

发电厂热工自动化技术丛书

# 压水堆核电站 过程控制系统

丛书主编 / 孙长生 主编 / 庞松涛 主审 / 马蜀



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

014044218

TM623.91

18

发电厂热工自动化技术丛书

# 压水堆核电站 过程控制系统

丛书主编 / 孙长生 主编 / 庞松涛 主审 / 马蜀



TM 623.91

18



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



北航

C1732193

815330310

中国电力出版社自动化专业丛书

## 内 容 提 要

本书由中国自动化学会发电自动化专业委员会、电力行业热工自动化技术委员会组织编写，共11册，内容包括燃煤、燃气、核电机组的整个热力系统、热工过程控制设备与系统、设计与安装调试、运行维护与检修、热工技术与监督管理、故障分析与过程可靠性控制等多方面。

本书为《压水堆核电站过程控制系统》分册，由国内长期从事压水堆核电站仪表自动化专业的专家精心编撰而成。本书以大亚湾核电站为基础，简明扼要地介绍了核能发电基础、仪控系统设计基准、压水堆核电站仪控设备分级，详细编写了反应性控制、反应堆保护系统、核岛过程控制系统、核电站特殊测量仪表系统、常规岛控制系统，最后介绍了最新的DCS控制技术在压水堆核电站的应用、核电站应急电源系统、核安全规范及仪控技术管理，在每章的最后，编者还精选了压水堆核电站（控制系统）故障案例分析等内容，以帮助读者快速了解和学习核电站被控对象的测量、保护和控制的原理，掌握实用压水堆核电站仪表自动化系统技术。

本书兼顾压水堆核电站技术的基础知识和工程实践，是一本实用的工程技术类图书，可供从事压水堆核电站设计、安装调试、运行维护的工程技术人员使用，也可作为大专院校热能动力与自动化专业的教科书和压水堆核电站热工自动化专业的培训教材。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

压水堆核电站过程控制系统/庞松涛主编. —北京: 中国电力出版社, 2014. 4

(发电厂热工自动化技术丛书/孙长生主编)

ISBN 978-7-5123-5629-0

I. ①压… II. ①庞… III. ①压水型堆-核电站-过程控制-控制系统 IV. ①TM623.91

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 041401 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街19号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

\*

2014年4月第一版 2014年4月北京第一次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 21印张 500千字

印数 0001—3000册 定价 66.00元

## 敬告读者

本书封底贴有防伪标签，刮开涂层可查询真伪  
本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

# 《发电厂热工自动化技术丛书》

## 主 编 单 位

丛书组织编写单位：中国自动化学会发电自动化专业委员会、  
电力行业热工自动化技术委员会

丛书主编单位：国网浙江省电力公司电力科学研究院、  
中国电力企业联合会科技发展服务中心

各分册主编单位：

第一册 《热工自动化系统及设备基础技术》

——华北电力科学研究院有限责任公司

第二册 《汽轮机热力过程控制系统》

——神华国华(北京)电力研究院有限公司

第三册 《锅炉热力过程控制系统》

——国网湖南省电力公司电力科学研究院

第四册 《单元机组及厂级控制系统》

——广东电网公司电力科学研究院

第五册 《脱硫、脱硝、公用及辅助控制系统》

——广东电网公司电力科学研究院

第六册 《燃气轮机发电机组控制系统》

——中国华电集团电气热控技术研究中心、  
国网浙江省电力公司电力科学研究院、  
江苏华电戚墅堰发电有限公司等

第七册 《压水堆核电站过程控制系统》

——大亚湾核电运营管理有限责任公司、  
中广核运营有限公司

第八册 《热工自动化系统安装调试技术》

——浙江省火电建设公司、  
国网浙江省电力公司电力科学研究院、  
浙江省电力建设有限公司等

第九册 《热工自动化系统检修维护技术》

——国网浙江省电力公司电力科学研究院等

第十册 《热工过程技术管理与监督》

——国网浙江省电力公司电力科学研究院等

第十一册 《热控系统典型故障分析处理与预控》

——国网浙江省电力公司电力科学研究院等

## 《发电厂热工自动化技术丛书》

### 审 委 会

主 任 金耀华  
副主任 黄世强 金 丰 许继刚  
委 员 段 南 王利国 仝 声 胡文斌 沈丛奇  
毕诗芳 盛建华 吴革新 叶江琪

### 编 委 会

主 编 孙长生 朱北恒  
副主编 尹 淞 尹 峰  
编 委 李劲柏 刘武林 岳建华 陈世和 骆 意  
章素华 施可登 孙 耘 张秋生 项 谨  
王建强 黄 勃

