

◎ 长江设计文库

# 地下核电厂概论

INTRODUCTION TO UNDERGROUND  
NUCLEAR POWER PLANT

钮新强 罗琦 等著

中国原子能出版社

◎ 长江设计文库

# 地下核电厂概论

INTRODUCTION TO UNDERGROUND  
NUCLEAR POWER PLANT

钮新强 罗琦 等著



中国原子能出版社

## 图书在版编目 (CIP) 数据

地下核电厂概论 / 钮新强等著.  
—北京: 中国原子能出版社, 2016.7  
ISBN 978-7-5022-7408-5

I. ①地… II. ①钮… III. ①地下—核电厂  
IV. ① TM623

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 165963 号

## 内 容 简 介

本书作者在总结国内外小型地下核电厂实验堆设计、建造技术以及大型地下工程设计、建设经验的基础上, 充分利用我国自主设计建造的 600 MW 级核电厂成熟技术, 以国内最新投产的某核电厂反应堆为基础, 对地下核电厂建设关键技术进行了大量的设计和研究工作, 针对当前国内尚缺乏地下核电方面系统专著的情况, 撰写了本书。其目的是系统论述地下核电厂成套技术, 使其能得到广泛应用。

本书从地下核电厂选址、总体布置、系统及设备、核岛洞室群稳定性分析、安全分析与评价、严重事故对策分析、辐射防护与环境管理、消防及人工环境、施工技术、概念设计及经济性初步分析等方面系统地介绍了地下核电厂关键技术, 首次推出了我国具有完全自主知识产权的地下核电厂三代新机型 CUP600 技术方案; 在此基础上, 研究论证了将百万千瓦级大型核电机组置入地下也是可行的; 书中同时指出了发展大型地下核电面临的挑战, 对水电核电组合进行了初步分析与探讨。希望本书能对地下核电厂的后续研究和工程实践提供有益借鉴。

## 地下核电厂概论

出版发行 中国原子能出版社 (北京市海淀区阜成路 43 号 100048)

责任编辑 孙凤春

装帧设计 崔 彤

责任校对 冯莲凤

责任印制 潘玉玲

印 刷 保定市中国画美凯印刷有限公司

经 销 全国新华书店

开 刷 787mm×1092mm 1/16

印 张 22.5

字 数 587 千字 彩 插 8

版 次 2016 年 7 月第一版 2016 年 7 月第一次印刷

书 号 ISBN 978-7-5022-7408-5 定 价: 118.00 元

网址: <http://www.aep.com.cn>  
发行电话: 010-68452845

E-mail: [atomep123@126.com](mailto:atomep123@126.com)  
版权所有 侵权必究

## 各章撰稿人名单

### 第1章

钮新强 罗琦 赵鑫 张文其

李庆 喻飞 苏毅 张涛

### 第2章

赵鑫 钮新强 张涛 苏毅 李翔 李满昌

### 第3章

吴永锋 杨启贵 李茂华 喻飞 肖华

### 第4章

钮新强 赵鑫 周述达 唐涌涛

刘海波 喻飞 韩前龙 肖韵菲

### 第5章

罗琦 李庆 隋海明 沈云海 杨启贵

苏毅 瓮松峰 刘海波 赖建永 喻飞

李娜 韩前龙 苟拓

### 第6章

钮新强 周述达 张志国

## 各章撰稿人名单

### 第7章

张文其 李 翔 周铃岚 刘定明 李 峰 党高健

### 第8章

李 庆 李 翔 孔祥程 陈 彬 邓纯锐

### 第9章

杨启贵 刘海波 马兴均 万艳雷 张 涛 徐成剑

施华堂 李洪斌 吕焕文 肖 华 景福廷 高 峰

### 第10章

钮新强 江宏文 查显顺 刘海波

### 第11章

杨启贵 刘立新 苏利军 李 锋

### 第12章

钮新强 赵 鑫 李 翔 刘海波 李满昌

喻 飞 华 夏 李文俊 张 涛

### 第13章

赵 鑫 钮新强 李建华 李文俊

# 序一<sup>①</sup>

能源是人类进化、社会进步和经济发展的物质基础和动力。在全球工业化的进程中，大量使用煤炭等化石能源严重地污染了大气环境，形成的温室效应导致全球气候变暖，已经引起了世界各国的高度重视。清洁能源的利用过程不排放废气废物等污染物，是绿色低碳的能源。控制和减少化石能源消耗，大力发展清洁能源，已经成为全球共识。

