53	9%
俄罗斯	48.03	9%
南非	29.56	6%
纳米比亚	28.42	5%
巴西	27.87	5%
尼日尔	27.29	5%
美国	20.74	4%
中国	17.14	3%
乌兹别克斯坦	11.46	2%
约旦	11.18	2%
乌克兰	10.5	2%
印度	8.02	2%
其他	19.18	2%
总计	540.4	3%

* 已知可开采的铀资源是指开采成本低于 130 美元/kgU 的可合理确保资源与推断资源之和。

二　全球铀产量与市场

(一)天然铀生产平稳,且有增长

2010 年,全球天然铀产量为 53663tU,比 2009

[收稿日期]　2011－11－20
[基金项目]　原国防科工委(现国防科工局)项目《核能经济学》资助
[作者简介]　任德曦(1937－),湖南岳阳人,南华大学老科协教授。
①南华大学老科协教授。

年的50772tU 增长5.7%。

全球天然铀产量的地域分布极不均匀。自2003 年以来,加拿大、澳大利亚和哈萨克斯坦的铀矿产量一直稳居世界前三。2010 年仍保持了这一趋势,全球前三大天然铀生产国的总产量占全球总产量的约67%(见表2)。

2010 年,在全球前三大产铀国中,除了哈萨克斯坦的产量继续保持增长外,加拿大和澳大利亚的产量均出现一定程度的下降。

哈萨克斯坦的铀矿产量继续大幅增长,达到17803tU,比2009 年的14020tU 增加了3783tU,增幅达27%,占全球总产量的约33%,继续超越加拿大成为全球第一大天然铀生产国;加拿大的铀产量位居第二,为9783tU,比2009 年10173tU 减少了390tU,降幅为3.8%。

加拿大产量出现下降的主要原因是由于麦克琳湖(McClean Lake)铀矿的水治厂在2010 年年中停止运营,导致该矿在2010 年仅产铀666tU。澳大利亚产量出现大幅下降的主要原因是:由于受到强降雨的影响,兰杰(Ranger)铀矿2010 年的产量仅为3216tU;奥林匹克坝(Olympic Dam)铀矿主矿井的矿石运输系统在2009 年10 月的一次事故中受损,该矿直到2010 年第二季度才恢复满负荷生产,因此该矿在2010 年的产量仅为2329tU。

天然铀生产在增加,从2004 年的47382tU_3O_8,增长至2010 年的63285tU_3O_8,增长了33.56%。在全球铀供应中,从2005 年的65%,上升至78%。

表2 各国天然铀产量(tU)

国 家		2004 年	2005 年	2006 年	2007 年	2008 年	2009 年	2010 年
哈萨克斯坦		3719	4357	5279	6637	8521	14020	17803
加拿大		11597	11628	9862	9476	9000	10173	9783
澳大利亚		8982	9516	7593	8611	8430	7982	5900
纳米比亚		3038	3147	3067	2879	4366	4626	4496
尼日尔		3282	3093	3434	3153	3032	3243	4198
俄罗斯		3200	3431	3262	3413	3521	3564	3562
乌兹别克斯坦		2016	2300	2260	2320	2338	2429	2400
美国		878	1039	1672	1654	1430	1453	1660
乌克兰(估计)		800	800	800	846	800	840	850
中国(估计)		750	750	750	712	769	750	827
马拉维		0	0	0	0	0	104	670
南非		755	674	534	539	655	563	583
印度(估计)		230	230	177	270	271	290	400
捷克		412	408	359	306	263	258	254
巴西		300	110	190	299	330	345	148
罗马尼亚(估计)		90	90	90	77	77	75	77
巴基斯坦(估计)		45	45	45	45	45	50	45
法国		7	7	5	4	5	8	7
德国		77	94	65	41	0	0	0
总计	tU	40178	41719	39444	41282	43853	50772	53663
	tU_3O_8	47382	49199	46516	48683	51716	59875	63285
在全球总需求中的份额		–	65%	63%	64%	68%	78%	78%