## 《压水堆核电站过程控制系统》

### 编 审 人 员

主 编 庞松涛  
副主编 黄世强 崔国华 王国云 孙长生  
参 编 李明钢 张允炜 犹代伦 黄文郁 杨新民  
刘立华 李 勇 纪庆泉 王 东 封文刚  
孙志峰 高 巍 季松棣 沙洪伟 张国财  
刘 军 陈 科 浦 黎 况德军 王耀刚  
张薇薇 王宝刚 卢 宁 付敬强 许少志  
陈绍辉 靳文金  
主 审 马 蜀

发电厂热工自动化技术丛书

压水堆核电站过程控制系统

## 序

热工自动化系统在发电厂机组安全稳定运行中的地位已不言而喻。热工自动化专业技术从主体上涉及热控系统设计、安装、调试、运行维护、检修和技术管理方方面面。因此不断提高发电厂热工专业技术人员的技术素质与管理水平，是发电企业的一项重要工作。

热工专业人员既要有扎实的专业理论基础，又要有丰富的专业实践经验，同时还要求有一定的热力系统知识。因此，热工专业知识的掌握，应该是基础理论联系实际经验、热力过程结合控制系统设备的渐近过程。随着技术的发展和新建机组的不断增加，新老电厂的热工专业人员都面临着专业知识和技术素质再提升的需求。

为了给热工专业人员提供系统、完整、实用、可操作、案例丰富的教材，推动热工专业培训工作的深化，造就业务精湛娴熟的专业人才队伍，电力行业热工自动化技术委员会根据专业知识的要求，组织编写了本套《发电厂热工自动化技术丛书》。丛书汇集了一批热爱自己的事业、立足岗位、善于吸取前人经验、勤于钻研、勇于实践的行业资深前辈、热工专家和现场技术人员的集体智慧。尤其可贵的是，在专业技术竞争激烈的今天，他们将自己长期用心血与汗水换来的宝贵经验，无私地奉献给了广大读者，相信本套丛书一定会给广大电力工作者和读者带来启发和收益。

希望本套丛书的出版，能推动热工专业运行、维护、检修及管理人员学习专业知识、深入技能培训进而提升专业人员技术水平和解决生产过程实际问题的能力，涌现出更多的热工专业技术人才。为强健我国热工自动化人才队伍，在保证发电机组安全稳定、经济、节能环保运行中发挥作用，为国民经济的增长与繁荣作出贡献。

中国大唐集团公司副总经理  
电力行业热工自动化技术委员会主任委员

二〇一四年二月二十日

## 前 言

随着科学技术的发展、机组容量不断增大，热工技术日新月异，热工自动化系统已覆盖到发电厂的各个角落，其技术应用水平和可靠性决定着机组运行的安全经济性。同时，热工自动化技术及设备的复杂程度不断提高，新工艺、新需求、新型自动化装置系统层出不穷，对热工专业人员掌握测量和控制技术提出了更高要求。新建机组数量的不断增加伴随着对热工人员需求的不断上升，又对热工专业的专业知识和运行维护能力提出了更高层次的要求。因此提高热工自动化系统的技术水平与运行可靠性，以人为本，通过加强热工人员的技术培训，提高热工人员的技术素质，是热工管理工作中急需的，也是一项长期的重要工作。

为了推动热工培训和技能竞赛工作的开展，协助各集团做好热工专业的技术培训工作，提供切合实际的系统培训教材，根据金耀华主任委员的意见，由电力行业热工自动化技术委员会主持、浙江省电力公司电力科学研究院和中国电力企业联合会科技服务发展中心牵头，华北电力科学研究院有限公司、神华国华（北京）电力研究院有限公司、湖南省电力公司电力科学研究院、广东电网公司电力科学研究院、中国华电集团电气热控技术研究中心、大亚湾核电运营管理有限责任公司、浙江省火电建设公司、江苏华电戚墅堰发电有限公司、华电杭州半山发电有限公司、浙江浙能嘉兴发电有限公司、浙江萧山发电厂、浙江浙能金华燃机发电有限责任公司等单位参加，编写了本套丛书，这套丛书主要有以下特点：

