

# 钠冷快堆及其安全特性

徐 铄 杨红义<sup>†</sup>

(中国原子能科学研究院 北京 102413)

2016-06-25收到

<sup>†</sup> email: yang.hongyi@139.com

DOI: 10.7693/wl20160902

## Safety properties of sodium-cooled fast reactors

XU Mi YANG Hong-Yi<sup>†</sup>

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

**摘要** 钠冷快堆是第四代核能系统国际论坛(GIF)公布的6种第四代先进反应堆中研发进展最快、最接近满足商业核电站需要的堆型。钠冷快堆因其在固有安全性以及可增殖核燃料、嬗变长寿命放射性废物等方面的优势,得到了世界各国的重视。文章以中国第一座钠冷快堆——中国实验快堆(China Experimental Fast Reactor, CEFR)为例,介绍了钠冷快堆在设计及运行方面的安全特性。

**关键词** 钠冷快堆, 固有安全性, 中国实验快堆(CEFR)

**Abstract** The sodium-cooled fast reactor is the fastest prototype and the closest to commercialization for nuclear power plants amongst the six types of fourth generation reactors, as announced at the Generation IV International Forum. Many countries are paying more and more attention to the research and development of these reactors, due to the inherent safety features, efficient utilization of uranium with the breeding of the plutonium, and transmutation of long-lived actinides. The design and operational safety characteristics of the China Experimental Fast Reactor are reviewed in this paper.

**Keywords** sodium-cooled fast reactor, inherent safety, China Experimental Fast Reactor

## 1 钠冷快堆简述

钠冷快堆原理如图1所示。它是以液态金属钠为冷却剂,主要由快中子引起核裂变并维持链式反应的反应堆。快中子是指反应堆堆芯内的中子能量高,飞行速度快的中子。将法国1200 MW<sub>e</sub>的超凤凰钠冷快堆与我国大亚湾970 MW<sub>e</sub>轻水冷却热中子压水堆相比,前者堆芯的平均中子能量约为~0.08 MeV,后者则约为~0.05 eV。换言之,快堆堆芯中子的飞行速度是压水堆的千倍。正因为快堆中子飞行速度快,导致其吸收截面与裂变截面之比显

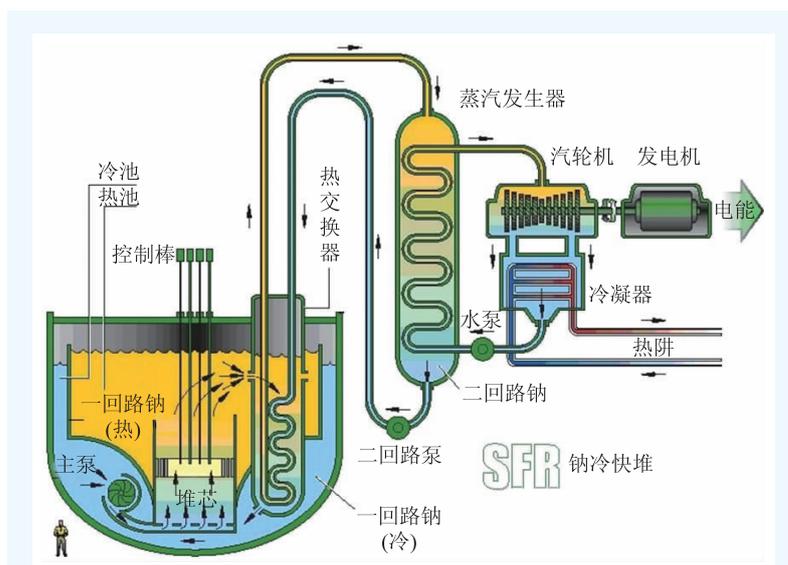


图1 钠冷快堆原理示意图

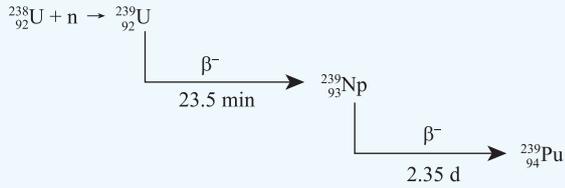


图2  ${}^{238}\text{U}$ — ${}^{239}\text{Pu}$ 转换示意图

著降低，以及每次裂变产生的中子数显著增大，因而快堆的中子经济性更好，所以有更多的剩余中子被铀-238俘获吸收，再经过两次衰变转变为钚-239，其转换示意图见图2。

