

清洁能源：核能

## 能源转型的核剧本

自20世纪50年代首次开发以来，核能技术一直被证明是可行的。然而，由于政策和公众支持的波动，以及成本和安全挑战，核能的发展一直不均衡。如今，随着创新、投资和政策支持的增强，核技术有望迎来显著的增长，尤其是在全球电力需求日益增长，对可靠、全天候和清洁的电力来源的需求日益增加的背景下。这一点在越来越多的国家支持COP28宣言中尤为明显，该宣言旨在到2050年将核能产能提高三倍，目前拥有~440个反应堆的核能舰队预计到2030年将扩大到~500个，同时还有超过400个额外的反应堆正在规划和提议中。

根据世界核协会（WNA）的数据，有几十年。在此背景下，我们强调了核能价值链中广泛存在的材料、技术和服务业的机会。我们的投资者路线图旨在利用核能主题的优势，列出了14只在我们GS覆盖范围内的股票，包括Cameco、Mirion technologies、三菱重工和南方公司等，这些股票在我们的买入评级中占据最大比例。



Brian Lee, CFA  
+1 917 343-3110  
brian.k.lee@gs.com  
高盛公司

尼克·卡什  
+1 212 357-6372  
nick.cash@gs.com  
高盛公司

卡莉·达文波特  
+1 212 357-1914  
carly.davenport@gs.com  
高盛公司

Tyler Bisset, CFA  
+1 212 357-5510  
tyler.bisset@gs.com  
高盛公司

原田良  
+81 3 4587-9865  
ryo.harada@gs.com  
高盛日本有限公司。

市山裕一郎  
+81 3 4587-9806  
yuichiro.isayama@gs.com  
高盛日本有限公司。

乔·里奇  
+1 212 357-8914  
joseph.ritchie@gs.com  
高盛公司

高盛与在其研究报告中提及的公司有业务往来。因此，投资者应意识到，该公司可能存在影响报告客观性的利益冲突。投资者应将本报告作为做出投资决策时的一个参考因素。有关注册AC认证及其他重要披露，请参阅披露附录，或访问[www.gs.com/research/hedge](http://www.gs.com/research/hedge)网站。html。非美国附属公司雇佣的分析师未在美国金融监管局注册/获得研究分析师资格。

高盛集团。

PM总结：核能成为能源转型的关键驱动力

自20世纪50年代首次被开发以来，核能一直是一种可行且经过验证的技术。但由于政策和公众支持的波动，以及成本和安全方面的挑战，核能的增长一直不稳定。如今，随着创新、投资和政策支持的不断加强，核技术正迎来显著的增长转折点。在全球电力需求日益增长，对可靠、全天候和清洁的电力来源的需求日益增加的背景下，这一点尤为明显。最显著的是，越来越多的国家支持COP28宣言，承诺到2050年将核能产能提高三倍。目前，全球核反应堆总数约为~440座，预计到2030年将增至~500座，未来几十年内还将有超过400座新的反应堆被规划和提议，根据世界核电协会的数据。在此背景下，我们强调了核能价值链中广泛存在的材料、技术和服务业机会，并通过我们的投资者路线图，展示了14只在我们全球股票覆盖范围内的股票，如图1所示。

附录1：我们强调了14只在GS覆盖范围内的股票，我们认为它们对核能机会的杠杆作用最好，无论是在价值链的上游还是下游GS核股在覆盖范围内

| 公司           | 老式的股票价格收报机 | 集市盖 (\$bn) | 价格       | 12-mo PT | 上行/下行 | 分析员            | 评级 | 核暴露                    |
|--------------|------------|------------|----------|----------|-------|----------------|----|------------------------|
| 铀和燃料         |            |            |          |          |       |                |    |                        |
| 卡梅科公司        | 胆囊空肠吻合术    | \$22.5     | \$51.27  | \$65     | 27%   | Brian Lee, CFA | 购买 | <div><div></div></div> |
| 反应堆技术、制造和服务  |            |            |          |          |       |                |    |                        |
| 日立有限公司。      | 6501.T     | \$120.8    | ¥3,816   | ¥4,900   | 28%   | 原田良            | 购买 | <div><div></div></div> |
| GE Vernova   | 盖夫         | \$117.3    | \$428.06 | \$500    | 17%   | 乔·里奇           | 购买 | <div><div></div></div> |
| 三菱重工有限公司。    | 7011.T     | \$66.1     | ¥2,830   | ¥3,000   | 6%    | 市山裕一郎          | 购买 | <div><div></div></div> |
| 三菱电机株式会社     | 6503.T     | \$42.1     | ¥2,935   | ¥3,600   | 23%   | 原田良            | 购买 | <div><div></div></div> |
| 卡梅科公司        | 000010.T   | \$22.5     | \$51.27  | \$65     | 27%   | Brian Lee, CFA | 购买 | <div><div></div></div> |
| IHI公司        | 7013.T     | \$13.3     | ¥12,930  | ¥13,000  | 1%    | 市山裕一郎          | 购买 | <div><div></div></div> |
| 流体服务公司。      | FLS        | \$6.8      | \$51.62  | \$54     | 5%    | 乔·里奇           | 中性 | <div><div></div></div> |
| NuScale电力公司  | SMR        | \$6.9      | \$24.17  | \$24     | -1%   | Brian Lee, CFA | 中性 | <div><div></div></div> |
| 米里昂科技公司。     | 米          | \$3.9      | \$17.23  | \$20     | 16%   | 乔·里奇           | 购买 | <div><div></div></div> |
| 所有者/经营者      |            |            |          |          |       |                |    |                        |
| 南方公司         | 尼的         | \$97.4     | \$88.71  | \$102    | 15%   | 卡莉·达文波特        | 购买 | <div><div></div></div> |
| 杜克能源公司       | 杜克         | \$89.9     | \$116.26 | \$125    | 8%    | 卡莉·达文波特        | 中性 | <div><div></div></div> |
| 多米尼安能源公司     | D          | \$46.8     | \$55.77  | \$61     | 9%    | 卡莉·达文波特        | 中性 | <div><div></div></div> |
| 公共服务企业集团有限公司 | 钉          | \$39.6     | \$79.29  | \$83     | 5%    | 卡莉·达文波特        | 中性 | <div><div></div></div> |
| 维斯达公司        | VST        | \$55.2     | \$156.62 | \$134    | -14%  | 卡莉·达文波特        | 中性 | <div><div></div></div> |

25%或以下

25%至50%

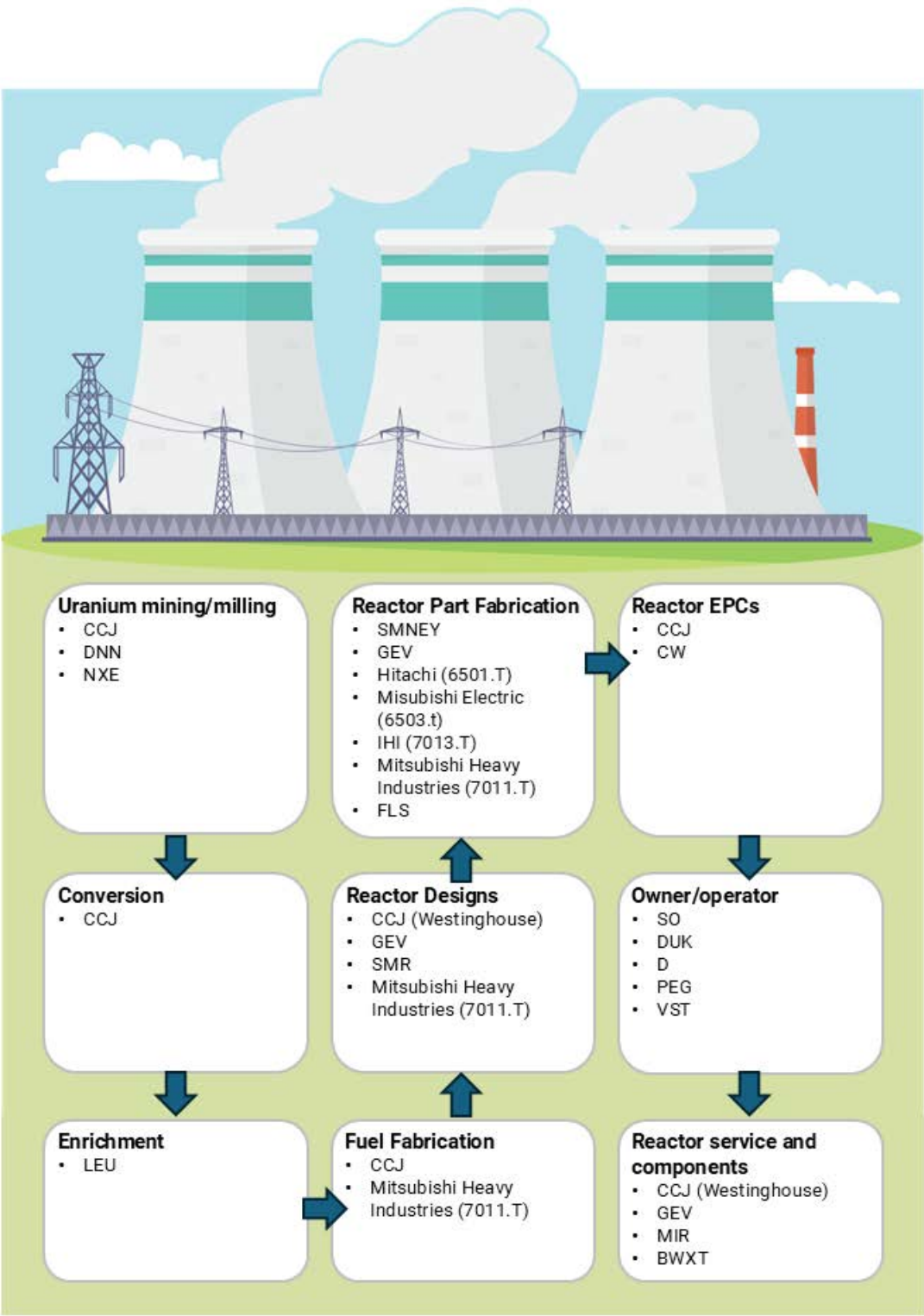
50%至75%

>75%

截至2025年5月16日的价格

资料来源：高盛全球投资研究

附表2：核电价值链各环节的上市公司



资料来源：高盛全球投资研究

# 核能用途很多，但能源是关键的重点和增长动力

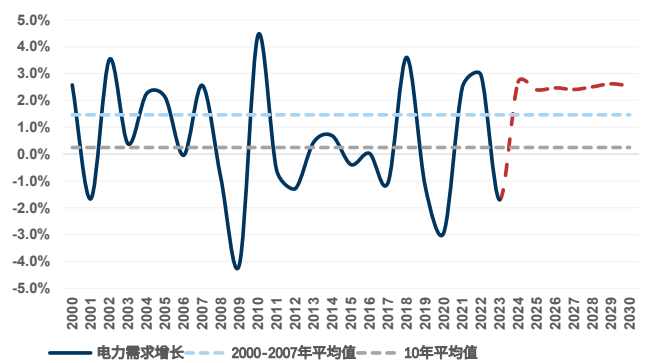
## 核能用于什么？

核能的应用范围广泛，从核电到武器（使用铀-235），再到放射性活动、治疗和成像（使用不同的同位素）。近年来，随着各国重新评估核能技术，尤其是在多年投资不足之后，核能已成为全球关注的焦点。我们强调，核能发电是清洁且最可靠的能源之一。

目前能源综合体中对核能需求增加的主要驱动因素包括：

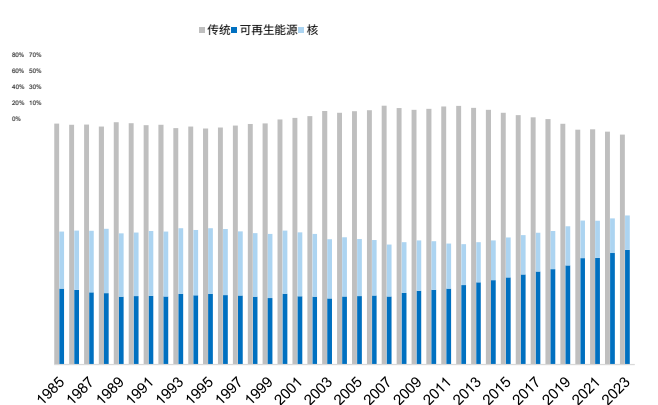
- 由于人口增长、电气化、电动汽车、数据中心等，电力消耗增加。
- 随着各国寻求可再生能源、电池存储、核能等更低排放的替代能源，清洁能源的转变正在进行中。
- 对更多基荷电力的需求，因为太阳能、风能和水力等可再生能源是间歇性的，并不能全天候可靠运行，而核能是无排放的，并且可以作为一种高容量因素的基荷发电资源，类似于煤炭/天然气。

图3：到2030年，整体电力需求增长估计值仍高于10年平均  
值2.5%  
用电需求



资料来源：EIA，高盛全球投资研究

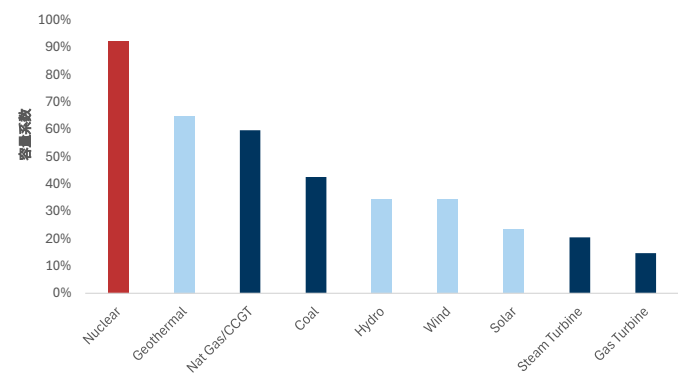
图4：清洁能源在全球能源中所占比例更大  
全球能源结构百分比，1985年至今



资料来源：EIA



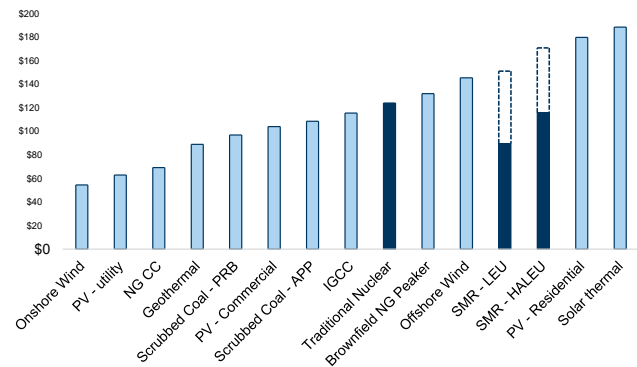
图5：核能发电的容量系数是所有电力来源中最高的  
不同发电类型2024年年度容量系数



资料来源：EIA

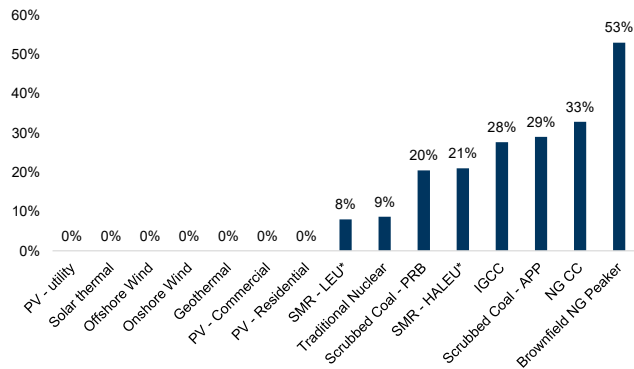
从成本角度来看，我们估计传统核能和小型模块化反应堆（SMRs）的平准化电力成本（LCOE）差异显著。在我们的基准案例中，传统核能的LCOE大约为~125美元/兆瓦时，而小型模块化反应堆达到批量生产时，其LCOE可能降至~100美元/兆瓦时或更低。这一成本差异很大程度上取决于新建核电站的实际建设成本，而这些成本的估计仍然存在较大差异，并且各国之间也有所不同。值得注意的是，由于核电站建设需要专门的技术和设施，加上历史上成本超支的情况，核能的资本成本高于大多数其他类型的发电方式。这导致了这些项目的建设成本存在较大差异，使得它们的建设成本难以准确预测。与传统核反应堆相比，小型模块化反应堆（SMRs），尤其是使用高浓缩低浓度铀（HALEU）作为燃料的SMRs，其燃料成本占LCOE的比例更高，因为HALEU比传统燃料更昂贵，而SMRs的初始建设成本较低。我们预计，HALEU燃料将至少占SMRs总LCOE成本的~25%，同时由于目前供应不足，HALEU燃料还带来了更广泛的供应链风险。

图6：SMR技术一旦进入稳定状态，预计将成为发电领域LCOE最低的技术之一  
LCOE适用于各类发电



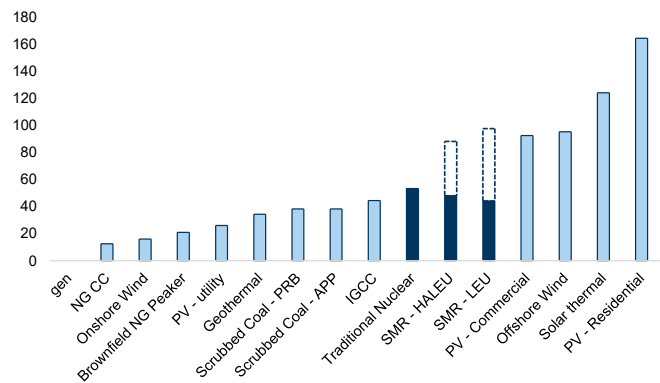
资料来源：高盛全球投资研究

图7：小型模块化反应堆燃料成本占LCOE的百分比与基于低浓缩铀的小型模块化反应堆传统核能相当，但HALEU的这一比例要高得多  
燃料成本占LCOE的百分比



资料来源：高盛全球投资研究

图8：当小型模块化反应堆达到第n个时，我们预计其资本成本将低于传统核能  
资本成本占LCOE的比例

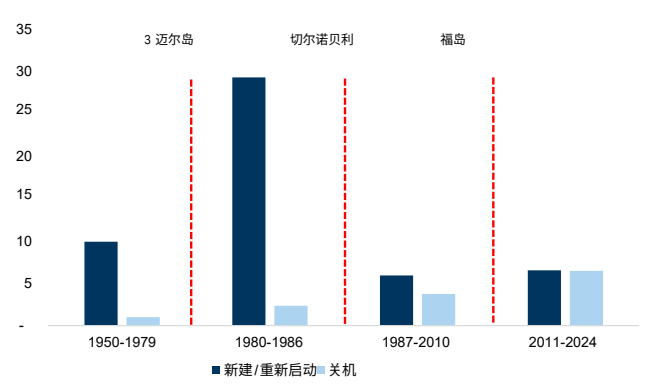


资料来源：高盛全球投资研究

## 核能——增长到停滞，再回到增长？

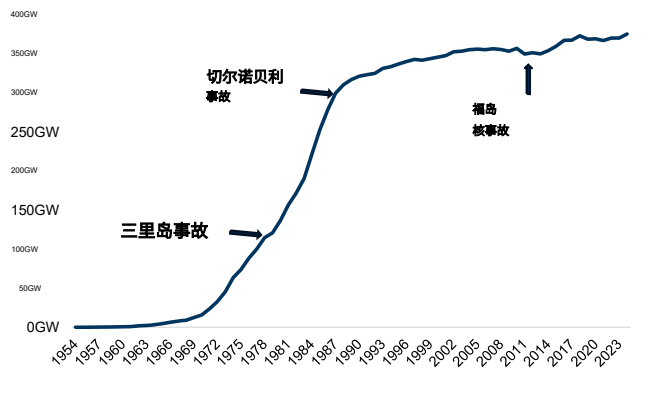
核能在能源领域的历史可以追溯到1950年代，当时美国启动了首个核反应堆。尽管核能被认为是电网中最清洁、最可靠的发电方式之一，但自全球多起重大事故后，公众对核能的想法和接受度逐渐下降，这些事故引发了对核技术的广泛质疑。实际上，在1979年三里岛事故之前，每关闭一个核反应堆，大约会有10个新反应堆启动，这表明核能在能源结构中的重要性日益增加。然而，1986年的切尔诺贝利事故发生后，核能建设的步伐显著放缓，从三里岛事故后的短短七年，到2010年代初，每年只有6个新反应堆启动，而关闭的平均数量为每年4个。2011年福岛核事故的发生，显著影响了全球对核技术及其安全性和可靠性的看法。过去十五年间，每年新建和关闭的核反应堆数量基本持平，导致整个核能产业链长期投资不足，因为核能领域的新增长有限。

图9：在经历了一段快速增长后期后，过去十年间新建的核反应堆被关闭所抵消  
平均每年新建反应堆数量与每年关闭的反应堆数量



资料来源：PRIS，由高盛全球投资研究汇编的数据

图10：核电站的建设始于20世纪50年代，但在21世纪停滞不前  
全球核能历史累计GW

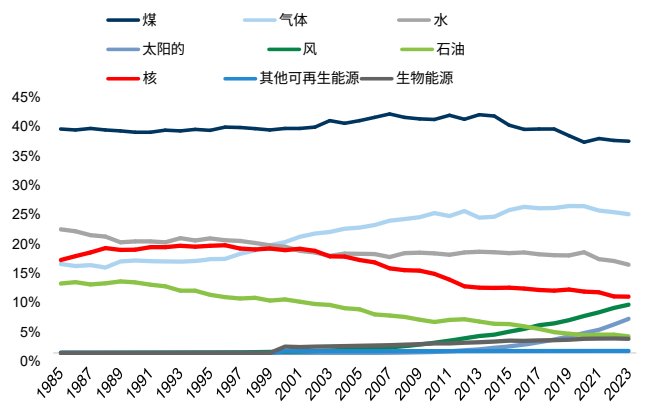


资料来源：PRIS，高盛全球投资研究

核能在全球电力结构中的重要性已经减弱，对该行业的投资也有所减少

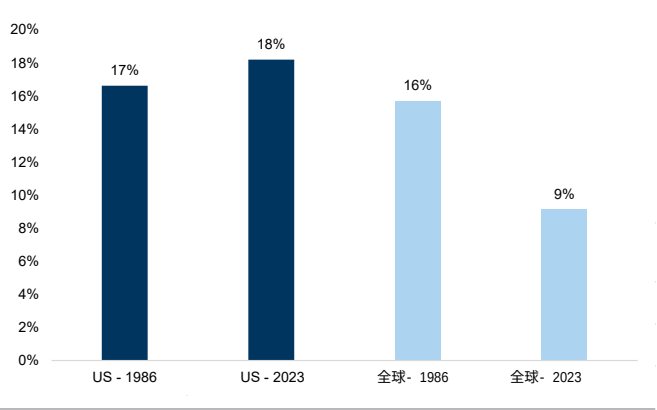
在1980年代（切尔诺贝利事故前），核能发电占全球电力总发电量的~17%，到2010年这一比例降至10%。福岛核事故后，核能发电的比例进一步下降至目前的约9%。在美国，核能发电的韧性较强，目前占全国电力总发电量的18%，与三十年前的水平大致相同。

图11：核能发电占全球总发电量的比例从1988年的17%下降到2023年的9%  
混合发电量（1985-2023年）



来源：ourworldindata.org，高盛全球投资研究

图12：自切尔诺贝利事故以来，美国的核发电量增长，而全球核发电量大幅下降  
占美国和全球核电总发电量的%

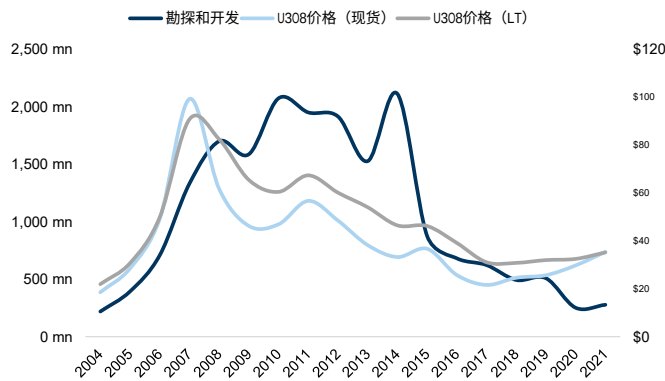


资料来源：EIA、高盛全球投资研究

随着安全问题的日益突出，核能作为能源资源的受欢迎程度逐渐下降，导致在新建项目上的投资显著减少。随着对新核反应堆开发的投资减少，这一影响波及了整个价值链，从下游的反应堆建设到上游的材料行业，包括铀矿开采、勘探和开发。重要的是，这些上游公司需要积极的消费趋势来支持投资，从而使铀及其相关产品的价格保持在足够高的水平，以激励投入所需资本，将更多的铀供应带入

集市

附录13：对新建反应堆和铀需求的预期下降导致商品价格下跌，随后勘探和投资支出也出现下降  
USD\$ mn (LHS) USD\$ (RHS)

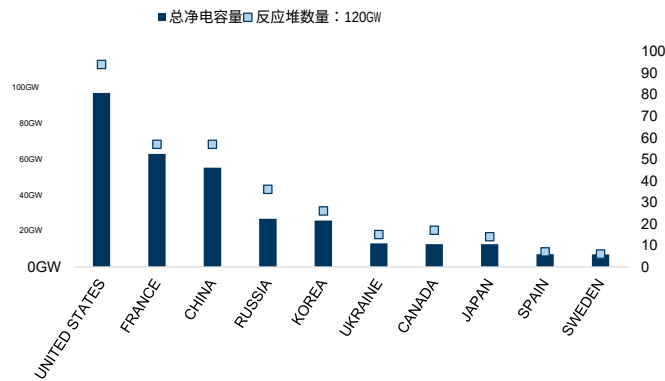


资料来源：《红皮书》，高盛全球投资研究，UxC

全球核船队正在老化，且在地理上集中

截至2024年，全球共有440座可运行的核反应堆。然而，目前只有417座在运行，因为日本有19座、印度有4座的反应堆虽然暂停运行但仍然可以使用。尽管目前有31个国家拥有正在运行的核反应堆，但大多数发电量来自前10个核反应堆最多的国家，这些国家拥有全球约80%的反应堆和~85%的总核发电能力。

图14：10个国家占全球所有反应堆~80%和全球发电能力~85%  
按国家分列的反应堆和发电能力，GW (LHS) #反应堆数量 (RHS)



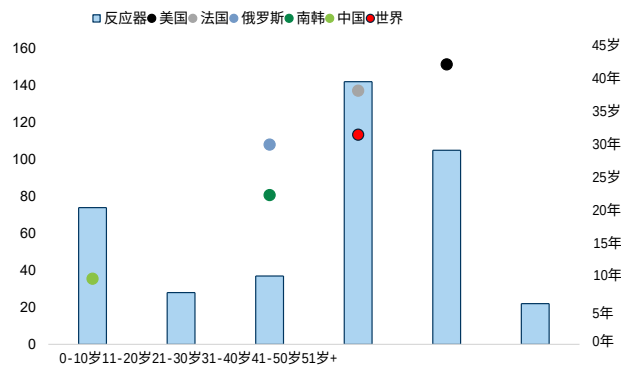
资料来源：PRIS，高盛全球投资研究

当前全球核反应堆群因投资不足和对技术的忽视而迅速老化，这主要是由于对安全性的担忧以及可再生能源试图取代核能。此外，2008年的页岩气繁荣使得天然气成为另一种相对清洁且成本显著更低的发电燃料。几十年来核能投资不足的结果是，全球核反应堆群的中位年龄已达到~32年，其中66%的全球反应堆