清洁能源包括水能、风能、太阳能、核能、生物质能等。然而，水能资源总量有限，风能、太阳能等能源受到自然环境等因素的影响，能量密度低，也不稳定。

核能的能量密度高、能量释放稳定可控，是优质的、可大规模替代化石能源的清洁能源。半个多世纪以来，全世界已建成 400 多座核电站，核电在全球能源消费中的比重近 4.5%。核电的蓬勃发展，为人类持续提供着安全稳定的电力能源。然而，1986 年的切尔诺贝利核事故和 2011 年的福岛核事故，造成了严重的核放射物的泄漏，给人类和自然环境带来了严重灾害，增加了社会公众对核电的恐惧。面对这一形势，科学家和工程师正千方百计地提高核电站的核心——核反应堆及安全壳的安全度和可靠性。

由于当今水电站的厂房大部分置于地下，因此联想到地下核电厂的概念，即把核电站的反应堆置于地下。水电机组的单机容量达 70 ~ 100 万 kW，水电厂房的尺寸可以容纳第三代核电机组；因岩体和钢筋混凝土是良好的抗辐射介质，相当于为核反应堆增加了一道天然的安全屏障；即使发生核泄漏，也可以将其封闭在地下洞室内，起到防止核泄漏扩散的目的。

三峡工程右岸地下厂房布置有 6 台 70 万 kW 总计 420 万 kW 的发电机组，地下厂房最大跨度 32.6 m，长度 311.3 m，开挖高度 87.24 m，地下建筑物的总体积达 88.54 万 m<sup>3</sup>。溪洛渡水电站拥有当今世界上规模

---

<sup>①</sup>中国工程院院士陆佑楣 2016 年 6 月为本书作序。



最大的地下厂房，其左右岸地下厂房各布置有 9 台 77 万 kW 发电机组，总装机规模达 1 386 万 kW，主厂房最大宽度 31.9 m，最大长度 443.34 m，总洞挖方量达 791 万 m<sup>3</sup>。无数实践证明，地下厂房是安全可行的技术方案。当前我国沿海核电厂址基本已开发完毕，在内陆核电厂址资源有限的情况下，地下核电厂则是核电发展可取的选择。

为研究地下核电厂的可行性，长江勘测规划设计研究院和中国核动力研究设计院于 2011 年联合成立了地下核电创新研发团队，组织地下工程与核能领域的专家，跨行业合作，在国内率先启动了地下核电自主创新研究，初步论证了地下核电厂的可行性。

依托两院，中国工程院于 2013—2014 年开展了《核电站反应堆及带放射性的辅助厂房置于地下的可行性研究》重点咨询项目研究。在本项目的研究过程中，两院进行了大量的现场勘察和数值模拟计算及分析，提出了地下核电厂示范性概念设计，为该项目的研究做出了重要贡献。项目结论意见认为：地下核电厂在技术上是可行的；工程造价略有增加，处于可以接受的范围，经济上是可行的；在严重事故工况下，对防止核泄漏和放射性物质扩散有更高的可控性；同时，有效利用了山地资源，远离了人口密集地区，扩大了内陆核电站厂址选择资源，同时可提高公众对核电安全的信心；适应我国山多、人多、平地少的国情，是核电发展方式的可选选择。

两家单位在上述自主创新研究和工程院立项研究的基础上，编撰了《地下核电厂概论》一书。这是一本具有创新精神的著作，为推动地下核电厂研究和我国核电开发具有积极意义和指导作用。

