

世界

DOCUMENTARY OF THE
THREE SEVERE ACCIDENTS ON
NUCLEAR POWER PLANT IN THE WORLD

三次严重核事故

始末

邢继 编著



2011年日本福岛核事故

1986年苏联切尔诺贝利核事故

1979年美国三哩岛核事故



科学出版社

世界三次严重核事故始末

邢 继 编著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书以世界三次严重核事故为主要内容,根据国际权威机构发布的调查研究报告为基础,对三座核电站的基本情况、核事故发展的始末、对公众和环境的影响、周边环境及其恢复情况、经验教训等内容进行了全面梳理;阐述了我国在吸取核事故所带来的教训的同时,不断改进、提升核电安全水平所采取的行动,包括出台相关法律法规、改进在运核电项目、更新设计理念以及核电技术创新等;并以重返切尔诺贝利核事故现场纪实的形式,为读者展现切尔诺贝利核电站的周边环境及其恢复情况。

本书可供核行业科研工作者、工程技术人员、高等院校工科类专业学生,以及其他希望了解世界三次严重核事故与我国核电行业技术现状的读者阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

世界三次严重核事故始末 / 邢继编著. —北京: 科学出版社, 2019.6

ISBN 978-7-03-061081-2

I. ①世… II. ①邢… III. ①放射性事故-介绍-世界
IV. ①TL73

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第075455号

责任编辑: 耿建业 韩丹岫 / 责任校对: 王 瑞

责任印制: 吴兆东 / 封面设计: 蓝正设计

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京虎彩文化传播有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019年6月第一版 开本: 720×1000 1/16

2019年9月第二次印刷 印张: 15 1/4

字数: 197 000

定价: 88.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

编 委 会

顾 问 叶奇蓁 潘自强

主 编 邢 继

副 主 编 程慧平 荆春宁 毛亚蔚 堵树宏

霍建明 刘 伟

编写团队 霍小东 陈巧艳 李汉辰 王贺南

郑平辉 蔡盟利 孙叶城 纪运哲

吴宇翔 李 辉 张 鹤 闫 瑾

序 一

核能是全球电力供应的三大支柱之一，是安全、高效、清洁的能源供应方式，同时又是解决环境和气候变化问题的最现实选择之一。核能作为一种稳定的能源，不但能够可靠地供应基本负荷电力，并且对波动性强的、不易于调配以应对需求的可再生能源（风电和太阳能光伏发电等）形成很好的补充。与能量密度更低的能源相比，大型核电站发电高度集中，因而所需厂区面积更小，能提供现在和未来涌现的超级城市所需的能源。

辐射在日常生活中几乎是无处不在的，每人每年所受到的天然辐射剂量为几毫希伏左右。在核电站正常运行时，额外辐射剂量对附近居民的影响非常小，只有天然辐射剂量的千分之一到百分之一，远低于国际放射防护委员会（International Commission on Radiological Protection, ICRP）1mSv/a 的限制标准。据联合国原子辐射效应科学委员会（United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, UNSCEAR）报告，从 2000 年到 2002 年，全球核燃料循环的工作人员平均年剂量约为 1.2mSv，而 ICRP 规定的工人职业照射限值为 20mSv/a。我国 30 年核电的运行实践表明，核电站放射性排放量低于国家标准两个量级以上，核电站周围环境的放射性水平维持在天然本底辐射水平范围内。核电站近零排放的事实为广大公众所认可。

然而核事故一旦发生，则势必在社会上造成巨大的恐慌，让公众对核安全心生疑虑。为了正确了解和认识人类历史上的三次重大核事故，分析其起因、过程、后果、根本原因、应该吸取的教训和采取的措施及其效果，阐述新一代核电站的安全水平，以提高公众对核电安全的信心，就显得非

常必要和有意义了。

福岛核事故发生于 2011 年 3 月，是由地震引发的海啸所导致。事故过程中 6 个核电机组中的 3 个发生了堆芯熔毁，同样造成了大量放射性气体和物质的释放。事故后未发现由辐射直接导致的急性病症（包括死亡）。在事故发生后的第一年内，参与事故善后工作的人员和生活在周边的成年人接受的平均剂量分别为 12mSv 和 1~10mSv，婴儿接受的平均剂量约为成年人的两倍。UNSCEAR 2013 年报告和 2015 年、2016 年的白皮书均指出，在辐射照射剂量最高的儿童组中，理论上出现甲状腺癌危险增加的可能性是存在的，然而，甲状腺癌在儿童中是一种罕见疾病，从统计学角度看，预计在这一人群中不会发现可观察到的影响。福岛核电站是早期的沸水堆核电站，堆内产生的蒸汽直接进入汽轮机发电，一旦堆芯熔融，汽水混合物就将放射性物质带入常规岛系统，从而释放到环境中。