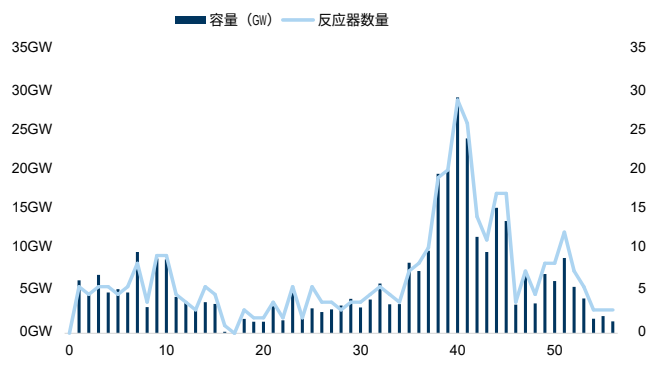
超过31岁。

附表15：全球反应堆的中位年龄~32岁  
反应器数量（LHS） 反应器使用年限（RHS）



资料来源：WorldNuclearReport，高盛全球投资研究

图16：目前运行中的核电站正在老化，大部分核基础设施已有30多年的历史  
按反应堆数量（RHS）和容量（LHS）划分的核反应堆时代



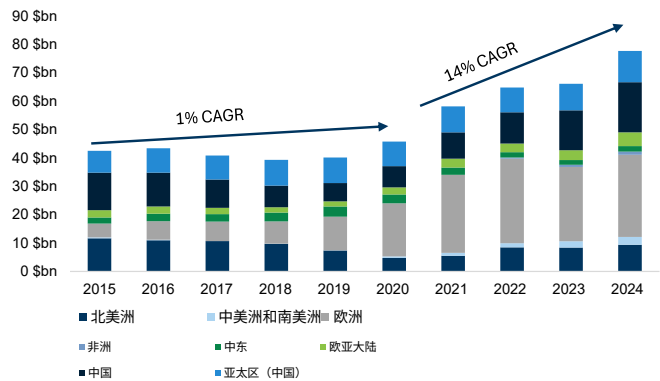
资料来源：PRIS，高盛全球投资研究

## 是什么推动核能再次增长？

近年来，核能已成为推动全球能源转型的核心动力。2020年至2024年间，全球对核电的投资增长了CAGR 14%，结束了近五年的停滞期。这一增长得益于全球政策支持的增强，以及电力需求的增长和减少。

在世界正以远超新建速度的速度淘汰燃煤电厂的情况下，排放密集型的替代能源显得尤为重要。尽管核能因其大规模产能（大多数核电站的规模达到1吉瓦或更大）和只要核燃料充足就能实现全天候供应而显得非常理想，但多年来的投资不足已使供应链难以迅速扩大。例如，建造一个核反应堆平均需要6到12年，在没有现有核供应链的国家，这一时间可能会更长。目前，为了解决这一问题，延长现有核反应堆的运行寿命成为了一种解决方案，这一趋势最近开始加速。根据美国能源信息署的数据，全球核电厂的平均年龄为32年，而美国核电厂的运营许可证平均约为40年，这意味着许多核电站在未来几年可能需要续签许可证才能继续运营。话虽如此，我们预计全球核舰队的很大一部分将寻求延期，这应该有助于弥补新反应堆上线带来的缺口。

图17：过去四年全球核电投资快速增长  
核电投资增长



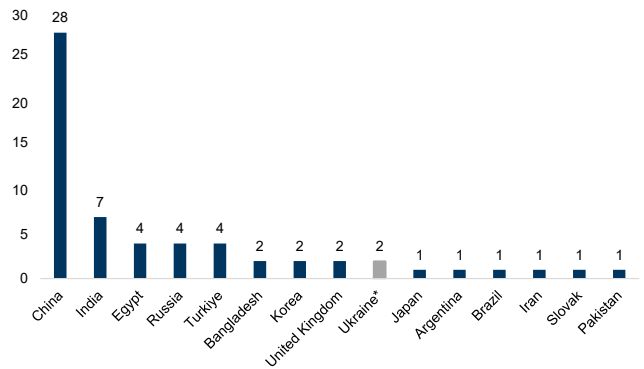
资料来源：国际能源机构、高盛全球投资研究

新反应堆的管道正在增长

目前的数据表明，全球有15个国家正在建设61座反应堆，其中大约一半位于中国。值得注意的是，如果一切顺利，这61座反应堆中有59座预计将在2025年至2032年间投入运行。此外，日本的19座和印度的4座暂停的反应堆也可能在这段时间内重新启动。

除了目前正在建设的61座反应堆外，全球目前计划建造约85座反应堆，另有359座拟建。虽然我们预计这些计划和提议的反应堆不会全部上线，但我们认为这一统计数据仍然值得注意，因为它突出了该行业的活动水平，正如31个国家在COP29上承诺到2050年将全球核能产能增加两倍所强调的那样。

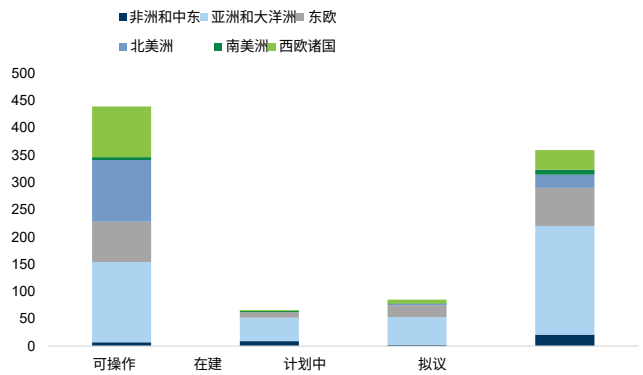
图18：目前有61个核反应堆正在建设中，预计在现在到2032年之间将有59个核反应堆投入运行  
各国正在建造的核反应堆



\*乌克兰的反应堆可能在2032年前不会上线

资料来源：PRIS，由高盛全球投资研究汇编的数据

图19：新核能活动的管道是强劲的，并且在增长  
可运行、在建、计划和拟建反应堆数量



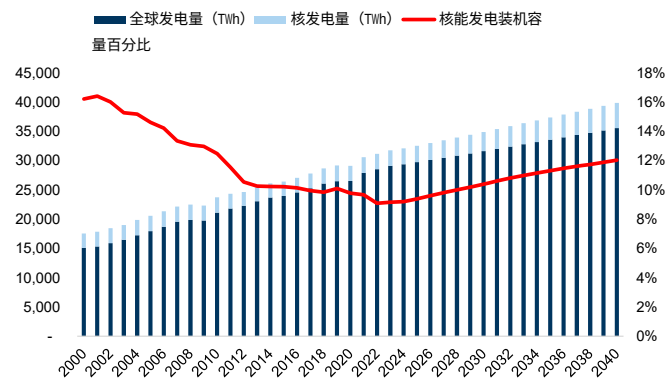
资料来源：世界核能协会、高盛全球投资研究

新技术伴随新反应堆出现

随着全球对核能投资的增加，各国不仅在扩大大型核能发电站的建设，还增加了对小型模块化反应堆等新技术的投资。这为该行业带来了巨大的绿色增长机会，因为目前全球仅有2个小型模块化反应堆获得许可并投入运营，以及1个正在测试的反应堆。在中国，HTR-PM（高温气冷反应堆）已投入运行，装机容量为210兆瓦，于2021年并网，并于2023年正式投入商业运营，据《世界核新闻》报道。在俄罗斯，KLT-40S（浮动核电站）是一个正在运行的35兆瓦压水反应堆，根据《世界核新闻》的报道，它被归类为浮动核电站。协会。日本也正在测试一个高温试验反应堆（HTTR）。

由于SMR技术距离大规模部署还有数年时间，我们对核发电的预测主要受到寿命延长、重启和正在建设和计划中的新传统反应堆的影响。到2040年，我们估计全球核发电能力将增长到575GW，占全球电力组合的12%，从目前的约9%上升，从目前378GW的基线增加~200GW的核发电能力。

图20：我们估计核能占全球发电总量的百分比将从目前的~9%增加到2040年的>12%



假设其他电力课程的净发电量增长了1%

资料来源：EIA，高盛全球投资研究

图21：公司正在转向核能，特别是先进的核技术，以应对日益增长的电力需求  
按公司分列的最近核能部门商业活动汇总

| 日期               | 核能/公用事业公司技术            |        | 承运人                 | 能力<br>(兆瓦)  | 交易类型       | 位置    | 代码      | 投资<br>(\$mn) |
|------------------|------------------------|--------|---------------------|-------------|------------|-------|---------|--------------|
| 股权投资             |                        |        |                     |             |            |       |         |              |
| 2024年10月16日      | X能量                    | SMR    | 亚马逊河                | -           | 股权投资       | -     | -       | 500          |
| PPA              |                        |        |                     |             |            |       |         |              |
| 2023年5月10日       | 赫利昂能源                  | 融合     | 微软公司                | >=50        | PPA        | -     | 2028    | -            |
| 20-Sep-24        | 星座能源                   | 传统反应器  | 微软公司                | 835         | PPA        | 帕     | 2028    | -            |
| 2024 年 10 月 15 日 | 凯洛斯电力                  | SMR    | 谷歌                  | 500         | PPA        | 卡     | 2030-35 | -            |
| 2024 年 10 月 16 日 | 能源西北                   | SMR    | 亚马逊河                | 320         | PPA        | 瓦     | 2030    | -            |
| 2024 年 10 月 16 日 | X-能量                   | SMR    | 亚马逊河                | 5,000       | 合作伙伴关系/PPA | -     | 2030-39 | -            |
| 法律意见书/谅解备忘录      |                        |        |                     |             |            |       |         |              |
| 2024年10月17日      | 多米尼能源                  | SMR    | 亚马逊河                | 300         | 穆          | 瓦     | 2030    | -            |
| 采购/预付款           |                        |        |                     |             |            |       |         |              |
| 2023年10月9日       | NuScale                | SMR    | 标准功率                | 1,848       | 购买         | 操作/参数 | 2029    | -            |
| 其他的              |                        |        |                     |             |            |       |         |              |
| 2024年12月4日       | -                      | 传统/SMR | 元数据                 | 1,000-4,000 | 快速充盈期      | -     | 2030    | -            |
| 2025年1月17日       | 通用电气日立                 | SMR    | TVA/Duke Energy/AEP |             | 联盟         | Tn    | 2033-35 |              |
| 2025年2月25日       | 霍尔特克                   | SMR    | 现代E&C               | 600-10,000  | 合作协议       | 北美洲   | 2030s   | -            |
| 01-Apr-25        | GE Hitachi/Samsung C&T | SMR    | 费米能源                | 600         | 团队协议       | 爱沙尼亚  | 2035    | -            |
| 04-Apr-25        | 通用电气日立                 | SMR    | 安大略发电               | 300-1,200   | 施工许可证      | 安大略省  | 2029    | -            |
| 2025年5月7日        | 元素电源                   | SMR    | 谷歌                  | 600         | 开发资本/PPA   | -     | -       | -            |

资料来源：公司数据，高盛全球投资研究

政策和公众对核能的支持都在增长

从政策角度来看，全球政府对核能的支持出现了复苏。在2023年12月的第28届联合国气候变化大会上，25个国家设定了到2050年将核能产能从2020年的水平提高三倍的目标。这一目标在2024年11月进一步扩大至31个国家。此外，140家核工业公司和14家大型金融机构也支持了这一承诺。值得注意的是，在2025年3月的CERA周（美国能源与环境研究周）期间，包括亚马逊、谷歌、Meta、陶氏化学、西方石油、Allseas和OSGE在内的主要能源用户也签署了支持到2050年至少将全球核能产能提高三倍的目标。

我们注意到，全球核能发电能力的三倍增长意味着总发电能力将超过1,100吉瓦，而2020年这一数字仅为~370吉瓦。尽管这一预测高于国际原子能机构最乐观的890吉瓦预测，但它仍凸显了全球对扩大核能发电能力的支持日益增强的趋势。

在美国，政府设定了到2050年将核能产能增加两倍的目标，这意味着新增~200 GW的产能。此外，2022年《通货膨胀减少法案》（IRA）为核能提供了多项税收抵免和激励措施。这包括对2024年投入运营的设施提供每兆瓦时最高15美元的生产税抵免（前提是满足劳动力和工资要求），该政策将持续至2032年。此外，先进反应堆还可以申请每兆瓦时25美元的生产税抵免或30%的投资税抵免。最后，IRA拨款7亿美元支持HALEU国内供应链的发展。值得注意的是，2025年4月，美国能源部向五家先进反应堆开发商（凯瑞斯电力、光辉工业、特拉电力、TRISO-X和西屋电气）做出了有条件承诺，确保它们能够从HALEU可用性计划中获得首批HALEU。此外，IRA还拨款1.5亿美元用于改善美国能源部爱达荷国家实验室（INL）的基础设施，以促进核能研究与开发，支持近十种先进的核技术。

附件22：IRA政策支持核开发

| 拨款              | 摘要                                                                                                          | 类型          | 资格        | 总投资     |
|-----------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|-----------|---------|
| 第45Y和48E节——新容量  | 技术中立的生产税收抵免，每兆瓦时25美元，适用于工厂运营的前十年。该抵免将于2032年或当电力生产的碳排放量比2022年水平降低25%时逐步取消...                                 | 生产税抵免（PTC）  | 2025-2032 | N/A     |
|                 | 或对2025年及以后投入运营的新零碳发电厂提供30%的投资税收抵免。如果核项目包含足够的国内成分，并且建在前燃煤电厂社区，投资税收抵免可提高至最高50%。                               | 投资税收抵免（ITC） | 2025-2032 | N/A     |
|                 | 这些信用中只有一项可以应用于单一设施，但如果发电厂建在棕地或化石能源社区，则两项都包括10%的奖金                                                           | -           | -         | -       |
| HALEU高级核反应堆的可用性 | 美国能源部（DOE）提供资金：1亿美元用于研发和商业应用HALEU燃料；5亿美元用于首批先进反应堆的HALEU燃料供应；1亿美元用于协助商业实体获得特殊核材料燃料（如HALEU）制造、浓缩设施及运输包的许可与监管。 | 拨款          | 2022-2026 | \$700mn |
| 第48C节——先进能源项目信贷 | 该法案包括延长先进能源项目信贷。如果满足工资和学徒要求，基础税率是6%，税收抵免为30%。                                                               | 制造税抵免（中转）   | 2023-2032 | \$10bn  |
| 核研发             | 为能源部爱达荷国家实验室（INL）的基础设施改进提供资金，以加强核能研究和开发                                                                     | 拨款          | 2022-2027 | \$150mn |
| 第45U节——现有反应堆    | 该法案规定了每兆瓦时15美元的基础税收抵免，当电力价格超过每兆瓦时25美元时，该税收抵免将逐步减少。若未能满足现行工资要求，则基础税收抵免将降至每兆瓦时3美元，并在必要时进行相应的更正和处罚。            | 生产税抵免（PTC）  | 2024-2032 | N/A     |

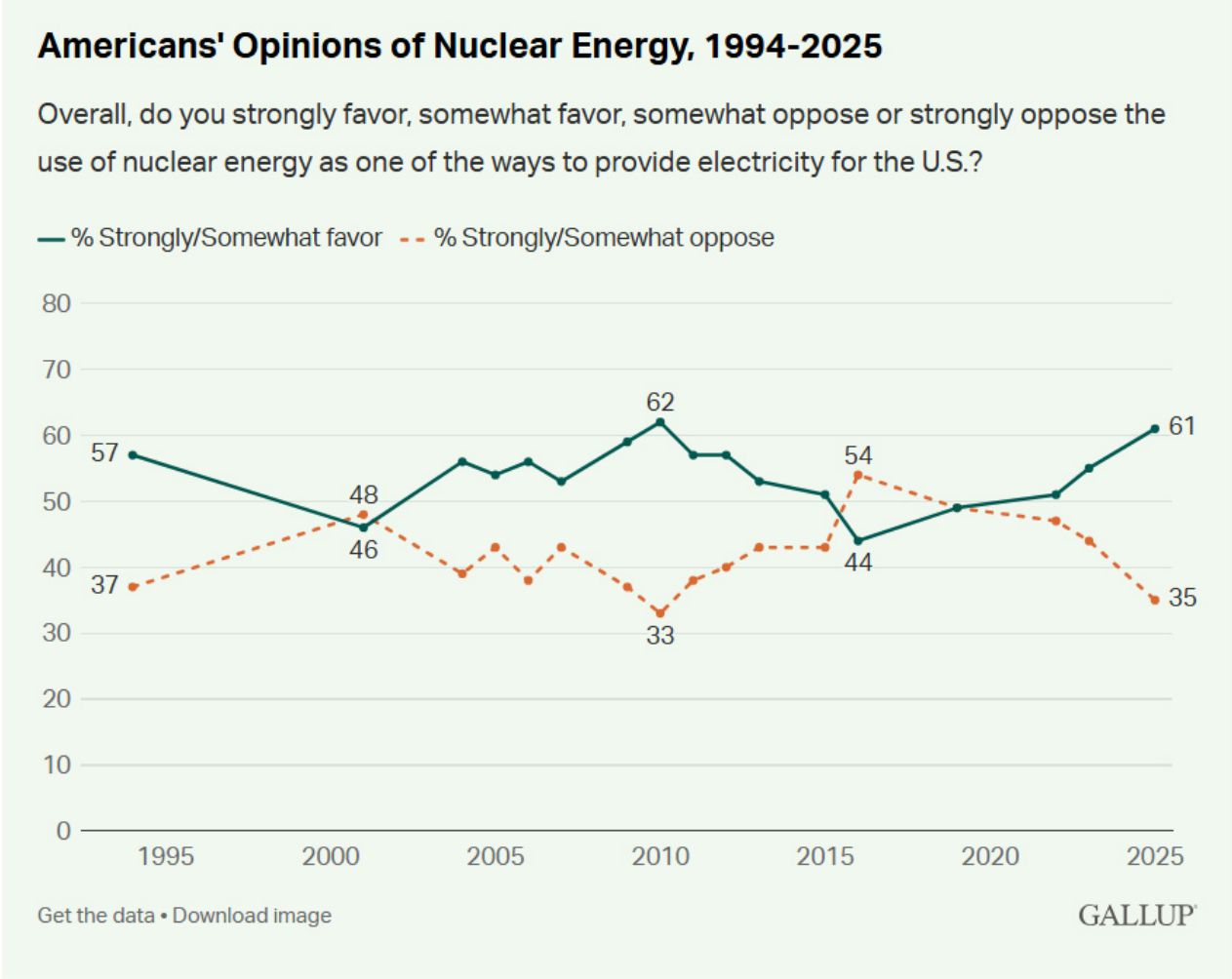
来源：美国能源部，高盛全球投资研究

2024年12月，美国能源部（DOE）宣布，已选定六家公司（美国离心机运营公司、通用材料公司、全球激光浓缩公司、路易斯安那能源服务公司、激光同位素分离技术公司和奥拉诺联邦服务公司），这些公司可以签订购买低浓缩铀的合同，以支持美国新铀浓缩能力的扩展。预计这些合同将持续长达10年，每家公司的最低合同金额为200万美元。

除了政府对核能的支持逐步增加，公众对核能的态度也在改善。最近的一项民意调查显示，自2015年的低点以来，公众对核能的支持率一直在稳步上升。特别是盖洛普的民调显示，61%的美国公民支持核能，这一比例从2016年的44%显著上升，当时天然气价格相对较低。此外，能源咨询公司Radiant energy Group委托Savanta进行的一项调查显示，在23个美国州中，支持核能的比例是反对者的1.5倍（40%的人支持，而27%的人反对）。支持核能的大多数是共和党人（74%）和无党派人士（64%），46%的民主党人支持核能。



图23：近年来，美国人对核能的想法变得更加积极  
对核能的态度



资料来源：盖洛普

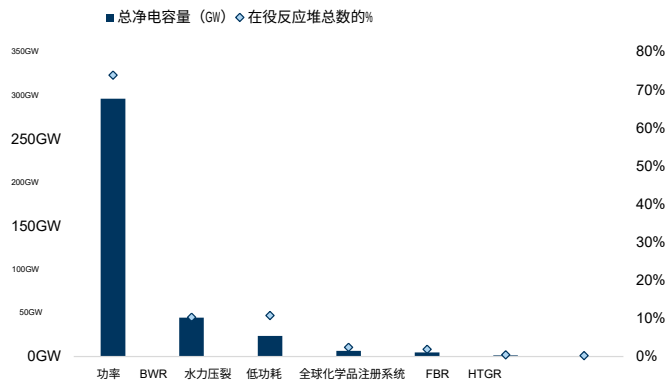
## 核技术-深入研究

### 传统核概述

核电厂是如何运作的？简单来说，核反应堆利用核裂变产生的热量将水加热至沸腾，从而产生加压蒸汽。这些蒸汽通过一个系统，驱动大型涡轮机的叶片旋转，进而带动磁发电机发电。核裂变是指当一个中子撞击一个较大的原子时，导致该原子分裂成两个较小的原子。随后释放出更多的中子，这些中子可以引发连锁反应，每次原子分裂都会释放出大量能量。

全球范围内，~95%的核反应堆属于以下三种类型：(1)压水反应堆（PWR），(2)蒸汽水反应堆（BWR），以及(3)加压重水反应堆（PHWR）。其中，压水反应堆最为常见，占全球已安装反应堆总数的~70%。

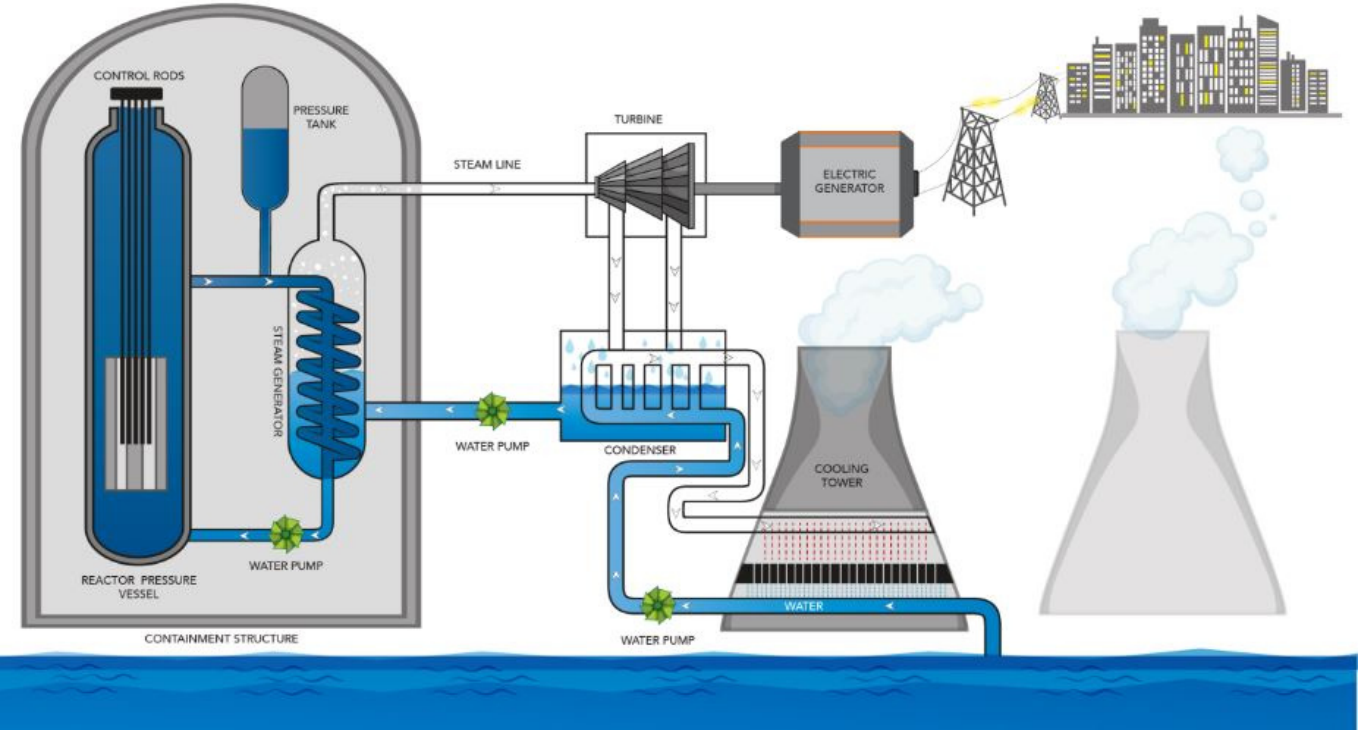
图24：PWR是全球反应堆技术的领导者  
每反应堆技术的全球电容量



资料来源：PRIS、高盛全球投资研究

压水反应堆（PWR）：这是最常见的一种反应堆，全球部署了~308个，占有在运行反应堆的74%。在PWR中，反应堆核心加热水，并通过加压防止水变成蒸汽。这些热水随后通过管道进入蒸汽发生器。蒸汽发生器是一个装满非放射性（清洁）水的大圆筒，这些水可以来自河流、海洋或湖泊。在大圆筒内有数千根管子，放射性热水通过这些管子加热清洁水，使其沸腾并转化为蒸汽。随后，放射性水返回反应堆核心再次加热，并在再次变热后返回蒸汽发生器。压水反应堆（PWRs）通常需要将铀浓缩至3%-5%才能用作燃料，这意味着裂变铀-235的浓度需从其自然水平0.7%提高。这种燃料在大型反应堆中最为常见，通常被称为低浓缩铀（LEU）。典型的压水反应堆每18到24个月需要更换一次燃料，在更换过程中，通常只替换反应堆内三分之一的燃料。

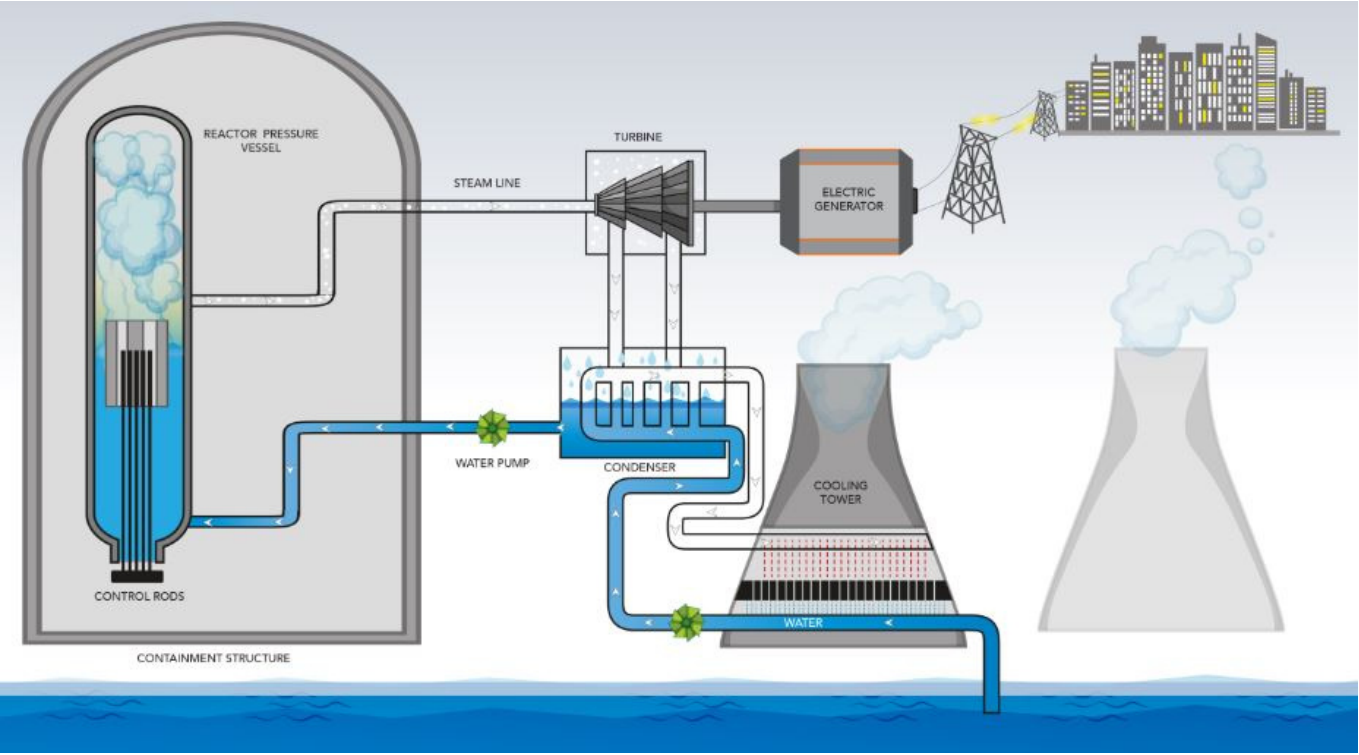
附录25：压水堆概述



来源：美国能源部

沸水反应堆（BWR）：这是第二常见的反应堆类型，发电过程通过加热反应堆核心中的水，水在反应堆容器内直接转化为蒸汽，随后利用这些蒸汽驱动涡轮机。与压水反应堆（PWR）类似，BWR也需要将铀浓缩至3%-5%作为燃料。