1000 MW<sub>e</sub>以上的大型商用钠冷快堆，当采用铀钚氧化物燃料运行时，其增殖比可达1.3，如果换用铀钚金属燃料，增殖比将会达到1.582<sup>[1]</sup>，增殖能力将更强，倍增时间短至6.2年。

## 2 钠冷快堆发展情况

### 2.1 世界钠冷快堆发展

1966年，美国原子能委员会主席I. J. Seaborg在《快堆工艺：核电厂设计》一书的引言中写道：“快堆的重要性早在核能发展的初期就了解了，1944年春，Fermi和Zinn就已经讨论建造快中子增殖堆的可能性了……”。

从1946年美国建成世界上第一座快堆Clementine开始，到现在全世界共建成了24座快堆。在早期个别实验快堆曾经用过Hg和NaK冷却剂，其他快堆全为液态钠冷却剂(见表1)。

在快堆的发展初期，一些国家设计并建造了

表1 国外快堆发展概况

国家和快堆	功率(热/电)/MW	堆型	冷却剂	燃料	运行时间	类别 <sup>a</sup>
美国						
Clementine	0.025/0	回路型	Hg	Pu	1946—1952年	E
EBR-I	1.2/0.2	回路型	NaK	U合金	1951—1963年	E
LAMPRE	1.0/0	回路型	Na	熔Pu	1961—1965年	E
FERMI <sup>2</sup>	200/66	回路型	Na	U合金	1963—1975年	E
EBR-II	62.5/20	池型	Na	U合金(U,Pu,Zr)	1963—1998年	E
SEFOR	20/0	回路型	Na	UO <sub>2</sub>	1969—1972年	E
FFTF	400/0	回路型	Na	(Pu,U)O <sub>2</sub>	1980—1996年	E
CRBR	975/380	回路型	Na	(Pu,U)O <sub>2</sub>		P
ALMR	840/303	池型	Na	(U,Pu,Zr)(Pu,U)O <sub>2</sub>		C
SAFR	873/350	池型	Na	(U,Pu,Zr)		D
法国						
Rapsodie	20—40/0	回路型	Na	(Pu,U)O <sub>2</sub>	1967—1983年	E
Phenix	653/254	池型	Na	(Pu,U)O <sub>2</sub>	1973—2010年	P
SPX-1	3000/1242	池型	Na	(Pu,U)O <sub>2</sub>	1985—1998年	D
EFR	3600/1500	池型	Na	(Pu,U)O <sub>2</sub>		C
德国						
KNK-II	60/21.4	回路型	Na	(Pu,U)O <sub>2</sub>	1977—1991年	E
SNR-300	770/327	回路型	Na	(Pu,U)O <sub>2</sub>	(1994) <sup>3</sup>	P
SNR-2	3420/1497	回路型	Na	(Pu,U)O <sub>2</sub>		D
印度						
FBTR	42/12.5—15	回路型	Na	(Pu,U)C	1985—	E
PFBR	1250/500	池型	Na	(Pu,U)O <sub>2</sub>	2014—	P

