



# 新型核能技术

## — 概念、应用与前景

XINXING HENENG JISHU GAINIAN YINGYONG YU QIANJING

周志伟 编著



化学工业出版社



# 新型核能技术

## — 概念、应用与前景

XINXING HENENG JISHU GAINIAN YINGYONG YU QIANJING

周志伟 编著 



化学工业出版社

· 北京 ·

## 图书在版编目 (CIP) 数据

新型核能技术——概念、应用与前景/周志伟编著.  
北京: 化学工业出版社, 2010.1  
ISBN 978-7-122-07100-2

I. 新… II. 周… III. 核技术 IV. TL

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 207769 号

---

责任编辑: 赵玉清

文字编辑: 颜克俭

责任校对: 徐贞珍

装帧设计: 刘丽华

---

出版发行: 化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印刷: 北京永鑫印刷有限责任公司

装订: 三河市万龙印装有限公司

720mm×1000mm 1/16 印张 11½ 字数 217 千字 2010 年 1 月北京第 1 版第 1 次印刷

---

购书咨询: 010-64518888(传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

---

定 价: 35.00 元

版权所有 违者必究

# 序

当今，无论如何强调发展新能源和可再生能源的意义都不过分。我们的世界正面临着由于以化石燃料为基础而支撑的能源系统带来的一系列威胁：资源枯竭、环境污染、生态恶化、气候变化、贫富不均，直至由于能源问题而引发的国与国之间、地区之间的冲突、纠纷不断，直至战争。新能源和可再生能源具有资源可持续、清洁、分布均衡等特点，必将成为未来可持续能源系统的支柱。

我国的经济社会正在快速发展。在能源方面，我们既需要充足的能源供应以保障全面建设小康社会目标的实现，同时我们也面临着国内资源和环境的威胁，国际社会温室气体减排的压力。因此，国家把发展新能源和可再生能源作为长期能源战略的重要组成部分，而且制订了以《可再生能源法》为基础的一系列政策措施。几年来，新能源可再生能源在我国得到了快速发展，其广阔的前景正日益显现出来。

清华大学长期致力于能源科学研究和人才培养，形成了新型核能、太阳能、风能、生物质能以及新能源战略和政策等领域的新能源科研和教学体系，取得了一批有影响的科技成果。以这些科研和教学经验为基础，并吸收了国内外同行的大量研究成果，在化学工业出版社的支持下，几位教师编写了这套新能源丛书。

丛书按能源种类分册，内容涉及发展新能源的战略和政策，各类新能源资源核技术的特点、技术和产业发展现状、未来的发展趋势展望等。丛书内容丰富、通俗易懂，从中可以较清晰地了解发展新能源的意义，各种新能源技术的基本原理和发展路线、发展前景等，对于广泛和

系统了解和认识新能源，这是一套很好的读物。

当然，新能源的发展是一个很复杂的系统工程，是一个很长的产业链、政策链和基础设施链，牵涉到技术、体制、政策、社会和个体的行为。所以，要起到有份额的作用，还有很长的路要走，尤其和我国国情有十分紧密的联系。在此期间，各种技术的发展有可能不一致，会有很大的差异性。我们目前的认识，在技术发展有新突破、政策上有新措施的条件下将会有很大的变化。今天我们认为有前途的方向可能将来会“边缘化”，一些新的方向可能“异军突起”。总之，我们作为科技工作者应该结合国情不断变化地在技术创新方面下功夫，走出我国自己的新能源和可再生能源发展的道路来。相信这套丛书的发行，会在提高社会各界对新能源的了解，普及新能源知识，促进我国新能源快速发展方面做出应有的贡献。

虽然丛书中有有关可再生能源的描述，社会上的专家不见得完全意见一致，有些同志会有不同的看法，这是很正常的。一个新生事物的发展总不可避免的有各种看法，在争议中成长。但是，了解它是第一位的，只有不断深入的了解，不断实践才会逐渐接近真理，这套丛书的作用就在于此。

