

美国强化国家战略科技力量的实践及启示

鲁世林¹, 赵俊贤², 李 侠³

(1. 兰州大学高等教育研究院, 甘肃 兰州 730000;

2. 中共中央党校(国家行政学院)文史教研部, 北京 100091;

3. 上海交通大学科学史与科学文化研究院, 上海 200240)

摘 要:阿贡国家实验室的诞生与发展是一个美国军方、政府、高水平研究型大学、科技领军企业等科技力量在国家使命导向下进行体制性互动与系统性耦合的过程,在此过程中其形成了独特的管理实践。其管理具有如下特点:根据任务需要形成多样化内部治理方式;利用大学优势稳定扩大规模并灵活构建科研团队;预算较高且以联邦政府资助为主,为员工提供有竞争力报酬;在完成国家使命中提升自身灵活性、学术性与专业性;具有独特的、顶尖的核心科研设施;广泛支撑教育和服务经济社会发展。阿贡成功的经验主要包括:在国家层面,通过做好顶层设计引导实验室服务国家使命;在能源部层面,通过评估考核实现宏观指导;在大学层面,为实验室发展提供人才与管理支撑;在实验室层面,通过多类型国内外合作回应多方需求;在适应大科学时代层面,完善设备管理运营机制并维持自身独特性。研究认为,在国家战略科技力量建设的过程中,计划与自由的关系、一般与特殊的关系、主体与客体的关系、结果与条件的关系等是需要考虑的重要问题,这些问题影响着国家战略科技力量的目的、方向、行为与效果。在强化我国国家战略科技力量方面,提出围绕国家使命来设计体系化的科技力量、重点考核国家战略科技力量的使命完成情况、创新不同类型国家战略科技力量的协作机制、布局完善“国家—区域—国际”三级科研合作体系、在完成国家使命时注重研发一流特色科研设施、注重营造良好科研环境并支持青年科技人才成长的建议。

关键词:国家战略科技力量;阿贡;管理模式

中图分类号:G321.9

文献标识码:A

文章编号:1005-0566(2025)11-0001-18

Practice of the United States in boosting the national strategic scientific and technological strengths and its enlightenment

LU Shilin¹, ZHAO Junxian², LI Xia³

(1. Institute of Higher Education, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China;

2. Department of Education and Research in Culture and History, Party School of the Central Committee of the Communist Party of China(National Academy of Governance), Beijing 100091, China;

3. School of History and Culture of Science, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: There is a process of institutional interaction and systematic coupling for the birth and development of Argonne National Laboratory among the scientific and technological strengths such as the U. S. military, the U. S. gov-

收稿日期:2025-05-16 修回日期:2025-09-30

基金项目:中国博士后科学基金面上资助项目“基于实验室史的基础学科国家级实验室特色发展路径研究”(2023M730060);北京市高等教育学会实验室工作研究分会学术研究课题“国家级实验室的管理模式及选择路径研究”(SYS202304)。

作者简介:鲁世林(1993—),男,山东滨州人,兰州大学高等教育研究院副教授,甘肃省飞天学者,兰州大学党委全面深化改革领导小组办公室副主任,曾任北京大学博雅博士后、助理研究员,研究方向为教育科技政策、科学技术与社会、科学思想史、高等教育学。通信作者:李侠。

ernment, the advanced-level research universities, and the leading high-tech enterprises under the guidance of the national missions, which has formed the unique management practice in this process. There are the characteristics of the management for Argonne National Laboratory: Argonne National Laboratory places emphasis on establishing diversified internal governance approaches in line with the requirement of its tasks; Argonne National Laboratory takes advantage of the strengths of universities to steadily expand its scale and flexibly establish scientific research teams; Argonne National Laboratory operates on a substantial budget that is primarily funded by the U. S. federal government and also provides competitive remuneration for its employees; Argonne National Laboratory places a strong emphasis on enhancing its flexibility, academic and professional expertise in fulfilling the national missions; Argonne National Laboratory is equipped with unique and cutting-edge core facilities for scientific research; Argonne National Laboratory extensively supports the educational activities and serves the economic and social development. There is the primary experience for Argonne National Laboratory: the United States guides Argonne National Laboratory to serve national missions through top-level design; the U. S. Department of Energy provides macro-guidance to Argonne National Laboratory through evaluation and assessment; the University of Chicago provides the strong workforce and management support for the development of Argonne National Laboratory; Argonne National Laboratory responds to diverse needs through multiple types of domestic and international collaborations; in order to adapt to the era of Big Science, Argonne National Laboratory attaches great importance to optimizing the mechanism of equipment management and operation and maintaining its unique identity. In the course of boosting the national strategic scientific and technological strengths, the relationship between the planning and the freedom, the relationship between the general and the particular, the relationship between the subject and the object, and the relationship between the outcome and the condition are of great significance for the Chinese government to deliberate upon, which will exert an influence on the purpose, direction, action, and effectiveness of national strategic scientific and technological strengths. There are some suggestions to boost the Chinese strategic scientific and technological strengths: the Chinese government ought to design the systematic scientific and technological strengths in the center of the national missions; the Chinese government ought to prioritize evaluating the fulfillment of the missions of the Chinese strategic scientific and technological strengths; the Chinese government ought to innovate the collaborative mechanism of different types of Chinese strategic scientific and technological strengths; the Chinese government ought to design and optimize the three-level scientific research cooperation system between the country, region, and globalization; the national strategic scientific and technological strengths ought to attach importance to the construction of first-class and characteristic facilities for scientific research in the process of fulfilling the national missions; the Chinese government ought to focus on fostering a favorable research environment and supporting the growth of young sci-tech talents.

Key words: national strategic scientific and technological strengths; Argonne National Laboratory; management model

强化国家战略科技力量是实现科技现代化的重要抓手,而国家实验室在国家战略科技力量中具有核心地位和关键作用。近年来,学界对国内外国家级实验室进行了一些基础性研究,对理解和认识国家实验室及国家战略科技力量提供了重要参考。不过,关于实验室管理模式尤其国家实验室管理模式的研究目前还处于起步阶段,对实验室兴起发展的社会环境因素、实验室发展中的自身科技问题、实验室管理体制的历史演进与基本特征、实验室与科技现代化之间的关系等都还需要进一步研究。

作为美国第一个“正式的”国家实验室,阿贡国家实验室(以下简称“阿贡”)值得关注。习近平

总书记在《论科技自立自强》中特别提到了阿贡:国家实验室已成为主要发达国家抢占科技创新制高点的重要载体,诸如美国阿贡、洛斯阿拉莫斯、劳伦斯伯克利等国家实验室和德国亥姆霍兹研究中心等,均是围绕国家使命,依靠跨学科、大协作和高强度支持开展协同创新的研究基地^[1]。历史地看,阿贡对美国科技创新实践起着破冰作用,在美国国家实验室体系中具有独特地位。第二次世界大战后的近 30 年里,只有阿贡、布鲁克海文和橡树岭被冠以“国家级”的称号。如今,阿贡是美国主要的联邦资助研发中心之一和美国能源部 17 个国家实验室之一^[2-3]。不过,纵观国内外相关研究,学界对阿贡还缺少必要的分析和研究。本文通过自

建的阿贡研究人员数据库(数据搜集时间为2023年7月1日—2024年2月8日,共1 345名研究人员),结合阿贡79年来的发展史和相关资料,分析了阿贡管理模式的特点与经验,并基于此提出了强化我国国家战略科技力量的启示。

一、阿贡管理模式的特点

(一)治:根据任务需要形成多样化内部治理方式

作为隶属于美国能源部的国家实验室,阿贡按照能源部与其下属国家实验室签订的M&O合同进行管理与运营,在外部治理方面遵循国家和能源部要求。在内部治理方面,阿贡的内部治理方式不是统一的和固定的,而是由国家需求与具体任务决定的。阿贡的研究机构有5个,即先进能源技术研究机构,计算、环境和生命科学研究机构,核技术与国家安全研究机构,光子科学研究机构,物理科学与工程研究机构。每个研究机构都有若干下级部门。阿贡的研究机构及其下级部门有着国家和时代赋予的特定职能,如材料科学部的职能是研究新型材料的结构和功能,生物科学部的职能则是开展环境微生物学、合成生物学等领域的跨学科研究。在不同职能的影响下,阿贡形成了目标导向的科研文化、组织有序的任务分工、灵活多样的治理模式,其每个研究机构及其下级部门的管理模式也有所不同。具体来看,阿贡除了决策与基础设施科学部这一特殊部门,从5个研究机构到下属的每1个部门都有各自特色的组织管理架构,具体如表1所示。

整体来看,阿贡可分为以科技研发为导向的纵向管理与以高效运营为导向的横向管理。不同的研究机构及下级部门因其使命导向的不同形成了多样的管理模式,如致力于解决最为紧迫的能源、交通、材料和制造难题的先进能源技术研究机构 and 致力于为全球5 000多名科学家提供先进的光源条件的光子科学研究机构的纵向管理模式和横向管理模式各不相同。因使命导向的不同,同属先进能源技术研究机构的“能源系统和基础设施分析部”与“运输和电力系统部”的纵向管理模式和横向管理模式也有所不同。就纵向管理模式来看,阿贡研究机构的内部管理模式可分为垂直

管理、树状管理、矩阵管理。垂直管理主要适用于结构单一、任务明确的研究部门,树状管理主要适用于结构复杂和跨学科的研究部门,矩阵管理主要适用于从事科研设施运营及部分研究型工作的部门。从横向管理模式来看,相关部门职能主要集中于管理运营、行政支持、顾问咨询、资源共享等,但不同机构和部门需要的运营支持力度和形式有所不同。如计算、环境和生命科学研究机构的横向管理侧重于运营和执行方面,但是光子科学机构的横向管理则更加侧重顾问、投资预算、技术支持、人力资源等。

