

大国碳中和之四代核电

解决核能利用痛点，向“终极能源”过渡

优于大市

核心观点

行业趋势：核能发展势头强劲，挑战与机遇并存，四代核电呼之欲出。截至2024年，我国在运和在建核电总量约1.13亿千瓦，规模升至世界第一，其中在建机组规模保持世界第一。目前我国核电发展以三代核电为主，受限于三代核电技术特性，在发展空间、应用场景等方面面临挑战。而四代核电是核能利用发展的下一阶段，针对三代核电面临的各种问题提出了新的堆型设计，也是可控核聚变实现之前向“终极能源”过渡的核能利用方式。

如何提高反应堆的安全性？——四代堆固有安全性。四代核电的一个重要特征是各种堆型设计具有固有安全性，即“从物理定律出发就可以理解的”，依靠系统本身设计和材料特性，不依赖外部保护装置，在正常工作和潜在异常情况下均能“确定地”保持安全的特性。

如何解决燃料问题？——快堆、钍基熔盐堆。三代核电属于热堆范畴，其主要燃料铀-235在自然界天然铀中的比重仅为0.7%左右。四代核电中的快堆则可充分利用天然铀中占比99.3%的铀-238作为反应原料，可以让天然铀的利用率从目前不到1%，提高到60%以上，大幅延长铀资源使用年限，缓解天然铀一次供给不足的问题。四代堆中的钍基熔盐堆则可以改用钍作为燃料，我国相对“富钍贫铀”，钍基熔盐堆可扬长避短，解决我国天然铀稀缺问题。

如何解决乏燃料问题？——快堆嬗变。压水堆会产生含有强放射性、长半衰期的乏燃料，目前对乏燃料的主流处理方式仍是掩埋和储存，无法完全解决乏燃料问题且成本高昂。快堆具有嬗变能力，是处理乏燃料的重要手段。快堆既可以利用压水堆中剩余的堆后铀等元素进行发电，还可以通过嬗变消耗掉乏燃料中的长寿命锕系元素，减少环境影响。

如何增加核电厂址？——四代堆结合小堆或可成为内陆核电放开的重要契机。四代核电的固有安全性使核电扩散性风险大幅降低，冷却水需求也可减少，也不存在极端情况需要引入大量外部冷却水淹没反应堆的准备。部分四代堆具有小型化自然循环设计，适用聚焦偏远地区供电，降低了厂址条件的限制，还可以利用煤电厂址进行“煤改核”。

如何增加核电的利用场景？——四代堆提高蒸汽参数。核电运行能量利用效率较低的一个重要因素是蒸汽参数较低导致能量损失大。从能量效率的角度来看，直接使用热能是更理想的能量利用方式，发电只是核能利用的其中一种形式。四代堆依靠较高的运行参数可以进行供汽、制氢、制氨等综合利用，拓展核能综合利用方式。

风险提示：相关政策不及预期；技术发展不及预期；核事故风险；舆情风险。

投资建议：核电发展加快，在电力系统中的作用凸显，成长空间和确定性较高。我国核电运营牌照具有稀缺性，建议关注目前唯二核电运营上市公司中国核电和中国广核，及筹划资产重组，注入国家电投集团旗下核电资产的电投产融。建议关注四代核电相关装备制造厂商。

重点公司盈利预测及投资评级

公司代码	公司名称	投资评级	收盘价(元)	总市值(亿元)	EPS		PE	
					2023A	2024E	2023A	2024E
601985.SH	中国核电	优于大市	9.98	1885	0.56	0.59	13.3	16.9
003816.SZ	中国广核	优于大市	3.76	1899	0.21	0.23	14.6	16.3
000958.SZ	电投产融	优于大市	5.94	320	0.24	0.25	16.7	23.8

资料来源：Wind、国信证券经济研究所预测

行业研究 · 行业专题

公用事业

优于大市 · 维持

证券分析师：黄秀杰

021-61761029

huangxiujie@guosen.com.cn

S0980521060002

证券分析师：刘汉轩

010-88005198

liuhanxuan@guosen.com.cn

S0980524120001

证券分析师：郑汉林

0755-81982169

zhenghanlin@guosen.com.cn

S0980522090003

联系人：崔佳诚

021-60375416

cncuijiacheng@guosen.com.cn

市场走势



资料来源：Wind、国信证券经济研究所整理

相关研究报告

《公用环保 2025 年 1 月投资策略-2024 年全国碳市场配额交易及清缴工作顺利结束，《加快工业领域清洁低碳氢能应用实施方案》发布》——2025-01-06

《公用环保 202412 第 5 期-广东省 2025 年电力市场年度交易结果出炉，华电国际拟 71.67 亿元收购多项火电资产》——2024-12-30

《公用事业与环保行业 2025 年投资策略-关注成本下行的火电、燃气及防御逻辑的水电、核电；同时关注资产整合标的》——2024-12-27

《公用环保 202412 第 4 期-1-11 月全社会用电量同比+7.1%，11 月工业及混合油（UCO）出口量创历史新高》——2024-12-22

《公用环保 202412 第 3 期-多省开展 2025 年电力市场交易工作，长江电力发布 2024 年中期分红规划》——2024-12-16

内容目录

核能发展势头强劲，挑战与机遇并存	5
我国核准机组数量创历史新高，核电成长确定性高	5
核能发展仍面临多重挑战	7
聚焦核能利用痛点，迭代核能新技术	12
如何提高反应堆的安全性？——四代堆固有安全性	15
如何解决燃料问题？——快堆、钍基熔盐堆	17
如何解决乏燃料问题？——快堆嬗变	19
如何增加核电厂址？——四代堆结合小堆或可成为内陆核电放开的重要契机	20
如何增加核电的利用场景？——四代堆提高运行参数	22
附录：四代堆技术特征介绍	27
快堆：钠冷快堆、铅冷快堆、气冷快堆	27
热堆：（超）高温气冷堆、超临界水堆、熔盐堆	33
投资建议	41
风险提示	41

图表目录

图 1: 我国历年核电装机容量变化情况 (MW)	5
图 2: 我国运行核电机组数量变化情况 (台)	5
图 3: 各国核电装机容量及核电发电量在全国发电量中的占比	6
图 4: 全国在运和在建核电站情况	7
图 5: “华龙一号”能动与非能动安全系统原理图	8
图 6: 全球天然铀产量和核电需求 (单位: tU)	8
图 7: STEPS 情境下各种电源发电量 (单位: TWh)	8
图 8: 天然铀长协 (红) 和现货 (蓝) 价格 (单位: $\$/\text{lbU}_3\text{O}_8$)	9
图 9: 全球勘探支出及美国核电业主进口天然铀价格	9
图 10: 核燃料循环及乏燃料处理的两种方式	9
图 11: 湿法贮存	10
图 12: 干法贮存	10
图 13: 核电站选址流程图	11
图 14: 田湾核电基地	12
图 15: 中国实验快堆	13
图 16: 华能石岛湾高温气冷堆核电站	14
图 17: 多普勒效应原理和示意图	16
图 18: 高温气冷堆耐高温全陶瓷包覆颗粒燃料球示意图	16
图 19: 快堆燃料转换示意图	17
图 20: 裂变产生的中子数与入射中子能量的变化曲线	18
图 21: 钍铀燃料循环原理示意图	19
图 22: 乏燃料处理路线	20
图 23: 美国核电场址分布情况	22
图 24: 2025-2060 年终端能源需求电能与氢能占比	23
图 25: 2019-2024 年中国氢气产量产量 (万吨)	24
图 26: 不同制氢方式及占比	24
图 27: 热化学硫碘循环水分解原理	24
图 28: 核能制氢不同工艺的成本范围	25
图 29: 合成氨在中国不同产业中的用量及预测	26
图 30: 2019-2024 年中国氢气产量产量 (万吨)	26
图 31: 中国合成氨行业市场规模, 2019-2027E	26
图 32: 绿氢制绿氨工艺流程图	27
图 33: 钠冷快堆系统示意图	28
图 34: 池式 (左) 和回路式 (右) 钠冷快堆结构示意图	30
图 35: 铅冷快堆系统示意图	30
图 36: Brest-OD-300 (上)、ELFR (左下) 和 SSTAR (右下) 结构设计	31
图 37: 铅基反应堆在核能中利用的建议路线图	32

图 38: 气冷快堆示意图	33
图 39: 二氧化碳气冷快堆参考设计示意图	33
图 40: 石岛湾高温气冷堆示范工程全貌	34
图 41: 高温气冷堆模块示意图	35
图 42: 高温气冷堆 TRISO 球形燃料元件	35
图 43: 高温气冷堆加料示意图	35
图 44: 高温气冷堆燃料元件循环利用	35
图 45: 超高温气冷堆系统示意图	36
图 46: 水的相图	36
图 47: 超临界水堆系统示意图	37
图 48: 中国 CSR1000 压力容器式超临界水堆堆芯示意图	37
图 49: 加拿大压力管式超临界水堆堆芯示意图	37
图 50: 我国 CSR1000 燃料组件示意图	38
图 51: 熔盐堆系统示意图	39
图 52: 全闭式钍铀燃料循环	39
图 53: 熔盐堆不同概念及主要参与者	40
图 54: MSFR(左)和 MOSART(右)示意图	40
表 1: 全国在运和在建核电站情况	6
表 2: GIF 第四代核电技术六种主流设计特征	15
表 3: 各种能源形式对比	23
表 4: 冷却剂物性表	28
表 5: 国外快堆发展情况	29
表 6: 燃料物性表	32

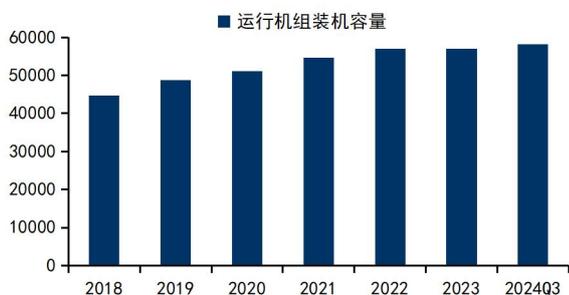
核能发展势头强劲，挑战与机遇并存

我国核准机组数量创历史新高，核电成长确定性高

核电是建设新能源体系的重要组成部分，我国大力支持核电发展。核能是低碳能源，全生命周期碳排放仅约 12 克/千瓦时，同时具有装机容量大，运行稳定可靠、换料周期长等特点，具备较强的频率和电压调节能力，能够为经济社会发展提供充足的电力保障。在高比例可再生能源、高比例电力电子设备的“双高”电力系统中，核电具有保障电力供应、支撑电力系统安全稳定运行、促进新能源消纳和实现“双碳”目标等方面具有重要作用¹。核电产业是我国支持发展的产业，《“十四五”现代能源体系规划》提出，在确保安全的前提下，积极有序推动沿海核电项目建设，保持平稳建设节奏，合理布局新增沿海核电项目。开展核能综合利用示范，积极推动高温气冷堆、快堆、模块化小型堆、海上浮动堆等先进堆型示范工程，推动核能在清洁供暖、工业供热、海水淡化等领域的综合利用。切实做好核电厂址资源保护。

我国核电行业发展全球领先，但核电发电量占比较低。截至 2025 年 1 月 6 日，我国商运核电机组数量达到 58 台，总装机 6096.7 万千瓦（含国和一号示范工程 1 号机组和漳州核电 1 号机组），位列全球第三；在运和在运核电总量约 1.13 亿千瓦，规模升至世界第一，其中在建机组规模保持世界第一；在建及已核准未开工机组合计 46 台，累计装机容量 5547 万千瓦。但我国核电发电量在全国发电量中的占比较低，2023 年仅占 4.86%，低于世界平均水平（近 10%²）。

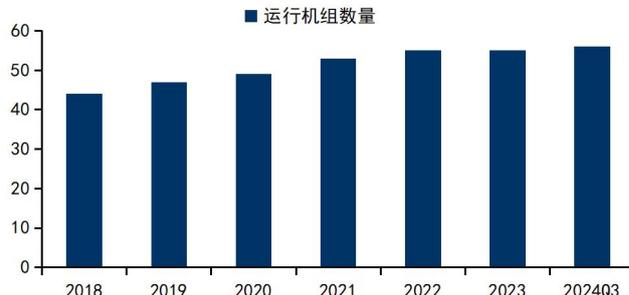
图1：我国历年核电装机容量变化情况（MW）



注：包括已并网但未投入商业运行的机组

资料来源：中国核能行业协会《全国核电运行情况》，国信证券经济研究所整理

图2：我国运行核电机组数量变化情况（台）



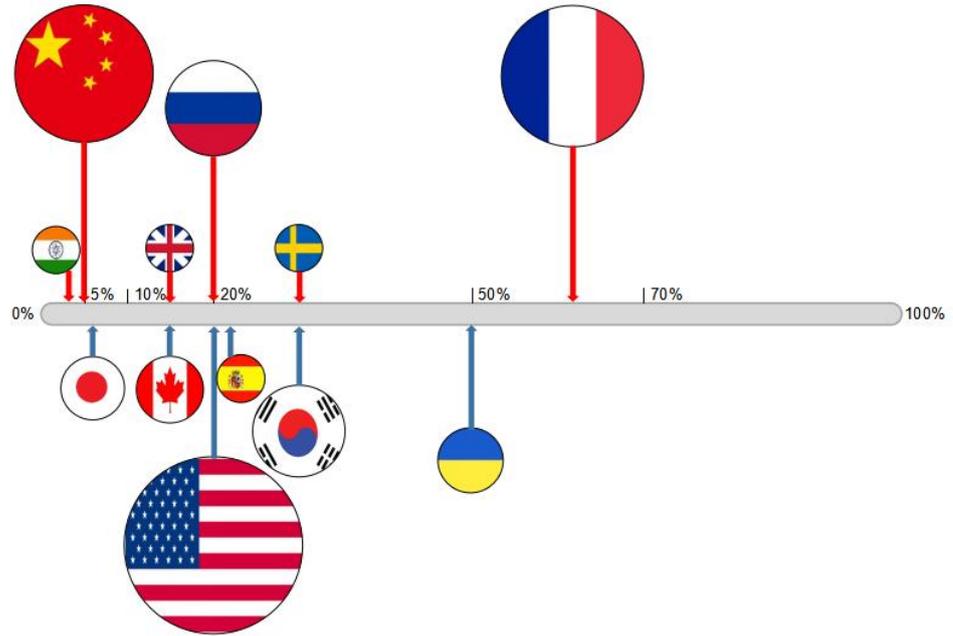
注：包括已并网但未投入商业运行的机组

资料来源：中国核能行业协会《全国核电运行情况》，国信证券经济研究所整理

¹ 中国核协《舒印彪：核电“四大功能”支撑新型电力系统构建》

² IAEA《世界核反应堆》

图3: 各国核电装机容量及核电发电量在全国发电量中的占比



资料来源：IAEA，国信证券经济研究所整理 注：面积与装机容量成正比，位置表示核电发电量在全国发电量中的占比，最左段为0，最右端为100%

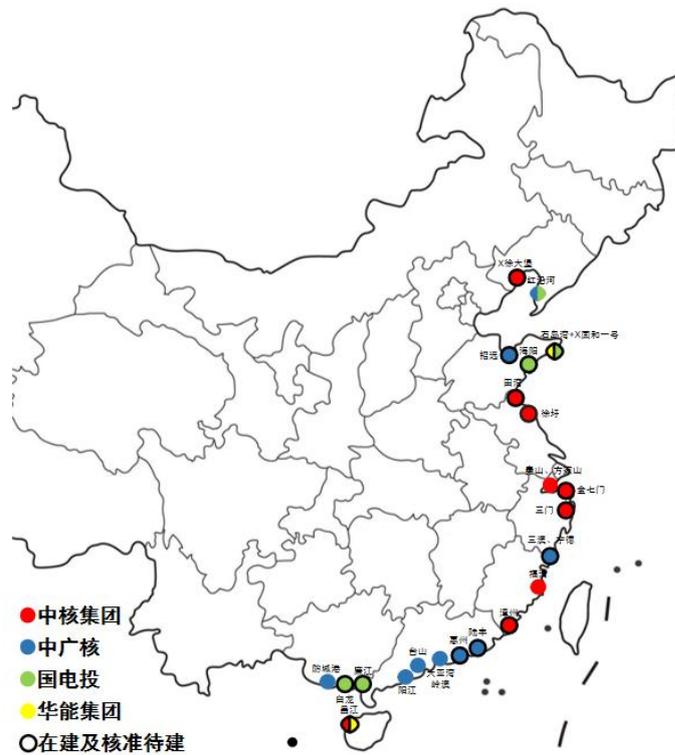
表1: 全国在运和在建核电站情况

省份	核电站	业主单位	在运机组数量	在运总装机 (MW)	在建及核准待建机组数量	在建及核准待建总装机 (MW)
辽宁	红沿河	中广核/国电投	6	6714		
	徐大堡	中核集团			4	5130
	石岛湾	华能集团	1	211	2	2450
山东	国和一号示范工程	国电投			2	3068
	海阳	国电投	2	2506	2	2506
	招远	中广核			2	2428
江苏	田湾	中核集团	6	6608	2	2530
	徐圩	中核集团			3	3076
	秦山 ¹	中核集团	7	4486		
浙江	方家山	中核集团	2	2178		
	三门	中核集团	2	2502	2	2502
	金七门	中核集团			2	2430
福建	三澳	中广核			4	4850
	宁德	中广核	4	4356	2	2420
	福清	中核集团	6	6678		
广东	漳州	中核集团			4	4848
	陆丰	中广核			4	4890
	太平岭	中广核			4	4822
广东	岭澳 ²	中广核	4	4152		
	大亚湾	中广核	2	1968		
	台山	中广核	2	3500		

	阳江	中广核	6	6516		
	廉江	国电投			2	2500
广西	防城港	中广核	4	4548		
	白龙	国电投			2	2500
海南	昌江	中核集团	2	1300	1	125
		华能集团			2	2396
合计			56	58218	46	55471