陸佑楣

2016 年 6 月

## 序二<sup>②</sup>

核电是安全清洁的能源，发展核电对能源结构改进，节能减排有重大意义。但切尔诺贝利和福岛核事故使人们对核电产生疑虑，担心核事故后果带来严重、长期的环境影响。福岛核事故后，国际原子能机构提出“从设计上实际消除大规模放射性释放”，以消除核事故给环境带来的影响。为达到这一目标，除加强严重事故预防和缓解的安全措施外，要提高最后一道放射性屏障——安全壳的可靠性。切尔诺贝利核电厂由于没有安全壳，事故时大量放射性释放到周围环境，甚至随风飘到临近地区；事故后为了防止剩余放射性继续释放，在厂房外建设了一个屏蔽外壳——俗称“石棺”；福岛核电厂三道屏障不完整，相当一部分放射性穿过钢安全壳泄漏到环境。

近年来我国成功开发建设了大型地下水电工程。汶川地震表明：地下水电工程的发电装置受地震的影响小于地面，抗震性能好。采取“水核共建，因地制宜”的方针，将核电厂建设在临近水电工程的地下洞内，充分利用水电工程的基础设施，如道路、输电设施等，有利于降低核电建设的投资；天然山体或岩体可作为放射性的又一道天然屏障，防止核电事故时放射性外逸，大量的施工导洞可临时贮存放射性气体和液体，减缓以致基本上排除场外应急；天然山体或岩体还可防止外部事件，如爆炸或飞机撞击的袭击或损害；水电站的水库和水力发电装置可作为核电厂的应急水源和应急电源，极大地提高了核电厂应对极端事故的能力。此外，水力发电受季节影响较大，核电厂不受季节影响，负荷因子较高，发电能力互补，有利于提高供电的稳定性。

20 世纪 70 年代我国就有设计建造大型地下核工程的经验，为更好地利用地下资源和我国已有的地下工程设计建造技术与经验，中国工程院于 2013—2014 年开展了《核电站反应堆及带放射性辅助厂房置于地下的可行性研究》重点咨询项目研究，两家项目承担单位在此基础上编著了《地

---

<sup>②</sup>中国工程院院士叶奇蓁 2016 年 6 月为本书作序。



下核电厂概论》一书。该书从厂址选择、总体布置（包括洞体内厂房布置）、工艺系统与设备、洞室群稳定分析、安全分析与评价、严重事故对策分析、辐射防护与环境保护、消防与运行维护人员环境、施工技术等方面对地下核电厂的设计建设进行了全面研究和系统论证。总体上说，地下核电厂技术上是可行的，有关地下核电厂设计建造、运行维护的特殊问题是可以解决的。最具挑战性的是建设成本，该书对两个厂址进行了初步概念设计和经济分析，分析表明：地下工程所增加的投资在可接受范围。相信只要合理选择厂址，充分利用水电工程的基础设施，地下核电厂的经济性是可望的。

地下核电厂的建设为我国核电厂址选择多了一条途径，该书出版为核电和大型工程建设的科技工作者提供了一个新的思路，相信在“创新驱动，科技引领”方针的指引下，我国广大的科技人员会作出新的科技成就。

A handwritten signature in black ink, consisting of stylized, flowing characters that appear to be 'WJG' followed by a flourish.

2016年6月

# 前言

20 世纪六七十年代，欧洲、美洲、苏联等地区和国家为度过“能源危机”，开始大规模建设核电厂。但受限当时大型地下工程技术，考虑经济性，地面核电厂成为主流；仅挪威、瑞典、瑞士、苏联、法国等建设了具有发电功能的小型地下实验反应堆。苏联切尔诺贝利和美国三哩岛核事故后，基于提高核电安全性的考虑，美国、加拿大等国家开始研究商用地下核电厂的选址、布置方案等，但目前尚处于概念设计阶段。