(二)人:利用大学优势稳定扩大规模并灵活构建科研团队

第一,长期不断扩大人才规模,巩固人才资源优势。阿贡诞生79年来,其人才规模因不同时期国家使命的不同而有所变化,但整体上呈现出长期稳定的增长趋势。1951—1959年,阿贡总人数从2 827人增长到3 579人(其中科学家和工程师常年占比近20%)^[2]。1973年,阿贡总人数达到3 982人(其中科学家和工程师占比39.7%,技术人员占比19.2%)^[4]。2010年,阿贡有2 725名全职员工、1 147名访问学者和长期任职的研究人员^[5]。2016—2022财年,阿贡的总人数一直维持在3 200人以上(其中科研人员常年占比近30%),且呈现出不断增长的趋势^[6]。到2024财年,阿贡总人数达3 836人^[7]。历史地看,阿贡人员规模长期稳定在3 000~4 000人,目前其人员规模大致与国内顶尖研究型大学专任教师数量相当。

第二,根据任务需求,灵活调整团队人员构成的类型和数量。为了更好地实现利益最大化,阿贡针对基础研究和应用研究设计了差异化管理方案。基础研究部门更专注于前沿科技创新,应用研究部门则更专注于适应国家战略任务需要。有研究说明了上述两个部门的区别:基础部的管理相对宽松,工程部的管理则有较大差别,因为工程部担负能源部的大项目必须按时完成,如果不能完成项目就会被砍掉,研究人员就会被解雇,且工程部的项目资金从能源部下来后直接由部主任或项目组长管理,他们的权力也相对较大^[8]。研究发现,不同部门因任务需求不同呈现出不同的人

表 1 阿贡研究机构的内部治理模式^①

研究机构				下级部门			
研究机构名称	使命导向	纵向管理方式	横向管理人员(人员数量)	下级部门名称	使命导向	纵向管理方式	横向管理人员(人员数量)
先进能源技术研究机构	解决最为紧迫的能源、交通、材料和制造难题	垂直管理	运营官(1)	应用材料部	开发新材料、新工艺,推动发明向商业化应用的创新转化	垂直管理	运营官(1)
				能源系统和基础设施分析部	负责分析能源技术的优势与挑战,提高美国能源系统的可靠性	矩阵管理	二级机构业务领导人员(1)
				运输和电力系统部	巩固能源安全,提高经济竞争力	垂直管理	业务领导人员(1)
计算、环境和生命科学研究机构	在 21 世纪关键技术领域取得突破性成就	垂直管理	运营官(1) + 行政人员(2)	生物科学部	开展环境微生物学、合成生物学等领域的跨学科研究	矩阵管理	行政人员(1) + 财务经理(1) + 人力资源代表(1)
				计算科学部	建构跨领域的仿真应用能力	树状管理	部门间任命人员(4) + 行政人员(1) + 财务经理(1) + 人力资源代表(1)
				数据科学与学习部	解决数据分析和人工智能等跨领域问题	垂直管理	行政人员(1) + 财务经理(1) + 人力资源代表(1)
				环境科学部	了解能源活动、新兴技术、政府重大策略如何改变环境系统	垂直管理	各类行政和服务人员(7)
				数学与计算机科学部	为解决美国一些最关键的科学问题提供数值工具和技术	垂直管理	战略领导人员(1) + 人力资源经理(1) + 财务经理(1) + 编辑服务人员(1)
核技术与国家安全研究机构	利用世界领先的核能知识和一流的防核扩散能力等来应对各种能源和安全挑战	垂直管理	运营官(1)	化学与燃料循环技术部	参与美国能源部的关键核科学和能源计划	垂直管理	—
				决策与基础设施科学部	为应对最紧迫的国家和全球安全挑战提供决策依据	—	—
				实验操作与设施部	提供实验技术支持服务和运行加速器设施	垂直管理	—
				核科学与工程部	负责推进核能系统的设计、运行和项目应用	垂直管理	各类行政和服务人员(9)
				战略安全科学部	负责设计有关国家安全的技术方案	矩阵管理	高级技术顾问(1) + 信息保障人员(1) + 运营人员(1)
光子科学研究机构	致力于为全球 5 000 多名科学家提供先进的光源条件	矩阵管理	顾问(2) + 投资预算、技术支持、人力资源等相关人员(6)	加速器系统部	为先进光子源提供工程和物理支持,开展与未来光源有关的研发工作	矩阵管理	—
				APS 工程支持部	保障先进光子源的性能,确保用户和相关人员的安全	矩阵管理	临时管理人员(2) + 临时集成人员(23)
				X 射线科学部	开发尖端 X 射线仪器和技术,利用 X 射线开展世界一流的研	矩阵管理	高级顾问团(3)
物理科学与工程研究机构	在基础和应	垂直管理	行政主管(1) + 信息技术、人力资源等人员(5)	化学科学与工程部	在化学转化、能源储存和能源转换方面为美国带来技术突破	垂直管理	能源前沿科研中心的人员(1) + 各类行政和服务人员(4)
				高能物理部	了解物质和能量基本成分,揭示空间和时间的终极本质	矩阵管理	财务和行政管理人员(6) + 环境、安全与健康方面的负责人员(4)
				材料科学部	研究新型材料的结构和功能	树状管理	各类行政和服务人员(13)
				纳米科学与技术部	应对纳米科学与技术方面的挑战	垂直管理	用户执行委员会的人员(1) + 科学咨询委员会的人员(1) + 技术辅助人员(11)
				物理部	了解宇宙中重物质的起源、演变和结构	矩阵管理	技术辅助人员(3) + IT 服务人员(1)

注:科研人员一般不在本部门以外的研究机构兼职;有少数科研人员在同一研究机构本部门或跨部门兼任 1~2 个职位。

资料来源:https://www. anl. gov/research-organizations。

① 阿贡内部治理模式资料整理时间为 2023 年 7 月 1 日—2025 年 4 月 30 日;由于实验室研究机构的内部治理模式较为复杂,本文根据其上下级隶属关系和是否平行于管理层将其管理方式划分为纵向管理(垂直管理、树状管理、矩阵管理)和横向管理(管理运营、行政支持、顾问咨询、资源共享等)。

才构成特点^②。侧重于基础研究的部门如计算科学部(57.78%)、数学与计算机科学部(36.00%)、数据科学与学习部(35.00%)的科学家占比较高,侧重于应用研究的部门如核科学与工程部(42.42%)、化学与燃料循环技术部(34.48%)、实验操作与设施部(32.50%)的工程师占比较高。具体如表2所示。

表2 阿贡研究机构科学家和工程师占比情况表

研究机构	下设机构	科学家人数 占本部门 人数比重 /%	工程师人数 占本部门 人数比重 /%
先进能源技术	应用材料部	25.97	11.69
计算、环境和 生命科学	生物科学部	24.44	2.22
	计算科学部	57.78	4.44
	数据科学与学习部	35.00	—
	环境科学部	17.05	7.95
	数学与计算机科学部	36.00	3.20
核技术与 国家安全	化学与燃料循环技术部	17.24	34.48
	决策与基础设施科学部	12.28	14.04
	实验操作与设施部	—	32.50
	核科学与工程部	3.03	42.42
	战略安全科学部	8.16	16.33
物理科学 与工程	化学科学与工程部	24.60	5.35
	高能物理部	29.90	4.12
	材料科学部	17.96	1.22
	纳米科学与技术部	31.58	—
	物理部	28.28	16.16

第三,充分利用大学人才优势,并为人才发展提供高水平支撑。首先,阿贡充分利用芝加哥大学的人才优势助推自身发展。阿贡的诞生与发展都与芝加哥大学紧密相连,阿贡诸多核心人物和顶尖科学家来自芝加哥大学,如曾推动美国曼哈顿计划实施的阿贡主要缔造者之一的康普顿(Arthur Compton)和领导团队建造世界上第一座可控链式核反应堆的阿贡顶尖科学家费米(Enrico Fermi)都来自芝加哥大学。芝加哥大学也管理阿贡的一部分科研人员,如有研究提到:阿贡的科研人员按编制分为固定人员与流动人员两类,其比例接近1:1,其中固定人员属于芝加哥大学的雇员,其按照大学管理方式进行管理,流动人员主要为

客座科学家、博士后、研究生等,实验室与他们采取聘用合同制方式^[9]。其次,阿贡为员工及其子女提供高水平福利,让科学工作者无后顾之忧。每年芝加哥大学阿贡有限责任公司理事会都会颁发40 000美元以上的奖金来表彰在杰出表现、卓越服务、教育工作和安全成就方面的阿贡优秀工作者,芝加哥大学也欢迎阿贡所有员工的子女申报国家实验室奖学金计划(NLSP)^[10]。芝加哥大学招生办可以向考入芝加哥大学的阿贡全职正式人员的子女提供金额不等的奖励,只要经过奖学金委员会的审查并由大学招生办公室验证其父母的就业资格,便有机会领取奖励;学生学业表现优秀就有续签4年奖学金的可能,并且根据困难情况,学生还有可能获得额外的资助^[11]。整体来看,阿贡为员工提供了较为充分的保障。

(三)财:预算较高且以联邦政府资助为主,为员工提供有竞争力报酬

首先,阿贡的预算整体上呈现出持续增长的气势,经费规模巨大且大多来自联邦政府资助。阿贡的资金支出分为资本资金(包括建筑和资本改善费用)与运营资金(包括工资、福利和采购费用)^[12]。历史地看,除能源危机和政府机构重组等时间点外,自20世纪50年代以来阿贡的预算整体上呈现出持续增长的气势,且主要预算资金来自美国联邦政府。1951—1966财年,阿贡的运营预算从1 870万美元上升到7 430万美元;1973—1977财年,阿贡的运营预算从9 300万美元增长到了1.683亿美元^[2,4]。2010财年阿贡共获得6.668亿美元的资助,其中89.9%来自联邦政府^[5]。2010—2021财年,实验室运营资金从接近6亿美元上升到约8.56亿美元(占2021财年总预算的81%),运营资金平均每年增长率为2.7%;资本资金从0(注:当时无资本资金)上升到2021财年的

