

核能矿产资源发展战略研究

张金带¹, 李子颖², 苏学斌³, 谭亚辉⁴, 李胜祥³, 苏艳茹³,
李建华⁴, 邓平⁵, 徐乐昌⁴, 潘自强⁶

(1. 中国核工业地质局, 北京 100013; 2. 核工业北京地质研究院, 北京 100029; 3. 中国铀业有限公司, 北京 100013;
4. 核工业北京化工冶金研究院, 北京 101149; 5. 中广核铀业发展有限公司, 北京 100029;
6. 中国核工业集团有限公司, 北京 100822)

摘要: 核能矿产资源是指铀资源和具潜在应用前景的钍资源, 目前主要是指铀资源。全球铀资源分布的不均衡性, 势必需要通过市场调节供求。建设核工业强国必须要有强有力的核能矿产资源供应能力做保障。我国核能矿产资源发展的战略目标应是禀赋与掌控复合型的强国。核能矿产资源强国的主要标志应包括国内资源保障能力、科技实力、企业实力、国际经略能力、可持续发展潜力五个方面。要实现核能矿产资源强国, 需要实施一批重大科技创新工程和重大应用示范工程, 需要建设一批千吨级铀资源开发基地, 需要积极“走出去”开展国际合作, 特别是加强与“一带一路”国家的合作, 需要国家在科技创新、产业发展、海外开发等方面给予必要的政策支持。

关键词: 核能矿产资源; 铀资源; 指标体系

中图分类号: F407.1 **文献标识码:** A

Development Strategy of Nuclear Energy Mineral Resources

Zhang Jindai¹, Li Ziyang², Su Xuebin³, Tan Yahui⁴, Li Shengxiang³, Su Yanru³,
Li Jianhua⁴, Deng Ping⁵, Xu Lechang⁴, Pan Ziqiang⁶

(1. China Nuclear Geology, Beijing 100013, China; 2. Beijing Research Institute of Uranium Geology, Beijing 100029, China;
3. China National Uranium Co. Ltd., Beijing 100013, China; 4. Beijing Research Institute of Chemical Engineering and Metallurgy,
Beijing 101149, China; 5. CGNPC Uranium Resources Co. Ltd., Beijing 100029, China; 6. China National Nuclear Corporation,
Beijing 100822, China)

Abstract: Nuclear energy mineral resources refer to uranium resources and thorium resources with potential application prospects. At present, it mainly refers to uranium resources. With an unbalanced global distribution, the supply and demand of the uranium resources will inevitably be adjusted through the market. To build a competitive nuclear industry, a strong supply capacity of the nuclear energy mineral resources is required. A great power of nuclear energy mineral resources should possess both resource endowment and resource management capabilities. The main indicators for a great power of nuclear energy mineral resources should include domestic resource support capacity, scientific and technological strength, enterprise strength, international management and planning abilities, and sustainable development potentials. To become a great power of nuclear energy mineral resources, China should implement a number

收稿日期: 2019-01-05; 修回日期: 2019-01-18

通讯作者: 潘自强, 中国核工业集团有限公司, 科学技术委员会主任, 中国工程院, 院士, 研究方向为辐射防护与环境保护;

E-mail: panzq@cnncc.com.cn

资助项目: 中国工程院咨询项目“矿产资源强国战略研究”(2015-XZ-35)

本刊网址: www.enginsci.cn

of major scientific and technological innovation projects and major application demonstration projects; build a number of 1000-ton uranium resources development bases; participate in international cooperation by actively “going global”, especially cooperation with the “Belt and Road” countries; and provide policy support for scientific and technological innovation, industrial development, and overseas development.

Keywords: nuclear energy mineral resources; uranium resources; indicator system

一、前言

核能矿产资源是指铀资源和具潜在应用前景的钍资源，目前主要是指铀资源。核能矿产资源是军民两用的重要战略资源，是发展核工业的重要物质基础。我国将从核工业大国走向核工业强国，必须具有足够强大的核能矿产资源供应能力做保障。因此，需要充分结合国内实际，着眼全球，找出差距，研究核能矿产资源的发展战略，提出实施核能矿产资源发展战略的重点任务。

