

# 论印度核能开发的现状、挑战及前景

李小军

**内容提要** 印度自建国之初,在政治家与科学家的密切合作下,对各种核能开发资源进行整合建设,提出三阶段核能开发战略。基于能源安全和国际义务的双重考虑,印度继续推进核能开发,取得突出成就。但是,印度的核能开发仍面临社会压力、政治阻力、核平安关注、资金压力等现实挑战。“福岛震惊”触发全球“核平安复兴”,“核平安复兴”意味着民众对核能平安标准的担忧和要求提高,以及核平安成本的提高,这给印度的核能开发带来一定的民意与政治阻力。尽管如此,全球核能复兴趋势不改,这些压力和挑战难以撼动印度核能开发的决心和意志,印度核能开发前景广阔。

**关键词** 地区与国别政治 印度 核能开发 增值反应堆 核平安 监管

作为一个占世界人口 1/6 和正在经历经济高速发展的国家,为缓解“能源饥渴”,印度对使用和发挥核能潜力表现出了极大兴趣。早在 1944 年,印度核计划创始人霍米·巴巴(Homi K. Bhabha,1909—1966)就曾预言:“人民生活水平的任何实质性提升,倘要得到长期的持续性提升,唯一的可能只能是大量进口燃料或以核能为基础。”<sup>①</sup>显然,在国内化石燃料储藏匮乏和进口能力有限的背景下,独立之初的印度只能将目光投向民用核能的发展。为此,印度在建国之初,就着手对各种核能

---

\* 李小军:广州大学公共管理学院政府管理系副教授。(邮编:510006)

\*\* 《国际政治研究》编委会和匿名评审专家提出了非常宝贵的修改意见,谨此一并致谢!

① Dr. S. K. Jain, “Nuclear Power in India: Past, Present and Future,” p. 1, [www.npcil.nic.in/pdf/CMD\\_paper\\_07dec2010.pdf](http://www.npcil.nic.in/pdf/CMD_paper_07dec2010.pdf), 2013-01-24.

开发的资源进行整合建设,提出和贯彻执行三阶段核能开发战略,核能开发取得突出成就。

然而,印度的核能开发仍面临诸多挑战。特别2011日本福岛核电站因地震和海啸引起严重的核泄漏事故后,再次撞击了核能利用中最为核心的敏感问题:核平安(Nuclear Safety)。<sup>①</sup>对在此之前显得“有点自满”的核能世界来说,福岛核事故的“一个重要警示”就是触发了“核平安复兴”(Nuclear Safety Renaissance),<sup>②</sup>再次引发全球对核能发展前景的关注。作为民用核能开发大国,福岛核事故也引发印度民众对其核电安全的担忧和关注。

为此,本文主要以西方学者的研究成果为基础,并结合国际原子能机构、印度原子能部的相关文件和研究报告,在对印度核能开发的历史与现状进行梳理的基础上,多视角分析印度核能开发面临的现实挑战,并据此评估印度未来核能开发的前景,这对推进“后福岛时代”我国核能开发的平安、稳定和持续发展,具有重要的借鉴意义。

## 一、印度核能开发的历史回顾

核能开发是一项技术复杂与工程浩大的系统工程,需要高层政治家与杰出科学家的通力合作与协同推进。印度核能开发的高起点启动与超常规发展,正是得益于“核能之父”霍米·巴巴博士与首任总理贾瓦哈拉尔·尼赫鲁之间建立的“融洽关系”和密切合作。<sup>③</sup>因为有了尼赫鲁总理的支持,霍米·巴巴博士才有可能大胆提出印度基于自给自足的核能发展设想。1939年,霍米·巴巴在归国旅途中结识尼赫鲁。在尼赫鲁成为印度独立后的首任总理后,将所有与核相关的事务与计划全权委托给霍米·巴巴,并只向尼赫鲁本人负责。印度所有的核政策都是通过霍米·巴巴与尼赫鲁之间不成文的“私人默契”制定的。<sup>④</sup>由此,独立之初,印度推进了一系列旨在启动核能开发的资源整合行动。

---

<sup>①</sup> Nathan Hultman, “Fukushima and the Global ‘Nuclear Renaissance’,” March 14, 2011, [http://www.brookings.edu/opinions/2011/0314\\_japan\\_nuclear\\_hultman.aspx](http://www.brookings.edu/opinions/2011/0314_japan_nuclear_hultman.aspx), 2013-01-24. 核能安全是核能利用与核能发展的生命线。“核能安全”的概念包含两方面内容:一是核平安(Nuclear Safety),旨在确保核设施、核材料不出事故和防止核事故伤害。二是核保安(Nuclear Security),旨在保护核设施、核材料、放射性材料免受人为攻击和动用,重在防止核恐怖主义的发生。从历史角度看,国际社会专注核平安问题,对核保安问题重视不够。“9·11”事件后,核恐怖袭击风险增加,核保安关注度上升。美国主导“全球核保安峰会”(2010、2012),着力凝聚核保安的全球治理共识。福岛核事故触发“核平安复兴”(Nuclear Safety Renaissance),凸显“核平安”与“核保安”之间建立强有力联系的紧迫性。

<sup>②</sup> Sylvia Pfeifer, “Fukushima Triggers ‘Nuclear Safety Renaissance’,” March 11, 2012, <http://www.ft.com/intl/cms/s/0/63cd3612-6b88-11e1-8337-00144feab49a.html#axzz2IsA4xsml>, 2013-01-24.

<sup>③</sup> R. Krishnan, “Saga of Atomic Energy in India,” *The Hindu*, Dec 12, 2002.

<sup>④</sup> “Dr. Homi Jehangir Bhabha,” <http://nuclearweaponarchive.org/India/Bhabha.html>, 2013-01-24.

在核科学研究的指导思想上,印度确立了国家主导科学研究,科学研究服务于核工业、反对纯科学研究的基本方略。在印度的开国精英们看来,要完成国家现代化的宏伟任务,由国家资助和主导科学工程无疑是能给传统印度带来进步与现代化的最有效方法,这就要求科学家的研究活动必须要与国家战略需求相契合。1947年,尼赫鲁在第34届印度科学大会上发表演讲,号召科学家应为国家利益而非个人单纯追求科学真理而努力奋斗。印度负担不起奢侈的纯科学研究,印度科学研究一定要服务于工业需求。<sup>①</sup>实际上,在印度独立前夕,尼赫鲁在一次演说中就已阐明了核研究服务于核工业发展的基本理念。他认为,原子能在未来将扮演一个巨大的和主导的角色,能让电力流动起来,从而打破地理条件的束缚,让工业发展遍地开花。因此,开展大规模的核能研究将是政府义不容辞的责任。<sup>②</sup>为此,印度将核科学家和工程技术人员的培养视为国家首要任务,科研投入也优先保障核技术、国防和宇航等战略性领域。

在核发展领导机构的组建与核发展立法方面,1948年,尼赫鲁总理采纳霍米·巴巴博士的建议,组建负责核政策的“原子能委员会”(The Atomic Energy Commission, AEC),巴巴博士被任命为首任主席。1954年,印度成立由总理直接领导的原子能部(Department of Atomic Energy, DAE),这是一个基础更为广泛的机构,主要负责核技术的发展与部署。原子能部由五个研究中心、三个工业组织、五个公共事业单位、三个服务组织,以及原子能部的辅助机构组成。原子能部的核心任务是:提高核能在能源领域的份额,研究反应堆的建设与运行,发展先进技术,制定和支持核能及相关科学前沿领域的基础研究。<sup>③</sup>在核发展立法方面,1948年,印度议会通过《原子能法》(*The Atomic Energy Act*),将原子能视为一项“国家特权”。<sup>④</sup>印度的《原子能法》虽然以英国《原子能法》为范本,但更强调原子能研究与开发的保密性。为应对外界对这些保密条款的批评,印度强调发展原子能是基于和平而非军事目的。

在启动核能开发之初,印度就特别重视研究机构与研究团队的组建。霍米·巴巴早在1944年就设想了核能发展的巨大潜力,以及核能成功运用于电力生产领域的可能性。基于此,印度国内核计划确立的重要信念,就是要努力实现核科学及

---

① Jayita Sarkar, "Big State, Big Science, Big Projects: The Nuclear Energy Programme and State (un)-managerialism in India," Paper prepared for "Rising Powers and the Future of Global Governance" International Conference, University of Sussex, May 16-17, 2012. pp. 2-3.

② Ibid, p. 3.

③ Government of India Department of Atomic Energy, "Recruitment and Promotion Guidelines in DAE for Scientific Technical Personnel," January 2010, <http://www.barc.ernet.in/hrd/careerdigest.pdf>, 2013-01-24.

④ Itty Abraham, *The Making of the Indian Atomic Bomb: Science, Secrecy and the Postcolonial State*, London and New York: Zed Books, 1998.

