

附件 1

小型核动力堆核安全监管的技术政策（征求意见稿）

国家核安全局

目 录

一、前言	1
二、技术立场	3
(一) 小型核动力堆的安全目标	3
(二) 纵深防御概念在小型核动力堆的应用	4
(三) 小型核动力堆的状态划分	7
(四) 关于“实际消除”的概念	9
(五) 事故源项	10
(六) 概率安全分析技术的应用	10
(七) 事故管理规程和指南	12
(八) 关于小型模块化核动力堆控制方式的一些问题	12
(九) 设计中试验、检查和维修的可达性考虑	12
(十) 非安全系统特殊管理要求的考虑	13
(十一) 防商用飞机恶意撞击的考虑	13
三、后续需开展的工作	13
(一) 重要设计准则的制定	13
(二) 安全分析程序的开发和验证	14
(三) 新型材料和工质性能数据的获取	14
(四) 放射性源项数据的获取	15
(五) 设计验证工作	15
(六) 设计过程中调试工作的考虑	15
(七) 设计过程中对运行限值和条件的考虑	16
(八) 其他重要工作	16

一、前言

上世纪 50 年代核电起步阶段，核电厂的功率普遍较小，例如美国第一座核电厂——希平港核电厂的电功率只有 60 兆瓦，但由于改进核电厂经济性的需求，在大约 10 年的时间内，核电厂的电功率就急剧上升到 1000 兆瓦左右。大型核电厂，特别是大型轻水堆核电厂，由于其在安全性和经济性上所能达到的较好平衡，成为核电发展的主力堆型。

上世纪 90 年代以来，由于能源需求变化、大型核电厂选址困难，以及规避大型核电厂的巨大投资风险和核能多用途等因素的考虑，一些国家开始高度关注小型或小型模块化核动力堆（以下简称小型核动力堆）。目前所开发的小型核动力堆堆型多样，虽然难以从功率角度给出各种类型的小型核动力堆一个统一定义，但许多小型核动力堆也具有一些普遍性的特征，例如：

（一）相对于大型核电厂而言，堆芯额定热功率大约降低一个数量级或更多；

（二）堆芯额定热功率的大大降低通常可使反应堆装置的体积大大减小，从而可以采用一体化设计等方式来简化反应堆系统的设计；

（三）堆芯额定热功率的大大降低也意味着堆芯衰变热的大大降低，方便采用非能动方式实现停堆和衰变热的排出，进一步提高核动力堆的安全水平；

（四）堆芯放射性物质的总积存量大大降低，或者说极端事

故情况下可向环境释放的放射性物质总量大大减少，为实现核能多用途所要求的“贴近用户”提供了可能性；

（五）考虑采用标准化、模块化和集约化等设计和建造技术，结合多用途、智能电网、核风光储一体化以及简化场外应急准备、采用退役火电厂厂址等措施，进一步改进小型核动力堆的经济性和市场竞争能力。

核安全法规《核动力厂设计安全规定》针对为发电或供热应用而设计的，采用水冷反应堆的陆上固定式核动力厂规定了设计安全要求，其中一些重要的安全概念和安全要求对小型核动力堆仍具有重要的指导意义。毋庸置疑，《核动力厂设计安全规定》的安全概念和安全要求主要来自大型核电厂，特别是大型轻水堆核电厂的安全实践，所以《核动力厂设计安全规定》强调，“其他类型或采用革新技术的反应堆设计可参照本规定，但应经过细致的评价和判断”。有鉴于此，为了推动相关项目的安全审评工作，国家核安全局于2008年和2016年分别制订了《高温气冷堆核电站示范工程安全审评原则》和《小型压水堆核动力厂安全审评原则（试行）》，并在华能山东石岛湾高温气冷堆示范工程和海南昌江多用途模块式小型堆科技示范工程的安全审评工作中得到了检验，获取了大量宝贵的经验。

