

我国快堆技术发展的现状和前景

徐 銖

(中国原子能科学研究院, 北京 102413)

[摘要] 考虑到人口众多, 经济快速发展, 人民生活水平不断提高, 人均能源相对贫乏和环境保护, 国家已决策加快核能应用的发展。采用压水堆—快堆匹配闭式燃料循环达到核能供应的快速增长和可持续性的基本战略已经决定, 也决定了分离和用快堆和ADS对高放废物(MA)的嬗变战略。笔者建议快堆工程发展将分三步进行, 中国实验快堆(CEFR, 65 MWt/20 MWe), 中国原型/示范快堆(CEFR / CDFR, 大于等于1 500 MWt/600 MWe)和中国经济验证性快增殖堆(CDFBR, 1 000 MWt/1 500 MWe)。CPFR的设计研究已于2006年开始目前正处于安装、调试阶段, 计划2009年首次临界。近期讨论建造比600 MWeCPFR更大功率的堆作为CDFR, 以加速快堆商用的步伐。

[关键词] 快堆发展战略; 增殖堆; 燃烧堆; 中国实验快堆

[中图分类号] TL43+3 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2008)01-0070-07

1 引言

随着国民经济的发展和人民生活水平的较快提高, 长期能源供应成为最重要的任务。考虑到石油和天然气的日益耗竭, 水力资源的有限性, 煤因运输负担和环境污染应有限地应用, 新能源中如太阳能、风能尚在发展阶段, 尚难看到其环

境的适应性、经济可接受性和大规模应用的可能性。仅有核能是一种安全、可靠、经济可接受且能大规模利用的新能源, 这一事实已被国际经验完全证明了。

我国大陆核电站提供了如表1所示令人满意的运行记录, 让我们相信上面提到的对核电的认识。

表1 我国大陆核电站运行情况

Table 1 Status of NPPs on China Mainland

Site	Capacity/Type	Grid Date	Load factor /%						
			2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006
Qinshan I	300 MW/PWR	1991.12.15	77.2	94.1	66.9	88.6	99.8	86.72	91.44
Daya Bay -1	900 MW/PWR	1993.08.31	85.2	84.9	89.6	89.6	87.2	99.79	80.31
-2	900 MW/PWR	1994.02.07	84.9	89.1	81.6	84.5	73.6	79.44	99.68
Qinshan II -1	600 MW/PWR	2002.02.01			74.9	81.0	82.2	92.76	55.20
-2	600 MW/PWR	2004.03.11						85.19	90.30
Lingao -1	984 MW/PWR	2002.04.05			92.0	76.8	87.76	82.69	89.16
-2	984 MW/PWR	2002.12.15				85.0	79.9	90.57	91.89
Qinshan III -1	700 MW/PHWR	2002.11.10				90.2	77.3	84.05	98.20
-2	700 MW/PHWR	2003.06.12				90.4	94.0	81.05	88.70
Tianwan -1	1 000 MW/PWR	2006.06							
-2	1 000 MW/PWR	2006.12							

对于核能的发展, 在2006年2月9日国务院公布的“国家中长期科学和技术发展规划纲要

[收稿日期] 2006-08-20; 修回日期 2006-12-02

[作者简介] 徐 銖 (1937-), 男, 江苏扬州市人, 中国原子能科学研究院实验快堆工程部总工程师

(2006—2020)”中指出了2条非常重要的原则:

1) “……大力发展核能技术,形成自主核能技术的发展能力……”

2) “……先进核能系统 GIV,核燃料循环和聚变能技术越来越受到重视……”。

在规划纲要下,政府决定继续发展核能利用,要求到2020年我国运行的核电总容量将达到40 GWe,已批准了8个核电厂,包括16个压水堆,另外34个堆的场址已准备就绪。

为了核能可持续供应和应用,热堆—快堆—聚变堆逐步发展方式早已确定为我国核能发展的基本战略。就裂变能而言,作为增殖堆的快堆对有效利用核资源将起重大作用和作为燃烧堆嬗变次量铀系核素(MA),并且用更有效的燃烧堆加速器驱动次临界系统(ADS)进行嬗变,可使需地质深埋的高放废物尽量减少。

按我国快堆发展的战略研究,快堆工程发展将分3步进行:

1) 中国实验快堆(CEFR),功率65 MWt / 20 MWe

2) 中国原型/示范快堆(CPFR/CDFR),功率大于1 500 MWt/600 MWe

3) 中国大型增殖快堆(CDFBR),功率2 500~3 750 MWt / 1 000~1 500 MWe

CEFR正在“八六三”高技术计划下实施,目前正在安装和调试阶段,计划2009年首次临界。

CPFR作为2006—2020年重大专项计划提出,目标是2020年建造完成,最近,正在讨论加大CPFR的功率规模,甚至作为CDFR以加快我国快堆商用化的进度。

在CPFR / CDFR之后,有两种可能,一是如果发现铀资源短缺,不能支持压水堆的发展,则一址多堆的推广CPFR / CDFR,作为增殖快堆(CCFR-B)约在2030年建成。另一可能性是,如果MA和LLFP分离技术和掺MA燃料,LLFP元件的制造和嬗变技术有了足够的经验,且更有效的嬗变装置ADS技术尚未发展到应用阶段,则一址多堆的推广CPFR / CDFR作为嬗变快堆(CCFR-T)约在2030年建成。

为了缩短从CEFR到CDFBR的反应堆工程发展周期和减小发展中的技术经济风险,考虑了这些堆的主要技术选择的延续性(如冷却剂,一回路结构,余热导出系统,燃料操作系统等),对于燃料的选择MOX燃料将作为过渡燃料,甚至作为CEFR

和CPFR的基础燃料。U-Pu-Zr燃料将作为CDFBR和中国商用快堆CCFBR以获得最高的增值利益。利用高温燃料处理和喷注制造设施与快堆可共为一址这一做法有利于防核扩散的需要。

燃料循环系统正在逐步发展,一座100 t/a PWR后燃料中试厂和一座500 kg/a MOX生产实验室正在建造中,预计2010年前运行,800 t/a工业规模后处理厂正在设计,工业规模40 t/a MOX厂正处在建议阶段,设想于2020年前运行。

2 快堆和闭式燃料循环战略研究

按照15年前国家“八六三”高技术计划能源领域的研究,预计我国2050年一次能源年产量将达到 4.5×10^9 t标煤,近期工程院咨询报告的研究指出2050年我国一次能源的生产将达到 5×10^9 t标煤(见表2),而核电容量将需要达到240~250 GWe。

表2 预见的我国2050年一次能源生产

Table 2 Envisaged primary energy production

in China for 2050					
预测能源	1991年		2005年		2050年
	2050年可采量	相当标煤/Gt	总需求/Gt	相当标煤/Gt	
石油	0.1 Gt	4.5		0.5	
天然气	150 Gm ³			0.3	
水力	260 GWe	6.5		0.6	
煤	3.4 Gt	25		0.25	
其他		3		0.5	
核电	240 GWe	6		0.6	
		45	45	5	5

从表2看出2050年我国至少需要240 GWe核电容量,大约占全国当年电力生产的16%,对如此大量的核电不可能仅用压水堆来满足,因为单用压水堆则需要 $2.4 \times 10^6 \sim 2.5 \times 10^6$ t天然铀供其60年运行的需要。我国技术经济可采的铀资源是有限的,世界130 \$ / kgU以下可靠铀资源估计约 4.5×10^6 t。

为了核能的应用,国家几乎20年前就确定了压水堆-快堆-聚变堆的基本战略。基于压水堆预见的发展规模:例如2020年及2030年分别发展到40 GWe和60 GWe,则压水堆能生产足够的工业钚作为快增殖堆和燃烧堆的初装料,商用快堆将具有高增殖比和短的倍增时间,因此选择了钠冷一合金燃料快堆作为核能应用第二阶段的主要堆型。图1给出了设想的核电容量发展情景。