② 本文研究的相关数据来自自建的阿贡人员数据库。研究统计了阿贡5个研究机构拥有科学家和工程师头衔的人数,将其汇总成阿贡研究机构科学家和工程师占比情况表。同时,阿贡共有“光子科学”“先进能源技术”“计算、环境和生命科学”“核技术与国家安全”“物理科学与工程”这5个研究机构,但由于“光子科学”下设的所有机构(加速器系统部、APS工程支持部、X射线科学部)和“先进能源技术”的2个下设机构(能源系统和基础设施分析部、运输和电力系统部)主要是大科学设施的运营机构,人员主要是设备运营人员,因而并未纳入统计数据。

约 1.95 亿美元(占 2021 财年总预算的 19%), 资本资金的年均增长率为 8.5%^[12]。2024 财年阿贡的预算达 12 亿美元^[7]。阿贡的大部分采购费用用于科技服务和科研设备采购, 2021 财年实验室科技服务与科研设备采购的总支出达到了 3.37 亿美元(占 2021 财年实验室总采购支出的 60.61% 和总支出的 32.03%)^[12]。美国国家科学与工程统计中心数据显示, 2003—2024 财年, 阿贡研发支出增长了 1 倍多, 且绝大多数都来自联邦政府资助(能源部资助长期占联邦政府资助的近 90%), 反映了国家实验室作为国家战略科技力量的本质属性^[13]。

此外, 阿贡为员工提供具有竞争力的薪资报酬。历史上就有这样的案例, 1967 年阿贡的招聘公告显示, 阿贡招聘的工程技术人员每周最低工资为 120 美元, 招聘的有经验的科技人员及助理的工资通常在每月 625 美元及以上, 所有职位都有定期加薪和晋升的机会, 并且阿贡的工资水平相较于芝加哥地区产业界的工资水平来说都具有一定的竞争力^[14]。总体来看, 2021 财年阿贡工资和福利支出为 4.96 亿美元, 占实验室总支出的 47.15%^[12]。同时, 阿贡的薪酬水平相较于长期支持阿贡发展的芝加哥大学来说具有一定的竞争力, 其薪酬水平(指的是合同聘用的流动科研人员的薪资水平, 固定科研人员属于芝加哥大学的执行大学的管理和薪酬制度)更是普遍高于大学同等职位的 20%~40%^[15]。例如, 截至 2025 年 9 月, 阿贡员工的平均年薪为 94 853 美元(时薪约 46 美元), 平均年薪通常为 83 419~107 522 美元^[16]。同年 9 月, 美国芝加哥大学员工的平均年薪为 46 376 美元(时薪约 22 美元), 平均年薪为 40 626~53 306 美元^[17]。对于科研人员尤其青年科研人员来说, 有竞争力的薪资报酬水平是保障自身日常生活和专心进行科学研究的重要基础条件之一, 阿贡在这一方面做得较为出色。

(四)事: 在完成国家使命中提升自身灵活性、学术性与专业性

在服务国家使命的长期过程中, 阿贡不仅完成了上级部门交付的任务, 还在灵活性、学术性与

专业性方面变得越来越出色。首先, 阿贡根据国家任务和需求完成了多项大型工程和项目。究其本质, 作为一种特殊类型的国立科研机构, 阿贡的使命就是要尽可能满足美国各种类型的战略需求, 而承担大学、企业无法承担的大型工程和项目便是其突出特征。例如, 大概在 20 世纪 40 年代末, 阿贡被要求至少在 3 个新反应堆项目中发挥作用: 快中子增殖反应堆、高通量反应堆和海军潜艇反应堆^[4]。世界上首次可用核能电力的成功开发(1951 年)、世界上第一艘核动力潜艇美国海军“鹦鹉螺号”的下水(1954 年)都与阿贡有关^[18]。面对 20 世纪 60 年代末以来美国对环境保护的重视, 阿贡项目的重点又转向环境保护, 如截至 1973 财年, 阿贡用于环境研究的预算已超过 500 万美元(近一半资金来自原子能委员会)^[4]。20 世纪 70 年代, 锂离子电池革命的启动(1970 年)、将光能转化为化学能的合成叶子的成功研制(1975 年)都是这一时期阿贡能源研究项目成功的真实写照^[18]。进入 21 世纪以来, 阿贡的项目锚向优化能源存储和应对气候变化, 联合储能研究中心(2012 年)、Q-NEXT 量子信息科学研究中心(2020 年)相继成立^[18]。

其次, 通过不断调整学科构成与强化跨学科研究能力, 阿贡提升了适应国家使命的灵活性。阿贡早期学科构成以核物理学科为主, 后在完成国家使命中不断发展成为包含物理、化学、医学、生物学和计算机科学等在内的多学科实验室, 这种学科构成更好地适应了解决复杂科学、工程与社会问题的需求。1947 年 12 月 11 日, 原子能委员会明确表示阿贡的项目应聚焦于反应堆开发问题上, 并针对化学、物理、冶金、医学和生物学方面的相关问题开展基础性支持研究(fundamental supporting research)^[4]。甚至在原子能委员会把阿贡指定为美国核反应堆研发的主要实验室之后, 它继续把约 50% 的活动投入到基础物理学、生物学和医学、数学以及计算机科学等重要研究项目中^[4, 19]。1973—1977 年, 阿贡的研究科学家经常从基础研究项目转向与能源有关的应用研究项目, 这一转变涉及了近 1/4 从事材料科学研究, 1/3

从事分子、数学和地球科学研究,1/2 从事核科学研究的科研人员^[4]。美苏冷战结束后,促进国家经济社会可持续发展的需求进一步推动了实验室的跨学科与交叉学科研究。2010 年,阿贡的主要研究领域包括粒子物理学与核物理学、分子科学、化学、材料科学与工程、交通运输、能源存储、应用数学、计算机科学和系统工程^[5]。根据阿贡自述,其目前是一个多学科科学和工程研究中心及真正意义上的多学科实验室^[20]。因此,阿贡是在完成国家使命过程中逐步成为多学科实验室的,阿贡的学科构成受到美国国家战略和任务转型的影响,因此学科构成本质上是一种反映和表征而不是目的和使命。

在学术发表上,阿贡有着高质高量的产出特点,其在优势学科上的学术发表质量远高于美国和本地平均水平。2000—2010 年,阿贡的科学家共发表了 11 009 篇论文(主要包括 8 个领域),其中物理(45.45%)、化学(18.09%)、工程(12.64%)、材料科学(7.83%)这 4 个领域的论文发表数量是最多的,阿贡这 4 个领域(依据论文发表数量)在汤森路透(Thompson-Reuters)追踪的全球数千家研究机构中分别为第 31 位、第 152 位、第 149 位、第 118 位^[5]。2011—2022 年,阿贡按学科分类发表的研究成果主要集中于物理学和天文学(39%)、化学与物理化学(22%)、材料科学(18%)和纳米科学(7%)等领域,在此期间阿贡的科研人员在“5 年内期刊影响因子大于 7”的顶尖刊物上发表 26 883 篇文章^[12]。这些顶尖刊物论文的大量产出不仅是阿贡科研人员个人努力的结果,还是阿贡长期致力于发展优势基础学科力量的见证。例如,2011—2022 年,阿贡在化学领域发表 7 791 篇论文(高影响期刊论文约占 41%),在材料科学领域发表 10 541 篇论文(高影响期刊论文约占 20%),在物理学领域发表 6 936 篇论文(高影响期刊论文约占 42%);在物理、化学、材料科学和纳米科学四大学科,阿贡发表的高影响期刊论文占比为 21%,这远高于伊利诺伊州的 15% 和美国平均水平的 13%^[12]。另外,根据 Nature Index 数据显示,2024 年 5 月 1 日—2025 年 4 月 30 日,阿贡的研究产出份额在美国政府机

构中排名第 4 位(在能源部 17 个国家实验室中排名第 2 位),在世界政府机构层面排名第 11;阿贡在化学、物理科学、地球与环境科学这 3 个学科上表现较为亮眼,他们各自的研究产出份额排名都处于全美国前 70 和全世界前 220 的位置^[21]。高质量的基础学科发表产出不仅离不开阿贡优势学科的支撑,也离不开阿贡严谨的科学文化的影响。在阿贡,任何文章投送前必须经过阿贡的专职英文编辑修改,经过审核后才可以在提交给杂志^[22]。由此可以发现,阿贡在学术产出方面具有高质高量的特点。

(五)物:具有独特的、顶尖的核心科研设施

阿贡为美国 and 全球提供了独特和顶尖的科研设施,依靠这些大科学装置阿贡享有不可替代的地位。大科学时代意味着科学研究越来越走向极宏观与极微观,而大科学装置成为科学研究走向拓展与深入的基本条件。彼得·J. 维斯特维克^[2]便直截了当地提出:国家实验室旨在为两个主要目标服务,为基础研究提供大型设备和为国家安全的技术发展提供安全设施。其中提到的大型设备和安全设施都说明了大科学时代顶尖科研设施的极端重要性。对于阿贡来说,它从创始至今都以大科学装置尤其独特的、顶尖的核心科研设施为抓手来构建自身的核心竞争力,并基于此实现了科研领域的不断突破。从 1963 年投入运行的美国首台用于高能物理研究的质子加速器到 1981 年 9 月正式启用的当时世界上唯一一台“能让研究人员实时观测并记录在辐射损伤发生时分子尺度结构变化”的电子显微镜,阿贡在科研设施和大科学装置方面长期处于世界科技发展的前沿,甚至奠定了很多学科领域兴起的基础^[4,18]。当前阿贡的 6 个国家用户设施分别由能源部科学办公室(5 个)和能源部核能办公室(1 个)管理^[23]。从服务国家安全到锚定技术前沿,阿贡及时建设大科学装置并进行有效管理,为自身参与国际竞争和提高自身政治站位打下了坚实的基础。