工程研发方面的“自力更生”与“技术独立”。<sup>①</sup>当霍米·巴巴意识到印度缺乏从事核物理、宇宙射线、高能物理等基础研究机构时,就决意组建基础研究机构和研究团队。同年,霍米·巴巴写信给多拉普吉·塔塔(Sir Dorabji Tata)慈善信托基金会,要求对建立一所科学研究机构提供财力援助。<sup>②</sup>塔塔慈善信托基金会赞同巴巴建议,并同意提供财力支持。1945年,塔塔基础研究院(Tata Institute of Fundamental Research, TIFR)成立,霍米·巴巴为首任负责人,从而开启了印度有组织的核能科学研究。1949年,印度科学与工业理事会(Council of Science and Industrial Research, CSIR)将塔塔基础研究院指定为承担核领域重大研究项目的中心基地。<sup>③</sup>1954年,印度成立“特朗贝原子能研究所”(Atomic Energy Establishment Trombay, AEET)。1967年,为纪念1966年死于空难的霍米·巴巴,特朗贝原子能研究所更名为“巴巴原子能研究中心”(The Bhabha Atomic Research Centre, BARC)。巴巴原子能研究中心是一个跨学科的研发机构,学科涵盖物理学、化学、工程学、生物学、反应器工程学、健康与安全、材料学、核燃料、核回收利用等。研发活动包括核燃料后处理厂、核废料管理设施、燃料制造设施、研究反应堆、同位素生产设施等的运行,以及一系列科学与技术的支持功能:人力资源开发、图书馆和信息服务、知识产权保护、技术转让和技术服务等。<sup>④</sup>

1954年,在尼赫鲁出席的“基于和平目的原子能发展”(Development of Atomic Energy for Peaceful Purposes)会议上,霍米·巴巴提出著名的“三阶段核能计划”。<sup>⑤</sup>霍米·巴巴对“三阶段核能计划”提出的背景及技术发展道路进行过详细阐释:“印度容易提取的钍储量达50万吨,而已知的铀储量还不及钍储量的1/10。因此,印度原子能计划的长期目标,一定要建立在尽可能使用钍原料而非铀原料进行核能发电的基础之上……采用天然铀原料的第一代原子能发电站仅用于启动原子能计划……由第一代核电站产生的钷可用于旨在发电、将钍转化为U-233,或通过增值增益将贫化铀转化为更多钷的第二代核电站……第二代核电站可视为是第三代增值核电站(与发电期间的燃烧方式相比,能产生更多U-233)的一个中间步骤。”<sup>⑥</sup>简言之,印度的核能计划分三阶段展开:第一阶段,开发以本土天然铀为燃料的加压重水反应堆(Pressurized Heavy Water Reactors, PHWRs);第二阶段,

① “India’s Nuclear Programme,” [http://www.dpec.co.in/pdf/nuclear\\_facts.pdf](http://www.dpec.co.in/pdf/nuclear_facts.pdf), p. 1, 2013-01-24.

② Virendra Singh, “Homi Jehangir Bhabha: Architect of Modern Science and Technology in India,” Tata Institute of Fundamental Research, 18 Jun 2009, <http://arxiv.org/pdf/0906.3356.pdf>, pp. 4-5.

③ U. P. I. “Tata Institute to Be Centre of Nuclear Research,” *The Indian Express*, February 2, 1949.

④ Homi Bhabha National Institute, “Bhabha Atomic Research Centre, Mumbai,” <http://www.hbni.ac.in/ci/11barc.htm>, 2013-01-24.

⑤ Puri, Raman, “Indo-US Nuclear Deal: The Technology Dimension,” *The IUP Journal of Governance and Public Policy*, Vol. 2, Issue 4, 2007, p. 77.

⑥ Ganesan Venkataraman, *Bhabha and His Magnificent Obsessions*, Universities Press, 1994, p. 157.

开发以钷(最初来自于加压重水反应堆)为燃料的快中子增殖反应堆(Fast breeder reactor, FBR);第三阶段,使用钍—U233 燃料循环开发先进核电系统。<sup>①</sup> 1958年,印度政府正式采纳三阶段核能计划,将其作为印度核能开发的战略而加以贯彻执行,并在核能开发的实践中不断对其进行修正和完善。

## 二、印度核能开发现状

霍米·巴巴提出的“三阶段核能计划”已执行近60年,印度宣布将继续执行该战略。近60年来,即使在缺乏国外技术或工业援助的情况下,印度在“核科学与核技术的几乎所有方面”<sup>②</sup>都取得了重要进展。这种进展不但体现在核能反应堆的科学与工程,以及工业制造的相关领域,而且还涵盖采矿、重水生产、燃料制造、燃料后处理与核废料管理等方面。美国核科学家塞格福雷德·海克(Siegfried Hecker)对印度的核能发展给予了高度评价,认为“印度已拥有在技术上最具抱负和创新的核能计划”,“印度核实验设施发展的程度与功能只有同领域的俄罗斯才能与其媲美,甚至遥遥领先于同领域发展迟缓的美国”。<sup>③</sup> 印度的在运核电站(表1)与在建核电站(表2),在数量、规模和技术水平方面,居世界核能发展的前列。

表1 印度在运核电站一览表

序号	核电站名称	机组	地址	功率(MWe)
1	塔拉普核电站	1	塔拉普,马哈拉什特拉省	160
2	塔拉普核电站	2	塔拉普,马哈拉什特拉省	160
3	塔拉普核电站	3	塔拉普,马哈拉什特拉省	540
4	塔拉普核电站	4	塔拉普,马哈拉什特拉省	540
5	拉吉斯坦核电站	1	拉瓦巴塔邦,拉吉斯坦	100
6	拉吉斯坦核电站	2	拉瓦巴塔邦,拉吉斯坦	200
7	拉吉斯坦核电站	3	拉瓦巴塔邦,拉吉斯坦	220
8	拉吉斯坦核电站	4	拉瓦巴塔邦,拉吉斯坦	220
9	拉吉斯坦核电站	5	拉瓦巴塔邦,拉吉斯坦	220
10	拉吉斯坦核电站	6	拉瓦巴塔邦,拉吉斯坦	220
11	马德拉斯核电站	1	库丹库拉姆,泰米尔纳德邦	220

① R. G. Bucher, “India’s Baseline Plan for Nuclear Energy Self-sufficiency,” ANL/NE-09/03. *Nuclear Engineering Division*. Prepared for: National Nuclear Security Administration, <http://www.ipd.anl.gov/anlpubs/2010/05/67057.pdf>, p.2, 2013-01-24.

② Department of Atomic Energy, “The Saga of Atomic Energy in India,” <http://www.dae.gov.in/publ/comvoll/pdf/start.pdf>, 2013-01-24.

③ Maseeh Rahman, “How Homi Bhabha’s Vision Turned India into a Nuclear R&D Leader,” November 2011, <http://www.guardian.co.uk/environment/2011/nov/01/homi-bhabha-india-thorium-nuclear?intemp=239>, 2013-01-24.

(续表)

序号	核电站名称	机组	地址	功率(MWe)
12	马德拉斯核电站	2	库丹库拉姆,泰米尔纳德邦	220
13	纳罗拉(Narora)核电站	1	纳罗拉,北方邦	220
14	纳罗拉核电站	2	纳罗拉,北方邦	220
15	卡克拉帕核电站	1	卡克拉帕,古吉拉特邦	220
16	卡克拉帕核电站	2	卡克拉帕,古吉拉特邦	220
17	凯加核电站	1	凯加,卡纳塔克邦	220
18	凯加核电站	2	凯加,卡纳塔克邦	220
19	凯加核电站	3	凯加,卡纳塔克邦	220
20	凯加核电站	4	凯加,卡纳塔克邦	220

资料来源: Government of India, Atomic Energy regulatory Board (Board (AERB)), "Facilities under Purview of AERB," <http://www.aerb.gov.in/cgi-bin/constitution/facilities.asp>, 2013-01-24.

显然,霍米·巴巴提出的“三阶段核能计划”,主要基于对“燃料”与“技术”两大因素的考虑。从燃料角度来看,印度是一个“贫铀富钍”的国家,印度的核能要获得可持续性发展,必须要获得充足的燃料供给。在铀储存贫乏和铀进口供给有限的背景下,印度必须发展基于钍燃料的核电系统。从技术角度来看,印度遵循“由易到难”的原则。第一阶段通过引进、吸收和创新,重水技术已较为成熟,已大规模运用于商业发电领域。第二阶段的快中子增殖反应堆主要承担燃料技术开发试验平台的功能,发电量有限,实际上是技术示范阶段。第三阶段是最复杂也是最为关键的技术发展阶段,即着力推进钍燃料循环技术发展,从而确保印度自给自足核能的可持续性发展。由此可见,印度的三阶段核能发展计划,主要是一种基于燃料考量的技术发展路径,并非线性的先后逻辑关系。在后来的发展中,更呈现出齐头并进和纵横交错的发展态势。为此,笔者主要从技术发展路径的角度,梳理印度三阶段核能发展取得的重要进展。

表2 印度在建核电站一览表

序号	核电站名称	机组	地址	功率(MWe)
1	库丹库拉姆核电站项目	1	库丹库拉姆,泰米尔纳德邦	1000
2	库丹库拉姆核电站项目	2	库丹库拉姆,泰米尔纳德邦	1000
3	原型快增殖反应堆		卡尔巴卡姆,泰米尔纳德邦	500
4	卡克拉帕核电站项目	3	卡克拉帕,古吉拉特邦	700
5	卡克拉帕核电站项目	4	卡克拉帕,古吉拉特邦	700
6	拉吉斯坦核电站项目	7	拉瓦巴塔邦,拉吉斯坦	700
7	拉吉斯坦核电站项目	8	拉瓦巴塔邦,拉吉斯坦	700

资料来源: Government of India, Atomic Energy regulatory Board (AERB), "Facilities Under Purview of AERB," <http://www.aerb.gov.in/cgi-bin/constitution/facilities.asp>, 2013-01-24.

