

Part 3 核事故分级及典型核事故

3.1 核事件分级

为了划分核事件或事故的级别，迅速通报核设施对安全有重要意义的事件，便于国际核事件交流通信，国际原子能机构和经济合作与发展组织于 1990 年起草并颁布了国际核事件分级标准(INES)，并建议世界各国使用。为了使民用核设施事件的定级和评定工作与国际接轨，我国也采用国际核事件分级准则。

核事件、事故等级的评定通常是在事件或事故发生之后，通过造成的影响和损失来评估等级。国际核事件分级根据各个核事件的厂外影响、厂内影响和纵深防御能力削弱三个方面，将核电厂或其他大型核设施内发生的与安全有关的事件或事故分为 7 个等级，所有的 7 个等级又被划分为 2 个不同的层次。最低影响的 3 个等级被称为核事件，最高的 4 个等级被称为核事故。具体的标准及案例参见表 3.1。表 3.2 以简单表格形式表示该分级的结构，并用关键词语概括了事件的重要程度。

表 3.1 国际核事件分级表

级别	说明	标准	案例
7 级	特大事故	· 大型核装置(如动力堆堆芯)的大部分放射性物质向外释放，典型的应包括长寿命和短寿命的放射性裂变产物的混合物(数量上，等效放射性超过 $10^{16}\text{Bq}^{131}\text{I}$)。这种释放可能有急性健康影响；在大范围地区(可能涉及多个国家)有慢性健康影响；有长期的环境后果	1986 年前苏联切尔诺贝利核电厂事故；2011 年日本地震海啸引起的福岛第一核电站事故

6 级	严重事故	<ul style="list-style-type: none"> · 放射性物质向外释放(数量上,等效放射性相当于 $10^{15}\sim 10^{16}\text{Bq}^{131}\text{I}$),这种释放可能导致需要全面执行场外应急计划的防护措施,以限制严重的健康影响 	1957 年前苏联南 乌拉尔核事故
5 级	有场外危险的 事故	<ul style="list-style-type: none"> · 放射性物质向外释放(数量上,等效放射性相当于 $10^{14}\sim 10^{15}\text{Bq}^{131}\text{I}$),这种释放可能导致需要部分执行应急计划的防护措施,以降低健康影响的可能性; · 核装置严重损坏,这可能涉及动力堆的堆芯大部分严重损坏,重大临界事故或者引起在核设施内大量放射性释放的重大火灾或爆炸事件 	1979 年美国三哩 岛核事故; 1957 年英国温茨 凯尔气冷石墨核反 应堆事故
4 级	主要在设施内 的事故	<ul style="list-style-type: none"> · 堆芯放射性向外释放,使受照射最多的厂外个人受到几毫西弗量级剂量的照射。除当地可能需要采取食品管制行动外,一般不需要厂外防护行动; · 核装置明显损坏,这类事故可能包括造成重堆芯部大厂内难以修复的核装置损坏; · 一个或多个工作人员受到很可能发生早期死亡的过量照射 	1980 年法国圣洛 朗核电厂事故造成 堆芯部分损坏,但 没有放射性外泄

3 级	严重事件	<ul style="list-style-type: none"> · 安全系统可能失去作用，放射性物质极少量外泄；放射性向外释放超过规定限值，使受照量最大的场外人员受到十分之几毫西弗量级的剂量，无需场外防护措施； · 因设备故障或运行事件造成场内高辐射水平目和/或污染，工作人员过量照射； · 安全系统的进一步故障可能导致事故工况，或者某些初因事件发生，安全系统不能防止事故发生的状况 	1989 年西班牙范德略斯核电厂事件，当时核电站发生大火造成控制失灵，但最终反应堆被成功控制并停机
2 级	事件	<ul style="list-style-type: none"> · 安全措施明显失效，但仍具有足够纵深防御，仍能处理进一步发生的问题； · 导致工作人员所受剂量超过规定年剂量限值的事件和/或导致在核设施设计未预计的区域内存在明显放射性，并要求纠正行动的事件 	
1 级	异常	<ul style="list-style-type: none"> · 超出规定运行范围的异常情况，可能由于设备故障、人为差错或规程有问题引起 	