附录26：沸水堆概述



来源：美国能源部

PHWR（加压重水反应堆）：与PWR（压水反应堆）基本相同，这种反应堆需要更高效的慢化剂，如重水（D2O）。PHWR每公斤开采的铀产生的能量比PWR多，但燃料消耗量也大得多。该系统的压力管设计允许在不关闭反应堆的情况下逐步更换燃料，因为可以将个别压力管与冷却回路隔离并关闭。虽然成本较低，但压力管的耐久性较差。尽管PHWR（加压重水反应堆）需要更多的燃料，但由于所需的燃料是天然未浓缩的铀（0.7% U-235），因此不需要经过浓缩过程。大多数PHWR在加拿大和印度运行，加拿大的整个舰队都使用Candu（加拿大铀）反应堆。

高级核概述

SMR是什么？SMR是一种小型模块化反应堆，其规模仅为大型核电站的一小部分，通常功率容量在20兆瓦到300兆瓦之间。~1GW用于像AP-1000 PWR这样的传统核反应堆。值得注意的是，还有微型反应堆，其功率通常在1MWe到20MWe之间。在SMR领域，尽管大约有~80种不同的设计被引入，但这些设计主要集中在四个不同的小型模块化反应堆（SMR）系列中。

总的来说，几乎所有的SMR设计应用都属于以下类型：(1)水冷，(2)气冷，(3)液态金属冷却，和(4)熔盐。

- 水冷SMR（陆基和海基）。水冷小型模块化反应堆利用了现有大型反应堆的成熟技术，例如轻水反应堆。

反应堆（轻水堆）和重水反应堆。这种设计的优势在于能够利用已验证的技术和燃料供应链，从而制造出传统大型反应堆的小型化版本。目前，此类别中大约有14种陆基水冷小型模块化反应堆设计。

用于海洋应用的水冷小型模块化反应堆（SMR）主要基于相同的设计，但作为浮动发电单元部署，可以安装在驳船上或采用其他灵活的部署方式。目前，已有六种基于海洋的SMR概念被提出。对于水冷SMR，技术通常使用富集铀氧化物（二氧化铀）颗粒（浓缩度~5%），这些颗粒被封装在锆合金管中。

这种低浓缩铀燃料与常规轻水反应堆使用的燃料相似，这意味着这些小型模块化反应堆的燃料供应链已经建立。相比之下，高浓缩铀燃料小型模块化反应堆通常需要高浓缩铀燃料，其铀浓缩浓度通常在5%到20%之间。根据世界核协会，全球HALEU的供应主要由俄罗斯公司Tenex控制，该公司目前是唯一一家大规模生产HALEU的商业可行生产商。

- 气体冷却的SMR。气体冷却的SMR是一种核反应堆，其中气体（通常是二氧化碳或氦气He）作为主要的冷却剂，用于从反应堆核心传递热量。在这些反应堆中，核裂变发生在燃料芯中，通常使用石墨作为慢化剂，周围环绕着气体冷却剂。冷却剂吸收裂变过程中产生的热量，并将其带走，产生蒸汽以发电。二氧化碳常用于第一代气体冷却反应堆——马格诺克斯反应堆，而氦气则用于更先进的设计，如高温气体冷却反应堆（HTGR）。目前，有14种气体冷却的SMR设计正在开发或运行中。这些高温气体冷却的SMR主要用于发电和工业应用。中国目前运营着一个这样的反应堆，而日本则有一个已运行超过20年的测试反应堆。
- 液态金属冷却的SMR。液态金属冷却的超临界模块化反应堆（SMR）采用钠、铅或铅铋共晶等液态金属作为冷却剂，这些材料具有高热导率和高效的散热性能。这种设计使得反应堆能够在更高的温度下运行，从而提高热效率，并支持氢气生产和海水淡化等应用。液态金属的高沸点降低了冷却剂沸腾的风险，而其低蒸气压则允许在接近常压的条件下运行，进一步提升了安全性。例如，GE Hitachi的棱柱反应堆就是一个使用钠冷却的快堆，该反应堆设计为模块化部署。尽管存在冷却剂反应性和材料腐蚀等挑战，但持续的研究和开发工作正致力于解决这些问题，使液态金属冷却的超临界模块化反应堆成为清洁、可靠电力生产的一个有前景的解决方案。目前，已有10种SMR设计采用了快中子和液态金属冷却剂。
- 熔盐SMR。熔盐反应堆的历史可以追溯到20世纪60年代，现在被认为是一项很有前途的技术，特别是用于钍燃料循环或乏LWR燃料的再处理。目前，包括快中子反应堆在内的多种设计正在开发中，中国在全球研究工作中处于领先地位。一些熔盐反应堆（MSR）使用类似于高温气冷堆的固体燃料，

当其他设计通过将燃料直接溶解到熔盐冷却剂中来实现创新时，这一概念显著提升了反应堆的性能。这些反应堆通常使用熔融氟化物盐，如锂-铍氟化物和锂氟化物，在高温（500-1400 °C）和低压条件下保持液态，与压水反应堆不同。其核心原理是将燃料溶解成燃料盐，这种盐可以连续再处理。钍、铀和钚的盐可以高效分离，用于再处理。尽管预计短期内将进行批处理再处理，但典型的燃料寿命为4到7年，石墨通常作为与氟化物盐兼容的慢化剂使用。目前，有11种SMR设计采用了熔盐冷却技术。

图27：美国有多种SMR技术寻求商业化

美国小型模块化反应堆公司概况

| 公司        | 反应器            | SMR类型          | 燃料  | 容量 (兆瓦) | 加油周期  | 生命周期阶段              | COD     | 首次部署地区 | 施工时间           |
|-----------|----------------|----------------|-----|---------|-------|---------------------|---------|--------|----------------|
| 通用电气-日立核能 | BWRX-300       | 小型模块化LWR       | 亮氨酸 | 300     | 1-2年  | 许可证申请已提交            | 2029    | 加拿大    | NOAK - 24-36个月 |
| 努斯克电力公司。  | NuScale电源模块    | 小型模块化LWR       | 亮氨酸 | 77      | 2年    | 标准设计批准 (SDA) 被一般承认的 | 2029    | 罗马尼亚   | NOAK - 30个月    |
| 西屋        | AP300型         | 小型模块化LWR       | 亮氨酸 | 330     | 4年    | 许可前                 | 2030年代初 | 英国     | NOAK - 36个月    |
| 特拉电力      | 钠              | 钠冷却快堆反应器       | 哈雷  | 345     | 2年    | 许可前                 | 2031    | 美国     | NOAK - 36个月    |
| X-能量      | Xe-100         | 高温气体冷却反应堆      | 三聚体 | 80      | 2年    | 许可前                 | 2030    | 美国     | NOAK - 30-48个月 |
| 凯洛斯电力     | 爱马仕是世界著名的奢侈品品牌 | 熔融氟化物盐-冷却高温反应器 | 三聚体 | 35      | 5年    | 许可证申请已提交            | 2027    | 美国     | NOAK - 36-48个月 |
| 西屋        | e-vinci微型反应器   | 微型反应器          | 三聚体 | 5       | >= 8年 | 许可前                 | 2029    | 加拿大/美国 | -              |

资料来源：公司数据，高盛全球投资研究

图28：重点SMR技术可分为几类

主要SMR技术总结

|                                   | 水冷轻水反应堆 (LWR)                   | 气体冷却快堆 (GFR) 和高温气体冷却堆 (HTGR) | 液态金属冷却反应堆            | 熔盐反应堆 (MSRs)                                                                                         |
|-----------------------------------|---------------------------------|------------------------------|----------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 燃料<br>- 丰富<br>- 燃料形式<br>- 加油周期/方法 | 亮氨酸                             | 哈雷                           | 哈雷                   | 莱乌/哈勒乌                                                                                               |
|                                   | 陶瓷二氧化铀颗粒                        | 碳化硅中的TRISO/UO? 碳化铀           | 金属铀锆/TRISO           | 熔融氟化物/熔融氯化物/固体燃料                                                                                     |
|                                   | 通常为12-24+个月                     | 在线 180-360个月                 | 在线                   | 在线                                                                                                   |
| 功率输出<br>- 分类<br>- 基础模型输出 (MWe)    | LWR-SMR                         | HTGR-SMR/GFR-SMR             | FHR-SMR              | MSR-SMR/MSR-SMR (中尺度) /MSR-Micro                                                                     |
|                                   | 变化。最大值为300兆瓦                    | 最高300兆瓦                      | 140 MWe              | 试验反应堆：1MWe (MSR-Micro) 195-500 MWe (MSR-SMR) 300-170-430 MWe (midscale) 780-650-910 MWe (largescale) |
| 反应堆：玩家                            | 通用-日立<br>西屋<br>努斯克电力公司。<br>霍尔特克 | X-能量<br>通用原子能公司              | 特拉电力<br>超安全核<br>X-能量 | 凯洛斯电力<br>特拉电力<br>陆上能源<br>莫特克斯                                                                        |

资料来源：NIA，公司数据，高盛全球投资研究

SMR为何能快速进步？与传统核反应堆相比，SMR具有多个优势，包括但不限于：

- 加速市场进入。小型模块化反应堆（SMRs）相比传统反应堆，能够显著缩短部署时间。根据多家公司的披露信息，我们估计领先的SMR公司可能在5-7年内实现商业化部署（~36个月的许可周期和~18-36个月的建设周期）。这比在美国建造传统反应堆所需的10+年时间要短得多，最近的案例是南方公司的Vogtle工厂，其建设周期远超这一时间，耗时~15年。



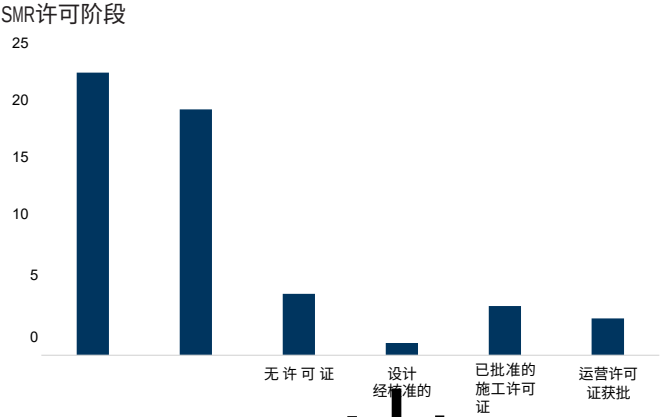
- 模块化和灵活性。部署速度更快的基础是SMR由于其模块化部件和组件而能够大规模生产，这些部件和组件可以在传统设施中制造，然后运送到现场，而传统的反应堆是在现场建造的，其组件要大得多、体积更大。  
此外，考虑到它们占地面积较小，从选址的角度来看，小型热电联产机组可以在更多的地点建造，从而更容易地部署在表后和离网位置。
- 安全性。小型模块化反应堆的设计比传统反应堆更安全，包括减少故障点。此外，小型模块化反应堆可以在工厂制造和加燃料，然后密封并运输到发电地点，之后再返回工厂进行燃料卸载，这将最大限度地减少危险材料的处理。
- 燃料补充。一些小型模块化反应堆，根据燃料类型的不同，将被设计成在不进行燃料补充的情况下运行很长一段时间，这可能长达数年到几十年，而传统反应堆平均需要每18-24个月进行一次燃料补充。对于专注于HALEU燃料的SMR来说尤其如此，因为其利用更高的浓缩度来运行更长的燃料周期。

尽管如此，小型模块化堆尚未大规模部署，大多数供应商的目标是在2030年代中期之前实现商业化。加速部署的关键瓶颈包括：

- 监管和许可的时间线。许可是SMR项目中的一个瓶颈，因为无论是新设计还是基于先前技术的设计，都需要经过严格的审查，才能从设计阶段推进到建设并最终投入运行。尽管小型模块化反应堆（SMR）的潜在时间线比传统反应堆短，但根据加拿大核安全委员会的数据，整个过程预计需要5到7年才能使反应堆投入运行。
- 燃料供应。另一个障碍在于燃料供应链——尤其是许多小型模块化反应堆（SMR）所需的燃料供应，这使得将SMR变为现实变得更加复杂。除了设计新型模块化系统带来的复杂性外，一些公司正考虑采用这些新设计中使用了新的/替代燃料类型。特别是，HALEU是一种在许多新设计中被提及的新燃料类型。然而，HALEU的问题在于其浓缩度极高（~10%-20%），而达到这些浓度需要投资建设浓缩设施，但目前的需求还不足以支持这种投资。此外，浓缩度超过10%需要在美国境内设立NRC第二类设施，这需要大量的资本投入来获得许可、建设和运营。目前，美国的HALEU供应和基础设施非常有限，且主要由美国能源部控制。全球范围内，能够大规模生产HALEU的供应商只有俄罗斯和中国。
- 供应链方面，整个行业大约有~70种SMR设计，能够大规模生产这些设计所需的组件可能是一个挑战。在这种情况下，成本问题也成为了SMR行业面临的主要障碍之一。在三个运营中的小型模块化反应堆（SMR）中，

至少有三个项目已经建成或正在建设中，其中成本超支严重。根据能源经济与金融分析研究所的数据，Shidao Bay 1 SMR（中国）和Floating SMR（俄罗斯）的成本分别比原计划高出300%和400%。目前，CAREM 5 SMR正在阿根廷建设，尽管尚未完工，但成本已超出700%（IEFA）。这种情况在小型模块化反应堆领域普遍存在，尽管这些反应堆的模块化设计提高了成本效益，但在初期生产阶段仍面临规模不经济的问题。值得注意的是，日本原子能机构建造的一个30兆瓦高温工程测试反应堆，旨在支持2028年的氢气生产。

附件29：很少有SMR获得施工或运营许可证

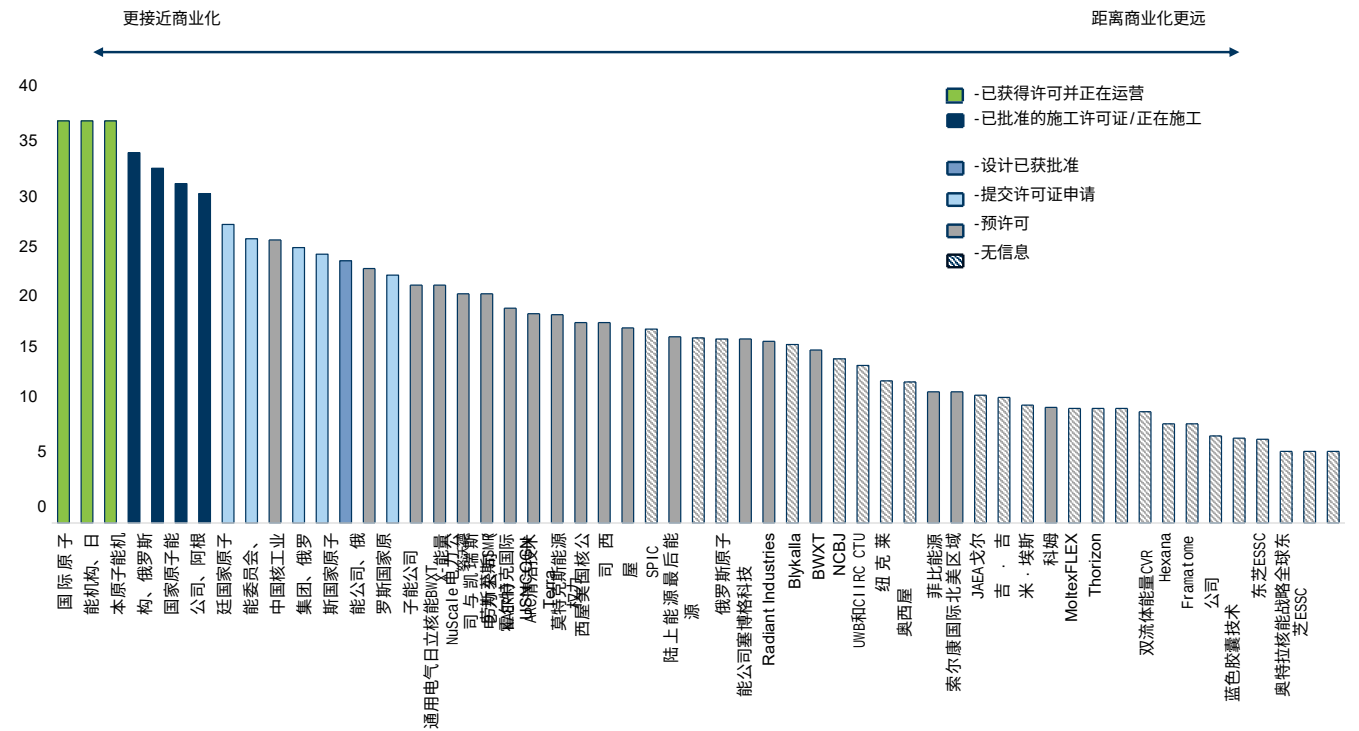


申请许可证已



资料来源：核管理委员会，高盛全球投资研究

附件30：目前，有3个SMR在运行，4个正在建设中，1个已获得设计批准，5个已提交许可证并正在审查  
按商业化状态排序的SMR公司



资料来源：NEA，高盛全球投资研究

## 核燃料循环-深入研究

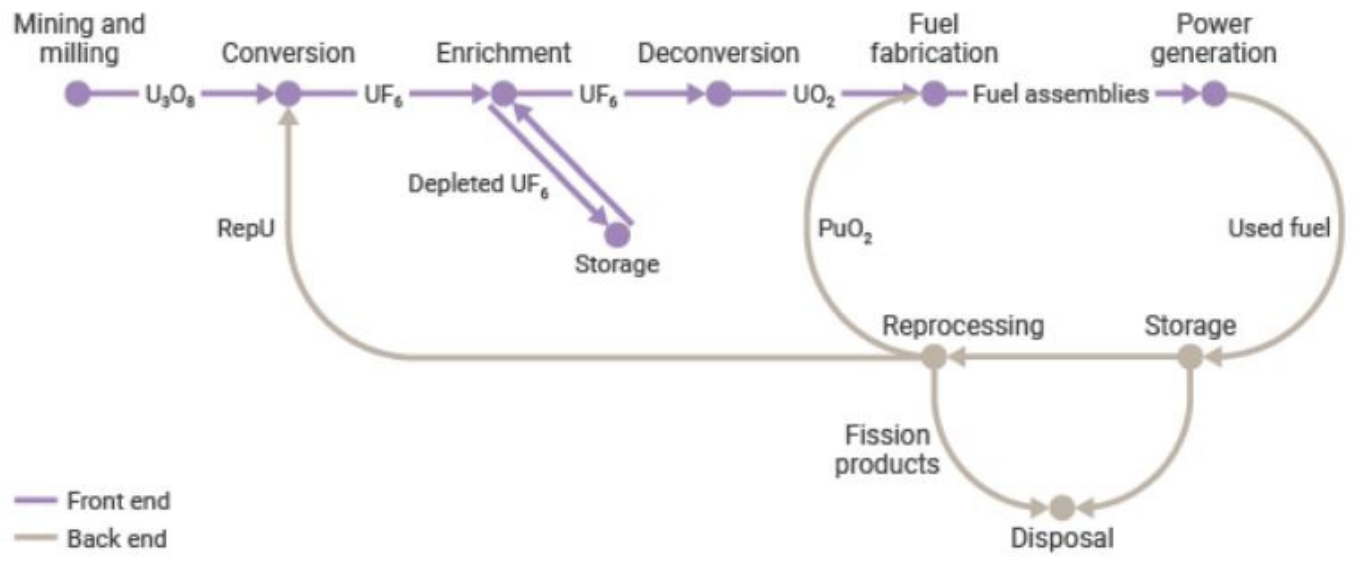
所有核反应堆都需要燃料运行，传统反应堆与SMR不同。传统的核反应堆通常使用铀氧化物（二氧化铀）颗粒，这些颗粒被装入称为燃料棒的细管中，然后排列成燃料组件。这些组件随后被放置在反应堆的核心位置。传统反应堆的燃料基于低浓缩铀（LEU）的铀燃料循环，其中铀-235的浓度为~3%-5%。铀-235是一种放射性同位素，能够通过核裂变产生能量。

然而，新型先进反应堆需要使用HALEU，即铀浓缩至5%-20%。值得注意的是，一些反应堆采用LEU+，即铀浓缩至5%-10%的U-235，这可以通过与浓缩至5%铀相同的设施实现。但是，要将铀浓缩至10%以上，则需要单独的NRC许可证，这不仅需要大量的资本投入来获得许可、建设、安全运营，而且还需要额外的运营成本。作为参考，美国和英国的海军反应堆使用武器级高浓缩铀（HEU），其铀浓缩度通常为90%+ U-235，而俄罗斯和印度则使用铀浓缩度超过20%的HEU。

核燃料循环概述

如图31所示，核燃料循环涉及两个阶段的多个步骤。前端步骤准备将铀用作核反应堆的燃料，而后端步骤确保使用过的/废燃料在仍具有高放射性的情况下得到安全管理和处置。

附图31：核燃料循环示意图



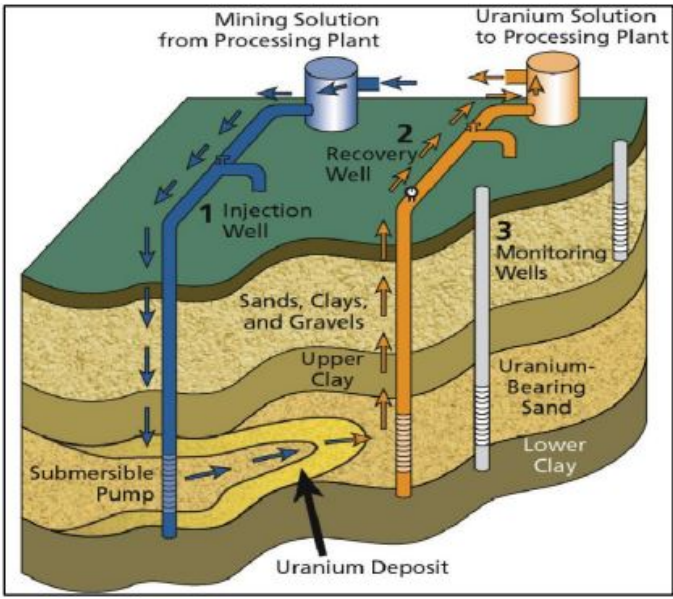
资料来源：世界核协会。

前端：

■ 采矿和磨矿

- 铀的生产方式包括传统的采矿和磨矿，以及原位回收/浸出（ISR/ISL）。传统采矿方式包括露天开采和地下开采，磨矿过程通过一系列物理和化学处理来提取铀。相比之下，ISR作业则是通过在钻入矿床的井中注入过氧化氢溶液来溶解矿物，然后通过另一个井孔提取铀。值得注意的是，~35%的铀是通过传统方法开采的，而~60%是通过ISR技术开采的，~5%的铀是从其他矿物（主要是铜和金）的采矿过程中产生的副产品。
- 目前，全球共有超过30座铀矿在运营，年产量总计~1.6亿磅（~6.2万吨）铀，其中最大的  
根据我们的估计，全球产量的一半以上来自10个矿山。

附件32：ISR操作概述



来源：NRC，能源部

附录33：采矿生命周期概述



来源：Orano

■ 转变

- 下一步是将U308转化为纯六氟化铀（六氟化铀），这种物质适合用于浓缩操作。由于氟只有一个天然同位素，因此在浓缩过程中更容易从铀中分离出来。主要有两种转化技术：干法和湿法。通常情况下，Cameco和Orano等公司采用的是湿法，该方法包括将铀浓缩物溶解在硝酸中，然后通过一系列处理步骤，最后与氟反应生成六氟化铀。而干法则主要在美国使用，其过程是将浓缩物研磨成细粉，加热至1,000 ° F+，再与氢氟酸反应以获得六氟化铀。为了生产六氟化铀，需要获得NRC的许可。

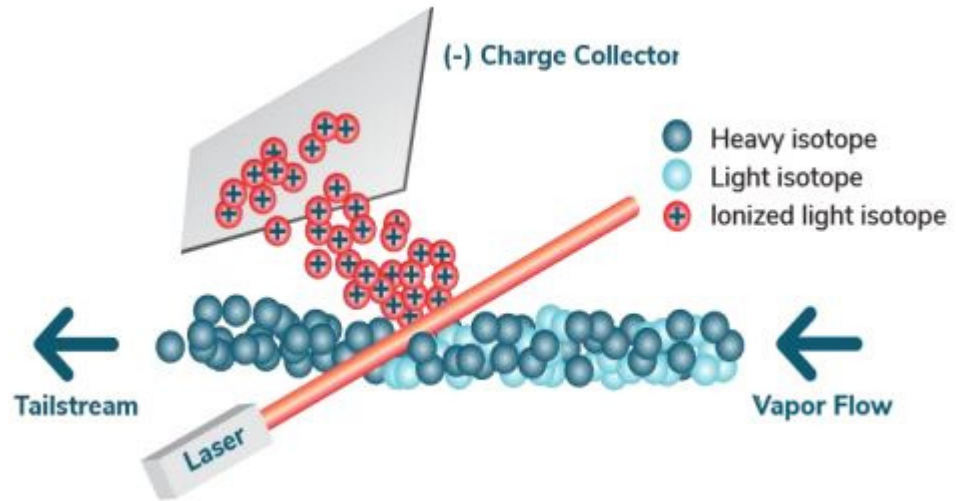


- 根据世界核协会的数据，全球大约有62,000吨的许可铀转换能力，这些能力主要由国家所有（如CNCC、Orano和Rosatom），Cameco在加拿大也有生产能力，ConverDyn在美国也拥有相关设施。然而，实际的转换生产量仅为42,000吨，其中超过一半位于俄罗斯和中国。因此，转换过程仍然是将U308转化为可用于浓缩过程的可用产品的上游流程中的主要瓶颈。

