

我国快堆技术发展和核能可持续应用

徐 铄

一、前言

快中子堆（简称快堆）是主要以平均中子能量 $0.08\sim 0.1\text{MeV}$ 的快中子引起裂变链式反应的反应堆。快中子堆的主要特点是，在堆运行时，新产生的易裂变核燃料，如钚，能多于消耗掉的易裂变核燃料钚或 ^{235}U ，即增殖比大于 1，易裂变核燃料得到增殖，因此又称为快中子增殖反应堆。运行中真正消耗的是天然铀中不易裂变，且丰度占 99.2% 以上的 ^{238}U 。快堆的乏燃料（即运行后出堆的燃料）经后处理，所得钚返回堆内再烧，多余的钚则用于装载新的快堆。如此封闭并无限次循环则对铀资源的利用率可从单发展压水堆的 1% 左右提高到 60%~70%。

在热中子反应堆运行时，会产生更高原子序数的长寿命锕系核素，包括其产量约为所产工业钚 1/10 的次锕系核素（Minor Actinides，缩写 MA，指镎、镅和锔等元素的核素），锕系核素需要衰变三四百万年才能将其放射性毒性降到天然铀的水平。但这些核素在快中子场中可以裂变成一般裂变产物，因此，可用快中子焚烧堆将它们裂变掉，获得裂变能，达到变害为利。加速器驱动次临界装置（ADS），有更硬的中子谱，有更高的效率来焚烧它们。在 ADS 实用前，快中子堆可望提前对热堆产生的 MA 进行焚烧，减少 MA 的存量，降低这种高放废物的贮存风险，也为 ADS 焚烧 MA 积累经验。

反应堆中的冷却剂是用来冷却反应堆堆芯，并把裂变热能带出来的介质（如液体）。为了在堆芯内维持快中子，除气体外不宜用带轻核的冷却剂。2000 年美国首先提出的和核能国家相继支持的第 IV 代先进核能系统中对快中子堆的冷却剂选用钠、氦和铅。

氦冷快堆早在 20 世纪六七十年代德、美等国进行过设计研究，当时各国主要追求快堆实现高增殖，氦冷快堆难以满足，因而无一堆建造。铅冷快堆至今也无一堆建成，但前苏联于 20 世纪六七十年代用铅铋合金作冷却剂建造过 11~12 艘核潜艇用堆，共积累过 80 堆·年的运行经验，但这一技术尚未达到能满足核电站长期可靠运行的水平。然而随着 21

世纪开始的冷却剂技术进一步发展，尤其是欧美一些国家暂不追求快堆增殖，而是追求快速减少 MA 的存量，因此用氦和铅或铅铋冷却剂的快堆会有新的进展。

在过去的快堆发展六十年中，各快堆国家审慎唯一地选择了钠作为冷却剂，至今已建成 18 座钠冷快堆，从实验快堆、原型快堆直到经济验证性快堆，相应的电功率从几百 kW 直至 1200MW，并有三座钠冷快堆正处建造阶段。我国长时间发展的正是钠冷快堆，表 1 列出了国外快堆发展概况。

钠在常压下熔点为 97.83°C ，而沸点高达 881.4°C 。堆芯钠出口温度一般在 550°C 以下，所以钠冷快堆是一个低压系统，在快堆主容器外又设置了保护容器，所以池式快堆堆芯几无失钠的危险。钠有较大的导热系数和比热容，堆芯不易过热。在快堆中，钠的流动特性类似水，也有较大的热膨胀系数，易于实现自然对流和自然循环，非能动地排出事故余热。钠易于净化，只要氢和氧的含量分别在 $0.5\times 10^{-6}\mu\text{g/g}$ 和 $5\times 10^{-6}\mu\text{g/g}$ 以下，对奥氏体不锈钢、铬钼钢等腐蚀极小，甚至与熔融的燃料、裂变产物亦无激烈的化学反应。

由于快堆堆芯出口温度高，商用快堆三回路的过热蒸汽参数高达约 $510^\circ\text{C}/18\text{MPa}$ ，因此热效率约为 41%。

钠的不足之处是在空气中易燃烧，与水会发生激烈的钠水反应。为了保护堆芯，钠冷快堆采用钠-水-蒸汽三回路作为主热传输系统。系统中钠要用氩气保护，换料需在氩气保护下密闭操作。国外建成过 18 座钠冷快堆，积累了约 400 堆年的运行经验，掌握了数百吨、数千吨液态钠的操作经验，对防止钠泄漏，限制钠火和钠水反应这样一些工业事故，已有了足够的经验。