切尔诺贝利核事故发生于 1986 年 4 月，堆芯熔毁导致放射性气体和物质释放到环境中。多名应急工作人员罹患急性放射性疾病，部分人员死于极大剂量的辐射，部分人员出现了白血病和白内障发病率升高的迹象，事故发生时处于儿童和青年期的人群甲状腺癌的发生率显著增加。切尔诺贝利核电站是石墨慢化压力管型反应堆，设计上存在瞬发超临界的潜在风险，也没有诸如压水堆所采用的承压安全壳，加上操作人员违反操作规程等因素，共同导致了严重事故的发生。

三哩岛核事故发生于 1979 年 3 月，堆芯部分熔毁导致放射性气体的释放。根据美国核协会使用的官方放射性释放数据，居住在核电站方圆 10 英里内的居民受到的平均辐射剂量为 0.08mSv，没有人超过 1mSv。各种流行病学研究结论表明，三哩岛核事故没有明显的远期健康影响。三哩岛核电站为压水堆核电站，具有三道安全屏障，最后一道屏障——安全壳可以将大量放射性物质包容在内。

我国不建造类似切尔诺贝利和福岛的核电站；我国核电站的厂址不选择在地震烈度高的地区；我国海域有宽缓的大陆架，水深条件不利于海啸能量的积累，不会出现海啸淹没厂址的事故；我国有完整的核安全监管法律、法规和严密的核安全监管组织，而且我国的核事故应急机制能迅速、有效地预防和处理灾害。因此可以认为，我国是不存在发生类似切尔诺贝利核事故和福岛核事故的可能性的。

中国正开发建设第三代压水堆核电站。第三代核电站堆芯熔毁事故的发生概率不到第二代核电站的 1/10；反应堆具有在堆芯熔毁时收集熔融物的堆芯捕集器及其他安全措施和严重事故缓解设施，可将堆芯熔融产生的放射性物质包容在安全壳内。完备的事故预防与缓解措施为操纵员在事故情况下的干预策略（例如在出现安全壳超压风险时启动湿式过滤排放等）留出足够的时间，因此即使在核电站发生严重事故时，核电站附近大范围内的居民无须撤离，也无须担心食物受到污染，只需短时间的隐蔽，不存在长期的环境及生态影响。

《世界三次严重核事故始末》一书的编写是基于国际权威机构的调查研究资料，并结合我国核电建设和运行的经验，对三大核事故进行详细的分析和研究，评估了三大核事故后国际上所采取的措施，以及我国核电设计所遵循的安全准则和安全水平。本书的出版，有利于向公众还原和澄清三次核事故的全貌，消除社会对核电盲目的排斥和不必要的恐慌，增强公众对中国核电的信心。



中国工程院院士 叶奇蓁

2019年1月

序 二

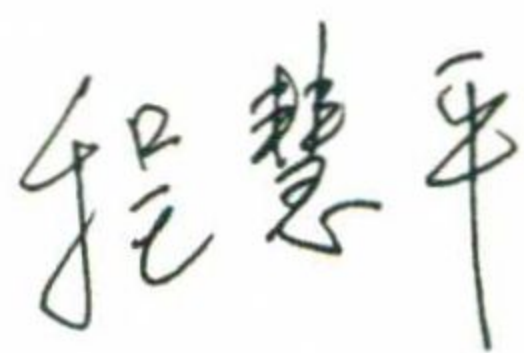
历史是事件驱动的，核电也不例外。我国拥有 30 年核电运行历史的安全纪录，这项优良安全纪录很大程度上归因于我国在核电安全方面投入了巨大的努力去反思核电的运行事件和事故，并持续不断地采取技术、安全和管理等改进措施。三哩岛核事故、切尔诺贝利核事故和福岛核事故在核电业界人人皆知并奉若戒律，所有拥有核电的国家都认真开展了事故后的重大改进行动；在这些事故发生后直至今日，核电行业仍在不断反思和汲取教训，持续追求卓越安全。

然而，有核电的国家就有反核人士。反核人士的关注点之一即为核电安全，或者说是核电事故导致的对公众和环境的影响和损害，上述三次核事故的后果也是时常被拿来当作反对核电的论据。对核电安全的关注原本是反核人士自身的合法权利，我们也欢迎在科学、客观、理性的范畴内表达对核电的不同意见。然而，有些反核人士时常摘取或参考一些非权威渠道来源的信息，而这些信息往往不准确、夸大甚至刻意歪曲了三次核事故的后果。部分相关机构和个人也易受之误导，在正式场合使用一些关于三次核事故的不科学的论断，不仅影响了核电的公众形象，还不利于核电发展。

