

# 高温气冷堆在原有工艺和运行经验基础上 可能出现的新发展

## 德意志联邦共和国的高温气冷堆计划已取得宝贵经验

R. Schulten

高温气冷堆 (HTGR) 所用的全陶瓷燃料元件能承受极高的温度而不会释放裂变产物。这种燃料元件能布置成功率密度较低的堆芯, 使得仅仅靠物理过程就可以限制住堆芯的升温速率和导出衰变热期间所能达到的最高温度。这些基本特性已被广泛的发展计划以及 HTGR 的运行经验所证实。由此出现了一种全新的安全概念: 高温气冷堆的陶瓷燃料元件本身成了即使在最严重的假想事故中也能将裂变产物包住的“安全壳”。

利用这一新的安全概念, 能设计出不会受到严重损伤的较简单的核动力机组。这种核动力机组容易被人们所接受, 发展中国家可以自己负责建造, 至少可以建造其中的大部分, 而且也能够靠他们自己有把握地运行和维修。

### 德意志联邦共和国 HTGR 的运行经验

在德意志联邦共和国, 运行着两座高温反应堆 (HTR), 即西德联营试验堆 (AVR) 和钍高温反应堆 (THTR), 并有一个广泛的发展计划。这些工作对于了解和掌握 HTGR 工艺作出了重要的贡献。

AVR 运行了 20 年, 其热功率为 50 兆瓦热

(MWth), 目的是验证使用球形燃料元件的反应堆在高温下运行的可行性。在此期间, 曾试验过几种不同的燃料元件, 有的元件是供钍-铀燃料循环用的, 有的则是供低浓铀燃料循环用的。在大部分运行时间内, 堆芯出口处的气体温度为 950 °C。燃料元件的质量逐年提高。氦气回路的污染水平非常低。部件的各种功能未出现过明显的失效。

数值很大的负温度系数使反应堆的安全有了保证, 以致必要时甚至在没有控制棒的情况下也能应付所有的运行工况和事故工况。反应堆的控制主要是利用这种负温度系数对反应性的影响实现的。

对有关反应堆运行的几个特殊问题曾作过调查研究。这些问题包括: 使氦气回路的 CO, H<sub>2</sub> 和 CH<sub>4</sub> 的污染水平保持在较低状态的能力, 这一点对于避免腐蚀来说是很重要的。在正常运行期间, 蒸汽发生器的水与蒸汽的泄漏率一般能维持在足够低的水平。有一次因蒸汽发生器的一根管子破裂而发生了大泄漏, 但也被控制住了, 没有造成损坏。在把水排掉并封住了这根管子之后, 反应堆再次运行, 并保持原功率。

反应堆换料系统修理了几次之后, 完满地实现了在有功率情况下连续地添加和卸出球形燃料元件的操作。在 20 年中, 总共使用了约 200 万个燃料元件。燃料元件的损坏率可以忽略不计。

同样, 一回路中杂物量也很少。已经获得了有关裂变产物行为的重要知识。还进行了各种裂变产物在石墨中的吸收和解吸情况的重要研究。研究结果

Schulten 先生是德意志联邦共和国于利希核研究中心 (KFA) 反应堆发展所所长。

表明,当燃料元件被加热到高达 1600℃时,高燃耗(100 000 MWd/t)燃料元件释放的裂变产物可以忽略不计。还应提到的是,在 AVR 上进行的安全实验证明,在冷却系统与核控制系统同时出现故障的情况下,反应堆仅仅靠负温度系数就被控制住了,衰变热靠热传导和热辐射导出,反应堆没遭受任何损坏。这些实验完成之后几天,反应堆又重新运行。

输出功率为 300 MWe 的 THTR 核动力厂,自 1985 年以来一直在运行,进一步证实了 HTGR 工艺具有极好的特性。裂变产物释放率较低这一特性已产生了一些良好的效果(包括运行和维修人员的集体剂量较低)。理论计算产生的各种物理数据和技术数据,都已得到证实。