国家和快堆	功率(热/电)/MW	堆型	冷却剂	燃料	运行时间	类别 <sup>*1</sup>
日本						
JOYO	100—140/0	回路型	Na	(Pu,U)O <sub>2</sub>	1977—	E
MONJU	714/318	回路型	Na	(Pu,U)O <sub>2</sub>	1994— <sup>*4</sup>	P
DFBR	1600/660	双池	Na	(Pu,U)O <sub>2</sub>		D
CFBR	3250/1300	池型	Na	(Pu,U)O <sub>2</sub>		C
英国						
DFR	60/15	回路型	NaK	U合金	1959—1977年	E
PFR	600/270	池型	Na	(Pu,U)O <sub>2</sub>	1974—1994年	P
CDFR	3800/1500	池型	Na	(Pu,U)O <sub>2</sub>		D
意大利						
PEC	123/0	回路型	Na	(Pu,U)O <sub>2</sub>		E
俄罗斯						
BR-2	0.1/0	回路型	Hg	Pu	1956—1957年	E
BR-5/10	5—10/0	回路型	Na	Pu,PuO <sub>2</sub>	1958—2003年	E
BOR-60	60—12	回路型	Na	(Pu,U)O <sub>2</sub>	1969—	E
BN-350	700/130	回路型	Na	UO <sub>2</sub>	1972—1999年	P
BN-600	1470/600	池型	Na	UO <sub>2</sub>	1980—	P
BN-800	2000—800	池型	Na	(Pu,U)O <sub>2</sub>	2014—	C
BMN-170	425/170	池型	Na	(Pu,U)O <sub>2</sub>		C
BN1600	4200/1600	池型	Na	(Pu,U)O <sub>2</sub>		C
BN1800	4500/1800	池型	Na	(Pu,U)O <sub>2</sub>		C
韩国						
KALIMER	392/162	池型	Na	(U,Pu,Zr)		P

\*1 E为实验堆，P为原型堆，D为示范堆，C为商用堆；

\*2 FERMI原作为原型堆设计；

\*3 SNR-300已建成，因地方政府反核而未装料，已拆除；

\*4 MONJU1995年二回路钠泄漏，停堆已近20年，正在重启。

一批小型实验快堆来验证各种科学概念，如验证快中子堆的可运行性(Clementine, BR-2, LAMPRE, EBR-I等)，验证快堆的可增殖性(EBR-I, LAMPRE, BR-5等)，验证安全性(如SEFOR等)，验证电站运行性(EBR-I, EBR-II, FERMI, DFR, BOR-60, KNK-II等)。

这一研究阶段快结束时已经到了20世纪70年代，当时发生了石油危机，工业化国家试图加快快堆的商用化进程，因此设计了一些商用快堆。功率规模均为1000 MW电功率左右。已经建成一批验证性实验快堆，其电功率都在66 MW以下，如无相近的技术选择，要以此为基础一步跨越到商用规模，技术经济风险太大。因此选择

了功率规模为250—600 MW电功率的原型快堆作为过渡。各国已经建成的原型快堆有俄罗斯(前苏联)的BN350, BN600, 法国的凤凰快堆，英国的PFR和日本的MONJU等。

在验证了快堆可作为核电站运行后，快堆商用的关键在于经济性，而运行经济性很大程度取决于设备和系统的可靠性以及耐高燃耗的燃料和耐高温及辐照的材料，因此也建成过一些不带发电系统的、专用于燃料和材料辐照考验的实验堆，如法国的狂想曲Rapsodie，日本的长阳快堆JOYO，美国的FFTF快堆等。当然，在以验证发电为主要目的的实验堆上以及原型堆上也可进行燃料和材料的考验，不会对这些堆的负荷因子产

生大的影响。

进入21世纪以来,各国没有放慢快堆研发的步伐,包括法国、俄罗斯、印度、中国、韩国、日本在内的各个快堆研发国家均已经开展了商用示范快堆的设计乃至建造工作。俄罗斯在别洛亚尔斯克建造的商用示范快堆BN-800已于2015年12月并网,如图3所示。

综上所述,各国发展钠冷快堆工程的共同经验是:分步建造实验快堆、原型快堆和商用快堆。而商用快堆的首座,一般其经济性尚不能与已有核电装置竞争,称为经济验证性电站,也称示范电站。

目前全世界钠冷快堆的运行年数已经超过了430堆年(1个反应堆运行1年等于1堆年),钠冷快堆的技术成熟性很大程度上得到了工程验证。世界上已经建成的功率最大的钠冷快堆是由法国等国家设计,建造于法国里昂附近的电功率为1200 MW