表 3.2 分级的基本结构

级别	说明	准则或安全特性		
		厂外影响	厂内影响	纵深防御能力下降
7 级	特大事故	大量释放；大范围的健康和环境		
6 级	严重事故	明显释放；可能需要全面执行计划的对策行动		
5 级	有场外危险的事故	有限释放；可能要求部分执行计划的对策行动	堆芯/放射性屏障严重损坏	
4 级	主要在设施内的事故	少量释放；公众剂量相当于规定限值量	堆芯/放射性屏蔽发生明显损坏；一个工作人员受到致死剂量	
3 级	严重事件	极少量释放；公众剂量相当于规定限值的一小部分	污染严重扩散；一个工作人员产生急性放射性效应	接近发生事故安全保护层全部失效
2 级	事件		污染明显扩散；一个工作人员受过量辐射	安全措施明显失效
1 级	异常		超出规定运行范围的异常情况	

3.2 威胁类型

威胁类型(threat category), 也称威胁类别, 是为对核或辐射应急准备和响应进行优化而建立的一种分类方案, 以求与威胁评估中所确立的危险的可能大小和性质相适应。IAEA 按照各类核设施及其活动可能造成的后果的严重程度进行分类, 分为五种威胁类型, I 类到 III 类按威胁水平逐次降低; IV 类是在任何地区都可能存在的威胁和活动, 可能与其他类型威胁共存; V 类威胁适用于需要进行应急准备以应对 I 和 II 类威胁设施的释放导致污染的场外区域。

对于可能发生的核或辐射应急情况, 事先应做好威胁评估, 确定威胁类型, 有针对性地制订应急预案, 以有效利用应急资源, 提高应急响应效能。可能发生核应急情况, 主要涉及下列设施和源:

- 1)大型辐照装置(例如工业用辐照设施);
- 2)工业设施(例如大型放射性药物生产厂);
- 3)带有高活度固定放射源(例如远距离治疗机)的研究用或医用设施;
- 4)失控(废弃、丢失、被盗)的危险源;
- 5)工业或医用危险源(例如工业探伤用的放射源)的滥用或毁损;
- 6)核武器意外事故;
- 7)公众受到未知来源的辐射照射和污染;
- 8)含有放射性物质的人造卫星再返回;
- 9)能导致严重确定性效应的放射源;
- 10)蓄意的涉及放射性物质的威胁和(或)活动(如放射性散布装置爆炸);
- 11)放射性物质运输中出现的应急;
- 12) IAEA 或其他国家通报发生跨界应急。

核或辐射应急的威胁类型划分为五类，其特征描述见表 3.3。

表 3.3 核或辐射应急威胁类型特征描述

威胁类型	特征描述
I	诸如核电厂这类设施的场内事件，可能在场外导致严重的确定性健康效应；或者曾在类似设施中发生过的此类事件
II	诸如某些类型研究堆这类设施的场内事件，可能导致场外居民遭受到按照国家标准(GB18871)有必要采取紧急防护行动的剂量；或者曾在类似设施中发生过的此类事件；具有威胁类型 II 的设施并不包括上述具有威胁类型 I 的设施
III	诸如工业辐照装置这类设施的场内事件,可能导致有必要在场内采取紧急防护行动的剂量或污染，或者曾在类似设施中发生过的此类事件。具有 I 类型威胁的设施并不包括上述具有 II 类型威胁的设施
IV	可能导致在无法预见的地点采取紧急防护行动的核或辐射紧急状态。这些状态包括未经授权的活动，例如与非法获得的危险源有关的活动；还包括涉及工业射线照相用源、核动力卫星或热电发生器等危险的可移动源的运输和经授权的活动。威胁类型 IV 代表最低等级的威胁水平(适用于所有国家和地区)
V	通常不涉及电离辐射源的活动。但很有可能由于威胁类型 I 或 II 中所列的设施发生的事件而 V 受到污染，并达到按照国家标准（GB 18871）必须迅速对食品等产品加以限制的程度

