

安全丛书

No.50-SG-D6

国际原子能机构安全导则

安全导则

核动力厂最终热阱及
直接有关的输热系统



国际原子能机构 维也纳 1987

IAEA 安全丛书分类

从安全丛书 No. 46 开始，丛书内的各种出版物将分以下四类：

(1) **IAEA 安全标准** 这类出版物包括机构理事会于 1976 年 2 月 25 日通过并载于 IAEA 文件 INFCIRC/18/Rev.1 的“国际原子能机构的安全标准和措施”所规定的本机构安全标准。这类标准是经过理事会的批准出版的，因此是本机构的业务和受本机构援助的活动所必须遵守的。这类标准由本机构的基本安全标准、本机构的专用规章和本机构的实施法规所构成。封面的下半页印有宽的红色标带。

(2) **IAEA 安全导则** 据 IAEA 文件 INFCIRC/18/Rev.1，IAEA 安全导则的目的是补充说明 IAEA 安全标准并为执行这些安全标准推荐一个或数个可以采用的程序。这类出版物是经过本机构总干事的批准出版的。封面的下半页印有宽的绿色标带。

(3) **推荐性文件** 这类出版物包括指导安全实践的一般推荐性文件，是经过本机构总干事的批准出版的。封面的下半页印有宽的棕色标带。

(4) **程序和数据** 这类出版物包括与安全问题有关的程序、技术和准则，是经过本机构总干事的批准出版的。封面的下半页印有宽的蓝色标带。

注：属于 NUSS 计划（核安全标准计划）范围内的所有出版物，其封面的上半页均有宽的黄色标带。

安全导则

核动力厂最终热阱及直接 有关的输热系统

[illegible]

© IAEA, 1987 年

国际原子能机构印于奥地利
1987 年 5 月

序

总干事

不论发达国家还是发展中国家，其能源需求均在持续不断地增长。象石油和天然气这类传统能源，可能在今后几十年内耗尽，而现有的能源生产能力已日益难以满足当前世界范围的能源需求。据专家们估计，到本世纪末，我们就可能要面临能源短缺的局面。在新能源中，核能因其成熟的工艺而成为弥补未来能源缺口的唯一的、最重要的可靠能源。

在过去 25 年中，已有 19 个国家建造了核动力厂。现有 200 多座动力反应堆在运行，还有 150 座正在计划建造。从长远看，核能将在世界能源规划发展中发挥愈来愈重要的作用。

核工业从出现以来，始终保持着首屈一指的安全记录。鉴于核动力安全的重要性，并希望把这个记录保持下去，国际原子能机构制定了一项广泛的计划，在与热中子动力堆有关的许多安全问题上给成员国提供指导。这项计划就是众所周知的 NUSS 计划（NUSS 是 Nuclear Safety Standards 的缩写），即核安全标准计划。目前该计划包括以实施法规和安全导则的形式编写和出版的约 50 本书。这些书正在作为机构的安全丛书出版，每一本都有英文、法文、俄文和西班牙文版本^①。这些书在必要时将根据经验加以修订，使其内容得到更新。

这项计划面临的任务是繁杂而又艰巨的，需要组织大量的会议来起草、审查、修改、统一和批准这些文件。国际原子能机构感谢许多成员国，它们慷慨地提供了专家和资料；也感谢许多个人，他们的名字列在已发表的参与人员名单中，这些人花费了时间和精力来帮助实施这个计划；还真诚地向参与这项工作的国际组织致以谢意。

这些实施法规和安全导则，是本机构出版的推荐性文件，供成员国按自己的核安全要求加以利用。愿意与国际原子能机构签订协议，以便在核动力厂选址、建造、调试、运行或退役方面从本机构获得援助的成员国，将被要求遵守属于该协议规定活动范围的那部分实施法规和安全导则。但是应当承认，在任何许可证审批程序中的最终决定权和法律责任，总是属于该成员国的。