图3 俄罗斯的BN800钠冷快堆核电站

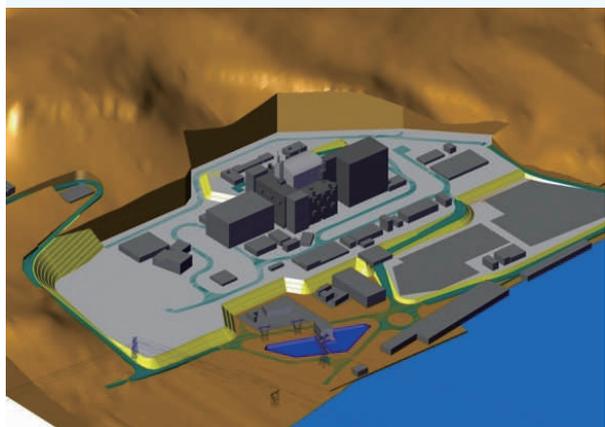


图4 法国的第四代钠冷快堆 ASTRID

的超凤凰堆。世界上运行记录最良好的是俄罗斯设计和建造的BN600快堆核电站,在成功运行30年后进行升级改造,又将延长运行至少10年。BN600钠冷快堆电站的平均负荷因子达到了74%,其电价在厂址所在地斯维尔德洛夫斯克比煤价还要便宜。

## 2.2 第四代核能系统的首选堆型

本世纪以来,由于世界范围内的能源和资源紧缺程度日趋严重,温室气体效应等相关环境问题日益突出,因此寻求可持续、稳定并且环境友好的能源发展形势问题受到各国关注。

2000年1月,美国能源部核能科技办公室召集9个国家的政府代表在华盛顿召开了一个研讨会,共同探讨如何加强国际合作,开发新一代核反应堆。这次会议形成了“第四代核能国际论坛GIF”政策组(PG)的雏形,会议决定各国选定高级专家组成专家组,以探索合作方向,推进和评定研发工作。最终于2001年7月正式签署了GIF宪章(GIF charter)。2002年底,发布了技术路线图(technical roadmap),并提出了几乎为所有核能国家所接受的6种堆型,其中有3种是钠冷快堆、铅冷快堆和气冷快堆,另3种是超高温堆、超临界水堆和熔盐堆。上述6种堆型中,只有钠冷快堆在工程技术上最为成熟,因而称为首选堆型。

中国于2006年签署了GIF宪章,2008年3月,“第四代核能系统和开发国际合作框架协议”对我国正式生效。截止到2015年底,参与GIF钠冷快堆系统研发的国家(机构)有7个,分别是:美国、法国、日本、韩国、欧盟、俄罗斯和中国。2009年3月,我国正式加入钠冷快堆系统协议,目前中国已正式加入系统整合与评价项目(SIA)、安全与运行项目(SO)、先进燃料项目(AF)等项目研发协议,并在其中开展了大量的合作研究,取得了良好的交流成果。

## 2.3 中国钠冷快堆发展

中国在20世纪60年代中期就开始了钠冷快

堆技术的研究，先后完成了基础技术研究、应用技术研究和实验快堆工程技术研究三个阶段。

基础技术研究阶段主要指上世纪1965年到1987年左右。该阶段主要致力于基本理论研究，快堆发展规划研究，技术路线选择研究，开发了与堆芯相关的主要计算机软件。同时建设了一批小型实验室，开始了一些有关快堆技术的基础研究，包括快堆中子学、热工流体、钠技术、燃料、材料、小型钠设备和仪表等。为了研究快中子技术，国家领导人亲自批准核材料用于快堆零功率装置的建设。该装置被称为“东风VI号”，于1970年6月29日达到首次临界(临界指链式裂变反应达到平衡，中子的产生率与消失率相等的状态，是反应堆的物理学设计成功的标志)，实现了我国快堆发展零的突破。此后科研人员将该装置连续运行了15年，获得一批科研成果。