3.3 历史上重大的核事故

3.3.1 南乌拉尔核事故

冷战高峰期，为了尽快把核弹头装备起来，苏联人在车里雅宾斯克建起了麦雅克工厂，专门生产核原料。作为苏联唯一的钚生产基地，为了给正在制造的原子弹和氢弹提供环，车里雅宾斯克的五个核反应堆日夜不停地运转，钚源源不断地制造出来，后处理工厂从反应堆所产生的放射性混合物中提炼出钚。为了处理核废料，苏联领导人最终做出决定：建造巨大的地下储罐把核废料封存起来。核废物中的钚是一种不易溶解的元素，乌拉尔地区核废物中的钚，大部分被土壤所吸收。当水浸透蓄积着钚的土壤，钚与水作用，触发链式反应，水被迅速加热成水蒸气，水蒸气压力增大而产生强烈的爆炸，从而造成一场骇人听闻的核灾难的发生。1957年9月29日，在苏联的大型核工业聚集区乌拉尔地区，克什特姆、车里雅宾斯克两城之间的一个地下核废料存储罐突然发生爆炸，强烈的爆炸将放射性尘埃和物质喷到天空中，其威力相当于1945年美国投在广岛的原子弹的100倍。一片直径10km的带有放射元素 ^{90}Sr 的烟云升空。通往该区的所有公路、铁路被封闭了长达一年之久。一年后，在该区外50km处设立了检查站，所有进入该区(有限度地开放)的机动车辆都必须接受检查，关闭所有车窗，不许拍照，要以最高车速通过，不得停车逗留。1958-1968年不许该区居民生育子女。直到1978年，污染区还有20%的地方未能恢复生产活动。这次事故中，存在大量放射性物质释放，按照国际原子能机构的核事件分级标准将其定为6级核事故。

3.3.2 温茨凯尔核事故

英国温茨凯尔军用核反应堆是用来生产核武器用的钚的单流程气冷反应堆，热功率250 MW,用空气作为冷却剂，石墨作为慢化剂。冷却剂通过反应堆堆芯后，通过装有过滤器的烟囱直接排入大气。反应堆没有安全壳建筑物。1957年10月7日，在进行石

墨潜能释放时，由于工作人员误操作，使堆芯 150 根工艺管熔化，反应堆石墨起火，大火燃烧了约 4 天，释放出约 $7.4 \times 10^{14} \text{Bq}$ 的 ^{131}I 和其他裂变产物，最后用水淹没反应堆使火熄灭。这次事故产生的放射性物质污染了英国全境，至少有 39 人患癌症死亡。气载放射性物质从温茨凯尔向周围地区扩散，影响到欧洲大陆。在人员受照射的总剂量中，约 50% 来自放射性碘对甲状腺的照射，40% 来自沉积于地面的放射性物质所致的外照射，10% 左右来自碘以外的其他放射性核素的内照射。本次核事故涉及放射性裂变产物向外释放，根据这一事件的场外影响，将它定位 5 级事故。

3.3.3 三哩岛事故

1979 年 3 月 28 日凌晨，美国宾夕法尼亚州三哩岛(TMI) 核电厂二号机组正在满功率运行。由于蒸汽发生器的冷却丧失，核反应堆和汽轮机自动停止运行，三个辅助给水泵自动启动，但因给水管上的阀门在检修后忘了打开，蒸汽发生器得不到必要的冷却，致使蒸汽发生器烧干和不能冷却一回路。三哩岛压水堆核电站发生了堆芯熔毁的严重事故，一座反应堆大部分元件烧毁，一部分放射性物质外泄。事件持续了 36 h，但给人们留下终生不灭的印象。三哩岛核电厂发生的核事故是美国最严重的核事故。然而事故对环境和居民都没有造成危害和伤亡，也没有发现明显的放射性影响。这次核泄漏事件是由于二回路的水泵发生故障；前些天工人检修后未将事故冷却系统的阀门打开，致使这一系统自动投入后，二回路的水仍断流。当堆内温度和压力在此情况下升高后，反应堆就自动停堆，卸压阀也自动打开，放出堆芯内的部分汽水混合物。同时，当反应堆内压力下降至正常时，卸压阀由于故障未能自动回座，使堆芯冷却剂继续外流，压力降至正常值以下，于是应急堆芯冷却系统自动投入，但操作人员却做出了错误的判断，反而关闭了应急堆芯冷却系统，停止了向堆芯内注水。以上种种管理和操作上的失误与设备上的故障交织在一起，使一次小的故障迅速而急剧地扩大，最终造成堆芯熔化的严重事故。

所幸的是在这次事故中，主要的工程安全设施都自动投入，加之反应堆有几道安全屏障(燃料包壳，一回路压力边界和安全壳等)，没有人员伤亡，仅三位工作人员受到了略高于半年的容许剂量的照射。本次核事故造成反应堆堆芯严重损坏，放射性场外释放很少，根据其场内影响，将其定为 5 级事故。

