

福岛第一核电站事故



总干事的报告



IAEA

国际原子能机构

福岛第一核电站事故

总干事的报告

下列国家是国际原子能机构的成员国：

| | | |
|------------|-----------|---------------|
| 阿富汗 | 德国 | 尼日利亚 |
| 阿尔巴尼亚 | 加纳 | 挪威 |
| 阿尔及利亚 | 希腊 | 阿曼 |
| 安哥拉 | 危地马拉 | 巴基斯坦 |
| 阿根廷 | 圭亚那 | 帕劳 |
| 亚美尼亚 | 海地 | 巴拿马 |
| 澳大利亚 | 教廷 | 巴布亚新几内亚 |
| 奥地利 | 洪都拉斯 | 巴拉圭 |
| 阿塞拜疆 | 匈牙利 | 秘鲁 |
| 巴哈马 | 冰岛 | 菲律宾 |
| 巴林 | 印度 | 波兰 |
| 孟加拉国 | 印度尼西亚 | 葡萄牙 |
| 白俄罗斯 | 伊朗伊斯兰共和国 | 卡塔尔 |
| 比利时 | 伊拉克 | 摩尔多瓦共和国 |
| 伯利兹 | 爱尔兰 | 罗马尼亚 |
| 贝宁 | 以色列 | 俄罗斯联邦 |
| 多民族玻利维亚国 | 意大利 | 卢旺达 |
| 波斯尼亚和黑塞哥维那 | 牙买加 | 圣马力诺 |
| 博茨瓦纳 | 日本 | 沙特阿拉伯 |
| 巴西 | 约旦 | 塞内加尔 |
| 文莱达鲁萨兰国 | 哈萨克斯坦 | 塞尔维亚 |
| 保加利亚 | 肯尼亚 | 塞舌尔 |
| 布基纳法索 | 大韩民国 | 塞拉利昂 |
| 布隆迪 | 科威特 | 新加坡 |
| 柬埔寨 | 吉尔吉斯斯坦 | 斯洛伐克 |
| 喀麦隆 | 老挝人民民主共和国 | 斯洛文尼亚 |
| 加拿大 | 拉脱维亚 | 南非 |
| 中非共和国 | 黎巴嫩 | 西班牙 |
| 乍得 | 莱索托 | 斯里兰卡 |
| 智利 | 利比里亚 | 苏丹 |
| 中国 | 利比亚 | 斯威士兰 |
| 哥伦比亚 | 列支敦士登 | 瑞典 |
| 刚果 | 立陶宛 | 瑞士 |
| 哥斯达黎加 | 卢森堡 | 阿拉伯叙利亚共和国 |
| 科特迪瓦 | 马达加斯加 | 塔吉克斯坦 |
| 克罗地亚 | 马拉维 | 泰国 |
| 古巴 | 马来西亚 | 前南斯拉夫马其顿共和国 |
| 塞浦路斯 | 马里 | 多哥 |
| 捷克共和国 | 马耳他 | 特立尼达和多巴哥 |
| 刚果民主共和国 | 马绍尔群岛 | 突尼斯 |
| 丹麦 | 毛里塔尼亚 | 土耳其 |
| 吉布提 | 毛里求斯 | 乌干达 |
| 多米尼克 | 墨西哥 | 乌克兰 |
| 多米尼加共和国 | 摩纳哥 | 阿拉伯联合酋长国 |
| 厄瓜多尔 | 蒙古 | 大不列颠及北爱尔兰联合王国 |
| 埃及 | 黑山 | 坦桑尼亚联合共和国 |
| 萨尔瓦多 | 摩洛哥 | 美利坚合众国 |
| 厄立特里亚 | 莫桑比克 | 乌拉圭 |
| 爱沙尼亚 | 缅甸 | 乌兹别克斯坦 |
| 埃塞俄比亚 | 纳米比亚 | 委内瑞拉玻利瓦尔共和国 |
| 斐济 | 尼泊尔 | 越南 |
| 芬兰 | 荷兰 | 也门 |
| 法国 | 新西兰 | 赞比亚 |
| 加蓬 | 尼加拉瓜 | 津巴布韦 |
| 格鲁吉亚 | 尼日尔 | |

《国际原子能机构规约》于 1956 年 10 月 23 日经在纽约联合国总部举行的国际原子能机构规约大会核准，1957 年 7 月 29 日生效。国际原子能机构总部设在维也纳，其主要目标是“加速和扩大原子能对全世界和平、健康及繁荣的贡献”。

福岛第一核电站事故

总干事的报告

前 言

总干事 天野之弥

本报告评定了 2011 年 3 月 11 日开始的日本福岛第一核电站事故的原因和后果。该事故由紧接大地震而来的巨大海啸导致，是 1986 年切尔诺贝利灾难以来在核电厂发生的最严重事故。

本报告审议了人的因素、组织因素和技术因素，旨在提供对所发生的事件及其原因的理解，以便世界各国政府、监管机构和核电厂营运者能够根据所汲取的必要教训采取行动。还审查了在日本和国际上作为对事故的响应所采取的措施。

不应忘记福岛第一核电站事故给人们造成的巨大影响。超过 10 万人因放射性核素向环境的释放而被撤离。在 2015 年编写本报告时，他们当中的许多人仍不能返回家园。

我在事故发生几个月后访问了福岛第一核电站，亲眼目睹了海啸的强大和破坏性影响。这是一次令人震惊而发人深省的经历。

但是，在海啸袭击后仍坚守在岗位上的工作人员和管理人员以及在恶劣条件下奋力将受灾反应堆置于控制之下的那些人的勇气和奉献精神给我留下了深刻印象。他们不得不在他们没有为之接受过培训的状况中随机应变，并且常常缺乏适当的设备。他们应得到我们的尊重和敬佩。

促成该事故的一个主要因素是，在日本，人们广泛推测，日本的核电站非常安全，以至于这种量级的事故完全是不可想像的。这种假设为核电站营运者所接受，也没有受到监管机构或政府的质疑。结果，日本没有为 2011 年 3 月的严重核事故做好充分准备。

福岛第一核电站事故暴露了日本监管框架的某些不足。职责被划分给一些机构，权限归属并不总是清晰明确。

电站设计、应急准备和响应安排以及对严重事故管理的规划也存在某些弱点。曾有一种推测，认为核电站永远不会发生超过很短时间的全部电源的丧失。同一设施中的若干反应堆同时发生危机的可能性并没有得到考虑。对核事故与重大自然灾害同时发生的可能性的准备不充分。

自事故发生以来，日本改革了其监管体系，以便更好地满足国际标准。日本赋予了监管机构更明确的责任和更大的权限。国际专家将通过原子能机构的“综合监管评审服务”工作组访问对新监管框架进行审查。应急准备和响应安排也已加强。

其他国家也对事故作出了响应，采取的措施包括开展“压力测试”以重新评价核电厂防范场址特定极端自然危害的设计、安装更多的备用电源和供水点以及加强防范极端外部事件的电厂保护。

虽然核安全仍然是各国的责任，但核事故能够跨越国界。福岛第一核电站事故突出表明了有效国际合作的至关重要性。原子能机构是进行这种大部分合作的地方。原子能机构成员国在事故发生后几个月通过了“国际原子能机构核安全行动计划”，并且一直在实施其中的深远规定，以加强全球核安全。

原子能机构在事故发生后向日本提供了技术支持和专门知识，向全世界通报了不断演变的危机情况，并审查和改进了其自身的核应急响应安排。原子能机构在核应急期间的任务已被扩大，现包括提供对核应急潜在后果的分析及提出关于危机可能如何发展的假想方案。

原子能机构安全标准体现了对高水平安全构成要素的国际共识。安全标准委员会在事故后对它们进行了审查。提出并通过了一些修订建议。我鼓励所有国家全面执行原子能机构安全标准。

原子能机构同行评审在全球核安全领域发挥着关键作用，它们使各国能够受益于一流国际专家基于原子能机构安全标准的共同基准框架提出的独立见解。这些同行评审处理核电厂运行安全、核监管机构有效性和核电厂场址防范特定危害的设计等各种问题。自该事故以来，我们已加强了我们的同行评审计划，并将继续这样做。

我相信，福岛第一核电站事故的遗产将是世界各地更加重视核安全。在我所访问的每座核电厂都看到安全措施和程序都已经得到加强。现已广泛认识到，必须尽人之所能确保这类事故不再发生。鉴于全球核电利用在今后几十年中可能继续增长，这就更加至关重要。

任何国家都没有理由对核安全产生自满。促成福岛第一核电站事故的一些因素不是日本所独有的。不断的质疑和从经验中学习的开放态度是安全文化的关键之所在，对从事核电的每个人而言都至关重要。必须始终将安全放在首位。

我谨感谢为本报告做出贡献的许多国家和国际组织的专家，以及起草和审查本报告的我的原子能机构同事。我希望本报告及随附的各技术卷将被证明对利用或计划利用核电的所有国家加强安全的持续努力都具有价值。

鸣 谢

加拿大、日本、俄罗斯联邦、英国和美利坚合众国提供了财政援助。

收到了阿根廷、澳大利亚、白俄罗斯、巴西、加拿大、中国、古巴、捷克共和国、芬兰、法国、德国、加纳、冰岛、印度、印度尼西亚、以色列、意大利、日本、大韩民国、马来西亚、墨西哥、摩洛哥、荷兰、新西兰、挪威、巴基斯坦、菲律宾、波兰、俄罗斯联邦、斯洛伐克、南非、西班牙、瑞典、瑞士、阿拉伯叙利亚共和国、土耳其、乌克兰、阿拉伯联合酋长国、英国、坦桑尼亚联合共和国和美利坚合众国的实物捐助。还收到了欧洲委员会、联合国粮食及农业组织、国际放射防护委员会、国际劳工组织、国际核安全组、经合组织核能机构、联合国原子辐射效应科学委员会、世界核电营运者联合会和世界气象组织的实物捐助。

日本政府给予了宝贵支持，提供了大量的资料，并安排日本专家为本报告的工作提供支持，还确保了对在日本举行的各次双边会议的后勤协助。

联合国原子辐射效应科学委员会通过共享其 2013 年报告中所用参考资料的相关数据库和允许转载该报告中的资料和数字向国际原子能机构提供了支持。

国际原子能机构感谢参与本报告工作的众多专家。本报告是许多人不懈努力的结果。本报告末尾所列所有参与人员都做出了宝贵的贡献，但共同主席和各工作组协调员则肩负了尤其繁重的工作。还对包括国际技术咨询组成员在内的许多专家审查人员所作的努力深表感谢。

目 录

| | |
|------------------------------------|----|
| 正文摘要..... | 1 |
| 简要报告..... | 19 |
| 1. 导言..... | 19 |
| 1.1. 福岛第一核电站事故报告..... | 20 |
| 2. 事故及其评价..... | 23 |
| 2.1. 事故描述..... | 23 |
| 2.1.1. 始发事件和响应..... | 23 |
| 2.1.2. 事故演进..... | 33 |
| 2.1.3. 稳定化努力..... | 44 |
| 2.2. 核安全考虑因素..... | 49 |
| 2.2.1. 电站对外部事件的脆弱性..... | 49 |
| 2.2.2. 纵深防御概念的适用..... | 53 |
| 2.2.3. 对基本安全功能执行失效的评价..... | 55 |
| 2.2.4. 超设计基准事故的评价和事故管理..... | 60 |
| 2.2.5. 监管有效性评价..... | 64 |
| 2.2.6. 人的因素和组织因素的评价..... | 68 |
| 2.3. 意见和教训..... | 71 |
| 3. 应急准备和响应..... | 75 |
| 3.1. 日本对事故的初期响应..... | 76 |
| 3.1.1. 通报..... | 77 |
| 3.1.2. 缓解行动..... | 78 |
| 3.1.3. 应急管理..... | 80 |
| 3.2. 保护应急工作人员..... | 82 |
| 3.2.1. 地震和海啸发生后, 在该电厂对工作人员的防护..... | 83 |
| 3.2.2. 应急工作人员的防护措施..... | 83 |
| 3.2.3. 应急工作人员的指定..... | 84 |
| 3.2.4. 应急工作人员的医学管理..... | 84 |
| 3.3. 防护行动和保护公众的其他响应行动..... | 85 |
| 3.3.1. 紧急防护行动和避迁..... | 86 |
| 3.3.2. 与食品、饮用水和农业有关的防护行动..... | 89 |
| 3.3.3. 公众宣传..... | 91 |
| 3.3.4. 国际贸易..... | 92 |
| 3.3.5. 应急阶段的废物管理..... | 92 |

| | |
|----------------------------------|-----|
| 3.4. 从应急阶段向恢复阶段的过渡和对响应的分析 | 93 |
| 3.4.1. 从应急阶段向恢复阶段的过渡 | 93 |
| 3.4.2. 对响应的分析 | 94 |
| 3.5. 在国际应急准备和响应框架内的响应 | 94 |
| 3.6. 意见和教训 | 97 |
| 4. 放射后果 | 101 |
| 4.1. 环境中的放射性 | 106 |
| 4.1.1. 释放 | 107 |
| 4.1.2. 弥散 | 107 |
| 4.1.3. 沉积 | 111 |
| 4.1.4. 消费品 | 113 |
| 4.2. 保护人员免于辐射照射 | 117 |
| 4.2.1. 公众照射限制 | 117 |
| 4.2.2. 包括应急工作人员照射在内的职业照射限制 | 120 |
| 4.3. 辐射照射 | 121 |
| 4.3.1. 公众照射 | 122 |
| 4.3.2. 职业照射 | 128 |
| 4.4. 健康效应 | 131 |
| 4.4.1. 辐射引起的早期健康效应 | 132 |
| 4.4.2. 辐射诱发的潜在远期健康效应 | 133 |
| 4.4.3. 对儿童的辐射效应 | 134 |
| 4.4.4. 辐射诱发的产前健康效应 | 135 |
| 4.4.5. 心理后果 | 135 |
| 4.5. 对非人类生物的放射后果 | 137 |
| 4.6. 意见和教训 | 138 |
| 5. 事故后恢复 | 142 |
| 5.1. 受事故影响区域的厂外治理 | 142 |
| 5.1.1. 建立治理的法律和监管框架 | 143 |
| 5.1.2. 采取的治理战略 | 144 |
| 5.1.3. 治理的进展 | 145 |
| 5.2. 厂内稳定和退役准备 | 149 |
| 5.2.1. 战略规划 | 149 |
| 5.2.2. 退役准备 | 150 |
| 5.2.3. 污染水管理 | 151 |
| 5.2.4. 乏燃料和燃料碎片的移除 | 153 |
| 5.2.5. 场址的退役终态 | 155 |

| | |
|--------------------------------|-----|
| 5.3. 污染物质和放射性废物的管理 | 155 |
| 5.3.1. 废物管理 | 156 |
| 5.3.2. 厂外活动 | 156 |
| 5.3.3. 厂内活动 | 159 |
| 5.4. 社区复兴和利益相关者参与 | 160 |
| 5.4.1. 社会经济后果 | 160 |
| 5.4.2. 复兴 | 161 |
| 5.4.3. 利益相关者的参与和与他们的沟通 | 162 |
| 5.5. 意见和教训 | 163 |
| 6. 原子能机构对事故的响应 | 167 |
| 6.1. 原子能机构的活动 | 167 |
| 6.1.1. 最初的活动 | 167 |
| 6.1.2. 原子能机构赴日本工作组 | 169 |
| 6.1.3. 原子能机构部长级核安全大会 | 169 |
| 6.1.4. 原子能机构“核安全行动计划” | 170 |
| 6.1.5. 与福岛县的合作 | 171 |
| 6.1.6. 福岛部长级核安全大会 | 172 |
| 6.2. 《核安全公约》缔约方会议 | 173 |
| 6.2.1. 《核安全公约》缔约方特别会议 | 173 |
| 6.2.2. 《核安全公约》缔约方第六次审议会议 | 174 |
| 6.2.3. 外交大会和《维也纳核安全宣言》 | 174 |
| 参考文献 | 175 |
| 简称表 | 199 |
| 参与起草和审查的人员 | 202 |
| 国际技术咨询组 | 213 |
| 会议 | 214 |
| 版权说明 | 216 |
| 编者按 | 217 |

福岛第一核电站事故

正文摘要

2011年3月11日发生了日本东部大地震。该地震是太平洋板块在北美板块下方向前挤压时在交界面发生的能量突然释放造成的。一条估计约500公里长、200公里宽的地壳带发生断裂，从而引发了9.0级的大地震和一场海啸，该海啸袭击了日本沿海的广大区域，包括东北海岸，那里的海啸波有几次则高达10多米。地震和海啸在日本造成了惨重生命损失和广泛破坏。1.5万多人死亡，6000多人受伤，在编写本报告时¹，仍有约2500人被报告为失踪。建筑物和基础设施遭到严重损毁，特别是日本东北海岸沿线的建筑物和基础设施。

在东京电力公司（东电公司）运行的福岛第一核电站，地震给该场址的供电线路造成了破坏，海啸则给厂内的运行和安全基础设施造成了重大破坏。叠加效应导致了厂外和厂内电力丧失。这使得三个在运反应堆机组²以及乏燃料贮存池丧失了冷却功能。海岸沿线的四座其他核电站³也受到地震和海啸不同程度的影响。但这些核电站的所有在运反应堆机组都被安全关闭。

尽管福岛第一核电站操纵员努力维持控制，但1号至3号机组仍发生了堆芯过热、核燃料熔化和三个安全壳的破裂。氢气从反应堆压力容器释放出来，导致1号、3号和4号机组的反应堆厂房内发生爆炸，使结构和设备受损，人员受伤。放射性核素从该电站释放到大气中，然后沉积到陆地上和海洋中。也发生了向海洋的直接释放。

在该场址20公里半径内和其他指定区域的居民被撤离，在20公里至30公里半径内的居民则被指示进行掩避，后被建议自愿撤离。对食物的分发和消费及饮用水的消费施加了限制。在撰写本报告时，许多人仍生活在他们所撤离的区域之外。

在福岛第一核电站反应堆工况稳定后⁴，开始了反应堆最终退役的准备工作。恢复受事故影响区域包括治理和复兴各社区和基础设施的努力于2011年开始。

¹ 2015年3月。在一些情况下，获得了直至2015年6月的资料，并在可能的情况下纳入了这些资料。

² 在福岛第一核电站的六台机组中，1号、2号和3号机组在事故发生时正在运行；4号、5号和6号机组正处于计划停堆状态。

³ 东通核电站、女川核电站、福岛第二核电站和东海第二核电站。

⁴ 2011年12月16日，日本政府-东电公司综合响应办公室宣布，1号至3号机组实现了“冷停堆状态”。术语“冷停堆状态”系日本政府当时专门针对福岛第一核电站确定的。其定义不同于原子能机构和其他组织所用的术语。

事故发生后，原子能机构立即履行了其应急响应任务。原子能机构启动了其“事件和应急系统”，协调进行了机构间响应，并发起了由成员国和媒体参加的一系列简况介绍会。

总干事立即访问了日本，原子能机构则向日本派遣了若干工作组，包括国际实情调查团及关于退役和治理问题的同行评审工作组。

原子能机构在 2011 年 6 月组织了国际部长级核安全大会，导致发表了《核安全部长宣言》。该宣言概述了进一步加强世界范围内的核安全、应急准备以及人员和环境的辐射防护的一些措施，还表达了原子能机构成员国确保采取这些措施的坚定承诺。

“部长宣言”还请总干事与成员国磋商，编写原子能机构“核安全行动计划（草案）”（“行动计划”）⁵。“行动计划”确定了加强全球核安全框架的工作计划，得到了 2011 年原子能机构第五十五届大会的一致核可。

原子能机构还通过原子能机构与福岛县的“合作备忘录”在福岛开展了合作活动。这为辐射监测和治理、人体健康以及应急准备和响应方面的合作提供了基础。

原子能机构还促进和组织了原子能机构成员国和《核安全公约》缔约方的若干国际会议。其中许多活动是根据“行动计划”开展的。

自福岛第一核电站事故以来，原子能机构成员国和国际组织以及国际核安全文书特别是《核安全公约》缔约方已对事故原因和后果进行了许多分析，并对事故对核安全的影响进行了详细审议。2012 年 8 月举行了《核安全公约》缔约方特别会议，审查和讨论了对事故的初步分析结果和该公约的有效性。

参加 2014 年 3 月至 4 月第六次审议会的《核安全公约》缔约方报告了实施安全升级的情况，包括：采取额外手段以抵御长时间的电源和冷却丧失；强化电源系统以提高可靠性；重新评价场址特定外部自然危害和多机组事件；加强厂内和厂外应急控制中心，以确保它们免受极端外部事件和辐射危害影响；加强保持安全壳完整性的措施；以及改进严重事故管理规定和导则。

2015 年 2 月，《核安全公约》缔约方在原子能机构总干事召集的外交大会上通过了《维也纳核安全宣言》，其中包括落实该公约防止发生具有放射后果的事故和在一旦发生事故时减轻这类后果的第三个目标的原则。

⁵ “行动计划”确定了加强全球核安全框架的工作计划。该行动计划包括与以下有关的 12 项主要行动：安全评价；原子能机构同行评审；应急准备和响应；国家监管机构；营运组织；原子能机构安全标准；国际法律框架；计划启动核电计划的成员国；能力建设；保护人类和环境免于电离辐射；通讯和信息传播；以及研究与发展。更多详情请参见第 6.1 节。

福岛第一核电站事故报告

总干事在 2012 年 9 月原子能机构大会上宣布，原子能机构将编写一份关于福岛第一核电站事故的报告。他后来表示，该报告将是“权威性、符合事实和均衡的评定，并涉及事故的原因和后果及所汲取的教训”。

福岛第一核电站事故报告是广泛国际协作努力的结果，由来自 42 个成员国（拥有或没有核电计划的成员国）的约 180 名专家组成的五个工作组和若干国际机构参与了这项努力。这确保了对经验和知识的广泛代表性。一个国际技术咨询组就技术和科学问题提供了咨询。设立了一个由原子能机构高管层人员组成的核心小组，以便指导和促进本报告的协调和审查工作。还建立了其他内部和外部审查机制。

总干事的本报告包括“正文摘要”和“简要报告”。本报告借鉴了国际专家编写的五个详细技术卷的内容及许多参与专家和国际机构的输入。本报告基于对截至 2015 年 3 月从大量来源获得的数据和资料的评价，包括基于在实施“行动计划”过程中开展的工作的结果，对事故及其原因、演变和后果作了描述，并突出强调了主要意见和教训。日本政府和日本其他组织提供了大量数据。

核安全考虑因素

电站对外部事件的脆弱性

2011 年 3 月 11 日的地震造成了振动性地面运动，引起了电站结构、系统和部件的摇晃。继之而来的是一系列海啸波，其中一个海啸波淹没了场址。所记录的地面运动和海啸波高度都大大超出了最初设计电站时所作的危害假设。地震和相关海啸影响了福岛第一核电站的多台机组。

原设计中考虑的地震危害和海啸波主要是根据日本的历史地震记录和近期海啸的证据评估的。该原始评估没有充分考虑构造地质标准，也没有利用这类标准进行重新评估。

地震发生前，日本海沟被归类为 8 级地震频发的俯冲带；日本科学家不认为福岛县沿海发生 9 级地震是可信的。但过去几十年中，已有在不同地区的类似构造环境中发生类似或更高震级的记录。

没有迹象表明，该电站的主要安全特性受到 2011 年 3 月 11 日地震产生的振动性地面运动的影响。这主要是由于在日本核电站的抗震设计和建造中采取的保守方案，这使得为电站提供了充分的安全裕度。但原设计的考虑因素没有提供针对海啸等极端外部洪水事件的可比安全裕度。

在福岛第一核电站的寿期期间，一直没有对该电站对外部危害的脆弱性进行再评价。事故发生时，日本没有关于这种再评价的监管要求，现行条例和导则也没有适当

考虑相关国内和国际运行经验。日本关于应对地震相关事件如海啸影响之办法的监管导则笼统而简短，没有提供具体标准或详细导则。

事故发生前，营运者使用日本在 2002 年制订的一种基于共识的方法对极端海啸洪水水位进行了一些再评价，得出的值高于原设计基准估计值。基于这些结果，采取了一些补偿措施，但这些措施在事故发生时被证明并不充分。

此外，营运者还在事故前利用波源模型或基于共识的方法之外的方法进行了一些试算。其结果是，利用日本地震调查研究推进本部在 2002 年建议的源模型进行的试算预期将发生远远大于原设计中和以往再评价所作估计中所设想程度的海啸。该模型使用了最新资料并在其假想情况中采用了不同的方案。事故发生时，还在开展进一步的评估，但同时，并没有实施任何额外的补偿措施。估计值与 2011 年 3 月记录的洪水水位相似。

世界各地的运行经验表明，已发生过自然危害超过核电厂设计基准的情况。特别是，来自其中一些事件的经历证明了安全系统对洪水的脆弱性。

- 对自然危害的评价需要足够保守。在建立核电站设计基准过程中，对主要历史数据的考虑对于表征外部自然危害的风险是不充分的。即便可以获得全面的数据，由于相对短的观察期限，在预测自然危害方面仍然存在很大的不确定性。
- 需要定期对核电厂的安全进行重新评价，以考虑知识的进步、必要的纠正行动或需要立即实施的补偿措施。
- 自然危害评价需要考虑自然危害同时或依次并发的可能性，以及它们对核电厂的叠加效应。自然危害评价还需要考虑自然危害对核电厂多机组的影响。
- 运行经验计划需要包括国内和国际两方面来源的经验。需要迅速落实通过运行经验计划确定的安全改进。需要定期和独立评估运行经验的利用情况。

纵深防御概念的适用

纵深防御是自开始核电计划发展以来为了确保核装置安全而适用的概念。其目的是通过若干层防护补偿潜在的人为故障和设备故障。这种防御通过在各层防护的多个而独立的手段提供。

福岛第一核电站的设计提供了前三层纵深防御的设备和系统：(1) 旨在提供可靠正常运行的设备；(2) 旨在使电站在异常事件后恢复安全状态的设备；和 (3) 旨在管理事故工况的安全系统。设计基准是利用一系列假想危害推导出的，但没有充分涉及海啸等外部危害。结果，海啸引起的洪水同时对纵深防御的前三个防护层构成了挑战，导致三个防护层中每层的设备和系统发生了共因故障。

多个安全系统的共因故障导致了在设计中没有预见到的电站工况。结果，旨在提

供第四层纵深防御即防止事故发展和减轻严重事故后果的防护手段失效，没能恢复反应堆冷却和维持安全壳完整性。电源的完全丧失、必要仪器仪表的不可用导致相关安全参数资料的缺乏、控制装置的丧失以及操作程序的不充分使得不能阻止事故发展和限制其后果。

没能在纵深防御的每个层级提供充分的防护手段导致 1 号、2 号和 3 号机组发生了严重的反应堆损坏和从这些机组的大量放射性释放。

- 纵深防御概念依然有效，但需要通过适当的独立性、冗余度、多元化和防范内外部危害在所有层级上加强该概念的实施。需要不仅注重预防事故，而且也注重改进缓解措施。
- 在超设计基准事故期间需要的仪器仪表和控制系统需要保持可运行，以便监测电厂基本安全参数和为电厂运行提供便利。

对基本安全功能执行失效的评价

对确保安全具有重要意义的三个基本安全功能是：控制核燃料的反应性；排出堆芯和乏燃料池中的热；以及密封放射性物质。地震发生后，第一个基本安全功能即“控制反应性”在福岛第一核电站所有六台机组都得到了执行。

第二个基本安全功能即“排出堆芯和乏燃料池中的热”由于操纵员因大部分交流电和直流电系统丧失而失去对 1 号、2 号和 3 号机组反应堆和乏燃料池的几乎所有控制手段而不能维持。第二个基本安全功能的丧失部分地是由于对反应堆压力容器的减压延误，没能实施备用水注入所致。冷却的丧失导致反应堆燃料过热和熔化。

密封功能因交流电和直流电丧失而丧失，这使冷却系统变得无法使用，并使操纵员难以使用安全壳排气系统。安全壳排气对减压和防止安全壳失效十分必要。操纵员能够对 1 号和 3 号机组进行排气，减少一次安全壳内的压力，但这却造成了向环境的放射性释放。虽然 1 号和 3 号机组的安全壳排气系统被打开，但 1 号和 3 号机组的一次安全壳最终全都失效。2 号机组的安全壳排气没有成功，安全壳失效，造成了放射性释放。

- 需要为排出余热提供能够既按设计基准又在超设计基准工况运行的坚固和可靠的冷却系统。
- 需要确保对超设计基准事故的密封功能，以防止放射性物质向环境的大量释放。

超设计基准事故的评价和事故管理

在福岛第一核电站许可证审批过程及运行过程开展的安全分析没有充分处理发生可能导致严重堆芯损坏的复杂事件序列的可能性。特别是，安全分析没能确定电站对洪水的脆弱性和操作程序与事故管理导则中的缺陷。概率安全评价没有涉及发生内部

水淹的可能性，并且对人的事故管理行为的假设是乐观的。另外，监管机构对操纵员考虑严重事故的可能性仅提出了有限的要求。

操纵员对海啸所致多机组丧失电源和丧失冷却的准备不充分。虽然东电公司制订了严重事故管理导则，但这些导则并没有涵盖这种可能性不大的事件并发情况。因此，操纵员没有受到适当的培训，没有参加相关严重事故演习，提供给他们的设备在恶化后的电站工况中也不适当。

2012年9月，原子力规制委员会成立。该委员会制订了关于核电站的新条例，以保护人员和环境。这些新条例已于2013年生效，它们加强了防止由于共同原因同时丧失所有安全功能的对策，包括对地震和海啸等外部事件影响的再评估。还引入了防止堆芯损坏、安全壳损坏和放射性物质弥散的严重事故响应的对策。

- 需要进行全面的概率安全分析和确定性安全分析，以确认电厂承受适用超设计基准事故的能力，并提供电厂设计坚固性的高置信度。
- 需要对事故管理规定措施进行全面、充分的设计和保持更新。这些规定措施需要在一整套始发事件和电厂工况的基础上得出，还需要为影响多机组电厂中若干机组的事故做出规定。
- 培训、演习和演练需要包括假想严重事故工况，以确保操纵员尽可能地做好充分准备。这些培训、演习和演练需要包括模拟使用在严重事故管理中将部署的实际设备。

监管有效性评价

在事故发生时日本的核安全监管由许多组织进行，他们具有不同的作用和职责以及复杂的相互关系。当时并不完全清楚哪些组织有责任和权力发布关于如何不拖延地对安全问题作出响应的有约束力的指令。

监管检查计划结构僵硬，降低了监管机构适当验证安全性并确定潜在新的安全问题的能力。

在事故发生时已建立的规章、导则和程序不完全符合一些关键领域的国际实践，特别是在关系到定期安全审查、危害重新评价、严重事故管理和安全文化时尤其如此。

- 为了确保对核装置的安全进行有效的监管监督，监管机构必须独立并具有法律授权、技术能力和强健的安全文化。

人的因素和组织因素的评价

在事故之前，日本存在的一个基本假设是，核电站的设计以及已经建立的安全措施是足够强健的，能够承受具有低概率和严重后果的外部事件。

因为基本假设是日本核电站是安全的，所以有关组织及其工作人员往往不会对安全水平提出挑战。强化利益相关者关于核电站技术设计坚固性的基本假设，导致安全改进没有被及时引入的情况。

福岛第一核电站事故表明，为了更好地查明电厂的漏洞，有必要采取考虑人、组织和技术之间复杂相互作用的综合方案。

- 为了促进和加强安全文化，个人和组织需要持续挑战或重新审查有关核安全的现行假设和可能影响核安全的决定和行动的影响。
- 系统性安全方案需要考虑人、组织和技术因素之间的相互作用。在核装置整个寿期期间都需要采取这种方案。

应急准备和响应

日本对事故的初期响应

事故发生时，在国家 and 地方一级实施的响应核应急和自然灾害的安排互不相干。对于响应同时发生的核应急和自然灾害，没有制订协调一致的安排。

核应急安排设想的是，在核电站发现相关不利工况（如丧失所有交流电供电五分钟以上或丧失进行反应堆冷却的所有能力）后，将从电站向当地政府和国家政府发送通报。国家政府将随后评价该状况和确定是否将该状况归类为“核应急”⁶。如果该状况被归类为“核应急”，则将在国家一级发布核应急通告，并将根据剂量预测对必要的防护行动作出决定。

根据福岛第一核电站的报告，首相在 3 月 11 日晚宣布了核应急，并发布了公众采取保护行动的命令。国家一级的响应由首相和东京首相府的高级官员领导。

地震和海啸造成的后果以及不断增加的辐射水平使得厂内响应极其困难。交流电源和直流电源的丧失、妨碍着厂内响应措施的大量瓦砾的存在、余震、又将发生海啸的警报和不断增加的辐射水平意味着许多缓解行动都不能及时采取。国家政府介入了关于厂内缓解行动的决定。

由于地震和海啸造成的广泛基础设施损毁，启动位于福岛第一核电站五公里外的厂外应急中心变得很困难。几天内，由于不利的放射状况，必须撤离该厂外中心。

- 在对可能的核应急进行响应准备时，有必要考虑可能涉及堆芯中核燃料或现场乏燃料严重破损的紧急情况，包括可能与自然灾害同时发生的涉及多机组电厂中的若干机组的紧急情况。

⁶ 《原子力灾害对策特别措置法》，1999 年第 156 号法令，经 2006 年第 118 号法令最后一次修订以下称“原子力灾害法”。

- 一 核应急的应急管理系统需要包括为营运组织及地方和国家当局确定明确的任务和责任。需要定期在演习中对该系统包括营运组织和有关当局之间的相互作用进行测试。

保护应急工作人员

事故发生时，尽管日本的国家法律和导则涉及了应为保护应急工作人员采取的措施，但它们只是一般性的而不是充分详尽的。

需要许多不同专业的应急工作人员向应急响应提供支持。应急工作人员来自各个组织和公共服务部门。但并没有制订将事故前未受指派的那些应急工作人员纳入到响应行动中的安排。

实施确保保护工作人员免于辐射照射的安排受到场址极端状况的严重影响。为了使厂内应急工作人员始终得到可接受水平的保护，实施了一系列临时措施。从事特定任务的应急工作人员的剂量限值被临时提高，以便能够继续进行必要的缓解行动。对应急工作人员的医学管理也受到严重影响，为了满足厂内应急工作人员的需求，需要作出很大努力。

被称为“帮助人员”的公众成员自愿协助开展了厂外应急响应。国家当局发布了关于帮助人员能够开展的活动类型和应采取的防护措施的导则。

- 一 需要指定应急工作人员并明确规定他们的职责，而无论他们为哪个组织工作，并需要对他们进行适当的培训，并在应急期间对他们进行适当的保护。需要制订将应急前未受指派的那些应急工作人员和自愿协助开展应急响应的帮助人员纳入到响应行动中的安排。

保护公众

国家在事故时的应急安排设想，关于防护行动的决定将基于需要作出决定时利用剂量预测模型即“环境应急剂量信息预测系统”计算给公众造成的估算预期剂量。该安排中并没有设想对公众采取紧急防护行动的决定将基于预先确定的具体电站状况。但在事故响应中，关于防护行动的初始决定是基于电站状况做出的。由于厂内电源丧失，无法提供源项估计值作为“环境应急剂量信息预测系统”的输入。

事故之前的安排包括根据预期剂量而不是根据可测量剂量进行隐避、撤离和碘甲状腺阻断的标准。没有任何避迁标准。

事故期间实施的公众防护行动包括：撤离、隐避、碘甲状腺阻断（服用稳定性碘）、限制食品和饮用水的消费、避迁和提供信息。

将居民从福岛第一核电站附近撤离在 2011 年 3 月 11 日晚上开始，撤离区范围从电站半径两公里逐渐扩大到三公里，然后到 10 公里。到 3 月 12 日晚上，撤离区范围

扩大到 20 公里。同样，民众被命令隐避的区域范围从事故不久后的电站半径 3 至 10 公里扩大到 3 月 15 日之前的 20 至 30 公里。在核电站半径 20 至 30 公里内区域，公众被命令隐避直到 3 月 25 日日本政府建议自愿撤离之时。主要由于缺乏详细的安排，没有统一采取服用稳定性碘进行碘甲状腺阻断。

在撤离方面，由于地震和海啸造成的破坏以及由此产生的通讯和交通问题而困难重重。从 20 公里撤离区内医院和疗养院进行患者撤离时也遇到了不少困难。

4 月 22 日，现有的 20 公里撤离区被确定为“限制区”，重新进入受到控制。还在可能超出具体的避迁剂量标准场所内的“限制区”之外确定了“计划撤离区”。

一旦在环境中检测到放射性核素，即在农业区防护行动以及食品消费和分配以及饮用水消费的限制方面作出安排。此外，还建立了拟出口食品和其他产品认证体系。

应急期间，多个渠道被用来向公众通报情况和回应人们的关切，其中包括电视、广播、互联网和电话热线。根据通过热线和咨询服务收到的公众反馈意见，确定对易于理解的信息和辅助材料的需求。

- 需要制订各项安排，以便能够根据预先确定的电厂状况，就实施预定的公众紧急防护行动作出决定。
- 需要落实各项安排，以便能够根据不断发展的电厂状况或监测结果扩大或更改紧急防护行动。还需要作出各项安排，以便能够根据监测结果启动早期防护行动。
- 需要制订各项安排，确保核应急中的防护行动和其他响应行动利大于弊。需要采取综合决策方案，确保实现这种平衡。
- 需要制订各项安排，协助决策者、公众和其他人（如医疗工作人员）了解核应急中的放射性健康危害，以便他们对防护行动作出知情决定。还需要制订各项安排，从地方、国家和国际层面处理公众关切。

从应急阶段过渡到恢复阶段和对响应进行分析

直到福岛第一核电站事故后才制订了从应急阶段过渡到恢复阶段的具体政策、准则、标准和安排。在制订这些安排过程中，日本当局适用了国际放射防护委员会（国际放射防护委）的最新建议。

以报告形式对事故和应急响应情况进行了分析和专题介绍，其中包括日本政府、营运组织（东电公司）以及政府和国会分别设立的两个调查委员会发布的报告。

在事故后，在许多情况下，对日本国家应急准备和响应的安排做了修订，以考虑这些分析的结论以及在应急准备和响应领域的原子能机构安全标准。

- 需要在准备阶段制订终止防护行动和其他响应行动及过渡到恢复阶段的安排。
- 对紧急情况和所作的应急响应进行及时分析、找出教训并确定可能的改进之处可加强应急安排。

在国际应急准备和响应框架内的响应

在事故发生时就存在着一个由国际法律文书、原子能机构安全标准和业务安排组成的广泛的国际应急准备和响应框架。⁷

在事故发生时，原子能机构在响应核或辐射应急方面有四项任务：(1) 通过正式指定的联络点通报和交流官方信息；(2) 提供及时、明确和易于理解的信息；(3) 应请求提供和便利国际援助；(4) 协调机构间响应。

对该事故的国际响应涉及了许多国家和一些国际组织。

原子能机构与日本的正式联络点进行了联系，共享了随着应急情况发展不断提供的应急信息，并随时向各国、相关国际组织和公众进行通报。在应急响应的早期阶段，与日本正式联络点的通讯遇到困难。原子能机构总干事对日本的访问和联络官员随后被派驻东京加强了原子能机构与联络点之间的通讯。原子能机构还向日本派出了专家工作组，并协调了机构间响应。

各国⁸采取或建议了不同的防护行动，以供其在日本的国民应对该事故。普遍未向公众充分说明这些不同，由此偶尔造成了混乱和关切。

参加机构间辐射和核应急委员会的相关国际组织定期交流了信息。还发布了联合新闻稿。

- 需要加强国际通报和援助安排的实施。
- 需要加强国家之间对防护行动和其他响应行动的磋商和信息共享。

放射后果

环境中的放射性

事故导致放射性核素向环境的释放。许多组织使用不同的模型对这些释放进行了评价。大部分大气释放被盛行风向东吹散，沉积和弥散在北太平洋。由于包括缺乏大

⁷ 主要国际法律文书有《及早通报核事故公约》和《核事故或辐射紧急情况援助公约》。在事故发生时，应急准备和响应领域的国际安全标准是《安全标准丛书》第 GS-R-2 号和第 GS-G-2.1 号。原子能机构《安全丛书》第 115 号也包括应急准备和响应的相关要素。国际业务安排包括《紧急通报和援助技术工作手册》、原子能机构“响应和援助网”以及“国际组织辐射应急联合管理计划”。

⁸ 核或辐射应急的准备和响应的主要责任属于当事国，保护人命、健康、财产和环境的主要责任亦是如此。

气释放海洋沉积的监测数据在内的原因，这种放射性物质数量和成分估计的不确定性难以得到解决。

风向的改变意味着相对少部分大气释放沉积在陆地，主要在福岛第一核电站的西北方向。对陆地环境沉积的放射性核素的存在和活度进行了监测和表征。由于物理衰变、环境迁移过程和净化活动，所测得的放射性核素活度随着时间的推移而降低。

除了从大气沉积进入海洋的放射性核素外，还有福岛第一核电站在厂址直接进入海洋的液体释放和排放。很难单独通过测量对放射性核素在海洋中的准确移动进行评价，但利用一些海洋输运模型对海洋弥散进行了估计。

碘-131、铯-134 和铯-137 等放射性核素被释放并在饮用水、食品和一些非食用消费品中被发现。作为对事故所作的响应，日本当局制订了限制措施，以防止消费这些产品。

- 一 在出现向环境的放射性物质事故性释放的情况下，需要迅速对这种释放的数量和成分进行量化和表征。对于大量释放，需要制订全面和协调一致的长期环境监测计划，以确定在当地、地区和全球层级对环境的放射影响的性质和程度。

保护人员免于辐射照射

事故发生后，日本当局适用了国际放射防护委最新建议中所列保守的剂量参考水平⁹。一些防护措施和行动经证明难以为实施当局所适用，而且对所受影响人员的要求非常高。

在应急阶段过去后，在针对事故的较长期后果而进行饮用水、食品和非食用消费品控制方面，国家和国际标准和导则之间则存在一些差异。

- 一 相关国际机构需要制订易于非专业人员理解的关于辐射防护原则和标准的说明，以使决策者和公众更加清楚这些原则和标准的适用。鉴于一些长期防护措施对受影响人员具有扰乱性，需要制订更好的沟通战略，向包括公众在内的所有利益相关者传达这类措施和行动的理由。
- 一 与消费品中所含比活度和放射性浓度及沉积活度有关的保守决定导致了延长限制时间以及相关的各种困难。在持续性照射情况中，国际标准之间以及国

⁹ 辐射防护的国际建议是由国际放射防护委发布的。在制订国际安全标准包括由一些国际组织制订并在原子能机构主持下发布的辐射防护标准（《国际电离辐射防护和辐射源安全基本安全标准》（基本安全标准））的过程中都考虑了这些建议。“基本安全标准”在世界范围内被用于制订有关保护人和环境免受电离辐射照射潜在有害影响的国家法规。2007 年国际放射防护委的建议提供了经修订的辐射防护框架。这些建议包括在防护战略中采用参考水平。在事故发生时，正在对“基本安全标准”进行修订，以便除其他外，特别考虑到这些建议。

际标准和国家标准之间特别是与饮用水、食品、非食用消费品和陆上沉积活度有关的标准的一致性是有利的。

辐射照射

在短期内，对公众照射的最主要促进因素是：(1) 烟云中和地面沉积的放射性核素产生的外照射；(2) 甲状腺因碘-131 的摄入产生的内照射，以及其他器官和组织主要因铯-134 和铯-137 的摄入产生的内照射。长期而言，对公众照射的最主要促进因素将是沉积的铯-137 产生的外辐射。

对辐射剂量的早期评价使用了环境监测和剂量估算模型，导致了一些过高估计。为本报告中估算起见，还包括了地方当局提供的个人监测数据，以便提供关于所受到的实际个人剂量及其分布的更牢靠的信息。这些估算表明，公众成员受到的有效剂量很低，而且普遍与因全球天然本底辐射水平所受到的有效剂量的范围具有可比性。

在涉及碘-131 释放和儿童摄入碘-131 的核事故后，这种摄入和随后对儿童甲状腺产生的剂量尤其令人关切。在福岛第一核电站事故后，所报告的儿童甲状腺剂量当量很低，因为他们摄入的碘-131 有限，而这部分地是由于对饮用水和食品包括绿叶蔬菜和鲜牛奶实行的限制所致。由于事故刚发生后的可靠个人辐射监测数据的缺乏，对这段时间的碘摄入目前还存在不确定性。

截至 2011 年 12 月，约有 2.3 万应急工作人员参加了应急作业。他们之中大多数人招致的有效剂量都低于日本的职业剂量限值。在这一数字中，有 174 人超过了有关应急工作人员的初始标准，六名应急工作人员超过了日本当局规定的在应急情况下临时修订的有效剂量标准。在执行职业辐射防护要求方面出现了一些不足之处，包括在应急工作人员辐射剂量的早期监测和记录期间、在获得和使用一些防护设备及在相关培训方面。

- 对代表性公众成员群体的个人辐射监测为可靠估计辐射剂量提供宝贵信息，需要与环境测量和适当剂量估计模型结合用于评价公众剂量。
- 虽然在日本，乳制品不是摄取放射性碘的主要途径，但显然，限制甲状腺剂量特别是儿童的剂量的最重要方法是限制放养奶牛所产鲜牛奶的消费。
- 需要建立完善的系统，以便监测和记录经由所有相关途径特别是工作人员在严重事故管理活动期间可能接受的内照射所致的职业辐射剂量。至关重要的是，应当提供用于限制工作人员在应急响应活动期间照射的适当而充足的个人防护设备，并且工作人员应当接受过使用它们的充分培训。

健康效应

在工作人员或公众成员中没有观察到可归因于该事故的任何早期辐射诱发的健康效应。

后期辐射健康效应的潜伏期可长达数十年，因此，不可能通过照射后若干年的观察就不予考虑受照人群发生这种效应的可能性。然而，考虑到所报告的公众成员所受剂量的低水平，本报告的结论与联合国原子辐射效应科学委员会（辐射科委会）提交联合国大会的报告的结论是一致的。¹⁰ 辐射科委会认为，“预计受照公众成员及其后裔的辐射相关健康效应发生率不会有明显的增加”（这是在与“2011年日本东部大地震和海啸后核事故引起的辐射照射水平和影响”有关的健康影响的范围内所作的报告）。¹¹ 在接受了100毫希或更高有效剂量的工作人员群体中，辐射科委会的结论是，“预计未来会增加罹患癌症的风险。然而，预计这批人员的癌症发病率的任何增加都不可能觉察到，因为很难参照癌症发病率的正常统计波动来确认这样小的发病率”。¹²

开展了《福岛健康管理调查》，以监测福岛县受影响民众的健康。这项调查旨在早发现和早治疗疾病以及预防生活方式相关疾病。在本报告撰写之时，作为调查的一部分，正在进行儿童甲状腺的集中筛查。正在使用高度灵敏的设备，并已检测到（临床手段本无法检测到的）大量被调查儿童无症状的甲状腺异常。在调查中发现的异常不太可能与该事故的辐射照射有关，而最有可能表示在该年龄段儿童中自然发生的甲状腺异常。儿童罹患甲状腺癌是涉及放射性碘大量释放的事故后最有可能的健康效应。由于所报告的可归因于该事故的甲状腺剂量普遍很低，不可能发生可归因于该事故的儿童甲状腺癌增加的情况。然而，在儿童于该事故后即刻受到的甲状腺当量剂量方面仍然存在不确定性。

没有观察到而且预计不会发生产前辐射效应，因为所报告的剂量大大低于这些效应可能发生的阈值。未见报告可归因于辐射情况的意外终止妊娠现象。就父母受照射导致其后代产生遗传效应的可能性而言，辐射科委会的结论是，总体来说，“虽然在动物研究中得到了证实，但人群遗传效应发生率的增加目前不能归因于辐射照射”。¹³

在受核事故影响的人群中据报告出现了一些心理状况。由于其中许多人遭受了大地震和毁灭性海啸以及事故的综合影响，因此，很难评估可以在何种程度上将这种影响单独归因于该核事故。《福岛健康管理调查》的“心理健康和生活方式调查”显示，在受影响民众的一些弱势群体中出现了相关的心理问题，如焦虑上升和创伤后应激障碍。辐射科委会估计，“[事故引起的]最重要的健康效应涉及与地震、海啸和核事故的巨大影响有关的心理和社会安宁，以及与所感受到的电离辐射照射风险有关的恐惧和

¹⁰ 联合国，《联合国原子辐射效应科学委员会的报告》，A/68/46号文件，联合国，纽约（2013年）。

¹¹ 世界卫生组织（世卫组织）还于2013年发表了基于初步估计剂量的健康风险评估结果。结果在本报告中作了介绍。

¹² 见脚注10。

¹³ 联合国，《联合国原子辐射效应科学委员会的报告》，A/67/46号文件，联合国，纽约（2012年）。

羞于见人的感觉”。¹⁴

- 需要向利益相关者清楚地介绍辐射照射危险和健康效应的辐射归因，以明确说明，如果照射水平与全球平均本底辐射水平相似，则不能将民众中发生健康效应情况的任何增加归因于辐射照射。
- 在核事故后，健康调查十分重要和有用，但不应被解读为流行病学研究。这种健康调查的结果旨在提供支持对受影响民众提供医疗援助的资料。
- 需要制订放射防护导则，以便处理放射事故后给受影响民众成员造成的心理后果。国际放射防护委特别工作组建议，“寻求制订减轻放射事故所致严重心理后果的战略”。¹⁵
- 需要以易于理解的方式及时将有关辐射效应的实情信息通报给受影响地区的人员，以便提高他们对防护战略的认识、减轻他们的担心和支持他们自身的防护举措。

对非人类生物群的放射后果

没有收到关于在动植物中观察到直接辐射诱发效应的报告，虽然在紧接事故之后的时期内进行了有限的观察性研究。评价放射后果的可用方法存在着局限，但根据以往的经验 and 环境中存在的放射性核素水平，由于该事故的后果而对生物种群或生态系统产生重大放射后果的可能性不大。

- 在应急阶段，重点必须是保护人。生物群所受的剂量无法控制，个别而言可能会相当大。需要通过改进评价方法和提高对生物种群和生态系统的辐射诱发效应的认识，加强对辐射照射对非人类生物群影响的了解。在发生向环境的大规模放射性核素释放后，需要采取综合观点，以确保农业、林业、渔业和旅游业以及自然资源利用具有可持续性。

事故后恢复

受事故影响区域的厂外治理

事故后恢复的长期目标¹⁶是重建一个可接受的基础，以促进受影响区域社会的全

¹⁴ 联合国，《电离辐射来源、效应和危险，辐射科委会 2013 年报告，第一卷，科学附件 A：2011 年日本东部大地震和海啸后核事故引起的辐射照射水平和影响》，原子辐射效应科学委员会，联合国，纽约（2014 年）。

¹⁵ 国际放射防护委员会，《国际放射防护委关于从日本核电站事故中汲取的初步教训以及国际放射防护委放射防护系统的第 84 号特别工作组的报告》，国际放射防护委，渥太华（2012 年）。

¹⁶ 事故后恢复包括：受事故影响区域的治理；厂内受损设施的稳定和退役准备；这些活动产生的污染物质和放射性废物的管理；以及社区复兴和利益相关者参与。

面运行。需要考虑受事故影响区域的治理¹⁷，以便根据所采用的参考水平减少辐射剂量。在进行撤离人员返回的准备工作时，需要考虑基础设施的恢复及社区的生机和可持续经济活动。

在福岛第一核电站事故前，日本没有关于事故后治理的政策和战略，在该事故后阶段，便产生了制订它们的必要性。日本政府于 2011 年 8 月颁布了治理政策。¹⁸ 该政策向国家政府和地方政府、营运者和公众分派了责任，并为实施协调一致的工作计划建立了必要的制度性安排。

制订并开始实施了一项治理战略。该战略规定，优先治理区域将是居民区，包括建筑物和庭院、农田、道路和基础设施，重点是减少外照射。

来自沉积在地面和其他表面的放射性核素的外部剂量是照射的主要途径。因此，治理战略的重点是开展去污活动，减少优先区域存在的放射性铯的水平，从而减少这种照射的可能性。内照射剂量继续通过食品限制以及通过农业用地治理活动进行控制。

事故发生后，日本当局制订了“参考水平”，供作为总体治理战略的目标剂量水平。该水平与国际导则规定的范围下限相一致。适用低参考水平会造成增加治理活动中产生的受污染物质数量从而增加费用和对有限资源需求的结果。可利用在日本获得的经验就国际安全标准在事故后恢复情况中的适用制订实际导则。

根据 2011 年秋季估计的额外年剂量，确定了两个类别的污染区。国家政府被赋予了制订和实施在福岛第一核电站场址 20 公里半径内的第一区（“特别去污区”）以及事故后第一年中因地面污染所致额外年剂量预计超过 20 毫希的区域的治理计划的责任。赋予市政当局的责任是在额外年剂量预计超过 1 毫希但仍低于 20 毫希的其他区域（“密集污染调查区”）实施治理活动。制订了具体的剂量减少目标，包括实现 1 毫希或更低的额外年剂量的长期目标。

- 一 有必要进行促进事故后恢复的事故前规划，以改进在事故刚结束后情况中在压力下作出的决策。需要预先制订关于事故后恢复的国家战略和措施，以便能够在万一发生核事故的情况下实施有效和适当的全面恢复计划。这些战略和措施需要包括：制订法律和监管框架；制订一般性治理战略和关于残留辐射剂量与污染程度的标准；制订受损核设施的稳定和退役计划；以及制订管理大量污染物质和放射性废物的一般性战略。

¹⁷ “治理”被定义为通过对污染本身（污染源）或对人类照射途径实施行动为减少土地现有污染物所产生的辐射照射而可能采取的任何措施。

¹⁸ 《关于处理与 2011 年 3 月 11 日东北地区太平洋近海地震有关的核电站事故放射性物质环境污染的特别措置法》，第 110 号法令，2011 年。

- 治理战略需要考虑各措施的有效性和可行性以及将在治理过程产生的污染物质数量。
- 作为治理战略的一部分，有必要实施严格的食品检测和控制，以防止或最大程度减少摄入剂量。
- 需要就辐射防护安全标准在事故后恢复情况中的实际适用制订进一步的国际导则。

厂内稳定和退役准备

东电公司和日本相关政府机构共同制订了一个关于受损核电站稳定和退役的全面、高水平战略计划。该计划于 2011 年 12 月首次颁布，此后已作了修订，以反映取得的经验和对受损核电站情况的更好了解，以及未来挑战的严重程度。该战略计划涉及厂内工作的复杂性，包括：确保安全的方案；实现退役的措施；促进工作的系统和环境；以及研究和发展的要求。

在编写本报告时，安全功能已重新建立，结构、系统和部件已到位，以可靠地维持稳定状况。然而，持续需要控制地下水进入受损和被污染的反应堆厂房。正在对由此产生的污染水进行处理，以尽可能移除 800 多个储箱中贮存的放射性核素。需要更多可持续的解决方案，同时考虑所有选项，包括可能恢复向海洋受控排放。在作出最终决策时将需要使有关利益相关者参与磋商过程和考虑社会经济状况，以及实施全面的监测计划。

已制订乏燃料和燃料碎片的管理计划，并开始从乏燃料池移除燃料。¹⁹ 开发了未来移除燃料碎片活动的概念模型，其中考虑了所需要的许多预备步骤，包括对碎片的构形和组成的目视确认。受损反应堆中的高辐射剂量水平意味着在编写本报告时还无法作此确认。

日本当局估计，完成退役活动的时间范围很可能在 30 至 40 年内。关于电站和场址的最终状况的决定将是进一步分析和讨论的主题。

- 事故发生后，维持长期稳定状况和对受事故破坏设施实施退役的战略对厂内恢复至关重要。这种计划需要具有灵活性，可根据不断变化的状况和新情况随时进行调整。
- 回取破损燃料及表征和移除燃料碎片需要制订对事故具有针对性的解决方案，并且可能需要制订专门方法和开发专门工具。

¹⁹ 2014 年 12 月完成了从 4 号机组乏燃料池移除燃料的工作。

污染物质和放射性废物的管理

受损核电站的稳定和厂内去污以及周边地区的治理工作导致产生了大量的污染物质和放射性废物。继各种恢复活动之后，厂内产生了大量的受污染固体和液体材料以及放射性废物。²⁰ 由于具有不同的物理学、化学和放射学特性，这种物质的管理十分复杂，并需要开展大量的工作。

在福岛第一核电站事故后，在建立用于贮存厂外治理活动产生的大量污染物质的场所方面一直困难重重。在编写本报告时，已在当地社区建立了数百个临时贮存设施，并且正在继续努力建立一个临时贮存设施。

- 关于事故后恢复的国家战略和措施需要包括在关于排放、贮存和处置的一般性安全评价的支持下，制订管理受污染的液体和固体材料和放射性废物的一般性战略。

社区复兴和利益相关者参与

在应急阶段和事故后恢复阶段实施的核事故和辐射防护措施对受影响民众的生活方式产生了重要后果。撤离和避迁措施及食品限制给受影响人们造成了艰辛。在福岛县实施的复兴和重建项目是在认识到事故的社会经济后果的情况下制订的。这些项目处理了基础设施重建、社区复兴以及支助和赔偿等问题。

与公众就恢复活动进行沟通对于建立信任至关重要。要进行有效的沟通，专家们就必须了解受影响民众的信息需求，并通过相关的手段来提供易于理解的信息。在事故后加强了沟通，受影响民众越来越多地参与决策和治理措施。

- 必须认识到任何核事故和后续防护行动的社会经济后果，并须制订处理基础设施重建、社区复兴和赔偿等问题的复兴和重建项目。
- 利益相关者的支持对事故后恢复的所有方面都至关重要。特别是，受影响民众参与决策过程对恢复工作取得成功、获得接受和具有有效性以及对社区复兴必不可少。一项有效的恢复计划需要受影响民众的信任和参与。必须通过对话过程以及提供一致、明确和及时的信息和对受影响民众给予支持来建立对实施恢复措施的信心。

²⁰ 污染物质和放射性废物的区别取决于物质的放射性核素和放射性浓度。

福岛第一核电站事故

简 要 报 告

1. 导 言

2011年3月11日发生了日本东部大地震。这次地震是太平洋板块在北美板块下方向前挤压时在交界面发生的能量突然释放造成的。一条估计约500公里长、200公里宽的地壳带发生断裂，从而引发了9.0级的大地震和袭击了日本沿海的广大区域包括东北海岸的海啸，在东北海岸，海啸波有几次则高达10多米。地震和海啸在日本造成了惨重生命损失和广泛破坏；有1.5万多人死亡，6000多人受伤，在撰写本报告时²¹仍有约2500人被报告为失踪[1]。建筑物和基础设施遭到严重损毁，特别是日本东北海岸沿线的建筑物和基础设施。

在东京电力公司（东电公司）运行的福岛第一核电站，地震造成了该场址供电线路的损坏，海啸给厂内的运行和安全基础设施造成了重大破坏。这种综合效应导致厂外和厂内电力丧失。这使得该电站三个在运反应堆机组²²以及乏燃料贮存水池丧失了冷却功能。海岸沿线的四座其他核电站²³也受到地震和海啸不同程度的影响。但这些核电站的所有在运反应堆机组都被安全关闭。

尽管福岛第一核电站操纵员努力维持控制，但1号至3号机组仍发生了堆芯过热、核燃料熔化和三个安全壳的破裂。氢从反应堆压力容器释放出来，导致1号、3号和4号机组的反应堆厂房内发生爆炸，使结构和设备受损，人员受伤。放射性核素从该电站释放到大气中，然后沉积到陆地上和海洋中。也发生了向海洋的直接释放。

在该场址20公里半径内和其他指定区域的居民被撤离，在20公里至30公里半径内的居民则被指令进行隐蔽，后被建议自愿撤离。对食物的分发和消费及饮用水的消费施加了限制。在撰写本部分时，许多人仍生活在他们所撤离的区域之外。

在福岛第一核电站反应堆工况稳定后²⁴，开始了反应堆最终退役的准备工作。恢复受事故影响区域包括治理和复兴社区和基础设施的努力于2011年开始。

²¹ 2015年3月。在一些情况下，获得了直到2015年6月的资料，并在可能的情况下纳入了这些资料。

²² 在福岛第一核电站的六台机组中，1号、2号和3号机组在事故发生时正在运行；4号、5号和6号机组正处于计划停堆状态。

²³ 东通核电站、女川核电站、福岛第二核电站和东海第二核电站。

²⁴ 2011年12月16日，日本政府-东电公司综合响应办公室宣布，1号至3号机组实现了“冷停堆状态”。“冷停堆状态”这一术语系日本政府当时具体针对福岛第一核电站而确定，其定义不同于原子能机构和其他组织所用的术语。

1.1. 福岛第一核电站事故报告

总干事在 2012 年 9 月原子能机构大会上宣布，原子能机构将编写一份关于福岛第一核电站事故的报告。他后来表示，该报告将是“权威性、符合事实和均衡的评定，并涉及事故的原因和后果及所汲取的教训” [2]。

关于福岛第一核电站事故的报告是广泛国际协作努力的结果，由来自 42 个成员国（拥有或没有核电计划的成员国）的约 180 名专家组成的五个工作组和若干国际机构参与了这项努力。这确保了对经验和知识的广泛代表性。一个国际技术咨询组就技术和科学问题提供了咨询。设立了一个由原子能机构高管层人员组成的核心小组，以便指导和促进本报告的协调和审查工作。还建立了图 1.1 所示其他内部和外部审查机制。

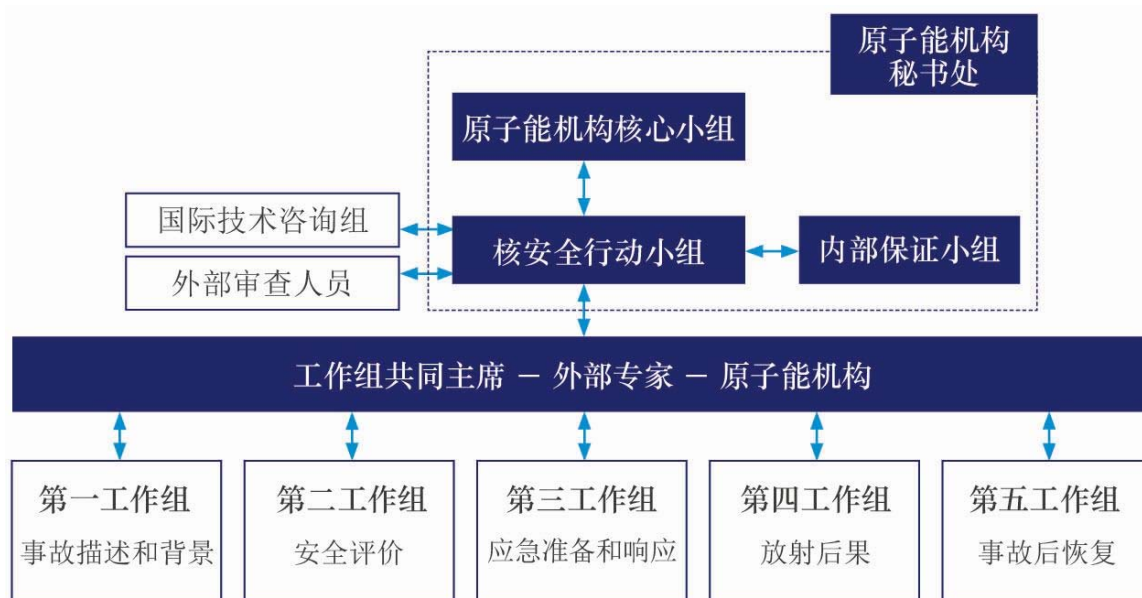


图 1.1. 原子能机构为编写《福岛第一核电站事故的报告》建立的组织结构。

总干事的报告包括一份《正文摘要》和一份《简要报告》。它借鉴了由国际专家编写的五个内容详尽的技术卷和利用了许多参与专家和国际机构的贡献。本报告基于对截至 2015 年 3 月从大量来源获得的数据和资料的评价，包括基于在实施原子能机构“核安全行动计划”（行动计划）²⁵ 过程中开展工作的结果，对事故及其原因、演变和后果作了描述，并突出强调了主要意见和教训。日本政府和日本其他组织提供了大量数据。

²⁵ 原子能机构 2011 年第五十五届大会一致核可的原子能机构“行动计划”确定了一项加强全球核安全框架的工作计划。该行动计划包括与以下方面有关的 12 项主要行动：安全评价；原子能机构同行评审；应急准备和响应；国家监管机构；营运组织；原子能机构安全标准；国际法律框架；计划启动核电计划的成员国；能力建设；保护人类和环境免于电离辐射；通讯和信息传播；以及研究与发展。关于对“行动计划”的详细讨论，参见第 6.1 节。

五个技术卷面向包括原子能机构成员国相关部门、国际组织、核监管机构、核电厂营运组织、核设施设计者和其他核电相关问题专家的技术受众。

总干事的报告包括以下六个部分：

- 第 1 部分：导言。
- 第 2 部分：事故及其原因，包括对事件序列的描述和关于极端自然事件如何导致严重核事故的评价。
- 第 3 部分：应急准备和响应，包括保护应急工作人员和公众的安排，以及这些安排在事故期间和事故刚刚结束时的实施。
- 第 4 部分：事故的放射后果，包括工作人员和公众的辐射照射，以及健康效应和环境影响。
- 第 5 部分：事故后恢复活动，包括该电站的退役、厂外受影响区域的治理战略、废物管理和复兴战略。
- 第 6 部分：原子能机构和《核安全公约》缔约方为响应事故而开展的活动的概述。

根据事故具体特点得出的主要意见和教训载于第 2 部分至第 5 部分。图 1.2 示出了总干事的报告内容与各技术卷内容之间的关系。

| | | | | | | |
|--------------------------------|----------------------|------------------|------------------------|--------------------------------|--------------------------|-------|
| 第 1 部分: 引言 | 福岛第一核电站 事故报告 | | | | | |
| 第 2 部分: 事故及其 评价 | 事故描述 | 核安全 考虑因素 | 技术卷 1 和 技术卷 2 | | | |
| 第 3 部分: 应急准备 和响应 | 日本对事故的 初期响应 | 保护应急 工作人员 | 保护公众 | 从应急阶段向 恢复阶段的 过渡和 响应分析 | 在国际应急准备 和响应框架内 的响应 | 技术卷 3 |
| 第 4 部分: 放射后果 | 环境中的 放射性 | 保护人员免于 辐射照射 | 辐射照射 | 健康效应 | 对非人类生物群 的放射后果 | 技术卷 4 |
| 第 5 部分: 事故后恢复 | 受事故影响 区域的 厂外治理 | 厂内稳定和 退役准备 | 受污染材料和 放射性废物 的管理 | 社区复兴 和利益 相关者参与 | 技术卷 5 | |
| 第 6 部分: 原子能机构 对事故的 响应 | 原子能机构 的活动 | 《核安全公约》 缔约方会议 | | 技术卷 1 和 技术卷 3 | | |

图 1.2. 《简要报告》的结构及其与各技术卷内容的关系。

2. 事故及其评价

本部分先简要描述福岛第一核电站事故，然后对被认为是促成事故起因和后果的因素进行评价。

2.1 节按时间顺序描述主要事件，包括地震和海啸及后续事件的影响。

2.2 节评价事故的起因。首先评估福岛第一核电站对外部危害的脆弱性，而后论述其设计、事故演进、操纵员维护基本安全功能的努力和他们所采取的行动。本部分还审议了日本监管框架的有效性，以及人为和组织考虑因素对核安全的影响。

2.1. 事故描述

以下描述主要基于日本政府提供给原子能机构的资料[3、4]；日本政府[5、6]、日本国会[7]和东电公司[8]设立的调查委员会的报告，包括东电公司[9、10]、监管机构[11]和第 6 部分所列原子能机构工作组的更新和补充资料。获取资料的其他来源则单独例示。

对事件的描述按时间顺序介绍，其中一些事件并行发生或对在厂内其他场所采取的行动产生了影响。

2.1.1. 始发事件和响应

地震和厂外电源丧失

2011 年 3 月 11 日日本标准时间 14 时 46 分、协调世界时²⁶ 5 时 46 分在日本东海岸发生了日本东部大地震。这次地震是太平洋构造板块在北美构造板块下方向前挤压时在交界面发生的能量突然释放造成的（图 2.1）。震级 9.0 级[12]的主震持续了两分多钟，伴随有若干强脉冲和余震。这起事件属于有记录的最大地震之列，其中大多数也发生在沿太平洋构造板块的区域：1960 年和 2010 年的智利地震，震级分别为 9.5 级和 8.8 级；阿拉斯加地震（1964 年）和苏门答腊地震（2004 年），震级均为 9.2 级。

²⁶ 协调世界时比日本标准时晚九个小时。除非标明，本报告对所有时间皆使用日本标准时。

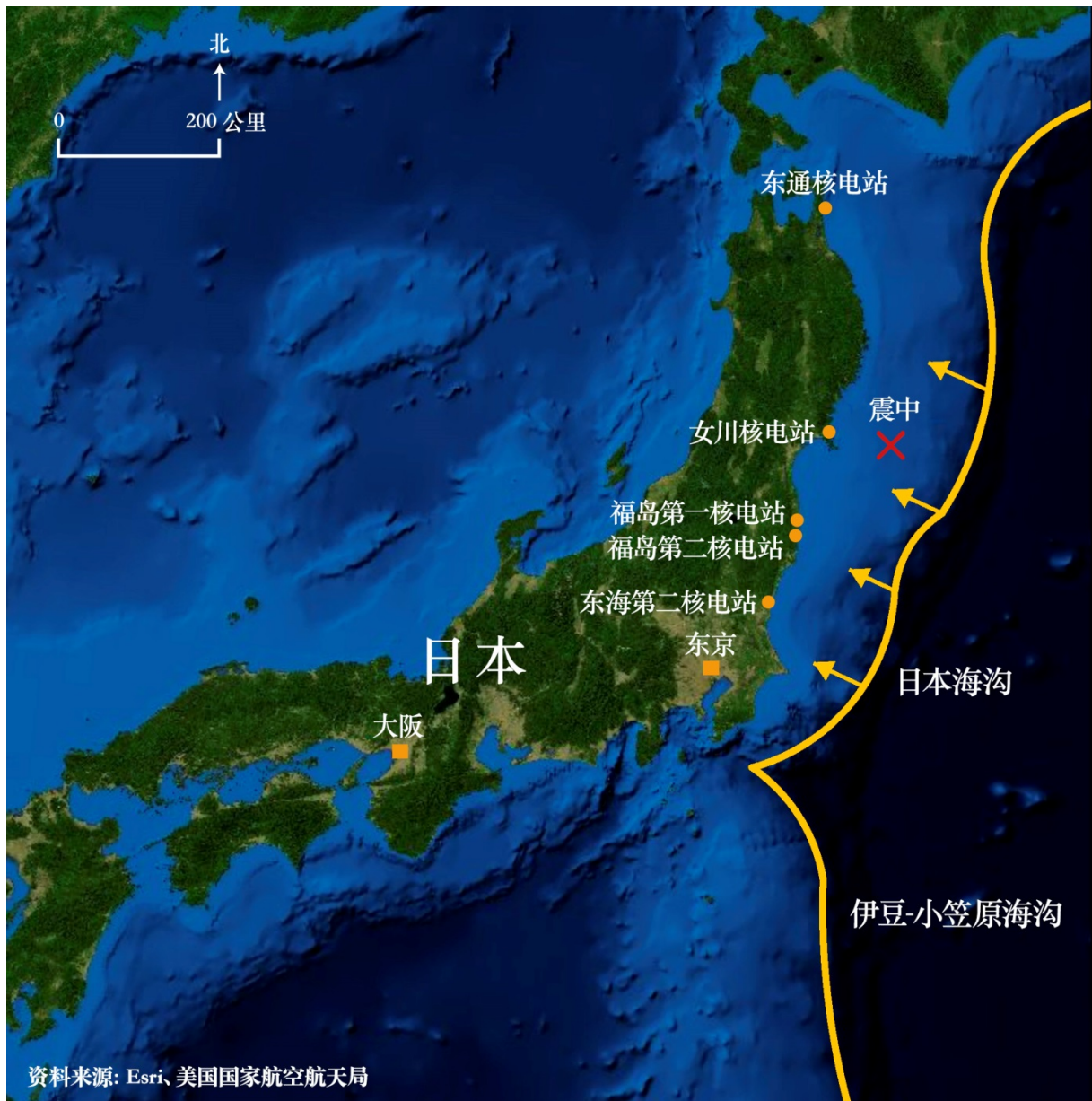


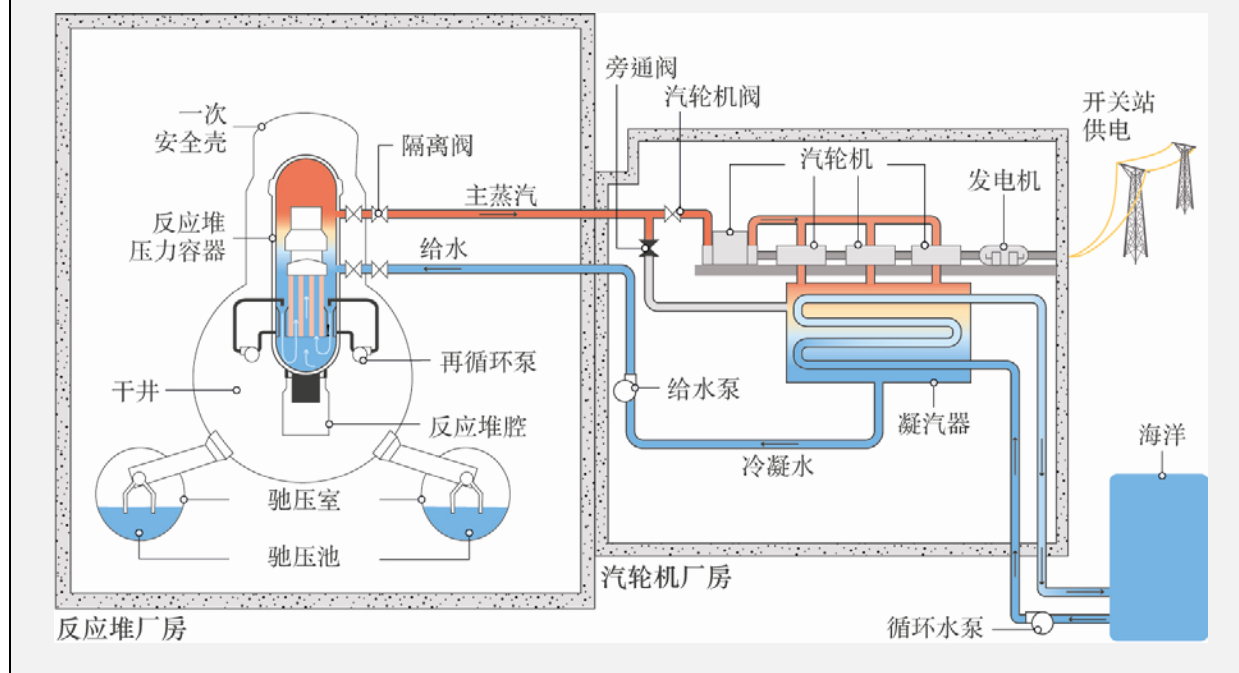
图 2.1. 日本东部大地震的震中和附近的核电站。

在地震发生时，福岛第一核电站六座沸水堆（资料框 2.1）[13]有三座正在满功率运行，另外三座已停堆进行换料和维护。当电站的传感器探测到地面运动并按设计触发反应堆保护系统时，正在运行的 1 号至 3 号机组的反应堆被自动停堆。这一自动动作实现了反应性控制。

在停堆的情况下，反应堆堆芯仍继续产生热（称为衰变热）。为了防止核燃料过热，不得不由主要通过电力运行或控制的冷却系统排出这种热。地震对厂内室外配电站、厂外分站设备和为电站供应厂外、交流电的电力线造成破坏，导致丧失所有厂外电源。厂内备用发电设施即应急柴油发电机被自动启动，以恢复所有六台机组的交流电。这些应急柴油发电机的设计目的就是应对这类厂外电源丧失情况。

资料框 2.1. 沸水堆

如下图所示，沸水堆使用闭合、直接蒸汽循环回路。工质是水，既用作冷却剂排出热，又用作慢化剂控制反应性。冷却剂水于约 7 兆帕压力下在反应堆堆芯沸腾，所产生的蒸汽被用于驱动汽轮机发电。经过汽轮机后，通过充满从热阱如海洋中汲取冷水的凝汽器管进行冷却，蒸汽又被冷凝为水。冷凝形成的水随后被泵回反应堆，用作给水。