#### ■ 丰富

- 铀浓缩主要有两种方法：气体离心机浓缩，这是目前更为常见的技术；以及激光浓缩。气体离心机通过一个大型旋转圆筒，向其中注入六氟化铀气体，然后以高速旋转，从而分离出较重的铀-238（U-238）和较轻的U-235，进而提取出浓缩的铀-235（U-235）。相比之下，激光浓缩则是利用激光来分离铀的不同同位素。值得注意的是，铀-235是唯一一种天然存在的热裂变同位素，这意味着它可以在反应堆中引发链式反应。
- 重要的是，根据美国能源部的说法，通过与III类设施相同的设施，可以将铀浓缩至10%，但要达到10%-20%的水平，则需要II类许可证，并且资本支出显著增加。而超过20%的浓缩则需要I类许可证。
- 在浓缩过程中，分离工作单位（SWU）是衡量分离铀同位素（U-235和U-238）所需努力的关键指标。它量化了从天然铀中提高U-235浓度所需的功，而不是衡量所需的能量。值得注意的是，1个SWU相当于1公斤的分离工作量。为了将1公斤铀浓缩至5%的浓度，如果尾矿品位为0.25%，则工厂需要~8个SWU；如果尾矿品位为0.20%，则需要~9个SWU。
- 根据世界核协会的数据，全球每年的铀浓缩能力约为~62,000标准单位（SWU），能够从~65,000吨的U308原料中每年生产出~7,000吨的浓缩铀产品（EUP）。主要的铀浓缩企业包括CNNC、Orano、Rosatom和Urenco等国有企业。我们注意到，虽然转换仍然是一个关键瓶颈，但浓缩设施能够超负荷运行以帮助推动增量产能，因此不被视为瓶颈。

附件34：激光富集概述



来源：ASP同位素

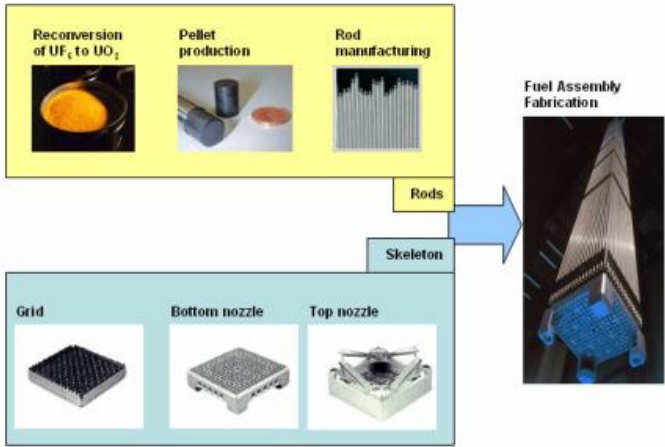
■ 脱离教派

- 由于反应堆不使用六氟化铀，因此需要将六氟化铀转化为铀金属、二氧化铀粉末或其他适合储存的形式。这是燃料制造过程的第一步。与转化类似，去转换也有干法和湿法两种方法。湿法过程中，向六氟化铀蒸汽中加入氨和硝酸，然后过滤并最终通过氢气还原生成二氧化铀。干法过程中，向六氟化铀蒸汽中加入蒸汽，形成粉末，然后送入旋转窑，在那里通过添加蒸汽和氢气来生成二氧化铀粉末。
- 目前，美国尚无能够处理HALEU浓度达到至少19.75%的去转化设施。然而，美国能源部最近宣布与六家公司签订合同，这些公司将进行HALEU的去转化，并将六氟化铀转化为其他燃料形式，用于先进反应堆。这些公司包括BWXT、Centrus、Framatome、GE Vernova、Orano和Westinghouse。

■ 燃料制造/组装

- 然后将二氧化铀粉末压制成药料颗粒。这些燃料颗粒随后被插入到一根根棒中，这些棒被组织成一种叫做燃料组件的结构。一个现代反应堆可以有高达1000万个燃料颗粒。
- 有许多公司参与燃料制造，如Framatome、Orano、Westinghouse、TVEL等。

附件35：燃料组件制造的主要步骤



资料来源：国际原子能机构。

■ 发电

- 一个典型的1,000兆瓦反应堆，其核心由100至200个燃料组件构成，每个组件含有~75吨的低浓缩铀。在反应堆的核心中，U-235同位素发生裂变，通过链式反应产生大量热量。这些热量随后被用来产生蒸汽，驱动涡轮机和发电机。大约每12到18个月，反应堆会更换三分之一的乏燃料。根据世界核协会的数据，大约一吨天然铀可以产生4400万度电，或等量的电力。2万吨煤或850万立方米天然气。
- 衡量核反应堆功率输出的一个关键指标是燃料消耗率，即每吨铀的热能消耗量（GWd/tU）。随着燃料组件变得越来越先进和坚固，这使得燃料消耗率更高。历史上，燃料消耗率一直限制在~40 GWd/tU，且浓缩度为4%，但如今的传统反应堆在5%的浓缩度下可以达到55 GWd/tU，而且通过提高浓缩度（至6%时可达70 GWd/tU），这一数值还有进一步提升的空间。重要的是，更高的燃料消耗率延长了运行周期，从而降低了燃料成本。值得注意的是，小型模块化反应堆（SMRs）有望将燃料更换周期延长至~10年。
- 根据美国能源部的数据，生产50公吨HALEU需要3,100公吨的六氟化铀可以从2,500公吨的U308中生产。这将产生2,900公吨的贫化六氟化铀。相反，50公吨的LEU需要大约550公吨的U308。我们注意到，这种~4倍的铀需求增加与将燃料浓缩度从5%提高到接近20%有关。

后端

核燃料循环的后端确保仍然具有高放射性的使用过的燃料得到安全管理、回收或妥善处置。

### ■ 用过的燃料

- 一旦使用过的燃料从反应堆中取出，就会被卸载到一个储存池中。这个储存池利用水来屏蔽辐射并吸收热量。经过几个月甚至几年后，这些燃料可以转移到干式储存设施中，但需要进一步处理，以便回收或准备永久地下处置。
- 浓缩过程中产生的剩余贫化铀也被称为尾矿，其裂变U-235同位素含量低于浓缩铀。

### ■ 处置

- 处理废旧核燃料的主要方式是处置。核燃料循环产生的废物分为低水平、中水平和高水平废物。大多数低水平放射性废物在妥善包装后，通常会在近地表处置设施中长期管理。这些设施同样适用于处理含有短寿命放射性同位素的中水平放射性废物。
- 但是，目前尚无处置设施来处理含有长寿命放射性同位素的高放废物或中放废物。相反，这种废物以固体、稳定的形态储存在反应堆现场或其他中心位置的池塘或干式容器中。对永久处置使用过的核废料犹豫不决的部分原因是，这些废物仍保留有可再加工的可用能量。
- 处理最放射性核废料的首选方法是深地质处置。这与目前处理与核武器相关的国防废物的方式相似，这些废物目前在新墨西哥州的废物隔离试验工厂中处置。芬兰的奥纳洛储存库已经开始试验将乏燃料罐存放在地下~30英尺的地质储存库中，但最终的储存深度将达到1,300+英尺。

### ■ 再处理

- 再加工是回收利用核燃料的另一种选择，这样可以回收材料，重新制成可用的燃料。这一过程还有助于有效减少高水平废物的数量。使用过的核燃料中仍含有~96%的原始铀，但可裂变的U-235含量已降至不到1%，~3%为废料，剩余~1%是反应堆运行期间产生的钚。再处理过程包括将燃料棒切割并溶解在酸中，以分离铀和钚。然而，由于成本高昂及回收能力有限，再循环仅占市场的很小一部分。值得注意的是，回收的燃料几乎全部用于MOX反应堆的MOX燃料，这限制了其应用范围，主要局限于传统反应堆。
- 根据法国跨国核公司阿海珐的说法，大约8个使用过的燃料组件可以再加工成一个MOX燃料组件，三分之二的浓缩铀燃料组件，约3吨贫化燃料

铀和~150公斤的废物。这一过程消除了购买~12吨开采铀的需要。

- 大多数再处理设施采用PUREX（钚-铀提取）技术，该技术通过将废燃料溶解在硝酸中，化学分离出铀和钚，随后将这些材料转化为钚氧化物（PuO<sub>2</sub>）和铀氧化物（二氧化铀）的粉末形式。这些PuO<sub>2</sub>可以与贫化后的二氧化铀混合，制成混合氧化物（MOX）燃料，这种燃料适用于MOX核反应堆。
- 再处理铀（RepU）是从使用过的核燃料中回收的铀，主要成分是U-238和~1%的U-235。因此，为了在反应堆中使用，RepU需要进行转换和再浓缩。目前，法国、英国、日本和俄罗斯已经具备了商业化的RepU生产能力，同时，一些军事核武器生产计划也在进行相关工作。

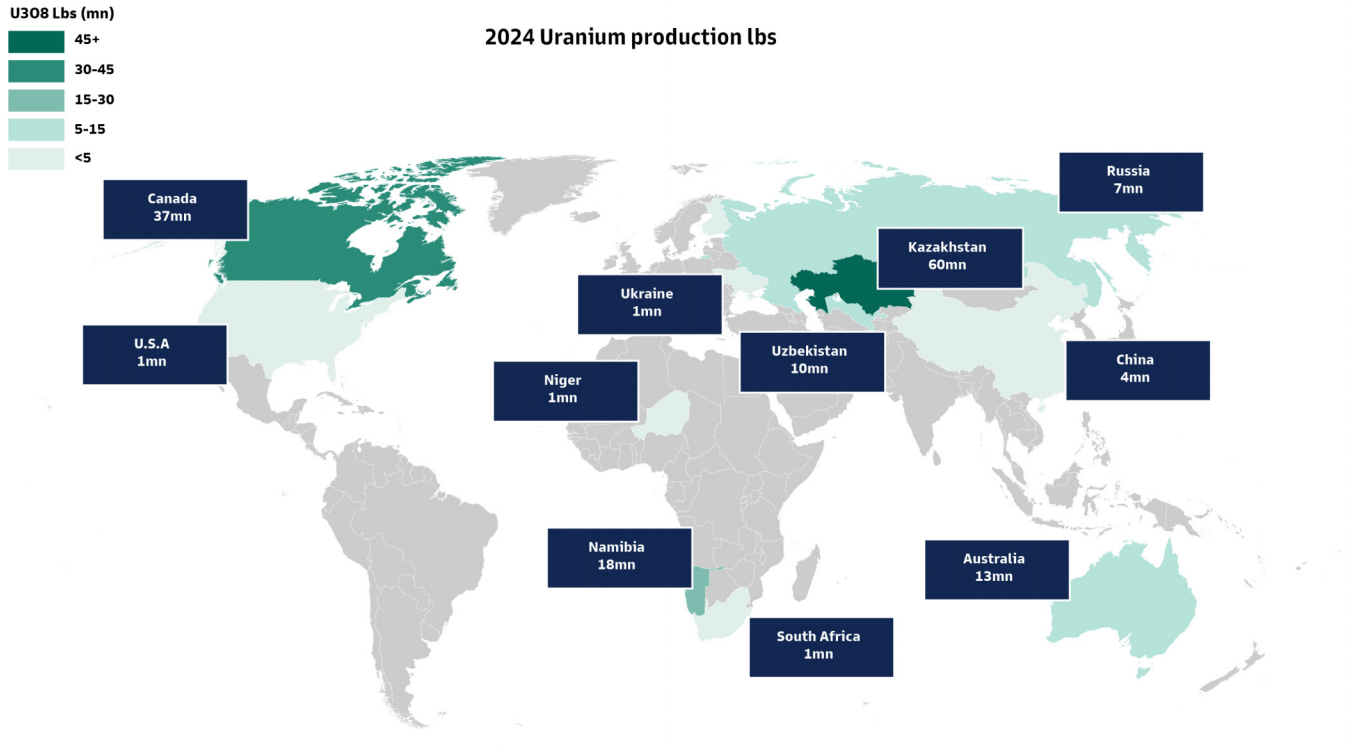
#### 其他核燃料形式（SMR）

如上所述，大多数传统核反应堆使用二氧化铀的颗粒，并将其排列成燃料棒/组件。然而，正在考虑用于先进反应堆技术的燃料形式有多种，这些燃料可以在燃料循环的去转化和燃料制造阶段生成。主要考虑的燃料形式包括金属合金、不同形式的陶瓷（如氧化物、碳化物、氮化物、硅化物）、熔盐以及三结构各向同性（TRISO）燃料。本报告后文将介绍HALEU的相关基础知识。

## 核燃料——介绍GS铀的供需模型

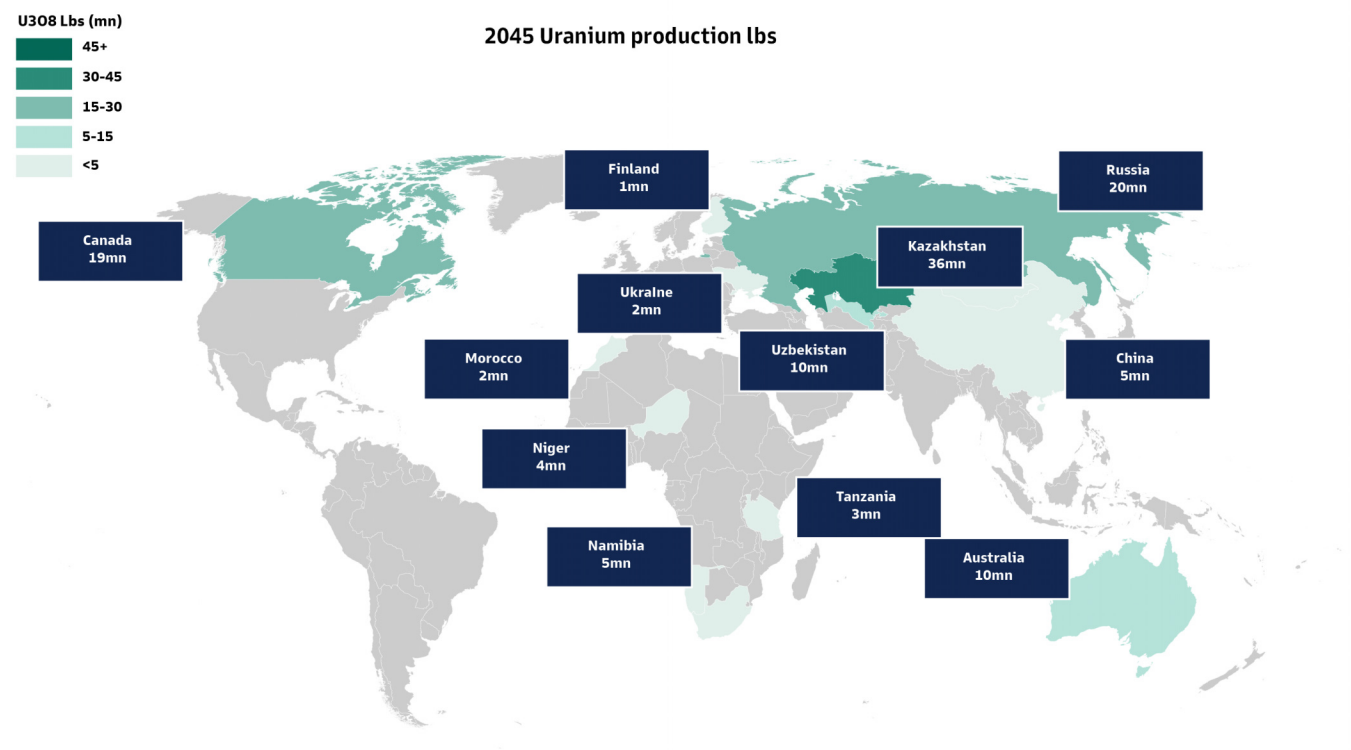
通过这份报告，我们介绍了一种专有的全球铀供需模型，该模型包括了到2045年的各地区预测。我们的需求展望考虑了现有的~418座运行中的反应堆，预计这些反应堆将增加~258座，其中包括未来20年内~19座的重启，这将支持铀需求增长~3% CAGR。在供应方面，我们的模型跟踪了全球~40座运营中的矿山，以及特定国家的产量，并考虑了~11座处于开发/勘探阶段的矿山的适度贡献，这些矿山预计将在未来十年内投产。总体而言，我们预计到2030年将出现实质性的结构性供应赤字，我们认为这将是未来铀价格的推动力。

图36：铀的生产跨越多个国家，但主要集中在加拿大和哈萨克斯坦  
全球铀生产概况



来源：高盛全球投资研究、公司报告、NEA、UxC

图37：根据目前提议的铀矿，我们的铀供应预测显示到2045年将出现显著的供应减少  
2045年铀产量预测概述



资料来源：高盛全球投资研究、UxC、公司报告



铀供应分析

我们预测，到2030年，初级铀产量将从目前的~160百万磅增加到接近~190百万磅，并在2034年前保持相对稳定，之后到2045年将下降至大约~120百万磅。值得注意的是，我们的未来预测中包含了95%的利用率假设，以应对可能的停机或运营问题。重要的是，前五大矿山占总铀产量的~40%，而前十名矿山则占~60%。我们将在下文提供更多关于关键运营和潜在矿山的详细信息。

图38：2024年，前十大铀矿占总产量~60%

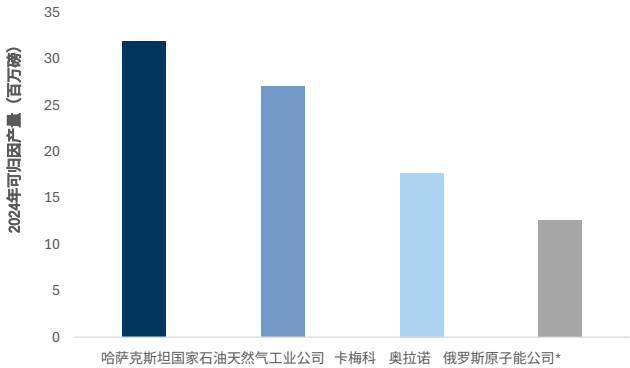
主要铀矿概述

| 矿山                 | 国家        | 所有权                                            | 2024          | 2030E         | 开采方法    | 已验证&可能 (千次 t) | 等级 (%) U3O8 | 已包含铀 (mn lbs) |
|--------------------|-----------|------------------------------------------------|---------------|---------------|---------|---------------|-------------|---------------|
|                    |           |                                                | 生产 (000s lbs) | 生产 (000s lbs) |         |               |             |               |
| 麦克阿瑟里弗             | 加拿大       | Cameco (70%) /Orano (30%)                      | 20,300        | 19,000        | 地下的     | 2,491         | 6.55%       | 359.5         |
| 雪茄湖                | 加拿大       | Cameco (54.5%) /Orano (40.5%)                  | 16,900        | 18,000        | 地下的     | 551           | 15.87%      | 192.9         |
| 胡萨布                | 纳米比亚      | 斯瓦科普 (中国 (90%) /纳米比亚 (10%)                     | 11,000        | 11,000        | 露天矿     | 280,000       | 0.05%       | 319.9         |
| Budenovskoye 2     | 哈 萨 克 斯 坦 | 哈萨克斯坦国家原子能公司 (50%) / 铀一号 (50%)                 | 8,577         | 8,100         | 信息贮存与检索 | 29,200        | 0.10%       | 78.5          |
| 英凯                 | 哈 萨 克 斯 坦 | 卡梅科 (40%) / 哈萨克斯坦国家石油天然气公司 60%                 | 7,779         | 10,300        | 信息贮存与检索 | 368,084       | 0.03%       | 251.0         |
| 奥林匹克坝              | 澳大利亚      | 必和必拓                                           | 8,288         | 10,000        | 露天矿     | 210,000       | 0.06%       | 314.9         |
| 穆永库姆               | 哈 萨 克 斯 坦 | Orano (51%)/ Kazatomprom (49%)                 | 6,208         | 10,000        | 信息贮存与检索 | 41,400        | 0.12%       | 124.5         |
| 罗斯林                | 纳米比亚      | 中核能公司 (69%) /伊朗 (15%) /南非 (10%) /纳米比亚 (6%)     | 6,000         | 5,500         | 露天矿     | 80,000        | 0.04%       | 49.4          |
| N Kharasan 1       | 哈 萨 克 斯 坦 | 哈萨克斯坦国家石油天然气公司 (50%)、铀一号公司 (30%) 和亚洲能源公司 (20%) | 5,278         | 6,500         | 信息贮存与检索 | 28,900        | 0.11%       | 79.8          |
| Budenovskoye 1,3,4 | 哈 萨 克 斯 坦 | 哈萨克斯坦国家原子能公司 (50%) / 铀一号 (50%)                 | 5,202         | 4,800         | 信息贮存与检索 | 36,400        | 0.09%       | 83.2          |
| 共计                 |           |                                                | 95,532        | 103,200       |         | 1,077,026     |             | 1,854         |

资料来源：公司数据，高盛全球投资研究

图39：Kazatomprom是世界上最大的铀生产商

按可归因产量计算的顶级铀生产商



\*代表2023年产量

资料来源：公司报告，高盛全球投资研究

■ 最大的采矿公司

- 哈萨克斯坦国家原子能公司（NATKY）主要由哈萨克斯坦政府持有，同时也在公开市场上交易，是全球最大的铀生产商。该公司在哈萨克斯坦境内运营着14个矿山资产，涉及27个铀矿床，采用ISR方法进行开采。根据~12,500吨或32.5百万磅的标准，哈萨克斯坦国家原子能公司在这些资产中的所有权。公司

- 2024年，哈萨克斯坦国家原子能公司报告的铀产量为12,300吨或31.9百万磅。然而，在100%的基础上，哈萨克斯坦国家原子能公司生产的铀为23,270吨（60.5百万磅），高于2023年的21,112吨，相当于世界铀产量的~35%。



- 2024年，哈萨克斯坦国家石油天然气工业公司主要的矿山/合资企业包括与Cameco合资的Inkai（持股60%），该矿生产了2,992吨；Karatau（持股50%），该矿生产了3,299吨；以及持股30%的South Mining Chemical Company合资企业，该公司生产了2,803吨。
  - 截至2024年底，该公司在其备案文件中持有30万吨铀的已探明和可能储量。
  - 该公司将铀运送到霍尼韦尔、Cameco和Orano拥有的转换设施。
  - 公司报告称，2024年的综合维持成本为每磅27.65美元，较2023年的每磅21.37美元和2022年的每磅16.19美元有所上升。公司预计2025年的AISC成本将为29.00-\$30.50美元。
- 加拿大卡梅科公司（CCJ）是全球最大的非国有公开上市铀矿公司。该公司运营着一些世界上最大的矿山，包括拥有54.5%股份的锡格湖矿，该矿在2024年生产了1690万磅铀（按100%基准计算）；以及拥有70%股份的麦克阿瑟河矿，该矿在2024年创下了2030万磅铀的年度生产记录（同样按100%基准计算）。该公司还持有哈萨克斯坦Inkai矿40%的权益，以及美国（Crow Butte和Smith）的暂停采矿资产。
- 兰奇-高地）。
- 2024年，Cameco报告的可归属产量为2700万磅，其中包括其在Inkai的360万磅产量。若以100%计算，Cameco的铀产量（不包括Inkai）达到3720万磅，较2023年的~2800万磅增长了~33%，这一数据涵盖了McArthur River和Cigar Lake资产的总产量。
  - Cameco报告称，2024年的总生产成本为31.35/lb美元，低于2023年的35.72美元。
  - 麦克阿瑟河是世界上最大的铀矿，已探明和可能的储量为250万吨，平均品位为6.55%，为公司提供360百万磅铀(100%基准)。
  - 雪茄湖是全球第二大运营中的铀矿，但其铀品位最高。雪茄湖已探明和可能的铀储量为60万吨，平均品位为15.87%，为公司提供1.93亿磅铀(100%基准)。
  - Cigar Lake的矿石在McClean Lake磨坊加工，该磨坊主要由Orano拥有和运营，而McArthur River的矿石在Key Lake磨坊加工，该磨坊主要由Cameco拥有和运营。
- 奥拉诺（法国）是法国政府全资拥有的企业，是全球第三大铀生产商。该公司在全球范围内拥有四个运营资产，分别位于加拿大（麦克阿瑟河和雪茄湖）、尼日尔（索迈尔）和哈萨克斯坦（卡特科）。

- 2024年，Orano报告的可归属产量~6,800吨或按100%计算，Orano的资产生产~17,700吨或45.9百万磅。
- 截至2024年底，Orano持有的资产中已探明和可能的铀储量为~23万吨，平均品位为4.53%。然而，其股份相当于~8万吨铀。
- 重要的是，Orano拥有能够将铀浓缩至3%-5%的转换和浓缩工厂。这包括Malvesi工厂，该工厂能将铀转化为四氟化铀（UF<sub>4</sub>），年产能为14,000吨；以及Philippe Coste工厂，该工厂能将UF<sub>4</sub>转化为六氟化铀，同样拥有14,000吨的年产能。我们注意到，Orano保留了~40%的西部转换能力。此外，还有Georges Besse II工厂，这是欧洲最大的浓缩工厂，年产能为750万标准单位（SWU），能够将U-235含量浓缩至3%-5%。公司还提供铀回收及其他服务。
- 俄罗斯国家原子能公司（Rosatom）曾是全球第四大铀生产商，其在哈萨克斯坦国家原子能公司（Kazatomprom）拥有的多个资产中，2023年生产了4,831吨（约1260万磅）的铀。然而，2024年12月，哈萨克斯坦国家原子能公司宣布，Rosatom正将其持有的股份出售给中国公司。
- 其他重要经营矿：
  - 胡萨布——位于纳米比亚的胡萨布矿由斯瓦科普铀业公司拥有，该公司是纳米比亚国有的埃潘杰洛矿业公司与中国政府所有的塔乌斯矿业有限公司之间10%/90%的合资企业。该矿的年产能为每家公司报告6000吨。
  - 奥林匹克坝是位于澳大利亚的一座地下矿，由必和必拓公司拥有，是全球最大的铜、金及铀矿藏之一。铀的生产技术上属于铜和金生产过程中的副产品。根据公司报告，2024年奥林匹克坝生产了3,600吨铀。

#### ■ 拟建矿山

- 车/箭-车项目，拥有箭矿床，是加拿大最大的开发阶段铀项目。该项目由NexGen能源公司全资拥有，预计在近12年的矿山寿命期间，平均年产量为1980万磅铀，最大年产能接近3000万磅。根据技术报告，该项目的平均运营成本为每磅10美元。
- 惠勒河（凤凰/格里芬）——位于加拿大阿萨巴斯卡盆地的惠勒河项目拥有凤凰和格里芬矿床。该项目由丹尼森矿业公司控股，该公司计划采用ISR采矿技术开发凤凰矿床，并采用传统地下开采方式。

就狮鹫矿床而言，根据其技术报告，凤凰矿床预计在10年矿山寿命期间生产5500万磅，而狮鹫矿床预计在7年矿山寿命期间生产5000万磅。

- 帕特森湖南项目(Triple R) 位于加拿大阿萨巴斯卡盆地，由帕拉丁能源公司拥有（该公司于2024年12月收购了菲森铀业）。根据技术报告，该项目预计在10年的开采期内可生产~9000万磅的铀。
- 埃尔康项目位于俄罗斯东部，是全球已知的最大未开发铀矿之一。该项目由ARMZ铀业控股公司拥有，该公司隶属于俄罗斯国家原子能公司（Rosatom），后者在其技术报告中估计，一旦项目达到满负荷生产，年产量将达到~5,000吨。据估计，该项目的铀资源总量为344,000吨，平均铀品位为0.146%。