基于顶尖科研设施尤其大科学装置,阿贡为美国甚至全球的科研人员提供了高水平的科研条件。2010 年,阿贡用户设施的总用户数量为 5 554 人,外国用户数量为 667 人,其中阿贡领导力计算

设施、先进光子源、阿贡串列直线加速器系统、纳米材料中心、电子显微镜中心(EMC)的总用户数量分别为 928、3 796、170、470、190 人,这些设备的外国用户数量分别为 104、459、63、24、17 人^[5]。2021 财年,阿贡用户设施的总用户数量为 5 995 人,其中 89% 的用户来自美国本土机构^[12]。当前,阿贡的六大国家用户设施的功能也各具特色,

其中最受青睐的是先进光子源和阿贡领导力计算设施,具体如表 3 所示。因此,阿贡在大科学时代的成功并不是巧合,而是将国家实验室的使命落实到了服务国家和辐射全球的实践中,依托政府重点建设并有效运营一批高水平、有实效、有国际知名度的大科学装置,在服务国家使命过程中尽可能地满足了国内外多主体的科研需要。

表 3 阿贡国家用户设施访问情况

用户设施名称	设施功能	2021 财年访问设备的主要雇主 (大致访问次数)	2023 财年 用户数量/人	投入运营 时间/年	管理方
先进光子源	为科学研究提供先进的光源条件	能源部实验室(500 次左右)、学术机构(2 700 次左右)	3 932	1996	能源部科学 办公室
阿贡领导力计算设施	为科学界与工程界提供超级算力	能源部实验室(500 次左右)、学术机构(500 次左右)	1 624	2006	
阿贡串列直线加速器系统	提供用于核反应和结构研究的多种束流	学术机构(200 次左右)	299	1985	
大气辐射测量气候研究设施	用于持续获取大气数据的实地测量	学术机构(300 次左右)	1 157	1989	
纳米材料中心	支持多学科纳米科学与技术研究	能源部实验室(300 次左右)、学术机构(300 次左右)	850	2007	能源部核能 办公室
中压电子显微镜	对材料中的缺陷结构进行原位透射电子显微镜研究	—	—	—	

注:大气辐射测量气候研究设施由多个科研机构联合管理,阿贡仅管理一部分;2025 年 9 月 26 日,能源部科学办公室官网显示,阿贡国家用户设施的用户数量数据已从 2023 财年更新至 2024 财年。

资料来源: <https://science.osti.gov/User-Facilities/User-Facilities-at-a-Glance#0>; <https://www.anl.gov/reference/argonne-economic-impact-report>; <https://www.anl.gov/national-scientific-user-facilities>

(六) 社会服务: 广泛支撑教育活动和服务经济社会发展

阿贡将自身的科学研究与现实应用结合起来,形成了“强调科普教育、服务关键领域、注重经济成效”的社会服务特征。首先,阿贡为社会提供了充分的科普教育平台。每年都有大批中学生、大学生、中学老师到阿贡参观学习,阿贡的科研人员也经常到中学做超导科普报告和实验^[22]。2018 年,阿贡组织了 322 场参观活动,接待了约 5 000 名公众;2019 年,阿贡围绕土壤科学、极端天气、创新创业、振兴经济 4 个主题举办了 4 场现场讲座,并吸引了 1 100 名参与者^[12]。在阿贡 2024 财年的统计数据中,阿贡提到自身与 6 273 名小学生、初中生和高中生建立了联系^[7]。相较于国内,阿贡的科普教育活动规模较大、涉及范围较广、举措更积极、组织更系统。

其次,服务教育发展等关键领域。阿贡秉持开放包容的态度,积极吸纳外来访问学生和博士后,助力自身在物理、化学、材料科学等关键领域

开放交流与科研水平的提升。在不影响国家安全的前提下,阿贡常年接纳上千名外来科研人员,其中值得关注的群体是外来访问的学生和博士后,因为他们一定程度上反映了科研力量与教育机构的科教融合状况及国家实验室服务教育发展等关键领域的情况。根据自建的阿贡研究人员数据库,当前阿贡材料科学部、化学科学与工程部、数学与计算机科学部是吸纳博士后最多的 3 个部门,材料科学部、化学科学与工程部、高能物理部是吸纳访问研究生最多的 3 个部门,与国家安全紧密相关的部门几乎没有招收外来访问的学生和博士后。可见,阿贡既注重吸纳外来科研人员来服务关键领域,又注重保障国家安全。不过,从整体来看,阿贡在服务教育发展尤其人才培养方面力度还不够,与大学存在一定脱节。正如中国科学院院士丁洪曾指出:阿贡有设施,但没有研究生;美国大学有学生,但需要设备^[24]。

再次,阿贡关注自身对国家和所在地区的经济社会贡献。美国很多国家实验室不仅关注他们

在科技方面的目标,还关注那些能提供实际应用、创造工作岗位和带来经济效益的工作^[24]。有研究预估,2010 财年阿贡运营活动贡献了近 7 亿美元的经济影响(约 94% 的收益流向了芝加哥地区的企业和家庭);从伊利诺伊州来看,这一财年阿贡为其带来了 6.969 亿美元的经济产值,创造了 4 952 个就业岗位并带来了 2.14 亿美元收益;从芝加哥地区来看,阿贡为其带来了 6.559 亿美元的经济产值,创造了 4 575 个就业岗位并带来了 1.95 亿美元收益^[5]。据阿贡自己预估,2021 财年阿贡给杜佩奇县带来了 2 143 个工作岗位并创造了近 3.5 亿美元的经济影响,给伊利诺伊州带来了超过 7 700 个就业岗位并创造了超过 12.9 亿美元的经济影响,也给美国中西部地区带来了超过 9 000 个就业岗位并创造了超过 15.3 亿美元的经济影响,给美国带来了 13 300 个就业岗位并创造了超过 26.7 亿美元的全国性经济影响^[12]。可见,阿贡十分重视服务国家和区域的经济社会发展。

此外,阿贡还积极推动自己的科研人员服务社会发展、响应国家号召、走向前沿市场。从阿贡校友(argonne alumni)^③就业与发展情况就可以发现其社会服务的成效。一是阿贡校友在就业地点选择方面兼具满足地区发展与国家发展的特征。截至 2022 年 12 月,阿贡校友大多数留在实验室所在的伊利诺伊州,其他人主要前往美国经济发达的加利福尼亚州以及纽约州^[12]。二是阿贡校友在就业机构选择方面重点服务于国家和政府发展的优先事项。截至 2022 年 12 月,研究机构、科技巨头以及诸如美国能源部、国防部和人口普查局等联邦机构接收了阿贡主要的校友^[12]。三是阿贡校友在就业行业选择方面与实验室从事的科研活动、前沿科技发展和市场需求等密切相关。截至 2022 年 12 月,阿贡的校友涉及 139 个行业,主要集中于研究(research,14.8%)、计算机软件(computer software,10.5%)和高等教育(higher education,9.5%)3 个行业,其他多分布在 IT 服务、机械

工程、化学制造等重要行业^[12]。因而,国家实验室并不完全是隐蔽在国家安全背后的“机密代号”,还是服务国家和地方经济社会发展的“助推器”。

二、阿贡的核心经验

(一)国家:通过做好顶层设计引导实验室服务国家使命

美国从国家层面高度重视国家实验室并赋予其不同的时代使命。第二次世界大战期间,美国将曼哈顿计划中的实验室体系定位为核武器研发的核心力量;冷战中,美国将国家实验室定位为维护国家安全和能源开发的关键力量;冷战后,美国将国家实验室定位为经济社会发展的推动力量;当前,美国将国家实验室定位为抢占智能时代技术制高点的主要力量。阿贡成立 79 年来的历史表明,国家实验室得以成功的最重要经验是积极服务国家战略需求和使命。

漫长而又变动的历史演变过程反映了阿贡服务国家战略需求的逻辑主线与动态实践。第二次世界大战中,作为阿贡前身的阿贡实验室与冶金实验室的核心使命都只有一个,即帮助美国成功制造原子弹并获得战争胜利。1942 年 12 月 2 日前,作为阿贡前身之一的冶金实验室主要专注于钚研究和实现自持链式反应,此后到第二次世界大战结束前的主要目标是尽可能快地生产出用于原子弹的钚^[4]。不过,随着原子弹任务的结束,阿贡前身之一的冶金实验室与阿贡实验室(此处阿贡实验室是指在阿贡刚兴起的新实验室)的未来都扑朔迷离。格罗夫斯将军的助手尼科尔斯(Kenneth Nichols)上校提醒康普顿,“目前我们关于阿贡实验室的计划具有不确定性”^[2]。1945 年,冶金实验室(以及劳伦斯实验室)已不再处于曼哈顿计划的研发前沿,顶尖科学家纷纷离开冶金实验室,以至于芝加哥大学还曾考虑关闭冶金实验室,但是军方认为第二次世界大战后冶金实验室将成为重要的核研究设施,因此说服芝加哥大学

③ 阿贡校友主要指曾在阿贡工作或学习过的人(包括全职员工、实习生、访问学生等),并非指在阿贡获得学位的人(美国国家实验室不具有授予学位的资格)。参见:Argonne National Laboratory. Argonne economic impact report[R/OL]. [2025-02-12]. <https://www.anl.gov/reference/argonne-economic-impact-report>.