清华大学教授  
工程研究院

倪晋峰

2009.12.4

# 前言

经过三十年的高速发展，中国经济已经成为全球化产业分工的重要环节。能源的安全供应是保障中国未来经济可持续发展的命脉。在世界经济不断发展的同时，因人类耗费大量化石能源造成全球气候变暖的问题越来越受到全人类的关注。减排温室气体、建立低碳经济体系的政治呼吁，正逐渐对全球经济、政治和社会活动形成巨大的冲击。人类必须寻求可持续发展的能源道路，必须尽力推动风能、太阳能、水电及核能等非化石能源技术的大规模利用。核能技术作为目前在技术上能够替代化石能源大规模稳定发电的唯一成熟低碳能源技术，再次迎来高速发展的历史机遇。

为了满足那些关心世界核能技术的现状、并对核能技术未来发展趋势感兴趣、但缺乏核能行业专业知识的读者的需要，本书作者从在核能工程行业从业多年的学者的视角，提供理解核能技术所需要的核物理、核工程与核安全学科方向的基本专业知识，以期能够帮助这些读者能更准确地理解核能技术的科学基础和技术发展前景。

本书共分8章。第1章概述世界核能的发现和发展的历史；第2章简述核能技术所涉及主要核物理基础知识；第3章描述商用核电技术，主要包括核电厂相关的工程设计基础知识并介绍典型的现有商用核电厂的工作原理；第4章描述发展核电的核安全与核能经济竞争力问题；第5章回顾中国核能工业的发展历程和中国核电技术发展现状；第6章描述目前世界范围正在逐渐到来的核能新纪元，以及第四代先进核能技术；第7章概述未来核能可持续发展的潜在技术选择，包括加速器驱动的次临界清洁核能系统、聚变-裂变混合堆、惯性约束核聚变能技术和磁约束核聚变能技术；第8章描述中国核能可持续发展的技术路线，从核燃料资源、技术、资金及人力不同视角分析中国核能可持续发展战略。

本书的内容和知识深度适宜从事行政管理、政策研究、文宣、情咨等领域相关工作的读者，也可作为其他能源领域的专业人士或在读研究生了解核能基本专业知识的参考读物。

本书的内容大部分是在清华大学王革华教授主编，由化学工业出版社2006年出版的《新能源概论》一书的第六章的基础上扩展得到的。清华大学核能与新能源技术研究院和化学工业出版社对本书的出版给予了大力的支持。在此表示诚挚的致谢。

由于近年来核能技术正沿着更安全、更经济、更强调防止核扩散和能够

实现可持续发展的技术方向探索前进，在新的概念设计、新材料和新建造技术领域涉及学科面广、技术发展迅速，且本书作者水平有限，欢迎读者坚持科学批判精神，对本书的学术观点、书中不当之处进行自由争论和批评指正。

作者

2009年12月于清华大学

# 目 录

## 1 概述 / 1

1.1 核能与宇宙的演变	4
1.2 放射性的发现	5
1.3 中子的发现与原子有核模型的建立	5
1.4 自持链式裂变反应的实现	6
1.5 核电工业发展历程	8
1.6 热核聚变能技术	10
参考文献	13

## 2 核物理基础 / 14

2.1 原子与原子核	14
2.1.1 原子与原子核的结构和电荷	14
2.1.2 原子与原子核的质量	15
2.1.3 原子核的尺度与密度	16
2.1.4 原子核的微观物理特性	17
2.2 放射性与原子核的稳定性	18
2.2.1 放射性衰变的基本规律	18
2.2.2 原子核的结合能与比结合能	23
2.2.3 原子核的 $\beta$ 稳定性	27
2.3 射线与物质的相互作用	28
2.3.1 重带电粒子与物质的相互作用	28
2.3.2 电子与物质的相互作用	29
2.3.3 $\gamma$ 射线与物质的相互作用	30
2.4 原子核反应	32



2.4.1	原子核反应的守恒定律与反应道	33
2.4.2	核反应的反应能	34
2.4.3	核反应截面与产额	35
2.4.4	核反应过程	36

## 2.5 中子物理学基础 38

2.5.1	中子与物质相互作用	39
2.5.2	核裂变与核聚变	40
2.5.3	中子慢化与扩散	44

## 参考文献 48

# 3 商用核电技术 / 49

## 3.1 核裂变反应堆物理热工设计 49

3.1.1	链式裂变反应与反应堆临界	49
3.1.2	反应堆时空动力学	51
3.1.3	反应性、反应性系数与剩余反应性	52
3.1.4	反应堆释热与冷却	54
3.1.5	核电厂工程热力学与能量转换系统	59