在较早的运行阶段,曾出现过两个特殊的机械问题。其原因当时很快就判明了。第一个问题是初始装料的损坏率高于预期值。经鉴定,这是由于初始装料装得过于密实所致,它起因于初始装料期间允许工作人员在堆芯顶部站立并走动。此外,还进行过一些试验,包括把停堆棒插入装得很密实的燃料床中的试验。随着燃料元件的不断循环,大多数受损燃料已经卸出,燃料床的整体密度已变低,燃料元件的损坏率也随之逐渐降低到预期水平。另一个机械问题是,随着反应堆功率水平的提高,球形燃料元件的卸料速率下降。在卸料管道上附加了一个旁路分流系统之后,这个问题就解决了。最近发现,在反应堆和蒸汽发生器之间的热气管道中固定隔离系统用的螺栓已损坏,但这并不妨碍反应堆的正常运行。上述这些问题,丝毫也不影响 HTGR 基本工艺的魅力。

## HTGR 的安全概念

常规核动力厂的安全系统是由能动的和非能动的系统合理地组合而成的。能动系统靠传感器、控制器件、执行元件和能量供应设备之间的相互作用驱动。它们需要按很高的质量标准制造。非能动系统却不需要非常精心地建造和监督。最为理想的是依据自然规律运行的那些非能动系统。因此,今后的安全技术将尽可能多地采用这种系统,以避免发生事故。

HTGR 工艺甚至在超设计基准事故的状况下,也已达到了上述要求。由于 HTGR 的热容量较大,温度上升起来十分缓慢,所以发生事故后不需要马上

采取能动的对抗措施。最高温度能够得到限制,不至引起任何裂变产物的释放。

HTGR 能够在各个方面都依靠非能动手段实现安全吗?根据现在的认识和预想,这是完全可以做到的。安全措施的主要目的是限制燃料元件的温度,使其达到无害的水平,从而不使裂变产物的释放数量达到危险的程度;另一个目的是避免产生腐蚀。引起这些效应的原因可能是反应性增加、衰变热,以及由蒸汽或空气引起的腐蚀。只要燃料元件对于这些效应有足够的抵御能力,电厂周围就不会受到危害。

如果使用低浓铀(LEU)燃料,反应性的增加一般会引起温度升高,但这种堆不会加重燃料的负担,因为反应性的各种增加量(包括由于蒸汽泄漏进入堆芯造成的反应性增加)都可以被反应性的负温度系数所补偿,而不必依靠核的停堆系统。因此,反应性事故不会导致温度增高到能破坏燃料元件,从而引起裂变产物释放的程度。这种中和效应是建立在一些物理规律之上的,因而是非能动地发生的。

采用 LEU 燃料还有一些好处。例如,选择适当的慢化比,可使蒸汽进入一回路后引起的反应性变化最小。几年前,燃料循环由高浓铀/钍改为低浓铀。当时已清楚地看到,由于前者涉及到钍的返回利用问题,因而铀的供应状况会使使用钍(高转化比)的循环变得不经济。如果采用 LEU,铀可以象在带有返回利用的轻水堆中那样得到充分利用。此外,燃料有可能不作后处理就直接存入乏燃料处置库,而且这样做在经济上是合算的。燃料的陶瓷涂敷层确实是很好的一道阻止裂变产物释放的屏障。

在冷却系统失效的情况下,燃料元件的衰变热也可以非能动地依靠物理规律导出。热容量、热传导和堆芯构形的组合可根据功率输出的大小加以选择,使得燃料温度不超过明确规定的最大值,裂变产物的释放也能得到充分的限制。

此外,关于燃料元件受到可能漏入堆芯的蒸汽和水的腐蚀问题,已作过详尽的分析。如上所述,只要慢化比选得适当,就能控制这种情况下的反应性增加量。因此,这种事故同样可以在不使用停堆系统的情况下被控制住。由于这一类泄漏事故期间的所有事件,一般都发生在 1 个小时以内,还由于在这段时间内,燃料元件的温度与正常运行温度相差无几,因而产生的腐蚀很轻,无关大局,不会导致放射性裂变产物的大量释放。空气腐蚀只有在失压(即内外压力达到平衡的失冷状态)后才可能发生。在这种情况下,

扩散和自然对流会把空气带入反应堆容器内，但这受到最大流通截面的限制，而这个面积总是比较小的。其结果是燃料元件表面被缓慢地腐蚀。由于空气进入量较小，因而这种腐蚀不会导致堆芯的重大损伤。最大的空气漏泄截面取决于钢容器、预应力混凝土或铸钢容器的牢固程度。总之，小型 HTGR 的现代化安全系统，仅仅依靠以下的两个非能动因素：燃料元件在高温下的可靠性，以及装有一次回路的反应堆容器。