日本福岛核事故揭示：核电极端事故概率极低，但后果十分严重；故人们重新审视核能的利用与发展，公众十分关注核电安全。在此背景下，借鉴水电地下工程的经验，中国工程院陆佑楣院士提出了将反应堆等涉核设施置于地下洞室，发展地下核电的设想。作者响应这一设想，考虑建设中大型商用地下核电厂更有意义，提出并组建研发团队对中大型地下核电厂建设可行性和关键技术进行系统性研究。

本书作者在总结国内外小型地下核电厂实验堆设计、建造技术以及大型地下工程设计、建设经验的基础上，充分利用我国自主设计建造的 600 MW 级核电厂成熟技术，以海南昌江核电厂反应堆为基础，对地下核电厂建设关键技术进行了大量的设计和研究工作，针对当前国内外尚缺乏地下核电方面系统专著的情况，撰写了本书。其目的是系统论述地下核电厂成套技术，使其能得到广泛应用。

本书从地下核电厂选址、总体布置、系统及设备、核岛洞室群稳定性分析、安全分析与评价、辐射防护与环境管理、严重事故对策分析、消防及人工环境、施工技术、概念设计及经济性初步分析等方面系统地介绍了地下核电厂关键技术，首次推出了我国具有完全自主知识产权的地下核电厂三代新机型 CUP600 技术方案；并在此基础上，研究论证了将百万千瓦级大型核电机组置入地下也是可行的；书中同时指出了发展

大型地下核电面临的挑战，对水电核电组合进行了初步分析与探讨。希望本书对地下核电厂的后续研究和工程实践提供有益借鉴。

本书是许多同志集体劳动的成果，依托长江勘测规划设计研究院和中国核动力研究设计院，组织有经验的专家和骨干力量完成全书的编写。钮新强和罗琦牵头进行了全书的编著，并完成对全书的统编和审定。其中钮新强、罗琦等完成了第1章的编写，钮新强、赵鑫等完成了第2、4、12、13章的编写，吴永锋、杨启贵等完成了第3章的编写，罗琦、李庆等完成了第5章的编写，钮新强、周述达等完成了第6章的编写，张文其、李翔等完成了第7章的编写，李庆、李翔等完成了第8章的编写，杨启贵、刘海波等完成了第9章的编写，钮新强、江宏文等完成了第10章的编写，杨启贵、刘立新等完成了第11章的编写。在本书撰写过程中，得到了陆佑楣院士、叶奇蓁院士、江亿院士的指导，长江勘测规划设计研究院李光华、李庆航、李书飞、刘小飞、金乾、袁博、张顺等，中国核动力研究设计院明哲东、罗英、黄伟、杨平、苏应斌、王帅、张航、邹志强、彭倩等，清华大学刘晓华、刘烨、张野等，中国长江三峡集团尚存良等专家和各专业有关人员的大力支持和帮助，在此谨向他们表示衷心的感谢。

由于时间仓促，水平有限，书中定有诸多不足，恳请读者批评指正。

著 者

2016年6月30日

# Preface

During 1960s—1970s, regions and countries such as Europe, America and the former Soviet Union struck up large-scale construction of nuclear power plants in order to overcome “energy crisis”. But at that time, due to the restriction of large-scale underground engineering technology, ground nuclear power plants were dominant in consideration of economy, and small-scale underground experimental reactors with power generation function were constructed only in Norway, Sweden, Switzerland, the former Soviet Union, France and so on. After nuclear accidents of the Chernobyl in the former Soviet Union and the Three Mile Island in America, for the purpose of improving nuclear power security, America, Canada and other countries began researching commercial underground nuclear power plants in site selection and plants layout, etc., but these are still in concept design stage by now.

The Fukushima Daiichi nuclear disaster in Japan revealed that extreme accident of nuclear power would result in extremely serious consequence although its probability is rather low. Thereafter, the utilization and development of nuclear energy was reviewed, and the general public attached great importance on nuclear power security. Under this background, by referring to underground engineering practice of hydropower, Academician Lu Youmei from the Chinese Academy of Engineering proposed to develop underground nuclear power by placing the nuclear facilities such as reactors into underground caverns. The authors responded this proposal and considered that it would be more meaningful to construct medium and large-sized commercial underground nuclear power plants, then proposed and established a research team to conduct systematic researches on feasibility and key technologies of construction of medium and large-sized underground nuclear power plants.