为了适应我国小型核动力堆发展的需要，国家核安全局制订本技术政策，重点针对可能影响小型核动力堆设计和安全监管的若干重要安全问题，提出技术立场。在制定过程中，结合了华能

山东石岛湾高温气冷堆示范工程和海南昌江多用途模块式小型堆科技示范工程审评经验和国际上对小型核动力堆安全研究的最新进展。

必须认识到的是，小型核动力堆的安全要求在国际上仍然处于探索和发展阶段，所以本技术政策的一些技术立场也需要在后续实践中对其技术合理性进行检验和修订。

本技术政策主要针对陆上固定式小型核动力堆，其中一些适用的部分，也可供其他堆型，如靠岸系泊的浮动核动力堆等参考。

二、技术立场

（一）小型核动力堆的安全目标

《核动力厂设计安全规定》为核动力厂确立了基本安全目标：“在核动力厂中建立并保持对放射性危害的有效防御，以保护人与环境免受放射性危害”。基本安全目标是通过核动力厂的辐射防护设计和安全设计实现的，《核动力厂设计安全规定》要求“辐射防护设计必须使得核动力厂所有辐射照射的来源都处在严格的技术和管理措施控制之下。但不排除人员受到有限的照射，也不排除法规许可数量的放射性物质从处于运行状态的核动力厂向环境的排放。此种照射和排放必须受到严格控制，并符合运行限值和辐射防护标准，且可合理达到的尽量低”，以及“安全设计必须采取实际措施，以减轻核与辐射事故对人的生命、健康以及环境造成的影响。必须实际消除可能导致高辐射剂量或大量放射性释放的核动力厂事故序列；必须保证发生频率高的核动

力厂事故序列没有或仅有微小的潜在放射性后果。安全设计的基本目标是在技术上实现减轻放射性后果的场外防护行动是有限的甚至是可以消除的”。

对于小型核动力堆，为了技术上实现简化场外应急准备以“贴近用户”，安全设计的基本目标应该达到在不依赖场外干预措施的情况下，对公众的保护水平与大型核电厂采取场外干预措施所能达到的公众保护水平相当或更高。

本技术政策推荐采用下述概率安全目标，作为衡量是否满足上述目标的辅助指导值：在事故的整个持续时间内，所有导致非居住区边界外公众个人可能受到的有效剂量超过 50 毫希沃特的事件序列的累积频率应小于 10^{-6} /堆·年。

应该注意的是，这个概率安全目标主要适用于具有数个或更少小型核动力堆或小型模块化核动力堆的厂址，对于拥有更多数量小型核动力堆或小型模块化核动力堆的厂址，需要在评价厂址整体风险的基础上，对概率安全目标进行合理的调整。

（二）纵深防御概念在小型核动力堆的应用

在核能发展初期，为了补偿知识和认知能力的限制，一些反应堆在设计上就采取了保持裕度等措施，后来这个做法发展成为一套比较系统的“纵深防御概念”，包括纵深防御层次、多道屏障、安全裕度及系统和设备冗余等，其有效性也在实践中得到了检验。

《核动力厂设计安全规定》中阐述：

“纵深防御概念的应用主要是通过一系列连续和独立的防御层次的结合，防止事故对人员和环境造成危害。如果某一层次的防护失效，则由后一层次提供保护。每一层次防御的独立有效性都是纵深防御的必要组成部分。

1. 第一层次防御的目的是防止偏离正常运行及防止安全重要物项的故障。这一层次要求：按照恰当的质量水平和经验证的工程实践，正确并保守地选址、设计、建造、维修和运行核动力厂。为此，应十分注意选择恰当的设计规范和材料，并对部件的制造、核动力厂的建造和调试进行质量控制。在这一层次，降低内部危险可能性的设计措施有助于事故的预防。还应重视涉及设计、制造、建造、在役检查、维修和试验的过程和规程，以及进行这些活动时良好的可达性、核动力厂的运行方式和运行经验的利用等方面。整个过程以确定核动力厂运行和维修要求及其质量管理要求的详细分析为基础。