资料来源：国家核安全局，中国核能行业协会，国信证券经济研究所整理 注：1：包括秦山核电厂、秦山第二核电厂和秦山第三核电厂；2：包括岭澳核电、岭东核电

图4：全国在运和在运核电站情况



资料来源：国家核安全局，国信证券经济研究所整理 注：不含中国台湾核电

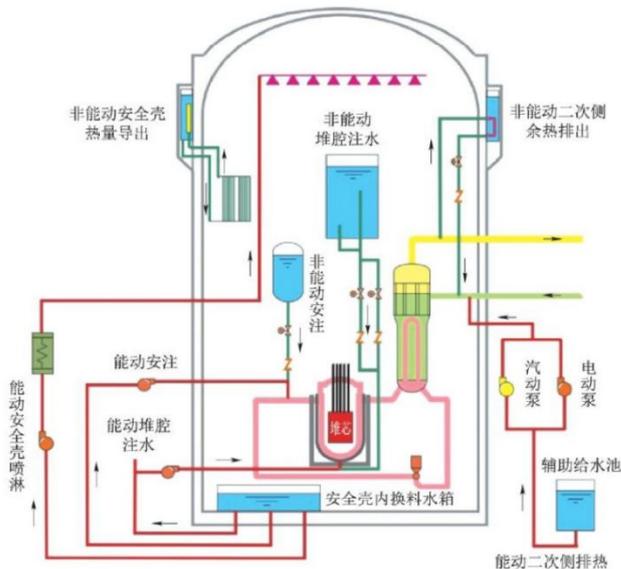
核能发展仍面临多重挑战

安全性是核能发展首要考虑因素。2011年福岛核事故后，全球核能发展放缓乃至停滞，部分国家启动退核，关停国内全部核电站。由于核事故的巨大危害性，安全性是核能行业发展的第一原则，安全和质量是核电发展的“生命线”。目前先进三代核电设计需要采用能动和非能动安全系统来保证核电运行的安全性，华龙一号设计就包括了辅助给水系统和非能动二次侧余热导出系统、安喷系统和非能动安全壳热量导出系统、能动和非能动的堆腔注水系统、能动和非能动的安注系统等4套安全系统³。华龙一号的安全设计保证72小时内不需要外部干预，依靠

³ 易飞, 顾传俊. 《华龙一号能动与非能动安全系统介绍》

重力、温度、密度差等非能动手段可以导出堆芯热量，保证机组安全，发生事故的概率降低到百万年分之一。

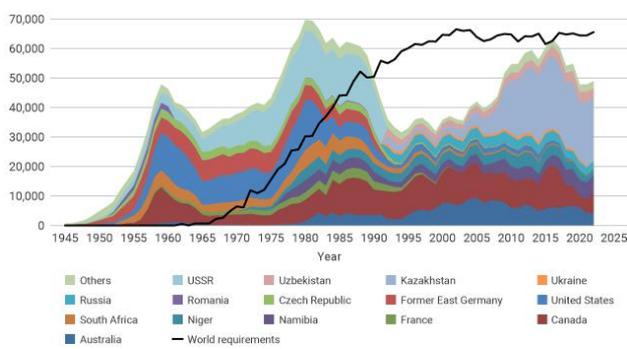
图5：“华龙一号”能动与非能动安全系统原理图



资料来源：宋代勇, 赵斌, 袁霞等. 《“华龙一号”能动与非能动相结合的安全系统设计》，国信证券经济研究所整理

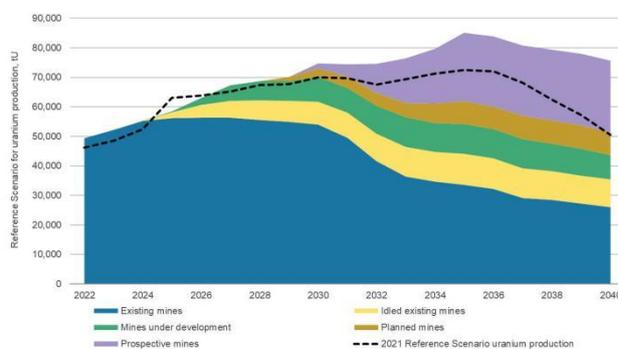
全球天然铀产能有限，存在供给缺口。根据 WNA 的数据，2022 年全球 U_3O_8 供应量 58201 吨，相当于 49355tU，占公用事业全年需求量的 74%，剩余部分则由二次供给补充。根据 WNA 统计，截至 2021 年，全球生产成本在 130\$/kgU（约 50\$/lb U_3O_8 ）以下的合理确定资源和推断资源合计 607.85 万 tU；而每 GW 核电装机每年约消耗 150-200tU，首次燃料装载则需要 300-450tU。以全球核电装机 400GW 测算，以上铀资源约可使用 100 年。而随着全球核能复苏，新建核电逐渐投产，全球铀矿需求将持续提高，供给缺口可能扩大，铀资源可用年限进一步缩短，导致全球天然铀市场价格明显提高；另一方面，受福岛核事故影响，2011 年后全球核电发展放缓、停滞甚至倒退，铀资源企业减少了铀矿勘探、开采开支，新矿山储备较少，而新矿山从前期勘探、审批到建成投产周期一般在 10 年以上，近年新增铀矿产能主要是原有矿山的复产和增产。

图6：全球天然铀产量和核电需求（单位：tU）



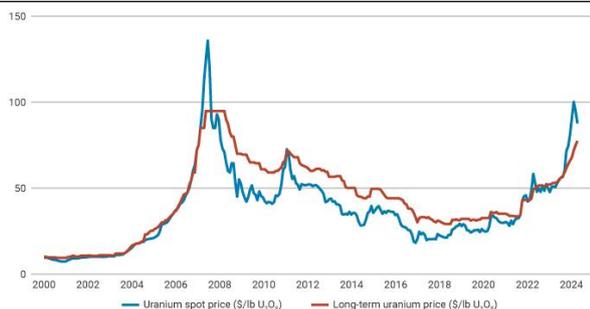
资料来源：WNA, OECD-NEA, IAEA, 国信证券经济研究所整理

图7：STEPS 情境下各种电源发电量（单位：TWh）



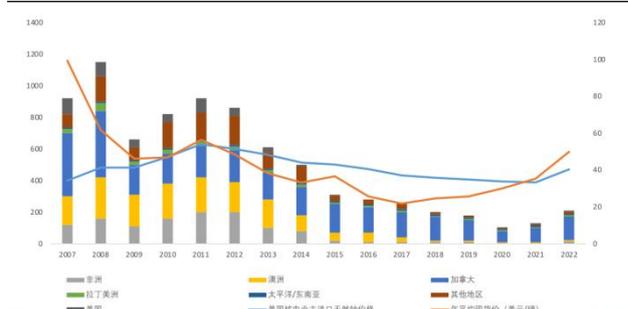
资料来源：IEA、国信证券经济研究所整理

图8: 天然铀长协（红）和现货（蓝）价格（单位：\$/lbU₃O₈）



资料来源：WNA, Cameco, UxC, TradeTech, 国信证券经济研究所整理

图9: 全球勘探支出及美国核电业主进口天然铀价格

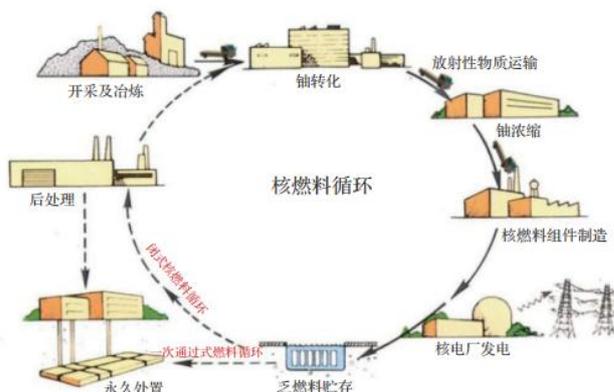


资料来源：IEA、国信证券经济研究所整理

乏燃料处理尚未成熟。目前全球投入商业运行的二三代核电均为热堆，热堆运行过程中会产生含有强放射性、长半衰期的乏燃料，通常含有 1.0%的铀-235，0.6%的可裂变钚（钚总量约 1%），3%的裂变产物和次要的锕系元素，以及 95%的铀-238。乏燃料取出后卸载到紧邻反应堆的储存池中或进行干法贮存，以屏蔽辐射并释放余热，这一过程可能持续数月乃至数年，然后可以转移储存，但最终需要回收处理再利用（闭式燃料循环），或直接进行永久储存（一次通过式燃料循环）。目前对于乏燃料的主流处理方式仍是掩埋和储存，无法完全解决乏燃料问题且需要长期监测，成本高昂，而乏燃料的后处理和回收再利用目前仍未完全成熟。按百万千瓦核电机组一年约产生 20-25 吨乏燃料测算，目前我国核电每年产生 1200-1500 吨乏燃料。据估计，到 2030 年我国累计乏燃料将达到约 23500 吨，离堆运输的需求将达到 15000 吨⁴。

目前我国乏燃料处理能力仅有 2010 年在甘肃兰州建成的四〇四中试工程，以及以中试厂为基础建设的 200 吨/年乏燃料后处理示范工程。中核集团和法国阿海珐集团合作的中法合作核循环项目选址曾计划选址连云港，模仿法国阿格核循环厂模式建设核循环厂，设计年处理乏燃料能力 800 吨，一期贮存能力 3000 吨，但由于当地居民对核能安全和环境影响的担忧，连云港市政府决定暂停了核循环项目的前期选址工作。

图10: 核燃料循环及乏燃料处理的两种方式



资料来源：Wind, 国信证券经济研究所整理

⁴ 肖岷《中国自主化商业闭式核燃料循环发展模式与路径的研究与探索》；新华社《中核集团：中法合作 800 吨大型核循环厂将于 2020 年开工》

图11: 湿法贮存



资料来源: 环境保护部核与辐射安全中心《核燃料循环》, 国信证券经济研究所整理

图12: 干法贮存



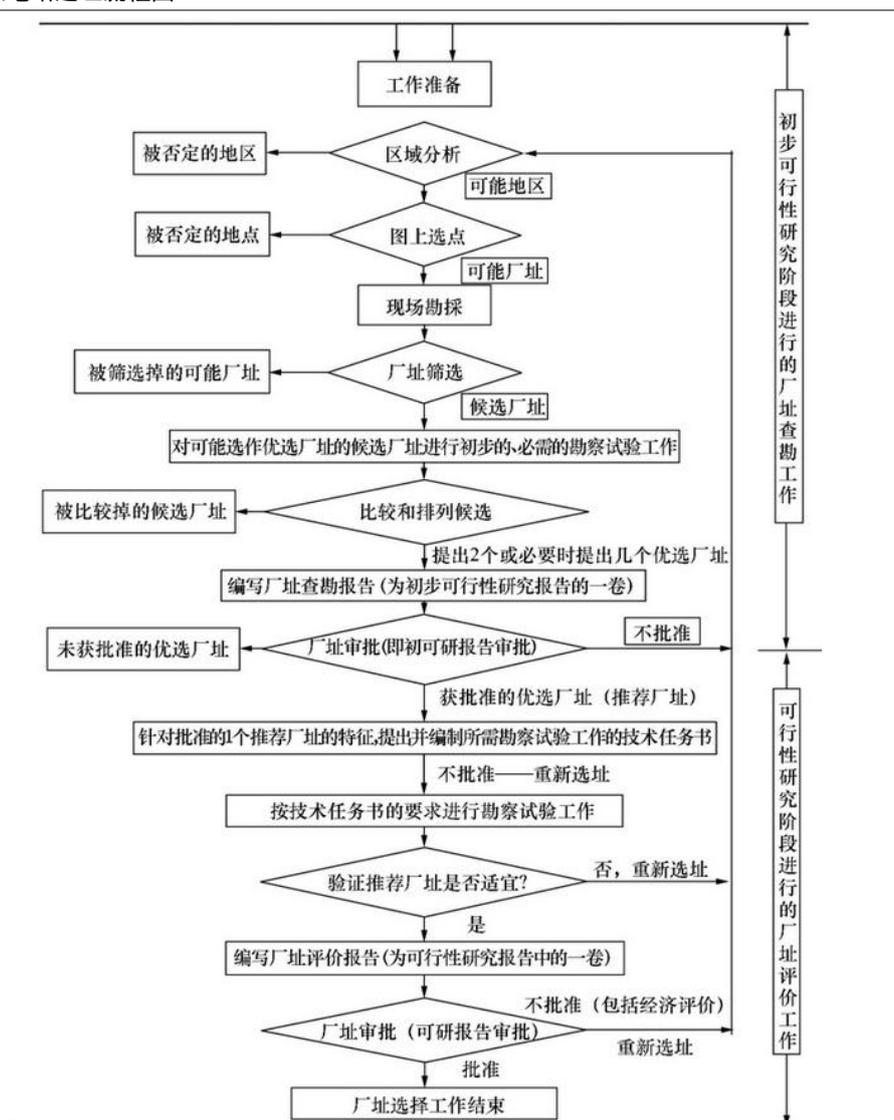
资料来源: 环境保护部核与辐射安全中心《核燃料循环》、国信证券经济研究所整理

核电厂址要求严格, 条件优秀的厂址有限, 内陆核电尚未放开。出于对核电运行安全性的考虑, 核电站选址条件苛刻, 需要确保核电站不受到自然灾害或外部人为因素等的影响, 即使发生事故时, 也能够有效降低对周围环境以及居民生产生活的影 响。国家能源局要求核电厂址满足以下 6 个条件:

- 核电厂址尽量选择人口密度相对较低, 离大城市较远的地点。半径 5 千米范围不宜有 1 万人以上乡镇; 10 千米范围内不宜有 10 万人以上城镇, 40 千米范围内不宜有 100 万人以上的大城市。
- 核电厂水源应该满足装机容量取水要求 (内陆核电厂采用淡水循环冷却, 取水量不超过每百万千瓦 1.2 立方米/秒; 沿海核电厂, 取水量不超过每百万千瓦 0.05 立方米/秒)。
- 核电厂址附近范围内不应存在能动断层, 厂址不受火山活动及其他严重地震、地质灾害的威胁, 地基地质条件好。
- 核电厂的交通运输应便捷, 设置进厂道路、应急和施工道路。厂址应具备可行的建造大件运输通道或大件码头条件。
- 核电厂厂址尽量选择距离电力负荷中心较近区域, 且电网可靠性高、厂外电源应有两个独立系统。
- 核电厂址可提供厂区 0.146 平方米/千瓦的用地和厂外施工临时用地, 厂址场地标高应高于设计基准洪水位⁵。

⁵ 国家能源局《核电百问|核电厂的厂址需要什么条件》

图13: 核电站选址流程图



资料来源：中核集团《有核电站的地方通常地震概率较低是真的吗？核电站选址需要考虑哪些要素？》，国信证券经济研究所整理

简而言之，核电选址需要考虑的要素包括：充足水源、稳定地质结构和气象等条件、适宜的社会经济条件和无潜在危险源。目前我国在建及在运核电站均为沿海核电，可供选择的厂址有限；内陆核电目前尚未放开，主要原因是核电冷却取水和安全等问题。而全球在运核电中，内陆核电占总装机的 2/3 以上，并且在技术和实践上都已验证成熟，只要在选址阶段对关键难点问题进行深入分析研究，并采取适当的管理措施和技术措施，内陆厂址能够满足有关法规和建厂条件的要求。根据中核集团相关报道，我国初步勘查选择的核电站厂址容量可支撑未来 4 亿千瓦装机，核电站厂址资源主要分布在我国东部沿海和中部内陆地区，主要包括辽宁、吉林、河北、浙江、安徽、河南、福建、江苏、浙江、山东、湖北、湖南、江西、四川、重庆、广东、广西、甘肃、黑龙江、云南等省份⁶。按照核电发展规划测算，考虑内陆核电的情况下，当前储备选址足以保证 2060 年前的核电发展。

⁶ 中核集团《有核电站的地方通常地震概率较低是真的吗？核电站选址需要考虑哪些要素？》

核能利用场景有限，能量转换效率较低。同样出于安全性考虑，核电站一回路压力较低，对应饱和温度也较低，同时设置一定的安全边界，再加上传热效率问题，二回路主蒸汽温度更低，因此能量转换效率也较低，通常显著低于超超临界火电机组。同时，低参数蒸汽也较难应用于供热供汽、制氢等用途，因此目前核电主要用途仍是发电。目前，海阳、红沿河等核电站有供暖应用，田湾核电建成“和气一号”后成为我国首个工业用途核能供汽项目。除以上核能综合利用方式外，部分堆型还可用于生产同位素，但目前我国在运核电中仅秦山三核的两座 CANDU6 重水堆具备此能力。

图14: 田湾核电基地



资料来源：新华社，国信证券经济研究所整理

聚焦核能利用痛点，迭代核能新技术

目前的核电受限于前述短板，尚不具备成为“终极能源”的条件，而可控核聚变距离实现商业化落地仍有较大差距，因此四代核电尤其是快堆成为核能发展下一阶段的目标和可控核聚变最终实现之前的替代方案。我国于1983年提出“热堆-快堆-聚变堆”的核能利用三步走战略计划，解决核能可持续发展和核燃料长期安全有效供应的问题。目前我国热堆发展已逐步成熟，自主三代压水堆核电“华龙一号”已建成投产并保持安全稳定运行，“国和一号”首堆工程已首次并网发电，多用途模块化小堆“玲龙一号”预计2026年建成投产，自主研发的世界首座具有第四代核电特征的高温气冷堆核电站投运。快堆成为当前核能发展聚焦点。

我国快堆采用“实验堆-示范堆-商用堆”三步走发展战略。我国于2010年建成第一座钠冷快堆中国实验快堆（CEFR），2014年底实现了100%功率运行72小时的工程设计目标。CEFR热功率65MW，实验发电功率20MW，首炉燃料使用UO₂，采用堆本体池式结构和一回路钠、二回路钠和三回路水进行传热，并首次设立非能动余热事故排出系统。2017年，霞浦600MW示范快堆工程开工，采用中核集团自主研发的CFR600型池式钠冷快中子反应堆，是我国首个快堆核电示范工程。