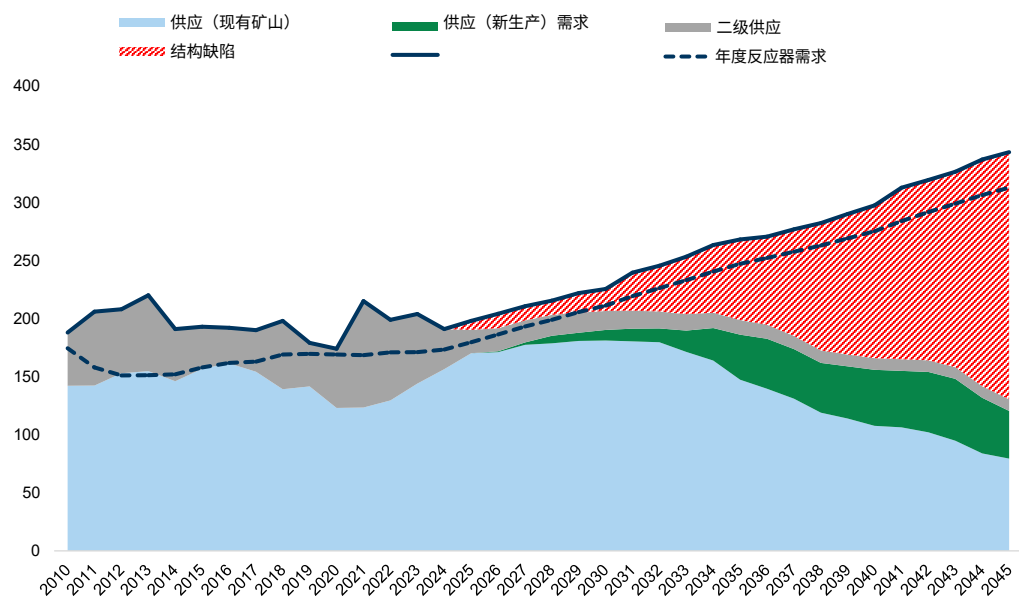
#### ■ 存货

- 由于历史上的铀产量超过了民用需求，市场参与者将铀库存作为二级资源持有。一些政府还讨论了建立战略铀储备的问题。此外，德国、日本和瑞典等地的退役核电站产生了多余的燃料。铀的二次来源非常广泛，包括商业库存、政府和承包商的库存（如军事材料、贫化铀、其他铀材料）、国际燃料库、未使用的燃料组件、贫化铀尾料（由浓缩厂或政府提供）以及回收材料。

#### 铀需求分析

我们预测，到2030年，初级铀产量将从目前的~160百万磅增加到接近~190百万磅，并在2034年前保持相对稳定，之后到2045年将下降至大约~120百万磅。值得注意的是，我们的未来预测中包含了95%的利用率假设，以考虑潜在的停机时间。这与我们预计2030年的铀需求量约为226百万磅相比，生产与需求之间存在大约~35百万磅的结构性缺口。我们预计，到2045年，随着新反应堆的投入运行和首次燃料装载加速当前结构赤字，这一赤字将增长至大约~205百万磅。截至2024年11月的第29届联合国气候变化大会（COP29），31个国家承诺到2050年将全球核能发电量增加三倍。这些国家包括目前拥有核电能力的成熟核国家，以及至今尚未拥有核电的新兴发展中国家。此外，中国计划在未来15年内建设150座核反应堆，每年新增6-8座，根据中国的“十四五”规划，目标是在2035年前达到200吉瓦的核能发电量。我们预计，新的发电量加上现有核电站的寿命延长及升级，将在未来20+年内增加对铀的需求。

图40：我们预计库存减少和新供应上线将不足以满足U308快速增长的需求  
铀供应/需求预测至2045年



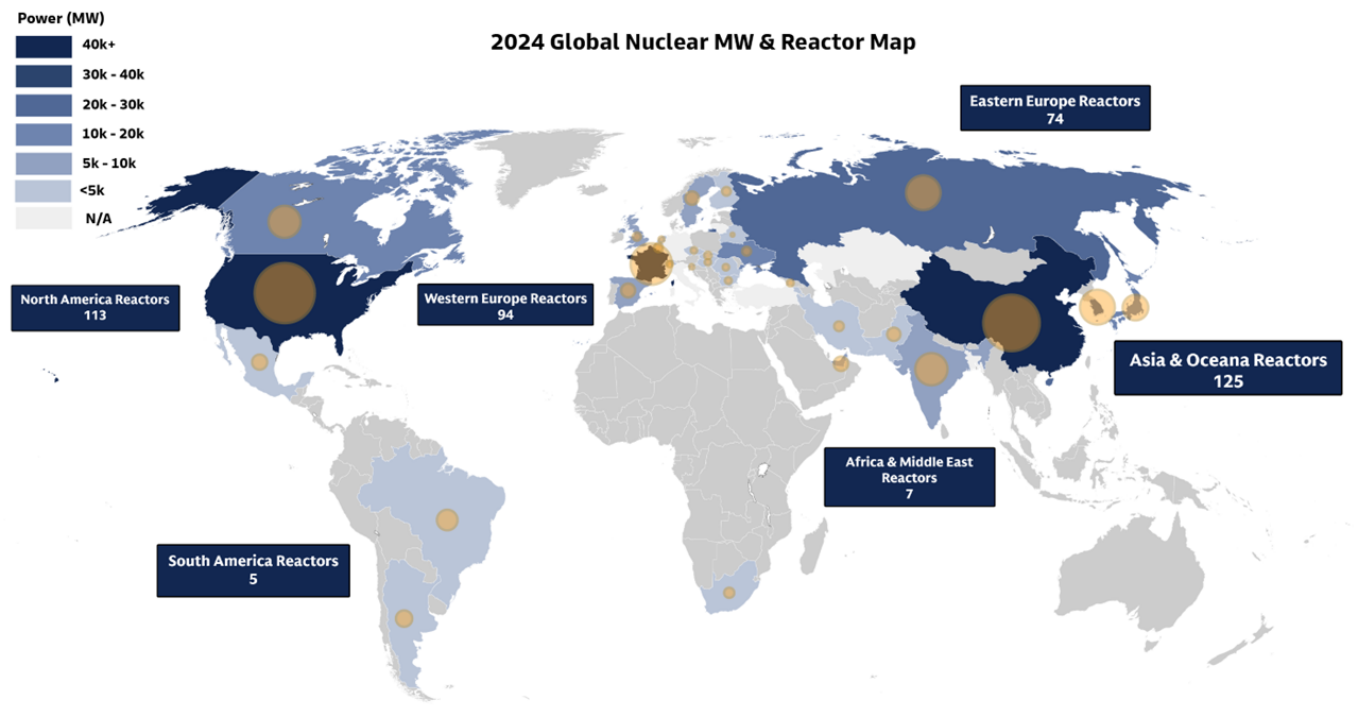
资料来源：NEA，高盛全球投资研究，UxC

目前，我们估计2024年的U308需求，包括运行中的反应堆需求和首次加燃料的反应堆增加的燃料需求，大约为~180百万磅。在我们的需求假设中，我们预计现有反应堆将延长运行时间，新建反应堆将与各国到2050年的核能发电目标保持一致，且在基准情景下不考虑SMR的需求。此外，我们仅计算正在消耗燃料的运行反应堆，因此未包括印度的4个暂停运行的反应堆和日本的19个暂停运行的反应堆，尽管我们预计这些反应堆将在未来10年内重新投入运行。对于2024年

假设我们基于418个运行中的反应堆，这不包括19个可操作但暂停的日本反应堆和4个暂停但可操作的印度反应堆，这使得全球可操作的反应堆总数在2024年底达到441个。



附表41：按国家分列的当前全球反应堆数量和兆瓦发电量  
目前全球反应堆总数和各国兆瓦发电量

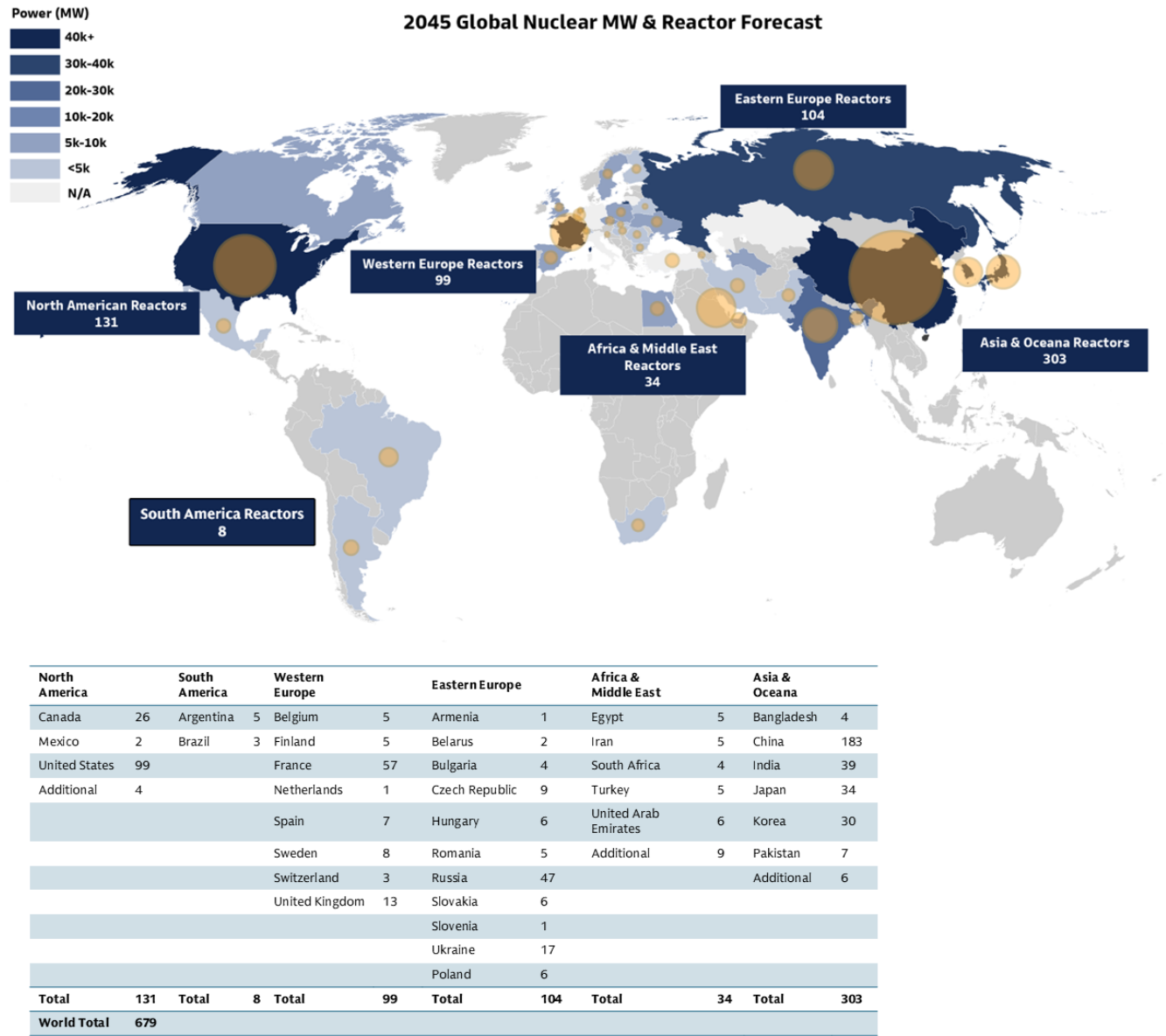


| North America |     | South America |   | Western Europe |    | Eastern Europe |    | Africa & Middle East |   | Asia & Oceania |     |
|---------------|-----|---------------|---|----------------|----|----------------|----|----------------------|---|----------------|-----|
| Canada        | 17  | Argentina     | 3 | Belgium        | 5  | Armenia        | 1  | Egypt                | - | Bangladesh     | -   |
| Mexico        | 2   | Brazil        | 2 | Finland        | 5  | Belarus        | 2  | Iran                 | 1 | China          | 58  |
| United States | 94  |               |   | France         | 57 | Bulgaria       | 2  | South Africa         | 2 | India          | 20  |
|               |     |               |   | Netherlands    | 1  | Czech Republic | 6  | Turkey               | - | Japan          | 15  |
|               |     |               |   | Spain          | 7  | Hungary        | 4  | United Arab Emirates | 4 | Korea          | 26  |
|               |     |               |   | Sweden         | 6  | Romania        | 2  |                      |   | Pakistan       | 6   |
|               |     |               |   | Switzerland    | 4  | Russia         | 36 |                      |   |                |     |
|               |     |               |   | United Kingdom | 9  | Slovakia       | 5  |                      |   |                |     |
|               |     |               |   |                |    | Slovenia       | 1  |                      |   |                |     |
|               |     |               |   |                |    | Ukraine        | 15 |                      |   |                |     |
| Total         | 113 | Total         | 5 | Total          | 94 | Total          | 74 | Total                | 7 | Total          | 125 |
| World Total   | 418 |               |   |                |    |                |    |                      |   |                |     |

资料来源：PRIS，高盛全球投资研究

图42：我们预测核电发电量和反应堆数量将大幅增长

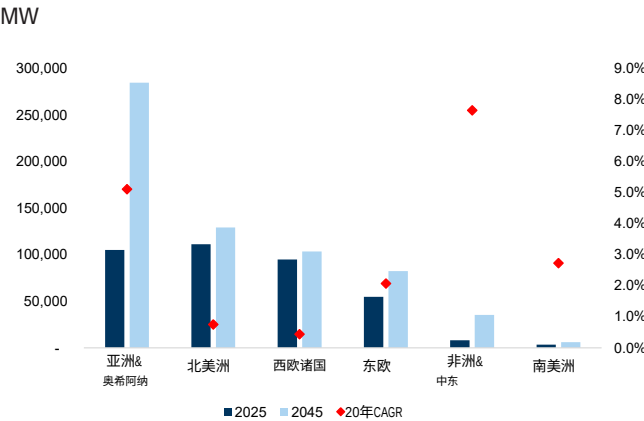
2045年核电发电量及反应堆台数预测



资料来源：PRIS，高盛全球投资研究

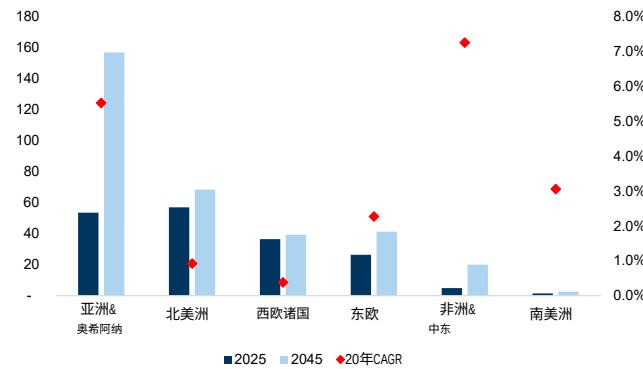
我们预计，在未来20年里，中国将推动大部分新建核电站的增长，同时，来自其他国家的新增建核电站也将陆续投入运营。在后续年份，我们假设每个反应堆的效率会提高，这意味着燃料消耗量将会减少。我们预计到2045年，每年对反应堆的需求将增加到~3.28亿磅U308，这一需求还不包括公用事业公司为储备库存、政府或个人购买者带来的额外需求。

图43：我们对各区域的核电发电量增长进行了估算，其中亚洲及大洋洲的发电量增幅最大。



来源：高盛全球投资研究，PRIS，WNA

附录44：我们预计到2045年U308反应堆的年度需求量将增加~1.5亿磅。磅U308



来源：高盛全球投资研究，PRIS，WNA

供需考量。铀的转换率与传统采矿方法不同，具有独特性。具体而言，一公吨铀相当于~2,600磅U308，而其他金属的传统转换率为2,204磅。

需求模型的关键假设

- 当前运行的反应堆。我们对全球范围内的每个反应堆进行建模，不考虑不可运行或暂停运行的反应堆的需求。我们使用最新报告的兆瓦发电量来计算每个反应堆所需的EUP。
- 燃烧率。我们以反应堆为基础对燃烧速率进行建模，使用较低的速率来描述较老、效率较低的反应堆，并使用较高的速率来描述更新、效率更高的反应堆。
- 容量系数。我们对全球核反应堆舰队的基准容量系数为90%，这相当于核反应堆的平均容量系数。
- 效率。我们根据反应堆类型对效率进行建模，例如PWR/BWR的效率约为33%。
- 产品分析。我们对PWR/BWR反应堆的产品分析建模，占全球已安装运行反应堆的大多数。
- 尾部分析。我们对除俄罗斯外的所有国家采用平均尾部分析值为0.25%，而俄罗斯则采用0.13%的尾部分析值，因为俄罗斯的离心机设计运行时的尾部分析值为~0.10%。我们认为这一尾部分析值假设在整个模型中较为保守，因为使用0.25%的尾部分析值意味着到2033年全球的浓缩能力已经足够。2033年后，除非有新的浓缩能力上线，否则将出现短缺，这意味着浓缩器需要增加进料量，以达到所需的浓缩水平，同时减少SWU（标准单位）的需求。如果尾部试验上升，这将增加对U308的需求，高于我们目前的预测水平。
- 初始装载要求。我们对全部燃料装载量进行建模，平均为3倍。

平均每年反应堆需求量。

- 预计反应堆将投入运行。我们的模型假设当前正在建设的反应堆将在未来10年内投入运行，此外，我们还将纳入计划中的反应堆建设。除此之外，我们还纳入了一些但并非全部提议的反应堆。
- 反应堆寿命。我们采用平均75年的反应堆寿命来考虑寿命延长。

附录45：我们对需求预测进行了敏感化处理，以更好地了解关键变量如何影响估计值

GSe铀需求预测中关键变量的敏感性分析

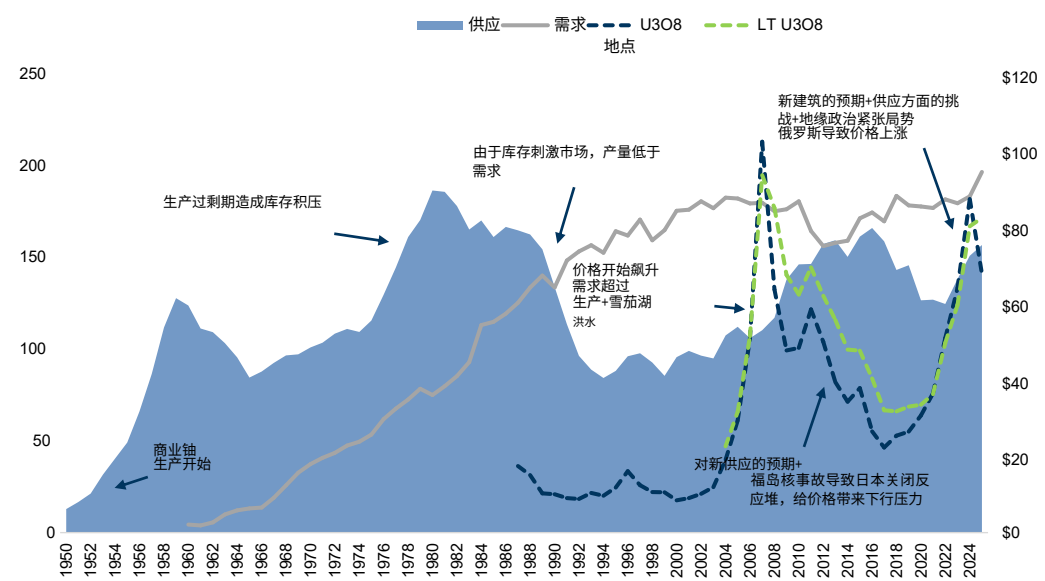
| 基线    | 灵敏度              | 2040年需求       | SWU要求2040   |
|-------|------------------|---------------|-------------|
| 0.25% | 尾部+/- 0.05%      | +/- 27mn lbs. | +/- 8mn SWU |
| 4.3%  | PWR/BWR富集+/- .3% | +/- 20mn lbs. | +/- 7mn SWU |
| 33%   | PWR/BWR效率+/- 2%  | +/- 16mn lbs. | +/- 4mn SWU |
| 90%   | 容量系数+/- 5%       | +/- 12mn lbs. | +/- 3mn SWU |

资料来源：高盛全球投资研究

定价和合同

关于核能的定价和合同，关键商品和价值链的开始部分显然是铀，或者更具体地说是U308。价格通常会根据未来几年的供需预期波动，因为公用事业公司作为主要买家，会根据是否有更多的供应上线与额外需求之间的对比来做出决策，这可能会导致价格上涨或下跌。此外，公用事业公司通常会通过燃料周期向后签订合同，优先考虑富集和转换能力的合同，然后再签订U308合同，因为如果无法将铀转化为可用的核燃料——包括后续处理——那么拥有铀库存就显得不太重要了。

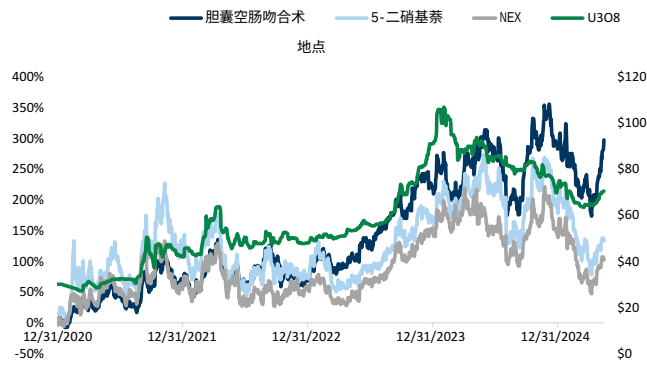
图46：铀价随需求和供应预期波动，价格波动在供需失衡期间更为剧烈  
历史供需与价格对比 (LHS - mn lbs.) (RHS - \$USD)



来源：高盛全球投资研究，NEA，UXC

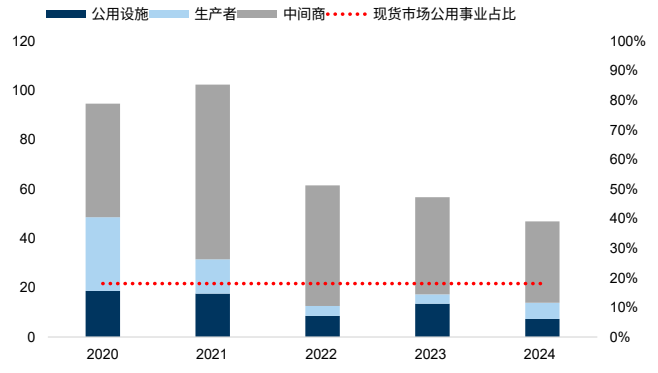
尽管铀现货价格与铀库存表现之间存在显著的相关性，但绝大多数（~80%）的铀现货价格波动主要由中间商和生产商之间的交易引起。公用事业公司通常会提前3至10年签订燃料供应合同，以确保供应链中的误差余量，并储备2至3年的库存。这些合同通常在期货市场签订，而87%的公用事业燃料交易量是在期货市场完成的。推动这一趋势的主要因素是燃料的生命周期。例如，如果公用事业公司与供应商签订了U3O8的燃料供应合同，约定在3年后交付，那么这批燃料可能还需要1到3年的时间才能完成转换、浓缩和制造，之后才能入库。从入库到燃料最终投入反应堆运行，通常还需要大约2年的时间。因此，公用事业公司很少会进入现货市场进行采购（大约13%的采购是在现货市场上完成的），除非他们认为在当前价格水平下持有更多库存是有利可图的，尽管短期内可能并不需要这些库存。

图47：核铀矿开采股票与现货价格变动高度相关...  
LHS -股价相对于RHS的百分比增幅\$现货价格



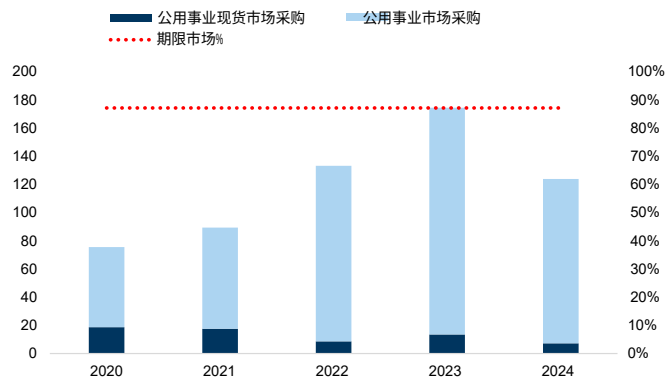
数据来源：FactSet、高盛全球投资研究、UxC

附录48：...主要由中间商和生产商驱动，因为公用事业占现货市场总量的比例不到20%...  
按买方分类的现货市场成交量



来源：UxC，高盛全球投资研究

附录49：...尽管公用事业公司长期合同中~87%的交易量是通过市场达成的  
现货市场与期货市场采购的公用设施数量



来源：UxC，高盛全球投资研究

由于该行业缺乏交易量和透明度，铀市场的定价比其他商品更不透明。铀市场有两个主要的价格指标，即每日报告的现货价格和每月报告的期货价格。我们估计，平均而言，现货市场仅占铀总量的20%-30%，而剩余70%-80%是通过长期合同签订的。

现货定价是一个主要由交易商主导的零售领域，由于该市场缺乏成交量和流动性，少量英镑进入市场就能显著影响现货定价。在现货市场中，根据UxC的数据，2024年中间商/其他渠道的现货交易量占总交易量的93%，这一比例与过去20年的水平基本一致，而公用事业部门的交易量占比约为3%  
2024年U3O8的供应量为1.3百万磅，这一数字与历史数据基本一致。现货市场通常作为过剩处理市场或最后手段市场发挥作用，当公用事业公司需要U3O8，而与其签约的生产商出现问题，无法提供供应时，就会启用这一市场。



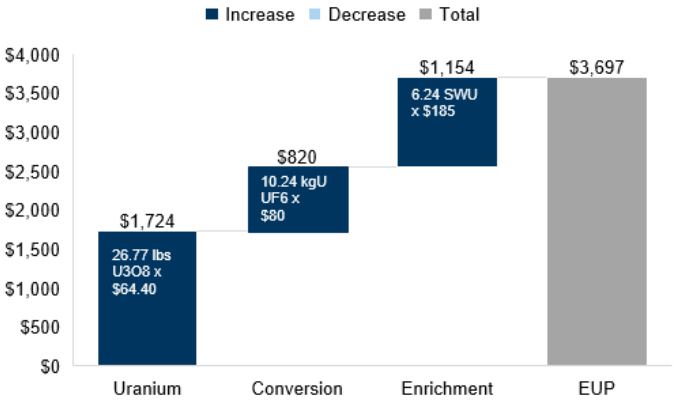
期限定价是指公用事业公司运营的市场，大多数U308（燃料浓缩物）被公用事业公司合同购买，用于供应核反应堆。通常，期限市场的购买合同为多年期，首次交付通常在3年后，因为大多数U308已经提前数年被合同购买，用于未来2-3年的核燃料生产。这个市场较为不透明，价格每月仅报告一次，因此比现货价格波动小，更能反映像Cameco这样的生产商根据合同协议将获得的实际收益。

合同。公用事业公司通常会签订固定价格或市场相关的交付合同，这些合同通常是5到7年的长期协议，通常在首次交付前2到3年签订。固定价格合同在签订时即确定，通常包含一个2%到3%的浮动条款。这类合同通常以长期价格签订。例如，如果一家公用事业公司今天签订了一份为期五年的合同，长期价格为每磅80美元，并设定了2%的递增条款。在三年后的首次交货时，该公用事业公司将支付大约每磅85美元。由于递增条款，这一价格将在合同剩余期间每年递增。到第七年，即合同的最后一年，该公用事业公司将支付大约每磅92美元。