(二)地浸采铀在逐步上升

不同采矿方法的产量份额在继续变化。1990 年,全球约55% 的铀来自地下铀矿;到1999 年,这一比例缩减至33%;2000 年后随着加拿大新铀矿的

投产,这一数字又再次上升。在澳大利亚奥林匹克坝矿投产后,地下铀矿的产量占全球总产量的 1/3。另外值得注意的是,由于哈萨克斯坦的铀矿大都为地浸矿,地浸矿的产量一直在稳步增长,其在全球总产量中的份额也在逐步上升。2001 年地浸矿产量仅占全球总产量的 15.5%,但到 2010 年已增至 41%。

2010 年各种采矿方法的产量占全球总产量的份额如下(见表 3):

表 3　不同采矿方法在 2010 年的产量份额

采矿方法	产量(tU)	份额
传统地下采矿	15095	28.1%
露天采矿	13541	25.2%
地浸矿	22108	41.2%
副产品	2920	5.5%

* 奥林匹克坝矿被视为以副产品形式产铀

地浸采铀方法所以快速发展是因为:(1)适合地浸采铀资源的大量发现,如哈萨克斯坦;(2)地浸采铀技术不断完善;(3)地浸矿投资少,建设周期短;(4)铀产品成本低。

(三)天然铀价格升中有降

铀的现货价格已从 2007 年 6 月的 135 美元/$1bU_3O_8$ 降至 2009 年的 40 多美元/$1bU_3O_8$。2010 年 7 月底为 45.25 美元/$1bU_3O_8$。几年前的高价已促使电力公司建立了库存,地浸采铀导致成本下降,过去 2 年铀价格逐渐下降。与此同时,在 2007 年达到顶峰 95 美元/$1bU_3O_8$ 的长期合同价格已下降至 60 美元/$1bU_3O_8$。

2009 年,美国从国外采购 5900 万 $1bU_3O_8$,加权平均价格 41.23 美元/$1bU_3O_8$,与 2008 年 41.30 美元/$1bU_3O_8$ 基本持平。美国 2009 年还向国外出口 2300 万 $1bU_3O_8$,价格与进口价格相近。

(四)天然铀需求与供应平稳上升

目前天然铀供应大于需求,至 2020 年铀市场供应能力仍可满足基准情景需求。需求与供应均在平稳上升,铀资源可保证生产与供给。二次铀供给能力将逐渐减少,从 2010 年的占总供给的 26% 下降至 2020 年 10%。

能源资源国际公司预计,核电站的铀需求将从 2010 年的 1.71 亿 $1bU_3O_8$/a(63957tU_3O_8/a)提升至 2030 年的 2.65 亿 ~ 3.61 亿 $1bU_3O_8$/a(120203 ~ 163748tU_3O_8/a)。表 4 列出了该公司对未来铀市场供需情况的预测结果。该预测把再循环材料作为一个供应源。经济合作与发展组织核能机构(OECD/NEA)与国际原子能机构(IAEA)预测,到 2035 年,世界核电装机容量将增至 511GWe(低需求情景) ~ 782 GWe(高需求情景),比 2009 年增加 37 ~ 110%。与之相适应,到 2035 年世界核反应堆的铀需求总量预计将增至 8.7307 万 ~ 13.865 万 tU(10.2961 ~ 16.2938 万 tU_3O_8/a)(见表 4)。

表 4　至 2030 年的全球铀市场供需预测(亿 1 bU_3O_8/a)