After summarizing domestic and foreign design and construction technology of small-scale underground nuclear power experimental reactors as well as design and construction experience of large-scale underground engineering and based on the reactor of Hainan Changjiang Nuclear Power Plant, authors have taken full advantage of mature technology of 600 MW nuclear power plant independently designed and manufactured in China, and conducted massive design and research for key techniques of underground nuclear power plant construction, and compiled this book to fill up the blank of systematic treatises about underground nuclear power both in China and abroad, thus systematically expounding complete technology of the underground nuclear power plant and enabling it to be used extensively.

This book has given a systematic illustration of the underground

nuclear power plant's key technology in the aspects of site selection, overall arrangement, system and equipment, stability analysis of nuclear island's underground caverns, safety analysis and assessment, radiation protection and environmental management, severe accidents countermeasure analysis, fire control and artificial environment, construction technology, conceptual design and preliminary economic analysis, etc. In this book, the technical scheme of the third-generation new-type CUP600 with completely independent intellectual property rights of the underground nuclear power plant was introduced for the first time, and accordingly the feasibility of placing mega-kilowatt level large nuclear power units into underground caverns was researched and demonstrated as well. In addition, the challenge for development of large underground nuclear power plants was indicated, and preliminary analysis and discussion for combination of hydropower and nuclear power was implemented. This book is expected to be an enlightenment to follow-up study and engineering practice of underground nuclear power plants.

This book is completed by a lot of experienced experts and backbones of Changjiang Institute of Survey, Planning, Design and Research and Nuclear Power Institute of China. Among them Niu Xinqiang and Luo Qi led to compile this book and complete its compilation for universal use and examination. In this book, Chapter One is done by Niu Xinqiang, Luo Qi, etc.; Chapter Two, Chapter Four, Chapter Twelve and Chapter Thirteen by Niu Xinqiang, Zhao Xin, etc.; Chapter Three by Wu Yongfeng, Yang Qigui, etc.; Chapter Five by Luo Qi, Li Qing, etc.; Chapter 6 by Niu Xinqiang, Zhou Shuda, etc.; Chapter Seven by Zhang Wenqi, Li Xiang, etc.; Chapter Eight by Li Qing, Li Xiang, etc.; Chapter Nine by Yang Qigui, Liu Haibo, etc.; Chapter Ten by Niu Xinqiang, Jiang Hongwen, etc.; and Chapter Eleven by Yang Qigui, Liu Lixin, etc. In the process of this book's writing, we received strong support and help of experts and professional staff including Academicians Lu Youmei, Ye Qizhen and Jiang Yi; Li Guanghua, Li Qinghang, Li Shufei, Liu Xiaofei, Jin Qian, Yuan Bo and Zhang Shun from Changjiang Institute of Survey, Planning, Design and Research; Ming Zhedong, Luo Ying, Huang Wei, Yang Ping, Su Yingbin, Wang Shuai, Zhang Hang, Zou Zhiqiang and Peng Qian from Nuclear Power Institute of China; Liu Xiaohua, Liu Ye and Zhang Ye from Tsinghua University; and Shang Cunliang from China Three Gorges Corporation. We hereby express our sincere gratitude to them.

Because of the limit of compilation time and relevant knowledge, defects of this book are inevitable which are waiting to be criticized and corrected by its readers.

