

中国工程院咨询项目

中国可持续发展矿产资源战略研究

中国裂变核能矿产资源 可持续发展战略研究

中国原子能出版社

中国工程院咨询项目

中国可持续发展矿产资源战略研究

中国裂变核能矿产资源 可持续发展战略研究

中国原子能出版社

图书在版编目(CIP)数据

中国裂变核能矿产资源可持续发展战略研究/潘自强主编.

—北京:中国原子能出版社,2016.4

ISBN 978-7-5022-7206-7

I. ①中… II. ①潘… III. ①铀矿—矿产资源—可持续发展战略—研究—中国 IV. ①P619.140.62

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 075235 号

内 容 简 介

核能是一种清洁、排放温室气体极小的能源。按照“核电中长期发展规划(2011—2020 年)”,到 2020 年建成 5 800 万 kW,即达到世界第 2 位。根据中国工程院有关研究报告预测,到 2030 年将发展到 10 000 万 kW 以上,即达到世界第 1 位。这样大规模的发展,铀资源有保障吗? 本项研究结果表明:我国潜在铀资源比较丰富,常规铀资源储量超过 200 万 t,近十多年来发现了多个大型铀矿,探明的铀资源储量大幅增长。全球铀资源较为丰富,当前供需相对稳定。我国核电发展所需铀资源是有保障的。为了保障我国核电的发展,进一步加大铀资源勘查的力度,创新铀资源勘查和开采的技术,加快“走出去”(特别是“一带一路”)勘查和开发铀资源的步伐,保持适当的铀资源储备是必要的。铀资源开发的安全和对环境的影响是公众关心的另一问题。我国铀矿开采的近 60 年的实践表明,铀矿工的安全是有保障的,环境影响是可控的。近年来,随着地浸技术的发展,安全水平进一步提高,环境影响明显减小。但在整个核燃料循环中,工作人员所受剂量和环境影响是偏高的。有必要加强工作人员所受剂量最小化和进一步减小环境影响的研究。

本书可供从事核能和矿产资源的研究人员、老师和政府工作人员参考。

中国裂变核能矿产资源可持续发展战略研究

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

责任校对 冯莲凤

责任印制 潘玉玲

印 刷 保定市中华美凯印刷有限公司

经 销 全国新华书店

开 本 787 mm×1092 mm 1/16

印 张 18.5 字 数 459 千字

版 次 2016 年 4 月第 1 版 2016 年 4 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5022-7206-7 定 价 86.00 元

网址: <http://www.aep.com.cn>

发行电话: 010-68452845

E-mail: atomep123@126.com

版权所有 侵权必究

中国可持续发展矿产资源战略研究

组 长：王淀佐 中国工程院院士
常务副组长：孙传尧 中国工程院院士
何建坤 清华大学校务委员会副主任、教授
彭苏萍 中国工程院院士
副组长：陈毓川 中国工程院院士
殷瑞钰 中国工程院院士
顾真安 中国工程院院士
郑绵平 中国工程院院士
潘自强 中国工程院院士
邱定蕃 中国工程院院士
倪维斗 中国工程院院士
李 政 清华大学热能工程系主任、教授
王安建 中国地科院矿产资源所教授
项目联系人：麻林巍

中国裂变核能矿产资源可持续 发展战略研究

项 目 负 责 人：潘自强

成 员：	李冠兴	丁德馨	刘庆成	刘建桥	李子颖
	李友良	李伟才	李俊杰	杜运斌	辛殿华
	苏广莉	苏学斌	苏艳茹	肖诗伟	陈跃辉
	张伟星	张金带	范洪海	徐乐昌	曾文乐
	黄敏刚	雷增光	谭亚辉	薛建新	

综合报告执笔人：张伟星

项 目 办 公 室：张雅丽

总 目 录

上 篇

摘要	3
中国裂变核能矿产资源可持续发展战略研究(综合报告)	7
我国铀矿资源勘查最新进展与技术经济分析	55
我国铀资源勘查采冶技术研究	71
我国地浸采铀工艺技术发展现状与展望	89
我国非常规铀资源及其应用前景	103
全球铀资源勘查开发现状及其利用前景分析	125
我国海外铀资源开发和利用的对策研究	157
我国钍资源分布调查及开发技术研究	183