	2010 年	2015 年	2020 年	2025 年	2030 年
铀矿产能的预测值①	1.41	2.02	2.34	2.04	1.94
AMU②					
俄高浓铀	0.26	0.02	0.01	0.01	0.01
高丰度尾料再浓缩	0.1	0.14	0.09	0.05	0
其他 AMU③	0.16	0.14	0.15	0.15	0.15
AMU 总计	0.52	0.30	0.25	0.21	0.16
总供应能力	1.93	2.32	2.59	2.25	2.10
基准情景需求	1.71	2.00	2.18	2.39	2.65
高值情景需求	1.78	2.18	2.68	3.27	3.61
基准情景中的供需差额	0.22	0.32	0.41	-0.14	-0.55
高值情境中的供需差额	0.15	0.14	-0.09	-1.02	-1.51

①假设铀矿的实际产能为额定产能的 90%
②AMU = 已开采铀
③包括得到循环利用的材料、美国铀浓缩公司和美国能源部的库存等

在基准情景中,美国的铀需求将从 2010 年的 5000 万 $1bU_3O_8$/a 增至 2020 年的 5600 万 $1bU_3O_8$/a 和 2030 年的 6100 万 $1bU_3O_8$/a;西欧的需求将从 2010 年的 4800 万 $1bU_3O_8$/a 增至 2030 年的 5200 万 $1bU_3O_8$/a;东亚的需求将从 2010 年的 4400 万 $1bU_3O_8$/a 增至 2030 年的 1 亿 $1bU_3O_8$/a;独联体和东欧国家的需求到 2030 年将在 2010 年的基础上增加 28%。

二次铀供应(或库存)

美国和非美国的西方世界手中共持有约 5.25 亿 $1bU_3O_8$ 的商业库存,如果将俄罗斯总计约为 1.4 亿 $1bU_3O_8$ 的商业库存包括在内,全球的商业库存量总计约为 6.65 亿 $1bU_3O_8$/a,可以满足全球约 3.9 年的需求。

除了上述商业库存外,美俄两国还持有大量高浓铀库存,分别约有 3.4 亿 $1bU_3O_8$ 和 4.2 亿 $1bU_3O_8$/a。美俄还分别持有约 6700 万 $1bU_3O_8$ 和 1.57 亿 $1bU_3O_8$ 的高丰度尾料。是否对这些尾料进行再浓缩取决于两个因素,即是否有过剩的浓缩产能可供使用以及尾料再浓缩的经济性。此外,其他国家还持有少量库存。

三　全球铀转化市场

铀转化是铀精制或铀同位素分离前的产品,以四氟化铀(UF_4)、六氟化铀(UF_6)为最终产品进入

市场。

UF_4,以 UO_2 为原料,通过氟化氢气流制取,其除作为核燃料中间产品外,还可作为熔盐反应堆燃料。

UF_6,用 UF_4 在氟气流中加热产生,蒸汽冷却后即收得固体。UF_6 用铀的浓缩过程,即将 0.711% ^{235}U 富集到不同丰度的浓缩铀。

(一) 铀转化价格

与天然铀市场不同,转化服务市场在 2007 年保持了相对的稳定。在 2005—2007 年的大部分时间里,北美转化市场的现货价格一直在 11 ~ 12 美元/kgU(以 UF_6 形式交货)之间浮动,这一价格在 2007 年 11 月下降至 9 美元/kgU,此后一直稳定在这个水平上。自 2006 年 6 月底以来,北美转化市场的长期合同价格一直为 12.25 美元/kgU。在 2005 年和 2006 年的大部分时间里,欧洲转化市场的现货价格在 11 ~ 12 美元/kgU 之间浮动,但在此后降至 10 美元/kgU。欧洲转化市场的长期合同价格比北美市场高约 1 美元,约为 13 美元/kgU。

(二)铀转化供需预测

世界目前有 5 家大型供应商分别是 Cameco、Areva、ConverDyn、Rosatom、CNNC。这些公司的一次供应能力为 5.8 万 tU/a,全球二次供约 2 万 ~ 2.5 万 tU/a,总供应能力 2010 年为 8.25 万 tU/a。

1、加拿大矿业能源公司(Cameco),UF_6 产能 1.55 万 tU/a,其中从 2006 年 ~ 2016 年加矿公司将 5000tUO_3 运至英国布兰德河工厂转化。