另一种合同类型是市场相关的合同。这类合同设定了最低价和最高价，规定了公用事业公司支付的价格不会低于或高于这些设定的金额，这些价格基于长期或现货价格。除了最低价和最高价之外，这类合同的另一个显著特点是价格在交付时确定。例如，如果一家公用事业公司今天签订了一份长期价格为每磅80美元、交货时间为3年的合同，最低价为每磅60美元，最高价为每磅130美元，那么根据交付时的价格，公用事业公司支付的价格可能会有很大差异。如果交付时的长期价格为每磅110美元，公用事业公司将支付每磅110美元；如果长期价格为每磅50美元。在交货时，由于合同签订时双方约定的地板价为每磅60美元，因此公用事业公司将支付每磅60美元。如果交货时长期价格为每磅200美元，公用事业公司仅需支付每磅130美元，因为合同签订时的上限价为每磅130美元。

附件50：从U308到EUP的桥梁

制造EUP的投入成本



资料来源：UxC，高盛全球投资研究

## 核股焦点

### Cameco Corp (CCJ/CCO.TO；买入-由Brian Lee覆盖)

公司业务：CCJ是一家市值160亿美元的铀矿开采公司，采用垂直整合模式，确保其在核能价值链中拥有100%的参与度。截至2024年，公司的核心业务为85%的铀销售和15%的燃料服务。公司不仅运营矿山、磨坊、转换设施和燃料制造设施，还拥有西屋电气，这是一家提供工程和采购服务的核反应堆服务提供商。

核能对商业模式有何影响？CCJ的主要业务是铀矿开采，公司拥有两家加拿大矿山和一家哈萨克斯坦矿山的股份，这些矿山占全球总产量的~15%。作为全球成本最低的生产商之一，CCJ拥有显著的运营杠杆优势。公司的主要客户是美国、欧洲和亚洲的公用事业公司，这些客户通常会提前3-9年签订合同，购买天然铀和转换铀，这使CCJ能够根据需求获得稳定的供应。CCJ通过持有西屋电气49%的股份，对核能价值链的下游部分拥有影响力，这使得西屋电气在2024年为CCJ带来了~30%的EBITDA。CCJ在西屋电气的股份增加了其商业模式的价值，因为它使CCJ能够直接接触核技术和原始设备制造商/服务领域。根据西屋电气的数据，其业务模式覆盖了目前在役的所有反应堆的40-50%。这不仅为CCJ提供了来自不断增长的核能领域的收入，还将受益于其服务的180-200台反应堆的庞大安装基础，以及未来十年内将投入使用的新反应堆。

价格目标与风险。我们对CCJ/CCO的12个月价格目标为65美元/89加元，基于各部分估值的总和，调整后的EBITDA。我们给予铀业务14倍的市盈率，燃料服务业务21倍的市盈率，以及西屋电气25倍的市盈率。主要风险包括：与低于预期的产量、交货时间和销售时间、低于预期的商品价格、高于预期的运营成本以及核反应堆建设时间长于预期有关的操作执行。

### NuScale Power Corp (SMR；中性，由Brian Lee报道)

公司业务：SMR是一家市值为50亿美元的公司，正在全球范围内建设小型模块化反应堆，以降低核能成本并加快部署速度。SMR是唯一一家在美国核管理委员会（NRC）审查中拥有活跃申请的公司。我们预计该公司将完全依赖核能领域实现收入增长。

核能对商业模式有何影响？SMR与全球核能的部署紧密相连，目标是在未来几年成为SMR终端市场的重要参与者。该公司是美国唯一拥有SMR技术的企业，其设计申请已提交给NRC，并计划在2025年获得最终设计认证。公司已建立供应链协议，正在生产预计于~2030年交付的电力模块。

价格目标与风险。我们设定的12个月价格目标为24美元，这一目标基于DCF和EV/销售倍数估值的50%权重。我们采用10年DCF，该估值基于GAAP收入和GAAP利润率。对于EV/销售部分，我们对2030年的GAAP收入预测应用了7倍的倍数。主要风险包括客户和执行风险、更高的现金消耗和资本需求、达到Nth of a kind能力的成本增加、竞争加剧以及获得许可的难度。

### **米里昂科技（MIR；买入-由Joe Ritchie覆盖）**

公司业务：米里昂技术（MIR）是一家市值达30亿美元的公司，是电离辐射检测与测量技术领域的领导者。MIR为核能、国防、医疗和研究领域提供检测、测量、分析和监控解决方案。MIR的业务分为两个主要部分：医疗和核能与安全。商业核能业务占公司收入的38%，MIR预计其核能业务在2025财年将实现+HSD增长。

核能对商业模式有什么影响？在过去12到18个月里，MIR在核能领域取得了显著进展。近期，多家大型企业宣布投资核能，以满足数据中心的电力需求（例如，MSFT与Constellation在三里岛的合作，GOOG与Kairos power的合作，AMZN与Energy Northwest的合作等），我们预计这一趋势将持续。MIR的订单中，有75%涉及核测量和检测设备，而工业界对核能的投资渠道非常有限。MIR透露，其核能订单总额约为3亿至4亿美元，预计大部分订单将在2025年前完成。

目标价格及风险。我们设定的12个月目标价为20美元，基于Q5至Q8季度EBITDA的18.5倍市盈率。主要风险包括有机增长放缓、利润率长期承压以及并购导致的股权稀释。

### **GE Vernova（GEV；买入-由Joe Ritchie覆盖）**

通用电气威诺瓦（GE Vernova, GEV）是一家市值达890亿美元的全球电力行业领导者，提供发电、输电、变电和储能等产品和服务。这是一家以脱碳为核心目标的公司，其装机容量占全球电力供应的近25%。GEV的业务分为三个报告部分：电力、风能和电气化。核能是公司的一个较小部分，2024财年对电力部门的收入贡献约为~5%。目前，GEV在10个国家运营着~65座使用其技术的核电站。电力部门的核能分支通过与日立有限公司的合资企业进行运营。

核能对商业模式有何影响？GEV坚定地投资核能。GEV表示，预计到本十年末，美国将新增近3-5吉瓦的核电能力。公司认为，核能在本十年内将促进服务增长，并在未来十年成为设备收入增长的重要推动力。GEV还指出，其核技术已经过验证，燃料基础设施已获得许可，供应链也已准备就绪，这将加快交付速度。GE Hitachi也有小型模块化

一种名为BMRX-300的反应堆（SMR）技术，与典型的水冷SMR相比，显著降低了每兆瓦发电的资本成本。

目标价格及风险。我们设定的12个月目标价为500美元，基于Q5至Q8季度的25.0倍EBITDA。主要风险包括：监管和地缘政治变化导致的增长放缓、供应链中断引发的项目延期以及执行风险。

### Flowserve Corp (FLS；中性，由Joe Ritchie覆盖)

公司业务：Flowserve Corporation (FLS) 是一家总部位于美国的全球制造商，市值约为50亿美元，专注于精密工程流体控制系统的生产。FLS通过其两个部门——Flowserve Pump Division (FPD) 和Flow control Division (FCD) ——提供泵、阀门、机械销售及自动化设备，以及诊断和维护服务。这些产品广泛应用于关键基础设施领域，包括石油与天然气（占2024年订单的37%）、化工（19%）、发电（13%）、水管理（5%）和一般工业（26%），如采矿和食品饮料行业。FLS不仅支持原始设备制造（OEM），还提供售后市场服务。FLS预计，全球能源转型和对脱碳基础设施的投资增加将使FLS受益。

核能对商业模式有何影响？核能是福陆服务公司脱碳战略中的高利润、长周期增长动力。福陆服务公司连续两个季度需求强劲，2024年第三季度和第四季度的核订单均超过1亿美元。福陆服务公司在欧洲、亚洲和北美支持新建设和延长项目，其认证组件组合，包括N型设备，具备核级可靠性。鉴于全球电力需求的增长，由人工智能、能源安全优先事项以及老化核反应堆的安装基数增加所驱动，福陆服务公司预计其核业务将提供持久的售后市场拉动，并增强经常性收入的可见度。

目标价格与风险。我们设定的12个月目标价为54美元，基于Q5至Q8季度的10.0倍EBITDA。主要的上行风险包括执行效率提升、油价上涨、订单量超出预期以及行业整合；而下行风险则涉及80/20利润率计划未能实现、订单表现平平以及并购导致的股权稀释。

### 南方公司。(S0；买入——由Carly Davenport承销)

南方公司是一家市值980亿美元的受监管公用事业公司，主要运营美国东南部的电力和天然气服务。该公司拥有超过870万的电力和天然气用户。南方公司在阿拉巴马州、佐治亚州和密西西比州运营着三个受单一州监管的电力公司，这些地区的监管环境较为宽松，同时还有四个受监管的天然气公司。此外，南方公司还拥有——一个竞争性的电力业务——南方电力，拥有13吉瓦的发电能力，并且还拥有技术与电信子公司——PowerSecure和南方电信。

核能对商业模式有何影响？S0拥有约4.8吉瓦的受监管核能发电能力，2024年核能在其能源组合中占比约为19%。除了其他资产外，GA电力公司是美国最大的核电站——Vogtle核电站的部分所有者（持股45.7%）。该核电站的1号和2号机组是在

1976年，3号和4号机组的建设于2009年开始。经过十多年的建设和挑战，SO公司最终在2024年4月29日将原定于2017年投入运营的Vogtle 4号机组正式投入使用，为佐治亚州的客户提供服务。3号机组则于2023年7月开始运行。这标志着该项目因执行问题而持续了十多年的延迟终于结束。

价格目标与风险。我们基于Q5至Q8季度预测的市盈率（P/E）为21倍，据此得出12个月的市盈率目标价为102美元。主要风险包括监管方面的负面发展、低于预期的费率基础及收益增长、负载增长和资产负债表的负面调整。

### 杜克能源公司（DUK；中性，由Carly Davenport报道）

杜克能源是一家市值930亿美元的电力和天然气公用事业公司，服务范围覆盖卡罗莱纳州、佛罗里达州、印第安纳州、俄亥俄州、肯塔基州和田纳西州。DUK是一家纯粹的受监管公用事业公司，拥有820万电力客户和160万天然气客户，投资于发电、输电和配电领域。

核能对DUK的商业模式有何影响？2024年，核能发电占DUK总发电量的~28%，公司运营着11座核电站，分布在六个站点。这些核电站分别由杜克能源卡罗莱纳、杜克能源进步和杜克能源佛罗里达拥有，总装机容量为~9 GW+。DUK宣布，计划在2025年至2029年间，从其830亿美元的资本计划中投资39亿美元用于核燃料，旨在扩大先进核能项目。这包括公司在2025年第四季度向北卡罗来纳州提交早期选址许可申请，继续与行业工作组和核供应商合作进行技术评估，以及参与美国能源部的US Gen III+小型模块化反应堆技术资助申请。DUK认为核能是一种可靠且清洁的能源，税收优惠有助于降低客户的成本。总体而言，DUK将核能视为其全面发电战略的一部分，该战略在全国范围内不断推进。

目标价格和风险。我们12个月的目标价格为125美元，是基于我们对Q5-Q8每股收益的18倍市盈率。主要的上行/下行风险与资产负债表、收益执行、监管结果和成本管理有关。

### 公共服务企业集团(PEG；中性——由Carly Davenport负责)

PEG是一家市值400亿美元的公用事业公司，主要业务包括在新泽西州受监管的输电和配电服务，以及拥有4吉瓦核能发电能力的商业发电业务。此外，该公司还拥有一家名为PSEG长岛的子公司，负责运营长岛电力局的电力传输和配电系统。

核能对商业模式有何影响？PEG的非监管发电业务PSEG Power拥有其核能发电资产，截至2024年，这部分业务贡献了公司总收入的大约10%。该公司的所有发电能力均位于新泽西州和宾夕法尼亚州。其在新泽西州的发电厂位于



“人工岛”因其潜在的联合数据中心交易和其他核能购电协议吸引了投资者的兴趣。这包括其全资拥有的Hope Creek，该设施拥有1.1吉瓦的发电能力；以及Salem 1号和2号机组，这两台机组各占57%，总发电能力为1.3吉瓦。此外，PSEG Power还持有Peach Bottom 2号和3号机组50%的股份，这两台机组的总发电能力同样为1.3吉瓦。总体而言，其商业核业务为PEG提供了稳定的现金流和价格保护，因为PTCs为其长期增长前景提供了稳定性。公司正在投资于人工岛上的电厂升级项目，以延长其核燃料循环，并延长其运营许可证。

价格目标与风险。基于SOTP的12个月价格目标为83美元。PEG的关键上行/下行风险包括：1) 与数据中心的合同加速了Power的收益增长，2) 核PTC的不确定性，3) 当前资本计划的潜在上行空间。

### **Vistra公司(VST；中性——由Carly Davenport覆盖)**

Vistra是一家市值360亿美元的电力公司，总部位于德克萨斯州，同时也是一个零售电力供应商。VST通过其零售部门直接向消费者销售电力，并向批发市场供应电力。VST在美国20个州拥有资产，拥有41吉瓦的发电组合和500万零售客户。Vistra的发电组合包括23吉瓦的天然气、8.4吉瓦的煤炭、6.5吉瓦的核能、464兆瓦的太阳能和1吉瓦的储能设施。VST是美国数据中心增长和电力需求上升的主要受益者之一，过去一年的表现比XLU高出50%。

核能对商业模式有何影响？尽管VST拥有多种发电机组，但其核能发电量~6.5 GW，全部处于非监管状态，其中约4 GW位于PJM市场，剩余2.4 GW位于ERCOT。这些核电站由于核能的高容量因子和收益稳定性（得益于核能的平准化电价），具有显著价值。然而，这些资产的主要潜在优势在于，有可能与数据中心或其他大型负荷客户签订PPA，以较高的价格。价格数据中心运营商青睐核能，因为其清洁可靠，可提供基荷发电。

目标价格及风险。基于12个月SOTP的目标价格为134美元。

上行/下行风险与潜在的数据中心交易、PJM容量拍卖、低于预期的电力价格以及电力需求主题的未来有关。

### **Dominion Energy (D；中性，由Carly Davenport报道)**

公司业务：Dominion是一家市值440亿美元的多元化公用事业公司，为弗吉尼亚州、北卡罗来纳州和南卡罗来纳州的410万客户提供服务。公司成立于1909年，拥有包括30.3吉瓦的发电能力、10,600英里的输电线路和79,700英里的配电网络。作为弗吉尼亚州最大的公用事业公司，它不仅服务于联邦政府，还支持着众多促进经济增长的科技公司。Dominion 70%的合同能源来自康涅狄格州唯一的核电站——米尔斯通核电站，该电站提供了超过90%的无碳电力。其余的合同能源收益则来自

太阳能，1.3 gw，RNG，和Charybdis，第一个海上风力涡轮机安装船。

核能对商业模式有何影响？D公司通过其合同资产部门Millstone在康涅狄格州运营着一座核电站，该电站拥有2吉瓦的发电能力，并且还有~4吉瓦的受监管核能发电量，其收益基于所在地区规定的允许回报率。尽管由于报告结构的限制以及反应堆建于1970年代且已严重折旧，将收益归因于受监管的核能资产存在挑战，但截至2024年，D公司的发电资产中~20%为核能。在不受监管的发电方面，Millstone电站几乎一半的电力输出是通过Millstone 2019年购电协议出售的，每年向Eversource Energy的服务区域提供900万兆瓦时的电力，直至2029年。其余电力则通过批发市场的竞争性投标过程售出。

价格目标与风险。我们设定的12个月价格目标为61美元，基于SOTP模型。我们对DEV的市盈率为17.5倍，对DESC的市盈率为17.0倍，对合同资产的EV/EBITDA比率为11.0倍。主要的上行/下行风险包括：1)弗吉尼亚州高于平均水平的电力需求，2)监管不确定性，3)许可和建设方面的执行风险。

### 日立有限公司（6501.T；买入—由Ryo Harada覆盖）：

日立公司：日本日立公司的市值为1150亿美元，是日本领先的大型企业集团之一。然而，在过去十年左右的时间里，日立公司开始优先发展以数字基础设施为核心的业务，并积极剥离非核心资产。目前，日立公司的业务主要集中在三个领域：

(1) DDS（数字系统与服务）、(2)GEM（绿色能源与移动）和(3)CI（连接产业）。在GEM领域，公司通过与通用电气(GE日立核能)的合资企业开展核电业务。2024财年，该业务销售额达到171.1亿日元，占公司总销售额的2%。

核能对商业模式有什么影响？日立目前没有在进行任何新的核电站建设项目，但正在对现有的核电站进行维护。我们相信，如果日本重启核电站，日立在重启工程中的作用将更加显著。日立还拥有与下一代核反应堆相关的技术，包括小型模块化反应堆（SMRs）。尽管目前尚不清楚日立未来是否会积极参与此类反应堆的建设，但我们认为，在技术合作和专利利用方面，日立的重要性不容小觑。

目标价格与风险。我们设定的12个月目标价格为4,900日元，基于2026财年到2027财年的平均EV/EBITDA比率为13倍。风险包括：数字系统和服务方面，大型项目可能出现延误和损失；宏观经济下滑导致客户对IT资本支出的信心减弱；服务器及其他产品供应中断的再次出现；GlobalLogic的独立增长速度放缓。

日立与GlobalLogic之间的协同效应实现速度低于预期；绿色能源与移动（日立能源）：电力传输/分配项目的延迟，投入成本急剧上升；连接产业：新建筑需求减弱



中国在新的维修和维护订单上输给日本竞争对手，半导体生产设备（SPE）的价格长期来看没有改善，这对测量和分析系统业务（日立高新技术）构成了风险；公司整体：外汇波动（日元对美元升值1%可能对销售额造成120亿日元的负面影响，对调整后的EBITA值造成12亿日元的影响）以及由于外汇波动导致的采购价格分配（PPA）摊销增加。

### 三菱电机株式会社(6503.T；买入——由Ryo Harada覆盖)：

三菱电机（MELCO）是一家日本公司，市值约为380亿美元。公司业务范围广泛，主要业务包括工厂自动化（FA）和暖通空调（HVAC）。近期，其国防与空间系统业务及电力基础设施业务因客户协议和订单的增加而受到关注。目前，公司正在对其汽车设备业务进行重组。MELCO还生产多种核电厂的核心产品。这些设备包括反应堆安全壳中使用的冷却泵电机和控制棒驱动线圈、中央控制面板、大型变压器和气体绝缘开关设备（GIS）。

核能对商业模式有何影响？我们估计，在2024财年，MELCO的核能相关业务销售额仅占销售总额的个位数百分比。然而，在电力需求不断增长的背景下，如果国内核电站重新启动，公司可能会受益。在核聚变领域，三菱电机为ITER项目提供了环形磁场线圈（TF线圈），以及为日本与欧盟合作的JT-60SA联合聚变项目提供了中心螺线管线圈（CS线圈）和平衡磁场线圈（EF线圈）。如果核聚变的实际应用取得进展，这些产品可能会受到更多关注，而公司在这方面已有交付记录。

目标价格与风险。我们对12个月的目标价格为3,600日元，基于2026财年至2027财年的平均EV/EBITDA比率为8.5倍。主要的下行风险包括：工业自动化系统（FA）：如果订单增长放缓持续，利润增长将不足以抵消新生产设施带来的折旧增加。工业自动化系统（汽车设备）：退出汽车多媒体业务进展缓慢，CASE业务中寻找合作伙伴面临挑战，或客户汽车制造商的生产大幅放缓。家用电器（HVAC）：由于采购组件困难及其他因素，难以实现生产规模，或在竞争加剧的ATW业务中利润率下降。功率半导体：无法获得足够的销售或订单以覆盖新的资本支出，或面对中国公司和其他竞争对手的激烈价格竞争。电梯与自动扶梯业务：在中国及其他市场的新建需求停滞，或国内业务中的高利润维护合同被第三方获取。基础设施系统：

国防和空间系统业务的项目延期或超出预期的损失。全公司：业务之间实现协同效应的前景较弱，日元升值。

### 三菱重工（7011.T；买入——由Yuichiro Isayama覆盖）：

三菱重工（MHI）是一家市值达600亿美元的日本重型工业公司。核能是其核心业务之一，与燃气轮机联合循环技术并列，占MHI能源系统部门总收入的约5%。截至2024财年，公司的核能销售主要分为三部分：50%用于日本反应堆的维护和重启，40%用于核燃料循环，10%用于出口等。核能是MHI在其“2024中期业务计划”中确定的三大核心增长业务之一。

核能对商业模式有何影响？MHI在日本的核电价值链中扮演了关键角色。其主要客户是日本的电力公司。迄今为止，MHI专注于重启日本的压水堆（PWR）核电站，并将进一步承担重水堆（BWR）核电站的重启工作。MHI的竞争优势之一在于其在专门安全设施（SSF）的设计和认证方面的专业知识，这是2011年大地震后日本核电站的新要求。随着更多的核电站重新启动，维护工作将在日本政府最新的基本能源计划的推动下使MHI在未来受益。根据该计划，日本将进一步利用核能。

目标价格与风险。我们设定的12个月目标价格为3,000日元，基于2028财年的预测和9倍的EV/EBITDA比率。主要的风险包括：日元可能比预期更强势；GTCC业务因低利润率项目集中或一次性大额支出导致盈利能力下降；以及由于投资组合改革受挫，整体回报率可能下滑。

### IHI（7013.T；买入-由Yuichiro Isayama覆盖）：

IHI是一家市值100亿美元的日本重型工业公司。过去几年，核能业务的收入贡献约为5%。IHI的主要收入和利润来源是民用航空发动机和国防业务。根据《2023年集团管理政策》，核能业务被定位为公司传统核心业务之一。

核能对商业模式有什么影响？IHI为核反应堆的容器和压力容器以及相关的维护工作做出了贡献。IHI致力于通过核反应堆重启及维护工作，确保核电业务的稳定收入。2021年，IHI投资了NuScale电力公司，并参与了SMR项目的开发。

目标价格与风险。我们设定的12个月目标价格为13,000日元，基于2027财年的预测和9倍的EV/EBITDA比率，未考虑行业相对折扣。主要风险包括日元升值、民用航空发动机业务利润率低于预期，以及由于投资组合改革放缓导致的折价扩大。

附录：核价值链——从上游到下游

理解核能价值链，包括关键步骤和参与者，对于推动核能的发展至关重要。值得注意的是，核能的价值链与其他可再生能源（如太阳能）的链条相似，都是由支持清洁能源生产的供应商和活动组成的网络。资源或矿物被开采并转化为可用材料，这些材料通过技术提供商的技术得到增强，设备制造以利用这些技术，开发/工程、采购和建设（EPC）公司负责建设使用这些技术的设施，最终客户购买这些技术的输出，即能源。在太阳能中，矿物是硅或石英；而在核能中，矿物是铀。

附录51：核价值链概述

| 公司       | 采矿业；<br>转变 | 丰富 | 工业燃料 | 重型组件<br>制造商 | 基础<br>组件 | 燃料<br>制造 | O&M | 高级反应堆<br>设计与<br>制造业 | 运输 | 退役<br>以及废物<br>经营 |
|----------|------------|----|------|-------------|----------|----------|-----|---------------------|----|------------------|
| 贝克特尔     |            |    | ✓    |             |          |          |     |                     |    | ✓                |
| 布克特      |            |    |      | ✓           |          | ✓        | ✓   | ✓                   |    | ✓                |
| 卡梅科      | ✓          | ✓  |      |             |          | ✓        |     |                     |    |                  |
| 森特鲁斯     |            | ✓  |      |             |          | ✓        |     | ✓                   |    |                  |
| 柯蒂斯-莱特   |            |    |      | ✓           |          |          | ✓   | ✓                   |    |                  |
| 斗山能源能力   |            |    | ✓    | ✓           | ✓        |          |     |                     |    |                  |
| 氟石       |            |    | ✓    |             |          |          | ✓   |                     |    | ✓                |
| 弗拉玛通     |            |    |      | ✓           | ✓        | ✓        | ✓   | ✓                   |    |                  |
| 通用电气日立   |            |    |      |             |          | ✓        | ✓   | ✓                   |    |                  |
| 纳诺核      |            |    |      |             |          | ✓        |     | ✓                   | ✓  |                  |
| 奥拉诺      | ✓          | ✓  |      |             |          | ✓        |     |                     | ✓  | ✓                |
| 俄罗斯原子能公司 | ✓          | ✓  | ✓    |             |          | ✓        |     |                     |    | ✓                |
| 尤伦科美国    |            | ✓  |      |             |          |          |     |                     |    |                  |
| 西屋       |            |    |      | ✓           |          | ✓        |     | ✓                   |    |                  |

资料来源：高盛全球投资研究

铀的生产和浓缩

如上所述，核燃料循环概述了核价值链的第一步，即开采/提取铀，并将其转化为核反应堆的可用燃料形式。

- 主要铀生产商：Kazatomprom、Cameco、Orano。
- 主要转换公司：Cameco、CNNC、ConverDyn、Orano、Rosatom。
- 主要富集公司：CNNC、Orano、Rosatom、Urenco。
  - 预期的浓缩商：Centrus、Global Laser Enrichment、ASP Isotopes、NANO Nuclear。
- 主要燃料制造公司：TVEL（俄罗斯）、Westinghouse、Framatome、Orano、三菱核燃料。

发电厂开发——制造、建造、服务和维护

建造核电站需要在严苛的操作条件下进行重型工业制造，以生产核能。这些设备制造商包括大型全球企业集团，它们参与核电站建设过程的每一个环节，包括维护和

维护（例如斗山能源、弗拉马通、西屋等）以及可能生产单个组件的公司。这些公司大多不开发自己的技术，而是通常与技术供应商合作（下文将详细讨论），以帮助项目从概念变为现实。特别是对于大型重型设备，如压力容器或蒸汽涡轮机的组件制造商，可能会为特定的技术供应商投资特定的生产线。

■ **核设备制造商包括（但不限于）：**

- 斗山能源（034020.KRX）是全球领先的核电站组件供应商，提供包括核反应堆、内部结构、蒸汽发生器、冷却泵、加压器、压力容器等在内的多种产品。斗山能源与传统核能公司及能源公司合作，如西屋电气、CNNC、坎杜能源和美拉尔科，并向特拉电力和努斯凯尔供应SMR部件。
- 弗拉玛通的子公司克鲁索锻造厂生产重机械部件，如反应堆压力容器和蒸汽发生器，并为法国所有核电站以及美国的一些核电站提供设备。弗拉玛通正与Nuscale、霍尔特克、通用原子能公司等多家公司合作，共同推进SMR技术的发展。
- 西屋电气公司，其中51%的股份由布鲁克菲尔德可再生能源公司（BEP）持有，49%由卡梅科公司（CCJ）持有，主要生产大型组件，如反应堆容器内部件、控制棒驱动机构和反应堆冷却泵，以及小型零件。该公司不仅服务于传统反应堆，还在推进其AP300 SMR设计，并与罗尔斯·罗伊斯合作开发燃料技术。
- 三菱重工（7011.T）生产压力容器、大型核部件，以及压水反应堆的替换部件、服务和技术。该公司正与TerraPower合作推进其SMR设计。
- BWX Technologies（BWXT）制造蒸汽发生器、反应堆压力容器（用于GE-Hitachi BWRX-300 SMR）以及其他核部件。该公司是潜艇和航空母舰用核反应堆的唯一制造商。尽管其主要业务对象是政府，但其业务中约有25%涉及商业和医疗领域。此外，该公司还是GE Vernova SMR供应商集团及国防部Pele项目的供应商，后者是一个移动核反应堆的原型项目。
- GE Hitachi（与GE Vernova和Hitachi合资）
- 西门子能源（ENR1n.DE）提供蒸汽涡轮机和发电机。该公司正在为罗尔斯·罗伊斯供货。
- 柯蒂斯-莱特核能公司是柯蒂斯-莱特（CW）的子公司，提供全面的核产品，并且是X-能源和TerraPower的供应商。