自然界存在的 ^{235}U 用于热中子堆的中子学特性优于它用于快堆，人类开发利用核能自然地从中子堆开始，而最适于快中子增殖堆用的裂变燃料是热堆生产的工业钚，所以快堆的推广应用一般在热堆发展到一定阶段之后。

表 1 国外快堆发展概况

国家	快堆	功率(MW) 热/电	堆型 ^①	冷却剂	燃料	运行时间	类别			
							实验堆	原型堆	经济验证堆	商用堆
美国	Clementine	0.025/0	回路型	Hg	Pu	1946~1952	√			
	EBR-I	1.2/0.2	回路型	NaK	U 合金	1951~1963	√			
	LAMPRE	1.0/0	回路型	Na	熔 Pu	1961~1965	√			
	FERMI	200/66	回路型	Na	U 合金	1963~1972	√	√ ^②		
	EBR-II	62.5/20	池型	Na	(U,Pu,Zr)	1963~1994	√			
	SEFOR	20/0	回路型	Na	UO ₂	1969~1972	√			
	FFTF	400/0	回路型	Na	(Pu,U)O ₂	1980~1993	√			
	CRBR	975/380	回路型	Na	(Pu,U)O ₂			√		
	ALMR	nx840/303	池型	Na	(U,Pu,Zr)					√
	SAFR	nx873/350	池型	Na	(U,Pu,Zr)				√	
法国	Rapsodie	20~40/0	回路型	Na	(Pu,U)O ₂	1967~1983	√			
	Phenix	653/254	池型	Na	(Pu,U)O ₂	1973~		√		
	SPX-1	3000/1242	池型	Na	(Pu,U)O ₂	1985~1998			√	
	EFR	3600/1500	池型	Na	(Pu,U)O ₂					√
德国	KNK-II	60/21.4	回路型	Na	(Pu,U)O ₂	1977~1992	√			
	SNR-300	770/327	回路型	Na	(Pu,U)O ₂	(1994) ^③		√		
	SNR-2	3420/1497	回路型	Na	(Pu,U)O ₂				√	
印度	FBTR	42/12.5~15	回路型	Na	(Pu,U)C	1985~	√			
	PFBR	1250/500	池型	Na	(Pu,U)O ₂	(在建)		√		
日本	JOYO	100~140/0	回路型	Na	(Pu,U)O ₂	1977~	√			
	MONJU	714/318	回路型	Na	(Pu,U)O ₂	1994 ^④		√		
	JSFR	3250/1300	池型	Na	(Pu,U)O ₂				√	
英国	DFR	60/15	回路型	Na	U 合金	1959~1977	√			
	PFR	600/270	池型	Na	(Pu,U)O ₂	1974~1995		√		
	CDFR	3800/1500	池型	Na	(Pu,U)O ₂				√	
意大利	PEC	123/0	回路型	Na	(Pu,U)O ₂		√			
俄罗斯	BR-2	0.1/0	回路型	Hg	Pu	1956~1957	√			
	BR-5/10	5~10/0	回路型	Na	Pu,PuO ₂	1958~	√			
	BOR-60	60~12	回路型	Na	(Pu,U)O ₂	1969~	√			
	BN-350	700/130	回路型	Na	UO ₂	1972~1998		√		
	BN-600	1470/600	池型	Na	UO ₂	1980~		√		
	BN-800	2000~800	池型	Na	(Pu,U)O ₂	(在建)			√	
	BMN-170	nx425/170	池型	Na	(Pu,U)O ₂					√
	BN1600	4200/1600	池型	Na	(Pu,U)O ₂					√
	BN1200	3000/1200	池型	Na	(Pu,U)O ₂					√
韩国	KALIMER	1500/600	池型	Na	(U,Pu,Zr)			√		