(1) 热工自动化系统及设备与热力系统融为一体，便于不同专业人员的学习，加深学习过程中的理解。

(2) 由浅入深，内容全面，包含了燃煤、燃气、核电机组，概括了火力发电厂的整个热力系统、热工过程控制设备与系统、安装调试与检修运行维护、热工监督与管理和故障分析处理技术。

(3) 按主设备的划分进行编写，适合发电厂热工专业因分工不同而开展的培训需要。

本丛书主要从应用的角度进行编写，作者均长期工作在电力建设和电力生产的第一线，不仅总结、提炼和奉献了自己多年来积累的工作经验，还从已发表的大量著作、论文和互联网文献中获得许多宝贵资料和信息进行整理并编入本丛书，从而提升了丛书的科学性、系统性、完整性、实用性和先进性。我们希望丛书的出版，有助于读者专业知

识的系统性提高。

在丛书编写工作的启动与丛书编写过程中，参编单位领导给予了大力支持，众多专家在研讨会与审查会中提出了宝贵的修改意见，使编写组受益良多，在此一并表示衷心感谢。

最后，特别感谢浙江省电力公司电力科学研究所和中国电力联合会科技发展服务中心，没有他们的支持，也就没有本套丛书的成功出版。

《发电厂热工自动化技术丛书》编委会

2014年2月



## 编者的话

2010年初,电力行业热工自动化技术委员会提出编写《热工自动化技术丛书》,考虑我国核电站装机容量的迅速发展,将《压水堆核电站过程控制系统》作为其中的第七分册。

在电力行业热工自动化技术委员会的组织下,大亚湾核电运营管理有限责任公司承接了本书的编写重任,成立了《压水堆核电站过程控制系统》编写组。编写组经过仔细斟酌,多次讨论,决定将写作重点放在与常规火电厂测量、控制和保护区别较大的核岛。另外,鉴于核安全的敏感性和重要性,核电站的运行技术规范管理和热工专业的技术管理也非常有特色,在书中一并作了介绍,供电力行业热控同行借鉴。

为了帮助读者更好地理解核电站的过程控制系统,本书的第一章介绍了核能的基础知识、压水堆核电站的工艺流程和反应堆的不同运行模式,第二章和第三章主要介绍了基于核电站最终安全分析报告的仪控系统设计基准及仪控设备分级的相关理念;第四章主要介绍了与反应堆反应性控制相关的长棒控制系统和硼水补给系统;第五章和第六章主要介绍了反应堆保护和过程控制系统;第七章介绍了核电站特殊测量仪表系统,包括堆外和堆内核测量系统及专用的化学仪表;第八章对核电站的常规岛控制系统做了简单介绍;鉴于计算机技术的迅猛发展,第九章介绍了西门子DCS控制在岭澳核电站二期的应用;第十章介绍了核电站应急电源系统;在本书的最后一章,介绍了核电站的核安全仪控技术管理,给电力行业同行作为参考和借鉴。另外,编写组精心挑选了部分规范及压水堆核电站过程控制系统故障分析处理案例,以帮助读者快速理解和学习每章的知识,掌握压水堆核电站仪表控制技术。

本书介绍的压水堆核电站仪表控制技术以20世纪80年代从法国引进的大亚湾核电站作为参考,并力求抽象成通用的仪表控制技术和术语,但鉴于水平所限,书中的专业技术和术语可能与国内其他核电站略有不同,请读者见谅。

本书是在学术造诣精深,经验丰富的四位资深专家庞松涛、黄世强、崔国华和王国云的组织和详尽指导下编写而成。由王国云总体统筹协调参编单位的编写任务,确定全书框架和各章节内容,负责书稿的组织编排、裁剪完善、拾遗补缺以及书稿的技术把关。全书共分十一章,第一章、第二章由王国云编写,刘立华校核;第三章由李勇、纪庆泉提供主要资料并编写,王东负责校核;第四章由封文刚编写、孙志峰校核;第五章由陈绍辉编写、黄文郁校核;第六章由付敬强编写、犹代伦校核,第七章由高巍、季松