NUSS 出版物事先假定有一个全国性的体系，在这个体系内的各方，如管理机构、许可证申请者 / 持有者、供应者或制造者等，要各善其事。然

^① 从 1986 年起增补中文版本。

而，如涉及一个以上的成员国，那就可能有必要根据国情和成员国之间及各组织间的有关协议对所述程序作某些修改。

这些法规和导则是以这种形式编写的，即只要成员国决定采用，就能把这些文件的内容直接应用于它所管辖的各项活动。因此，根据法规和导则的惯例并按照高级顾问组的建议，行文中采用了“必须”和“应该”二词，使可能的使用者区别是坚持要求还是希望采用。

保证为子孙后代提供充足而安全的能源，从而对提高他们的福利和生活水平有所贡献这样一个任务，是我们大家都关心的事。希望本书以及根据 NUSS 计划正在出版的其他文件，能对实现这个任务有所裨益。

说 明

高级顾问组

国际原子能机构关于制定核动力厂实施法规和安全导则的计划，已载于 IAEA 文件 GC (XVIII) /526/Mod.1。这个计划称作 NUSS 计划，它讨论放射安全问题，而且目前只限于陆上固定式热中子反应堆核动力厂。本书就是根据这个计划出版的。

总干事为实施该计划而在 1974 年 9 月设立的高级顾问组选定了实施法规的五个题目，并草拟了一份有助于实施这五种法规的安全导则的暂定书目。高级顾问组被委以在这项计划的各个阶段对其进行监督、审查和咨询的任务，以及批准将递交总干事的文件草案。已针对每个实施法规成立了一个相应的技术审查委员会，各委员会均由成员国的专家们组成。

按照上述 IAEA 文件所规定的程序，实施法规和安全导则——它们基于不同国家的组织体制和实践方面的文件和经验——由来自成员国的两三位专家同本机构的工作人员组成的专家工作组首先草拟，然后再由相应的技术审查委员会进行审查和修改。这项工作既利用公开的资料，也利用非公开的资料，如成员国对征求意见表的答复等。

经技术审查委员会修改后的文件草案，提交高级顾问组。在高级顾问组认可后，要把英、法、俄和西班牙文本送交各成员国征求意见。技术审查委员会根据这些意见进行修改与补充，再经高级顾问组进一步审查之后，文件草案就递交总干事，由他在适当的时候送交理事会，进行出版前的最后核准。

五种实施法规包括下列题目：

管理核动力厂的政府机构；
核动力厂选址的安全问题；
核动力厂安全设计；
核动力厂运行中的安全问题；
核动力厂安全方面的质量保证。

这五种实施法规确定了为实现核动力厂充分安全运行应达到的目标和最低要求。

出版安全导则，是为了说明并向成员国提供实施有关法规特定部分的可接受的方法。如果采用的方法和方案与这些导则中规定的不同，但它们提供了至少相当的保证，说明核动力厂可以安全运行而不会给广大公众和厂区人员的健康和安全带来过大的危险，那么这样的方法和方案也是可以接受的。虽然这些实施法规和安全导则为安全建立了必要的基础，但它们也可能不充分或不完全适用。必要时应参考国际原子能机构出版的其他安全方面的文件。

为了适应特殊情况，有时可能需要满足附加要求。而且，还会有一些特殊问题，必须由专家们根据具体情况加以分析。

易裂变物质和放射性物质以及整个核动力厂的实体保卫只在适当场合笼统提到，未加详细讨论。工业安全和环境保护的非放射性方面的问题，没有明确地加以考虑。

文件中的附件，要看作是这个文件的一个不可分割的组成部分，而且与正文具有同样的地位。

另一方面，附录、脚注、参与人员名单和参考书目仅仅是为了给使用者提供可能有帮助的资料或实际事例。补充的书目资料有时可从本机构得到。

每本书中都附有有关的定义。

出版这些书的目的是为了成员国的管理机构和有关单位在适合时使用。为了完整地理解这些书的内容，还应参阅其他有关实施法规和安全导则。

注

本安全导则正文中引用下列 **NUSS** 计划出版物:

安全丛书 No. 50-C-S	安全丛书 No. 50-C-D
安全丛书 No. 50-SG-S1	安全丛书 No. 50-SG-D1
安全丛书 No. 50-SG-S2	安全丛书 No. 50-SG-D2
安全丛书 No. 50-SG-S5	安全丛书 No. 50-SG-D4
安全丛书 No. 50-SG-S6	安全丛书 No. 50-SG-D5
安全丛书 No. 50-SG-S7	安全丛书 No. 50-SG-D7
安全丛书 No. 50-SG-S10A	安全丛书 No. 50-SG-D8
安全丛书 No. 50-SG-S10B	安全丛书 No. 50-SG-O1
安全丛书 No. 50-SG-S11A	安全丛书 No. 50-SG-O2
安全丛书 No. 50-SG-S11B	

上述书名及其出版日期刊印在本导则后面的 **NUSS** 计划书目中。如何订购这些出版物，见本导则最后一页的说明。

目 录

1. 引言	1
1.1. 本导则的目的	1
1.2. 范围	1
2. 设计原则	2
2.1. 设计目标	2
2.2. 最终热阱和输热系统的类型以及输热流体的种类和来源	3
2.2.1. 最终热阱的类型	
2.2.2. 输热系统的类型	
2.2.3. 输热流体的种类和来源	
2.3. 选择的准则	5
2.3.1. 最终热阱的选择	
2.3.2. 输热系统的选择	
2.4. 确定容量的准则	7
2.4.1. 热负荷	
2.4.2. 最终热阱的容量	
2.4.3. 与最终热阱直接有关的输热系统的容量	
2.5. 多堆厂址	11
3. 假想始发事件	13
3.1. 一般要求	13
3.2. 外部事件	13
3.2.1. 丧失厂外电源	
3.2.2. 土崩和地移	
3.2.3. 水坝破坏	
3.2.4. 爆炸	
3.2.5. 飞机坠毁	
3.2.6. 船舶冲撞	
3.2.7. 地震	
3.2.8. 极端的气象条件和自然条件	
3.2.9. 生物学现象	
3.2.10. 火山活动	
3.3. 内部事件	22
3.3.1. 火灾	
3.3.2. 内部水淹	

3.3.3. 飞射物和承压件破坏	
3.3.4. 部件功能失常和运行人员差错	
3.4. 事件的组合	23
3.4.1. 概率论法	
3.4.2. 确定论法	
4. 设计措施	26
4.1. 冗余性	26
4.2. 部件的多样性	27
4.3. 运行人员的行动	28
4.4. 实体分隔和进出口控制	30
4.4.1. 实体分隔	
4.4.2. 进出口控制	
4.5. 安全分级	32
4.6. 监测、试验和检查措施	32
4.7. 其他设计要求	32
4.8. 质量保证	32
附录 I 最终热阱及其直接有关的输热系统的典型配置方式	33
附录 II 为确定设计最终热阱用的假想始发事件可信组合而 需要考虑的典型事件	39
定义	41
参与人员名单	45
NUSS 计划书目	49

塔或热交换器等的设计，也不包括诸如成本、建造难度、核动力厂可利用率等问题，因为这些因素都不是与安全密切相关的。

本导则也不提供针对破坏活动的特殊设计导则。然而应认识到，在某些情况下，包括最终热阱在厂外的情况下，发生破坏活动的可能性将是一项重要的安全考虑，并确有可能成为设计中起主导作用的假想始发事件。

本导则为最终热阱及其直接有关的输热系统所规定的很多要求也可应用于其他排除余热的输热系统，例如反应堆一回路和二回路冷却系统、应急堆芯冷却系统和乏燃料池冷却系统等。然而，对这些系统的安全要求还可能包括另外一些对与最终热阱直接有关的输热系统不适用的项目。因此，为实用起见，本导则的范围仅限于最终热阱及其直接有关的那些输热系统，它们有一套共同的与安全有关的功能要求。

在很多设计中，用来排除余热的最终热阱可能也用作汽轮机功率运行时冷凝器的冷却水源。本导则不涉及这种应用。由于这种功能而对最终热阱及其直接有关的输热系统提出的任何附加要求，必须不妨碍这些系统满足本导则的各项要求。

