

# 日本量子科技的最新趋势和未来展望

## ——基于第11次技术预见调查结果的 analysis

王 达，苗晶良

(中国科协创新战略研究院，北京 100038)

**摘 要：**量子科学技术在物联网、人工智能、健康医疗、自动驾驶等方面应用广泛，对保障国家安全、促进高质量发展具有重要作用。本文论述了日本量子科技的研究现状，通过分析日本科技政策研究所科技预测中心KIDSASHI平台<sup>1</sup>定期发布的报告，概述了各国量子科技战略和政策文件，并根据日本第十一次技术预见德尔菲调查结果，从各个主题的重要程度、国际竞争力、科技实现前景、社会实现前景和政策措施等五个方面对日本量子科技的未来发展趋势、应用前景进行了分析。德尔菲调查结果的数据表明，本次调查的702个主题的平均实现时间是2032年，量子科技的22个主题均在2032-2040年之间实现社会目标；日本将在2035年建成国家首台门控量子计算机；单自旋元件、量子传感器和量子中继技术的重要程度和国际竞争力较高。

**关键词：**日本，量子计算机，量子通信与密码，量子传感，技术预见

### 1. 引言

当今世界正经历百年未有之大变局，突如其来的新冠疫情给社会发展带来了广泛和深远的影响。量子计算机和模拟器在提高药物、新材料和催化剂研发效率方面具备一定潜力，大容量、高速通信的量子通信与密码技术，医学量子传感和成像技术等量子科技已引起关注，各国都在寻求进一步突破，抢占发展先机。2020年10月16日下午，习近平总书记在中共中央政治局第二十四次集体学习时指出，要充分认识推动量子科技发展的重要性和紧迫性，加强量子科技发展战略谋划和系统布局，把握大趋势，下好先手棋。量子科技方面，日本的量子计算机基础研究处于领先，

同时量子传感和量子密码通信技术也发展良好。鉴于此，总结和思考其量子科技发展轨迹，对于我国政策制定和加快建设创新型国家具有重要意义。本文根据日本科技政策研究所第十一次技术预见调查数据，围绕量子科技主题的重要程度、国际竞争力、科技实现前景、社会实现前景和政策措施等五个方面对日本量子科技的未来发展趋势、应用前景进行了分析，为我国量子科学技术发展战略规划和系统布局提供参考。

### 2. 背景

量子器件在当今数字化社会中扮演着重要的角色，它将拥有超越电子和光学器件的信息

**作者简介：**王 达，男，硕士，助理研究员，中国科协创新战略研究院，研究方向为颠覆性技术跟踪研究、日本科技政策、日本技术预见。

苗晶良，女，博士，助理研究员，中国科协创新战略研究院，研究方向为科技社团、科技政策、创新战略。

<sup>1</sup> KIDSASHI (Knowledge Integration through Detecting Signals by Assessing/Scanning the Horizon for Innovation) 是日本科技政策研究所开发和运营的平台，该平台每天采集全球300多个大学和机构发布的报告，使用AI机器学习系统分析并编写文章，在KIDSASHI网站公开发布。

处理能力，有望实现对生物体的高精度、非侵入性、非接触性测量和传感，其研发在世界范围内日益活跃。日本发布的《创新综合战略2019》报告指出，量子技术、人工智能和生物技术是影响科技创新的前沿基础技术领域<sup>[2]</sup>。日本政府拟推出《量子技术研发战略》，为今后十年的具体发展制定时间表。2019年6月，日本政府召开综合科学技术创新会议，讨论了《量子技术创新战略中期报告》，报告指出，量子技术将为日本经济、产业和国家安全取得跨越式发展提供新的可能，日本应举全国之力，全面地、战略性地推动量子技术创新。报告还提出了推动量子技术创新的五大战略，即技术开发战略、国际化战略、产业创新战略、知识产权与国际化战略和人才战略<sup>[3]</sup>。

日本第十一次技术预见活动中，科技政策研究所（NISTEP）于2018-2019年进行了德尔菲调查，确定了7大领域<sup>1</sup>，共计702个科技主题，预计实现时间为2050年<sup>[4-5]</sup>。活动通过对企业、研究机构、政府的专家发放网络问卷，调查了各个主题的重要程度、国际竞争力、科技实现前景、社会实现前景和政策措施等五个方面，量子科技领域共确定了22个主题。

### 3. 量子科技的发展趋势

#### 3.1 量子信息处理

谷歌、IBM、英特尔、微软等各大IT巨头企业已经成为全球量子计算机发展的主要参与者。2017年，量子计算机的集成度为9量子比特，一年后，谷歌宣布成功研发出72量子比特的超导集成量子计算机。此外，日本产业技术综合研究所川畑史郎提出，量子系统的相干时间从过去20