3.3.4 切尔诺贝利核事故

切尔诺贝利核电站事故于 1986 年 4 月 26 日发生在苏联乌克兰苏维埃共和国境内，电站 4 号机组爆炸，反应堆全部炸毁，大量放射性物质泄漏，成为有史以来最严重的核事故。辐射危害严重，导致事故后前 3 个月内 31 人死亡，之后 15 年内 6 万~8 万人死亡，13.4 万人遭受不同程度的辐射疾病折磨，方圆 30 km 地区的 11.5 万多民众被迫疏散。为消除事故后果，耗费了大量人力、物力。切尔诺贝利核电站采用大型石墨沸水反应堆，用石墨作慢化剂，用沸腾清水作冷却剂。1986 年有 4 台机组在运行，每台机组的热功率为 3 200 MW。每两台机组(每对反应堆)共用一个汽轮机发电机房，放有 4 台汽轮发电机和与之相关的并联强迫循环系统。每台机组配备两个完全相同的冷却回路；每个环路与 840 盒燃料组件的垂直平行管道相连接。冷却剂在底部进入燃料管道，向上流动被加热，部分沸腾。每个冷却环路有四台并联的主循环泵(三台运行，一台备用)。在平衡燃料辐照时，反应堆有正的空泡反应性系数。然而，燃料温度系数是负的。功率改变的净反应性效应取决于功率水平；在正常运行工况下，满功率下功率系数是负的；低于满功率的 20%时变成正的。因此，正常运行规程中限制在低于 700 MW 热功率下运行。低功率下反应堆处于不安全工况是这类核反应堆的设计缺陷，是导致这场事故的重要原因。1986—1987 年参加事故后果处理的 24 万人员接受的平均剂量约为 100 mSv。其中约 10%人员受到的剂量为 250mSv，少数人员受到的照射剂量大于 500mSv。在禁区 30km 范围内，事故后 20h 撤离了 4.9 万人，以后数天至数周内陆

续撤离 6.7 万人，11.6 万人所遭受的辐射值从 0.1~380 mSv 不等，其中约 10%的人受到的剂量大于 50mSv，少于 5%的居民受到大于 100 mSv 的辐照剂量，总平均受照剂量为 17~31 mSv。事故后对救灾人员采样测定体内辐照，平均剂量值逐年下降：1986 年约为 170 mSv，1987 年为 130 mSv，1988 年为 30 mSv，1989 年为 15 mSv。联合国原子辐射效应科学委员会(UNSCARE) 估计，除苏联以外，北半球各国居民由于切尔诺贝利事故导致的长期辐照个人剂量为：事故第一年受影响最大国家的平均个人剂量约 0.8 mSv；欧洲地区最高的平均 70 年的剂量负担为 1.2 mSv。据国际切尔诺贝利计划(The International Chernobyl Project) 估计，白俄罗斯、乌克兰和俄罗斯放射性污染最严重地区居住的居民在 1986—2056 年 70 年内受到的最高剂量负担为 160 mSv。经过 20 余年的跟踪医学调查，基本结论是除甲状腺癌以外，没有证实可归因于辐射而引发的肿瘤性疾病的增加。也没有发现因此次事故造成的婴儿出生缺陷、先天畸形、死胎、早产儿发生率的增加。本次核事故造成范围广泛的对环境和人类健康的严重影响，因此定为 7 级事故。

3.3.5 日本福岛核事故

2011 年 3 月 11 日，日本东部发生 9 级大地震并引发一系列巨大海啸，袭击了日本东部海岸。地震发生之前，福岛第一核电厂的 6 台机组中 1、2、3 号处于功率运行状态，4、5、6 号在停堆检修。地震导致福岛第一核电厂所有的厂外供电丧失，三个正在运行的反应堆自动停堆；应急柴油发电机按设计自动启动并处于运转状态。海啸冲破了福岛第一核电厂的防御设施，这些防御设施的原始设计能够抵御浪高 5.7m 的海啸，而当天袭击电厂的最大浪潮达到约 14 m。海啸浪潮深入到电厂内部，造成除一台应急柴油发电机之外的其他应急柴油发电机电源丧失，核电厂的直流供电系统也由于受水淹而遭受严重损坏，仅存的一些蓄电池最终也由于充电接口损坏而导致电力耗尽。由于丧