2. 第二层次防御的目的是检测和控制偏离正常运行状态，以防止预计运行事件升级为事故工况。尽管注意预防，核动力厂在其寿期内仍然可能发生某些假设始发事件。这一层次要求在设计中设置特定的系统和设施，通过安全分析确认其有效性，并制定运行规程以防止这些始发事件的发生，或尽量减小其造成的后果，使核动力厂回到安全状态。

3. 设置第三层次防御是基于以下假定：尽管极不可能，某些预计运行事件或假设始发事件的升级仍有可能未被前一层次防

御所制止，而演变成事故。在核动力厂的设计中，假定这些事故会发生。这就要求必须通过固有安全特性和（或）专设安全设施、安全系统和规程，防止造成反应堆堆芯损伤或需要采取场外干预措施的放射性释放，并能使核动力厂回到安全状态。

4.第四层次防御的目的是减轻第三层次纵深防御失效所导致的事故后果。通过控制事故进展和减轻严重事故的后果来实现第四层次的防御。安全目标是，在严重事故下仅需要在区域和时间上采取有限的防护行动，且避免场外放射性污染或将其减至最小。这要求可能导致早期放射性释放或者大量放射性释放的事件序列被实际消除。

5.第五层次，即最后层次防御的目的是减轻可能由事故工况引起的潜在放射性释放造成的放射性后果。该层次要求配备恰当的应急设施，制定用于场内、场外应急响应的应急计划和应急程序”。

《核动力厂设计安全规定》进一步阐述：

“纵深防御概念应用的另一方面是在设计中设置一系列的实体屏障，并采用能动、非能动设施和固有安全特性的组合，以使实体屏障能够有效地将放射性物质包容在特定区域。所需实体屏障的数目取决于放射性核素总量和同位素成份表征的初始源项、单个屏障的有效性、可能的内部与外部危险以及各种失效的潜在后果”。

在小型核动力堆上，仍然需要应用纵深防御概念，但如前所述，《核动力厂设计安全规定》的安全概念和安全要求主要来自于大型核电厂，特别是大型轻水堆核电厂的安全实践。针对小型核动力堆的技术特点和安全特性，必须全面理解纵深防御概念并加以合理地利用，以保证达到为其所设定的安全目标。例如对高温气冷堆，实体屏障应把保证具有充分安全裕度的包覆颗粒燃料元件的包容能力作为重点；而针对熔盐堆，可把具有良好放射性物质包容能力的熔盐视为一道“功能性”屏障。

总体而言，小型核动力堆应将前三个层次，至多第四个层次的防御作为重点，从而实现“在不依赖场外干预措施的情况下，对公众的保护水平与大型核电厂采取场外干预措施所能达到的公众保护水平相当或更高”。

（三）小型核动力堆的状态划分

《核动力厂设计安全规定》将核动力厂状态划分为正常运行、预计运行事件、设计基准事故和设计扩展工况。预计运行事件和设计基准事故的划分是依据假设始发事件发生的频率，而设计扩展工况则是在工程判断、确定论和概率论评价的基础上得出的。对设计基准事故，通常采用保守方法进行评价，而设计扩展工况可采用现实模型和最佳估算的方式进行评价。

考虑到现有的安全和工业标准和规范状况，为更好地处理设计和安全评价输入及验收准则问题，本技术政策推荐小型核动力

堆的状态划分为正常运行、预计运行事件、稀有事故、极限事故和设计扩展工况，其中稀有事故和极限事故属于设计基准事故：

1.预计运行事件：在小型核动力堆的寿期中有可能发生，并且可能影响反应堆安全的一类事件，该类事件的频率下限界定为 10^{-2} /堆·年。预计运行事件下向环境释放的放射性物质对公众个人造成的有效剂量应小于 0.25 毫希沃特/电厂·年。

