



核电站岩体地基抗震 适应性评价技术

蒋宇静 杨磊/著

Evaluation Technology for Rock Foundation
Seismic Adaptability of Nuclear Plant



科学出版社

核电站岩体地基抗震适应性 评价技术

Evaluation Technology for Rock Foundation
Seismic Adaptability of Nuclear Plant

蒋宇静 杨 磊 著



科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书系统介绍了岩体地基调查和试验方法、岩体地基设计荷载、岩体地基稳定性分析模型建立及岩体地基稳定性评价方法,并以某核电厂地基模型中风化变质地基和含有断层破碎带等弱层地基为例,详细分析阐述了地质模型建立、非均质地基条件数值模拟、地震动输入和响应,并结合抗震设计规范,给出了明确的地基稳定性评价标准。本书对国际上核电站岩体地基抗震适应性评价技术的最新进展做了详细介绍;同时列举了将国际已有的抗震计算方法和法规应用于工程实践的实例,对国内日益发展的核电建设事业具有一定参考价值。

本书可供能源、水电、土木、环境、地质等工程与科学领域的科研、工程技术人员及高等院校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

核电站岩体地基抗震适应性评价技术=Evaluation Technology for Rock Foundation Seismic Adaptability of Nuclear Plant/蒋宇静,杨磊著. —北京:科学出版社,2016.7

ISBN 978-7-03-049192-3

I. ①核… II. ①蒋… ②杨… III. 核电站-岩石基础-抗震能力-研究 IV. ①TM623

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 149688 号

责任编辑:李 雪 / 责任校对:蒋 萍

责任印制:张 倩 / 封面设计:无极书装

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>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 7 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2016 年 7 月第一次印刷 印张:12 1/4

字数:250 000

定价:158.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

作者简介

蒋宇静: 1982年6月毕业于山东矿业学院(现山东科技大学), 1993年3月毕业于日本九州大学土木工程专业、获工学博士学位。现担任山东省矿山灾害预防控制重点实验室-省部共建国家重点实验室培育基地主任, 教授、博士生导师。

2008年当选为山东省泰山学者特聘教授, 2011年被评为国家“千人计划”特聘专家。教育部长江学者和创新团队发展计划“煤矿深部矿压与突水动力灾害机理与防治”学术带头人, 国家杰出青年基金(B类)“工程岩体结构可靠性设计理论与方法体系研究”获得者, 国家重点基础研究发展计划(973计划)课题负责人。兼任中国岩石力学与工程学会理事、中国岩石力学与工程学会软岩工程与深部灾害控制分会副理事长, 国务院侨务办公室专家咨询委员会委员等。主要从事地层环境力学及其在岩土工程和地下能源工程中应用的科研工作, 研究成果: 出版学术著作8部, 编写教材2部, 发表学术期刊论文160余篇, 授权发明专利30余项(国外发明专利2项)。先后获得国家科技进步奖二等奖、教育部自然科学奖二等奖、山东省技术发明奖一等奖、山东省科技进步奖一等奖、中国岩石力学与工程学会技术发明一等奖、中国驻日本大使馆教育参赞奖、日本岩石力学联合会论文奖和技术奖、日本电力土木协会高桥奖(论文奖)等多项科技奖励。2010年被推荐当选日本土木学会会士(Fellow)。

杨磊: 2005年6月毕业于山东大学土建与水利学院土木工程系, 获学士学位; 2008年6月毕业于山东大学土建与水利学院岩土工程专业, 获硕士学位; 2013年2月毕业于日本国立长崎大学系统科学(岩土工程)专业, 获博士学位。现担任山东大学土建与水利学院土木工程系讲师, 硕士生导师, 主要从事裂隙岩体地震动力响应特征、裂隙岩体破坏行为以及岩体水力耦合特征相关的教学和研究工作。近年来, 主持国家自然科学基金(青年基金)项目1项, 作为主要研究人员参与国家重点基础研究发展计划(973计划)项目、国家自然科学基金面上项目等10余项, 发表学术论文10余篇, 获得国家发明专利5项。相关成果获教育部自然科学奖二等奖1项(排名第5)。

