

核能创新：可再生核裂变

工业能源需求正在经历巨大变革。数据中心、人工智能集群和大规模制氢等新兴需求，给本已紧张的电网带来了前所未有的压力。为了获得廉价、充足、可用的电力，需要全新的技术，实现按需供应、本地化、成本低廉、可再生等要求。Stellaria 公司正逐渐走入这一舞台。



Stellaria 公司设计概念图

随着电力系统中波动性可再生能源份额的不断攀升，对可调度电力容量的结构性需求日益突出。反应堆公司Stellaria 的首席执行官尼古拉斯·布雷顿指出，为了应对长时间无日照或无风的情况，需要一定规模的、可调度的机组容量，而其固定成本是系统经济性的主要决定因素，固定成本占电力价格的 80%。无论极端条件多久发生一次，公用事业公司都必须按照最坏打算来规划稳定容量。以可预测的价格获得全天候电力的难度不断攀升，这促使工业转向自给自

足的能源解决方案。对 **Stellaria** 而言，这些极端条件框定了具体的技术要求：一种本地化的、高温的、可调度的、能够在燃料最少的情况下长期自主运行的按需电力来源。布雷顿认为答案在于快谱反应堆。实现这一目标的唯一途径是可再生裂变，这里的‘可再生’指的是闭式燃料循环，其中可增殖同位素（主要是铀-238）在快堆熔盐堆芯内持续转化为易裂变的钚-239。熔盐堆既可以实现闭式循环，并且还能嬗变次锕系元素，后者是最难处理的长寿命高放废物。

快堆的研究和建造已进行了数十年，但布雷顿指出，过去的项目受阻并非因为物理原理，而是因为工程经济学。他在评价过往的快堆发展时表示：“缺乏连贯性。主要原因在于商业上缺乏可行性。”钠冷和铅冷反应堆依赖燃料组件内的固体燃料棒，但固体燃料固有的非均质性在快谱条件下会引发问题。布雷顿解释道“钚会在固体燃料棒外积聚，同时消耗棒内的易裂变原子。大约三年后，就必须被移出燃料组件并进行后处理。后处理需要十五年，且相当昂贵，成本甚至超过反应堆本身。虽然快堆能够处理现有反应堆的乏燃料，在废物管理方面颇具价值，但由于其堆芯成本高昂，加上后处理流程漫长复杂，因此迄今为止在商业上并不可行。”

根据布雷顿的观点，限制因素并非快谱物理原理，而是燃料形式的选择。液体燃料系统可以实现均匀的燃料成分、持续的堆芯内增殖以及长停留时间，而不受固体燃料棒性能

衰退的限制。

设计快谱熔盐堆

Stellaria 设计的核心是一个包含可增殖和易裂变氯化物混合物（主要是 UCl_3 和 PuCl_3 ）的堆芯，这些氯化物溶解在纯化的氯化钠基载体盐中。

该设计需要严格控制同位素组成。例如，天然的氯化钠同时含有氯-35 和氯-37，在高通量环境下，氯-35 会俘获中子产生氯-36，氯-36 有放射性危害且寿命较长。布雷顿表示“反应堆也能使用氯-35 运行，但效果不佳。为了避免产生氯-36，燃料盐将仅使用氯-37，这需要在工业规模上进行同位素分离。这一要求并非易事，因为氯-37 的分离在当前工业供应链中十分罕见。

纯化的氯化钠还必须去除水分和氧气，以防止不必要的化学反应，并提高抗腐蚀性能。燃料混合物还包括布雷顿称之为“秘密配方”的未公开添加剂。

布雷顿强调，反应堆硬件和燃料盐制造并重。“这是一项颠覆性创新；我们需要按时铺好轨道和道路，轨道是反应堆，道路是燃料。”**Stellaria** 与 **Orano** 公司的合作也很重要，布雷顿表示 **Orano** 公司拥有唯一能生产氯化物燃料前体的商业化规模设施。