①回路型：堆芯、钠泵和中间热交换器分离布置，用管道相连。池型：这些设备都放在反应堆的主容器中。

②FERMI 原作原型堆设计。

③SNR-300 建成，因地方政府反核而未装料，已拆除。

④MONJU 1995 年二回路钠泄漏，停堆 15 年，2010 年 5 月重新启动。

然而，钠冷快堆是一种全新的核工程技术，需要从基础研究、发展、验证、推广多个阶段，耗时数十年。对于需要大规模开发利用核能而言，快堆

的研发需适时地开始。在国际上，钠冷快堆的技术已发展到推广应用的前夕，我国快堆的技术发展尚处于在实验快堆的调试阶段。实验快堆是快堆工程

技术发展的第一步，它将为后续的大功率快堆：示范快堆、商用快堆奠定技术基础。

二、快堆技术科研

1. 快堆技术基础研究

在前核工业部（中国核工业集团公司前身）领导下，我国快堆技术的开发始于 20 世纪 60 年代中后期。重点放在快堆堆芯中子学、热工流体、钠工艺、材料，燃料、安全、小型钠设备和仪表。1986 年之前，建成了约 12 台套实验装置和钠回路。其中包括一座快中子零功率装置，1968 年经李富春副总理和周总理特批，调用核燃料，该装置于 1970 年 6 月 29 日首次临界（图 1）。



图 1 我国首座快中子零功率装置 DF-6

在这二十多年间通过理论和实验研究，初步掌握了堆芯中子学和钠热工流体的计算方法、钠净化技术、钠与材料的相互作用原理、小型钠设备和仪表技术以及快中子临界装置的运行技术等。

2. 快堆技术应用基础研究

1986 年快堆技术发展纳入国家八六三高技术计划，1988~1993 年八大院校：中国原子能科学研究院、西安交大、清华大学、核工业一院、核工业

404 厂、上海交大、湖南大学、钢铁研究总院和郑州机械研究所合作，共约 500 余人进行了以 65 MW 热功率实验快堆为工程目标的应用基础研究，重点放在快堆设计、钠工艺、材料和燃料以及快堆安全研究上。建成了约 20 台套具有一定规模的试验装置和试验钠回路；完成了设计计算程序编制、收集、开发和实用化，实验快堆概念设计，实用化的钠净化、分析技术的开发；建成一批钠水反应、钠沸腾等安全研究实验装置；完成了大部分钠热工仪表的研制，并已实用化；完成了钠水反应、钠沸腾等诊断试验；完成了燃料组件模拟件、阀门的研制；开展了燃料研制与试验工作，准备了材料使用性能验证的条件。

三、中国实验快堆

中国实验快堆（CEFR）是我国快堆工程发展的第一步，其目的是：积累快堆电站的设计、建造和运行经验；运行后作为快中子辐照装置，辐照考验燃料和材料，也作为钠冷快堆全参数实验平台考验钠设备和仪表，为快堆工程的进一步发展服务。

对 CEFR 的原则要求是保证运行的安全性和保证运行安全的可靠性和为后续高功率快堆积累经验，技术上易于向后续高功率快堆过渡。具体设计 requirements 是：

- (1) 技术方案应有商用前景；
- (2) 热工参数应接近商用快堆；
- (3) 充分利用快堆的固有安全性；
- (4) 反应堆应尽量设计成具有非能动安全性；
- (5) 利用包括国外的成熟技术。

CEFR 是一座热功率 65MW、电功率 20MW 的钠冷池型快堆。设计燃料为 $\text{PuO}_2\text{-UO}_2$ ，首炉采用 ^{235}U 加浓度 64.4% 的 UO_2 堆芯，包括 81 盒燃料组件，3 盒补偿棒组件，2 盒调节棒组件和 3 盒安全棒组件，337 盒不同形式的不锈钢组件和 230 盒 B_4C 屏蔽组件，另有 56 个供乏燃料初步贮存的位置。补偿棒组件和调节棒组件组成第一停堆系统，安全棒组件组成第二停堆系统。

CEFR 一回路系统采用了池式结构，堆本体由一个直径 8.01m、高 12m、下部支撑的大钠池，即主容器、保护容器、双旋塞、两台主钠泵、栅板联箱及堆芯、四台中间热交换器、事故余热导出系统的两台独立热交换器，堆内燃料操作系统及堆内构件等组成（图 2），内装由 Ar 作为覆盖气体的 260 吨液态钠，堆本体总重约 1200 吨。