- 其他核部件制造商包括United Heavy Machinery、Atomenergomash、Fluorserve (FLS) 和AtkinsRealis (ATRL)。

### 谁帮助建造核电设施

与公用事业规模太阳能发电厂的开发类似，通常由建筑公司或EPC负责核电站的实际建设，包括工程/设计服务、设备采购、现场许可、施工和调试。

#### ■ 主要核建设/EPC公司：

- Fluor Corp (FLR) 是一家主要的核能工程总承包公司，参与了阿拉巴马州法利核电站的建设，并且是萨凡纳河核解决方案的主要合作伙伴。FLR还与海军核推进计划签订了合同，并从美国能源部获得了450亿美元的核废料清理资金。值得注意的是，FLR在2021年将NuScale分拆出来，并正与NuScale/RoPower合作，在罗马尼亚推进小型模块化反应堆 (SMRs) 的开发。
- 贝克特尔 (BC8. 德国) 于2017年接手美国Vogtle新建项目的施工，取代了Fluor。此外，该公司还与Westinghouse签订了在波兰建造三座AP1000反应堆的合同，并且是TerraPower的EPC。
- Aecon正与Kiewit合作为安大略发电公司建造达灵顿新核项目，该项目正在部署BWRX-300小型模块化反应堆。
- 其他公司包括：斗山能源 (034020-KRX)、西门子能源 (ETR)、KEPCO E&C、PCL建筑、现代和Aecon。

### 所有者/经营者——运营/购买核电站的公司

- 公用事业：南方公司 (SO)，杜克能源公司 (DUK)，多米尼安能源公司(D)，公共服务企业集团 (PEG)，Vistra (VST)。
- 超大型企业：亚马逊 (AMZN)、Meta (META)、Alphabet (GOOG)、微软 (MSFT)

## 附录：铀矿开采101

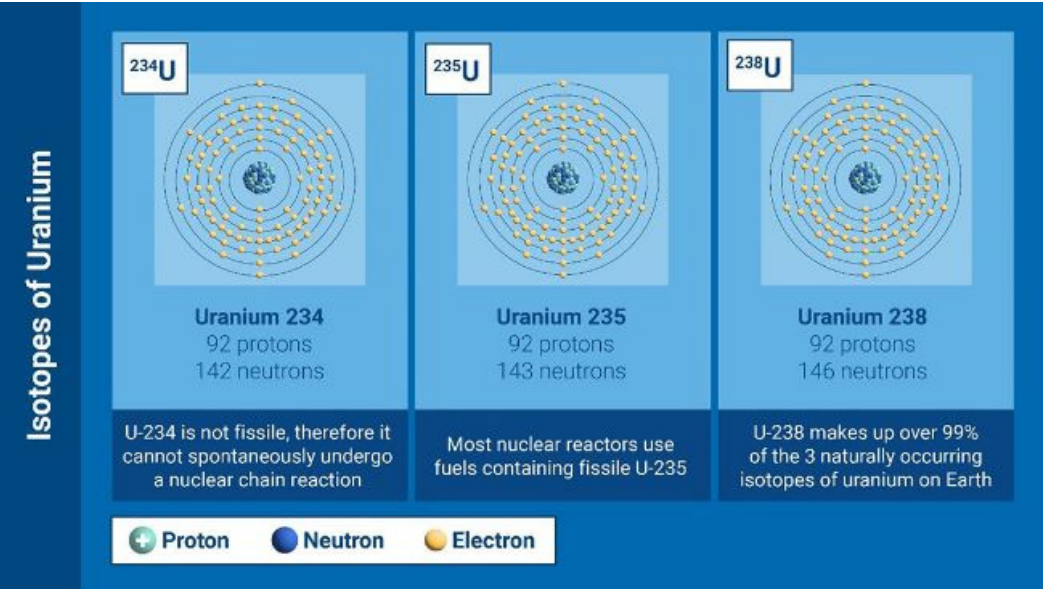
### 什么是铀？

铀是一种天然存在的放射性元素，主要用于核电站发电，同时也应用于医学、国防和工业领域。铀是自然界中原子量最高的元素，其含量高于金、银和汞，但略低于铅。

铀有三种天然同位素，即U-234、U-235和U-238，但地球上的天然铀中~99%为U-238。然而，U-235是核反应堆中主要使用的铀同位素，但在全球天然铀中的比例不足1%。

图52：铀同位素概述

U-235是核反应堆的主要铀同位素



来源：原子能机构。

铀矿床是如何形成的？

国际原子能机构确认了15种主要类型的矿床，以及~40个亚型。这些矿床包括不整合面相关的矿床、砂岩、石英卵石角砾岩、角砾岩复合体、脉状矿床、侵入岩、磷灰石等。然而，铀含量最经济的矿床类型包括：砂岩/沉积矿床（如怀俄明盆地、德克萨斯州、哈萨克斯坦、俄罗斯、澳大利亚和尼日尔）、多金属铁氧化物角砾岩复合体（如奥林匹克坝）以及元古代不整合面（如阿萨巴斯卡盆地）。

根据世界核协会的数据，砂岩矿床占全球已测量和指示资源的~18%，这些矿床通常品位较低至中等（铀品位0.05%-0.35%），且规模较小至中等。砂岩铀矿床通常出现在大陆河流或边缘海洋区域（如盐沼、潮滩、泻湖等）的中到粗粒砂岩中。）在矿化带的上方或下方紧邻不透水的页岩或泥岩。这些特征使得砂岩沉积物更适合ISR采矿方法。

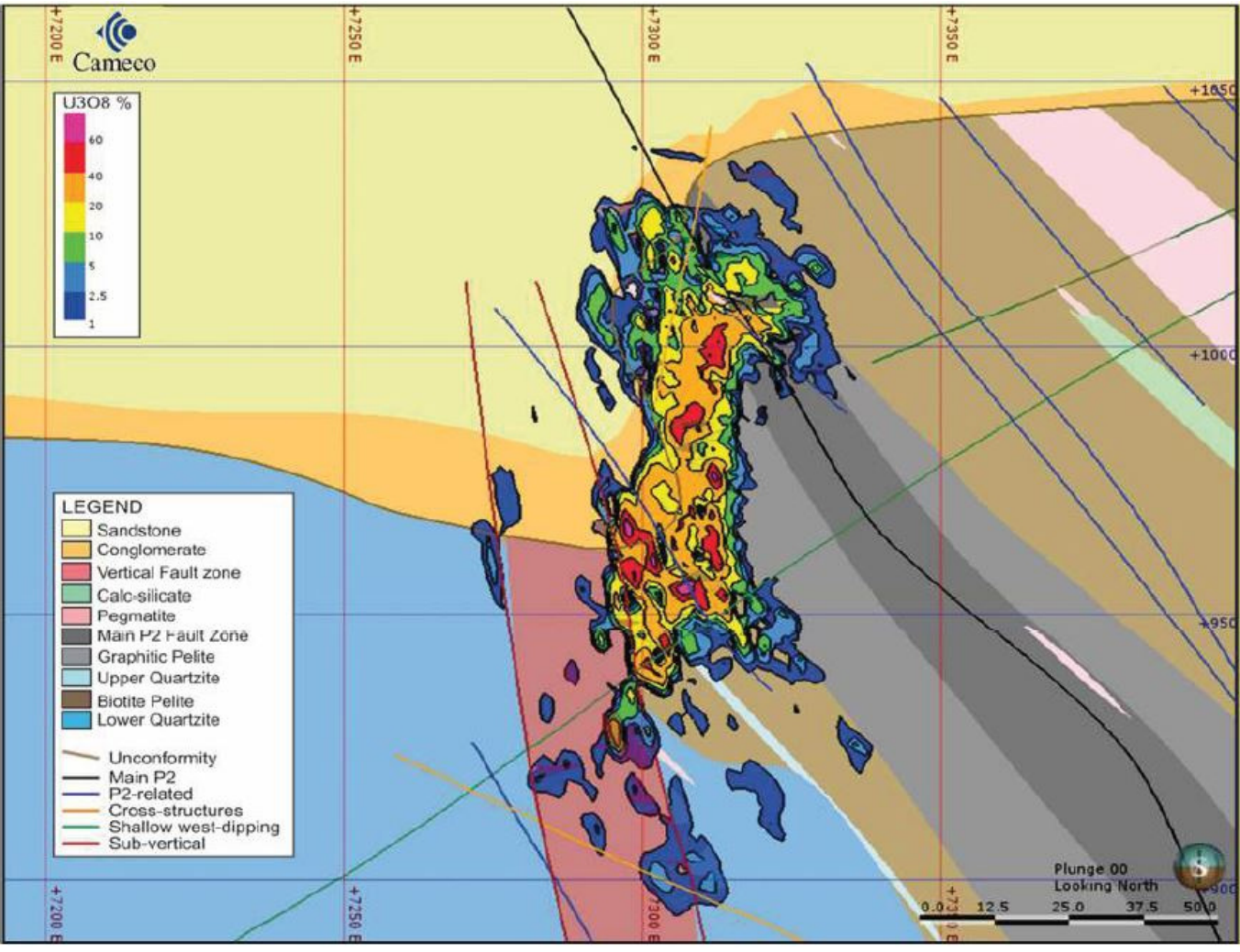
多金属铁氧化物角砾岩复合体通常作为其他矿石（如铜、金、铁和银）的副产品，含有铀，例如澳大利亚的奥林匹克坝。铀存在于赤铁矿-石英角砾岩中，这种岩石由大块的角状岩碎片在基质中胶结而成。据信这些沉积物是在火山喷发期间，由于水和岩浆的爆炸性相互作用而形成的，可能是通过水力压裂或构造断层作用形成的。

元古代不整合沉积物，例如阿萨巴斯卡盆地中的沉积物，受构造控制，通常位于显著区域不整合面的几百米范围内。该不整合面本质上是两个岩石单元之间的边界，反映了由侵蚀或沉积作用暂停所导致的时间间隔。这意味着



不整合面以下的岩石通常比其上方的岩石更古老。这些沉积物通常受到断层或裂隙带的影响。在元古代时期，由于大气中氧气含量低，铀可以缓慢溶解在大型沉积盆地中的流体中。当这些流体遇到不整合面时，条件发生变化，促使铀氧化物矿物的沉积。这些矿床通常品位较高，可以通过传统的采矿方法（如地下开采或露天开采）进行开采。

附图53：麦克阿瑟河矿床2区矿化地质剖面

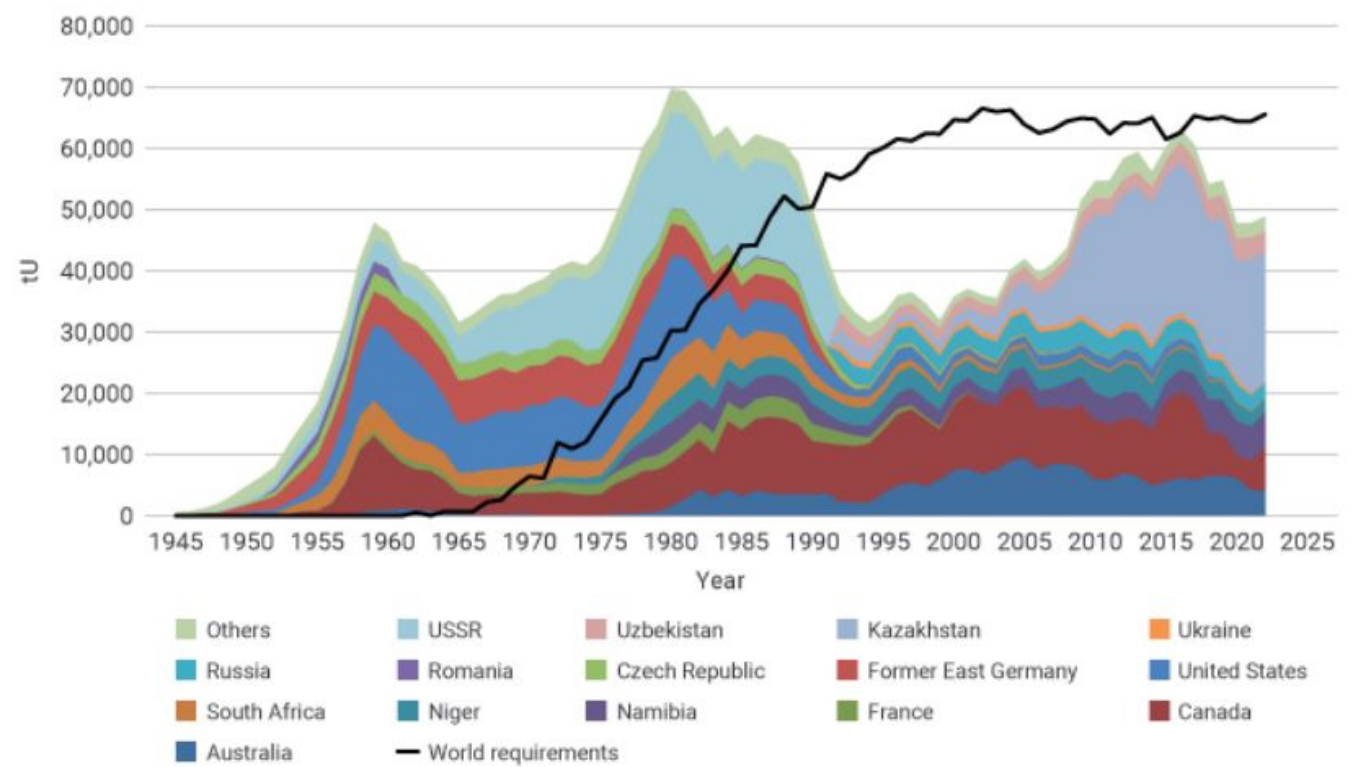


来源：Cameco

铀矿开采历史

铀于1789年首次被发现，最初用于玻璃生产中的着色。铀矿开采始于19世纪中叶，但直到20世纪中叶才开始大规模开采，尤其是在二战和冷战期间，各国对原子弹的研究取得了进展。我们注意到，该行业在1980年代达到了铀产量的顶峰，随后由于公众情绪的变化、国家能源政策的调整以及铀价格的下降，产量在1990年代开始下滑。目前，铀矿开采活动在20+个国家中进行，但据我们估计，全球约60%的铀产量来自加拿大和哈萨克斯坦。

图54：全球铀产量和反应堆需求（吨） 铀产量在20世纪80年代达到顶峰

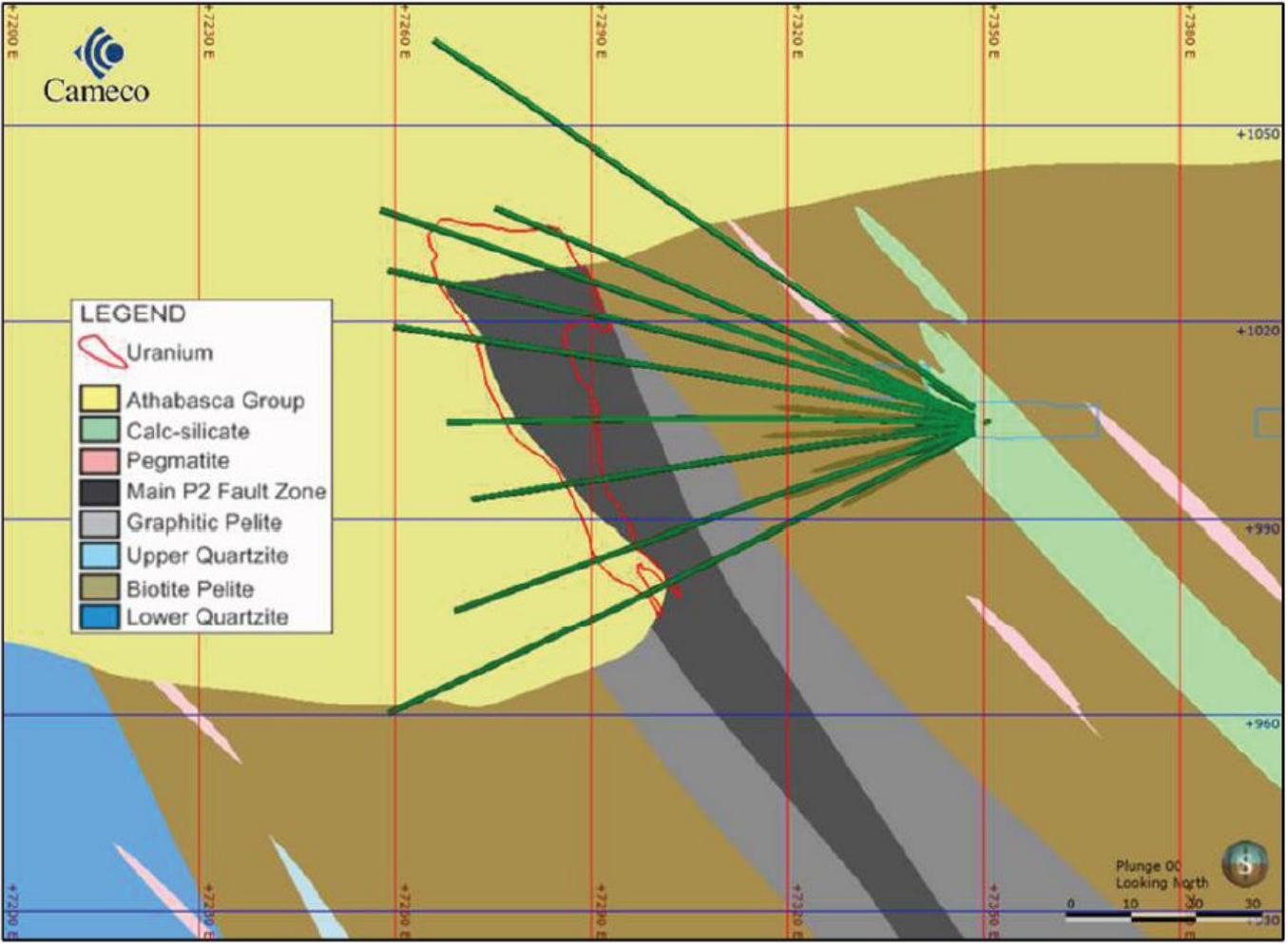


资料来源：世界核协会、经合组织-原子能机构、原子能机构。

划分矿床

发现和定义铀矿床的过程与其他金属相似，实际上由于放射性衰变的作用，通过空气中的伽马射线光谱分析和磁数据，可以从空气中识别出这些矿床，这使得这一过程稍微容易一些。一旦确定了矿床的位置，就会进行钻探计划，以测试潜在的目标区域，并更准确地确定矿床的规模和品位，评估其是否具有经济开采的价值。钻探测定的结果通常会以一定长度的矿床平均品位的形式呈现。

图55：典型地下钻孔间距



来源：Cameco

一旦钻探到足够的矿藏，就可以形成一个资源评估报告，该报告总结了矿藏的数量、品位、质量、密度、形状和物理特性。矿物资源通常分为三个等级：测量资源，这是最可靠的数据；指示资源，包括测量资源和指示资源，通常合并为测量和指示资源量；推断资源。这些资源还可以根据经济开采的信心程度进一步分类为已证实的矿物资源和可能的资源（已证实的资源具有更高的可信度）。这些资源评估必须基于初步经济评估（PEA）、预可行性研究（PFS）或可行性研究（FS），这些评估通常会提供关于采矿物流、资本需求和潜在挑战的概览。我们注意到，PEA被称为范围界定研究，提供对潜在项目经济的初步评估，但比PFS和FS报告更初步，FS报告需要最多的工程工作，提供最准确的项目成本和经济假设。

大多数铀矿床的平均铀品位为0.10%+（百万分之一千），部分项目甚至达到~20%的品位，例如Cigar Lake项目的平均品位就高达~16%。这类高品位矿床通常更易于采用传统开采方法。

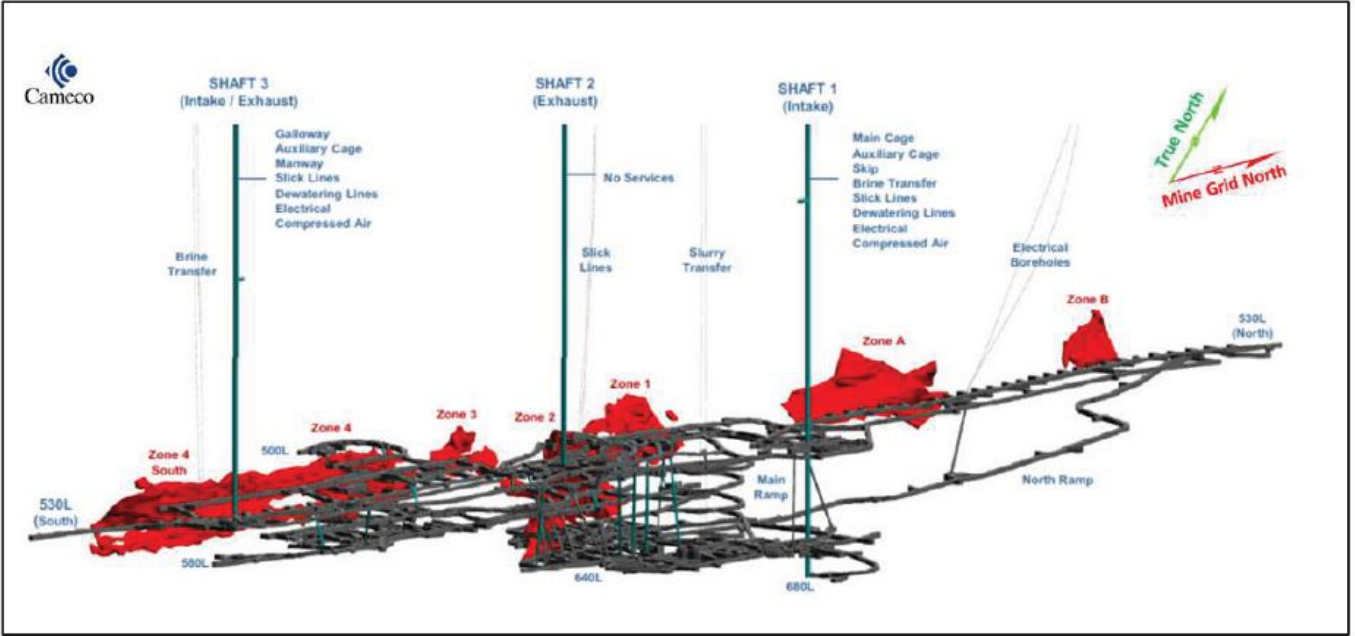


露天或地下开采作业。

开采方法

开采铀矿与其他矿石相似，但可能需要采用特殊技术，如防尘措施，以减少辐射暴露。铀矿开采主要分为两种类型：传统开采和ISR或ISL（离子交换树脂法）。据统计，~35%的铀通过传统方法开采，~60%通过ISR开采，而~5%则作为其他矿物（主要是铜和金）开采的副产品。传统开采方式包括露天开采和地下开采，加工过程涉及一系列物理和化学处理步骤，以提取U3O8。露天开采通常适用于矿床距离地表几百米且覆盖层易于移除的情况；而地下开采则适用于矿床深埋地下或被硬岩覆盖的情况。

附件56：麦克阿瑟河地下工程



来源：Camcco

ISR操作包括将过氧化氢溶液注入钻入矿床的钻孔中，以溶解矿物，然后通过第二个钻孔提取。关键特征包括：

- 通常，ISR采矿可提供较低的前期资本成本、更快的投产时间表和更少的环境风险。然而，ISR有可能污染地下水，仅适用于某些矿床，通常用于低品位矿石，并且在开采过程中可能会遇到技术问题。
- 传统采矿方式更易于理解，可能具有更高的回收率，主要应用于品位较高的矿床。然而，其前期资本成本较高，调试时间较长，并且在废料移除和管理过程中可能会产生环境后果。

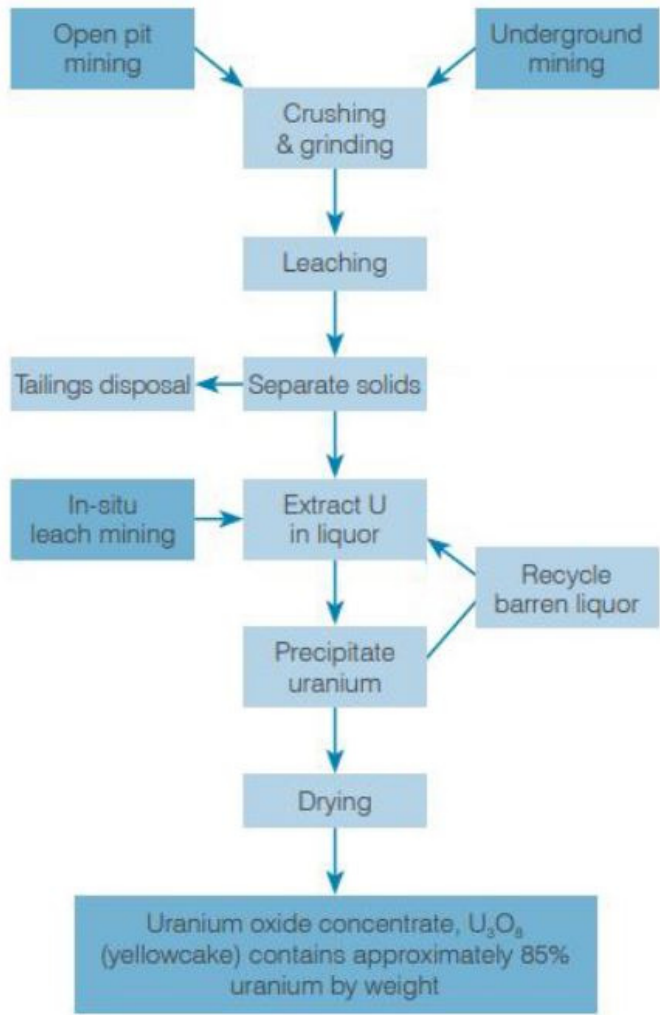
我们注意到，一些铀是作为其他金属的副产品被回收的，例如

在澳大利亚的奥运会上，铜和南非的黄金。

磨削/回收方法

传统的采矿方法和ISR采矿都采用硫酸浸出来溶解铀氧化物，随后通过处理回收铀。然而，传统采矿需要使用磨机将矿石粉碎和研磨，以释放矿物颗粒，使其适合浸出。未溶解的矿物以“尾矿”的形式从富含铀的溶液中分离出来。铀随后通过离子交换（IX）或溶剂萃取（SX）系统回收，并通过酸或氯化物溶液去除铀，之后加入氨、过氧化氢或烧碱，使铀沉淀或固体从溶液中分离。这些固体随后被干燥，转化为U3O8。

图57：铀磨矿和提取工艺步骤概述



资料来源：世界核协会。

矿物分类

随着矿业公司勘探铀矿床，他们将对铀资源进行分类

根据勘探工作的可信度，该资源将根据地质可信度进行细分，包括：

- 测量资源代表了资源（而非储量）的最高置信水平，并且保持了来自勘探、取样和其他测试的充分地质证据，以提供矿床的数量、品位/质量、密度、形状和其他物理特征。
- 指示性资源表示基于充分勘探和测试工作而假设资源量估计的矿床的估计特征。指示性资源的置信水平低于测量资源，只能转换为可能的矿产储量。
  - 测量和指示的资源通常合并为一个测量和指示的总资源或M&I资源。
- 推断资源的置信度最低，通常基于有限的地质证据，这些证据足以推断资源等级或质量。在转换为矿产储量之前，这些资源需要升级为指示资源。
- 探明储量是指测得的矿产资源中具有经济开采价值的部分，是资源量中置信度最高的部分，其商业开采的可能性为~90%+。
- 可能储量代表指示资源（有时是已测量资源）中经济可开采的部分，其置信水平低于已证实储量。
- 我们注意到，矿产储量由预可行性研究或可行性研究支持，该研究提供了支持采矿方法、矿石将被加工的地方以及经济数据的信息。