1 号至 3 号机组由于电力中断而自动与其汽轮机隔离，导致反应堆因衰变热所致温度和压力升高。这些反应堆隔离后的冷却通过提供以下设计和运行完成（资料框 2.2）：

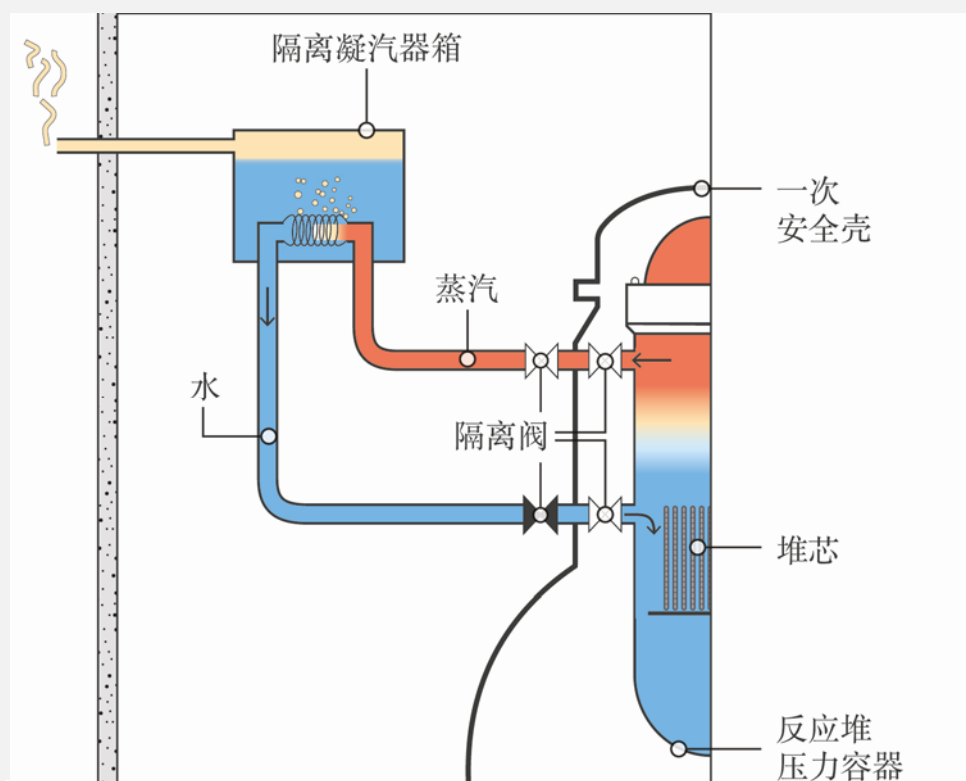
- 在 1 号机组，随着反应堆压力升高，隔离凝汽器系统两个回路自动启动，并继续冷却反应堆。两个凝汽器回路的运行降低了反应堆的压力和温度如此之快，以致于操纵员根据有关程序手动予以停止，以防止反应堆压力容器引起热应力。然后，操纵员仅使用其中一个回路将冷却率²⁷控制在程序规定的范围。
- 在 2 号和 3 号机组，反应堆压力的升高自动启动了安全卸压阀，卸压阀的设计目的就是通过将蒸汽从反应堆压力容器释放到一次安全壳的驰压池区而保护反应堆不过量增压。这导致了反应堆水位降低。操纵员按照程序手动启动了反应堆堆芯隔离冷却系统。

²⁷ 在沸水堆中，冷却率受到监测并通过降低反应堆压力来控制，而降低反应堆压力相当于降低反应堆温度。

资料框 2.2. 在反应堆与汽轮机隔离时对堆芯进行冷却的系统

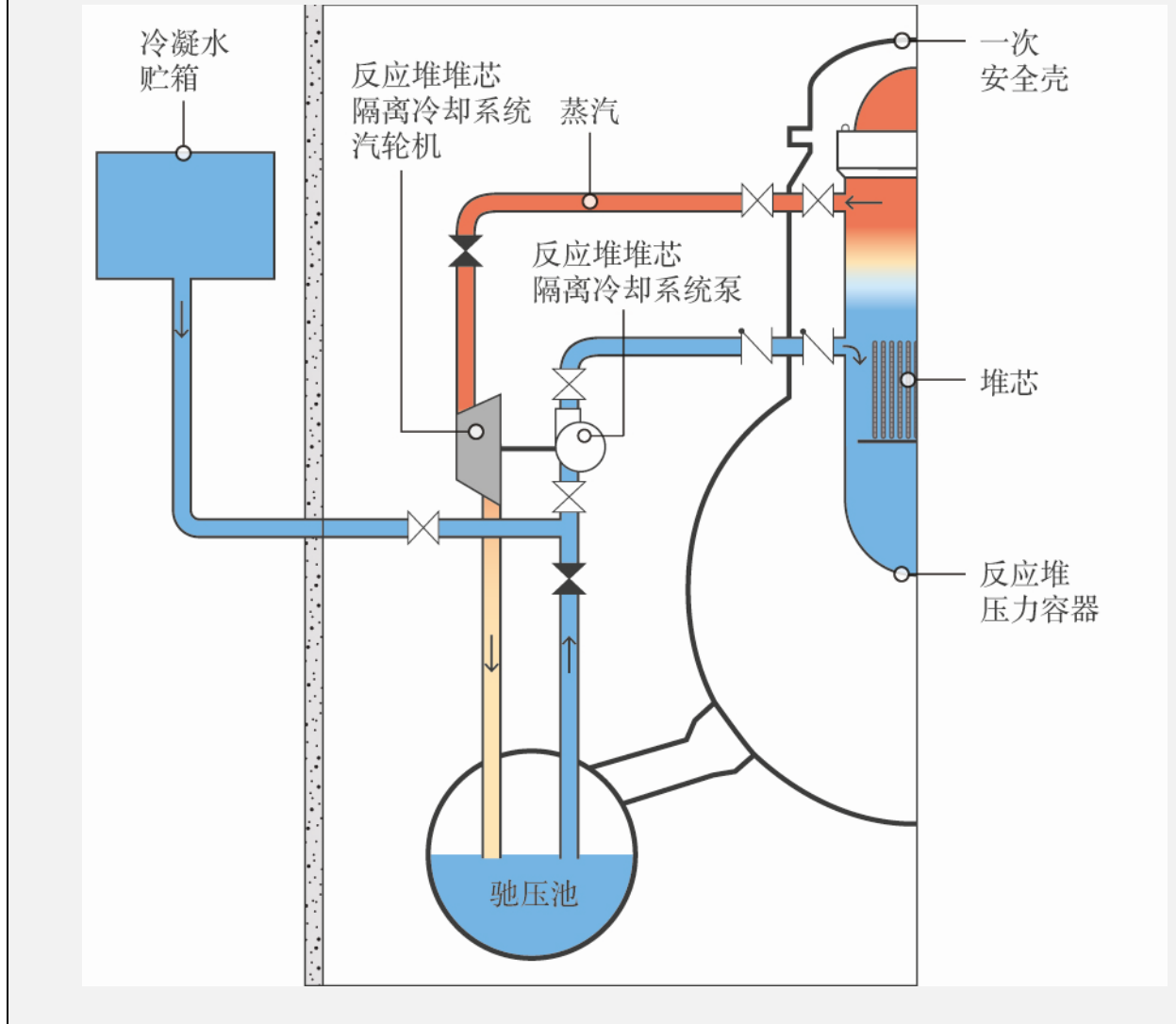
在反应堆高压下，沸水堆的正常停堆冷却是将蒸汽旁通汽轮机从反应堆导向主凝汽器完成的（见资料框 2.1）。但当反应堆被隔离时，这一路径行不通，而由为反应堆停堆后存在的高压工况下被隔离的反应堆设计的系统提供堆芯冷却。在福岛第一核电站的设计中，这些系统是：1 号机组的隔离凝汽器系统（早期设计）和 2 号至 6 号机组的反应堆堆芯隔离冷却系统。

隔离凝汽器。在 1 号机组设计中，有两个单独和冗余的隔离凝汽器回路。在这些闭合回路中，隔离凝汽器的一次侧接受反应堆中产生的蒸汽，并通过内部热交换管冷却将蒸汽冷凝。热交换管浸没在位于一次安全壳外的较冷水罐（隔离凝汽器池）内。冷凝蒸汽随后作为冷水通过重力作用被回送到反应堆（见下图）。不与放射性一次侧水相混的隔离凝汽器池中的二次侧水沸腾，蒸发出的蒸汽被排入起到热阱作用的大气中。在需要从专用水源补给之前，隔离凝汽器二次侧水容量（两列合计）足够用于八个小时冷却。



反应堆堆芯隔离冷却。在 2 号至 6 号机组的设计中，存在需要一个来源为反应堆系统注水的开式循环冷却系统。在堆芯隔离冷却系统中，来自反应堆的蒸汽驱动一个小汽轮机，该汽轮机继而运转一台泵，将水注入高压下的反应堆。运转汽轮机的蒸汽被排放和累积在一次安壳的驰压池区，该驰压池起到吸收废热的热阱作用。反应堆失去的水通过从凝结水贮存箱采取淡水进行补给（见下图）。当贮存箱无水或驰压池水满时，可以使用驰压池中积累的水，这使该系统基本上成为一个闭合回路循环。反应堆堆芯隔离冷却按设计可运行至少四个小时。

资料框 2.2. 在反应堆与汽轮机隔离时对堆芯进行冷却的系统（续）



来自 4 号至 6 号机组的核燃料的衰变热也必须排出：

- 在 4 号机组，用于乏燃料池水²⁸冷却和再充水的设备由于厂外电源丧失而停止工作。4 号机组乏燃料池载有 1300 多个乏燃料组件，要排出的衰变热量在各机组所有乏燃料池中最大。
- 在 5 号机组，地震时正在为压力试验目的用一台泵保持升高的反应堆压力在泵因厂外电源丧失而停转时起初下降，后因衰变热，该压力开始上升，但与 2 号和 3 号机组情况不同，其仍然远低于为启动安全卸压阀所设定的水平。

²⁸ 贮存乏燃料组件和新燃料组件的乏燃料池被充入了水，同时提供了辐射屏蔽和排出了位于那里的核燃料产生的热。但不进行冷却，该池水会加热并最终开始汽化。如果这种情况持续下去，而不进行再充水，在水面下降并暴露出燃料时，燃料冷却将停止。过热和照射会造成燃料破损和放射性核素释放。

- 一 在 6 号机组，反应堆接近大气压力和室温，燃料保持在堆芯中，而且衰变热很低。

在厂外电源丧失时失去冷却和再充水能力的所有机组的乏燃料池和共用乏燃料池²⁹中，池水的温度因衰变热而开始上升。

为了应对地震和厂外电源丧失情况，操纵员在六台机组的所有三个主控室启动了“基于事件”的异常运行程序。³⁰ 在位于隔震建筑物内的厂内应急响应中心启动了地震应急响应小组。³¹ 现场主管以东电公司现场应急响应中心负责人的身份负责指挥现场响应以及与厂内和厂外各组织进行协调。每个主控室的三名轮班主管负责按照现场主管的命令在各自机组指挥有关行动。

福岛第一核电站各机组按设计者的意图和操作规程所规定的那样（因地震受到限制或推迟的某些操纵员行动除外），对地震和同时发生的厂外电源丧失的始发事件做出了响应（图 2.2）。

²⁹ 作为一个机组间共享辅助设施，该共用乏燃料池位于 4 号机组附近的一个单独建筑物中，贮存有 6000 多个乏燃料组件，所有这些乏燃料组件均需要排出衰变热。

³⁰ 每一对机组共享一个共用主控室，即 1 号和 2 号机组、3 号和 4 号机组、5 号和 6 号机组。

³¹ “隔震建筑物”系根据从 2007 年新泻县中越冲地震对柏崎-刈羽核电站的影响中获得的经验建造的，于 2010 年 7 月投入运行。该建筑物的设计目的是抵御地震和配有备用电源。为进行放射性防护提供了过滤通风和屏蔽。

海啸和全厂断电

除了引起强烈的地面运动，地震还位移了巨大数量的水体，形成系列大海啸波 [14]。当这一波接一波的海啸波到达海岸时，对广大的区域造成了破坏性影响（图 2.3）。

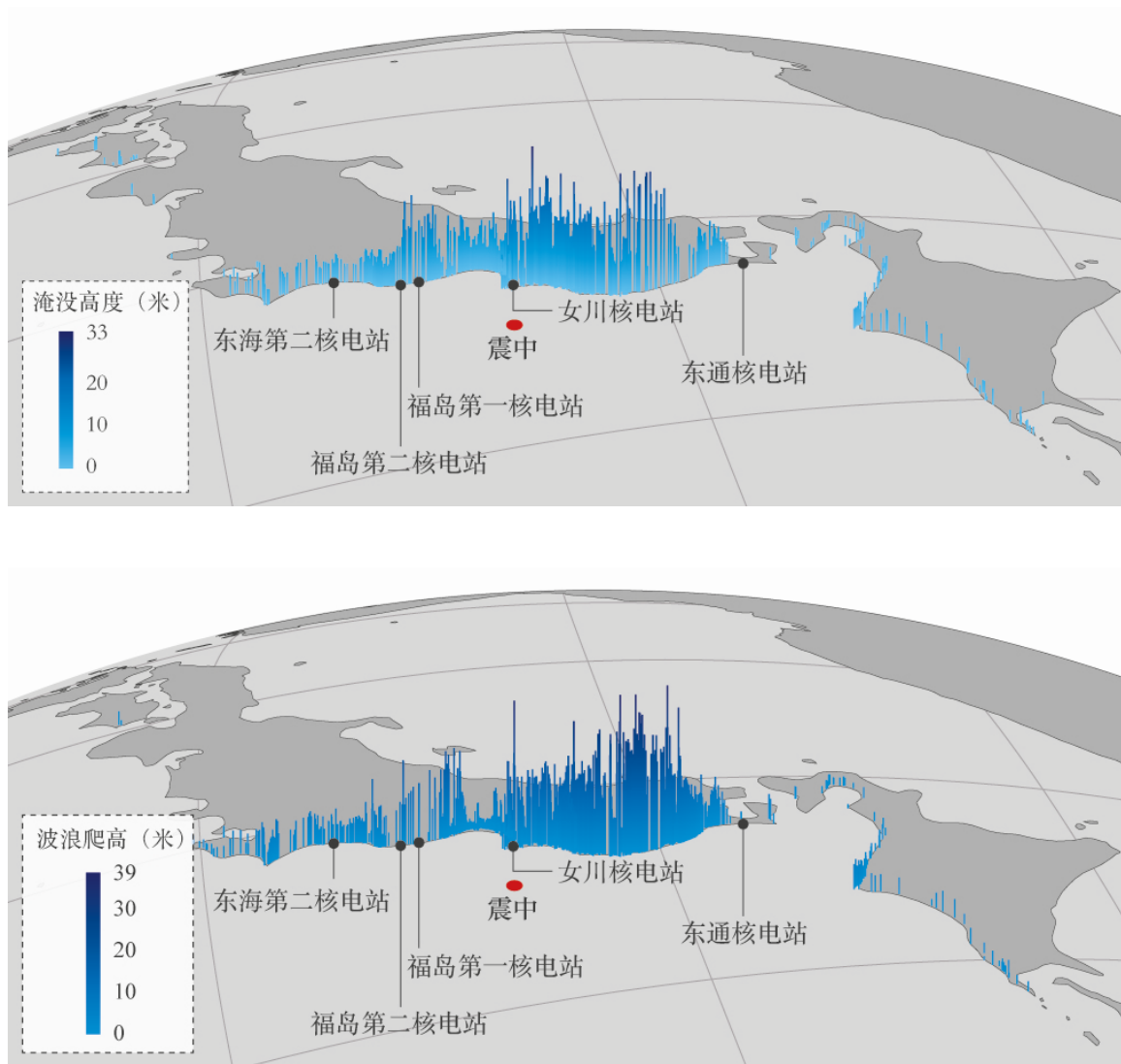


图 2.3. 基于海岸地形地貌、海啸波影响的变化、泛滥（上图）和溯升（下图）³² [15]。

海啸波在地震后约 40 分钟开始到达福岛第一核电站。该厂址受到屏障海啸的防波堤保护，没有受到溯升高度 4—5 米的第一波浪影响，防波堤的设计目的是防止最大波高 5.5 米的海啸[16]。但在第一波浪之后约 10 分钟，第二波溯升高度 14—15 米的最大波浪淹没防波堤，涌入厂址。海水吞没了位于防波堤的所有结构和设备，以及较

³² “溯升高度”系指最远内陆点的波浪高度，“泛滥高度”系指与海平面相比的波浪波高。

高处³³的主建筑物（包括反应堆、汽轮机和服务厂房）（图 2.4），造成以下事件序列：

- 波浪淹没和破坏了位于海岸线海水取水场所无庇护的海水泵和电机，这意味着包括水冷应急柴油发电机³⁴在内的电站基本系统和部件不可能得到冷却以保证其持续运行。
- 波浪淹没和破坏了位于 1 号至 4 号机组和 5 号至 6 号机组之间海岸附近的干式容器贮存建筑物。如后来确认，对容器和其中贮存的燃料没有造成显著影响[17]。
- 水涌入并淹没了建筑物，包括所有反应堆和汽轮机厂房、共用乏燃料贮存建筑物和柴油发电机厂房；破坏了这些建筑物及内部地面层和下面各层的电器和机械设备。受到损坏的设备包括应急柴油发电机或其相关电源连接，由此导致应急交流电源丧失。6 号机组气冷应急柴油发电机中只有一台未受水淹的影响³⁵，而且仍在运行继续为 6 号机组安全系统供应应急交流电，使得能够对该反应堆进行冷却。

由于这些事件的结果，1 号至 5 号机组的所有交流电源丧失，发生了所谓的全厂断电。

由于 1 号至 5 号机组的全厂断电，针对“所有交流电源丧失”[18]的应急操作程序被启动。基于“一些安全系统不能使用”的工况，按照与《原子力灾害对策特别措置法》（以下称《原子力灾害法》）[19]有关条例中的定义，作为营运组织东电公司厂内应急响应中心负责人的现场主管宣布是一起“特定事件”。因此，根据《原子力灾害法》的要求通报了相关的厂外机构。

与同龄的其他电站相似，基于反应堆机组中直流电蓄电池的容量³⁶，福岛第一核电站各机组按设计能够承受八个小时的全厂断电。

³³ 行政办公大楼和载有厂内应急响应中心的“隔震建筑物”位于海拔约 35 米的峭壁上（这是建造期间在开挖厂区安置机组之前最初的厂址地形标高）。

³⁴ 每台机组有一对应急柴油发电机，而 6 号机组另有一台额外的发电机。在这 13 台应急柴油发电机中，2 号、4 号和 6 号机组各有一台是气冷的。由于它们是气冷发电机，这些发电机的运行没有受到海水泵受损造成的冷却水丧失的影响。

³⁵ 2 号和 4 号机组位于共用乏燃料建筑物地面层的气冷应急柴油发电机以及 6 号机组位于较高海拔处一个单独柴油发电机厂房的气冷应急柴油发电机似乎没有受到洪水影响。但 2 号和 4 号机组位于共用乏燃料建筑物地下室的气冷应急柴油发电机的部件（如开关设备、动力中心、面板等）遭到海水破坏。

³⁶ 核电厂一般配备厂内直流电和额外后备直流电源（即燃气轮发电机或柴油机），以承受 4 至 72 小时不等的有限时间的全厂断电。应对时间的确定主要基于核电厂恢复交流电源所用的时间和可利用措施的能力。在这段时间，采用了直流电蓄电池、直流电/交流电逆变器和其他次级后备交流电源（如汽轮机或柴油发电机）等设备。

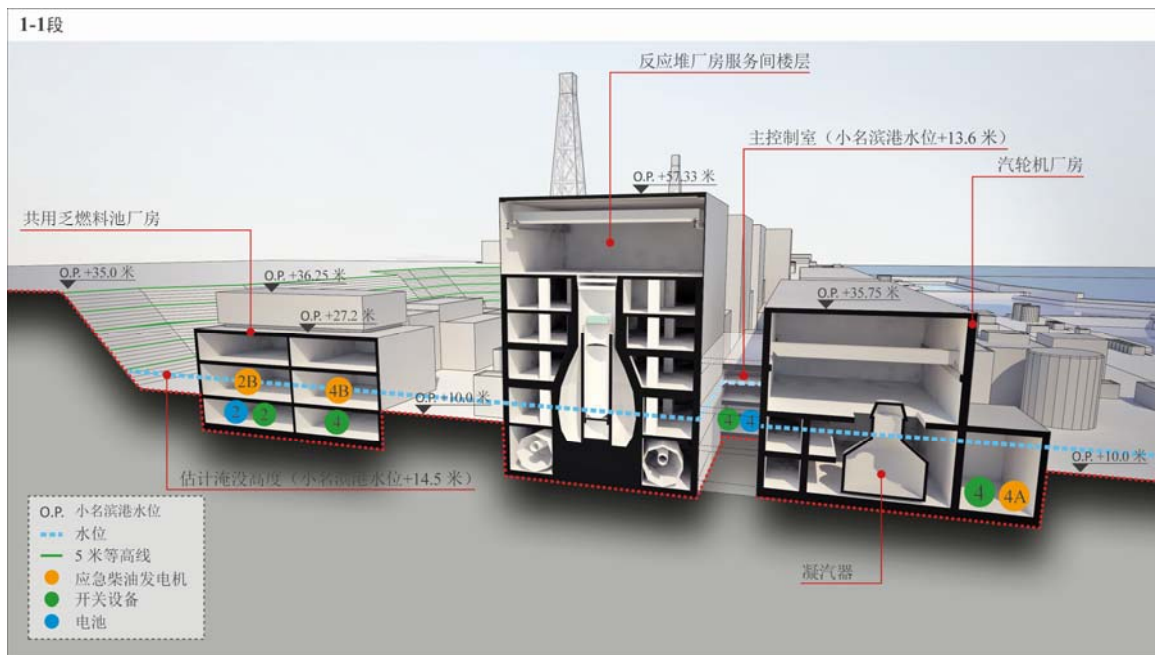
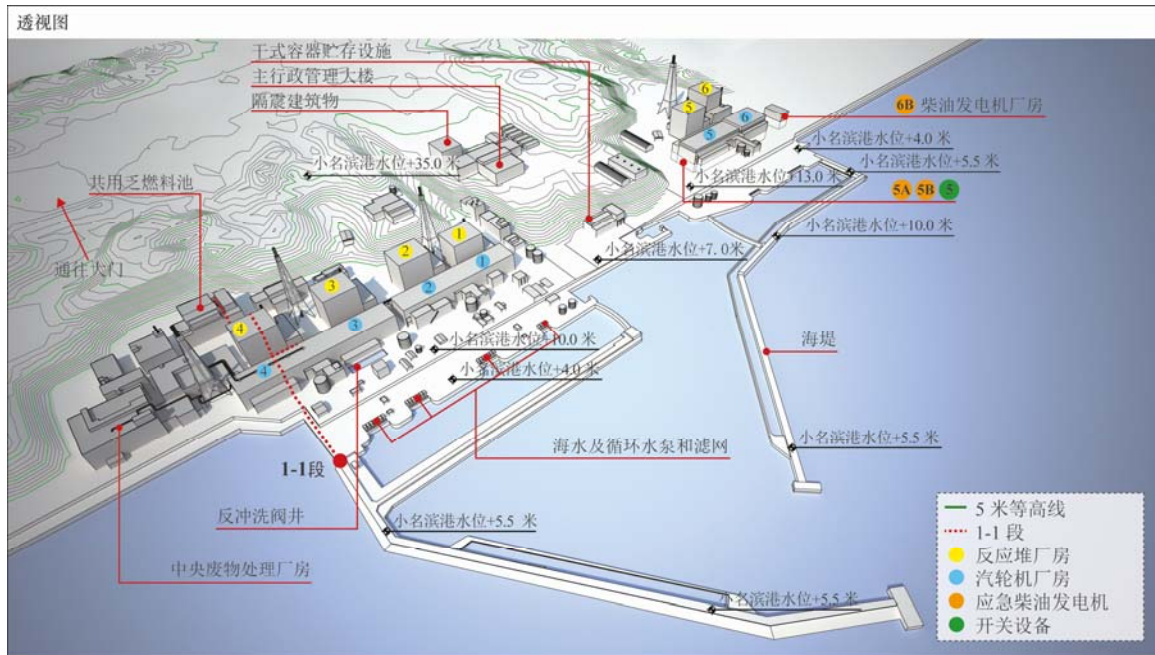


图 2.4. 福岛第一核电站各结构和部件的海拔和场所[20]。

1 号、2 号和 4 号机组直流电源丧失

福岛第一核电站所有机组都配备有作为应急供电的厂内直流电源，但水淹也影响到 1 号、2 号和 4 号机组的这种设备，淹没了直流电蓄电池、电源板或电源连接。因此，1 号、2 号和 4 号机组在水淹的头 10—15 分钟期间逐渐丧失了直流电源，这使得应对全厂断电很困难。

由于丧失所有交流电和直流电电源，1 号和 2 号机组不再可能监测反应堆压力和反应堆水位等基本的电站参数，或用于堆芯冷却的关键系统和部件的状况。如先前提到

的，厂外电源丧失后，所有机组乏燃料池的排热能力也随即丧失。1号、2号和4号机组另外丧失直流电源意味着操纵员不再可能监测这些机组乏燃料池中的水温 and 水位。

由于缺乏应对所有交流和直流电源丧失的程序，1号、2号和4号机组的操纵员没有关于在这些工况下如何处理全厂断电的特定程序。操纵员和应急响应中心的工作人员开始审查可用方案以及确定恢复电力的可能途径，从而重新获得监测及控制电站的能力。

3号、5号和6号机组的响应

3号、5号和6号机组维持了电源，因而操纵员能够观察电站状况，因为主控室的指示和控制正在工作。这使操纵员能够继续其“基于征兆”的应急运行程序对以下事件作出响应：

- 在3号机组，安全卸压阀自动开启，以保护反应堆压力容器不过量增压，操纵员手动重启堆芯隔离冷却系统，利用可用直流电源控制和监测反应堆注水。他们还关闭了其他非关键设备，以最大程度地利用直流电蓄电池，目的是延长处理全厂断电的时间。
- 5号机组的直流电源也可使用。该反应堆没有产生蒸汽，因此，通过高温冷却系统进行余热排出是不可能的。尝试采用对反应堆压力容器减压以便能够通过低压系统进行冷却剂注入的替代方案没有成功，而加压和充水的反应堆压力容器的温度和压力继续升高。
- 6号机组没有经历全厂断电，因为可以从一台运行的应急柴油发电机获得交流电源。那里的工作重点是维护基本的安全功能，以应对厂外电源丧失。该反应堆处于大气压力下，这使得利用低压系统注入冷却水成为可能；但是，这些系统的必要部件中有一些因水淹受到损坏，需要进行修复。

2.1.2. 事故演进

1号和2号机组核应急

由于1号和2号机组丧失全部电力，没有任何指示可供操纵员用于确定安全系统是否正在正常工作，或究竟是否在工作，以维持基本安全功能³⁷。由于无法确定反应堆中的水位和冷却系统的运行状态，电站操纵员宣布堆芯冷却基本安全功能丧失。因此，现场应急响应中心向厂外组织、东电公司总部和相关政府部门报告，由于“堆芯应急冷却系统无注水能力”，根据条例的规定[21]，1号和2号机组出现了核应急状况。

³⁷ 反应性控制的基本安全功能在全厂断电前得到了确认，因为有指征表明在控制棒插入后便停止了裂变反应。

制订严重事故管理战略

遵循既定的严重事故管理导则，现场应急响应中心的工作人员开始行动，并且 1 号和 2 号机组共同主控室的操纵员启动了严重事故操作程序。由于堆芯冷却似乎受到了损害，事故管理战略便侧重于向反应堆注水，以防止或减轻对核燃料的潜在损坏。确定了两种反应堆注水方案：

- 使用即使在高压下也可以直接向反应堆注水的系统，这需要恢复交流电。
- 使用替代的设备，如可以在低压下注水的移动消防车和固定式柴油驱动消防泵，这需要对反应堆减压和调整消防线路以便向堆芯注水。³⁸

现场应急响应中心采用的堆芯冷却战略应该是，除了连接临时电源外，还应使用固定式柴油驱动消防泵和消防车通过消防系统向堆芯注水。

该事故应对战略在 1 号和 2 号机组被赋予了最高优先等级，而且在稍作变通后适用于所有其它机组。例如，在 5 号机组，事故管理行动应该是利用与 6 号机组正在运行的应急柴油发电机的可用互连线³⁹来恢复交流电源。

1 号和 2 号机组堆芯冷却状况

就在海啸来袭前，操纵员已经按照既定操作程序停止了 1 号机组隔离凝汽器，以控制反应堆的冷却速率。这是通过关闭（如资料框 2.2 所示，位于一次安全壳外部并通过直流电操作的）阀门来实现的。在指示消失后约 2.5 个小时，即 3 月 11 日 18 时 18 分，发现这些阀门的一些状态灯开始运行，因此确认控制阀已被关闭。操纵员试图通过开启这些阀门来启动隔离凝汽器，但隔离凝汽器并未起作用，这表明一次安全壳内部的交流供电隔离阀已经关闭。⁴⁰ 因此，就在操纵员在海啸发生之前停止隔离凝汽器时，1 号机组堆芯冷却的基本安全功能已经丧失，1 号机组堆芯自那时起一直在升温。

此外，20 时 07 分（在反应堆厂房）进行的局部测量表明，反应堆仍接近 70 巴（7 兆帕）的运行压力，这种情况阻止了将只能在 8 巴（0.8 兆帕）以下进行的替代方法注水。

³⁸ 消防系统的设计主要是为了灭火和防止安全壳浸水，而不是用于向反应堆注水。

³⁹ 作为一种事故管理强化设计，大约在 10 年前就在福岛第一核电站安装了跨联线。5 号机组只能共享 6 号机组运行中的应急电力，因为只在成对的机组即 1 号和 2 号、3 号和 4 号以及 5 号和 6 号机组之间安装了这种互联。

⁴⁰ 由于将决定隔离阀状况的每类电源丧失的时间和先后顺序不确定，操纵员不清楚这些阀门的位置。在交流电丧失时，所有隔离凝汽器阀门将保持自己的位置，但如果控制电源（即直流电源）丧失，交流电源操作的阀门按照设计会关闭。

在现场应急响应中心几次报告 1 号机组和其他机组状况并报经首相批准之后，日本政府于 3 月 11 日 19 时 03 分宣布启动核应急。⁴¹

在 2 号机组，同样是在没有堆芯冷却系统以及堆芯压力和温度的任何指征的情况下，操纵员设想了最坏的假想方案，即反应堆堆芯隔离冷却系统没在运行，2 号机组堆芯正在升温。21 时 01 分，现场应急响应中心通知政府当局，没有任何冷却的 2 号机组堆芯预计会在大约 21 时 40 分裸露。根据这一预测，作为核应急对策本部的干事长，首相于 3 月 11 日 21 时 23 分发布了对距离现场三公里内的公众进行撤离和在 3—10 公里范围内提供隐避的命令⁴²。

在 1 号机组堆芯裸露之时，21 时 51 分被派去确认隔离凝汽器运行状态的小组在 1 号机组反应堆厂房遭遇了高水平辐射。⁴³ 这是 1 号机组反应堆状况和可能的堆芯损坏十分严重的迹象。

1 号机组密封状况恶化

在 1 号机组堆芯冷却丧失得到确认后，在 3 月 11 日 23 时 50 分能够显示安全壳压力的第一个读数时很明显地出现了对其他基本安全功能（密封）的进一步挑战。安全壳压力已经超过其设计中考虑的最大压力，并且这一情况促使现场主管下令为 1 号机组安全壳通风做好准备。这种情况还证明了发出《原子力灾害法》相关条例规定的基于“一次安全壳压力异常升高”的紧急通报的正当性[19]。

3 月 12 日 2 时 30 和 2 时 45 分均测得了 1 号机组安全壳压力的最高值。

确认 2 号机组的状况和侧重于恢复 1 号机组的安全功能

3 月 12 日 2 时 10 分，一个小组才得以进入 2 号机组反应堆堆芯隔离冷却系统设备所在的房间，并读取参数以确定系统的状况。运行状况在 3 月 12 日 2 时 55 分被传送到现场应急响应中心，并在失去对主控室的监测 11 个小时后，起到了澄清先前未知的 2 号机组堆芯冷却状况的作用。在确认 2 号机组堆芯冷却以后，由于 1 号机组密封功能面临严峻挑战，现场主管决定将事故管理的重点放在 1 号机组的通风努力上。

在制订通风计划的同时，由于 3 月 12 日 1 时 48 分发现消防泵不起作用，通过消防泵注水来恢复 1 号机组堆芯冷却的事故管理战略被证明无法执行。随后实施了替代

⁴¹ 与此同时，在首相府内设立了核应急对策本部，首相担负起了作为指导国家核应急响应的干事长的职责。

⁴² 稍早前，在 20 时 50 分，在对国家核应急通告进行评估并与东电公司官员就核电站状况的不确定性进行讨论后，福岛县地方政府发布了关于撤离电站两公里范围内居民的命令。

⁴³ 他们的个人剂量计记录了其在该厂房逗留约 10 秒钟高达 0.8 毫希的水平。

方案，即使用消防车连接与前一年根据新泻县中越冲地震的经验作为消防措施安装的汽轮机厂房喷水口。

5 号机组的升温和交流电源的恢复

3 月 12 日 1 时 40 分，在全厂断电事件后约 10 小时，5 号机组的一个安全卸压阀自动开启，因为反应堆压力在大约同一时间达到了其开启设定值。由于 5 号机组堆芯在没有排热措施的情况下继续升温，该阀门不停地自动打开和关闭了几次，以使压力保持在按照设计确定的范围。

安全卸压阀进行自动操作，以限制压力，但不能被用来减少压力，因为它们之中大多数的减压功能为了事故前进行的测试被禁用。由于直流电源可用于这一目的，因此，考虑作为替代通过开启反应堆压力容器上的一个小阀门（封头排气管嘴）进行减压。后来于 3 月 12 日 6 时 06 分，即在全厂断电后约 14.5 个小时，封头排气管嘴被远程开启，并保持打开，以便对充满水的反应堆压力容器进行减压。此外，在全厂断电后约 16.5 个小时，完成了 5 号机组与运行中的 6 号机组应急柴油发电机之间的电源连接，这使一些交流电源得以通到 5 号机组的设备，如反应堆排热所需的泵和阀门。

1 号机组堆芯的替代冷却

与此同时，1 号机组反应堆压力已经低到足以⁴⁴允许进行替代注水。3 月 12 日 4 时，在全厂断电约 12.5 个小时之后，开始了另一种冷却方式，即从消防车向 1 号机组反应堆注入淡水，以恢复堆芯冷却。一辆一吨的卡车注水断断续续地持续了约 5.5 个小时，因为卡车必须返回到淡水箱定期重新装水。同时，还继续致力于建立一条直通淡水箱的管线。后来，在全厂断电超出 17.5 个小时以后，开始直接从淡水箱向 1 号机组连续注入淡水。

1 号机组安全壳的通风

3 月 12 日 4 时 19 分进行的 1 号机组安全壳压力测量情况表明，安全壳内的压力自上次（2 时 45 分）测量以来在没有任何操纵员行动和没有既定通风路径的情况下出现下降，这表明通过一个未知的路径发生了一些非故意的安全壳卸压。此外，不久后在大门测得的辐射水平显示出现了增加⁴⁵。这也是来自一次安全壳的某些失控放射性释放的迹象，即密封下降。现场不断恶化的辐射状况，加上 1 号机组安全壳压力升高，导致政府于 3 月 12 日 5 时 44 分将撤离区扩大到 10 公里范围。

为 1 号机组安全壳实施通风配置的活动定于 3 月 12 日 9 时开始进行。当 9 时 02

⁴⁴ 在没有任何操纵员行动或电站系统行动的情况下出现了反应堆减压，表明一个未知的路径提供了卸压。

⁴⁵ 增加了约 10 倍（4 时测得 0.000 069 毫希/小时，4 时 23 分测得 0.000 59 毫希/小时）。

分收到福岛县当局关于大熊町撤离完毕的确认后⁴⁶，即启动了各小组开始操纵阀门，以安排1号机组安全壳的通风路径。经过5.5个小时的努力，当通风路径上的最后一个阀门于3月12日14时左右被开启时，通风路径（资料框2.3）建立了起来。通风作业的成功通过14时30分测得的安全壳压力下降得到证实⁴⁷，并向相关政府机构作了报告。虽然在大约一小时后在厂区边界范围内进行的辐射测量没有立即出现任何显著变化，但设在1号机组西北方厂区边界附近的一个现场测量仪却于15时29分⁴⁸记录了约1毫希/小时的辐射剂量率读数。

3号机组正常堆芯冷却丧失和开始应急堆芯冷却

虽然正在建立1号机组的安全壳通风，但当堆芯隔离冷却系统在连续运行近20.5小时之后于3月12日11时36分停止运行时，必须对3号机组全厂断电响应进行修改。操纵员几次都未能成功地重启该系统，反应堆中的水因此继续沸腾和蒸发，反应堆水位持续下降。

当水位达到在该高压冷却剂喷射系统（应急堆芯冷却系统）被自动启动的点即12时35分时，该系统将反应堆中的水位自动地保持在预定的范围内。然而，根据全厂断电响应程序，操纵员通过手动控制来避免系统自动反复启动和停止，以使直流电源保持较长的时间。

1号机组注入海水和建立电源线路

经过约11个小时向1号机组堆芯注水，消防水箱的淡水几乎完全耗尽。其结果是，在3月12日14时53分停止了1号机组的淡水注入。现场主管随后决定从海啸后汇集了海水的3号机组反冲洗阀井向1号机组反应堆注入海水，因为它是当时唯一可用的水源。注入海水的安排在短短半个多小时就完成了。

大约在同一时间，还完成了利用2号机组未损坏的变压器将移动电压电源⁴⁹连接到1号和2号机组的工作，1号机组的低压交流电供电电网于3月12日15时30分重新通电。

⁴⁶ 与福岛县当局商定在完成撤离后开始通风。

⁴⁷ 总之，从现场主管午夜左右发出命令到开始通风花了14.5个小时，原因是其中的阀门必须手动操作的驰压室周围的辐射水平很高，并缺乏压缩空气供应来操作这些阀门。

⁴⁸ 16时17分，应急响应中心注意到15时31分在大门附近测得的辐射值为0.569毫希/小时，因此，于16时27分向当局作了通报，因为该值超过0.5毫希/小时的法定报告标准。16时53分对该通报作了更正，因为当时意识到在1号机组通风后（但在1号机组发生爆炸前），在15时29分测得的辐射水平为1.015毫希/小时。

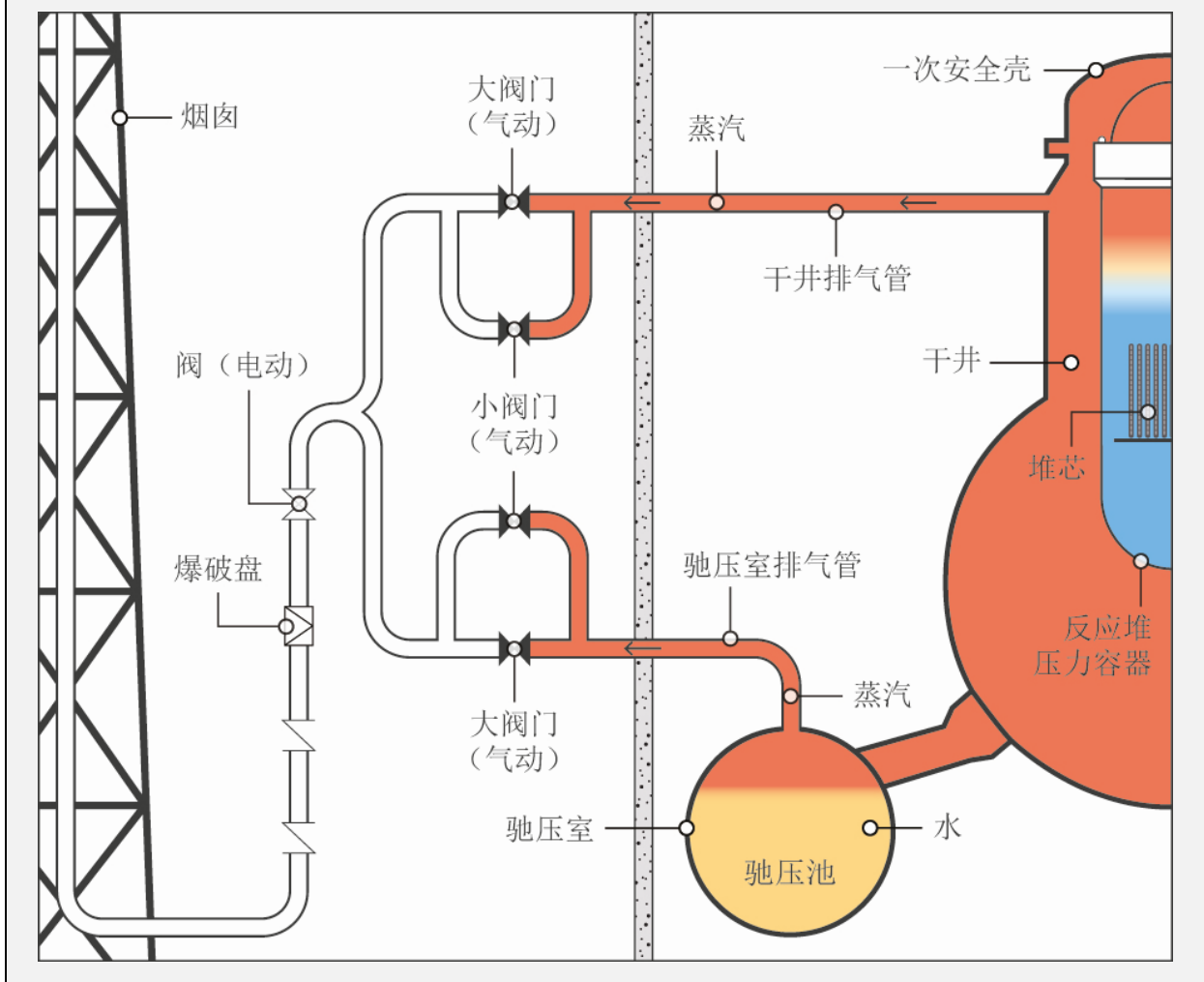
⁴⁹ 在3月11日全厂断电近一个小时后，移动电源设备（低压和高压供电车）被派往福岛第一核电站和福岛第二核电站。东北电力公司的第一辆车于3月11日22时左右也就是全厂断电近六小时后抵达。整个晚上都有来自东电公司和东北电力公司其他设施以及日本自卫队的更多车辆陆续抵达。截至3月12日10时15分，现场共有23辆车。

在全厂断电近 24 小时后，海水注入和交流电源都连通到 1 号机组。但在连通的几分钟内，1 号机组反应堆厂房的爆炸就破坏了这些尚未投入使用的安排。

资料框 2.3. 安全壳通风

作为提高严重事故处理能力的措施，在 20 世纪 90 年代做出一项监管决定后，便在福岛第一核电站各机组安装了“硬性通风装置”（即有相对厚壁排放管道的卸压装置）[22、23]。这样做的目的是通过允许一次安全壳通风（见下图）防止其出现过压。虽然优选通风路径是从驰压室起始，以受益于利用水池去除放射性同位素，但该通风路径包括从干井起始的另一条路线。可以通过从主控室操纵阀门同时控制通过成对机组共用烟囱的排放量和时间来调整任一路径。

在福岛第一核电站，通风管道还包含了一个爆破盘，该爆破盘被设定在安全壳压力超过预设压力时破裂，从而防止过早通风。日本的基本理念是直到不可避免时才开始作为保持一次安全壳完整性最后手段的通风，以延缓或防止向环境直接排放放射性物质。



1 号机组反应堆厂房爆炸

3 月 12 日 15 时 36 分，1 号机组反应堆厂房的服务层发生爆炸，造成了上部建筑结构的损坏和工人的受伤。虽然爆炸似乎没有损坏一次安全壳，但对二次安全壳（反应堆厂房）造成广泛的破坏。爆炸的原因不为电站工作人员所知，但怀疑有氢气从堆

芯释放并通过一个未知的路径从一次安全壳中泄出。因此，现场应急响应中心要求，除了三名最高层人员外，工作人员全部撤离 1 号至 4 号机组各区域及周边区域，其中包括两个共用主控室的工作人员。

大约在 1 号机组爆炸三个小时（1 号机组安全壳通风后四小时）后，即 3 月 12 日 18 时 25 分，政府将撤离区扩大到 20 公里。

向 1 号机组注入海水

1 号机组的爆炸不仅造成了海水注入和临时供电线组件的严重损坏，而且由于现场周围散落的瓦砾和受污染瓦砾的局部高剂量率，还妨碍了对它们的修复。在撤离持续大约两个小时后，各小组又返回现场维修或更换受损设备。

在对受损设备进行维修和更换后，于 3 月 12 日 19 时 04 分开始而且以后继续⁵⁰利用消防车和 3 号机组反冲洗阀井中的海水向 1 号机组反应堆注水。后来加入了硼酸，以解决再临界关切，从而确保反应性控制的基本安全功能。总之，在结束淡水注入与开始海水注入之间，1 号机组堆芯有近四个小时没有被冷却。

3 号机组堆芯冷却丧失

尽管在地震和海啸之后的头一天半在维护基本安全功能方面 1 号机组被赋予了最高优先地位，但在 3 月 13 日（星期日），3 号机组堆芯的冷却情况却引起了关切。

在应急高压冷却剂喷射系统连续运行 14 个小时后，3 号机组的操纵员开始担心为注水泵提供动力而当时正在以低反应堆蒸汽压力工作的该系统汽轮机的可靠性和可能的故障。这种担心涉及到该汽轮机可能受损，而且来自反应堆压力容器的路径将被建立，而这将导致放射性蒸汽不可控地直接释放到一次安全壳之外。当汽轮机没有自动停止时，这种担心则更为加重。因为按照设计，当反应堆压力下降到自动关闭压力之下时，汽轮机应自动停止工作。

因此，操纵员决定停止高压冷却剂喷射系统，而使用替代低压喷射手段（柴油驱动消防泵）。操纵员认为不用中断堆芯冷却就可以实现这一点，因为反应堆压力已经低于柴油驱动消防泵的压力，并且可以通过使用卸压阀保持低压。因此，操纵员关闭了 3 号机组应急高压堆芯喷射系统，继而开始尝试打开卸压阀。

然而，打开卸压阀的所有尝试均告失败，反应堆压力迅速上升到高于柴油驱动消防泵可以喷射的水平，并在全厂断电约 35 小时后停止了对 3 号机组堆芯进行冷却。面对这种挫折，操纵员尝试了近 45 分钟，以便恢复到通过应急高压冷却剂喷射系统进行

⁵⁰ 有一次，根据调查[7]，作为东电公司在首相府代表的一名高管曾电话要求现场主管停止向 1 号机组注入海水。该指令没有得到遵守，海水注入没有中断。

喷射，但均未成功。在没有任何能力对反应堆进行冷却的情况下，3月13日5时10分，根据《原子力灾害法》[19]相关条例的规定发出了3号机组“反应堆冷却功能丧失”的报告。3号机组的堆芯在随后数小时仍然没有被冷却，3号机组成为另一个失去堆芯冷却的机组。

在丧失冷却后，现场主管于5时15分下令利用消防车注水来冷却3号机组堆芯的替代方法。鉴于情况不断恶化，他还下令准备建立3号机组安全壳通风路径。

3号机组替代堆芯冷却和安全壳通风

来自5号至6号机组的消防车被派往3号机组，并于3月13日5时21分开始致力于建立一条通过消防线从反冲洗阀井向3号机组堆芯注入海水的管线。6时30分又有一辆来自柏崎-刈羽核电站的消防车抵达现场。在一个小时内就完成了海水注入管线的建立。但由于来自东电公司总部的一个通知⁵¹，现场主管推迟了对该管线的使用。其结果是，注水管线被改回到通过消防车组成的消防线提供含硼淡水源。

为将反应堆压力降低到低于消防车水泵压力以保持注水所作的努力需要启动卸压阀。通过使用轿车上的直流电池实现了这一点，这些电池被收集在3号和4号机组共同主控室中。

与此同时，3月13日8时41分，在三个小时多一点的时间内还完成了3号机组的通风线路安排，但安全壳压力仍低于安全壳设计压力，按设计尚没有高到足以使爆破盘破裂。由于继续致力于通过打开安全卸压阀以降低反应堆压力，主控室中的操纵员观察到，在9时08分，3号机组反应堆的反应堆压力出现下降，虽然阀门状态指示没有最终显示阀门是否处于开启位置。在对反应堆压力容器进行这种减压的同时，一次安全壳的压力出现了激增，表明出现了从反应堆压力容器到安全壳的排放。最终，安全壳压力于3月13日9时20分超过了安全壳的最大设计压力，且随后安全壳压力迅速下降，表明由于爆破盘破裂，3号机组安全壳的通风已经建立。

在通过打开附加的安全卸压阀实现反应堆减压后，反应堆压力降到消防车泵压之下，并在四个多小时没有进行冷却之后，于9时25分开始向3号机组反应堆注入含硼淡水。

3号机组安全壳的通风是短暂的，当时，由于缺乏足够的空气供应以保持其开放，通风管线上一个阀门被关闭⁵²。经过6.5个小时的努力后，移动压缩机重新开启了该阀门。

⁵¹ 东电公司总部厂外应急响应中心的一名部门主管在先前参加首相府的一次会议时电话询问现场主管是否有任何可用的淡水。他向现场主管通报了与会者的意见，他们都倾向于尽可能继续注入淡水。现场主管将该通知解释为只要有淡水可用便不注入海水的指令。

⁵² 两个小时后才发现。

2 号机组基本安全功能的预防措施

3 月 13 日 10 时 15 分左右，由于促进保持 1 号和 3 号机组相关基本安全功能的各项条件变得更加困难，现场主管下令抢先建立 2 号机组的安全壳通风路径。这是为了利用准备在其中操纵阀门的 2 号机组反应堆厂房相比其他机组仍然有利的放射性条件和在其中开展工作的现场趋向⁵³。这项工作在 45 分钟内就完成了，但由于 2 号机组安全壳内的压力尚未高到足以使爆破盘破裂的程度，因此通风并未发生。

12 时 05 分左右，现场主管还下令做好万一 2 号机组运行中的冷却系统失灵就向该机组注入海水的预防性准备。为此，要将消防车连接到 2 号机组的消防线，以便在必要时从 3 号机组的反冲洗阀井注水。

向 3 号机组注入海水和辐射水平的上升

由于消防水箱的淡水在 3 月 13 日 12 时 20 分被耗尽，现场主管决定向 3 号机组反应堆注入海水。消防车被重新定位，并在近一个小时后即 13 时 12 分开始从 3 号机组的反冲洗阀井注入海水。

3 月 13 日 14 时 15 分，在厂区边界附近测得高辐射剂量率（近 1 毫希/小时），并按照《原子力灾害法》相关条例的规定于 14 时 23 分向相关政府机构通报了“厂区边界辐射水平异常增加”[19]。15 分钟后，3 号机组反应堆厂房进门处的辐射剂量率超过 100—300 毫希/小时。由于在 3 号和 4 号机组共同主控室 3 号机组一侧测得的剂量率超过 12 毫希/小时，轮班小组转移到 4 号机组一侧。

现场应急响应中心根据这些剂量水平推断，已有放射性气体从 3 号机组反应堆泄露，这反过来又意味着也有氢泄露出来。意识到存在与 1 号机组类似的氢气爆炸的可能性，现场主管于 14 时 45 分决定从 3 号和 4 号机组共同主控室以及 3 号机组附近区域暂时撤离工人。

撤离区还包括 3 号机组反冲洗阀井区，同时暂停注水活动。撤离令于 17 时解除，工人回到 3 号机组反冲洗阀井区继续注水和通风活动。

在 5 号机组建立堆芯冷却

同时，来自 6 号机组应急柴油发电机的电源于 3 月 13 日 20 时 48 分被连接至 5 号机组正常低压散热系统的水泵，并于 20 时 54 分被启动。在全厂断电 53 个小时后，通过两个余热排出系统之一通向 5 号机组反应堆的反应堆注水管线准备就绪，并打开了通向补充水冷凝系统的互连管阀。但注水并未发生，因为反应堆的压力逐渐上升并超过了喷射压力。对此，利用现有的直流电源和氮气供应打开了安全卸压阀。这成功地

⁵³ 在 3 月 13 日 5 时 30 分至 10 时 50 分期间，在大门附近距离 1 号至 4 号机组反应堆厂房约一公里处探测到了中子，说明安全壳可能已经破裂，尽管中子来源不明。

降低了在反应堆压力容器中的压力，并允许于 3 月 14 日 5 时 30 分开始并于此后继续向 5 号机组反应堆注水。⁵⁴

1 号和 3 号机组丧失海水冷却

由于从 3 号机组反冲洗阀井向 1 号和 3 号机组注入海水的工作延续到 3 月 14 日（星期一），该井中的水下降到了很低的水位，以致于在 1 时 10 分停止了注水。在将进气软管更深入地降到井中后，井中剩余水被保留用于向 3 号机组注水；3 号机组两小时后便恢复了注水。1 号机组堆芯冷却被推迟到该井可以被重新注满之时。

在接下来的数小时内，3 号机组安全壳的压力被发现不断上升，反应堆的水位读数继续下降。3 号机组的反应堆水位于 3 月 14 日 6 时 20 分超出正常范围，这就向操纵员显示堆芯已经露出。由于担心 3 号机组有可能发生氢气爆炸，现场主管下令所有工人撤离，同时停止坑井重新注水活动。

3 号机组安全壳的压力于 7 时达到最高，但发现在 7 时 20 分略有下降，此后稳定地保持在最大设计压力之下。现场主管随后决定恢复建立管线的工作，以便从海洋将反冲洗阀井重新注满。在接下来的二至四个小时，所有机组的海水注入管线被重新建立，并开始重新注满反冲洗阀井，同时利用另外两台消防车从海洋和日本自卫队的油罐车泵水；日本自卫队的油罐车于 10 时 26 分抵达现场向反冲洗阀井运水。

1 号机组做好了恢复注入海水的准备，这时的所有活动，包括正在进行的向 3 号机组反应堆注入海水却不得不由于 3 号机组的爆炸而停止。爆炸损坏了 3 号机组反冲洗阀井周围的软管和消防车，并使得必须从外部区域临时撤离工人。

3 号机组反应堆厂房爆炸

3 月 14 日 11 时 01 分，3 号机组反应堆厂房的上部发生爆炸，造成了服务层上方结构的损坏和工人的受伤。除了替代注水安排遭到破坏外，2 号机组也由于爆炸丧失了安全壳通风能力，因为爆炸影响了先前设置的 2 号机组安全壳通风路径。爆炸后，2 号机组通风管线上的隔离阀被发现已经关闭，无法重新打开。

1 号和 3 号机组重新开始海水冷却

在暂停两小时后，又重新开始了海水注入管线的工作，这一次是直接来自海洋抽取海水。注水管线恢复后，3 月 14 日下午首先为 3 号机组并随后在晚上为 1 号机组重新开始注入海水。3 号机组已经五个小时、1 号机组已经 18 个小时没有冷却水注入堆芯。

⁵⁴ 此外，还提供了来自 6 号机组应急柴油发电机的交流电源，以操作反应堆厂房压力控制系统。在断电两天多一点后，反应堆厂房的压力低于大气压，确保了二次密封。

2 号机组丧失冷却和海水注入

3 月 14 日 13 时左右，2 号机组成为下一个发生冷却丧失的机组，测量表明反应堆水位下降而压力增加。根据机组操纵员和现场应急响应中心所做的推断，这显示 2 号机组反应堆堆芯隔离冷却系统可能出现了故障。其结果是对 2 号机组发布了与《原子力灾害法》[19]有关条例规定的“反应堆冷却功能丧失”的报告。

在反应堆堆芯隔离冷却系统出现故障后，13 时 05 分尝试通过消防系统注入海水，但对消防车泵而言，反应堆的压力太高了。在没有注水的情况下，堆芯似乎有可能很快就要露出。因此，决定使用卸压阀来对反应堆进行减压，以便能够在低压下注水，同时认识到由于反应堆蒸汽向安全壳的排放对密封可能造成不利的影晌。⁵⁵

在反应堆压力容器减压和消防车加油后，3 月 14 日 20 时前不久便开始通过消防系统向 2 号机组注入海水，起先是一辆消防车，此后不久用了两辆。

2 号机组密封性能下降

在 3 月 14 日 21 时 55 分左右，最近恢复的安全壳内辐射监测设备显示，2 号机组安全壳的辐射水平从八小时前最后一次测量以来出现了大幅增加。⁵⁶此外，在 3 月 14 日 22 时 30 分之后，反应堆压力和安全壳压力均显示了上升的趋势。22 时 50 分，安全壳压力就超过了设计压力，促使按照与《原子力灾害法》[19]有关条例的规定对 2 号机组紧急宣布“安全壳压力异常上升”。这种情况于 23 时 39 分向相关政府当局做了报告。在接下来的三到四个小时，更多的卸压阀被打开，以降低反应堆压力，并允许向 2 号机组反应堆注水。其结果是，安全壳压力进一步增加，但肩负建立通风管线以减轻安全壳压力任务的机组操作团队却无法打开通风阀。为了保护密封功能，并允许尽早通风，东电公司厂内厂外应急响应中心的工作人员一致同意直接从干井通风，同时认识到这会增加对环境的放射性释放。但这也无法打开干井通风口上的阀门，因此 2 号机组的通风无法实现。

3 月 15 日（星期二）4 时 17 分，相关政府当局得到通报，2 号机组安全壳及反应堆的减压一直没有效果，安全壳的压力继续增加。

2 号和 4 号机组在现场撤离后发生的事件

3 月 15 日 6 时 14 分，在现场听到了爆炸声，在 1 号和 2 号机组共同主控室感受到

⁵⁵ 一次安全壳的驰压室部分已接近饱和。

⁵⁶ 安全壳大气中的辐射水平增加了 5000 倍（从 1.08 毫希/小时增加到 5360 毫希/小时），安全壳驰压水池部分的辐射水平增加了 40 倍（从 10.3 毫希/小时增加到 383 毫希/小时）。此外，3 月 14 日 21 时和 3 月 15 日 1 时 40 分再次在大门附近探测到中子。东电公司认为，这些中子来自三个反应堆之一的堆芯受损后释放的铀系元素的自发裂变。

震颤。紧接着是 2 号机组安全壳（驰压室）的压力读数下降。主控室工作人员最初向现场应急响应中心所作的报告是，2 号机组驰压室的压力已下降至大气压力⁵⁷，这表明有可能丧失了密封功能。

这一情况表明，2 号机组安全壳可能失效而且出现了不受控制的释放。据此，现场应急响应中心下令所有机组的所有人员暂时撤离到现场应急响应中心所在的隔震建筑物。在 2 号机组驰压室相关事件的大约同一时间，正在撤离的人员报告 4 号机组反应堆厂房上部发生了爆炸。

在发生 2 号和 4 号机组的事件后，除了监测和应急响应所需人员外，现场主管命令所有人员都前往一个辐射安全场所。大约有 650 人将这一命令理解为撤离现场，并撤到了福岛第二核电站。估计有 50—70 名工作人员⁵⁸包括现场主管仍然留在了福岛第一核电站现场。3 月 15 日 7 时，现场应急响应中心向相关政府机构通报了撤离情况。

大约两个小时后，白色的烟雾（或蒸汽）被观察到从 2 号机组反应堆厂房第五层附近释放出来。3 月 15 日 9 时记录了大门附近近 12 毫希/小时的辐射剂量率测量值，这是自事故发生以来的最高测量值。由于辐射水平高，政府主管当局在两个小时后即 11 时发布了一项命令，要求福岛第一核电站 20 至 30 公里半径内所有居民暂避室内。

在这一连串事件期间，1 号至 3 号机组的基本安全功能出现了丧失或严重恶化（图 2.5），工作的重点放在了损坏评价以及这些功能的恢复和稳定方面。

2.1.3. 稳定化努力

3 号和 4 号机组乏燃料池补水

为解决对 3 号和 4 号机组乏燃料池状况的关切，3 月 16 日（星期三）下午通过直升机进行了远程目视检查。经检查证实，4 号机组乏燃料池有足够的水可以覆盖燃料组件；然而，对 3 号机组乏燃料池的观察并不确定，使得补水成为高度优先事项。

3 月 17 日 9 时 30 分至 10 时整，在直升机空投海水时向 3 号机组乏燃料池进行了第一次供水。当天 19 时 05 分至 20 时 07 分，通过高压水枪卡车喷射了淡水。向 4 号机组乏燃料池喷射海水或淡水于 3 月 20 日开始⁵⁹。

⁵⁷ 在复查读数后确认驰压室的压力超出了正常范围，但 2 号机组干井部分的压力并没有显著下降。

⁵⁸ 正如不同调查报告所指出的，不能确定工作人员的确切数目[6、8]。其中还指出，撤回到福岛第二核电站现场的工作人员当日就开始回到福岛第一核电站现场。

⁵⁹ 1 号机组乏燃料池注水采取了同样的做法。由于 2 号机组反应堆厂房仍覆盖着 2 号机组乏燃料池，因此，这种喷射方法不能用于 2 号机组。

3月一直断断续续地通过高压水枪卡车和消防卡车或混凝土输送泵车辆向乏燃料池喷射海水和淡水，以确保乏燃料不裸露出来。2011年4月直至5月，乏燃料池冷却和净化系统也被利用起来。

电源恢复和全厂断电结束

3月17日至20日，实施了铺设连接到1号和2号机组临时电源线的工作。3月20日（星期日）15时46分，全厂断电几乎满九天后，通过这个临时交流电电源系统，1号和2号机组的厂外电源得到恢复，结束了1号和2号机组的断电。

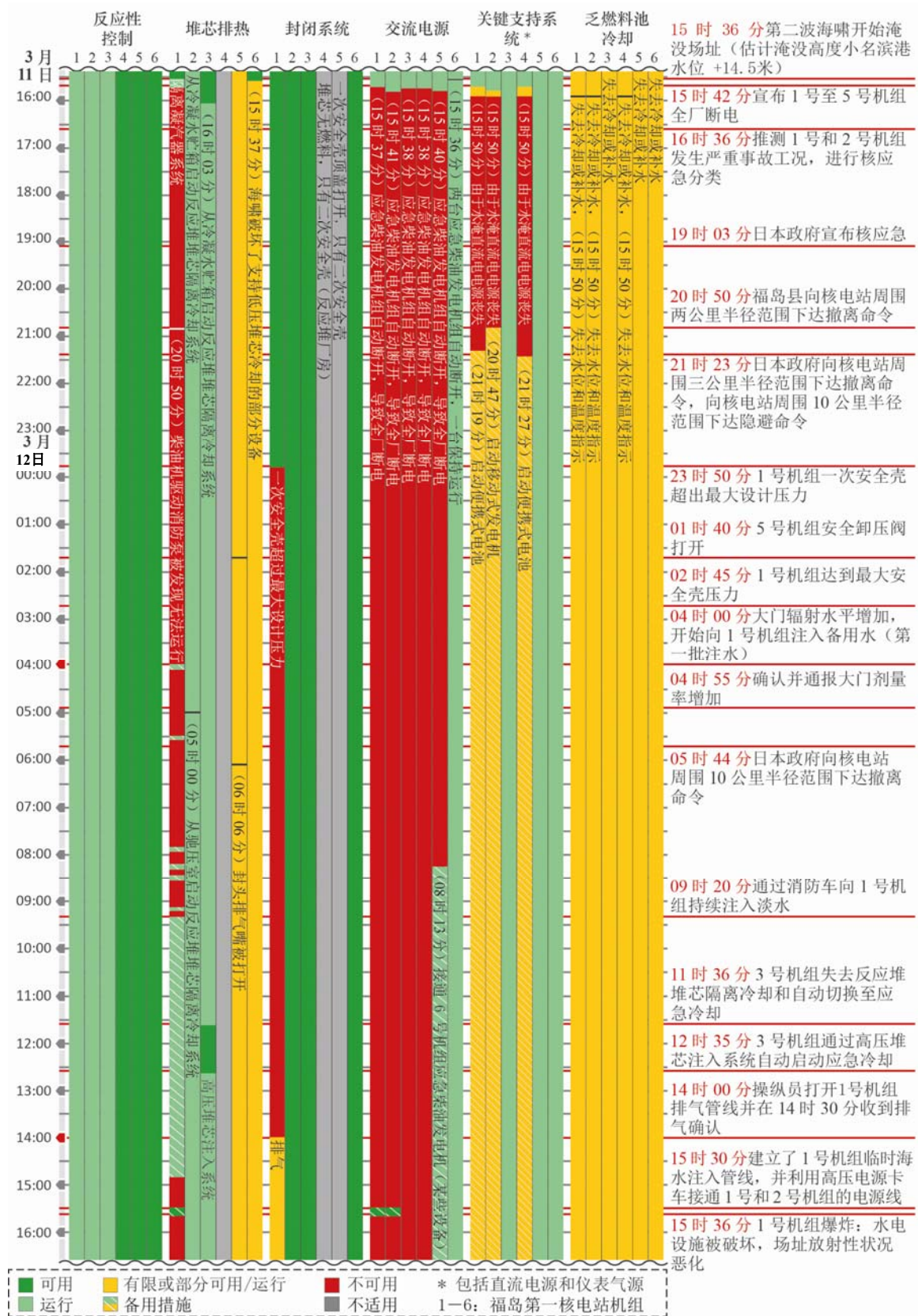


图 2.5. 2011 年 3 月 11 日至 15 日福岛第一核电站事故响应中的基本安全功能和辅助安全功能。

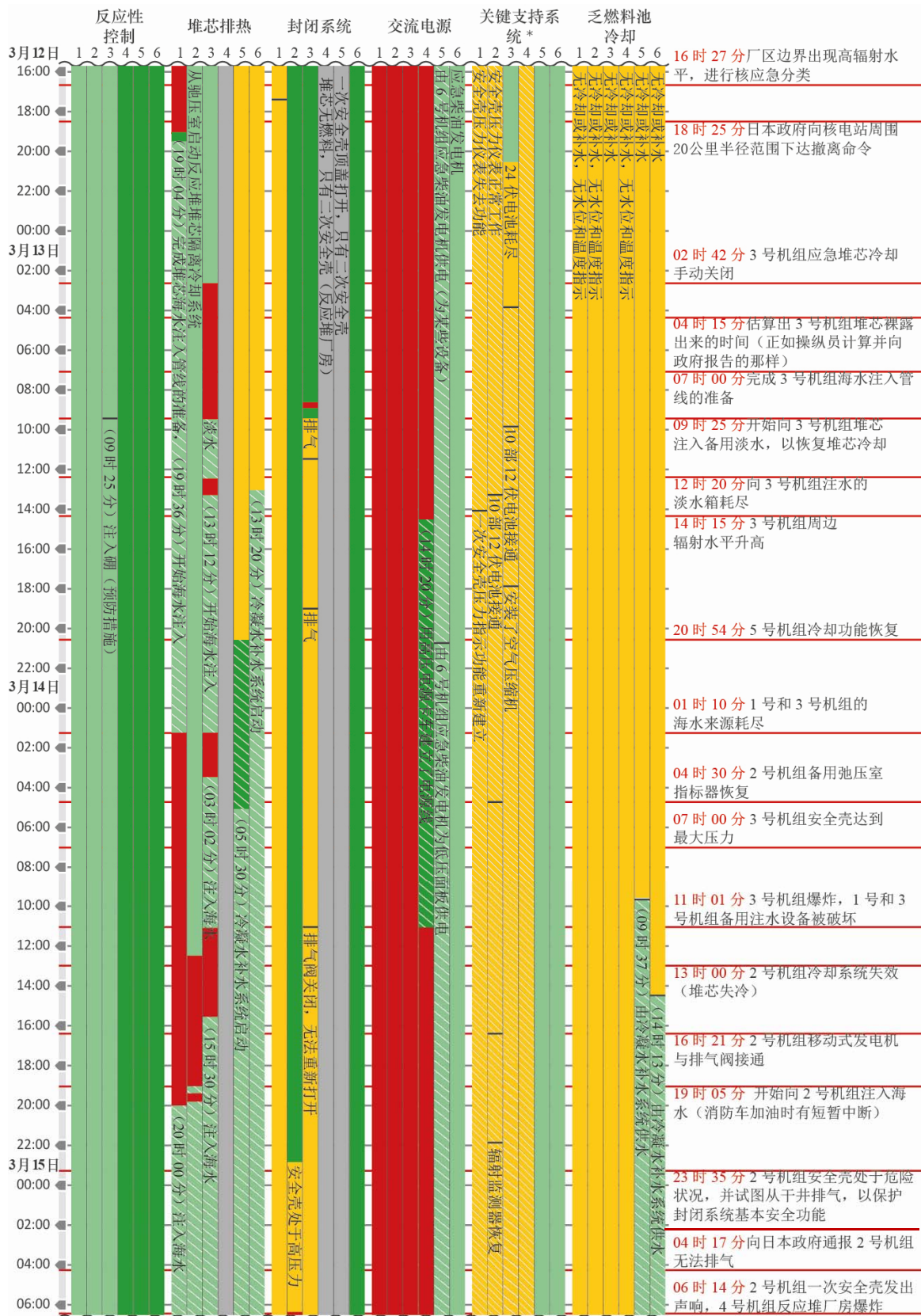


图 2.5. 2011 年 3 月 11 日至 15 日福岛第一核电站事故响应中的基本安全功能和辅助安全功能（续）。

在 6 号机组，通过连接电源线至运行中的气冷发电机，恢复了第二个水冷应急柴油发电机冷却系统的电源。水冷应急柴油发电机于 3 月 19 日 4 时 22 分重新开始工作，向 5 号和 6 号机组提供交流电电源。

3 号和 4 号机组在超过 14 天断电后于 3 月 26 日恢复临时厂外电源，结束了两台机组的断电。

实现稳定状况

5 号机组在其正常余热排出系统于 3 月 20 日 12 时 25 分投入使用后，成为第一个达到冷停堆模式的机组。2011 年 3 月 20 日 14 时 30 分，在事故发生后将近九天，5 号机组反应堆温度在约两小时下降到低于 100℃，从而使 5 号机组处于冷停堆模式。

同日 18 时 48 分，6 号机组正常余热排出系统以类似于 5 号机组的方式重新投入运行。3 月 20 日 19 时 27 分，6 号机组反应堆温度在不到一个小时降低到低于 100℃，从而使 6 号机组处于冷停堆模式（图 2.6）。

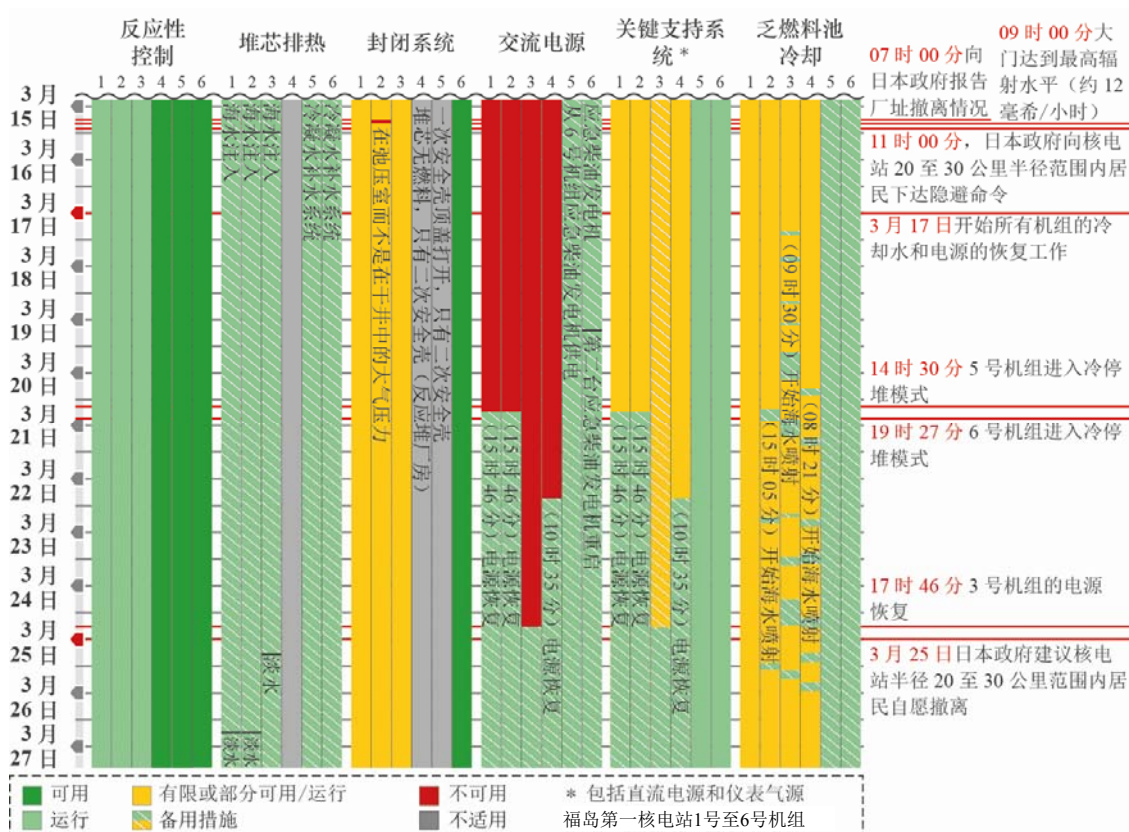


图 2.6. 福岛第一核电站基本安全功能临时恢复。

对于 1 号至 3 号机组，东电公司于 2011 年 4 月 17 日发布了一项行动计划，即“东京电力公司福岛第一核电站事故后的恢复路线图” [24]。该路线图包括将在以下方面采取的措施：建立反应堆和乏燃料的稳定冷却；减少和监测放射性释放；控制氢气积聚；预防重回临界。这些行动是在事故发生后九个月采取的。

该路线图确立了将确定事故状态或“冷停堆状态”⁶⁰结束的两个条件：实现放射性释放的显著抑制和辐射剂量率的稳步下降；实现路线图所规定的某些电站参数的目标值。日本政府和东电公司于7月19日宣布在第1号至3号机组已经达到第一个条件，于2011年12月16日宣布第二个条件对于这些机组已经达到。这项宣布正式⁶¹使福岛第一核电站事件的“事故”阶段宣告结束。

然而，一些不稳定的电站状况持续不断，例如温度波动，这一点曾被解释为由仪器仪表失效或裂变产物测量波动所造成。2012年3月至4月，实现了较稳定的电站参数，而事故后管理工作则继续进行。此外，废物管理方面的挑战持续存在，例如，由于地下水进入到建筑物和设备意外失效，处理累积的放射性积水却困难重重。在撰写本报告之时，日本政府认为福岛第一核电站是一个“作为事故场址的特定设施”⁶²。

2.2. 核安全考虑因素

2.2.1. 电站对外部事件的脆弱性

2011年3月11日的地震造成了振动性地面运动，引起了电站结构、系统和部件的摇晃。继之而来的是一系列海啸波，其中一个海啸波淹没了场址。所记录的地面运动和海啸波高度都大大超出了最初设计电站时所作的危害假设。地震和伴随的海啸给福岛第一核电站多台机组造成了影响。

原设计中考虑的地震危害和海啸波主要是根据日本的历史地震记录和近期海啸的证据评估的。这种初始评估没有充分考虑构造地质标准，因而没有利用这种标准进行重新评估。

地震发生前，日本海沟被归类为8级地震频发的俯冲带；福岛县沿海发生9级地震被日本科学家认为是不可信的。但过去几十年中，已有在不同地区的类似构造环境中发生类似或更高震级的记录。

没有迹象表明，该电站的主要安全特性受到2011年3月11日地震产生的振动性地面运动的影响。这主要是由于日本核电站抗震设计和建造采取的保守方案，给电站提供了充分的安全裕度。但原设计的考虑因素没有针对海啸等极端外部洪水事件提供可比安全裕度。