继续开放实验室^[4]。第二次世界大战后,美国的科学研究都指向国家安全,作为美国国家安全“风向标”之一的阿贡亦是如此^[2]。原子能委员会第一任主席利连索尔(Lilienthal,任期为1946—1950年)甚至认为:美国国家安全……以及原子能的良性发展在很大程度上取决于阿贡^[4]。到1952年,阿贡几乎所有的研发工作都直接或间接地用于建立或改进美国的核力量;国家安全在各个方面均被置于优先地位:反应堆开发、物理研究、生物学和医学乃至“高深莫测”的高能物理^[4]。甚至,一旦苏联威胁到美国,如果国家实验室的科学家能提出与苏联竞争的可信理由,那么他们的研究一般都能赢得国会的支持,作为美国核武关键力量的阿贡自然便是最受青睐的国家实验室之一^[4]。可见,即使第二次世界大战已然结束,阿贡仍然紧紧围绕着美国政府的规划和设计充当着维护国家安全、进行国际竞争的核心角色。

当然,由于侧重于国家安全,20世纪六七十年代,美国政府强调能源经济对阿贡造成了一定冲击。1967年,美国《清洁空气法案》出台后,阿贡被赋予了改善人类环境的新使命,随即1968年阿贡的高通量反应堆项目被终止^[4]。不过,1977财年能源部用于多项目实验室的财政总预算为14亿5310万美元,其中国家安全的预算仍然占到43.5%^[4]。因此,从历史来看,能源危机只是一个重要的插曲,维护国家安全依然是国家实验室使命的核心和支柱。冷战结束后,国家实验室的使命随着经济发展新任务的出现而有所变化。典型的标志性事件是,1994年美国取消阿贡的集成快中子反应堆计划,这使得美国自1942年以来首次没有核反应堆研发计划^[19]。此后,在削减成本、提高研发效益的导向下,2006年芝加哥大学阿贡有限责任公司成功竞标为阿贡的新承包方^[25]。2008年,美国能源部将阿贡的使命总结为5个方面,分别是:开展基础科学研究;运营国家科学设施;加强国家能源资源建设;探索能更妥善处理环境问题的方法;保护国家安全^[26]。近年来,随着国际核力量的变化,美国又加快了核力量的更新与研发。阿贡所属机构名称的变化反映了上述

趋势。2018年其国家安全机构的名称为能源与全球安全科学部,2025年更名为核技术与国家安全机构^[15,27]。具体到当下,阿贡的使命是满足国家对可持续能源、经济竞争力和安全的需求^[26]。总之,包括阿贡在内的国家实验室的最核心使命是服务国家战略需求,这种战略需求在不同时期则有不同的体现。

(二)能源部:通过评估考核实现宏观指导

自1941年以来,美国国家实验室的管理模式经历了较为复杂的演变。整体来看,美国国家实验室所属政府部门及国会能够对国家实验室发展进行灵活指导与稳定监督并对其发展方向进行把控^[28]。这既得益于美国国家层面对国家实验室的顶层设计与规划,又与主管部门能源部对国家实验室的具体指导密切相关。曾任美国能源部部长的朱棣文在2009年签署的文件《美国能源部关于国家实验室管理与运营合同竞争方面的政策》表明,美国能源部17个国家实验室中的16个采用管理与运营(M&O)的合同模式,该模式可追溯至第二次世界大战时期;该文件还提到,1984—1994年M&O合同只进行过3次竞争,1996年前能源部没有定期对绝大多数M&O合同进行竞争^[29]。冷战结束后,在发展经济的使命下,能源部在1996年出台了一项通过竞争获得实验室管理与运营(M&O)合同的政策,逐步对多个实验室的管理与运营合同进行竞标,在管理合同年限结束后实验室管理权将被重新竞标^[29]。这一时期,伴随着美国政府绩效改革的推进,M&O合同的调整促使美国国家实验室管理模式走向了适应产业发展的市场化道路。

当然,能源部并未一开始就知道如何管理阿贡等实验室,而是采取边实践探索、边总结经验、边落实改革的管理思路。从历史来看,原子能委员会在亲自尝试了管理实验室的各种可能性,就合同款与承包商进行协商以及反复考虑产业方向之后,形成了一个持续整个20世纪50年代的“权宜之计”:在继续使用相同的承包商的基础上每隔4年或5年更新一次合同^[2]。在此过程中,芝加哥大学持续担任阿贡的主承包商并积极吸纳地区型

大学组成的联合机构参与阿贡的管理实践,如阿贡国家实验室理事会、参与机构理事会执行局、中西部大学联合董事会、阿贡大学协会^[4]。不过,面对“多头”管理给阿贡带来的机构臃肿、职能模糊、技术落后等现实问题,作为原子能委员会继任者的能源部在短时间内对此也束手无策。能源部认为,阿贡缺乏活力并且管理层也没有做好质量保证,便敦促实验室管理主体应承担起振兴实验室的责任^[4]。20世纪90年代,冷战的结束与美国发展重心的调整促使政府对实验室管理模式进行系统性调整。1994年5月,美国总统克林顿指示国防部、能源部和国家航空航天局对各自的主要实验室进行审查,自此精简机构与高效管理成为能源部管理国家实验室的基本准则^[30]。

能源部管理部门对阿贡承包商进行着严格的、全面的年度考核。从2006年起,美国能源部科学办公室实施了国家实验室现行的评估程序,每年都会对下辖10个国家实验室的承包商展开评估,评估范围涵盖科学研究、技术创新、管理效能及运营状况等维度,这些评估将成为确定年度绩效酬金、是否延长和重新竞争能源部管理与运营合同的依据;能源部科学办公室有意将预期标准设置得非常高,设定的“B+”等级为承包商在某一方面符合绩效预期的水平,在低于B+的方面意味着承包商还有改进的空间^[31]。根据能源部对阿贡承包商的考核可以发现,2006—2024财年,阿贡承包商在“使命完成情况(研发的质量与效率)”“研究设施的建设与运营”“科技项目/规划的管理”等方面整体上表现较为优秀,但在“承包商的领导力/管理效能”“环境、安全与健康”“商业系统”“设施维护与基础设施建设”“安全与应急管理”等方面表现有些许不佳^[31]。此外,阿贡通过多种方式进行自我评估和改进。有研究提到:阿贡的科研项目每年都要接受由6~8位外部专家进行的第三方评价;除外部评价机制外,阿贡也建立了由内部研究人员组成的评价委员会,每3~6个月对正在进行的工作进行一次自我评价;阿贡还建立了对机构整体的科研评价机制,由高水平科学家、企业家等组成实验室顾问委员会,在一年内对整个

实验室的工作进行6次综合评价^[9]。因此,对作为国之重器和国家战略科技力量关键的国家实验室进行考核,应该由主管部门或相关部门进行考核,重点考核国家实验室的管理运行情况(如使命完成情况、科研设施的建设与运营、实验室的领导与管理等),注重对其服务国家使命和自身管理运营水平的考核,整体上保障实验室的良性运营并依据实验室优势条件发展其特色。

(三)大学:为实验室发展提供人才与管理支撑

科学发展史表明,17和18世纪科学依托于科技社团,19世纪科学已进驻大学,19世纪末和20世纪上半叶科学开始依托于工业实验室以及国立科研机构,值得强调的是在科技演进过程中具有体制化地传承科学功能的大学对科技发展具有独特作用,大学一方面是科技进步的力量,另一方面又通过体制化地培养人才促进其他科技力量的发展。20世纪上半叶,美国的研究型大学已逐步成熟,而国家实验室的建立需要充足的人才支撑,研究型大学正好是科研人才的重要聚集地和培养地。第二次世界大战期间,美国联邦政府已开始大规模地支持大学进行科学研究,大学管理的实验室如加州理工学院喷气推进实验室、麻省理工学院辐射实验室等纷纷在曼哈顿计划中崭露头角。这一时期,研究型大学与国立科研机构进行着密切的但非正式的合作,曼哈顿工程则在国家推动下促使研究型大学开始体制化地介入了国家实验室的创建、管理、运营等各类工作。作为美国最为典型的国家实验室,阿贡的发展史则充分体现了芝加哥大学对其创建、管理与发展方面的奠基性作用以及其对芝加哥大学科学研究和人才培养的关键支撑。

因原子弹研制的需要,1942年1月24日,芝加哥大学物理系教授康普顿决定把普林斯顿和哥伦比亚的研究团队迁至芝加哥大学并在1月的最后几天组建了冶金实验室^[32]。在冶金实验室成立后,科学研究与发展办公室便把冶金实验室的部分管理职权交给了芝加哥大学^[4]。1946年4月19日,芝加哥大学接受了一份运营阿贡的书面合同

(letter contract),这标志着芝加哥大学正式开始运营阿贡,也标志着研究型大学在国家级实验室创建和发展中的基础性作用得到政府承认^[3]。自成为国家实验室以来,阿贡由芝加哥大学代表美国原子能委员会(1946—1974 年)及其继任机构能源研究与发展署(1974—1977 年)和美国能源部(1977 年以来)进行运营和管理^[19]。2010 财年,大学为阿贡提供了近 2 720 万美元(占总资助额的 4.1%)的资助,其中芝加哥大学是大学资助方中最大的贡献者(近 2 000 万美元),可见芝加哥大学对阿贡的支持力度之大^[5]。依据能源部实验室 M&O 合同模式,2006 年 7 月 31 日,芝加哥大学阿贡有限责任公司成为阿贡的新运营方,自此实验室依托于大学的单一管理模式开始向竞争性管理的模式转变^[25]。不过,由于历史上的紧密关系,由公司对阿贡进行管理与运营并不是让阿贡脱离芝加哥大学。根据芝加哥大学委托安德森经济集团有限责任公司(Anderson Economic Group, LLC)编写的《阿贡的经济影响》报告,阿贡一直由芝加哥大学负责管理(oversight),芝加哥大学阿贡有限责任公司是运营阿贡的法律实体(legal entity)^[5]。也就是说,阿贡管理模式的变更并不是绕过大学来单独管理实验室或割裂大学与实验室的本质联系,而是让芝加哥大学与芝加哥大学阿贡有限责任公司、阿贡保持一种体制性的互动关系。当前,阿贡与芝加哥大学也是深度绑定在一起的。例如,2017 年有研究提到,芝加哥大学阿贡有限责任公司的最高决策机构理事会的法定人数共计 29 人,其中 6 人来自阿贡与芝加哥大学^[9]。