Authors

June 30, 2016



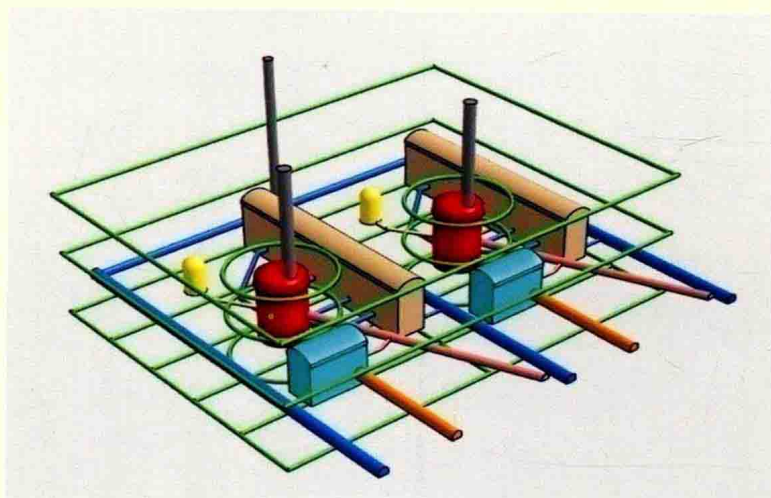


2013 年 2 月中国工程院地下核电项目启动会

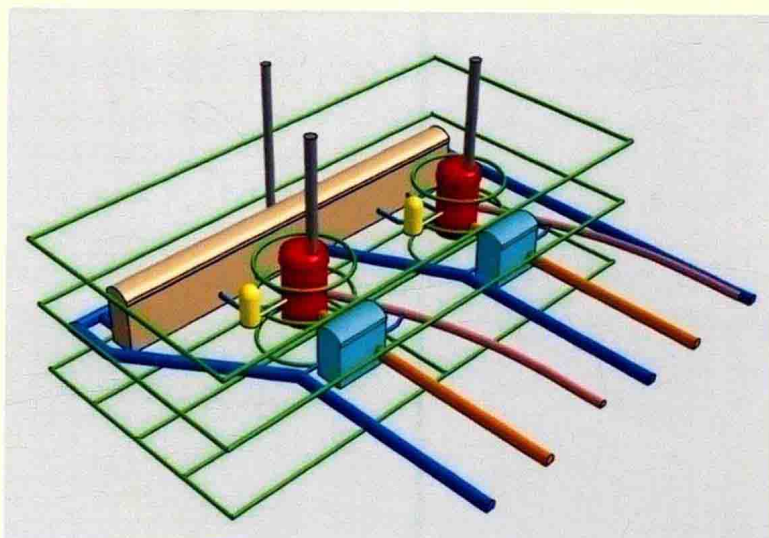


2014 年 6 月中国工程院地下核电项目结题审查会