本导则的范围还包括作为最终热阱本身或其直接有关的输热系统的一个必需部分的任何补给系统。这些将在 2.2.1、2.2.3 和 2.3 节中进一步讨论。

2. 设计原则

2.1. 设计目标

为了达到 1.1 节的要求，在很多情况下可能需要规定一些设计限值，以防止：

- (1) 燃料元件的过热；
- (2) 一回路压力边界失去完整性；
- (3) 安全壳结构失去完整性。

对预期不常发生的事故来说，只要满足 1.1 节的要求，这些设计限值可个别或全部比常发生的工况下的限值略为放宽。

在确定可接受的放射性释放量时，需考虑发生这一特定情况的预期频率。很多国家的管理当局要求动力厂在运行工况下的释放量必须很低。然而，对罕见的事故工况，则认为较大的释放量往往也是可以接受的。当这种

不常发生的事故工况要求与最终热阱直接有关的输热系统执行其正常设计范围以外的任务时，只要这类事故工况产生的放射性释放量不超过该种频度事故所对应的可接受水平，原则上允许降低设计裕量或可靠度以执行这一加重的任务。

这就是说，例如在不常发生的事故工况下，允许动用比常见事件中更多的动力厂设施，使与最终热阱直接有关的输热系统满足较大输热量的要求。这些额外的动力厂设施和它们所依靠的支持系统必须按照在不常见事故工况期间和之后仍能保持运行的要求来进行设计和评定。因此，如果一个系统在常见事件中依靠三台泵中的一台，那么在不常见事故中，如果认为必须提高系统性能应付这些事故，则依靠三台泵中的两台也是允许的。在上述例子中还可以有另一方案，即如果一台泵运行所造成的性能不足并没有引起超过这种频度事故的可接受限值的情况，则只有一台泵运行也是可以接受的。

排到最终热阱并为它所吸收的热量，要根据各种热源的大小及其随时间变化的情况而定。这些将在 2.4 节中讨论。

当判断一个具体的最终热阱及其有关的输热系统是否实现主要设计目标时，必须考虑能够实现这种功能的可靠度。这种可靠度不必用数字的形式来表示，而可采用对某些设计措施提出要求的方式来表示。为了实现主要设计目标，要求最终热阱及其直接有关的输热系统具有：

- (1) 很高的可靠度；
- (2) 在假想始发事件所要求范围内的可运行性；
- (3) 长期可用性。

如果切实可行，可以再增加一个有助于提高可靠度的特性作为设计目标，即

- (4) 简单性。

2.2. 最终热阱和输热系统的类型以及输热流体的种类和来源

2.2.1. 最终热阱的类型

最终热阱通常采用一种或兼用两种主要类型，即水体或大气。

水体可以是海、河、湖、水库、地下水、冰池、其他贮水设施或它们的组合。利用单一热阱的和利用几个这样热阱的核动力厂都必须满足本导则规定的所有各项要求。对各种热阱的容量要求将在 2.4 节中讨论，2.4 节还列举了当有几个热阱可供使用时影响热阱选择的各种因素。

在 2.2.2 节中概要列出将余热输送和排放到最终热阱中去的各种手段。

动力厂内部的热阱，例如在某些反应堆中的石墨慢化剂，能暂时地容纳

热量，使得余热排出系统有更宽裕的起动时间，但不能认为它们本身就能构成一个最终热阱。

当利用一个贮水设施作为最终热阱时，必须经常保持随时可供使用的最小蓄水量。这将在 2.4 节进行详细地讨论。

2.2.2. 输热系统的类型

虽然最终热阱通常只有两种主要类型（大气或水体），但向最终热阱排热的系统却有相当多的方案。这些系统通常只应用两种物理过程中的一种，即让水蒸发或让最终热阱的一部分升温。偶而也采用其他排热方法，如热辐射。

下面列举利用上述过程的一些可能的途径：

- (1) 海水以直流方式流过热交换器；
- (2) 淡水（或贮存的水）以直流方式流过热交换器；
- (3) 水经过喷水池循环；
- (4) 由湖泊、水库或大水池取水进行循环；
- (5) 在蒸汽发生器中使水蒸发；
- (6) 干式冷却塔；
- (7) 带补水设施的湿式冷却塔，或干式 / 湿式冷却塔联合使用；
- (8) 由构筑物靠对流或辐射散热；
- (9) 冷凝系统。