## 3.2 现有商用核电技术 61

3.2.1	压水堆核电厂	62
3.2.2	沸水堆核电厂	64
3.2.3	重水堆核电厂	67
3.2.4	气冷堆与高温气冷堆核电厂	69
3.2.5	石墨慢化水冷堆核电厂	73
3.2.6	液态金属冷却快堆核电厂	75

## 3.3 商用核电厂的核燃料循环技术 78

3.3.1	天然铀或低浓铀燃料一次通过	79
3.3.2	MOX 燃料循环	80
3.3.3	低浓铀 PWR+CANDU 两次通过	81
3.3.4	快堆闭式燃料循环	81
3.3.5	钚铀燃料循环	84

## 参考文献 85

# 4 核安全与核能经济竞争力 / 86

## 4.1 核电厂的安全性 86

4.1.1	核电厂的核安全风险 .....	88
4.1.2	“纵深防御”原则 .....	89
4.1.3	核电厂设计基准事故与超设计基准事故 .....	91
4.1.4	核电厂的安全文化 .....	92
4.1.5	核电厂的安全监管 .....	93
<b>4.2</b>	<b>核电厂核安全专设系统</b> .....	<b>94</b>
4.2.1	临界安全及反应性控制 .....	95
4.2.2	反应堆冷却剂系统完整性保护 .....	96
4.2.3	余热排出及最终热阱 .....	96
4.2.4	安全壳完整性保护 .....	98
<b>4.3</b>	<b>核电厂的安全性与经济性的关系</b> .....	<b>99</b>
4.3.1	安全系统与安全功能的冗余 .....	100
4.3.2	非能动安全或固有安全：核电厂设计理念的革新 .....	101
4.3.3	核安全风险的管理 .....	102
<b>参考文献</b> .....		<b>102</b>

## 5 中国核电技术发展现状 / 103

<b>5.1</b>	<b>中国核能工业发展的历史回顾</b> .....	<b>103</b>
5.1.1	核武器的自主研发 .....	105
5.1.2	核潜艇的自主研发 .....	106
5.1.3	核反应堆的自主研发 .....	107
5.1.4	核电厂技术的自主研发 .....	108
5.1.5	核电厂技术的引进、消化和国产化 .....	109
<b>5.2</b>	<b>中国核电技术发展的技术路线</b> .....	<b>110</b>
5.2.1	压水堆-快中子增殖堆-聚变堆技术路线 .....	110
5.2.2	高温气冷堆的作用 .....	111
5.2.3	CANDU 堆的作用 .....	112
5.2.4	压水堆标准化与核电技术多样化 .....	113
5.2.5	中国核燃料循环工业 .....	114
<b>5.3</b>	<b>中国核能中长期发展前景</b> .....	<b>115</b>
5.3.1	中国核电的潜在市场 .....	116
5.3.2	中国核电工业发展的技术选择 .....	116
5.3.3	中国核电工业发展的基础 .....	117
<b>参考文献</b> .....		<b>119</b>

## 6

## 核能的新纪元 / 120

6.1 全球气候变暖与核能的新机遇	120
6.1.1 全球气候变暖的现状 .....	120
6.1.2 减少温室气体排放的全球行动 .....	121
6.1.3 核能在全全球减少温室气体排放行动中的潜力 .....	121
6.2 核能：大规模电力生产的主要低碳能源	122
6.3 迎接核能新纪元的技术准备	123
6.3.1 近期能建造的第三代先进商用核电技术 .....	124
6.3.2 中长期可持续发展的第四代先进核能系统 .....	126
6.3.3 核能的工艺热应用 .....	135
6.3.4 防止核扩散 .....	137
6.3.5 乏燃料的处置 .....	138
6.3.6 核能的公众接受性 .....	138
参考文献	139