在福岛第一核电站寿期期间，一直没有对该电站对外部危害的脆弱性进行再评

⁶⁰ 术语“冷停堆状态”系日本政府当时专门针对福岛第一核电站反应堆确定的。其定义不同于原子能机构和其他组织所用的术语。

⁶¹ 根据日本政府当时所设定的标准。

⁶² 根据2012年11月7日由现行监管机构原子力规制委员会确定的“特定核设施”的定义，即将需要对特定核材料的安全或实物保护采取特别措施的设施。

价。在事故发生时日本没有关于这种再评价的监管要求，现行条例和导则没有适当考虑相关国内和国际运行经验。日本关于应对地震相关事件如海啸影响之办法的监管导则笼统和简短，没有提供具体标准或详细导则。

事故发生前，营运者使用日本在 2002 年制订的一种基于共识的方法对极端海啸洪水水位进行了一些再评价，得出的值高于原设计基准估计值。基于这些结果，采取了一些补偿措施，但这些措施在事故发生时被证明不够充分。

此外，营运者还在事故前利用波源模型或基于共识的方法之外的方法进行了一些试算。其结果是，利用日本地震调查研究推进本部在 2002 年建议的源模型进行的试算预期将发生远远大于原设计中和以往再评价所作估计中所设想程度的海啸。该模型使用了最新资料并在其假想情况中采用了不同的方案。在事故发生时还在开展进一步的评估，但同时，并没有实施任何额外的补偿措施。估计值与 2011 年 3 月记录的洪水水位相似。

世界各地的运行经验已经表明了自然灾害超出核电站设计基准的情况。特别是，从其中一些事件获得的经验证明了安全系统对于洪水的脆弱性。

资料框 2.4. 海啸[25]

“海啸”在日语中的意思是港口中的波浪，系海底（或用通用术语说，水下地面）变形或扰动产生的一系列长波长（如从数公里到数百公里）和长周期（如几分钟到几十分钟，例外情况下到数小时）的行波。地震、火山现象、水下和沿海滑坡、岩崩或岩体坍塌均能够产生海啸。海啸会发生在世界的所有海洋区域和海盆甚至峡湾和大型湖泊。

海啸波从发生区域沿所有方向向外传播，能量传播的主要方向由发生源的体量和方位决定。海啸在深水中传播的过程中是作为普通重力波行进的，速度取决于水的深度。例如，在海洋深处，速度可超过 800 公里/小时，波高通常小于几十厘米，在有震源的情况下，波长往往超过 100 公里。在传播过程中，海底地形影响着海啸波的速度和高度。海山或海山链（群岛）的折射、反射和衍射是影响海啸波在深水中传播的重要因素。

海啸波在接近浅水时会变得更加陡峭，并有高度增加，因为水深减少时波速降低、波长缩短。在沿海地带，当地地形和水深，如半岛或海底峡谷，可能导致波高额外增加，随着海啸向内陆移动，波高也可能因海湾、河口、港口或泻湖漏斗的存在而增大。可能会发生一些大型波，而且第一个可能不是最大的。在第一个波到来之前和各连续的洪水之间也可能发生海水的后退。海啸可能导致内陆被淹没，因为它的波长非常长，紧随波锋之后而来的是铺天盖地的洪水。这会产生破坏性影响。

事故发生时施行的原子能机构安全标准要求，在建设核电厂之前，需要查明地震和海啸等场址特定外部危害，并需要作为场址综合和全面表征的一部分，评估这些危害对核电厂的影响[26]。需要制订适当的设计基准，以便在核电厂寿期内提供充分的安全裕度[27]。这些裕度需要足够大，能够应对与外部事件评估相关的高度不确定性。还需要定期重新评价场址相关危害，以便确定由于在电厂寿期期间获得的新资料和新知识而需要进行的改动[26]。

在 20 世纪 60 年代和 70 年代，在使用估计地震和伴生（如海啸）危害的方法时，使用历史记录是普遍的国际作法。这种普遍做法包括通过增加所记录的场址地区最大历史地震强度或震级并假设这种事件将在离场址最近的距离发生来增加安全裕度[28]。这样做的目的是考虑到强度或震级观测中存在的 uncertainty，以及弥补最大潜在值可能不会在相对较短的观测期内获得的情况，因为通常情况下，观测期需要包括史前数据，以便为危害评价提供坚实的估计值。但对福岛第一核电站的 1 号和 2 号机组设计的地震危害评价主要是根据地区历史地震数据进行的，而没有如上所述增加安全裕度。在为后续机组获取建造许可证的过程中，采用了将历史地震资料和地貌断层规模结合使用的新方法[16、29]。

有关“内陆”断层的资料来自官方来源以及营运者开展的特定勘测，在分析中，使用了保守参数来预测可能发生的地震震级。对于日本海沟，最初估计的最大事件是震级为 8 级的地震，这 (1) 并没有基于构造的充分理由，(2) 没有利用全球类比，在很大程度上依据的是所看到的历史数据。

就在福岛第一核电站 1 号机组获得建造许可证前不久，曾在太平洋“火圈”的其他地方发生大震级地震（9 级），如 1960 年的智利地震和 1964 年的阿拉斯加地震。这些地震的发生没有导致日本地震学家形成一种共识，即认为在一个与在太平洋板块其他地区引发地震的构造环境相似的构造环境中，这种事件是可能在日本海岸附近发生的。

在对该电站“建设许可证”中使用的对外部洪水危害的初始评价中，该电站的设计者采用了当时在日本流行的方法和标准，这些方法和标准以对地震和海啸历史记录的研究和解读为基础。在 1960 发生在智利的世界上已知最大的地震之一之后发生的偏远海啸是被用于针对外部洪水的设计目的之事件。该事件导致在福岛县小名滨港观察到的海啸高度为海拔 3.1 米。

就位于东海岸以外日本海沟的海啸源而言，没有在福岛第一核电站场址这一地点的海啸洪水水位历史记录，也没有在该场址近海地区曾发生地震的证据。没有有关附近海啸源的数据支持为设计目的而采用 3.1 米的最高洪水水位。东电公司没有考虑发生在其他地区的大震级地震，并且没有将它们假设为在日本海沟的本地海啸源。

尽管日本没有对开展地震危害和海啸危害再评价的监管要求，但东电公司在福岛第一核电站寿期内仍开展了几次再评价[30]。东电公司和日本其他营运组织使用日本土木工程师学会制订并于 2002 年颁布的方法对海啸洪水水位进行了再评价[31]。这种方法使用基于历史数据的标准近距或本地海啸源模型，其中不假设将在福岛第一核电站场址近海的日本海沟沿线发生引发海啸的地震。在使用这种方法进行的所有评估中都采用了上述标准源模型的假设。

日本原子力安全委员会 2006 年的导则[32]要求除了考虑内陆地壳地震，还要考虑板间地震。有关地震安全及相关事件的这些导则被用于评价地震危害，但有关海啸危

害的导则仅包括笼统而简短的说明，并没有提供具体的要求、准则或方法。东电公司在按照原子力安全和保安院的要求进行地震安全“复查”时，将这些地震视为 8 级地震。但由于该场址与这些板间地震的距离，这种做法提供的与这种构造结构相关的危害值与内陆震源相比较小。因此，没有考虑它们对地面运动危害的影响。在事故发生时，东电公司尚未完成该电站对于地震和海啸脆弱性的重新评价。

2009 年，东电公司使用最新测深和潮汐数据估计的最大海啸高度值为 6.1 米。由于这一新估计值，对福岛第一核电站进行了设计修改，特别是抬高了余热排出泵电机。事故期间，证明仅此措施是不够的。没有实施加强防洪的其他安全措施，如避免应急柴油发电机被洪水淹没的措施。

除了使用日本土木工程师学会的方法进行的这些再评价外，东电公司还在事故前对海啸洪水水位进行了试算。其中的一个试算[30]采用了地震调查研究推进本部建议的源模型，该模型使用了最新资料并考虑了不同假想情况[30、33]。该方案研究了福岛县沿海的日本海沟引发海啸的潜在可能性。它没有仅仅依靠历史海啸记录来研究这一部分的构造俯冲带。

在 2007 年至 2009 年期间采用的这一新方案假定将在福岛沿海发生震级为 8.3 级的地震。这样一起地震能够导致在福岛第一核电站场址出现约 15 米高的海啸抬高（与 2011 年 3 月 11 日的实际海啸高度接近），这将淹没主厂房。根据这一新分析结果，东电公司、原子力安全和保安院和日本其他组织认为需要开展进一步的研究和调查。东电公司和其他电力公司请求日本土木工程师学会审查海啸源模型的适宜性；这些努力在 2011 年 3 月正处于进行中。

东电公司在对这些提高后的海啸高度估计值的响应中没有采取临时补偿措施，原子力安全和保安院也没有要求东电公司迅速对这些结果采取行动[30]。

虽然地震危害评价存在着种种困难和不确定性，但发生在福岛第一核电站的事件证明，就地震振动引起的地面运动而言，日本核电站是坚固的。2011 年 3 月 11 日，在福岛第一核电站 1 号至 5 号机组反应堆厂房抗震地基记录到的最大加速度显著大于电站设计时估计的最大加速度。但没有迹象表明地面运动给安全相关结构、系统或部件造成了明显破坏[34]。然而，事实证明，针对海啸引起的对洪水的防御措施，则不足以抵御海啸波高度远远高于福岛第一核电站设计高度的海啸。在福岛第一核电站的设计中没有考虑涉及并发多种极端自然灾害和影响多台机组的假想情况。由于地震和海啸造成基础设施大面积损坏，导致该地区厂外混乱，破坏了为福岛第一核电站严重事故管理行动的实施及时提供资源。

日本和其他地区在事故前的 12 年中的核电站运行经历表明，洪水有可能造成严重后果。相关运行经历包括：1999 年的风暴潮，它导致法国布莱耶核电厂的两座反应堆被淹；2004 年的印度洋海啸，它淹没了印度马德拉斯原子能电站的海水泵；以及 2007

年的日本新潟县中越冲地震。后者影响了东电公司的柏崎-刈羽核电站，导致 1 号机组的反应堆厂房因地下的外部灭火管道发生故障而被淹[35—38]。

2.2.2. 纵深防御概念的适用

纵深防御是自开始核电计划发展以来为了确保核装置安全而适用的概念。其目的是通过若干层防护补偿潜在的人为故障和设备故障。防御是通过每层防护的多种而独立的手段提供的。

福岛第一核电站的设计为前三层纵深防御提供了设备和系统：(1) 旨在提供可靠正常运行的设备；(2) 旨在使电站在异常事件后恢复安全状态的设备；和 (3) 旨在管理事故工况的安全系统。多个安全系统的同时失灵导致了在设计电站时没有预计到的电站工况。设计基础是利用广泛的假想危害导出的；但没有充分涉及海啸等外部危害。因此，同时由海啸引起的洪水危及到纵深防御的前三个防护层，导致三个防护层的每一层的设备和系统发生共因故障。

多个安全系统的共因故障导致了设计中没有预计到的电站工况。因此，旨在提供第四层纵深防御的防护手段（即防止严重事故发展和减轻严重事故后果）无法用于恢复反应堆冷却和维持安全壳的完整性。电源的全部丧失、因必要仪器仪表的不可用所致相关安全参数信息的缺乏、控制器件的丧失以及操作程序的不足，致使不能阻止事故发展和限制事故后果。

每个纵深防御层不能提供充分的防护手段，导致 1 号、2 号和 3 号机组发生严重反应堆损坏，并导致这些机组发生大量的放射性释放。

2011 年 3 月 11 日地震给该地区的基础设施造成了重大破坏，包括从厂外电网到福岛第一核电站的连接中断。这导致该电站偏离正常运行（第一层纵深防御）。地震发生后，从厂内电源成功地提供了供电，第三层纵深防御的所有安全系统继续按设计的那样工作。这表明安全系统和设备承受住了地震危害[8]。

该电站的建设接近海平面，对洪水危害的防护不足，因为没有对洪水危险作出适当估计[27]。关键安全设备没有用密封隔间保护，也没有设置在更高的位置上以防水淹。这导致纵深防御第一层、第二层和第三层的余热排出和安全壳冷却规定措施丧失。

资料框 2.5. 事故发生时适用的纵深防御概念[27]

纵深防御概念当被用于无论是组织工作方面的、行为方面的还是与设计有关的一切安全活动时，它能确保这些活动能受到相互重叠的多种措施的约束，使得故障一旦发生能被适当的措施察觉、抵销或纠正。自 1988 年以来，这一概念一直被进一步推敲[39、40]。在设计和运行的各个方面适用纵深防御概念，能就多种瞬变过程、预计运行事件和事故，包括由厂内设备故障或人的行动引起的那些事故，以及起源于厂外的事件，提供多层次保护。

在设计电厂时应用纵深防御概念，就能提供多层次的防御（固有特征、设备和程序），旨在防止事故的发生并确保一旦不能防止时仍有适当的保护。

- (1) 第一层防御的目的是防止偏离正常运行和防止系统故障。这导致以下要求：按照适当的质量水平和工程实践，诸如应用冗余性、独立性和多样性，完善而保守地设计、建造、维护和运行电厂。为了满足这一目标，应谨慎注意选用适当的设计规范和材料，并注意控制好部件的制造及电厂建造。那些能有助于减少造成内部危害的可能性（例如控制对假想始发事件的响应），减轻给定假想始发事件的后果，或减少事故序列之后可能出现的释放源项的设计方案对这一防御层是有作用的。还要注意与电厂设计、制造、建造以及在役检查、维护和测试有关的规程，注意使这些活动易于进行，注意电厂的运行方式以及注意如何利用运行经验。这一整个过程要得到旨在为电厂确定运行和维护要求的详细分析工作的支持。
- (2) 第二层防御的目的是探测和阻止对正常运行状态的偏离，以防止预计运行事件升级为事故工况。这样做是认识到以下事实：尽管在核电厂的整个服役寿期内会注意对假想始发事件的预防，但还是可能会发生一些假想始发事件。这一层防御需要设置安全分析中确定的一些特定系统，并确定好运行程序，以便防止或尽量减小由此类假想始发事件造成的损害。
- (3) 就第三层防御而言，假定上一层防御可能没有阻止某些预计运行事件或假想始发事件升级，尽管这是非常不可能的，因而发展成了比较严重的事件。在电厂的设计基准中要考虑到这些可能性不大的事件，并提供固有安全特征、失效安全设计、附加设备和程序，以便控制其后果，并在发生此种事件之后实现稳定而可接受的电厂状态。这导致提供专设安全设施这一要求，这些设施有能力首先把电厂引导到可控制的状态，随后引导到安全停堆状态，并至少维持一道可以将放射性物质包容起来的屏障。
- (4) 第四层防御的目的是处理可能超过设计基准的严重事故，并确保放射性释放量维持在尽实际可能低的水平。这层防御的最重要目的是保护上述的包容功能。这除了采取事故管理程序外，还可通过阻止事故发展的补充措施和程序，以及缓解选定严重事故的后果措施来实现。由这种包容功能提供的保护可以用最佳估计方法加以验证。
- (5) 第五层也是最后一层防御的目的，是缓解事故工况下可能导致释放出的放射性物质的放射后果。这要求提供设备齐全的应急控制（见关于“应急准备和响应”的第 3 部分）。

与实施纵深防御相关的一个方面，是在设计中提供一系列的实体屏障，用于将放射性物质包容在规定的场所内。所需要的实体屏障的数目取决于潜在的内部和外部危害，以及各种故障的潜在后果。对于水冷反应堆而言，这样的屏障一般可以采取燃料基体、燃料包壳、反应堆冷却剂系统压力边界和安全壳的形式。

洪水是造成应急供电系统失灵、向测量和控制装置提供直流电的系统几近全部丧失以及向电站提供海水冷却的结构和部件毁坏的共因。

第四层纵深防御的目的是防止事故发展并减轻严重事故的后果。就第四层的行动而言，操纵员需要利用所有可用的手段向反应堆供水，以确保余热被充分排出。这要

求具备能够提供有关关键安全参数的可靠信息的仪器仪表，并具备对反应堆进行减压的简易、可靠手段。此外，操纵员需要接受过明确的指导和培训，能够启动事故管理措施[41]。

随着事故的发展，操纵员失去了从控制室可靠地测量重要安全参数的能力。需要用这些信息来评价反应堆状况和就冷却反应堆的非常行动和办法作出知情决定。虽然如此，操纵员仍将反应堆冷却作为高度优先事项，并想方设法迅速准备了供水管线，目的是利用可用的低压泵将冷却剂注入反应堆。但减轻反应堆压力的尝试归于失败，因为根本没有进行在完全丧失电源后执行这种功能的规定措施。所需的控制电源不能及时恢复，以防止堆芯损坏[8]。

纵深防御第四层包括的最后实体屏障是反应堆安全壳。其目的是通过防止在反应堆损坏后发生向环境的大规模放射性释放，减轻事故后果。根据安全壳类型，需要各种系统或各类设备来保护安全壳免于与堆芯损坏事故相关、可能危及安全壳完整性的物理现象的损害。福岛第一核电站机组包括安全壳受控排气的手段，用于减轻反应堆冷却回路的蒸汽泄漏可能造成的过压。此外，向安全壳内的大气充满了惰性氮，以便消除氢燃烧和防止可能的氢爆炸。

事故期间进行的测量表明，1号、2号和3号机组安全壳内的压力在某些时间增加到了接近或高于各安全壳的设计压力的水平。这种压力增加是安全壳冷却系统丧失和过热堆芯产生蒸汽所致。虽然一些安全壳排气系统被成功打开，但迹象表明，1号、2号和3号机组的安全壳失效，导致发生了放射性物质释放和氢释放。安全壳内的氢大气有效地防止了氢燃烧和氢爆炸在该密闭空间内的发生。但随着氢从安全壳泄漏到反应堆厂房，在1号、3号和4号机组发生了氢爆炸[8]。

福岛第一核电站事故证明，极端自然灾害有可能使纵深防御的多个防护层失效或受损[42、43]。因此，对于纵深防御的所有层级，都需要考虑系统地确定和评价外部危害并实施防范这些危害的强有力防护。此外，事故还表明，即使设计用来保护反应堆防范事故的所有主要安全系统都丧失，备用设计规定措施和事故管理能力仍能确保向反应堆的冷却水供应。但及时利用这些规定措施，要求具备能够提供有关关键安全参数的可靠信息的仪器仪表，并具备减轻反应堆内压力的简易、可靠手段，以便能够使用任何手段向反应堆供应冷却水。

2.2.3. 对基本安全功能执行失效的评价

对确保安全具有重要意义的三个基本安全功能是：控制核燃料的反应性；排出堆芯和乏燃料池中的热；以及包容放射性物质。地震发生后，第一个基本安全功能即“控制反应性”在福岛第一核电站所有六台机组都得到了执行。

第二个基本安全功能即“排出堆芯和乏燃料池中的热”不能得到维持，因为大部分交流电和直流电系统丧失，操纵员被剥夺了对1号、2号和3号机组反应堆和乏燃料

池的几乎所有控制手段。第二个基本安全功能的丧失部分地是由于对反应堆压力容器的减压延误，没能执行备用水注入所致。冷却的丧失导致反应堆燃料过热和熔化。

密封功能因交流电和直流电丧失而丧失，这使冷却系统变得无法使用，并使操纵员难以利用安全壳排气系统。安全壳排气对安全壳卸压和防止失效十分必要。操纵员能够对 1 号和 3 号机组进行排气，减少一次安全壳内的压力。但这导致了向环境的放射性释放。虽然 1 号和 3 号机组的安全壳排气被打开，但 1 号和 3 号机组的一次安全壳最终还是失效。2 号机组没能成功进行安全壳排气，并且安全壳失效导致了放射性释放。

资料框 2.6. 基本安全功能

三个基本安全功能是：

- (1) 控制反应性；
- (2) 排热；
- (3) 包容放射性物质。

在福岛第一核电站事故前，曾发生两次涉及不能维持一个或多个基本安全功能的事故。1979 年在美利坚合众国三里岛核电厂的事故是由于这些安全功能中的第二个功能丧失而发生的，但向环境的放射性释放被第三个功能（放射性物质被安全壳密封）成功阻止。1986 年在前苏联切尔诺贝利核电站的事故是由于这些安全功能中的第一个功能丧失而发生的。该电站没有安全壳。结果，切尔诺贝利事故造成了规模很大的向环境的放射性释放。福岛第一核电站事故是由于极端外部事件并发后这些安全功能中的第二个功能和第三个功能丧失而发生的。

堆芯中核燃料反应性的控制

控制堆芯中核燃料反应性的安全系统是反应堆保护和控制棒驱动机构。在地震发生前，福岛第一核电站 1 号至 3 号机组正在运行；4 号至 6 号机组已停堆进行维护。1 号至 3 号机组的反应堆被由地震事件监测设备启动的反应堆保护系统自动停堆。控制棒驱动机构将反应堆控制棒插入，终止了反应堆燃料的核链式反应，使反应堆进入停堆状况。

核燃料中热的排出

在 1 号至 3 号机组停堆后，燃料中的放射性物质持续衰变产生的余热通过反应堆冷却系统排出。这维持了第二个基本安全功能。这些冷却系统包括将热转移到海水中的闭合循环回路和以高压和低压将水注入堆芯以排除这些余热的各种手段（见第 2.1 节）。

这些系统中的许多系统需要交流电运行，并且全都需要直流电控制它们的运行。大多数电源都在事故过程中丧失；本报告部分侧重于这种电源丧失的影响。

1 号机组

用于冷却 1 号机组的隔离凝汽器（见资料框 2.2）因反应堆压力容器压力升高信号而自动启动。它在反应堆地震之后停堆时打开了冷凝水回流管上的隔离阀（回流管上的其他隔离阀在正常运行期间处于打开状态）。按照操作程序的要求，操纵员关闭并重启了隔离凝汽器系统若干次，以防止反应堆过快冷却和造成超过反应堆压力容器设计值的热应力。这是通过打开和关闭冷凝水回流管上的隔离阀进行的[8]。

在海啸淹没场址和电源丧失时，操纵员刚刚通过关闭一次安全壳外部回流管上的一个阀门关闭隔离凝汽器系统。操纵员没有隔离凝汽器位置的信息，直到约三个小时后，他们才试图手动重启隔离凝汽器。操纵员没有接受过充分培训，不了解阀门在这些状况下如何工作。他们最终从主控室进行了两次尝试，想通过打开外隔离阀重启隔离凝汽器，但均未成功。操纵员没有手动操作隔离凝汽器的程序。在本报告编写时，隔离凝汽器系统中的所有阀门的准确位置尚不知晓，但有指征表明隔离凝汽器在海啸之后不能正常工作[8]。

由汽轮机运行的高压冷却剂注入系统因直流电丧失而无法使用。

在隔离凝汽器和高压冷却剂注入系统丧失后，需要用依靠低压设备的替代手段将水注入反应堆压力容器，如消防泵或消防车泵提供的手段。操纵员适时准备好了注入路径，但为了能够用低压注水，还必须使用安全卸压阀减少反应堆压力容器内的压力。这些卸压阀却因控制电源和高压气体丧失无法打开。反应堆压力容器内和安全壳内的压力都太高，在不对安全壳进行排气和对反应堆压力容器进行减压的情况下，无法注入足够的水使燃料冷却。其结果是，备用水注入系统不能将水注入反应堆压力容器。

反应堆压力容器内的压力一直居高不下，直到堆芯严重损坏。减压的最可能原因是因熔化所致反应堆压力容器损坏[44]。对减压系破裂所致的假设给予支持的是，在获得堆芯严重损坏的迹象几小时后，安全壳内的压力增加。随之而来的压力降低为在海啸后约 12 小时向反应器压力容器第一次注水提供了条件。但那时，已经发生了显著的燃料破损[8]。

据估计，对反应堆堆芯的损坏发生在海啸后约 4—5 小时，并且熔化的堆芯在海啸后约 6—8 小时熔穿了反应器容器底部。在海啸后约 12 小时，观察到了向环境的放射性释放的最早迹象，在海啸后约 23 个小时，在为了防止 1 号机组安全壳破裂而对其进行排气时，由于压力高而发生了大规模释放。燃料包壳和水之间的化学反应产生了大量的氢，这些氢从反应堆压力容器进入一次安全壳，并进一步泄漏到反应堆厂房中[8]。

2 号机组

2 号机组在排出堆芯余热方面的设计不同。堆芯隔离冷却系统（见资料框 2.2）利用来自反应堆压力容器的蒸汽来驱动将水泵入反应堆压力容器的汽轮机。2 号机组的堆芯隔离冷却系统在厂外电源丧失后被手动启动。为了远程操作该系统，需要有直流电，该系统按设计可运行至少四个小时。但该系统在没有直流电也没有操纵员干预的情况下，在恶劣工况下持续运行了约 68 个小时[8]。该系统将反应堆压力容器内的水位成功地维持在高于燃料的水平，确保了冷却功能。

有迹象表明，在约 68 个小时后，反应堆堆芯隔离冷却系统失灵。因此，由于反应堆压力容器处于高压下，不再能够将水注入其中。反应堆压力容器内的水位估计在堆芯隔离冷却系统停止工作后的几个小时内下降到堆芯上方位置。操纵员依靠替代设备以低压注水，这与对 1 号机组采用的手段相似。在经历最初的一些困难后，他们通过使用安全卸压阀，成功地降低了反应堆压力容器内的压力，虽然注水太迟，没能阻止燃料迅速变热和堆芯损坏。

安全壳排气系统没有成功地缓解 2 号机组的压力。假设这种失效的发生是因为爆破盘没有破裂。据估计，2 号机组堆芯在海啸发生后约 76 个小时开始熔化。正如安全壳内压力的迅速下降所表明的那样，放射性释放始于海啸发生后约 89 个小时，继安全壳边界破裂后[45]。

3 号机组

在 3 号机组，约有两天时间有直流电可用，这与 1 号和 2 号机组的情况形成了对照。这意味着使用蒸汽驱动泵的堆芯隔离冷却和高压冷却剂注入系统可以使用。起初，操纵员能够通过将水注入堆芯隔离冷却系统维持堆芯中的水位。他们按照程序操作，这使他们得以最大程度延长可用于反应堆堆芯隔离冷却系统的电池寿命[8]。

此外，从反应堆压力容器到驰压室的蒸汽卸压可用，并且驰压室内的压力能够利用消防泵提供的喷水进行控制。这种状况持续了 20 个小时，直到反应堆堆芯隔离冷却系统停止和不能再次启动。高压冷却剂注入系统自动开始向反应堆压力容器中注水，以维持水位。

高压冷却剂注入系统的目的是在反应堆冷却剂系统发生泄漏后迅速对反应堆压力容器进行再补水。这种系统对降低反应堆压力容器内的压力非常有效。但这导致了一种情况：水泵汽轮机受到的进汽压力降低到了低于水泵技术规格的水平，这使水泵的效率大幅下降。操纵员在大约 14 个小时后决定关闭该系统，因为他们担心该系统可能失灵并可能开始向安全壳外泄漏放射性物质。

在高压冷却剂注入系统关闭后，操纵员准备了一条通到反应堆压力容器的注水管，并准备将海水注入反应堆压力容器。但由于反应堆内的压力太高，在对反应堆进行减压之前，则无法注入海水。因此，因为迟迟没有将海水注入反应堆压力容器，水

位持续下降到接近燃料上方的位置。评价认为，在操纵员能够以更加可控的方式打开安全阀之前，一个被怀疑是假信号的自动信号触发了安全卸压阀的自动快速减压[46]。估计这一减压加上压力容器内的低水位导致堆芯中剩余的水闪蒸成蒸汽，造成了堆芯充分冷却的丧失。导致堆芯冷却丧失的随后一系列事件与 2 号机组的那些事件相似。

堆芯开始过热，从反应堆压力容器向安全壳泄压室的蒸汽大量排放使压力增加到了导致排气管中的爆破盘破裂的程度，从而打开了一个通向环境的释放路径[8]。3 号机组堆芯的熔化估计是在海啸发生后约 43 个小时开始的。大规模放射性释放是在海啸发生后约 47 个小时开始的[8]。

4 号机组

4 号机组正在进行预定检查，已在事故前停堆。事故发生时，4 号机组的所有燃料都在乏燃料池中。因此，不需要对 4 号机组堆芯进行冷却。由于电源丧失，无法对乏燃料池进行冷却，致使池内温度开始缓慢升高。

乏燃料池

在海啸发生后的头几天中，操纵员认为乏燃料池中有足够的水，燃料过热不是迫在眉睫的问题。这种观点在 3 月 15 日 4 号机组反应堆厂房发生爆炸后改变。当时，认为爆炸的起因是氢气，而 4 号机组中氢气的惟一可能来源被认为是乏燃料池因失去水覆盖导致燃料过热。这立即引起了对乏燃料池中还剩下多少水的关切，并为确定乏燃料池中的水位做出了努力。

3 月 16 日，目视检查表明，4 号机组乏燃料池内仍然有水，但对 3 号机组的状况又产生了关切，这导致进行了各种减缓努力，包括使用直升机进行空中投水。随后的分析和检查表明，3 号和 4 号机组乏燃料池中的水位并没有下降到乏燃料的高度。这些检查证实，4 号机组内的爆炸是氢引起的，氢的来源不是 4 号机组乏燃料池中的燃料，而是氢通过共用排风系统从 3 号机组向 4 号机组的迁移。但仪器仪表丧失所致对乏燃料池中实际状况的缺乏了解导致进行了向池中加水的努力。第 2.1 节详细描述了乏燃料池事件。

5 号和 6 号机组

5 号和 6 号机组也受到了海啸影响，但其反应堆产生的余热较少，这是因为它们已在事故前的很长一段时期被停堆。此外，6 号机组的一台应急柴油发电机在洪水中幸存并能够运行。因此，操纵员有更多的时间作出响应，两台机组的冷却系统都使用这台剩余应急柴油发电机提供动力。这一供电维持了 5 号和 6 号机组堆芯的冷却并最终被用于为 5 号和 6 号机组乏燃料池提供冷却，两台机组都被成功地冷却到安全状态[8]。

放射性废物的密封和放射性释放的控制

由于 1 号至 3 号机组堆芯的损坏，大量蒸汽和氢泄漏出反应堆压力容器。这反过来又增加了一次安全壳内的压力和热量。一次安全壳被破坏，蒸汽、氢气和其他气体连同放射性物质被释放到反应堆厂房中和最终释放到环境中。

这些反应堆的一次安全壳按设计不能承受严重事故可能产生的压力；正因为如此，才于 20 世纪 90 年代安装了排气系统[22、23]，以限制发生事故时安全壳内的压力。有迹象表明，1 号至 3 号机组的一次安全壳在事故演变的各个阶段全都失效。这是一次安全壳内的压力和温度造成的，在能够实施排气前，这些压力和温度上升的水平远远超出了一次安全壳的设计能力（见第 2.1 节）。堆芯中放射性物质的泄漏被驰压池减轻了一部分，因为驰压池滞留了从反应堆压力容器中释放出来的一些放射性核素。

2.2.4. 超设计基准事故的评价和事故管理

在福岛第一核电站许可证审批过程及运行过程开展的安全分析没有充分处理能够导致严重堆芯损坏的复杂事件序列的可能性。特别是，安全分析没能确定电站对洪水的脆弱性和操作程序与事故管理导则中的缺陷。概率论安全评价没有涉及内部水淹的可能性，并且对事故管理有关人的行为的假设持乐观态度。此外，监管机构对于操纵员考虑严重事故的可能性仅施加了有限的要求。

对于海啸所引起的多机组丧失电源和丧失冷却，操纵员的准备不充分。虽然东电公司制订了严重事故管理导则，但这些导则并没有涵盖这种不太可能的事件叠加情况。因此，操纵员没有受到适当的培训，也没有参加相关严重事故演习，而且可供他们使用的设备在恶化后的电站工况中也不合适。

2012 年 9 月，原子力规制委员会成立。该委员会制订了关于核电站的新条例，以保护人员和环境。这些新条例已于 2013 年生效，它们加强了防止由于共同原因同时丧失所有安全功能的对策，包括对地震和海啸等外部事件影响的再评估。还引入了防止堆芯损坏、安全壳损坏和放射性物质弥散的严重事故响应的新对策。

事故发生时，原子能机构已生效的安全标准要求开展评价，以确定是否能够在所有正常运行方式、事故工况和超设计基准事故（包括严重事故）下执行安全功能。需要综合采用概率论方法、确定论方法和合理的工程判断确定可能导致严重事故的重要事件序列[27]。此外，需要开展特定确定性超设计基准事故分析，以调查可用于对事故管理措施实施改进的可信的事故假想情况[41]。因此，有必要确定是否能够在超设计基准事故工况中执行安全功能。

资料框 2.7. 确定论和概率论安全评价[47、48]

安全分析是对在核电厂发生的物理现象的分析评估。对核电厂的确定论安全分析预计对假想始发事件的响应。应用一套特定的规则和验收标准。通常情况下，这些分析的重点应当是中子学、热工水力学、放射学、热力学和结构方面，对这些方面的分析经常利用不同的计算工具进行。

应开展最佳估计的确定论安全分析，以确认由预期运行事件和设计基准事故所致瞬态之后为恢复电厂正常运行工况所制订的战略。这些战略反映在确定应该在此类事件期间将采取的行动的应急操作程序中。确定论安全分析须提供就响应一些事故将采取的操纵员行动作出规定所必要的输入，并且这些分析应当是审查事故管理战略的一个重要因素。在制订恢复战略以确定操纵员采取有效行动可用的时间段时，应根据必要的操纵员行动时间安排进行灵敏度计算，并且可利用这些计算结果来优化程序。

还应进行确定论安全分析，以协助制订应急操作程序不能防止严重事故发生时操纵员应采取的战略。这些分析应被用于确定在事故发展中预期会出现哪些挑战和将发生哪些现象。它们应被用于为制订管理事故和减轻事故后果的一套导则提供基础。

虽然确定论分析可用于核实验收标准被满足情况，但概率论安全评价可以用来确定每道屏障损坏的概率。因而概率论安全评价可能是评估导致屏障损坏的低频率序列所产生风险的合适工具，而确定论分析则适合较高频率的事件。

确定论安全分析在概率论安全评价的执行中可发挥重要作用，因为它们可以提供有关事故假想情况是否会导致裂变产物屏障失效的信息。概率论安全评价“故障树”是可用于确认在所述确定性计算中通常就系统的可用性所作假设的一个有力工具。

概率论安全评价的目标是，确定对设施或活动所产生的辐射危险的所有重要贡献因子，并评估在多大程度上总体设计保持完美平衡并在已规定概率性安全标准的情况满足这些标准。在反应堆安全领域，概率论安全评价采用全面的结构化方法来确定各种故障假想方案。这种分析构成得出风险数值估计的一种概念性数学工具。概率论方法只要有可能就采用现实假设，并为明确解决许多不确定性提供一个框架。概率论方法可以洞察系统的性能可靠性、相互作用和设计弱点、纵深防御应用以及风险，而这些可能无法从确定论分析来导出。

总体安全分析方法的改进已使确定论和概率论方法得到更好的整合。随着模型和数据质量的日益提高，可以在选择事故假想方案中开展更实际的确定论分析和利用概率性信息。目前越来越强调从概率上规定要如何论证遵守确定性安全标准（例如，通过规定置信区间）和如何规定安全裕度。

在开展概率论安全评价中可采用若干种技术。通常的方法是使用“事件树”和“故障树”的组合。“事件树”和“故障树”的相对规模（复杂性）主要是分析的偏好问题，也取决于所使用软件的特性。

“事件树”概述从始发事件开始的事故序列的广泛特征，并根据缓解安全和安全相关系统的成功或失败，导致一个成功的结果，或堆芯损坏，或电厂损坏状况之一（需要进行 2 级概率论安全评价）。“故障树”是用来模拟安全系统和辅助系统执行其安全功能时的故障。

“故障树”应制定用来为“事件树”分析所确定的各种安全系统故障状况提供逻辑失效模型。提供每个安全系统功能的“故障树”顶事件的失效标准应该是事故序列成功标准的逻辑反相。在“故障树”中模拟的基本事件应与组件故障的可得数据相一致。“故障树”模型应根据单个部件（泵、阀、柴油发电机等）的显著故障模式水平和单个人为差错水平来制定，应包括可能直接或与其他基本事件组合导致“故障树”顶事件的所有基本事件。

东电公司于 20 世纪 90 年代初开始进行概率论安全评价以及较重要事故序列的一些确定论安全分析。与当时原子能机构成员国的实践一致，这些概率论安全评价仅限于单机组核电站事件。虽然福岛第一核电站位于有可能发生海啸的地区，但这些分析没有包括由洪水或长时间电源丧失造成的共因故障[8]。对福岛第一核电站的概率论安全评价研究也没有考虑内部水淹或火灾，与操纵员的动作有关的假设是乐观的。

需要开展全面概率论安全评价，包括内部水淹序列，以突出强调例如应急柴油发电机和电气开关等关键电站系统对于水淹的脆弱性。1991 年，在福岛第一核电站 1 号机组一条腐蚀管道以 20 立方米/小时的速率漏水，水通过反应堆应急动力系统房门和电缆贯穿件进入反应堆应急动力系统房间。这一事件表明了地下室中应急柴油发电机和电气开关的位置对于水淹的脆弱性。

还通过有限范围的概率论安全评价研究，评估了福岛第一核电站的事故管理导则。例如，这些评价包括通过应用“故障树”方法模拟设备故障与手动操作的人为失误的可能性，利用安全壳排气系统。但是没有对严重事故管理方面挑战（包括对电站人员提供的有限培训和指导）的彻底评价。没有认识到关于失效可能性的假设过于乐观，没有通过研究对程序和导则进行改进[47]（见“资料框 2.8 事故管理”）。

福岛第一核电站有一些缺陷，而这些缺陷并没有按照原子能机构安全标准的建议利用概率论安全评价进行充分评估[47、49]。例子包括应急柴油发电机、电池室和开关缺乏防水淹保护，以及鉴于电站人员在严重事故管理方面的指导培训和知识有限，严重事故干预成功的可能性低。超设计基准事故没有得到充分考虑，这影响到维持反应堆堆芯冷却的能力、操纵员监测重要安全参数的能力和严重事故工况的管理（见图 2.7）。

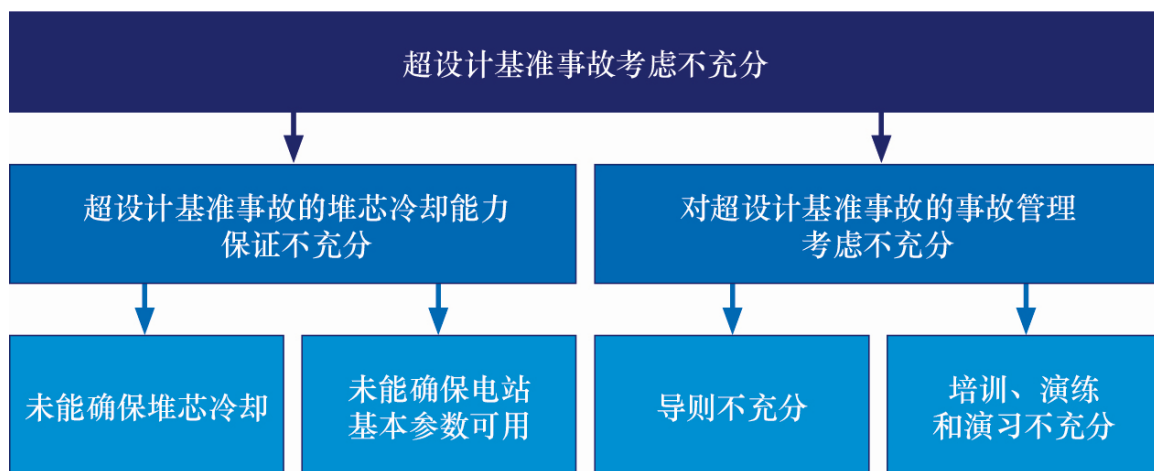


图 2.7. 未充分考虑超设计基准事故，影响到维持反应堆堆芯冷却的能力、操纵员监测重要安全参数的能力和严重事故工况的管理[27、50]。

资料框 2.8. 事故管理[41]

事故管理计划应针对所有电厂制订，无论计算的电厂总堆芯损坏频率和裂变产物释放频率如何。应利用结构化的自上而下的方案制订事故管理导则。这种方案应以目标和战略开始，以程序和准则结束，应既涵盖预防范畴又涵盖减缓范畴。

在顶层，事故管理的目标界定如下：防止堆芯显著损坏；堆芯损坏一旦开始终止其进程；尽可能长时间地维持安全壳的完整性；最大限度地减少放射性物质释放；实现长期稳定状态。为实现这些目标，应制定若干策略。

根据这些策略，应制订适当和有效的事故管理措施。这些措施包括在电厂修改被认为对于管理超设计基准事故和严重事故至关重要的情况下进行的这些修改，以及人员行动。这些措施包括故障设备的修复。应以程序和准则的形式为负责执行事故管理措施的人员制订适当的导则。

在制定事故管理导则时，应考虑电厂利用安全和非安全系统的整个设计能力，包括可能在其设计基准之外可能利用超出其原计划功能和预期运行条件的一些系统。应规定责任和权力将从预防范畴过渡到减缓范畴的那个点，并且该点应以适当确定和以文件记录的标准为基础。

对于电厂配置的任何更改，或者如果物理现象研究的新成果变得可用，应检查对事故管理导则的影响，并在必要时，修订事故管理导则。

监管机构对超设计基准事故的要求范围有限，造成电站操纵员缺乏对相关风险的适当考虑。在 2007 年 6 月开展的一次原子能机构“综合监管评审服务”工作组访问期间突出强调了这一点，这次访问的结论是“对于超设计基准事故的考虑没有任何法律规章，因为日本的电站被认为如预防措施所确保的那样，是充分安全的”[51]。例如，日本的定期安全审查过程没有要求营运组织更新他们的分析，以利用最新的技术[52]。

东电公司事故管理计划假定，福岛第一核电站交流电电源将会立即得到恢复。东电公司还假定，其他重要的公用工程，如直流电电源和高压空气，将在任何时候可用为仪器仪表以及阀门的操作提供电源。该计划和导则没有涵盖严重事故可能会同时影响几台反应堆机组的可能性或因为厂外基础设施受到严重破坏从场址之外获得支持的困难的可能性。这种方案与当时典型的国际实践相一致。这次事故表明，在超设计基准工况下某些系统的运行需要操纵员具有超凡的高水平技能，以维持基本安全功能。

已确定的福岛第一核电站的事故管理导则由可供操纵员使用的一套文件组成，包括应急操作程序和严重事故管理导则。已有可供东电公司应急响应组织技术支持人员使用的事故管理导则。总的来说，这些文件涵盖了对设计基准事故和超设计基准事故（包括严重事故）的各种响应。由于电源丧失和缺少有关电站状况的足够信息，因此，操纵员很难有效地对不断演变的事件作出响应。事故管理导则并未涵盖显示能够使操纵员判定核电站状态的关键参数所必要的仪器仪表丧失的突发事件。此外，该导则没有对当所有安全相关的配电系统和随后许多从属安全系统的设备不可操作时进行事故管理提供建议。

在长时间全厂断电工况下或在信息有限或缺失的情况下如何执行事故管理行动方面，人员没有受到过培训。尽管存在这种情况，操作人员仍然在由事故所造成的恶劣条件下适当地完成了活动。然而，无法获得有关电站状况的基本信息以及需要即刻采取缓解行动，妨碍了响应。在监管框架中缺乏严重事故管理要求也导致东电公司准备不足。日本原子力安全委员会于 1992 年发布一份事故管理导则[23]，同年，通产省（通产省）公布了“事故管理路线图”。通产省还要求核营运组织采取行动，管理比在原设计中考虑的更严重的事故。然而，这不是强制性要求，这导致核营运组织采取的自愿行动有限。2007 年对日本开展的原子能机构“综合监管评审服务”工作组访问建议，有必要对超设计基准事故采取监管要求，并建议原子力安全和保安院继续为考虑此类事件以及补充利用概率论安全评价和严重事故管理制订一个系统方案[51]。这次评审工作组的建议并没有推动这方面的进一步努力。

2.2.5. 监管有效性评价

事故发生之时日本的核安全监管由许多组织进行，他们具有不同的作用和职责以及复杂的相互关系。当时并不完全清楚哪些组织有责任和权力发布关于如何不拖延地对安全问题作出响应的有约束力的指令。

监管检查计划结构僵硬，降低了监管机构适当时验证安全性并确定潜在新的安全问题的能力。

在事故发生时已建立的规章、导则和程序不完全符合一些关键领域的国际实践，特别是在关系到定期安全审查、危害重新评价、严重事故管理和安全文化时尤其如此。

在事故发生之时日本适用的核安全法律框架中，日本政府已制定辅以附属法及部级法令和规章的主要法律。事故发生之时的法律和监管框架一般结构示于图 2.8 和图 2.9。事故发生之时日本的监管结构由多个政府部门及拥有核安全责任的其他组织组成。该结构在 1974 年“陆奥”核动力船发生船上辐射事件和 1999 年东海村日本核燃料转化公司设施发生临界事故后已修改了两次，但涉及作用和职责分工的一些基本问题并没有得到解决[53、54]。2007 年原子能机构“综合监管评审服务”工作组访问建议需要改进、完善和澄清一些监管问题[51]，例如关于处理超设计基准事故和澄清原子力安全和保安院和日本原子力安全委员会在日本监管体系内的作用和职责的监管问题。

通产省负责有关核能开发和利用的政策，以及商业核设施的监管。在通产省内，自然资源和能源厅负责监督国家能源供应，包括促进核能。原子力安全和保安院成立于 2001 年，作为自然资源和能源厅的一个下属专门机构，被委以核安全监管机构的责任。法律要求，在安全与促进之间发生冲突的情况下，通产省大臣将优先考虑安全。通产省在此优先的基础上制定了其国家战略计划，2007 年原子能机构“综合监管评审服务”工作组访问得出结论认为，原子力安全和保安院在其监管决策中是有效独立于

自然资源和能源厅的。不过，该工作组访问还建议，原子力安全和保安院独立于通产省的问题应更明确地体现在立法中。

文部科学省也拥有监管责任，包括监督核电站、研究堆以及某些核电研究和发展设施的辐射防护和核材料保障。文部科学省还主管国家放射线医学综合研究所和日本原子力开发机构。

日本原子力安全委员会设在内阁府，向首相报告，是一个在核监管框架内具有咨询和监督作用的独立机构。它制订和发布原子力安全和保安院在其监管工作中使用的核安全相关政策文件和监管导则。原子力安全委员会根据法律授权可要求原子力安全和保安院提交报告，并监督其工作。它还有自己的工作人员进行核电厂许可证申请的独立审查和评价以及重新确认原子力安全和保安院得出的结论。2007 年原子能机构“综合监管评审服务”工作组访问建议，原子力安全和保安院作为监管机构相对于原子力安全委员会的作用需要澄清。

原子力安全和保安院由日本原子力安全组织提供支持，该组织根据 2002 年通过的一项法律于 2003 年成立[51]。原子力安全组织的主要职能包括开展核设施检查、对许可证持有者定期检查进行评审、提供核应急准备支持和协调安全相关研究项目。一个监管机构需要有一项全面检查计划，以便能够独立确定电厂安全问题。在日本，在事故发生时，尽管原子力安全和保安院作出了努力[56]，但检查结构僵化，类型和频率由法律规定。2011 年，日本根据《核安全公约》提交的报告指出，营运者的安全管理活动受原子力安全和保安院批准的运行安全检查管理。原子力安全和保安院开展季度检查，核实营运者执行定期安全审查情况。原子力安全和保安院与原子力安全组织还每隔不到 13 个月进行定期检查，重点是营运者对核电厂结构、系统和部件的维护情况。定期检查例如集中在属于反应堆停堆系统的安全重要结构、系统和部件；反应堆冷却剂压力边界；余热排出系统和安全壳系统。这些监管程序是除营运者自身的核设施巡查和维护管理、定期安全评价以及与核电厂老化有关的技术评价之外的程序。原子力安全和保安院在法律规定范围之外扩大检查的能力有限，这限制了其找出缺陷和偏差并确保汲取经验教训的能力[51]。这种方法限制了为确定安全问题和验证许可证持有者活动的安全性和遵守要求情况而进行监管检查的有效性。

| 立法 | 内阁令 | 部级条例 | 部级公告 |
|--------------|------------------------|-------------------------|---------------------------------|
| 原子力基本法 | | | |
| 反应堆等规制法 | 关于《反应堆等规制法》的内阁令 | 关于商业动力反应堆的部级条例 | 关于基于商业动力堆规定的剂量限值的部级公告 |
| | | | 关于负责运行的人员之准则的部级公告 |
| | | 关于研发阶段反应堆的部级条例 | 关于工厂或业务场所中核燃料材料等运输的技术细节的部级公告 |
| | | | 关于重要安全相关设备的部级公告 |
| 辐射危害预防法 | 关于《辐射危害预防法》的内阁令 | 关于《辐射危害预防法》的部级条例 | 关于基于研发阶段反应堆规定的剂量限值的部级公告 |
| 电力事业法 | 关于《电力事业法》的内阁令 | 关于《电力事业法》的部级条例 | 关于因与核能发电设施有关的辐射所致剂量当量等技术要求的部级公告 |
| | | 关于制订核能发电设施技术标准的部级条例 | |
| 灾害对策基本法 | | 关于制订发电核燃料材料技术要求的部级条例 | |
| 原子力灾害对策特别措置法 | 关于强化《原子力灾害对策特别措置法》的内阁令 | 关于强化《原子力灾害对策特别措置法》的部级条例 | |

图 2.8. 事故发生之时日本核设施安全的法律和监管框架[55]。

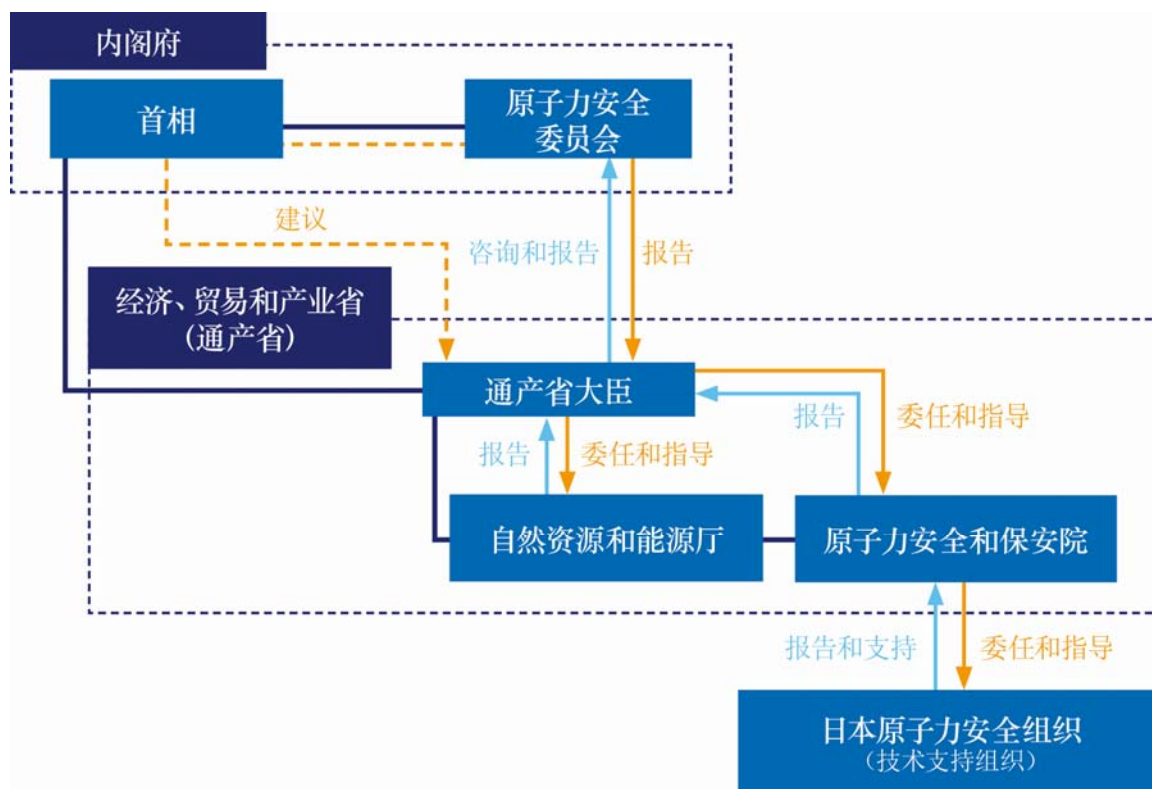


图 2.9. 原子力安全和保安院在日本政府中的位置。

原子力安全委员会出台了一系列导则，这些导则在实践中被视为要求[34]。由专业和学术团体发布的共识标准对这些导则提供了补充。然而，一些关键领域的规章和导则与事故发生时的国际实践并不完全相符。最显著的差异涉及定期安全审查、危害再评价、严重事故管理和安全文化[52、57、58]。

定期安全审查为许可证持有者和监管机构根据新的资料及现行标准和技术重新审查设计和外部危害提供一个正式机制[52]。在日本，2003 年发布的规章要求以 10 年为间隔进行定期安全审查[51]，但这些审查的范围都有限。并且与国际实践不完全符合，因为它们没有要求重新审查外部危害[51、52、58]。

2007 年原子能机构“综合监管评审服务”工作组访问建议，原子力安全和保安院应该能够为制订安全法规作出重大贡献。该工作组还建议，原子力安全和保安院需要能够以灵活的方式修改其检查计划以优化其有效性和重点，并且能够随时自行决定开展场所安全检查[51]。原子能机构“综合监管评审服务”工作组访问还建议，原子力安全和保安院应促进与核工业界和营运组织的坦诚和开放关系，以便向管理层直接传达监管关切。

新监管当局的建立

2012 年 9 月，原子力规制委员会成立[59]。原子力规制委员会开展了安全导则和监管要求的审查，以期制订保护人类和环境的新规章。2013 年，有关核电站的新的监

管要求生效。基于纵深防御概念，重点强调了第三层和第四层以及防止由于共同原因同时丧失所有安全功能。重新评价了有关地震、海啸以及火山喷发、龙卷风和森林火灾等其他外部事件的影响的以往假设，并考虑了针对这些外部事件的核安全对策。还考虑了防止内部火灾和内部水淹的对策以及提高厂内和厂外电源应对全厂断电可能性的稳定性。

此外，还需要防止堆芯损坏、安全壳损坏和放射性物质弥散的严重事故响应对策，强化乏燃料池注水措施，飞机坠毁对策，以及建设应急响应大楼。

福岛第一核电站事故背景下新的监管要求的例子包括：(1) 强化了抗震/抗海啸的要求；(2) 强化或新推出了设计基准的要求；(3) 新推出了防止严重事故的措施要求[60]。

将以前分配给不同政府机构的作用和职责整合到原子力规制委员会中。原子力规制委员会拥有对国家放射线医学综合研究所和日本原子力开发机构一些活动的管辖权。主要核安全技术支持组织日本原子力安全组织于 2014 年 3 月 1 日与原子力规制委员会合并。

原子力规制委员会采用了于 2013 年 12 月实施的与原子能机构安全标准相一致的定期安全审议过程。该制度要求核动力堆许可证持有者全面评估反应堆的安全性并在定期检查结束后的六个月内将结果提交原子力规制委员会，并在其中说明：

- 遵守监管要求的情况；
- 自愿改进安全的措施；
- 促进改进的安全裕度评价和审查以及概率风险评价；
- 基于上述结果和改进安全的行动计划进行的全面再评估。

日本请求原子能机构在 2015 年底开展一次“综合监管评审服务”工作组访问，目的是加强核安全，并通过持续、透明和开放的学习过程提高原子力规制委员会作为独立核监管机构的能力。

2.2.6. 人的因素和组织因素的评价

在事故之前，日本存在的一个基本假设是，核电站的设计以及已经建立的安全措施是足够强健的，能够承受具有低概率和严重后果的外部事件。

因为日本核电站是安全的这一基本假设，所以有关组织及其工作人员往往不会对安全水平提出挑战。在利益相关者中强化关于核电站技术设计坚固性的基本假设，导致安全改进没有被及时引入的情况。

福岛第一核电站事故表明，为更好地查明电厂的漏洞，有必要采取考虑人、组织和技术之间复杂相互作用的综合方案。

在事故之前，对仍未被发现的具有低概率、严重后果的外部事件没有充分考虑。其部分原因是日本的基本假设在过去的几十年中已被加强，即核电站技术设计的坚固性将提供足够的假定风险保护。因此，导致了福岛第一核电站事故的事件并不在营运组织、监管机构和政府的基本假设边界范围之内。这些基本假设影响了广大利益相关者的决策和行动，这些利益相关者不局限于那些直接参与核电站运行和监管的组织。

资料框 2.9. 安全文化

在国际核安全组出版物 INSAG-4 号文件中，安全文化被定义为：“在组织和个人中建立将核电厂安全问题因其重要性而作为最高优先事项予以重视的特性和态度的总合” [61]。

原子能机构《安全标准丛书》第 GS-G-3.5 号[62]和《安全报告丛书》第 11 号[63]明确阐述，安全文化本身就是整个组织文化的一个子集，整个组织文化包括赋予该组织具体特性的共同价值观、态度和行为模式的组合。

组织在发展和加强安全文化中通常历经一些阶段。《安全报告丛书》第 11 号确定了三个阶段：

(1) 安全是合规性驱动的，主要是基于规则和条例。在这一阶段，安全被看作是一个技术问题，符合外部施加的规则和条例被认为是适合安全的。

(2) 良好的安全实绩应成为一项组织目标，并主要根据安全指标或目标来处理。

(3) 安全被看作是一个持续的改进过程，每个人都能够为这一过程作出贡献。

在现实中，这三个阶段不是可明显区分的，在加强安全文化的过程中，任何组织都有可能先做某些部分，然后再做其它部分。

基本假设影响了原子力安全和保安院，使之不能行使充分的权力，因此，原子力安全和保安院未能对有关核安全的其他假设提出质疑。因为缺乏适当的监管框架以及明确的法律约束，故抑制了其履行监督职能[6、51]。例如，2007 年原子能机构“综合监管评审服务”工作组发现，虽然原子力安全和保安院检查人员没有不受阻碍地进入许可证持有者设施进行检查，但只被允许在特定的时间进行检查。由于以下基本假设，即技术设计的坚固性将提供对假定风险的足够保护，原子力安全和保安院的通常工作缺乏综合性和主动性，在某些情况下，集中在短期活动，并没有涉及更基本的和长期的问题，如对原子能机构安全标准的考虑和应用。在一些情况下，没有对法规进行更新或没有开展复杂的应急演练，因为担心公众可能会得到这样的印象，即与基本假设相反，核电站是不安全的[5]。

核电站是安全的这一基本假设也影响了东电公司的行动，使之相信其核电站的技术特性有能力避免严重核事故。这意味着，东电公司没有对减轻 2011 年 3 月的事故作好充分准备[6、7、65]。引发核事故的水淹风险不在基本假设范围之内，因此，有关严重事故管理的最新国际导则没有始终得到遵循[66]。基本假设还将能够导致多台机组全厂断电的共因故障的可能性排除在外。

有关组织及其工作人员没有挑战或重新审视有关核安全的基本假设的事实说明了

安全文化的缺失。正如资料框 2.9 所确定的，安全文化计划的第三阶段确定了建立一个持续改进过程的必要性，这个过程应包括定期重新审查核安全的充分性。一种具有挑战性的基本假设方式是采取系统性的核安全方案，了解人的因素、组织因素和技术因素之间各种相互作用的复杂性。没有充分处理这些相互作用是造成事故的因素之一，因为基本假设仍然未被发现。

资料框 2.10. 基本假设[64]

为了解安全文化的全部内容，必须确定形成其所适用于安全文化概念三个层面的人工制品与行为、信奉的价值观和基本假设。这三个层面模型在特定组织的应用将反映该组织的唯一性，并使得人工制品、信奉的价值观和基本假设之间的逻辑联系成为可能。逻辑联系在以下示出的说明例子中将不明显，因为它们不是从任何特定组织导出的。

人工制品是最容易看到的，但是它们的意义是最难以解释的。了解信奉的价值观，将有助于理解它们的意义，但这只有在理解基本假设时，人工制品层次的基本内容的意义才会变得显而易见。

人工制品和行为：建构、问候礼仪、着装、谈吐方式 — 明显可见；

信奉的价值观：战略、目标、理念 — 可查明；

基本假设：人的本性、人们受到尊重的基础 — 无意识地保持并且通常是默示的。

基本假设处于文化的最深层次。它们是文化群体中多数人并非有意识地赞同而被当成理所当然的基本信念。要理解任何一种文化，则有必要发掘这些正在运用的基本假设。就一个组织而言，这些假设也将反映其历史以及使组织取得成功的创始人和主要领导人的价值观、信仰和假设。基本假设很少被讨论和质疑，是极其难以改变的。

资料框 2.11. 系统性安全方案[67]

系统性安全方案通过考虑系统的所有相关因素内部和相互之间的动态相互作用来解决整个系统问题，这些因素包括个人因素（如知识、思想、决定、行动）、技术因素（如技术、工具、设备）和组织因素（如管理系统、组织结构、治理、资源）。

系统性安全方案通过整体上解决这一复杂的相互作用的系统而运作。例如，在核电厂的这些相互作用中要考虑的重要因素中包括那些与个人有关的因素，如知识、决定、思想、情感和行动。技术因素包括核电厂的实体方面和用于运行的各种技术工具和设备。组织因素包括管理系统、组织结构、电厂治理以及人力和财政资源。考虑所有的个人因素、技术因素和组织因素之间的相互作用，可揭示核电厂运行的复杂性和非线性。有必要更好地研究所有这些因素的弱点和长处相互影响的方式，以期以前瞻性的方式减少或消除风险。

绝大多数利益相关者倾向于不对核电站现有安全特性的充分性提出质疑是因为他们认为，加强了有关核电站技术设计的坚固性和现有安全措施将足以保护电站的假设。这导致没能主动并及时做出必要的安全改进[5—7]。

在事故早期直接作出响应的操纵员在极端情况下便是如此。他们时常得不到有关家人安全或家里状况的消息，进一步加重了与其行动有关的焦虑和压力。现场每个人

不知道事故会如何演变，这造成了显著的不确定性；尽管这样，他们仍尽其所能来保护人员和环境。操纵员面对的情况是前所未有的——在基础设施遭到严重破坏的一场国家危机中管理一起多机组事故。这从身体和心理角度都造成了极其恶劣的工作环境。

所有利益相关者组织之间和每个组织内部不同层面之间的人的因素、组织因素和技术因素的相互作用发生在组织更广泛的安全文化范围，并以这种方式反映该组织的安全文化。采用系统性安全方案分析人的因素、组织因素和技术因素，能够使一个组织为突发事件做更好的准备。核安全也将取决于人的态度和行为[67]。导致有关安全之基本假设不被挑战的人的因素和组织因素可能导致组织和个人采取可能会无意中危及核安全的决定和执行这种行动。牢记这种基本假设并努力了解它们对核安全的影响颇为重要。

2.3. 意见和教训

作为对事故的核安全考虑因素的评价结果，汇编了一些意见和教训。

- 一 对自然危害的评价需要足够保守。在建立核电站设计基准过程中，对主要历史数据的考虑对于表征外部自然危害的风险是不充分的。即便可以获得全面的数据，由于相对短的观察期，在预测自然危害方面仍然存在很大的不确定性。

具有低发生概率的极端自然事件能够导致严重的后果。对极端自然事件的预测仍然很难，而且由于不确定性的存在也有争议。此外，随着可以获得更多资料和分析方法的改进，这种预测可能会在核电厂寿期内发生改变。因此，必须利用所有相关的国内和国外可得数据确保可靠地预测各种危害、确定防范自然极端事件的可靠和现实的设计基准并给核电厂的设计提供充分的安全裕度。

- 一 需要定期对核电厂的安全进行重新评价，以考虑知识的进步、必要的纠正行动或需要立即实施的补偿措施。

福岛第一核电站定期安全评审计划并未导致基于监管要求的安全升级。考虑到知识的进步，包括新的资料和数据，东电公司自愿进行了重新评价。当面对超过以往预测的经修订的危害估计时，重要的是在评价经修订值的准确性的同时，通过按照新危害估计实施临时纠正行动来确保装置的安全。如果新危害估计的准确性得到确认，营运组织和监管当局则需要商定时间安排和全面行动计划，立即解决处理这类更大危害的方法，以确保电厂安全。

- 一 对自然危害的评价需要考虑其同时或顺序合并发生的可能性及其对核电厂的综合影响。对自然危害的评价还需要考虑其对一个核电厂多个机组的影响。

福岛第一核电站事故证明有必要充分调查影响一个核电厂多个机组的自然危害合并发生的可能性。在考虑减轻事故的措施和恢复行动时，需要考虑到自然危害合并发生所导致的复杂假想情况。

- **运行经验计划需要包括国内和国际两方面来源的经验。需要迅速落实通过运行经验计划确定的安全改进。需要定期和独立地对利用运行经验的情况进行评价。**

福岛第一核电站运行经验评价计划并未导致考虑涉及水淹的国内和国际两方面经验的设计变更。运行经验审查需要成为电厂监督过程的一个标准组成部分，并考虑原子能机构和经合组织核能机构的“事件报告系统”等相关来源。监管机构需要对国家和国际运行经验进行独立审查，以确认营运组织正在采取改进安全的具体行动。

- **纵深防御概念依然有效，但需要通过适当的独立性、冗余度、多元化和防范内外部危害在所有层级上加强该概念的实施。需要不仅注重预防事故，而且也注重改进缓解措施。**

海啸引发的洪水同时危及到纵深防御的前三个防护层，导致设备和系统发生共因故障。即便在面对这种情况时，操纵员也能够适用有效的缓解战略，尽管有些滞后。应当通过适当的独立性、冗余度、多元化和保护加强与既预防又缓解事故有关的纵深防御的所有层级，以便它们不会同时受到外部或内部危害的挑战，也不易发生共因故障。在核电厂寿期内，需要对纵深防御概念的适用进行定期重新审查，以确保对外部事件漏洞的任何修改得到理解，并确保作出和实施对设计的适当修改。就此而言，需要在定期安全评审中处理极端外部危害，因为这类危害能够导致可能同时损害好几个层级纵深防御的共因故障。

- **在超设计基准事故期间必要的仪器仪表和控制系统需要保持可运行，以便监测电厂基本安全参数和为电厂运行提供便利。**

福岛第一核电站事故期间仪器仪表和控制的失灵几乎没有给操纵员提供电站实际工况的指示。仪器仪表和控制系统的失灵对预防严重事故或缓解其后果的工作具有严重的影响。需要根据电站包括乏燃料池的设计特征，审慎确定必要的仪器仪表和控制系统的程度和性质。需要时对这些系统进行保护，以确保其在需要时的可用性。这还证明了改进采取手动行动控制关键设备之战略的必要性。

- **需要为排出余热提供能够既按设计基准又在超设计基准工况运行的稳固和可靠的冷却系统。**

在福岛第一核电站，操纵员在有些延误后最终能够部署便携式设备向反应堆注水。需要对基于固定设备或便携设备的冷却系统进行合格认证和测试，以确保它们能够运行和能够由操纵员在需要时进行部署。

- **需要确保对超设计基准事故的密封功能，以防止放射性物质向环境的大量释放。**

在福岛第一核电站，安全壳排气失灵和随后因氢爆炸所致反应堆厂房损坏导致了放射性物质向环境的大量释放。需要对密封功能进行评价，以确保在拟用于维持密封系统完整性的设备的设计中考虑所有可能的危害。

- **需要进行全面的概率安全分析和确定性安全分析，以确认电厂承受适用的超设计基准事故的能力，并提供电厂设计坚固性的高置信度。**

可利用安全分析评价和制定对超设计基准事故的响应战略，而且可包括使用确定性方法和概率论方法。对福岛第一核电站开展的概率安全评价研究具有有限的范围，没有考虑从内部和外部两种来源发生水淹的可能性。这些研究的局限性导致了操纵员在可利用的事故管理程序方面的范围有限。

- **需要对事故管理规定措施进行全面、充分的设计和保持更新。这些规定措施需要在一整套始发事件和电厂工况的基础上得出，并且还需要考虑影响多机组电厂中若干机组的事故。**

福岛第一核电站操纵员可利用的事故管理程序既没有考虑多机组事故的可能性，也没有针对电源完全丧失提供导则。事故管理规定措施需要以利用确定性方法和概率论方法相结合开展的电厂特定分析为基础。事故管理导则和程序需要考虑可能在若干机组同时发生的事件和在乏燃料池发生的事件，还需要考虑包括通讯、运输和公用工程设施严重缺失在内的地区基础设施中断的可能性。事故管理规定措施还应当考虑从国际社会可获得的最佳导则，并进行定期更新以虑及新情况。

- **培训、演习和演练需要包括假想严重事故工况，以确保操纵员尽可能做好充分准备。它们需要包括模拟使用在严重事故管理中部署的实际设备。**

没有对福岛第一核电站操纵员进行过如何手动操作 1 号机组的隔离凝汽器等系统和作为低压注水的一个备用源的消防车方面的培训。需要特别关注对人员进行在长时间失去所有电源而且有关电厂状况的信息有限并也没有任何关于重要安全参数信息的工况下开展行动方面的培训。工作人员培训、演习和演练需要实际模拟严重事故的演进，包括同一厂址中若干机组同时发生事故的情况。培训、演习和演练需要不仅涉及厂内事故管理人员，而且还涉及营运组织、地方、地区和国家一级的所有厂外响应人员。

- 一 为了确保对核装置的安全进行有效的监管监督，监管机构必须独立并具有法律授权、技术能力和强健的安全文化。

原子力安全和保安院没有充分的权力采取必要的行动，包括在受监管设施进行视察。至关重要的是监管机构能够就装置寿期内的安全作出独立决定。为了确保这种独立决策，监管机构必须有能力而且必须拥有充分的人力资源、适当的法律授权 — 包括中止运行和（或）对营运组织强制实施安全方面改进的权力，以及适当的财政资源。监管机构需要具有根据新的安全信息调整其视察计划的权力。监管机构还必须能够确保根据科学技术发展、运行经验和国际标准与实践，对国家有关评价核装置安全的监管要求和相应导则进行定期修订。

- 一 为了促进和加强安全文化，个人和组织需要持续挑战或重新审查有关核安全的现行假设和可能影响核安全的决定和行动的影响。

这可通过个人和组织接受对旨在确定其有关核安全的共同假设的性质、边界和潜在威胁的质疑态度来实现。将组织内和不同组织间关于核安全相关问题及其对决策和行动的意义和影响的经常性对话制度化是非常重要的。定期评价安全文化有助于促进就基本假设进行思考和对话。

- 一 系统性安全方案需要考虑人、组织和技术因素之间的相互作用。在核装置整个寿期期间需要考虑这种方案。

福岛第一核电站的事故表明，确定涉及人、组织和技术之间复杂相互作用的系统中的薄弱环节很困难，因为有关核安全的基本假设可能仍然没有被觉察到。包括人、技术和组织考虑因素的系统性方案对了解整个系统的各部件在正常运行和事故工况中如何运作和相互作用是颇为必要的。

3. 应急准备和响应

本部分叙述 2011 年 3 月 11 日事故伊始的关键事件和响应行动。它还考虑了事故前日本已有的国家应急准备和响应系统以及国际应急准备和响应框架。

资料框 3.1 概述了事故前存在的对核应急响应准备工作的关键国际要求。

资料框 3.1. 事故前原子能机构安全标准中对核应急响应准备工作的主要要求

事故前有效的原子能机构安全标准[68、69]有如下要求：(1) 将“全危险方案”用于准备和响应安排制订工作⁶³；(2) 在可观察到的状况和可测量的标准的基础上制订紧急情况分级系统（应急行动水平），并在营运者对紧急情况分级之后立即启动对（各预定区域的）公众预定的紧急防护行动；(3) 建立适用于所有可能的紧急情况（包括概率小的应急情况）的应急区；(4) 建立在各应急区内以及必要时在应急区外实施防护行动的安排；(5) 制订国家标准，以供就公众防护行动（撤离、隐避、碘甲状腺阻断、避迁、限制食品和饮用水消费和分配、公众监测和去污）做出剂量和可测量方面的决定（行动干预水平），同时考虑一系列因素（如金融和社会方面）；(6) 做出实施辐射监测以及环境取样和评价的安排，以便及时发现新的危险和完善响应战略；(7) 在准备阶段确定各应急区内需要对其做好具体安排的特殊人群（如残疾人、医院病人）；(8) 建立适用于应急工作人员的各项安排，包括设定适用于不同类型任务的剂量标准，指定应急工作人员并确保其受到防护，制订用于管理、控制和记录其剂量的导则，并提供专业的防护设备、程序和培训；(9) 对从应急阶段向长期恢复运行并恢复正常的社会和经济活动的过渡做出规划，其中包括明确划分责任、共享和传播信息、评价后果、就取消应急期间规定的限制和其他安排建立正式决策过程、制订相关原则和标准以及向公众提供咨询；(10) 作为应急计划的一部分，明确划分各级对应急准备和响应的作用、职责和权限；(11) 建立营运组织和响应组织之间的组织关系和接口，并制订协调各级应急响应的操作规程；(12) 在已进行的危险评估的基础上制订和协调各级应急计划和程序；(13) 准备通过提供工具、仪器、用品、设备、通讯系统、专用功能设施和文件的方式提供后勤支持，包括在应急响应中对处于假想放射工况、工作条件 and 环境条件下这些物项和设施的可操作性和可用性做出规划；(14) 规划和开展培训、演练和演习；以及 (15) 制订质量保证计划，以确保所有用品、设备、通讯系统、设施和文件等不断保持更新、可用且功能适于在紧急情况下使用。

资料框 3.2 概述了核应急防护行动的类型。

⁶³ “安排”——一整套所需的基础结构要素，它能够提供为执行响应核或辐射应急所要求的规定职能或任务的能力。这些要素可包括权限和职责、组织、协调、人员、计划、程序、设施、设备和培训。

资料框 3.2. 核应急防护行动的类型[48、69]

“缓解行动”系指即时采取的行动，目的是减少导致需要在厂内或厂外采取应急响应行动的照射或放射性物质释放情况发展的可能性，或缓解可能导致需要在厂内或厂外采取应急响应行动的照射或放射性物质释放的电厂状况。

“紧急防护行动”系指必须能迅速（通常数小时内）有效采取的行动。核应急中最常见的紧急防护行动是撤离、隐避、碘甲状腺阻断、限制食用可能受到污染的食物和个人去污。

“早期保护行动”系指必须在数天或数周内能有效采取的行动。它们可以是持久的，甚至持续到紧急情况终止之后。与紧急防护行动不同的是，通常可以将这些行动建立在考虑放射性物质释放及其在环境中散布的具体性质的监测结果的基础上。早期防护行动的例子包括避迁、限制食品和饮用水以及农业控制。

3.1. 日本对事故的初期响应

在事故发生时，就做出了在国家一级和地方一级开展核应急和自然灾害响应的不同安排。对同时发生的核应急和自然灾害没有作出协调一致的响应安排。

核应急响应安排设想，在探测到核电站出现的相关不利工况（如所有交流电供应中断五分钟以上或所有反应堆冷却能力丧失）后，电站将向地方政府和国家政府进行通报。国家政府随后将评估和确定该情况是否应被归类为“核应急”⁶⁴。如果情况被归类为“核应急”，将在国家层面发出核应急通告，并将在剂量预测的基础上就必要的防护行动做出决定。

根据福岛第一核电站的一份报告，国家政府于3月11日晚宣布核应急并发布了公众防护行动令。国家一级的响应是在首相以及东京首相府高级官员的领导下进行的。

地震和海啸的后果以及辐射水平的升高使得厂内响应极为困难。交、直流电源丧失、阻碍厂内响应措施的大量瓦砾的存在、余震、进一步海啸的警报以及辐射水平的上升意味着许多缓解行动都无法及时进行。国家政府参与了现场缓解行动的决策。

由于地震和海啸造成广泛的基础设施损坏，距离福岛第一核电站五公里的“厂外应急中心”的启动工作非常艰难。在几天之内，由于不利的辐射状况，该厂外中心也必须开始进行撤离。

⁶⁴ 《原子力灾害对策特别措置法》，经2006年第118号法令修订的1999年第156号法令，以下称《原子力灾害法》。

《灾害对策基本法》[70]和《原子力灾害对策特别措置法》[19]对日本国家应急准备和响应系统的主要法律依据做了规定（资料框 3.3）。

资料框 3.3. 在事故发生时对日本国家核应急准备和响应系统做出规定的重要文件

| 国家法律依据 | | | |
|-----------|-----------------|------------------|-------------|
| 灾害对策基本法* | | 原子力灾害对策特别措置法 | |
| 国家规划依据 | | | |
| 基本灾害管理计划* | 原子力灾害对策特别措置法施行令 | 原子力灾害对策特别措置法施行规则 | 核设施应急准备监管指南 |
| 业务计划和手册 | | | |
| 国家 | 灾害管理业务计划* | 核应急响应手册 | |
| 县/市/镇/村 | 县/市/镇/村灾害管理计划* | 县/市/镇/村核手册 | |
| 营运者 | 核营运者应急行动计划 | 核营运者应急响应手册 | |