二、核能矿产资源现状和供求形势

(一) 核能矿产资源现状

世界核能矿产资源状况：截至2015年1月1日，世界回收成本 < 260 美元/kgU 的保有已查明的可回收资源为 7.641×10^6 t (原地资源为 1.019×10^7 t)，但其分布及开发产量都极不均衡，其中澳大利亚、哈萨克斯坦、加拿大、俄罗斯、美国、纳米比亚、南非、尼日尔、巴西、中国排名前十的国家的铀资源量占了80.25% [1]。据世界核能协会(WNA)统计，2015年全球生产天然铀60514 t，其中89%的份额被Kazatomprom公司、Cameco公司、Areva公司、ARMZ公司(包括U-one)、RioTinto公司、Navoi公司、BHP Billton公司、Paladin公司、中国核工业集团有限公司(CNNC)和中国广核集团有限公司(CGN)十大铀矿公司控制。

中国核能矿产资源状况：截至2017年年底，我国已探明360余个铀矿床。我国铀矿类型目前以“四大类型”为主，其中砂岩型铀资源量占45.51%，花岗岩型占21.84%，火山岩型占16.38%，碳硅泥岩型占8.14%，其他类型约占8.13%。我国铀成矿条件总体较好，最近完成了新一轮预测，潜在常规铀资源量超过 2×10^6 t，非常规铀资源量超过 1×10^6 t，我国是铀资源潜力较大的国家 [2]。我国形成了较完整的铀矿勘查采冶

体系，铀矿勘查形成了较系统的地质理论体系和“天-空-地-深一体化”技术，并全面进入了500~1500 m深度的“第二找矿空间”，最近10多年在北方新探明了6个万吨级至十万吨级的砂岩型铀资源基地；铀采冶工艺技术齐全，主要采用地浸、常规开采-堆浸、常规开采-搅拌浸出等采冶工艺，建立了CO₂+O₂地浸采铀工艺技术为标志的第三代采铀技术，最近10多年在新疆、内蒙古建成了多个现代化的地浸采铀矿山，2017年在新疆伊犁建成了首个千吨级地浸采铀基地，地浸采铀产量占比已超过70%。

(二) 供求形势

世界大部分核电国家坚持继续发展，全球核电规模仍将增长。截至2017年年底，全球在运行的核电机组共448台，总装机容量为391.74 GWe；在建核电机组为60台，装机容量约为60.96 GWe。2016年全球共计核电发电2490 TW·h，占世界总发电量的10.6% [3]。2016年全球铀矿山生产的天然铀为62366 tU，全球铀资源比较丰富，供需稳定，能满足核电发展需求。未来按低需求方案预测，至2035年核电装机容量将增加到418.608 GWe，相应天然铀需求量将增加到66995 tU/a；按高需求方案预测，则至2035年核电装机容量将增加到682.753 GWe，相应天然铀需求量将增加到104740 tU/a。

我国核电建设仍将处于持续稳定增长阶段，核能发电规模和比重将进一步提高，核电将成为绿色能源的重要支柱。我国(大陆)截至2017年年底，在运核电机组共37台，总装机容量为 3.581×10^7 kW，居世界第四位；在建核电机组20台，总装机容量为 2.287×10^7 kW，居世界第一位。在运核电装机容量占全国电力装机总量的2.02%，2017年核电累计发电量为 2.475×10^{11} kW·h，约占全国总发电量的3.94%，与世界平均水平相比还有很大差距 [3]。按常态发展目标测算，我国到2030年将建成运行

总装机容量为（下限目标） 1.18×10^8 kW，核电当年所需天然铀为 2.2×10^4 t，当年消耗铀资源储量为 3.14×10^4 t。如果按核电机组的全寿期为 60 年计算，至 2030 年建成的所有核电机组将共需要消耗铀矿储量为 1.8×10^6 t。如果是快速发展方案，对铀资源的需求将更为巨大 [4]。

全球核能矿产资源分布的不均衡性，势必需要通过市场调节供求。我国核能矿产资源与未来需求相比仍有较大差距，有很强的紧迫性，需要有长远的发展战略，一方面国内要加强勘查和开发工作，以保障有足够的供应比例；另一方面也势必需要面向全球，提升利用国际资源的能力，争取早日迈入世界核能矿产资源强国的行列。

三、世界核能矿产资源强国的主要特征和我国的发展战略目标

（一）核能矿产资源强国的内涵和指标体系

核能矿产资源强国的内涵是指拥有安全可靠的核能矿产资源供应保障体系、先进的科技水平、雄厚的企业实力、强大的国际经略能力和巨大的可持续发展潜力，综合实力国际排名靠前的核能矿产资源国家。据此，可以设置表征核能矿产资源强国的五项一级指标，19 项二级指标（见表 1）。