## 7

## 未来的新型核能 / 140

7.1 加速器驱动清洁核能系统	140
7.1.1 质子加速器驱动的次临界少钢材料嬗变焚烧器 ..	141
7.1.2 质子加速器驱动的次临界能量放大器 .....	143
7.2 磁约束核聚变及聚变系统	144
7.2.1 托卡马克等离子体磁约束技术的发展现状 .....	146
7.2.2 国际热核聚变实验反应堆 ITER 计划 .....	147
7.2.3 氘增殖包层技术与未来商用磁约束核聚变发电系统 .....	148
7.3 聚变-裂变混合堆	149
7.3.1 聚变中子源驱动的液态锂铅冷却次临界混合堆 ..	150
7.3.2 聚变中子源驱动的深度次临界水冷产能混合堆 .....	151
7.4 惯性核聚变系统	152
7.4.1 激光束直接点火 .....	154
7.4.2 激光束间接点火 .....	155
7.4.3 Z-箍缩点火 .....	155
7.4.4 高效核爆核聚变发电系统 .....	156

参考文献	157
------	-----

## 8 中国核能可持续发展战略 / 158

8.1 核燃料资源可持续性供应的保障	158
8.2 核能可持续发展的技术保障	161
8.3 核能可持续发展的法律与金融保障	164
8.4 核能可持续发展的研发创新能力保障	165
8.5 核能工业可持续发展的人力资源保障	165
结束语	166
参考文献	168

# 1

## 概述

“物有本末，事有终始，知所先后，则近道矣”引自《大学》一书，论述了中国古代伟大的思想家孔丘对自然界万事万物规律的认识论观点。孔夫子认为：宇宙万物都有其根本规律，事情的发生和演变都有其因果关系，人们只要知道了事情的前因后果，就接近掌握万物的根本规律了。本书以追溯人类对原子、原子核的认识，以核能科学和技术发展史为主线描述面向未来的新型核能技术，以及相关的基础理论的概念、应用与发展前景。

当前世界核能技术的发展趋势为两个层面，首先是改进现有核电厂的经济性和安全性，为扩大核电容量寻求发展机遇；其次是研发提高核电反应堆利用核材料效率、减少放射性产物地质处置量的新途径，为核能长期可持续发展奠定技术基础。根据中国经济可持续发展对能源的需求以及中国现有技术基础，本书分析了中国积极发展核电的必要性，论述了核能发电技术长期可持续发展策略以及面临的挑战和前景。

核能在 20 世纪 60~70 年代的第一次石油危机中得到了第一次大发展的机遇，目前世界上大多数核电厂采用的都是在那个时代迅速发展起来的反应堆技术，主要包括压水堆、沸水堆、坎杜压力管重水堆、气冷堆和压力管水冷石墨堆。虽然在 1979 年发生了美国三哩岛核电厂堆芯严重熔化事故，1986 年发生了苏联切尔诺贝利核电厂堆芯解体、并向环境排放大量放射性产物的严重事故，从而极大地影响了核能健康发展的步伐，但核能在逆境中经受住了挫折的打击，整个核工业体系在面临全面退出的社会压力下艰难地保存了下来。

核能技术、特别是与核安全相关的技术在挫折中获得了改善和提高的重大机遇。在 20 世纪最后二十年的时间内，一些有明显技术缺陷和缺乏商业竞争力的早期核电技术，如美国和法国的早期快堆核电厂、德国和美国的早期高温气冷堆核电厂、英国的早期气冷堆核电厂以及俄国压力管水冷石墨堆核电厂都已经或正在逐渐步入全面退出商业运行的阶段。纵观当今遍布世界各国的核电厂，只有采用压水堆、沸水堆、坎杜压力管重水堆的商用核电厂，由于已经获得商业运营规模化和技术成熟性的支撑，才能在非常苛刻的核安全监管条件下，面对激烈的商业竞争，通过运行和监管技术的改进而得以生存，并保持继续发展的基础。以先进安全分析程序的开发和验证、概率风险安全评价技术和新安全监督管理法规为标志的技术进步，既极大地改善了现有核电厂的安全性，也为现有核电产业带来了良好的经济性，为核电在世界范围全面复苏奠定了坚实的人力、技术和经济基础，并保持了核能产业高速扩张的良好环境。

在 21 世纪，经济全球化的趋势在促进世界经济繁荣的同时，也对世界经济发展的可持续性和人类赖以生存的地球环境和资源的可承受性提出了严重的挑战。人类有意识地开发能够节制利用自然资源的技术，这些新技术已经逐渐开始引领核能和新能源技术革新的趋势，并在全世界范围内受到越来越广泛的关注。显然，面向未来的新型核电技术将以可持续发展潜力为最重要的优化目标。