图15: 中国实验快堆



资料来源：中核集团，国信证券经济研究所整理

2024年8月27日，在国务院国资委指导下，中核集团在中国原子能科学研究院举办一体化闭式循环快堆核能系统创新联合体成立大会。会上提出，中核集团将积极推动将一体化快堆纳入国家科技重大专项，计划于2035年左右，建成一体化快堆首个示范工程，实现商业化示范。一体化快堆指在同一厂址建设钠冷快堆、干法处理厂、燃料制造厂和废物处理设施，同时具备发电、增殖、嬗变三个功能，实现高效闭式燃料循环利用。

在国际上，核能利用战略与我国三步走战略略有差异，将裂变核电技术根据发展阶段、反应堆特点、技术目标、本征安全性等划分为1-4代核电，其中快堆属于四代核电，但四代同时包含部分热堆设计。1-4代核电发展历程和主要特征如下：

一代核电：始于20世纪50年代，基于军用核能技术开发建造，苏、英、美分别于1954年、1956年和1957年建成实验性和原型核电站，主要验证了核能发电的技术可行性。目前一代核电已退出使用。

二代核电：在一代核电的基础上，对经过验证的机型实施标准化、系列化、批量化建设，陆续建成电功率30万千瓦以上的压水堆、重水堆和沸水堆等核电机组。20世纪70年代石油涨价引发的能源危机推动了二代核电的发展，使其验证了经济性可以与火电、水电竞争，目前全球商业运营的400多座核电站大部分在此阶段建成，属于二代或二代改进型（二代+）核电技术。这一代的核电机组类型主要由美国设计的压水堆核电机组（PWR，System80）和沸水堆核电机组（BWR）、法国设计的压水堆核电机组（P4、M310）、俄罗斯设计的轻水堆核电机组（VVER），以及加拿大设计的重水堆核电机组（CANDU）等。

三代核电：由于世界核电先后发生美国三哩岛、苏联切尔诺贝利和日本福岛三起严重核事故，全球对核电安全的重视进一步提升，基于二代核能系统设计和运行经验，在美国核电用户要求（URD）或欧洲核电用户要求（EUR）开发了三代核电技术，主要特征包括：功率更大（1000-1500MW），寿命更长（由40年延长至60年），建设周期更短（48-52个月），经济性更好（批量化建设后大幅降低造价），安全性更高；世界核能协会要求，第三代核电在事故发生时即使不依赖人为操作

或外界系统的干预，而依靠重力、自然循环等自然规律也能实现一定的保护作用，避免出现堆芯熔毁事故。三代核电设计主要包括美国 AP1000 和 ABWR、欧洲 EPR、俄罗斯 VVER-1200、韩国 APR-1400 以及我国的华龙一号、国和一号和自主改进的 CAP1400 等。其中 AP1000、EPR、华龙一号和国和一号首堆均在我国投产，我国也引入了 VVER-1200 并建成投产。

四代核电：2000 年 1 月，在美国能源部的倡议下，美国、英国、瑞士、南非、日本、法国、加拿大、巴西、韩国和阿根廷等十个有意发展核能利用的国家，联合组成“第四代国际核能论坛”（GIF），并于 2001 年 7 月签署了合约，约定共同合作研究开发第四代核能系统，并在技术路线图中提出了 6 种四代核电的设计概念。四代核电的设计理念主要包括大幅减少核废料、更充分利用铀资源、降低核电站建造和运营成本，以及更好控制核扩散，即保证核技术的和平利用等。目前全球首座具有第四代核电特征的核电站是我国华能石岛湾高温气冷堆示范工程，于 2023 年 12 月 6 日正式投入商业运行。

图16: 华能石岛湾高温气冷堆核电站



资料来源：央视网，国信证券经济研究所整理

四代核电是核能发展的重要方向。第四代核能系统的目标是更好的经济竞争性、安全性和可靠性，要求燃料利用率高、废物产生量小，是全球核能发展的重要方向⁷。GIF 于 2002 年发布技术路线图，提出国际接受的 6 种堆型，包括气冷快堆（GFR）、铅冷快堆（LFR）、钠冷快堆（SFR）三种快中子堆和超临界水堆（SCWR）、（超）高温气冷堆（V/HTR）和熔盐堆（MSR）三种热中子堆。特别地，钠冷快堆因在工程技术上最成熟而被称为第四代核能系统的首选堆型，而热堆中的部分堆型也有快堆设计。本文主要针对目前关注度较高的钠冷快堆、高温气冷堆和钍基熔盐堆三种堆型，铅冷快堆、气冷快堆、超临界水堆和其他形式的熔盐堆仅做简要介绍。关于各种四代核电的技术特征请见本文附录。

⁷ 国资小新《世界领先！中国四代核电技术扫描》

表2: GIF 第四代核电技术六种主流设计特征

	类型	冷却剂	温度(°C)	压力	燃料	应用场景
钠冷快堆	快堆	钠	500-550	低	U-238/MOX	发电、增殖、嬗变
铅冷快堆	快堆	铅/铅铋合金	480-570	低	U-238 ⁺	发电、核潜艇动力
气冷快堆	快堆	氦	850	高	U-238 ⁺	发电、制氢
熔盐堆	快堆	氟化物盐	700-800	低	UF	发电、制氢
	热堆	氟化物盐	750-1000		UO ₂	制氢
(超)高温气冷堆 ^{**}	热堆	氦	900-1000	高	UO ₂	制氢、供热、发电
超临界水堆	热堆/快堆	水	510-625	超高	UO ₂	发电

*: U-238+指含有 U-235 和 Pu-239

**：2003 年第四代核能系统路线图中将超高温气冷堆列为种候选技术之一，2010 年后更新为超高温气冷堆/高温气冷堆。

资料来源：WNA，GIF，国信证券经济研究所整理

如何提高反应堆的安全性？——四代堆固有安全性

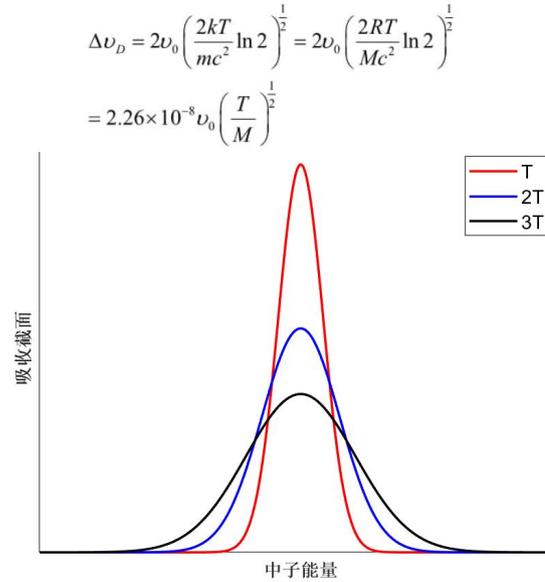
三代核电虽然采取了多种措施提高安全性，但仍然需要外部安全系统和措施来保障安全性。四代核电与三代核电相比，一个重要的特征就是四代堆具有一定的本征安全性（固有安全性），即依靠系统本身设计和材料特性，不依赖外部保护装置，在正常工作和潜在异常情况下均能保持安全的特性。四代核电即使遇到地震、海啸等重大自然灾害，四代核电站也不会发生堆芯的严重损坏，并确保不会产生放射性厂外释放，也无需厂外应急。换言之，四代核电是“从物理定律出发就可以理解的、在任何情况下堆芯都不会熔化的反应堆，不是概率安全的，而是确定安全，是固有安全的反应堆”⁸。

通俗但有失精确地概括，四代核电的固有安全性主要针对堆芯熔毁的预防，主要是通过各种“负反馈”设计，即事故发生，机组失控，功率飞升→堆芯温度上升→燃料、冷却剂的物性或核性质随温度上升而变化→抑制核反应继续进行→机组功率得到控制。而相比于三代压水堆，四代堆的六种堆型容许温度更高，尤其是熔盐堆和超高温气冷堆，负反馈能力更强。此外，四代堆通常还具有反应堆余热的缓冲和自然导出的功能。

多普勒效应是核电固有安全性的重要机制。核燃料具有多普勒效应，当堆芯温度升高时，原子核的热运动加剧，燃料中的铀-238、冷却剂以及热堆的慢化剂吸收中子的能力增强，导致参与裂变反应的中子减少，从而抑制裂变反应失控。温度越高多普勒效应越强，因此四代核电的固有安全性更高。此外，温度上升也会导致燃料膨胀，中子泄露增加，以及冷却剂的空泡效应，进一步减少参与裂变反应的中子数量，从而抑制核反应的继续发生。

⁸ 中国工业报《忌因噎废食 安全性凸显四代核电战略意义》

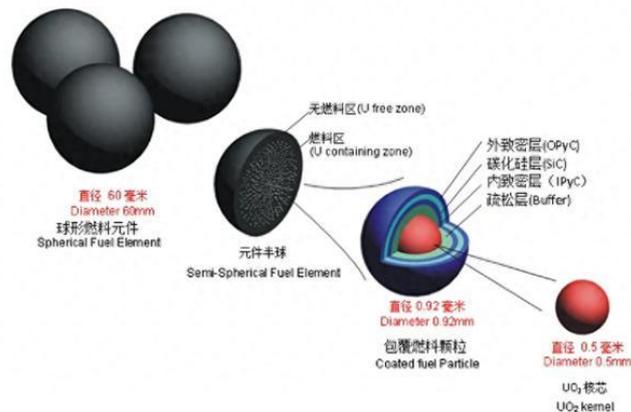
图17: 多普勒效应原理和示意图



资料来源: Matlab, 国信证券经济研究所整理

高温气冷堆燃料颗粒包覆层形成负反应性控制。以我国高温气冷堆为例, 采用全陶瓷包覆燃料元件, 由外致密热解碳层、碳化硅层、内致密热解碳层、疏松热解碳层和二氧化铀燃料核心构成, 复合包覆层组成微球型压力容器, 能够在不高于1650摄氏度的温度下, 阻止放射性裂变产物的释放。直径外厘米的燃料球外包覆层的基体是石墨粉, 也是反应堆的慢化剂, 石墨粉中分散着12000个四层全陶瓷材料包覆的直径0.9毫米的燃料颗粒。当反应堆温度上升时, 石墨的中子慢化能力会有所下降, 从而抑制反应进行。

图18: 高温气冷堆耐高温全陶瓷包覆颗粒燃料球示意图



资料来源: 中科院物理所, 国信证券经济研究所整理

四代堆非能动停堆技术形成反应堆安全最后防线。四代核能系统设计中包含一些非能动的停堆技术, 比如当堆芯温度过高时, 控制棒会因为受热膨胀或重力作用插入堆芯, 中止裂变反应, 防止堆芯熔毁; 熔盐堆设计了应急排盐系统, 反应堆设有冻结塞, 当反应堆的堆芯超过预设温度时, 冻结塞熔化, 熔盐会泄入应急储罐, 由于熔盐堆中的熔盐既是冷却剂也是燃料, 核反应会自动停止, 熔盐冷却凝

固后也不会泄露放射性。

不施加外界干预的条件下，四代堆停堆后可快速导出堆芯余热。对于钠冷快堆、铅冷快堆和熔盐堆，其冷却剂导热能力强，且沸点较高，冷却剂不易形成空泡，均质性较好，可快速导出堆芯余热，同时由于这些冷却剂密度较高，单位体积可容纳热量更多，在事故第一时间可形成热阱，避免堆芯温度快速上升；而对于气冷堆，由于气体冷却剂的热惯性较小，受热膨胀明显，在堆芯温度上升时可以加强对流，带走热量，其中高温气冷堆设计了非能动余热排出系统，在失去强迫冷却的情况下，仅依靠热传导、热辐射和冷却剂的自然对流就可以导出余热，保证任何情况下堆芯温度均不超过限值，保证燃料颗粒包覆层不损毁，组织放射性裂变产物释放。

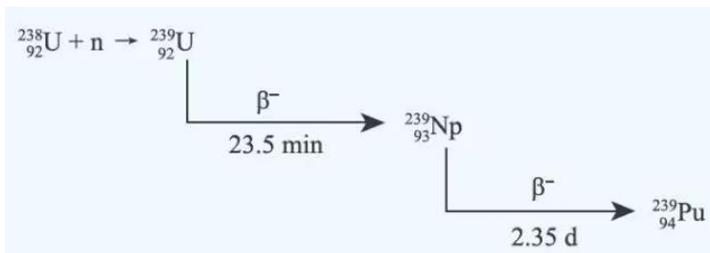
如何解决燃料问题？——快堆、钍基熔盐堆

目前三代核电主流堆型为压水堆，属于热堆范畴，其反应主要原料为铀-235，而铀-235在自然界天然铀中的比重仅为0.7%左右。快堆则可充分利用天然铀中占比99.3%的铀-238作为反应原料，可以让天然铀的利用率从目前不到1%，提高到60%以上，大幅延长铀资源使用年限，缓解天然铀一次供给不足的问题。四代堆中的钍基熔盐堆则可以改用钍作为燃料。

热堆裂变过程净消耗铀-235。在热堆中，铀-235吸收一个热中子后迅速裂变，产生氪-92和钡-141两个原子，同时释放2-3个快中子。而铀-235对快中子的裂变截面较小，裂变概率较低，因此必须利用慢化剂（中子减速剂）将快中子减速成热中子来维持铀-235的链式反应，常见的慢化剂包括轻水堆的水以及重水堆的重水等。同时，热堆中的慢化剂同时也是换热介质，将反应堆产生的热量传递给二回路介质（轻水堆、重水堆）或直接（沸水堆）对外做功。

快堆采用铀钚燃料循环，利用天然铀中热堆无法燃烧的铀-238发电。快堆则利用铀-238可以吸收快中子的特性，将热堆无法利用的铀-238转化成铀-239，再通过β衰变经由镎-239转化成容易发生裂变的钚-239，钚-239裂变释放2-3个快中子，部分中子用于继续和U-238反应增殖钚-239，部分中子与钚-239反应从而维持链式反应并释放能量。因为快堆不需要慢化剂，因此需要中子吸收截面小的其他流动介质进行换热。根据换热介质的不同，目前主流快堆设计包括钠冷快堆、气冷快堆和铅冷快堆三种。

图19: 快堆燃料转换示意图

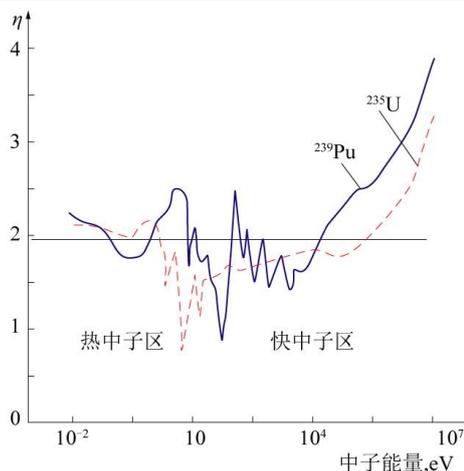


资料来源：中国物理学会期刊网《钠冷快堆及其安全特性》，国信证券经济研究所整理

转换比是指反应堆内反应堆内通过转换产生的易裂变同位素核数与消耗的易裂变同位素核数之比，一般压水堆的转换比为0.5-0.6，压重水堆和高温气冷堆可达

到 0.8，而快堆则可达到 1.0 以上，钠冷快堆理论模型转换比可达 1.8。因此裂变过程中转换生成的燃料不仅能够自持，还能有所盈余，供其他反应堆使用，因此快堆也被称为增殖反应堆，快堆的转换比也被称为增殖比。1000 MW 以上的大型商用钠冷快堆采用铀钚氧化物燃料运行时，增殖比可达 1.3，如果换用铀钚金属燃料，增殖比可达到 1.582，倍增时间短至 6.2 年⁷。

图20: 裂变产生的中子数与入射中子能量的变化曲线

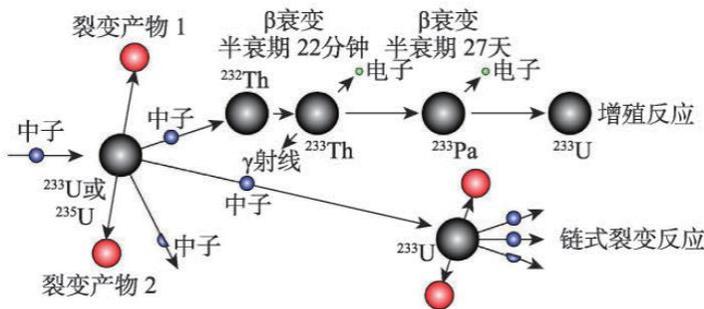


资料来源：中国大百科全书，国信证券经济研究所整理

快堆可解决铀资源短缺问题。热堆只能利用天然铀中丰度仅有 0.7% 的铀-235 发电，核燃料组件需要将铀富集到 3%-5%。而快堆则可以利用丰度为 99.3% 的铀-238 发电，因此对天然铀的需求大幅下降，一般认为可以将天然铀的利用效率提高 60 倍。根据 WNA 统计，截至 2021 年全球开采成本低于 130\$/kgU 的已探明确认铀资源量和推测铀资源量为 607.85 万 tU，即使按照当前全球核电天然铀需求约 7-8 万 tU/年推测，铀资源可用时间也不足一百年，无法支撑核电持续增长；若改用快堆，铀资源可用时间则可达到数千年。

钚基堆采用钚铀燃料循环路线，规避天然铀资源问题。迄今发现的有商业价值的易裂变核素包括铀-235、钚-239 和铀-233。其中，铀-235 是自然界唯一天然存在的易裂变核素，钚-239 需较难裂变的铀-238 吸收中子后转换而来，而铀-233 则需较难裂变的钍-232 吸收中子后转换而来，所以铀-238 和钍-232 也称可转换核素。天然钍中含有钍-232，可通过钍铀燃料循环成为钚基核燃料，钍原子在中子轰击并经两次 β 衰变后转变成铀-233，铀-233 受到中子轰击后发生裂变，产生 2-3 个中子，这些中子继续轰击钍-232 增殖可裂变的铀-233 或轰击铀-233 维持链式反应。相比于铀钚燃料循环，钍-232 对热中子的反应截面更高，钍铀燃料循环在热中子堆中也可以实现自持和缓慢增殖，但铀-233 对快中子的反应截面较弱，钍铀燃料循环在快中子堆中适合增殖和嬗变。