（二）世界核能矿产资源强国的主要特征和我国的发展战略目标

世界核能矿产资源大国、强国，一种是依靠其本土资源优势发展强大，一种是靠技术、资金实力和依托国家综合实力跨国运作、控制海外资源，或者两者兼备。根据此特点，按照上述指标体系分析，加拿大、澳大利亚、哈萨克斯坦、俄罗斯、法国、美国、中国、日本、纳米比亚、尼日尔共十个国家可列为全球核能矿产资源大国，其中国际排名前六的国家加拿大、澳大利亚、俄罗斯、美国、法国和哈萨克斯坦可称为全球核能矿产资源强国。世界核能矿产资源大国、强国可分成三类：第一类为资源禀赋型（A 型），第二类为资源掌控型（B 型），第三类为禀赋与掌控复合型（A+B 型）。

资源禀赋型（A 型）：本身具有丰富的铀资源，但其资源却被掌控在他国公司手中。本国铀矿冶技术能力和资金都不足或发展缓慢，也没有核电站，铀产品销往国外，资源开发的目的是主要是吸引投资，促进就业，从而带动经济发展。资源禀赋型国家主要是纳米比亚和尼日尔。

资源掌控型（B 型）：国内铀资源贫乏或出于保护而不再开发，但却在他国掌控了较多的铀资源。具备先进的铀矿地质勘查、采冶工艺技术和资金优势，国内核电占比大，基本依靠海外资源保障国内

表 1 核能矿产资源强国的指标体系

一级指标	二级指标
国内核能矿产资源保障能力	国内核能矿产资源在全球的占比地位，达到前三位 核能矿产资源供应保障能力，不低于需求的 1/3
科技实力	科学技术水平 装备能力水平 科技创新能力 研发投入强度
企业实力	世界十强核能矿产资源矿业公司排名 矿业公司多元化水平（含产业延伸程度） 盈利能力
国际核能矿产资源经略能力	资源掌控能力 产品加工能力 运输掌控能力 市场控制能力 权益保障能力
可持续发展潜力	资源勘查投入强度 矿产资源综合利用水平 矿山绿色环保水平 矿山安全水平 能耗水耗水平

需求，积极向国外扩张控制资源，抢夺市场话语权。资源掌控型国家主要是法国和日本。

禀赋与掌控复合型（A+B型）：不仅本身具有较丰富的铀资源，而且掌控着大量的国外优质铀资源，矿业资本市场成熟，拥有先进的铀矿地质勘查、采冶工艺技术，能够影响并主导全球天然铀市场走向，有清晰的全球战略。多数有较大的核电发展规模，对铀资源的需求强劲，禀赋与掌控复合型国家主要有美国、俄罗斯、澳大利亚、加拿大、哈萨克斯坦。其中哈萨克斯坦情况较为特殊，其综合国力不算强大，也没有发展核电，但依仗本国铀资源的绝对优势，依托其他强国，也对外控制部分资源。

根据我国核能发展趋势和我国地质条件及核能矿产资源的特点，我国发展战略目标应是禀赋与掌控复合型（A+B型）的核能矿产资源强国。

四、我国核能矿产资源与世界强国的差距

我国探明的铀资源总体上与核能发展在世界所占比例还是不够相称的。从建设核能矿产资源强国的需要出发，结合我国国情，我国掌控的核能矿产资源在全球的占比地位应达到前三位，国内天然铀供给能力应不低于需求的1/3。现在主要差距表现在如下几个方面。

国内资源虽然较为丰富，但富矿、大矿的天然地质禀赋条件不如加拿大、澳大利亚、哈萨克斯坦，探明的资源量还较为有限，铀资源品位偏低，大型、特大型铀矿床数量还较少，而且勘查程度偏低，目前，基础地质研究和勘查工作资金投入不足，在国家层面尚缺乏统一规划和总体部署，整个国土面积的可勘查面积有近50%处于很低的程度，500m以深大多地区处于空白。

在铀矿勘查能力方面，数字化、信息化技术应用和找矿仪器设备的先进性及研发能力也与目前世界部分核能矿产资源强国还有较大差距，基础地质研究和中大比例尺的系统性预测评价还有很多薄弱环节。

在铀资源开发能力方面，产能偏低，2020年以后要满足国内供应不小于1/3的比例还面临很大压力。企业综合实力还不强，采冶自动化、规模化、集约化和数字化生产水平及劳动生产率等方面还远

不如世界核能矿产资源强国，地下开采的技术装备落后，安全环保技术还有较多薄弱环节。

在利用国际资源能力方面，我国走出国门投资和开发铀资源的时间较晚，资源掌控量和形成的产能规模还不大，经略能力还不强，国际化矿业人才还较为缺乏。目前在国外掌控的权益资源、权益产能不仅规模较小，资源品质不高，而且几乎没有市场话语权。