节制利用自然资源的技术在这里指的是：在保证世界经济健康发展的前提下，对实现消耗自然资源最少化能够作出贡献的新技术。现有以压水堆、沸水堆和压力管重水堆为主流技术的核电技术的运行安全性和商业经济竞争力都达到了相当好的水平，对这些技术必须保持和提高。对现有核裂变技术改进，主要依赖制造业的技术进步和新的简单化设计。

目前世界核能技术发展的主要趋势反映在 3 个层面上：

- ① 改进现有核电技术的经济性和安全性，提高核电机组发电的负荷因子；
- ② 研发提高核电反应堆利用核燃料的效率、减少放射性产物地质处置量、并能够实现可持续发展的新型核裂变能的技术途径；
- ③ 研发能够彻底解决人类未来可持续发展能源需求的核聚变能技术。

第一个层面的目标是推进近期（2035 年以前）新建核电项目采用安全性和经济性得到明显改进的核电技术，主要是第三代核电技术，包括：先进轻水堆技术，如 AP1000（美国西屋公司）、EPR（欧洲阿海法公司）、ABWR/ES-BWR（美国 GE 公司）等；高温气冷堆技术，例如 HTR-PM（中国）、PBMR（南非）、GT-MHR（美国）、GTHTR300（日本）等，以及先进重水堆技术，如 ACR（加拿大 AECL 公司）。

第二个层面需要发展面向未来长期（2035 年以后）核电市场的新型裂变核电技术，包括快中子增殖堆，如美国能源部主导的第四代核能论坛计划（GEN-IV Forum）推荐的气冷快堆（GCFR）、钠冷快堆（SFR）、铅冷快堆（LFR）、快中子超临界水堆（SCWR-F）等；外中子源驱动的次临界清洁核能系统，例如加速器驱动的次临界堆（ADS）和相关的先进燃料循环技术。

这就要求面向未来长期核电市场的新型核裂变发电技术能够实现易裂变核燃料增殖并高效地烧掉各种超铀元素。因此相关的研发工作必须考虑反应堆的设计、核燃料的选择和包括后处理在内的整个核燃料的循环工艺。除此之外，还必须考虑在现有或将来国际政治和社会秩序条件下，大规模利用核能和发展新型核能技术可能潜在的核武器技术扩散的风险。正是基于上述技术限制的考虑，国际核能界才提出了 6 种第四代先进反应堆、ADS 和先进燃料循环研发计划，它们都具有良好的可持续发展前景。但新型商用核裂变能发电技术极大依赖前期工程验证计划的实施和进展，实际用于工业生产的时间表仍有一定的不确定性。

核能技术发展的第三个层面是核聚变能技术的战略研发，其中主要包括以燃烧核聚变等离子体的托卡马克装置为典型代表的磁约束核聚变技术，以及以激光和其他粒子束点火装置为代表的惯性核聚变技术。

面对不断严重的能源问题，各能源大国都提出了自己的核能发展战略。一些国家认为，在一定时期内可以利用快中子堆与热中子堆的共生系统来满足日益壮大的核能发展需求，待聚变能完全实现商用，人类也将彻底解决能源问题。

快堆虽能够实现核燃料的增殖，但燃料倍增时间太长，并且需要数量巨大的初装工业钷燃料（我国快堆研究时间短，工业钷储量很少），其液态金属冷却剂还带来了比技术成熟的轻水堆、重水堆和高温气冷堆等热中子堆更复杂的系统结构和更严重的安全问题。法国的“超凤凰”快堆、日本的“文殊”快堆以及俄罗斯的多艘核潜艇都是因为液态金属回路发生故障而引发事故的。

众所周知，聚变能优点显著：作为聚变燃料的氘核素可以直接从海水中提取。海水中氘和氢原子比为 1 : 6500。若将海水中的氘原子全部用于聚变，则其能量几乎为无穷尽；目前聚变反应使用的另外一种燃料是氚，可由地球上储量丰富的锂制备。虽然，氚核素是具有  $\beta$  衰变的放射性核素，但它的半衰期仅为 12.6 年，也不会产生裂变堆中那样大量的高水平放射性废物。聚变堆的堆芯等离子体稳定运行条件苛刻，一旦不能满足，聚变反应自动停止，不会出现核临界事故，具有裂变反应堆不可实现的固有安全性。然而，人们对等离子体物理的了解还不够深入，支持商用规模的磁约束聚变堆的各项复杂技术（如低温、超导、超真空、微波、材料等）还不够成熟，人类目前还不具备建造商用核聚变电厂的能力。