按本文战略研究，快堆工程发展将分为三步，中国实验快堆（CEFR），中国原型/示范快堆

（CPFR/CDFR），大型增殖经济验证性快堆（CDFBR），继而商用推广。

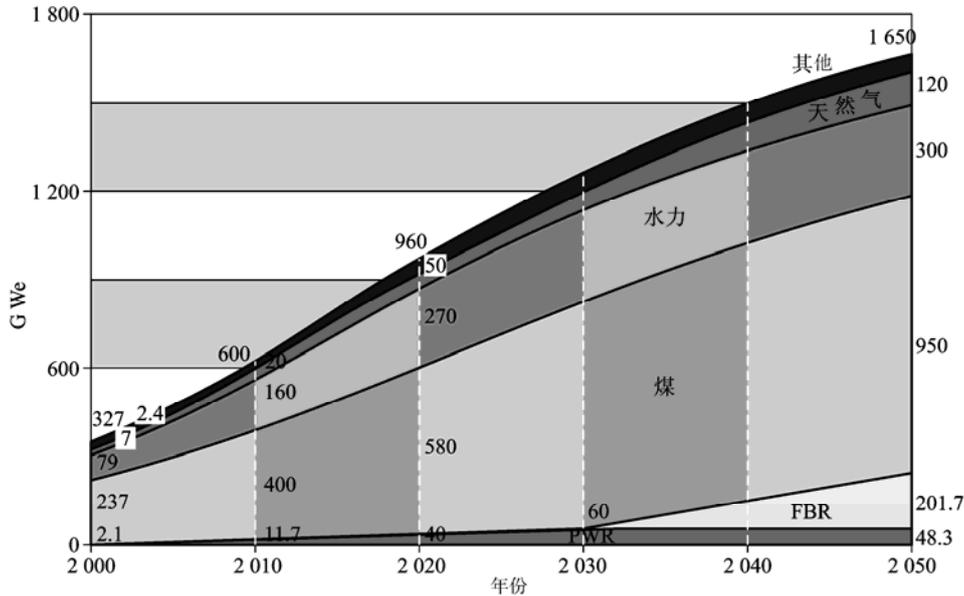


图1 我国核电发展设想*

Fig.1 Electric capacity development envisaged in China

*非核电数据取自2005年工程院能源发展咨询报告

表3 我国快堆发展战略研究

Table 3 China FBR development strategy study

快堆	热功率/电功率 (MW)	设计	建造	建成
		开始	开始	
CEFR	65/20	1990	2001	2010
CPFR/CDFR	≥1 500/600	2007	2013	2020
CCFR	n×≥1 500/600	2015	2023	2030
CDFBR	2 500~3 750/1 000~1 500	2015	2021	2028
CCFBR	n×2 500~3 700/1 000~1 500	2020	2025	2032

在 CPFR / CDFR 之后，考虑了两种可能性，如果 2030 年左右天然铀难以支持压水堆的发展，即可一址多堆地推广 CPFR / CDFR，称为 CCFR-B 增殖堆核电站，另一种可能性是如果 MA 分离技术、在快堆中嬗变 MA 和长寿命裂变产物的经验已足够和 ADS 技术尚未成熟，便一址多堆的推广 CPFR / CDFR，称为 CCFR-T 燃烧堆。

为了缩短从 CEFR 到 CDFBR 的发展周期，考虑了各堆的主要技术选择有最大的延续性，见表 4。

最近，为了加快实验快堆商用，并提高它的经济竞争性并考虑到 CEFR 能够起到原型堆的作用，提出了建造大于 600 MWe 的示范快堆作为第二部的建议但最后选择尚未决定。

表4 我国快堆技术延续性

Table 4 Technical continuity of Chinese FBRs

	CEFR	CPFR / CDFR	CDFBR
功率 MWe	25	≥600	1 000~1 500
冷却剂	Na	Na	Na
型式	池式	池式	池式
燃料	UO2	MOX	金属
包壳材料	MOX	金属	金属
堆芯出口温度/°C	530	550~500	500
燃料线功率 W/cm	430	480, 450	480
燃料 MWD/kg	60~100	100~120	120~150
燃料操作	双旋塞直拉式操作机	双旋塞直拉式操作机	双旋塞直拉式操作机
乏燃料贮存	堆内一次贮存水池贮存	堆内一次贮存水池贮存	堆内一次贮存水池贮存
安全性	主动停堆系统	主动停堆系统	主动停堆系统
	非能动余热排出	非能动余热排出	非能动余热排出

为解决核工业高放废物的潜在风险,将进行次量钢系核素 (MA) 和长寿命裂变产物 (LLFR) 的分离与嬗变并与压水堆乏燃料后处理匹配起来。众所周知，加速器驱动次临界系统 (ADS) 有非常硬的中子谱，因而是最好的嬗变装置。我国和一些国家正在开发 ADS。在 ADS 实现应用前，发展快堆的第二个目标就是嬗变 MA 和 LLFR，以尽可能早

地降低 MA 等贮存的风险。快堆将是比较现实的焚烧 MA 嬗变 LLFR 的装置，初步分析表明 600 MWe 快中子燃烧堆安全特性降低有限，并支持比可达 1:4，研究指出这种规模的快堆可能在 2030 年批量建成。图 2 给出了基于 2020 和 2030 年压水堆分别发展到 32 和 50 GWe 积累的 MA 理论计算的嬗变结果。