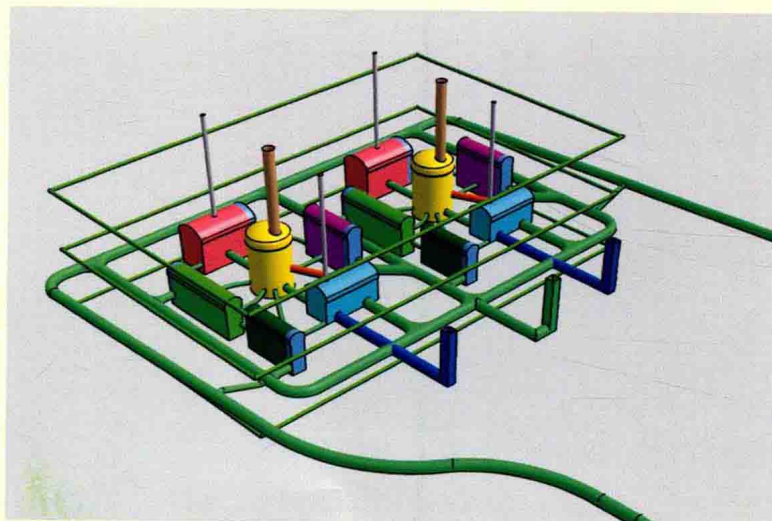




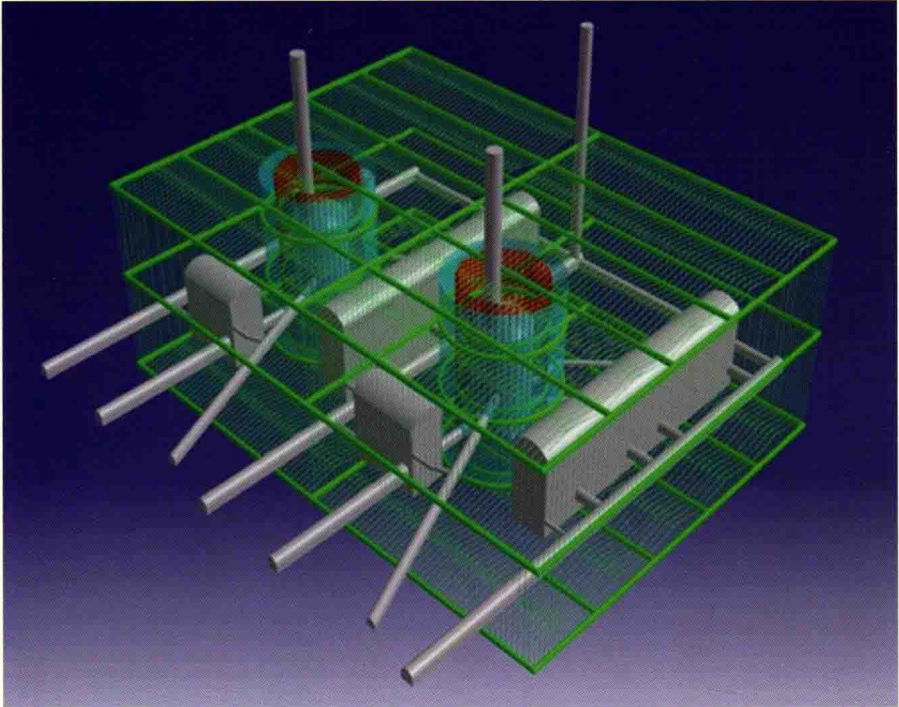
地下核岛 L 形布置方案



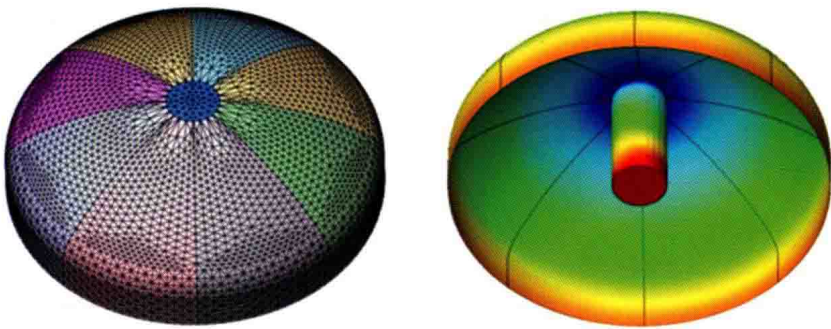
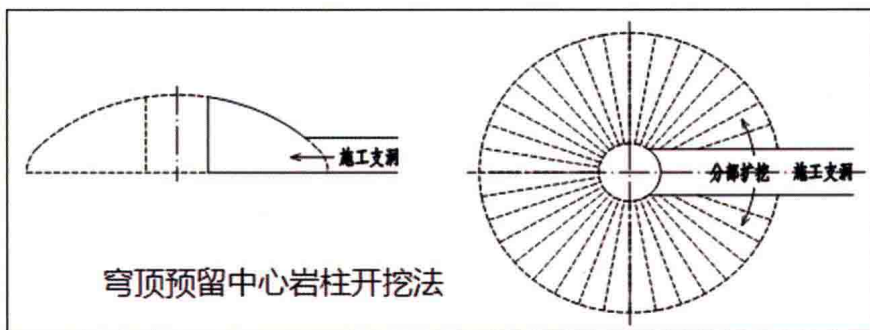
地下核岛长廊形布置方案