与经典的快谱增殖堆配置类似，随着钚衰变，一个中子引发另一个钚原子核裂变，维持链式反应。第二个中子被盐

中的铀-238 吸收，将其转化为钷-239。因为燃料完全混合，钷-239 在原位并以空间上均匀的方式得到补充。

这种均质性是区别于其他设计的特征，它使得易裂变原子的存量在数十年的运行中保持近乎恒定。在此系统中，随着裂变产物积累，操纵员会随时间添加少量铀-238 以维持可增殖与易裂变材料的比例。布雷顿将其描述为“等反应性”。在整个过程中，易裂变原子的数量不变。由于在线增殖使得易裂变原子数量几乎保持恒定，因此没有初始过剩反应性，也没有燃耗反应性波动。原则上，反应堆可以在数十年内保持稳定的功率输出，而无需像轻水堆那样进行复杂的燃料组件管理。因此，该设计允许长期运行而无需更换燃料，直至裂变产物中毒限制反应性为止，可以持续四五十年之久。



非能动安全设计特点

在 *Stellaria* 设计中，热传输系统依赖于堆芯容器内的自然对流。随着盐温升高，其密度降低并沿着流体柱上升。随

后，流经集成在内部的主热交换器，被冷却后沿着裂变室外部的环形通道下降，最后重新进入中心区域。这形成了一个无需泵的浮力驱动循环回路，降低了机械复杂性。

该设计中一个对非能动安全具有特别意义的部分是熔盐载体的热膨胀系数。盐的精细平衡的物理特性作为确保非能动运行和安全机制十分重要。盐的膨胀很重要，如果温度增加 20℃，密度会略微降低，进而足以停止裂变。作为一种固有的负反应性系数，布雷顿描述其响应速度“等同于声速”，因为密度变化在流体中传播。液态盐顶部的充气区使其在需要时易于膨胀。

布雷顿将此与固体燃料反应堆进行了对比，后者在某些快谱状态下可能经历正反应性瞬变。在均匀的液体中，不会因燃料破裂或位移而产生内部功率峰值，也不存在由包壳原因导致的反应性变化风险。堆芯已经是熔融状态，所以不可能发生堆芯熔毁。

尽管如此，该设计确实有快速排盐能力，可将燃料和盐的混合物分配到多个次临界储存罐中。在发生事故的情况下，很容易将燃料从裂变室中移除，并放入 15 个次临界状态的储存罐中。

排盐罐是大表面积的次临界配置，用于非能动地排出衰变热。布雷顿声称，在危机情形下，操纵员可在十五分钟内排空堆芯。

此外，设计中保留了机械驱动的停堆棒，但并不是用于精细的反应性控制。其目的是在初始启动期间确保安全临界，或在保持燃料在容器内的同时维持系统停堆状态。例如在极端外部事件情况下，排盐功能可实现最终的非能动停堆。

该反应堆围绕多个负反馈过程进行设计，包括一回路内的自然对流、容器热辐射，以及通过来自非能动水池的水内管网络冷却的铅反射层。为了支持钷-239 的持续增殖，布雷顿表示“在反应堆周围有 50-70 厘米厚的铅用于反射中子。”

反应堆厂房一半埋入地下，地面以下部分有 15 米深，位于三道混凝土屏障之后，地上部分也有 15 米高。地上部分设有一台能够吊起压力容器以便定期更换的起重机，而埋入地下的部分有助于在地震载荷和飞机撞击下保持机械稳定性。

据布雷顿称，各种安全特性使得电厂设计即使在包括地震、海啸和飞机撞击在内的严重事故下，也无需进行厂区边界外的疏散。他表示，对地震和撞击载荷的大量模拟支持了其安全论证。正如他所说：“当这些事件发生时，甚至仍然可以在反应堆旁边进行农业活动。”