应用技术研究阶段主要指1987到1992年左右。该阶段恰逢国家高技术研究发展计划(简称“八六三”计划)的实施，钠冷快堆发展被纳入了“八六三”计划，获得专款建设了一批实验设施，包括综合实验设施、钠工艺实验台架、热工和安全试验设施、部件考验设施等。1992年，由邹家华副总理亲自命名中核集团公司中国原子能研究院的“中国快堆研究中心”，在此阶段通过组织论证，提出了热功率65 MW、电功率20 MW的工程目标，组织多个研发单位，开展了9个课题共61个子课题的预先研究工作。

工程技术验证阶段主要指1992年到2011年左右，该阶段以65 MW<sub>th</sub>研究性快堆为建设目标，组织大量技术力量，并与俄罗斯等国开展国际合作，于2010年完成了我国第一座钠冷快堆——中国实验快堆(China Experimental Fast Reactor, CEFR)的建成并达到首次临界，2011年实现了40%功率并网发电24小时的既定工程目标。后在完成数十项功率阶段试验研究后，于2014年底实现了100%功率运行72小时的工程设计目标。

目前，在建成CEFR的基础上，我国已经开始了示范快堆技术的研发工作。



图5 中国快中子零功率装置



图6 中国实验快堆效果图

### 3 钠冷快堆的安全特性

#### 3.1 钠的本征安全性

金属钠在热物性上的优点主要表现在：熔点低，易于熔解使用；沸点高，不易沸腾产生钠气泡；密度低于水，节省泵功率等。此外，更重要的是，在反应堆运行情况下，钠的热导率要比水高百倍以上(见表2)，从而保证堆芯和燃料不易过

表2 冷却剂物性表<sup>[3]</sup>

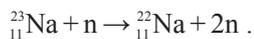
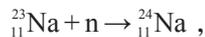
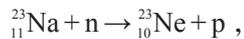
物性	Na	NaK	Hg	Pb	Pb-Bi	He	H <sub>2</sub> O	H <sub>2</sub> O
	450 ℃	450 ℃	450 ℃	450 ℃	450 ℃	450 ℃/6 MPa	280 ℃/6.4 MPa	342.16 ℃/15 MPa
熔点/℃	98	-12.6	-38.9	327.6	208.2			
沸点/℃	883	784	356.7	1743	1638			
密度/(kg/m <sup>3</sup> )	844	759	12510	10520	10150	3.955	610.7	758.0
热容/(kJ/(kgK))	1.272	0.873	0.13	0.147	0.146	5.193	8.95	5.29
热导率/(W/mK)	71.2	26	13	17.1	14.2	0.2893	0.456	0.5777
运动粘度/(×10 <sup>-7</sup> m <sup>2</sup> /s)	3.0	2.4	0.60	1.9	1.4	357.9	1.14	1.239
热胀系数 <sup>[3]</sup> /(×10 <sup>-4</sup> /K)	2.4	2.77					25.79 (6 MPa)	72.1

热。例如在一回路冷却系统失电事故发生时，冷却剂钠的高热导率将使堆芯事故导致的剩余发热快速地导出，避免堆芯的过热。尤其是在池式钠冷快堆中的一回路有大量的金属钠，在事故发生的早期，将成为最初的热阱，接收从堆芯导出的剩余发热，十分有助于事故状态的缓解。CEFR的一回路钠池中有260吨钠，一般大功率商用池式钠冷快堆的一回路中甚至有上千吨钠，堆芯有很大的热惰性，这对事故瞬变具有很强的适应能力。

同时，钠冷快堆一般几乎是在常压下运行，这给反应堆和一回路系统的安全设计带来很大的固有优势。

### 3.2 钠的核性能

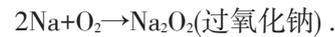
钠的核子数为23，相对于水来讲，对中子的慢化能力弱，吸收截面小，因此钠作为冷却剂导致的快中子损失不多。钠与中子将会产生如下所示的三种核反应：



产生的 ${}_{10}^{23}\text{Ne}$ ， ${}_{11}^{24}\text{Na}$ 和 ${}_{11}^{22}\text{Na}$ 的半衰期分别是38 s，15 h和2.6 a(年)，衰变速度快，易于被屏蔽，而且对保持环境的可持续发展有利。

