

# 国外快堆要闻简报

—独立、全面、客观



主 办 快堆产业化技术创新战略联盟

## 目 录

### 重点关注

#### 重点快堆技术季度进展情况

钠冷快堆.....	1
◆ 美国微堆电热原型装置投运.....	1
◆ 俄罗斯BN-1200反应堆建设项目的前期工作已完成.....	1
◆ 美国泰拉能源推迟提交钠冷快堆建设许可证申请.....	1
◆ 日本常阳实验快堆获准启动.....	2
◆ 俄罗斯BN-600钠冷快堆延寿项目进入最后阶段.....	2
◆ 三菱重工将负责日本快堆开发.....	2
其他快堆.....	3
◆ Aurora有望成为美军事基地建设的首座固定式微堆.....	3
◆ 俄罗斯Brest反应堆建造现场的混凝土制备设施投运.....	3
快堆燃料循环.....	4
◆ 俄罗斯开始为VVER机组测试MOX燃料.....	4
快堆技术文献.....	4
◆ 荷兰快堆热工水力先锋计划系统分析程序SPECTRA.....	4
快堆专利情况.....	7
◆ 以液态熔融锂作为二回路冷却剂的下一代核反应堆设计 ....	7

## 重点关注

- **俄罗斯BN-1200反应堆建设项目的前期工作已完成**，俄罗斯国家原子能公司计划2024年启动BN-1200结构设计工作，2025年开始公众咨询和环境评估，2027年获得建设许可证，2035年完成反应堆建设。
- **日本常阳实验快堆获准重启**，日本原子能研究开发机构计划在2025年3月重启该堆。日本政府已将快堆视为核工业未来发展的重点之一，计划于21世纪40年代建设一座示范堆。
- **Aurora有望成为美军事基地建设的首座固定式微堆**，美国国防后勤局能源处已选择奥克洛公司作为在位于阿拉斯加州艾尔森空军基地建设一座微型快堆Aurora电厂的候选承包商。Aurora单堆容量为1500千瓦，利用热管将热量从堆芯传导至超临界二氧化碳动力转换系统，使用高丰度低浓铀金属燃料。

## 重点快堆技术季度进展情况

快堆技术	设计机构	技术状态	用途	反应堆净功率 (MWe)	燃料	最新动态
TWR-P	美国 TerraPower	设计	商用	600	铀-钆	无
FBR-1 & 2	印度 IGCAR	设计	商用	500	MOX	无
JSFR	日本 JAEA	设计	商用	750	MOX	无
BN-1200	俄罗斯 Afrikantov OKBM	可建设	商用	1140	氮化物或 MOX	无
PRISM	美国 GE-Hitachi	设计	商用	311	铀-钐-钆	无
4S	日本 Toshiba	设计	商用	10	铀-钆	无
PGSFR	韩国 KAERI	概念设计	示范	-	铀-钆和铀-TRU-钆	无
MBIR	俄罗斯 NIKIET	建造	实验	60	MOX	穹顶开始组装
ASTRID	法国 CEA	设计	示范	600	MOX	无

## >>>钠冷快堆<<<

### ◆ 美国微堆电热原型装置投运

美国能源部（DOE）近日宣布，“微型反应堆应用、研究、验证与评估”（MARVEL）项目“一回路冷却剂测试台”（PCAT）已投运。

PCAT是爱达荷国家实验室（INL）在MARVEL项目下制造的一个全尺寸、电加热原型装置，高3.6米（12英尺），重900千克（2000磅），依靠外部供电加热，由多件不锈钢设备组成，包括4台斯特林电机。

MARVEL项目的目标是2024年底前在爱达荷建成一座以钠和钾为冷却剂，电功率为100千瓦的微堆，测试微堆的各种应用（包括发电、海水淡化、区域供暖等），帮助制订微堆监管取证程序，评价远程遥控系统以及开发自动控制技术。

（国际核工程）

### ◆ 俄罗斯BN-1200反应堆建设项目的前期工作已完成

俄罗斯别洛雅尔斯基（Beloyarsk）核电厂拟建BN-1200反

应堆项目（即别洛雅尔斯基5号机组）的前期工作已完成，包括工程、地质、环境、水文气象和岩土测量等，相关调查报告正在编制中。后续将对报告进行分析，并纳入投资可行性研究，以确定该厂址是否适合建设BN-1200反应堆。