图21：钍铀燃料循环原理示意图



资料来源：徐洪杰等《钍基熔盐堆和核能综合利用》，国信证券经济研究所整理

相比于铀钚燃料循环，钍铀燃料循环具有明显优势。钍-232 到铀-233 的转换效率高，中子经济性好，在热堆中也能实现增殖；钍原子序数较低，形成超铀元素需要的中子数更多，因此产生的长寿命次锕系核素较少，放射性毒性相对较低；钍铀燃料循环中会伴生短寿命强 γ 辐射的铀 232，易于监测，在防止核扩散上有一定优势；钍和氧化钍化学性质稳定，耐辐照、耐高温、热导性高、热膨胀系数小、产生的裂变气体较少，钍基反应堆允许更高的运行温度和更深的燃耗。同时，钍基核燃料还具有不易用于制造核武器等特点，是更理想的民用核燃料，不过 WNA 也指出，美国曾在 1955 年引爆一个钚-233 装置，但爆炸当量低于预期，IAEA 将钍-233 与 HEU（高浓缩铀）归为同类。

钍资源含量相对充足，我国“贫铀富钍”。钍元素在自然界中以单一同位素钍-232 形式存在，在大多数岩石和土壤中都有少量分布，土壤中平均钍含量约为百万分之六，地球上钍资源总储量是铀资源的 3-4 倍。钍常见的来源主要为稀土磷矿独居石和钍矿，其中独居石平均含有 6-7% 的磷酸钍，全球独居石资源量约 1600 万吨。根据 OECD、NEA 和 IAEA 的《铀（2016）：资源、生产和需求》，全球开采成本低于 80\$/kgTh 的合理保证和可推断钍资源量约 635.5 万吨，其中我国钍资源约占 10 万吨，印度钍资源量 84.6 万吨位列第一。需要说明的是，钍资源没有国际标准，也不是主要的勘探目标，在资源量的含义上与铀资源并不同意，且该统计数据并不能确定亚洲国家实际情况，一些数据是对独居石的假设和替代数据，尤其提出中国的实际产量不详。包钢股份曾表示，仅白云鄂博矿中土资源储量折合氧化钍 (ThO_2) 就有 22 万吨，约合 19 万吨钍-232。相比于铀矿资源，我国可称得上“贫铀富钍”，据观研报告《中国钍行业发展趋势研究与未来投资分析报告（2022-2029 年）》统计，我国钍资源储量约为 30 万吨，广泛分布在 23 个省市和地区。据中科院上海应物所《小型模块化钍基熔盐堆研究设施环境影响报告书（选址阶段）》，我国已查明的钍工业储量约为 28 万吨，仅次于 34 万吨的印度。

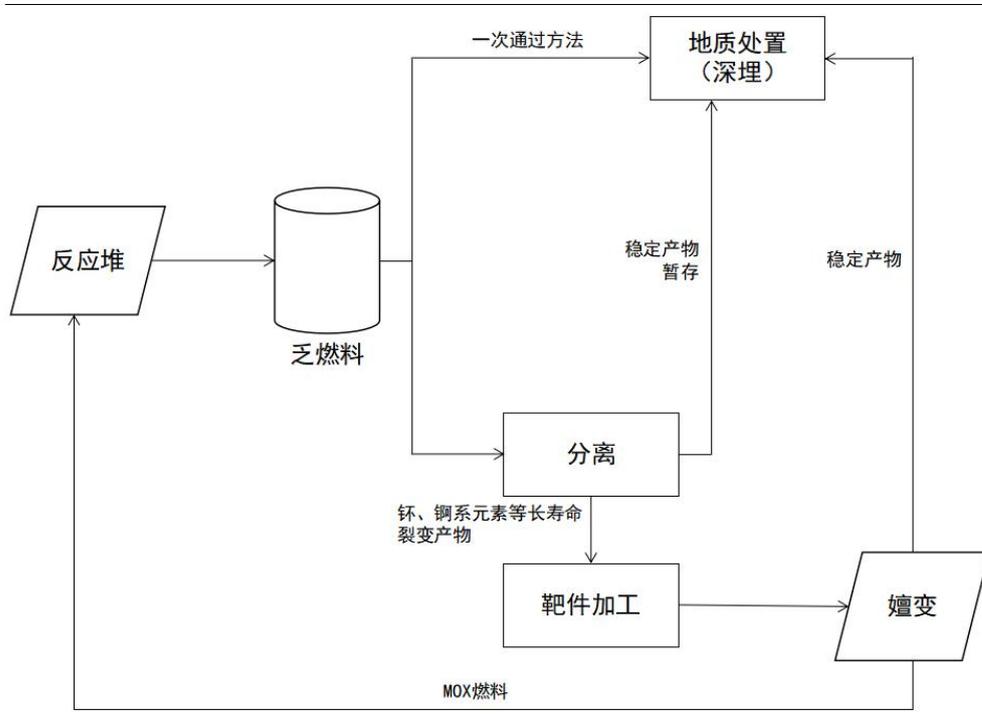
如何解决乏燃料问题？——快堆嬗变

嬗变是解决乏燃料的重要手段。核嬗变指通过核反应将一种元素转化成另一种元素或将一种化学元素的某种同位素转化成另一种同位素的过程。压水堆会产生含有强放射性、长半衰期的乏燃料，目前对乏燃料的主流处理方式仍是掩埋和储存，无法完全解决乏燃料问题且成本高昂。部分国家启动了核嬗变研究，如加速器驱动先进核能系统（ADANES），用加速器产生的高能粒子轰击核废料，使质量数较大的超铀元素分裂。

快堆具有嬗变能力，是处理乏燃料的重要手段。快堆既可以利用压水堆中剩余的堆后铀等元素进行发电，还可以通过嬗变消耗掉乏燃料中的长寿命锕系元素，使

其对环境的影响时间缩短 300 倍，废物量也减少 1-2 个数量级⁹。同时压水堆乏燃料经后处理后也可转化为快堆所需的 MOX 燃料组件，用于快堆的首炉装料。

图22: 乏燃料处理路线



资料来源：中科院物理所《关于核循环，这些基本知识你需要了解》，国信证券经济研究所整理

快堆和热堆组合发展，可形成二元闭式燃料循环系统。快堆可以处理压水堆的乏燃料，同时快堆的首堆装料需要压水堆提供钚元素，因此热堆和快堆需要组合发展，中国科学院院士叶国安预测，到 2065 年，我国热堆核电站装机约 1.97 亿千瓦，快堆核电站装机约 2.07 亿千瓦¹⁰，快堆装机快速增长初期需要压水堆提供首炉燃料，后期则可通过已有快堆增殖满足首炉燃料需求。另一方面，快堆和热堆可以组合形成二元闭式燃料循环系统。闭式燃料循环指的是铀在反应堆中燃烧后，将乏燃料进行后处理产生可利用的铀钚混合氧化物（MOX）重新利用。目前，对于闭式燃料循环在成熟压水堆的基础上发展和在快堆上直接实施仍存在一定分歧。由于钚作为热堆燃料会产生更多铀系元素，热堆循环次数越多对后处理的屏蔽要求越高，一般进行 2-3 次再循环就不宜继续，只能在一定程度上提高对铀资源的利用率。而快堆循环受限于快堆仍未发展到商业化水平，技术和经济性成熟度也落后于热堆，因此目前世界上一些国家投入实施的闭式燃料循环仍是热堆循环。在此基础上，快堆可以建在热堆后端，形成二元闭式燃料循环系统，兼具经济性、钚自持和废物最小化的优势。

如何增加核电厂址？——四代堆结合小堆或可成为内陆核电放开的重要契机

我国曾在 21 世纪初规划多座内陆核电。《核电中长期发展规划（2005-2020 年）》

⁹ 中国原子能科学研究院《【人物】张东辉：特别的爱，给快堆》

¹⁰ 中国电力企业管理《核能“三步走”行至中场》

中有对于内陆核电项目明确的表述，规划指出，湖北、江西、湖南、吉林、安徽、河南、重庆、四川、甘肃等内陆省（区、市）不同程度地开展了核电厂址前期工作，这些厂址要根据核电厂址的要求、依照核电发展规划，严格复核审定，按照核电发展的要求陆续开展工作。2008年2月，国家发改委批准江西彭泽项目、湖南桃花江项目和湖北大畈项目开展前期工作。相关资料显示，到2010年中，我国完成初步可行性研究报告审查的核电项目共43个，其中内陆厂址31个，还有20余座核电站规划处在“厂址普选”阶段¹¹。

2011年后内陆核电进度暂停。2011年3月福岛核事故发生后，全球核电发展停滞，我国群众对核电抵制情绪高涨，2012年10月24日，国务院召开常务会议明确指出，“十二五”时期不安排内陆核电项目，系首次明确暂停内陆核电项目，2008年批准开展前期工作的三个内陆核电项目全部暂停。国务院发展研究中心资源与环境政策研究所研究员王亦楠撰文指出，在内陆建设核电站，必须“万无一失”“绝对可靠”⁹。

四代核电或成为内陆核电放开的重要契机。在内陆核电发展倍受争议的阶段，中核集团公司科技委常委张禄庆提出，等到先进核电技术的安全性能得到运行实践的检验和进一步完善，甚至有固有安全特色的第四代核能系统成熟后，再来从长计议内陆核电的建设问题更加妥当、更可持续。由此可见四代堆成为内陆核电放开的重要契机的观点早已有之。

沿海核电主要具有扩散性和冷却水优势。根据《核辐射防护手册》，核电站选址必须考虑公众和环境免受放射性事故释放所引起的过量辐射影响，同时要考虑到突发的自然事件或人为事件对核电站的影响。因此，核电站一般选择滨海、滨河等人口密度低，易隔离的地区建设。另外，核电站在运行过程中会产生巨大热量，需要大量的水进行冷却。靠近海边建设除了能够为核电站提供大量的海水进行冷却外，还由于海洋具有很大的稀释能力，同样的核泄露，放射性物质泄露到大海或海边，通过洋流等海水运动的模式，核泄露物质相对比较容易被稀释，危害会逐渐减小或者消失。此外，靠海建设还可以解决大件设备运输等问题。因此核电站必须建在靠近海边或者大型湖泊周围。

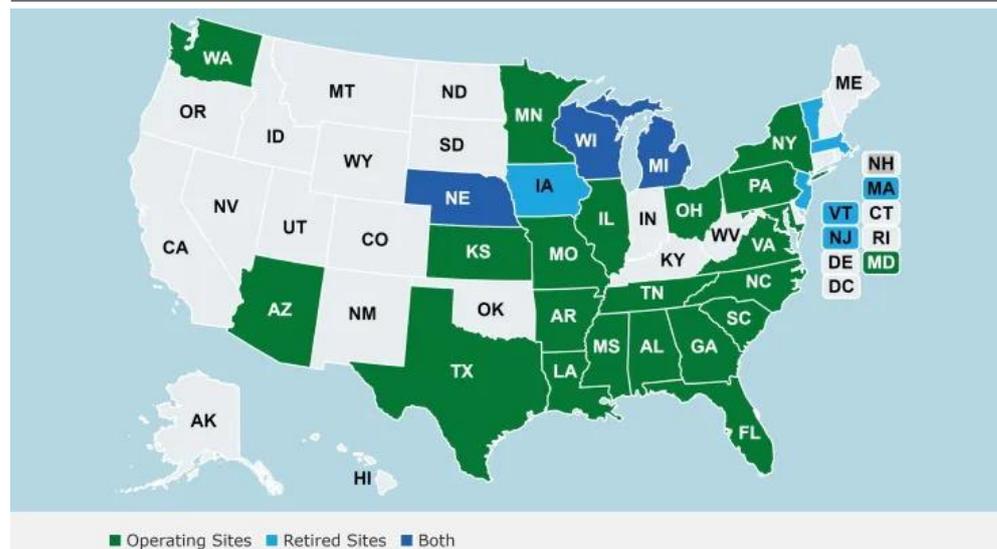
四代核电的固有安全性使核电扩散性风险大幅降低，冷却水需求也可减少。四代堆大幅提高了核电的安全性，使放射性扩散风险进一步降低，且因为几乎没有堆芯熔毁风险，不存在极端情况需要引入大量外部冷却水淹没反应堆的准备。目前三代核电发电系统与火电并无原理区别，但目前火电汽轮机可采用水冷和空冷的冷却方式，而核电目前主要采用水冷，空冷仍在讨论范畴，主要原因是核电为了保证安全性，一回路压力较低，导致汽轮机所用蒸汽参数较低，使用空冷的情况下能量损耗过大，且空冷需建造冷却塔，将进一步提高核电的投资强度。而四代核电一回路温度高，可获得高参数蒸汽，提高冷却效率，并使空冷具备可行性。

铅冷快堆等四代堆具有小型化设计，聚焦偏远地区供电。铅冷快堆概念设计之初即包含三种不同规模的系统设计，其中基于美国小型铅冷快堆（SSTAR）的小型可运输系统的小型自然循环堆的主要使用场景就是偏远山区、海上平台或孤岛等场景的长期发电，设计寿命中无需换料。此外高温气冷堆 HTR-PM（石岛湾项目）和 HTR-PM600（江苏徐圩项目）均为小型模块化设计，单个反应堆模块电功率约为10万千瓦。小型模块化反应堆降低了核电对厂址条件的要求，同时因为小堆本身功率规模较小，运行参数也较低，安全性有望取得提高。需要说明的是商业化小堆全系统全寿命的安全性目前尚未得到验证，行业内有一定分歧。

¹¹ 中国水运网《内陆核电缘何暂停》

“煤改核”是核电厂址扩容的一个重要方向。根据美国能源部《核电和煤电厂址新增核电装机容量评估报告》，美国在 31 个洲的 54 座在运和 11 座近年退役的核电厂主要分布在中东部区域，沿海、五大湖沿岸和内陆均有分布，其中 41 座在运和已退役核电厂厂址可新建 60GW 大型轻水堆；如果将有可能新建 600MWe 小型堆和先进堆的厂址包括在内，则可达 95GWe；在煤电厂址附近建设核电厂还可新增 128-174GW 核电。四代堆相比于三代压水堆，其蒸汽参数更高，汽水回路条件与火电更接近，也更适于推进“煤改核”进程。

图23: 美国核电场址分布情况



资料来源：美国能源部，世界核新闻网，中国能源研究会核能专委会，国信证券经济研究所整理

如何增加核电的利用场景？——四代堆提高运行参数

核能供热供汽是综合利用的重要方式。核电运行能量利用效率较低的一个重要因素是汽-水循环推动汽轮机发电过程中，因为蒸汽参数较低导致焓效率低，能量损失大。因此，提高核能利用效率的一个直接方式就是转向供热供汽综合利用，从能量效率的角度来看，直接使用热能是更理想的能量利用方式，发电只是核能利用的其中一种形式。一方面，热电联产在提高能量利用效率之外可以提高核电的盈利能力；另一方面，核电可为化工基地供热供汽，拓展核能利用场景，降低核电选址对电网条件的要求。

四代堆蒸汽参数高，更适于供热供汽。为了防止放射性泄露，核电往往采用多回路设计，二、三回路可利用的蒸汽的温度和压力均受到一回路出口温度的限制。目前三代压水堆为了保证安全，一回路压力控制较低，一回路理论温度上限不超过 330℃，再加上运行过程中还要维持一定的安全边界，及换热过程中的温度损失，可对外输出的蒸汽温度更低，远不及超超临界火电 600℃ 以上的供汽能力，也达不到很多化工反应要求的温度。因此三代核电供热相对简单，而工业供汽需要一定的改造，如田湾核电“和气一号”项目。而四代核电一回路温度较高，可输出蒸汽的参数也相应提高，从而带来了更广泛的供汽应用。

核能制氢/氨拓展二次能源形式，拓展核能应用。核能属于一次能源，目前主要通过转化为二次能源的电来利用，而在燃料动力领域无法小型化和民用化，但核能可以通过制氢、制氨转化为燃料，拓展核能需求。氢、氨均具有清洁燃料属性，有望替代化石燃料成为新的终端能源，还是需求广泛且不可替代的重要化工原料，

具有应用前景开阔，有望拓展核能应用。

表3: 各种能源形式对比

	氢能	氢能	煤炭	石油	天然气	新能源电力
热值(能量密度)	143MJ/kg	18.6MJ/kg	29.3MJ/kg(标煤) 23.1MJ/kg(5500大卡)	42.7MJ/kg(0号柴油)	36MJ/m ³ 约50MJ/kg	3.6MJ/kWh
成本	6.7-13.4元/kg(煤制氢) 18.6-24.6元/kg(PEM电解水制氢)	2.0-3.1元/kg(灰氢) 2.3-3.6元/kg(绿氢)	0.8元/kg(郑商所动力煤期货)	7.15元/升(0号柴油)	4.5元/kg(LNG出厂价格指数)	0.1-0.2元/kWh
单位热值成本	46.9-93.7元/GJ(煤制氢) 130-172元/GJ(PEM电解水制氢)	107.5-193.5元/GJ	34.6元/GJ	167.4	90	27.7-83.3元/GJ

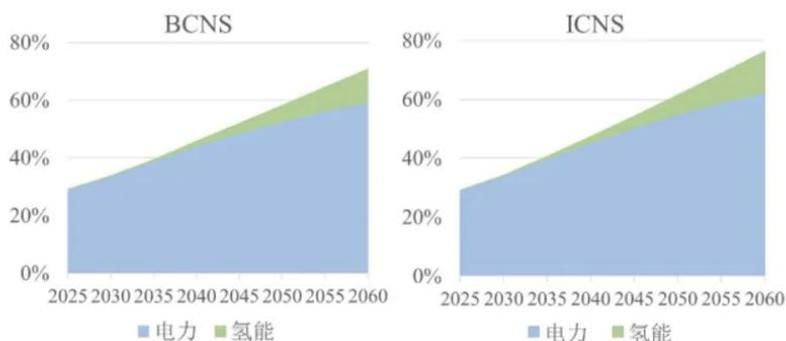
资料来源: Wind、国家电投集团氢能产业创新中心《氢能百问》，中国电力出版社，2022年第一版、王明华，《新能源电解水制氢技术的经济性分析》，现代化工，2023年5月第43卷第5期、科普中国《储氢新思路！把“氢”困在“氨”里？》、《不同应用场景下新能源制氨合成绿氨经济性分析》、汽车之家、上海本地宝、国信证券经济研究所整理 注：绿氢、绿氨和新能源电力的成本项均为生产成本，且假定制取氢、氨的电价为0.1-0.2元/kWh，煤炭、石油、天然气的成本项用市场价格表示