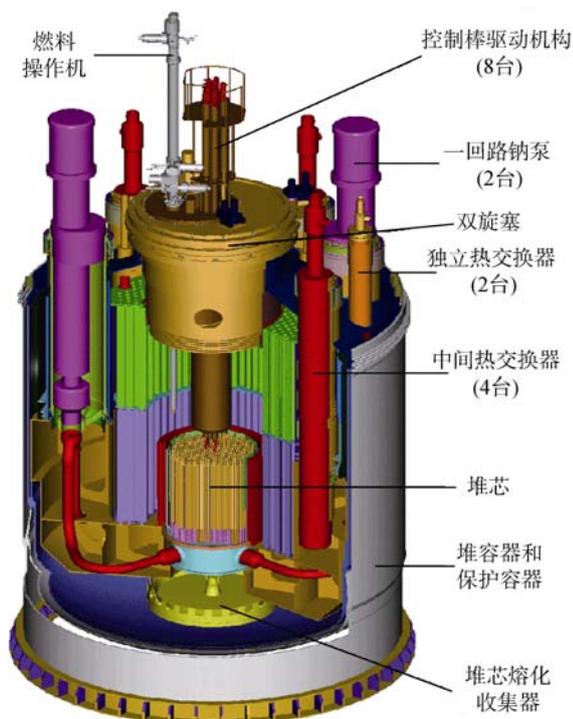


图2 中国实验快堆堆本体

两台主泵将冷池中 360℃的钠泵入栅板联箱，钠向上流经堆芯，出口时平均温度达 530℃，与热池钠搅混后降为 516℃进入中间热交换器。

燃料操作系统的大旋塞上偏心地装有小旋塞，小旋塞上偏心地装有直拉式燃料操作机，大小旋塞的组合运动可使该操作机抓取堆芯的任何一个组件，并将组件装入倾斜式提升机上的转运桶中，对于新组件则用这套系统进行反向操作。

快堆的主热传输系统由 Na-Na-水、蒸汽三回路组成（图3），堆本体的四台中间热交换器用于一回路的钠向二回路的传热（图2），而 CEFR 的主热传输系统包含两条二回路（图3），图3上注明的设备数量是两条二回路的总量（每条二回路就称一个环路），每条环路有一台钠泵，两台中间热交换器，一台过热器，一台蒸发器和一台缓冲罐。包括独立热交换器（二台在图2的堆本体中）和空冷器（二台，在图3中）的非能动余热导出系统也是两个环路。正常运行时二回路钠进入中间热交换器的钠温是 310℃，出口温度是 495℃，进入过热器将 370.3℃的饱和蒸汽加热成 480℃/14MPa（这里，480℃/14MPa 为过热蒸汽参数，指温度/压力，下同。该数值越大，则热效率越高，即发电能力越大）的过热蒸汽，进汽轮发电机发电，钠温降到 463.3℃进入蒸

发器将 190℃/14MPa 的给水加热成饱和蒸汽，这时钠温下到了 310℃，再进入中间热交换器循环。

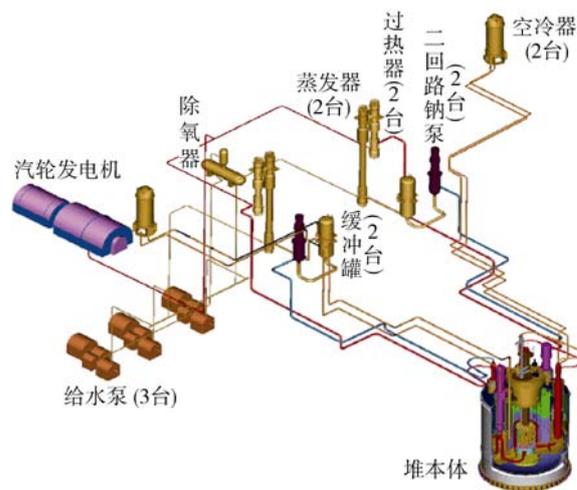


图3 中国实验快堆主热传输系统

CEFR 采用一台凝汽式汽轮发电机。两条环路的过热蒸汽合并后进入汽轮机的主汽门，发电功率 20 MW（最大电功率 22.4 MW）。

由于钠中含氧量较高时会对不锈钢材料造成腐蚀，因此一回路钠和二回路钠都需要净化，一般氧的含量控制在 5 μg/g 以内。目前中国实验快堆运行控制在 3 μg/g 左右。氧化钠 Na₂O 在低温时易于沉淀，中国实验快堆的一和二回路都配备了冷阱回路，在冷阱中降低温度，再将氧化钠过滤掉，如此保持氧含量处于较低水平。相应地，建有钠的分析监测系统，在线的主要监督氧和氢，离线的则取样分析，分析杂质包括氧、碳、氢、氯、氮、钙、锂、铁、镉、钾等。另外还有钠的贮存、充排系统，沾钠设备和燃料组件的清洗系统。钠遇空气会氧化和燃烧，因此 CEFR 一、二回路都设置了氩气分配系统，用氩气对钠进行保护。