棣、沙洪伟编写，张国财、刘军、陈科校核；第八章由陈科编写、浦黎负责校核；第九章由王耀刚、张薇薇编写，杨新民、卢宁、李明钢、况德军校核；第十章由许少志编写，靳文金校核；第十一章由黄文郁、刘立华编写、王国云校核；此外，张允炜、黄文郁、杨新民先生负责全书技术内容的平衡；孙长生主持了全书结构框架、书稿内容的讨论、审查、修改完善和部分章节内容的补充编写。

本书由中广核运营有限公司副总工程师马蜀主审。

本书编写过程，得到了各参编单位领导的大力支持，参考了大量的的学术论文、研究成果、规程规范和收集的资料，电力行业热工自动化技术委员会专家们在审查中提出了许多宝贵意见，在此一一表示感谢。

最后，鸣谢参与本书策划和幕后工作人员！存有不足之处，恳请广大读者不吝赐教。

**《压水堆核电站过程控制系统》编写组**

2014年2月

## 目 录

序	1
前言	
编者的话	
<b>第一章 核能发电基础</b> .....	1
第一节 概述.....	1
第二节 压水堆核电站简介 .....	12
<b>第二章 仪控系统设计基准</b> .....	25
第一节 概述 .....	25
第二节 反应堆保护系统与安全停堆仪表系统设计基准 .....	30
第三节 反应堆主要控制系统设计基准 .....	42
<b>第三章 压水堆核电站仪控设备分级</b> .....	48
第一节 设备分级 .....	48
第二节 设备鉴定 .....	53
<b>第四章 反应性控制</b> .....	64
第一节 反应堆长棒控制系统 .....	65
第二节 反应堆硼和水补给系统 .....	86
<b>第五章 反应堆保护系统</b> .....	91
第一节 概述 .....	91
第二节 反应堆保护信号 .....	96
第三节 反应堆保护系统工作原理.....	119
第四节 反应堆保护系统的周期试验.....	124
第五节 机组启停过程保护系统的运行与案例分析.....	130
<b>第六章 核岛过程控制系统</b> .....	135
第一节 控制系统性能必须遵守的评价准则.....	135
第二节 一回路平均温度控制系统.....	136
第三节 稳压器压力和水位控制系统.....	140
第四节 蒸汽发生器水位控制系统.....	148

第五节	汽轮机旁路排放系统 (GCT)	160
第六节	经验反馈	165
<b>第七章</b>	<b>核电站特殊测量仪表系统</b>	<b>167</b>
第一节	堆外中子测量系统	167
第二节	堆内仪表测量系统	190
第三节	核电站专用化学仪表	204
<b>第八章</b>	<b>常规岛控制系统</b>	<b>212</b>
第一节	概述	212
第二节	汽轮机调节系统 (GRE)	213
第三节	汽轮机保护系统	229
第四节	常规岛其他控制系统	233
<b>第九章</b>	<b>DCS 控制技术在压水堆核电站的应用</b>	<b>240</b>
第一节	岭澳二期仪控系统概述	240
第二节	TXP 平台架构及功能概述	243
第三节	TXS 平台架构及功能概述	252
第四节	DCS 环境下的反应堆保护系统周期试验	263
<b>第十章</b>	<b>核电站应急电源系统</b>	<b>272</b>
<b>第十一章</b>	<b>核安全规范及仪控技术管理</b>	<b>286</b>
第一节	核安全	286
第二节	核电站运行技术规范	292
第三节	核电站主要技术管理	301
<b>缩略语</b>		<b>311</b>
<b>附录</b>	<b>重大核事故简介</b>	<b>314</b>
<b>参考文献</b>		<b>324</b>

# 核能发电基础

火力发电厂利用煤和石油发电，水力发电厂利用水力发电，而核电站是利用原子核内部蕴藏的核能量产生电能的发电站。

核电站指用铀、钚等作核燃料，在核反应堆中发生特殊形式的“燃烧”——裂变，使核能转变成热能，用来加热高压下的水，在蒸汽发生器内产生蒸汽。蒸汽通过管路进入汽轮机，推动汽轮发电机发电，使机械能转变成电能。因此核电站主要分为两部分：一部分是利用核能产生蒸汽的核岛，包括反应堆装置和一回路系统；另一部分是利用蒸汽发电的常规岛，包括汽轮发电机系统。