除此之外，核能利用还具有海水淡化、医用同位素生产等目前三代核电即可实现的综合利用形式，在此不再赘述。

1、核能热解制氢

目前，国内终端能源需求以煤炭、石油等化石能源为主，随着国家能源结构低碳化转型推进，未来低碳的电力和氢能将逐步成为终端能源需求的主要能源品种。根据国家发改委能源所发布的《中国能源转型展望2024—执行摘要》预测，未来终端能源将主要以电能和氢能为主，氢能占终端能源需求的比重将从目前的约等于0%增至2040年的2%左右，到2060年则进一步提升至12%-14%左右，氢能逐步成为国内终端能源需求的第二大能源品种。

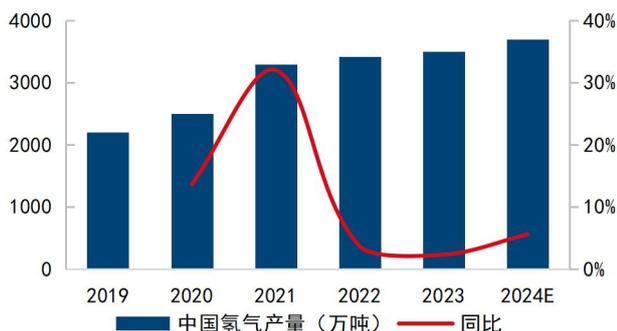
图24: 2025-2060年终端能源需求电能与氢能占比



资料来源: 国家发改委能源所《中国能源转型展望-执行摘要》，国信证券经济研究所整理 注: BCNS表示基准碳中和情景; ICNS表示理想碳中和情景

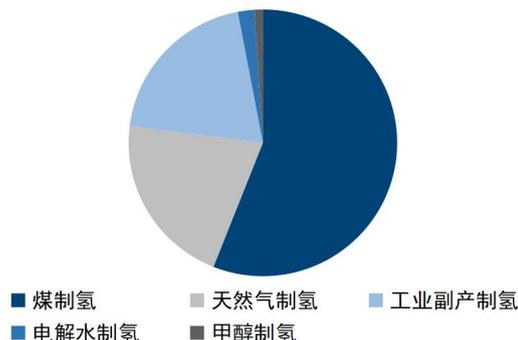
据中国氢能联盟研究院统计，2023年我国氢气产量约为3500万吨，占全球氢气总产量的三分之一以上，稳坐全球第一大产氢国的宝座。从制氢结构来看，目前以化石能源制氢为主，2022年煤制氢产量达到1985万吨，占比56%；其次为天然气制氢，占比21%。据中国氢能联盟数据，到2050年，若要实现净零排放，全球对氢气的需求量将达到6.6亿吨，其中中国约为1.95亿吨，占比近30%。从增速看，2020年~2050年间每10年中国氢气需求量平均复合增速为4.8%、10.6%、5.9%。

图25: 2019-2024 年中国氢气产量产量（万吨）



资料来源：中商产业研究院，国信证券经济研究所整理

图26: 不同制氢方式及占比

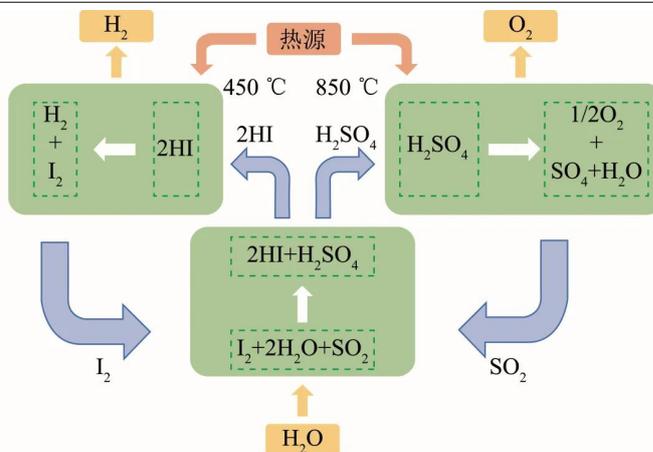


资料来源：中国氢能联盟研究院、国信证券经济研究所整理

氢气的低成本制备、规模化生产成为发展氢能的首要问题。氢能作为一种高效、清洁的能源载体在未来可以和可再生能源结合构成完整的能源系统，环境污染和化石能源危机进一步提高了未来氢能系统的关注程度。目前主流的制氢方法包括化石能源制氢、电解水制氢、工业副产氢、生物质制氢等技术，但在碳排放、效率、成本等方面各有不足，化石燃料重整、气化制氢产生的灰氢不满足绿色性的要求，只能作为氢能的短期解决方案；电解水制氢能量利用效率低，目前综合成本也相对较高；光解水制氢距离实用仍有较远距离。

核能+热解制氢成为氢能制备的未来解决方案之一。目前核能制氢方案主要是通过超高温气冷堆与高温蒸汽电解（HTSE）、蒸汽甲烷重整（SMR）以及碘硫循环（SI）三种工艺耦合实现。与其他方法相比，热化学硫碘循环分解水制氢是实现大规模、低成本、高效率的一种制氢技术，也是国际上工人最具应用前景的催化热分解方案。硫碘循环制氢可与多种热源进行耦合，如太阳能、核能和工业余热等。多种不同能源的适应特性，使其具有广泛而全面的推广特性，可适用于不同地区不同气候。此外，在产氢过程中不存在温室气体和有害气体的排放问题，满足国家节能减排的要求。而核能作为未来的“终极能源”形式，在碳排放、能量密度等方面具有明显优势，将核能与热解制氢结合起来也有利于提高核能的利用效率。但碘硫热解循环需要 850℃ 以上的高温，目前三代堆尚无法达到要求温度，而四代堆中的超高温气冷堆等堆型设计则可以实现。

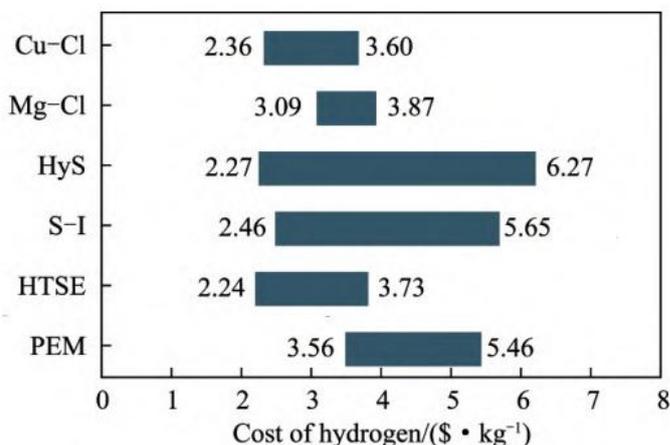
图27: 热化学硫碘循环水分解原理



资料来源：王智化等. 热化学硫碘循环水分解制氢研究进展[J]. 洁净煤技术, 国信证券经济研究所整理

IAEA 主要国家对核能制氢技术经济方面的协同研究，评估了潜在核能制氢方案的各种技术可能和经济性。相比质子交换膜（PEM）水电解制氢而言，热化学循环制氢虽然成本变动范围大，但下限更低，随制氢规模扩大和核反应堆技术成熟，热化学制氢成本可能进一步降低。

图28: 核能制氢不同工艺的成本范围



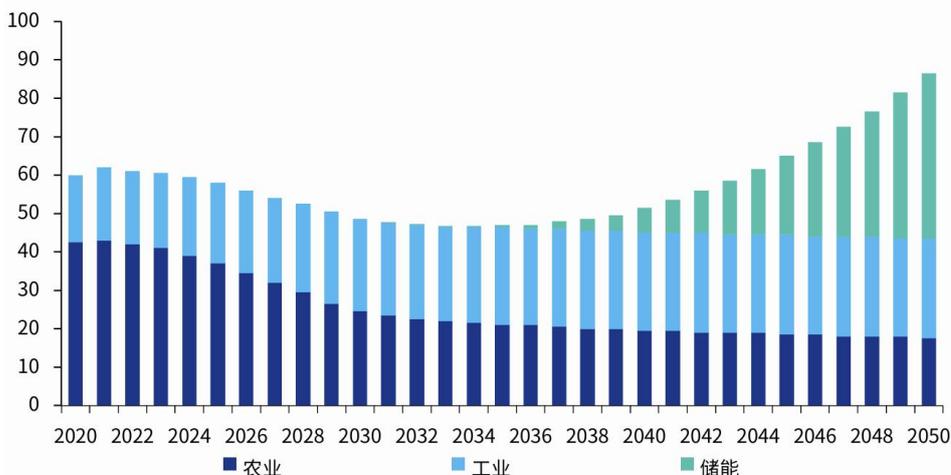
资料来源: EL —EMAM R S, OZCAN H. Comprehensive review on the techno— economics of sustainable large—scale clean hydrogen production [J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 220:593—609.; 王智化, 曾俊杰, 何勇, 等. 热化学硫碘循环水分解制氢研究进展[J]. 洁净煤技术, 2023, 29(11):1-24., 国信证券经济研究所整理 注: Cu-Cl/Mg-Cl/HyS/S-I 代表不同的热化学循环, HTSE 代表核驱动的高温蒸汽电解, PEM 代表质子交换膜水电解

当地时间 1 月 5 日，美国财政部和国税局发布 IRA 法案设立的第 45V 节氢气生产税收抵免的最终规则，其中对使用核能生产的“粉氢”规则有所调整，此前拟议规则禁止现有核电厂参与氢气生产项目，而新规定只要核电厂符合特定的退役风险明线指标以及对氢投资共同依赖指标，其所生产的电力将被视作增量电力，单个合格反应堆的增量电力最高可达 200MW。

2、核能制氢

氨具有极其重要的战略资源价值，未来氨能向绿氨转型。全球氨产量约每年 2 亿吨，其中我国合成氨年产量约 5000-6000 万吨。氨是现代工业的重要原料，废料、医药、塑料乃至硝基炸药等化工产品都离不开氨。在目前普遍采用的工业化合氨生产中，所需的氮元素可自空气中含量最高的氮气直接获得，而氢元素的来源目前主要为化石燃料，而最终将转变为依赖生物质与水。同时，制氨所需的能源也将从目前的化石能源走向风光核分布式制氨。与氢能类似，氨能也将由灰氨转型为蓝氨、绿氨。

图29: 合成氨在中国不同产业中的用量及预测



资料来源: 毕马威《固碳、储氢、航运燃料、掺混发电: 绿氨行业概览与展望》, 国信证券经济研究所整理

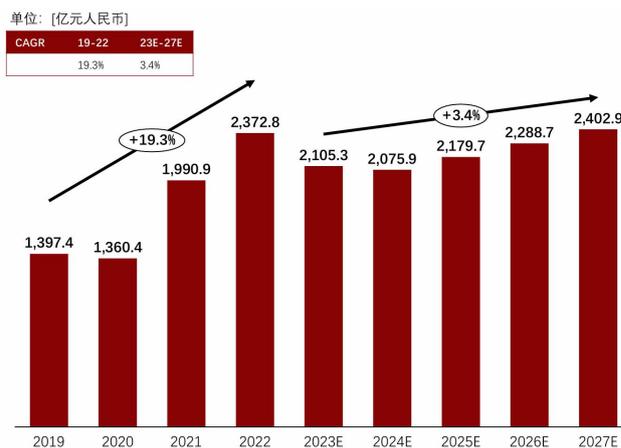
2027年合成氨市场规模有望突破2400亿元。中国合成氨行业作为化工领域五大行业之一, 具有较高的发展前景和消费潜力。受合成氨下游旺盛的市场需求以及国产化制氨技术发展的积极影响, 中国合成氨产量在近年来保持着稳定增长的趋势, 从2018年的4587.05万吨增长至2022年的5806.02万吨, 年均复合增长率为4.8%。据头豹产业研究院预测, 伴随着合成氨行业市场集中度提高、产能置换工作完成、中国农产品价格上涨拉动下游市场需求回暖等影响, 预计未来五年内中国合成氨行业市场规模的CAGR会稳定在5%左右的平稳发展趋势, 在2027年会到达该行业产量的峰值, 即7509.7万吨, 届时中国合成氨市场规模将达到2402.9亿元。

图30: 2019-2024年中国氢气产量产量(万吨)



资料来源: Wind, 国信证券经济研究所整理

图31: 中国合成氨行业市场规模, 2019-2027E



资料来源: 头豹产业研究院, 国信证券经济研究所整理

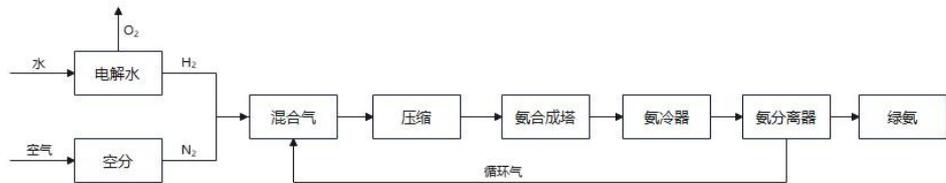
国际清洁氨市场逐步成型。据标普全球预计, 到2050年全球氨需求将飙升至6亿吨以上, 主要原因是航运和发电消费量不断增加。届时, 低碳氨预计将满足约三分之二的的需求, 即4.2亿吨。截至目前, 首批经认证的低碳氨已运往印度、日本等成熟氨市场, 美国许多氨生产项目也宣布转型蓝氨。欧洲是目前唯一一个拥有激励低碳氨的明确监管框架的市场, 随着2026年CBAM正式实施, 欧洲有望成

为蓝氨的关键市场¹²。

氨能源是一种以氨为基础的新能源，旨在用无碳化合物代替化石燃料来减少排放，是一种清洁能源。氨（NH₃）的特点在于其可完全由可再生能源（如水、电、空气）生产，在内燃机燃烧的氨，没有硫氧化物、二氧化碳、颗粒物的排放，氮氧化物也能通过广泛应用于柴油发动机尾气处理的 SCR 系统减排或移除。因此可以说氨是一种低碳、无污染、环境友好型能源。不仅如此，价格相对低廉，低空燃比，安全性高也是氨的特点。除此之外，氨可作为氢能载体，储存和运输更加方便、安全且更经济，重量载氢能力达 17.6%，体积载氢能力大于液氢，氨应用的安全性和储存运输的方便性能有效降低氢气的输运成本。

核能制氢是实现绿氨的方案之一。合成氨工艺主要基于 Haber-Bosch（哈伯法），反应压力 20-50MPa，反应温度 350-550℃ 之间，最佳温度约为 500℃，铁基催化剂活性最高，反应速度最快，虽然钨基催化剂可以在相对温和条件催化反应，但也需要 400℃ 左右。合成氨过程中的碳排放主要来自化石燃料制氢及维持反应温度消耗的燃料等方面。目前常规三代压水堆未经改造情况下无法达到哈伯法要求的温度条件，而四代堆则可以满足，以我国已投产的 HTR-PM 高温气冷堆为例，堆芯氨气出口温度 750℃，蒸汽温度可达 566℃。同时，若在核能制氢基础上延伸制氨工艺，则可实现合成氨全面去碳，实现绿氨要求。

图32: 绿氢制绿氨工艺流程图



资料来源：瓜州县商务局《绿氢、绿氨、绿色甲醇制取技术介绍》，国信证券经济研究所整理

附录：四代堆技术特征介绍

快堆：钠冷快堆、铅冷快堆、气冷快堆

实际上，核能发展初期就已经开始对快堆的研究，早在 1944 年春就已有建造快中子增殖堆建造的可能性的讨论¹³。快堆发展初期建造的小型实验快堆主要用于验证各种科学概念和快中子堆的可运行性；到了上世纪 70 年代，部分国家设计了一些商用快堆，加快推进商用化，建成了一些功率规模在 250MW-600MW 之间的原型快堆。但快堆作为核电站的可运行性得到验证后，商用的关键仍在于安全性和经济性，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¹⁴。

¹² 江苏省化学化工学会《全球清洁氨市场正起步》

¹³ 美国原子能协会主席 I. J. Seaborg《快堆工艺：核电厂设计》

¹⁴ 中国物理学会期刊网《钠冷快堆及其安全特性》

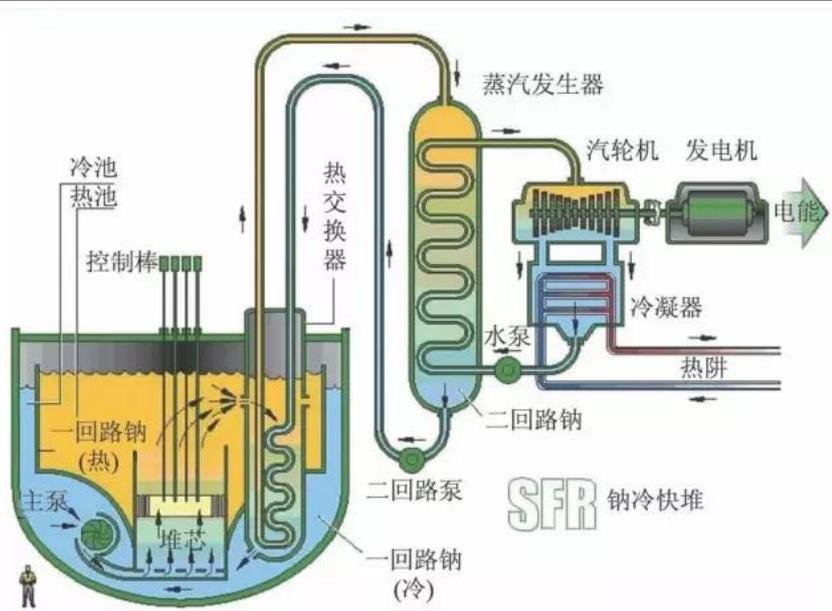
钠冷快堆是目前运行经验最丰富的先进核能系统，也是我国重点发展的堆型之一。钠冷快堆使用液态钠为冷却剂，钠具有中子吸收截面小、慢化能力弱、熔点低沸点高、导热性远高于水、热容较大、密度低于水、对多种钢种腐蚀性小等优势。钠还具有本征安全性，高热导率保证了堆芯和燃料不易过热，在一回路冷却系统失电时也可以快速导出剩余发热，在池式设计，钠较高的热容还可以形成热阱，缓冲事故过热。钠冷快堆通常在常压下运行，在系统的安全设计有一定优势，但同时由于钠的化学性质更活泼，与氧气、水均可剧烈反应，需要设计相应的保护措施以避免钠泄露事故，系统复杂度更高。