目前变得比较明显的事实是，HTGR 的安全技术有可能变得更加简单，更加显而易见。燃料元件可以用硅-碳 (SiC) 密封或浸渍，使燃料元件不易被腐蚀。正如刚才讨论过的那样，发生水和空气进入一回路的这种事故期间的腐蚀速率已经比较低，SiC 处理技术则可使腐蚀速率小到忽略不计。在这些情况下，甚至反应堆容器的完整性也可以不作为安全性的决定性因素了；而燃料元件本身则能在所有事故工况下起到安全屏障的作用。这样，包括控制系统在内的所有反应堆部件和所有工作人员，都将处于备而不用状态，它们对安全性的意义就很小了。采用这样的概念以后，核动力厂显然可以做更大的简化。到目前为止，核动力厂各个部件的制造和监督都必须按很高的质量标准进行，采用新概念后，这方面的要求可以大大降低。同时，把燃料元件作为抵御恶性事故屏障的做法，是避免造成严重后果的一种简单易行的办法。这种新概念将会大幅度降低核动力厂的造价。

增加 SiC 保护层或许还可以省去中间回路，因为堆芯已得到足够的保护，在管子破裂的情况下能得住蒸汽或空气的进入而不造成腐蚀。这套做法也能适用于采用直接循环式燃气轮机的情况，这种燃气轮机在热电并供的情况下能最有效地利用能量。

前面提到的依靠负温度系数管住反应性事故的安全概念、利用热传导和热辐射来导出衰变热的做法，以及用 SiC 保护层来防止各种腐蚀过程的做法，也能够功率更大的反应堆中采用。此时，反应堆堆芯的表面积与其体积之比必须足够大。这个要求可用各种几何构形来满足。特别适宜于这个目的的构形是环形堆芯。例如，直径 16 米、高 8 米、宽 2 米、功率密度  $3 \text{ MW/m}^3$  的环，可容许的功率约为 1000 MWe 左右。

这种环形堆芯的安全壳可以是预应力混凝土容器，也可以是用铸钢块制成的预应力容器。此类容器

的工艺已广为人知。已对按比例缩小 (1:10) 的预应力铸钢块容器作过试验。每块铸钢块边缘用焊接接头加以密封，实验已证实此种容器很成功。其运行温度可以高达  $300^\circ\text{C}$ 。而流回反应堆的氦气温度在  $250\text{—}270^\circ\text{C}$  的范围内，它们将与该容器的内表面接触并冷却它。这些钢块可以利用常规的生产工艺制造。钢块可以预制好，然后运到现场组装、施加预应力和焊接。这样一来，就能把小型模块堆的安全特性应用到环形反应堆中去，以便建造出更大的反应堆。

### 核工业用热的应用

过去，核动力的主要目的是替代用于发电的矿物燃料资源。今后，为减少  $\text{CO}_2$  的生成量和保护大气，这种替代作用将变得越来越重要。至今，主要的工业化国家一直在建造和使用核动力厂，而在未来，发展中国家也将会需要这种工艺技术。然而，仅仅用核能生产电力来减少  $\text{CO}_2$  排放量或许还是不够的。供热以及把矿物燃料精炼成污染较小的燃料，能够——或许必须——成为核能的一种应用。到目前为止，达不到这种应用所需高温的制约因素并不来自堆芯，主要来自热气管道和热交换器。鉴于材料科学，特别是陶瓷材料方面的进展非常快，可以期望，不久的将来，技术将容许达到比今天我们所能掌握的高得多的温度。

### 结论

要在世界范围内建立起经济的能源系统，就需要有简单而经济的核动力厂。它们应该易于建造，具有不会发生重大损坏的安全特性。结构简单是绝对必要的，因为只有这样才能保证全世界筹措到核电厂的建设资金，并使发展中国家有能力制造这些设备。如果常规核动力厂中众多的安全系统大部分都成了多余的，或用精度不高和适合这些国家的非能动安全设施所代替，就能非常方便地实现上述目标。

鉴于世界需要愈来愈多的能源，加上人们对燃烧矿物燃料提供这部分能源所带来的环境影响的担心，要求核动力在今后的能源需求中占有越来越大的份额。HTGR 凭借着逐步发展起来的独特的安全概念，以及由此而产生的设计简化，加之广泛的应用前景，似乎可以被看成是能对这种需求作出重大贡献的理想堆型。