中国核电工程有限公司受国家能源局核电司委托，认真梳理了三次核电事故的调查总结报告等权威文献，并在此基础上编写了《世界三次严重核事故始末》一书。该书既不同于鸿篇巨制的权威学术报告，也不同于浅尝辄止的核电安全科普读物——它以中等篇幅的内容客观、清晰、系统地阐述三次核事故的过程，辅以阅读性较强的图表，短时间内就可以使读者了解三次核事故的主要情况；方便读者根据需要查找到相

关的准确事故细节。此书可供政府相关部门、监管机构、智库等各相关行业
的领导、专家，以及关心、关注核电安全的人士，放置案边阅读和
不时参考。

祝中国核电健康安全发展，是以为序。

Handwritten signature in black ink, reading '程慧平' (Cheng Heping).

中国核工业集团有限公司科技委员会常委

2019年1月

前 言

历史上曾发生过三次影响世界的严重核事故，分别是 1979 年美国的三哩岛核事故、1986 年苏联的切尔诺贝利核事故及 2011 年日本的福岛核事故。核能的利用似乎总给人以神秘感和恐惧感，公众也自然而然会联想到“核事故”“核辐射”等负面事物。从三哩岛核事故发生后的 40 年里，各类报道中核事故的真相与造成的后果仍存在大量矛盾之处。这既给历史学者还原事实真相带来很大困难，又是摆在核电从业者面前十分现实的问题。

随着近些年经济发展与生态环境保护之间问题的增多，核能也逐渐面临清洁能源分类的资格考查。2017 年，习近平总书记在党的十九大报告中指出，坚持人与自然和谐共生，必须树立和践行绿水青山就是金山银山的理念，坚持节约资源和保护环境的基本国策。如何促进核能的开发利用与保障生态环境的和谐发展，是我们当下需要认真和积极面对的问题。为此，我们通过查阅权威资料、探访事故现场、梳理事故始末与造成的影响等，还原三次核事故的历史真相，并将与之相关的情况编写成为一份内容翔实、有据可依的资料呈献给读者。

本书由导论开篇，阐述了编写目的、意义和主要内容。

本书的主体内容由两部分构成：第一部分为回望篇（第一章至第三章），介绍了福岛核事故、切尔诺贝利核事故和三哩岛核事故的具体情况，包括电厂简介、事故起因和过程回顾、直接后果和原因分析、应急响应、事故综合影响等。通过第一部分的内容，读者可以对核事故的全过程、影响以及后续的跟踪研究有较为完整的认识。第二部分为前行篇（第四章和第五章）。第四章描述了事故发生后中国的行动，包括从中央

政府、行业监管机构再到各核电厂的行动以及近年来我国运行机组的安全状况。读者可以了解我国开展的从顶层到基层的机制改革以及所采取的各项核安全重大整改举措。第五章从我国核电发展的历史沿革、核安全理念与设计原则、政府监管体制、政策法规以及新一代核电技术等多个角度，分析了中国核电安全发展的历史与现状，并在结尾尝试对核电发展的未来进行思考。

为使读者更直观地了解 and 感受核事故留下的历史印记以及事故现场近期的恢复情况，本书的附录部分介绍了国内核行业团体 2017 年初重返切尔诺贝利核事故现场的纪实。这部分内容反映了事故发生地目前的基本情况，用事实对网络中的传言做出了回应，帮助读者建立了对切尔诺贝利核事故后果真实而立体的认识。