## (一) 印度第一阶段的核能开发

虽然在核能开发启动之初,印度就特别强调自力更生和技术发展的自主性,但事实上印度最初的核能发展恰好是在外国技术援助之下发展起来的。印度最初的核能开发,主要由巴巴原子能研究中心承担,集中攻关研究反应堆的建设和开发。1954年,霍米·巴巴邀请剑桥大学的同窗约翰·考克饶夫爵士(Sir John Cockcroft)帮助印度建设一个低容量的研究反应堆。数月后,考克饶夫爵士提供了详细的工程图样、技术数据,并为“游泳池式反应堆”(swimming pool reactor)提供浓缩铀燃料棒。<sup>①</sup>这是由巴巴原子能研究中心承建的第一个反应堆,即仅有1兆瓦(MW)的“阿帕莎拉研究堆”(APSARA)。该反应堆于1956年开始运行,是亚洲第一个研究反应堆,也是苏联之外亚洲当时唯一的反应堆,更是印度声称自主研发的反应堆。<sup>②</sup>

印度第二座研究反应堆是锡鲁斯(Cirus)反应堆,采用了加拿大重水型国家实验性反应堆的设计,称为“加拿大—印度反应堆”(Canada-India Reactor, CIR)。由于美国提供了重水援助,后来就发展为著名的“加—印反应堆,美国”(Canada-India Reactor US, CIRUS)。这是一个拥有40兆瓦(MW)的重水慢化、轻水冷却、使用天然铀作为燃料的研究反应堆。美加两国还在人才方面对印度提供援助。在1955—1974年间,1104名印度科学工作者被分配到美国不同的核设施工作。在1971年前,有263名印度科学工作者在加拿大的核基地接受了培训。<sup>③</sup>虽然锡鲁斯反应堆早于《核不扩散条约》(NPT)及其安全保障的规定,但印度在同加拿大和美国签署供应合同时,承诺该反应堆“仅用于和平”,但在美国的技术援助下,锡鲁斯反应堆却从乏燃料棒中提取了印度最初用于核武器制造的钚,并将其用于1974年的首次核试验。锡鲁斯反应堆在1997年被关闭维修,计划2002年重新运行,后又推迟到2005年运行。在美印达成民用核能协议后,印度根据协议规定于2010年12月31日正式关闭该反应堆。

然而,要实现反应堆的发电并非易事。印度决定在轻水和重水两条线上来进行试验。印度原子能委员会打算从英国原子能委员会(UKAEA)购买印度的首座发电反应堆,英国原子能委员会也承诺向印出售一座以天然铀作为燃料的石墨气

---

① M. V. Ramana, “Chapter 3: Nuclear Power in India: Failed Past, Dubious Future,” *Program on Science and Global Security*, Princeton University, p. 74.

② Dr. H. N. Sethna, “India’s Atomic Energy Programme: Past and Future,” *IAEA Bulletin*, Vol. 21, No 5, p. 4.

③ George Perkovich, *India’s Nuclear Bomb: The Impact on Global Proliferation*, Berkeley, CA: University of California Press, 1999.

冷反应堆(Gas Graphite Reactor),但英国要价太高,反被美国通用公司夺标。<sup>①</sup>最终,通用公司以交钥匙形式向印度提供了两座200兆瓦的“沸水反应堆”(Boiling Water Reactors, BWR),即塔拉普-1(Tarapur 1)和塔拉普-2(Tarapur 2),并在运行初期提供了浓缩铀。两座轻水反应堆在1969年开始商业运行,但周期性技术事故不断。后来,随着工业技术水平的提升,印度工程师又开发出了塔拉普-3(Tarapur3)和塔拉普-4(Tarapur4),并分别于2005年9月和2006年8月投入运行。

1961年,印度建立了第一座后处理厂,成为世界上第五个拥有核燃料回收设施的国家。1956—1966年,印度还进行了诸如“铀萃取和提炼”(uranium extraction)、核燃料制造(fuel fabrication)等技术攻关活动。尽管如此,这仍然无法改变印度总体工业技术薄弱,浓缩技术落后的现状。如果开发基于天然铀作为燃料的重水反应堆,不但可以回避浓缩技术落后的短处,而且较之轻水反应堆能提取更多的钚,这对铀矿资源贫乏的印度来说无疑是首选。为此,霍米·巴巴与加拿大原子能公司(Atomic Energy Canada Limited, AECL)和蒙特利尔工程公司(MECO)达成一项建设200兆瓦重水反应堆的协议。该反应堆以加拿大“道格拉斯角反应堆”(Canada's Douglas Point reactor)作为参照体,名为瓦巴塔-1(Rawatbhata 1)反应堆,是印度第一座重水反应堆。但该反应堆一直问题不断,不久装机容量就退化到了90兆瓦。印度核电有限公司(NPCIL)复制的瓦巴塔-2(Rawatbhata2)也遇到了严重的技术困难,实际上这两个重水反应堆直到1972年才实现运行。

在此基础上,印度将开发重点转向了加压重水反应堆。印度工程师开发了九个202兆瓦的加压重水反应堆,并在1984—2007年间投入运行,不但装机容量稳步提升,而且其安全运行记录可与世界上运行最好的反应堆相媲美。事实上,从2005年开始,印度反应堆运行的最大挑战,已从技术挑战转向了燃料供给。一些核电站之所以不能正常运行,主要缘于燃料短缺,这也是美印两国达成民用核协议的重要动因之一。

## (二) 印度第二阶段的核能开发

虽然西方发达国家对部署快中子增殖反应堆的紧迫性下降了,但对印度和俄罗斯这些铀短缺的国家来说,仍然比较重视开发快中子增殖反应堆。特别对印度这样一个钍储量丰富而铀资源贫乏的国家来说,在缺乏钚再循环生产能力的情况下,现有的铀储量根本无法满足核电发展的需求。快中子增殖反应堆却可以使铀燃料中钚的提取能力至少提高65倍,是一种能让印度丰富钍资源得到大规模运用

---

<sup>①</sup> M. V. RaMaNa, "The Indian Nuclear Industry: Status and Prospects," *Nuclear Energy Futures Paper*, No. 9, December 2009, p. 3.



的一种可靠技术,能让核发电能力得到成倍增长,届时能满足印度 2050 年预计能源需求的 1/4。<sup>①</sup>

印度原子能部虽然在其创立之初就讨论过增值反应堆问题,但对增值反应堆的概念研究却开始于 20 世纪 60 年代早期。1965 年,巴巴原子能研究中心开发了一个快中子反应堆部件,并开展了一个 10 兆瓦实验增值反应堆的设计工作。1969 年,印度原子能部与法国原子能委员会(CEA)达成一项合作协议,获取了法国狂想曲实验堆(the Rapsodie test reactor)和凤凰反应堆(the Phénix reactor)蒸汽发生器的设计图样,<sup>②</sup>从而开发出印度第一个快中子增值试验反应堆(Fast Breeder Test Reactor, FBTR)。1971 年 9 月,印度原子能部批准了快中子增值试验反应堆的开发预算,并预测将在 1976 年服役。

作为印度原子能部和法国原子能委员会合作协议的组成部分,有 30 多名印度工程师和科学人员在法国接受了培训,这些科研人员回国后在 1971 年组建了中子反应堆研究中心(the nucleus of the Reactor Research Centre, RRC)。1985 年,该中心更名为“印度甘地原子能研究中心”(Indira Gandhi Centre for Atomic Research, IGCAR)。同年,该中心开发出一个 40 兆瓦的快中子增值试验反应堆。在此基础上,印度原子能部制定了开发更大型“原型快增殖反应堆”(Prototype Fast Breeder Reactor, PFBR)的计划。1990 年,据报道,印度政府已“同意该反应堆的初步设计,并批准建设”,并打算于 2000 年投入使用。<sup>③</sup>该反应堆在 2004 年 10 月才开始建设,计划在 2010 年投入使用。后来,通过改进设计,印度开发出具有商业价值的 500 兆瓦原型快增殖反应堆。印度计划于 2013 年初将国内首座原型快增殖反应堆投入运行。<sup>④</sup>

综合而言,印度快堆技术发展的特色之一,在于快堆技术的发展并不局限于其自身,而是对快堆技术及整个循环体系的所有环节都开展深入研究,促使快堆技术及相关的燃料装备、后处理及燃料再循环、废物处理、核安全等技术都得到了协调发展,从而实现快堆及其燃料循环体系的整体发展。

### (三) 印度第三阶段的核能开发

印度第三阶段核能计划发展的关键是对丰富钍储量的运用。长期以来,由于

---

① “History and Evolution of Fast Breeder Reactor Design in India: A Saga of Challenges and Successes,” *IGC Newsletter*, Vol. 69, July 2006, p. 1.

② Thomas B. Cochran et al., “Fast Breeder Reactor Programs: History and Status,” *Research Report 8 International Panel on Fissile Materials*, February 2010, p. 38.

③ Mark Hibbs, “India’s New Breeder Will Be on Line by 2000, Iyengar Says,” *Nucleonics Week* 31, No. 42, 1990.