本导则涉及与最终热阱直接有关的输热系统。因此，它包括使水以直流方式流过冷却回路各中间热交换器的重要厂用水系统或海水系统。本导则不为可能由于巧合而共用同一最终热阱的其他性质类似的系统（例如汽轮机冷凝器的循环水系统）规定设计准则，虽然这些系统在正常情况下可能用于余热排出的早期阶段。在这种场合下，只有当这些系统在已被识别的可信事故序列中成为唯一的安全排热方式而没有替代方法时，才能应用本导则中牵涉到有关输热系统的那些条款。当设施（例如冷却水泵房和水渠）供与最终热阱直接有关的输热系统和其他冷却系统共用时，对于为正确地发挥与最终热阱直接有关的输热系统的功能而必需的共用设施，必须使用本导则的条款。

对采用湿式冷却塔的装置来说，本导则的范围包括冷却塔本身、任何有关的强迫通风设备以及有关的水回路和设备及补水装置。在这种情况下把水回路包括在内，是因为它对最终热阱的输热过程有直接而不可分割的关系。对干式 / 湿式冷却塔的有关水回路也使用同样的条款。

对采用干式冷却塔的装置来说,与最终热阱直接有关的输热系统是经过冷却塔的空气流道。因此,本导则将应用于冷却塔和为获得所需空气流而需要的任何手段。

在有些场合下,为了符合 4.2 节中关于部件多样性的建议,需要采用多种方法将余热排向同一个最终热阱或另一个不同的最终热阱^①。在这种情况下,必须将导则中有关冗余性、多样性、运行人员的行动等条款应用于为了排除余热而设置的每个最终热阱和所有直接有关的输热系统。

2.2.3. 输热流体的种类和来源

在将热量从热源输送到最终热阱的整个排热路线中,所用的输热流体不一定是同一种。例如,可在一个阶段用压缩气体,一个阶段用蒸汽,而另一个或更多的阶段用不同化学纯度的水。

用于最后阶段输热的某些流体可在过程中部分或全部消耗掉,例如产生蒸汽并向大气排放。

在这种情况下,必须有补充输热流体的手段。可利用几种供应源来补充流体,例如符合随时可用条件的厂内贮水、未经处理但尚可用的贮水、用管道接到厂区的生活用水、最终热阱本身和经过处理的排放污水。

设置厂内水源较为可取。选择输热流体补给源时应考虑的因素在 2.3 节中讨论。

对于虽然不属于与最终热阱直接有关的输热系统的组成部分,但却为安全地排出余热、润滑和冷却某些部件以及对泄漏进行补给等所必需的其他供应源,也会有各种要求。这些要求不属于本导则的范围。

2.3. 选择的准则

最终热阱必须能吸收它所服务的各反应堆发出的余热,而其自身的温度仍保持在可接受的限值以内。这些温度限值可以根据传热机理中涉及的物理过程来确定,也可以由主管当局根据环境考虑来规定。

选择最终热阱及其直接有关的输热系统必须根据具体的厂址条件,包括输热介质(水或空气)的来源、该厂址的假想始发事件以及环境保护方面的有关规章等。对各种可以接受的设计方案的选择,可主要根据经济上的考

^① 举例来说,如果排除余热的正常方式是利用水体和低压泵送系统,则作为另一种方式,还可采用使水经过蒸汽发生器并将蒸汽排向大气的方式,以满足 4.2 节中关于部件多样性的建议。在这一不同的排热方式中所用的设备,在正常运行时可以有不同的功用。