表4: 冷却剂物性表

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

资料来源：中国物理学会期刊网《钠冷快堆及其安全特性》，国信证券经济研究所整理

图33: 钠冷快堆系统示意图



资料来源：中国物理学会期刊网《钠冷快堆及其安全特性》，国信证券经济研究所整理

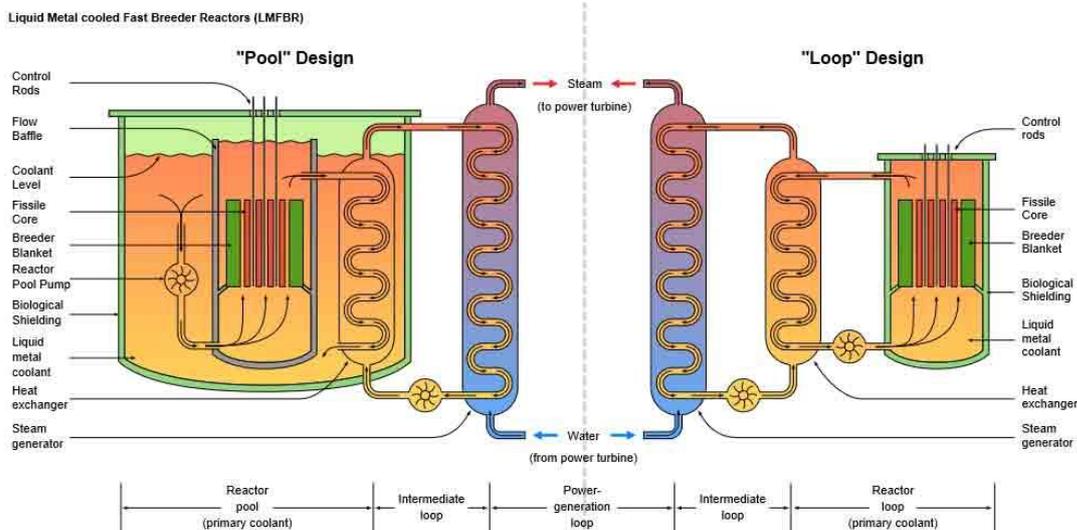
表5: 国外快堆发展情况

国家	快堆	堆型	类别	热/电功率 MW	冷却剂	燃料	运行时间
美国	Clementine	回路型	实验堆	0.025/0	Hg	Pu	1946-1952
	EBR-I	回路型	实验堆	1.2/0.2	NaK	U 合金	1951-1963
	LAMPRE	回路型	实验堆	1.0/0	Na	熔融 Pu	1961-1965
	FERMI	回路型	实验堆	200/66	Na	U 合金	1963-1975
	EBR-II	池型	实验堆	62.5/20	Na	U 合金 (U, Pu, Zr)	1963-1998
	SEFOR	回路型	实验堆	20/0	Na	UO ₂	1969-1972
	FFTF	回路型	实验堆	400/0	Na	(Pu, U)O ₂	1980-1996
	CRBR	回路型	原型堆	975/380	Na	(Pu, U)O ₂	
	ALMR	池型	商用堆	840/303	Na	(Pu, U, Zr) (Pu, U)O ₂	
	SAFR	池型	示范堆	873/350	Na	(Pu, U, Zr)	
俄罗斯(苏联)	BR-2	回路型	实验堆	0.1/0	Na	Pu	1956-1957
	BR-5/10	回路型	实验堆	5-10/0	Na	Pu, PuO ₂	1958-2003
	BOR-60	回路型	实验堆	60/12	Na	(Pu, U)O ₂	1969-
	BN-350	回路型	原型堆	700/130	Na	UO ₂	1972-1999
	BN-600	池型	原型堆	1470/600	Na	UO ₂	1980-
	BN-800	池型	商用堆	2000/800	Na	(Pu, U)O ₂	2014-
	BMN-170	池型	商用堆	425/170	Na	(Pu, U)O ₂	
	BN-1600	池型	商用堆	4200/1600	Na	(Pu, U)O ₂	
	BN-1800	池型	商用堆	4500/1800	Na	(Pu, U)O ₂	
	Rapsodie	回路型	实验堆	20-40/0	Na	(Pu, U)O ₂	1967-1983
法国	Phenix	池型	原型堆	653/254	Na	(Pu, U)O ₂	1973-2010
	SPX-1	池型	示范堆	3000/1242	Na	(Pu, U)O ₂	1985-1998
	EFR	池型	商用堆	3600/1500	Na	(Pu, U)O ₂	
德国	KNK-II	回路型	实验堆	60/21.4	Na	(Pu, U)O ₂	1977-1991
	SNR-300	回路型	原型堆	770/327	Na	(Pu, U)O ₂	1994
	SNR-2	回路型	示范堆	3420/1497	Na	(Pu, U)O ₂	
日本	JOYO	回路型	实验堆	100-140/0	Na	(Pu, U)O ₂	1977-
	MONJU	回路型	原型堆	714/318	Na	(Pu, U)O ₂	1994-
	DFBR	双池	示范堆	1600/660	Na	(Pu, U)O ₂	
	CFBR	池型	商用堆	3250/1300	Na	(Pu, U)O ₂	
英国	DFR	回路型	实验堆	60/15	NaK	U 合金	1959-1977
	PFR	池型	原型堆	600/270	Na	(Pu, U)O ₂	1974-1994
	CDFR	池型	示范堆	3800/1500	Na	(Pu, U)O ₂	
印度	FBTR	回路型	实验堆	42/12.5-15	Na	(Pu, U)C	1985-
	PFBR	池型	原型堆	1250/500	Na	(Pu, U)O ₂	2014-
韩国	KALIMER	池型	原型堆	392/162	Na	(U, Pu, Zr)	
意大利	PEC	回路型	实验堆	123/0	Na	(Pu, U)O ₂	

资料来源: 中国物理学会期刊网《钠冷快堆及其安全特性》, 国信证券经济研究所整理

根据结构设计的差异, 钠冷快堆可分为回路式钠冷快堆和池式钠冷快堆。回路式钠堆结构与热堆类似, 用管路将各个独立设备连接成回路系统, 泵和中间热交换器均布置在堆容器之外, 避免容器尺寸过大, 部署相对灵活。池式钠堆将堆芯、一回路钠循环泵和中间热交换器都浸泡在钠池内, 并在钠一回路和汽水回路间插入钠二回路, 形成三回路系统, 避免蒸汽发生器泄露造成放射性外泄; 三回路(汽水回路)可以产生过热蒸汽, 参数可接近常规火电厂水平。

图34: 池式（左）和回路式（右）钠冷快堆结构示意图

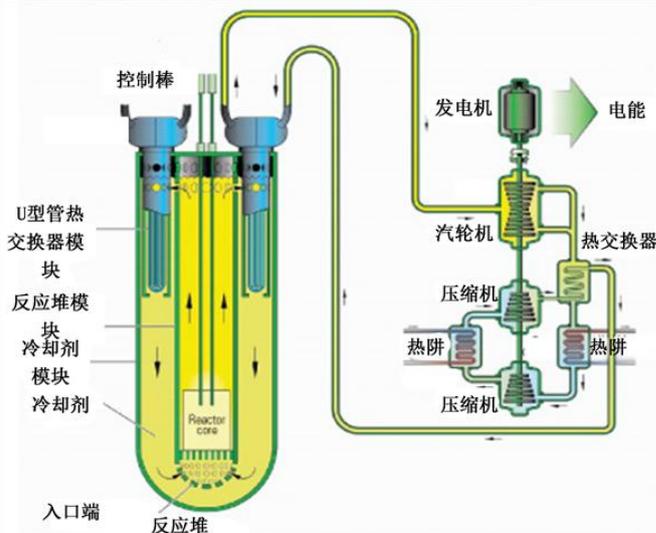


资料来源：GIF，国信证券经济研究所整理

除钠冷快堆外，快堆还有铅冷快堆和气冷快堆两种设计。

铅冷快堆（铅合金液态金属冷却快堆系统，LFR）指使用液态铅或铅铋合金作为冷却剂的快堆。由于铅铋合金密度高于钠，在相同体积下热阱效果优于钠冷却剂，导热性能逊于钠冷却剂但也可以实现反应堆余热的快速导出；此外由于铅铋合金化学性质相对惰性，具有良好的γ射线屏蔽性能，在系统安全性和复杂度上较钠冷快堆有一定优势。另一方面，由于液态铅对合金钢中的某些元素(如镍、铬)具有溶解性腐蚀能力，且熔点较高，密度较大，流动性较弱，需要保持较高温度防止冷却剂凝固堵塞，结构抗震也需要考虑冷却剂的高质量，此外铅铋合金（主要是铋）在反应堆中经中子辐照还可能生成放射性、强挥发性的剧毒物钋-210，铅冷快堆的发展仍面临挑战，应用场景相对受限。

图35: 铅冷快堆系统示意图

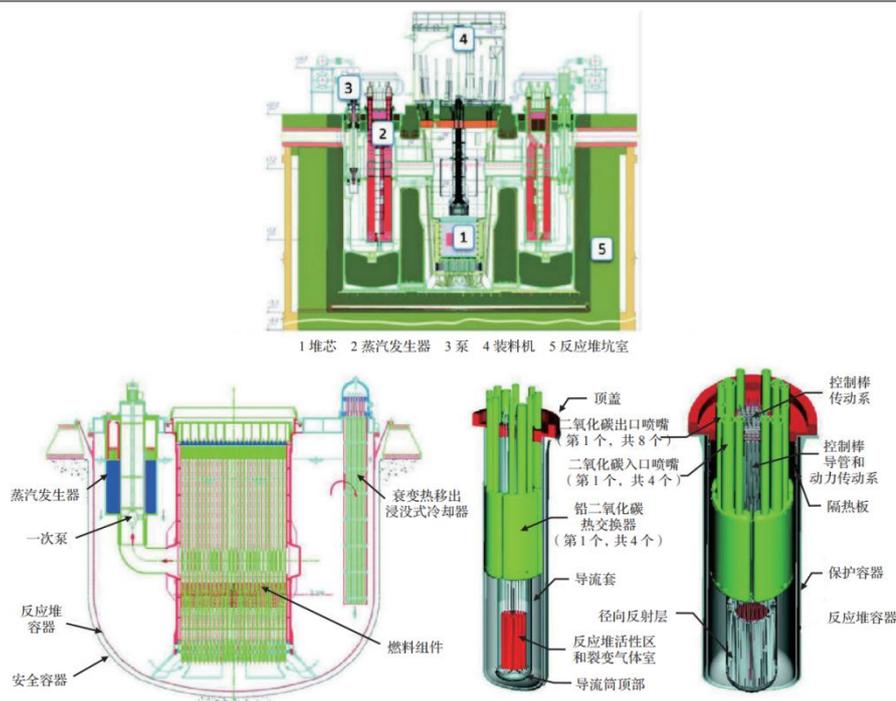


资料来源：韩金盛，刘滨，李文强. 铅冷快堆研究概述[J]. 核科学与技术，国信证券经济研究所整理

早在 20 世纪 50 年代，铅基材料就被应用在核裂变反应堆中，并且主要用于核潜艇动力装置，苏联第一艘试验性核潜艇 645 项目 1 艘核潜艇装载两座铅铋反应堆，705 项目 7 艘阿尔法级核潜艇各装载一座铅铋反应堆，得益于铅铋反应堆功率调节灵敏，阿尔法级核潜艇具有高速和优越的机动性能。21 世纪以来，俄罗斯积极推进将铅基反应堆用于商业核电站，Brest-OD-300 铅冷快堆拟于 2027 年启动，还计划在西伯利亚部署新一代更大型铅冷快堆；欧洲也形成了完成的铅基反应堆发展路线；我国确定了以铅铋反应堆作为加速器驱动次临界系统（ADS）反应堆的首选发展方向，并全面研发中国铅基反应堆（CLEAR），首座铅基核反应堆零功率装置启明星 II 号 2016 年月 12 首次实现临界，首座铅铋合金零功率反应堆启明星 III 号于 2019 年 10 月 9 日实现临界。

GIF 提供了三种铅冷快堆参考设计，即基于欧洲铅冷快堆（ELFR）概念的 600MW 大型系统、基于俄罗斯 BREST-OD-300（300MW）的中型系统和基于美国小型铅冷快堆（SSTAR）的小型可运输系统，分别代表了大型商用堆、中型示范堆和小型自然循环堆的发展方向。ELSY 采用闭式燃料循环，使用天然铀或贫化铀作为补充燃料；BREST-OD-300 则采用两回路热传输系统，堆芯外围不设增殖区，并使用氮化物燃料 PuN-UN，在密度、容纳气态裂变产物等方面具有性能优势；SSTAR 则设计为可运输小堆，为偏远地区提供电力供应，不需要现场装料，无需换料即可长期运行，使用超铀元素的氮化物作为燃料。

图36: Brest-OD-300（上）、ELFR（左下）和 SSTAR（右下）结构设计



资料来源：GIF，《铅冷快堆抗扩散与实物保护白皮书》，国信证券经济研究所整理

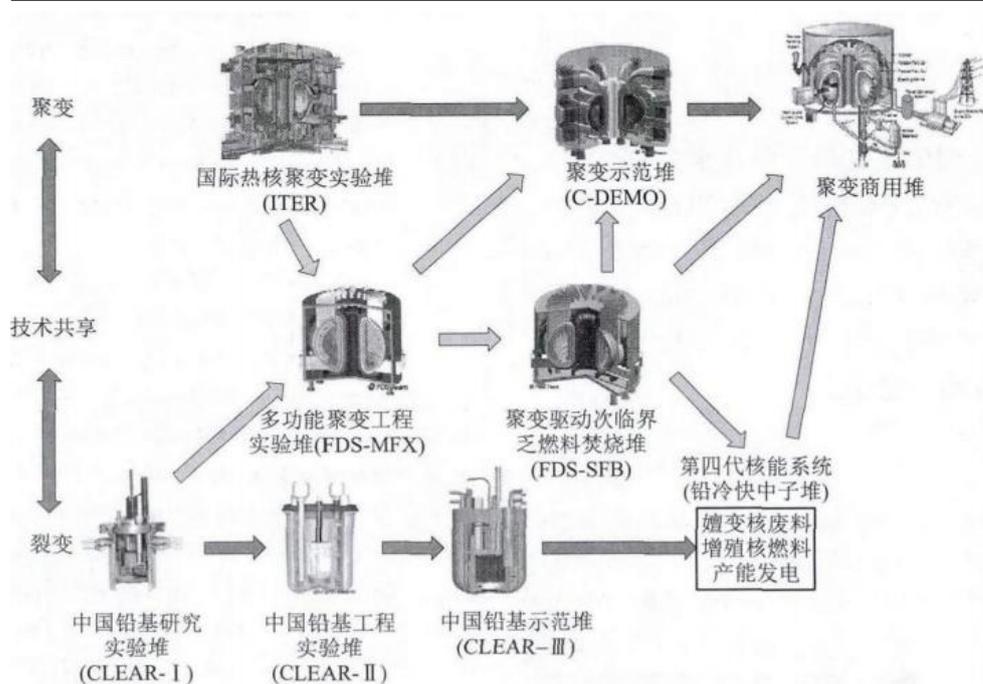
表6: 燃料物性表

物性	U	Pu	U-10%Er	UO ₂	PuO ₂	UC	PuC	UN	PuN
理论密度/(g/cm ³)	19	19.8	17.5	10.97	11.46	13.63	13.49	14.32	14.23
重金属含量/(g/cm ³)	19	19.8	15.75	9.68	10.1	13.0	12.9	13.5	13.47
熔点 (K)	1408	913	1429	3113	2665	2795	1925	3220	3070
线胀系数/(K ⁻¹)	18.6	-	14	12	13.6	12	13	10	12.5
导热系数(W/m*K)	31.8	8.8	14	12	13.6	12	13	10	12.5
重金属与燃料吸收截面比	1	-	0.9958	0.9997	0.9997	0.99985	0.99985	0.9308	0.95606

资料来源: 吴宜灿等. 《铅基反应堆研究现状及发展前景》, 国信证券经济研究所整理

铅基反应堆可形成完整的核能应用路线。铅基反应堆可以覆盖裂变技术和聚变技术, 在设计上可以应用于临界堆或次临界堆(需要外部中子源)。铅冷快堆在功能上包含发电、嬗变和增殖, 可用于大规模生产气, 用作动力装置, 也可以小型化偏远地区和小电网供电。此外, 由于铅基反应堆具有良好的中子经济性, 还可以用于钍反应堆。