④ 中华人民共和国国家原子能机构:《印度原型快堆将于 2013 年投入运行》, <http://www.caec.gov.cn/n16/n1100/n1313/434352.html>, 2012-02-27。

没有掌握直接的钍运用技术,印度第三阶段核能发展计划停滞不前。在反思第三阶段核能发展得失的基础上,印度原子能部制定“修整第三阶段印度核能计划”,<sup>①</sup>提出第三阶段核能发展的具体目标:实现钍燃料在商业上的规模化运用;实现国内核电站的大规模建设;在多类型能源发电选项中选取最佳经济效益者;通过对固有的和被动安全特征的最优利用,获得高水平的透明平安;最大化钍燃料循环的反扩散潜力;要为非电力利用的适应性做准备,特别是海水淡化和高温处理运用,其中也包括非化石液体燃料的发电运用。

为此,印度基于直接利用钍的反应堆创新性设计,力求在“三阶段计划”上取得同步进展:<sup>②</sup>

一是进步型重水式反应堆(Advanced Heavy Water Reactor, AHWR)。进步型重水式反应堆的设计与开发,是为了获得对钍储存的大规模使用,并用于商业核电。进步型重水式反应堆通过燃烧 U-233,同时在可持续“闭合”循环中将钍资源转化为铀。该反应堆不但附加有能削减环境影响的燃料循环,而且也拥有可削减资源与运行成本的许多特征。<sup>③</sup>事实上,巴巴原子能研究中心自 20 世纪 60 年代末期就开始研究钍燃料的后处理,并于 1970 年 9 月分离出了首批 U-233。通过努力,印度成功开发和部署以钍作为燃料的卡米尼(Kamini)微堆,据称是世界上第一座用钍作核燃料的反应堆,是印度利用钍矿发展核能的一个重要里程碑。该反应堆在 1996 年获得重大突破,并于次年实现了 30 兆瓦的满功率运行。这些研究进展奠定了印度发展钍燃料循环的基础,标志着印度已进入其核能计划的第三阶段。<sup>④</sup>

二是加速器驱动系统(Accelerator-Driven Systems, ADS)。加速器驱动系统是一种不但能提供自给自足电力生产系统的技术,也是一种有助于核废料处置的方法。该系统能成倍削减裂变材料时间,能焚化长寿命锕系元素和裂变产物,从而导致削减长寿命放射性废料的可能性,对钍的使用更是如此。<sup>⑤</sup>加速器驱动系统在本质上是一种使用裂变高能粒子的临界系统,废料生产量少是其突出优点。

三是紧凑型高温反应堆(Compact High Temperature Reactor, CHTR)。紧凑型

---

① Department of Atomic Energy, “Shaping the Third Stage of Indian Nuclear Power Programme,” <http://www.uxc.com/smr/Library/Design%20Specific/AHWR/Papers/Shaping%20the%20Third%20Stage%20of%20Indian%20Nuclear%20Power%20Programme.pdf>, p. 8, 2013-01-24.

② Dr. S. K. Jain, “Nuclear Power-An Alternative,” NPCIL, <http://www.npcil.nic.in/pdf/nuclear%20power-%20an%20alternative.pdf>, p. 4. 2013-01-24.

③ Bhabha Atomic Research Centre, “AHWR300-LEU Advanced Heavy Water Reactor with LEU-Th MOX Fuel,” <http://www.barc.gov.in/reactor/ahwr.pdf>, p. 3, 2013-01-24.

④ R. G. Bucher, *Nuclear Engineering Division*, pp. 14-15.

⑤ *Nuclear India*, Vol. 40, No. 3-4, 2006, p. 5, see <http://www.dae.gov.in/ni/nisep06/nisep06.pdf>, 2013-01-24.

高温反应堆是一种紧凑型的模块化反应堆,不但适合边远地区电力的生产,而且也适合在化石原料转化过程中生产过程热,而且也适合在化石原料转化过程中生产过程热。结构紧凑和模块化的设计,使紧凑型高温反应堆特别适合向没有连接国家电网的边远地区提供电力。紧凑型高温反应堆的高运行温度提供的过程热,适合诸如氢、提纯的低级碳、回收液体燃料的石油等可替代运输燃料的生产。<sup>①</sup>

#### (四) 核能协议 (USIND) 签署: 印度核能开发迎来新机遇

1974 年核试验后,印度被排除在国际防扩散机制之外。由于印度不是《核不扩散条约》与“核供应国集团”(NSG)的成员国,不允许从国际市场上进口核燃料、反应堆技术及设备。印度要实现雄心勃勃的核能发展计划,就必须促使美国的政策转变,并借此打破国际核制裁态势。1998 年核试验后,美国对印实施严格的经济制裁,两国关系一度跌入冰点。但随着两国新政府的组建和领导人的新老交替,为改善关系带来了机遇。特别“9·11”事件后,迫使美国重新思考其南亚政策和印度的战略地位。布什政府决意将印度塑造为亚洲的战略伙伴,促使世界上最大的民主国家成为平衡中国崛起的军事与政治杠杆。此外,印度也是一个不可小觑的庞大新兴市场,核合作可确保美国公司在参与印度核能建设的国际竞争中保持优势地位。美国希望能从印度未来十年间高达 1500 亿美元的核电站建设中能分一杯羹。<sup>②</sup>

2004 年 1 月,布什政府出台《美印战略关系的后续步骤》(NSSP),强调在诸如民用太空项目和民用核活动方面对印度提供更多帮助和支持。2005 年 7 月 18 日,美印发表建立“全球伙伴关系”宣言,宣布开展全面的民用核合作。2008 年 9 月,45 个核供应国集团成员国一致同意取消对印度的核制裁,允许印度从国际市场上获取民用核技术与核燃料。同年 10 月,布什总统签署《美国与印度核合作认证与核不扩散促进法案》(United States-India Nuclear Cooperation Approval and Non-proliferation Enhancement Act),该法案经国会批准正式生效。

在民用核协议中,印度为谋求核能发展利益,虽做出了一系列义务承诺,<sup>③</sup>但谋得的核发展权利尤为突出。首先,印度成功获得核分离(民用和军用分开)发展权,美国承诺不干涉印度基于军事目的的核计划,这为核武发展创造了更为有利的

① *Nuclear India*, Vol. 40, No. 3-4, 2006, p. 5.

② Dafna Linzer, “Bush Officials Defend India Nuclear Deal,” *The Washington Post*, July 20, 2005.

③ 印度同意其民用核项目接受国际原子能机构(IAEA)的核查,但具体哪些核项目应归入核查范围则由印方决定;印方承诺签署一项附加议定书,同意继续暂停核试验和强化核武库安保;美国支持印度同《禁止生产核裂变材料公约》(FMCT)展开谈判,印度承诺不会将铀浓缩与核燃料回收技术转让第三国;印度将允许美国公司在本国建立核反应堆,并为其民用核能项目提供核燃料。可参见 Esther Pan et al., “The U. S. - India Nuclear Deal,” Council on Foreign Relations, September 4, 2008, <http://www.washingtonpost.com/wp-dyn/content/article/2008/09/04/AR2008090401614.html>, 2013-01-24.

条件,是印度重大的外交胜利;其次,美国督促核供应国集团成员国准许印度从国际市场购买核燃料,这对解决印度的“铀短缺”和确保能源安全具有重要意义;第三,美国承诺帮助印度建立应对未来供给中断危机的核燃料战略储备,这对确保印度核能开发的长期稳定发展至关重要;第四,美印两国同意坚持双向受益的核贸易原则,这为印度同第三国开展核反应堆、涵盖铀浓缩和核燃料回收在内的核燃料循环的技术合作开启了方便之门,从而为印度的核能发展带来了新的机遇。

### 三、印度核能开发面临的挑战

印度提出了雄心勃勃的核能发展计划,而民用核合作协议的签署也为加快核能开发的步伐增添了新动力。然而,这并不意味着印度的核能开发就会一帆风顺。印度的核能开发仍然面临诸多挑战。

#### (一) 社会压力:影响日隆的“反核抗议”活动延缓核能开发步伐

20世纪50年代晚期,全球出现反核抗议活动,其宗旨是反对核武器,倡导核裁军。1958年,英国爆发阿尔德梅斯顿(Aldermaston)大游行,其政治诉求就是争取核裁军。1961年,美国60座城市中有近5万名妇女参与了旨在反对核武器的和平罢工游行。1964年,澳大利亚部分中心城市爆发“禁止核弹”(Ban the bomb)游行。

进入20世纪70年代后,核能逐渐成为民众抗议的一个重要议题。1975—1977年,作为核能开发大国,法国针对核能的抗议示威游行有10次之多,参加总人数约为17.5万人。美国也爆发由“蛤壳联盟”(Clamshell Alliance)在锡布鲁克核电站和“鲍鱼同盟”(Abalone Alliance)在魔鬼峡谷核电站举行的核能抗议活动。<sup>①</sup>1979年,三厘岛核事故发生后,抗议活动的规模更大。同年,联邦德国的波恩爆发了有12万人参加的反核能示威游行。1986年,切尔诺贝利核事故后,在罗马有15万—20万人举行反对意大利核项目的示威活动。2011年,日本福岛核事故后,日本和印度等国家又掀起了新的核能抗议活动。

印度反核活动萌芽于国家层面对核武器的道德批判与核裁军主张。1948年,甘地就曾指出,“我认为为了大规模毁灭男人、妇女和儿童而部署原子弹,是对科学最恶魔式地运用”。<sup>②</sup>1978年,印度提出了一项禁止或威胁使用核武器的国际公约。1982年,印度号召“核冻结”(nuclear freeze),建议禁止用于核武器裂变材料

<sup>①</sup> Marco Giugni, *Social Protest and Policy Change: Ecology, Antinuclear, and Peace Movements in Comparative Perspective*, Rowman & Littlefield Publ Group, 2004, p. 44.