*这些文件论述各类灾害，包括核应急。

3.1.1. 通报

根据《原子力灾害法》第 10 条[19]，核电站必须在发生某些预定“特定事件”如所有交流电源发生故障五分钟以上时向地方政府和国家政府进行通报[55]。根据该法第 15 条，要在符合或超过某些预定标准如所有反应堆冷却能力丧失时发送“核应急”报告[21、71]。

所作的假设是，在第 15 条规定的事件报告之后要发出第 10 条规定的事件通报[72]。通报将引起国家政府对相关事件是否为“核应急”做出评估和判断。如果被判定为属于这种情况，要向首相作简报并向其提交一份“核应急”通告草案。首相将负责决定宣布“核应急”，并负责发布对公众的防护行动命令⁶⁵和（或）建议[73]。

图 3.1 [19、70、73—75]概述了在事件属于《原子力灾害法》第 10 条和（或）第 15 条所规定者的情况下拟采取的关键行动。

⁶⁵ 《原子力灾害法》[19]和《灾害对策基本法》[70]对启动防护行动使用了“指令”和“建议”这两个术语。“指令”具有强制性，因此，公众必须遵守。“建议”只是一个提议，因此，不具有强制性。然而，为明晰起见，本报告采用“命令”一词作为“指令”的等效词。

淹没了福岛第一核电站的海啸波于 2011 年 3 月 11 日 15 时 36 分抵达[10]。电站根据《原子力灾害法》第 10 条[19]于 3 月 11 日 15 时 42 分向国家政府和地方政府发出了 1 号至 5 号机组“特定事件”的通报，并随后于 16 时 45 分发送了关于 1 号和 2 号机组发生的事件被归类为该法第 15 条[3、8、76、77]规定的“核应急”的报告。

根据《原子力灾害法》第 10 条报告的“特定事件”的类型为 1 号至 5 号机组“全厂断电”[76]。根据第 15 条作为“核应急”报告的事件类型最初为 1 号和 2 号机组“堆芯应急冷却系统无注水能力”[77]。收到通报后，国家政府对情况作了评估，并判断该情况属于“核应急”[6]。

首相于 19 时 03 分发布核应急通告。这已经是在收到福岛第一核电站发出的关于 1 号和 2 号机组发生的事件经厂外官员长时间讨论被归类为该法第 15 条规定的“核应急”的通报两个小时之后[3]。

3.1.2. 缓解行动

大约在地震发生后 15 分钟，按照东电公司的《救灾手册》，在福岛第一核电站成立了以电站负责人为首的应急响应中心[6、8]。该中心设在隔震建筑内，其中配备了特殊的功能，包括独立电源和带过滤装置的通风系统。该建筑是由于从 2007 年新泻县中越冲地震后柏崎-刈羽核电站的经验中汲取教训的结果而修建的⁶⁶，它的使用使得能够在本次事故期间在现场继续进行缓解行动[8]。

事故之前所作安排的设想是，在需要的情况下，现场应急响应中心将请求东电公司总部利用东电公司的能力或从其他核营运组织聚集的资源通过《日本核电运营商之间的合作协议》[8、75]提供支持。

在福岛第一核电站发出请求后，调动了来自日本（非由东电公司运营的）其他核电站的更多工作人员和设备，以便对现场应急响应提供支持。然而，除了前期规划不足外，地震和海啸对交通基础设施造成的广泛损毁破坏了这种支持的有效性。例如，在对设备的请求未包含对所需设备适当的技术规格的情况下，结果导致所采购的设备（由于不匹配的接头、连接器等）而与现有电站设备不兼容[8]。

⁶⁶ 该建筑物于 2009 年 3 月开始施工，并于 2010 年 7 月投入使用。

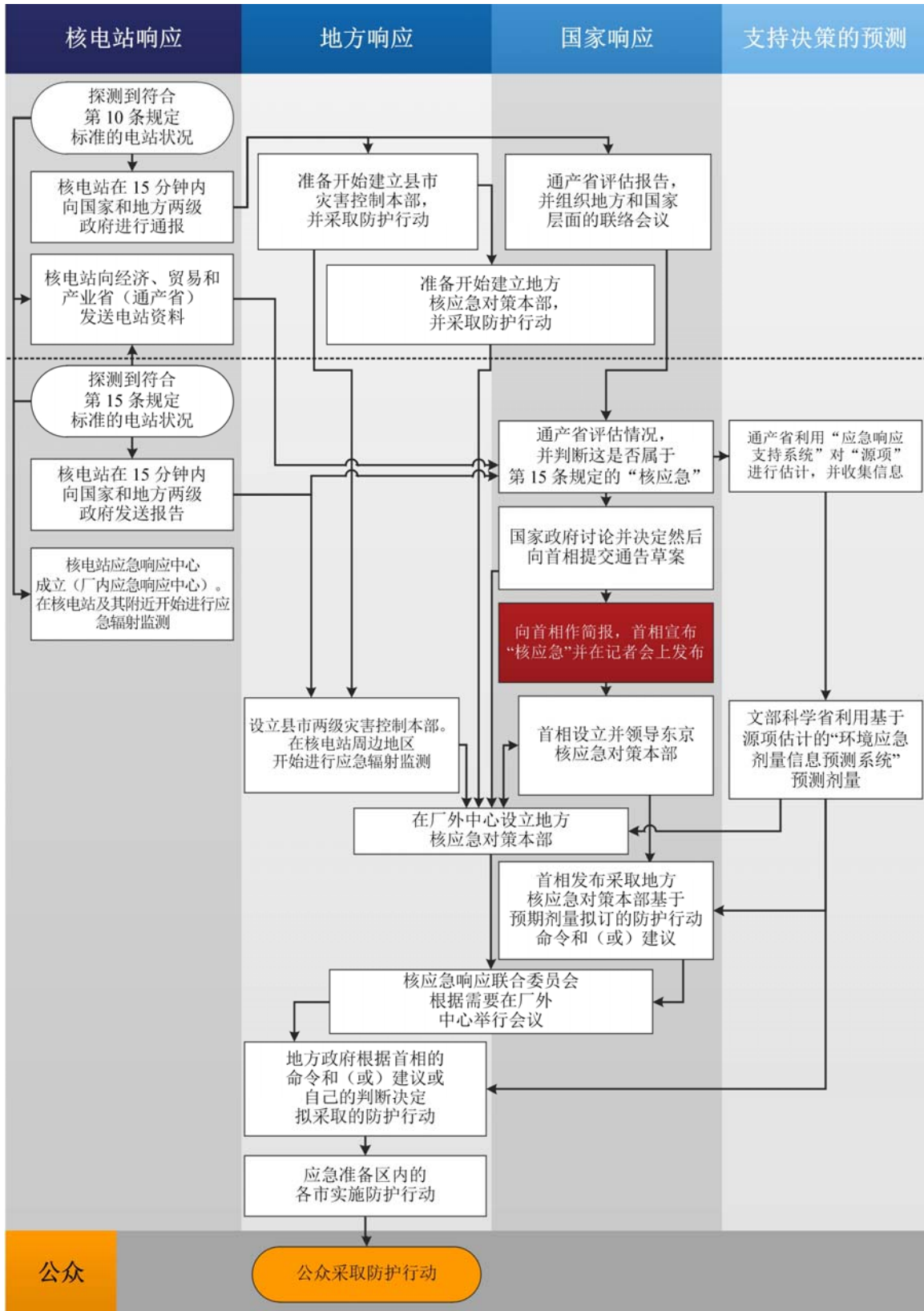


图 3.1. 事故前规划的在事件属于《原子力灾害法》第 10 条和（或）第 15 条所规定者的情况下的关键行动（根据参考文献[19、70、73—75]）。

在应急响应过程中，东电公司、承包商和日本（非由东电公司运营的）其它核电站的工作人员被派往现场协助执行各种任务，包括恢复电力和监测仪器、向反应堆注入冷却水、移除瓦砾和监控辐射水平[8]。国家政府机构和组织的人员如日本自卫队、警察和消防员也被派往现场。他们帮助开展了各种活动，其中包括操作所需的大型设备将水灌注或喷射到1号、3号和4号机组乏燃料池，并提供了对乏燃料池状态的直升机监视[3、6、8]。

地震和海啸造成了交、直流电源丧失和大量的瓦砾。还有余震和可能进一步发生海啸的警报。由于这些因素以及辐射水平上升和氢气爆炸，同时还由于缺乏周详的安排，致使响应工作极其困难，许多缓解行动无法及时进行[8]。现场工作人员在极为艰难的环境下进行了缓解行动，而且长时间不间断地并在远比一般预期更疲劳的情况下开展了工作[8]。

国家政府参与了缓解行动的决策，如注入海水进行燃料冷却[6、7]。在准备阶段尚未明确划分这方面的作用、职责和权限。

3.1.3. 应急管理

事故发生时已有的国家应急准备和响应系统的设想是，管理核应急的核心实体将是：核应急对策本部⁶⁷及其秘书处⁶⁸，以及地方核应急对策本部⁶⁹。核应急对策本部将指导和协调国家的响应工作，其中应包括拟订和向地方政府发出人员撤离的命令和（或）建议[19]。

对于地方一级的国家响应工作，核应急响应的整体管理应尽快由设在离福岛第一核电站五公里厂外中心的地方核应急对策本部进行协调。县级核应急对策本部和核应急响应联合委员会也计划设在厂外中心[73、74、78]。

就县级核应急响应而言，计划是由县级核应急对策本部和福岛县灾害控制本部协调县一级的活动。核应急响应联合委员会将在地方一级的国家响应与县级响应之间进行协调[19、73、74]。

对在国家一级和地方一级开展核应急和自然灾害响应做出了不同的安排。这些安排并没有设想需要对同时发生的核应急和自然灾害作出响应[74、78]。

⁶⁷ 核应急对策本部应由首相从内阁官房和指定行政机关的官员中任命的人员组成[19]。首相应担任核应急对策本部的干事长，核应急对策本部计划设在首相府内（见图3.2）。

⁶⁸ 秘书处将配备各主要组织的代表作为工作人员，并由经济、贸易和产业省（通产省）下属的原子力安全和保安院的干事长领导。它计划设在通产省大楼通产省/原子力安全和保安院应急响应中心（见图3.2）。

⁶⁹ 地方核应急对策本部将配备所有相关组织的人员作为工作人员，并由通产省资深副大臣担任干事长。它计划设在厂外中心（见图3.2）。

事故前规划的管理核应急响应的核心实体所在位置如图 3.2 所示。



图 3.2. 参与管理核应急响应的核心实体所在位置⁷⁰。

2011年3月11日14时50分，内阁危机管理监在首相府内设立了处理地震事务的紧急对策室。15点14分，国家政府在首相府内设立了东京紧急灾害对策本部，由首相担任本部干事长。16时36分，内阁危机管理监在首相府内设立了处理核事故的紧急对策室[6]。

2011年3月11日19点03分，在发布核应急通告的同时，国家政府设立了核应急对策本部[3]。

由于事故发展如此之快，核应急对策本部的会议没有时间进行详细讨论。首相以

⁷⁰ 根据参考文献[7、8、73、74、79—91]。

及首相府的高级官员组成了应急响应核心小组。在没有核应急对策本部官房的参与下，首相向各地方政府发布了撤离令[7]。

作为营运组织和政府响应组织统一的总部，2011年3月15日在东京东电公司设立了政府与东电公司统一对策室[6]，以确保在国家层面及时共享信息。

在地方一级，地震和海啸造成的大面积损坏导致厂外中心的启动作业困难重重[92]。其结果是，地方核应急对策本部和应该从厂外中心开展工作的其他实体（核应急响应联合委员会和县级核应急对策本部）无法履行自己的职责。2011年3月15日，由于辐射状况日益恶化⁷¹，开始有必要撤离厂外中心，并将其避迁到位于离福岛第一核电站约60公里处的福岛县公会堂[6、92]。该设施没有与厂外中心相当的能力，这一情况造成了例如在相关部门之间实时共享信息方面的诸多困难。

就县级响应而言，作为为应对地震和海啸而设立的组织结构的一部分，在福岛县灾害控制本部成立了一个新的“核小分队”⁷²，以便协调县级活动[7]。

3.2. 保护应急工作人员

在事故发生时，尽管日本的国家法律和导则涉及了应为保护应急工作人员⁷³采取的措施，但它们只是一般性的而不是充分详细的。

需要许多不同专业的应急工作人员向应急响应提供支持。应急工作人员来自各个组织和公共服务部门。但并没有制订将事故前未受指派的那些应急工作人员纳入到响应行动中的安排。

实施确保保护工作人员免于辐射照射的安排受到该场址极端状况的严重影响。为了使厂内应急工作人员始终得到可接受水平的保护，实施了一系列临时措施。从事特定任务的应急工作人员的剂量限值被临时提高，以便能够继续进行必要的缓解行动。对应急工作人员的医学管理也受到严重影响，为了满足厂内应急工作人员的需求，需要作出很大努力。

⁷¹ 厂外中心并没有设计成能承受日益增加的辐射水平。

⁷² 之所以设立一个新的核小分队，是因为“福岛县灾害管理计划”[74]规定的现有九大功能小分队都在忙于应对地震和海啸[7]。

⁷³ 原子能机构使用术语“应急工作人员”来涵盖作为工作人员对响应紧急情况负有规定职责的那些人员（或全职、兼职或临时为雇主工作并在职业辐射防护方面拥有公认权利和职责的任何人员），包括受注册者和许可证持有者直接或间接聘用的工作人员以及响应组织的工作人员，如警察、消防队员、医疗人员以及撤离车辆的司机和乘务员等。在日本，术语“应急准备人员”用于涵盖在核应急中执行应急活动的所有人员，如“向附近居民传达公共信息和指示、引导附近居民撤离、进行交通控制、进行辐射监测、提供医疗、采取行动防止核设施中的一种状况发展成灾难的人员，以及执行灾后恢复活动如消除放射性污染物的人员”[93]。

被称为“帮助人员”的公众成员自愿协助开展了厂外应急响应。国家当局发布了关于帮助人员能够开展的活动类型和应采取的防护措施的导则。

3.2.1. 地震和海啸发生后，在该电厂对工作人员的防护

在发出海啸警报后，为保护电厂工作人员（约 6000 名）免于预期的海啸影响作出了努力。海啸警报是使用厂内有线广播系统广播的，其中建议工作人员撤离和转移到更高位置的指定场所。虽然这些努力在大多数情况下是成功的，但并非所有工作人员都收到了海啸警报和撤离命令[7、8]。地震发生后正在 4 号机组汽轮机厂房地下一层检查设备的两名工作人员就在海啸引发的洪水中溺亡[8]。

保护电厂工作人员免于海啸影响的行动是成功的，这在很大程度上归因于是从柏崎-刈羽核电站在 2007 年新泻县中越冲地震后的经历中汲取的教训，以及以后在制订紧急撤离程序方面作出的努力[8]。

从 2011 年 3 月 11 日至 14 日，被认为并非不可或缺的电厂工作人员，包括女性工作人员和来自分包商的大部分职员，都被撤离了场址。3 月 15 日上午，由于场址上不断恶化的状况，又撤离了更多的电厂工作人员。估计有 50 至 70 名工作人员仍留在场址上，同时，约有 650 人乘大巴或私人车辆临时撤离到福岛第二核电站。他们自当日中午起开始返回福岛第一核电站[8]。

3.2.2. 应急工作人员的防护措施

在事故发生时，日本的国家法律和导则涉及了应为保护应急工作人员采取的措施。但所制订的安排，如厂内计划，只是一般性地而没有充分详细地涉及这些要求。例如，厂内计划涵盖以下领域：确定责任；分派应急准备和响应中的普遍性职责；以及列出可用仪器仪表（如测量仪和电子剂量计）的存量清单[75]。

为应急工作人员确定的剂量限值取决于他们的预定任务，对救生行动和防止灾难性状况发展的活动的剂量上限为 100 毫希，同时要求努力最大程度减少照射[93、94]。

事故期间，为使厂内应急工作人员在极端状况下始终得到可接受水平的保护，采取了一系列临时措施。由于场址上大部分个人剂量计在海啸后已不能使用，造成了个人剂量计的不足。这导致需要采取应急措施来跟踪厂内应急工作人员接受的个人剂量[8]。例如，发布了要求预计将在类似状况中工作的每个应急工作人员小组只使用一个电子个人剂量剂的指示。对于处在隔震建筑中的应急工作人员，则是采用区域剂量率监测和按工作人员在特定区域停留的时间来监测和控制剂量。这种状况一直持续到 2011 年 3 月底从其他核电厂获得充足数量的剂量计[6、8]。

2011 年 3 月 14 日，从事特定工作的应急工作人员的剂量限值被临时提高到 250 毫希，以使能够在厂内和福岛第一核电站 30 公里半径范围内开展必要的活动[95]。100 毫希的剂量仍然是来自消防部门的应急工作人员在救生行动中的限值[6]。2011 年

11月1日，对自该日起开始工作的厂内应急工作人员取消了将剂量限值临时提高到250毫希的做法；2011年12月16日，对大多数剩余应急工作人员取消了这种做法；2012年4月30日，对具有专业知识和经验的一小部分应急工作人员取消了这种做法[96、97]。

大多数厂内应急工作人员都接受了低于250毫希的剂量[8]。有六例，应急工作人员接受的剂量超过了250毫希的剂量标准，最高剂量达到678毫希（其中590毫希系体内污染所致）。

体内污染归因于恶劣的工作条件和采取的防护措施不充分（如呼吸保护设备的使用不当、碘甲状腺阻断措施、一些行动导致了放射性核素的不慎摄入），这主要是缺乏训练和训练不够有效所致[5]。

东电公司还在确保厂内应急工作人员的安康方面，例如在提供适当的设施和条件（休息、睡眠、就餐、卫生等设施 and 条件）方面面临着挑战[98—101]。

在事故响应期间，来自受灾地区以及来自日本各地包括来自一些非政府组织的人员，即所称的“帮助人员”，自愿协助进行了诸如提供食品、水和必需品的活动以及后来的去污和监测活动。国家当局发布了关于帮助人员能够开展的活动类型和应采取的防护措施的导则[102—104]。

3.2.3. 应急工作人员的指定

需要许多不同类型的应急工作人员向厂内和厂外应急响应提供支持。厂内应急工作人员包括直接受雇于东电公司或持有分包合同的核电站工作人员，以及日本自卫队、消防部门和警方在该场址上参与应急工作的人员[8]。厂外应急工作人员包括来自不同组织或部门（政府部门和非政府部门）的人员。他们的任务包括撤离公众和专门设施、向撤离人员提供支助、提供医疗保健以及进行监测和取样[6、97、105、106]。

不是所有应急工作人员在这次紧急情况之前都被指定为应急工作人员（如一些东电公司职员和分包商职员），并且没有制订在他们被指定为应急工作人员后将他们纳入到响应行动中的安排。此外，在这次紧急情况之前没有被指定的许多人没有接受过在核应急状况下工作的培训。例如，他们没有接受过辐射防护方面的培训，没有被告知辐射照射的潜在健康风险，或没有接受过使用呼吸保护设备或应对可能受到放射性物质污染的患者的培训[107]。这导致在响应初期，缓解行动的实施出现一些延误[6]。

3.2.4. 应急工作人员的医学管理

为身受常规创伤的应急工作人员获得必要的治疗遇到了困难，因为一些医院由于撤离或隐避而关闭，有些医院则没有作好治疗可能受到放射性物质污染的患者的准备[107、108]。直至在现场提供基本医疗之前，身受常规创伤的应急工作人员都被运送到两家当地医院中的一家治疗[108]。

在地震后约 17 小时，国家放射线医学综合研究所向地方核应急对策本部（设在厂外中心）派遣了最初由一名医师、一名护士和一名保健物理学家组成的辐射应急医疗援助小组，以便对应急工作人员的污染和去污开展评价[107]。

在事故发生八天后，职业健康医生开始在设在隔震建筑物中的应急响应中心向厂内应急工作人员提供基本治疗。随后设立了两个伤员鉴别分类中心，一个在厂内，另一个在“J村”⁷⁴ [3、8、108]。

自 2011 年 7 月 1 日起，在福岛第一核电站设立了一个紧急治疗设施。从日本各地为该设施征聘了接受过应对辐射应急培训的医疗工作人员[8、108]。

3.3. 防护行动和保护公众的其他响应行动

在事故发生时，国家应急安排设想，关于防护行动的决定将基于需要作出决定时利用剂量预测模型即“环境应急剂量信息预测系统”计算给公众造成的估算预期剂量。安排中并没有设想对公众采取紧急防护行动的决定将基于预定的具体电站状况。但在事故响应中，关于防护行动的初始决定是基于电站状况做出的。由于厂内电源丧失，无法提供源项估计值作为“环境应急剂量信息预测系统”的输入。

事故之前的安排包括根据预期剂量而不是根据可测量剂量进行隐避、撤离和碘甲状腺阻断的标准。没有任何避迁标准。

事故期间实施的公众防护行动包括：撤离、隐避、碘甲状腺阻断（服用稳定性碘）、限制食品和饮用水的消费、避迁和提供信息。

将居民从福岛第一核电站附近撤离在 2011 年 3 月 11 日晚上开始，撤离区范围从电站半径 2 公里逐渐扩大到 3 公里，然后又扩大到 10 公里。到 3 月 12 日晚上，撤离区范围已被扩大到 20 公里。同样，居民被命令隐避的区域范围从事故不久后的电站半径 3—10 公里扩大到 3 月 15 日之前的 20—30 公里。在核电站半径 20—30 公里内区域，公众被命令隐避直到 3 月 25 日日本政府建议自愿撤离之时。主要由于缺乏详细的安排，没有统一采取服用稳定性碘进行碘甲状腺阻断。

在撤离方面，由于地震和海啸造成的损坏以及由此产生的通讯和交通问题而困难重重。在从 20 公里撤离区内医院和疗养院进行患者撤离时也遇到了很多困难。

4 月 22 日，现有的 20 公里撤离区被确定为“限制区”，重新进入受到控制。还在可能超出具体的避迁剂量标准场所内的“限制区”之外确定了“计划撤离区”。

⁷⁴ J 村位于福岛第一核电站以南约 20 公里处。事故发生前，那里是一个足球培训设施。事故发生后，它被用作一般性后勤保障基地，例如，使工作人员做好从事指定任务的准备、在工作人员完成指定任务后根据需要对他们进行监测和去污、进行伤员鉴别分类等[3]。

一旦在环境中检测到放射性核素，即在农业领域的农业保护措施以及食品的消费和分配和饮用水的消费方面作出安排。此外，还对出口食品和其他产品建立了认证体系。

应急期间，多个渠道被用来向公众通报情况和回应人们的关切，其中包括电视、广播、互联网和电话热线。根据通过热线和咨询服务收到的公众反馈意见，确定对易于理解的信息和辅助材料的需求。

3.3.1. 紧急防护行动和避迁

事故之前，已在福岛第一核电站和福岛第二核电站厂区周围确立了即将大幅加强应急准备的 10 公里应急规划区（图 3.3）。制定了在这些区域内实施防护行动的计划 [74]。

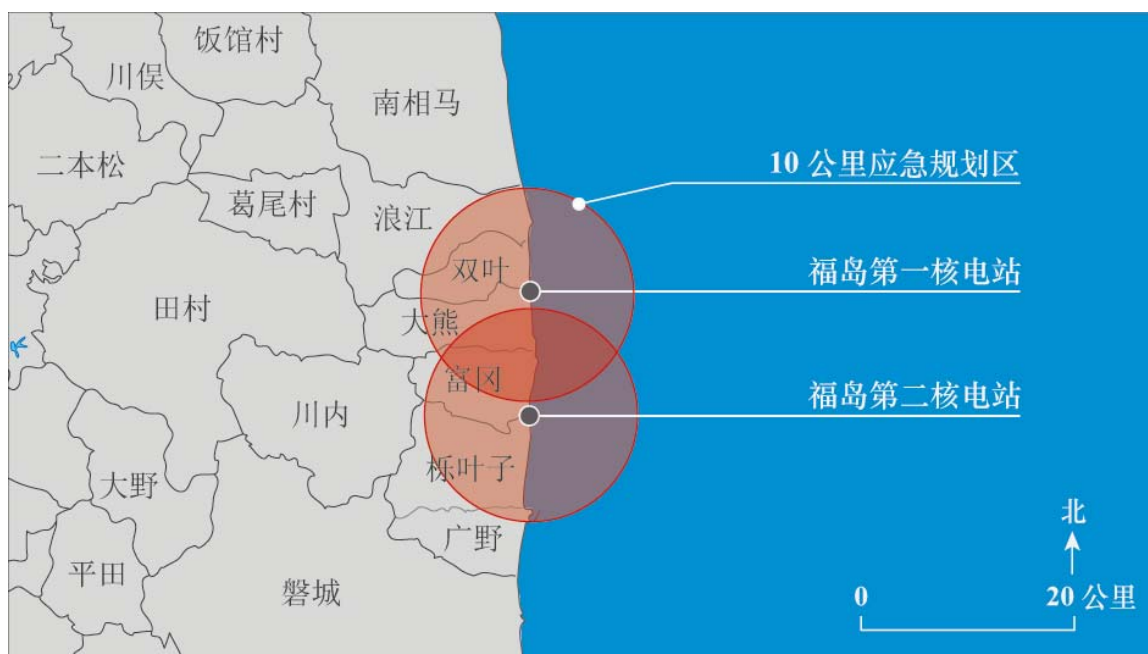


图 3.3. 事故之前确立的福岛第一核电站和福岛第二核电站应急规划区（基于参考文献[74]）。

应急响应计划设想，关于防护行动的决定将基于需要作出决定时进行的剂量预测。剂量将在事故发生伊始即通过“环境应急剂量信息预测系统”进行预测，并与预定剂量标准进行比较，从而决定需要采取哪些防护行动和在哪些区域采取这些行动 [73、93]。这种方案并不符合原子能机构安全标准，根据原子能机构安全标准关于公众紧急防护行动的初始决定需要基于电站状况[68、69]。

根据预期剂量而不是根据可测量剂量，预定剂量标准可用于隐避⁷⁵、撤离⁷⁶和碘甲状腺阻断⁷⁷。没有预定的避迁⁷⁸标准（即基本剂量或可测量数量的操作剂量的通用标准）[93]。

在事故响应期间，由于厂内电源丧失，无法从“应急响应支持系统”提供“源项”估计值作为“环境应急剂量信息预测系统”的输入⁷⁹。关于撤离和隐避的决定是根据电站状况（堆芯冷却丧失）做出的[3、7]。

国家和地方政府关于防护行动的决定并不总是协调一致的，其主要原因是严重的通讯问题，另外厂外中心启动困难重重也是其部分原因[92]。2011年3月11日20时50分，福岛县根据直接从东电公司收到的信息向福岛第一核电站半径2公里范围内居民发出了撤离命令[3、6、7、70]。

21时23分，日本政府向电站半径三公里内区域发出了撤离命令，向半径3—10公里内区域发出了隐避命令。2011年3月12日5时44分，日本政府向半径3—10公里内区域发出了撤离命令，并在18时25分，将撤离区扩大到电站半径20公里内区域⁸⁰ [3、7]。

撤离命令是通过地方灾害管理无线电通讯网络、宣传车、警车和逐户访问通报给公众的。由于电站状况、协调困难和预先规划不足，撤离和隐避命令在24小时内修改了几次，最终半径20公里区域被命令撤离，涉及约7.8万居民[7]。

由于地震和海啸造成的基础设施的损坏以及通讯和交通问题，撤离工作困难重重。从20公里撤离区内医院和疗养院进行患者撤离也遇到了重要挑战（例如提供有医疗用品的适当交通和避难所）。尽管道路受损和交通拥堵，大部分不需要医疗支持的居民开始在撤离命令发出后几小时内离开撤离区[7]。

3月15日，向福岛第一核电站周围20—30公里半径区域内居民下达了隐避命令，

⁷⁵ “隐避”是指短期内利用构筑物防止气载烟羽和（或）沉积的放射性物质[48]。

⁷⁶ “撤离”是指将人员临时迅速地从一个区域转移，以避免或减少紧急情况下的短期辐射照射。撤离可根据电站状况作为一种预防行动来实施[48]。

⁷⁷ “碘甲状腺阻断”是在涉及放射性碘的紧急情况中将采取的一种紧急防护行动。碘甲状腺阻断涉及服用稳定性碘化合物（通常是碘化钾），以防止或减少甲状腺对碘的放射性同位素的摄入[48]。

⁷⁸ “避迁”是指将人员非紧急转移，以避免较长期（例如一年内）受到沉积放射性物质的照射[48]。

⁷⁹ 一些剂量预测是利用其他假设进行的；然而，这些预测都没有被用作决定紧急防护行动的基础[4、7]。

⁸⁰ 就福岛第二核电站而言，电站半径3公里内居民撤离命令和电站半径3—10公里内居民隐避命令是在2011年3月12日07时45分发出的[6]。在福岛第一核电站1号机组发生氢气爆炸（3月12日15时36分）后，3月12日17时39分，日本政府作出决定，将福岛第二核电站半径10公里内区域居民撤离，作为在该电站发生类似氢气爆炸情况下的一项预防措施[6]。由于该10公里撤离区在福岛第一核电站周围20公里撤离区范围内，因此，就福岛第二核电站而言则不需要采取任何进一步的防护行动。

该命令一直持续到 3 月 25 日[3、7]。隐避时间的延长和当地基础设施的破坏扰乱了人们的生活[7]。2011 年 3 月 25 日，日本政府向 20—30 公里区域内居民发出了自愿撤离的建议[3、7]。但很多居民已自愿离开了这一区域。

主要由于预先规划安排不充分，没有统一采取服用稳定性碘进行碘甲状腺阻断。一些地方政府发放了稳定性碘片，但是没有提供服用建议，另一些地方政府不仅发放了碘片，还向公众提供了服用建议，还有一些地方政府等待日本政府的指令[6]。

在 2011 年 3 月底之前建立完全出入控制之前，一些居民返回撤离区内的家中取东西[6]。4 月 22 日，经与地方政府磋商，福岛第一核电站周围现有 20 公里撤离区被确定为“限制区”，控制再进入和有条件进行临时进入。2011 年 5 月，在安排到位的情况下，包括对污染作出具体说明和监测的情况下，短期临时进入获得了准许[6、104、109]。

2011 年 3 月 12 日，开始对撤离人员进行地方一级监测。有关需要去污的决定是基于事故之前制定的操作标准。几天后，这些标准被提高，以应对现有状况（如气温低、水供应不足）[5]。

在困难和危险的条件下，利用有限的设备和工作人员进行了事故后环境监测。例如，地震和海啸使大部分现有的本地监控设备不能发挥功能。对福岛第一核电站 20 公里半径范围内的监测于 3 月 12 日开始，在 3 月 14 日完成该区域内撤离时结束。在超出 20 公里撤离区的一些地方，自 3 月 15 日起，测得剂量率在每小时几百微希数量级（微希/小时）[3、6]。

2011 年 4 月 11 日，日本政府宣布，预计自事故之日起一年内将受到 20 毫希剂量的标准将被用于确定超出 20 公里撤离区可能需要人们避迁的区域⁸¹ [3]。2011 年 4 月 22 日，在超过 20 公里撤离区确立了一个“计划撤离区”，以涵盖可能超出预测的 20 毫希剂量标准的区域。日本政府发布了应在一个月左右对这一区域人员采取避迁的命令[3]。

除了“计划撤离区”，2011 年 4 月 22 日还确立了“应急撤离准备区”（见图 3.4）。“应急撤离准备区”的居民被告知在福岛第一核电站可能出现新情况时以自己的方式进行隐避或撤离。“撤离准备区”的指定于 2011 年 9 月 30 日被解除[6]。

作为对超出“限制区”（即 20 公里撤离区）和“计划撤离区”进行监测的结果，确定了预测在事故发生后一年内居民接受剂量超过 20 毫希的具体场所。6 月 16 日，日本政府宣布了应指定这些场所为“建议撤离的具体地点”的指导方针。日本政府于 6 月 30 日开始指定这些场所采取避迁[6、7]。

⁸¹ 大多数描述福岛第一核电站事故响应情况的日本官方文件不使用“避迁”一词，而是将人员的转移称为“撤离”。

被命令或建议采取防护行动直至 2011 年 9 月 30 日的区域和场所示于图 3.4。

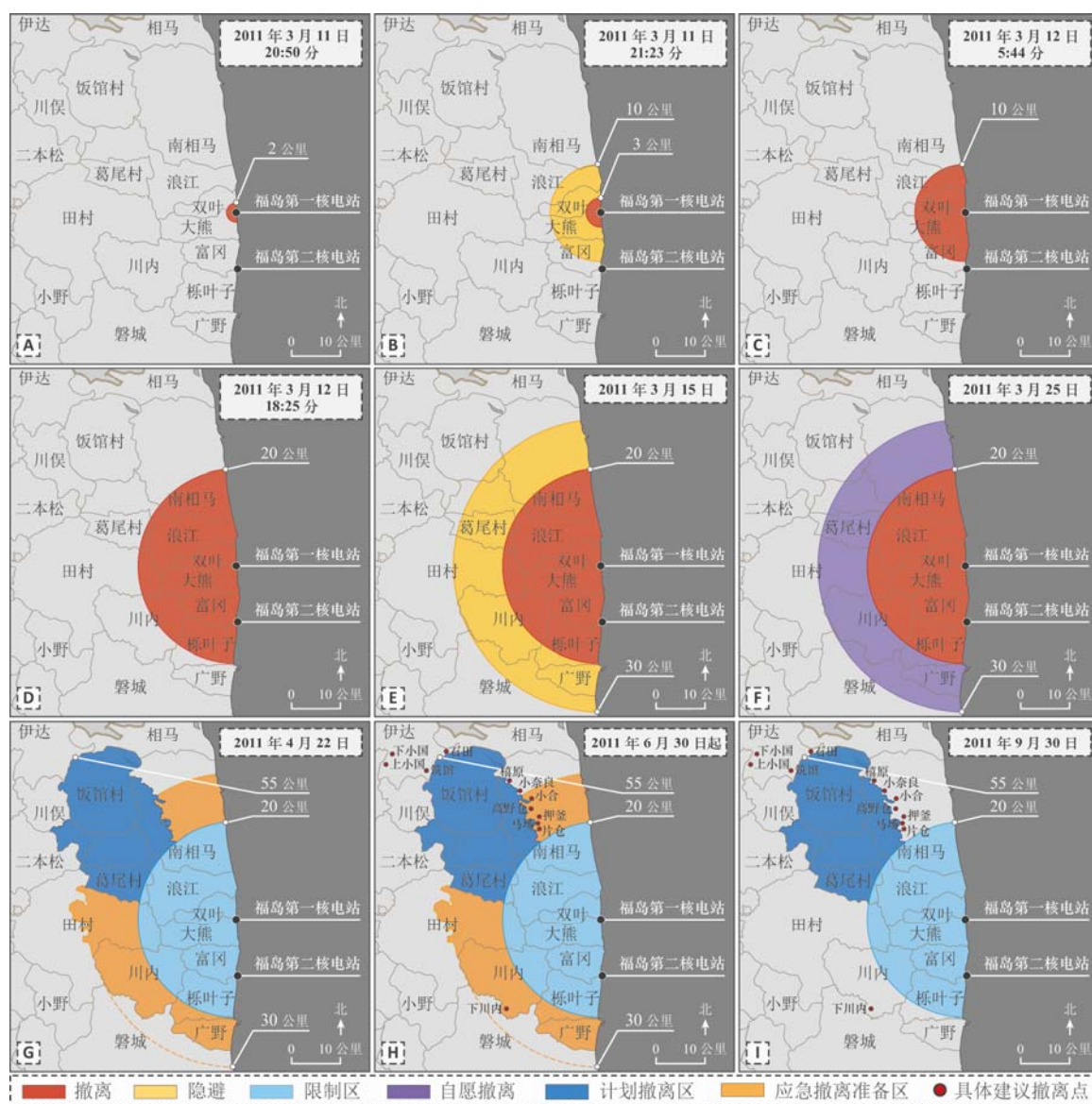


图 3.4. 被命令或建议采取防护行动直至 2011 年 9 月 30 日的区域和场所 (基于参考文献[3、6、7、104])。

地方政府官员也必须及早决定是否重开学校和在什么条件下重开。最初，2011 年 4 月 19 日，重开学校的剂量标准被确定为 20 毫希/年。5 月 27 日，为回应公众的关切，日本政府发布了一份通知，表示在短期内将减少剂量到 1 毫希/年的目标[7]。

3.3.2. 与食品、饮用水和农业有关的防护行动

在核事故之前就已制定核应急情况下用于日本生产的食品和饮用水限制的特定放射性核素的放射性浓度标准[93]。然而，这些值都没有作为具体监管限值被用于紧急情

况⁸² [6、7]。2011年3月17日，根据《食品卫生法》，这些标准被确定为食品和饮用水中放射性核素水平的暂行监管值[110]。

在环境中检测到放射性物质后，对食品和饮用水控制作出了安排。这些安排包括：(1) 根据《食品卫生法》，作为暂行监管值，确定了食品和饮用水中的放射性铯和放射性碘的放射性核素含量，高于这些值，食品和饮用水受到了限制；(2) 测量食品和饮用水样品中的放射性核素含量。放射性碘含量（碘-131）由于其半衰期短（约八天）在几周内显著下降，而中长期内食品限制只基于放射性铯含量[110]。

2011年3月21日，随着形势的发展变化，日本政府开始发布对具体食品分发的限制[111]。食品限制是根据食品样品的监测结果制定的，通过食品样品监测，确定了哪些食品超出了标准和哪些地理位置受到了影响[112、113]。

在有关食品和饮用品的防护行动方面遇到了一些挑战，包括：(1) 确定可用作食品控制基础的标准（放射性核素的放射性浓度）；(2) 确定在不同的地理位置，哪些食品已受到或可能受到高于这些标准的水平影响；(3) 解决取样和分析基础设施和资源的不足问题；(4) 解决一些地方政府有关开展取样和分析的关切问题。

2011年4月4日，制定了酌情启动实施食品限制的政策，不仅是在都道府县的边界，而且在较小的地理区域（如城市、城镇和村庄）。该政策开始了确立或解除对不同食品实施限制的过程。都道府县可以申请修改限制，条件是每周监测试验中的食品监测结果连续三次低于暂行监管值[7]。

2011年4月5日，根据鱼样品中碘-131的测得含量，增加了对水产品中放射性碘的放射性浓度暂行监管值[114]。

2011年4月8日，发布了对放射性铯含量超过既定标准的农业土壤中水稻栽培的限制[6]。

2011年4月14日，作为临时允许值，确定了动物饲料中的放射性铯和放射性碘的放射性核素浓度水平。尽管对动物饲料规定了限制，一些牛肉样品仍超过暂行监管值（2011年7月）。为防止这种肉供应给消费者实施了管控制度[6]。

2012年4月1日，标准限值生效，取代了暂行监管值。这些限值规定了食品和饮用水中放射性核素的放射性浓度，其依据是有效剂量为1毫希/年（尽管5毫希/年标准曾被用作临时监管值的依据），同时考虑事故期间释放的各种放射性核素的剂量贡献。因此，这些值均远低于它们所取代的临时监管值[115]。

⁸² 关于进口到日本的食物标准（370 贝可/千克放射性铯 — 铯-137 和铯-134）是 1986 年前苏联切尔诺贝利核电站事故后作为监管限值确定的[7]。

3.3.3. 公众宣传

向公众通报情况的安排是在事故之前建立的。在国家层面上，已有的安排认识到需要相关的响应组织协调向公众提供信息，包括通报的内容、时间和方法[73]。福岛县灾害管理计划还包括公众宣传安排[74]。

监管机构，即原子力安全和保安院在 2011 年 3 月 11 日 15 时 16 分即地震发生后 30 分钟通过“原子力安全和保安院移动系统”发布了有关地震对核设施影响的最初信息。19 时 03 分，首相发布了核应急通告，并宣布于 19 时 45 分举行新闻发布会。之后于 21 时 52 分举行了有关发布撤离命令的政府新闻发布会[6、7]。

日本政府、原子力安全和保安院、地方应急响应组织、地方政府和东电公司举行了独立新闻发布会，会议一直持续到 4 月 25 日。内阁官房长官一天两次定期召开新闻发布会，并专门向公众提供有关事故的信息和政府的观点。2011 年 3 月 11 日至 5 月 31 日期间，原子力安全和保安院发布了 150 多份新闻稿，召开了 182 次新闻发布会[3]。在新闻发布会和新闻简况介绍会上日本文部科学省介绍了环境监测的结果。

从 2011 年 3 月 25 日至 4 月 24 日，日本原子力安全委员会每天召开新闻发布会，2011 年 4 月 25 日至 5 月 19 日，日本原子力安全委员会召开了八次新闻发布会[3]。

从 2011 年 4 月 25 日起，参与响应各组织之间举行联合新闻发布会。这促进了所提供信息的一致性[6]。从 2011 年 4 月起，地方核应急对策本部印发通讯并分发到撤离场所。还定期通过当地电台播报相关信息[3]。

建立热线电话，解答公众咨询。例如，2011 年 3 月 11 日，原子力安全和保安院建立了热线电话，回应有关应急和辐射安全演变情况的咨询，在 2011 年 3 月 17 日至 5 月 31 日期间接收了大约 1.5 万个电话[3]；3 月 13 日，国家放射线医学综合研究所的热线电话开通，到 4 月 11 日回复了大约 6500 个电话[116]；2011 年 3 月 17 日，日本文部科学省和日本原子力开发机构开通了热线电话，到 2011 年 5 月 18 日共接收了 1.75 万个电话[3]。福岛县设立了咨询服务，以处理居民有关辐射各个方面的问题。根据通过热线和咨询服务收到的公众反馈意见，确定对易于理解的信息和辅助材料的需求[3]。

从 2011 年 3 月 12 日起，日本政府在相关部委和机构的网站上以英文、中文和韩文公布信息[117]。从 2011 年 3 月 13 日至 5 月 18 日，日本政府通过每天举行的定期简况介绍会向驻东京的外交使团提供信息，并从 5 月 19 日起改为每周三次[6]。还建立了通过传真和电子邮件向外交使团提供信息的通报渠道。日本外交使团向其驻在国提供信息，以总计 29 种不同的语言将信息公布在网站上[3]。

国家相关部委和政府机构从 2011 年 3 月 13 日开始几乎每天为外国新闻媒体举行联合新闻发布会[6]。

在向国际社会提供信息时遇到了挑战，主要涉及对翻译材料和通过电话回复信息请求的人力资源的需求[117]。

在福岛第一核电站事故发生后日本根据《国际核和放射事件分级表》（国际核事件分级表）报告了事故级别情况。利用“国际核事件分级表”对同一场址不同机组进行了单独定级。在一个月内在所定级别修改了若干次，提高到更高级别。根据“国际核事件分级表”将级别修改到更高级别，引起了公众和新闻媒体的重要关切。

3.3.4. 国际贸易

启动了许多活动和措施，其目的是：(1) 使公众、各行业及各国对日本产品的安全性放心；(2) 促进日本产品的国际贸易和防止分发拖延；(3) 尤其是在福岛县，向各企业和行业提供建议和指导[98、99、118、119]。

大多数进口国对日货采取了管制措施；许多国家提高了现有进口管制措施或要求有日本政府提供的证书；还有一些国家在一段时期内禁止进口日货或来自日本某些地区的商品（主要是农产品）。2011年6月，日本建立了一个用于出口食品的认证体系，这有助于向公众和其他有关各方重新保证管制措施已经到位。该体系在2011年9月被扩大到包括集装箱和意图出口的一些工业产品[120]。

3.3.5. 应急阶段的废物管理

日本在事故之前建立的放射性废物管理安排包括如核电站等设施产生的废物，但并不包括已经在公共场所产生的放射性废物[121]。详细的放射性废物管理战略、准则和指令是在事故发生后制定的。

日本原子力安全委员会于2011年6月3日发布了《确保福岛第一核电站场址周边受污染废物处理和处置安全的短期政策》[122]。该文件提供了以下方面剂量学标准：再循环材料；处理材料工作人员的防护；处理设施附近公众成员的防护；处置场附近公众成员的防护。日本原子力安全委员会建议，受事故影响的材料——即瓦砾、水和污水处理产生的污泥、焚烧灰、树木、植物和去污活动产生的土壤——将在适当的管理下处置，而且一些材料可能被考虑回用。利用这些回用材料制造的产品在被投放市场之前，将适当进行污染检查和管理。适当的防护措施将确保工作人员和公众方面的辐射照射量保持在可合理达到的尽量低水平[122]。

2011年8月26日，核应急对策本部制定了《去污工作应急响应的基本政策》[123]作为一项临时政策，直到《关于处理与2011年3月11日东北地区太平洋近海地震有关的核电站事故放射性物质环境污染的特别措置法》全面生效。该法于2011年8月26日制定，于2011年8月30日颁布——同日该法部分生效，2012年1月全面生效[124]。它概述了污染区的管理，并包括国家和地方政府、营运者和公众的任务和责任。该法促进了从应急照射情况向现存照射情况的过渡。它还正式确定了对环境监

测、去污措施以及受放射性物质污染的土壤和废物的指定、处理、贮存和处置的长期管理。

3.4. 从应急阶段向恢复阶段的过渡和对响应的分析

直到福岛第一核电站事故之后，才制定了从应急阶段向恢复阶段过渡所需的特定政策、导则、准则和安排。在制定这些安排过程中，日本当局决定适用国际放射防护委员会（国际放射防护委）的最新建议。

以报告包括日本政府、营运组织（东电公司）、政府和国会分别设立的两个调查委员会发布的报告形式对事故和应急响应进行了分析和专题介绍。⁸³

在事故之后，日本国家应急准备和响应安排经过了多处修订，以考虑这些分析的结论，并考虑原子能机构在应急准备和响应领域的相关安全标准。

3.4.1. 从应急阶段向恢复阶段的过渡

在制定事故后从应急阶段向恢复阶段过渡的安排过程中，日本当局决定适用国际放射防护委的最新建议[127—129]。在事故后，制定了从应急阶段向恢复阶段过渡所需的特定政策、导则和准则以及总体安排[130]。这一过程包括对应急响应初期采取的防护行动和做出的安排进行调整，并考虑所掌握的关于受影响区域状况的信息（主要通过全面监测获得）[131、132]。该过程还包括了对必要的长期恢复作业的考虑。

这些行动和安排主要处理在过渡阶段期间产生的紧迫需求。根据正在开展的工作，逐步修改了有关工作人员防护的规定[6、96]。

2011年4月17日，东电公司发布了一个“路线图”，概述厂址恢复的步骤（在上述领域的基本政策、目标和即时行动：冷却、缓解后果、监测和去污）[24]。

2011年5月17日，通产省发布了“对核受害者的即时援助行动路线图”[130]。该路线图列出了九组行动，这些行动被分成预定在与东电公司的路线图关联的不同时间段实施的步骤。步骤1的目标是7月中旬，步骤2的目标是在达到步骤1后约3至6个月，步骤3则为中期阶段。该路线图旨在促进沟通和准备向长期恢复作业过渡及恢复正常的社会和经济活动，其中分配了职责，并明确规定了过渡过程的其他组织问题以及应急阶段终止的目标和条件。

⁸³ 还发表了学术界和私营部门（如日本原子力学会和日本重建倡议基金会）的报告[125、126]。

3.4.2. 对响应的分析

许多机构都对事故和应急响应进行了分析，以期查明教训和加强除其他领域外，特别是日本的应急准备和响应安排。作为结果，确定了这些安排方面的一些改进措施。

例如，日本政府 2011 年 6 月[3]提交原子能机构部长级大会的报告介绍了在以下对应急准备和响应至关重要的领域所汲取的教训：(1) 并发自然灾害和核应急；(2) 环境监测；(3) 中央和地方组织之间的任务分配；(4) 应急通讯；(5) 对其他国家援助的响应和与国际社会的沟通；(6) 放射性物质释放的模拟；(7) 核应急情况下的撤离准则和辐射防护导则。⁸⁴

政府设立的东京电力公司福岛核电站事故调查委员会发现，日本有必要考虑来自国际社会的经验教训，并将国际标准，如原子能机构制定的那些国际标准等，纳入其国家导则[5]。

东电公司福岛核事故分析报告[8]突出强调了在响应该紧急情况期间确定的问题，包括：应急响应组织、信息交流、物质和设备的运输以及辐射防护。

日本国会设立的福岛核事故独立调查委员会的报告载有除其他外特别是有关改革国家应急准备和响应体系的建议，包括明确国家政府、地方政府和营运者在应急期间的任务和责任[7]。

在分析和已查明教训的基础上，采取了纠正行动，以加强应急准备和响应安排[133、134]。在内阁范围内设立了一个核应急准备委员会，以确保政府执行和推动核应急响应政策[134]。为了处理教训，原子力规制委员会编制了《核应急响应准则》⁸⁵ [136]，同时也考虑了原子能机构在应急准备和响应领域的安全标准。

3.5. 在国际应急准备和响应框架内的响应

在事故发生时，建立了广泛的国际应急准备和响应框架，包括国际法律文书、原子能机构安全标准和业务安排。⁸⁶

⁸⁴ 2011 年 9 月向原子能机构提交了一份补充报告[4]。该报告提供了有关进一步的发展情况和在处理 2011 年 6 月发布的第一份报告中已确定的教训方面取得的进展的资料。

⁸⁵ 《核应急响应准则》基于 2012 年印发的关于修订《核设施应急准备监管指南》[93]的中期报告[135]。

⁸⁶ 主要国际法律文书是《及早通报核事故公约》和《核事故或辐射紧急情况援助公约》。事故发生时应急准备和响应领域的国际安全标准是原子能机构《安全标准丛书》第 GS-R-2 号[69]和第 GS-G-2.1 号[68]。原子能机构《安全丛书》第 115 号[137]也包括与应急准备和响应有关的内容。国际业务安排包括《紧急通报和援助技术工作手册》、原子能机构“响应和援助网”以及“国际组织辐射应急联合管理计划”。

在事故发生时，原子能机构在响应核或辐射应急方面有四项任务：(1) 通过正式指定的联络点通报和交流官方信息；(2) 提供及时、明确和易于理解的信息；(3) 应请求提供和便利国际援助；(4) 协调原子能机构的响应。

对事故的国际响应涉及许多国家和一些国际组织。

原子能机构与日本的正式联络点进行了联系，共享了随着应急情况发展不断提供的应急信息，并随时向各国、相关国际组织和公众进行通报。在应急响应的早期阶段，与日本正式联络点的通讯颇为困难。原子能机构总干事对日本的访问和联络官员随后派驻东京加强了原子能机构与联络点之间的通讯。原子能机构还向日本派出了专家工作组，并协调了机构间响应。

各国⁸⁷对他们在日本的国民采取或建议了不同的防护行动以响应这起事故。普遍未向公众充分说明这些不同，由此偶而造成了混乱和关切。

参加机构间辐射和核应急委员会的相关组织定期交流了信息。还发布了联合新闻稿。

原子能机构通过应急安排与日本的正式联络点原子力安全和保安院直接联络[143]。日本根据“及早通报公约”第三条提供了信息。

原子能机构秘书处共享了随着应急情况发展不断提供的应急信息，并随时向各国、相关国际组织和公众进行了通报[143]。

原子能机构当时的作用并不包括提供对事故潜在演变的预测或对可能后果的评价。它在响应核电厂应急方面的作用在通过原子能机构“核安全行动计划”后被扩大[144]。这要求原子能机构向成员国、国际组织和公众提供核应急期间有关其潜在后果的及时、明确、实事求是、客观和易于理解的信息，包括对可得资料进行分析以及基于证据、科学知识和成员国的能力对可能的假想方案作出预测。

⁸⁷ 核或辐射应急的准备和响应的主要责任属于当事国，保护人命、健康、财产和环境的主要责任亦是如此。

资料框 3.4. 事故当时国际核或辐射应急的应急准备和响应框架

核或辐射应急的应急准备和响应的主要责任属于当事国，保护人命、健康、财产和环境的主要责任亦是如此。当事国有责任确保在国家、地区、地方和营运组织/设施各级建立应急准备和响应安排。适当时，当事国还有责任确保使国家应急准备和响应安排与该国的已加入或以其他方式（例如通过双边和（或）多国协定）成为缔约方的相关国际安排进行协调。

事故当时的这种国际框架包括国际法律文书、原子能机构安全标准和业务安排。

《及早通报核事故公约》和《核事故或辐射紧急情况援助公约》（以下称“及早通报公约”和“紧急援助公约”）为原子能机构和各缔约方规定了具体的响应职能和责任。各国际组织按照其法定职能或相关法律文书均具有包含应急准备和响应诸方面的职能和责任[138、139]。

事故当时，原子能机构在应急准备和响应领域的安全标准是原子能机构《安全标准丛书》第 GS-R-2 号（由七个国际组织共同倡议编写）和原子能机构《安全标准丛书》第 GS-G-2.1 号（由六个国际组织共同倡议编写）[68、69]。《国际电离辐射防护和辐射源安全的基本安全标准》（原子能机构《安全丛书》第 115 号）也包括了与应急准备和响应有关的部分[137]。

国际业务安排包括《紧急通报和援助技术工作手册》、原子能机构“响应和援助网”以及“国际组织辐射应急联合管理计划”[140—142]。

《紧急通报和援助技术工作手册》便利了“及早通报公约”和“紧急援助公约”中提供通报和信息交流及根据“及早通报公约”和“紧急援助公约”所确定的联络点通讯协议（通过可 24 小时做出响应的传真、电话、电子信箱和受保护安全网站发送信息）等业务性质的那些条款的实施。这些措施是称为“公约演习”的不同级别复杂程度的定期演习的主题。

“响应和援助网”的建立旨在便于应请求并按照“紧急援助公约”提供国际援助。凭借该网络上登记的国家能力的帮助，该体系形成了一个在不同技术领域提供援助的业务机制。

“国际组织辐射应急联合管理计划”描述了对每个组织针对核或辐射应急在响应期间和作出准备安排时如何采取行动问题的共同理解。该计划提供了一种协调机制，并明确了参与国际组织的作用的能力。该计划由机构间辐射和核应急委员会维护运作，原子能机构为该委员会提供秘书处。在事故当时，机构间辐射和核应急委员会由 15 个国际政府间组织组成。

在应急响应的早期阶段，与日本正式联络点的通讯遇到困难。原子能机构总干事 2011 年 3 月 17 日至 19 日对日本的访问和联络官员随后派驻东京加强了原子能机构与联络点之间的通讯[143]。

一些国家对保护其在日本的公民发布了建议或具体的指示。一些国家建议其在日本的国民听从日本当局为响应紧急情况发布的命令和建议，而一些国家则发布了与日本当局和其他国家所提供的建议有所不同的建议[145]。国家间建议的不同系因各种因素所致，包括缺乏有关演变情况的信息。普遍未向公众充分说明这些不同，由此偶尔造成了混乱和关切。

原子能机构向日本派出了专家工作组，并协调了成员国向日本提供的援助。没有

援用“紧急援助公约”，也没有利用“响应和援助网”⁸⁸。一些国家直接向日本提供了援助。这种支持帮助了日本政府管理核应急，这种应急加上地震和海啸的效应对该国响应能力提出了挑战。在国家响应的早期阶段，接受国际援助方面的问题之一是缺乏接受这类援助的安排和程序[5、143]。

原子能机构秘书处根据其职责，立即启动了“国际组织辐射应急联合管理计划”和机构间响应的协调。机构间辐射和核应急委员会交流了信息，并特别侧重于对事故后情况达成共同认识，以及协调努力随时向公众进行通报。举行了定期视频会议直至2011年7月。还发布了联合新闻稿。

作为秘书处之间双边协议的一部分，联合国粮食及农业组织（粮农组织）、世界卫生组织（世卫组织）和世界气象组织（气象组织）派遣联络官员来到原子能机构，以确保对国际响应进行有效协调。

3.6. 意见和教训

作为对这次事故的应急准备和响应进行评价的结果，汇编了一些意见和教训。对事故的响应强调了从以往应急中获得的教训，并证实了对应急响应做好充分准备的重要性。

- 一 在对可能的核应急进行响应准备时，有必要考虑可能涉及堆芯中核燃料或厂内乏燃料严重破损的紧急情况，包括涉及多机组电厂中的若干机组可能与自然灾害同时发生的紧急情况。

需要考虑可能涉及场址上一个以上机组和与自然灾害同时发生并且可能导致场址和当地基础设施受到破坏的严重核事故的可能性，而无论事故的原因如何。用于为厂内和厂外响应提供重要信息的系统、通讯和监测设备需要能够在这些情况下工作。

需要对管理响应实施的设施（如厂内和厂外应急响应中心）进行选择或设计，以便它们能够在所有应急条件（放射条件、工作条件和环境条件）下运行，并需要将它们设在适当的位置和（或）对它们进行适当的保护，以确保它们能够在这些条件下运行和居住。

- 一 核应急的应急管理系统需要包括为营运组织及地方和国家当局明确确定的任务和责任。该系统包括营运组织与当局之间的互动需要定期在演习中进行检验。

⁸⁸ 原子能机构秘书处与“响应和援助网”上已登记成员国一道，基于从福岛第一核电站事故汲取的经验，继续加强这一网络。

需要作出将核应急响应和自然灾害与人为灾害（如地震、洪水和火灾）响应相结合的安排。

厂内响应需要由位于厂内并了解电厂和情况的工作人员管理。厂内和厂外响应需要根据预先规划的安排协调进行。

- 一 **需要指定应急工作人员，明确规定他们的职责，无论他们为哪个组织工作都对他们进行适当的培训，并在应急期间对他们进行适当的保护。需要制订将应急前未受指定的那些应急工作人员和自愿协助开展应急响应的帮助人员纳入到响应行动中的安排。**

需要在相关计划和程序中以一致的方式充分详细地处理关于应急工作人员防护的实际安排。需要考虑在准备阶段可能未被指定为应急工作人员的那些人。应急工作人员的剂量标准需要预先确定，并需要以一致的方式适用于所指派的应急任务。需要制订确保应急工作人员安康的安排（包括与其家人联系）。

此外，需要预先对安排进行规划，以便将自愿协助开展响应行动的公众成员（称为“帮助人员”）纳入到应急响应组织中并向他们提供适当水平的辐射防护。

- 一 **需要制订安排，以便能够根据预先界定的电厂状况，就实施预定的公众紧急防护行动作出决定。**

这些安排非常必要，因为决策支持系统包括使用计算机模型的决策支持系统，在应急中可能不能充分迅速或精确地预测放射性释放的规模和时间（“源项”）、烟缕的移动、沉积水平或所致剂量，从而不能为决定初始紧急防护行动提供惟一依据。

在准备阶段，需要根据可观察到的状况和可测量的标准（应急行动级别）建立应急状态分级系统。这种系统使得能够在发现表明燃料已实际破损或预计会破损的电厂状况后不久即宣布进入应急，并在营运者进行应急状态分级后迅速启动预定的公众紧急防护行动（在预先规定的区域）。这种应急状态分级系统需要涵盖全部的电厂异常状况。

- 一 **需要制订安排，以便能够扩大或修改紧急防护行动，响应不断发展的电厂状况或监测结果。还需要作出安排，以便能够根据监测结果启动早期防护行动。**

在准备阶段，需要制订安排，以便除其他外，特别是：(1) 确定应急规划地带和区域；(2) 制订采取紧急防护行动和其他响应行动包括应对应急区内特殊人群（如医院患者）的行动所用的剂量和作业标准（可测量数量的水平）；(3) 能够在放射性物质释放发生前或发生后不久采取紧急防护行动；(4) 能够

在实施紧急防护行动的区域迅速建立出入控制；(5) 在必要情况下将防护行动扩大到既定应急规划地带和区域以外的区域；(6) 制订采取合理和最优化早期防护行动和其他响应行动（如进行避迁和实行食品限制）所用的剂量和作业标准，同时考虑到一系列因素，如包括经济、社会和心理后果在内的放射后果和非放射后果；(7) 制订根据当前状况修订采取早期防护行动所用的作业标准的安排。

- **需要制订安排，确保核应急中的防护行动和其他响应行动利大于弊。需要采取综合决策方案，确保实现这种平衡。**

制订这些安排时，需要清楚地认识到核应急可能带来的各种可能的健康危害以及任何防护行动可能产生的放射后果和非放射后果。

需要及时和安全地采取防护行动，同时考虑到可能的不利条件（如恶劣天气或基础设施毁坏）。预先准备对确保医院和疗养院等专门设施的安全撤离非常必要；必须向需要者提供持续的照顾或监督。

- **需要制订安排，协助决策者、公众和其他人（如医疗工作人员）了解核应急中的放射性健康危害，以便他们对防护行动作出知情决定。还需要制订安排，从地方、国家和国际层面处理公众关切。**

在核应急中，需要有效地处理公众关切。这包括采取办法将可测量数量（如剂量率）和预计辐射剂量与放射性健康危害相联系，使决策者（和公众）能够就防护行动作出知情决定。处理公众关切有助于减轻紧急情况的放射后果和非放射后果。

国际关切可以部分地通过认证体系处理，以证明所有可交易商品都符合国际标准，并使进口国和公众感到放心。

- **需要在准备阶段制订终止防护行动和其他响应行动及过渡到恢复阶段的安排。**

在准备阶段，需要制订从应急阶段向长期恢复阶段过渡及恢复正常社会和经济活动的计划。这些安排需要：(1) 制订就终止防护行动和其他响应行动作出决定的正常过程；(2) 明确分配责任；(3) 制订终止防护行动和其他响应行动的标准；(4) 制订与公众协商的战略和过程。

- **对紧急情况 and 所作的应急响应进行及时分析、汲取教训并确定可能的改进之处可加强应急安排。**

这种分析需要包括审查所有相关安排，包括国家法律和条例、权限和责任的分配、应急响应计划和程序、设施、设备、培训和演习。分析结果可为在必

要情况下修订有关安排提供依据。需要通过演习证明经修订的应急安排的适当性。

— **需要加强国际通报和援助安排的实施。**

需要提高对核或辐射应急中国际通报和援助安排及现有运作机制的认识，这包括通报和信息交流机制与程序、请求和提供国际援助的机制与程序等。需要加强“及早通报公约”和“紧急援助公约”运作方面的培训和演习。

需要将参加根据“紧急援助公约”提供国际援助的现有机制作为国家应急准备工作的一个组成部分。需要在准备阶段对在核或辐射应急中请求和接受援助（根据双边协定或根据“紧急援助公约”）做出安排。

根据“及早通报公约”和“紧急援助公约”的要求正式指定的联络点清单需要不断进行更新，并做好原子能机构随时要求提供信息的准备。

在国家一级适用原子能机构应急准备和响应安全标准有助于加强应急准备和响应、促进应急通讯及推动国家防护行动和其他响应行动标准的统一。

— **需要加强国家之间对防护行动和其他响应行动的协商和信息共享。**

国家之间在应急中就防护行动和其他响应行动进行协商和信息共享有助于确保一致采取行动。此外，对防护行动和其他响应行动决策的技术依据作出清楚和易于理解的解释，对提高国内和世界公众的认识和接受度至关重要。

4. 放射后果

第 4 部分叙述了福岛第一核电站事故对人类和环境的放射后果。该事故的放射后果已经通过一些国际组织和机构得到了处理。世界卫生组织（世卫组织）公布了对辐射剂量的初步估计[146]，并随后对归因于该事故的风险作了评估[147]。最近，联合国原子辐射效应科学委员会（辐射科委会）对辐射水平和效应做了估计[148]。国际放射防护委员会（国际放射防护委）对辐射防护的经验教训做了汇编[149、150]。其他国际组织，特别是联合国粮食及农业组织（粮农组织）和世界气象组织（气象组织）也提供了相关资料。资料框 4.1 对其中的一些国际活动作了描述。

资料框 4.1. 与福岛第一核电站事故的放射后果有关的国际活动

除原子能机构外，其他国际机构也一直在积极处理福岛第一核电站事故的放射后果问题：

- 作为联合国关注公共卫生的一个专门机构，世界卫生组织（世卫组织）公布了对该事故所产生的辐射剂量的初步估计[146]，并随后公布了健康风险评估[147]。
- 向联合国大会报告工作的联合国原子辐射效应科学委员会（辐射科委会）报告了对可归因于该事故的辐射照射水平和效应所做的估计，包括关于环境放射性和辐射剂量的大量数据[148]。
- 作为发表得到广泛采用的放射防护建议的一个非政府专家国际机构，国际放射防护委员会（国际放射防护委）公布了为加强国际放射防护体系对该事故期间和之后的放射防护问题所做的审查[149、150]。
- 作为从事农业、林业和渔业实践以确保所有人都有良好的营养和食品安全的一个联合国专门机构，联合国粮食及农业组织（粮农组织）通过机构间辐射和核应急委员会与原子能机构合作准备和响应影响粮食、农业、林业和渔业的核或辐射应急，并汇编了关于该事故引起的食品中放射性核素浓度的一个重要数据库[151]。
- 作为气象、实用水文学和相关地球物理学科的一个联合国专门机构，世界气象组织（气象组织）公布了对涉及事故的放射性核素弥散和沉积的气象分析所做的评价[152]。
- 经济合作与发展组织核能机构（经合组织核能机构）就核安全响应和从该事故汲取的教训提出了报告[153]。
- 这些组织和其他组织如联合国环境规划署（环境规划署）、国际劳工组织（劳工组织）、泛美卫生组织和欧盟委员会共同倡议编写了原子能机构主持印发的国际安全标准。世卫组织制订了拟适用于现存照射情况的《饮水质量指导方针》，其中包含饮用水的放射性参数[154]。粮农组织和世卫组织食品法典委员会编制了《食品法典》，其中汇集了保护消费者健康和确保国际食品贸易中的公平实践的国际统一食品标准，并载有关于食品中存在放射性核素的标准[155]。

许多国家包括日本的官方机构对福岛第一核电站事故的放射后果做了众多的评价（如参考文献[5]）。日本和其他国家专业辐射防护组织已经确定了辐射防护的重要教训（如参考文献[156]）。福岛县于 2011 年 6 月[158]推出了《福岛健康管理调查》[157]。福岛国际专家专题讨论会对资料框 4.2 中所述的这次调查进行了讨论[159、160]。

资料框 4.2. 福岛健康管理调查

《福岛健康管理调查》是对福岛县民众的健康状况所做的一般性研究和调查[157]。它基于一系列调查问卷，并具有以下目标：“(1) 评估居民的辐射剂量，和 (2) 监测居民的健康状况，以便进行疾病预防、早发现和早治疗，从而 (3) 保持和促进他们未来的健康” [161]。

在收到问卷调查答复后，结合对相关辐射水平的了解，国家放射线医学综合研究所在有记录的答复者移动情况的基础上对核事故后四个月内由于外照射产生的有效剂量作了估计。此外，还进行了详细的调查，其中包括：(1) 甲状腺超声检查，涵盖了约 37 万在核事故发生时年龄在 0 至 18 岁的居民（在事故发生后的头三年内进行了初步筛查，随后从 2014 年开始进行了全面的甲状腺检查，并在此后对居民进行定期监测）；(2) 旨在早发现和早治疗疾病以及预防生活方式相关疾病的全面健康检查，主要目标是在事故后大幅改变生活方式的 21 万撤离区前居民（除纳入工作场所一般健康检查的常规测试外或当地政府正在开展额外的测试，如白细胞分类计数）；(3) 心理健康和生活方式调查，旨在主要为具有罹患心理健康疾病如创伤后应激障碍、焦虑和压力的较高危险的撤离人员提供适当关怀；(4) 怀孕和生育调查，旨在向 2010 年 8 月 1 日和 2011 年 7 月 31 日之间收到了《母婴健康手册》的母亲及其子女提供适当的医疗护理和支持。（目前每年对这项调查进行更新，以考虑新的数据，特别是有关怀孕和生育的数据[162]。）

福岛医科大学已经接到了福岛县关于开展健康调查的任务，并启动了《福岛健康管理调查》辐射医疗科学中心，以便进行外部剂量估计的基本调查和四项详细调查。该项调查及其结果由《福岛健康管理调查》县级监督委员会会议定期评估。

本部分建立在这些国际和国家数据、评价和估计的基础上，并利用了新的资料，特别是日本当局为本报告的目的向原子能机构提供的特定资料。应当指出的是，各种国际和国家报告中的估计都是在不同时期做出的，而且资料水平各不相同。因此，虽然可以在不同的结果之间进行一些直接比较，但研究数据、方法和日期之间的差异使得难以作任何详细的比较。

量和单位

专业化的国际量⁸⁹和单位⁹⁰ [163、164]被用于监测和报告事故放射性数据。资料框 4.3 简要介绍了在本报告中使用的国际辐射防护量和单位。

⁸⁹ “量”一词在本报告中用于作为（本例中）放射性或辐射等现象的可衡量特性的科学意义。

⁹⁰ 量的单位是用作衡量一项标准的量的确定数额。

资料框 4.3. 本报告中使用的基本辐射防护的量和单位

用来描述放射性的量被称为活度，其测量单位称为贝可。1 贝可代表极小活度水平。例如，人体中含有约 5000 贝可天然放射性钾-40（一个重 70 公斤的人体内含 140 克钾）。因此，为了测量来自事故的大量放射性核素释放，本报告中使用了一个合适的前缀，如拍它（拍）。1 拍它贝可等于 10^{15} 贝可。

放射性物质的释放导致人受到电离辐射照射，当活度在体外时为外照射，当放射性核素被纳入体内（如通过摄入或吸入或通过皮肤）时为内照射。描述器官和组织所受平均辐射照射的量被称为吸收剂量，其测量单位是焦耳/千克，被称为戈瑞（戈），经常以千分之一戈瑞或毫戈瑞表示。

为辐射防护的目的，吸收剂量必须经过加权，因为不同类型的辐射对造成伤害有不同的效能水平，不同的器官和组织对辐射照射有不同的敏感性。对器官和组织吸收剂量适用辐射权重因子得出的量被称为当量剂量，其单位被称为希沃特，通常表示为千分之一希沃特，或毫希。在本报告中，还使用千分之一毫希，或微希沃特（微希）。从适用组织权重因子得出的量被称作有效剂量，其测量单位也是毫希。虽然在特定辐射照射效应方面存在个体之间的某些差异，但对于辐射防护目的而言，对剂量的估计就如同对限定的理想参考个体实施了照射，因为考虑个体差异并不可行。

吸收剂量和当量剂量用于表示组织和器官所受的剂量。鉴于所涉及的辐射类型，在事故引起的所有辐射照射情况下（除了轻微中子照射外），所报告的吸收剂量在数值上等于相应的当量剂量，反之亦然。有效剂量用于评估对整个身体的影响。只要任何吸入或食入的放射性物质留在体内，内照射就会继续下去。这种持续照射造成的待积剂量按预期受照人一生所受的剂量计算。

以下作为参考提供了对通常所受有效剂量的估计数[165]：

- 全球天然本底辐射产生 2.4 毫希的年平均有效剂量，一般范围为 1—13 毫希，大量人群招致 10—20 毫希，在极端的情况下高达约 100 毫希。
- 由医疗放射诊断引起的全球平均年有效剂量为 0.6 毫希，单次计算断层照相检查可以产生约 10 毫希的有效剂量。（应当指出的是，医疗照射通常局限于身体的一部分，也就是说，它不是在体内均匀分布）。

在实践中采用的其它量都从这些基本辐射防护量衍生出来。资料框 4.4 描述了其中一些衍生量和一些相关问题。在事故发生后，这许多量和单位都不容易为公众所理解。在对事故期间和之后所产生的放射防护问题进行评估的过程中，国际放射防护委得出的结论是，今后应采取国际行动，以确保“解决防护量和单位方面的任何混乱”[149]。

资料框 4.4. 测量量和操作术语

防护量当量剂量和有效剂量无法直接测量。因此，用于测量个人所受的或环境（或周围环境）中存在的外照射的手段要按照分别被称为个人剂量当量和周围剂量当量的操作量进行校准。这些都是防护量的替代值，即用来推断感兴趣量值的测量量，其测量单位也是毫希。这些操作量在事故后被用于监测工作，并在报告述及时被用于监测值。

取决于照射情况的类型，使用特定术语是为了便于说明照射控制的概念，具体如下：

- 在计划照射情况¹下，采用预期由某项计划操作添加的补充剂量。对于这种情况，相关个人剂量限制被称为剂量限值。剂量限值指预期由某一计划照射情况引起且不应被超过的个人补充有效剂量或补充当量剂量；剂量限值适用于在特定时间段内由外照射引起的补充个人剂量加上在该时间段内由于摄入放射性核素引起的补充个人剂量负担。
- 在应急照射情况²下，使用了三个剂量概念：(1) 预期剂量（在不采取防护行动的情况下预期会接受的剂量）；(2) 可防止剂量（在采取防护行动的情况下可防止的剂量）；及 (3) 残留剂量（预期在现存照射情况³下所受的、在防护行动终止后余留的剂量）。参考水平被作为用于优化防护的指导水平适用于残留剂量。这些概念体现了这样的剂量水平，即“高于该水平则判定不适合计划允许照射发生，而低于该水平则应该实施防护的最优化”[129]。

还有从活度中衍生出来的量，如与环境中存在放射性有关的量，例如表示在陆地上或在公众消费产品中的活度。相关衍生量有：表示单位面积活度的沉积密度，通常以贝可/平方米表示；表示单位质量或重量活度的比活度，通常以贝可/千克表示；表示单位体积活度的放射性浓度，通常以贝可/升表示。这些量通常涉及到污染。该术语在国际标准中被正式定义为：(1) 地表或土壤、液体或气体内（包括人体内）存在放射性核素，而放射性核素在其中的存在是非故意或不希望的；或 (2) 引起放射性核素存在于这类地方的过程，在这两种情况下，都没有给出所涉危害的程度。然而，污染一词具有杂质或危险的含义，在其正式字面意义中并不意指存在或过程。

¹ 计划照射情况源于对辐射源的计划操作（如福岛第一核电站的正常运行）或导致产生源照射的计划操作。由于可以事先对防护和安全做出规定，因此，可从一开始就对照射加以限制。在计划照射情况中，是预期会发生某种程度照射的。

² 应急照射情况包括由于事故所引起并需要立即采取行动方能避免或减轻不利后果的照射情况。

³ 现存照射情况系指在需要就实施控制的必要性作出决定时业已存在的照射情况，并包括在宣布应急照射情况结束后由核或辐射应急产生的残留放射性物质所致的照射。

不确定因素

对事故放射后果的估计受许多不确定因素的约束，这些不确定因素常常以一系列可能的相关量值表示。在对比如估计外照射引起的个人辐射剂量过程中的有关变量进行统计分析后，对其中的一些不确定因素的原因作了说明，但并不是所有的不确定因素都得到了解决。虽然对辐射照射引起的风险的了解比其他制剂受到照射引起的风险的了解更深入，但重要的是相关的不确定因素应得到适当解决和交流[166、167]。

统计学分析

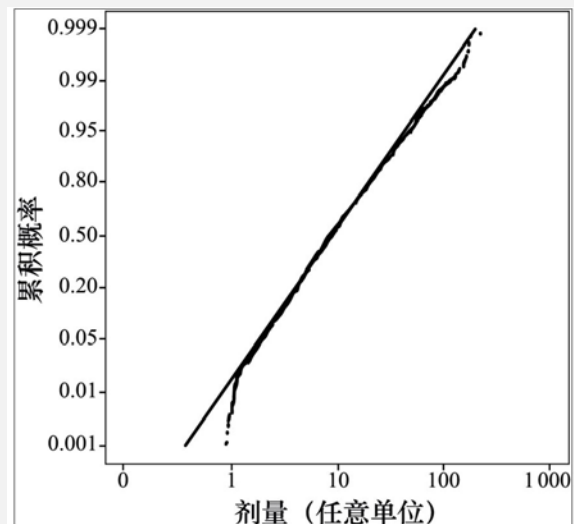
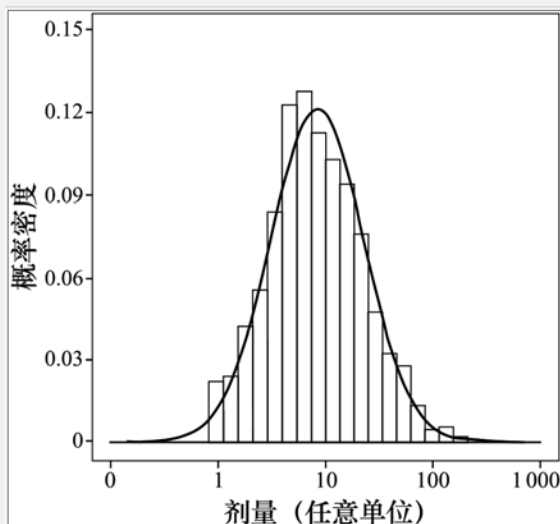
为了处理不确定因素，对一些相关的可变数据进行了统计学分析。变量包括食品中的比活度，特别是个人辐射剂量。辐射剂量分析涵盖了基于调查表和周围环境辐射数