虽然基于核聚变能的氢弹技术的开发成功与基于裂变能的原子弹技术的开发成功相差只有几年，但经过半个多世纪的历史演变，以核电厂和核动力船舰为标志的民用核裂变能技术已经取得了举世瞩目的进步，核电已经成为世界总发电量中的重要组成部分。然而，以托卡马克、磁箍、强激光驱动等技术为典型代表的磁约束和惯性约束核聚变能技术，经过了世界主要核国家半个世纪的持续研发，却没有形成能够直接应用于动力系统的商用技术。由此可见，商用核聚变能技术的研发难度远远大于核裂变能技术的研发。根据核聚变能技术目前达到的水平，国际核聚变领域专家的乐观估计是：纯聚变商用发电技术可能还要经过 50 年的规模化研发才能实现，世界上任何一个国家都难于独立支撑商用核聚变能技术的规模化研发。虽然世界主要核国家都有一定规模的独立核聚变技术研发计划，但国际合作多年来一直是研发核聚变能技术的主流趋势。

2006 年 11 月 21 日，参加国际热核聚变实验堆（ITER）计划的欧盟、中国、美国、日本、韩国、俄罗斯和印度等国，在各国合作的框架下正式签署协议，步入实际建造国际热核聚变实验堆的阶段，目标是验证利用核聚变能为人类提供一种固有安全、环境友好、资源取之不尽的新核能技术的可行性。ITER 计划将持续 35 年，总投资额按不变价格计算约 100 亿欧元，由项目参加国共同分担。项目的成功实施，将使 20 年后实现掌握设计建造 500MW 聚

变功率规模的托卡马克装置的技术成为现实，同样也为进一步研发作为未来新型商用核能系统的聚变-裂变混合堆带来非常有诱惑力的战略价值。

为了满足那些关心世界核能技术的现状、并对核能技术未来发展趋势感兴趣、但缺乏核能行业专业知识的读者的需要，本书作者从一个在核能工程行业从业多年的学者的视角，提供理解核能技术所需要的核物理、核工程与核安全学科方向的基本专业知识，以期能够帮助这些读者能更准确地理解核能技术的科学基础和技术发展前景。本章的内容和知识深度适宜从事行政管理、政策研究、文宣、情咨等领域相关工作的读者，也可作为其他能源领域的专业人士或在读研究生的了解核能基本专业知识的参考读物。

## 1.1 核能与宇宙的演变

按照现有的科学知识，大约在 137 亿年之前发生了形成宇宙的“大爆炸 (big bang)”。大爆炸发生的那一刻，宇宙处于密度和温度都极高的状态，形成了空间和时间。在大爆炸之后约  $10^{-33} \sim 10^{-4}$  s，构成目前人类已知物质原子核的质子和中子在称为“重子起源过程 (baryogenesis)”中产生，从此标志了宇宙“核时代 (nuclear age)”的开始<sup>[1]</sup>。

从形成地球的视角看，宇宙的演变可以分为 4 个阶段，即：原初核合成与原子的形成；星系凝聚；恒星核合成；太阳系的形成。因此，宇宙“核时代”的历史源头实际上可以追溯到宇宙演变的原初核合成与原子的形成阶段之初的

某一瞬间。宇宙“核时代”开始后，又经过大约 35 万年的演变，才产生了第一个氢原子。随着宇宙的不断膨胀和冷却，再经过了 1 亿~2 亿年的演变历程，宇宙中才产生了恒星；之后宇宙又演变了几百万年计的时间，才发生第一颗超新星爆炸，并在整个宇宙中撒布碳、氮、氧以及铀等重元素。大约在 50 亿年前，在我们现在这个太阳系的附近发生了这样一颗超新星的爆炸，并提供了形成太阳系的原始材料，而我们今天的地球是大约在 10 亿年前形成的。