五、实施核能矿产资源发展战略的重点任务

（一）需要实施一批重大创新工程

重大创新工程主要包括：构建全球铀资源信息数据库和开展大数据应用技术研究；开展大深度攻深找盲技术体系研究、核能矿产资源勘查关键设备研发和核能矿产资源勘查先进分析测试技术研发；开展第四代智能化地浸采铀技术研究、地浸采铀二次开发技术研究与应用、深层铀资源开发技术研究与应用、大型沉积盆地铀煤协调开采技术研究、铀多金属共伴生矿综合利用技术研究与应用、地浸采铀工艺废水深井处置和地下水修复技术研究、常规采冶废物最小化技术研究等。

（二）需要实施一批重大应用示范工程

重大应用示范工程主要包括：实施铀矿大基地探采一体数字化矿山示范工程、重点铀成矿区（带）系统预测与资源扩大示范工程、重点铀矿田/矿化集中区精细地质评价技术示范工程、分布式地浸采铀技术应用示范工程、千吨级绿色高效地浸采铀示范工程、重点铀矿集中区集约化开发示范工程、海外核能矿产资源勘查区找矿示范、南方硬岩矿山环境影响最小化及安全监控预警示范工程、北方砂岩地浸矿山环境影响监控及地下水修复示范工程、重点盆地铀煤协同开采环境影响及防治示范工程等。

（三）建设一批铀资源开发基地

国内探明的铀资源大部分集中在近30个铀矿田或矿化集中区，建设铀矿大基地具备了一定的资源条件。按照规模化、集约化思路，继续加大勘查力度，建设一批探明铀资源量数万吨至十万吨级、天然铀产能千吨级以上的铀资源开发基地，形成以

北方砂岩型铀矿与南方硬岩型铀矿开发相协调的产能格局。

(四) 加强国外铀资源勘查开发

积极落实“一带一路”倡议。“一带一路”国家铀资源十分丰富,哈萨克斯坦、俄罗斯、乌克兰、蒙古、印度、捷克、乌兹别克斯坦等 15 个国家的可回收铀资源总量约占全球可回收铀资源总量的 32.6%。2015 年,哈萨克斯坦、俄罗斯、乌兹别克斯坦、乌克兰、捷克和罗马尼亚六个国家的铀生产总产量约为 3.1×10^4 t, 占当年全球铀总产量的 50.6%, 特别是哈萨克斯坦的铀生产是当年全球总产量的 39.3%, 居全球第一位。由此可见,“一带一路”国家的铀资源及生产在全球铀资源及生产中占有举足轻重的地位。应大力加强与“一带一路”国家合作开发的整体布局, 争取使“一带一路”国家发展成为与我国天然铀供应合作的重要区域。

稳步推进与非洲国家合作, 开拓澳大利亚、加拿大等资源大国铀矿资源市场。非洲铀资源丰富, 互补性强, 合作空间非常广阔。澳大利亚、加拿大是世界铀资源强国, 政治稳定, 矿业及投资法规政策稳定。澳大利亚保有的回收成本 < 260 美元/kgU 的已查明可回收资源有 1.78×10^6 tU, 居全球第一位, 近年产量为 5000~6000 t, 居全球第三位。加拿大铀资源以资源量大、品位极富而闻名全球, 目前保有的回收成本 < 260 美元/kgU 的已查明可回收资源有 7.04×10^4 t, 近 10 年的年产量维持在 9000~10000 t, 2009 年之前长期居全球第一, 之后位居全球第二。此外, 还应积极探索与其他铀资源新兴国家合作, 如阿根廷等。

加强铀资源贸易, 不断提高国际市场的经略能力, 提升我国铀资源的储备水平。在国际铀价低迷期, 能以较低的价格扩大铀资源储备, 并保障国内核电发展需求; 在国际铀价高峰时期, 能抓住机会, 向国外出售一些储备资源。

六、保障措施和建议

(一) 强化创新驱动发展

加强基础研究, 推进引领性原创成果重大突破。深化热液型铀矿和砂岩型铀矿成矿理论研究, 推动

新区新类型铀矿找矿的突破。加强铀矿采冶基础理论研究, 继续推进 $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ 第三代地浸采铀技术的优化, 并争取突破“智能化 + X”第四代采铀技术。

加强创新能力体系建设。建立核能矿产资源勘查开发国家重点实验室和国防科技重点实验室及创新中心等平台, 系统提高创新能力。加强与国际学术组织或科研机构合作, 建立国际化联合科研机构。