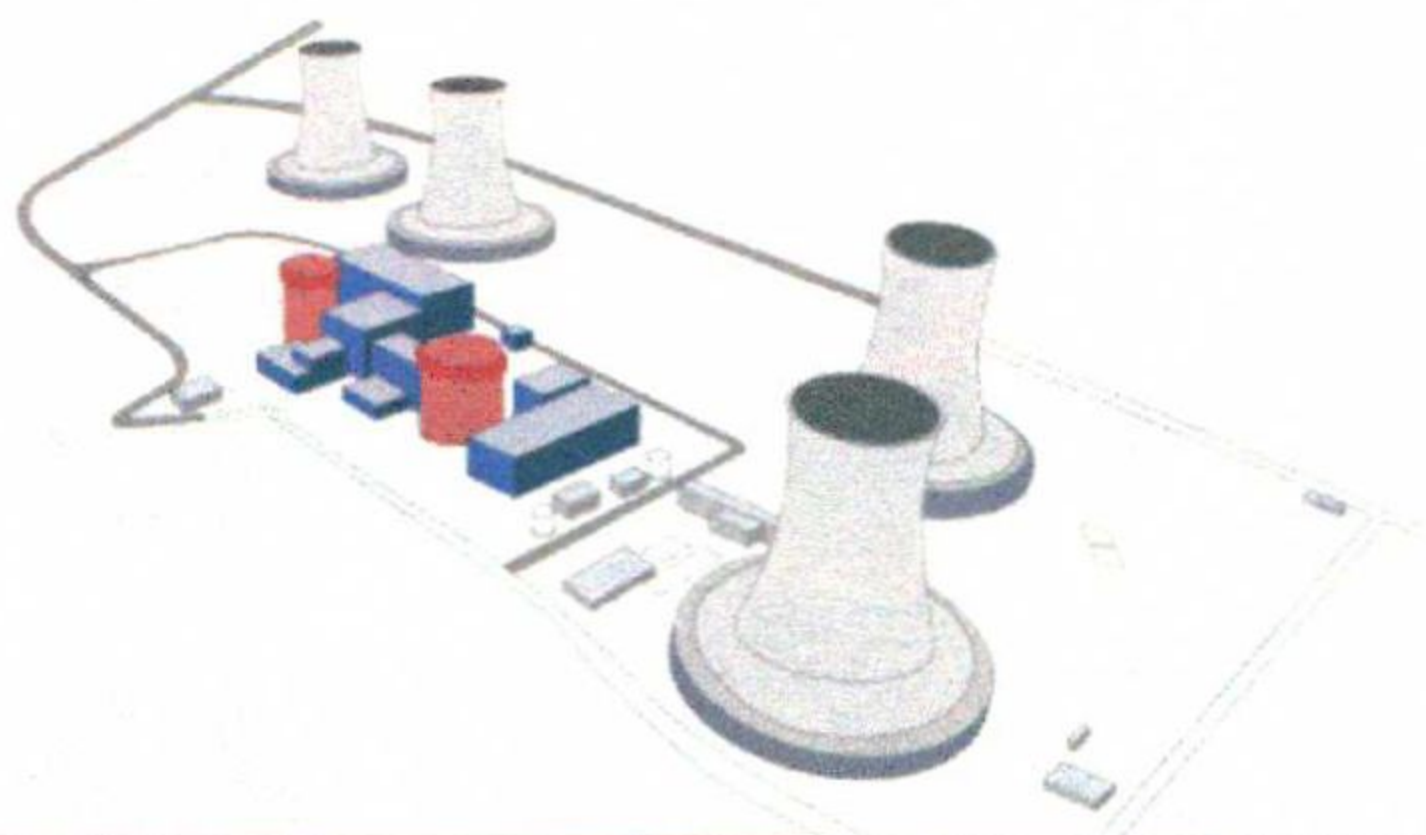
本书的编写受到了有关部门领导、行业同仁、社会科学工作者等众多专家学者的指导和大力支持，在此向他们表示诚挚感谢。

由于核电厂严重事故分析涉及诸多专业并且具有相当深度，限于编者水平，书中难免存在疏漏之处，敬请读者批评指正。

本书编写组

2018 年 12 月

目 录



序 一		/i
序 二		/iv
前 言		/vii
导 论	历史的诉说	/1
第一部分	回 望	/17
第 一 章	福岛核事故	/19
	第一节 电厂简介	/10
	第二节 事故回顾	/15
	第三节 应急响应	/30
	第四节 放射性后果	/47
	第五节 事故后恢复	/59
	第六节 经验教训	/67
	第七节 事故综合影响	/69
	参考文献	/71
第 二 章	切尔诺贝利核事故	/73
	第一节 电厂简介	/74
	第二节 事故回顾	/77
	第三节 应急响应	/82
	第四节 放射性后果	/89

第五节	事故后恢复	/98
第六节	经验教训	/101
第七节	事故综合影响	/103
第八节	关于切尔诺贝利核事故死亡人数的讨论	/107
	参考文献	/111
第三章	三哩岛核事故	/112
第一节	电厂简介	/112
第二节	事故回顾	/115
第三节	应急响应	/124
第四节	放射性后果	/125
第五节	事故后的清理工作	/126
第六节	经验教训	/129
第七节	事故综合影响	/132
	参考文献	/135
第二部分	前 行	/137
第四章	中国的行动	/139
第一节	中央政府的要求	/140
第二节	监管机构的行动	/144
第三节	各核电厂的行动	/150
第四节	我国运行机组安全状况	/160
第五章	中国的核电安全	/164
第一节	三次核事故的共同点	/164
第二节	我国核电发展的历史沿革	/166
第三节	核电安全	/173
第四节	关于中国核电未来的思考	/191
附 录	重返切尔诺贝利	/195
后 记		/230