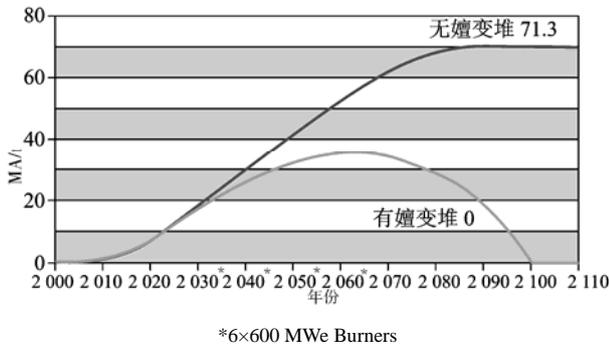


图 2 MA 嬗变战略

Fig.2 MA transmutation strategy

3 中国实验快堆

在国家“八六三”高技术计划领导下，中国实验快堆（CEFR）计划自 1990 年开始实施。CEFR 是一座钠冷 65 MW 热功率实验快堆，用 PuO₂-UO₂ 装料，首炉采用 UO₂-Cr-Ni 奥氏体不锈钢用作燃料元件包壳和堆本体结构材料，一回路是池型，底部支撑采用两台主泵，二回路有两条环路。水-蒸汽三回路也是两条环路，但过热蒸汽合并于一条管路引入汽轮机。CEFR 工程主要时间表如表 5 所示：

表 5 CEFR 工程主要时间表

Table 5 The main schedule of CEFR engineering

CEFR 工程	时间
概念设计	1990—1992.7
对俄快堆联合体咨询和优化	1993
与俄合作技术设计	1994—1995
初步设计	1996—1997
施工设计	1998—2005
初步安全分析报告评审	1998—2005
建造开始	2000.5
主厂房封顶	2002.8

如图 3 所示，CEFR 堆芯包括 81 盒燃料组件，3 盒安全组件，3 盒补偿组件和 2 盒调节棒组件，堆芯外图有 336 盒不锈钢反射层组件，230 盒屏蔽组件和 56 个乏燃料组件初级贮存位置。

CEFR 堆本体表示在图 4 上，主容器、保护容

器支撑在堆坑底部。堆坑直径 10 m，高 12 m，堆芯及支承结构支撑在下内部结构上。2 台主泵和 4 台中间热交换器则支撑在上内部构件上。这两个结构坐在堆容器裙边上。2 台独立热交换器悬挂在主容器的锥顶面上。装有控制棒驱动机构，燃料操作机和一些仪表支承的双旋塞支撑在主容器的颈部。