健全多层次人才培养体系。加强相关高等院校放射性地质和铀矿采冶工程的学科建设, 组织实施人才培养计划, 打造一支适应核能矿产资源强国需要的人才队伍。

(二) 优化产业布局和完善产业政策

加大地质勘查投入, 进一步加大国家财政资金对于战略性、基础性、公益性铀矿勘查的投入力度。强化地勘能力体系建设, 建立中央财政预算核地勘专项, 形成稳定长效的财政投入机制。

深化产业结构调整, 继续加强北方砂岩型铀矿开发工作, 形成南北方相协调的产能格局。国内铀资源开发继续坚持“上大限小”“多探少采”的保护性开发战略, 建设具有国际竞争力的天然铀产业体系。

完善矿权政策, 提升资源利用水平。多种资源共伴生的地区或盆地的资源开发应统一规划, 依规设置矿业权, 做到依法依规有序勘查开发。在确保安全和环保的前提下, 固体矿产矿业权可与油气矿业权重叠登记。按照“铀矿优先、空间划开、时序错开、合理避让”的原则, 制定铀矿和煤炭、油气等矿产矿业权重叠设置的专门规定, 并形成常态化的协调机制。

鼓励创新合作开发模式, 可以积极推进“一个责任主体、多方参与投资、股份合作开发”模式的实施。技术领域应积极研发铀铁、铀磷、铀钼、铀铍、含铀稀土等共伴生资源的综合回收技术, 降低对环境的影响, 提高资源综合利用水平。

完善环境保护政策。鼓励企业为提高资源采选回收利用水平的技术开发和改造, 财政资金和银行信贷重点支持矿业领域循环经济发展项目。加大矿山地质环境修复治理和矿区土地复垦的投入。加强铀采冶废物最小化和地下水及土壤修复等关键技术

的研发。推进退役后的铀矿尾矿库等铀矿冶设施属地管理。

(三) 完善“走出去”的政策

我国企业进入国际天然铀市场较晚，要占有更大份额，需要投入更多的资金和技术力量。当前天然铀市场价格处于持续低迷状态，我国在国外勘查开发铀资源面临着融资困难增加、盈利能力削弱、开发成本提高、开发技术难度增加等问题，对此，应加大资金支持力度和加强政策协调。一是抓住国际铀价“筑底期”的机遇，设立海外铀资源勘查开发专项基金，帮助企业开展风险勘查和开发项目的并购；二是加强国有资本金支持，国家拟设立境外投资平台，加大对海外铀资源开发项目的国有资本金支持；三是加强政策协调支持，希望国家相关部门加强协调，建立金融机构支持企业“走出去”的专项融资政策和专项融资渠道；四是利用近期国际天然铀市场价格处于持续低迷的有利时机，加快掌控国外部分优质铀资源和确保贸易储备的力度。

七、结语

我国核能矿产资源的勘查开发经过 60 多年的积累，形成了较好的资源基础和较完备的能力体系，加上我国有完整的先进的核工业产业链为依

托，对跻身世界核能矿产资源强国行列已经具有较好的基础条件。今后，只要坚持“创新发展、开放合作”的方针，把加强人才队伍建设放到核心能力建设的首要位置，发挥好我国的制度优势和政策优势，核能矿产资源发展战略的实施一定能顺利推进。

致谢

感谢参与本课题研究的李光亚、陈跃辉、张伟星、薛迎喜、张剑勇、朱博、薛建新、范洪海、肖诗伟、周冕等同志。

参考文献

- [1] Nuclear Energy Agency/ International Atomic Energy Agency (NEA/IAEA). Uranium 2016: Resources, production and demand [R]. Vienna: NEA/IAEA, 2016.
- [2] 张金带, 李子颖, 蔡煜琦, 等. 全国铀矿资源潜力评价工作进展与主要成果 [J]. 铀矿地质, 2012, 28(6): 321-326.
Zhang J D, Li Z Y, Cai Y Q, et al. The Main advance and achievements in the potential evaluation of uranium resource in China [J]. Uranium Geology, 2012, 28(6): 321-326.
- [3] 中国核能行业协会. 中国核能发展报告(2018) [M]. 北京: 社会科学文献出版社, 2018.
China Nuclear Energy Association. China nuclear energy development report (2018) [M]. Beijing: Social Science Literature Publishing House, 2018.
- [4] 潘自强, 张伟星. 中国裂变核能矿产资源可持续发展战略研究 [M]. 北京: 中国原子能出版社, 2016.
Pan Z Q, Zhang W X. Strategic study on sustainable development of fissile nuclear energy mineral resources in China [M]. Beijing: China Atomic Energy Publishing House, 2016.