前 言

在常规能源日益枯竭,提倡清洁能源、倡导低碳生活的现代社会,新能源具有广阔的应用前景。长远来看,发展核电是改善我国能源结构、逐步减少环境污染的有效途径之一。但核电站具有潜在重大威胁性,且我国区域地震活动比较活跃,其抗震性能要求远远高于一般的工业与民用建筑。核电站地基的抗震适应性评价决定着核岛结构和设备抗震设计的安全,也是厂址选择中的重要制约性因素。现实条件下,地基岩体中不可避免地存在着节理、裂隙、断层等不连续面,这些因素对核岛结构和设备抗震适应性会造成重大影响,若在地震中发生事故,对人类和环境造成的危害不可估量。因此,在核电站工程设计、建设和运营中,非均质核岛地基动力响应机理及影响预测是保证核电设备安全运营的重要研究课题。

日本是一个地震多发国家,福岛核电站事故发生之前,核能发电量占据全国总发电量近30%。1954年以后,不断有新的核电站建设投入使用。截止2010年3月底,已有54座商业用核电站投入运行。继美国和法国之后,日本拥有世界第三的设备运转能力。为确保核电站安全正常运行,通过反复的技术改进与现场实践,日本在岩体地基抗震适应性评价方面积累了丰富的经验,形成了比较完整的技术体系。本书第一作者曾有幸参加过九州电力株式会社位于鹿儿岛县境内的川内核电站二期扩建工程地质勘测与环境评估合作项目,还承担过JAEA(Japan Atomic Energy Agency 日本原子能研究开发机构)委托的研究开发项目。在此期间,先后指导和协助指导6位博士研究生的相关课题研究,对节理岩体的原位调查、强度变形试验方法、数值模拟及结构抗震稳定性评估有一个比较系统的理解,也积累了一些经验,想通过总结与专家同行们切磋交流。

本书从“岩体地基的调查和试验方法”“岩体地基的设计荷载”“岩体地基稳定性分析模型的建立”“岩体地基稳定性评价方法”等方面进行了系统阐述。在研究实例介绍中,以某核电厂地基模型中的风化变质地基和含有断层破碎带等弱层的地基为例,详细分析说明了地质模型的建立、非均质地质的数值模拟分析、地震动的输入和响应,并结合抗震设计规范,给出了明确的地基稳定性评价标准。

本研究得到了国家自然科学基金项目（51379117、51509146）、山东省泰山学者优势特色学科人才团队支持计划等的资助，本书是这些项目研究成果的部分总结。在撰写过程中，参考引用了日本土木学会原子能土木委员会研究报告的有关内容；日本电力中央研究所冈田哲实博士（本书第一作者在九州大学工作期间指导的研究生）提供了原位岩体三轴试验方法的宝贵图件，在此表示衷心感谢。在资料整理与分析方面，山东科技大学土木工程学院王刚副教授、广东省电力设计研究院郑文棠研究员、长崎大学李博助理教授等也给出了很好的建议；2015 级博士研究生张学朋同学参加编写了第 8 章初稿并负责本书的文字编排和图表整理工作，付出了大量劳动，在此一并表示感谢。

由于我们的理论与学识水平所限，谬误与不足之处，恳请专家同行和读者批评指正。

蒋宇静

2016 年 3 月于青岛

目 录

前言	
绪论	1
第一部分 核电站岩体地基的调查、试验及地震稳定性评价方法	
第 1 章 核电站的现状与抗震评价	5
1.1 核电站设施	5
1.1.1 沸水反应堆	5
1.1.2 压水反应堆	7
1.2 核电站抗震评价	8
1.3 核电站发展现状	9
1.3.1 国际核电发展	9
1.3.2 中国核电发展	10
第 2 章 地基的调查和试验方法	12
2.1 地质与地质构造调查	12
2.1.1 钻孔调查	12
2.1.2 勘探坑调查	13
2.1.3 沟渠调查	13
2.2 岩石物理力学参数的确定	15
2.3 地基岩体物理力学参数的确定	19
第 3 章 岩体地基的设计载荷	22
3.1 抗震设计要求	22
3.2 设计地震荷载	24
3.2.1 地基的设计地震力	24
3.2.2 建筑物对地基的作用力	27
第 4 章 抗震设计中地基条件的设定	28
4.1 地质构造和地基模型	28
4.2 岩体分类和地基模型	30
4.3 地基力学性能的评价	32
4.3.1 强度特性	32

4.3.2 变形特性	33
第5章 岩体地基稳定性评价方法	35
5.1 稳定性分析方法	35
5.1.1 滑动面法等传统方法	35
5.1.2 静态分析	38
5.1.3 动态分析	39
5.2 稳定性评价的内容和标准	39
5.2.1 评估内容	39
5.2.2 地基稳定性的评估标准	41