阿贡建立 79 年的历史演变与管理实践与美国顶尖研究型大学尤其芝加哥大学有着紧密关联,这反映了大学自身所具有的独特功能,也反映了美国对不同类型国家战略科技力量的有效协调与支配。在阿贡创立之初的 20 世纪 40 年代、摸索运营的 20 世纪 50 年代—20 世纪 90 年代以及引领科技创新的当下,芝加哥大学分别为其重点提供了人才场地、管理经验、资源保障,使其能够有效适应不同时代的国家使命。同时,阿贡也为芝加哥大学提供了较为短缺的大科学设施,让芝加哥

大学意识到了自身在大科学时代难以有效回应国家使命和市场需要等问题,从而主动与国家实验室、科技领军企业等进行积极合作^[33]。可见,大学与实验室在科学体制上不是割裂而是相互成就和互为补充的,前期大学为实验室的发展提供了基本条件,后期实验室促使大学在科学管理上进行制度变革,两者在国家使命的变更中不断进行体制性耦合,共同建构了当前美国的国家战略科技力量。

(四)实验室:通过多类型国内外合作回应多方需求

在国家使命、日益复杂的科技问题、经济社会发展需求的驱动下,阿贡通过多类型合作不断满足国家和社会需求。在大科学时代,任何科研机构都不可能仅依靠自己解决所有技术难题,作为国家实验室的阿贡承担着国家赋予的多项使命,不仅在大科学时代要及时追踪科学技术前沿,还要回应多种利益诉求,因此开展多维度、多类型的科技合作就势在必行。当前阿贡在科研合作上采用了一些美国国家实验室常见的合作方案:战略合作伙伴项目(SPP,付费模式)、合作研发协议(CRADA,成本分摊模式)、技术服务协议(TSA,与 SPP 类似,主要适用于成本较低、周期较短的国内项目)和技术许可协议(TLA,旨在实现实验室原型技术的商业化)^[34-35]。2017—2021 年,阿贡与大专院校、国际研究机构、大型企业、小型企业、非营利性机构以及地方和联邦机构的合作主要采用战略合作伙伴项目方式,与能源部国家实验室的合作采取合作研发协议方式^[12]。

阿贡既注重服务国家战略需求和地方政府需要,又注重国际合作以及与国内其他机构的合作。具体来看,阿贡与国际研究机构、地方和联邦机构等的战略合作伙伴项目的数量和合同价值都是巨大的,远远超过其合作研发协议的数量和合同价值。同时,阿贡也与广泛的国际机构和国内机构开展多类型合作。2017—2021 年,阿贡在美国国内的战略合作伙伴项目的合同价值为 4.98 亿美元,其中贡献金额位居前四名的合作伙伴来自华盛顿州(主要为联邦机构)(1.84 亿美元)、马里兰

州(9 630 万美元)、弗吉尼亚州(8 520 万美元)、伊利诺伊州(3 820 万美元)。在同一时期,阿贡在美国国内的合作研发协议的合同价值为3 200 万美元,其中贡献金额位居前三名的合作伙伴来自加利福尼亚州(1 830 万美元)、弗吉尼亚州(340 万美元)、伊利诺伊州(250 万美元)^[12]。从2024年5月1日—2025年4月30日的科研合作情况来看,阿贡与国际819个合作机构的合作占比为45.7%,国外合作机构主要是国立科研机构 and 大学,其中中国科学院、中南大学、剑桥大学位居前三;与美国国内324个合作机构的合作占比为54.3%,国内合作机构主要是大学和国家实验室,其中芝加哥大学、西北大学和布鲁克海文国家实验室位居前三^[21]。在科研成果方面,2011—2022年,阿贡发表的26 883篇顶级期刊的大部分是和全球约8 000家机构合作撰写的;在排名前十位的合作机构中,有3家来自伊利诺伊州,分别是芝加哥大学(合作出版物占比为20.4%)、伊利诺伊大学系统(合作出版物占比为15%)和西北大学(合作出版物占比为14.4%),科研成果合作方面呈现出兼具集中性(集中在伊利诺伊州)和分散性(与全球多家机构合作)的特点^[12]。总之,阿贡在科研合作方面的国家使命导向和国际化趋势较为明显,但它仍具有服务地方的特色并与芝加哥大学等本地机构建立了稳定长期联系。因此,国家实验室虽然被冠以“国家”之名,但也同时是地方经济社会发展的重要力量。

(五)适应大科学时代:完善设备管理运营机制并维持自身独特性

大科学时代的科技竞争与研究设备的水平密切相关,一般性和特色性科学研究的未来发展方向与趋势都指向特色的尖端研究设备,而作为国家战略科技力量关键能力的研究设备水平也与国之重器是否能够承担自身使命紧密相关。为了应对设备费用高、建设周期长和运营难度大等问题,阿贡致力于探索研发与维护相结合的设备运营机制。由于第二次世界大战以来大科学设备的持续开发和长期运营成本过高,政府在科研设备上投资较为“谨慎”。1977年,美国国家科学院国家研

究委员会建议开发一种配备高通量脉冲散裂设施的脉冲中子源,当时强脉冲中子源(IPNS)成本总估算达到了7 000万美元,尽管阿贡认为可以利用原有设备等以900万美元的成本来建造第一阶段的强脉冲中子源(IPNS-I),但能源部并未批准该项目的全部资金,还同时授予阿贡和洛斯阿拉莫斯国家实验室开发脉冲中子源的资格以使其相互竞争^[4]。能源部相关部门负责人在与各实验室主任协商后达成了“只资助阿贡的强脉冲中子源到1985年,之后将不再资助”的折中方案;虽然1981年5月5日阿贡第一阶段的强脉冲中子源被投入运行,但是阿贡的相关负责人并不知道资金将从何而来,对此阿贡的最佳应对策略就是继续运营,待时机成熟再考虑如何解决后续难题^[4]。还有报告显示,阿贡每年花费约1亿美元用于维护其设备和基础设施^[5]。可见,国家实验室设备开发与运营的投入之大。

随着大科学的深入发展,进入21世纪能源部越发重视科研设施的长期投入与高效管理。能源部向国会提交的财年预算说明显示,2020财年开始,能源部对阿贡的3个国家用户设施(先进光子源、阿贡领导力计算设施、阿贡串列直线加速器系统)的设备运营情况进行集中统计,主要从“本财年已获批预算指标”“本财年现行运营情况”“下一财年预算请求”等方面对其设备运营情况进行总结并集中向国会申请大科学设备的运营费用^[36]。但是,能源部需要向国会报告大科学设施的年度变化(预计运营时长变化、实际运营时长变化、运营费用变化、用户数量变化、下一财年预算请求相较于本财年或上一财年已获批预算指标的变化等),同时要向国会报告运营费用的具体用途。如能源部向国会申请的2026财年阿贡领导力计算设施的近2.23亿美元的运营费用主要用于支持人工智能应用和高性能计算等设施的运行^[37]。因此,大科学时代离不开政府对大科学设备的运营资助,也离不开一套专业的、科学的、针对性的设备运营资金申请机制。

能源部每年将根据阿贡主要用户设施的运营情况为其向国会申请下一财年的设备运营预算。

2020—2024 财年,先进光子源的现行运营费用从近 1.4 亿美元提升到了近 1.8 亿美元,阿贡领导力计算设施的现行运营费用从 1.5 亿美元提升到 2.19 亿美元,阿贡串行直线加速器系统的现行运营费用也常年保持在 2 000 多万美元的水准^[36]。先进光子源、阿贡领导力计算设施两者与阿贡串行直线加速器系统现行运营费用的巨大差异与各自在面对人工智能等重大时代课题和服务国家战略中发挥的实际作用有关,政府对大科学设备资助的多少往往与国家实验室能够带来的创新转化收益的大小密切相关。先进光子源、阿贡领导力计算设施和阿贡串行直线加速器系统常年的巨大运营支出也说明了大科学离不开政府的资助且只能由政府来主要负责资助事宜。依托这些大科学设施,不仅让阿贡与最契合的科研人员建立了稳定的合作关系,还让阿贡在大科学时代持续获得政府的巨额资助并保持自身的竞争力。能源部注重有针对性地资助大科学设备,阿贡注重提升自身在大科学时代的发展优势,两者的默契协作为阿贡未来持续在物理、计算科学等技术前沿领域服务国家使命和创造经济收益奠定了坚实基础。

三、关于美国国家战略科技力量建设的启示

(一)理解科技现代化进程中的国家实验室

把国家战略科技力量的分析与科技现代化的历史与现实研究相结合,可进一步明晰不同类型战略科技力量兴起与发展的基本情况及其本质特点。20 世纪中叶,国家实验室的出现迎合了大科学的发展趋势以及美苏冷战背景下服务国家安全与战略需求使命对曼哈顿工程遗产保守处理的可能性,其延续了 17 世纪科学革命以来科技组织从科技社团、研究型大学、工业实验室、一般性国立科研机构产生与发展的历史趋势,反映了美国自身科技创新体系注重顶层设计与规划的基本特征。也就是说,国家实验室是一个新兴组织,其本质是“国办科学的力量集中”,最典型特征就是“以服务国家战略为目标,以解决实际问题为核心,以政府巨额投资为基础,以灵活组织管理为手段”。不过因历史和国情的差异,不同国家的国家战略科技力量的类型、名称及其体系也有所差异。但