虑，但必须对最终热阱及其直接有关的输热系统设计中各种介质来源的相对可靠度作出评定。

2.3.1. 最终热阱的选择

在选择最终热阱及其直接有关的输热系统时，必须考虑到下列各点：(1) 与厂址有关的自然现象，例如地震、洪水、枯水、风暴、冰雪的影响、水或空气的高温和低温、土崩、地移、火山活动等；(2) 外部人为事件，例如飞机坠毁、爆炸、地面交通工具撞击、丧失厂外电源等；(3) 动力厂内部事件，例如火灾、管道破裂、内部水淹等。然而，只是针对具体动力厂和厂址已规定作为假想始发事件的那些内部和外部事件才必须加以考虑。第3节描述了某些这样的事件和它们对设计可能存在的影响。为了实现设计目标，在评定方案时必须考虑到所有与厂址有关的内部和外部事件。这可能导致选出一种联合使用几个热阱、几个不同的补给源和输热系统的设计。

环境保护方面的有关规章或法律可能会指定或禁止使用某些可用的热阱。这些规章或法律可能也是在确定最终热阱的选择准则时需要考虑的一种因素。基于使用这种热阱是出于安全的需要，并且仅限于不常有的情况和有限的持续时间，有时可能需要申请免除这些规章和法律的约束。

在很多场合下，可能选用水和/或空气作为输热介质，并将根据经济上的考虑在各种可用的方案之间进行选择。然而，必须考虑可用水源的相对可靠度和容量。一般来说，通向海洋、大湖、大河等的用不尽的天然水源，要比容量有限的人工水源更为可取。在选择最终热阱和设计直接有关的输热系统时，其他必须考虑的因素是可用介质的品质和推荐的最终热阱的预期极端温度变化情况，后一因素关系到是否有接受来自各种热负荷的热量的充分排泄能力。

当不能通向一个用不尽的水源时，最终热阱的选择可能主要取决于影响为全部假想始发事件提供所需补给水的能力的各种局部因素。当可用的水源有限时，在要求的时期内（见2.4节）提供补水的可靠度可能不足以证明采用一个仅靠这些水源的最终热阱是合理的。补给水源所需的可靠度和数量与这些水源可供使用的时间有关。当可用时间很短时，就要求有更加可靠的补水手段，并要求更加严格地对各步骤进行论证。为厂址选定的各种假想始发事件会大大影响补水装置的需要容量。正如2.4节所讨论的，在任何事件中，最终热阱必须有一个在所有情况下都可供使用的最小蓄水量。当考虑了这些局部因素以后，为了在要求补水以前能有更多的时间，可能需要一些额外的贮水，或者作为另一方案，也可采用空气作为最终热阱的介质。

2.3.2. 输热系统的选择

与最终热阱有关的输热系统的选择，主要根据 2.3.1 节所讨论的与最终热阱本身的选择有关的因素。

当最终热阱容量有限时，直接有关的输热系统的选择可能要根据保持最终热阱蓄水量，从而增加获取补水所需时间这一需要来确定。这种考虑可能使设计采用混合式系统，兼用空气和水进行输热。当对直接有关的输热系统的各种可用方案进行选择时，与最终热阱的情况相似，经济性的考虑可能起很大作用。然而，还必须考虑到可用系统的相对可靠度。

2.4. 确定容量的准则

2.4.1. 热负荷

当确定最终热阱及其直接有关的输热系统的需要容量时，必须正确地确定各种热源和它们随时间变化的特性。为了实现设计目标，必须考虑下列将在 2.4.1.1 ~ 2.4.1.5 节中论及的热负荷：

- (1) 堆芯衰变热（来自放射性衰变和停堆后裂变）；
- (2) 乏燃料衰变热；
- (3) 贮存热
- (4) 安全重要物项的放热；
- (5) 其他与事故有关的热源（如化学反应）。

这些热负荷每个都会随时间而变化，有些还随具体情况而变化。看来，热负荷 (5) 只需在事故工况下考虑，而热负荷 (1)、(2) 和 (4) 将在所有事故保护停堆后出现。热负荷 (3) 可能也不得不排往最终热阱（例如在冷却过程中），但它常常可在事故保护停堆后较晚的阶段，即当由热负荷 (1) 来的输热要求已经降低时进行处置。

必须为每个要求最终热阱执行其安全功能的假想始发事件，包括安全停堆过程和事故后的工况在内，定量地确定各种热负荷随时间的变化。必须确定与最终热阱直接有关的输热系统排放热量的速率和排入最终热阱的总热量。