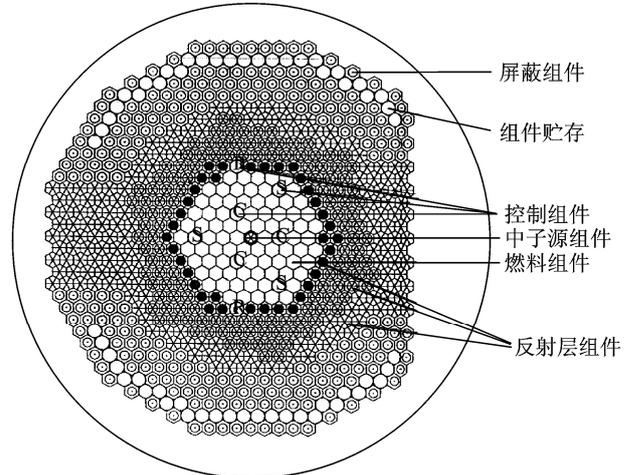


图 3 CEFR 堆芯

Fig.3 CEFR core arrangement

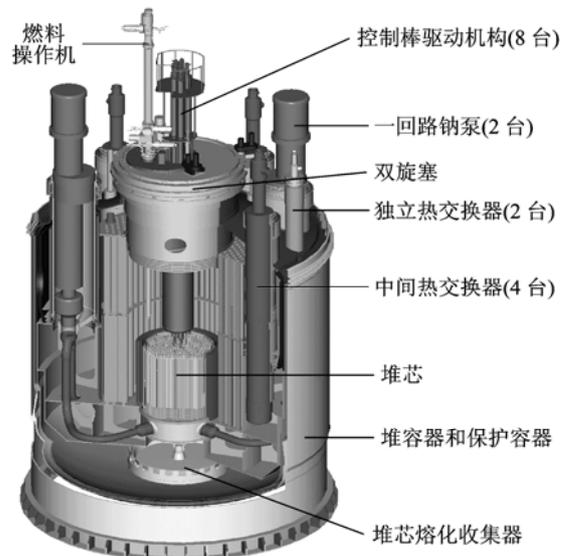


图 4 CEFR 堆本体

Fig.4 CEFR reactor block

如图 5 所示，二次钠回路有二条平行的环路，每条一路主要有二次钠泵，膨胀罐，蒸发器，过热器的各一台及阀门、管道等，余热导出系统也包括两条互相独立的环路，每条环路由一台独立热交换器一台空冷器和钠管道组成，它完全靠自然对流和自然循环导出事故余热。

CEFR 主要设计参数见表 5。

表 5 CEFR 主要设计参数

Table 5 The main design parameters of CEFR

项 目	单 位	参 数	项 目	单 位	参 数
热功率	MW	65	主容器外径	mm	8010
电功率	MW	20	一回路		
反应堆堆芯			钠量	t	260
高度	cm	45	一回路钠泵	台数	2
等效直径	cm	60	总流量	t/h	1328.4
燃料			中间热交换器	台数	4
铀	kg	150.3	二回路		
²³⁹ Pu	kg	97.7	环路数		2
²³⁵ U(富集度)	kg	436(19.6%)	总钠量	t	48.2
首炉			总流量	t/h	986.4
²³⁵ U(富集度)	kg	236.6(64.4%)	三回路		
线功率(最大)	W/cm	430	蒸汽压力	MPa	14
中子注量率(最大)	n/cm ² ·s	3.7×10 ¹⁵	蒸汽流量	t/h	96.2
目标燃耗	MWd/kgH	100	设计寿命	a	30
首炉燃耗	MWd/kgH	60			
堆芯入/出口温度	°C	360/530			

4 CEFR 的设计验证装置

随着 CEFR 设计的进行, 大约 50 项设计验证的试验已经完成, 其目的是验证设计确认其运行性能和积累运行经验。一些为设计验证的试验回路和台架列在表 6 中, 其中虹吸破坏试验装置见图 7, 通过在它上面的试验发现, 虹吸破坏器件必须修改才能保证其应有的性能。

表 6 CEFR 设计验证台架及回路

Table 6 The design demonstration facilities of CEFR

序号	装置	主要参数	开始 运行/时间	地址
1	钠设备清洗系统	水雾率 1.2 kg/h 水流率 8 l/h N ₂ 压力 0.4 MPa N ₂ 流率 2 m ³ /h	1995.10	CIAE
2	中规模钠净化装置	最高温度 350 °C 净化流量 300 kg/d O<20×10 ⁻⁶ Ca<10×10 ⁻⁶	1999.7	CIAE
3	钠火试验室	房间大小 3 m×4 m×5 m 钠压力 0.2 MPa 钠流率 0.25 m ³ /h 钠量 250 kg	1998.10	CIAE
4	固定膨胀石墨 灭火设备	N ₂ 压力 1.6 MPa 石墨体积 40 l	1999.10	CIAE
5	钠火探测系统	烟雾探测器 温度探测器	1999.2	CIAE
6	钠气溶胶净化 和过滤设备	体积 200 l 通风 1700 m ³ /h 过滤器压降 0.25 MPa	1999.11	CIAE

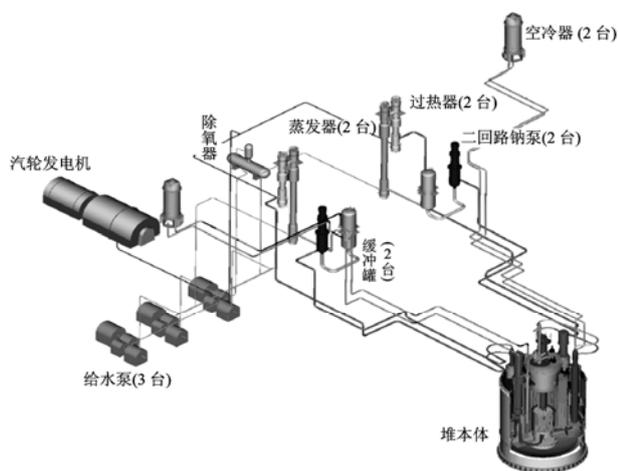


图 5 CEFR 主热传输系统

Fig. 5 The heat transfer system of CEFR

目前 CEFR 正处安装、调试过程中。大约 1 100 台较大的设备和约 75 % 的系统已经安装。2005 年 8 月开始安装堆本体, 超过 30 % 的系统已调试完毕, 250 t 核级钠已贮入钠罐。CEFR 计划 2009 年 6 月首次临界。图 6 为 CEFR 的外貌。