下 篇

摘要	211
铀矿资源开发辐射安全与环境保护	217

中国裂变核能矿产资源可持续发展 战略研究

上 篇

摘 要

1 裂变核能矿产资源的内涵和特点

裂变核能矿产资源就是能产生裂变核能的自然矿产资源。

产生裂变核能的易裂变核素有铀-235、钚-239 和铀-233，其中铀-235 是蕴藏在天然铀中的铀同位素，而钚-239 和铀-233 分别由铀-238 和钍-232 在核反应中产生而获得，因此，铀和钍就是能产生裂变核能的自然矿产资源。

裂变核能与常规能源相比，具有能量密度巨大、资源的可利用性宽广、对环境的影响较小等特点。

2 全球铀资源勘查开发发展现状

当前，在核电对铀资源的需求方面，既有核电，国内铀生产又完全能满足本国需求的只有加拿大和乌克兰两个国家；既有核电，国内生产的天然铀又基本能满足本国需求的也只是俄罗斯一个国家；而大多数国家是本身为核电大国，但本国几乎不生产铀，它们的核燃料补给主要是依靠市场采购、境外合作开发加上部分二次铀资源补给。另外，也有一些国家国内没有核电机组，铀资源勘查后生产的天然铀全部用于出口。

根据国际原子能机构 2014 年报道，截至 2013 年 1 月 1 日，全球查明的铀资源总量，其开采成本小于 260 美元/kgU 的有 764 万 t，小于 130 美元/kgU 的有 590 万 t。2012 年全球有 19 个国家 50 多座铀矿山在生产运行，天然铀产量为 58 816 t。

3 我国裂变核能矿产资源勘查开发基本状况

截至 2012 年年底，我国已探明各类铀矿床近 350 个，分布在 23 个省（自治区）。已探明的铀资源量中的砂岩型约占 32%，花岗岩型约占 27%，火山岩型约占 21%，碳硅泥岩型约占 11%，其他类型约占 10%。热液型铀矿床多集中产于江西、广东等南方地区，砂岩型铀矿床集中产于新疆、内蒙古等北方地区。

我国铀资源赋存特点：一是分布广泛而又相对集中。二是矿床类型多而又有主导类型。三是单个矿体规模小而往往群居产出，大型矿床已占相当比例。四是矿床以中低品位为主。五是铀矿床矿化类型比较复杂，共生、伴生矿产种类多。六是我国有较好的铀成矿背景和合适的铀矿区域成矿环境，预测的铀资源总量大。我国非常规铀资源和钍资源分布

广泛，资源丰富。

截至 2012 年年底，我国铀资源开发占用过的铀矿床数约占已查明铀矿床总数的 29%，保有的资源储量约占提交资源量的 84%；目前正在生产的铀矿床 25 个，其保有资源储量占总保有资源储量的 22%；天然铀生产中采用了地浸、堆浸等新的采冶工艺，2014 年我国地浸采铀的生产量占天然铀总产量的 37%，其中 $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ 的地浸采铀和堆浸技术达到世界先进水平。

4 我国核电发展对天然铀和铀资源的需求

我国《核电中长期发展规划（2011—2020 年）》确定到 2020 年我国核电发展规模为建成 5 800 万 kW，在建 3 000 万 kW。2020—2030 年我国的核电规模分为两个阶段、四个目标：两个阶段就是到 2020 年的近期发展阶段和到 2030 年的中期发展阶段；四个核电建成目标一是 2020 年的建成装机容量 5 800 万 kW 规划发展目标；二是 2030 年的常态、快速、超常三个发展目标，分别建成装机容量 11 800 万 kW、15 800 万 kW 和 20 800 万 kW。

按照上述发展目标，2020 年时我国核电发展当年所需天然铀为 1.2 万 t，到 2030 年，常态、快速、超常目标当年所需天然铀分别为 2.2 万 t、3.0 万 t 和 4.0 万 t；累计消耗天然铀 2020 年时为 6.2 万 t，2030 年时常态、快速、超常目标累计消耗天然铀分别为 23.4 万 t、28.2 万 t 和 34.1 万 t。

从上述两种发展规模、四个发展目标可见，当年和累计天然铀需求量逐年快速增加，呈现出明显的陡斜率上升的趋势，铀资源储量的消耗和占用也一并上升。

实际上从地质勘查到获得天然铀，再通过铀的转化、铀同位素分离和制造出核燃料元件入堆，至少需要 15 年时间，甚至更长，因此，从现在开始就必须加强地质勘查开发，以保证我国核电的可持续发展。