2、法国阿珐集团(Areva),UF_6 产能 1.4 万 tU/a,2012 年产能可能提升至 2.1 万 tU/a。

3、康弗登(ConverDyn),是美国铀转化厂的代理商。产能 1.5 万 tU/a,2013 年产能可提高至 1.8 万 tU/a。

4、俄罗斯国家原子能公司(Rosatom),产能 1.1 万 tU/a,2015 年达到 1.8 万 tU/a。

5、中国核工业集团公司(CNNC),2 座转化厂,总转化产能 2500 ~ 3000tU/a,2020 年预计可能达到 0.6 万 tU/a 以上(比表 5 高)。

此外,乌尔巴转化公司(Ulab Conversion),为加拿大矿业能源公司与哈萨克斯坦原子能公司在哈合建的公司,该公司转化厂拟建产能 1.2 万 tU/a,由于转化市场景气下降,2008 年暂时搁置。全球转化市场供需与预测(见表 5)。

表 5 全球转化服务的供应与需求 单位:万 tU(UF_6)

	2007 年	2010 年	2015 年	2020 年	2025 年	2030 年
Cameco①(加拿大与英国)	1.00	1.55	1.55	1.80	1.80	1.80
Areva	1.37	1.40	1.50	1.90	2.10	2.10
ConverDyn	1.00	1.50	1.50	1.80	1.80	1.80
Rosaton	1.10	1.10	1.80	2.00	2.50	2.50
中国	0.10	0.25	0.25	0.3	0.35	0.35
Ulab Conversion	0.00	0.00	0.40	1.2	1.20	1.20
已开采铀②	1.87	2.45	1.52	1.29	1.14	1.00
总供应能力	6.44	8.25	8.52	10.29	10.89	10.75
基准情景与高增长情景中的需求	5.7	6.2 ~ 6.4	7.0 ~ 8.0	7.6 ~ 9.2	8.3 ~ 10.7	8.9 ~ 11.3

①包括该公司在加拿大和英国的产能。②已开采铀包括库存、尾料、再循环和高浓铀。

在未来数十年中,全球仍将会有大量的二次供应。二次供应量在 2013 年之前约为 2 万 ~ 2.5 万 tU/a,此后将降至约 1 万 tU/a,直至 2030 年。在 2013 年之前,来自俄罗斯高浓铀的二次供应量将达到约 1 万 tU/a。因钚和少量铀的再循环而形成的二次供应量在 2012 年之前将逐步提高至约 4000tU/a,然后保持在这个水平上,直至 2030 年。包括美国能源部库存以及俄罗斯尾料再浓缩在内的其他二次供应在 2010—2020 年期间将保持在 1 万 tU/a,然后逐步降至 7000 tU/a。

四 全球浓缩铀生产与市场

(一)浓缩铀价格

铀浓缩市场的长期合同价格自 2005 年 12 月以来一直处于稳中有升的趋势。该价格在 2009 年 5 月底达到峰值 165 美元/SWU,并在这一水平上保持了几乎 1 年时间,此后于 2010 年 4 月降至 160 美元/SWU,并一直保持到 2010 年 6 月 30 日。这意味着,与上年同期相比,浓缩服务的长期合同价格下降了约 3%,而之前 4 年的平均增幅为 11%。如果以欧元计价,浓缩服务的价格在过去 5 年中并未出现

明显的总体增幅。长期合同价格与现货价格之间的差距目前略有放大,现货价格比长期合同价格低约4%。导致浓缩服务价格上涨的因素包括:不断增长的市场需求导致供应偏紧,而新增产能需要获得市场价格的支持;在铀浓缩过程中,尾料丰度降低了;对许多燃料买方而言,确保燃料的长期供应是非常重要的;供应商的成本不断上升。