随着人类社会的不断进步，世界能量消耗快速增长。随着化石能源燃料（如石油、煤炭、天然气等）的逐渐枯竭和高污染特性，核能作为清洁能源的一种成为人类最具希望的未来能源，受到世界的普遍关注，越来越受到人们的重视。

## 第一节 概 述

### 一、核能发电史

1895年德国物理学家伦琴发现了X射线，1902年居里夫人发现了放射性元素镭；1905年爱因斯坦提出质能转换公式，1938年德国科学家奥托哈恩用中子轰击铀原子核，发现了核裂变现象；1942年12月2日美国芝加哥大学成功启动了世界上第一座核反应堆，1945年8月6日和9日美国先后在日本的广岛和长崎投放两颗原子弹；自1951年12月美国实验增殖堆1号（EBR-1）首次利用核能发电，1954年苏联建成了世界上第一座核电站（nuclear power plant）——奥布灵斯克核电站，世界核电至今已有60多年的发展历史。越来越多的核电站建成，截止到2012年，全世界核电站运行机组有440多台，其发电量约占世界发电总量的16%。核能已经由陌生渐渐被人们所熟知，核能的巨大能量也被开发的越来越全面。

过去一提到“核电”，人们马上会联想到可怕的核辐射。经过科学家和工程技术人员的长期努力，核电的安全性已有足够可靠的保障，成为一种强大、可控、清洁而又足够安全的能源，值得大力发展。

#### （一）核能发电优劣

核电站是利用核裂变（nuclear fission）或核聚变（nuclear fusion）反应所释放的能量产生电能的发电厂。目前商业运转中的核电站都是利用核裂变反应而发电。

##### 1. 核能发电优点

（1）核电是高效能源，消耗资源少。火力发电厂利用化石燃料的燃烧所释放出的化学能来发电，核电站则利用核燃料的核裂变反应所释放的核能来发电。而核燃料能量密度比起化

石燃料高上几百万倍，在核裂变过程中，1g 铀 235 裂变所产生的能量相当于  $2.7 \times 10^6$  g 煤燃烧时所放出的能量，所以核电站所消耗的核燃料比同样功率的火电厂所消耗的化石燃料体积要小得多，运输与储存成本要低得多。例如，一座百万千瓦级的煤电厂每年要消耗约 200~300 万 t 原煤，相当于每天要用一列 40 节车厢的火车为它拉煤。而一座同样功率的核电站每年仅需补充约 30t 含量为 3% 铀的低浓缩铀燃料，低浓缩铀燃料仅为煤的十万分之一，一航次的飞机或一辆重型车即可完成运送，相比可见核能的高效是无与伦比的。

(2) 核电是清洁能源，环境影响小。目前的环境污染问题，大部分是由于使用化石燃料引起的。化石燃料燃烧后会排放加重地球温室效应的巨量的二氧化碳以及二氧化硫、氮氧化物和飘尘等污染物到大气中，例如，一座百万千瓦级的煤电厂每年烧掉 200 万~300 万 t 原煤，会排出 20 多万吨煤渣，往空气中排放 600~700t 二氧化碳，5 万~10 万 t 二氧化硫，2 万~3 万 t 氮氧化物，3000~6000t 一氧化碳，以及 2000~3000t 颗粒物。除此之外，还会排放约 400 万 t 的重金属，这些污染物不仅直接危害人体健康和农作物生长，还导致全球气温升高，酸雨频降（二氧化硫和氮氧化物造成）和大气层的“温室效应”，破坏生态平衡，对人类的生存环境造成极大的威胁和损害。国际气候委员会报告指出：人类现在这样排放二氧化碳的速度不控制的话，到 2100 年，地球升高的温度会使海平面升高约 1m。其结果不但是大片海岛和浅滩被淹没，更严重的是全球气候变暖将引发干旱、洪涝、海啸等各种自然灾害，带来各种新型疾病。虽然各国已经为此提出了各种限制措施，但是，一些发展中国家要发展，无论发展什么行业，都需要能源的支持，少量的排放聚在一起就成为大的污染。而比较起来，核电站设置了层层屏障，基本上不排放污染环境的物质，就是放射性污染也比烧煤电站少得多。据统计，核电站正常运行的时候，一年给居民带来的放射性影响，还不到一次 X 光透视所受的剂量。因此核电环境污染影响小，是清洁能源，从而保护了人类赖以生存的生态环境。