我国核电四个目标不同时段规模发展全寿期运行需要的天然铀大约分别为 62.2 万 t、126.6 万 t、169.5 万 t 和 223.1 万 t，其消耗的经济可采铀资源储量分别为 88.9 万 t、180.8 万 t、242.1 万 t 和 318.7 万 t。

5 对我国裂变核能矿产资源基本判断

对我国裂变核能矿产资源，有以下几点基本认识：

一是我国裂变核能矿产资源量丰富。铀资源量潜力巨大，前景乐观，探明的铀资源储量在世界上占据重要地位。调查获得的钍资源量具有相当规模和集中度。非常规铀资源分布广泛、多样丰富。

二是我国铀资源品质中等。

三是铀资源开发技术水平已上新的台阶，已跻身于世界前列。天然铀产量在全球只占到一定份额。

四是面对我国核电的飞速发展，能保证和满足 2020 年时规模发展和 2030 年的常态发展规模对天然铀的需求，如果要保证 2030 年的快速发展规模和超常发展规模的需求，必

须适度增加天然铀产能和增大对外依存度的比重。

6 发展思路、工作目标任务及战略思考

总的发展思路是：“立足国内，扩展海外；充实储备，确保需求；科技引领，注重效益”。铀矿勘查坚持“基础先行，着力基地，综合勘查，综合评价”的原则，铀矿开发实行“依靠科技创新，突破关键技术，提高利用水平，现代集约经营，确保安全环保”方针，大力推进铀矿大基地建设，实现国内供应保持足够的比例。

“十二五”期间工作目标是保证每年保持 70 万 m 的钻探工程量，新探明一批铀资源勘查基地，老矿区扩大取得新突破，新增资源量 5 万 t；新疆、内蒙古、江西等省（自治区）建成一批铀矿大基地，生产能力达到相当规模，科技创新能力、勘查能力进一步提升。通过 10~15 年的努力，力争建成由国内外勘查开发和对外贸易三个渠道组成的天然铀供应保障体系，建立起铀资源基地储备、天然铀产品储备同步发展的天然铀储备体系。

在战略思考方面，一是坚持可持续发展理念，裂变核能矿产资源勘查开发仍然是 21 世纪的重要产业；二是坚持国内与国外、勘查与开发、建立基地与国际贸易三个两手抓，实行以获得铀资源和天然铀为基本方针；三是坚持立足国内，大力推进铀矿大基地建设，兼顾开展钍资源的调查；四是坚持对外合作统一管理，形成以国家铀资源勘查和开发队伍为核心，多团队参与的海外铀资源勘查开发格局，并加速推进勘查开发的各阶段项目转化；五是构建铀产品的多元化、多渠道进口新机制；六是力争在不长的时间内建成能调节天然铀供应的亚洲乃至全球的铀加工储备中心。

7 保证中国裂变核能矿产资源可持续发展的对策建议

一是全面加大国内勘查开发力度，争取在近期内有较大的全面突破；二是继续扩大“走出去”成果，争取在国际上开辟更多的铀资源基地，取得更多天然铀产品；三是充实矿产地和铀产品储备，保证我国资源供应安全；四是推动勘查开发科技进步，注重综合利用，不断提高“开源”水平和铀资源的利用率；五是统筹规划，使国内外铀资源勘查开发列入重点优先发展的领域；六是全方位加大投入，为铀资源勘查开发突破提供物质保障；七是制定出台有关政策，保证铀矿地质勘查开发的顺利有序进行；八是进一步深化改革，切实加强队伍建设，培养稳定科技人员。

8 基本结论

一是全球铀资源较为丰富，当前供需相对稳定；二是我国潜在铀资源比较丰富，具有相当供应潜力；三是树立“立足国内”理念，不断提高铀资源勘查开发水平；四是扩大“走出去”方针成果，力争保持合理的对外依存度；五是坚持超前发展意识，扩大裂变核能矿产资源的利用视野；六是采取各种有效措施，全方位加强裂变核能矿产资源勘查开发。

中国工程院咨询项目

中国裂变核能矿产资源 可持续发展战略研究

(综合报告)