目前，该电厂有两台机组在运，分别是采用BN-600快堆设计的3号机组和采用BN-800快堆设计的4号机组，两台机组总装机容量1485 MWe。

俄罗斯国家原子能公司（Rosatom）计划2024年启动BN-1200结构设计工作，2025年开始公众咨询和环境评估，2027年获得建设许可证，2035年完成反应堆建设。

（中国能源研究会核能专委会）

### ◆ 美国泰拉能源推迟提交钠冷快堆建设许可证申请

2023年8月10日，美国泰拉能源公司（Terra Power）表示，公司将于2024年3月提交怀俄明州凯默勒市（Kemmerer）的Natrium钠冷快堆项目建设许可证申请，较先前计划的2023年8月有所推迟。泰拉

能源称，这一变动对Natrium钠冷快堆示范项目的整体时间表无影响。该公司曾称受高丰度低浓铀（HALEU）供应链问题影响，钠冷快堆项目整体推迟两年。

按计划，泰拉能源首座钠冷快堆单机容量345 MWe，拟于2030年前投运。

（中国能源研究会核能专委会）

#### ◆ 日本常阳实验快堆获准重启

2023年7月26日，日本原子力规制委员会(NRA)批准常阳实验快堆重启。日本实验性快堆“常阳”位于茨城县大洗町，1977年投运，因故障从2007年开始进入停堆状态。

日本原子能研究开发机构(JAEA)于2017年向规制委提交重启申请，计划在2025年3月重启该堆。日本政府已将快堆视为核工业未来发展的重点之一，计划于21世纪40年代建设一座示范堆。

（日本三菱重工公司）

#### ◆ 俄罗斯BN-600钠冷快堆延寿项目进入最后阶段

俄罗斯别洛雅尔斯基（Beloyarsk）核电站3号机组延寿

项目最后阶段工作将在2023年8月启动。该机组采用BN-600钠冷快堆设计，于1980年投运，是全球首座商用钠冷快堆。

延寿项目包括更换蒸汽发生器的蒸发模块和给水泵。此外，还将对反应堆、汽轮机、电气车间、自动化和测量车间以及消防安全部门的设备进行检查，以确定是否影响延寿。

别洛雅尔斯基核电厂表示，目前3号机组已经符合现代化的安全要求，在2010~2020年进行的延寿项目中进行了众多可靠性升级，包括供电系统、柴油发电机组升级改造，更换循环导管等。延寿后，该机组可运行至2040年。

（中国能源研究会核能专委会）

#### ◆ 三菱重工将负责日本快堆开发

日本政府近日选定三菱重工公司（MHI），负责领导日本示范钠冷快堆概念设计。该反应堆将于本世纪40年代投入运行。三菱重工将与三菱快堆系统公司（MFBR）合作，监督反应堆的概念设计和研发。三菱快堆系统公司是三菱重工集团

的一家工程公司，成立于2007年，负责快堆的开发和设计。该快堆的概念设计工作计划于2024财年启动。

日本内阁2022年12月对《2018年快堆发展战略路线图》进行修订，并作出两项决定：首先，选择钠冷快堆作为示范反应堆概念设计的目标，计划2024财年启动设计；其次，选择一家制造商作为核心公司，负责快堆的设计和必要的研发工作，并根据政府制定的目标和政策方向进行技术开发。

(日本三菱重工公司)

## >>>其他快堆<<<

### ◆ Aurora有望成为美军事基地建设的首座固定式微堆

美国奥克洛公司 (Oklo) 2023年8月31日宣布，国防后勤局能源处 (DLA Energy) 已选择该公司作为在位于阿拉斯加州艾尔森空军基地建设一座微型快堆Aurora电厂的候选承包商。如果获得合同，Aurora将成为在美军事基地建设的首座固定式微堆。