第二部分 原位岩体三轴试验方法与裂隙力学参数测试技术

第6章 新型原位岩体三轴试验方法及其工程应用	45
6.1 试验装置	45
6.2 原位岩体三轴试验方法的应用实例	48
6.2.1 地基岩体的概况	48
6.2.2 钻头的选取	50
6.2.3 现场试件的制备	54
6.2.4 原位岩体三轴试验方法	54
6.2.5 试验结果及分析	59
第7章 新型岩体剪切试验装置的开发与裂隙力学行为	66
7.1 直剪试验装置的硬件和软件系统	67
7.1.1 裂隙岩体的垂直刚度	67
7.1.2 试验装置的硬件系统	67
7.1.3 试验装置的软件系统	69
7.2 裂隙的剪切力学行为	72
7.2.1 裂隙试件的制备	72
7.2.2 试验装置的调试	76
7.2.3 人工裂隙面的剪切力学行为	77
7.2.4 自然裂隙面的剪切力学行为	79
第8章 裂隙岩体直接剪切宏观力学特性	82
8.1 岩石材料的颗粒流程序表达	82
8.1.1 颗粒流理论	82
8.1.2 本构模型	83
8.2 细观物理力学性质参数确定	84

8.3	裂隙面直接剪切数值试验	86
8.3.1	裂隙面数值模型构建	86
8.3.2	边界条件实现	87
8.3.3	直接剪切数值试验的实现	88
8.4	裂隙面受剪细观力学特性演化机制分析	89
8.4.1	裂隙面宏观力学特性分析	89
8.4.2	粒间接触力演化过程	89
8.4.3	裂纹扩展过程	91
8.4.4	能量演化过程	94
8.4.5	颗粒旋转弧度演化分析	96
第9章	节理发育形态对非均质基岩力学特性影响	99
9.1	模型试验台	99
9.1.1	试验装置	99
9.1.2	节理基岩模型	100
9.1.3	类岩石材料的力学特性	100
9.1.4	试验加载方法及方案	101
9.2	模型试验结果	104
9.2.1	剪切变形分析	104
9.2.2	基岩模型的破坏过程	106
9.2.3	剪切强度分析	106
9.2.4	节理密度的影响	108

第三部分 核电站岩体地基抗震稳定性研究实例

第10章	核电站岩体地基抗震稳定性静态分析	113
10.1	核电站的岩体地基及其物理力学性质	113
10.2	地基模型的建立与加载条件	115
10.2.1	数值模型的建立	115
10.2.2	静态分析中的边界条件和地震荷载	116
10.3	地基的自重平衡状态	117
10.4	水平地震力作用下地基的力学行为	118
10.5	垂直地震力作用下地基的力学行为	138
10.6	水平和垂直地震力共同作用下地基的力学行为	149
第11章	核电站岩体地基抗震稳定性动态分析	161
11.1	动态有限元法和离散元法的基本原理	161

11.1.1	动态有限元法的基本原理	161
11.1.2	动态离散元法的基本原理	165
11.2	动态分析模型的建立	167
11.3	地震波的选择与反演计算	170
11.3.1	地震波的选择	170
11.3.2	地震波的反演计算	173
11.4	动力计算结果与对比分析	177
参考文献		183

绪 论

核电是对环境影响极小的清洁能源,核电厂本身不排放二氧化硫等大气污染物,发展核电是改善大气环境质量和治理 PM2.5 等大气雾霾的必要措施。核能属于低碳能源,一座百万千瓦电功率的核电厂和燃煤电厂相比,每年可以减少二氧化碳排放 600 多万吨,是减排效应最大的能源之一。因此,核电对煤电有较强的经济竞争力和替代能力。自 1954 年苏联建成世界上第一座实验性核电站厂,1957 年美国建成希平港原型核电站以来,世界核电已取得了长足发展,核发电量约占世界发电总量的 16%。相比而言,我国目前核电规模不大,核发电量约占全国发电总量的比例 [3.01% (2015 年)、2.39% (2014 年)、1.19% (2013 年)] 甚小,与世界核电平均水平 16% 相差甚远。为了满足我国电力增长需求,保障能源供应安全、调整能源结构、减小环境污染、保证社会和国民经济持续发展,自“十一五”我国提出“积极发展核电”后,我国核电进入大发展时期。截至 2010 年年底,我国核电装机容量 1082 万千瓦。进入“十二五”,受到日本福岛核电站事件影响,核电发展有所延缓。但核电前行的脚步并未停止,并加速“走出去”的步伐。