<sup>②</sup> Muchkund Dubey, "President Obama's Initiative for Achieving a Nuclear Weapons-Free World," *Mainstream*, Vol. 47, No. 22, May 16, 2009.

的生产,核武器及其运载系统的生产。但随着印度核试爆炸和核能计划的发展,印度反核活动演变为对核武器和核能安全的双重关注,现在又重点转向对毁灭性核电事故危险的持续关注。在印度,由记者、作家、科学家和学者组成的社会精英阶层,掀起核能抗议活动。他们通过开展课题研究,发表著述,参与国内和国际相关会议,制定阶段性抗议计划等手段,质疑核武器的道德性,批评核大国的地缘缺陷和印度核发展的非民主本质,关注放射性废料对社会环境和公众健康的影响。

印度社会中参与反核抗议活动最积极和最激进的,当属其利益和命运直接受到核能发展影响的草根阶层。为捍卫自己的土地权利、生活方式、身体健康,置身其中的农民、渔民和矿工组成反对核能发展的利益共同体。典型案例是印度南部泰米尔纳德邦的当地民众对库坦库拉姆(Koodankulam)核电站建设的抗议活动。福岛核事故更是刺激了民众的抗议情绪。2011年3月,在长期致力于反核的社会活动家S. P. 乌代·库玛(S. P. Uday Kumar)的领导下,来自于农耕和渔业社区数以百计的抗议者(其中大多数是妇女),通过集会抗议竭力阻止库坦库拉姆的核电站建设活动,迫使政府在当地实施戒严,并逮捕约200个抗议者。<sup>①</sup>辛格政府指责有外国势力插手抗议活动。

成立于1978年的“卡西学生联合会”(KSU),致力于反对铀矿开采的抗议活动,是印度草根组织反核抗议活动的有机组成部分。高质量铀储存的贫乏一直是印度核能开发计划中的“阿喀琉斯之踵”。印度政府决定在梅加拉亚邦(Meghalaya)的卡西丘陵(khasi hills)开发一座新铀矿,预计可开采铀27.5万吨。但该工程一旦实施,将有三万名卡西原住民(adivasi)可能被迁移,72个村庄的351公顷的土地将会被征收。<sup>②</sup>在印度获得独立后,印度宪法给与卡西部落高度的自治权,享有独立的自治选区,享有在土地使用、财产继承、婚姻和社会习俗方面的司法管辖权。卡西原住民认为,为了全印度的福祉而牺牲卡西人的利益,让卡西人失去自己的土地,遭受严重的健康威胁,这是不公正的。但卡西学生联合会(KSU)为赢得更多的道义支持,认为反对铀矿开采的主要目标在于阻止外国技术人员、工程师和廉价劳动力的侵入。<sup>③</sup>2004年,在卡西学生联合会写给梅加拉亚邦最高领导人的信件就明确表明了这一立场:“我们绝不让祖先留下的一英寸土地卖给我们认为是自己敌人的外国人。”<sup>④</sup>

---

① Monamie Bhadra, “India’s Nuclear Power Problem,” <http://www.aucegypt.edu/GAPP/CairoReview/Pages/articleDetails.aspx?aid=167>, 2013-01-24.

② Monamie Bhadra, <http://www.aucegypt.edu/GAPP/CairoReview/Pages/articleDetails.aspx?aid=167>, 2013-01-24.

③ Vasundhara Sirnate, “Students Versus the State: The Politics of Uranium Mining in Meghalaya,” *Economic and Political Weekly*, Vol. 44, No. 47, November 21, 2009, pp. 18-23.

④ Bengt G. Karlsson, “Nuclear Lives: Uranium Mining, Indigenous Peoples, and Development in India,” *Economic and Political Weekly*, Vol. 44, No. 34, August 22, 2009.

此外,作为反核抗议活动草根组织的“贾坎德邦反辐射组织”(JOAR),则主要关注因核能发展而造成的民众健康与职业病方面的问题。贾坎德邦反辐射组织认为,生活和工作在贾杜古达(Jaduguda),人人都拖着“辐射躯体”(radiated bodies),都在饱受核经济笼罩下的痛苦。有村民对媒体抱怨说,“我们有许多人死于癌症和肺结核,有许多畸形的孩子,妇女中也有许多人流产。我们有太多的悲痛。我们生活在辐射的笼罩之下,我们无法逃避辐射。”<sup>①</sup>人们看到越来越多的“皮疹,畸形的同伴,生下来就没有尾巴的奶牛,患上了不知名疾病的鱼儿,包括老鼠、猴子和兔子这样的小动物都从该地区消失了”。<sup>②</sup>于是,不再沉默,而是掀起了对产生核辐射的核能计划的抗议活动。

毫无疑问,民众的反核抗议活动已在一定程度上延缓了印度的核能开发步伐。其中,民众抗议已延缓了库坦库拉姆核电站建设的进程,使原定于2010年12月投入运行的计划搁置。印度政府指责外国非政府组织对本国民众反核抗议活动提供资金援助,迫使印度核电站要么延缓运行,要么被迫停工。辛格总理就曾表示,泰米尔那德邦1000兆瓦的核反应堆“因这些非政府组织而陷入困境,我认为主要是来自美国的非政府组织,无法理解我们国家对增加能源供给的需求”。<sup>③</sup>为此,印度政府做出反击:宣布吊销三家非政府组织的活动许可证,关闭三家援助团体。理由是他们将原本用于帮助残疾人和根除麻风病的资金非法转移给反核抗议者。<sup>④</sup>辛格政府还将参与抗议活动的印度15家团体中四家的银行账户进行冻结,并撤销其活动许可证。

## (二) 政治阻力:核能开发的国内政治羁绊依然存在

虽然核能开发的必要性在印度国内取得了较高的政治共识,但在如何推进核能开发上,国内各政治力量之间仍存在一定分歧。辛格政府将核能发展视为弥合印度庞大能源需求缺口的重要途径,这不但是辛格政府推进美印核协议的基本依据,也是其任期内具有里程碑的重大政治事件。但印度议会在2008年讨论和审议民用核协议的过程中,却遭到了来自左翼政治力量的抵制。由印度共产党(CPI)

---

<sup>①</sup> Vinay Upadhyay, “High-Grade Energy, Low-Grade Safety,” *Tehelka Magazine*, Vol. 7, Issue 38, September 25, 2010, [http://www.tehelka.com/story\\_main46.asp?filename=Ne250910HIGH\\_GRADE.asp](http://www.tehelka.com/story_main46.asp?filename=Ne250910HIGH_GRADE.asp), 2013-01-24.

<sup>②</sup> Tarun Kanti Bose, “Challenging the Nuclear Heart: The Movement Against Uranium Mining in Jharkhand,” in Smitu Kothari ed., *Dissent, Self-Determination, and Resilience: Social Movements in India*, New Delhi: Human Resources Development Foundation, 2010.

<sup>③</sup> “India Charges ‘Anti-nuclear Protest’ NGOs,” *BBC News India*, 29 February 2012, <http://www.bbc.co.uk/news/world-asia-india-17200957>, 2013-01-24.

<sup>④</sup> Rama Lakshmi, “India Shuts down Aid Groups over Anti-nuclear Protests,” February 24, 2012, [http://articles.washingtonpost.com/2012-02-24/world/35442386\\_1\\_kudankulam-nuclear-power-anti-nuclear-protests](http://articles.washingtonpost.com/2012-02-24/world/35442386_1_kudankulam-nuclear-power-anti-nuclear-protests), 2013-01-24.

领导的左翼认为,一旦印度签署核协议,在美国的压力下,就会束缚印度在国际原子能机构关于伊朗核问题上投票的行动自由,迫使印度积极参与对伊朗的劝服、孤立、乃至制裁和遏制。协议中附加有强迫印度同美国开展经济、政治和军事合作的内容。印度允许美国企业优先参与本国的核能开发项目,以较高成本从美国进口国防设备,优先从美国进口核反应堆,这实质上让印度蜕变为执行美国战略的配角。而且根据协议规定,印度一旦重启核试验,美国的《海德法案》规定将立即停止技术转让,收回所有出口设备。这些规定与印度的独立、民族自尊心和主权严重相悖。为此,如果印度签署该协议,左翼威胁将退出辛格领导的联合政府。

在印度具有重要政治影响的反对党人民党(BJP),也认为协议的目的不是助推印度的核能发展,其根本目标是要阻止印度的核计划,因为印度一旦失去外国的技术与设备的援助,相当多的核反应堆是无法运行的。他们对将民用和非民用核计划分离的情势不适用其他核武国,而仅适用于印度的理论也提出质疑。印度既没有得到进入核俱乐部的地位与资格,也不能重启核试验,而且将增殖反应堆也置于国际原子能机构的监管之下,这与印度的国家利益严重相悖。由此,人民党认为该协议对印度毫无价值,只不过是美国强迫印度签署的一项经过新包装的《核不扩散条约》。<sup>①</sup>