为应对钠火这种工业事故，CEFR 配置了钠泄漏探测，钠火探测，非能动钠接收系统，氮气淹没和石墨膨胀灭钠火系统。与钠相关的另一类工业事故是钠水反应。为此 CEFR 配置了蒸汽发生器泄漏探测和保护系统，对其微漏、小漏、大漏分别有氢、气泡、压力、流量等测量和达到限值的保护，保证其他二回路管道和设备不致损坏。

CEFR 具有固有安全性。堆芯平均温度系数为 -4.21 pcm/℃，平均功率系数为 -5.96 pcm/MWt，堆芯总钠空泡效应为 -3644 pcm。（pcm：反应性单位，1 pcm = 10⁻⁵ Δk/k）全为负值，当温度或功率变高、变大时，堆的反应性是负反馈，堆功率和温度将下降，

所以 CEFR 堆芯有中子学自稳性。CEFR 最重要的专用安全系统是非能动事故余热导出系统,它是由两条互相独立的环路系统组成。每条环路包括一台浸在主容器钠液下的 Na-Na 热交换器,一台空冷器和钠管路组成,在全厂失电、地震或三回路给水系统失效的事故下,单靠一回路钠的自然对流和事故余热排出系统的二回路的自然循环即可将堆芯余热导出。相对于在主热传输系统上接空冷器的方案,非能动事故余热导出系统有更可靠的优点,而且避免二回路管道、中间热交换器的共因故障,对安全更为有利。

CEFR 主要设计参数

热功率 65MW

电功率 20MW

反应堆堆芯

高度 45cm

当量直径 60cm

燃料 $\text{PuO}_2\text{-UO}_2$

铀 150.3kg

^{239}Pu 97.7kg

^{235}U (富集度) 436(19.6%)kg

首炉 UO_2

^{235}U (富集度) 236.6(64.4%)kg

线功率(最大) 430 W/cm

中子注量率(最大) 3.7×10^{15} n/cm²·s

目标燃耗 100 MWd/kg

首炉燃耗 60 MWd/kg

堆芯入/出口温度 360/530℃

主容器外径 8010mm

一回路

钠量 260t

一回路钠泵 2台

总流量 1328.4 t/h

中间热交换器 4台

二回路

环路数 2

总钠量 48.2t

总流量 986.4 t/h

三回路

蒸汽温度/压力 480℃/14MPa

蒸汽流量 96.2 t/h

设计寿命 30a

中国实验快堆于1990~1992年7月完成概念设

计,1993~1995年向俄罗斯快堆联合体进行技术咨询和合作进行技术设计,1996~2005年自主完成初步设计、施工图设计,1997年开始设备订货,国产化率达到70%,该堆于2000~2008年完成建造,继之以冷热调试,于2010年7月21日前次临界,功率启动正在进行中,预计2011年6月40%功率并网。

四、快堆发展战略研究和未来发展

1. 快堆战略目标

快堆的发展目标是制定其发展规划的重要前提,也是规划的重要结果。

自2006年我国核电规划制定以来,国家核能领导机构不断研究核电发展目标,不断有新的更高的目标要求。近20年来,在2050年经济发展目标的宏观要求下,核能发展目标的研究多次提出2050年核电总容量达到240GWe(这里e表示电功率,全文同),甚至400~500GWe。如此,更显高增殖快堆早日推广应用的迫切性。鉴于中国实验快堆已具有原型快堆的特征,包括技术方案与商用快堆一致,主要参数也接近商用快堆。因此,可以快速进入示范快堆发展阶段,尽早推广应用,并可加快向高增殖快堆发展。

同时,加快快堆的发展,大规模替代化石燃料是我国减排温室气体的必由之路。因为要求有数十亿kWe的核电容量必然要依靠快堆的增殖。因此,快堆发展应有三个战略目标:

(1) 2030年前批量运行快堆商用核电站,增加核电容量;

(2) 2050年快堆总容量发展到240GWe以上。使核电份额约占我国总发电量的16%以上;

(3) 2050~2100年核能大量替代化石燃料,减少CO₂排放。

2. 快堆规划研究和建议

快堆是一种全新的复杂核工程,充分重视快堆先行国家的经验,免走弯路是制定我国快堆发展规划的原则之一。为减少工程发展中的技术经济风险,我国快堆在各发展阶段选择的技术路线具有一致性和延续性(表2);在发展的阶段性上,原则上采取实验堆、原型堆和示范堆三步发展模式,但考虑到国内快堆工程发展已建立的基础,CEFR已有原型堆特征,国际快堆经验和合作条件,我国快堆工程发展将分为三步,中国实验快堆(CEFR),中国示范快堆(CDFR),大型高增殖经济验证性快堆(CDFBR),继而商用推广,见表3。

表 2 我国快堆技术延续性

	CEFR	CDFR	CDFBR
功率 MWe	25	800~900	1000~1500
冷却剂	Na	Na	Na
一回路结构型式	池式	池式	池式
燃料	UO ₂	MOX	金属
	MOX	金属	
包壳材料	Cr-Ni	Cr-Ni	Cr-Ni
		ODS	ODS
堆芯出口温度℃	530	550~500	500
燃料线功率 W/cm	430	480, 450	450
燃耗 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	堆内一次贮存	堆内一次贮存
	水池贮存	水池贮存	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
		非能动停堆系统	非能动停堆系统
	非能动余热排出	非能动余热排出	非能动余热排出

表 3 我国快堆发展战略研究

快堆	热功率/电功率 (MW)	设计开始	建造开始	建成时间
1. CEFR	65/20	1990	2001	2010
2. CDFR	2000~2250/800~900	2007	2011	2018
CCFR (推广)	n×2000~2250/800~900	2012	2018	2026
3. CDFBR	2500~3750/1000~1500	2015	2021	2028
CCFBR (推广)	n×2500~3700/1000~1500	2020	2025	2032

目前,我国快堆示范快堆发展有两个计划:

计划 1, 自主设计、建造 1000MWe, 示范快堆 CFR-1000、CFR-1000 已进入概念设计阶段即将进入立项申请阶段。该堆的主要设计目标包括: 增殖比 1.2; 堆芯熔化概率小于 10^{-6} /堆·年; 过量放射性释放概率小于 10^{-7} /堆·年和电站可利用率大于 80%。

计划 2, 在俄 BN-800 的基础上引进两座 800MWe 商用示范快堆。引该项目正处对俄谈判过程。在增殖性能和安全性能方面将比原 BN800 有所提高。

这三座快中子增殖堆核电站目标计划如下: CFR-1000 的开工时间为 2017 年, 建成时间为 2022~2023 年; 2XBN-800 的开工时间为 2013~2014 年, 建成时间为 2018~2019 年。

由于我国对大规模核能的需要。因此, 必须发展金属燃料技术, 鉴于金属燃料的后处理和燃料生产技术有待发展, 因此 CDFR 和其首批推广 CCFR 快堆电站将用 MOX 燃料。设想金属燃料能于 2025 年起可在大型增殖示范快堆 (CDFBR) 上和 2032 年推广的批量 CCFBR 商用堆上得到应用。图 4 给出了设想百年内能获得 300 万吨天然铀, 持续发展压水堆, 2020 建成两座快堆后, 推广 U-Pu 混合氧化物快堆, 该战略下可能实现的核电容量。图 5 估计了国家总电力装机与快堆总装机的发展, 2050 年国家总电力装机容量值参考 2010 年 9 月工程院能源中长期发展战略研究项目组编制的综合报告, 约 25 亿千万, 之后设想按年增率 5% 发展。快堆则采用金属燃料高增殖快堆, 系统倍增时间为 6.2 年, 理论上快堆有能力大规模替代化石燃料。