目前，美国军事基地几乎完全依赖外部电网供电，可能因各种威

胁造成长时间供电中断。美国空军2021年10月宣布，决定在艾尔森空军基地建设一座固定式微型反应堆，并将该项目作为在国内军事基地部署微堆的试点项目。艾尔森基地拟于2027年建成一座装机容量1000千瓦至5000千瓦的固定式微堆，以满足该基地的能源需求。Aurora单堆容量为1500千瓦，利用热管将热量从堆芯传导至超临界二氧化碳动力转换系统，使用高丰度低浓铀金属燃料。

(美国核学会)

### ◆ 俄罗斯Brest反应堆建造现场的混凝土制备设施投运

位于 Seversk 的 Siberian Chemical Combine(SCC) 的 Brest-OD-300反应堆建造现场的混凝土制备设施已开始运营。该设施每小时可生产多达130立方米的混凝土。Brest快中子反应堆是试点示范电力综合体(ODEK)设施的一部分，SCC自2011年以来一直负责实施该设施，作为旨在展示闭式燃料循环技术的"突破"(Proryv)项目的一部分。

ODEK还将包括一个用于制造和再制造核燃料的模块，以及一个用于后处理辐照燃料的模块。燃料制造模块几乎已经完成。Brest反应堆的建设始于2021年，它将是世界上第一个使用液态铅作为冷却剂的反应堆。2022年9月，Brest反应堆和反应堆钢板基座已交付至现场。

Brest的建设需要特制的耐热混凝土。这种混凝土将用于填充金属环锥体墙壁之间的空间，这些金属环锥体将支撑反应堆安全壳的第一层。

(小堆观察)

## >>>快堆燃料循环<<<

### ◆ 俄罗斯开始为VVER机组测试MOX燃料

近日，俄罗斯国家原子能公司（Rosatom）正在俄罗斯反应堆研究所（NIAR）的研究堆中测试计划用于VVER机组的铀钚混合氧化物燃料（MOX）元件，以证明该燃料的运行效率和安全性能。

目前，俄罗斯只为快堆生产MOX燃料，包括别洛雅尔斯基（Beloyarsk）核电厂的BN-800机

组。针对VVER机组，Rosatom已为VVER-1000机组开发了铀-钚再生混合物（REMIX）燃料。

REMIX燃料是俄罗斯为轻水堆开发的一种创新型核燃料，由经过后处理的铀和钚混合物制成，并添加了浓缩铀，混合燃料中钚含量为1.5%。而MOX燃料则是由乏燃料中分离出来的钚氧化物和贫铀氧化物制成。VVER机组使用的MOX燃料中钚含量约5.5~7.5%。

俄罗斯TVEL核燃料公司高级副总裁Alexander Ugryumov表示，目前，VVER机组仍使用浓缩铀作燃料，少数情况下使用回收铀。未来，在确定市场偏好后，公司将根据堆型和燃料循环策略的要求，提供多种核燃料供应方案。

(国际核工程)

## >>>快堆技术文献<<<

### ◆ 荷兰快堆热工水力先锋计划系统分析程序SPECTRA

作者：F. Roelofs

作者所属机构：核能研究与咨询院，荷兰

关注的领域或重点：快堆、热工水力、系统分析

由核能研究与咨询院（NRG）开展并由荷兰经济事务和气候部资助多年的研究计划被称为“核基础设施和研究创新和能力发展计划”（先锋，PIONEER）。该计划包括七个主题，即核电厂长期运行、建模与仿真、核安全、燃料与材料、放射性废物管理、辐射防护和创新核系统。创新核系统主题的支柱之一是快堆研究，特别是在热工水力领域。本论文概述了该计划中的快堆热工水力研究的系统尺度热工水力SPECTRA开发和验证。

NRG开发了自主知识产权的系统热工水力程序SPECTRA，最初用于水冷反应堆，后续开发并加入新型反应堆模型。程序适用于事故分析工况，如运行瞬态、冷却剂丧失事故（LOCA）、失流事故（LOFA）和其他事故工况。简而言之，数学物理模型包括多维两相流、非平衡态热力学计算、固体结构中的瞬态热传导以及蒸汽/水/不凝性气体的传热和传质，

对流、冷凝和沸腾换热等。目前，可以使用点堆动力学模型和节块法中子物理计算模型，并使用同位素转换模型来计算反应堆内重要同位素的浓度。程序中的放射性粒子输运模型可捕获放射性裂变产物的释放，气溶胶输运、沉积和再悬浮过程。