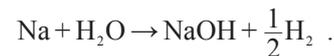
### 3.3 钠的化学活性

钠是活泼的金属，其燃烧反应如下：



以池式形式燃烧的钠的燃点大约在250 ℃以上，而喷雾或微粒状的钠在低于120 ℃就会爆燃<sup>[4]</sup>。由于在快堆中所有钠系统外围都设置了保温层，因此几乎不可能造成喷雾爆燃，但设计中仍考虑了一旦发生此类情况时采用泄压保护措施。对于钠的泄漏事故则采用铺设于钠系统下方的非能量的钠接收盘，以保证泄漏钠的约93%不会燃烧。

钠接触水则发生钠水反应：



钠冷快堆二回路的钠在蒸汽发生器的传热管外流动，将热量传递给传热管中的水/蒸汽，使之产生过热蒸汽而进入汽轮机发电。蒸汽发生器中的传热管如有泄漏，水/蒸汽进入钠中将会发生钠水反应。微漏时首先探测到的是产生的H<sub>2</sub>，CEFR采用极为灵敏的氢计探测器，灵敏度高达0.005 ppm，在确认是钠水反应的情况下，则将反应堆停堆以检查维修。如水/蒸汽泄漏量较大，钠中可测出气泡噪声、钠流量以及压力的变化，这将导致专门的蒸汽发生器事故保护系统投入工作，以隔离蒸汽发生器中的水和二回路的钠，并将反应堆停堆。因二回路钠几乎无放射性，故与二回路泄漏产生的钠火一样都属于工业事故，不会造成放射性物质释放。

## 4 钠冷快堆的安全设计

根据国际原子能机构(IAEA)发布的核动力厂

安全规定和我国核安全法规，为了保证安全，要求在各种运行状态下、在发生设计基准事故期间和之后，以及在设计扩展工况下，都要执行下列基本安全功能：

- (1)控制反应性(包括停堆)；
- (2)排出堆芯余热和所贮存燃料的热量；
- (3)包容放射性物质和控制运行排放，以及限制事故状态下的放射性物质释放。

CEFR 已按上述原则进行了设计。

#### 4.1 CEFR 的反应性控制

CEFR 有两套停堆系统，第一停堆系统由两根调节棒和三根补偿棒组成，第二停堆系统由三根安全棒组成。CEFR 热功率为 65 MW<sub>th</sub>，其温度、功率以及钠空泡的反应性效应均为负值(见表 3)，具有固有的安全特征，对反应堆的安全运行十分有利。

表 3 CEFR 设计的固有安全特征

反应性效应	设计值/pcm	测量值/pcm
温度反应性效应(250—360 ℃)	-457	-465
功率反应性效应(360 ℃, 0—100%功率)	-485	-468
钠空泡反应性效应(燃料区)	-3644	-3159

#### 4.2 CEFR 的事故余热导出

CEFR 的堆芯余热在正常情况下通过主热传输系统导出，在主热传输系统失效的情况下，利用非能动余热排出系统导出(见图 8)。

CEFR 主要放射性物质出自核燃料芯块中，防御放射性物质进入环境的层次分别为：元件包壳，一回路钠及其覆盖气体，反应堆主容器及顶盖，旋塞，反应堆的保护容器及堆顶防护罩，以及反应堆大厅的防泄漏功能等。