反应堆寿命与后处理

在 Stellarium（公司设想的商业反应堆设计名称）内部，堆芯装料的有效运行寿命不受限于易裂变材料的耗尽，而受限于裂变产物的积累。在运行过程中，盐内会积累各种各样

的同位素，其中一些具有高中子吸收截面。在四五十年后，这些原子中有 1-2% 开始“污染”中子学特性。当中子经济性不足以在额定功率下维持临界时，可以直接向盐中添加铀-238 作为可增殖原料。铀-238 没有放射性，至少在衰变热和操作方面没有风险。因此，定期少量添加氯化铀-238 在操作上很简单，不需要现有反应堆所使用的浓缩和制造设施。

该设计还包括两种机制，可以去除累积的大部分裂变产物。三分之一的裂变产物会附着在容器壁上，大大降低了有害衰变产物的比活度浓度。挥发性物质也会在覆盖气体中积累。另外三分之一的衰变产物会进入液体上方的气体中，因此不更换盐就能去除三分之二的裂变产物。即便如此，仍需要每十年更换内部容器和主热交换器。布雷顿认为，这与当前的监管检查实践相符，也在一定程度上缓解了氯化物盐固有的腐蚀风险。为了便于更换，反应堆在一回路侧采用了双层壁容器的设计——两层壁都是可更换的。

在运行寿命结束时，还需要完整的化学净化过程。这一过程依赖于高温化学分离工艺，仍有待开发。但这并不构成重大障碍，因为安装第一座 **Stellarium** 反应堆后，距离需要启用优化工艺还有四十年的准备时间。

净化后，盐料计划在同一类型的反应堆中重复使用。布雷顿表示“盐料被净化后可以再利用，通过多次循环使用，盐料至少可以使用二十年。”

ALVIN、MEGALVIN 和首堆的开发路径

Stellaria 的早期开发主要集中在集成多物理场建模上，布雷顿声称已经使用源自法国快堆研究历史的核代码进行了约 2500 次模拟。

随着模拟和建模研究的进行，在商业部署之前已经制定了一个三阶段的技术示范路线图。第一个实验设施名为 ALVIN，是一个小型系统，旨在展示首次临界及其固有安全行为，特别是热膨胀停堆机制。将在反应堆内引入大量反应性，观察燃料膨胀与裂变停止的速度。ALVIN 的实验数据将用于支持监管许可、完善堆芯模型。



ALVIN 设计图

开发过程的第二阶段是一个约 10 MWth 的原型堆 MEGALVIN，具有足够的中子通量，可以在代表性辐照条件下测试结构材料、泵和热交换器。MEGALVIN 旨在研究集

成系统性能和材料老化。布雷顿给出的时间表是：ALVIN 将在 2030 年底运行，MEGALVIN 将在 2032 年底运行，第一座 250 MWe 商业反应堆将在 2035 年底建成。

Stellaria 将自己定位为反应堆技术开发商，而非电厂建造商，正在与多个工业伙伴密切合作以开发实体电厂。总体而言，该方法反映了模块化供应链的思路。Technip Energies 公司将承担工程、采购和建造（EPC），施耐德电气将负责电气系统和自动化。法国原子能和替代能源委员会（CEA）负责模拟，Orano 负责燃料循环。

布雷顿表示“我们不会自己建造反应堆，我们提供核心系统。”他预计项目会因地制宜地推行，具体取决于客户是需要电力、氢气、蒸汽还是混合输出。

2025 年 11 月，Stellaria 与 Equinix 公司就其采用 Stellarium 设计的 AI 数据中心达成了首个 500 MWe 预购协议。Equinix 法国董事总经理雷吉斯·卡斯泰涅表示：“我们选择 Stellaria，是因为它能够使我们的高性能 AI 数据中心具备能源韧性，同时兼具安全性和灵活性。”