SPECTRA程序具备良好的扩展性，除应用于液态金属反应堆如钠冷快堆、铅铋快堆以外，还可适用于高温堆和熔盐堆。对于液态金属反应堆的应用，液态金属物性和传热关系式的灵活输入和变更是一个特别重要的特征，因为与成熟的水和空气物性相比，对液态金属的物性和关系式的理解仍在不断更新中。在SPECTRA程序中，通过提供用户输入表格的选项来实现物性的输入，该输入取代了标准的水和空气物性和关联式，为用户提供了充分的灵活性，不仅可以使最新物性和关联式，还可以使用过去物性和关联式的历史数据。

自2010年以来，NRG工程师使用SPECTRA程序对越来越多的

液态金属反应堆进行了分析。当应用新模型时，都会对所采用的模型进行彻底的验证。此外，还会进行程序与程序之间的对比，并使用实验数据和真实反应堆数

据作为液态金属反应堆程序验证的手段。

表1概述了使用SPECTRA程序对液态金属反应堆进行的模拟。

表 1 SPECTRA程序在液态金属反应堆及试验装置的应用

反应堆或试验设施	冷却剂工质	验证方式	验证工况	年份
ESFR	钠冷快堆	程序与程序对比验证	无保护的失流事故；超功率瞬态	2014
EBR-II	钠冷快堆	反应堆数据	无保护的失流事故	2017
ASTRID	钠冷快堆	程序与程序对比验证	无保护的失流事故	2018
Phenix	钠冷快堆	反应堆数据	失流事故	2019
FFTF	钠冷快堆	反应堆数据	无保护的失流事故	2023
ELSY	铅冷快堆	程序与程序对比验证	反应堆启停工况	2010
ALFRED	铅冷快堆	程序与程序对比验证	无保护的超功率瞬态	2013
SEALER-Arctic	铅冷快堆	程序与程序对比验证	无保护的超功率瞬态	2019
CIRCE	铅铋试验装置	试验验证	无保护的失流事故	2021
TALL-3D	铅铋试验装置	试验验证	失流事故	2022
ESCAPE	铅铋试验装置	试验验证	不对称运行；失流事故	2023