如上所述,在能源稀缺和环境问题更加严峻的今天,合理开发使用核电能源将对缓解人类当前的能源危机及改善居住环境具有重要的战略意义。由于核电站是具有潜在重大威胁性的重要能源结构,且我国区域地震活动非常活跃和频繁,其抗震性能要求远远高于一般的工业与民用建筑。核电厂地基的抗震适应性评价决定着核岛结构和设备抗震设计的安全,是厂址选择中的重要制约性因素。

地质勘察分析表明,核岛地基岩体中不可避免地存在节理、裂隙等不连续面,如江苏田湾核电厂 3 号、4 号核岛地基发现特殊地质体,为横跨核岛区域的 5~16m 宽的构造破碎带;辽宁红沿河核电厂 3 号、4 号核岛地基开挖过程中,发现地基下部存在若干分布不规则、岩性较差的强风化“捕虏体”。地基的非均质性和各向异性使得岩土力学参数(强度特性、变形特性)具有空间上的变异性 and 影响的不确定性,从而对核岛结构和设备抗震适应性造成重大影响。由于其潜在的高度危险性,若在地震中发生事故,将对人类和环境造成巨大危害。例如,2007 年 7 月 16 日日本新潟县中越冲发生 6.8 级地震,引发柏崎刈羽核泄露;2011 年 3 月 11 日日本东北地区发生 9.0 级大地震,引发的福岛核电站事故成为继切尔诺贝利核电站事故之后的第二个七级核事故,为日本甚至全球带来巨大灾难和深远影响。因此,在工程设计、建设和运营中非均质核岛地基动力响应的机理及影响是岩土工程中的一个重要研究课题。

根据《核电厂抗震设计规范》(GB 50267—2011)征求意见稿第5章“基础、地基和边坡”第5.4.1条和第5.4.3条规定:抗震Ⅰ、Ⅱ类物项的地基以及与抗震Ⅰ、Ⅱ类物项安全有关的边坡应进行抗滑移验算。抗震Ⅰ类物项应同时采用拟静力法和动力有限元法进行地基和斜坡的抗滑移分析,两种方法的计算结果均应满足第5章要求。同时,规范总则的第1.0.6条指出:抗震Ⅰ类物项应满足核电厂在极限安全地震动和运行安全地震动作用下的结构完整性和设计功能要求。含软弱夹层核岛地基超出了设计规范的地基计算规定,需要专题研究其抗震稳定性评价技术,是国内尚未系统研究的难点和热点。例如,目前日本核电厂地基的分类中,非均质地基包括异种均质地基、风化变质地基和含有断层破碎带等弱层的地基。其中,“含有断层破碎带等弱层的地基”是由于其存在断层破碎带等的软弱层,成为物理性质评价上显著因素的地基。日本土木学会原子力土木委员会编写的【原子力発電所地質・地盤の調査・試験法および地盤の耐震安定性の評価手法 報告書 第3編 地盤調査・試験法】^[1](《核电站地基地质调查试验方法及地基抗震稳定性评价方法报告书 第3章 地基地质调查试验方法》)中就附有含软弱层地基的核电厂抗震分析案例。

本书以某核电厂地基模型中的风化变质地基和含有断层破碎带等弱层的地基为例,研究地质模型的建立、非均质地基条件的数值模拟及地震动的输入和响应,结合抗震设计规范,给出明确的地基稳定性评价标准。其具有以下几项技术特点。

(1) 研究日本原子力发电所耐震设计技术指针 JEAG 最新修订版中关于核岛地基勘察和地基稳定性评价的具体操作内容,特别针对非均质地基的分类,采用非均质地基的核电厂情况(地质条件)、计算方法及遵循的日本标准。综合分析涉及非均质地基的日本核电厂案例,系统研究核电厂非均质地基岩土的设计参数,建立一套适合中国未来核电厂选址的、具有拓宽性的核电厂地基分类方法。

(2) 以发育优势节理组、含软弱夹层的非均质基岩厂址为研究对象,结合日本抗震设计规范和中國抗震设计规范,研究节理发育的非均质基岩地基的数值模型构建方法,非均质地基条件的数值模拟、地震动的输入和响应,采用离散元法模拟地震波在节理、软弱夹层中的传播、反射、透射和衰减规律,分析优势节理组、含软弱夹层对地基不均匀沉降和地基应力扩散的影响。分析核电厂建(构)筑物对非均质地基岩土层的荷载分布特征、地基不均匀沉降和地基应力扩散规律,结合抗震设计规范,给出明确的地基稳定性评价标准。