图 6 CEFR 外观

Fig.6 Outside view of CEFR

续表

序号	装置	主要参数	开始运行/时间	地址
7	钠试验回路 (ESPRESSO)	钠流率 110 m ³ /h 最大压力 1.07 MPa 最高温度 600 °C 最大热冲击 200 °C/s	1997	CIAE
8	钠试验回路 (CEDi)	钠流率 320 m ³ /h 最大压力 1.4 MPa 最高温度 650 °C 最大热冲击 50 °C/s	1997	CIAE
9	水试验回路	流率 100 m ³ /h 压力 9 MPa 最高温度 150 °C	1997	CIAE
10	反应堆容器水 自然对流模拟 (为 CEFR 概念设计)	直径 1.6 m 功率 30 kW	1995	CIAE
11	钠虹吸试验 装置	CEFR 实用大小	2002	CIAE
12	超压保护试 验装置	CEFR 实用大小	2003	CIAE
13	钠阀试验回路	相应于 Dg.86	2002	CIAE
14	燃料操作系 统总体验证	CEFR 实用大小	2006	CIAE



图 7 虹吸破坏试验装置

Fig.7 Siphon destruction testing facility

5 中国原型快堆

作为我国快堆工程发展第二步的可能选择中国原型快堆的设计研究始于 2005 年,除表 4 中已列出的主要设计选择外,表 7 还列出了 CPFR 的设计边界条件,堆芯的第一个方案采用俄 BN-600 的结构参数,计算指出初装工业钚的总量为 2 106.19 kg。

表 7 CDfR 设计边界条件

Table 7 Design boundary condition for CPFR		
	单位	数值
功率	MWe	600
燃料		PuO ₂ -UO ₂
堆芯出口温度	°C	550
增殖比		~1.2
目标燃耗	MWd/kgH	120
首炉燃耗	MWd/kgH	100
运行周期	d	300
安全需要		
堆芯熔化概率		<10 ⁻⁶ /a
严重事故下 (BDBA)		厂址边界不要短期应急
停堆功能丧失频率		<10 ⁻⁷ /a
余热导出功能丧失功率		<10 ⁻⁷ /a
负荷因子	%	>70
电站寿命	a	40

6 结语

我国未来需要大规模核能,作为核能发展的第一阶段压水堆的应用已有较快发展计划。第二阶段快堆发展和闭式燃料循环的发展仍处于实验阶段。为了我国核能的可持续发展和核能供应的安全性,加快快堆及其闭式燃料循环的发展是极其重要的。

参考文献

- [1] 赵仁恺.中国快堆技术发展[M].北京:“八六三”计划能源领域专家委员会,1996
- [2] 徐 铄.PWR-FBR 闭式燃料循环实现我国核能持续供应[J].中国前沿能源动力工程(英文)2007,1(2):129~134
- [3] 徐 铄.我国快堆技术研究和发展的[J].核工程和技术(英文).2007,39(3):187~192

The Status and Prospects of Fast Reactor Technology Development in China

Xu Mi

(China Institute of Atomic Energy, 102413, Beijing, China)

[Abstract] China has decided to speed-up the nuclear power development. It is programmed that the nuclear power capacity will reach 40 GWe in 2020 and envisaged 60 GWe and 240 GWe in 2030 and 2050 respectively. The basic strategy of PWR-FBR matched development with fast reactor metal fuel closed cycle for a sustainable and quick increasing nuclear energy supply is adopted. Another strategy also decided is that the partitioning and transmutation of MA will be realized using fast burner and ADS. The fast reactor engineering development will be divided into three steps: China Experimental fast Reactor (CEFR 65 MWt/20 MWe), China Prototype/Demonstration Fast Reactor (CPFR/CDFR $\geq 1\ 500$ MWt/600 MWe) and China Demonstration Fast Breeder Reactor (CDFBR 100~1 500 MWe). The CEFR is under installation and pre-operation testing with its first criticality planned in 2009. The design study of CPFR is just started in 2006. Recently a discussion for the second step is under way to faster the fast reactor development by a larger than 600 MWe CPFR and as a role of CDFR.

[Key words] fast reactor development strategy; breeder; burner; China experimental fast reactor