据的估计以及基于通过个人剂量计的个人监测和已纳入放射性的全身计数的估计。资料框 4.5 对这种统计学分析的依据作了概述，其中描述了数据的概率分布，特别是在分析中具体采用的对数正态概率分布。存在着多个测量数据包括环境量测量数据在统计学上预期按照近似对数正态概率分布方式分布的许多情形。可以获得关于呈现近似对数正态分布的受照人群所受剂量统计分布的大量信息。相关证据来自辐射科委会职业剂量估计[168]以及对 1986 年切尔诺贝利核电站事故公众剂量所做的分析[169]。但在对呈对数正态分布的提交数据进行分析的过程中提出了一些问题，资料框 4.6 对其中一些问题作了概述。

资料框 4.5. 对估计数据和测定数据的统计学分析

对本报告中使用的一些相关数据特别是关于个人剂量以及关于食品中的活度的数据进行了统计学分析。对可变量的值（如活度值或剂量值）根据它们的频度分布进行了分类。为此，对全部数据进行了归堆，即归入将数据进行整理后归入其中以供进行分析的统计堆栈或一系列小间隔数值范围内。各统计堆栈中的数据在柱状图中彼此相邻显示，该柱状图是一个由代表各统计堆栈的矩形组成的图表，各统计堆栈位置代表量值，其尺寸代表每一统计堆栈的数据量。然后对该柱状图进行了正常化处理，同时将各矩形的值乘以一个系数，使得这些矩形的总面积等于 1。当可以获得足够的数量而且间隔变得非常小时，该柱状图变成一个被称为概率密度函数的光滑曲线，该曲线描述该量（如食品中的活度或人所受的剂量）拥有一个给定值的相对可能性。

最常见的分布是由就最大概率而言对称的钟形概率密度函数所代表的正态分布（或高斯分布），但适合本报告目的的最相关分布是对数正态分布。对数正态分布是一个量如活度或剂量的概率分布，其对数呈正态分布。因此，只有当作为该量的对数（如活度的对数或剂量的对数）的函数而不是作为该量的函数显示时，对数正态概率密度函数才就最大概率而言是对称的。以下左图示出了该对数正态概率分布的一个例子，其中显示了理想化的柱状图及其概率密度函数。



概率密度函数可以合并，即可以从量的低值到高值计算正常化柱状图中各统计堆栈之价值的总和。这种量的函数之和被称为累积概率函数，并描述这样的可能性，即具有特定概率分布的一个量将被发现具有小于或等于该值的一个值。

在代表经过对数校准的量（如剂量）的横坐标与代表作为正态函数校准的累积概率的纵坐标的坐标平面上，对数正态累积概率函数可以被绘制成一条直线。以上右图中显示这种代表的例子，其中与直线相对绘制了左图统计堆栈中的实际实验数据的积分。

资料框 4.6. 数据对数正态分布的问题

数据集的归堆通常会导致统计堆栈级别的相对平滑分布，但对某些所提交信息的数据集而言，情况却不是这样。对于这些数据集而言，由于大量数据在特定统计堆栈积累，这些统计堆栈的分布看起来通常都是扭曲的。例如，在一些数据集中，接近探测限值的所有值都被不作区分地积累在一个（初始）统计堆栈，而对较高的值则作了适当区分。在统计学分析中，做出的决定是根据从实际数据得到的概率密度分布来分配这种误导性地积累的数据（使用其相关的统计值，如平均和标准偏差），并在此基础上建立一个推测性的、随机创建的分布，包括更多数量的统计堆栈。结果产生了一个概念性的柱状图，该图根据真实数据的统计值量身定制，而且一个平滑概率密度曲线可以适合于该图。该概率密度函数描述了在数据已经足够详细并作了区分的情况下怎样才是这种分布的理想的样子，在本报告的相关图表中是与累积概率函数一起呈现的。在其中的一个附图中还呈现了堆栈的实际分布情况，以进行比较。

在整个数据范围内可能观察不到确切反映对数正态分布的情况，但对偏差特别是对累积概率中偏离直线情况的说明通常可以详细加以阐述，而且这种说明是分析工作的一个重要组成部分。偏差的原因是源于测量本身以及采样过程统计性质这两方面的不确定性。所受剂量分析中的一个特殊问题是同期受照人群的可能的不同类性，这在事故情况中具有代表性。其他原因包括数据的约束分布；例如，在高剂量时，有可能会高于预期累积概率（即比预期更少的人接受高剂量），而最可能的解释是成功地实施了剂量限制。如果在低剂量范围内人数高于预期（即比预期更多的人接受低剂量），一个似乎可能的解释是，与探测限值相等的剂量已被（误导性地）分配给所受剂量低于这些水平的所有人；反之，如果人数低于预期，这可能意味着给所受剂量低于探测水平的每个人都（再次误导性地）分配了一个零剂量。有时，由于本地数据的高度不一致性，对该直线的偏离就成为表面上的；例如，当两个不同人群组如撤离人员与仍留在该区域的居民混在一起时，可能会出现累积概率分布斜率变化的证据，因为每个扇区会反映在各区域接收的剂量。有时还要长期收集比如由于随时间进行的放射性衰变引起的使数据失真的信息。对数正态累积概率图中的偏离线性度可被用来就基础数据做出似乎合理的推论。

4.1. 环境中的放射性

事故导致放射性核素向环境的释放。许多组织使用不同的模型对这些释放进行了评价。大部分大气释放被盛行风向东吹散，沉积和弥散在北太平洋。放射性物质的数量和成分估算方面的不确定性难以解决，原因包括缺乏有关大气释放沉积在海洋的监测数据。

风向的改变意味着相对少部分大气释放沉积在陆地，主要在福岛第一核电站的西北方向。对陆地环境中沉积的放射性核素的存在和活度进行了监测和表征。测得的放射性核素活度因物理衰变、环境传输过程以及净化活动随时间而降低。

除了从大气沉积进入海洋的放射性核素外，还有福岛第一核电站在厂址直接排入海洋的液体释放和排放。放射性核素在海洋中的准确移动很难单独通过测量进行评价，但利用了一些海洋输运模型对海洋弥散进行了估计。

碘-131、铯-134 和铯-137 等放射性核素被释放并在饮用水、食品和一些非食用物品中被发现。日本当局为响应事故制定了有关防止消费这些产品的限制措施。

4.1.1. 释放

利用成熟的数学模型和方法及相关计算机程序开展了对福岛第一核电站事故放射性核素释放的多次评价（见参考文献[170—177]）。

在事故的早期阶段，半衰期分别为 10.76 年和 5.25 天的惰性气体氙-85 和氙-133 对来自大气释放烟羽的外照射有贡献。半衰期为 8.02 天的短寿命碘-131 在摄入或吸入情况下对甲状腺所受的剂量当量有贡献。半衰期分别为 2.06 年和 30.17 年的较长寿命铯-134 和铯-137 通过外照射和内照射对当量剂量和有效剂量均有贡献。虽然碘-131 衰变相对很快，但它能够对甲状腺产生相对高的当量剂量。在一些区域，铯-137 可能在环境中持续存在，在不进行治疗的情况下，它可能始终是个人有效剂量的贡献者。

锶、钇和一些铜系元素（如钷）的放射性核素也以不同数量被释放。如第 2.1 节所表明的那样，3 月 13 日上午 5 时 30 分至 10 时 50 分之间，在电站大门（距离 1—3 号机组合一公里）附近探测到中子。据估计，中子来自因反应堆堆芯损坏而可能已被释放的放射性核素的自发核裂变。这种现象是可预见的，而且已报告了相对低水平的这些放射性核素的存在。

向环境的释放

惰性气体是福岛第一核电站早期释放中一个重要组成部分；据估计释放了约 6000 至 12 000 拍它贝可的氙-133（或 500—15 000 拍它贝可，如果评价中包括早期估计值）。所释放的碘-131 的平均总活度约为 100—400 拍它贝可，而铯-137 的平均总活度约为 7—20 拍它贝可（或 90—700 拍它贝可和 7—50 拍它贝可，如果包括早期估计值）。这起事故的释放估计约为 1986 年切尔诺贝利核电站事故释放的十分之一[169、178、179]。这些释放大部分被弥散在北太平洋；因此，通过环境放射性核素沉积测量不可能再确认所释放物质（源项）的数量和同位素组分[177]。

向海洋的释放

在北太平洋弥散的大气释放大部分沉降在海洋表层。有向海洋的直接释放，也有在厂址向海洋的排放，而主要的高放射性水源来自位于福岛第一核电站的一个海沟。在 2011 年 4 月初观察到放射性释放高峰。向海洋直接释放和排放的碘-131 估计为 10—20 拍它贝可。直接释放和排放的铯-137 按大多数分析估计范围为 1—6 拍它贝可，但也有评价报告说估计值为 2.3—26.9 拍它贝可[175]。

4.1.2. 弥散

已利用许多理论模型估算弥散模式。开展了环境（包括空气、土壤、海水、沉积物和生物群）中碘-131、铯-134 和铯-137 放射性浓度的广泛测量，而且还利用这些测量估算了释放的弥散情况。

大气弥散

大气放射性释放随盛行风方向主要向日本东部和北部传输，然后遍布全球。图 4.1 示出用于估算各种放射性核素的大气传输及其沉积模式的许多大气传输模型的一个例子，图示说明了模拟铯-137 全球弥散的结果[180]。该图利用参考文献的原色码说明空气中放射性浓度，其中色度方面的小改变对应于放射性浓度方面一个数量级的变化。该图示旨在支持以下结论，即大气中放射性浓度随离开福岛第一核电站的距离而显著降低。

远至欧洲和北美的高灵敏度辐射监测网探测到归因于这起事故的极低水平的放射性。但是，这些释放对全球环境本底放射性水平的影响则可忽略不计。

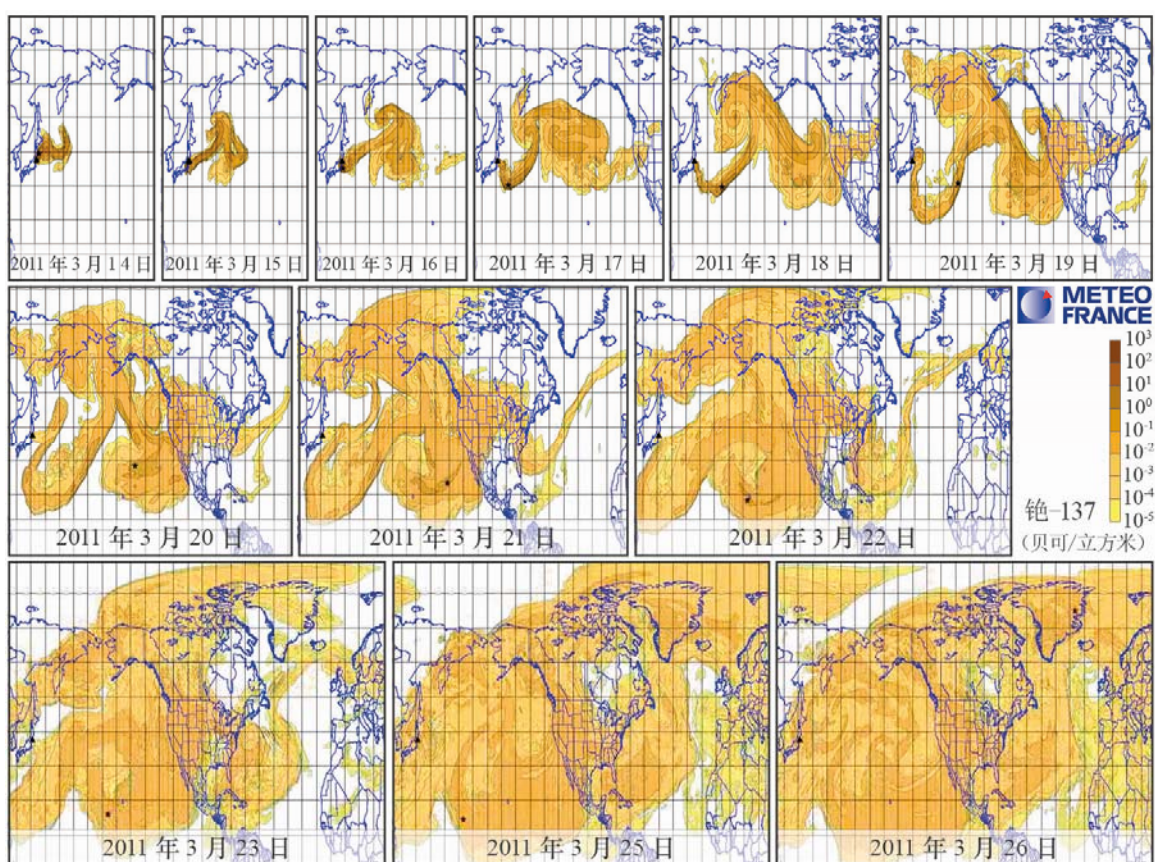


图 4.1. 来自其中一个铯-137 大气弥散全球模型的结果，以参考文献的原色码示出（详见参考文献 [180]）（图示提供：法国气象网站）。

在厂址向海洋的直接释放和排放的海洋弥散

在厂址进入海洋、随黑潮洋流⁹¹ 东向移动的已释放和排放的放射性核素大部分通

⁹¹ 黑潮系流经福岛第一核电站的北太平洋西侧北向流动的洋流。

过北太平洋环流⁹²被传输很远的距离，并在海水中被高度稀释[181]。放射性散布于很大的海洋距离，有时通过蓝鳍金枪鱼等海洋生物群落的途径，在远离事故的地方检测到极少量的放射性[182]。

虽然放射性核素在海洋中的准确移动很难单独通过测量进行评价，但利用了一些海洋运输模型对其弥散模式进行了评价。图 4.2 示出这些说明铯-137 在北太平洋弥散模式的例子。该图使用每一特定参考文献中所用的原色码。与大气弥散的情况一样，色度或色调方面的小改变对应于放射性浓度的一个数量级变化。该图示旨在支持以下结论，即海洋中活度随离开福岛第一核电站的距离而显著降低。所有模型均表明，海洋中铯-137 的活度非常低。

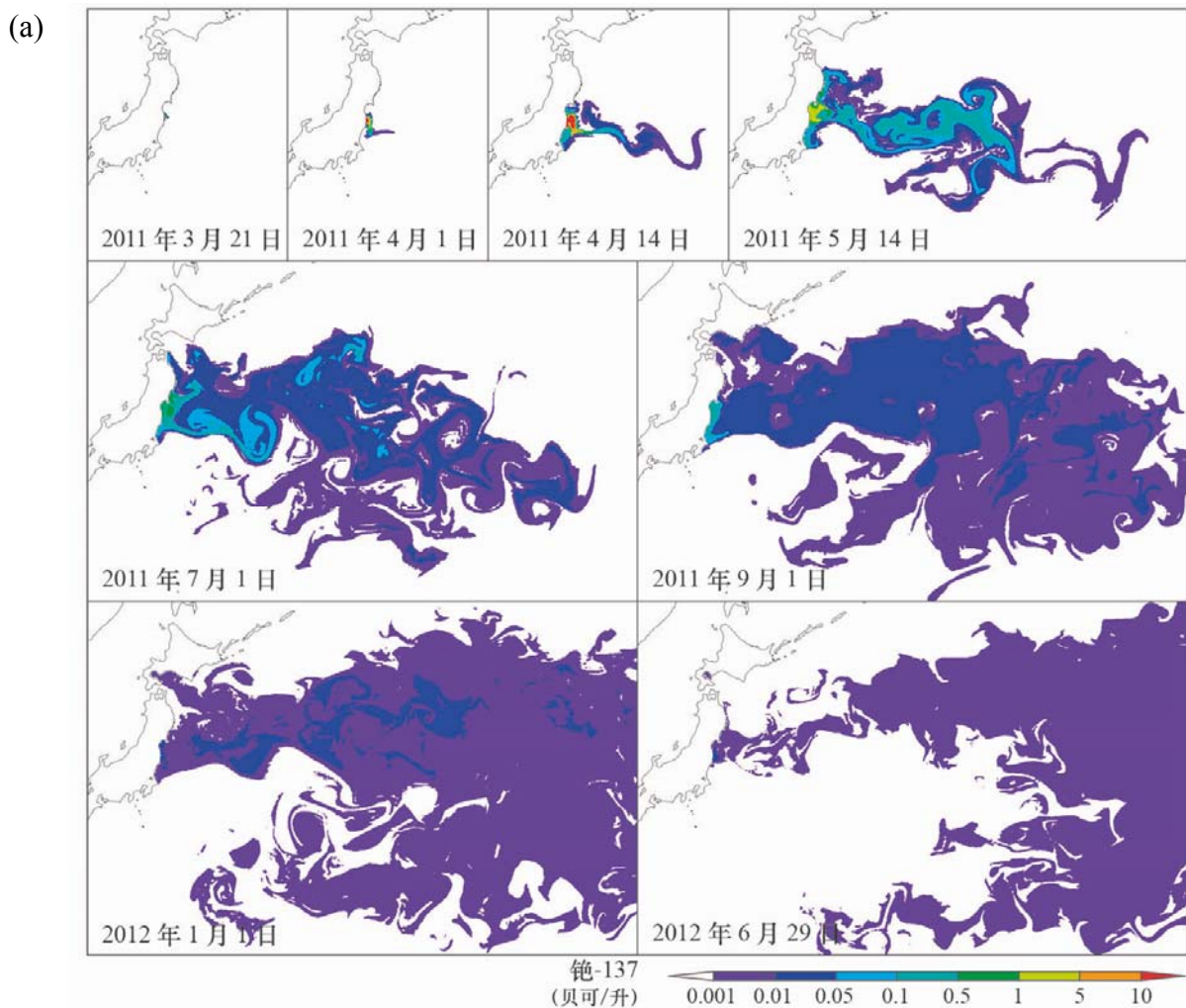
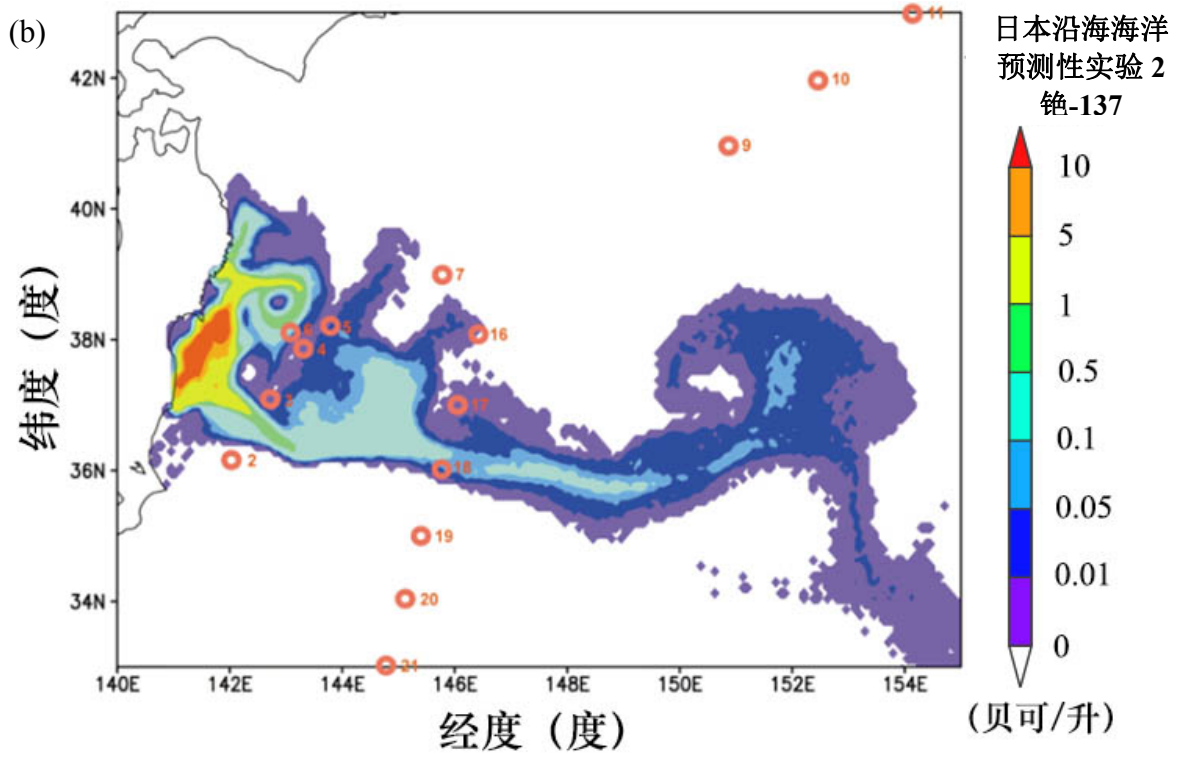


图 4.2. 使用一些海洋模型估算海水中铯-137 的放射性浓度 (所使用的色码和单位参考文献中采用的色码和单位): (a) 模拟 2011 年 3 月 21 日至 2012 年 6 月 29 日受污染水体的例子[183、184]。

⁹² 北太平洋环流系五大海洋环流之一，覆盖北太平洋大部；它具有顺时针环流模式，由北方的北太平洋洋流、东方的加利福尼亚洋流、南方的北赤道洋流和西方的黑潮洋流形成。



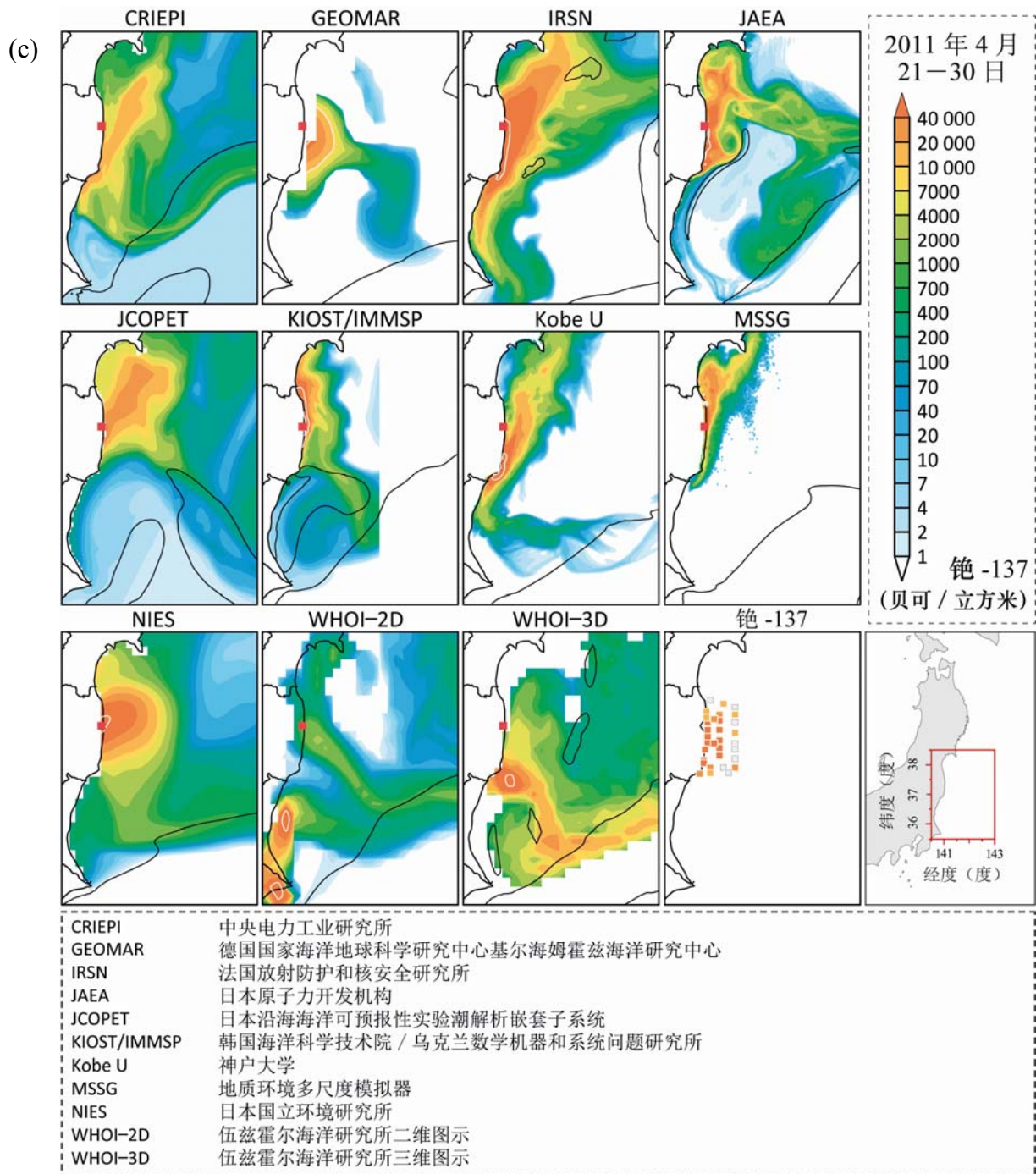


图 4.2. (续) 使用一些海洋模型估算海水中铯-137 的放射性浓度 (所使用的色码和单位为参考文献中采用的色码和单位): (b) 模拟 2011 年 4 月 14 日至 26 日之间表层水中铯-137 的横向分布 [185]; (c) 2011 年 4 月 21 日至 30 日的 10 天平均铯-137 浓度的横向分布, 模型的名称在每幅图的上方标出 [175]。

4.1.3. 沉积

地球表面沉积的活度被量化为沉积密度, 并以单位面积的活度形式衡量, 通常以贝可/平方米表示。当这种沉积是陆地沉积, 通常称之为地面“污染”。

海洋沉积

使用不同的模型研究了铯-137 在海洋的沉积[见图 4.3]。

很难提供释放到大气中沉积在海洋表面的铯-137 的准确数量估计[186]。作为参考，截至 1970 年的事故前全球铯-137 沉积估计为 290 ± 30 拍它贝可，而北太平洋的一般（本底）水平约为 69 拍它贝可[187、188]。

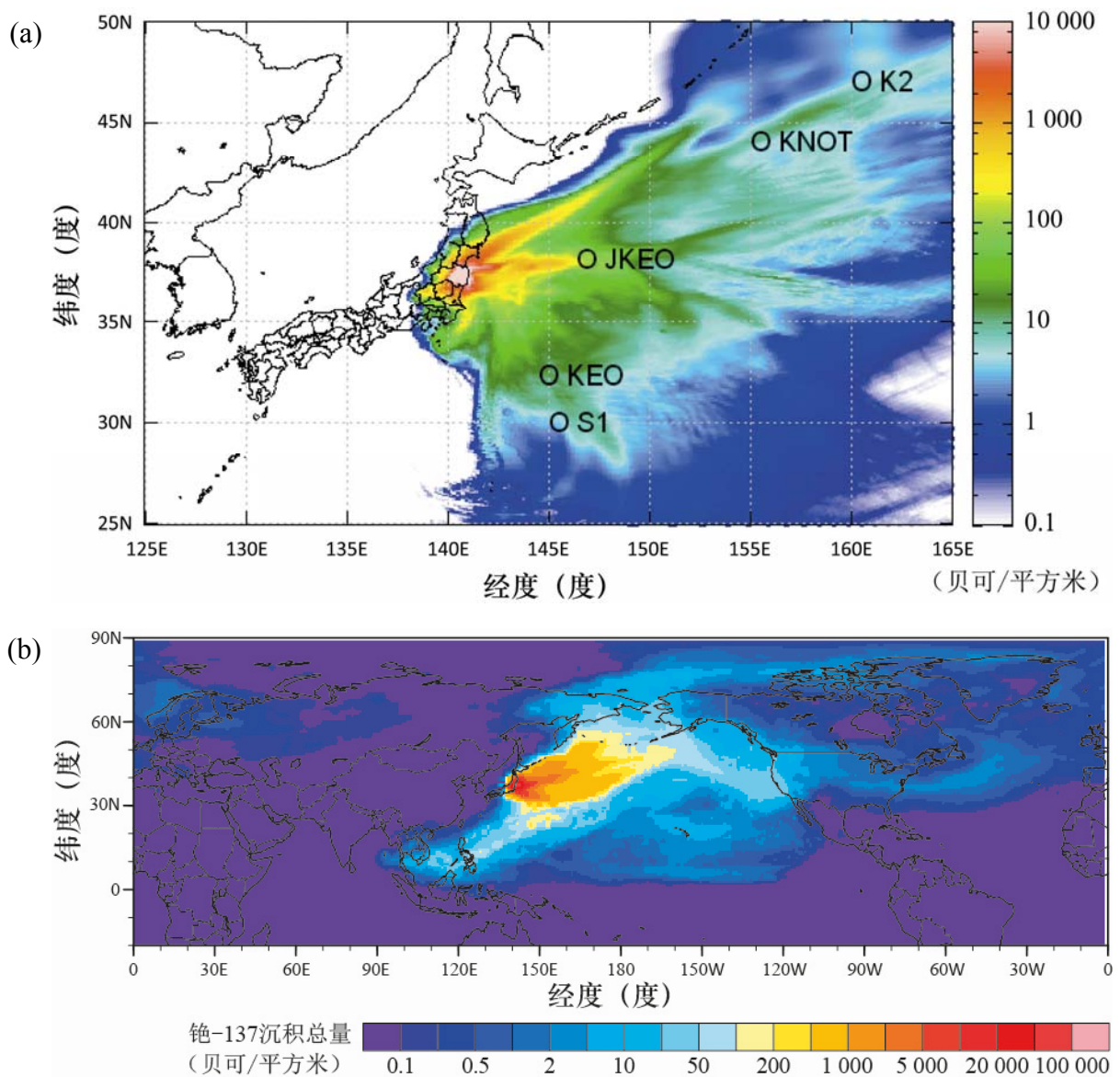


图 4.3. 使用一些模型估算铯-137 的海洋沉积密度（所用单位为贝可/平方米）。(a) 模拟直至 2011 年 4 月 1 日的累积风成输入[185]；(b) 集合平均铯-137 沉积（2011 年 3 月 11 日至 31 日）的例子 [175]。

陆地沉积

虽然大部分大气释放向东弥散，但 3 月 12 日、14 日和 15 日发生的释放被吹向内陆，相关的放射性核素特别是碘-131、铯-134 和铯-137 沉积在地面。沉积模式因受到降雨、降雪及地貌和土地使用等其他局地或区域条件的强烈影响而差异很大。影响陆地环境沉积模式的另一个因素是碘和铯的不同物理和化学特征。

在福岛第一核电站的西北部发现了长寿命铯-137 的最大量沉积，那里日本地表沉积的铯-137 估计约为 2—3 拍它贝可[188]。其沉积密度通过物理和环境衰变随时间而降低。铯因其化合物的溶解度而可以相对容易地通过环境移动。风和雨等风化效应及其他环境影响能够减少铯在环境中的存在。所有这些影响减少较铯-137 存在的时间比其半衰期还要短。在许多受影响的区域，通过净化和其他治理工作进一步减少了铯-137 的存在。

图 4.4 示出事故厂址西北空中测量的周围剂量当量的详图及其随时间的变化（亦见图 4.2(c)）。

对个人而言，除了因自然本底辐射水平而通常受到的照射外，陆地环境中因事故所致铯-137 的存在有可能导致对他们的延长照射。存在着一个主要归因于以往核试验的铯-137 全球本底沉积密度水平。据辐射科委会估计，在 20 世纪 60 年代中期，该全球本底水平在北半球 40°—50° 纬度处高达约 4000 贝可/平方米；当时，在南半球 60°—70° 纬度最低的全球值估计约为几百贝可/平方米[190]。一些研究分析了当地条件的影响，得出的结论是累积的本底沉积可能约为 10 000 贝可/平方米，或甚至更高（例如，见参考文献[187]）。自 20 世纪 60 年代以来，全球沉积水平一直在衰变；就 2000 年而言，辐射科委会估计最高值约为 2000 贝可/平方米[190]。

在福岛第一核电站西北地区，测量到明显增高水平的铯-137 沉积密度。按数量级表示，在受影响最重区域的水平为 1000 万贝可/平方米，而且很多区域的水平约 100 万贝可/平方米。福岛县整个受影响区域的沉积分布不均匀，紧邻福岛县受影响最重区域外的水平约为 1 万贝可/平方米。虽然日本其他一些地区显示出增高的沉积水平，但日本大多数地方归因于这起事故的水平一般约低于 1000 贝可/平方米[191、192]。

沉积碘-131 的最高水平在事故发生后曾一度超过约 300 万贝可/平方米，但由于碘-131 的半衰期短，该水平此后迅速降低，目前已测量不到。

4.1.4. 消费品

在受影响区域，食品、饮用水和非食用产品等一些消费产品和个人或家庭日常使用的其他用品）中发现了碘-131、铯-134 和铯-137 等放射性核素。

日本当局在事故发生后于 3 月 21 日制定了限制措施，以防止消费含有水平高于暂行监管值的放射性核素的饮用水和食品（见第 3 部分）。

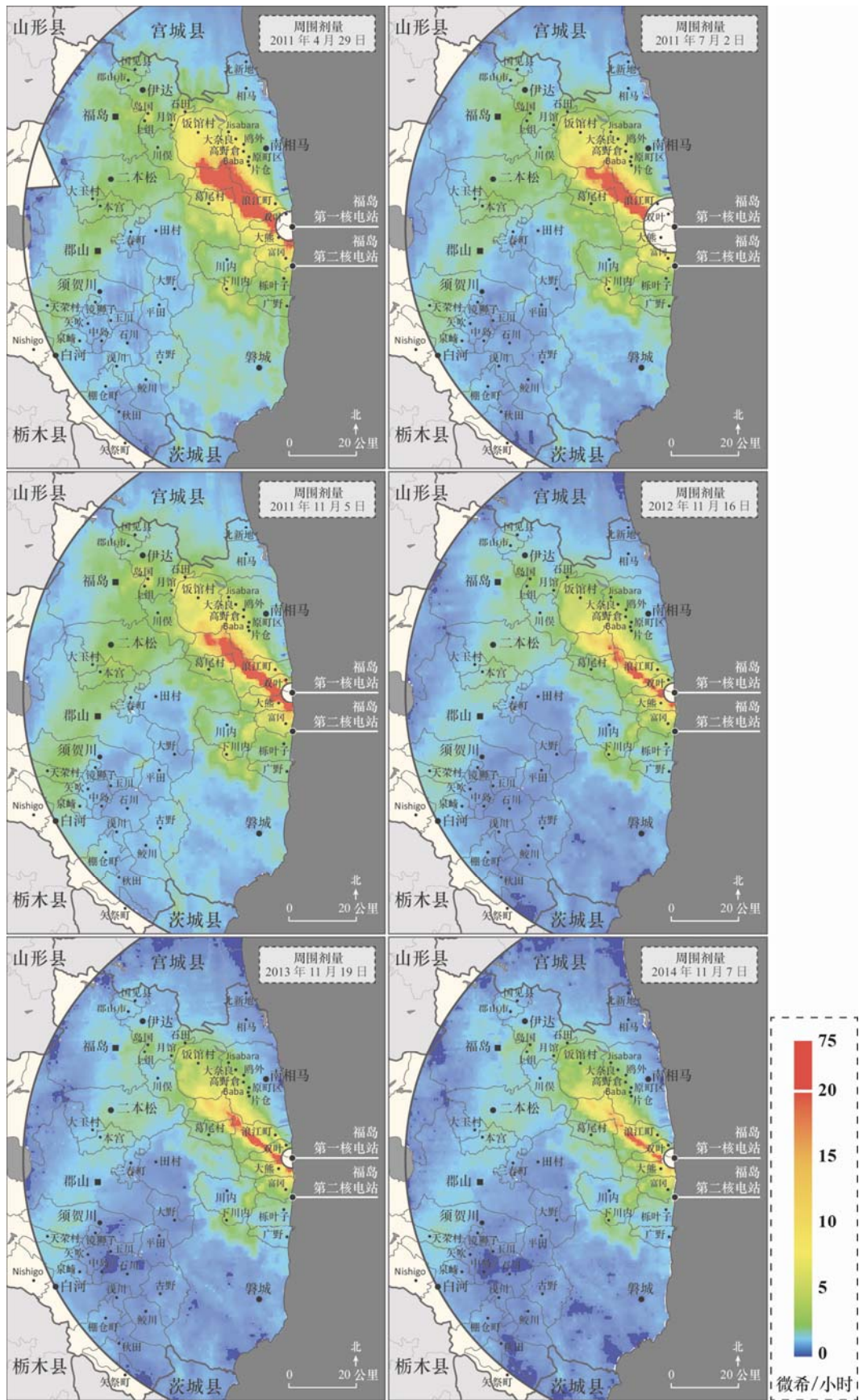
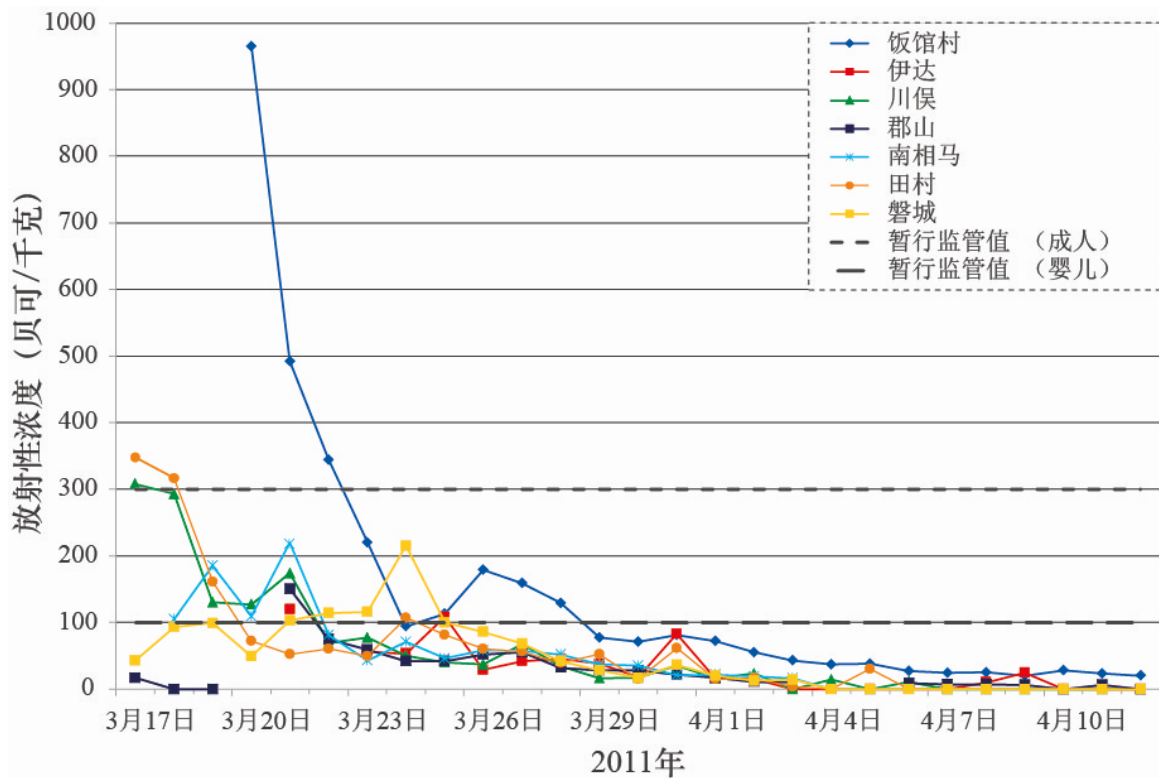


图 4.4. 实测电站西北区域散布的释放沉积所致空中周围剂量当量率（以微希/小时表示）[189]。

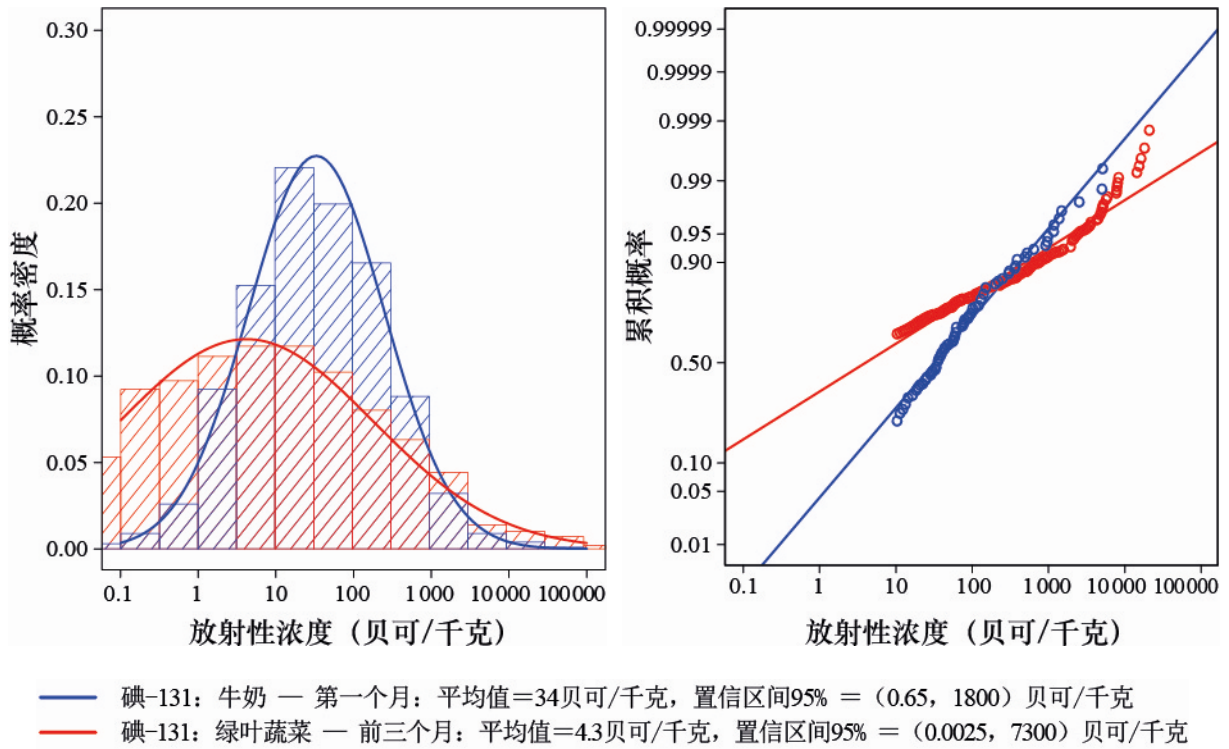
世卫组织关于饮用水中放射性核素可允许水平的指导值适用于正常情况（见资料框 4.1）2012 年 4 月之后，日本所有饮用水都低于世卫组织的指导值[193]。

鲜有例外的是，市场上提供的食品中放射性核素的水平没有超过适用于国际贸易的《食品法典》中规定的水平（见资料框 4.1）。存在着在野猪肉、野生蘑菇和野生植物包括蕨类等野生食品中发现放射性核素水平高的情况[194]。在日本，食用野生食品的情况并不常见。野生植物主要是有限人群在春季有限的时段期间食用。农户很少直接销售野生蘑菇和植物。栽培蘑菇若放射性浓度水平低于监管值则可以在市场上出售。

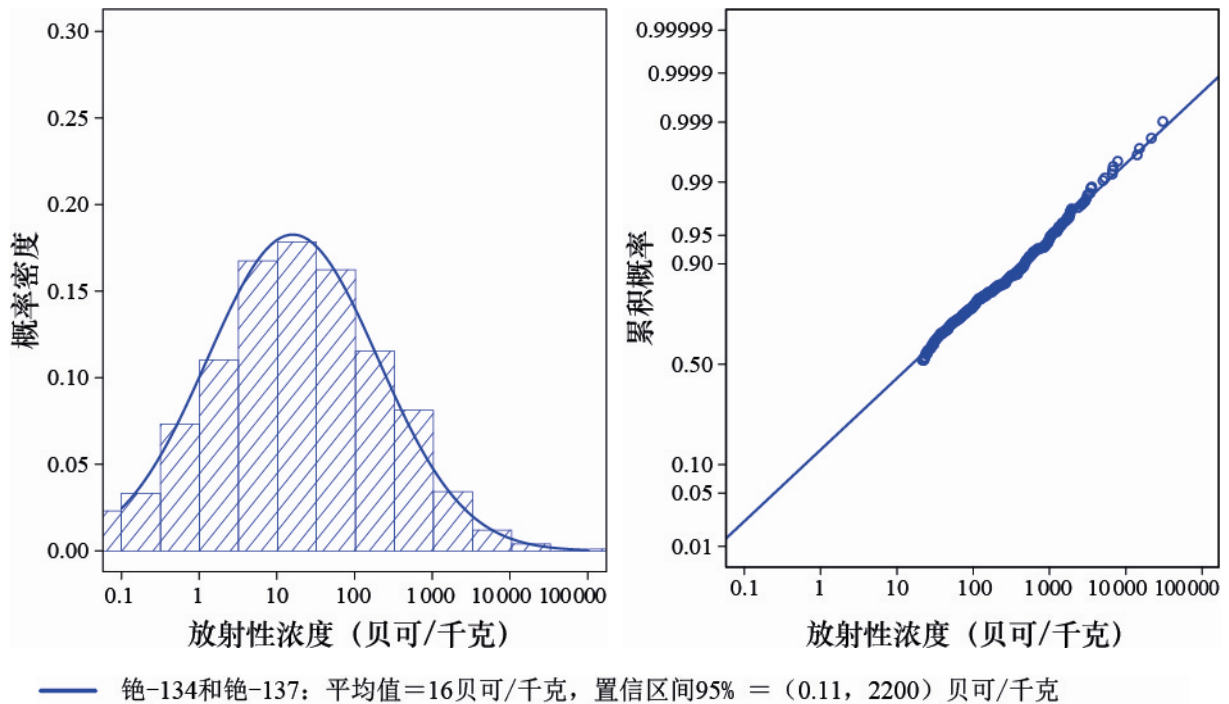
图 4.5 中示出饮用水中放射性浓度和食品中比活度的一些例子。该图示出福岛县各场所饮用水供应中测量的碘-131 放射性浓度相比日本当局发布的暂行条例中规定的水平的时间演变[195]。对于事故后第一个月期间牛奶中的碘-131 比活度和事故后头三个月内绿叶蔬菜中的碘-131 比活度，评价了对数正态分布概率密度和累积概率分布。对于蘑菇（包括主要的露天栽培蘑菇）中铯-134 和铯-137 的比活度，对数正态分布概率密度和累积概率分布的评价在事故后 12 个月期间进行。这些分析基于对粮农组织[151]收集的数据的统计分析，证明有约 90%的可能性是这些值低于《食品法典》规定的 1000 贝可/千克的水平（日本当局规定的水平最初为 500 贝可/千克，随后将其降为 100 贝可/千克[193]）。这种保守方案给生产商和消费者造成了困难。



(a)



(b)



(c)

图 4.5. 饮用水和食品中放射性的一些例子。(a) 在福岛县各场所饮用水供应中测量的碘-131 放射性浓度的时间演变[195]。(b) 事故后第一个月内牛奶中和事故后头三个月内绿叶蔬菜中的碘-131 比活度的对数正态概率分布。(c) 事故后 12 个月期间蘑菇中铯-134 和铯-137 比活度的对数正态概率分布[151]。(图 4.5(b)和图 4.5(c)示出标准化理想概率密度分布(见资料框 4.6)和累积概率分布; 在食品中比活度方面采用了 10 贝可/千克的标称检出限值。)

4.2. 保护人员免于辐射照射

事故发生后，日本当局适用了国际放射防护委最新建议⁹³中列出的保守的剂量参考水平。一些防护措施和行动的实施已被证明对于实施当局是困难的，对受到影响的人则非常苛刻。

在应急阶段过去后，在针对事故的较长期后果而进行饮用水、食品和非食用消费品控制方面，国家和国际标准和导则之间则存在一些差异。

人们通过被称作照射途径的许多不同的渠道受到归因于事故的辐射照射。这些照射在资料框 4.7 中讨论。人员所受辐射剂量通过对各种照射途径的模拟和（或）环境测量和个人测量进行估算。这种估计数和测量值随后被用于限制照射量和确保对人员的防护。

4.2.1. 公众照射限制

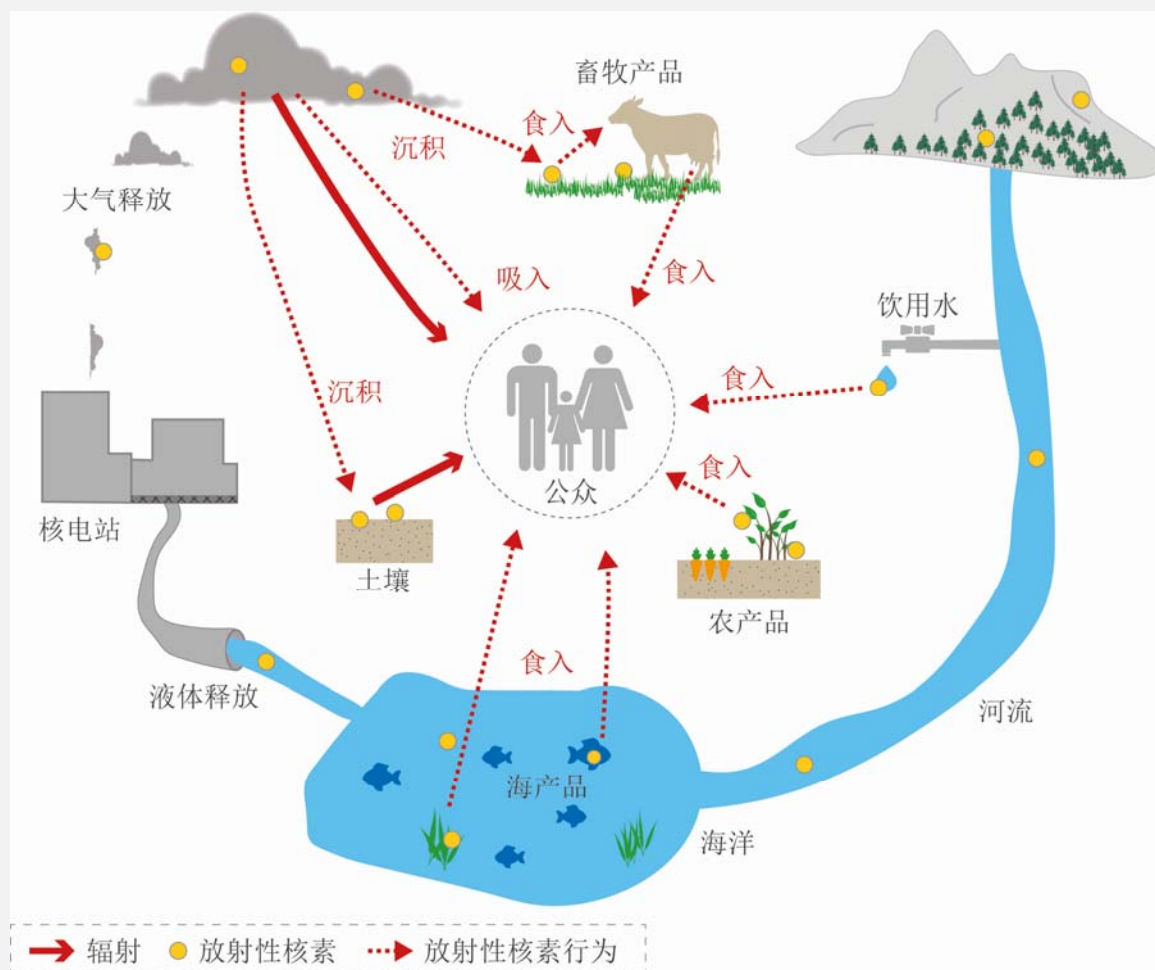
事故发生时适用的“基本安全标准”的版本是于 1996 年发布的[137]，并基于 1990 年发布的国际放射防护委建议[196]。该版本包括有关事故情况下的干预水平要求，并考虑预计的预期剂量和可能减少可避免剂量。事故发生时，正在对 1996 年版“基本安全标准”进行修订，以反映 2007 年已发布的国际放射防护委建议[129]（见资料框 4.8）。这些建议包含了处理紧急情况的不同方案，特别是审查了已被设计用作个人防护行动标准的干预水平概念，并引入旨在用于决定防护战略的参考水平概念（条件是将在涉及个人防护行动的安全标准中引入一般准则）。

2007 年版国际放射防护委的建议提供了有关参考水平的框架，并对包括应急情况在内的所有照射情况作了举例说明。作为说明辐射应急产生的最高预计残留剂量的一个例子，它们建议，无论是急性照射还是年照射，其参考水平可以是大于 20 毫希但不超过 100 毫希。它们还建议，应该考虑减少剂量，并加强努力使剂量不超出 100 毫希，应向个人提供辐射风险和旨在减少剂量的措施的信息，并应进行个人剂量评估。日本监管机构原子力安全和保安院选择将 20 毫希/年较低的参考水平用作公众防护的参考水平。

⁹³ 辐射防护的国际建议是由国际放射防护委员会（国际放射防护委）发布的。在制订国际安全标准方面，包括由一些国际组织制订和确立并在原子能机构主持下颁布的辐射防护标准（《国际电离辐射防护和辐射源安全基本安全标准》（基本安全标准）），都考虑了这些建议。“基本安全标准”在世界范围内被用于制订有关保护人类和环境免受电离辐射照射的潜在有害影响的国家规章。2007 年版国际放射防护委的建议提供了经修订的辐射防护框架。这些建议包括在防护战略中采用参考水平。事故发生时，正在对“基本安全标准”进行修订，以便除其他外，尤其考虑这些建议。

资料框 4.7. 照射途径

照射途径系指构成放射性物质经环境迁移并最终使人容易受到辐射剂量的进程的各种过程、变化序列或事件。它们的特点是多方面的，包括放射性物质进入环境的过程、物质从源头迁移所借助的媒介、人受到辐射影响的照射点、描述人如何受到外照射和放射性物质可能如何进入人体的照射路径（例如进食、饮水、通过皮肤接触），以及有可能受到照射的人群。下图简单描述了福岛第一核电站事故的照射途径。



儿童保护

儿童保护是受事故影响的地区父母特别关切的事情。为进行保护的目，当前国际放射防护委建议针对包括儿童在内的整个人群使用的以危害调整的风险系数高于针对成年人群使用的系数（高出约 30%）。这种差异反映在国际放射防护建议和标准中。

为保护公众所采取的辐射防护措施和行动的影响

公共设施的适当基础设施是核或辐射应急期间支持限制公众照射的措施必不可少的[199]。地震、海啸和事故后果必须在当地基础设施崩溃的情况下进行处理。由于

地震和海啸，许多公共设施、家庭和商业被摧毁或损坏，电话和互联网使用、电力、燃气和饮用水的供应、公共交通，以及食品、汽油和取暖用油的配送都遭到严重破坏。室外温度低，天下着雨雪，暖气不足。这就意味着，如果没有御寒的衣服和外套，许多居民无法长时间留在避难所。

这些困难条件影响了保护人员免受辐射照射所需的防护措施的实施。例如，避难人员无法通过洗涤去污，因为在大多数避难所水是定量配给的，而且是留作饮用的。

资料框 4.8. 事故发生时正在修订已经施行的“基本安全标准”：参考水平

事故发生时正在施行的辐射防护国际安全标准是 1996 年版《国际电离辐射防护和辐射源安全基本安全标准》或 1996 年版“基本安全标准”[137]。这些标准要求，个人可能从计划的和受监管的实践中受到的附加有效剂量限于 1 毫希/年（在特殊情况下，可以适用高达 5 毫希有效剂量，条件是连续五年平均有效剂量不超过 1 毫希/年）。1996 年版“基本安全标准”强调，这些剂量限值不涉及在必须考虑预期剂量和可能减少可避免剂量和最终残留剂量的事故情况下是否和如何采取干预行动的决定。具体涉及紧急情况的 1996 年版“基本安全标准”要求提供了预计在紧急情况下进行干预（如隐避、撤离和碘甲状腺阻断）的通用干预水平和食品的一般行动水平。

此外，原子能机构还在 2002 年颁布了与核或辐射应急准备和响应的具体要求有关的安全标准[69]，包括执行隐避、撤离和碘甲状腺阻断等防护行动的剂量标准。这些标准规定了对核或辐射应急适当准备和响应水平的要求，以期最大限度地减少紧急情况发生时的后果（更多信息参见第 3 部分）。

在事故发生时，1996 年版“基本安全标准”正在审查中，部分地鉴于已于 2007 年颁布的国际放射防护委新的一般建议[129]。就在事故发生前，国际放射防护委还颁布了关于向应急照射情况下的人员防护[127]和核事故或辐射紧急情况后期污染区的居民防护[197]适用其新建议的具体建议。

2007 年版国际放射防护委的建议修订了处理应急照射情况的方案，包括将参考水平概念用于防护战略。建议的参考水平是可大于 20 毫希但不高于 100 毫希的一种有效剂量（无论是急性照射还是年照射）。考虑到有效剂量提高到 100 毫希无疑将有理由采取防护行动，在为减少照射所采取的行动将具有破坏性的异常且通常极端的情况下，这将被用于处理个人防护行动的一般准则。对于事故后的恢复重建阶段，参考水平可以是大于 1 毫希但不超过 20 毫希。新建议还强调，所选择的参考水平值将取决于所考虑的当时的照射状况。

在 2014 年作为原子能机构《安全标准丛书》第 GSR Part 3 号《国际辐射防护和辐射源安全基本安全标准》颁布的经修订的“基本安全标准”中介绍了这一新方案[198]。

一些防护行动对于当局非常困难，对于受影响的个人和社区非常苛刻[200、201]。隐避和撤离尤其打乱了约 16 万人的生活，他们离开了社区，只能利用有限的供应来满足日常需求（图 4.6(a)）。虽然居民最终避迁，但他们正常的生活条件受到严重影响（图 4.6(b)）。就业和参与社区活动受到限制。他们的前景不明朗和未来规划困难重重。



图 4.6. 最初的撤离导致避难所出现拥挤状况。(a) 2011 年 3 月 22 日东电公司一位高级主管在撤离中心向撤离人员道歉（照片提供：Koichi Nakamura/美联社图片/picturedesk.com）；(b) 搬迁居民的正常生活条件受到严重影响（照片提供：福岛县立医科大学 Yujiro Kuroda 博士）。

已经遭受地震和海啸后果的人们又受到隐避、撤离和避迁所造成的更多身心压力。虽然对大众消费产品的限制是重要和必要的，但却给当地生产商造成了经济破坏和名誉损失或社会混乱。

4.2.2. 包括应急工作人员照射在内的职业照射限制

日本是 1960 年在国际劳工组织主持下通过的《辐射防护公约》（第 115 号文件）的缔约国[164]。日本有关职业照射的法规与职业防护的国际建议和标准一致。这些法规规定职业照射的剂量限值为五年期间平均年有效剂量为 20 毫希，任何一年的有效剂量为 50 毫希[137]。对于应急工作人员，即“在执行旨在缓解紧急情况对人体健康和安安全、生活品质、财产或环境之影响的行动时所受照射可能超过职业照射剂量限值的工作人员[48]”，规定有效限制剂量标准为 100 毫希。对于直到 2011 年 12 月 16 日在福岛第一核电站 30 公里范围内的应急工作人员，日本当局不得不将这一标准临时提高到 250 毫希剂量限值（参见 3.2.2 节）。

事故发生时的国际标准（1996 年版“基本安全标准”）规定的“特殊情况”下职业照射剂量限值为 100 毫希[137]。国际放射防护委建议的国际参考水平上限也是 100 毫希[129]，虽然有关建议表示，在特殊情况下，知情志愿者为挽救生命、防止辐射引起的严重健康影响或防止发展成灾难性状况，可能会受到高于这个水平的剂量。在确定 250 毫希这一数值时，日本当局考虑了国际放射防护委以前的建议[196、202]和原子能机构安全标准的要求，其中建议，对于从事旨在防止核事故进一步恶化的应急活动或应急操作人员的指导值为 500 毫希。在日本当局宣布应急（2011 年 3 月 14 日）后的三天，在厚生、劳动和福利省（厚生劳动省）的豁免令中执行了经修订的应急工作人员的剂量限值。该豁免令于 2011 年 12 月 16 日被取消[203]。

4.3. 辐射照射

在短期内，对公众照射的最主要促进因素是：(1) 烟云中和地面沉积的放射性核素产生的外照射；(2) 甲状腺因碘-131 的摄入产生的内照射，以及其他器官和组织主要因铯-134 和铯-137 的摄入产生的内照射。长期而言，对公众照射的最主要促进因素将是沉积的铯-137 产生的外照射。

对辐射剂量的早期评价使用了环境监测和剂量估算模型，导致了一些过高估计。为本报告中估算起见，还包括了地方当局提供的个人监测数据，以便提供关于所受到的实际个人剂量及其分布的更健全的信息。这些估算表明，公众成员受到的有效剂量很低，而且普遍与因全球天然本底辐射水平所受到的有效剂量的范围具有可比性。

在涉及碘-131 释放和儿童摄入碘-131 的核事故后，其甲状腺的摄取和随后对甲状腺产生的剂量尤其令人关切。在福岛第一核电站事故后，所记录的儿童甲状腺剂量当量似乎很低，因为他们摄入的碘-131 有限，这部分地是由于对饮用水和食品包括绿叶蔬菜和鲜牛奶实行的限制所致。由于事故刚发生后的可靠个人辐射监测数据的缺乏，对这段时间的碘摄入目前还存在不确定性。

到 2011 年 12 月，约有 2.3 万名应急工作人员参与了应急作业，他们中的大多数人受到的有效剂量低于日本职业剂量限值的照射。在这一数字中，有 174 人超过了有关应急工作人员的最初标准，六名应急工作人员超过了日本当局规定的在应急情况下临时修订的有效剂量标准。在执行职业辐射防护要求方面存在一些缺点，包括在应急工作人员辐射剂量的早期监测和记录期间以及在获得和使用一些防护设备及相关培训方面。

如资料框 4.9 中所概述的那样，本报告中的剂量估计值已被世卫组织和辐射科委会用作基本的国际剂量估计值。本报告也受益于补充的数据特别是《福岛健康管理调查》提供的新数据以及对人员所受剂量和环境中的辐射的直接测量数据。这些数据由专家、研究机构、日本地方当局和日本政府以及东电公司提供，并经过了统计学分析。

各种估计存在差异是因为它们是在不同时间和使用不同的方法进行的，世卫组织的估计值一般比辐射科委会的估计值要高，这主要是因为前者是基于事故后非常有限数据的早期剂量预测。世卫组织和辐射科委会有关公众成员的剂量估计值受限于有限可得的人所受个人剂量的直接辐射测量结果，而主要利用基于环境条件的剂量评价模型得出。虽然这些不同使得很难进行详细比较，但本报告中的估计值以及世卫组织和辐射科委会的估计值在表明剂量一般低于国际建议和标准中确定的参考水平方面基本上是一致的。

资料框 4.9. 世卫组织 2012 年[146]和辐射科委会 2014 年[148]的剂量估计值

2012 年，世界卫生组织（世卫组织）发布了针对这起事故辐射照射的早期评估报告，其中利用对政府研究机构公开提供的资料和直至 2011 年 9 月收集的资料适用的模拟技术给出了对典型公众成员所受辐射剂量的初始估计。当时，开展全面评估所需的数据不是没有就是不充分。采用了许多可能导致一些剂量被过高估计的谨慎假设。例如，为最大程度地减少低估有关防护行动和食品消费的最终健康危险的可能性，采用了谨慎的假设。然而，这项评估表明，在事故后第一年期间福岛县两个相对高照射场所的个体公众成员一般受到的总有效剂量在 10—50 毫希有效剂量范围内。在这些受影响最大的场所，外照射是有效剂量的主要促进因素。在福岛县其他地方，有效剂量估计在 1—10 毫希有效剂量范围内。日本大多数地方的有效剂量估计在 0.1—1 毫希有效剂量范围内；而在世界其他地方，所有有效剂量均低于 0.01 毫希，而且通常则远低于这一水平。

2014 年，联合国原子辐射效应科学委员会（辐射科委会）公布了一份关于这起事故的报告，其中包括了对工作人员和公众成员所受剂量的评价。对公众成员所受外部有效剂量的估计基于所获得的关于铯-137 作为时间的函数在不同地区的沉积密度的资料以及所估计的场所和人口的移动模式。辐射科委会的估计表明，在具有最高平均估计值的撤离区，估计成人在撤离前和撤离期间已接受的有效剂量平均低于 10 毫希，而且该水平的约半数是在早期撤离的那些人接受的。生活在福岛市的成人估计在事故后第一年平均接受了约 4 毫希的有效剂量，一岁大婴儿的估计有效剂量约高出一倍。

生活在福岛县其他地区 and 邻县的那些人估计接受了可比或较低的有效剂量；估计日本其他地方接受的有效剂量甚至更低。辐射科委会估计，持续居住在福岛县的那些人平均可能接受的归因于这起事故的终生有效剂量略高于 10 毫希。在邻国和世界其他地方因这起事故受到的辐射照射远低于在日本受到的照射，有效剂量低于 0.01 毫希。但辐射科委会强调了个体之间在该值左右有相当大的差异，这取决于其所在场所和消费什么食品。

注：如资料框 4.3 所指出的，辐射科委会报告的全球天然本底剂量为年平均剂量 2.4 毫希（这意味着累积终生总剂量约为 170 毫希），一般变化范围为 1—13 毫希，而大量人群则接受 10—20 毫希的天然本底剂量。

4.3.1. 公众照射

外照射

估计公众成员因外照射所受有效剂量的最初方案主要基于对周围剂量当量率的环境测量数据以及对场所和人的行为的计算和调查。使用的数据包含了对周围剂量当量的广泛测量，包括使用车载仪器仪表。

国家放射线医学综合研究所估计了在这起核事故后四个月内对《福岛健康管理调查》做答者所受因外照射导致的有效剂量[204]。这项估计基于所公布的人员移动情况和当地环境的相关辐射水平。

公布了因外照射所致个人有效剂量在头四个月的一些估计值[205—208]。例如在相马地区⁹⁴（包括“撤离区”和“计划撤离区”），98.7%的居民受到的这种剂量低于5毫希（最大的有效剂量为25毫希）。在整个福岛县，包括撤离区和计划撤离区，在所调查的居民中有99.4%受到的这种剂量低于3毫希[208]。

本报告中对国家放射线医学综合研究所利用《福岛健康管理调查》2011年3月11日至7月11日的估计的福岛县各城市因外照射所致个人有效剂量进行了统计学分析（不包括因天然本底辐射的外照射所致有效剂量）。图4.7示出对位于20公里半径内区域的各城市和该区域以外各城市进行的这种分析的结果。这一数字说明，作为早期撤离20公里区域的结果，该区域内民众在头四个月所受的外照射剂量平均低于该区域以外场所的民众所受的外照射剂量。在20公里区域内的结果倾向于表明比区域外场所的结果有着更广泛的分布。这是由于同一社区的成员撤离到不同场所并常常进一步移动所致，这些导致了所受剂量的差异。放射线医学综合研究所使用18种撤离假想方案模拟了这种复杂模式。

利用与居民访谈、环境测量和剂量评估模型来评价公众剂量存在着相关不确定性。因而，公众成员的个人辐射监测对辐射剂量的可靠重建至关重要。

外部辐射所致个人剂量的更重要确证由利用个人剂量仪进行个人监测的数据提供。在个人监测数据可得时，它们使得能够在使用对人们的假设和模型估计所受到的有效剂量与监测所受到的实际个人剂量当量的两种不同方案之间进行比较⁹⁵。

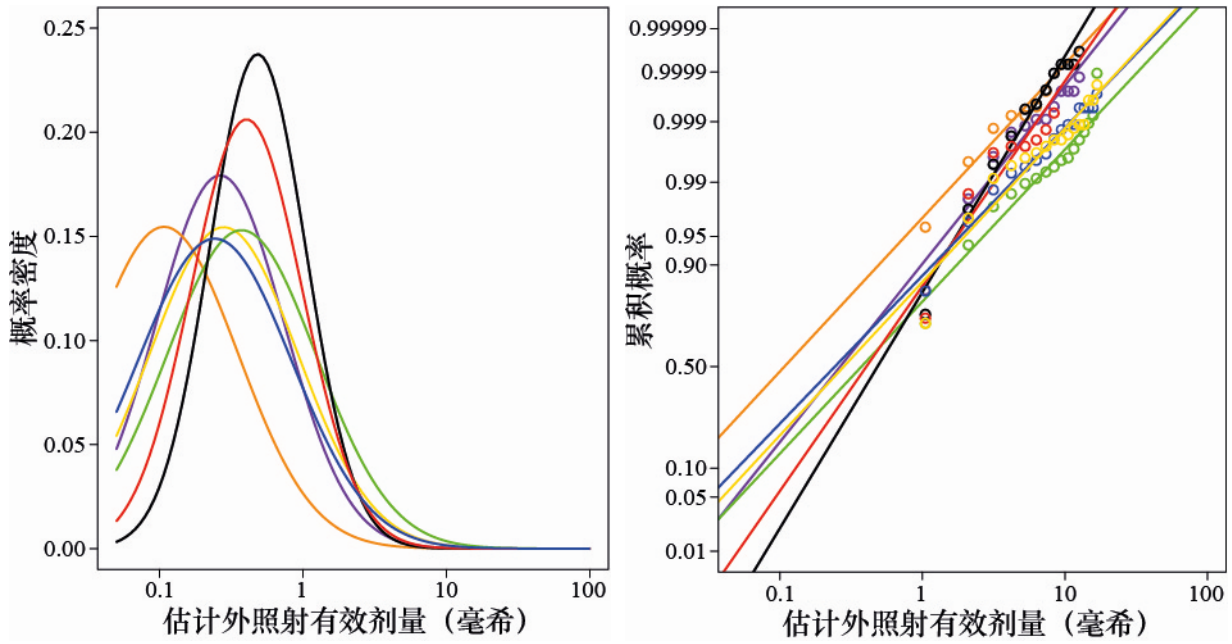
结果表明，个人监测仪测量的实际受到的剂量一般低于来自“调查表”和模拟的估计剂量。图4.8示出了地方政府开展的这种比较的一个例子。该图表明，与实际受到的剂量相比，模拟得出的剂量通常被高估（在切尔诺贝利事故后的剂量评价期间也观察到这种情况[169]）。

日本向原子能机构提供的大量资料包括了个人剂量当量的数据和全身计数测量的结果。

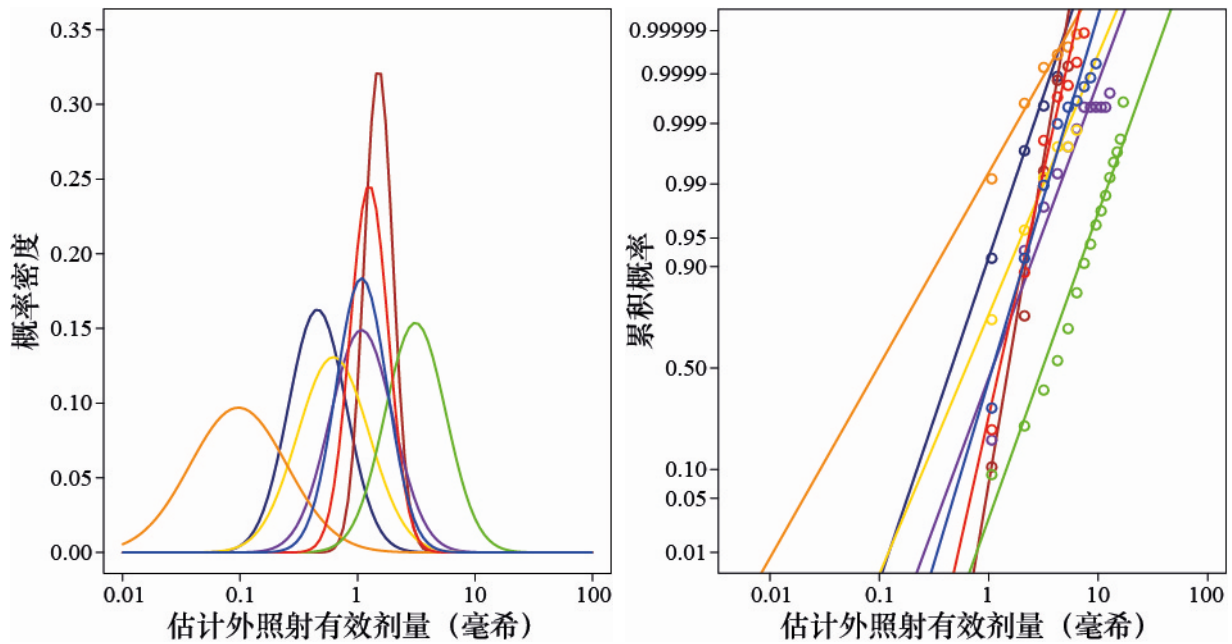
这些资料在不同时期的不同时间使用不同的测量技术被记录下来，而且测量是在许多但并非全部的受影响区域进行的。这些数据的共同特点是，所有个人剂量当量都低（从全身计数估计的待积有效剂量可忽略不计，见下文），导致有效剂量水平可与典型的本底有效剂量水平相比。

⁹⁴ 福岛县东部的一个地区，包括相马市、南相马市、广野町、栎叶子町、富冈町、川内村、大熊町、双叶町、葛尾村、浪江町、Shinti町和饭馆村，其中许多位于指定的“撤离区”或“计划撤离区”内。

⁹⁵ 用于个人监测的量值即个人剂量当量是有效剂量量值的替代值。



双叶: 平均值 = 0.24毫希, 置信区间95% = (0.022, 2.7) 毫希
 栎叶子: 平均值=0.11毫希, 置信区间95% = (0.01, 1.1) 毫希
 川内: 平均值 = 0.4毫希, 置信区间95% = (0.07, 2.3) 毫希
 大熊: 平均值=0.28毫希, 置信区间95% = (0.027, 2.9) 毫希
 南相马: 平均值 = 0.48毫希, 置信区间95% = (0.11, 2.2) 毫希
 富冈: 平均值=0.26毫希, 置信区间95% = (0.036, 2) 毫希
 浪江町: 平均值 = 0.37毫希, 置信区间95% = (0.035, 3.9) 毫希



伊达: 平均值=1.1毫希, 置信区间95% = (0.41, 2.9) 毫希
 福岛: 平均值=1.3毫希, 置信区间95% = (0.6, 2.6) 毫希
 饭馆村: 平均值=3.1毫希, 置信区间95% = (0.96, 10) 毫希
 磐城: 平均值=0.097毫希, 置信区间95% = (0.015, 0.62) 毫希
 葛尾村: 平均值=0.62毫希, 置信区间95% = (0.16, 2.5) 毫希
 川俣: 平均值=1.1毫希, 置信区间95% = (0.32, 3.6) 毫希
 二本松: 平均值=1.5毫希, 置信区间95% = (0.87, 2.6) 毫希
 田村: 平均值=0.46毫希, 置信区间95% = (0.15, 1.4) 毫希

图 4.7. 在《福岛健康管理调查》数据的基础上, 事故后四个月福岛县各市、町、村估计外部有效剂量的对数正态标准化理想概率密度和累积概率分布。上图示出对位于 20 公里半径内区域 (见第 3 部分) 各地方的分析, 下图是对该区域以外各地方的分析。图下面的图例说明表示平均剂量或这些地方 95% 的置信区间范围。在原数据中, 所有低于 1 毫希的剂量都累积在 1 毫希堆栈。