CEFR 遵循纵深防御的概念保证放射性物质尽可能低地向环境泄漏。

CEFR 核安全设计参考了压水堆和部分国外快堆的经验反馈，设计中对正常运行和预计运行事件以及设计基准事故(DBA)和超设计基准事故



图 7 CEFR 反应堆大厅

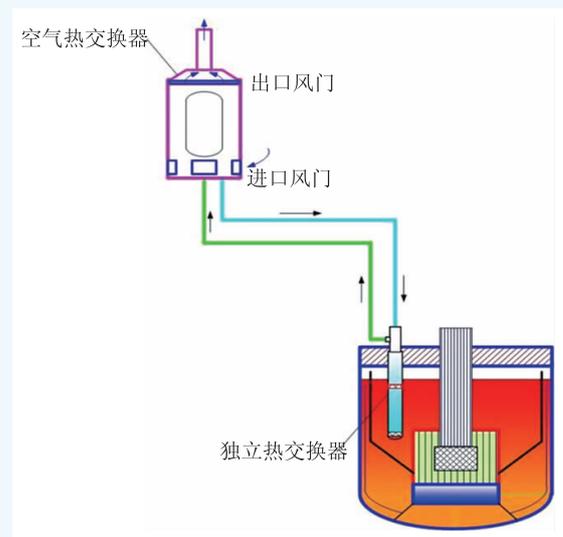


图 8 CEFR 非能动余热排出原理图

(DBDA)都进行了分析计算，获得了CEFR堆厂址边界 153 m 处居民所受最大有效剂量当量(见表 4)，结果低于 GB6249-2011 规定的限值。

表 4 CEFR 堆厂址边界 153 m 处居民个人最大有效剂量当量

运行工况	CEFR	GB6249-2011
正常运行	0.05 mSv/a	0.25 mSv/a
设计基准事故	0.5 mSv/2h	5—100 mSv/2h
超设计基准事故	5 mSv/2h	250 mSv/2h

#### 4.3 关于堆芯熔化

在新版核动力厂设计安全规定中，在设计基准事故之后为设计扩展工况(原称超设计基准事

Connecting Global Competence Messe München

## SOLUTIONS IN LIGHT

扫一扫，加微信！

四大展区：激光器与光电子  
激光生产与加工技术  
光学与光学制造  
成像，检测和质量控制

展位预定，先到先得！☎+86-21-20205500\*887

www.world-of-photonics-china.com.cn  
www.world-of-photonics-china.com

2017年3月14-16日  
上海新国际博览中心N1、N2、N3、N4馆  
中国光电行业完美展示平台

**慕尼黑上海光博会**  
**LASER** World of **PHOTONICS CHINA**

故)，包括堆芯熔化事故。

针对CEFR的一级概率安全分析表明，导致堆芯融化的概率为 $1.04 \times 10^{-7}$ 。同时，CEFR也充分考虑了堆芯熔化事故的安全措施，在堆芯下方装配有堆芯熔融收集器，即使在发生堆芯熔化事故时，通过钠的自然对流也可冷却堆芯的熔融体使之凝固，防止其对堆容器的威胁，因此放射性物质将仅仅收集于钠池中。

此外，由于反应堆运行时钠的平均温度约为 $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，而钠的沸点是 $883\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，钠温离沸点还有 $433\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的裕量，且因钠的导热能力强( $71.2\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ )，与熔融物接触的钠尚未达到沸点，热量就传递到钠池中，故熔融物在钠中不会发生钠蒸汽爆炸的问题。

## 5 结束语

正如美国的Enrico Fermi先生在20世纪40年代就预言的：首先发展增殖堆的国家将在原子能事业中得到巨大的竞争利益。掌握快堆技术的国家将可能永远解决能源问题。快堆的发展必将在未来核能可持续发展中占据重要的地位。

数十年快堆的发展证明了钠冷快堆具有很好的固有安全性，在6种第四代堆型中，它是已经具有建造和运行经验最多的堆型。

我国已经建成了第一座钠冷快堆CEFR，并通过设计和建造CEFR，掌握了钠冷快堆的关键技术，验证了原理和安全性，这将为我国后续快堆的发展奠定十分重要的技术基础。

## 参考文献

- [1] Fast Reactors, Report of INFCE Working Group 5, IAEA, 1980, 176
- [2] GIF Symposium Proceedings, 2012 ANNUAL REPORT, [https://www.gen-4.org/gif/jcms/c\\_9334/origins](https://www.gen-4.org/gif/jcms/c_9334/origins)
- [3] И.А.基里洛夫(俄罗斯)主编,吴兴曼、郑颖、张玲等译.核工程用材料的热物理性质(第二版).北京:中国原子能出版传媒有限公司,2011年10月.第52,74页
- [4] Status of liquid metal cooled fast reactor technology, IAEA-TECDOC-1083, April 1999, P.201