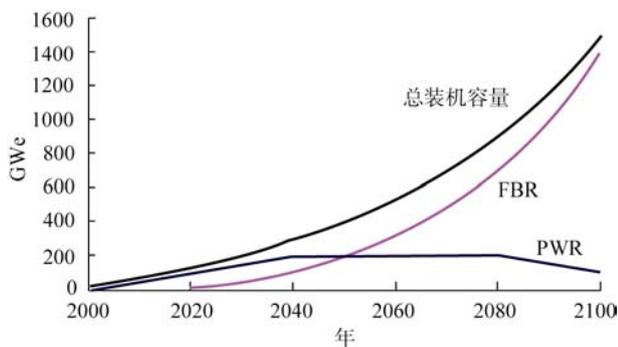


图4 我国核电发展设想

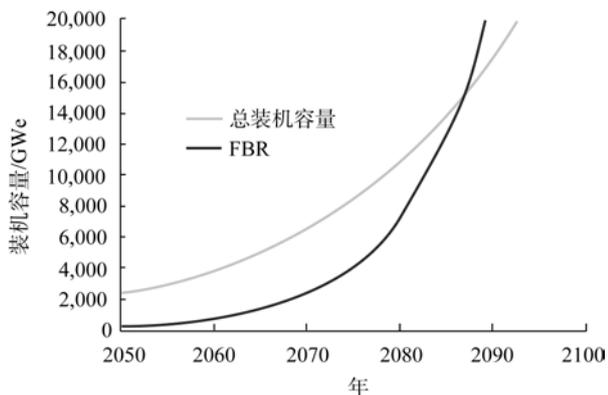


图5 估计的国家总电力装机与快堆总装机的
发展
(注:2050年国家总电力装机容量值参考2010年9月工程院能
源中长期发展战略研究项目组编制的综合报告)

当然，今后只要还能获得天然铀，前端的燃料循环系统没有拆除、退役，则热中子堆就不会消失，这样，快堆将会与热中子堆长期并存。

五、结语

第四代先进核能系统最重要的要求是更安全保证资源的有效利用和高放核素的嬗变处理以便大大



科苑快讯

同步加速器无损检验 艺术品和化石

梵高曾向他的兄弟抱怨自己的向日葵油画很快就褪色了，而现在看起来他的向日葵不是褪色了，而是由黄色变成棕色了。这种变化是由于染料中的六价铬缓慢还原为三价铬，使绿色化合物转变为棕色化合物造成的。这是意大利佩鲁贾大学（University of Perugia）的莫尼科（Letizia Monico）与比利时安特卫普大学（University of Antwerp）的同行在法国格勒诺布尔（Grenoble）利用欧洲同步辐射装置（European Synchrotron Radiation Facility，

减少废物贮存需要，从而实现核能可持续发展。

正是因为快堆在这两方面的优势而成为第四代先进核能系统的多国开发的堆型，自然也是我国核能可持续发展的关键堆型。我国压水堆已进入规模性的商用阶段，快堆及其闭式燃料循环系统的国家规划和发展计划已成为当前工作的关键。

致谢：本文摘录了我国快堆开发至今的一些成果，作者谨向快堆领域的同志们表示深深的谢意。

（北京中国原子能科学研究院 102413）

作者简介

徐铄，1937年4月出生于江苏省扬州市；1961年毕业于清华大学工程物理系反应堆工程专业；1961~1970年在北京原子能所、北京194所从事零功率装置实验研究，包括铀水栅和快中子零功率装置；1971~1987年在核工业一院从事快堆设计研究和快堆发展战略研究；1990~2002年曾任国际原子能机构快堆工作组中国代表；1991~1995年曾任清华大学工程物理系兼职教授；1987到现在，在中国原子能科学研究院反应堆工程研究所和快堆工程指挥部曾先后任副所长和副指挥长，技术上负责快堆设计研究，快堆科研，中国实验快堆设计和建造。1996年任博士生导师。1996年起至今任快堆工程部总工程师。2010年9月聘为核工业集团公司快堆首席专家。



ESRF) 的密集 X 射线通过实验进行无损光谱学检测得出的结论。

这里的 X 射线同样被法国国家自然历史博物馆（National Museum of Natural History）的何赛（Alexandra Houssaye）用于制作 9500 万年前有足蛇化石的 3D 影像。目前全世界仅发现 3 件有足蛇化石，它们表明蛇最初像蜥蜴一样是有腿的，后来才渐渐失去。何赛研究的这件蛇化石看起来只有一条腿，其实还有一条腿埋在岩石之中，借助欧洲同步辐射装置后才看清了化石的细节。

（高凌云编译自 2011 年 3 月《欧洲核子研究中心快报》）