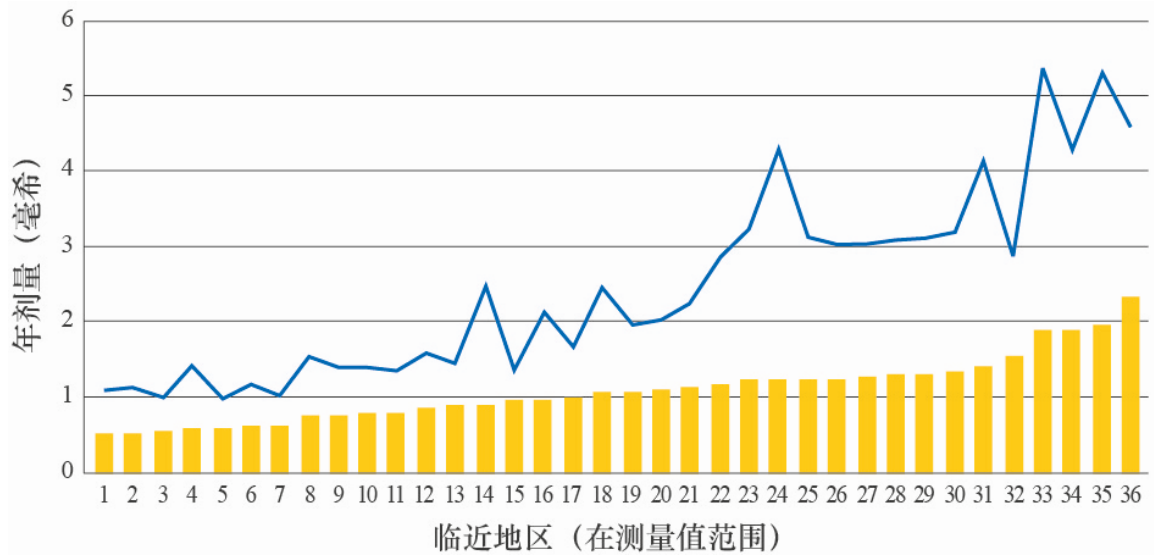


图 4.8. 2012 年 7 月至 2013 年 6 月，外部个人剂量估计值与代表性受影响城市的测量值的比较。对该城市的各街区（编号），通过估计评价有效剂量（实线），假定呆在室内和屏蔽 16 小时，室外 8 小时；以及通过对个人剂量当量的个人监测评价有效剂量（条柱）[209]。

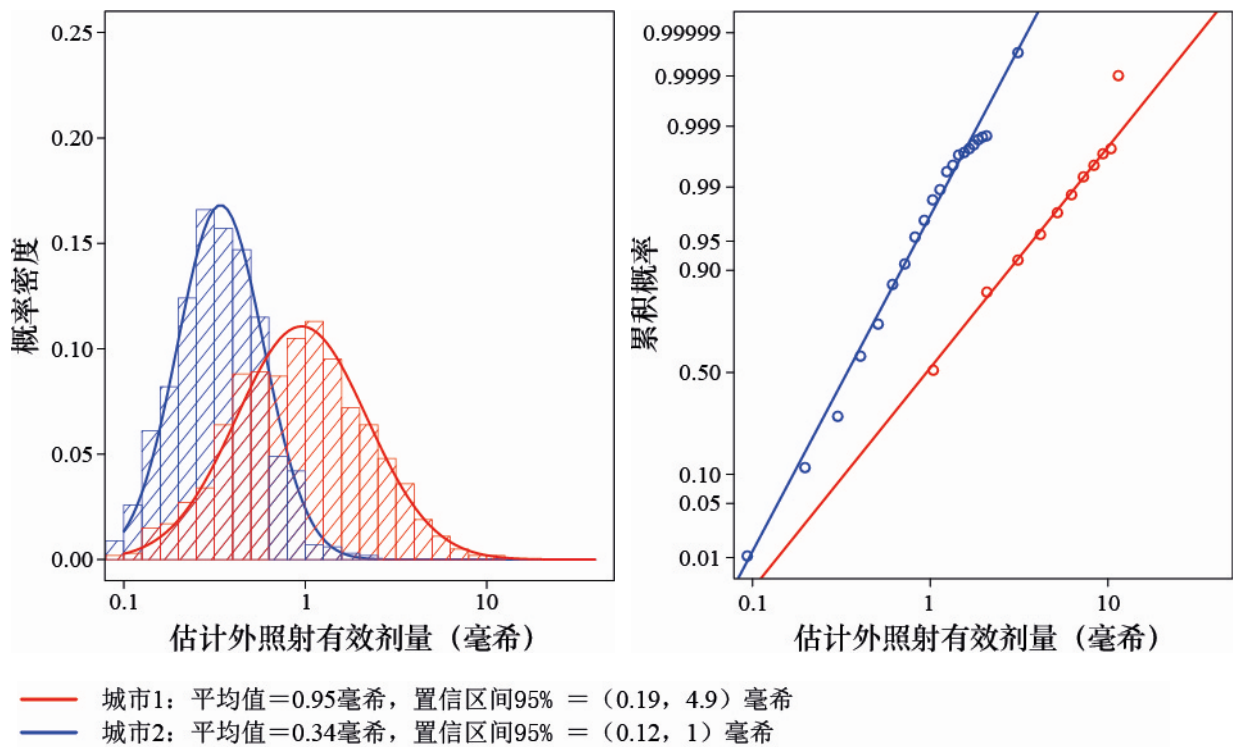


图 4.9. 日本政府提供的关于受影响区域可得年度资料的两个城市的公众成员 2011 年期间监测个人剂量当量的概率分布。对于第一个城市，图示了标准化理想概率密度分布（红色）；对于第二个城市，图示了标准化理想概率密度（蓝色）；对于这两个城市，图示了累积概率分布（见资料框 4.6）。这种分布表明个人剂量当量很低，平均值低于每年 1 毫希，并且在这些城市个人受到的有效剂量始终低于 5 毫希，剂量的置信度为 95%。

图 4.9 示出对受影响区域可获得的年度资料的两个城市进行的这种分析。分析重新确认了年个人剂量当量很低，平均有效剂量低于每年 1 毫希，并且其受到低于 5 毫希的有效剂量的置信度为 95%。

内照射

国家放射线医学综合研究所、日本原子力开发机构和日本其他组织开展了利用全身计数测量放射性核素摄入量的工作。

事故发生后，对福岛县范围内各场所的 20 多万居民进行了监测。有关水平一般低于全身计数器非常低的探测限值，表明体内几乎没有或根本没有摄入放射性核素。因此，既无可能也没必要对这些数据进行详细的统计学分析。

凡可能将测量的摄入转换为有效剂量场合，并对摄入的时间和性质做出假测，则绝大多数的待积有效剂量估计值均低于 1 毫希[210]。对铯-134 和铯-137 的全身计数测量得出的估计有效剂量负担已报告在 99%的居民中低于约 1 毫希[206]。

在事故后几个月进行过多次全身计数测量[211、212]，因此，往往仅适用于铯-134 和铯-137，因为碘-131 半衰期较短。鉴于在事故后第一个月通过吸入和食入两种方式摄入碘-131 的重要性，这使得对内照射的判断变得很困难。但还是能够在长崎大学开展的对撤离人员和福岛县短期访问者的测量中进行了碘-131 检测[213]。最高的估计甲状腺吸收剂量是 20 毫戈瑞（即甲状腺当量剂量 20 毫希），相应的有效剂量约为 1 毫希。

在初期阶段受到的内剂量取决于在限制措施充分实施之前的头几天内人们是否食用了当地生产的食品或来自别处的食品或饮用自来水。“市场购物篮”调查表明，来自牛奶、食品和水消费的照射很低，因为当地生产的牛奶和食品并没有被分发到避难所，而且只饮用瓶装水和使用瓶装水配制婴幼儿配方奶粉。

来自蔬菜消费的照射很低，原因是非常少（若有）的当地户外种植生产的蔬菜被食用；时值初春，未到生长季节。实际上，所消费的仅有的当地产蔬菜是那些在温室里生长的蔬菜，它们没有被污染。

儿童甲状腺剂量

在涉及大量释放碘-131 的核事故后，儿童甲状腺剂量是一个重要的公共卫生关切。儿童甲状腺剂量的主要潜在途径是摄入含碘-131 的牛奶。

但由于一些因素，事故后通过牛奶摄入碘-131 一般非常少。日本通常采用圈养牛的做法防止了奶牛食入碘-131。因牛奶对婴儿饮食的贡献相对低以及事故后当局对消费牛奶施加的严格限制，通过牛奶摄入碘-131 也有限。虽然存在别的碘-131 食入途径，如食用绿叶蔬菜和饮用水，特别是在释放后的非常早期阶段，但对饮用水和食品迅速采取的限制措施则限制了通过这些途径的摄入。

由于这些因素，儿童对碘-131 的摄入可能一直很低，而主要是吸入。但是，在事故后头几天儿童对碘-131 的摄入和甲状腺当量剂量的估计存在着相关不确定性。

通过监测腺体中碘-131 活度的外部辐射水平，估计了儿童甲状腺剂量当量。在来自甲状腺剂量据预测居高区域的儿童甲状腺附近的皮肤上测量了这些水平。在事故后几周报告了有限数量的这些直接测量情况。图 4.10 概述了 2011 年 3 月 26 日至 30 日期间对磐城市川俣町飯館村年龄 1—15 岁的儿童进行 1080 次测量的一项研究结果[214]。

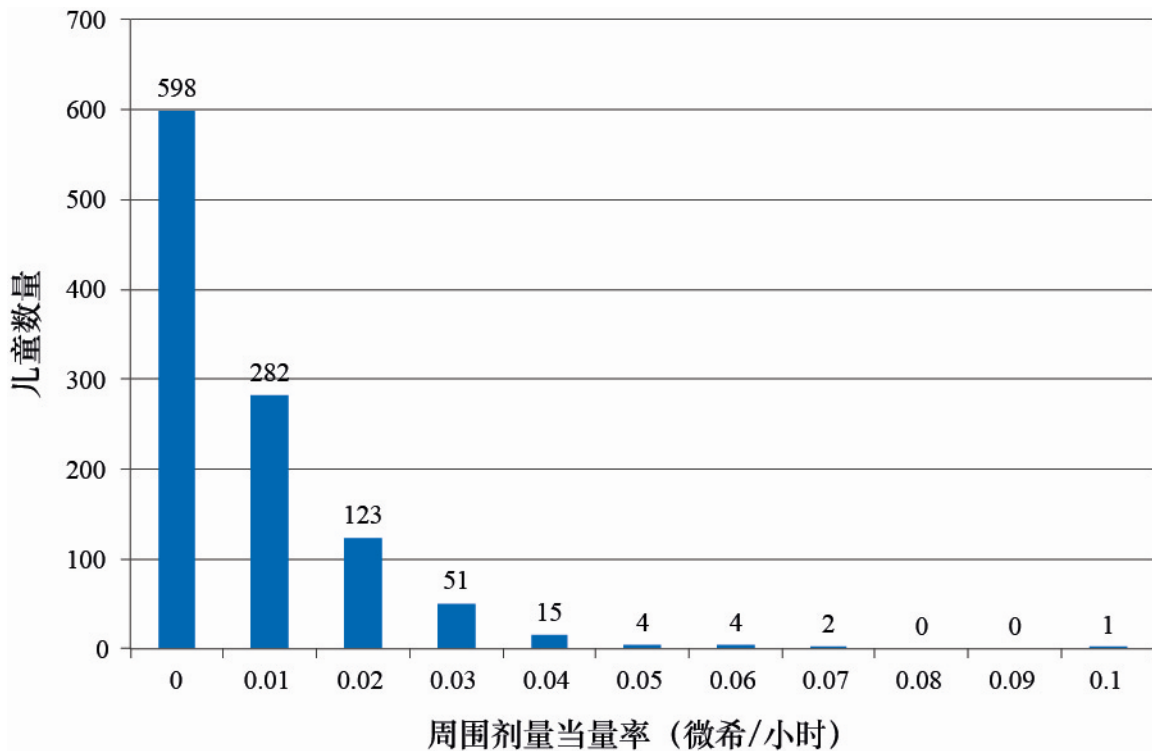


图 4.10. 从读取值中减去本底值估算的 1080 名 0—15 岁儿童的测量甲状腺剂量率的净值分布[214]，即甲状腺的净周围剂量当量率。对于所测试的 99% 的儿童，在甲状腺附近测量的周围剂量当量率为每小时 0.000 04 毫希或更低，相当于大约 20 毫希或更低的甲状腺当量剂量。

在一岁儿童甲状腺附近测量的最高周围剂量当量率为每小时 0.0001 毫希，这与大约 50 毫戈瑞的甲状腺吸收剂量（甲状腺当量剂量 50 毫希）相一致。据报告，2011 年 3 月利用碘化钠（铯）闪烁测量仪在撤离区和“计划撤离区”儿童中测量的甲状腺当量剂量对 95.7% 的儿童而言低于约 10 毫希（最高 43 毫希）[214]。可能所有剂量均低于 1996 年“基本安全标准”[137]规定的因放射性碘所致甲状腺接受的可防止待积吸收剂量 100 毫戈瑞的服碘预防通用最佳干预值。它们也低于经修订的“基本安全标准”[198]规定的头七天用于碘甲状腺阻断的预期剂量 50 毫希，该剂量作为应急照射情况下预防行动和其他响应行动的一般标准，以减少随机效应的危险。比较而言，切尔诺贝利事故后儿童甲状腺吸收剂量高达数千毫戈瑞[169、178]，高出近 100 至 1000 倍。

4.3.2. 职业照射

在事故发生后，厂内应急工作人员随即经受了极端恶劣的工作条件，并在他们试图稳定反应堆时遭受到非常高的辐射水平。2011年3月至2012年10月期间，厂内近2.3万名工作人员中，174名工作人员超过了最初的应急情况下有效剂量标准100毫希，其中六名应急工作人员超过了（临时修订）的应急情况下有效剂量标准250毫希。在其后几年，没有工作人员超过100毫希的有效剂量。在2012年4月至2013年3月期间，一名工作人员⁹⁶超过了50毫希的职业年有效剂量限值[203]。图4.11示出2011年3月至2014年10月福岛第一核电站应急工作人员受到的有效剂量的比较。

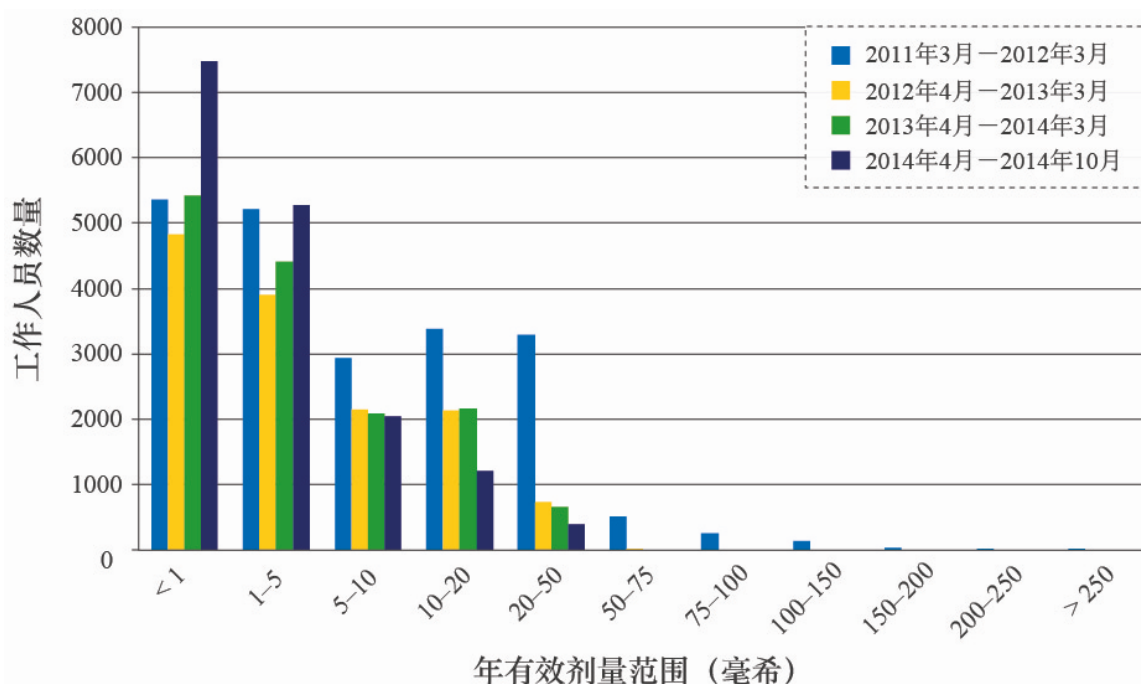


图 4.11. 2011 年 3 月至 2014 年 10 月福岛第一核电站应急工作人员的有效剂量比较（东电公司雇员和承包商）。在事故后那一年接受了高有效剂量。到 2012 年，工作人员的有效剂量很低，可与正常运行下接受的剂量相比较[215]。

⁹⁶ 该工作人员现被归类为接受了 100 毫希应急剂量限值，而非接受了每年 50 毫希的职业剂量限值。

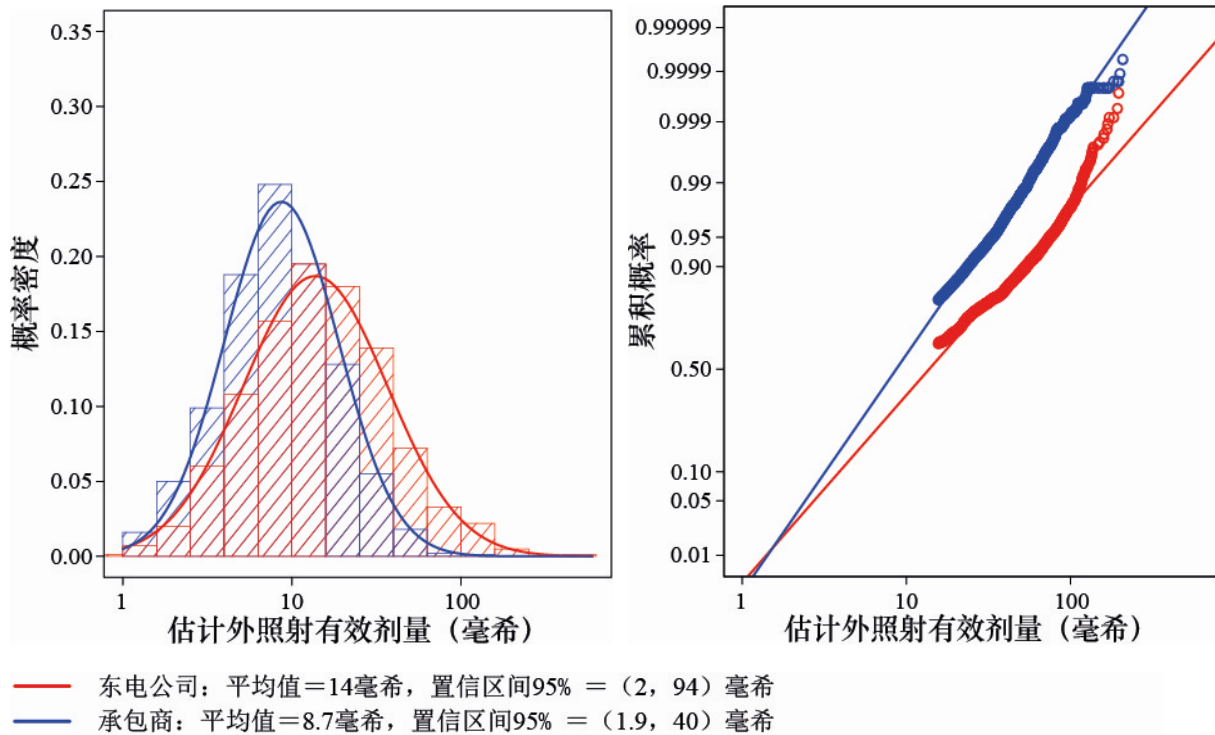


图 4.12. 2011 年对东电公司工作人员和承包商工作人员监测的个人剂量当量的标准化理想概率密度分布和累积概率分布（见资料框 4.6）。东电公司工作人员的剂量一般高于承包商工作人员的剂量，因为东电公司雇员是在较高剂量区工作的[215]。

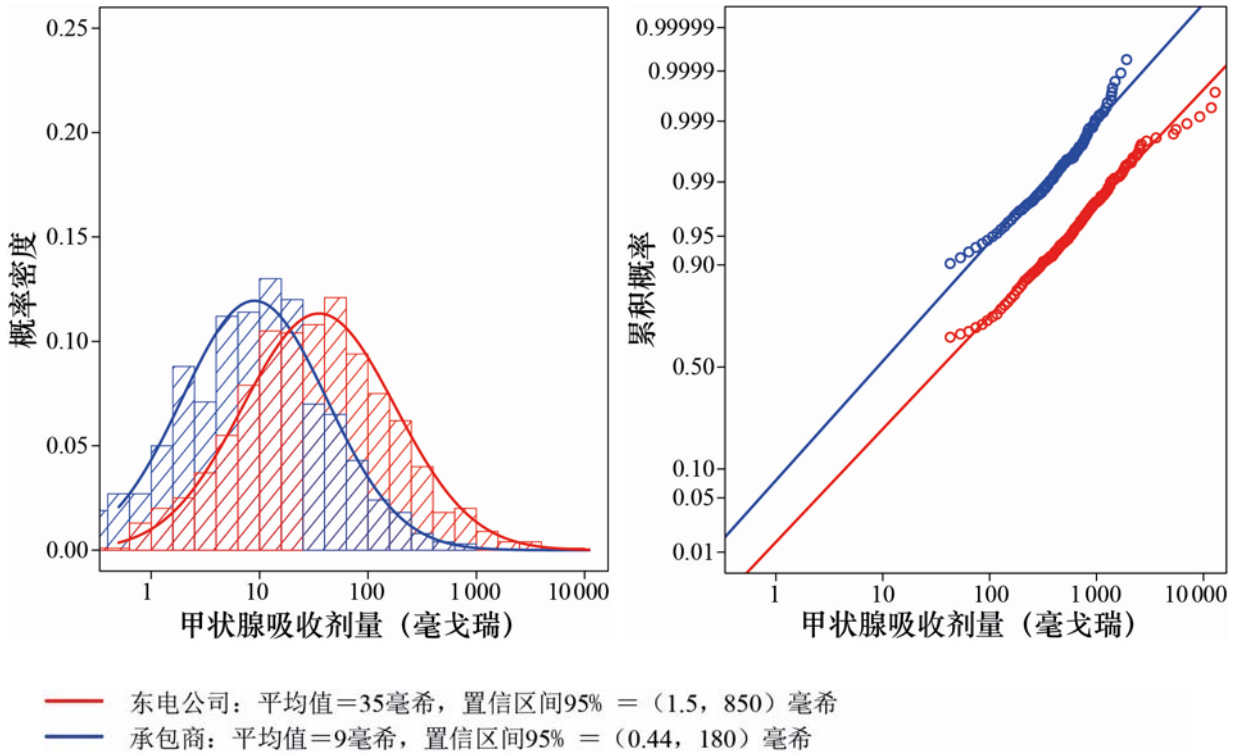
东电公司提交了东电公司工作人员和承包商工作人员的个人剂量当量值，对这些数值进行了统计学分析。图 4.12 示出了有关结果。

在早期阶段，对有效剂量特别是对超过了临时修订的应急工作人员剂量标准的六名厂内应急工作人员所受剂量的主要促进因素是摄入放射性核素产生的内照射。这是与恶劣的应急工作条件有关的挑战、呼吸面罩的使用不当和培训不充分所造成的。

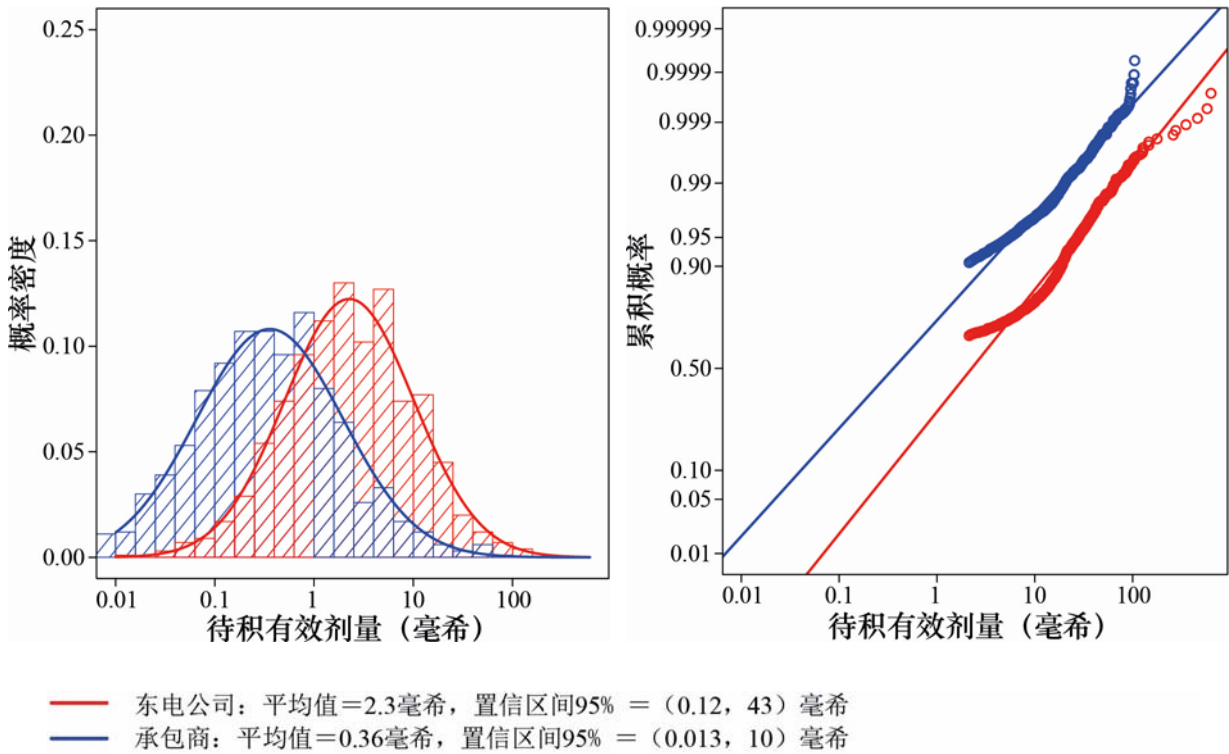
内照射剂量主要是吸入碘-131 产生的甲状腺当量剂量。虽然福岛第一核电站大多数工作人员接受了低于 100 毫希的甲状腺当量剂量，但 1757 名工作人员接受了超过这一水平的甲状腺当量剂量，有 17 名工作人员接受了超过 2000 毫希的甲状腺当量剂量，以及两名工作人员接受了超过 1.2 万毫希的甲状腺当量剂量[216]。

存在着若干与工作人员因内照射所致辐射剂量的估计特别是甲状腺当量剂量相关的不确定性。例如，假设放射性核素进入体内的假想情况（如时间）对于内照射剂量的估计至关重要。由于应急作业和一般性事故后工况，在进行甲状腺测量方面也有些迟滞。厚生劳动省对应急工作人员的待积有效剂量进行了再评估。厚生劳动省促进了内照射剂量审慎评价方法学的标准化，以便以尽可能合理达到的方式避免低估剂量[217]。

图 4.13 示出所报告的甲状腺吸收剂量和因内照射所致估计待积有效剂量的统计学分析。



(a)



(b)

图 4.13. 内照射剂量的标准化理想概率密度分布和累积概率分布（见资料框 4.6）。(a) 甲状腺吸收剂量；(b) 随之产生的待积有效剂量。较低剂量高于预期分布可能意味着将达到探测水平的剂量当量分配到放射性无法探测的所有人[215]。

厂内工作人员的职业受照量与辐射科委会的结论是一致的。本报告在剂量的统计学分析中采用了在辐射科委会的报告出版后对可获得的东电公司工作人员和承包商的剂量进行的再评价结果，从而减少了不确定性。在短寿命放射性核素的剂量、早期全身计数测量的高本底辐射影响、甲状腺测量的延迟、生物学检验信息的充分性方面仍存在着一些不确定性。日本的一些组织正在致力于进一步减少职业剂量评价特别是内照射评价方面的不确定性（如参考文献[218]）。

消防员、警察和日本自卫队队员也参加了一系列厂内应急活动（见第3部分）。这一群体中无人受到超过100毫希的有效剂量，而大多数接受了低于10毫希的有效剂量。在厂外工作并可获得剂量测定信息的8000多人中，有五人接受了超过10毫希但低于20毫希的有效剂量。在厂外工作的警员有记录的最大有效剂量约为5毫希。

有来自其他国家的人在应急中提供帮助。可得数据表明，在那些来自美国提供援助或在福岛地区开展环境监测的人员中，美国军事人员接受的最大有效剂量为0.12毫希；美国能源部工作人员接受的最大有效剂量为0.068毫希[219]，所有均低于监管限值。参加环境监测及提供防护和安全咨询的原子能机构工作人员中，平均有效剂量约为0.5毫希，而一名工作人员则接受了外照射产生的2.5毫希有效剂量。

4.4. 健康效应

在工作人员或公众成员中没有观察到可归因于该事故的任何早期辐射诱发的健康效应。

后期辐射健康效应的潜伏期可长达数十年，因此，不可能通过照射后若干年的观察就不予考虑受照人群发生这种效应的可能性。然而，考虑到所报告的公众成员所受剂量的低水平，本报告的结论赞同联合国原子辐射效应科学委员会（辐射科委会）向联合国大会所作的报告。该报告认为，“预计受照公众成员及其后裔的辐射相关健康效应发生率不会有明显的增加”（这是在与“2011年日本东部大地震和海啸后核事故引起的辐射照射水平和影响”有关的健康影响的范围内所作的报告）[148]。在接受了100毫希或更高有效剂量的工作人员群体中，辐射科委会的结论是，“预计未来会增加罹患癌症的风险。然而，预计这批人员的癌症发病率的任何增加都不可能觉察到，因为很难参照癌症发病率的正常统计波动来确认这样小的发病率”[148]。

开展了《福岛健康管理调查》，以监测福岛县受影响人口的健康。这项调查旨在早发现及早治疗疾病以及预防生活方式相关疾病。在本报告撰写之时，作为调查的一部分，正在进行儿童甲状腺的集中筛查。正在使用高度灵敏的设备，已检测到（临床手段无法检测到的）大量被调查儿童无症状的甲状腺异常。在调查中发现的异常不太可能与该事故的辐射照射有关，而最有可能表示在该年龄段儿童中自然发生的甲状腺异常。儿童罹患甲状腺癌是涉及显著放射性碘大量释放的事故后最有可能的健康效应。由于所报告的可归因于该事故的甲状腺剂量则普遍很低，不可能发生可归因于该事故

的儿童甲状腺癌增加的情况。然而，在儿童在该事故后即刻受到的甲状腺当量剂量方面仍然存在不确定性。

没有观察到而且预计不会发生产前辐射效应，因为所报告的剂量大大低于这些效应可能发生的阈值。未见报告可归因于辐射情况的意外终止妊娠现象。就父母所受照射导致其后代产生遗传效应的可能性而言，辐射科委会的结论是，总体来说，“虽然在动物研究中得到了证实，但人群遗传效应发生率的增加目前不能归因于辐射照射” [167]。

在受核事故影响的人群中据报告出现了一些心理状况。由于其中许多人遭受了大地震和毁灭性海啸以及事故的综合影响，因此，很难评估可以在何种程度上将这种影响单独归因于该核事故。《福岛健康管理调查》的“心理健康和生活方式调查”显示，在受影响人口的一些弱势群体中出现了相关的心理问题，如焦虑上升和创伤后应激障碍。辐射科委会估计，“[事故引起的]最重要的健康效应涉及与地震、海啸和核事故的巨大影响有关的心理和社会安宁，以及与所感受到的电离辐射照射风险有关的恐惧和羞于见人的感觉” [148]。

受影响人口的全面健康检查正在资料框 4.2 中所述《福岛健康管理调查》下进行。这项调查旨在早发现和早治疗疾病以及预防生活方式相关疾病。除被纳入工作场所或当地政府的常规一般体检外，还进行了额外的测试，如白细胞分类计数[220]。

4.4.1. 辐射引起的早期健康效应

辐射照射可诱发由于杀死细胞引起的健康效应。这种效应的严重程度随剂量而增加，而且其范围可以从皮肤受伤到重要组织萎缩。大多数的这种效应都发生在招致超过对于每个潜在效应已知的阈值水平的剂量后的早期。现有的资料表明，没有任何一个人由于该事故接受的剂量达到或超过了引起急性辐射效应的阈值水平。两名工作人员的腿部受到了来自汽轮机大厅被污染水的照射。这些工作人员的皮肤当量剂量据报告低于估计的确定性效应阈值⁹⁷ [81]和适用的国际限值⁹⁸ [222]。

⁹⁷ 国际放射防护委对皮肤照射所作的估计是，在受照区相对较大时，在剂量超过 2000 毫戈瑞后几个小时可以看到早期瞬态红斑等早期反应。国际放射防护委还估计，近似阈值剂量如下：早期瞬态红斑 2000 毫戈瑞，主要红斑反应 6000 毫戈瑞，临时性脱毛 3000 毫戈瑞，永久脱毛 7000 毫戈瑞，干性脱屑 14 000 毫戈瑞，湿性脱屑 18 000 毫戈瑞，继发溃疡 24 000 毫戈瑞，后期红斑 15 000 毫戈瑞，皮肤缺血性坏死 18 000 毫戈瑞，皮肤萎缩（一期）10 000 毫戈瑞，毛细管扩张 10 000 毫戈瑞，皮肤坏死（晚期）> 15 000 毫戈瑞[221]。

⁹⁸ 在计划照射情况下建议的适用于皮肤的职业剂量限值为无论受照部位按每平方厘米皮肤面积平均计算 500 毫希/年当量剂量（见参考文献[129]表 6 和参考文献[198]细目表 III）。为皮肤急性剂量制定的在任何情况下为避免或最大程度减少严重确定性效应预期应为之采取防护行动和其他响应行动的通用标准为表皮下 100 平方厘米真皮（40 毫克/平方厘米即 0.4 毫米深处皮肤结构）招致 10 000 毫戈瑞。（见参考文献[198]表 IV.1）。

辐射科委会已经注意到，“在受到该事故引起的辐射照射的工作人员和一般公众中没有观察到任何辐射相关的死亡或急性病[223]。

4.4.2. 辐射诱发的潜在远期健康效应

在严重事故情况和工况下，在参与应急行动的近 2.3 万名工作人员中，超过 100 毫希剂量的人数为 174 人。辐射科委会的结论是，在这批工作人员中，“预计未来会增加罹患癌症的风险。然而，预计这批人员的癌症发病率的任何增加都不可能觉察到，因为很难参照癌症发病率的正常统计波动来确认这样小的发病率” [223]。

就公众成员中的潜在远期效应而言，在本报告之前就已经公布了国际估计值（见资料框 4.1）。世卫组织发布了对处在最高剂量率场所人口在基准率之上罹患白血病、乳腺癌、甲状腺癌和所有固体癌症的额外终身风险所做的假设性估计⁹⁹，该估计基于世卫组织的初步剂量估计¹⁰⁰ [146、147]。

辐射科委会在对其剂量估计进行更新后报告说，

“公众所受剂量普遍较低或非常低，无论第一年所受剂量还是估计的终生剂量均如此。预计在受照射公众及其后代中辐射相关的健康效应发生率不会出现可察觉的增加” [223]。

在提出事故报告之前，辐射科委会已通报联合国大会，“人群健康效应发生率的增加不能可靠地归因于接受了作为全球平均本底辐射水平之典型水平的慢性辐射照射” [167]。现有资料表明，公众成员接受的年剂量并不高于典型本底辐射水平引起的年剂量。这表明，与辐射科委会的估计一致，预计在受照射公众成员及其后代中与辐射相关的健康效应发生率不会出现可察觉的增加。

该估计一般也适用于成人甲状腺癌的特殊情况。在成年生活中，这种风险比童年受到辐射照射引起的风险低得多（见下文关于儿童甲状腺效应的讨论）。考虑到据报告甲状腺所受的辐射当量剂量，成年人中不可能会出现可察觉的甲状腺癌增加。

⁹⁹ 鉴于当时可得资料有限，该评价包含一些保守假设。世卫组织表示，“为避免剂量低估作出了一切努力”，并且“或许发生了一些可能的剂量高估” [146]。

¹⁰⁰ 世卫组织的健康风险评估估计，“在福岛县的两个受影响最严重的场所，初步估计的辐射有效剂量第一年为 12 至 25 毫希之间”，根据该估计，“在最高剂量的场所，在基准率之上罹患白血病、乳腺癌、甲状腺癌和所有固体癌的估计额外终身风险可能代表着该风险的上限，因为已经有意识地选择了解决方法备选方案，以避免低估风险。就白血病而言，预计终身风险比婴儿时受照男性的基准癌症率最多增加 7% 左右；就乳腺癌而言，估计的终身风险比婴儿时受照女性的基准率增加 6% 左右；就所有固体癌而言，估计的终身风险比婴儿时受照女性的基准率最多增加 4% 左右；而就甲状腺癌而言，估计的终身风险比婴儿时受照女性的基准率最多增加 70% 左右。这些百分比代表所估计的相对于基准率的增加，并不是所估计的罹患这种癌症的绝对风险[147]”。

对于受到了高甲状腺当量剂量的几个工作人员（见第 4.3.2 节），可以推断他们会 出现罹患甲状腺疾病的风险增加的情况。这种甲状腺当量剂量水平可能将腺体的功能 下降到继发甲状腺功能减退的程度。预期不会出现甲状腺功能亢进，因为所报告的甲 状腺当量剂量远低于如超过就会发生这种效应的约 15 000 毫希的水平。作为应急工作 人员所受剂量范围的典型特征，中低甲状腺当量剂量效应很难加以量化，产生效应的 可能性以及幅度仍不清楚。

4.4.3. 对儿童的辐射效应

对儿童潜在的辐射效应是特别令人关切的一个问题。国际辐射防护建议和标准考 虑到了受照人群中的儿童。为辐射防护的目的，它们假定对包括儿童¹⁰¹的全部人口具 有名义上的潜在辐射风险，这种风险比假定的对于成年人口的风险高约 30%（已在对 受高辐射照射人口流行病学研究的基础上对这种名义上的风险作了估计）[129、224]。

对儿童的甲状腺效应

就甲状腺癌而言，儿童比成人更具放射敏感性。就放射性碘的给定摄入量而言， 婴儿甲状腺所受的剂量比成人高八到九倍。碘-131 在环境中的大量存在可能导致儿童 罹患甲状腺癌。某些类型甲状腺癌在儿童中的正常发病率较低，但儿童甲状腺对辐射 的灵敏度却较高。由于这种较高的敏感度，在事故发生后，重要的是进行后续筛查行 动，以便及早检测这种类型癌症发生率的任何潜在增加情况[225]。

就在《福岛健康管理调查》下开展的三年甲状腺超声检查的结果提出了报告 [226]。这项筛查覆盖了事故发生时年龄在 0—18 岁的约 37 万儿童。在该初步筛查之后 进行了从 2014 年开始的全面甲状腺检查，并将在此后几年对居民进行定期监测。

这种检查将高灵敏度超声波超声显像设备用于对甲状腺进行筛查。这种筛查已经 检测出了如使用标准设备筛查无症状¹⁰²儿童本不可能检测出来的无症状的甲状腺异 常——结节、囊肿和癌症。在对生活在远离事故影响区的儿童进行相同的筛查时得到了 类似的结果[227]。辐射诱发甲状腺癌的潜伏期比自事故以来至本报告撰写之时已过去 的四年时间更长。在许多情况下，在青少年晚期儿童中发现了甲状腺癌，但在 2011 年 3 月 11 日不足 5 岁的最脆弱儿童群体中却没有发现任何病例。可疑或恶性病例的比例 与福岛县各地 2011—2013 年初次筛查时几乎完全一样[228]。这些因素表明，在调查中 检测出的甲状腺异常不大可能与该事故引起的辐射照射有关。

根据所提供的由于甲状腺中的活度引起的外部剂量当量间接测量数据（见图

¹⁰¹ “儿童”一词包括受到照射的婴幼儿、儿童和青少年。

¹⁰² 无症状的效应系指不产生任何症状的效应，即没有任何东西尤其对儿童及其父母甚至医生而言明显的任何东西显示出现了疾病状况。

4.10)，儿童的甲状腺当量剂量似乎一直很低。就所报告的剂量水平而言，儿童甲状腺癌的增加不可能归因于辐射照射。

4.4.4. 辐射诱发的产前健康效应

“产前（或‘出生前’）照射效应”是提及辐射对胚胎和胎儿的效应时所用的术语。在低于 100 毫戈瑞吸收剂量下，辐照在胚胎发育的胚胎植入前期间的致命效应被认为是非常罕见的，而诱发其他效应则有一个大约 100 毫戈瑞的吸收剂量阈值[229—231]。可归因于该事故的胚胎和胎儿吸收剂量均远低于这些效应发生的阈值吸收剂量。

作为《福岛健康管理调查》一部分进行的孕期调查（见资料框 4.2）帮助向 2010 年 8 月 1 日和 2011 年 7 月 31 日之间收到了《母子健康手册》的母亲及其子女提供了适当的医疗照顾和支持。将每年对这项调查进行更新，以考虑特别是关于怀孕和生育的新数据[162]。这样做的目的是收集可能改进产科和产前护理的数据，并对事故后在福岛县怀孕或生产的妇女提供支持。根据调查结果，没有产生显著的不良后果，而且死胎、早产、低出生体重儿和先天畸形的发生率被认为类似于日本其它地方[232]。

辐射科委会向联合国大会报告说，“虽然在动物研究中得到了证实，但人群遗传效应发生率的增加目前不能归因于辐射照射”[167]。因此，本报告中的结论表示，没有任何遗传效应可归因于该事故。

在发生涉及明显的辐射照射可能性的事故后，往往有些孕妇就是否终止妊娠寻求医学咨询。在福岛第一核电站事故案例中，由福岛县立医科大学妇产科部进行的一项研究报告说，事故后没有进行过这样的可选性终止妊娠[232、233]。

4.4.5. 心理后果

虽然不能直接归因于辐射照射，但心理后果在本报告中做了考虑。辐射科委会报告说：

“最重要的健康效应涉及与地震、海啸和核事故的巨大影响有关的心理和社会安宁，以及与所感受到的电离辐射照射风险有关的恐惧和羞于见人的感觉。已经收到了关于抑郁症和创伤后应激症状等效应的报告。”[148]

已经执行一些关于福岛第一核电站事故后的心理状况的研究。这些研究主要集中在孕妇和哺乳期妇女、救援和清理工人以及撤离人员。已经在受灾人群中检测到一些心理影响[234—244]¹⁰³。根据这些研究，在事故早期阶段和发展过程中向公众通报和

¹⁰³ 已经检测到其他创伤情况下的心理后果，其中可能包括抑郁症、创伤后应激反应、慢性焦虑、睡眠障碍、严重的头痛和增加吸烟和喝酒，以及不正常的行为，如强烈的愤怒、绝望、对健康的极度焦虑以及受到侮辱和歧视的感觉。正如以往事故如切尔诺贝利事故所证明的那样，多数受影响的人一般都能承受心理状况，但一些研究也报告出现了例外情况[169、245—247]。

传播准确的信息有助于减轻不必要的心理反应[150]。

最大的研究是作为《福岛健康管理调查》的一部分进行的“心理健康和生活方式调查”[248]，其目的主要为具有罹患创伤后应激障碍、焦虑和压力等心理健康问题的较高风险的撤离人员提供适当的照顾。“调查表”包含了对创伤后应激障碍和心理困扰（焦虑）等症状的标准衡量指标，以及涉及对地震和海啸引起的辐射照射和逆境（如失去家人或亲戚、房屋损坏、失业、收入减少、在福岛县内部或向外迁移）的担忧的各种问题。

“心理健康和生活方式调查”的结果已经公布[236]，其中确认受影响人群经历了相当大的困扰和创伤后应激障碍的症状。该调查显示，“社会人口数据表明，很多撤离人员家庭在灾难发生后分离，而且不得不几经搬迁”，暗示这就是出现心理状况的原因。

采用了两种其他方法来评估成年撤离人员的心理健康状况[249、250]，并进行了一次补充调查，以评估酒精中毒情况[251]。这些调查表明，心理健康症状大大严重于对普通人群所做调查的预期[237]。儿童心理健康状况采用另一种问卷方法进行了评估[252、253]，评估情况表明被调查儿童有一些心理上的困难，但每年相对而言有所改善。

还对受影响的工作人员进行了各种研究。2011年4月至6月福岛第一核电站和福岛第二核电站工作人员情况的比较研究发现，福岛第一核电站工作人员中明显有更多一般心理困扰和创伤后应激反应症状（见图4.14）。在这两组工作人员中，在遭受歧视和诬蔑与上述两种状况的症状之间还存在着统计显著性关联。

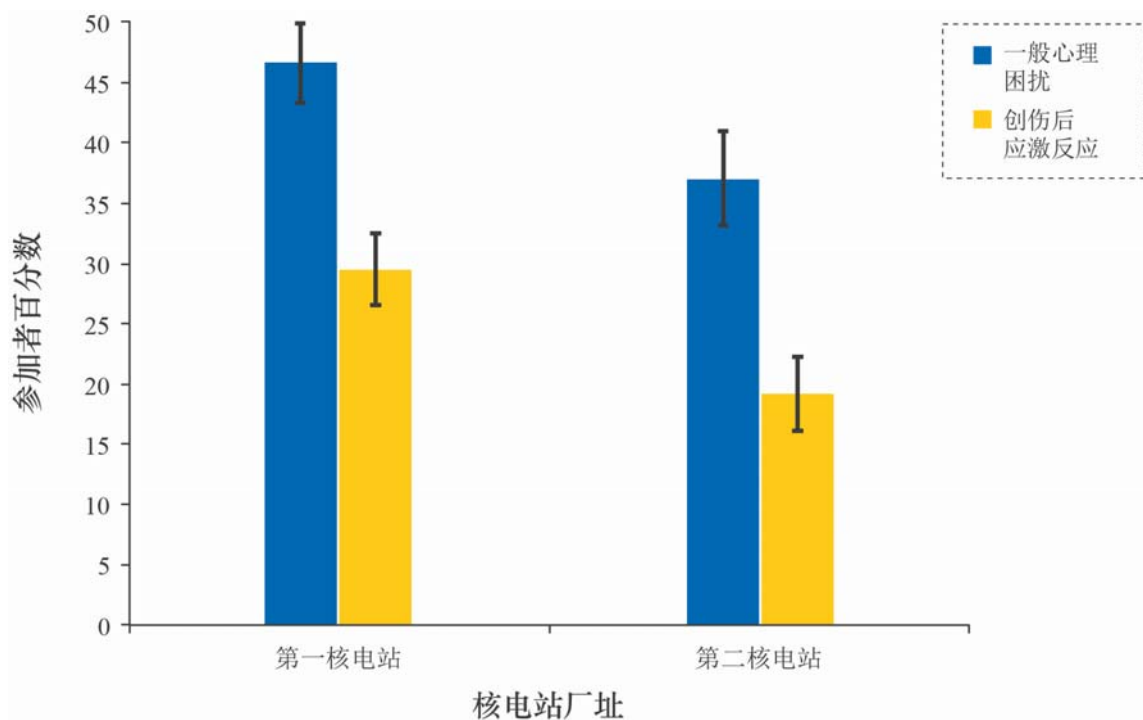


图 4.14. 2011 年 4 月福岛第一核电站和福岛第二核电站报告有心理困扰的百分比[242]。

4.5. 对非人类生物的放射后果

没有收到关于在动植物中观察到直接辐射诱导效应的报告，虽然在紧接事故之后的时期内进行的观察研究有限。评价放射后果的可用方法存在着局限，但根据以往的经验 and 环境中存在的放射性核素水平，由于该事故的后果而对生物种群或生态系统产生重大放射后果的可能性不大。

保护环境¹⁰⁴包括“保护和保持：包括动物物种和植物物种在内的非人类物种及其多样性；环境商品和服务。此术语还包括保护：粮食和饲料生产；农业、林业、渔业和旅游业所用的资源；精神、文化和消遣活动所用的娱乐设施；土壤、水和空气等介质；以及碳、氮和水循环等自然过程”[198]。地震和海啸给本州东北海岸沿线的陆地和海洋环境造成了显著的环境压力[254、255]¹⁰⁵。

事故发生后当务之急的优先事项是保护人而不是环境中的物种，因为不易控制对这些物种的照射。虽然为了减少对该电站 20 公里半径内居民的辐射照射而对他们进行了撤离，但栖息在这些地区的非人类生物的照射却无法避免。本报告中用于评价事故对非人类生物的潜在放射影响的方案是国际放射防护委员会建议的那些方案[224、257]。随后将估计照射量与文献（见参考文献[258、259]）中发表的关于这些照射量对不同类型植物和动物的影响的资料进行比较。

与该评价采用的模型类型相关的总体不确定性是很大的，特别是在涉及有关环境迁移的假设的情况下尤其如此[260]。这些评价方法往往基于简单假设，并且通常通过使用保守假设来考虑各种不确定性。用于将计算剂量与辐射效应相联系的基准主要涉及慢性照射而非急性照射以及有限范围的个体生物而非种群或生态系统。现行方法不考虑生态系统各组成部分之间的相互作用或辐射与其他环境压力因素的叠加影响。既需要改进评价方法，也需要提高对辐射诱发生态系统效应的了解。

就植物而言，估计吸收剂量在事故后的前几周最高，但仍处在低于预期会产生严重效应的水平。就一些陆地参考生物（如松树、草、鹿和鼠）而言，估计吸收剂量在事故后的早期阶段超过了相关参考水平。但没有观察到对这些生物种群或生态系统的总体影响。

辐射科委会早些时候的出版物[261、262]报告说，在低于 1.2 戈瑞的剂量下，针叶树可能出现轻微伤害，而在 10—20 戈瑞范围内的剂量下，可能出现导致死亡的更严重伤害。从评价剂量中可以推断，由于野草的抗辐射性更强，不大可能对野草产生直接致死效应。就陆地动物而言，早期阶段的估计剂量率表明，造成生殖障碍的概率很低。

¹⁰⁴ 在本报告中，术语“环境”系指“人、动物和植物赖以生存或生长以及维系所有生命和发展的状况，特别是受人类活动影响的那些状况”[198]。

¹⁰⁵ 关于海啸对生态系统的影响的其他报告可见[256]。

虽然在事故早期阶段，剂量率超过了一些参考值，但预计并没有对动物和植物种群和生态系统产生任何影响。鉴于估计短期剂量一般远远低于可预期产生高度有害严重效应的水平，并且剂量率在事故后的下降速度相对较快，故还预计没有产生长期效应。

4.6. 意见和教训

通过对事故的放射后果的评价，汇编了一些意见和教训。

- 一 在发生向环境的放射性物质事故性释放的情况下，需要迅速对这种释放的数量和组分进行量化和表征。对于大量释放，需要制订全面和协调一致的长期环境监测计划，以确定在当地、地区和全球层级对环境的放射影响的性质和程度。

对福岛第一核电站事故源项的量化和表征证明非常困难。迅速进行环境监测可对放射性核素水平作出确认，并为保护人员确定初步依据。可利用监测结果向公众作出通报及制订关于响应和恢复活动的战略。还须持续进行环境监测，以便核实没有发生放射性核素的进一步大量释放，并向决策者和其他利益相关者提供关于一段时间内放射性核素在环境中的可能再分布的信息。

- 一 相关国际机构需要制订易于非专业人员理解的关于辐射防护原则和标准的说明，以使决策者和公众更加清楚这些原则和标准的适用。鉴于一些长期防护措施对受影响人员具有扰乱性，需要制订更好的沟通战略，向包括公众在内的所有利益相关者传达这类措施和行动的理由。

公认需要对包括以下在内的一些辐射防护问题作出简要说明：

- 剂量限值和参考水平之间的区别和依据。
- 旨在从长期避免辐射剂量的防护措施和行动的正当性标准，特别是在这些措施和行动会对正常生活造成显著干扰的情况下。
- 在应急中与工作人员的辐射防护有关的特定情况。

辐射防护原则不只是建立在科学的基础上，还建立在基于伦理原则的价值判断的基础上。在一些情况下，防护措施和行动会造成长期社会干扰。在这些情况下，从避免辐射剂量方面获得潜在益处必须高于防护措施和行动本身造成的个人和社会损害。对于长期辐射防护措施和行动的理由，必须向利益相关者作出解释。

- 一 关于消费品中所含比活度和放射性浓度及沉积活度的保守决定导致延长了限制时间和造成了相关困难。在持续性照射情况中，国际标准之间以及国际标准与国家标准之间特别是与饮用水、食品、非食用消费品和陆上沉积活度有关的标准具有一致性是有益的。

日本当局制订了控制放射性物质进入消费品中的措施，这些措施总体上比现有国际导则更为严格。控制消费品中的放射性的现行国际制度受不同的导则支配，如关于国际贸易食品（包括瓶装水）的《食品法典》、原子能机构供在应急中使用的食品和饮用水安全标准、世卫组织关于现存照射情况中饮用水的导则以及原子能机构用于豁免目的的非食品类安全标准。有必要使关于公共消费品中可接受的放射性水平的国际标准保持一致性，以促进监管机构对它们的适用和公众对它们的理解。国家标准需要在可行的情况下与国际标准相一致。此外，还需要为应对放射性核素在陆地上的长期存在制订标准。

- 一 **对代表性公众成员群体的个人辐射监测为可靠估计辐射剂量提供宝贵信息，需要与环境监测和适当剂量估计模型结合用于评价公众剂量。**

早期剂量估计系基于环境指标和模拟，它们导致对所受剂量和预测剂量作出了一些保守假设。

鉴于碘-131 的半衰期很短，需要在发生向环境的放射性释放后尽快对儿童甲状腺中的这种放射性核素进行个人监测。需要在可行情况下尽快对寿命更长的放射性核素（如铯-137）的外部辐射和体内存在进行监测，并需要酌情持续一段时间。

在没有个人辐射测量的情况下，可能需要进行环境数据和周围数据模拟，以估计个人所受辐射剂量。在这些情况下，需要清楚地说明与在模型中使用的假设有关的不确定性，特别是在将利用这些结果为防护措施和行动决策提供信息或估计发生辐射诱发健康效应可能性的情况下更应如此。

- 一 **虽然在日本，乳制品不是摄取放射性碘的主要途径，但显然，限制甲状腺剂量特别是儿童的剂量的最重要方法是限制放养奶牛所产鲜牛奶的消费。**

事故后，儿童的甲状腺剂量估计量非常低。这是若干因素共同作用的结果，其中包括时节（生长季之前）、日本的农业实践、婴儿较低的牛奶消费量和对牛奶消费立即实行的控制。这些因素有助于使碘-131 摄入保持在低水平。

- 一 **需要建立完善的系统，以便监测和记录经由所有相关途径特别是工作人员在严重事故管理活动期间可能接受的内照射所致的职业辐射剂量。至关重要的是，应当提供用于限制工作人员在应急响应活动期间的照射的适当而充足的个人防护设备，并且工作人员应当接受过使用它们的充分培训。**

及早和持续直接测量应急工作人员接受的辐射照射和放射性核素水平是获得估计辐射危险和潜在健康效应及优化防护所需信息的最重要办法。有必要通过完善的个人剂量计和测量系统监测和记录职业辐射剂量。需要尽快进行甲状腺中碘-131 的监测。

在福岛第一核电站事故发生后，立即提供用于限制工作人员的照射和进行监测的个人保护设备在当时非常困难。

- 需要向利益相关者清楚地介绍辐射照射危险和将健康效应归因于辐射问题，明确说明，如果照射水平与全球平均本底辐射水平相似，则不能将民众中发生健康效应情况的增加归因于辐射照射。

在福岛第一核电站事故案例中，公众成员的剂量很低，与通常的全球平均本底剂量相当。需要明确告知公众特别是受影响者，预计受照公众成员及其后代的辐射相关健康效应发生率不会由于该事故而有明显的增加。

了解辐射及其可能的健康效应对参与应急的所有人特别是医师、护士、辐射技术人员和医疗第一响应者都非常重要。需要通过对医学专业人员进行放射性、辐射和辐射照射相关健康效应专题的适当教育和培训来确保做到这些。

- 在核事故后，健康调查十分重要和有用，但不应被解读为流行病学研究。这些健康调查的结果旨在提供信息，以支持向受影响民众提供医疗救助。

《福岛健康管理调查》向当地社区提供有价值的健康信息，从而帮助确保迅速发现健康效应和采取适当措施保护民众健康。健康检查的总体结果可以提供重要信息，但不应将检查结果错误地解读为流行病学评价结果。

- 需要制订放射防护导则，以便处理放射事故后给受影响群体成员造成的心理后果。国际放射防护委特别工作组建议，“寻求制订减轻放射事故所致严重心理后果的战略” [149]。

已将心理状况作为事故后果进行报告。这一直是在发生涉及辐射照射的事故后重复出现的一个问题。尽管这一问题非常重要，但有关放射防护的国际建议和标准一直没有确认这些后果。

- 需要以易于理解的方式及时将有关辐射效应的实情信息通报给受影响地区的人员，以便提高他们对防护战略的认识、减轻他们的担心和支持他们自身的防护措施。

需要实施国家和地方层级的安排，以便以易于理解的方式向可能受具有放射后果的事故影响的公众通报信息。这些安排需要允许个人间对话，以便个人能够寻求澄清和表达关切。这些安排需要相关当局、专家和专业人员在向受影响人员和社区提供支助和咨询方面进行协调一致的努力。在传达保护这些人员的决定包括对他们自身的措施给予支持时，共享信息非常重要。

- 在应急阶段，重点必须是保护人。生物所受的剂量无法控制，个别而言可能会相当大。需要通过改进评价方法和提高对生物种群和生态系统的辐射诱发效应的认识，加强对辐射照射对非人类生物的影响的了解。在发生向环境的

大规模放射性核素释放后，需要采取综合观点，以确保农业、林业、渔业和旅游业以及自然资源利用具有可持续性。

由于采取应对措施的不切实际性，可能很难显著减少非人类生物所受的剂量。在诸如福岛第一核电站事故这样的事故后对植物和动物进行影响评价，需要考虑许多潜在压力因素 — 辐射照射只是多种因素之一。还需要考虑环境中长寿命放射性核素积聚和积累的可能性，以及这可能将如何在多个世代的时间里影响植物和动物。

5. 事故后恢复

在福岛第一核电站事故后，立即通过各种行动，包括隐避和撤离受影响地区居民及对食品¹⁰⁶与饮用水实行限制，将稳定电站状况和保护公众作为了优先事项。随着工作的推进和核电站状况的稳定，将重点更多地放在了从事事故的恢复上，包括社区和基础设施的复兴方面。

本部分考虑截至 2015 年 3 月在事故后恢复方面取得的进展以及今后的计划，但主要考虑应急阶段后的现存照射情况。

5.1. 受事故影响区域的厂外治理

事故后恢复¹⁰⁷的长期目标是为受影响区域拥有全面运行的社会重建一个可接受的基础。需要考虑受事故影响区域的治理¹⁰⁸，以便根据所采用的参考水平减少辐射剂量。在进行撤离人员返回的准备工作时，需要考虑基础设施的恢复及社区的生机和可持续经济活动。

在福岛第一核电站事故前，没有制订关于事故后治理的政策和战略，在该事故后阶段，便产生了制订它们的必要性。日本政府在 2011 年 8 月实施了治理政策¹⁰⁹，该政策向国家政府和地方政府、营运者和公众分派了责任，并为实施协调一致的工作计划制订了必要的制度性安排。

制订了治理战略并开始加以实施。该战略规定，优先治理领域是居民区，包括建筑物和庭院、农田、道路和基础设施，重点是减少外照射。

来自沉积在地面和其他表面的放射性核素的外部剂量是照射的主要途径。因此，治理战略的重点是开展去污活动，减少优先区域存在的放射性铯的水平，从而减少这种照射的可能性。内照射剂量继续通过食品限制以及通过农业用地治理活动进行控制。

事故发生后，日本当局制订了“参考水平”，供作为总体治理战略的目标剂量水平。该水平与国际导则规定的范围下限相一致。适用低参考水平会造成增加治理活动

¹⁰⁶ 包括对食品分发和销售、农业用地使用和野生食品采集的限制（见第 3.3 节）。

¹⁰⁷ 事故后恢复包括：受事故影响区域的治理；厂内受损设施的稳定和退役准备；这些活动产生的污染物质和放射性废物的管理；以及社区复兴和利益相关者参与。

¹⁰⁸ “治理”被定义为通过对污染本身（污染源）或对人类照射途径实施行动为减少土地现有污染物所产生的辐射照射而可能采取的任何措施。

¹⁰⁹ 《关于处理与 2011 年 3 月 11 日东北地区太平洋近海地震有关的核电站事故放射性物质环境污染的特别措置法》（2011 年第 110 号法令）。

中产生的受污染物质数量并从而增加成本和对有限资源的需求的结果。可利用在日本获得的经验就国际安全标准在事故后恢复情况中的适用制订实际导则。

根据 2011 年秋季估计的额外年剂量，确定了两个类别的污染区。国家政府被赋予的责任是制订和实施在福岛第一核电站场址 20 公里半径内的第一区（“特别去污区”）以及事故后第一年中因地面污染所致额外年剂量预计超过 20 毫希区域的治理计划。赋予市政当局的责任是在额外年剂量预计超过 1 毫希但仍低于 20 毫希的其他区域（“密集污染调查区”）实施治理活动。制订了具体的剂量减少目标，包括实现 1 毫希或更低的额外年剂量的长期目标。

5.1.1. 建立治理的法律和监管框架

事故发生后，日本政府在 2011 年 8 月通过颁布《关于处理与 2011 年 3 月 11 日东北地区太平洋近海地震有关的核电站事故放射性物质环境污染的特别措置法》确定了恢复和治理政策[124]。该法令中包括对将治理的场址进行优先排序、为开展治理工作分配资金和使利益相关者参与整个过程的规定。

制订治理计划的前首批步骤是确定适当的参考水平和制订按要求减少公众成员的辐射照射的治理战略。国际导则建议根据现时状况，在 1—20 毫希/年的额外剂量范围内选择一个参考水平（资料框 5.1）[129、198、263]¹¹⁰。

非常重要的一点是，在确定这一范围内的参考水平时，不应将它们确定得太高，否则可能损害所要求的安全目标，也不应太低，否则可能导致对有限资源的使用低于最佳。在日本 2011 年的初始治理阶段，日本政府制订了有意压低的参考水平[264、265]，并通过了在治理后使居民的额外剂量不超过 1 毫希/年的长期目标[266]。这是国际导则给出范围内的最低值（资料框 5.1）。

估计人员所受剂量所用的方案的高度保守性的一个实例是辐射科委会的一项评价[148]。估计剂量系基于单位面积铯-134 和铯-137 的活度计算，同时考虑到衰变所致活度下降、表面风化所致活度丧失和木结构房屋典型的屏蔽系数。为了本报告的目的而使用辐射科委会使用的同样方法[148、267]进行的计算表明，2012 年在“密集污染调查区”很多地方的平均额外辐射剂量（见第 5.1.2 节）都本应大大低于 1 毫希/年。

¹¹⁰ 在事故发生时，已推出“国际基本安全标准”暂行版的预发布版本[263]。后于 2014 年出版了国际原子能机构《安全标准丛书》第 GSR Part 3 号[198]。

资料框 5.1. 治理的参考水平

“参考水平”是总体治理战略的目标剂量，但不是剂量限值。国际导则[129、263]建议，在“现存照射情况”下，公众成员的额外照射的参考水平在 1 至 20 毫希/年的范围，这取决于当时状况。

参考水平由政府、监管机构或另一相关当局根据国家监管框架的安排确定。事故后情况中的参考水平用于确定最佳治理战略。这些战略将确保通过高效使用可得人力、技术和财政资源实施治理，以便在保护受影响社区方面实现最佳结果。

用于减少环境污染和人员所受辐射剂量的特定行动一般以所推导出的“治理行动水平”为指导。通常情况下，它们以易于测量的数量形式加以具体规定，如周围 γ 剂量率（微希/小时）或单位面积的沉积活度（贝可/平方米），并且是通过使用关于民众生活习惯和关于环境中放射性核素行为的模型和假设从参考水平中推导出来的。

5.1.2. 采取的治理战略

事故后的内照射剂量由于对食品和饮用水实施了限制而得到很大程度的避免，这一点影响了治理战略。因此，本文所述的治理行动主要涉及旨在减少外照射剂量水平的去污努力。

日本政府的治理战略确定了快速减少辐射剂量的方案，将居民区、农田和毗邻农业区域的森林地区的治理列为了优先事项[124、266]。2011 年 8 月，为了促进治理，日本政府对对应治理的土地进行了以下分类：

- **特别去污区**（图 5.1，右）。这种区域与原“限制区”即福岛第一核电站 20 公里半径以内的撤离区和位于该电站 20 公里半径以外、个人的额外年剂量在事故后第一年中可能超过 20 毫希的原“计划撤离区”相重叠。在特别去污区内，国家政府有责任制订和实施治理计划。
- **密集污染调查区**（图 5.1，右）。这种区域包括在部分城区，个人的额外辐射剂量在第一年中估计在 1 毫希至 20 毫希之间的那些城市¹¹¹。各城市开展监测调查以确定需要去污的区域并在这些区域开展治理活动，国家政府则提供财政和技术支持。

2012 年和 2013 年，根据居住在区内人员（如有）所受的估计年总剂量，将发布了撤离令的地区进一步细分为以下三个类别（图 5.1，左）[268、269]：

- **一类区域（绿色）**。准备撤销撤离令的地区。估计年剂量预计为 20 毫希或以下。

¹¹¹ 0.23 微希/小时的周围剂量率被用作这种区域的放射学标准。这一剂量率相当于保守估计的一年中 1 毫希的额外有效剂量。

- 二类区域（橙色）。仍不允许居民居住的地区。估计年剂量预计超过 20 毫希。
- 三类区域（红色）。预计居民将在很长时间里不能返回的地区。估计年剂量超过 50 毫希，在事故后六年期间的平均年剂量预计将高于 20 毫希。

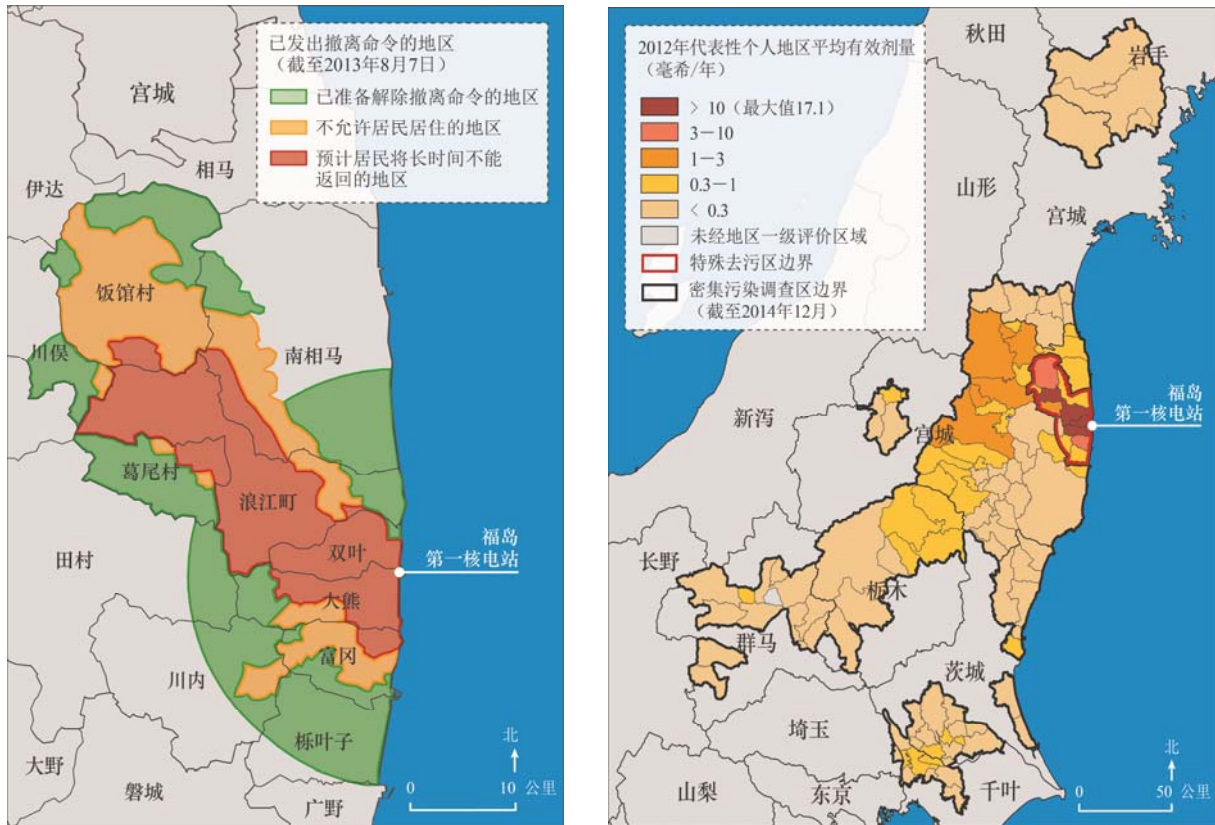


图 5.1. 左图显示截至 2013 年 8 月 7 日撤离区的细分情况[270]。右图显示截至 2014 年 12 月指定的“特别去污区”和“密集污染调查区”并显示了 2012 年的代表性个人所受估计额外辐射剂量。

5.1.3. 治理的进展

在 2011 年实施了一些试点项目。日本原子力开发机构最初在撤离区以外的两个场址开展了一系列小规模研究，以评价去污活动在降低各种表面（如街道、屋顶、墙壁和草坪）的剂量率方面的有效性[271]。随后的研究考虑了在撤离区的更大区域进行去污的可行性，并评价了这些措施在减少周围 γ 剂量率方面的有效性和探讨了对工作人员安全和废物管理的影响。

这些试点研究在规划和实施治理战略方面发挥了重要作用。它们提供了有关去污技术有效性和适用性的资料，并有助于制订工作人员的辐射防护程序[272]。

在福岛第一核电站事故后普遍实施的治理措施列于表 5.1。在前几年的治理中，广泛采用了会产生大量废物的表土移除。

表 5.1 普遍实施的治理措施

| 目标 | 治理措施 |
|----------|--|
| 房屋和建筑物 | 移除屋顶、平台和阴沟的沉积物 擦拭屋顶和墙壁 真空砂光 高压清洗 |
| 校园、庭院和公园 | 表土移除 杂草/草坪/牧草移除 |
| 道路 | 移除沟渠中的沉积物 高压清洗 |
| 庭院和树木 | 刈草 移除落叶 表土移除 高压清洗 削除树皮 |
| 农田 | 倒耕 表土移除 土壤处理（如加强施肥） 土壤硬化和移除 杂草/草坪/牧草移除 |
| 牧业生产 | 控制动物饲料中的放射性铯水平 |
| 森林和林地 | 移除落叶和低树枝 修剪 |

后来在“密集污染调查区”和“特别去污区”实施了治理战略，并取得了显著进展。到 2015 年 3 月底，在福岛县外的“密集污染调查区”内大部分地方的去污已接近完成（约 80%的城市）。在福岛县内的“密集污染调查区”，约 90%的公共设施、60%的住宅和 50%的道路都完成了去污[273]。

在“特别去污区”，2015 年 3 月，在四个行政区域（田村市、川内村、栎叶子町和大熊町）完成了去污计划。还在另外两个行政区域（葛尾村和川俣町）完成了居民区的去污，在饭馆村的去污已接近完成[273]。在福岛县内第 1 去污区和第 2 去污区的大部分去污计划预定在 2016 年 3 月底之前完成，但一些去污计划预定将持续到 2017 年（图 5.2）。

在田村市和栎叶子市居民区进行的调查表明，它们的周围 γ 剂量率已分别降低了平均 36%和 46%。 γ 剂量率（见资料框 5.1）通过在离去污表面一米远的距离测量治理行动前和治理行动后的周围剂量率得以确定。在农田、森林和道路上实施治理行动后，这两个市的平均剂量率降低幅度为 21%至 44%[273]。

这些数据表明，周围 γ 剂量率的降低幅度在有着更高初始剂量率的地区更为显著。经过治理后，由于风化和放射性衰变的自然过程， γ 剂量率继续下降。

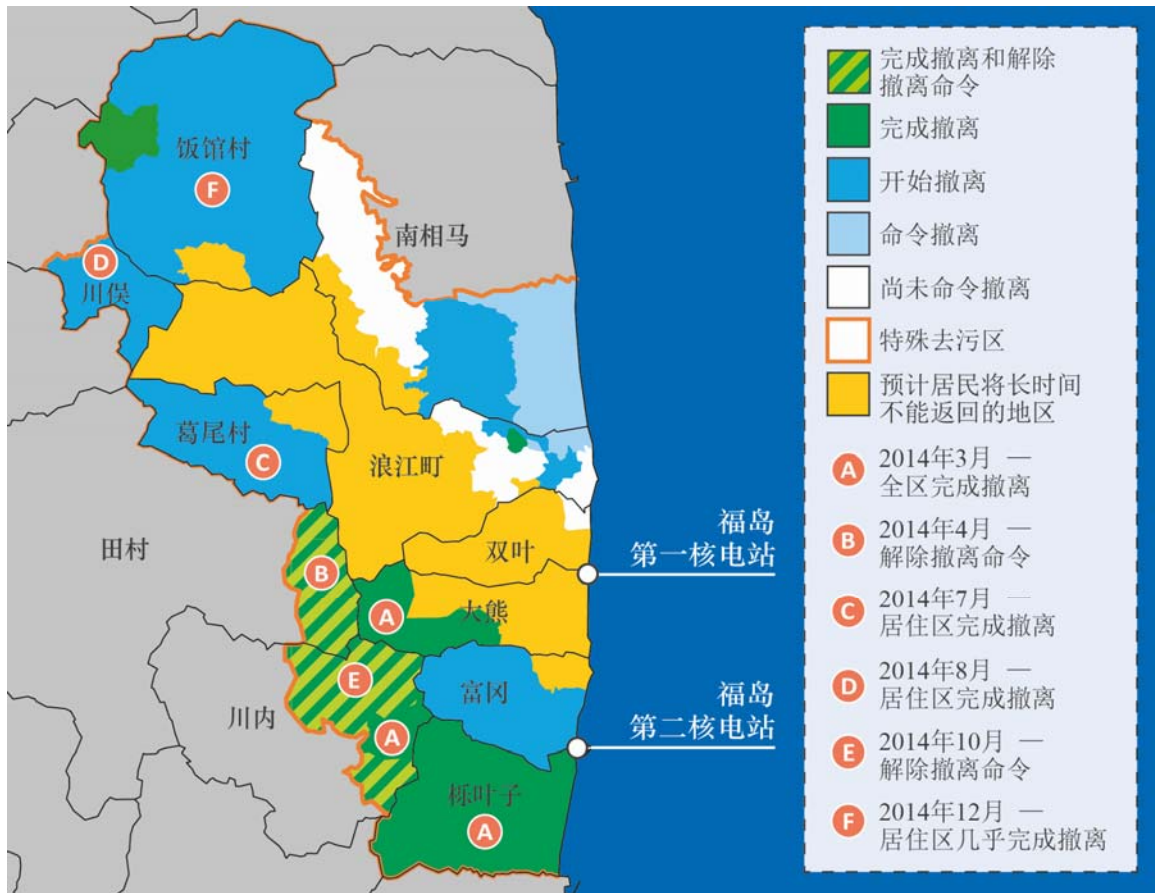


图 5.2. 截至 2014 年 12 月在“特别去污区”治理工作的进展情况[273]。

图 5.3 示出治理工作的一些实例。

由国家政府直接控制的“特别去污区”的单位去污成本从约 1100 日元/平方米（森林）到约 5500 日元/平方米（公园）不等[274]。

治理之前



治理之后



图 5.3. 在田村市实施治理之前和治理之后的景象 (照片由日本环境省提供)。

5.2. 厂内稳定和退役准备

东电公司和日本相关政府机构共同制订了一个关于受损核电站稳定和退役的全面、高水平战略计划。该计划于 2011 年 12 月首次公布，后来又经过修订，以反映取得的经验和对受损核电站情况的更好了解，以及未来挑战的严重程度。该战略计划涉及厂内工作的复杂性，包括：确保安全的方案；实现退役的措施；促进工作的系统和环境；以及研究和发展的要求。

在编写本报告时，安全功能已重新建立，结构、系统和部件已到位，以可靠地维持稳定状况。然而，持续需要控制地下水进入受损和被污染的反应堆厂房。由此产生的污染水正在进行处理以尽可能消除放射性核素，并被贮存在 800 多个储箱中。需要更多可持续的解决方案，这些方案将考虑所有选项，包括可能恢复向海洋受控排放。在作出最终决策时将需要使相关利益相关者参与，并需要在协商过程中考虑社会经济状况，以及需要实施全面的监测计划。