(3) 核电发电成本低。火力发电厂每度电的成本是由建造折旧费、燃料费和运行费这三部分组成。其中建造折旧费和燃料费是主要的，核电站由于特别考究安全和质量，建造费高于火力发电厂，一般要高出 30%~50%，但燃料费则比火力发电厂低得多。据测算，火力发电厂的燃料费约占发电成本的 40%~60%，而核电站的燃料费则只占 20%~30%。经验证明，核电站的发电成本要比火力发电厂低 15%~50%。

此外核燃料不是一种日常生活燃料，受经济等因素的影响小，因此核能发电的成本较少受国际经济形势影响，故发电成本较其他发电方法为稳定。

(4) 核电是安全能源，发生事故的可能性小。核电是世界上最安全的行业之一。全世界 50 年来 500 多座核电反应堆在其总共 1 万 2 千多堆年的运行历史中，基本上是安全正常的，虽然有 1979 年美国三里岛压水堆核电站事故和 1986 年苏联切尔诺贝利石墨沸水堆核电站事故，以及日本 2010 年福岛事故，但这三次大事故都是由于人为因素或天灾引起。20 世纪七八十年代堆芯熔化的严重事故也发生过两起，但进入 21 世纪以来此类事故也未见有报道。随着压水堆的进一步改进，核电站的安全性能将会更好，发生事故的可能性更小。

化石燃料释放的污染物也将使地球不堪重负，虽然只利用了它一小部分的能量，却带来了更多的环境问题。在全球限制温室气体的大环境下，需要开发更多的清洁能源，而发展核能几乎被认为兼顾发展经济和减少温室气体排放的唯一途径，以有效地削减主要污染物排放量，改善当地的环境空气质量，创造良好的生态环境。

## 2. 核能发电缺点

(1) 存在安全问题。虽然核能的发展有许多优点，但是普通人对核电站的认识基本偏向负面。人们担心的核电站容易发生最大的问题就是安全问题。核电站的反应器内有大量的放射性物质，如果在事故中释放到外界环境，会对生态及民众造成伤害。而且核电站产生的高低阶放射性废料，或者是使用过的核燃料，虽然所占体积不大，但都具有放射性，必须谨慎处理。

(2) 核电站投资成本太大，电力公司的财务风险较高。发展核能的投资成本巨大，所以电力公司的财务风险也就大大提高。若建造一个核电站未能成功运行或失败，那损失非常大。而且一些发展中国家并不是不想发展核能，但迫于经济等原因，计划就会被搁置，这就造成了世界能源分布不均。

(3) 核电站较不适宜做尖峰、离峰之随载运转。虽没有化石燃料场污染物多，但核电站热效率较低，因而比一般化石燃料电厂排放更多废热到环境里，故热污染较严重。

## (二) 核反应

### 1. 核能

核能（或称原子能）是通过转化其质量从原子核释放的能量，符合阿尔伯特·爱因斯坦的方程，即

$$E=mc^2$$

式中  $E$ ——能量；

$m$ ——质量；

$c$ ——光速常量。

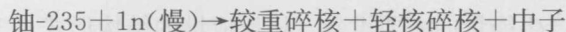
这里光速常量是一个很大的数值，我们可以看出，即使很小的质量的物质，也可以发出巨大的能量。核能有三种核反应：

(1) 核裂变。打开原子核的结合力。

(2) 核聚变。原子的粒子熔合在一起。

(3) 核衰变。自然的慢得多的裂变形式。

目前，正在运转的核电站所使用的是铀 235。用慢中子轰击铀 235 时，就会发生裂变反应：

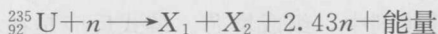


用爱因斯坦公式计算：在核裂变过程中，每 1g 参加反应的铀-235 可以放出约  $8 \times 10^7$  kJ 的能量，而每 1g 煤完全燃烧时所放出的热量约为 30kJ。也就是说，1g 铀-235 裂变所产生的能量相当于  $2.7 \times 10^6$  g 煤燃烧时所放出的能量，可见核能是多么巨大。

### 2. 链式反应

核能发电的能量来自可裂变材料（核燃料）进行裂变反应所释放的裂变能。能发生核裂变的燃料有铀-235、铀-238、钚-239 等重元素。裂变反应是指这些重元素在中子作用下分裂为两个碎片，同时放出中子和大量能量的过程，见图 1-1。反应中，可裂变物的原子核吸收一个中子后发生裂变，并放出两三个中子。