在印度的核能开发中,代表各邦利益的地方领导人原来鼎力支持中央政府的核能开发计划。然而,随着福岛核事故的爆发,并伴随着地方民众风起云涌的反核抗议活动,备受压力的地方领导人对核能开发的支持也开始出现松动。新孟加拉邦首席部长玛玛塔·班纳吉(Mamata Banerjee)原支持在赫里布道尔建设由俄罗斯设计的一座6000兆瓦核设施,但在遭遇当地民众的强烈抗议后,却请求中央政府考虑取消该项目的建设。泰米尔纳德邦首席部长贾雅拉莉妲(J. Jayalithaa)在致辛格总理的信件中,认为在地方民众的关注没有得到解决之前,建议中央政府暂缓在其邦内的核项目开发。因为“福岛核灾难所凸显的严重后果,让大家的神神经高度紧张,人们正经受着折磨、不安和情绪传染”。<sup>②</sup>为此,在泰米尔纳德邦地方选举之前,地方政府对由“民众反对核能运动”(PMANE)组织的反核抗议活动,采取了支持态度。由此可见,核电工程能否顺利开发,在一定程度上还取决于中央政府和地方政府之间的权力博弈、地方和国家政治的形势,以及联盟政治的推动等因素的影响。此外,在核项目建设中,印度政府还存在诸如腐败和僵化这样的政治惰性现象,严重影响政府在核安全、核废料处置、核危机处置中的灵活反应,引起民众不满,成为政治反对派抵制核能开发可资利用的民意基础。

<sup>①</sup> Annpurna Nautiyal, "The Indo-U. S. Nuclear Deal: What Is There?" <http://www.nps.edu/Academics/centers/ccc/publications/OnlineJournal/2008/Sep/nautiyalSep08.pdf>, 2013-01-24.

<sup>②</sup> Ranjit Devraj, "Prospects Dim for India's Nuclear Power Expansion as Grassroots Uprising Spreads," *Inside Climate News*, Oct 25, 2011.

### (三) 核安全关注:核能发展中的“核平安”问题

虽然核能可为人类提供用之不竭的能源,但核能发电在本质上是一种风险技术,主要表现为放射性危险、反应堆平安问题、令人头痛的核废料处置、潜在的核恐怖袭击目标等。在全球核能发展进程中,核设施的平安问题一直是人类关注和争议的焦点。美国的三厘岛、苏联的切尔诺贝利和日本的福岛核事故的发生,更让全球谈“核”色变。核能开发过程中“核事故”(nuclear accidents)的发生不可避免,但各国的核开发者都委婉地将其描述为“核事件”(nuclear incidents),为的是减缓和抚慰公众的安全关注。

印度作为一个核能开发大国,核事故的发生自然不可避免。尽管印度原子能部在提交给国际原子能机构的一份报告中认为,印度一直坚持将核平安作为核能开发中压倒一切的优先任务来抓,印度所有核设施的选址、设计、建设、服役和运行,都符合严格的质量和“平安标准”。由此,印度核反应堆的平安记录是“优良”的。<sup>①</sup>但事实上,印度的核发展记录并非如原子能部宣扬的那般优良,几乎所有的核反应堆和原子能部管理的核燃料循环设施,都发生过“轻重不一”的核事故。据统计,在1993年至1995年间,印度核电站大约发生了124次“危险事故”(hazardous accidents)。1989年印度塔拉波(Tarapur)核电站的碘泄漏辐射水平超过正常值700倍,3000印度人受到影响。<sup>②</sup>1995年,印度原子能管理委员会(AERB)通过对全国所有民用核能设施平安运行状况的监控,提交的报告中确认了134个平安问题,其中95%被认为是“最优处置案例”,这表明印度核平安形势不容乐观。

印度最严重的核事故发生于1993年的纳罗拉核电站。该核电站第一单元涡轮机的两个叶片因劳损发生断裂,掉落的碎片切断其他刀片,导致涡轮机失去平衡而发生剧烈晃动,致使用于运输冷却涡轮的氢气管道发生爆炸,挥发的氢气导致火灾,并造成润滑油发生泄漏。操作员被迫离开操作室,由于浓烟操作员无法进入,操作室被迫关闭13个小时。操作员一直尝试从紧急控制室对电站设施进行控制,但由于断电,紧急控制室的控制面板根本无法打开,操作员在没有条件标示的反应堆中工作,其效果就类似于“盲飞”(flying blind)。纳罗拉核电站的事故给印度以深刻教训。如果必要的预防和检修到位,涡轮叶片断裂的事故是可以避免的。即使涡轮叶片出了问题,如果电力供应装置被放置于独立和防火的导管里,电力供应不中断,该系统仍能正常运转。类似的火灾事故在印度原子能部管理的反应堆都曾出现过,但一直没有引起重视。

---

<sup>①</sup> M. V. Ramana, "The Indian Nuclear Industry: Status and Prospects," *Nuclear Energy Futures Paper No. 9*, December 2009, p. 12.

<sup>②</sup> T. Shivaji Rao, "Why Indian Nuclear Plants Are Accident-prone and Some May Explode in the Long Run?" <http://www.dianuke.org/why-indian-reactors-are-bound-to-explode-in-the-longrun/>, 2013-01-24.



燃油泄漏在印度核开发进程中也屡屡出现。1988年,马德拉斯核电站(MaPS II)因发电机变压器出现油泄漏而被迫关闭。次年,马德拉斯核电站涡轮机轴承出现油泄漏。1992年,马德拉斯核电站涡轮机的闭塞阀出现油泄漏。2003年1月,卡尔巴卡姆(Kalpakkam)原子再处理工厂(KARP)的工作人员在厂房废料罐区(WTF)收集低浓度废料样品时,一个核电阀门出现故障,造成高浓度核废料泄漏,高浓度放射性物质进入废料罐区,导致在其中工作的六个工人暴露于大剂量辐射之下。<sup>①</sup>造成本次事故的原因在于核电站服役的五年内,一直没有建立起放射性和阀门损坏监控机制。2006年,贾杜古达(Jaduguda)核电站一条运输放射性废料的管道发生爆炸,挥发的放射性物质达100公里之远。<sup>②</sup>

印度的核电开发中也出现了因地震而造成核电事故的风险。印度原有核电站的选址,没有将地震、海啸等因素考虑进去。在福岛核事故发生后,才引起了印度方面的重视。杰塔普(Jaitapur)核电站就位于印度沿海地震高发地带,被划分为四类地震带,有发生能导致建筑物倒塌的里氏7级地震的可能。在过去20多年里,杰塔普地区发生过三次地震。其中1993年发生了一次6.3级的地震,死亡9000人。<sup>③</sup>虽然还没有发生因地震造成核电站泄漏或坍塌的案例,但这种风险仍然存在,且后果不堪设想。造成印度核事故频发的原因多样,影响因素复杂。但从监管的角度来看,核能职能部门监管的缺失与监管能力的不足是最根本原因。印度审计总署(CAG)在提交给国会的报告中批评说,印度原子能管理委员会(AERB)缺乏独立性,缺乏实施核平安或辐射防御规章制度的权力,没有制定核电站退役的计划,也没有实施平安标准的权力,在应对核能设施紧急事件中没有发挥其应有的作用。<sup>④</sup>

#### (四) 资金压力:核能开发面临资金不足

与传统的化石原料发电相比,核能发电的总成本中,燃料费用所占的比重较低,核燃料对价格波动的敏感度不及化石原料,核能发电的成本不易受国际经济情势的影响。根据印度核电有限公司2007—2008的年度报告,当年度核能总支出

---

① S. Anand, "India's Worst Radiation Accident," *Outlook*. July 28, 2003, pp. 18-20.

② Benjamin K. Sovacool, "A Critical Evaluation of Nuclear Power and Renewable Electricity in Asia," *Journal of Contemporary Asia*, Vol. 40, No. 3, August 2010, p. 380.

③ Jain, S. K. et al., "The September 29, 1993, M6.4 Killari, Maharashtra Earthquake in Central India," *EERI Special Earthquake Report*, Vol. 28, No. 1, January 1994, [http://www.nicee.org/eqe-iitk/uploads/EQR\\_Killari.pdf](http://www.nicee.org/eqe-iitk/uploads/EQR_Killari.pdf).

④ Dan Yurman, "Questions Raised about India's Nuclear Safety Agency," September 6, 2012, <http://ans-nuclearafe.org/2012/09/06/questions-raised-about-indias-nuclear-safety-agency/>, 2013-01-24.