2.稀有事故：预计在一座小型核动力堆的整个寿期中不会发生，但在可能建造的这类堆型的总体中（假设数百座堆）有可能会发生的事故，其频率范围为 10^{-2} - 10^{-4} /堆·年。在发生一次稀有事故时，非居住区边界外公众个人在事故整个持续时间内可能受到的有效剂量应控制在 5 毫希沃特以下。

3.极限事故：预计在这类堆型总体的寿期中不会发生，但出于安全的考虑，仍将它们归于设计基准事故之中，其频率范围为 10^{-4} - 10^{-6} /堆·年。在发生一次极限事故时，非居住区边界外公众个人在事故整个持续时间内可能受到的有效剂量应控制在 10 毫希沃特以下。

4.设计扩展工况：设计扩展工况是没有在设计基准事故中考虑的，比设计基准事故更严重的或包含多重故障的事故工况。对于非均匀堆芯设计的小型核动力堆，设计扩展工况可包括没有造成堆芯（燃料）明显损伤的工况（DEC-A）和堆芯（燃料）熔化的工况（DEC-B）。在 DEC-A 工况下，非居住区边界外公众个人在事故的整个持续时间内可能受到的有效剂量应小于 10 毫希

沃特；在 DEC-B 工况下，非居住区边界外公众个人在事故的整个持续时间内可能受到的有效剂量应小于 50 毫希沃特。对于采用燃料和冷却剂均匀一体设计的小型核动力堆，如熔盐堆等，可不对设计扩展工况进行区分，或参考非均匀堆芯设计小型核动力堆的划分方式，结合可能导致放射性物质释放后果显著变化的因素进行划分。

（四）关于“实际消除”的概念

《核动力厂设计安全规定》要求“可能导致早期放射性释放或者大量放射性释放的事件序列被实际消除”，《核动力厂设计安全规定》对“大量放射性释放”的解释是：“需要厂外防护行动，但是这些行动受到时间长度和使用区域的限制，从而不足以保护人员和环境而导致的放射性释放”。

对于小型核动力堆，为了技术上实现简化场外应急准备以“贴近用户”，大量放射性释放被定义为导致非居住区边界外公众个人在事故的整个持续时间内可能受到的有效剂量超过 50 毫希沃特的放射性释放。

《核动力厂设计安全规定》对“实际消除”的解释是：“如果该工况实质上不可能发生或高置信度极不可能发生，则认为该工况被实际消除”。

对于小型核动力堆，应充分利用固有安全特性和可靠的设计措施，确保可能导致大量放射性释放的事件或事件序列被实际消除，为简化场外应急提供条件。

“可靠的设计措施”是一个相对概念，应基于风险对其进行考察。本技术政策推荐的“实际消除”的辅助判断值是：如果该事件或事件序列在 95%置信度下发生频率低于 10^{-7} /堆·年，则可认为该事件或事件序列被实际消除。

需要注意的是“实际消除”的概念主要针对内部事件所导致的事件或事件序列。而针对超设计基准的外部事件，则需通过安全评价，包括概率安全分析，证明其满足了安全目标，包括概率安全目标，因而具备了恰当的安全裕度。

（五）事故源项

国家标准《核动力厂环境辐射防护规定》为小型水冷模块化核动力厂推荐了选址假想事故源项确定方法，对于其他类型的小型核动力堆，目前尚没有法规或标准规定的选址假想事故源项确定方法。

必须对其他类型的小型核动力堆的设计基准事故和设计扩展工况的事件序列进行分析，以确定放射性物质的释放。从中选取保守的和包络性的源项作为厂址选择和应急预案的源项，用以评价是否满足安全目标。