目 录

1 全球裂变核能矿产资源勘查开发状况概述	10
1.1 目前全球核电发展走向	10
1.2 全球天然铀安全性供应状况及态势	11
1.3 全球裂变核能矿产资源勘查开发概况	13
2 我国裂变核能矿产资源勘查开发基本状况	17
2.1 我国探明的铀资源储量状况	17
2.2 我国铀资源赋存特点	18
2.3 我国非常规铀资源状况	21
2.4 我国钍资源储量概况	21
2.5 我国铀资源开发进展	22
2.6 对我国裂变核能矿产资源勘查开发的基本认识	22
2.7 近十年来铀资源勘查开发新突破	23
3 铀资源勘查开发对外合作现状及发展趋势	23
4 我国的核能发展态势及对裂变核能矿产资源的需求	25
4.1 后福岛时代前后中国矿产资源发展方针	26
4.2 我国核能在中国能源及世界核电中的地位	26
4.3 后福岛时代我国核电发展规模	28
4.4 后福岛时代我国核电发展对裂变核能矿产资源的需求	29
5 我国裂变核能矿产资源面临的机遇和挑战	34
5.1 我国裂变核能矿产资源勘查开发的机遇与挑战	34
5.2 “走出去”战略的勘查开发机遇与挑战	36
6 后福岛时代中国裂变核能矿产资源可持续发展的战略思考	41
6.1 发展思路	41
6.2 工作目标	41
6.3 工作任务和战略思考	41
7 保证中国裂变核能矿产资源可持续发展的对策建议	44
7.1 全面加大国内勘查开发力度,争取在近期内有较大的全面突破	44
7.2 继续扩大“走出去”成果,争取在国际上开辟更多铀资源基地,取得更多 天然铀产品	44
7.3 充实储备,保证我国铀资源供应安全	45

7.4 推动科技进步，不断提高“开源”水平和铀资源的利用率 46

7.5 统筹规划，使国内外铀资源勘查开发列入重点优先发展的领域 46

7.6 加强铀矿冶辐射环保的科研工作 47

7.7 全方位加大投入，为铀资源勘查开发突破提供物质保障 47

7.8 制定出台政策，保证铀矿地质勘查开发的顺利有序进行 47

7.9 进一步深化改革，切实加强队伍建设，培养稳定科技人员 49

8 基本结论 49

8.1 全球铀资源较为丰富，当前供需相对稳定 49

8.2 我国潜在铀资源比较丰富，具有相当供应潜力 50

8.3 树立“立足国内”理念，不断提高铀资源勘查开发水平 50

8.4 扩大“走出去”方针成果，力争保持合理的对外依存度 50

8.5 坚持超前发展意识，扩大裂变核能矿产资源的利用视野 50

8.6 采取各种有效措施，全方位加强裂变核能矿产资源勘查开发 50

附 表 51

参考文献 53

众所周知，核能的开发利用是人类征服自然过程的一项重大突破，它对社会经济技术发展产生了巨大影响，对人类的进步起到了革命性的推动作用。核能一开始被应用于军事工业，后来核能得到了和平利用，它的迅速兴起和快速发展，使它成为能源应用领域中的重要组成部分，造福人类的重要工具。

20 世纪 40 年代，人们开始探索核能的利用。1954 年，苏联建成了世界上第一座核电站，从此，世界开始进入了核能和平利用发展的新时代。近 60 年来，核电发展经历了起步、发展、停滞、复苏、休整等多个阶段。核电起步以后的 20 多年间，世界各国纷纷研发建设热中子反应堆核电站，从而使裂变核能利用成为当时发展的朝阳产业。1979 年 3 月，美国的三哩岛核电站事故和 1986 年 4 月苏联的切尔诺贝利核电站事故，给正在蓬勃发展中的裂变核能和平利用带来了致命性的打击，使世界范围内核电发展处于停滞状态。到了 21 世纪，裂变核能的和平利用得到了复苏，但是，2011 年 3 月在日本发生的福岛核电站事故，又使刚刚复苏的核电建设处于休整状态，也给中国正在发展的裂变核能事业带来了严峻的考验。

尽管如此，裂变核能的和平利用，在 21 世纪以及更长一段时间内，仍然是能源工业中不可或缺的重要成员之一，是实现大规模应用和可持续发展的现实的替代能源，有着广阔的发展空间。它的发展对改善能源结构，保护人类生存环境，促进经济发展，带动各有关工业领域，特别是冶金、建筑、机械、电气仪表、电子等领域的发展，实现产业升级，起到极为重要的作用。