### 铀矿开采的经济性

铀矿开采的经济性因国家、矿石等级、矿石性质及基础设施的不同而有所差异。各国的风险程度不同，这决定了投资的吸引力、特许权使用费和税收制度等。矿石的质量同样至关重要，因为数量、地质条件、品位和深度等因素都会影响所需资本的投入。

铀矿开采成本可分为资本成本、运营成本和间接成本。资本成本包括前期的场地准备、建设和调试等资本支出，而持续资本成本则是为了维持运营所需的资金，也称为持续资本支出。运营成本涉及矿石的开采和销售前的准备工作，通常还包括特许权使用费。运营成本或现金成本通常以\$/磅或\$/公斤单位报告，并且不包括折旧等非现金项目。间接成本则包括资产的折旧和摊销，以及与勘探或矿山开发相关的未资本化的持续资本支出的利息支付。

成本的典型报告指标：



1. 现金运营成本
2. 总生产成本（含折旧）
3. 维持成本（AISC）包括与维持未来生产活动相关的所有成本。
4. 全部分配成本，包括采矿作业的所有直接和间接成本、健康危害和关注事项

虽然铀本身放射性较弱，但在矿石开采和粉碎过程中，会释放出少量的氡气，这是一种放射性惰性气体。露天采矿作业通常采用自然通风，而地下采矿作业则需要适当的通风措施，以减少矿工的辐射暴露。重要的是，可以通过测量氡气水平来确保达到一定的安全标准。此外，ISR作业由于不涉及实际的矿石开采，因此可以保持较低的辐射暴露水平。

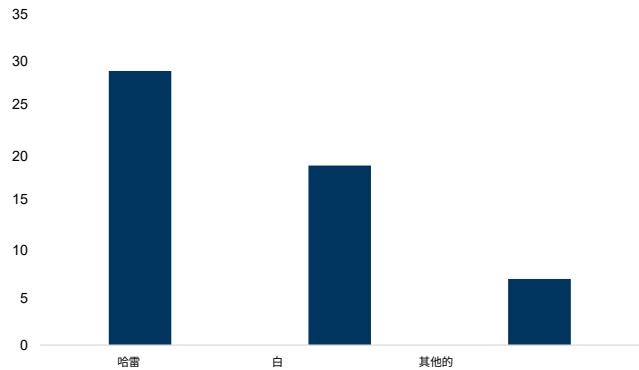
保护措施仍然被用来减少氡的释放。

## 附录：HALEU 101

天然铀中约含0.7%的U-235，U-235是大多数商业核燃料中关键的裂变同位素。通过浓缩工艺，铀-235的浓度可以被提高到不同的水平。低浓缩铀（LEU）通常用于传统反应堆燃料，其浓缩度一般为3%-5%的U-235。若铀的浓缩度超过20%的U-235，则被归类为高浓缩铀（HEU）。

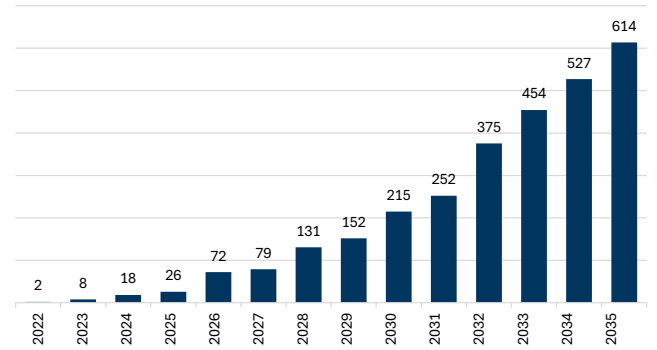
在低浓缩铀（LEU）和高浓缩铀（HEU）之间，或在5%至20%的浓缩度范围内，被认为是高浓缩低浓缩铀（HALEU）。与低浓缩铀相比，HALEU燃料具有显著优势，包括更高的燃烧效率和从相同量的燃料中提取更多的能量。这些特性不仅提高了燃料的使用效率，还延长了反应堆核心的运行寿命。因此，HALEU正逐渐成为先进反应堆设计的首选，因为这些优势对于实现预期性能和可持续性至关重要。

图58：我们认为，使用低浓缩铀燃料的SMR更容易实现商业化，因为HALEU供应链存在不确定性  
每种燃料需求的SMR数量



资料来源：NEA，高盛全球投资研究

附件59：高浓缩低浓缩铀到2035年的年度需求估计  
米/年



来源：NEI HALEU需求调查（2021）

哈雷

HALEU既可以通过传统的气体离心浓缩技术生产，也可以通过将HEU与低浓铀（LEU）混合来制备。在美国，Centrus能源公司和URENCO美国公司已获得核管理委员会（NRC）的许可，可以生产HALEU。

然而，为HALEU建立可靠的国内供应链面临着核工业中的‘先有鸡还是先有蛋’问题。尽管美国具备建设HALEU生产设施的技术能力，但由于目前需求不足，市场仍处于起步阶段。随着先进反应堆设计的开发仍在进行中，以及需求预测尚未完全实现，潜在的生产者面临着与HALEU生产相关的高风险，这些风险主要源于高昂的前期资本成本。反应堆开发商在确保燃料供应稳定之前，不愿承诺采用特定的设计，而缺乏明确的客户基础使得燃料循环公司难以确定需求预测。在美国，政府通过作为HALEU的初始买家来降低这些投资的风险，这有助于燃料循环公司建立更强大的供应链，而无需承担全部的财务负担。

在私营部门，BWXT是唯一一家能够将HEU降解为HALEU燃料的公司。此外，X-能源有限公司的子公司TRISO-X已向NRC申请许可，在田纳西州的新设施生产基于TRISO的燃料。尽管这些努力非常重要，但我们认为它们可能不足以支持建立一个完全功能的国内商业高浓铀燃料循环，或满足短期内对高浓铀日益增长的需求。能源部（DOE）意识到，在推动高浓铀燃料循环商业化的同时，必须保持现有的铀生产能力，以支持美国核工业的发展。因此，高浓铀发展的未来路径仍不确定，其商业化进程可能会逐步推进。

大多数基于HALEU的SMR开发人员都基于使用他们的设计概念

从俄罗斯进口的HALEU。然而，地缘政治紧张局势实际上已经关闭了这一供应渠道，尤其是在2024年8月铀进口禁令生效之后。因此，美国政府采取了果断措施，发展国内HALEU供应链，例如在《创新研究法案》（IRA）中拨款7亿美元支持国内HALEU供应链的发展，以及能源部（DOE）的34亿美元计划，该计划选定了六家能够签订合同采购低浓缩铀（LEU）的公司。这些战略举措对于小型模块化反应堆（SMR）的持续增长至关重要，并为美国核工业提供了更大的上游确定性。

### 三聚体

三结构各向同性（TRISO）燃料是一种专为先进反应堆设计的高性能核燃料颗粒，具有更高的安全性和耐久性。这种燃料由铀、碳和氧组成的核心构成，TRISO颗粒被三层保护涂层包裹，能够承受极端温度和辐射。这种结构赋予了TRISO显著的强度，确保在所有反应堆条件下都能保留裂变产物，有效避免了熔毁的风险。美国能源部认为TRISO是最安全的铀燃料形式，其卓越的结构完整性和热性能显著提升了燃料效率。美国能源部的先进反应堆技术（ART）计划支持TRISO的持续研发，凯瑞斯电力和X-能源等公司计划在其先进的反应堆设计中采用TRISO。虽然TRISO主要关注燃料的完整性和安全性，HALEU则通过提高燃料利用率和减少换料需求来提升反应堆性能。凯瑞斯电力和X-Energy正在推进使用TRISO燃料的SMR。

图60：有几十种反应堆正在尝试  
反应器类型概述

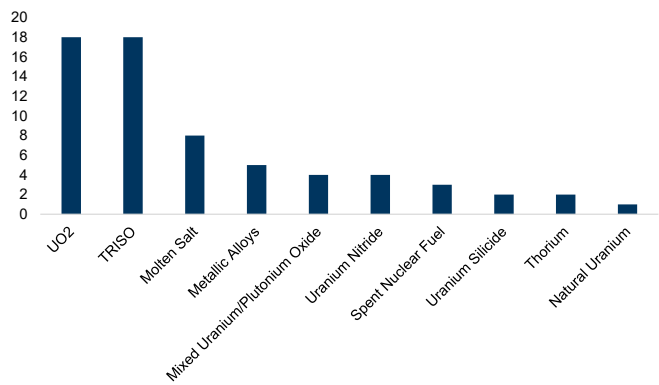
| 姓名                    | 公司                     | 国家         | 燃料类型                        | 燃料（LEU/HALEU/HEU）                          |
|-----------------------|------------------------|------------|-----------------------------|--------------------------------------------|
| 莫维卢克斯<br>密封器- 55      | 东芝能源系统与解决方案公司。<br>布利卡拉 | 日本         | 硅化铀                         | 亮氨酸                                        |
| <b>西屋LFR</b>          | <b>西屋</b>              | 瑞典         | 氮化铀                         | 哈雷                                         |
| KLT-40S               | 俄罗斯原子能公司               | <b>合众国</b> | <b>二氧化铀颗粒或MOX；然后UN颗粒</b>    | <b>对于二氧化铀型颗粒，使用HALEU；对于MOX型，则使用铀-铀氧化物。</b> |
| 卡伦                    | 国家原子能委员会               | 俄罗斯        | 二氧化铀颗粒                      | 哈雷                                         |
| 阿克普100                | 中国核工业总公司               | 阿根廷        | 二氧化铀颗粒                      | 亮氨酸                                        |
| RITM-200N             | 俄罗斯原子能公司               | 中国         | 二氧化铀颗粒                      | 亮氨酸                                        |
| RITM-200S             | 俄罗斯原子能公司               | 俄罗斯        | 二氧化铀颗粒                      | 哈雷                                         |
| <b>BWRX-300</b>       | <b>通用电气日立核能</b>        | 俄罗斯        | 二氧化铀颗粒                      | 哈雷                                         |
| <b>旅行</b>             | <b>NuScale电力公司</b>     | <b>合众国</b> | <b>二氧化铀颗粒</b>               | <b>亮氨酸</b>                                 |
| 智能                    | 卡埃里                    | <b>合众国</b> | <b>二氧化铀颗粒</b>               | <b>亮氨酸</b>                                 |
| ACPR50S               | CGN                    | 朝鲜         | 二氧化铀颗粒                      | 亮氨酸                                        |
| Nuward SMR            | 努沃德                    | 中国         | 二氧化铀颗粒                      | 亮氨酸                                        |
| RR SMR                | 劳斯莱斯SMR                | 法国         | 二氧化铀颗粒                      | 亮氨酸                                        |
| <b>SMR-300</b>        | <b>霍尔特克国际</b>          | 英国         | 二氧化铀颗粒                      | 亮氨酸                                        |
| 快乐200                 | 美籍西班牙人                 | <b>合众国</b> | <b>二氧化铀颗粒</b>               | <b>亮氨酸</b>                                 |
| <b>PWR-20</b>         | <b>最后能源</b>            | 中国         | 二氧化铀颗粒                      | 亮氨酸                                        |
| RITM-200m             | 俄罗斯原子能公司               | <b>合众国</b> | <b>二氧化铀颗粒</b>               | <b>亮氨酸</b>                                 |
| <b>AP300 SMR</b>      | <b>西屋</b>              | 俄罗斯        | 二氧化铀颗粒                      | 哈雷                                         |
| 卡洛吉纳                  | 峡谷                     | <b>合众国</b> | <b>二氧化铀颗粒</b>               | <b>亮氨酸</b>                                 |
| 吉米CMR                 | 吉米                     | 法国         | 二氧化铀或铀硅化物                   | 亮氨酸                                        |
| <b>班尔</b>             | <b>布克特</b>             | 法国         | UCO TRISO棱柱形                | 哈雷                                         |
| Xe-100                | <b>X-能量</b>            | <b>合众国</b> | <b>UCO TRISO和UN TRISO棱镜</b> | <b>哈雷</b>                                  |
| <b>eVinci微型反应器</b>    | <b>西屋</b>              | <b>合众国</b> | <b>TRISO-X鹅卵石</b>           | <b>哈雷</b>                                  |
| HTTR                  | 耶亚                     | <b>合众国</b> | <b>TRISO-X鹅卵石</b>           | <b>哈雷</b>                                  |
| <b>集体小型X线照相检查</b>     | <b>国际电工委员会的美国委员会</b>   | 日本         | 三棱柱形                        | LEU，HALEU                                  |
| <b>D1号塔</b>           | <b>国际电工委员会的美国委员会</b>   | <b>合众国</b> | <b>TRISO棱柱形</b>             | <b>哈雷</b>                                  |
| <b>万花筒</b>            | <b>辐射工业</b>            | <b>合众国</b> | <b>TRISO棱柱形</b>             | <b>哈雷</b>                                  |
| Htgr-极性               | NCBJ                   | <b>合众国</b> | <b>TRISO棱柱形</b>             | <b>哈雷</b>                                  |
| GTHTR300              | 耶亚                     | 波兰         | TRISO棱柱形                    | 哈雷                                         |
| 能量井                   | CVR                    | 日本         | 三棱柱形                        | 哈雷                                         |
| <b>SC-HTGR</b>        | <b>弗拉玛通</b>            | 捷克         | 三棱柱形                        | 哈雷                                         |
| 蓝色胶囊                  | 蓝色胶囊技术                 | <b>合众国</b> | <b>TRISO棱柱形</b>             | <b>哈雷</b>                                  |
| HTR-PM                | 英尺                     | 法国         | TRISO棱柱形                    | LEU或HALEU                                  |
| <b>爱马仕是世界著名的奢侈品品牌</b> | <b>凯洛斯电力</b>           | 中国         | TRISO鹅卵石                    | 哈雷                                         |
| A-HTR-100             | 埃斯科姆                   | <b>合众国</b> | <b>TRISO鹅卵石</b>             | <b>哈雷</b>                                  |
| HTMR-100              | Stratek全球              | 南非         | TRISO鹅卵石                    | 哈雷                                         |
| <b>佩莱项目</b>           | <b>布克特</b>             | 南非         | TRISO鹅卵石                    | 哈雷                                         |
| 特普拉托                  | UWB和CII RC CTU         | <b>合众国</b> | <b>三聚体</b>                  | <b>哈雷</b>                                  |
| LFR-AS-200            | newcleo                | 捷克         | SNF来自低浓缩铀或天然铀               | SNF或天然铀                                    |
| 海克萨纳                  | 六烷                     | 英国         | 莫克斯                         | 氧化铀和钚                                      |
| 奥特拉300                | 奥特拉核能                  | 法国         | 莫克斯                         | 贫化铀和贫化钚                                    |
| SSR-W                 | 莫特克斯能源                 | 法国         | 莫克斯                         | 莫克斯                                        |
| 行星际飞行任务物质保障要求         | 陆上能源                   | 加拿大        | 熔盐                          | 乏燃料的再循环                                    |
| CMSR                  | Seaborg技术              | 加拿大        | 熔盐                          | 亮氨酸                                        |
| <b>左前轮</b>            | <b>菲比能源</b>            | 加拿大        | 熔盐                          | 亮氨酸                                        |
| ThorCon 500           | 索康国际                   | 丹麦         | 熔盐                          | 亮氨酸                                        |
| XAMR                  | 阿纳雷亚                   | <b>合众国</b> | <b>熔盐</b>                   | <b>LEU，钍</b>                               |
| 缩放                    | 莫特克斯弗莱克斯               | 阿拉伯联合酋长国   | 熔盐                          | 亮氨酸                                        |
| Thorizon 1            | 索里顿                    | 法国         | 熔盐                          | 未披露                                        |
| 布雷斯特-奥德-300           | 镍                      | 英国         | 熔盐                          | 亮氨酸                                        |
| <b>钠反应堆装置</b>         | <b>特拉电力</b>            | 荷兰         | 熔盐                          | SNF和钍                                      |
| <b>ARC - 100</b>      | <b>ARC清洁技术</b>         | 俄罗斯        | MNUP燃料                      | 天然或贫化铀和钚                                   |
| 4S                    | 东芝能源系统与解决方案公司。         | <b>合众国</b> | <b>金属U-Zr合金</b>             | <b>哈雷</b>                                  |
| DF300                 | 双流体能量                  | <b>合众国</b> | <b>金属U-Zr合金</b>             | <b>哈雷</b>                                  |
|                       |                        | 日本         | 金属U-Zr合金                    | 哈雷                                         |
|                       |                        | 加拿大        | 液态金属U-Cr合金                  | 哈雷                                         |

资料来源：NEA，高盛全球投资研究

进入市场

附件61：

按燃料类型分列的SMR数量



资料来源：NEA，高盛全球投资研究

其他燃料类型

金属合金包含不同量的铀-锆（U-Zr）或铀-钚（U-Pu-Zr）与其他合金如铝或硅。我们注意到像TerraPower这样的公司正在追求金属U-Zr合金。

基于氯化物或氟化物的熔盐也被考虑用于核燃料，因为它们可以在非常高的温度但低压的环境中使用。

熔盐为传统燃料带来了多项优势，包括提高安全性和效率。此外，由于盐是液态的，因此可以轻松添加新燃料，并且在使用过程中清洁或过滤燃料，减少了加油时间。值得注意的是，熔盐不仅可以用作燃料，还可以作为冷却剂。例如，Terrestrial Energy、Moltex Energy和Flibe Energy等公司正在利用熔盐燃料。

附录：核许可

许可

核反应堆的许可程序是核开发中最耗时和最复杂的阶段之一。这是核生命周期中的一个阶段，在此阶段，设计概念将得到验证，并获得授权以推进实施。在美国，核管理委员会（NRC）负责核反应堆的许可，并对核能运营的所有阶段进行全面审查，从选址、核材料处理到退役。NRC的核反应堆许可和监管工作由核反应堆监管办公室（NRR）监督。NRR负责完成NRC核反应堆安全任务的关键部分，主要关注许可、操作监督和规则制定等监管领域。

NRC将轻水反应堆的许可、监督和监管活动与先进非轻水反应堆和所有非动力反应堆的许可、监督和监管活动分开。

许可证分为两类：103类和104类。103类许可证发放给商业反应堆，而104类许可证则用于研究与开发或医疗治疗，主要是非商业反应堆。新旧许可证部（DNRL）负责所有103类轻水反应堆的许可工作，这包括现有商业轻水反应堆的重新许可，以及新型LWR设计（如西屋AP1000/AP300、霍尔特克SMR 300、GEH BWRX-300和NuScale VOYGR）的首次许可。先进反应堆和非电力生产与利用设施部（DANU）负责103类非轻水先进反应堆及所有104类反应堆的许可工作。该部门处理未获DNRL许可的反应堆，包括商业非轻水反应堆、医疗、研究和测试反应堆。由DANU许可的反应堆示例包括TerraPower钠离子反应堆、X-energy Xe-100、Kairos Power Hermes 1 & 2和阿比林基督教大学熔盐研究反应堆（MSRR）。

为建造或运营核电站，申请人必须提交安全分析报告。本文件包含了拟建反应堆的设计信息和标准，以及关于拟建地点的全面数据。文件还探讨了多种假设的事故情景，并介绍了防止事故或减轻事故影响的安全措施。此外，申请书中还需包含对拟建工厂环境影响的全面评估。潜在的许可证持有者还需提交拟建工厂的反垄断审查信息。

## 过程

目前，运营中的核电站是根据《联邦法规》第10篇第50部分规定的两步流程获得许可的。这一流程要求同时获得建设许可证和运营许可证。为了提高监管效率并增加过程的可预测性，NRC于1989年制定了替代许可流程，即《联邦法规》第10篇第52部分。第52部分包含了一种综合许可证，该许可证不仅提供建设许可证，还附带了电厂运营的条件。

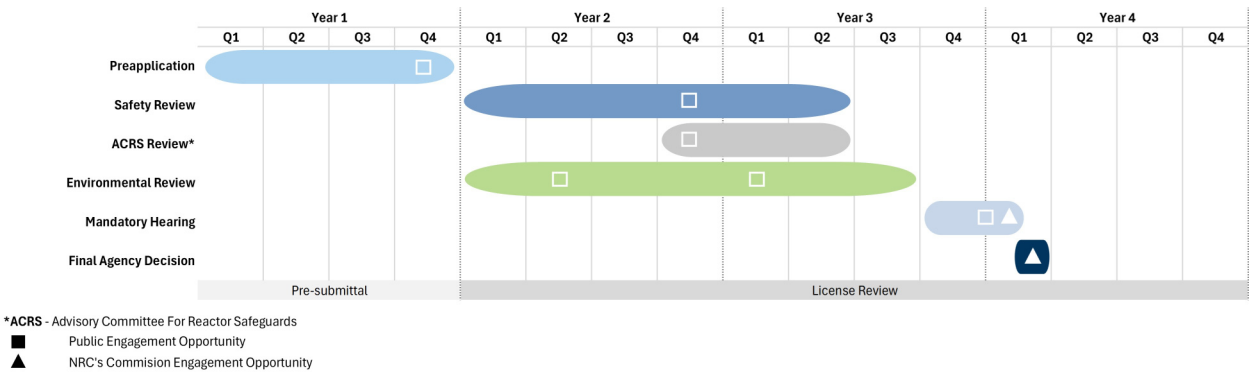
### 第50部分-两阶段许可流程

第50部分是核反应堆的传统两阶段许可流程，包括建设许可证（CP）和运营许可证（OL），适用于103类和104类反应堆。流程始于申请建设许可证，这允许申请人开始建造反应堆。为获得此许可证，申请人需提交详细的安全分析报告（SAR）和环境影响评估。在获得建设许可证并完成建设后，申请人还需申请运营许可证，以确保反应堆已按照批准的计划建成，并准备好安全运行。这一阶段要求提供更新的安全报告和运营准备证明。在整个过程中，核管理委员会（NRC）会进行彻底的安全和环境审查，确保反应堆不会对公众或环境构成威胁。公众参与也是该过程的关键部分，包括关于安全问题、环境影响及反应堆选址适宜性的听证会和评论。一旦反应堆



在运营方面，NRC继续通过检查和合规检查进行监督。

附件62：根据第50部分，核管理委员会在新反应堆开始施工前发放许可证的流程通常需要~3-5年



许可时间表因申请而异；然而，根据《先进法案》，核管理委员会（NRC）对某些联合许可证（第52部分）的许可时限规定，最终决定不得超过25个月。资料来源：核管理委员会（NRC），第三条，高盛全球投资研究

第52部分-单阶段许可流程

《联邦法规》第10篇第52部分与第50部分的两阶段流程相比，仅需一个阶段，并且提供了一种综合许可证，该许可证不仅包含建设许可，还附带了工厂运营的条件。第52部分为寻求更稳定和高效反应堆部署路径的申请人提供了额外的工具。这些工具允许申请人分阶段解决关键监管要求，从而减少反应堆开发过程中的财务和时间风险。

早期现场许可（ESP）- 允许申请人在申请CP或COL之前获得NRC对现场的批准，以尽早解决潜在的现场相关问题，确保现场最多20年（有20年续期可能性），而不必承诺特定的反应堆项目。

标准设计证书（SDC）-设计认证（DC）流程允许NRC对反应堆设计进行审批，而不受具体项目限制，从而减少针对特定地点的审查需求。经认证的设计有效期为15年，可提高安全性、降低成本，并简化未来申请者的审查流程。

标准设计批准（SDA）-设计批准（DA）在没有正式制定规则的情况下，为核反应堆的设计提供NRC批准，允许其在许可申请中被引用。虽然不如设计认证那样确定，但它可以缩短许可时间，并且可以续期，但申请人必须证明其符合现行法规。

制造许可证-制造许可证允许NRC批准在获得施工许可之前制造主要的反应堆部件，从而加快部署。有效期最长可达10年，可续期，它使具有模块化组件的反应堆受益，使其能够实现标准化制造和质量控制。

有限工作许可（LWA）——在颁发完整施工许可证或COL之前，LWA允许开展某些施工活动，例如场地准备，有助于减少延误。它加快了项目进度，但需要提供充分的环境和安全信息，并且范围需严格控制，以避免提前完成全部施工

许可过程。

附录63：两种工艺各有优缺点

| 第50部分                                         |                | 第52部分                                  |                        |      |
|-----------------------------------------------|----------------|----------------------------------------|------------------------|------|
| 阶段/许可时间表数量                                    |                | 阶段/许可时间表数量                             |                        |      |
| 第1阶段                                          | 施工许可证（CP）申请    | 1 仅阶段                                  | 联合许可证（COL）申请           |      |
| 第二阶段                                          | 运营许可证（OL）申请    |                                        |                        |      |
| 施工许可证                                         | 36个月           | 设计证书（可选）                               | 非LWR患者为36个月，LWR患者为42个月 |      |
| 经营许可证                                         | 36个月           | 早期现场许可证（可选）                            | 24个月                   |      |
|                                               |                | 联合许可证                                  | LWR/非LWR，带认证设计         | 30个月 |
|                                               |                |                                        | LWR无认证设计               | 42个月 |
|                                               |                |                                        | 非LWR型，无认证设计            | 36个月 |
| 成果                                            | 合计             | 成果                                     | 合计                     |      |
| 设计灵活性<br>用A开始施工<br>预备设计                       | 更长的时间线<br>延迟风险 | 简化流程<br>更高的确定性<br>更快的运行时间              | 灵活性降低<br>前期承诺          |      |
| 小型模块化反应堆                                      |                | 小型模块化反应堆                               |                        |      |
| 凯洛斯电力公司、赫尔墨斯反应堆、泰拉电力公司及GE日立公司，以及钠X能源公司和Xe-100 |                | NuScale Power -美国600<br>西屋电气公司- eVinci |                        |      |

资料来源：核管理委员会，高盛全球投资研究

第53部分：正在审查的新许可途径

国会通过《核能创新与现代化法案》（NEIMA），认识到需要一个非规定性的监管框架。该法案采用基于性能的方法，而非预设的成果，以数字风险目标的形式设定性能标准。2019年通过的《核能创新与现代化法案》（NEIMA）要求核管理委员会（NRC）为先进反应堆制定一个风险知情、技术包容的监管框架，即第53部分，该框架将通过一个高效的许可框架来适应新的设计发展，该框架旨在适应核能部署的新方式，同时不降低第50部分所确保的安全水平。

52天。这一许可途径仍处于规则制定过程中，NRC工作人员预计将在2025年向委员会提供最终规则草案，并在2027年底前发布最终规则。

美国核电站的许可和许可程序长期以来一直受到审查，因为它阻碍了核能技术的部署。2023年7月，Vogtle 3反应堆投入运行，这是美国核管理委员会（NRC）近50年历史上首次批准并投入运营的新商业反应堆设计。来自政治各领域的众多利益相关者建议加快NRC的监管流程，但至今这些改革措施要么未被采纳，要么未能产生显著影响。

先进核技术的开发人员正在努力推动反应堆部署速度的突破，一些公司承诺通过实施类似传送带的制造和选址来减少许可和许可障碍

在现有的工业设施中安装微型反应堆。这些努力正在获得国会的支持：2023年7月，旨在恢复美国在核技术领域领导地位的两党推进法案，作为《国防授权法》（NDAA）的一部分，以86票对11票通过了参议院；最近，众议院能源和商业委员会通过了H. R. 6544号法案，《原子能推进法案》，该法案也包含了类似的条款。