是从整体上看,作为国家战略科技力量核心的国立科研机构(其中以国家实验室为主)自 20 世纪中叶以来在服务国家安全和核心利益以及满足国家重大关切方面成为所有科技力量中最为关键的部分。

事实上,只有美国对国家实验室有较为明确的定义和界定,而英国、法国、德国对国家实验室都没有明确定义和划分。从第二次世界大战后原子能委员会主要委托大学对国家实验室进行单一化管理到如今美国在原有大学管理国家实验室的基础上引入大量科技领军企业对国家实验室进行联合管理与竞争运营,其背后反映的是美国对研究型大学、科技领军企业、国家实验室等国家战略科技力量进行体系化建设并赋予其国家使命的历史。当前美国单个国家实验室的人员规模与我国单个研究型大学专任教师数量大致相当,平均在三四千人;美国 18 个国家实验室中的 17 个采用竞争性 M&O 合同模式,该模式可追溯至第二次世界大战时期,承包商在 20 世纪 90 年代之前主要是大学和企业,20 世纪 90 年代后因政府绩效改革绝大多数转为企业运营,如阿贡承包商前期为芝加哥大学、现为芝加哥大学阿贡有限责任公司;国家实验室融汇多个学科,以问题为中心实行多样化组织模式,在完成国家任务的同时又创立了多个学科;对国家实验室的评估注重长远规划的整体性评估和一事一议的任务型评估;资金投入巨大,且以联邦政府资助为主;注重科研设施研发与维护。

作为美国第一个正式的国家实验室,阿贡具有一定的象征性,它不仅是美国国家实验室管理体制探索过程中最典型的存在之一,而且橡树岭国家实验室、爱达荷国家实验室的诞生也都与其有关系。作为美国国家战略科技力量的典型,阿贡的成功既源于美国对其长期持久的顶层设计与规划,也包含其自身管理和实践方面的原因,最终结果是阿贡实现了将国家使命时代性与自身发展灵活性的恰当结合。阿贡成功的最重要原因在于国会和政府对国家实验室建制的长期探索与规划改革,以及主管部门对阿贡的具体规划和有效监管,在此基础上其紧紧围绕国家使命和战略需求

开展科研活动,通过与大学保持紧密合作关系获得师资和学生支持并为大学提供科研设备和项目等资源,以具体任务为工作原则灵活搭建团队、合理分配资源。阿贡管理的成功告诉我们,最好的管理并不是让管理者包揽一切事务或让执行者承担一切事务,而是各司其职,科研管理最重要的是尽可能地以任务为导向去有效监督科研的进展和提供良好的服务,为不同类型的人才提供适宜的科研环境和物质条件保障,让其不至于被各种琐事纠缠,让专业的人做专业的事。

(二) 国家战略科技力量建设中的几对关系

在国家战略科技力量建设的过程中,计划与自由的关系、一般与特殊的关系、主体与客体的关系、结果与条件的关系等是需要考虑的重要问题,这些问题影响着国家战略科技力量的目的、方向、行为与效果。

计划与自由的关系。在大科学时代,更加强调计划科学的正当性,但自主性和科学共同体的作用同样不可忽视。正如樊春良^[38]指出,计划和自由之间的关系是贯穿20世纪科学发展的一个重要政策议题,由于计划者面临着预算的压力,计划的指向常常是可以证明的、看得见的发展,因此会有着牺牲将来、换取眼前收益的危险,同样过分地强调实用可能会限制在某一特定的路线而放弃其他有前景的发展方向。在国家战略科技力量建设中,国家和政府可以对科技力量的研究方向和研究问题进行“计划”,但也需要给科学家留足充分的研究空间甚至给予支持,因为不论计划的科学还是自主的科学都存在着研究结果方面的不确定性。所以,科技部门在规划研究项目与研究问题时平衡好计划科学与自由探索之间的关系,并充分尊重科学家在科学研究具体行为方面的主导权。

一般与特殊的关系。英法德美等科技强国的科技发展史表明,这些科技强国的科技发展离不开对本国科技组织、科学建制、科学文化与科学传统的继承与创新,不同国家在科技的发展历程与主要特征、科技体系的构建过程与基本构成、科技与社会的互动关系等方面又存在着较大的差异,

这些都影响了不同国家的国家战略科技力量的基本构成和组织方式。从科技社团、研究型大学、工业实验室到国立科研机构科学发展史说明了重视大科学的组织与科技力量的体系化是科技现代化发展的重要趋势,即使国家战略科技力量的名称、构成及体系化建构方式有着显著的差别,但重视国家战略科技力量建设已成为几乎所有发达国家在科技强国建设方面的关键事项。因此,我国在建设国家战略科技力量过程中既要考虑科技现代化的一般规律,也要结合我国科技组织、科学建制、科学文化与科学传统等方面的具体国情。

主体与客体的关系。就美国而言,曼哈顿计划促使美国实现了高水平研究型大学、科技领军企业、国立科研机构以及军事科研力量等各类科研力量的组织化与体系化,奠定了战后美国国家实验室体系的形成基础。以美国国家实验室为代表的国家战略科技力量并不是凭空出现的,而是在多类型科研力量(美国研究型大学占重要地位)互动协作的历史过程中形成的,其中国家对科研力量的规划与布局起到了非常关键的作用。也就是说,国家战略科技力量的建设需要国家对各类科技力量的体系化协作与制度化运行形成合法性基础。任何科技力量的基础都是科技人才,而多数国家的国家战略科技力量并不自主培养人才,因此国家战略科技力量的形成和发展都需要研究型大学的支持。对于我国来说,国家战略科技力量建设要以国家使命为目标,重视发挥相关部门的主体作用,充分利用研究型大学的参与和支持以迅速实现自身科技力量的壮大。

结果与条件的关系。在国家战略科技力量建设过程中,结果导向与条件导向是两种不同的发展思路与建设思维,其突出表现为注重科技成果产出还是注重科研设备建设这样一个关键性选择问题。对于美国而言,其国家战略科技力量建设尤其国家实验室建设比较注重条件导向,即通过打造实验室尖端科研设施、提供充分人财物资源、构建良好科研环境、保障实验室运营方向符合国家重大战略需求等促使国家实验室成为不可替代的科技力量。而对于我国而言,国家战略科技力

量建设尤其国家实验室建设在前期较为重视实验室科研项目 and 科研论文等科研成果,在实验室评估考核方面也注重科研成果显性指标的情况,这促使我国国家战略科技力量的教学科研和社会服务水平迅速提升。不过,在未来大科学时代更加强调原始创新的情况下,重视条件导向应成为我国国家战略科技力量建设的重要考量,尤其要注重根据国家战略需求提升自主研发高精尖科研设备的能力和水平。

四、强化我国国家战略科技力量的建议

(一) 围绕国家使命来设计体系化的科技力量

要明确国家战略科技力量的目标,围绕国家使命来设计体系化的科技力量。国家战略科技力量的最主要目的是通过自身一流和特色的科研力量实现国家使命,为满足国家重大战略需求和经济社会可持续发展提供国家其他科技力量不可替代的关键支撑。基于国家战略科技力量的目标和使命,必须强化国家战略科技力量的政治属性、人民属性和战略属性,使得国家战略科技力量的规模与质量能够根据国家和政府部门战略需求和发展需要来设计,形成灵活设置与调整国家战略科技力量构成、运行与组织的机制。同时,要设计好、规划好不同类型国家战略科技力量的目标与行为,突出不同类型国家战略科技力量的体系化与系统性,将不同类型国家战略科技力量的结构与功能综合起来进行考量,并形成根据不同国家使命和战略需求灵活调整的管理模式与组织机制。总之,要强调国家战略科技力量围绕国家使命来设计并使其体系化。

(二) 重点考核国家战略科技力量的使命完成情况

注重围绕国家使命考核评估国家战略科技力量,形成完善重点考核国家战略科技力量使命完成情况的评价机制与评估体系。历史地看,我国建设国家战略科技力量尤其国家重点实验室已有 40 余年历史,过去建设和评估国家级实验室重点突出其教学科研水平尤其科研论文和科研项目情况,这为我国国家级实验室迅速提升科研水平和综合实力提供了充分的保障。从国际范围看,

对国家战略科技力量要重点考核其使命完成情况以及与之相适应的条件保障。未来要想使国家战略科技力量在服务国家使命和国家重大战略需求方面取得更好的效果,就需要转变评估理念和评估方式,从结果导向评估转向条件导向评估,重点关注国家战略科技力量完成国家任务和使命过程中的保障性条件,促使国家战略科技力量尤其国家实验室体系形成国家战略需求快速响应机制。同时,要明确主体责任,明晰国家战略科技力量的责任主体,落实国家级实验室主任负责制,提升国家战略科技力量的主体性。

(三) 创新不同类型国家战略科技力量的协作机制

要处理好不同类型国家战略科技力量之间的关系,创新不同类型国家战略科技力量的协作机制与互动方式。国际科学发展史表明,科技社团、研究型大学、工业实验室和国立科研机构不是独立存在和发展的,而是相互影响和促进的,而国家实验室的形成正是这种互动关系最典型的表现。在阿贡等国家实验室形成的历史过程中,研究型大学如芝加哥大学为其提供了长期、持久而又深入的支持和帮助,而国家实验室的成功也促进了相关合作大学的发展。对于我国而言,在现有条件下,国家级实验室的发展更需要高水平研究型大学以及科技领军企业的人才和管理支撑,创新不同类型国家战略科技力量的协作机制就显得尤为重要。例如,可建立竞标性管理与运行合同制,由相关部门对有意向管理与运行相关国家级实验室的高水平研究型大学、科技领军企业或联合机构等进行评估,委托其具体推进相关实验室的建设与发展。

(四) 布局完善“国家—区域—国际”三级科研合作体系

进一步布局和完善国家战略科技力量的科研合作体系,形成以“国家为主、区域为辅、国际为补”的三级科研合作体系。科研合作是国家战略科技力量实现自身功能、提升自身水平、发展自身能力的重要途径与方式,在大科学时代尤其要注重完善国家战略科技力量的科研合作体系。国家