（六）概率安全分析技术的应用

在核能发展的早期阶段，由于尚不具备系统化的风险评价技术，因而实现核安全的途径转向对一个个具体问题的处理，结合当时有限的数据和工程判断，通过“打补丁”的方式，建立了一套“处方”式的核安全要求和方法，这套方法被称为“确定论安

全方法”。但这套方法并不是哲学意义上的确定论，并且主要是针对大型轻水堆核电厂建立的，直接将这套要求和方法机械地套用到其他堆型，包括小型核动力堆上，会带来诸多问题。随着概率安全分析技术的发展，有必要在小型核动力堆更多地使用概率安全分析技术，以支持如下工作：

1. 确认满足了小型核动力堆的安全目标，包括概率安全目标；
2. 支持小型核动力堆状态的划分；
3. 支持对小型核动力堆设计中所要考虑的设计扩展工况的选取；
4. 支持事故源项的选取和确定；
5. 支持小型核动力堆纵深防御层次的设置；
6. 支持小型核动力堆运行限值和条件的制定；
7. 支持某些具体安全要求的建立或调整；
8. 确认小型核动力堆的安全设计是平衡的；
9. 评价不存在“陡边”效应。

近些年来，风险指引、基于性能和技术包容的执照基准建立方法取得了重大进展，国家核安全局鼓励使用技术文件《风险指引型非轻水反应堆执照基准开发导则》推荐的方法建立许可证基准，以支持小型核动力堆的安全评价和许可证申请工作。

(七) 事故管理规程和指南

核安全法规《核动力厂调试和运行安全规定》要求“营运单位应当制定适用于预计运行事件和设计基准事故的规程，以及用于管理比设计基准事故更严重的事故的规程和指南”。对于小型核动力堆而言，应尽量利用设施已有能力，通过严重事故管理指南或类似文件的制定和实施，进一步降低风险和减轻事故后果。

应为小型核动力堆制定大范围损伤管理指南，用于应对由超设计基准外部危险导致的工况，以控制事故进程并尽量减轻其后果。

(八) 关于小型核动力堆控制方式的一些问题

小型核动力堆，特别是小型模块化核动力堆的建设模式是一个厂址也许拥有多达数十个模块，因而可能采用单个主控室、特别是单个控制盘控制数个模块的设计。

在采用这种控制方式时，必须考虑到各个模块可能处于不同的状态，因而需要确定各个模块不同状态的合理组合，并且对这些状态组合下的控制任务进行全面分析，通过充分的理论评价和有代表性的模拟机验证表明控制方式和在人机之间的任务分配是合理的，操纵员能够可靠地完成赋予其的控制任务。

(九) 设计中试验、检查和维修的可达性考虑

由于小型核动力堆通常采用紧凑型设计，空间有限，因而可能会对试验、检查和维修的可达性构成挑战。在设计中，应统筹小型核动力堆的功能设计和试验、检查和维修的可达性设计，以

满足规范规定的试验、检查和维修的可达性要求，如果因某些原因不可达，应进行必要的论证，并采取替代性措施。

(十) 非安全系统特殊管理要求的考虑

采用非能动设计的小型核动力堆，非能动安全系统应有足够的能力实现安全功能，并且可以通过调试、运行监测其性能。否则可能需要选取一些设计上用于正常运行的非安全系统，用于事故后维持长期安全停堆或可维修状态，或用以避免非能动安全系统不必要的启动，或者在极端情况下，当非能动安全系统失效时，用于排出堆芯衰变热。

应根据这些非安全系统的功能和可靠性需求为其设置合理的特殊管理要求。

(十一) 防商用飞机恶意撞击的考虑

小型核动力堆可通过利用地形或厂区布置等因素使遭受商用飞机恶意撞击的可能性极低，在此基础上可不再进一步评价商用飞机恶意撞击后的影响。

三、后续需开展的工作

为推进小型核动力堆的开发，亟待开展若干重要的工作：

(一) 重要设计准则的制定

小型核动力堆在技术特点和安全特性上与大型轻水堆可能存在重大的差异，所以需要在深入分析具体小型核动力堆技术特点和安全特性的基础上，尽早开展重要设计准则制定工作，以建立安全的原则要求，并用以指导具体安全要求的建立和安全设