(3) 计算软件采用国际通用的三维有限元软件或离散元软件,非均质地基模型以某核电厂非均质地基为原型,需考虑简单的核电厂模型。动力计算同时考虑拟静力法和时程动力分析法。对于时程动力分析法,考虑发育优势节理组、含软弱夹层的非均质基岩厂址。

第一部分

核电站岩体地基的调查、试验 及地震稳定性评价方法

第 1 章 核电站的现状与抗震评价

当前以及今后相当长一段时期，核电都将是中國积极发展的能源形式之一，保障核电安全是确保核电工程建设顺利实施和安全运营的关键。核电站核岛地基的适应性是核电站厂址选择的重要制约因素，而厂址地基的抗震适应性分析是核心技术。

我国的核电站建设起步较晚。现行核电规范基本参照国外的规范制订，缺乏具有自主知识产权的成果和配套建设的能力，在自主创新、适应中国国情、体现中国特色方面有所不足。在当前核电建设的背景下，无法满足核电建设的要求，严重影响了我国的核电建设和技术竞争能力。开展适合我国国情的核安全相关结构的抗震安全评价方法与技术研究，对于保障核电工程结构的“可靠与安全”有着重要的理论指导意义和工程应用价值。

为对核电站的现状 & 抗震评价做出进一步的了解，本章先就“核电站设施”、“核电站抗震评价”和“核电站发展现状”三个方面做出说明。

1.1 核电站设施

依据燃料形式、冷却剂种类、中子能量分布形式、特殊的设计需要等因素可建造成各种不同结构形式的反应堆。目前，世界上有大小反应堆上千座，其分类也是多种多样的。反应堆按中子能谱分为热中子堆和快中子堆。按用途分为研究堆、生产堆和动力堆等，生产堆主要是用于生产军用钚和钚。按冷却剂分有轻水堆（light water reactor, LWR）、重水堆（heavy water reactor, HWR）、气冷堆和钠冷堆。其中，以水作为减速剂和冷却剂的轻水反应堆是当前商业运营核反应堆的主要类型。轻水反应堆根据其工作原理的不同，又可分为沸水反应堆（boiling water reactor, BWR）和压水反应堆（pressurized water reactor, PWR）两种。目前国内运营核反应堆以 PWR 为主，下面就以轻水反应堆为例介绍核电站的基本设施。

1.1.1 沸水反应堆

BWR 型核电站内建有反应堆室、涡轮室、控制室、服务室、垃圾处理室、固态垃圾储藏库、配备有主排气管的建筑物或构筑物、现场水处理室、取水设备

(包括紧急取水设备的取水口、取水通道、取水坑及泵室,海水管道等室外土木构筑物)、排水设备、海水热交换器室、办公室等基本设施。其中,反应堆室是最重要的设施,其内部放置反应堆容器(包括燃料聚合体和控制棒)、再循环泵、存储容器和燃料储藏池等重要设备(图 1-1)。除反应堆室以外的其他主要建(构)筑物的结构和功能如表 1-1 所示。