核能伴宇宙的诞生而产生，随天地的形成而转换，也必将在斗转星移的宇宙演变中用之不尽。将核能的起源与宇宙的起

源关联起来，目的是要阐明核能资源的可持续性。图 1-1 表示了根据大爆炸理论和宇宙背景探测卫星 (COBE) 获得的天空图推测的宇宙演变过程的示意<sup>[2]</sup>。

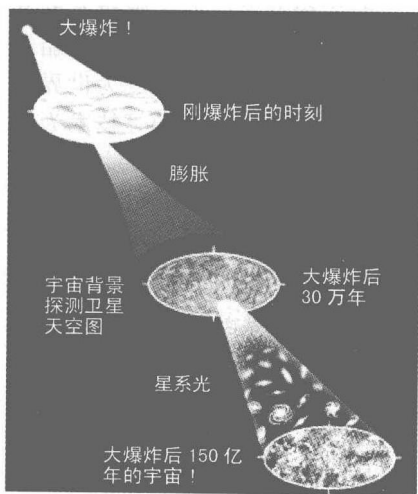


图 1-1 宇宙演变示意



## 1.2 放射性的发现

对于核裂变能的应用而言，有必要提及德国人在中世纪就开始采用来自银矿的附带废物，即一种能闪烁的黑矿石，来生产黄色的玻璃和陶瓷产品。事实上，一个令人兴奋的奥秘就一直藏匿在这些被德国银矿工人称为“坏运矿石”的物质中，实际上这些物质就是后来才被发现和命名的铀矿石。虽然德国银矿工人当时并不知道这个奥秘，但它对人类后来发现原子核具有重要意义。19世纪末期，当这些能闪烁的黑矿石传到当时世界上最伟大的科学家之一，法国人亨利·贝克勒尔（Henri Becquerel）的科学实验室里，他解开了这个藏匿的奥秘，他在1896年发现从这些铀矿石发射的、用人类肉眼看不见的射线能引起感光底片曝光，并把从铀矿石发射看不见的射线的现象称为放射性现象<sup>[3]</sup>。

图1-2是两种常见铀矿石的照片。贝克勒尔发现铀矿石放射性的科学意义是确认了放射性射线是铀矿石自发发射的，与荧光和X射线产生的机理有本质的不同，外界物理条件的变化不会改变铀矿石自发发射放射性的性质，为后来确认铀矿石的放射性可分为穿透力不强并带正电荷的 $\alpha$ 射线；穿透力较强并带负电的 $\beta$ 射线；以及穿透力很强但不带电荷的 $\gamma$ 射线3种不同的射线，为应用这些射线研究物质原子内部的结构以及为放射性射线屏蔽与辐射防护的研究奠定了科学基础，开辟了新的科学研究领域。

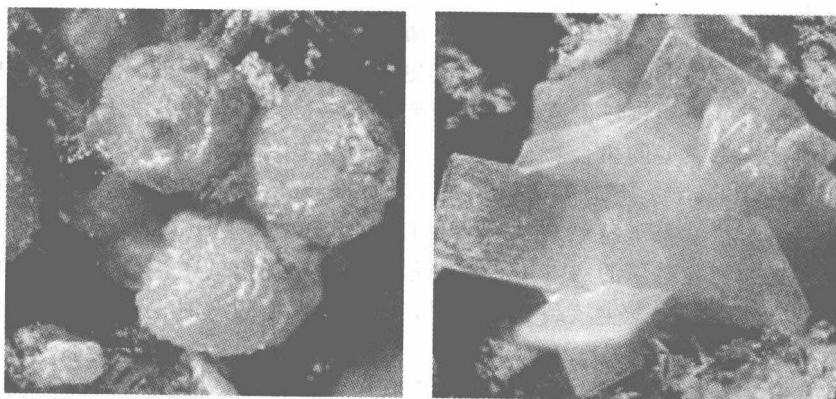


图 1-2 两种常见铀矿石的照片

## 1.3 中子的发现与原子有核模型的建立

自1896年法国科学家贝克勒尔发现天然放射性现象，人类开始步入原子核领域的科学探索。在随后的半个世纪，与原子核相关的科学研究工作取得了辉煌的成就。居里夫妇（P. Curie 和 M. Curie）在1898年发现天然放射性元