306.3246 亿卢比,而核燃料的支出是 62.75399 亿卢比,占当年度核能总支出的 20.48%。<sup>①</sup> 与此形成鲜明对比的是,印度国家火电公司(NTPC)2008—2009 年度报告却显示,当年度火力发电总支出是 3823.4 亿卢比,而燃料的支出是 2734.6 亿卢比,占当年度火力发电总支出的 71.53%。<sup>②</sup> 随着运输能力的提升,核能燃料成本的比较优势也有所下降。1958 年,霍米·巴巴认为核能的成本与远离煤田地区的传统发电成本相比,具有较大优势。早期距离指的是远离煤田 600 公里,20 世纪 80 年代,原子能部修改为与远离煤田 800 公里地区的传统发电站相比有优势。1999 年,印度国营核电公司(NPC)的研究进而认为“印度核发电的成本与距煤矿 1200 公里的火力发电站相比具有竞争性”,<sup>③</sup>正因为如此,印度有学者认为核发电比化石燃料发电更为昂贵,因而并不看好核能的未来发展前景。<sup>④</sup>

核能开发虽然在燃料成本上占有优势,但其开发成本仍然是昂贵的。核电站初期投资是热电厂的三倍,而且核能的成本通常还将确保核平安与核废料管理的成本计算在内,化石原料的发电成本通常不包括环境及其相关成本。尽管印度政府在核能开发上的投入从来都是优先保障,比如,原子能部提出的 2011—2012 年的核能预算大约是 17 亿美元,而同期“新能源与可再生能源部”(MNRE)提出的预算仅为 2.2 亿美元。<sup>⑤</sup> 尽管如此,印度核能开发仍然存在较大资金缺口。如果印度计划 2020 年核能的装机容量要达到 20GW,需要投资大约 3500—4000 亿美元。获得足额投资正面临严峻挑战,平衡各类发电资源中的投资额将是一个艰难的政治博弈过程。各利益方都试图分得一块更大的蛋糕。<sup>⑥</sup>

世界上核能发展较为成功的法国、日本和韩国等国家,都形成了一套行之有效的商业融资框架,极大提升了公共部门和私营部门的投资热情,从而缓解和弥合了政府核电投入的资金缺口。印度的核能投资基本由国家控制的国有部门垄断,而国有部门必须以低廉价格将电力出售给消费者,这种政策性的亏损导致国有电力部门无法从电力消费中获得收益,从而无法支撑高水平的投资。加之政府每年都承受着财政赤字和公共债务的压力,对核能开发的投资仍较为有限,这更加重了核

---

① “Profit and Loss Account,” *NPCIL Annual Report 2007-2008*, March 31, 2008, pp. 71, 81. [http://www.npcil.nic.in/pdf/annual\\_report07\\_08.pdf](http://www.npcil.nic.in/pdf/annual_report07_08.pdf), 2013-01-24.

② “Profit & Loss Account for the Year Ended 31st March 2009,” (May 2009), *NTPC Annual Report 2008*, May 2009, p. 187, [https://www.ntpc.co.in/annualreports/2008-09/Consolidated\\_Financial\\_Statements09.pdf](https://www.ntpc.co.in/annualreports/2008-09/Consolidated_Financial_Statements09.pdf), 2013-01-24.

③ M. V. Ramana, *Program on Science and Global Security*, p. 72.

④ M. V. Ramana, “Nuclear Power in India: Failed Past, Dubious Future,” <http://www.npec-web.org/files/Ramana-NuclearPowerInIndia.pdf>.

⑤ M. V. Ramana, “Three Strikes for Indian nuclear?” 16 Oct 2012, <http://www.climatespectator.com.au/commentary/three-strikes-indian-nuclear>, 2013-01-24.

⑥ Xu Yi-hong, “Big Ambitions, Small Returns: Nuclear Energy Development in China and India,” Griffith University, Australia, pp. 9-10, <http://www.worldenergy.org/documents/congresspapers/210.pdf>, 2013-01-24.

能开发的资金压力。

面对庞大的资金压力,印度也尝试引入民营资本与外资投入。从1991年开始,为加快推动民用部门的投资步伐,印度着手进行经济改革。2003年,印度出台的《电力法》(The Electricity Act)已表现出鼓励民营资本投资的迹象,但许多项目在真正开始实施操作时,监管部门却又拖延不批。面对印度冗长的办事程序和土地成本持续上升的情势,外国资本对印度核能开发的参与也举步维艰。为此,印度开始着手解决这些问题。在电站建设的融资方面,政府建议私人投资者担保将“承购合同”(off-take contract)或“无货亦付款合同”(take-or-pay contracts)使用一定时期,但投资者对这种政策的可持续性仍缺乏信心。况且,印度电力损耗仍然是全球最高。由于缺乏投资,17%的电网没有得到保养,因盗窃而造成的电力损耗是15%。<sup>①</sup>在当前世界经济形势下,印度要吸引外资对其核电的投资,就需要改变这种形势。但直到2012年底,私人和外国资本参与核电建设的规模仍很小,国有企业垄断核能开发的基本格局仍然没有发生变化,核能开发的资金短缺仍没有解决。

## 四、印度核能开发的前景

作为全球瞩目的核能开发大国,印度是全球核能复兴不可或缺的有机组成部分,其核能开发的前景自然备受关注。“福岛震惊”带给印度的影响是巨大的,印度的核能开发也经受着各种因素的压力。印度核能开发的未来前景可从如下几个方面进行考量。

### (一) 核能开发是印度解决未来能源安全和兑现国际承诺的不二选择

印度不但是仅次于中国的世界第二大新型经济体,也是仅次于中国的世界第二人口大国,能源消费增长迅速,是世界第五大能源消费国。印度虽拥有全球第五大电力系统,总装机容量达到了1800亿瓦特,但仍有近四亿人没有电可用。<sup>②</sup>印度计划未来25年内要保持年均8%的经济增长,在此期间的电力需求也将保持年均7.4%的增长。保守估计,2031—2032年印度将需要8000亿瓦特的装机容量。<sup>③</sup>从世界范围看,全球75%的能源被城市人口消耗,而印度正在经历高速城市化进程,预计2020年城市人口将达5.9亿人,将进一步加剧能源需求与能源供给之间

<sup>①</sup> Jacques Lesourne ed., *Energy in India's Future: Insights*, Paris: IFRI, DL 2009, pp. 153-155.

<sup>②</sup> Sonia Luthra, "India's Energy Policy and Electricity Production," An Interview with Charles Ebinger, October 26, 2011, <http://www.nbr.org/research/activity.aspx?id=181>, 2013-01-24.

<sup>③</sup> Gevorg Sargsyan et al., "Unleashing the Potential of Renewable Energy in India", South Asia Energy Unit, Sustainable Development Department, The World Bank, 2010, p. 14. [http://siteresources.worldbank.org/EXTENERGY2/Resources/Unleashing\\_potential\\_of\\_renewables\\_in\\_India.pdf](http://siteresources.worldbank.org/EXTENERGY2/Resources/Unleashing_potential_of_renewables_in_India.pdf), 2013-01-24.

的矛盾。全印度缺电的平均水平是11.7%，高峰期的缺电更高达25.4%；全印度能源短缺的平均水平是7.4%，能源短缺最高达到20%。

从印度的整体能源结构来看，煤炭资源约占国内总发电量的68%，但储量极为有限。天然气发电提供了12%的电力，水发电提供了12%的电力。<sup>①</sup>这种以化石燃料为主的能源结构，将无法在经济增长、环境保护和国际义务（减少碳排放）之间取得平衡。印度的能源还严重依赖进口，其中66%的石油和天然气是进口的，煤炭进口预期会从2005年的12%提高到2030年的28%。<sup>②</sup>因此，印度能源安全面临的一个巨大挑战，就是要将能源结构从以化石燃料为主转向以清洁与可持续性能源为主。由此，印度需要补充相当大的额外资源来确保长期的能源安全与环境保护。在这种能源结构中，核能将在未来的岁月中扮演重要角色。<sup>③</sup>核能有助于印度应对能源安全与环境可持续性的双重挑战。因为在众多能源选项中，核能是能够大规模提供重要能源的唯一选项，承载了从氢经济过渡到完全清洁能源经济的“桥梁”功能。<sup>④</sup>化石燃料中的煤炭会排放大量二氧化碳，天然气的排放量是煤炭的一半，核能则是零排放。虽然核能也会排放有毒和放射性物质，但煤炭发电过程中产生的有害物质要比核能更为严重。<sup>⑤</sup>

从世界范围看，核能已有效弥补了其他能源的不足。当前，核能已提供了17%的全球能源需求，在14个国家里提供了超过30%的电力供给，其中法国居首，达到了78.5%。<sup>⑥</sup>当前，印度有20个核反应堆在运行，发电4780兆瓦，占印度总装机容量的比重还不到3%。<sup>⑦</sup>到2022年，印度核能的总发电量预计增长8倍，能满足印度电力需求的大约10%。到2052年，印度的核能发电将提升70倍，对印度总电力需求的贡献将达26%。<sup>⑧</sup>

---

① World Nuclear Association, "Nuclear Power in India", <http://www.world-nuclear.org/info/inf53.html> (Updated August 2012), 2013-01-24.

② Jacques Lesourme, ed., *Energy in India's Future: Insights*, (c) All Rights Reserved-IFRI-PARIS, 2009, p. 150.

③ Indian Institute of Science, "Atomic Energy in India," *Pursuit and Promotion of Science*, p. 294, <http://www.iisc.ernet.in/insa/ch29.pdf>, 2013-01-24.

④ Al Shpyth, eds., "Nuclear Power's Role in Enhancing Energy Security in a Dangerous World," [www.globalcentres.org/can-us/energy\\_shpyth.pdf](http://www.globalcentres.org/can-us/energy_shpyth.pdf), 2013-01-24.

⑤ Mara Hvistendahl, "Coal Ash Is More Radioactive than Nuclear Waste," *Scientific American*, December 13, 2007.

⑥ Xu Yi-hong, "Big Ambitions, Small Returns: Nuclear Energy Development in China and India," Griffith University, Australia, p. 1, <http://www.worldenergy.org/documents/congresspapers/210.pdf>.

⑦ Megha Bahree, "Is Democracy Thwarting India's Nuclear Power Ambitions?" September 26, 2011, <http://blogs.wsj.com/indiarealtime/2011/09/26/is-democracy-thwarting-india%E2%80%99s-nuclear-power-ambitions/>, 2013-01-24.

⑧ *IDS Task Force Report*, November 2010, p. 5.