(二)浓缩铀生产与供应商

目前,全球的大型铀浓缩服务供应商主要有 4 家,即法国阿海珐集团(Areva)、欧洲铀浓缩公司(Urenco)、美国铀浓缩公司(USEC)和俄罗斯国家原子能公司(Rosatom)。

1、法国阿海珐集团

法国阿海珐集团在皮埃尔拉特(Pierrelatte)拥有一座额定产能为 1080 万 SWU/a 的铀浓缩厂,由于该厂采用的是能耗极大的气体扩散铀浓缩技术,该厂在 2010 年底就开始停产。

阿海珐在皮埃尔拉特附近建设一座额定产能为 750 万 SWU/a 的铀浓缩厂,即乔治·贝斯 II(GB-II)铀浓缩厂,该厂采用的是由浓缩技术公司(ETC)提供的离心铀浓缩技术。该厂在 2010 年运行。

阿海珐还向美国核管会(NRC)提出申请,拟在美国爱达荷·福尔斯(Idaho Falls)建设一座额定产能为 660 万 SWU/a 的铀浓缩厂,即鹰岩(Eagle Rock)铀浓缩厂。该厂将于 2014 年开始商业生产,2018 年达到 320 万 SWU/a 的产能。如果市场许可,该厂的产能将在 2021 年增至 640 万 SWU/a。

2、欧洲铀浓缩公司

欧洲铀浓缩公司目前正在提升现在铀浓缩设施的产能。该公司在欧洲拥有 3 座铀浓缩厂,即英国的卡本赫斯特(Capenhurst)、德国的格罗瑙(Grona)和荷兰的阿默洛(Almelo)。这 3 座工厂使用的均是浓缩公司提供的离心铀浓缩技术。根据目前的计划,这 3 座铀浓缩厂的总产能将从 2009 年年底的 1120 万 SWU/a 提高至 2011 年年底的 1300 万 SWU/a。

欧洲铀浓缩公司的子公司路易斯安娜能源服务公司(LES)正在美国新墨西哥州尤尼斯(Eunice)建设一座额定产能为 570 万 SWU/a 的铀浓缩厂。采用离心铀浓缩技术。该厂已于 2010 年 6 月投产,预计将于 2015 年达到 570 万 SWU/a 的额定产能。

3、美国铀浓缩公司

美国铀浓缩公司目前的铀浓缩产能来自位于美国肯塔基州帕杜卡(Paducah)的一座气体扩散厂,额定产能 800 万 SWU/a。该厂的部分产能专门用于欠料运行,仅约有 500 万 SWU/a 的产能可用于商业销售。在欠料运行中,浓缩厂将使用更多的 SWU 进行浓缩铀作业,以将尾料丰度降至合同规定水平之下,从而可以从一定数量的铀进料中获得更多的浓缩产品。预计帕杜卡铀浓缩厂将于 2012 年 6 月关闭。

美国铀浓缩公司目前正在帕杜卡建设一座额定产能为 380 万 SWU/a 的离心铀浓缩厂,即美国离心厂(ACP)。预计该厂将在 2012 年下半年投入商业运行,并在 2015 年年底前达到 380 万 S WU/a 额定产能。

4、俄罗斯国家原子能公司

俄罗斯国家原子能公司在俄境内共有 4 座铀浓缩厂。由于这些浓缩厂的浓缩尾料丰度较低,因此其实际产能比额定产能低约 5%。2009 年,俄罗斯的浓缩服务产量估计约为 2520 万 SWU/a。由于俄正在用新型离心机替代现有离心机。预计其产能到 2014 年将增至 2860 万 SWU/a,并在后续 5 年中保持稳定,然后又开始稳步增长,到 2030 年增至 3450 万 SWU/a。

2009 年,俄国家原子能公司向独联体和东欧国家提供了约 740 万 SWU 的浓缩服务,尾料中的铀—235 丰度为 0.11%。

5、中国、日本、巴西伊朗等国

中国核工业集团公司(CNNC)在 2 个场址拥有 100 万 SWU/a 的产能。该公司的产能主要供中国国内使用。通过从俄罗斯进口离心机,该公司的产能到 2011 年将提升至 150 万 SWU/a。