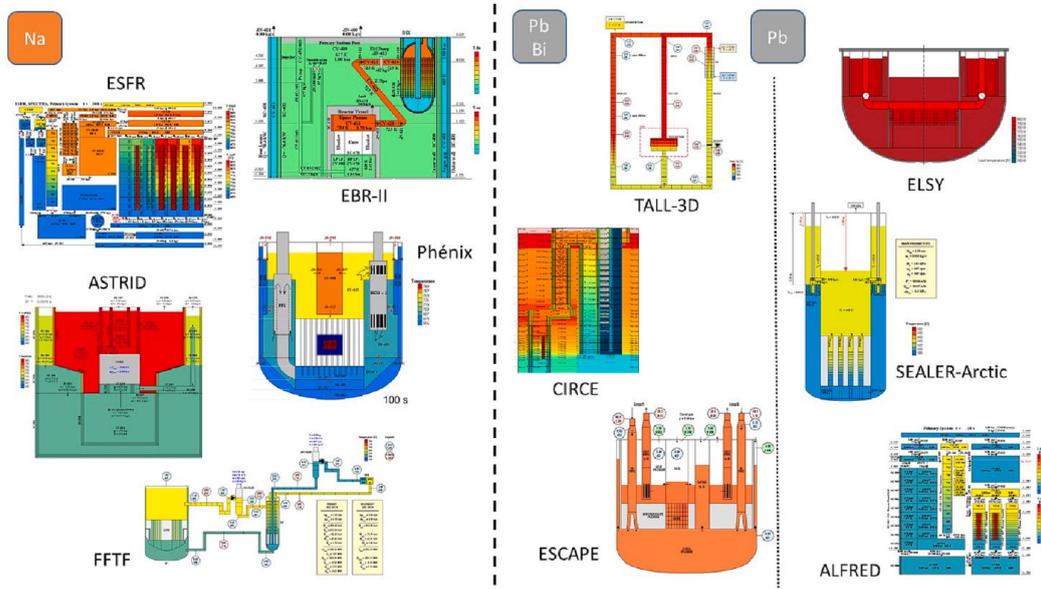


图 1 液态金属反应堆SPECTRA程序建模

综上，SPECTRA程序对钠冷快堆、铅冷快堆和铅铋快堆的系统尺度热工水力模拟，通过程序与程序、反应堆数据和试验数据的验证，证明SPECTRA的模拟精度均能满足设计和分析需求。此外，正在进行中的工作还包括计算流体力学方法在液态金属反应堆的应用，包括湍流流动和换热、堆芯局部和钠池等重要设备的热工水力分析，以弥补系统尺度SPECTRA程序的不足。

## >>>快堆专利情况<<<

### ◆ 以液态熔融锂作为二回路冷却剂的下一代核反应堆设计

专利号：US20230245791A1

关注的重点领域：锂冷快堆、核聚变

本发明将核聚变过程引入到传统的基于裂变的反应堆中。这是当前核反应堆设计的改进，而不是基于等离子体的聚变技术。特别是，反应堆中引入二回路冷却剂作为辅助燃料，从裂变堆芯吸收中子，并通过聚变反应释放二次能量。熔融锂被认为是本发明中的优选冷却剂，因为它通过中子-锂聚变产生氦气，

而不会对环境留下任何放射性或化学影响。

系统中还引入了氦压力控制器，用于管理使用辅助燃料的核聚变产生的氦气。压力控制器通过从反应堆腔室释放氦气或将氦气注入反应堆腔室来保持反应堆腔室与外部环境之间的气压平衡。

为了利用使二回路冷却剂达到更高的工作温度，使用氯化锂（LiCl）作为二回路冷却剂代替常用的熔盐，以实现二回路冷却剂达到更高的工作温度，从而提高发电效率。预计所设计的系统可以使反应堆发电效率超过50%。

本发明系统布置如下图所示。该反应堆可在650至1000摄氏度的温度范围内运行，并具有足够的安全裕度。它允许二回路冷却剂在高达1000摄氏度的温度下运行，这远远超出了钠冷快堆所能达到的水平。本发明所提出系统的反应堆比相同功率容量的传统反应堆占用更少的空间，适用于空间局限的反应堆应用中（例如在集装箱船上的海上浮动核电站）。

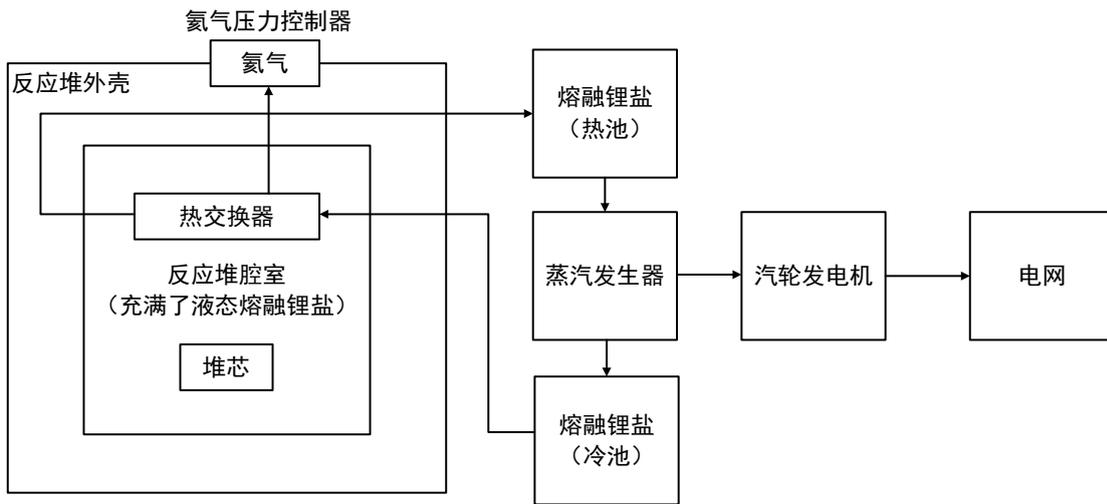


图2 本发明系统示意图