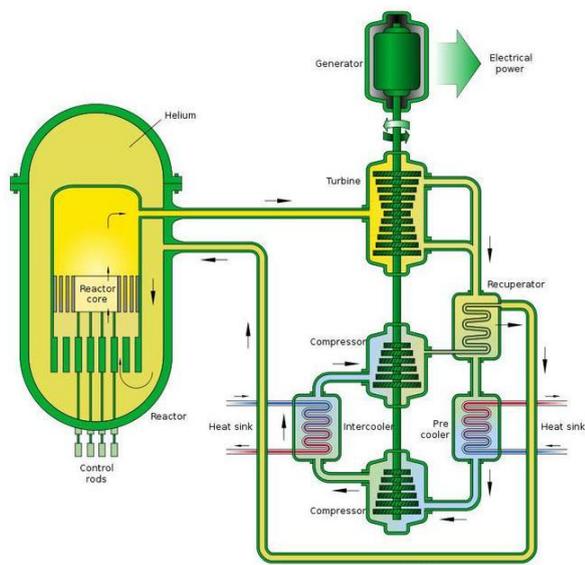
图37: 铅基反应堆在核能中利用的建议路线图



资料来源: 吴宜灿等. 《铅基反应堆研究现状及发展前景》, 国信证券经济研究所整理

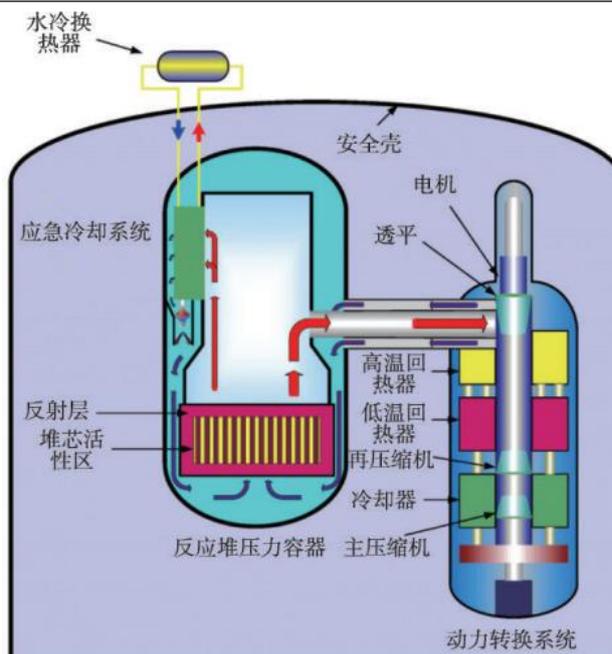
目前气冷快堆(GFR)的研究相对较少, GIF 建议用气冷快堆作为液态金属冷却快堆的长期替代方案。气冷快堆通常使用氦气作为冷却剂, 堆芯出口温度通常为800-850°C, 因此对燃料的连续运行要求较高, 需要较高的功率密度才能实现良好的中子经济性。GIF 的参考气冷快堆设计功率达2400MW, 采用三回路设计, 一回路为氦气间接循环, 二回路中氦气-氮气通过布雷顿循环直接驱动燃气轮机发电做功, 燃气轮机余热加热三回路蒸汽, 驱动蒸汽循环, 二三回路的燃气-蒸汽联合循环是天然气发电中的成熟技术。此外, 气冷快堆也可采用超临界二氧化碳作为冷却剂。

图38：气冷快堆示意图



资料来源：GIF，国信证券经济研究所整理

图39：二氧化碳气冷快堆参考设计示意图



资料来源：黄彦平，臧金光.《气冷快堆概述》，国信证券经济研究所整理

气冷快堆冷却剂核性能较好。气冷快堆采用气体作为冷却剂，相比与液态金属冷却剂具有更硬的中子能谱，理论上具有更高的增殖率和更短的燃料倍增时间，因此气冷快堆的燃料循环具有灵活性，能适应传统核燃料增殖和次锕系元素焚烧等燃料循环的要求，但同时堆芯中子泄漏率也更高，需要更多的燃料装载量和更高的富集度，中子辐照环境也更恶劣，对系统的安全性和防核扩散要求更高¹⁵。

气冷快堆通常高温高压运行，热对流部分实现固有安全性。气冷快堆堆芯出口温度较高，一般可达 850℃以上，因此具有更高的发电热效率，且可通过燃气-蒸汽联合循环提升系统效率，在功能上还可以供热、供汽和制氢。由于常压条件下气体密度较低，气冷快堆一般带压运行，氦气冷却快堆运行压力约 7MPa，超临界二氧化碳快堆运行压力约 20MPa。由于气体冷却剂热惯性小，在发生事故冷却剂强制循环失效时，气体和燃料温度易于迅速上升，加强热对流带出反应堆余热，但同时会给安全壳带来更大的压力载荷。热对流只能部分实现气冷快堆的固有安全性，仍需热传导、燃料结构设计以及其他能动和非能动的余热排出系统以保证气冷快堆的堆芯安全¹¹。

热堆：（超）高温气冷堆、超临界水堆、熔盐堆

GIF 在 2003 年提出的 6 种第四代核能系统候选技术中，三种热堆设计分别是超高温气冷堆（VHTR）、超临界水堆和熔盐堆，在 2010 年更新后将超高温气冷堆更改为超高温气冷堆/高温气冷堆（V/HTR），并说明包括的温度范围是 700-100℃。此外，超临界水冷对和熔盐堆概念中均存在快堆形式的设计。在无特殊说明的情况下，以下内容均用高温气冷堆代替超高温气冷堆/高温气冷堆。

高温气冷堆以“高温”和“气冷”两个主要特点区别于压水堆。高温气冷堆采用全陶瓷包覆颗粒燃料，使用石墨作为中子慢化剂，氦作为冷却剂，堆内核燃料和

¹⁵ 黄彦平，臧金光《气冷快堆概述》

其他材料均采用耐高温材料，工作温度和堆芯出口温度可达 850-1000℃。氦气作为冷却剂可直接通过布雷顿循环带动燃气轮机发电，也可以通过与水-蒸汽回路换热通过朗肯循环带动蒸汽轮机发电，还可以通过燃气-蒸汽联合循环进一步提高系统效率。目前在运高温气冷堆主要采用蒸汽循环系统，能量利用效率相对较低，未来可通过燃气轮机发电或不进行发电来提高高温气冷堆的能量利用效率。

高温气冷堆首堆已投产，江苏徐圩高温气冷堆获核准。2023 年 12 月 6 日，全球首座投入商业运行的第四代核电站中国华能石岛湾高温气冷堆示范工程圆满完成 168 小时连续运行考验，当日正式投入商业运行，机组包括两个反应堆模块，每个反应堆模块额定热功率为 250MW，两个模块共用一套汽轮机，总电功率为 20 万千瓦。石岛湾高温气冷堆示范工程首次在商业规模核电站上实现了“固有安全”，即突发故障或遭遇严重外部事件时，在不靠人为干预和应急冷却的情况下，反应堆堆芯不会熔化，放射性不会大量外泄。2024 年 8 月 19 日，国常会核准江苏徐圩核能供热厂一期工程，一期包括两台华龙一号和一台 HTR-PM600S 高温气冷堆，供汽能力为 4082t/h，发电功率为 1652.9MW，首台华龙一号和高温气冷堆同时开工，建设周期计划 60 个月。

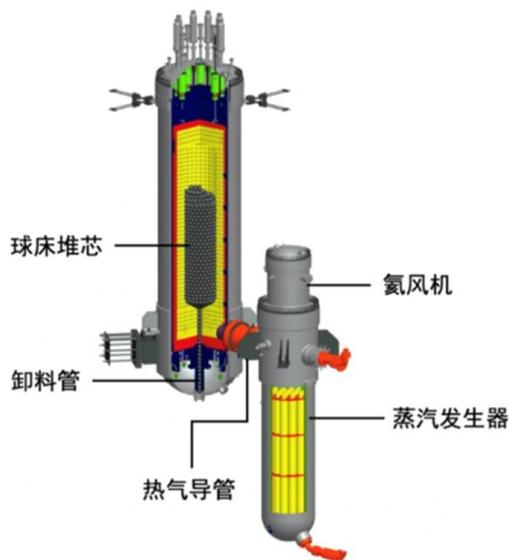
图40: 石岛湾高温气冷堆示范工程全貌



资料来源：中核集团，国信证券经济研究所整理

按照堆芯结构特点，高温气冷堆可分为球床堆和棱柱堆，其中我国高温气冷堆为球床堆，采用 TRISO 球形燃料元件，即由耐高温全陶瓷包覆颗粒球形核燃料元件。在石岛湾高温气冷堆示范工程，采用的燃料球直径 6 厘米，最外层是石墨层，内部基体石墨粉中弥散约 12000 个直径 0.9 毫米的核燃料颗粒，由四层全陶瓷材料包覆；反应堆堆芯直径 3m，高 11m，堆芯周边的反射层是耐高温的石墨；冷却剂氦气从反应堆顶部流过堆芯，进入和反应堆肩并肩布置的蒸汽发生器，冷却后的氦气由布置在蒸汽发生器壳顶部的氦气循环风机加压后流回反应堆。高温气冷堆顶部是加料口，底部有卸料口，可实现在线加料，换料无须停堆，燃料元件在使用周期内可能多次循环使用，直到经过检测无法使用为止。

图41: 高温气冷堆模块示意图



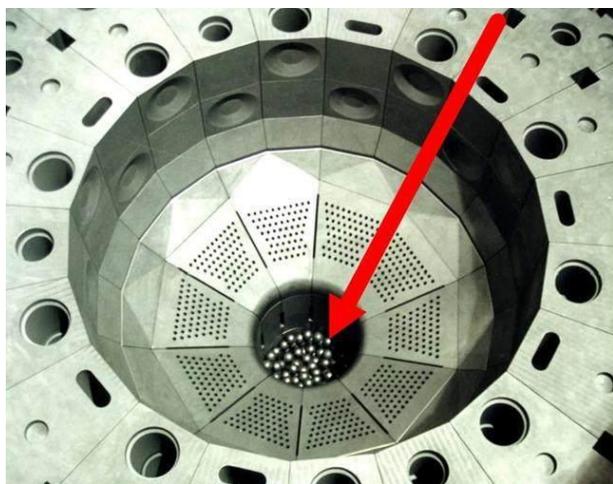
资料来源: 中科院物理所, 国信证券经济研究所整理

图42: 高温气冷堆 TRISO 球形燃料元件



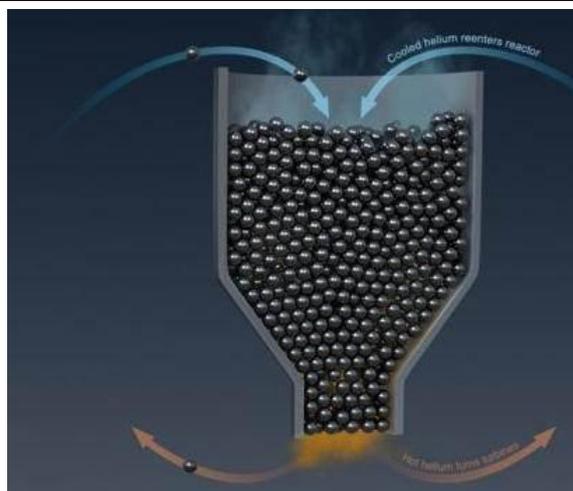
资料来源: 中国科普博览, 国信证券经济研究所整理

图43: 高温气冷堆加料示意图



资料来源: 中国科普博览, 国信证券经济研究所整理

图44: 高温气冷堆燃料元件循环利用



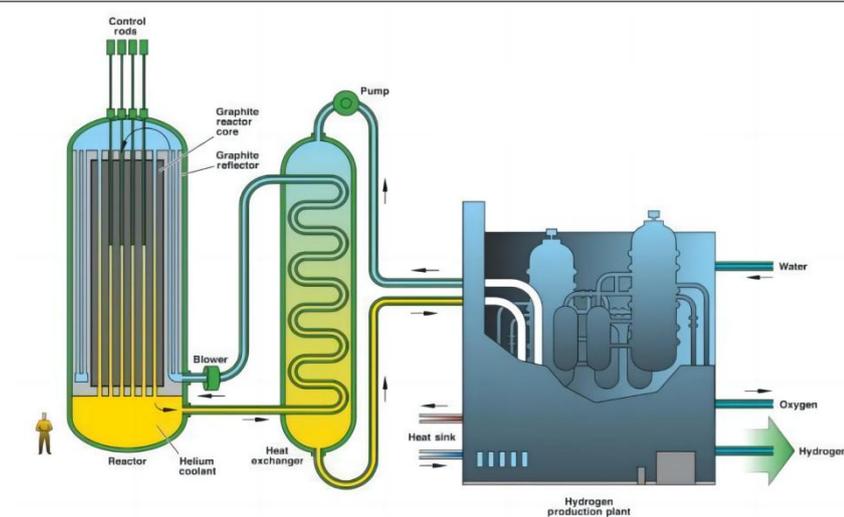
资料来源: 中国科普博览, Graham Templeton, 国信证券经济研究所整理

高温气冷堆具有固有安全性。高温气冷堆设计包括燃料的多普勒效应、慢化剂慢化作用随温度上升而下降、中子泄露几率增加等核性质, 以及通过热的传导、对流和辐射及时将堆芯热量导出, 通过这些负反应性温度系数来保证堆芯温度不会超过 1650℃。而 TRISO 燃料元件的包覆层设计则保证了 1650℃以下燃料球不会破损, 放射性物质不会泄露。因此, 高温气冷堆具有固有安全性, 号称“永不熔毁”, 即突发故障或遭遇严重外部事件时, 在不靠人为干预和应急冷却的情况下, 反应堆堆芯不会熔化, 放射性不会大量外泄。

高温气冷堆具有发电效率高、环境适应性强等优势, 可应用于热电冷联产等领域。

高温气冷堆使用氦气等气体作为冷却剂，出口温度可达 850℃ 以上，因此能量转换效率和发电效率可达 40% 以上。除发电和供汽外，高温气冷堆还可进行高温蒸汽电解，比传统电解水效率更高，是优秀的氢能来源。此外，由于高温气冷堆采用小型模块化设计，可以根据实际需求灵活配置容量，满足不同场景需要，占地面积也相对较小，可与化工基地、工业园区等下游需求方的临近设施配套同步建设。但同时高温气冷堆的功率密度较低，在发电经济性上可能存在一定劣势。

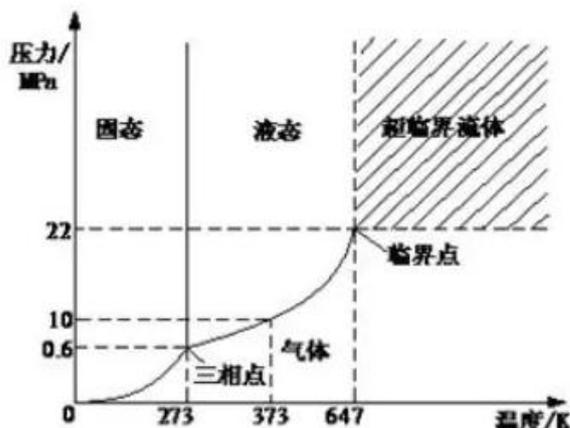
图45: 超高温气冷堆系统示意图



资料来源: GIF, 国信证券经济研究所整理

超临界水冷反应堆（SCWR）是一种高温高压水冷反应堆，是结合了现有水冷堆和超临界火电技术发展的四代核电设计。超临界水冷堆的主要特征在于，一回路冷却剂/慢化剂为水，但运行温度高于水的热力学临界点（374℃，22.1 MPa）。在温度和压力均超过临界点的情况下，水不会变成气体或液体，而是以超临界流体形态存在，在热力学性质上与水和蒸汽有所不同，具有粘度小、均质性强等特点。

图46: 水的相图

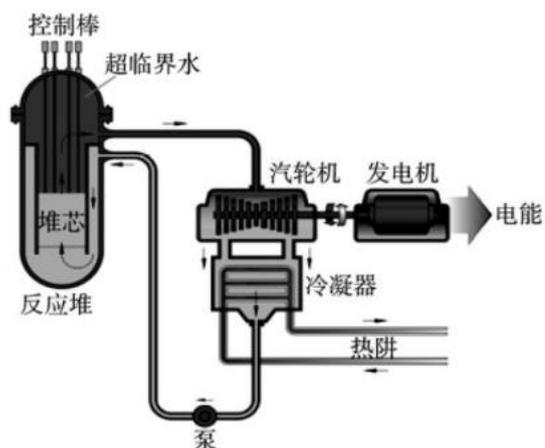


资料来源: 朱明善、刘颖、林兆庄，《工程热力学（第2版）》，清华大学出版社，国信证券经济研究所整理

典型超临界水冷堆与沸水堆设计类似，取消了二回路和蒸汽发生器，而是利用一回路的超临界水直接推动汽轮机进行发电。在系统压力 25MPa 情况下，反应堆的

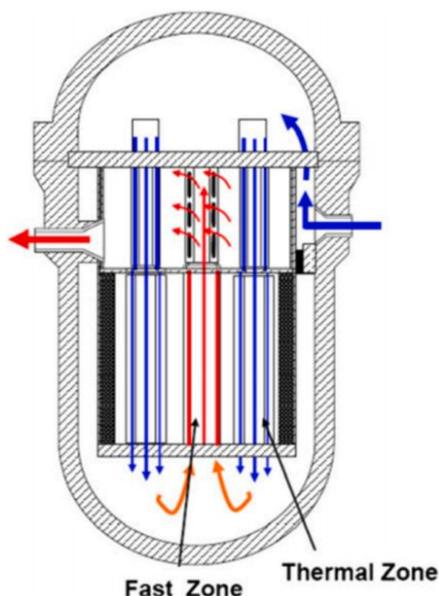
出口温度可达 508℃，装置净效率达 44%。在安全性方面，超临界水冷堆与目前在运水冷堆比较类似，包括急停堆系统、高压辅助给水系统、低压堆芯注射系统、安全释放阀、自动卸压系统和主蒸汽隔离阀等系统的非能动安全系统。一般而言，SCWR 的概念设计可分为压力容器和压力管两大类，主要是堆芯设计有所区别。SCWR 与现有水冷堆相比，具有系统简单，装置尺寸小，热效率高，经济性和安全性更好的特点。