$^{235}_{92}\text{U}$  裂变反应式为



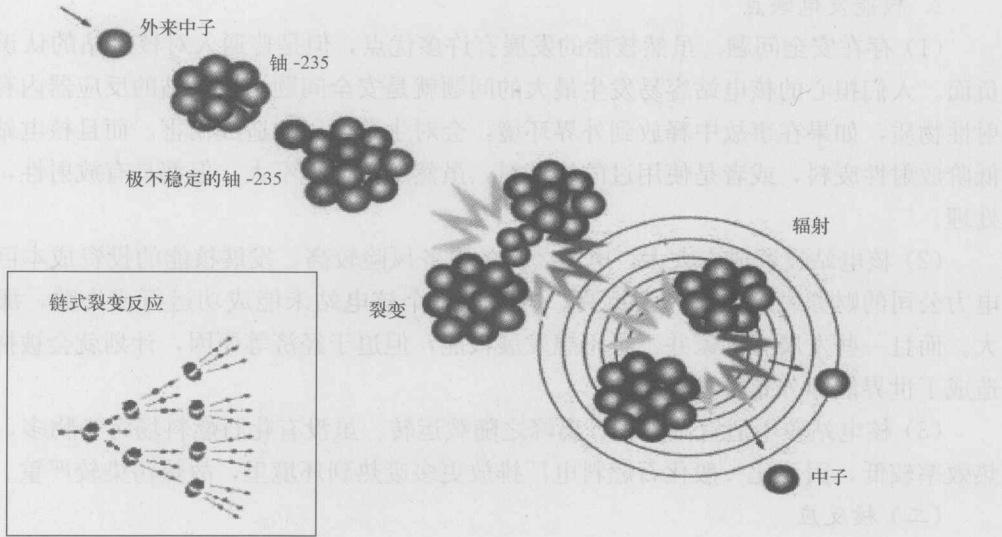


图 1-1 铀-235 裂变图

其中  $X_1$  和  $X_2$  表示裂变碎片。 $^{235}_{92}\text{U}$  裂变反应时, 会形成 60 余种不同的碎片, 这些碎片通过  $\beta$  衰变产生约 250 种不同的核素, 称为裂变产物。

对于  $^{235}_{92}\text{U}$ , 每次裂变平均放出 2.43 个中子, 每次裂变反应释放约 207MeV 能量。绝大部分中子是在裂变的瞬间放出的, 称瞬发中子, 另有约 0.65% 是由裂变产物在衰变过程放出来的, 称为缓发中子。缓发中子虽然份额很小, 但由于它的平均寿命长达 12s, 因而增加了每代中子的平均寿命, 使得反应堆功率变化速度变慢, 从而有可能对裂变反应进行控制。

在裂变反应中放出的中子与其他可裂变核碰撞, 会进一步引起新的核裂变, 从而放出第二代中子。如果反应如此不断地继续下去, 这个过程就称为链式裂变反应, 简称链式反应。链式反应如果不依靠外界补充中子而能持续下去, 则称为自持链式反应。

### 3. 核反应堆

核反应堆是利用易裂变物质, 使之发生能持续进行可控的自持链式裂变反应的一种装置, 是核电站的核心和产生能量的主要设备。核反应堆的结构形式是千姿百态的, 它根据燃料形式、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类型结构形式的反应堆。目前世界上有大小反应堆上千座, 其分类也是多种多样。

(1) 按能谱分, 有由热能中子和快速中子引起裂变的热堆和快堆。

1) 热堆。利用原子核反应原理建造的反应堆需将裂变时释放出的中子减速后, 再引起新的核裂变, 由于中子的运动速度与分子的热运动达到平衡状态, 这种中子被称为热中子。堆内主要由热中子引起裂变的反应堆叫做热中子反应堆 (简称热堆)。它是用慢化剂把快中子速度降低, 使之成为热中子 (或称慢中子), 再利用热中子来进行链式反应的一种装置。由于热中子更容易引起铀-235 等裂变, 这样, 用少量裂变物质就可获得链式裂变反应。慢化剂是一些含轻元素而又吸收中子少的物质, 如重水、铍、石墨、水等。热中子堆一般都是把燃料元件有规则地排列在慢化剂中, 组成堆芯。链式反应是在堆芯中进行的。