失了把堆芯热量排到最终热阱的手段，福岛第一核电站 1、2、3 号机组在堆芯余热的作用下迅速升温，锆金属包壳在高温下与水作用产生了大量氢气，随后引发了一系列爆炸：

2011 年 3 月 12 日 15: 36, 1 号机组燃料厂房发生氢气爆炸；

2011 年 3 月 14 日 11: 01, 3 号机组燃料厂房发生氢气爆炸；

2011 年 3 月 15 日 6: 00, 4 号机组燃料厂房发生氢气爆炸。

这些爆炸对电厂造成进一步破坏，使现场工作环境非常恶劣，许多抢险救灾工作往往以失败告终。现场淡水资源用尽后，电厂分别于 3 月 12 日 20: 20、3 月 13 日 13: 12、3 月 14 日 16: 34 陆续向 1、3、2 号机组堆芯注入海水，以阻止事态的进一步恶化。直至 3 月 25 日，福岛第一核电站才建立了淡水供应渠道，开始向所有反应堆和乏燃料池注入淡水，第一核电站的堆芯和乏燃料池冷却状况逐渐得到控制。日本原子能安全保安院(NISA)和核安全委员会分别宣布了向大气释放的放射性物质的估计总量。NISA 估计总的释放量 ^{131}I 和 ^{137}Cs 分别为 $1.6 \times 10^{17}\text{Bq}$ 和 $1.5 \times 10^{16}\text{Bq}$ 。核安全委员会以环境监测数据和空气扩散数据进行计算，估计释放到大气的核素量分别是 ^{131}I 为 $1.5 \times 10^{17}\text{Bq}$, ^{137}Cs 为 $1.2 \times 10^{16}\text{Bq}$ 。含有放射性物质的水从反应堆压力容器(RPV)扩散泄漏到安全壳(PCV)，为冷却而注入反应堆的水从 PCV 泄漏，汇集到了反应堆厂房和汽轮机厂房。4 月 2 日，超过 1 000 mSv/h 高放射性水平的污染水被发现汇集在 2 号机组进水口附近的电缆坑内。尽管 4 月 6 日通过采取措施中断了流出物，总的放射性物质释放量预计达到了 $4.7 \times 10^{15}\text{Bq}$ 。作为紧急处理措施，严重污染的水被储存在罐中。然而，由于没有足够的容器，为保证污水的储存能力，4 月 4—10 日，低放射性水平的水被排入海中。释放的放射性物质的总量推测约为 $1.5 \times 10^{11}\text{Bq}$ 。这一事件引起了包括俄罗斯、韩国、中国等相邻国家的极大关注。虽然在事故期间福岛第一核电站向外界释

放的放射性总量约为苏联切尔诺贝利事故的 10% (本次核事故所释放的放射性物质的准确数据仍待研究), 但也达到了国际核事故分级中最严重的事故等级(7 级)的范围。

预习测试

一、选择题

1、6级核事件放射性物质在数量上的等效放射性相当于 (B) 。

A $10^{14}\sim 10^{15}\text{Bq}^{131}\text{I}$ B $10^{15}\sim 10^{16}\text{Bq}^{131}\text{I}$ C 大于 $10^{16}\text{Bq}^{131}\text{I}$ D 不足 $10^{14}\text{Bq}^{131}\text{I}$

2、1957年前苏联南乌拉尔核事故属于 (A) 级核事件。

A 6 B 5 C 3 D 1

3、堆芯/放射性屏障严重损坏属于 (C) 级核事件。

A 6 B 7 C 5 D 3

4、核或辐射应急威胁类型中,在任何地区都可能存在的威胁和活动的是第 (B) 类威胁。

A II B IV C V D III

5、III类威胁包括的反应堆热功率水平标准为 (C) 。

A 大于 100MW B 大于 2MW 小于 100MW C 不超过 2MW D 以上都不对

二、判断题

1、1979年美国三哩岛核事故属于6级核事故 (√) 。

2、厂内堆芯/放射性屏蔽发生明显损坏;一个工作人员受到致死剂量的事件属于3级核事件 (×) 。

3、可能发生核应急情况的设施不包括工业设施(例如大型放射性药物生产厂) (×) 。

4、主要在设施内的事故属4级核事件 (√) 。

5、通常不涉及电离辐射源的活动属于第II类威胁 (×) 。