## (二) 福岛核事故后印度全面强化和提升对核能项目的安全监管

福岛核事故发生后,有些研究报告将其描述为另一个“切尔诺贝利事故”,这种宣传导致民众对核能安全的疑惧上升。印度的一些观察家也对福岛核事故对印度核能的严重影响作了评估:“日本核事故已给印度造成了一种异常严重的局面。核电工程的实际执行将注定大打折扣,在日本核灾难发生后,任何政党再向民众兜售核能的观点都将非常困难。”<sup>①</sup>个别学者也对印度核能的未来发展作了较为悲观的预测,认为印度 50 多年核能发展的实践表明,核能不是一个“平安的”、“经济的”和“环境可持续性”的电力来源。印度和其他国家将放弃这种“昂贵的”和“危险的”技术,并寻求不会威胁其未来或环境的发电方式。<sup>②</sup>显然,印度不大可能因噎废食而放弃核能开发。因此,在理解为何尽管有核事故影响,但亚洲国家仍继续致力于核能项目建设时,有必要在福岛核事故的神话与现实之间做出鉴别。<sup>③</sup>

福岛核事故会对印度的核能开发产生影响,这对印度来说既是一种压力,也是一次反思和提升核能安全的难得机遇。在国家层面上,印度总理辛格指出,“原子能部及其附属机构……已被委托对我们的核电站的所有安全系统进行一次紧急的技术评估……目的在于确保核电站能够经受住诸如海啸和地震这样特大自然灾害的影响”<sup>④</sup>。在核电公司层面上,印度核电公司首席执行官贾殷(Shreyans Kumar Jain)就认为,福岛核事故可能是印度核能计划的“一个巨大调节器”(a big damper),他认为:“在我们接受更多来自日本的信息后,我们和原子能部将一定重新审视整个核能计划,包括我们的新反应堆计划。”<sup>⑤</sup>印度核电集团有限公司执行主任苏当恩德·塔库尔(Sudhinder Thakur)也表态说:“日本的核事故是十分严重的,我们已同国际组织取得了联系,但对我们的核能计划没有必要作出下意识反应。”<sup>⑥</sup>

为此,印度政府邀请国际原子能机构的“运行安全评价组”(OSART),对印核电站的平安评估与审查提供帮助。该决策由印度安全部门委员会(CCS)通过对核电站的平安评估后作出的。据报道,印度安全部门委员会决定采取如下措施确保现有和在建核电站工程的“完全平安”:(1)对印度核电站的所有平安体系进行技术评估,特别关注核电站对诸如地震和海啸这样特大自然灾害的承受能力;(2)配

① Mycle Schneider et al., “Nuclear Power in a Post-Fukushima World: 25 Years after the Chernobyl Accident,” *The World Nuclear Industry Status Report 2010-2011*, Publisher: Worldwatch Institute, Washington, D. C., U. S. A., p. 42.

② M. V. Ramana, *Program on Science and Global Security*, p. 97.

③ Hooman Peimani, “Prospects for Nuclear Energy in Asia,” *Pacific Energy Summit, 2012 Summit Papers*, pp. 13-14.

④ Auriol Weigold, “India’s Nuclear Energy Future: A Positive Outlook?” *South Asia Masala*, March 22, 2011.

⑤ Mycle Schneider et al., *The World Nuclear Industry Status Report 2010-2011*, p. 42.

⑥ Ibid, p. 42.

合国家灾难管理局,强化核与放射性紧急事件反应机制,包括建立特别紧急事件反应中心;(3)在国会提出旨在创建一个独立的和自治的核监察局的《核安全监管部门法》(*The Nuclear Safety Regulatory Authority Bill*),并上升为法律。<sup>①</sup>印度在核安全方面能知错就改,强化平安标准,努力确保核能项目的安全,将会为未来核能的发展奠定良好的民意和政治基础。

### (三) 执行“核分离”发展计划,获取核能发展急需的原料供给与技术援助,实现核能与核武相得益彰的发展目标

民用核协议的签署,意味着印度将成为世界上不是《核不扩散条约》成员国的拥核国,却享有同世界上其他国家进行核贸易特权的国家。协议的签署及其正式实施,结束了印度民用核计划超过30多年的国际孤立,从而提供了若干对成功推进三阶段核电计划尚未动用的备选方案。两国之间的核能合作,有助于印度参与“国际热核试验反应堆”(ITER)和美国能源部的“第四代能源国际论坛”(GIF),这种参与对在核能领域拓展未来的技术创新大有裨益。”<sup>②</sup>在美国的帮助下,印度参与由国际原子能机构主导的“创新型反应堆和燃料循环国际计划”(INPRO)。这些国际合作,将有助于降低印度核技术开发的成本,帮助印度评估新技术的发展,让印度的核能发展更为廉价和安全。

与此同时,印度还在核反应堆与核技术方面与其他国家展开了合作。2008年9月30日,法国率先与印度签署《合作协议》,两国确认在遵守国际法基本原则、符合各自核政策及相关国际承诺的基础上,在核能的和平利用方面展开广泛合作。2010年12月,法国总统访问印度,法国的亚瑞华能源集团(Areva)与印度核能电力公司(Nuclear Power Corp of India)签署合作框架协议,拟在杰塔普建造两座第三代压水式反应器核电厂(EPR),每个核电厂的装机容量是1650兆瓦。2010年2月11日,印度与英国签署《关于民用合作的共同宣言》(*Joint Declaration on Civil Nuclear Cooperation*),促进两国在核贸易与核技术方面的合作与交流。2009年10月14日,印度同阿根廷签署关于民用核合作协议。双方鼓励和支持科学的、技术的和商业的合作,实现核领域的相互受益。

在核燃料供给方面,在核供应国集团解除对印度的核贸易制裁后,印度同其他国家的合作也迅速展开。在燃料供应方面,2009年2月,印度同俄罗斯签署了一项向其购买2000吨核燃料的合同,合同金额为7亿美元。<sup>③</sup>2009年6月15日,印

---

① Rajeev Sharma, “India Beefs up Nuclear Safety,” December 5, 2011, <http://thediplomat.com/indian-decade/2011/12/05/india-beefs-up-nuclear-safety/>, 2013-01-24.

② “Development of Nuclear Energy Sector in India”, *IDSA Task Force Report*, November 2010, Publisher: Institute for Defence Studies and Analyses, p. 25.

③ India Juris, “Nuclear Energy in India & Foreign Investment”, <http://www.indiajuris.com/nuclear.pdf>, p. 2. 2013-01-24.

度同蒙古签署了一项向其购买铀原料的民用核协议。2009年9月2日,印度同作为世界第五大铀供应国的纳米比亚签署五项协议,其中一项是关于印度从非洲国家获取铀供给的民用核能协议。2010年6月28日,印度同作为世界上最大铀出口国的加拿大签署民用核合作协议,同意为加拿大企业在印度拓展核市场和为印度反应堆补给核燃料提供便利。2011年4月,印度同哈萨克斯坦签署一项民用核能的政府间合作协议,确立了双方在燃料供给、核电站建设与运行、铀矿勘探与共同开发、科学与研究信息交流、反应堆平安机制和卫生保健激光技术运用等方面开展合作的基本法律框架。同年7月,印度还同韩国签署了一项准许韩国参与印度核能拓展计划和投标建设核电站的核合作协议。

民用核协议的实施,有助于印度实现核武与核能相得益彰的发展目标。在核项目的开发中,民用与军用存在着天然的技术联系,要明晰两者之间的界限,难度较大。事实上,印度以民用核能为掩护,成功开发出了核武器。尼赫鲁就曾承认:“我不知道该如何在核能用于和平与国防目的之间做出区分。”“我认为我们一定要发展基于和平目的的核能”,“当然,如果我们的民族被迫将其用于其他目的,那么任何虔诚的信仰将无法阻止国家将用那种方式使用它。”<sup>①</sup>实际上,印度用于核武器的铀是就从核电项目中分离出来的。

#### (四) 印度核能发展的重点是基于钍燃料的增值反应堆,有助于回避铀资源短缺带来的发展短板

印度国内的铀储存小,一直依赖铀矿进口来支持其核电工业。自20世纪90年代以来,俄罗斯一直是印度核原料的重要供应者。印度的铀储量仅占全球的1%—2%。但与铀储存形成鲜明对比的是,印度的钍储量却极为丰富,占全球钍储量的30%,几乎是已探明铀储量的十倍。由此,印度核能的三阶段开发战略的目的是要从印度巨大的钍储存而非贫乏的铀储存中获得电力。<sup>②</sup>

概言之,印度核能开发的思路就是先开发基于天然铀的第一代核电站,然后将第一代核电站生产的钷通过回收利用用于第二代核电站发电,并将钍转化为U-233,或通过增殖增益将贫化铀转为更多的钷。第二代核电站可被看作是第三代增殖核电站的一个中间步骤。原子能部关于核能开发的长期规划也是建立在增值反应堆的拓展上。根据原子能部规划,2052年2750亿瓦特装机容量来自核能,其中2625亿瓦特估计来自于增值反应堆。<sup>③</sup>

① M. V. Ramana, *Program on Science and Global Security*, p. 72.

② Maseeh Rahman, “How Homi Bhabha’s Vision Turned India into a Nuclear R&D Leader,” November, 2011, <http://www.guardian.co.uk/environment/2011/nov/01/homi-bhabha-india-thorium-nuclear>, 2013-01-24.

③ M. V. Ramana, *Nuclear Energy Futures Paper No. 9*, p. 21.