图47: 超临界水堆系统示意图



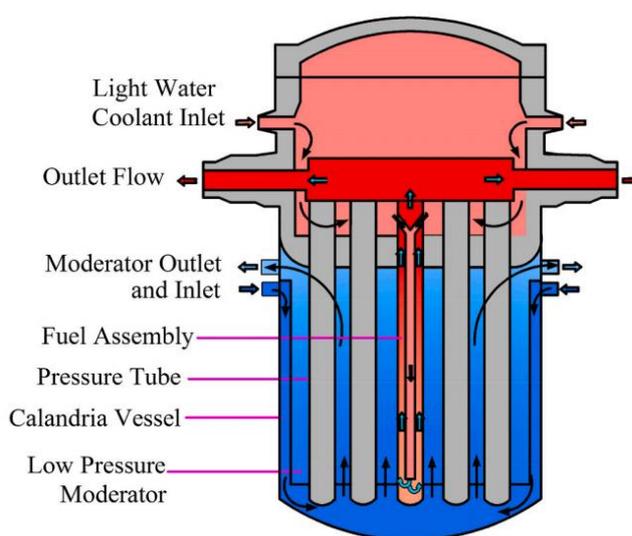
资料来源：李满昌、王明利，《核动力工程》：超临界水冷堆开发现状与前景展望，国信证券经济研究所整理

图48: 中国 GSR1000 压力容器式超临界水堆堆芯示意图



资料来源：Xu, Z., Hou, D., et al., 2011. Loss of flow accident and its mitigation measures for nuclear systems with SCWR-M. Ann. Nucl. Energy 38 (12), 2634 - 2644., 国信证券经济研究所整理

图49: 加拿大压力管式超临界水堆堆芯示意图

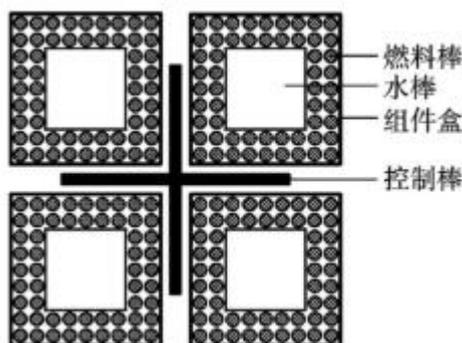


资料来源：Wu P., Ren Y.H., Feng M., et al. A review of existing SuperCritical Water reactor concepts, safety analysis codes and safety characteristics[J]. Progress in Nuclear Energy 153 (2022) 104409., 国信证券经济研究所整理

与三代水冷堆相比，超临界水冷堆主要优势在于安全性和经济性。由于超临界水在运行过程中不发生相变，冷却剂不易出现空泡，均质性较好，避免了堆芯传热的不连续性，因此超临界水冷堆运行的稳定性。由于超临界水冷堆工质温度、压力更高，因此能量利用效率更高，且系统有所简化，因此超临界水冷堆的经济性也较好。

此外，由于超临界水的慢化作用有所降低，在特殊设计下，可以形成快中子能谱，转换为超临界水冷快堆，或者兼具热谱和快谱的混合谱。不同的能谱设计可以通过调节堆芯内水铀比、燃料布置实现，如热堆的冷却剂流量较小，堆芯水铀比较小，能谱比传统轻水堆更硬。

图50: 我国 CSR1000 燃料组件示意图

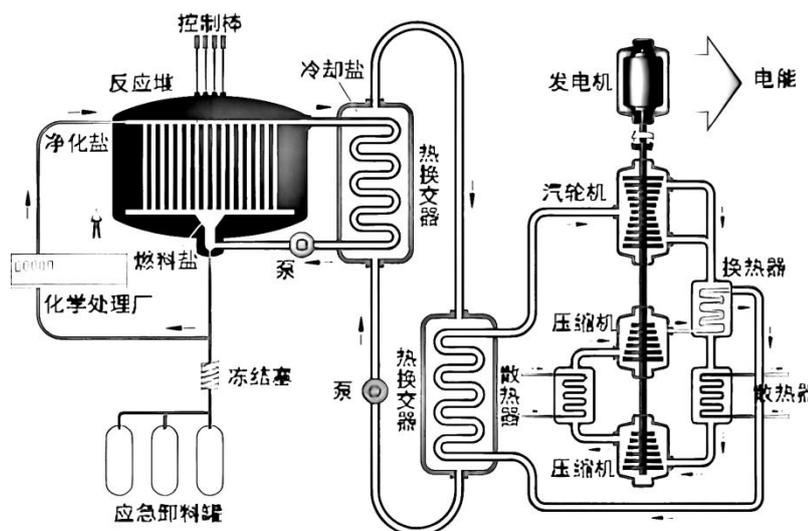


资料来源：夏榜样, 杨平, 王连杰, 等. 超临界水冷堆 CSR1000 堆芯初步概念设计 [J]. 核动力工程, 2013, 34 (01): 9-14. , 国信证券经济研究所整理

熔盐堆是指将裂变燃料（铀/钍的氟化物）溶解在高温熔融的氟盐冷却剂（如锂、钠等元素的氟化盐）中，或使用液体燃料的反应堆具有固有安全性和灵活性等优势。由于熔盐具有高温、低压、高沸点、稳定、高热容、高热导率等特性，熔盐堆可简称常压、紧凑、轻量化和低成本的反应堆，且运行时对冷却水的需求较少，可部署在干旱地区发电，输出温度较高，可实现核能综合利用，甚至美国橡树岭国家实验室最初提出“熔盐堆”概念设计时就打算将其用于核能飞行器推进计划。

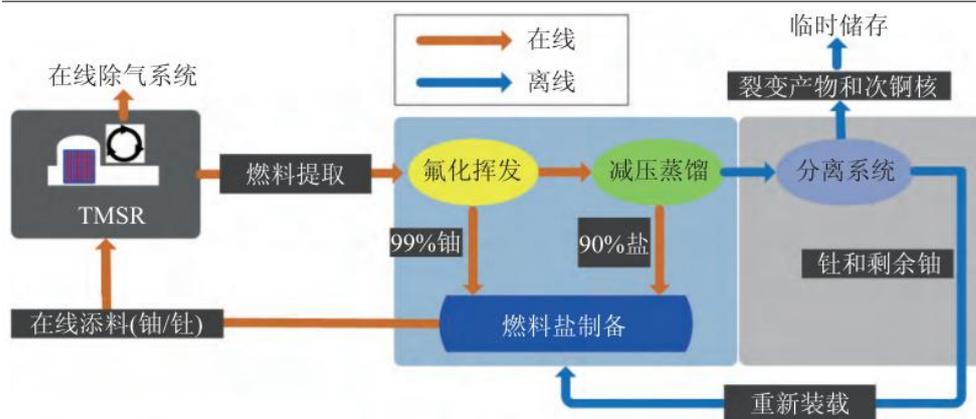
熔盐堆一回路使用熔融氟化盐作为燃料和冷却剂，在运行过程中可以在线加料和进行后处理，因此无需停堆换料，可连续运行。一回路还设计了通过冻结塞控制的非能动应急停堆系统，当堆芯温度过高时冻结塞融化，熔盐泄入下方应急储罐，终止反应。二回路可采用冷却熔盐，三回路采用汽-水循环推动汽轮机发电。

图51: 熔盐堆系统示意图



资料来源：经济日报《第四代核能系统：“钍”里“淘金”》，中国科学院，国信证券经济研究所整理

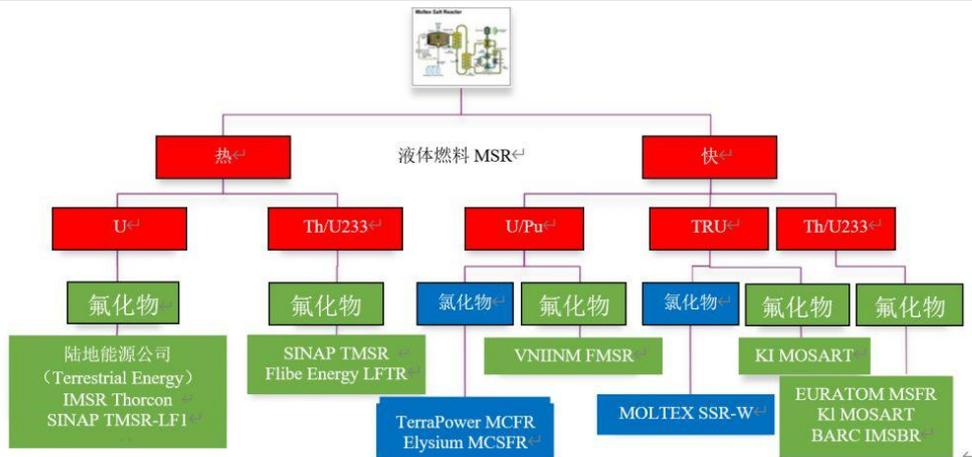
图52: 全闭式钍铀燃料循环



资料来源：蔡翔舟, 戴志敏, 徐洪杰, 《钍基熔盐堆核能系统》，中国科学院，国信证券经济研究所整理

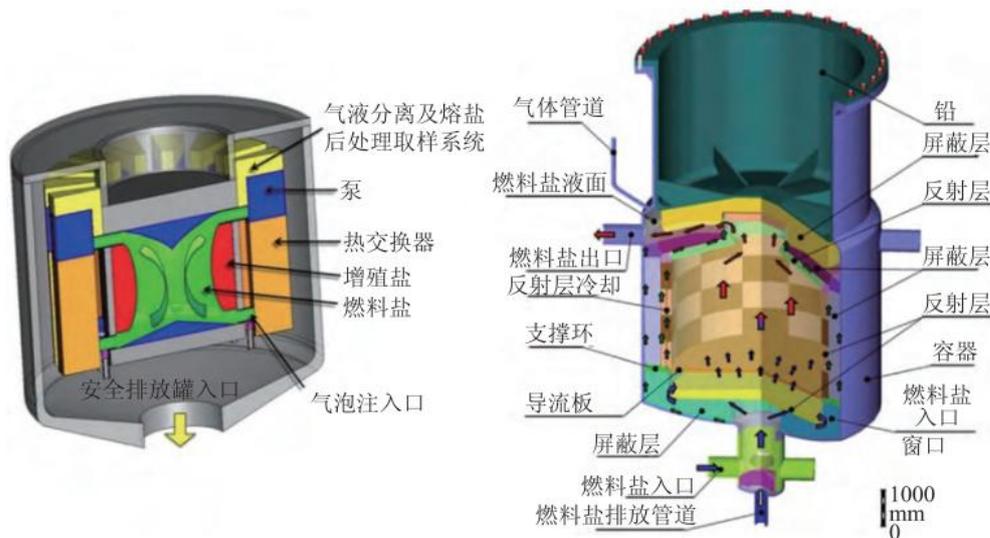
熔盐堆是一种“概念”，具有多种变体。熔盐堆既可采用钍-铀燃料循环（如法国 MSFR 设计），也可以使用超铀元素作为燃料的铀-钚燃料循环（如俄罗斯 MOSART 设计）；既可以直接将熔融态的燃料作为冷却剂形成快堆设计，也可以将燃料包裹在石墨微粒中形成热堆；既可以使用熔融燃料而不需要制造组件，也可以利用轻水堆产生的堆后铀或高浓缩铀、MOX 燃料，或者嬗变少量锕系元素；既可以部署大功率反应堆，也具有小型模块化反应堆设计。目前，熔盐堆的主要难点在于熔盐的温度控制、结构材料的强度和耐腐蚀性、在线燃料处理系统的分离效果等方面。

图53: 熔盐堆不同概念及主要参与者



资料来源: GIF, 国信证券经济研究所整理

图54: MSFR(左)和MOSART(右)示意图



资料来源: 蔡翔舟, 戴志敏, 徐洪杰, 《钍基熔盐堆核能系统》, 国信证券经济研究所整理

我国钍资源相对丰富，钍基熔盐堆发展前景开阔。相比于铀，钍大量存在于地壳表层，已探明储量约为铀的3-4倍，我国钍铀储量比约为6:1，已探明的钍工业储备量约为28万吨，居世界第二。此外，钍可以直接用作核燃料，不需要经过高浓缩，且丰度100%的钍-232可直接通过中子轰击转化成铀-233进入钍-铀燃料循环，相关测算显示，1吨钍裂变产生的能量大约相当于200吨天然铀，因此中科院将“钍基熔盐堆核能系统（TMSR）”作为首批战略性先导专项之一¹⁶。2023年6月，我国甘肃武威2MWt液态燃料钍基熔盐实验堆（TMSR-LF1）环评（运行阶段）获批复，取得运行许可证，目前已达到100%满功率运行¹⁷；中国科学院上海应用物理研究所发布小型模块化钍基熔盐堆研究设施项目环境影响报告书（选址阶

¹⁶ 经济日报《第四代核能系统：“钍”里“淘金”》

¹⁷ 武威日报《武威深度：向创新更深处奋楫前行》

段)》并于 2024 年 11 月或生态环境部受理,披露将新建 10MWe 小型模块化钍基熔盐堆(设计最大热功率 60MWt)和十升级干法分离研究装置,2025 年将建造世界上第一座钍基熔盐堆核电站,热功率 60MW,并计划于 2029 年首次临界并满功率运行¹⁸。

投资建议

核电发展加快,在电力系统中的作用凸显,成长空间和确定性较高。我国核电运营牌照具有稀缺性,建议关注目前唯二核电运营上市公司**中国核电**和**中国广核**,及筹划资产重组,注入国家电投集团旗下核电资产的**电投产融**。建议关注四代核电相关装备制造商。

风险提示

相关政策不及预期;技术发展不及预期;核事故风险;舆情风险。

¹⁸ 界面新闻《中国将建造全球首座钍基熔盐堆核电站》;南华早报《中国即将开建全球首座钍基熔盐堆核电站》

免责声明

分析师声明

作者保证报告所采用的数据均来自合规渠道；分析逻辑基于作者的职业理解，通过合理判断并得出结论，力求独立、客观、公正，结论不受任何第三方的授意或影响；作者在过去、现在或未来未就其研究报告所提供的具体建议或所表述的意见直接或间接收取任何报酬，特此声明。

国信证券投资评级

投资评级标准	类别	级别	说明
报告中投资建议所涉及的评级（如有）分为股票评级和行业评级（另有说明的除外）。评级标准为报告发布日后 6 到 12 个月内的相对市场表现，也即报告发布日后的 6 到 12 个月内公司股价（或行业指数）相对同期相关证券市场代表性指数的涨跌幅作为基准。A 股市场以沪深 300 指数（000300.SH）作为基准；新三板市场以三板成指（899001.CSI）为基准；香港市场以恒生指数（HSI.HI）作为基准；美国市场以标普 500 指数（SPX.GI）或纳斯达克指数（IXIC.GI）为基准。	股票 投资评级	优于大市	股价表现优于市场代表性指数 10%以上
		中性	股价表现介于市场代表性指数 $\pm 10\%$ 之间
		弱于大市	股价表现弱于市场代表性指数 10%以上
		无评级	股价与市场代表性指数相比无明确观点
	行业 投资评级	优于大市	行业指数表现优于市场代表性指数 10%以上
		中性	行业指数表现介于市场代表性指数 $\pm 10\%$ 之间
		弱于大市	行业指数表现弱于市场代表性指数 10%以上

重要声明

本报告由国信证券股份有限公司（已具备中国证监会许可的证券投资咨询业务资格）制作；报告版权归国信证券股份有限公司（以下简称“我公司”）所有。本报告仅供我公司客户使用，本公司不会因接收人收到本报告而视其为客户。未经书面许可，任何机构和个人不得以任何形式使用、复制或传播。任何有关本报告的摘要或节选都不代表本报告正式完整的观点，一切须以我公司向客户发布的本报告完整版本为准。

本报告基于已公开的资料或信息撰写，但我公司不保证该资料及信息的完整性、准确性。本报告所载的信息、资料、建议及推测仅反映我公司于本报告公开发布当日的判断，在不同时期，我公司可能撰写并发布与本报告所载资料、建议及推测不一致的报告。我公司不保证本报告所含信息及资料处于最新状态；我公司可能随时补充、更新和修订有关信息及资料，投资者应当自行关注相关更新和修订内容。我公司或关联机构可能会持有本报告中所提到的公司所发行的证券并进行交易，还可能为这些公司提供或争取提供投资银行、财务顾问或金融产品等相关服务。本公司的资产管理部门、自营部门以及其他投资业务部门可能独立做出与本报告中所提及的意见或建议不一致的投资决策。

本报告仅供参考之用，不构成出售或购买证券或其他投资标的的要约或邀请。在任何情况下，本报告中的信息和意见均不构成对任何个人的投资建议。任何形式的分享证券投资收益或者分担证券投资损失的书面或口头承诺均为无效。投资者应结合自己的投资目标和财务状况自行判断是否采用本报告所载内容和信息并自行承担风险，我公司及雇员对投资者使用本报告及其内容而造成的一切后果不承担任何法律责任。

证券投资咨询业务的说明

本公司具备中国证监会核准的证券投资咨询业务资格。证券投资咨询，是指从事证券投资咨询业务的机构及其投资咨询人员以下列形式为证券投资人或者客户提供证券投资分析、预测或者建议等直接或者间接有偿咨询服务的活动：接受投资人或者客户委托，提供证券投资咨询服务；举办有关证券投资咨询的讲座、报告会、分析会等；在报刊上发表证券投资咨询的文章、评论、报告，以及通过电台、电视台等公众传播媒体提供证券投资咨询服务；通过电话、传真、电脑网络等电信设备系统，提供证券投资咨询服务；中国证监会认定的其他形式。

发布证券研究报告是证券投资咨询业务的一种基本形式，指证券公司、证券投资咨询机构对证券及证券相关产品的价值、市场走势或者相关影响因素进行分析，形成证券估值、投资评级等投资分析意见，制作证券研究报告，并向客户发布的行为。

国信证券经济研究所

深圳

深圳市福田区福华一路 125 号国信金融大厦 36 层
邮编：518046 总机：0755-82130833

上海

上海浦东民生路 1199 弄证大五道口广场 1 号楼 12 层
邮编：200135

北京

北京西城区金融大街兴盛街 6 号国信证券 9 层
邮编：100032