制订了乏燃料和燃料碎片的管理计划，并开始从乏燃料池清除燃料¹¹²。还为清除燃料碎片的未来活动开发了概念模型，其中考虑了所需要的许多预备步骤，包括对碎片的结构和组成的目视确认。在编写本报告时，受损反应堆中的高辐射剂量水平意味着这种确认尚未成为可能。

日本当局估计，完成退役活动的时间范围很可能在 30 至 40 年内。关于电站和场址的最终状况的决定将是进一步分析和讨论的主题。

资料框 5.2. 稳定和事故后退役

术语“退役”系指为允许解除对设施的部分或全部监管控制而采取的行政和技术行动。

实际上，退役是逐渐地清除设施的结构、系统和部件。在正常情况下，核电厂的退役是在已决定结束运行之后启动的有计划的活动。事故后退役提出了各种不同的挑战：需要首先确定设施的状况以及燃料和电厂设备的状态，并决定前进道路。这可能需要发展新的技术和方法。

如果反应堆停堆是因事故而导致的，那么在将经批准的最终退役计划付诸实施前，需要将该设施置于安全配置（稳定）中。稳定包括为确保电厂结构（如容纳受损反应堆的构筑物）、系统（如供电系统）和部件（如泵或电机）置于稳定工况并且能够在可能需要的时间内正常运行所需要的行动。

5.2.1. 战略规划

继应急阶段后，东电公司和相关政府机构制订了一项关于稳定和退役活动的战略计划——“福岛第一核电站 1 号至 4 号机组退役的中长期路线图”[275]。该计划于 2011 年 12 月首次发布，后来又进行了修订，以考虑更多的经验和对厂内状况的更多了

¹¹² 2014 年 12 月完成了从 4 号机组乏燃料池移除燃料的工作。

解[276]。¹¹³ 这是一项为监督实施恢复工作的人员而制订的全面、高水平战略计划。据日本当局估计，退役预计将在 30 至 40 年内完成。

该计划描述了以下有关工作领域的战略方案：

- **确保安全的方案**，其中包括减少风险和优化移除燃料和燃料碎片的战略目标。
- **实现退役的中期和长期措施**，包括从每台反应堆机组移除燃料和燃料碎片的计划。这些计划比较具有灵活性，能够处理随着移除燃料和燃料碎片过程中获得更多信息而揭示的各种可能的状况。
- **促进工作的系统和环境**，东电公司已为此建立了一个集中监控工作人员的健康和辐射照射水平的组织。继续努力改善工作人员的辐射防护，并为管理和确保整个退役过程中获得训练有素的职工队伍制订了计划。
- **研究和发展**，这非常必要，因为将在福岛第一核电站完成的大多数工作都是首开先河，将需要目前尚未开发或尚未被大规模使用的设备和技术。建立了国际核退役研究所，以开发核退役技术，促进与国际和国内核退役组织的合作以及开发研究与发展人力资源。

5.2.2. 退役准备

该组织成立后不久[278]，原子力规制委员会为所谓的历经灾难设施的监管制订了新的监管框架，这些设施需要特殊措施，以防止进一步的事故和确保核安全。2012 年 11 月 7 日，原子力规制委员会指定福岛第一核电站为“指定反应堆设施”，即发生过核事故并作出与设施目前状况相称的特殊规定的设施。

这种指定允许原子力规制委员会要求东电公司制定实施战略计划中所概述行动的计划[275]。东电公司的“实施计划”于 2012 年 12 月提交[279]并随后获得批准。东电公司负责执行“实施计划”中所规定的行动。这些行动的执行情况由原子力规制委员会审查。

此外，原子力规制委员会还于 2014 年 2 月为管理厂区边界附加有效剂量制订了监管要求，并于 2015 年 2 月确定了“东电公司福岛第一核电站中期减少风险措施”的行动[280]。

¹¹³ 由于计划将随着条件的不断变化以及新资料的出现而将予以调整，因此，预计路线图将有进一步修订。在本报告的最后编制过程中（2015 年 6 月），发布了路线图的第三次修订版。这次修改了移除燃料和碎片的时间表和方法，改进了降低风险、与当地利益相关者沟通、减少工作人员所受照射及研究与发展管理的方案[277]。

东电公司已在场址建立了维持防护与安全并允许开展退役的稳定状况[275]。重要支持功能，如正常和备用电力供应，已重新确立和升级。基本安全功能也已重新建立。确保稳定状况长期可靠性的安排包括：

- 监测电站状况；
- 冷却燃料和燃料碎片；
- 维持核次临界；
- 控制氢气水平；
- 确保反应堆厂房的结构稳定性；
- 控制水进入到反应堆厂房，并防止泄漏到环境中；
- 确保必要的电力供应；
- 确保基本安全功能的长期实现。

对重要安全功能进行了重新建立和升级，例如，通过安装多个备用设施和通过更换和（或）升级移动和临时系统来扩大永久系统。场址形势依然复杂，需要仔细的监测和控制，以保证持续稳定状况。

5.2.3. 污染水管理

进入受损反应堆厂房的水被污染，并由于涉及的大量而提出特别具有挑战性的问题。在编写本部分时，水继续以两种方式进入福岛第一核电站反应堆厂房：向反应堆堆芯注水用于冷却目的和地下水进入。表征和管理这种水仍然是必要的（图 5.4）。

事故发生前，从山腰流到福岛第一核电站后部的地下水已经以约 850 立方米/天的速率从设在 1 号至 4 号机组厂房周围的地下排水系统抽出，以控制地下水水位。作为事故的后果，先前抑制建筑物浮力和防止地下水进入建筑物的地下排水系统及泵停止运行[281]。

事故发生后，大约 400 立方米/天未被污染的地下水流入建筑物。大约 400 立方米/天的水通过 1 号至 3 号机组反应堆循环进行冷却。进入建筑物的地下水与用于冷却反应堆的循环水混合，导致必需要管理的污染水总量达到约 800 立方米/天。大约 400 立方米/天的水被重新注入反应堆，用于冷却燃料和燃料碎片，而其余 400 立方米/天的水被贮存在污染水储箱[276]。

这些水经处理，以去除除了氚之外的放射性核素，氚是无法去除的[282]。处理后的水贮存在厂内 826 个储箱（截至 2015 年 2 月 12 月）[283]。

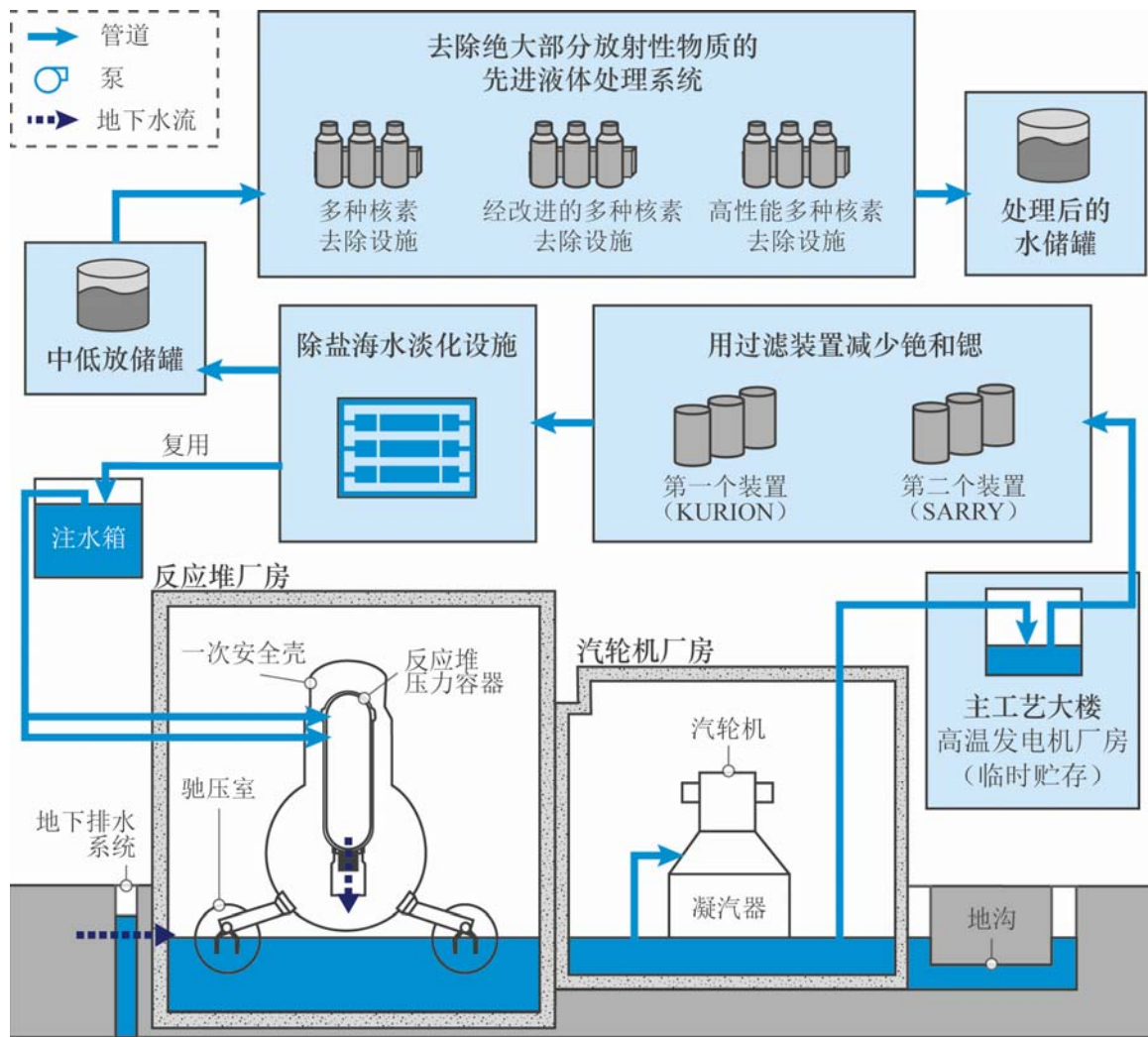


图 5.4. 厂内污染水的管理[284]。

已经有效运用或正在计划利用各种水管理方法，包括改善和安装额外的处理系统和储箱，恢复地下排水系统和安装海洋一侧的防渗墙。来自受损设施高处未被污染的地下水正被从设施周围分流到海洋（图 5.5）[285]。另外，正在反应堆厂房的靠山一侧建设低温“冻结”墙，以防水进一步进入。还计划在反应堆厂房的靠海一侧建立一个低温墙。

在获得原子力规制委员会批准以及包括福岛县和捕鱼业在内的有关利益相关者认可后，东电公司于 2014 年 5 月开始直接向海洋排放被分流的未被污染的地下水[285]。这一措施减少了需处理的水量。

厂内大量的污染水呈现出各种风险。由于储箱、管道和阀门出现故障或大雨期间，注意到具有放射性的污染水从部件中泄漏出来。在某些情况下，泄漏导致放射性核素释放到大海。检出这种泄漏后，引起了对厂内以及海洋环境的更密切监测[287]。虽然正在采取措施以停止或减少泄漏，但需要更多可持续的解决方案，这些方案将考虑所有选项，包括可能恢复向海洋受控排放。作为原子能机构评审工作组访问的结果

[288、289]，建议东电公司对向海洋排放含氚和其他任何残留放射性核素的水所产生的潜在放射后果开展评价。还认识到，进行最终决策时将需要使所有利益相关者参与，包括东电公司、原子力规制委员会、日本政府、福岛县、当地社区等利益相关者，并需要在协商过程中考虑社会经济状况及实施全面的监测计划，以确保不对人类健康和环境产生有害影响[288、289]。在这方面，有益的做法将是制订关于在事故后情况下适用国际排放导则的进一步导则。



图 5.5. 水管理工作示意图。左侧所示为污染水储箱[286]。

5.2.4. 乏燃料和燃料碎片的移除

被事故损坏设施的退役准备包括从受损反应堆厂房内的贮存池移除乏燃料和新燃料组件。东电公司于 2013 年 11 月开始将 4 号机组反应堆厂房内贮存池的燃料转移至公共燃料池。这次作业于 2014 年 12 月完成[290]。

完成 1 号至 3 号机组贮存池乏燃料和新燃料组件的转移将需要数年时间。对所需时间更准确的估计取决于在清除爆炸产生的碎片、进行 1 号至 3 号机组上部结构进入准备、为移除工作提供设备和结构支持以及其他措施方面取得的进展。乏燃料将被放置在一个共同燃料池进行临时贮存。

清除和管理反应堆堆芯熔化燃料产生的碎片是一个更加复杂的难题。由于受损反应堆中高辐射剂量水平，对事故产生的破损燃料（燃料碎片）的结构和组成的目视确认尚不可能。可用的分析表明，1 号机组中的大多数燃料已熔化并且一些燃料熔穿反应器压力容器底部落到一次安全壳里，而 2 号和 3 号机组中的燃料虽然也已熔化，但较大部分仍留在反应器压力容器内[9]。

在编写本部分时，日本政府正在主持关于接触并清除燃料碎片的办法的概念研究[276、291]。已为清除燃料碎片的未来活动开发了概念模型，其中考虑了所需要的许多初步步骤，包括：

- (1) **减少反应堆厂房中的辐射水平。** 因为反应堆厂房内的高剂量率以及散落在反应堆厂房内的瓦砾和被污染的粉尘，工作人员难以进入反应堆厂房内的空间。在很多情况下将需要用远程操作设备进行去污才能进入。
- (2) **灌进水的一次安全壳的修复。** 将开展调查并将开发所需要的设备，以停止从安全壳漏水，在这之后将根据后续操作需要，监测和维持水位。
- (3) **表征一次安全壳内的工况。** 清除燃料碎片需要确定燃料碎片块的准确位置。将开发用于调查安全壳内工况的设备，并将获取燃料碎片块的位置、分布和形状等必要的信息。
- (4) **表征反应堆压力容器内的工况。** 这包括燃料碎片的分布、放射性水平，以及破损压力容器的物理构成。
- (5) **开发用于清除燃料碎片的技术。** 将确认清除燃料碎片的先决条件，从而开发用于打开反应堆、移出反应堆压力容器内的结构障碍物并清除燃料碎片的技术和设备。
- (6) **水管理。** 除了冷却和硼控制外，随着清除燃料碎片方案的进展，还需要进行精心的水管理。例如，将需要额外手段来去除由于清除作业而悬浮于水中的颗粒物。
- (7) **燃料碎片的包装、运输和贮存。** 随着碎片从反应堆压力容器和一次安全壳中移出，将需要把它们置于屏蔽容器中。将需要把这些容器从反应堆厂房移出并置于福岛第一核电站场址临时贮存，直至对它们的处置做出最终决定。
- (8) **防止燃料碎片达到核临界。** 将开展评估，并将落实监测技术，以防止碎片内发生核临界的任何可能性。

- (9) **燃料碎片中的核材料的衡算和控制。**按照日本与原子能机构缔结的保障协定和日本国内法，需要对可裂变材料进行衡算。因为标准方法无法适用于燃料碎片，所以在从反应堆中清除燃料碎片之前将确立可衡算性措施。

燃料碎片一旦从反应堆中移出便浸入水中，以提供屏蔽，并最大限度地减少放射性释放到空气中。高的辐射和污染水平以及燃料碎片的未知分布和特性，意味着许多工作将需要通过使用远程操作设备进行。随着有关燃料和燃料碎片状况的数据可供使用，将需要调整清除燃料碎片的战略，也将需要调整设计、策划和制造适当设备的计划。

5.2.5. 场址的退役终态

在正常（非事故）的情况下，核电厂的终态在许可证申请文件和后续辅助文件中界定和说明。实现电厂终态一般有两种战略可供使用：立即拆除和延迟拆除，延迟拆除有时被称作安全贮存。在特殊情况下，如在核事故之后，也可以考虑掩埋[292]。

核事故可能使之前的退役规划作废，例如，由于在可以制订新的退役计划前需要稳定结构、系统和部件。退役计划、燃料碎片清除和场址最后终态的选择，取决于事故的性质，并将包括以下方面状况的考虑：留在设施内的核残留物、颗粒和放射性物质；贮存中的乏燃料和燃料碎片；以及贮存中的固体放射性废物和处理过的水[293]。例如通过适当的公众咨询过程获得的利益相关者的权益也将影响退役的规划和实施。

目前还无法预测福岛第一核电站场址的终态[291]。可以指出，在以往的事故中经历了最严重燃料损坏的世界其他地方的三座核电厂没有一个已达到完全退役的最后终态[293]（资料框 5.3）。

资料框 5.3. 受损核设施的退役状况

在以往的事故中经历了最严重燃料损坏的其他地方的三个设施分别是温茨凯尔（英国）、三哩岛（美国）和切尔诺贝利（前苏联）。在本报告编写时，这些设施的状况如下：

1957 年在事故中被损坏的温茨凯尔堆，目前处于保养和维护状态，有计划在未来几年将其置于安全贮存中，并计划在 2050 年左右进行最终退役。

1979 年受损的三哩岛核电厂机组处于安全贮存模式，有计划在未来 20 年内进行完全拆除和场址恢复。

1986 年在事故中严重受损的切尔诺贝利核电站 4 号机组正被置于安全贮存状况，预计在 2050 年左右进行最终退役。

有关福岛第一核电站场址将实现的终态的最终决定，将需要考虑很多因素，包括未来的土地使用，对退役工作人员可能的辐射剂量，将产生的废物以及废物整备和处置的方案。

5.3. 污染物质和放射性废物的管理

受损核电站的稳定和厂内去污以及周边地区的治理工作会导致大量的污染物质和

放射性废物。在厂内，各种恢复活动后，便产生了大量受污染的固体和液体材料以及放射性废物。¹¹⁴ 这种物质由于其不同的物理学、化学和放射学特性，因而管理复杂，并需要很大的工作量。

在福岛第一核电站事故发生后，在建立用于贮存厂外治理活动产生的大量污染物质的场所方面一直困难重重。在当地社区已建立了数百个临时贮存设施。正在继续努力建设中间贮存设施。

5.3.1. 废物管理

地震叠加海啸产生了大量废物（称为“灾害性废物”），其中一些废物由于福岛第一核电站释放的结果而受到污染（主要被铯-134 和铯-137 污染）。厂内稳定活动增加了需要管理的污染物质以及固体和液体放射性废物的存量，而厂外治理活动则增加了污染物质数量。

资料框 5.4. 放射性废物

放射性废物是其所包含放射性核素的含量或浓度高于规定水平、预计不再进一步使用的物质。处置是放射性废物管理的国际公认的终点。然而，在处置设施正在开发期间经常需要将一些放射性废物贮存数十年。某些类型的放射性废物（低放废物）可以在“近地表”废物处置设施进行处置。

对具有不同物理学、化学和放射学特性的大量废物进行管理（即预处理、处理、整备、运输、贮存和未来处置）提出了挑战。因地震叠加海啸造成基础设施丧失和高辐射水平，使情况变得更加困难，而设备、活动和设施的开发和（或）修改不得不在这些情况下进行。还必须修订立法和国家废物管理方案[124、266、278、294]。

5.3.2. 厂外活动

已启动厂外治理，目的是减少外照射。治理行动包括去除表层土壤和植被以及公共区和居住区的去污。需要治理区域的大小取决于所采取的放射学标准和行动水平，这些也对需要管理的污染物质数量有影响。

一般情况下，低参考水平则导致较大量污染物质的产生。据估计，事故发生后因治理活动产生的土壤和其他污染物质的存量在通过植物和树木焚烧进行减容后，将约为 1600—2200 万立方米[273]。

福岛县采用的废物管理过程的各个阶段示于图 5.6。对治理活动中产生的废物管理包括将废物收集在场所附近的临时贮存设施进行去污。已建成数百个临时贮存设施。这种废物经临时贮存后，将被运到中间贮存设施。一些废物污染水平足够低，可以使

¹¹⁴ 污染物质和放射性废物之间的区别取决于这些物质的放射性核素和放射性浓度。

用现有的城市固体废物处置基础设施（如市政焚烧设施、垃圾填埋场）进行处置。然而，获得市政当局同意使用常规焚化炉来减少厂外污染物质数量的过程已被证明很困难。

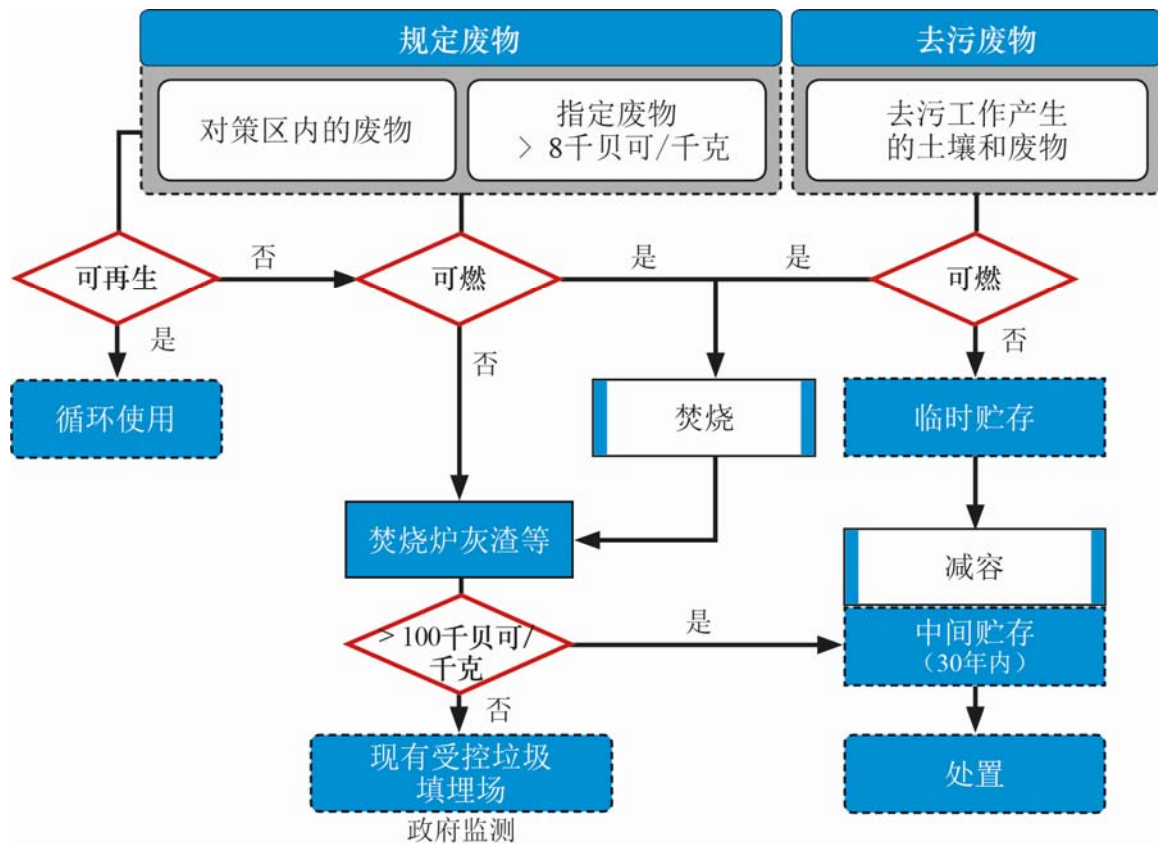


图 5.6. 福岛县指定废物和去污废物的管理流程图[295]。

临时和中间贮存设施的选址存在拖延。获得当地居民的同意是造成选址拖延的一个因素。然而，在国家和地方政府官员与当地居民和土地所有者讨论之后，大隈町和双叶町分别于 2014 年 12 月和 2015 年 1 月接受了建设中间贮存设施的计划。2015 年 1 月，环境省证实了从 2015 年 3 月以中试规模向中间贮存设施运输污染土壤的计划和安排[273]；出于试验目的，这些运输于 2015 年 3 月 13 日开始。

5.3.3. 厂内活动

继各种恢复活动之后，在福岛第一核电站产生了大量的固体和液体污染物质以及放射性废物。例如，截至 2014 年 11 月 30 日，13.19 万立方米的碎片和 7.97 万立方米的树木被贮存在厂内[296、297]。这些大量的污染物质和放射性废物的产生要求制订有效的废物管理战略。特别是，需要开发用于处理和贮存数十万立方米的污染水和处理水以及用于从处理过程和大面积土地清理产生的固废物的设施。厂内废物管理的部分战略包括用于水处理和贮存的设施示于图 5.7。

对各种类型的固体和液体废物流的贮存能力（图 5.8）存在持续需要。因此，减容已成为厂内废物管理的一个重要组成部分，例如通过避免废物产生、安装焚化炉，以及进行废物再利用和再循环。预计核电站退役还会产生更多的废物[298]。废物的类型和数量将取决于要采取的方案。



图 5.8. 厂区储水箱鸟瞰图[301]。

进行了从厂区边界转移放射性废物的努力，以限制厂区边界剂量率低于 1 毫希/年。这些活动对公众照射没有任何影响，因为厂区边界没有人居住[299]。

厂内废物的管理会提出许多复杂的挑战，需要进一步的研究和开发。随着掌握新的能力，将需要考虑厂内废物最终处置的战略，而这将涉及近期和长期的决策[300]。

5.4. 社区复兴和利益相关者参与

在应急阶段和事故后恢复阶段实施的核事故和辐射防护措施对受影响民众的生活方式产生了显著影响。撤离和避迁措施及食品限制使受影响人们陷入了艰辛。在福岛县实施的复兴和重建项目是在认识到事故的社会经济后果的情况下制订的。这些项目处理基础设施重建、社区复兴和支持与赔偿等问题。

就恢复活动与公众进行交流对建立信任至关重要。为了进行有效交流，专家必须了解受影响民众的信息需要，并通过相关途径提供信息。事故后，加强了交流，受影响居民越来越多地参与了决策和治理措施。

该事故和在应急阶段与恢复阶段采取的防护行动均影响了受影响地区民众的生活方式。到 2015 年 1 月 30 日，撤离人员的人数约为 11.9 万人，而 2012 年 6 月达到高峰时的人数约为 16.4 万人。在与撤离、避迁和食品限制相关方面存在的艰辛相当大[268、269]。

地震、海啸和事故造成了基础设施（包括学校、医院和商业企业）的毁坏、降质或废弃，影响了工商和贸易，并通过大量人员的撤离引起了人口统计学变化。据报道，年轻家庭更有可能保持撤离，而年长者更有可能返回家园[302]。国家和地方一级的恢复和复兴计划应认识到实体重建和社会经济重建的重要性，并应处理基础设施重建、社区支持和赔偿等问题[269]。

生活在临时住所的人们面临的特别挑战包括一系列的一般性身体安康和精神安康问题，这些问题与高失业率和临时住所相关困难联系在一起[239]。由于地震、海啸和核事故而生活在临时住所的撤离人员总人数没有精确获悉，但到 2013 年 6 月，已建造了 1.68 万个临时住房单元，有近 2.4 万个家庭生活在县政府租赁的住所中[269]。此外，还计划到 2015 年为受地震和海啸影响的人们建造 2586 个永久公共住房单元。对于在事故响应中撤离的那些人，计划为他们建设 4890 个永久公共住房单元[283]。

5.4.1. 社会经济后果

撤离导致失去了农场和企业。停止了在该场址方圆 30 公里（2011 年 9 月底减少到 20 公里）范围内的渔业，并停止了在“特别去污区”之外约 700 平方公里范围内的农业和其他商业活动[269、303、304]。

在“特别去污区”和“密集污染调查区”以外，也给农业部门和其他企业造成了社会经济后果。除了受影响人员失去就业机会和生计外，食品限制、与食品和消费品

有关的出口损失、为验证遵守放射学标准情况而进行的监测的成本以及对受影响人员的赔付也造成了影响。间接社会经济后果包括消费者不仅对食物产品而且对来自受影响区域的商品和受影响区域的企业都丧失信心所引起的后果[269、303、305]。

地震、海啸和核事故的并发对日本经济产生了直接影响。与 2010 年 4 月的水平相比，出口在 2011 年 4 月下降了 2.4%。与此同时，进口特别是燃料、化工制品和食品的进口增加，导致 2011 年 4 月和 5 月的贸易收支平衡出现逆差[303]。在编写本报告时，化石燃料进口仍处于较高水平[306]。

虽然事故发生时日本不是任何核损害民事责任公约的缔约方（日本在 2015 年 1 月 15 日加入了《核损害补充赔偿公约》），但 1961 年实施的立法与这些公约中所载的核责任基本原则相一致。根据该立法，东电公司对福岛第一核电站事故造成的核损害负完全责任[307]。该公司的责任没有数额限制。事故后，政府和国会没有对东电公司予以免责，认为《核损害补偿法案》规定的与严重自然灾害有关的免责条款不适用于此案例。为使东电公司能够履行对事故受害者的义务，实施了各种办法，包括作为应急措施的临时赔付、由原子力损害赔偿和退役支援机构向东电公司提供财政支持和由原子力损害赔偿和退役支援机构成为东电公司的控股股东。此外，核损害赔偿纠纷调解委员会的设立和无法律约束力的导则的公布为核损害赔偿的迅速庭外和解提供了机制。

既定赔偿政策适用于被命令撤离的人，还覆盖对生计和生活方式的影响、因各种限制和失去消费者信任所致利润损失以及对仍留在该地区的人们而言基础设施的变化。此外，还针对年轻家庭的父母和孕妇制订了特别规定[308]。

根据 2011 年 12 月制订的导则，须撤离的人获得了每人每月约 10 万日元的赔偿。还将向在解除撤离令后一年内返回受影响区生活的那些人们支付每人约 90 万日元的额外赔偿[309]。

5.4.2. 复兴

在政府和地方的支持下，实施了刺激福岛县复兴的一些举措。这包括重建基础设施、住房和交通。一些行动重在恢复消费者对产品的信任同时也促进当地自豪感和旅游业。由于认识到工作和就业机会的提供也是促进居民返回（或促进新人口定居）的推动因素，还有些举措重在重建企业及创造新的商业机会。

与恢复有关的复兴举措和重建活动从国家政府层面的举措和活动到非政府组织和当地社区的举措，不一而足。日本政府设立了复兴厅；福岛县启动了各种活动，包括设立了环境创造中心[234、269]；东电公司在 2013 年设立了福岛复兴本部。所有项目都旨在将辐射防护行动与更广泛的社会方面如基础设施复兴、公众参与和赔偿（就复兴本部而言）相结合[310]。

这些行动在全县各地各不相同，这通常取决于当地领导人的参与和本地区内不同的挑战。成功的复兴举措的事例包括桃子种植户和分销商及食品行业为恢复公众对福岛县出产的食品的信任开展合作[269、311]。

5.4.3. 利益相关者的参与和与他们的沟通

随着治理和恢复行动取得进展，利益相关者的参与增加，协商和参与战略得到改进。事故响应提供了一些事例，这些事例表明了使受影响民众参与从协商和对话到治理行动（所谓的“自助行动”）的恢复活动的益处。

与公众进行公开和有效的沟通是复兴的一个重要部分。该地区的去污信息枢纽（去污信息广场）作为福岛县和环境省的联合项目于 2012 年 1 月在福岛市开放[312]。

在地方一级的其他沟通活动包括专家与公众之间的对话和对自助行动的具体建议。这些活动有助于恢复与福岛县居民的沟通和重建信任。

图 5.9 示出治理工作和与利益相关者相关互动实施过程的流程图。计划制订及其实施中的所有步骤都包括利益相关者参与和协商。对于私有土地的治理，在能够开始任何治理活动之前，需要取得土地所有者的同意。

在核事故中，传统媒体和新媒体都在与公众的沟通中发挥着重要作用。福岛第一核电站事故的一个特点是媒体通过因特网、社交媒体和在初始阶段通过持续的电视和无线电广播进行了大规模报道。事故报道持续了数月，主要侧重报道与事故场址相关的问题，但也报道日本当局采取的防护行动。社交媒体加强了对事件的报道，以及对个人和非政府组织的观点的传播。提供的信息非常之多，但质量和可信度各异[310]。

辐射安全专家需要了解公众需要什么种类的信息，并以易于理解的方式提供它们。受影响社区和媒体提出的关键问题侧重于什么程度的辐射是“安全的” [314]。

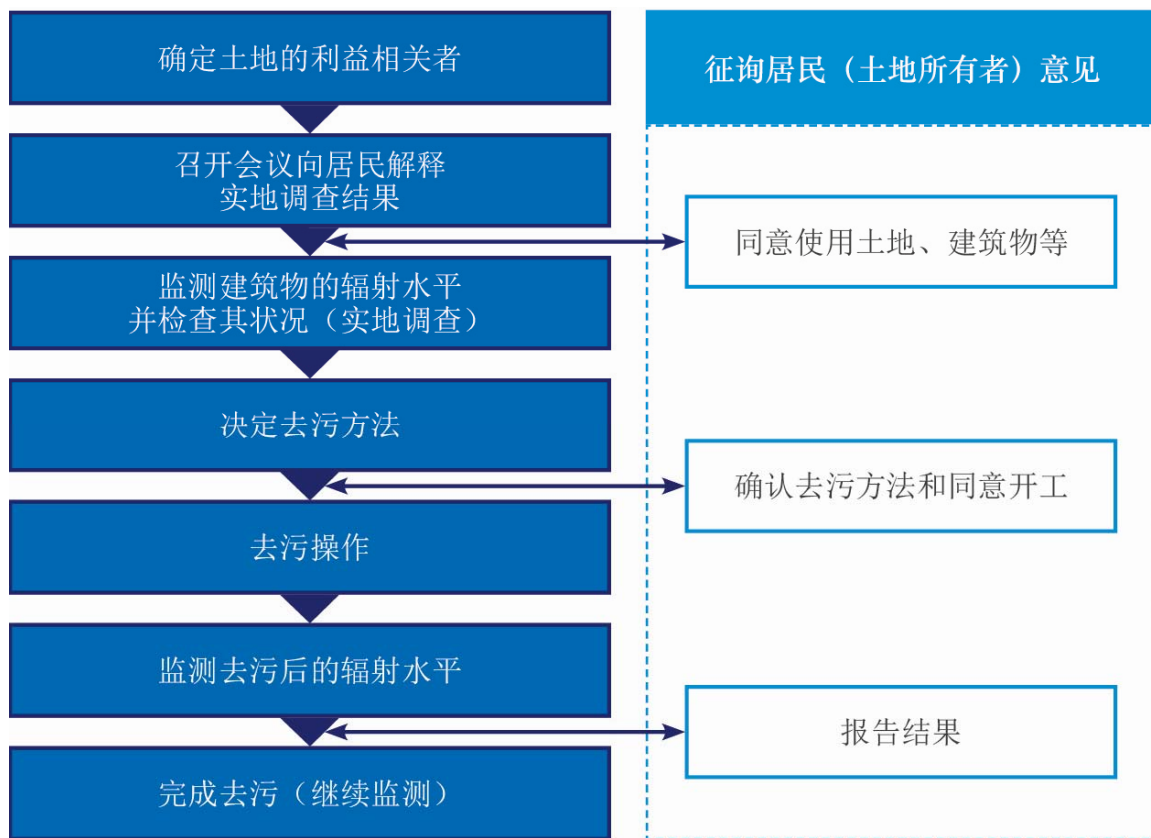


图 5.9. 治理过程和与居民协商过程的流程图[313]。

5.5. 意见和教训

作为对事故后活动的评价结果，汇编了一些意见和教训。

- 一 事故后恢复的事故前规划对改进在事故刚结束后情况中的压力下作出的决策非常必要。需要在核事故前预先制订关于事故后恢复的国家战略和措施，以便能够在万一发生核事故的情况下落实有效和适当的全面恢复计划。这些战略和措施需要包括：制订法律和监管框架；制订一般性治理战略和关于残留辐射剂量与污染程度的标准；制订受损核设施的稳定和退役计划；以及制订管理大量污染物质和放射性废物的一般性战略。

这些战略和措施需要包括：

- 制订法律和监管框架，具体规定各参与机构的任务和责任。该框架需要涉及厂外治理、厂内稳定和退役准备、污染物质和放射性废物管理以及社区复兴和利益相关者参与。
- 关于残留辐射剂量和污染程度的一般性治理战略和标准（参考水平和推导出的行动水平）。

- 制订稳定受损核设施现场状况的计划和进行退役准备。
- 在贮存和处置设施的一般性安全评价支持下，制订管理大量污染物质和放射性废物的一般性战略。
- 具有充分的灵活性，以确保能够根据不断变化的状况和所获得的资料和经验对事故后状况管理进行调整。

— **治理战略需要考虑各措施的有效性和可行性以及将在治理过程产生的污染物质数量。**

在制订关于残留辐射剂量和污染程度的参考水平后，必须谨慎控制因实施治理战略而产生的污染物质数量，以最大程度减少将管理的废物数量。由于日本没有进行核事故后恢复的准备，最初产生了大量可能受污染的物质。随着时间的推移和规划的制订，对治理行动进行了优化，从而改进了对将管理的废物数量的控制。

试点项目对确定特定治理技术的有效性和特定技术产生的废物数量都起到了作用。试点项目还有助于制订工作人员的辐射防护程序。

— **作为治理战略的一部分，有必要实施严格的食品检测和控制，以防止或最大程度减少摄入剂量。**

在事故后系统实施的严格食品检测和控制证明，能够将摄入剂量保持在低水平。

为了建立对当地产食品的信任，建立了当地监测站，以便使受影响地区的人们能够将食品送去检测。这种摄入量控制简化了恢复工作，使治理活动能够专注于可减少外照射剂量的技术。

— **需要就辐射防护安全标准在事故后恢复情况中的实际适用制订进一步的国际导则。**

需要就原子能机构安全标准在现存照射情况中的适用制订进一步的实用导则。需要根据不断变化的放射状况，酌情定期审查和修改为事故后最初几年制订的参考水平。导则需要包括从剂量和推导数量方面选择个案特定参考水平和场址特定参考水平的方法，以及将技术和科学建议与其他具有社会意义的因素相结合的机制，以便构建一个连贯一致、透明和共同接受的决策过程。

— **事故发生后，维持长期稳定状况和对受事故破坏设施实施退役的战略对厂内恢复至关重要。这种计划需要具有灵活性，可根据不断变化的状况和新信息随时进行调整。**

事故中受损设施的退役准备将首先涉及保持稳定性，以确保结构、系统和部件到位，能够可靠地维持长期稳定状况，直到不再需要它们的功能为止。事故后的退役准备需要几十年时间。需要为维持整个期间必要的专门知识和职工队伍作出安排。

在就暂定退役阶段及场址和受损反应堆的最终状况作出决策时，需要包括与利益相关者进行对话。对退役的决策取决于受损反应堆、燃料和碎片的状况，这些状况无法在事故后立即确定。在决策时需要考虑的因素包括：工作人员在退役过程中接受的剂量水平；产生的废物的体积和类型；以及废物处理所需的努力。在净化活动的早期阶段，预测电厂场址的最终状况是不实际的，但在决策过程中需要考虑对土地的预期和计划。

- 一 **回取破损燃料及表征和清除燃料碎片需要制订对事故具有针对性的解决方案，并且可能需要制订专门方法和开发专门工具。**

涉及核燃料破损的反应堆事故会导致反应堆出现特定状况，这些状况将是该事故所特有的。破损燃料元件及熔化燃料碎片的移除和管理是复杂的工作。需要对碎片进行表征、移除、包装和贮存，直到在主要与高辐射水平相关的困难条件下对它们实施处置。

- 一 **关于事故后恢复的国家战略和措施需要包括在关于排放、贮存和处置的一般性安全评价的支持下，制订管理液态和固态污染物质和放射性废物的一般性战略。**

需要制订废物管理战略，以促进实施事故产生的污染物质和放射性废物的处置前管理（如搬运、处理、整备和贮存）。它还需要确定适当的物质处置路线。废物管理战略可以涉及使用现有处理、贮存和处置设施，如焚化炉或受控浸出物填埋场。但根据所涉及废物的体积和特性，也可能需要采取其他方案。这类战略的制订可以通过编写一般性安全论证文件予以支持。

还必须制订对大体积污染水进行事故后管理的战略，包括考虑其向环境的受控排放。尽管存在核设施正常运行期间排放的国际导则，但需要制订其在事故后情况下适用的进一步导则。

- 一 **必须认识到任何核事故和后续防护行动的社会经济后果，并须制订处理基础设施重建、社区复兴和赔偿等问题的复兴和重建项目。**

核事故和在应急阶段与事故后恢复阶段为减少剂量而采取的防护行动和补救行动都对受影响民众的生活方式产生了深远影响。利益相关者参与各阶段的治理和恢复至关重要。

- 一 利益相关者的支持对事故后恢复的所有方面都至关重要。特别是，受影响民众参与决策过程对恢复工作取得成功、获得接受和具有有效性以及对社区复兴必不可少。一项有效的恢复计划需要受影响民众的信任和参与。必须通过对话过程以及提供一致、明确和及时的信息和对受影响民众给予支持来建立对实施恢复措施的信心。

政府需要向公众提供一致、明确和及时的恢复计划的切实描述。需要利用各种信息渠道包括社交媒体向所有感兴趣群体进行传播。

对辐射危险的看法和“安全”辐射水平问题的答案有着许多层面，包括科学层面、社会层面和道德层面。需要通过教育计划向相关社区清晰地传播这些答案，最好在事故发生前这样做。

受影响民众在当地恢复努力方面获得支持非常重要。对治理活动相关自助行动和重建企业给予支持可以增加对恢复计划的参与和建立受影响民众的信心。

6. 原子能机构对事故的响应

本部分概述了福岛第一核电站事故后即时阶段和较长时期内的原子能机构主要活动。这些活动包括最初的活动、原子能机构赴日本工作组访问、“部长级核安全大会”和原子能机构“行动计划”。

原子能机构是《核安全公约》的保存人，其作用是通过召集、筹备和服务于会议以及传递相关信息给缔约方的方式为会议提供秘书处。本部分还介绍了福岛第一核电站事故后《核安全公约》缔约方会议的相关活动。

6.1. 原子能机构的活动

6.1.1. 最初的活动

对核或辐射应急作出响应和保护工作人员、公众和环境的责任由相关设施一级的营运组织承担，在地方、地区和国家各级则由受影响国家承担。

原子能机构在国际应急准备和响应框架¹¹⁵中发挥着核心作用。该作用包括：(1) 通过官方指定的联络点进行通报和正式信息交流；(2) 提供及时、明确和易懂的信息；(3) 应请求提供和便利提供国际援助；以及 (4) 协调机构间的响应。¹¹⁶

原子能机构通过其“事件和应急系统”履行这一职责，该系统由一个全天 24 小时的联络点和一个业务协调中心即“事件和应急中心”组成。

在 2011 年 3 月 11 日协调世界时¹¹⁷ 6 时 42 分，在接到原子能机构国际地震安全中心的通报后，原子能机构启动了“事件和应急系统”。该通报表明发生了地震，日本东北部海岸的四座核电站¹¹⁸有可能遭受损坏，并有发生海啸的风险[143]。在协调世界时 7 时 21 分，原子能机构与日本根据“及早通报公约”和“紧急援助公约”指定的官方联络点建立了初始通讯。

¹¹⁵ 在发生事故时的国际应急准备和响应框架包括：(a) 国际法律文书和协定，特别是《及早通报核事故公约》（及早通报公约）和《核事故或辐射紧急情况援助公约》（紧急援助公约）；(b) 应急准备和响应方面的原子能机构安全标准和技术导则；(c) 国际业务安排和工具，特别是《紧急通报和援助技术工作手册》（紧急通报和援助手册）、原子能机构响应和援助网络（响应和援助网）以及《国际组织辐射应急联合管理计划》（应急联合管理计划）。

¹¹⁶ 核和辐射应急方面的主要协调机构是机构间放射和核应急委员会。该机构是在 1986 年切尔诺贝利事故后设立的，目前包括 18 个国际组织。机构间放射和核应急委员会的基本职责之一是制订和维护《国际组织辐射应急联合管理计划》（事故发生时为“2010 年应急联合管理计划”）。

¹¹⁷ 协调世界时，比日本标准时间晚九个小时。

¹¹⁸ 东京电力公司（东电公司）的福岛第一核电站和第二核电站、东北电力公司的女川核电站和日本原子力发电公司的东海核电站。

在事故的最初几天，情况已变得很明显，福岛第一核电站各座反应堆以及乏燃料池中的燃料可能有严重损坏的危险。因此，原子能机构设立了评估关键核和辐射安全问题的小组。原子能机构的实验室¹¹⁹审查了日本当局提供的关于海洋环境监测的环境数据，并收到了陆地环境样品，以便进行独立分析。

原子能机构总干事于3月17日至19日访问了东京，进行了高级别磋商，表达了国际社会的团结一致和对日本处理地震、海啸和核事故后果的全力支持，并转达了10多个国家提供援助的意愿。总干事还讨论了原子能机构提供或协调特定类型援助如专家工作组和实情调查组的可能性，并强调了透明度以及日本及时提供官方资料的重要性。

3月28日，在为原子能机构成员国举行的特别简况介绍会上，总干事宣布将在夏季到来之前在维也纳举行一次高级别原子能机构核安全大会。他表示，“至关重要的是我们要从3月11日及以后发生的事件中汲取到正确的教训，以便加强全世界的核安全”[315]。

在3月18日至4月18日期间，应日本请求，原子能机构派遣了四个赴日放射性监测小组，以帮助确认日本当局进行的更广泛测量的结果。这些小组在位于福岛第一核电站周围20公里撤离区内和东京附近区域的一些地点进行了测量。向日本派遣了一名原子能机构高级官员，以协调原子能机构的相关活动，并向日本当局转达成员国提供援助的意愿。原子能机构数名联络官员被派往东京，目的是促进和改善与日本监管机构即当时的原子力安全和保安院的沟通。

原子能机构和粮农组织食品安全联合评价小组于3月26日至31日访问了日本。该小组就与食品安全和农业对策有关的技术问题向国家和地方两级当局提供了咨询和协助。就采样和分析战略以及监测数据的解读提供了咨询，以确保就受影响区域食品污染的程度提供可靠、持续的更新。这些数据被日本当局用来制订缓解和治理战略。

原子能机构的一个沸水堆专家小组于4月3日被派往日本，并于4月12日完成了工作。该小组对福岛第一核电站和福岛第二核电站的场址进行了巡视，并会见了电站工作人员，以便更好地了解事故情况、截至当时所采取的缓解行动以及已经作出的重大决策的依据。他们还与几个政府办公室工作人员举行了会议，并在东京与东电公司和原子力安全和保安院进行了详细的技术讨论。

原子能机构在3月11日地震发生后不到三个小时就发表了原子能机构关于该事故的第一份声明，当天晚些时候又发表了另外五份声明，其中传达了从日本获得的信息。到2011年4月22日发布了120多条更新信息。在2011年3月14日至6月2日

¹¹⁹ 位于奥地利塞伯斯多夫和位于摩纳哥的原子能机构实验室是分别专门从事陆地和海洋环境样品评的实验室。

期间，除了总干事访问日本期间举行的新闻发布会外，原子能机构还举行了 16 场新闻发布会。原子能机构的公众宣传活动还包括答复数千个电话，并对媒体数以百计的询问提供详细的技术解答。

原子能机构在其公开网站上向成员国和公众发布每日简报。这些简报的内容包括：福岛第一核电站 1 号至 6 号机组的状况；放射性核素如碘-131、铯-134 和铯-137 的辐射监测数据；食品辐射监测结果以及关于食品和饮用水分配和消费当前受到的限制的信息；以及海洋环境监测数据。原子能机构还向原子能机构各成员国常驻维也纳代表团就该事故作了简要说明和介绍。

6.1.2. 原子能机构赴日本工作组

根据与日本政府达成的协议，来自原子能机构和成员国的专家从 2011 年 5 月 24 日至 6 月 2 日进行了一次国际实情调查专家工作组访问。工作组收集了供对福岛第一核电站事故进行初步评价以及关于在其他场址（福岛第二核电站和东海第二核电站）上发生的事件的资料。此外，还确定了与自然事件相关的一般安全问题，对这些问题需要基于原子能机构的安全标准作进一步探讨或评价。

工作组访问的范围包括：自然来源的外部事件；电厂安全评价和纵深防御的实施；地震和海啸后的电厂响应；严重事故管理；严重恶化设施中的乏燃料管理；应急准备和响应；以及放射后果。工作组访问的结果[34]包括 15 项结论和 16 个教训，这些结论和教训已于 2011 年 6 月报告给了原子能机构部长级核安全大会。

原子能机构其他赴日本工作组访问情况在表 6.1 中作了概述。

根据第二个退役工作组提出的建议，启动了提高透明度和对日本的海洋环境监测进行独立评估的各项活动。在摩纳哥原子能机构环境实验室进行了水平测试，以监测参加实验室的性能和分析能力。海洋监测计划的结果在原子能机构的网站上定期加以更新。

6.1.3. 原子能机构部长级核安全大会

2011 年 6 月，总干事在原子能机构总部召集了一次旨在通过汲取事故教训加强核安全的部长级核安全大会。这次大会提供了在部长一级和高级技术层面对事故进行初步评价的契机。大会还审议了促进加强安全的行动、有关应急准备和响应的问题以及对全球核安全框架的影响。

大会的成果是《部长级核安全大会宣言》[320]，其中概述了进一步加强全球核安全、应急准备以及人和环境辐射防护的一些措施。“宣言”还表达了原子能机构成员国确保采取这些措施的坚定承诺。关键措施是：加强原子能机构的安全标准；对所有核电厂的安全进行系统性审查，包括通过扩大原子能机构专家同行评审计划来进行这种审查；增强国家核监管机构的有效性和确保其独立性；加强全球应急准备和响应系

统；以及扩大原子能机构在接收和分发信息方面的作用。“部长宣言”还要求总干事在与成员国磋商后编写原子能机构“核安全行动计划”草案。

表 6.1. 原子能机构赴日本工作组

| 日期 | 任务 | 目的 |
|--------------------------------|---|--|
| 2011年10月7日至15日 | 福岛第一核电站厂外大面积污染区域治理问题国际工作组[316] | 援助日本治理大面积事故污染区的计划。评审日本正在实施的治理战略、计划和活动，包括绘制污染区域图。与国际社会分享调查结果，以传播事故教训。 |
| 2012年1月23日至31日 | 日本原子力安全和保安院综合评价现有动力堆设施安全性的方案评审工作组[317] | (应日本政府请求) 评审日本原子力安全和保安院综合评价现有动力堆设施安全性的方案以及许可证持有者的评价结果。 |
| 2012年7月30日至8月11日 | 原子能机构赴女川核电站专家工作组审查系统、结构和部件在日本东部大地震和海啸后的性能[318] | 审查结构、系统和部件在地震和海啸后的性能。 |
| 2013年4月15日至22日 | 对《东京电力公司福岛第一核电站1号至4号机组退役中长期路线图》的国际同行评审(第一次工作组访问)[319] | 评审“退役路线图”、挑战、反应堆状况、废物管理、员工防护以及反应堆建筑物和其它结构的结构完整性。 |
| 2013年10月14日至21日 | 福岛第一核电站厂外大面积污染区域治理问题国际工作组的后续活动[265] | 评估日本正在进行的治理工作的进展情况，并提出应对治理挑战的建议。 |
| 2013年11月6日至12日 | 海洋监测专家访问 | 在福岛观察海水取样和数据分析(2013年11月7日和8日)，并在东京会晤相关日本当局，以收集有关日本根据其“海域监测计划”进行的海洋监测的信息。 |
| 2013年11月25日至12月4日 | 对《东京电力公司福岛第一核电站1号至4号机组退役中长期路线图》的国际同行评审(第二次工作组访问)[288] | 审查和更新“退役路线图”；从贮存池移出乏燃料；污染水的管理；废物管理；以及海洋监测。 |
| 2014年9月10日至16日以及2014年11月4日至14日 | 建立海洋监测信任和数据质量保证专家工作组 | 重点是海洋监测结果的可用性。 |
| 2015年2月8日至15日 | 对《东京电力公司福岛第一核电站1号至4号机组退役中长期路线图》的国际同行评审(第三次工作组访问)[289] | 审查“退役路线图”实施情况；污染水的管理；地下水进入问题；移出乏燃料和燃料碎片；以及制度和组织问题。 |

6.1.4. 原子能机构“核安全行动计划”

原子能机构“核安全行动计划”草案是2011年9月理事会核准的。“行动计划”

随后被提交到 2011 年原子能机构大会常会，并得到了成员国的一致核可[144]。大会随后呼吁原子能机构秘书处和成员国全面和协调一致地实施作为首要优先次序的行动[321]。

“行动计划”规定的行动一经通过便开始实施。全面和有效实施该计划中的活动需要原子能机构秘书处、成员国和其他利益相关方作出共同努力和充分承诺。

自“行动计划”通过以来，已在开展核电厂安全薄弱环节评价、加强原子能机构同行评审服务、审查并在必要时修订原子能机构相关安全标准、提高应急准备和响应能力、开展能力建设以及加强与成员国、国际组织和公众的沟通和信息共享等几个关键领域取得了显著进展。向原子能机构理事会和原子能机构大会提交了定期进展报告[322—324]。

在通过“行动计划”的决议中，原子能机构在核应急响应方面的作用被扩大到包括向成员国、国际组织和广大公众提供关于核应急潜在后果的及时、清晰、事实准确、客观和容易理解的信息。这将包括对可得信息所作的分析，以及对基于证据、科学知识和成员国能力的可能的假想方案所作的预测。

组织了不同安全领域的一系列国际专家会议，分析了各方面的技术问题，并从福岛第一核电站事故中汲取教训。原子能机构公布了关于这些关键安全领域的报告，包括国际专家会议的结果（见表 6.2）。

2013 年还编写了关于以下主题的其他报告：

- “福岛第一核电站事故背景下的核或辐射应急准备和响应”，基于 2012—2013 年举行的系列技术会议[327]。
- “在福岛第一核电站事故背景下加强核监管的有效性”，基于 2013 年加拿大渥太华有效核监管体系国际会议的结果[328]。

6.1.5. 与福岛县的合作

2012 年 12 月签署了原子能机构和福岛县之间的合作备忘录[329]。在此备忘录的基础上，分别与福岛县、福岛县立医科大学和日本外务省签署了辐射监测和治理[330]、人体健康[331]以及应急准备和响应[332]领域的实际合作安排。

2013 年 5 月在福岛市指定了原子能机构“响应和援助网”的一个能力建设中心。该中心用于原子能机构在日本和世界各地开展的旨在加强应急准备和响应能力的一系列活动。在该中心已经举办了涉及核和辐射应急期间的监测、通报、报告和请求援助以及应急准备和响应的系列培训讲习班。

表 6.2. 国际专家会议

| 日期 | 名称 | 重点 |
|-----------------|--|--|
| 2012年3月19日至22日 | 国际专家会议 1: 福岛第一核电站事故背景下的反应堆安全和乏燃料安全[42] | 分析技术方面; 认识根源; 分享事故教训。 |
| 2012年6月18日至20日 | 国际专家会议 2: 核或辐射应急情况下增强透明度和提高宣传的有效性[314] | 确定和分析事故教训, 并讨论改进信息传播的最佳实践。 |
| 2012年9月4日至7日 | 国际专家会议 3: 在福岛第一核电站事故背景下防范极端地震和海啸[325] | 就以下方面分享教训、交流信息和确定有待进一步调查的问题: 地震和海啸危害评价; 特别水浸问题; 与危害评价相关的不确定性; 确定设计值的方案; 应对超设计基准事件; 防范地震和海啸的安全。 |
| 2013年1月28日至2月1日 | 国际专家会议 4: 核事故后的退役和治理[293] | 审查被事故损坏设施退役的短期和长期问题; 核事故产生的放射性废物管理; 以及厂外环境治理。 |
| 2013年5月21日至24日 | 国际专家会议 5: 福岛第一核电站事故背景下核安全中的人为因素和组织因素[67] | 探讨加强一系列关键机构包括营运组织和监管机构核安全文化的途径。 |
| 2014年2月17日至21日 | 国际专家会议 6: 福岛第一核电站事故后的辐射防护: 促进信任和理解[326] | 侧重于福岛第一核电站事故突显出来的辐射防护问题以及如何在国家层面和国际层面解决这些问题。 |
| 2014年3月17日至20日 | 国际专家会议 7: 福岛第一核电站事故背景下的严重事故管理 | 收集和分享在福岛第一核电站事故背景下获得的关于严重事故管理的知识和经验; 确定教训和最佳实践。 |
| 2015年2月16日至20日 | 国际专家会议 8: 在福岛第一核电站事故背景下加强研究与发展的有效性 | 促进交流由原子能机构成员国以及经合组织核能机构和处理核电厂严重事故包括影响乏燃料池的事故的其他国际组织开展的新研发活动所产生的信息。此外, 进一步加强成员国和国际组织之间的国际协作。 |
| 2015年4月20日至24日 | 国际专家会议 9: 核或辐射应急响应中的评价和预测 | 促进交流核或辐射应急期间及其潜在后果的及时、清晰、事实准确的信息, 包括对可得信息的分析以及对基于证据、科学知识和成员国能力的可能的假想方案的预测。 |

6.1.6. 福岛部长级核安全大会

2012年12月, 日本政府在福岛县组织了一次由原子能机构协办的部长级大会, 其主要目的是促进加强全球核安全[333]。这次大会使得有机会与国际社会分享从事故中汲取的更多知识和教训, 并讨论加强核安全的国际努力所取得的进展, 包括在执行“行动计划”方面取得的进展。

讨论内容包括：福岛第一核电站的辐射水平；事故后的退役和治理挑战；以及电站周边地区的损坏和恢复状况。大会突出强调了在核或辐射应急情况下以科学和事实信息为依据采取行动以及加强国际合作的重要性。

6.2. 《核安全公约》缔约方会议

资料框 6.1. 核安全公约

《核安全公约》于 1994 年 6 月 17 日在维也纳获得通过[334]。这是处理核装置（陆基民用核电厂）安全的第一个具有法律约束力的国际条约，其宗旨是：实现和维护全球高水平核安全；建立并保持对潜在辐射危害的有效防御，以保护个人、社会和环境；以及防止发生具有放射后果的事故，并在事故发生时减轻这种后果。该公约于 1996 年 10 月 24 日生效。截至 2015 年 3 月，共有 77 个缔约方。

缔约方的义务在很大程度上基于目前包含在原子能机构“基本安全原则”（第 SF-1 号）中的各项原则[335]。这些义务特别包括：核装置的选址、设计、建造和运行；建立和维护立法和监管框架；建立一个有足够权力、能力以及财务和人力资源的监管机构；有充足的财务和人力资源可用于对核装置的安全提供支持；评价和验证安全性；质量保证；以及应急准备。

各缔约方必须提交关于其为履行公约规定的各项义务已经采取的措施的报告。这些报告在原子能机构主持下每三年举行一次的缔约方“审议会议”期间进行审议。

6.2.1. 《核安全公约》缔约方特别会议

在 2011 年 4 月 4 日至 14 日举行的《核安全公约》缔约方第五次审议会上，缔约方通过一项声明，其中除其他外，特别重申缔约方承诺实现“公约”的目标，并同意举行一次特别会议，以审查和讨论对事故的初步分析以及“公约”的有效性。

2012 年 8 月 27 日至 31 日在维也纳原子能机构总部召开了这次特别会议。缔约方讨论了以下内容：外部事件；设计问题；严重事故管理与恢复（厂内）；国家组织；应急准备和响应；事故后管理（厂外）；以及国际合作。

缔约方还以协商一致方式同意采取一些具体行动，以提高同行评审过程的有效性。对该公约的三个基本导则文件¹²⁰进行了修订，以加强审议过程的透明度，鼓励缔约方在其国家报告中援引原子能机构的安全标准，并通过借助定期安全审查或其他方法进行的定期安全再评价加强为持续改进所作的努力。

设立了一个有效性和透明度问题工作组，以便就加强《核安全公约》的进一步行动和在必要时对其进行修订的建议向缔约方第六次审议会提出报告。缔约方还审议了作为特别会议“总结报告”[339]附件的“注重行动的加强核安全目标”清单。

¹²⁰ 《议事规则和财务规则》[336]、《审议过程细则》[337]和《国家报告细则》[338]。

6.2.2. 《核安全公约》缔约方第六次审议会议

2014年3月24日至4月4日在维也纳举行了《核安全公约》缔约方第六次审议会议。在该会议的一次特别会议期间，缔约方报告了在福岛第一核电站事故背景下所采取的行动。该会议指出，虽然核安全和应急准备和响应安排得到了改善，但还有更多工作要做。随着采取步骤实现监管机构的有效独立并更新法规，国家安全框架正在得到进一步加强。随着更多地参与同行评审和信息交流，国际合作也得到了加强[340]。

《核安全公约》缔约方报告了实施安全升级的情况，其中包括：以引入额外的手段来抵御长时间断电和失水；进行了动力系统升级，以加强可靠性；对场址特定的外部自然灾害和多机组事件进行了重新评估；加强了厂内和厂外应急控制中心，以确保免于极端外部事件和辐射危害；加强了维护安全壳完整性的措施；以及改进了严重事故管理规定和准则。

缔约方还通过了关于进一步修改《核安全公约》基本导则文件的建议，并向秘书处、各缔约方和其他组织提出了采取行动的建議。

最后，缔约方投票决定在一年内召集一次外交大会，以便审议瑞士关于修正涉及新核电厂和现有核电厂设计和建造的《核安全公约》第18条的建议。

6.2.3. 外交大会和《维也纳核安全宣言》

外交大会由总干事于2015年2月9日在原子能机构总部召集，有71个缔约方出席。缔约方一致通过了《维也纳核安全宣言》。该宣言包括了落实该公约第三项目标即防止发生具有放射后果的事故并在事故发生时减轻这种后果的下列原则：

- “1. 新建核电厂的设计、选址和建造应符合防止调试和运行过程中发生事故和一旦发生事故时减轻放射性核素造成长期厂外污染的可能释放以及避免早期放射性释放或规模大到足以需要采取长期防护措施和行动的放射性释放的目标。
2. 应在现有装置的整个寿期期间对它们定期和经常开展全面和系统的安全评价，以便确定旨在实现上述指向目标的安全改进。应及时实施合理可行或可实现的安全改进。
3. 关于在核电厂整个寿期期间处理这一目标的国家要求和条例应考虑原子能机构相关安全标准，并酌情考虑除其他外特别是在‘公约’[《核安全公约》]审议会议上确定的其他良好实践。” [341]

“维也纳宣言”考虑了自福岛第一核电站事故以来为增强全球核安全在国际、国家和地区各层面所做的大量工作和采取的举措。

参 考 文 献

- [1] 日本国家警视厅,《与 2011 年东北地区太平洋近海地震有关的受损情况和警方相关对策》(2015 年),
https://www.npa.go.jp/archive/keibi/biki/higaijokyo_e.pdf。
- [2] 国际原子能机构,“致理事会介绍性发言”(2013 年),
<https://www.iaea.org/newscenter/statements/introductory-statement-board-governors-3>。
- [3] 日本政府,核应急对策本部,《日本政府提交国际原子能机构部长级核安全大会的报告 — 东电公司福岛核电站事故》(2011 年),
<http://www.iaea.org/newscenter/focus/fukushima/japan-report>。
- [4] 日本政府,核应急对策本部,《日本政府提交国际原子能机构的补充报告 — 东电公司福岛核电站事故 — 第二次报告》(2011 年),
http://www.meti.go.jp/english/earthquake/nuclear/iaea/iaea_110911.html。
- [5] 《东京电力公司福岛核电站事故调查委员会最后报告》,日本政府内阁官房(2012 年),
<http://www.cas.go.jp/jp/seisaku/icanps/eng/final-report.html>。
- [6] 《东京电力公司福岛核电站事故调查委员会中期报告》,日本政府内阁官房(2011 年),
<http://www.cas.go.jp/jp/seisaku/icanps/eng/interim-report.html>。
- [7] 日本国会,福岛核事故独立调查委员会,《福岛核事故独立调查委员会正式报告》,日本国会,东京(2012 年)。
- [8] 东京电力公司,《福岛核事故分析报告》,东电公司,东京(2012 年)。
- [9] 东京电力公司,《福岛第一核电站 1 号至 3 号机组堆芯和安全壳状况评价和事故进展方面未决问题审查》,东电公司,东京(2013 年)。
- [10] 东京电力公司,《福岛核事故未确定事项/未明事项的调查报告 — 进展报告第 2 号》,东电公司,东京(2014 年)。
- [11] 原子力规制委员会,《东电公司福岛第一核电站事故分析,中期报告》(2014 年),
https://www.iaea.org/sites/default/files/anaylysis_nra1014.pdf。
- [12] 日本气象厅,《2011 年东北地区太平洋近海地震情况通报》(2015 年),
http://www.jma.go.jp/jma/en/2011_Earthquake/Information_on_2011_Earthquake.html。
- [13] 国际原子能机构,原子能机构动力堆信息系统(2015 年),
<http://www.iaea.org/pris/>。
- [14] 日本气象厅,《海啸情况通报(估计海啸抵达时间和高度)》(2011 年),
http://www.jma.go.jp/en/tsunami/info_04_20110311145026.html。
- [15] 日本土木工程学会沿海工程委员会,《2011 年东北地区太平洋近海地震情况通报》(2013 年),
<http://www.coastal.jp/tsunami2011/index.php?Field%20survey%20results>。

- [16] 原子力安全和保安院，《福岛第一核电站建设许可证》，原子力安全和保安院（1966年）（日文）。
- [17] 经济、贸易和产业省，《向经济、贸易和产业省报告的干法贮存罐泄漏测试结果》（2013年）（日文），
http://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/20130530_03.html。
- [18] 东京电力公司，《东电公司福岛第一核电站事故情况下操作手册》（2011年）（日文），http://www.nsr.go.jp/archive/nisa/earthquake/manual/manual_index.html。
- [19] 《原子力灾害对策特别措置法》，1999年第156号法令，经2006年第118号法令最后一次修订（日本），
<http://www.cas.go.jp/jp/seisaku/hourei/data/ASMCNEP.pdf>。
- [20] 东京电力公司，“4号机组一层地平面和横截面建筑图”，《官方资讯》（2014年）。
- [21] 《原子力灾害对策特别措置法施行令》，2000年4月5日第195号（日本）（日文），<http://law.e-gov.go.jp/htmldata/H12/H12SE195.html>。
- [22] 日本原子力安全委员会，《事故管理：轻水核动力堆设施严重事故的防范措施》（1992年）（日文），
http://www.mext.go.jp/b_menu/hakusho/nc/t19920528001/t19920528001.html。
- [23] 日本原子力安全委员会，《轻水核动力堆装置严重事故管理》，NSCRG: L-AM-II.01号，日本原子力安全委员会，东京（1997年）。
- [24] 东京电力公司，《福岛第一核电站事故后的恢复路线图》（2011年），
http://www.meti.go.jp/english/speeches/pdf/20110417_a.pdf。
- [25] 国际原子能机构，世界气象组织，《核装置厂址评价中的气象和水文危害》，原子能机构《安全标准丛书》第SSG-18号，原子能机构，维也纳（2011年）。
- [26] 国际原子能机构，《核装置的厂址评价》，原子能机构《安全标准丛书》第NS-R-3号，原子能机构，维也纳（2003年）。
- [27] 国际原子能机构，《核动力厂安全：设计》，原子能机构《安全标准丛书》NS-R-1号，原子能机构，维也纳（2000年）。（本出版物已由SSR-2/1号（2012年）所取代）。
- [28] 国际原子能机构，《与核电厂选址有关的地震及相关专题》，《安全丛书》第50-SG-S1号，原子能机构，维也纳（1979年）。（本出版物已由SSG-9号（2010年）所取代）。
- [29] 《核动力堆建设变更许可证申请书》，提交政府的核工业报告第5-11号（1993年）。
- [30] SAKAI, T., 东京电力公司，《以往海啸评价和2011年3月11日海啸》，提交第二工作组第五次会议的论文，维也纳，2014年。

- [31] 日本土木工程学会，《日本核电厂海啸评价方法》（2002 年）（日文），
<http://committees.jsce.or.jp/ceofnp/node/5>。
- [32] 原子力安全委员会，《核电厂设施地震设计审查监管指南》，原子力安全委员会，东京（2006 年）。
- [33] 地震调查研究推进本部，《三陆海岸和房总半岛之间日本东部地震活动的长期评价》（2002 年）（日文），
http://www.jishin.go.jp/main/chousa/kaikou_pdf/sanriku_boso.pdf。
- [34] 国际原子能机构，关于日本东部大地震和海啸后福岛第一核电站事故的国际原子能机构国际实情调查专家工作团（2011 年），
http://www-pub.iaea.org/MTCD/meetings/PDFplus/2011/cn200/documentation/cn200_Final-Fukushima-Mission_Report.pdf。
- [35] 印度政府，《福岛核事故后对印度核电厂采取的行动》，《核安全公约》国家报告（2012 年），
<http://www.aerb.gov.in/AERBPortal/pages/English/t/documents/CNS2012.pdf>。
- [36] 国际原子能机构，《核电厂设计和评定中的极端外部事件》，原子能机构《技术文件》第 1341 号，原子能机构，维也纳（2003 年）。
- [37] 国际原子能机构，《国际运行经验报告系统》（2014 年）（未出版）。
- [38] 国际原子能机构，《与柏崎-刈羽核电站 2007 年 7 月 16 日地震调查结果和从中汲取的教训有关的国际原子能机构后续工作组访问》，原子能机构，维也纳（2009 年）。
- [39] 国际核安全咨询组，《核安全纵深防御》，第 INSAG-10 号，原子能机构，维也纳（1996 年）。
- [40] 国际核安全咨询组，《核电厂基本安全原则》（第 75-INSAG-3 Rev.1 号），《国际核安全咨询组丛书》第 12 号，原子能机构，维也纳（1999 年）。
- [41] 国际原子能机构，《核电厂严重事故管理计划》，原子能机构《安全标准丛书》第 NS-G-2.15 号，原子能机构，维也纳（2009 年）。
- [42] 国际原子能机构，《国际原子能机构关于福岛第一核电站事故背景下反应堆和乏燃料安全的报告》，原子能机构，维也纳（2012 年）。
- [43] 国际原子能机构，“核装置安全专题：纵深防御 — 核装置安全的进步和挑战”国际会议，
（见 http://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TE-1749_CD_web.pdf）。
- [44] 圣地亚国家实验室，《福岛第一核电站事故研究》（截至 2012 年 4 月的状况），SAND2012-6173 号，圣地亚国家实验室，阿尔伯克基，新墨西哥州（2012 年）。

- [45] 电力研究所，《福岛技术评价第一阶段 — 按照第 5 版模拟事故分析计划所做的分析》，电力研究所，帕洛阿尔托（2013 年）。
- [46] 东京电力公司，《福岛核事故未确定事项/未明事项的调查报告 — 进展报告第 2 号》（2014 年），http://www.tepco.co.jp/en/press/corp-com/release/betu14_e/images/140806e0101.pdf。
- [47] 国际原子能机构，《制订和实施核电厂一级概率安全评价方法》，原子能机构《安全标准丛书》第 SSG-3 号，原子能机构，维也纳（2010 年）。
- [48] 国际原子能机构，《国际原子能机构安全术语》（核安全和辐射防护系列）（2007 年版），原子能机构，维也纳（2007 年）。
- [49] 国际原子能机构，《制订和实施核电厂二级概率安全评价方法》，原子能机构《安全标准丛书》第 SSG-4 号，原子能机构，维也纳（2010 年）。
- [50] 国际原子能机构，《核动力厂安全：运行》，原子能机构《安全标准丛书》第 NS-R-2 号，原子能机构，维也纳（2000 年）。（本出版物已由 SSR-2/2 号（2011 年）所取代）。
- [51] 国际原子能机构，《赴日综合监管评审服务》，IAEA-NSNI-IRRS-2007/01 号，原子能机构，维也纳（2007 年）。
- [52] 国际原子能机构，《核电厂的定期安全评审》，原子能机构《安全标准丛书》第 NS-G-2.10 号，原子能机构，维也纳（2003 年）。（本出版物已由 SSG-25 号（2013 年）所取代）。
- [53] 国际原子能机构，《从 1999 年日本核燃料转化公司核临界事故中汲取的教训》（2009 年），<http://www-ns.iaea.org/downloads/iec/tokaimura-report.pdf>。
- [54] SHIROYAMA, H., 《日本核安全监管的失败 — 福岛事故的案例》，提交“地球系统治理：复杂架构，多重代理”东京会议的论文，东京（2013 年），http://tokyo2013.earthsystemgovernance.org/wp-content/uploads/2013/01/0202-SHIROYAMA_Hideaki-.pdf。
- [55] 日本政府，《核安全公约》第五次审议会日本国家报告，（2010 年），<http://www.nsr.go.jp/archive/nsc/NSCenglish/documents/conventions/2011.pdf>。
- [56] KATO, S., 《核燃料循环活动安全监管的最新发展》，《2011 年维也纳核安全专题国际会议文集》，原子能机构，维也纳（2002 年）。
- [57] 国际原子能机构，《促进安全的政府、法律和监管框架》，原子能机构《安全标准丛书》第 GSR Part 1 号，原子能机构，维也纳（2010 年）。
- [58] 国际原子能机构，《核电厂定期安全评审：成员国的经验》，原子能机构《技术文件》第 1643 号，原子能机构，维也纳（2010 年）。
- [59] 原子力规制委员会，《2012 财年年度报告》，原子力规制委员会，东京（2012 年）。

- [60] 原子力规制委员会，《商用核动力堆新监管要求的强制执行》（2013 年），<http://www.nsr.go.jp/data/000067212.pdf>。
- [61] 国际核安全咨询组，《安全文化》，《安全丛书》第 75-INSAG-4 号，原子能机构，维也纳（1991 年）。
- [62] 国际原子能机构，《核装置管理系统》，原子能机构《安全标准丛书》第 GS-G-3.5 号，原子能机构，维也纳（2009 年）。
- [63] 国际原子能机构，《发展核活动安全文化：有助于取得进展的实际建议》，《安全报告丛书》第 11 号，原子能机构，维也纳（1998 年）。
- [64] 国际原子能机构，《核装置安全文化》，原子能机构《技术文件》第 1329 号，原子能机构，维也纳（2002 年）。
- [65] 核电运行研究所，《从福岛第一核电站核事故中汲取的教训》，INPO 11-005 号增编，核电运行研究所，亚特兰大（2012 年）。
- [66] 美国核管理委员会，《福岛事故发生时有效的美日两国监管要求之比较》，美国核管会，华盛顿哥伦比亚特区（2013 年）。
- [67] 国际原子能机构，《国际原子能机构关于福岛第一核电站事故背景下核安全方面的人为因素和组织因素的报告》，原子能机构，维也纳（2014 年）。
- [68] 联合国粮食及农业组织、国际原子能机构、国际劳工组织、泛美卫生组织、联合国人道主义事务协调厅、世界卫生组织，《核或辐射应急准备的安排》，原子能机构《安全标准丛书》第 GS-G-2.1 号，原子能机构，维也纳（2007 年）。
- [69] 联合国粮食及农业组织、国际原子能机构、国际劳工组织、经济合作与发展组织核能机构、泛美卫生组织、联合国人道主义事务协调厅、世界卫生组织，《核或辐射应急准备与响应》，原子能机构《安全标准丛书》第 GS-R-2 号，原子能机构，维也纳（2002 年）。
- [70] 《灾害对策基本法》，1961 年 11 月 15 日第 223 号法令，经 1997 年最后一次修订（日本），<http://www.adrc.asia/documents/law/DisasterCountermeasuresBasicAct.pdf>。
- [71] 《原子力灾害对策特别措置法施行令》，2000 年 4 月 5 日第 2 号（日本）（日文），<http://law.e-gov.go.jp/haishi/H12F03103016002.html>。
- [72] 原子力规制委员会，“就技术卷 3 第 3.1 节收到的意见”，《官方资讯》（2014 年 7 月 23 日）。
- [73] 日本政府，《核应急响应手册》，日本政府（2010 年）（日文）。
- [74] 福岛县，《福岛县灾害管理计划》，（2009 年）（日文）。
- [75] 东京电力公司，《核营运者针对福岛第一核电站的应急行动计划》，东电公司，东京（2010 年）。
- [76] 东京电力公司，“特别事件报告”，第 0042 号传真（2011 年 3 月 11 日）。