日本新离心机厂 2011 年投入运行,产能从 15 万 SWU/a,提升至 150 万 SWU/a。

巴西正运行一座小型铀浓缩设施,产能 20 万 SWU/a。

伊朗在 2 年内达 10 万 SWU/a。

(三)浓缩铀市场展望

2009 年,核电厂对浓缩服务的需求为 4580 万 SWU/a,与 2008 年的需求大致相同。在能源资源国际公司(ERI)的核电增长基准情景预测中,预计全球浓缩服务的需求在 2010—2030 年期间将以每年 2.5%的速率稳步增长。因此,浓缩服务需求到 2015 年将增长 21%,达到 5590 万 SWU/a,到 2030 年将在 2015 年基础上继续增长 36%,达到 7610 万 SWU/a,需求增幅最大的将是东亚和其他地区(包括南美、中东和非洲),独联体/东欧国家的增幅也不可忽视。美国和西欧的需求将会出现较为温和的增长。根据全球各浓缩服务供应商的现有产能及其

已宣布的产能增加计划,全球在 2012 年之前的浓缩需求基本能得到保证,供需缺口将不足 5%。但此后的供需缺口将不断增大,到 2013 年达到 6%、2015 年 13%、2020 年 25% 和 2025 年的 45%。

从长期来看,市场上还可能出现新的供应源来填补可能出现的供需缺口。例如浓缩技术公司在 2016—2027 年的时间框架内将拥有足够的离心机制造能力,可以满足阿海珐和欧洲铀浓缩公司未来扩展其位于美国和欧洲的铀浓缩厂产能的需求。此外,全球激光浓缩公司(GLE)已公布一份分阶段测试 Silex 激光浓缩技术并使该项技术商业化的计划。图 1 显示了全球浓缩市场直至 2030 年的供需情况预测

五 世界核燃料元件市场

核燃料元件是核电、推进动力的热源——核能裂变(或聚变)产生的热源。元件在反应堆面临辐照、高温、高热流、高速流的作用,面临腐蚀、蠕变、膨胀、塌落的风险。所以,元件在能源燃料市场中除了高热值、无碳(或低碳)的特色外,还是一个高技术、高质量、高风险核燃料终端市场。

燃料元件分类很多,这里主要介绍轻水堆(LWR)元件市场。目前世界轻水堆占核电装机容量的 87%,其中压水堆占 65%,沸水堆占 22%。而重水堆占 6%,石墨水冷堆 3.6%,石墨气冷堆 3.2%。

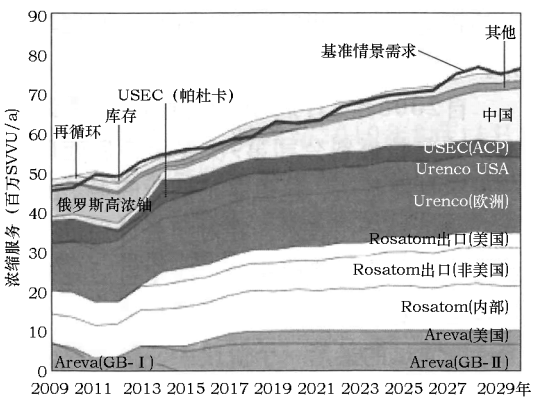


图 1 全球浓缩市场直至 2030 年的供需情况预测

世界核燃料元件市场技术成熟,管理先进,市场较为稳定。净制造加工值超过 30 亿美元,大型企业一般在千吨铀/a 以上,20 世纪末轻水堆燃料组件加工能力已达 10480tU/a,加工服务在 6000tU/a,能力大于加工服务。据国际能源机构 ERI 估计,2010 年 LWR 燃料制造服务为 6800tU/a,2020 年可能在万 t 以上。目前美国生产能力在 4000tU,法国能力 1600tU,日本能力 1800 tU。