导 论

历史的诉说

影响世界核电发展的重大事故有三次，分别是1979年发生在美国的三哩岛核事故、1986年发生在苏联的切尔诺贝利核事故以及2011年发生在日本的福岛核事故。距离三哩岛核事故已经过去几十年的时间了，各类研究机构和新闻媒体的报道依然存在矛盾，而且是多年来一直摆在核电从业者面前的严肃问题。近年来，化石能源的过度使用造成了很多环境污染问题，人们对绿水蓝天的生态环境需求日益增长，同时也期盼着新一轮清洁能源革命的到来。核能究竟是不是清洁能源？核事故的真相到底是什么？这些事故对环境、社会造成了怎样的影响？这些问题促使我们查阅权威资料，探访事故现场，梳理事故起因、经过与造成的影响，还原三次核事故的真实情况，将三次核事故的相关情况编写成一份翔实、有依据的资料。

1979年发生严重核事故的三哩岛核电站采用的是美国早期的压水堆机型，事故的起因是设备故障及操作员误操作，导致堆芯熔化、大量裂变产物进入安全壳。但由于安全壳保持完好，有效包容了放射性物质，因而对周围公众产生的最大剂量小于年天然本底辐射。尽管三哩岛核事故仅对环境和公众造成了微小的放射性后果，但其对世界核工业的发展却影响深远。三哩岛核事故给美国整个核行业和监管部门敲响了警钟，之前未予重视的小破口失水事故居然会酿成如此严重的后果，事故反映出的管理（如操作人员培训、应急程序、组织、管理等）与技术（如设备设计、建造、设备鉴定和安全分析等）问题同样重要。三哩岛核事故后，核工业企业和监管部门重点加强了反应堆严重事故研究，投入巨资开展了大量的严重事故研究项目。为了改变以往核工业监管部门和电力公司在管理和运行方面缺乏重视的问题，相关机构进行了改组，并制定了相应的行动计划。作为一个分水岭，安全分析由大破口失水事故转向小破口失水事故和瞬态研究。另外，美国核管理委员会（Nuclear Regulatory Commission, NRC，以下简称美国核管

会)在 1975 年发布的《反应堆安全研究—美国商业核电站事故风险评价》(即 WASH-1400)报告中采用的概率风险评价技术体现出了传统确定论分析技术所无法比拟的科学预见性。作为世界反应堆安全演变史上的一个里程碑,三哩岛核事故使概率风险评价技术在核能领域的应用得到了重视,并在随后的几十年的发展应用中展现了强大的生命力。

如果说三哩岛核事故给欧美等国快速发展的核电行业敲响了安全警钟,那么,切尔诺贝利核事故对于世界各国的核能行业发展都堪称是一次重大打击。此次事故影响涉及公众安全、区域经济、能源结构规划、社会舆论等诸多领域,其影响程度之深、范围之广远超三哩岛核事故。

切尔诺贝利核事故的发生,原因可以归结为核电机型设计存在严重缺陷、核电站运行监督管理存在漏洞、安全文化缺乏等。该核电站采用石墨慢化水冷堆,这种堆型在设计上存在瞬发超临界的潜在风险,而且没有包容放射性物质的安全壳,一旦违规操作导致瞬发超临界事故,堆芯解体爆炸则可造成大量放射性物质的外泄。这种堆型仅在苏联设计建造,切尔诺贝利核事故后已不再建设。

为了避免再次发生类似的核事故,世界核能行业做出了大量调整与改进,如摒弃类似堆型设计、改进系统设计理念以降低人因失误的可能性、确立安全文化并在各领域全面贯彻落实、加强国际合作交流等。

联合国原子辐射效应科学委员会 2011 年关于切尔诺贝利核事故后果和影响的报告已经给出最终的权威结论:切尔诺贝利核事故后三个月内,因急性辐射综合症引起的死亡人数为 28 人。对于核电站周边的公众而言,事故早期并没有出现急性辐射综合症的病例。大部分地区的居民暴露于低水平的辐射中,所吸收的剂量与天然本底辐射水平相当或高于天然本底辐射水平的几倍,不必担心存在严重的健康后果。至于事故晚期效应,截至目前,只发现儿童受辐照后甲状腺癌发病率增