计，对于重要设计准则的符合情况要在安全分析报告中进行分析描述。

(二) 安全分析程序的开发和验证

由于核动力厂无法在调试过程中验证事故工况的后果满足验收准则的要求，所以事故工况的进程和后果是通过事故分析获得的，这要求事故分析程序具有高度的可靠性，分析结果具有恰当的裕度。对于大型轻水堆核电厂，事故分析程序已经经过多年的开发和验证，而许多新型核动力堆，包括许多小型核动力堆，或者缺乏适用的事故分析程序，或者这些事故分析程序的验证并不充分。

小型核动力堆的设计单位应当高度关注这个问题，及早开始安全分析程序的开发和验证工作。

(三) 新型材料和工质性能数据的获取

许多小型核动力堆采用了新的工作原理和设计特点，同时工作参数范围相比大型轻水堆有较大变化，因而可能采用了许多新型材料和工质，或者虽然这些材料和工质是核能早期发展阶段研发的，但缺乏足够材料性能测试和工程验证，给性能评价带来困难。

小型核动力堆的设计单位应当高度关注这个问题，及早开展材料和工质性能的测试或补充测试，以尽量获得必要的材料和工质性能和数据，并对工质和材料的相容性开展研究。

（四）放射性源项数据的获取

在许多法规和标准中，已对大型轻水堆核电厂放射性源项的确定做出了规定，但对于许多新型核动力堆，包括许多小型核动力堆，尚缺乏法规和标准的规定，实践中可能也缺乏足够的试验数据支持放射性源项的合理确定。

小型核动力堆的设计单位应当高度关注这个问题，及早开展必要的研究和试验工作，以支持安全评价工作。

（五）设计验证工作

《核动力厂设计安全规定》规定：“当引入未经验证的设计或设施，或存在偏离已有工程实践的情况时，必须借助适当的支持性研究计划、特定验收准则的性能试验，或通过其他相关应用中获得的运行经验的检验，来证明其安全性是合适的。新的设计、设施或实践必须在投入使用前经过充分的试验，并在使用中进行监测，以验证达到了预期效果”。

这个要求对小型核动力堆格外重要，因为其在设计中可能引入较多的新技术、新设计和新设施。小型核动力堆的营运单位和设计单位应高度关注这个问题，及早安排相关的工作，以支持安全评价和许可证申请工作。

（六）设计过程中调试工作的考虑

大型轻水堆核电厂的设计和调试技术具有比较高的成熟度，而小型核动力堆可能引入较多的新技术、新设计和新设施，给调试工作带来许多新的内容。

小型核动力堆的营运单位和设计单位应高度关注这个问题，在设计阶段就统筹考虑后续的调试问题，确定合理的调试方法，并设置必须的测量仪表、试验装置等调试手段，以使后续调试工作能够顺利实施。

（七）设计过程中对运行限值和条件的考虑

设计阶段应为小型核动力堆制定运行限值和条件提供技术基础和依据。这些技术基础和依据应考虑不同堆型的设计特点，以支持适当的模式划分和确定安全限值、安全系统整定值、正常运行的限值和条件、监督要求，以及偏离上述运行限值和条件时的行动。

（八）其他重要工作

对于许多采用了新的工作原理和设计特点的小型核动力堆，可能还存在许多新的重要问题，小型核动力堆的设计单位应在全面评价的基础上识别这些重要问题，及早开展相关的分析、研究和验证等方面的工作。

国家核安全局鼓励小型核动力堆的设计或营运单位在工作初期就积极与国家核安全局开展沟通工作，在重要的安全问题上尽早达成共识，以降低许可证申请过程中的风险。