在世界 LWR 市场中,约 20 家制造商。法马通占市场服务 31%,西屋占 19%,俄罗斯(TVEL)占 16%,西门子占 11%,ABB 原子能公司占 8%。

中国有元件厂两座,年产能 PWR 元件 600 tU/a,在建、筹建元件能力在 1000tU/a 以上,包括 AFA2 元件、Ap-1000 燃件、AFA3G 元件。预计到 2020 年 PWR 元件需求量在 2000~2500tU/a,元件加工值超过 10 亿美元。

元件制造成本 1991 年为 275 美元/kgU,目前价格在 400 美元/kgU 左右。

六 铀钚混合氧化物(MOX)燃料的生产与市场

(一)MOX 燃料

铀钚混合氧化物 uraniam-plutonium mixed dioxide 由 UO_2 和 PuO_2 的混合烧结制成的单相固溶体,以 $(U,pu)O_2$ 表示,简称 MOX。

混合氧化物中的 UO_2/puO_2 比例随堆型而异,对商用快中子增殖堆一般采用 0.75~0.80/0.25~0.20,对压水堆则约为 0.90/0.10。在堆内使用时,混合氧化物产生裂纹、重构、密实、肿胀及裂变气体释放等现象。在设计燃耗 100000MW.d/tHM 下,$(U,pu)O_2$ 仍具好辐照稳定性。

通常而言,核燃料会在反应堆中停留 3 年时间,其中 50% 的钚-239 会在反应堆中"燃烧",其产生的能量约占核燃料产生的总能量的 1/3。钚-239 的反应行为与铀-235 类似,其裂变产生的能量也与铀-235 相当。燃料的燃耗越高,乏燃料中残留的易裂变钚的数量就越少。在一般情况下,乏燃料中含有约 1% 的钚,而这些钚中有约 2/3 是易裂变材料(约 50% 的钚-239,约 15% 的钚-241)。目前全球每年产生的乏燃料中含有约 70t 钚。

如果以混合氧化物(MOX)燃料形式对钚进行一次循环使用,那么从原始铀燃料中提取的能量将增加约 12%,如果对铀也进行循环使用,那么这个比例将达到约 22%(以燃耗为 45GWd/tU 的轻水堆为基础计算)。

在 MOX 燃料制造厂中,将以氧化物形式的钚与贫铀(浓缩厂的尾料)混合在一起,运营者一直在寻求加大燃料的燃耗(燃耗已从多年前的 30GWd/tU 上升至目前的 50GWd/tU 以上),因此 MOX 燃料的使用将更具有吸引力。

当铀价较低时,MOX 燃料的使用不具有经济吸引力。但是随着铀价的不断攀升,加上需要减少最

终废物的数量,使得 MOX 燃料得到了越来越多的关注。如果进行后处理,7 个 UO_2 燃料组件会产生 1 个 MOX 燃料组件以及一些玻璃固化的高放废物,最终需要加以处理的废物数量将降低 35%。

(二)MOX 燃料的生产

截止 2006 年 11 月,全球共有 3 家商业 MOX 燃料制造厂(法国 2 家,英国 1 家),总生产能力约为 185t/a。2005 年全球共生产了约 200tMOX 燃料,共使用了 12—14t 钚(位于比利时代瑟尔的生产能力为 40t/a 的 MOX 燃料制造厂于 2006 年 7 月底关闭)。自 1963 年以来,全球反应堆使用的 MOX 燃料中共含有超过 400t 钚。MOX 燃料制造能力(见表 6)。

表 6　世界轻水堆 MOX 燃料制造能力(t/a)