战略科技力量的科研合作要以实现国家使命为主,主动承接国家相关部门的重大项目,同时要结合自身所在区域具体情况发展特色科研、满足地方需要,此外还要注重利用国际先进科技资源和条件实现自身力量的提升和发展。国家战略科技力量尤其国家实验室要注重合作项目的战略属性,通过国家相关部门重大非竞争性项目打造自身特色和影响力。

(五)在完成国家使命时注重研发一流特色科研设施

国家战略科技力量要进一步明晰自身优势,在完成国家战略需求和重大任务时注重研发一流特色科研设施,打造自身的独特性与先进性。王伯鲁^[39]指出,当代科学研究越来越依赖于先进实验技术研发及其成果的支撑,或者说实验技术的样式与水平决定着新科学事实的发现模式,即决定着科学家能感知到什么。在这样一种科学发展趋势下,大科学时代的科学成功即意味着需要一流特色的科研设施。因而,国家战略科技力量要在完成国家使命的同时,利用大项目相对充足的经费研发一流特色科研设施,依据自身科研特色打造国际一流的科研设施,掌握本领域科学研究的主动权。与之密切相关的是,相关部门委托国家战略科技力量进行科研项目研究时要突出项目的先导性、针对性与集中性。

(六)注重营造良好科研环境并支持青年科技人才成长

要注重营造有利于专心科学研究的良好科研环境,并为青年科技人才的成长提供充分的支撑条件。国家战略科技力量的发展归根结底在于构成国家战略科技力量的人才的发展,在国际人才竞争日趋激烈的背景下,国家战略科技力量要通过科研组织模式的变革、良好科研条件的营造等创造良好的科研环境,促进科研人员尤其青年科技人才的成长。国际上一些顶尖实验室形成了良好的科研组织模式,通过矩阵式科研组织方式、灵活的项目运行机制等为青年科技人才的成长提供了发挥自身才能的机会,使其可以心无旁骛地开展研究。此外,需要为青年科技人才提供良好的

物质生活条件和科研支持氛围,让优秀青年科技人才挑科研大梁,为青年科技人才的成长提供系统、全面和充分的条件保障。

参考文献:

- [1] 习近平. 论科技自立自强[M]. 北京:中央文献出版社,2023:102.
- [2] 维斯特维克. 国家实验室:美国体制中的科学:1947—1974[M]. 钟扬,等译. 上海:上海科学技术出版社,2023:9-358.
- [3] U. S. Department of Energy-Office of History and Heritage Resources. Argonne national laboratory[EB/OL]. [2025-02-12]. <https://www.osti.gov/opennet/manhattan-project-history/Places/MetLab/argonne.html>.
- [4] HOLL J M, HEWLETT R G, HARRIS R R. Argonne National Laboratory, 1946-1996[M]. Urbana: University of Illinois Press, 1997:xi-507.
- [5] Anderson Economic Group, LLC. The economic impact of Argonne National Laboratory[R/OL]. (2011-06-30) [2025-02-12]. https://tbed.org/wp-content/uploads/2018/01/AEG_Argonne_June_2011.pdf.
- [6] Argonne National Laboratory. Trends in laboratory workforce demographics (FY 2016-2022)[EB/OL]. [2025-03-12]. <https://www.anl.gov/hr/argonne-employee-demographics>.
- [7] Argonne National Laboratory. Argonne: by the numbers[EB/OL]. [2025-03-12]. <https://www.anl.gov/reference/argonne-by-the-numbers>.
- [8] 科学网. 美国阿贡国家实验室:科学研究的圣地[EB/OL]. (2011-11-01) [2025-02-12]. <https://paper.sciencenet.cn/htmlnews/2011/11/254744.shtm>.
- [9] 三思派. 美国阿贡国家实验室的管理运营机制及启示[EB/OL]. (2017-07-10) [2025-02-12]. <https://mp.weixin.qq.com/s/vCSUVbJpUBCyhzKZwYF3Qg>.
- [10] UChicago Argonne, LLC. Awards and scholarships[EB/OL]. [2025-02-12]. <https://www.uchicagoargonnellc.org/stewardship/awards-and-scholarships>.
- [11] University of Chicago. National Laboratories Scholarship[EB/OL]. [2025-02-12]. <https://collegeadmissions.uchicago.edu/cost-aid/scholarships/national-laboratories>.
- [12] Argonne National Laboratory. Argonne economic impact report[R/OL]. [2025-02-12]. <https://www.anl.gov/reference/argonne-economic-impact-report>.
- [13] National Center for Science and Engineering Statistics. FFRDC Research and Development Survey[EB/OL]. [2025-09-06]. <https://nces.nsf.gov/surveys/ffrdc-research-development/>

- 2024#data.
- [14] African American Communities. Argonne National Laboratory [EB/OL]. [2025-02-12]. https://www.aac.amdigital.co.uk/Documents/Details/UIC_CULR_02_0013_0202.
- [15] 三思派. 美国阿贡国家实验室管理运营评价机制及经验借鉴 [EB/OL]. (2018-10-15) [2025-02-12]. <https://mp.weixin.qq.com/s/Iboz3DKtp19T226DxtvgxA>.
- [16] Salary. Argonne National Laboratory Salary [EB/OL]. [2025-09-11]. <https://www.salary.com/research/company/argonne-national-laboratory-salary>.
- [17] Salary. University of Chicago Salary [EB/OL]. [2025-09-11]. <https://www.salary.com/research/company/university-of-chicago-salary#:~:text=As%20of%20July%202025%2C%20the%20average%20annual%20salary,translates%20to%20an%20approximate%20hourly%20wage%20of%20%2422>.
- [18] Argonne National Laboratory. 75 years of discovery [EB/OL]. [2025-02-12]. <https://www.anl.gov/75th-anniversary/timeline>.
- [19] Encyclopedia of Chicago. Argonne National Laboratory [EB/OL]. [2025-02-12]. <http://www.encyclopedia.chicagohistory.org/pages/66.html>.
- [20] Argonne National Laboratory. Research index [EB/OL]. [2025-03-22]. <https://www.anl.gov/research-index>.
- [21] Nature index. Argonne National Laboratory (ANL) [EB/OL]. [2025-08-20]. <https://www.nature.com/nature-index/institution-outputs/united-states-of-america-usa/argonne-national-laboratory-anl/5139073734d6b65e6a002208>.
- [22] 科学网.《科学新闻》:大师成就阿贡的世界一流 [EB/OL]. (2011-11-01) [2025-02-12]. <https://news.sciencenet.cn/htmlnews/2011/11/254746.shtm>.
- [23] Argonne National Laboratory. National scientific user facilities [EB/OL]. [2025-02-12]. <https://www.anl.gov/national-scientific-user-facilities>.
- [24] JANE QIU. Building national laboratories to meet China's development challenges [J]. National science review, 2016, 3(3): 387-391.
- [25] U. S. Department of Energy. Annual report on the state of the DOE national laboratories [R/OL]. (2017-01-11) [2025-04-06]. <https://www.energy.gov/articles/annual-report-state-doe-national-laboratories#:~:text=The%20first%20Annual%20Report%20on%20the%20State%20of,resource%20for%20the%20Department%20E2%80%99s%20near-%20and%20long-term%20missions>.
- [26] 李昊,徐源. 国家使命:美国国家实验室科技创新 [M]. 北京:清华大学出版社,2021:72-73.
- [27] Argonne National Laboratory. Nuclear Technologies and National Security (NTNS) organizational chart [EB/OL]. (2025-07-02) [2025-09-20]. <https://www.anl.gov/ntns/reference/nuclear-technologies-and-national-security-ntns-organizational-chart>.
- [28] 鲁世林,李侠. 国家重点实验室建设困境与重组思路 [J]. 中国软科学,2023(6):66-78.
- [29] Department of Energy's Office of Science. Management & Operating (M&O) Contracts [EB/OL]. (2009-12-22) [2025-04-06]. <https://science.osti.gov/lp/Management-and-Operating-Contracts>.
- [30] The American Presidency Project. Statement on the future of federal laboratories [EB/OL]. (1995-09-25) [2025-02-12]. <https://www.presidency.ucsb.edu/documents/statement-the-future-federal-laboratories>.
- [31] Department of Energy's Office of Science. Laboratory Appraisal Process [EB/OL]. [2025-02-12]. <https://science.osti.gov/lp/Laboratory-Appraisal-Process>.
- [32] U. S. Department of Energy-Office of History and Heritage Resources. Making of the Met Lab [EB/OL]. [2025-09-12]. <https://www.osti.gov/opennet/manhattan-project-history/Places/MetLab/making-met.html>.
- [33] University of Chicago. Facilities at the national laboratories [EB/OL]. [2025-03-22]. <https://sing.uchicago.edu/national-laboratories-stewardship/facilities-at-the-national-laboratories/>.
- [34] Lab partnering service. How to partner [EB/OL]. [2025-04-25]. <https://www.labpartnering.org/partnering>.
- [35] Argonne National Laboratory. Private industry [EB/OL]. [2025-02-12]. <https://www.anl.gov/partnerships/private-industry>.
- [36] U. S. Department of Energy. Budget (Justification & Supporting Documents) [EB/OL]. [2025-02-12]. <https://www.energy.gov/cfo/listings/budget-justification-supporting-documents>.
- [37] Department of Energy's Office of Science. FY 2026 Budget Request to Congress [EB/OL]. [2025-02-12]. <https://science.osti.gov/budget>.
- [38] 樊春良. 科学中的计划和自由 [J]. 科学学研究,2002(1):5-10.
- [39] 王伯鲁. 科技观的历史演进与时代意蕴 [N]. 光明日报,2022-03-21(15).

(本文责编:润 泽)