反应堆必须用冷却剂把裂变能带出堆芯。冷却剂也是吸收中子很少的物质。热中子堆最常用的冷却剂是轻水（普通水）、重水、二氧化碳和氦气。已经实用化的核反应堆有轻水堆和重水堆〔重水是氢的同位素氘（重氢）同氧的化合物〕之别。目前使用的多为轻水堆。在轻水堆中，水被兼作减速（和石墨一样起控制反应速度的作用）和冷却用。轻水堆又可分为压水型的和沸（腾）水型的，现在大多数核电站用的都是压水型的。

2) 快堆。普遍使用的压水堆主要以铀-235为燃料，慢中子轰击铀-235，使其裂变成2~3个快中子和钡-239，然后中子继续轰击铀-235，使得裂变反应能够持续进行。在热中子反应堆中，产生的钡-239的数量不足以抵偿消耗的铀-235。只有利用快中子来维持链式反应，使新产生的可裂变材料多于消耗的裂变材料。这种主要由快中子来引起裂变链式反应的反应堆，叫做快中子反应堆（简称快堆）。快堆中常用的核燃料是钚-239，而钚-239发生裂变时放出来的快中子会被装在反应区周围占铀大部分的铀-238吸收，又变成钚-239。这就是说，在堆中一边消耗钚-239，一边又使铀-238转变成新的钚-239，且新生的钚-239比消耗掉的还多，从而使堆中核燃料变多。反应开始循环持续下去，使铀的利用率提高到60%~70%，核燃料快速增殖，所以这种反应堆又称快速增殖堆。

(2) 按冷却剂分有轻水堆、重水堆、气冷堆和钠冷堆。

1) 轻水堆。轻水堆是以水（经净化的普通水，也可称为太空水或蒸馏水）或汽水混合物作为冷却剂和慢化剂的反应堆。与重水相比，轻水有廉价且减速效率很高的长处。堆内载出核裂变热能的方式可分为压水反应堆和沸水反应堆两种。

压水反应堆是一回路的冷却水在15~16MPa的高压下，通过反应堆容器循环运行，一回路温度达320℃左右，仍保持液体而不沸腾的反应堆。其热交换器把一次冷却系（取出堆芯产生的热）和二次冷却系（发生送往涡轮机的蒸汽）完全隔离开来。压水堆以低浓二氧化铀作燃料，净化的纯轻水作冷却剂和慢化剂。一回路的冷却剂将堆芯发出的热量通过蒸汽发生器把热量传递给二回路水，并产生蒸汽推动汽轮发电机发电。压水堆的燃料浓度为3%，以锆合金作包壳，每200多根燃料元件组装成方型截面燃料组件，安装在堆芯中。

沸水反应堆允许一回路水在堆内发生一定程度的沸腾，其特点是将水蒸气不经过热交换器直接送到汽轮机，从而防止了热效率降低。沸水堆本体由反应堆压力容器、堆芯、堆内构件、汽水分离器、蒸汽干燥器、控制棒组件及喷泵等部分组成。堆芯处在压力容器中心，由若干单元组成，每单元有四盒燃料组件和一根十字形控制棒。每盒燃料组件上部靠上栅板定位，下部安放在下栅板上，并坐在控制棒导向管顶部和燃料支撑杯中。燃料组件由燃料元件、定位格架及元件盒组成。燃料元件以8×8排列，采用二氧化铀燃料芯块，以锆-2合金做包壳，内部充氦气，端部加端塞焊接密封。堆内构件包括上栅板、下栅板、控制棒导向管及围板等部件。汽水分离器用来将蒸汽和水分离开来，蒸汽通过蒸汽干燥器除湿，以达到汽轮发电机的工况要求。

2) 重水堆。用重水即一氧化二氘（D<sub>2</sub>O）作为慢化剂的核反应堆被称为重水反应堆，或简称为重水堆。现在的反应堆几乎都利用热中子，但这些热中子必须用慢化剂减速，才能使这些中子参与更多其他原子核的裂变，因此慢化剂是反应堆不可缺少的组成部分。虽然普通的轻水在一些反应堆（如轻水反应堆）中也可以作为中子慢化剂，但由于轻水能吸收中子