时间	2006 年	2012 年
法国	145	195
日本	0	130
英国	40	40 +
总计	185	445

MOX 燃料也在快堆中得到使用,尤其是在法国和俄罗斯。快堆最初就是为使用 MOX 燃料而开发的,美国、俄罗斯、英国、法国、德国、比利时和日本都开展过相关的实验工作。目前,俄罗斯在快堆研发方面走在世界的前列,并已制定了建设使用 MOX 燃料的新一代快堆的长期计划。俄罗斯目前正在别洛雅尔斯基建设一座 800MWe 的快堆—BN-800。该堆预计将在 2010 年投入运行。

目前,由于后处理厂生产钚的速度大于 MOX 燃料使用钚的速度,因此在若干国家中存有民用钚,这些钚的总量在 2010 年左右达到顶峰—超过 250t,之后将会开始下降。因为在 2010 年之后,MOX 燃料的使用量会不断上升,并将能够满足全球反应堆 5% 的燃料需求。

在制成新的 MOX(UO_2 + puO_2)也可能含有少量再循环铀燃料。钚(假定其中的易裂变钚含量达到 2/3)含量在 7% ~9% 之间的 MOX 燃料相当于铀-235 丰度为 4.5% 的氧化铀燃料。如果使用武器级钚(钚-239 的丰度在 90% 以上),则钚含量为 5% 的 MOX 燃料就相当于铀-235 丰度为 4.5% 的氧化铀燃料。

由于所有超铀同位素都是可裂变的,因此快中子堆可以对钚进行多次循环使用。但在热堆中,同位素品质的下降限制了钚的循环次数。因此大部分的乏 MOX 燃料目前都被贮存起来,等待着快堆的大规模商业应用。当燃耗为 45GWd/tU 时,乏 MOX 燃料中钚同位素的组成是:钚-239,37%;钚-240,32%;钚-241,16%;钚-242,12%;钚-238,4%。

(三)MOX 燃料使用

目前,比利时、瑞士、德国和法国有 30 多座反应堆正在使用 MOX 燃料,日本也计划在其约 20 座反应堆中使用 MOX 燃料。在使用 MOX 燃料时,大部分反应堆都是将其 1/3 堆芯装载 MOX 燃料,未来有一些反应堆可能会将 MOX 燃料的装载比例提高到 50%。法国的目标是,所有 900MWe 系列的反应堆至少装载 1/3 的 MOX 燃料。日本的目标是,在 2010 年之前 1/3 的反应堆使用 MOX 燃料。日本已批准建设堆芯全部使用 MOX 燃料的新反应堆。欧洲压水堆(EPR)和 AP ~ 1000 等先进轻水堆能够使用全堆芯 MOX 燃料运行。

尽管必须对机组进行简单的设计调整,例如需要使用更多的控制棒,但 MOX 燃料的使用不会改变反应堆的运行特性,如果 MOX 的使用量超过 50%,那么就需对反应堆进行重大改造。

MOX 燃料的优势之一是,提高燃料中易裂变元素的含量十分容易,只需向燃料中多添加一些钚即可。而在氧化铀燃料中,提高铀-235 的丰度相对较为昂贵。

七　结论

核燃料是高效、清洁、安全、可靠、经济的燃料,是化石燃料最有前途的替代能源。它推进和提升了核电、核推进动力在能源市场的价值与竞争性,核燃料产业与市场未来发展是毋庸置疑的。

今后,要继续加大对铀资源勘探,研究开发利用钍-铀-233 资源;多元化、扩大铀矿开采方法,增加地浸采铀比重,降低天然铀成本;采用浓缩离心分离技术,开拓激光分离技术,淘汰气体扩散分离技术,实现进一步节能、节省分离功的投资与成本。

[参考文献]

[1] 经济合作与发展组织核能机构(OECD/NEA)和国际原子能机构(IAEA). 铀 2009—资源,产量和需求[J]. 国外核新闻,2010(10):17-21.

[2] 世界核协会. 2010 年全球铀矿开采概况[J]. 国外核新闻,2011(5):23-26.

[3] 国际核工程特易公司(Trade tech). 全球浓缩铀市场概况[J]. 国外核新闻,2011(1):22-24.