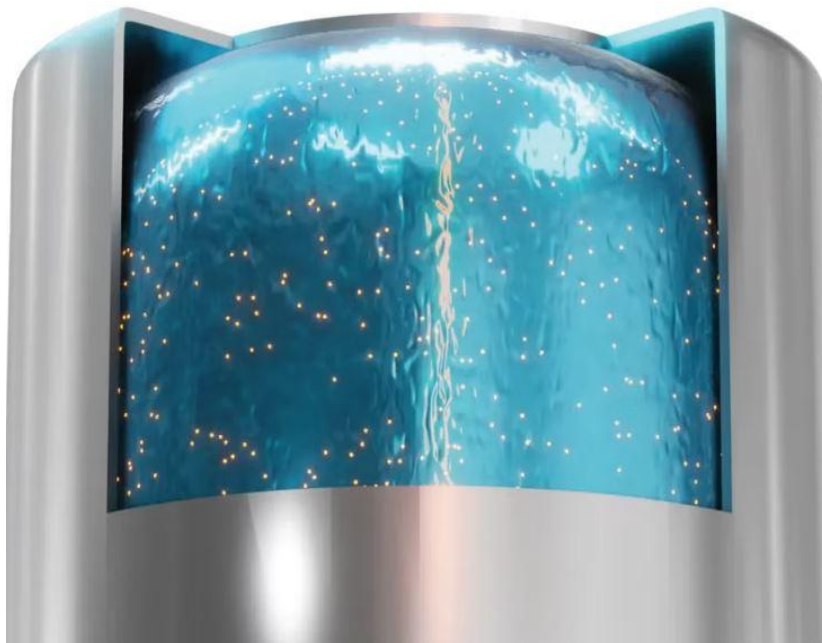
热电联产

Stellaria 的商业核电机组为每座反应堆 250 MWe，机组将成对建造，以便共用起重机和辅助系统等基础设施。计划运行盐出口温度约为 605°C。在此温度下，可以采用标准的过热蒸汽循环。布雷顿估计电转换效率至少为 45%，可能达

到 47%，显著高于大型轻水堆约 33% 的效率。他将这种更高效率归因于快谱熔盐冷却剂更好的热力学特性。

此外，由于蒸汽条件与燃煤电厂使用的条件兼容，布雷顿强调了改造选项。“蒸汽轮机与燃煤电厂的相同，因此，理论上可以通过将燃煤锅炉替换为放置在按照原锅炉占地面积挖掘的基坑中的反应堆模块来改造现有发电机组。”布雷顿认为，仅在欧洲就有多达 250 座可能成为采用这种方法进行脱碳改造的候选燃煤电厂。

高温热输出也为该设计的工业应用打开了大门。在制氢或高温工艺热领域也可以部署，将反应堆模块设置在工业集群内为多个用户服务。



面临的挑战

尽管在五年内从 10 MWth 原型堆扩展到商业化的 600°C、250 MWe 快谱熔盐堆显然是一个重大跨越，并且需要进行大

量研发，但布雷顿认为主要挑战实际上是资金，“我们需要有足够的财政支持来穿越‘沙漠’。”这里的沙漠是指建造商业反应堆前的无收入时期。为建成 ALVIN 和 MEGALVIN，需要私人投资和政府的支持。

对于首座此类快谱熔盐堆的监管许可，也需要前所未有的材料 and 安全性数据的深度，Stellaria 已经向法国核安全局（ASN）提交许可申请。

Stellaria 反应堆将成熟的快谱物理与众多非能动安全特性、固有的负反馈回路和非能动排盐能力结合起来。液体燃料设计具有多种特定优势，包括均质成分、长停留时间和燃料增殖。尽管仍存在大量的工程挑战，但布雷顿认为，鉴于有可靠的物理原理与当前迫切的工业能源需求，追求快谱熔盐堆发展具有合理性。未来十年内，从 ALVIN 实验开始，将决定这一工程路径能否实现。

对外合作部 李安琪 供稿

编译自国际核工程官网

文章内容不代表本公众号观点