毋庸置疑，核电的发展对裂变核能矿产资源提出了迫切要求，影响着裂变核能矿产资源的勘查开发，反过来，裂变核能矿产资源的勘查开发一定程度上推动或制约着裂变核能本身的发展，因此进一步深入研究裂变核能矿产资源的现状和未来走向，不可避免地成为我国值得关注的重要的研究课题。

1 全球裂变核能矿产资源勘查开发状况概述

核能分为裂变核能和聚变核能两大类，裂变核能是指重原子核在发生裂变过程中释放出的能量；而轻原子核在发生聚变过程中产生的能量被称作聚变能。

产生裂变核能的易裂变核素有铀-235、钚-239 和铀-233，其中铀-235 是蕴藏在天然铀中的铀同位素，而钚-239 和铀-233 分别由铀-238 和钍-232 在核反应中产生而获得，因此我们将铀-238 和钍-232 称为可转换核素。从上可见，这些易裂变核素的来源都是从矿产资源铀和钍中得到。因此要发展裂变核能，必须要有足够的铀、钍资源做保证。

1.1 目前全球核电发展走向

2011 年发生福岛核电站事故以后核能发电在全世界发电总量中占 13%左右，仅仅次于火电和水电的发电量，列第三位，在此之前，核能发电在全球发电量中的比例保持在 16%左右的水平（如图 1 所示），根据世界核协会统计资料，在 2011 年福岛核电站事故之前，全球运行的核电机组为 430 多台，总装机容量为 370.373 GW，其中大约有 25%的反应堆的运营时间已超过 30 年。由于 2013 年 9 月日本在运核电机组 50 台全部停运，2013

年 10 月全球运行的核电机组为 382 台，而这时在建的核电机组 69 台，装机容量为 71.226 GW；计划建设的还有 162 台，装机容量为 183.025 GW。

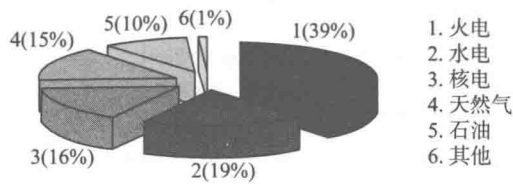


图 1 2011 年前核能发电量在世界总发电量中的比例

福岛核电站事故之前，世界上裂变核能发电的情况是：集中分布在几个主要国家；在运的核电机组以第二代核电机组为主；接近关闭的核电机组数量少于正在建设的核电机组数量；在建核电机组数量又小于在运核电机组数量，大约为在运核电机组的 16%；在建核电机组以亚洲为主，大约占 73.3%。

福岛核电站事故以后，核电国家出现了两极分化的倾向。日本和德国等宣布停运核电机组，而美国、俄罗斯、法国、韩国等核电大国的发展核电政策依然坚定，中国、印度、东南亚等新兴核电国家的发展势头不减。由此可见，核电在能源中的地位仍然坚挺，核电发展呈现出刚性发展的势头。

1.2 全球天然铀安全性供应状况及态势

裂变核能与常规能源相比，具有能量密度巨大、资源的可利用性宽广、对环境的影响较小等特点。1 kg 天然铀中的铀-235 完全燃烧释放出的能量大约相当于 17 t 标准煤或 11 t 石油；裂变核能的一次资源利用率高，二次资源具有巨大的利用价值，不仅自然资源中易裂变核素铀-235 可以利用，而且由铀-238 生成的钚-239，由钍-232 生成的铀-233 都是易裂变核素，同样可以得到循环利用；核电本身不排放二氧化碳等温室气体，一座 100 万 kW 的核电厂每年卸出的乏燃料经过后处理后，仅仅形成 3 m³ 的高放废物。

全球天然铀的安全性供应与核电的发展速度和规模有关，也与全球天然铀生产、二次铀的供应数量有关。2005 年以来，全球天然铀的生产量一直少于需求量（见表 1），其缺口部分都由包括库存铀、反应堆乏燃料和钚的再处理、高浓铀稀释、贫铀尾料再浓缩等二次供应弥补。根据世界核协会估计，2010 年世界天然铀商业库存约为 14.5 万 tU。而随着核电的发展，国际原子能机构和世界核协会对 2020 年和 2030 年时，在三种情景下的天然铀生产、需求及二次铀供应进行了预测（见表 2 和表 3）。

表 1 2004—2011 年世界铀产量和需求量

年份	铀产量/tU	铀需求量/tU	产量占需求量的比例/%
2004	40 178		—
2005	41 719	64 183	65
2006	39 444	62 609	63
2007	41 282	64 503	64