- [77] 东京电力公司，“东电公司核电站管理层提交经济、贸易和产业省的报告”，第 1560 号传真（2011 年 3 月 11 日）。
- [78] 日本政府，中央防灾会议，《基本灾害管理计划》，日本政府，东京（2008 年）。
- [79] 日本政府，日本首相及其内阁官方网站（2015 年），
<http://japan.kantei.go.jp/index.html>。
- [80] 原子力规制委员会，“原子力安全和保安院介绍”（2015 年），
<http://www.nsr.go.jp/archive/nisa/english/aboutnisa/contact.html>。
- [81] 东京电力公司，《东电公司一览》（2015 年），
<http://www.tepco.co.jp/en/corpinfo/overview/p-glance-e.html>。
- [82] 原子力规制委员会，“原子力安全委员会介绍”（2015 年），
<http://www.nsr.go.jp/archive/nsc/NSCenglish/aboutus/overview/overview.htm>。
- [83] 原子力规制委员会，“日本原子力安全组织介绍”（2015 年），
<http://www.nsr.go.jp/archive/jnes/english/index.html>。
- [84] 日本文部科学省，文部科学省主页（2015 年），<http://www.mext.go.jp/english/>。
- [85] 日本厚生、劳动和福利省，厚生、劳动和福利省主页（2015 年），
<http://www.mhlw.go.jp/english/>。
- [86] 日本农林水产省，农林水产省主页（2015 年），<http://www.maff.go.jp/e/>。
- [87] 日本环境省，环境省主页（2015 年），<http://www.env.go.jp/en/>。
- [88] 日本防卫省，日本防卫省主页（2015 年），<http://www.mod.go.jp/e/index.html>。
- [89] 日本气象厅，日本气象厅主页（2015 年），
<http://www.jma.go.jp/jma/indexe.html>。
- [90] 日本原子力开发机构，日本原子力开发机构主页（2015 年），
<http://www.jaea.go.jp/english/index.html>。
- [91] 日本放射线医学综合研究所，日本放射线医学综合研究所主页（2015 年），
<http://www.nirs.go.jp/ENG/index.shtml>。
- [92] 日本原子力安全基盘机构，《地方核应急对策本部的初步行动》（2013 年），
<https://www.nsr.go.jp/archive/jnes/content/000124530.pdf>。
- [93] 日本原子力安全组织，《核设施应急准备监管指引》，日本原子力安全组织，东京（1980 年）。
- [94] 《电离放射线障害防止规则》，1972 年 9 月 30 劳动省令第 41 号，经 2001 年 7 月 16 日第 172 号令最后一次修订（日本）（日文），
<http://law.e-gov.go.jp/htmldata/S47/S47F04101000041.html>。

- [95] 日本厚生、劳动和福利省，《执行关于在应对 2011 年东北地区太平洋近海地震所致情况中豁免〈电离放射线障害防止规则〉的省令》（2011 年），
http://www.mhlw.go.jp/english/topics/2011eq/workers/tepcor/ri_0315_07.html。
- [96] 日本厚生、劳动和福利省，《就“关于取消在应对 2011 年东北地区太平洋近海地震所致情况中对〈电离放射线障害防止规则〉的豁免的省令草案纲要”与劳动政策审议会的磋商和劳动政策审议会的建议》（2011 年）。
http://www.mhlw.go.jp/english/topics/2011eq/workers/tepcor/pr_111121.html。
- [97] 日本厚生、劳动和福利省，《日本厚生劳动省就涉及东电公司福岛第一核电站事故的工作人员的辐射防护所作的响应和所采取的行动》，厚生劳动省，东京（2013 年）。
- [98] 核应急对策本部，《“对受核事件影响居民的即时援助行动路线图”进展状况》（2011 年），
http://www.meti.go.jp/english/earthquake/nuclear/roadmap/pdf/110719_assistance_03.pdf。
- [99] 核应急对策本部，《“对受核事件影响居民的即时援助行动路线图”进展状况》（2011 年），
http://www.meti.go.jp/english/earthquake/nuclear/roadmap/pdf/110617roadmap_assistance_report.pdf。
- [100] 东京电力公司，《福岛第一核电站工作人员工作环境改善状况》（附文 2：降温背心）（2011 年），
<http://www.tepco.co.jp/en/press/corp-com/release/11061013-e.html>。
- [101] 东京电力公司，《冷却（反应堆）进展状况》（2011 年），
http://www.tepco.co.jp/en/press/corp-com/release/betu11_e/images/110517e5.pdf。
- [102] 日本厚生、劳动和福利省，《职业安全和卫生署通知》（2011 年），
http://www.mhlw.go.jp/english/topics/2011eq/workers/dr/dr/ri_0909_01.html。
- [103] 日本厚生、劳动和福利省，《对从事去污工程工作人员的辐射危害预防指南》（2011 年），
http://www.mhlw.go.jp/english/topics/2011eq/workers/dr/dr/pr_120615_a03.pdf。
- [104] 原子力规制委员会，第三工作组问题 4，第一次呈递，《官方资讯》（2013 年）。
- [105] 原子力规制委员会，第三工作组问题 5，第六次呈递，《官方资讯》（2014 年）。
- [106] WATANABE, Y., “日本红十字会在福岛第一核电站事故后开展的赈灾活动以及未来面临的挑战”，《国际原子能机构关于福岛第一核电站事故背景下严重事故管理问题的报告》，原子能机构，维也纳（2015 年）。

- [107] TOMINAGA, T., HACHIYA, M., AKASHI, M., 《从辐射应急医学与复合灾害的角度看待从应对东电公司福岛第一核电站事故中汲取的教训》，《辐射应急医学》第1卷第1—2期（2012年）第56页至第61页。
- [108] TANIGAWA, K., HASEGAWA, A., “医学观点”，《辐射灾害医学》（TANIGAWA, K., CHHEM, R. K.编著），施普林格，海德堡（2014年）。
- [109] 原子力规制委员会，第三工作组问题7，第一次呈递，《官方资讯》（2013年）。
- [110] 日本厚生、劳动和福利省，《辐射污染食品处理》（2011年），
<http://www.mhlw.go.jp/english/topics/foodsafety/dl/food-110317.pdf>。
- [111] 日本厚生、劳动和福利省，《发布指令限制福岛核电站事故相关食品的分销》（2011年），<http://www.mhlw.go.jp/english/topics/2011eq/dl/food-110321.pdf>。
- [112] 日本厚生、劳动和福利省，《在福岛县和茨城县限制分销和（或）消费相关食品》（2011年），
<http://www.mhlw.go.jp/stf/houdou/2r98520000015wun-att/2r98520000015xym.pdf>。
- [113] 日本厚生、劳动和福利省，《农畜产品放射性污染物监测》（2011年），
<http://www.mhlw.go.jp/english/topics/2011eq/dl/food-110323.pdf>。
- [114] 日本厚生、劳动和福利省，《水产品中放射性碘暂定监管值的处理》（2011年），<http://www.mhlw.go.jp/english/topics/2011eq/dl/food-110405.pdf>。
- [115] 日本厚生、劳动和福利省，《食品中放射性核素的新标准限值》（2012年），
http://www.mhlw.go.jp/english/topics/2011eq/dl/new_standard.pdf。
- [116] 日本放射线医学综合研究所，《辐射照射电话咨询情况 — 东电公司福岛第一核电站核灾难发生后第二年以来的列表显示结果报告》（2014年），
http://www.nirs.go.jp/publication/irregular/pdf/nirs_m_265en.pdf。
- [117] 日本经济、贸易和产业省，《公共交流活动中的问题和未来与东电公司福岛第一核电站事故有关的工作》，原子力安全和保安院，东京（2012年）（日文）。
- [118] 核应急对策本部，《“对受核事件影响居民的即时援助行动路线图”进展状况》（2011年），
http://www.meti.go.jp/english/earthquake/nuclear/roadmap/pdf/110817_assistance_02.pdf。
- [119] 核应急对策本部，《“对受核事件影响居民的即时援助行动路线图”进展状况》（2011年），
http://www.meti.go.jp/english/earthquake/nuclear/roadmap/pdf/110920_assistance_02.pdf。
- [120] 日本贸易振兴机构，“日本东部大地震对国际商务的影响”（2014年）（日文），
www.jetro.go.jp/world/shinsai/20110318_11.html。

- [121] 日本政府，《日本提交〈乏燃料管理安全和放射性废物管理安全联合公约〉的国家报告》（2011年），
http://www.nsr.go.jp/english/cooperation/conventions/data/jc_4th.pdf。
- [122] 日本原子力安全委员会，《确保福岛第一核电站场址周边受污染废物处理和处置安全的短期政策》，原子力安全委员会，东京（2011年）。
- [123] 核应急对策本部，《去污工作应急响应的基本政策》（2011年），
http://www.kantei.go.jp/jp/singi/genshiryoku/dai19/19_03_gensai.pdf。
- [124] 日本环境省，《关于处理与2011年3月11日东北地区太平洋近海地震有关的核电站事故放射性物质环境污染的特别措置法》，第110号法令，2011年（日本）。
- [125] 日本原子力学会，《日本原子力学会调查委员会的最终报告》（公告）（2014年），
<http://www.aesj.or.jp/en/announcement/finalreport20141119.pdf>。
- [126] 福岛核事故独立调查委员会，《福岛第一核电站灾难：调查传言与现实》，劳特利奇，伦敦和纽约（2014年）。
- [127] 国际放射防护委员会，《落实委员会促进在应急照射情况下保护民众的建议》，第109号出版物，培格曼出版公司，牛津和纽约（2009年）。
- [128] 日本原子力安全委员会，《日本原子力安全委员会关于开展辐射防护以促进终止疏散和开始重建的基本政策》（2011年），
http://www.nsr.go.jp/archive/nsc/NSCenglish/geje/20110719suggest_4.pdf。
- [129] 国际放射防护委员会，《国际放射防护委员会2007年建议书》，第103号出版物，爱思维尔出版公司，牛津（2007年）。
- [130] 日本经济、贸易和产业省，《对核受害者的即时援助行动路线图》（2011年），
http://www.meti.go.jp/english/earthquake/nuclear/roadmap/pdf/110517roadmap_assistance.pdf。
- [131] 日本文部科学省，《在限制区和计划疏散区进行详细监测的计划》（2011年），
http://www.mext.go.jp/component/english/_icsFiles/afieldfile/2011/06/29/1304084_0613.pdf。
- [132] 日本经济、贸易和产业省，《解除应急指定的疏散准备区》（2011年），
<http://www.reconstruction.go.jp/topics/41genshiryoku.pdf>。
- [133] 日本核应急准备委员会，《核应急响应手册》（2012年）（日文），
http://www.kantei.go.jp/jp/singi/genshiryoku_bousai/pdf/taisaku_manual.pdf。
- [134] 原子力规制委员会，《向〈核安全公约〉第六次审议会提交的国家报告》（2013年），
http://www.nsr.go.jp/english/cooperation/conventions/data/cns_6th.pdf。
- [135] 日本原子力安全委员会，《〈核设施应急准备监管指南〉中期审查报告》（2012年）（日文），
http://www.nsr.go.jp/archive/nsc/NSCenglish/geje/20120322review_3.pdf。

- [136] 原子力规制委员会,《核应急响应准则》(2012年)(日文),
http://www.nsr.go.jp/activity/bousai/data/130905_saitaishishin.pdf。
- [137] 联合国粮食及农业组织、国际原子能机构、国际劳工组织、经合组织核能机构、泛美卫生组织、世界卫生组织,《国际电离辐射防护和辐射源安全基本安全标准》,《安全丛书》第115号,原子能机构,维也纳(1996年)。(本出版物已由GSR Part 3号(2014年)所取代)。
- [138] 《及早通报核事故公约》,INFCIRC/335号文件,原子能机构,维也纳(1986年)。
- [139] 《核事故或辐射紧急情况援助公约》,INFCIRC/336号文件,原子能机构,维也纳(1986年)。
- [140] 国际原子能机构,“国际组织辐射应急联合管理计划”,EPR-JPLAN,原子能机构,维也纳(2010年)。
- [141] 国际原子能机构,《紧急通报和援助技术工作手册》,EPR-ENATOM (2007年),原子能机构,维也纳(2007年)。
- [142] 国际原子能机构,“国际原子能机构响应和援助网”(2010年),
<http://www-ns.iaea.org/downloads/iec/info-brochures/13-27031-ranet.pdf>。
- [143] “国际原子能机构应对福岛事故所开展的活动”,GOV/INF/2011/8号文件,原子能机构,维也纳(2011年)。
- [144] 国际原子能机构,“原子能机构核安全行动计划”(2011年),
<http://www.iaea.org/sites/default/files/actionplanns.pdf>。
- [145] 经合组织核能机构,《福岛核电站事故期间政府决定和建议的信息交换模式》,NEA/CRPPH(2012)3号文件,经合组织核能机构,巴黎(2012年)。
- [146] 世界卫生组织,《2011年日本东部大地震和海啸后核事故初步剂量估算》,世卫组织,日内瓦(2012年)。
- [147] 世界卫生组织,《2011年日本东部大地震和海啸后核事故基于初步剂量估算的健康风险评价》,世卫组织,日内瓦(2013年)。
- [148] 联合国,《电离辐射来源、效应和危险(提交联大的报告)》,联合国原子辐射效应科学委员会2013年的报告,第一卷,科学附件A:2011年日本东部大地震和海啸后核事故引起的辐射照射水平和影响》,联合国原子辐射效应科学委员会(辐射科委会),联合国,纽约(2014年)。
- [149] 国际放射防护委员会,《国际放射防护委关于从日本核电站事故中汲取的初步教训以及国际放射防护委放射防护系统的第84号特别工作组的报告》,国际放射防护委,渥太华(2012年)。
- [150] GONZÁLEZ, A.J.、AKASHI, M.、BOICE, J.D.、JR.、CHINO, M.、HOMMA, T.、ISHIGURE, N.、KAI, M.、KUSUMI, S.、LEE, J.-K.、MENZEL, H.-G.、NIWA, O.、SAKAI, K.、WEISS, W.、YAMASHITA, S.、YONEKURA, Y.,《福

- 岛核反应堆事故期间和之后产生的放射防护问题》，《辐射防护期刊》第 33 卷第 3 期（2013 年）第 497 页至第 571 页。
- [151] 联合国、粮农组织/原子能机构粮食数据库、联合国原子辐射效应科学委员会 2013 年报告附件 A 附文 C-8:《2011 年日本东部大地震和海啸后核事故引起的辐射照射水平和影响》，原子辐射效应科学委员会，联合国，纽约（2014 年）。
- [152] 世界气象组织，《福岛第一核电站事故放射性核素弥散和沉积作用的气象分析评价》，气象组织，日内瓦（2013 年）。
- [153] 经合组织核能机构，《福岛第一核电站事故：经合组织核能机构的响应和汲取的教训》，经合组织，巴黎（2013 年）。
- [154] 世界卫生组织，《饮水质量指导方针》第三版，世卫组织，日内瓦（2008 年）。
- [155] 1995 年《食品和饲料中污染物和毒素的通用标准》，经 2013 年最后一次修订，营养法典委员会，
http://www.fao.org/fileadmin/user_upload/agns/pdf/CXS_193e.pdf。
- [156] 日本保健物理学会，《与福岛第一核电站灾难后的辐射防护有关的问题：日本保健物理学会的响应和建议》（2012 年）。
- [157] YASUMURA, S.,《福岛健康管理调查综述》，提交第三次国际专家专题讨论会“辐射与健康风险之后：展现韧性和迈向复苏”的论文，福岛（2014 年），
[http://www.fmu.ac.jp/radiationhealth/symposium201409/media/5_S2_Yasumura_FINAL\(0909\).pdf](http://www.fmu.ac.jp/radiationhealth/symposium201409/media/5_S2_Yasumura_FINAL(0909).pdf)。
- [158] 福岛县，“福岛健康管理调查监督委员会第三次会议议程”（2011 年）（日文），
<http://www.pref.fukushima.lg.jp/uploaded/attachment/6497.pdf>。
- [159] SASAKAWA, Y.,《2011 年 9 月福岛国际专家专题讨论会》，《辐射防护期刊》第 32 卷第 1 期（2012 年），E7-E8。
- [160] 《“福岛：辐射与健康风险”国际专家专题讨论会的结论和建议》，《辐射防护期刊》第 31 卷第 4 期（2011 年），第 381 页至第 384 页。
- [161] 福岛县，《福岛健康管理调查委员会工作范围》（2011 年）（日文），
<http://www.pref.fukushima.lg.jp/uploaded/attachment/65128.pdf>。
- [162] 福岛县立医科大学，《基本调查（辐射剂量估计）》，福岛健康管理调查监督委员会第 19 次会议，福岛县，日本（2015 年），
http://www.fmu.ac.jp/radiationhealth/results/media/19-1_Basic_Survey.pdf。
- [163] 国际辐射单位与测量委员会，《辐射的量和单位》，国际辐射单位与测量委员会第 33 号报告，贝斯达出版公司，马里兰州（1980 年）。
- [164] 国际劳工组织，《保护工作人员免受电离辐射公约》，第 115 号，劳工组织，日内瓦（1960 年）。

- [165] 联合国,《电离辐射来源和效应》(提交联合国大会的报告),联合国原子辐射效应科学委员会 2008 年报告第 1 卷附件 A 和附件 B,原子辐射效应科学委员会,联合国,纽约(2010 年)。
- [166] 国家辐射防护测量委员会,《辐射防护中采用的致命癌症风险评估的不确定性》,国家辐射防护测量委员会第 126 号报告,国家辐射防护测量委员会,贝斯达出版公司,马里兰州(1997 年)。
- [167] 联合国,联合国原子辐射效应科学委员会的报告,A/67/46 号,联合国,纽约(2012 年)。
- [168] 联合国,《电离辐射来源和效应》(提交联合国大会的报告),联合国原子辐射效应科学委员会 1977 年报告,原子辐射效应科学委员会,联合国,纽约(1977 年)。
- [169] 国际原子能机构,《国际切尔诺贝利项目:技术报告》,原子能机构,维也纳(1991 年)。
- [170] ESLINGER, P.W.等,《利用测量空气浓度和大气传输模型对福岛第一核反应堆释放的放射性氙进行源项估计》,《环境放射学期刊》第 127 卷(2014 年),第 127 页至第 132 页。
- [171] STOHL, A.等,《氙-133 和铯-137 从福岛第一核电站向大气的释放:源项、大气弥散和沉积的测定》,《大气化学和物理学》第 12 卷第 5 期(2012 年),第 2313 页至第 2343 页。
- [172] BOWYER, T.W.等,《福岛核事故后遥测的放射性氙浓度上升》,《环境放射学期刊》第 102 卷第 7 期(2011 年),第 681 页至第 687 页。
- [173] SCHÖPPNER, M.等,《利用大气传输模型对福岛核电站事故随时间变化的放射性源项进行评估》,《环境放射学期刊》第 114 卷(2012 年),第 10 页至第 14 页。
- [174] TERADA, H.、KATATA, G.、CHINO, M.、NAGAI, H.,《福岛第一核电站事故期间的放射性核素大气排放和弥散。第二部分:源项核实和区域规模大气弥散分析》,《环境放射学期刊》第 112 卷(2012 年),第 141 页至第 154 页。
- [175] 日本学术会议,《因东京电力公司福岛第一核电站事故而被释放到环境中的放射性物质的传输和沉积模式比较评述》(2014 年),
http://www.jpgu.org/scj/report/20140902scj_report_e.pdf。
- [176] CHINO, M.等,《福岛第一核电站事故性排放到大气中的碘-131 和铯-137 释放量的初步估计》,《核科学技术期刊》第 48 卷第 7 期(2011 年),第 1129 页至第 1134 页。
- [177] BUESSELER, K.、AOYAMA, M.、FUKASAWA, M.等,《福岛核电站对海洋放射性的影响》,《环境科学技术期刊》第 45 卷第 23 期(2011 年),第 9931 页至第 9935 页。

- [178] 欧洲委员会、国际原子能机构、世界卫生组织，《切尔诺贝利后十年：事故后果总结》，原子能机构，维也纳（1996年）。
- [179] 《切尔诺贝利：回顾过去，展望未来》，（《2005年维也纳国际会议文集》），原子能机构，维也纳（2005年）。
- [180] 辐射防护和核安全研究所，《福岛第一核电站事故：建立放射性物质向全球大气释放的弥散模型》（2011年），
http://www.irsn.fr/FR/popup/Pages/irsn-meteo-france_30mars.aspx。
- [181] 《探索福岛第一核电站对海洋的影响》（《2012年东京福岛海洋影响专题讨论会文集》，伍兹霍尔海洋研究所，伍兹霍尔，马里兰州（2012年））。
- [182] MADIGAN, D.J.、BAUMANN, Z.、FISHER, N.S.，《太平洋蓝鳍金枪鱼将福岛来源的放射性核素从日本输运到加利福尼亚州》，《美国国家科学院院刊》第109卷第24期（2012年），第9483页至第9486页。
- [183] MASUMOTO, Y.，“海洋模式：福岛污染行播得有多远/多快？”，《探索福岛第一核电站对海洋的影响》（《2012年东京福岛海洋影响专题讨论会文集》，伍兹霍尔海洋研究所，伍兹霍尔，马里兰州（2012年））。
- [184] MASUMOTO, Y.等，《福岛第一核电站释放的铯-137的海洋弥散模拟》，《元素》第8卷第3期（2012年），第207页至第212页。
- [185] HONDA, M.C.、AONO, T.、AOYAMA, M.，《福岛事故后一个月人工铯-134和铯-137在西北太平洋的弥散》，《地球化学期刊》第46卷第6期（2012年），e1-9页。
- [186] RYPINA, I.I.等，《日本沿海福岛来源放射性核素的短期弥散：建模工作和模型数据的相互比较》，《生物地球科学》第10卷第1期（2013年），第4973页至第4990页。
- [187] AOYAMA, M.、HIROSE, K.、IGARASHI, Y.，《重建和更新我们对全球武器试验铯-137放射性沉降物的理解》，《环境监测期刊》第8卷第4期（2006年），第431页至第438页。
- [188] BUESSELER, K.、AOYAMA, M.，“福岛结果”，《探索福岛第一核电站对海洋的影响》（《2012年东京福岛海洋影响专题讨论会文集》），伍兹霍尔海洋研究所，伍兹霍尔，马里兰州（2012年）。
- [189] 原子力规制委员会，《辐射监测信息》，环境放射性水平监测信息，原子力规制委员会（2015年）（日文），<http://radioactivity.nsr.go.jp/ja/list/191/list-1.html>。
- [190] 联合国，《电离辐射来源和效应》（提交联合国大会的报告），联合国原子辐射效应科学委员会第2000号报告，原子辐射效应科学委员会，联合国，纽约（2000年）。
- [191] 原子力规制委员会，《2011-2015年按县分列的沉降物放射性水平》（2011-2015年），<http://radioactivity.nsr.go.jp/en/list/194/list-1.html>。

- [192] 原子力规制委员会,《航空监测》,
<http://radioactivity.nsr.go.jp/en/list/278/list-1.html>。
- [193] 日本厚生、劳动和福利省,《食品安全部第 0315 号通知》第 1 条(2012 年),
http://www.mhlw.go.jp/english/topics/2011eq/dl/food-120821_1.pdf。
- [194] 国际原子能机构,《工作组报告:利用辐射监测数据绘制供公开发表的地图的 NSRW 9/13 号援助项目》,福岛县,2013 年 12 月 16 日至 19 日(未发表)。
- [195] 日本厚生、劳动和福利省,《自来水中放射性物质的调查结果》,厚生劳动省,东京(2011 年)。
- [196] 国际放射防护委员会,《国际放射防护委员会 1990 年关于放射防护的建议》,第 60 号出版物,培格曼出版公司,牛津和纽约(1991 年)。
- [197] 国际放射防护委员会,《落实委员会关于在核事故或辐射紧急情况后生活在长期污染区居民的防护的建议》,第 111 号出版物,爱思维尔出版公司,牛津(2009 年)。
- [198] 欧洲委员会、联合国粮食及农业组织、国际原子能机构、国际劳工组织、经济合作与发展组织核能机构、泛美卫生组织、联合国环境规划署、世界卫生组织,《国际辐射防护和辐射源安全基本安全标准》,原子能机构《安全标准丛书》第 GSR Part 3 号,原子能机构,维也纳(2014 年)。
- [199] AKASHI, M.、TOMINAGA, T.、HACHIYA, M.、TATSUZAKI, H.,“福岛核电站事故后果的医学管理”,《辐射事故防备的医学基础》(《2013 年橡树岭第五届国际辐射应急援助中心/培训场所文集》),橡树岭,田纳西州(2013 年)。
- [200] YASUMURA, S.、GOTO, A.、YAMAZAKI, S.、REICH, M.R.,《福岛核灾难后重新安置的社会福利机构老人过度死亡率》,《公众健康》第 127 卷第 2 期(2013 年),第 186 页至第 188 页。
- [201] NOMURA, S.等,《福岛核事故后疏散的疗养院居民的死亡风险:回顾性群组研究》,《PLoS One》杂志第 8 卷第 3 期(2013 年),e60192。
- [202] 国际放射防护委员会,《辐射紧急情况下的公众防护干预原则》,第 63 号出版物,培格曼出版公司,牛津和纽约(1993 年)。
- [203] 日本厚生、劳动和福利省,《执行关于在应对 2011 年东北地区太平洋近海地震所致情况中取消豁免〈电离放射线障害防止规则〉的省令》(2011 年),
http://www.mhlw.go.jp/english/topics/2011eq/workers/tepcu/rp/pr_111216.html。
- [204] AKAHANE, K.等,《国立放射学研究所福岛第一核电站事故后福岛居民外部剂量估算系统》,《科学报告》第 3 卷(2013 年),第 1670 页。
- [205] ISHIKAWA, T.,《基本调查:福岛县居民所受外部剂量的估计》,提交第三次国际专家专题讨论会“辐射与健康风险之后:展现韧性和迈向复苏”的论文,福岛,2014 年,
http://www.fmu.ac.jp/radiationhealth/symposium201409/media/6_S2_Ishikawa.pdf。

- [206] NAGATAKI. S.、TAKAMURA. N.、KAMIYA. K.、AKASHI. M.，《福岛核电站周边居民个人辐射剂量的测量》，《辐射研究》第 180 卷第 5 期（2013 年），第 439 页至第 447 页。
- [207] 福岛县立医科大学，“按地区分列的基本调查响应率。截至 2014 年 12 月 31 日数据”（《福岛县第 18 次健康管理调查监督委员会会议文集》，2015 年），https://www.fmu.ac.jp/radiationhealth/results/media/18-1_Basic_Survey_Appendix.pdf。
- [208] 福岛县立医科大学，“基本调查（辐射剂量估计）”（《福岛县第 18 次健康管理调查监督委员会会议文集》，2015 年）（2015 年），http://www.fmu.ac.jp/radiationhealth/results/media/18-1_Basic_Survey.pdf。
- [209] 伊达市，伊达市《恢复和振兴通讯》第 8 号：《外照射年剂量测量分析》（2013 年）（日文），<http://www.city.date.fukushima.jp/uploaded/attachment/10035.pdf>。
- [210] TSUBOKURA, M.等，《受福岛第一核电站灾难影响的儿童中不存在体内放射性铯辐射污染》，《保健物理学》第 108 卷第 1 期（2015 年），第 39 页至第 43 页。
- [211] HAYANO, R.S.等，《福岛县南相马市福岛第一核电站事故后 4 个月全身计数器调查结果》，《辐射防护期刊》第 34 卷第 4 期（2014 年），第 787 页。
- [212] HAYANO, R. S.等，《福岛核电站事故后 7 至 20 个月通过广泛的全身计数器调查测得的福岛县成人和儿童体内放射性铯污染情况》，《日本学士院纪要，卷 B，物理和生物科学》第 89 卷第 4 号（2013 年），第 157 页至第 163 页。
- [213] MATSUDA, N.等，《核电站事故后一个月内通过全身计数器在福岛县测得的内照射剂量的评估》，《辐射研究期刊》第 179 卷第 6 期（2013 年），第 663 页至第 668 页。
- [214] KIM, E.等，福岛第一核电站事故后儿童甲状腺照射筛查，《东电公司福岛第一核电站早期内照射剂量再现》（《第一次国立放射学研究所专题讨论会文集》）（KURIHARA, O.、AKAHANE, K.、FUKUDA, S.、MIYAHARA, N.、YONAI, S. 等编辑），国立放射学研究所，千叶（2012 年），第 59 页至第 66 页。
- [215] 东京电力公司，《更新后的工作人员剂量》，《官方资讯》（2015 年）。
- [216] 东京电力公司，《福岛第一核电站工作人员照射剂量评估》。附文：“甲状腺当量剂量分布”（2015 年），http://www.tepco.co.jp/en/press/corp-com/release/2015/1248073_6844.html。
- [217] 日本厚生、劳动和福利省，《东京电力公司福岛第一核电站应急工作人员待积剂量的再评价结果》（2013 年），http://www.mhlw.go.jp/english/topics/2011eq/workers/tepco/rp/pr_130705_a02.pdf。

- [218] YASUI, S., 《东京电力公司福岛第一核电站应急工作人员所受待积有效剂量的政府再评价》，《职业与环境卫生杂志》第 12 卷第 5 期（2015 年），D60—D70 页。
- [219] 国防威胁降低局，《朋友行动中岸基个人辐射剂量评估》，DTRA-TR-12-001 号，国防威胁降低局，贝尔沃堡，弗吉尼亚州（2012 年）。
- [220] HASHIMOTO, S.等，《作为福岛健康管理调查一个方面的头两年全面健康检查结果》，提交第三次国际专家专题讨论会“辐射与健康风险之后：展现韧性和迈向复苏”的论文，福岛，2014 年，
[http://www.fmu.ac.jp/radiationhealth/symposium201409/media/7_S2_Hashimoto_FINAL\(0909\).pdf](http://www.fmu.ac.jp/radiationhealth/symposium201409/media/7_S2_Hashimoto_FINAL(0909).pdf)。
- [221] 国际放射防护委员会，《关于组织反应的声明及正常组织器官的早期和晚期辐射效应 — 辐射防护中的组织反应阈剂量》，第 118 号出版物，爱思维尔出版公司，牛津（2012 年）。
- [222] 东京电力公司，《福岛第一核电站 3 号机组合作公司工作人员辐射照射情况的调查结果》（2011 年），
<http://www.tepco.co.jp/en/press/corp-com/release/11032503-e.html>。
- [223] 联合国，联合国原子辐射效应科学委员会的报告，A/68/46 号，联合国，纽约（2013 年）。
- [224] 国际放射防护委员会，《辐射相关癌症风险的低剂量外推》，第 99 号出版物，爱思维尔出版公司，牛津（2005 年）。
- [225] 联合国，联合国原子辐射效应科学委员会的报告，A/63/46 号，联合国，纽约（2008 年）。
- [226] SUZUKI, S.等，《福岛核电站事故后福岛甲状腺超声检查的三年结果与未来的范围》，提交第三次国际专家专题讨论会“辐射与健康风险之后：展现韧性和迈向复苏”的论文，福岛（2014 年），
[http://www.fmu.ac.jp/radiationhealth/symposium201409/media/9_S2_Suzuki_FINAL\(0909\).pdf](http://www.fmu.ac.jp/radiationhealth/symposium201409/media/9_S2_Suzuki_FINAL(0909).pdf)。
- [227] HAYASHIDA, N.等，《日本青森、山梨和长崎三县儿童跟踪调查中的甲状腺超声检查结果》，《科学报告》第 5 卷（2015 年）。
- [228] 福岛县，《福岛县第 18 次健康管理调查监督委员会会议文集》（2015 年），
http://www.fmu.ac.jp/radiationhealth/results/20150212_Thyroid_Ultrasound_Examination.html。
- [229] 国际放射防护委员会，《妊娠和医疗辐射》，第 84 号出版物，培格曼出版公司，牛津和纽约（2000 年）。
- [230] 国际放射防护委员会，《胚胎和胎儿由于母亲摄入放射性核素所受的剂量》，第 88 号出版物，培格曼出版公司，牛津和纽约（2001 年）。

- [231] 国际放射防护委员会,《产前辐射后的生物学效应(胚胎和胎儿)》,第90号出版物,培格曼出版公司,牛津和纽约(2003年)。
- [232] NOMURA, Y.,《妊娠和分娩调查(福岛健康管理调查辐射医疗科学中心)》,提交第三次国际专家专题讨论会“辐射与健康风险之后:展现韧性和迈向复苏”的论文,福岛,2014年,
[http://www.fmu.ac.jp/radiationhealth/symposium201409/media/10_S2_Nomura_FINAL\(0909\).pdf](http://www.fmu.ac.jp/radiationhealth/symposium201409/media/10_S2_Nomura_FINAL(0909).pdf)。
- [233] NOMURA, Y.、FUJIMORI, K.,《福岛县孕妇调查和未来问题》,《福岛县医学期刊》第60卷第2期(2014年),第213页。
- [234] YASUMURA, S.等,《福岛健康管理调查研究协议》,《流行病学杂志》第22卷第5期(2012年),第375页至第383页。
- [235] KAWAKAMI, N.,《掩蔽设施中居民的心理健康》,日本疫学会,东京(2014年)。
- [236] YABE, H.等,《日本东部大地震和福岛第一核电站事故后的心理困扰:2011财年和2012财年福岛健康管理调查取得的心理健康与生活方式调查结果》,《福岛县医学期刊》第60卷第1期(2014年),第57页至第67页。
- [237] KAWAKAMI, N.、TSUCHIYA, M.、UMEDA, M.、KOENEN, K.C.、KESSLER, R.C.,《创伤和创伤后应激障碍在日本:世界精神保健调查日本调查的结果》,《精神病学研究杂志》第53卷(2014年),第157页至第165页。
- [238] IWADARE, Y.等,《2011年日本地震和海啸后小学和初中学生的创伤后症状:症状严重程度和恢复状况因年龄和性别而异》,《儿科学杂志》第164卷第4期(2014年),第917页至第921页。
- [239] BROMET, E.J.,《核电厂灾难的情感后果》,《保健物理学》第106卷第2期(2014年),第206页至第210页。
- [240] GOTO, A.等,《日本东北地区核电站灾难前后福岛母亲做产妇的信心:市政健康记录分析》,《社区保健杂志》第7卷第2期(2014年),第106页至第116页。
- [241] BROMET, E. J.等,《DSM-IV 重度抑郁发作跨国流行病学》,《生物医学中心医学杂志》第9卷第1期(2011年),第90页。
- [242] SHIGEMURA, J.、TANIGAWA, T.、SAITO, I.、NOMURA, S.,《福岛核电站工作人员的心理困扰》,《美国医学会杂志》第308卷第7期(2012年),第667页至第669页。
- [243] SHIGEMURA, J.等,《2011年核事故后福岛核电站工作人员灾难中受照、创伤近期困扰和创伤后应激反应之间的关联:福岛 NEWS 项目研究》,《PLoS One》杂志第9卷第2期(2014年)e87516。

- [244] MATSUOKA, Y.等,《关注日本东部大地震后救援人员的辐射照射和心理困扰》,《生物医学中心公共卫生杂志》第12卷(2012年),第249页。
- [245] BROMET, E.J.,《切尔诺贝利灾难的心理健康后果》,《辐射防护期刊》第32卷第1期(2012年),N71-75页。
- [246] BROMET, E.J.、HAVENAAR, J. M.,《切尔诺贝利灾难的心理和自觉健康影响:20年回顾》,《保健物理学》第93卷第5期(2007年),第516页至第521页。
- [247] BROMET, E.J.、HAVENAAR, J. M.、GUEY, L. T.,《切尔诺贝利事故心理影响的25年回顾性分析》,《临床肿瘤学杂志》第23卷第4期(2011年),第297页至第305页。
- [248] MAEDA, M.等,《对福岛民众的心理影响:心理健康和生活方式调查结果》,提交第三次国际专家专题讨论会“辐射与健康风险之后:展现韧性和迈向复苏”的论文,福岛,2014年,
[http://www.fmu.ac.jp/radiationhealth/symposium201409/media/8_S2_Maeda_FINAL\(0909\).pdf](http://www.fmu.ac.jp/radiationhealth/symposium201409/media/8_S2_Maeda_FINAL(0909).pdf)。
- [249] KESSLER, R.C.等,《筛查普通人群的严重心理疾病》,《普通精神病学档案》第60卷第2期(2003年),第184页至第189页。
- [250] BLANCHARD, E.B.、JONES-ALEXANDER, J.、BUCKLEY, T.C.、FORNERIS, C.A.,《创伤后应激障碍清单中的心理测量学特性》,《行为研究和治疗》第34卷第8期(1996年),第669页至第673页。
- [251] EWING, J.A.,《酗酒筛检问卷》,《美国医学会杂志》第252卷第14期(1984年),第1905页至第1907页。
- [252] GOODMAN, R.,《长处和困难问卷的心理测量学特性》,《美国儿童与青少年精神病学杂志》第40卷第11期(2001年),第1337页至第1345页。
- [253] MATSUSHI, T.等,《日文版长处和困难问卷的范围属性:社区样本中婴儿和学龄儿童的研究》,《大脑与发育》第30卷第6期(2008年),第410页至第415页。
- [254] OGURI, K.等,《2011年东北冲地震诱发日本海沟超深渊扰动》,《科学报告》第3卷(2013年)。
- [255] 日本生物多样性中心,关于地震和海啸影响的官方网站(日文),
<http://www.shiokaze.biodic.go.jp>。
- [256] NAKAJIMA, H.、KOARAI, M.,《日本东部大地震海啸灾情评估》,《日本国土地理院公告》第59号(2011年),第55页至第66页。
- [257] 国际放射防护委员会,《电离辐射对非人类物种影响的评估框架》,第91号出版物,培格曼出版公司,牛津和纽约(2003年)。

- [258] 国际放射防护委员会,《不同照射情况下的环境保护》,第 124 号出版物,培格曼出版公司,牛津和纽约(2014 年)。
- [259] 国际放射防护委员会,《环境保护:参考动物和植物传输参数》,第 114 号出版物,爱思维尔出版公司,牛津(2009 年)。
- [260] LINKOV, I、BURMISTROV, D.,《模型的不确定性和建模者所做的选择:从国际原子能机构模型比对中汲取的教训》,《风险分析》第 23 卷第 6 期(2003 年),第 1297 页至第 1308 页。
- [261] 联合国,《电离辐射来源和效应》(提交联合国大会的报告),联合国原子辐射效应科学委员会 2008 年报告,第二卷,科学附件 C、D 和 E,原子辐射效应科学委员会,联合国,纽约(2011 年)。
- [262] 联合国,《电离辐射来源和效应》(提交联合国大会的报告),联合国原子辐射效应科学委员会 1996 年报告,原子辐射效应科学委员会,联合国,纽约(1996 年)。
- [263] 国际原子能机构,《国际辐射防护和辐射源安全基本安全标准 — 暂行版》,原子能机构《安全标准丛书》第 GSR Part 3 号(暂行版),原子能机构,维也纳(2011 年)。(本出版物已由第 GSR Part 3 号(2014 年)所取代)。
- [264] 国际原子能机构,《国际原子能机构福岛第一核电站场外大面积污染区域治理问题工作组初步结论的简要报告》(2011 年),
<https://www.iaea.org/sites/default/files/preliminaryfindings2011.pdf>。
- [265] 国际原子能机构,《国际原子能机构福岛第一核电站场外大面积污染区域治理问题后续国际工作组访问》(2013 年),
https://www.iaea.org/sites/default/files/final_report230114.pdf。
- [266] 日本环境省,《关于处理与 2011 年 3 月 11 日东北地区太平洋近海地震有关的核电站事故放射性物质环境污染的特别措置法》(2011 年),
http://josen.env.go.jp/en/framework/pdf/basic_principles.pdf。
- [267] GOLIKOV, V.等,《通过采用实体人体模型评估被污染土壤上从外照射可测量到风险数量的转换系数》,《辐射与环境生物物理学》第 46 卷第 4 期(2007 年),第 375 页至第 382 页。
- [268] 内阁府,《指定和重新安排疏散区域》,提交国际原子能机构福岛第一核电站场外大面积污染区域治理问题后续国际工作组文件,东京和福岛县,2013 年。
- [269] 福岛县,《福岛的复兴步骤》(2014 年),
<http://www.pref.fukushima.lg.jp.e.od.hp.transer.com/sec/11015b/fukkoukeikaku1081.html>。
- [270] 日本经济、贸易和产业省,“发出疏散令的地区”(2013 年),
http://www.meti.go.jp/english/earthquake/nuclear/roadmap/pdf/20130807_01.pdf。

- [271] 日本原子力开发机构,《利用从福岛第一核电站事故中获得的知识和经验建立场外战略响应的技术基础》(2015年),
<http://jolissrch-inter.tokai-sc.jaea.go.jp/search/servlet/search?5049878>。
- [272] 日本原子力开发机构,《福岛第一核电站事故后受污染区的治理:概述、分析和汲取的教训》,第1部分:关于“去污试点项目”的报告,《日本原子力机构的研究开发成果》第2014-051号,日本原子力研究开发机构,东京(2015年)。
- [273] 日本环境省,《日本场外清理工作的进展》(2015年),
http://josen.env.go.jp/en/pdf/progresseet_progress_on_cleanup_efforts.pdf?150113。
- [274] 日本环境省,《由国家政府直接控制的特别去污区去污的单位价格》,《官方资讯》(2015年)。
- [275] 日本核应急对策本部,《东京电力公司福岛第一核电站1号至4号机组退役中长期路线图》(2011年),
http://www.meti.go.jp/english/earthquake/nuclear/decommissioning/pdf/111221_02.pdf。
- [276] 日本核应急对策本部,《经修订的福岛第一核电站1号至4号机组退役中长期路线图》(2013年),
http://josen.env.go.jp/en/documents/pdf/workshop_july_17-18_2013_02.pdf。
- [277] 受污染水和退役问题省厅间议会,《东京电力公司福岛第一核电站退役中长期路线图》(2015年)。
- [278] 《原子力规制委员会设置法》,2012年6月27日第47号法令,经2013年第82号法令修订(日本),
<https://www.nsr.go.jp/data/000067231.pdf>。
- [279] 东京电力公司,《拟在被指定作为特定反应堆设施的福岛第一核电站采取的措施的实施计划(概要)》(2012年),
http://www.tepco.co.jp/en/nu/fukushima-np/images/handouts_12120701-e.pdf。
- [280] 原子力规制委员会,《东京电力公司福岛第一核电站中期降低风险的措施》(2015年),
<http://www.nsr.go.jp/data/000098679.pdf>。
- [281] 污染水处理对策委员会,《防止地下水流入的措施》,东京电力公司(2012年)。
- [282] 日本政府、东京电力公司,《东电福岛第一核电站1号至4号机组退役中长期路线图的进展状况和未来挑战》(2012年),
<http://www.tepco.co.jp/en/nu/fukushima-np/roadmap/images/m121203-e.pdf>。
- [283] 东京电力公司,“就第5部分收到的意见”,《官方资讯》(2015年3月2日)。
- [284] 东京电力公司,《污染水处理》(2015年),
<http://www.tepco.co.jp/en/decommision/planaction/alps/index-e.html>。
- [285] 东京电力公司,《福岛第一核电站2014年及时提交报告:清洁地下水开始分流入海》(2014年),
http://www.tepco.co.jp/en/press/corp-com/release/2014/1236566_5892.html。

- [286] 东京电力公司,《停止或减少地下水渗入反应堆和涡轮机建筑物的措施》,提交“东京电力公司福岛第一核电站 1 号至 4 号机组退役中长期路线图”国际原子能机构国际同行评审工作组(第二工作组)的文件,东京和福岛县,2013 年。
- [287] 日本经济、贸易和产业省,《情况简报:东京电力公司福岛第一核电站污染水问题概述》,自然资源和能源厅(2013 年),http://www.meti.go.jp/english/earthquake/nuclear/decommissioning/pdf/20130822_01.pdf。
- [288] 国际原子能机构,“东京电力公司福岛第一核电站 1 号至 4 号机组退役中长期路线图”国际原子能机构国际同行评审工作组访问(第二工作组)”(2014 年),<http://www.meti.go.jp/press/2013/02/20140213003/20140213003-2.pdf>。
- [289] 国际原子能机构,“东京电力公司福岛第一核电站 1 号至 4 号机组退役中长期路线图”国际原子能机构国际同行评审工作组(第三工作组)”(2015 年),<https://www.iaea.org/sites/default/files/missionreport170215.pdf>。
- [290] 东京电力公司,《福岛第一核电站 4 号机组乏燃料水池完成燃料移出工作》(2014 年)(日文),http://www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/handouts/2014/images/handouts_141222_04-j.pdf。
- [291] 日本核应急对策本部,《东京电力公司福岛第一核电站 1 号至 4 号机组退役中长期路线图》(2013 年),http://www.meti.go.jp/english/press/2013/pdf/0627_01.pdf。
- [292] 国际原子能机构,《利用放射性物质的设施的退役》,原子能机构《安全标准丛书》第 WS-R-5 号,原子能机构,维也纳(2006 年)。(本出版物已由第 GSR Part 6 号(2014 年)所取代)。
- [293] 国际原子能机构,原子能机构报告《核事故后的退役和治理》,原子能机构,维也纳(2013 年)。
- [294] 经合组织核能机构,《核法律通讯》第 90 卷第 2 期(2012 年)。
- [295] 日本政府,《其他县规定废物和被污染土壤管理流程图》,《官方资讯》(2015 年)。
- [296] 东京电力公司,《福岛第一核电站固体废物贮存中长期计划(草案)》(2014 年)(日文),http://www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/roadmap/images/l140407_05-j.pdf。
- [297] 东京电力公司,《临时贮存干法屏蔽容器的安装》(2014 年)(日文),http://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/pdf/120625/120625_02cc.pdf。
- [298] 东京电力公司,《福岛第一核电站固体废物中长期贮存计划》,《官方资讯》(2014 年)。
- [299] 东京电力公司,《放射性废物管理 — 实现福岛第一核电站 1 号至 4 号机组的退役》,提交“东京电力公司福岛第一核电站 1 号至 4 号机组退役中长期路线图”

- 国际原子能机构国际同行评审工作组（第二工作组）的文件，东京和福岛县，2013年。
- [300] 日本核应急对策本部，《福岛第一核电站1号至4号机组退役中长期路线图的进展状况》（2012年），
<http://www.tepco.co.jp/en/nu/fukushima-np/roadmap/images/m120730-e.pdf>。
- [301] 退役和受污染水处理对策小组秘书处，《退役和受污染水管理概述》（2014年），<http://www.meti.go.jp/english/earthquake/nuclear/decommissioning/pdf/20140529-e.pdf>。
- [302] 国际放射防护委员会，《国际放射防护委员会对话倡议的报告》（2014年），
<http://www.icrp.org/page.asp?id=189>。
- [303] 日本贸易振兴机构，《日本贸易振兴机构2011年全球贸易和投资报告：国际商务作为日本重建的催化剂》，日本贸易振兴机构，东京（2011年）。
- [304] 日本水产厅，《东京电力公司福岛第一核电站被污染水的泄漏和渔业产品的安全性》（2015年）。
- [305] 食品基准局，《原产于或进口自日本的饲料和食品的进口》（2012年），
http://www.food.gov.uk/business-industry/imports/banned_restricted/japan#.UKS7deQ0V8E。
- [306] 日本贸易振兴机构，《日本贸易振兴机构全球贸易和投资报告：综述》（2014年），
http://www.jetro.go.jp/en/reports/white_paper/trade_invest_2014.pdf。
- [307] 1961年《核损害补偿法》，第147号法令，经2009年第19号法令修正。
- [308] 日本文部科学省，原子力损害赔偿纷争审查会，《东京电力公司福岛第一、第二核电站事故引起的原子力损害范围的判定等相关事宜的中间指针》（2011年）（日文），
http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/chousa/kaihatu/016/houkoku/_icsFiles/afieldfile/2011/08/17/1309452_1_2.pdf。
- [309] 东京电力公司，《避难指示解除后早期返还引起的追加费用的赔偿》（2014年）（日文），
http://www.tepco.co.jp/cc/press/2014/1235026_5851.html。
- [310] PERKO, T.、VALUCH, J.、NAGY, A.、LAMMERS, P.、MAYS, C.，《大众媒体和新媒体对电离辐射专题的处理情况概述：福岛案例》，EAGLE协调项目（2013年），
<http://eagle.sckcen.be/en/Deliverables>。
- [311] 福岛县，《福岛的复兴步骤》，福岛县（2013年）。
- [312] 日本环境省，福岛县，“去污信息广场”（2013年）。
- [313] 日本环境省，《利益相关方去污沟通概述》，提交国际原子能机构福岛第一核电站场外大面积污染区域治理问题后续国际工作组文件，东京和福岛县，2013年。

- [314] 国际原子能机构,《国际原子能机构关于核或放射性紧急情况下增强透明度和提高沟通有效性的报告》,原子能机构,维也纳(2012年)。
- [315] 国际原子能机构,“国际原子能机构总干事召集高级别加强核安全会议”(2011年), <https://www.iaea.org/newscenter/news/iaea-director-general-calls-high-level-conference-strengthen-nuclear-safety>。
- [316] 国际原子能机构,《福岛第一核电站场外大面积污染区域治理问题国际工作组的最后报告》(2011年),
http://www.mofa.go.jp/mofaj/saigai/pdfs/iaea_mission_1110_en.pdf。
- [317] 国际原子能机构,“国际原子能机构赴日开展对原子力安全和保安院综合评定现有动力堆设施安全性的方案的评审工作组访问”(2012年),
<https://www.iaea.org/sites/default/files/nisamissionreport2012.pdf>。
- [318] 国际原子能机构,“国际原子能机构在日本东部大地震和海啸后赴日开展对女川核电站的工作组访问以审查结构、系统和部件的性能”(2012年)。
- [319] 国际原子能机构,“东京电力公司福岛第一核电站1号至4号机组退役中长期路线图”国际原子能机构国际同行评审工作组访问(2013年),
<http://www.iaea.org/sites/default/files/missionreport220513.pdf>。
- [320] 《2011年6月20日维也纳国际原子能机构部长级核安全大会宣言》,INFCIRC/821号文件,原子能机构,维也纳(2011年)。
- [321] “加强核安全、辐射安全、运输安全和废物安全国际合作的措施”,GC(57)/RES/9号决议,原子能机构,维也纳(2013年)。
- [322] “实施国际原子能机构‘核安全行动计划’的进展”,GOV/INF/2012/11-GC(56)/INF/5号文件,原子能机构,维也纳(2012年)。
- [323] “实施国际原子能机构‘核安全行动计划’的进展”,GOV/INF/2013/8-GC(57)/INF/5号文件,原子能机构,维也纳(2013年)。
- [324] “实施国际原子能机构‘核安全行动计划’的进展”,GOV/INF/2014/15-GC(58)/INF/7号文件,原子能机构,维也纳(2014年)。
- [325] 国际原子能机构,《国际原子能机构关于福岛第一核电站事故背景下防范极端地震和海啸的报告》,原子能机构,维也纳(2012年)。
- [326] 国际原子能机构,《国际原子能机构关于“福岛第一核电站事故后的辐射防护:促进信任和理解”的报告》,原子能机构,维也纳(2014年)。
- [327] 国际原子能机构,《国际原子能机构关于福岛第一核电站事故背景下核或放射性应急准备和响应的报告》,原子能机构,维也纳(2013年)。
- [328] 国际原子能机构,《国际原子能机构关于福岛第一核电站事故背景下加强核监管有效性的报告》,原子能机构,维也纳(2013年)。

- [329] 《福岛县和国际原子能机构在东京电力公司福岛第一核电站事故后开展合作的备忘录》（2012年），
http://www.mofa.go.jp/policy/energy/fukushima_2012/pdfs/fukushima_iaea_en_04.pdf。
- [330] 《福岛县和国际原子能机构之间关于在辐射监测和治理领域开展合作的实际安排》（2012年），
http://www.mofa.go.jp/policy/energy/fukushima_2012/pdfs/fukushima_iaea_en_05.pdf。
- [331] 《福岛县立医科大学和国际原子能机构之间关于在人体健康领域开展合作的实际安排》（2012年），
http://www.mofa.go.jp/policy/energy/fukushima_2012/pdfs/fukushima_iaea_en_06.pdf。
- [332] 《日本外务省和国际原子能机构之间关于在应急准备和响应域开展合作的实际安排》（2012年），
http://www.mofa.go.jp/policy/energy/fukushima_2012/pdfs/fukushima_iaea_en_07.pdf。
- [333] 国际原子能机构，“国际原子能机构和日本主办福岛核安全部长级大会”（2012年），
<https://www.iaea.org/newscenter/news/iaea-and-japan-host-fukushima-ministerial-conference-nuclear-safety>。
- [334] 《核安全公约》，INFCIRC/449号文件，原子能机构，维也纳（1994年）。
- [335] 欧洲原子能联营、联合国粮食及农业组织、国际原子能机构、国际劳工组织、国际海事组织、经济合作与发展组织核能机构、泛美卫生组织、联合国环境规划署、世界卫生组织，《基本安全原则》，原子能机构《安全标准丛书》第SF-1号，原子能机构，维也纳（2006年）。
- [336] 《〈核安全公约〉议事规则和财务规则》，INFCIRC/573/Rev.6号文件，原子能机构，维也纳（2015年）。
- [337] 《〈核安全公约〉审议过程细则》，INFCIRC/571/Rev.7号文件，原子能机构，维也纳（2015年）。
- [338] 《〈核安全公约〉国家报告细则》，INFCIRC/572/Rev.5号文件，原子能机构，维也纳（2015年）。
- [339] 《〈核安全公约〉缔约方第二次特别会议：最后总结报告》，CNS/ExM/2012/04/Rev.2号文件（2012年），
<http://www.iaea.org/sites/default/files/cns-summaryreport310812.pdf>。
- [340] 《〈核安全公约〉缔约方第六次审议会议：总结报告》，CNS/6RM/2014/11_Final（2014年），
http://www-ns.iaea.org/downloads/ni/safety_convention/2014-cns-summary-report-w-annexes-signed.pdf。
- [341] 《总结报告和〈维也纳核安全宣言〉》CNS/DC/2015/3/Rev.2号文件（2015年），
https://www.iaea.org/sites/default/files/cns_summary090215.pdf。

简称表

| | |
|----------------|--------------------------|
| μGy | 微戈[瑞] |
| μSv | 微希[沃特] |
| AC | 交流电 |
| ALPS | 先进液体处理系统 |
| ANRE | 自然资源和能源厅 |
| Bq | 贝可 |
| BSS | 基本安全标准 |
| CI | 置信区间 |
| ConvEx | 公约演习 |
| CRIEPI | 中央电力工业研究所 |
| CSC | 核损害补充赔偿公约 |
| DC | 直流电 |
| EC | 欧洲委员会（欧委会） |
| EDG | 应急柴油发电机 |
| ENATOM | 紧急通报和援助技术工作手册（紧急通报和援助手册） |
| EPZ | 应急规划区 |
| ERSS | 应急响应支持系统 |
| FAO | 联合国粮食及农业组织（粮农组织） |
| FW | 淡水 |
| GPD | 一般心理困扰 |
| Gy | 戈[瑞] |
| HP | 控制点 |
| HPCI | 高压冷却剂注入 |
| IACRNE | 机构间辐射和核应急委员会 |
| IC | 隔离凝汽器 |
| ICRP | 国际放射防护委员会（国际放射防护委） |
| IEC | 事件和应急中心 |
| IEM | 国际专家会议 |
| IES | 事件和应急系统 |
| IGP | 大地测量和摄影测量研究所 |
| ILO | 国际劳工组织（劳工组织） |
| IMMSP | 数学设备和系统问题研究所 |
| INES | 国际核和放射事件分级表（核事件分级表） |
| INSAG | 国际核安全组（核安全组） |
| INPO | 核动力运行研究所 |

| | |
|-------------|----------------------|
| IRRS | 综合监管评审服务 |
| IRSN | 辐射防护和核安全研究所 |
| JAEA | 日本原子力开发机构 |
| JAMSTEC | 日本海洋-地球科学技术机构 |
| JCNER | 核应急响应联合委员会 |
| JCO | 日本核燃料转化公司 |
| JCOPET | 日本沿海海洋预测性实验用潮解析嵌套子系统 |
| JKEO | 日本海洋-地球科学技术机构黑潮观察分站 |
| JMA | 日本气象厅 |
| JNES | 日本原子力安全组织 |
| JPLAN | 国际组织辐射应急联合管理计划 |
| JST | 日本标准时间 |
| KEO | 黑潮观察分站 |
| KIOST | 韩国海洋科学技术院 |
| KNOT | 协同北太平洋时系列 |
| Kobe U | 神户大学 |
| Local NERHQ | 地方核应急对策本部 |
| MAFF | 农林水产省 |
| METI | 经济、贸易和产业省（通产省） |
| MEXT | 文部科学省（文部省） |
| mGy | 毫戈[瑞] |
| MHLW | 厚生、劳动和福利省（厚生劳动省） |
| MITI | 经济产业省 |
| MO | 电动的 |
| MOD (SDF) | 防卫省（自卫队） |
| MOE | 环境省 |
| MPa | 兆帕 |
| MSSG | 地质环境多尺度模拟器 |
| mSv | 毫希[沃特] |
| NDF | 原子力损害赔偿和退役支援机构 |
| NERHQ | 核应急对策本部 |
| NIES | 国立环境研究所 |
| NIRS | 国家放射线医学综合研究所 |
| NISA | 原子力安全和保安院 |
| NPP | 核电厂 |
| NPP-ERC | 福岛第一核电站厂内应急响应中心 |
| NPS | 核电站 |
| NRA | 原子力规制委员会 |

| | |
|--------------|--------------------------|
| NSC | 日本原子力安全委员会 |
| OECD/NEA | 经合组织核能机构 |
| OP | 小名滨港 |
| PAHO | 泛美卫生组织 |
| PBq | 拍贝可 |
| PCV | 一次安全壳 |
| PSA | 概率论安全评价 |
| PTSR | 创伤后应激反应 |
| RANET | 响应和援助网 |
| RAP | 参考动物和植物 |
| RCIC | 反应堆堆芯隔离冷却 |
| R&D | 研究与发展（研发） |
| REMAT | 辐射应急医疗援助小组 |
| SPEEDI | 环境应急剂量信息预测系统 |
| Sv | 希[沃特] |
| SW | 海水 |
| TEPCO | 东京电力公司（东电公司） |
| TEPCO HQ-ERC | 东电公司本部应急响应中心 |
| UNEP | 联合国环境规划署（联合国环境署） |
| UNSCEAR | 联合国原子辐射效应科学委员会（联合国辐射科学委） |
| USDA | 美国农业部 |
| USGS | 美国地质调查局 |
| UTC | 协调世界时 |
| WHO | 世界卫生组织（世卫组织） |
| WHOI | 伍兹霍尔海洋研究所 |
| WMO | 世界气象组织（气象组织） |

参与起草和审查的人员

国际原子能机构秘书处

项目管理

项目主任
Caruso, G.

分析项目主任
Bevington, L. (高级安全官员)
Boreta, B.
Massegg, V.

图形和数据协调员
Zimmermann, M.

图形设计员
Kasper, M.

执行助理
Gutierrez Flores, S.

团队助理
Fitzpatrick, L.

技术撰稿人和编辑

Boemeke, M.
Delves, D.
Harbison, S.
McDonald, A.
Ramesh, G.V.
Robinson, C.

共同主席会议科学秘书
Webster, P.

外部评审人员

Alonso, A., 西班牙
Gray, R., 英国
Robinson, I., 英国
Simmonds, J., 英国
Webster, P., 加拿大

第一工作组：事故描述和背景

共同主席

Jammal, R.
加拿大核安全委员会
加拿大

Vincze, P.
核能司
原子能机构

科学秘书

Heitsch, M. (截至 2014 年 8 月)
核安全和安保司
原子能机构

成员

Dobrzyński, L.
国家核研究中心
波兰

Dolganov, K.
俄罗斯科学院核安全研究所
俄罗斯联邦

Duspiva, J.
雷兹核研究所
捷克共和国

Grant, I.
联邦核监管局
阿拉伯联合酋长国

Guerpinar, A.
高级顾问
土耳其

Hirano, M.
原子力规制委员会
日本

Khouaja, H.
加拿大核安全委员会
加拿大

Kim, H.T.
韩国水电和核电公司中央研究所
大韩民国

Krijger, H.
南荷兰电力生产公司
荷兰

Lequerica I.
恩德萨电力集团公司
西班牙

Noel, M.
欧洲委员会联合研究中心

Orders, W.
核管理委员会
美国

Urzua, G.
阿雷瓦核电公司
法国

Volkholz, P.
阿雷瓦核电公司
法国

Weidenbrück, K.
联邦环境部自然保护、建设和核安全局
德国

Weiss, S.
全球安全研究组织（设施和反应堆安全组织）
德国

郑明光
上海核工程研究设计院
中国

特邀专家

Dodo, T.
日本原子力安全推进协会
日本

Ihara, T.
东京电力公司
日本

Kanno, M.
原子力規制委员会
日本

Kawano, A. (截至 2013 年 8 月)
东京电力公司
日本

Muftuoglu, K.
通用日立核能公司
美国

Taira, J.
东京电力公司
日本

Yamamoto, M. (自 2013 年 8 月起)
东京电力公司
日本

向第一工作组提供支持的原子能机构秘书处工作人员

Kang, K.-S.
Kilic, N.
Pagannone, B.
Yamada, K.
Yoshimoto, Y.

第二工作组：安全评价

共同主席

Chande, S.
原子能管理局
印度

Hughes, P. (截至 2014 年 8 月)
核安全和安保司
原子能机构

Ulses, A. (自 2014 年 8 月起)
核安全和安保司
原子能机构

科学秘书

Aparkin, F.
核安全和安保司
原子能机构

成员

Alonso, J.R.
核安全委员会
西班牙

Ayub, M.
巴基斯坦核管理局
巴基斯坦

Bucalossi, A.
欧洲委员会联合研究中心

Chaikiat, P.
瑞典辐射安全管理局
瑞典

Dermarkar, F.
坎杜堆业主集团
加拿大

Foucher, L.
法国核安全管理局
法国

Gauntt, R.
圣地亚国家实验室
美国

Giannelli, I.A.
斯洛伐克电力公司
(国家电力局附属机构)
意大利

Godoy, A.R.
詹姆斯·约翰逊联营公司
阿根廷

Gonzalez, V.
国家核安全和核保障委员会
墨西哥

Harrison, S.
核监管办公室
英国

Heppell-Masys, K.
加拿大核安全委员会
加拿大

Hoshi, H.
原子力规制委员会
日本

Kajimoto, M.
原子力规制委员会
日本

Kuivalainen, H.
辐射和核安全管理局
芬兰

Lankin, M.
俄罗斯联邦环境、工业和核监督服务局
俄罗斯联邦

de L'Epinois, B.
阿雷瓦核电公司
法国

Macchi, L.
Dédale 机构
法国

Mildenberger, O.
全球安全研究组织（设施和反应堆安全
组织）
德国

Misak, J.
雷兹核研究所
捷克共和国

Perryman, L.
埃斯科姆公司
南非

Ryser, C.
瑞士联邦核安全检查局
瑞士

Song, J.H.
韩国原子能研究院
大韩民国

Weidenbrück, K.
联邦环境、自然保护建设和核安全部
德国

特邀专家和联络人

Donges, A.
核电运行研究所
美国

Haber, S.
人力绩效分析公司
美国

Harter, R.
沸水堆业主集团
美国

Hatamura, Y.
东京大学
日本

Ihara, T.
东京电力公司
日本

Iino, K.
SYDROSE 公司
日本

Kunito, S.
东京电力公司
日本

Nakagawa, Y.
东京电力公司
日本

Takizawa, S.
日本
东京电力公司

Watford, G.
通用日立核能公司
美国

Yamanaka, Y.
东京电力公司
日本

向第二工作组提供支持的原子能机构秘书处工作人员

Beltran, F.
Earle, K.
Haage, M.
Haber, S.
Roveti, B.
Rycraft, H.
Skarbo, B.
Yllera, J.
Yoshimoto, Y.

第三工作组：应急准备和响应

共同主席

Drábová, D.
国家核安全办公室
捷克共和国

Buglova, E.
核安全和安保司
原子能机构

科学秘书

Shiraga, K.
核安全和安保司
原子能机构

成员

Aaltonen, H.
辐射和核安全管理局
芬兰

Ahier, B.
辐射防护局
加拿大

Bardelay, J.
放射防护和核安全研究所
法国

Blackburn, C.
粮农组织

Byron, D. (已故)
粮农组织

Chen, P. (截至 2014 年 6 月)
世界气象组织

Chugunov, V.
国家原子能公司
俄罗斯联邦

Cortes Carmona, A.
国家核安全和核保障委员会
墨西哥

Dela Rosa, A.
菲律宾核研究所
菲律宾

Harou, A. (自 2014 年 6 月起)
世界气象组织

Hernández, D.
核监管局
阿根廷

Homma, T.
日本原子力开发机构
日本

Hubbard, L.
瑞典辐射安全管理局
瑞典

Kelly, N.
高级顾问
英国

Kenigsberg, J. (已故)
国家辐射防护委员会
白俄罗斯

Maree, M.
埃斯科姆公司
南非

McClelland, V.
能源部
美国

Molina, G.
国家核研究所
墨西哥

Pascal, G.
欧洲委员会联合研究中心

Sigouin, L.
加拿大核安全委员会
加拿大

Soufi, I.
国家科学和核技术能源中心
摩洛哥

Sumargo, D.E.
核能监管局
印度尼西亚

Takahara, S.
日本原子力开发机构
日本

de la Vega, R.
核安全委员会
西班牙

特邀专家和联络人

Taminami, T.
东京电力公司
日本

Tanigawa, K.
广岛大学
日本

Tominaga, T.
放射线医学综合研究所
日本

Wiley, A.
辐射应急援助中心/培训场-世卫组织协作
中心
美国

Yamashita, S.
长崎大学
日本

向第三工作组提供支持的原子能机构秘书处工作人员

Callen, J.
Chaput, J.
Kaiser, P.
Martincic, R.
McKenna, T.
Mutluer, A.
Nestoroska Madjunarova, S.
Vilar Welter, P.
Yoshimoto, Y

第四工作组：放射后果

共同主席

González, A.
核监管局
阿根廷

Chhem, R. (截至 2014 年 8 月)
核科学和应用司
原子能机构

Meghizifene, A. (自 2014 年 9 月起)
核科学和应用司
原子能机构

Pinak, M.
核安全和安保司
原子能机构

科学秘书

Muskens, P. (截至 2013 年 8 月)
核安全和安保司
原子能机构

Bevington, L. (自 2013 年 9 月起)
核安全和安保司
原子能机构

成员

Akashi, M.
放射线医学综合研究所
日本

Betancourt, A.
核能和先进技术机构
古巴

Blumenthal, D.
能源部国家核安保管理局
美国

Bromet, E.J.
纽约州立大学石溪分校
美国

Brown, J.
挪威辐射防护管理局
挪威

Coleman, C.N.
国家癌症研究所
美国

Demidchik, Y.
白俄罗斯科学院和
白俄罗斯研究生教育医学科学院
白俄罗斯

Dobrzyński, L.
国家核研究中心
波兰

Gallego, E.
马德里理工大学
西班牙

Haquin, G.
索雷克核研究中心
以色列

Jones, C.G.
美利坚合众国常驻维也纳国际原子能机构
代表团和核管理委员会
美国

Lee, J.K.
汉阳大学
大韩民国

Magnusson, S.
冰岛辐射安全局
冰岛

Mason, C.
必和必拓公司
澳大利亚

McEwan, A.C.
高级顾问
新西兰

McGinnity, P.A.

环境保护局
爱尔兰

Ng, K.H.

马来亚大学
马来西亚

Niwa, O.

京都大学和福岛县立医科大学
日本

Pentreath, R.J.

雷丁大学
英国

Perrin, M.L.

法国核安全管理局
法国

Rochedo, E.

核装置协调机构
巴西

Shinkarev, S.

联邦医学和生物学管理局
俄罗斯联邦

Sundell-Bergman, S.

瑞典农业科学大学
瑞典

Thomas, G.

伦敦帝国学院
英国

Valentin, J.

杰克·瓦伦丁放射防护研究所
瑞典

特邀专家和联络人

Brenner, A.

国家癌症研究所
美国

Chino, M.

日本原子力开发机构
日本

Fukui, T.

原子力规制委员会
日本

Ivanov, V.

国家辐射和流行病学登记系统
俄罗斯联邦

Makihira, A.

东京电力公司
日本

Nagataki, S.

长崎大学
日本

Ohtsuru, A.

福岛县立医科大学
日本

向第四工作组提供支持的原子能机构秘书处工作人员

Harms, A. V.

McGinnity, P.A.

Nies, H.

Osvath, I.

Sakai, K.

Yonehara, H.

第五工作组：事故后恢复

共同主席

Williams, G.
澳大利亚辐射防护和核安全局
澳大利亚

Mele, I.
核能司
原子能机构

Proehl, G.
核安全和安保司
原子能机构

科学秘书

Delaunay, N.
核安全和安保司
原子能机构

成员

Al-Masri, M.S.
叙利亚原子能委员会
阿拉伯叙利亚共和国

Balonov, M.
辐射卫生研究所
俄罗斯联邦

Bassanelli, A.
核工厂管理公司
意大利

Brennecke, P.
高级顾问
德国

Darko, E.O.
加纳原子能委员会
加纳

Gallay, F.
法国核安全管理局
法国

Howard, B.J.
生态学和水文学中心
英国

Inoue, T.
中央电力工业研究所
日本

Kifanga, L.D.
坦桑尼亚原子能委员会
坦桑尼亚联合共和国

Nakayama, S.
日本原子力开发机构
日本

Oughton, D.H.
挪威生命科学大学
挪威

Rowan, D.
加拿大原子能有限公司
加拿大

Seitz, R.
萨凡纳河国家实验室
美国

Tokarevsky, V.
切尔诺贝利问题研究所
乌克兰

Zeleznik, N.
地区环境中心
斯洛文尼亚

特邀专家和联络人

Belencan, H.
高级顾问
美国

Negin, C.
项目增强公司
美国

Takizawa, S.
东京电力公司
日本

向第五工作组提供支持的原子能机构秘书处工作人员

Izumo, A.
Fesenko, S.
Kumano, Y.
Monken-Fernandes, H.
Sakov, K.
Walker, J.
Yankovich, T.
Yonehara, H.

国际技术咨询组

主席

Meserve, R.
国际核安全组

科学秘书

Bevington, L.
核安全和安保司
原子能机构

成员

Asmolov, V.G.
俄罗斯国家核电厂电力和热能生产联合体
合股公司

Carrière, J.M.
世界气象组织

Clement, C.
国际放射防护委员会

Cousins, C.
国际放射防护委员会

De Boeck, B.
国际核安全组

Echávarri, L.E. (截至 2014 年 4 月)
经合组织核能机构

Ellis, K.
世界核电营运者联合会

Fuketa, T.
国际核安全组

Jamet, P.
国际核安全组

Kim, M.
国际核安全组

Laaksonen, J.
国际核安全组

Le, C.D.
国际核安全组

梁劬
联合国粮食及农业组织

Magwood, W. (自 2014 年 9 月起)
经合组织核能机构

Mohammad Jais, A.
国际核安全组

Niu, S.
国际劳工组织

Sharma, S.K. (已故)
国际核安全组

Torgerson, D.
国际核安全组

Weightman, M.
国际核安全组

Weiss, W.
联合国原子辐射效应科学委员会

Wiroth, P.
国际核安全组

潘自强
国际放射防护委员会

会议

工作组会议

2013年3月18日

工作组共同主席首次会议，维也纳

2013年3月21日至22日

所有工作组第一次会议，维也纳

2013年6月12日至14日

所有工作组第二次会议，维也纳

2013年9月12日至13日

第一工作组和第二工作组第三次会议，
维也纳

2013年10月7日至9日

第三工作组、第四工作组和第五工作组
第三次会议，维也纳

2013年12月9日至13日

所有工作组第四次会议，维也纳

2014年2月10日至14日

所有工作组第五次会议，维也纳

2014年4月14日至17日

第一工作组、第二工作组和第三工作组
第六次会议，维也纳

2014年5月5日至9日

第四工作组第六次会议，维也纳

2014年5月26日至30日

第五工作组第六次会议，维也纳

国际技术咨询组会议

2013年3月21日至22日

国际技术咨询组第一次会议，维也纳

2013年6月10日

国际技术咨询组/共同主席第一次联席会议，
维也纳

2013年6月11日

国际技术咨询组第二次会议，维也纳

2013年12月6日

国际技术咨询组/共同主席第二次联席会
议，维也纳

2014年5月7日

国际技术咨询组/共同主席第三次联席会
议，维也纳

2014年10月23日至24日

国际技术咨询组/共同主席第四次联席会
议，维也纳

2015年2月23日至24日

国际技术咨询组/共同主席第五次联席会
议，维也纳

顾问服务会议

2013年8月6日至7日

关于源项的顾问服务会议，维也纳

2013 年 10 月 29 日至 31 日
人为因素和组织因素与安全文化的顾问
服务会议，维也纳

2013 年 11 月 17 日至 21 日
人为因素和组织因素与安全文化的顾问
服务会议，亚特兰大

2014 年 1 月 13 日至 17 日
人为因素和组织因素与安全文化的顾问
服务会议，维也纳

2014 年 3 月 17 日至 21 日
人为因素和组织因素与安全文化的顾问
服务会议，渥太华

2014 年 3 月 24 日至 26 日
环境中的放射性顾问服务会议，摩纳哥

2014 年 5 月 20 日至 21 日
辐射和对数正态分布的顾问服务会议，
维也纳

2014 年 6 月 23 日至 27 日
辐射和对数正态分布的顾问服务会议，
维也纳

在日本举行的双边会议

2013 年 10 月 14 日至 21 日
与原子能机构治理领域报告有关问题的
双边讨论

2013 年 11 月 25 日至 27 日
讨论第 4 部分（放射后果）和第 5 部分
（事故后恢复）的编写中与放射后果有
关问题的顾问服务会议

2013 年 11 月 25 日至 12 月 4 日
与原子能机构退役领域报告有关问题的
双边讨论

2014 年 1 月 20 日至 24 日
讨论原子能机构报告的编写中与监管活
动、运行经验和废物管理专题有关问题
的顾问服务会议

2014 年 1 月 23 日
与内阁府复兴厅和受灾者生活支援小组
举行会议

2014 年 1 月 24 日
与日本能源经济研究所举行会议

版权说明

国际原子能机构的所有科学和技术出版物均受 1952 年（伯尔尼）通过并于 1972 年（巴黎）修订的《世界版权公约》之条款的保护。自那时以来，世界知识产权组织（日内瓦）已将版权的范围扩大到包括电子形式和虚拟形式的知识产权。必须获得许可而且通常需要签订版税协议方能使用国际原子能机构印刷形式或电子形式出版物中所载全部或部分內容。欢迎有关非商业性翻印和翻译的建议并将在个案基础上予以考虑。垂询应按以下地址发至国际原子能机构出版科：

Marketing and Sales Unit, Publishing Section
International Atomic Energy Agency
Vienna International Centre
PO Box 100
1400 Vienna, Austria
传真：+43 1 2600 29302
电话：+43 1 2600 22417
电子信箱：sales.publications@iaea.org
<http://www.iaea.org/books>

© 国际原子能机构·2015 年
国际原子能机构印制
2015 年 8 月·奥地利
STI/PUB/1710

编者按

总干事的本报告由在各技术卷中选用的详细资料编制。报告的内容不一定反映那些提名参加编制技术卷的工作组专家的国际原子能机构成员国或组织的观点。

虽已特别注意保持本报告中所载资料的准确性，但是国际原子能机构及其成员国对使用本报告可能产生的后果均不承担任何责任，亦不就与报告有关的内容作出任何保证。

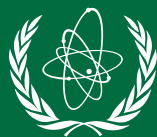
本报告无意处理与任何个人或主体的作为或不作为有关的责任、法律或其他方面的问题。

可在别处自由摘录本报告之内容，但使用时应注明出处。如本报告注明其资料（包括照片和图形）系因国际原子能机构以外之来源或地址，其再使用亦须获得原始来源的许可。

使用某些国家或领土的特定名称并不意味着国际原子能机构对这类国家或领土、其当局和机构或其边界划定的法律地位作出任何判断。

提及具体公司或产品的名称（不论表明注册与否）并不意味着国际原子能机构有意侵犯所有权，也不应被解释为国际原子能机构的认可或推介。

国际原子能机构对本报告中提及的外部或第三方因特网网站的网址继续存在或准确与否不负任何责任，而且不保证这类网站上的任何内容现在或将来仍然准确或适当。



IAEA
国际原子能机构

奥地利维也纳
维也纳国际中心