地下核岛环形布置方案

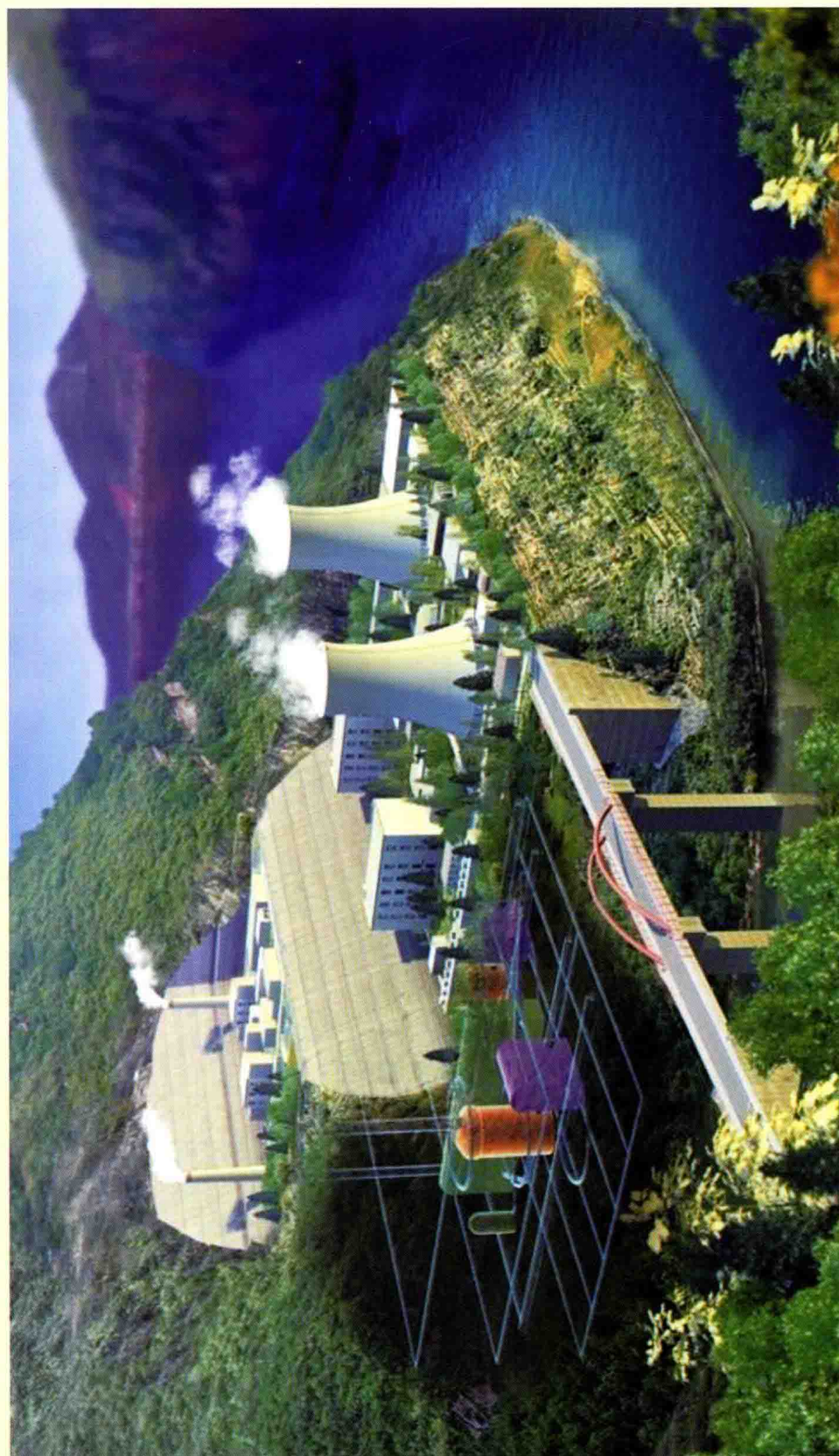


地下核电厂放射性废水防护专利技术



超大跨度穹顶施工开挖专利技术





概念设计厂址三维布置示意图