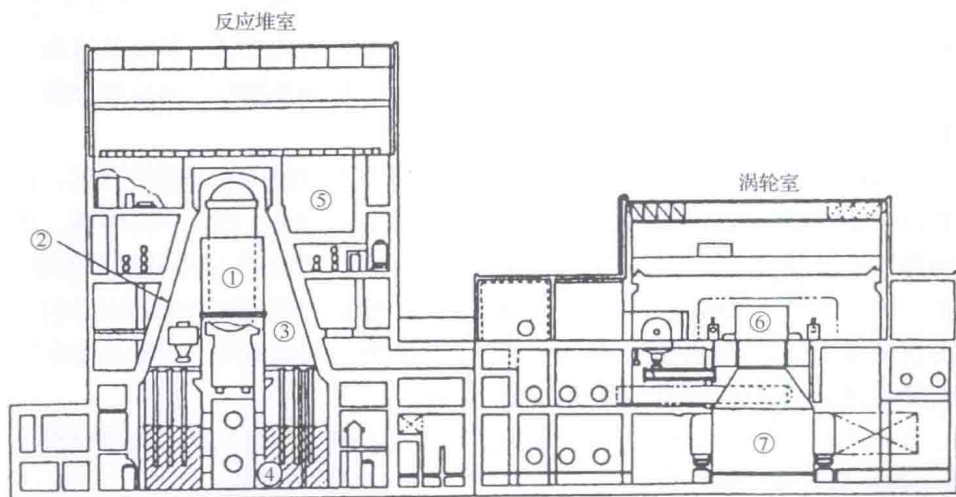


图 1-1 BWR 型核电厂房及其主要设备

①反应堆压力容器；②储存器；③干井；④控制池；⑤燃料贮藏池；⑥涡轮发电机；⑦冷凝器

表 1-1 BWR 型核电厂房建(构)筑物及其结构和功能

建(构)筑物	主要结构	功能
涡轮室	钢筋混凝土结构；钢结构与钢筋混凝土的组合结构	放置涡轮发电机、冷凝器、加热器和反应堆给水泵等各种设备
控制室	钢结构与钢筋混凝土的组合结构	最上层为中央控制室，下层为电缆管理及 PVC 开关装置室
服务室	钢筋混凝土结构	包含出入管理设施、更衣室、浴室、保健管理室、化学分析室等
垃圾处理室	钢结构与钢筋混凝土的组合结构	设有多种处理装置，对反应堆排出的液体和固体垃圾及其他废弃设备进行处理
固态垃圾储藏库	钢筋混凝土结构	用于罐装固体废弃物的储存
主排气管设施	钢结构与钢筋混凝土的组合结构	反应堆室，汽轮机室，垃圾处理室等空调排气系统的排气以及紧急条件下瓦斯处理系统的瓦斯排出

1.1.2 压水反应堆

PWR 型核电站内建有反应堆室、反应堆辅助室、涡轮室、固态垃圾储藏库、水处理设施、附属蒸汽设备、取水设备（包括室外重要的土木构筑物）、排水设备、办公室等。如图 1-2 所示，作为最重要设施的反应堆室内设有反应堆压力容器、蒸汽发生器和加压器等。除此之外的其他主要建（构）筑物的结构和功能如表 1-2 所示。

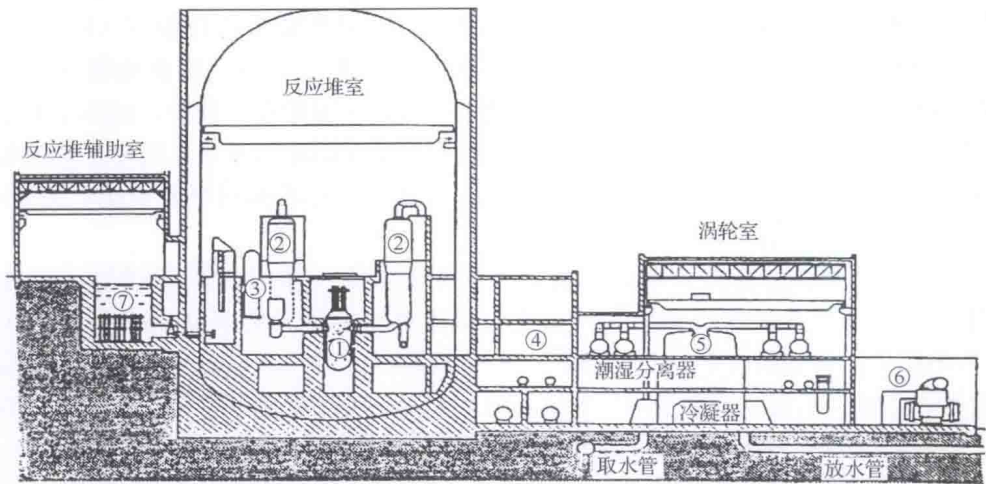


图 1-2 PWR 型核电厂房及其主要设备

- ①反应堆压力容器；②蒸汽发生器；③加压器；④中央控制室；⑤涡轮发电机；⑥主变压器；
⑦乏燃料储藏池

表 1-2 PWR 型核电站的主要建筑物

建（构）筑物	主要结构	功能
反应堆辅助室	钢结构与钢筋混凝土的组合结构	与反应堆室相邻，包含化学体积控制设备、余热排出设备、废弃物处理设备、燃料循环冷却水供给设备、燃料处理系统、燃料贮藏设备、HAVC（通风及空调设备）、采样设备、辅助冷却水设备、特殊电源及中央控制室等
涡轮室	钢结构与钢筋混凝土的组合结构	包含发电机、冷凝器、给水加热器、给水泵及其他辅助设备