年的纳秒大幅度提高到数百微妙，假设这一趋势继续下去，日本到2035年将实现100万量子位的量子计算机。量子计算机有助于更高效地设计和研发新药物、新材料等。量子算法研究的最新进展，揭示了通过将量子计算机应用于电子态计算和化学反应模拟来计算含有大分子和过渡金属等重元素的分子系统方法。例如，微软公司借助量子计算机，阐明了硝基酶固氮过程的机理，从而研发出人工室温合成法，该成果有望开始一场新的农业革命。目前很多公司都在利用超导、光和冷却原子开发数字量子模拟器。如，谷歌和IBM已经成功通过量子计算机模拟复杂化学反应，旨在解决铍氢化物（ $\text{BeH}_2$ ）的分子结构问题。川畑史郎认为，实际的量子模拟至少需要100万~1亿个量子比特进行集成化，目前量子计算的现状还没有证明它们比传统计算机更优越，在实际应用中还有诸多课题有待研发<sup>[6-7]</sup>。日本科技政策研究所研究员蒲生秀典指出，量子化学计算（数字量子模拟器）是量子计算机研发的试金石，量子计算机研发的最终目标是加速门控量子计算机的实用化，使其具有与传统计算机相同的容错能力<sup>[8]</sup>。阿部英介等指出，作为计算用的量子位，超导、离子阱、硅量子点和金刚石氮空位中心等各种芯片正处在研究和开发中<sup>[9]</sup>。超导量子位是发展最成熟的器件，由两部分组成，分别是硅基底上层叠的超导体（铝）和绝缘体（氧化铝）组成的约瑟夫森器件以及环形的超导量子干涉器（SQUID）。虽然器件结构相对简单，但为了提高相干时间，必须对材料的结晶度、取向度和界面进行改进和控制，这也是实际应用中最重要的问题。此外，器件的工作温度极低（几十毫开尔文），这给器件安装带来诸多挑战。由于硅量子点与当前的半导体器件的整合性较高，英特尔等

<sup>1</sup> 7大领域分别为健康·医疗·生命科学、农林水产·食品·生物技术、环境·资源·能源、信息与通信技术·分析·服务、材料·设备·工艺、城市·建筑·土木·交通、宇宙·海洋·地球·基础科学。

公司正在积极开展研发。另外, 微软与欧洲的一所大学合作共同研发马约拉纳粒子量子比特, 这有望成为量子计算机的重大突破<sup>[7,9]</sup>。

### 3.2 量子密码通信

随着信息和数据使用的普及, 对信息和通信安全的需求不断增长, 量子密码通信作为一种安全性极高且能够规避窃听者闯入传输网络的通信技术备受关注。日本国家信息与通信研究院(NICT)于2013年搭建总长约100公里的东京量子密钥分发(Quantum Key Distribution, QKD)管理设备, 并对其运行情况进行了评估。2019年7月, 日本牵头制定的标准(Y.3800)被国际电信联盟电信标准化部门(ITU-T)正式通过, 成为全球首个量子密钥分发(QKD)技术标准<sup>[10]</sup>。

在量子密码通信中, 单光子用于信息传输, 量子态由偏振(光波方向)、相位和自旋控制。横滨国立大学小坂英男指出, 由于信息加载在单光子上, 以固定间隔进行传输, 目前传输信号较弱, 因此研发一种能够长距离稳定传输信息(目前100km左右为极限)的技术迫在眉睫。目前采用经典的继电器来构建长途网络, 无法从物理上保证网络的安全性。基于此, 日本正在研发量子中继技术, 可以快速有效地生成一个单光子源且能够进行安全、远距离通信<sup>[11]</sup>。

近年来, 使用金刚石中的晶格缺陷和氮空位(NV)中心的单光子源备受关注。金刚石具有超高的禁带宽度(5.5eV), 可以在室温下产生单光子且不受光和声子的影响。Kosaka等研究发现, 可利用金刚石氮空位中心开发一种量子态隐形传输技术, 该技术可以测量入射单光子的量子态与空位的局部电子的叠加(量子纠缠)并将其转移到核自旋<sup>[12]</sup>。蒲生秀典指出, 通过量子态隐形传输是量子中继的基础技术, 如果量子中继器可以

投入实际使用, 有望实现“万物互联”<sup>[13]</sup>。

### 3.3 量子传感与量子生命科学

量子传感应用方面, 在室温下实现金刚石中氮空位中心单电子自旋的量子传感器备受关注。金刚石中的氮空位中心可以产生单电子自旋相干叠加态, 禁带较宽且位于间隙中心, 在室温下能够保持较长的时间(相干时间: 几毫秒)。该传感器可用于对生物体产生的磁场进行传感和成像。此外, 通过控制氮空位中心的密度和位置, 可实现纳米到毫米量级的空间分辨率<sup>[14-17]</sup>。

近年来, 科研人员注意力也集中在量子生命科学研究, 它将量子科学技术(量子传感)与生命科学相结合。日本量子生命科学学会和专家委员会于2019年3月发布《关于促进量子生命科学发展的建议》, 提出了基础科学和创新的两个方向和长期发展目标, 以及为实现这些目标而需要关注的研究主题。量子生命科学学会于2019年4月1日正式成立, 当年的5月召开了第一次会议。在“量子生命”方面, 结合量子力学和生命科学的“量子生命科学(量子生物学)”, 力争通过可以捕捉细胞内温度等细微变化的超敏“量子传感器”, 实现癌症发病前预测。位于日本千叶市的量子科学技术研究开发机构将打造可供100~200名研究者使用最尖端设备和仪器的研究环境, 将从大学和企业汇聚人才, 构建“All Japan”(全日本)体制。<sup>[18]</sup>

## 4. 各国积极出台政策探索量子技术, 抢占发展先机

量子技术被认为是可以改变未来的关键科学技术。近年来, 各国对量子技术的关注度持续攀升, 美国、欧盟、日本、澳大利亚、英国等国家和地区均加大对量子技术的政策倾斜和资金支

<sup>1</sup> <https://www.afcea.org/content/national-science-foundation-pushes-quantum-edge>.

持，旨在抢占发展先机，预计2020年全球对量子技术的投资将达到130亿美元<sup>1</sup>。

2018年，美国众议院科学委员会高票通过《国家量子倡议法案》，计划在10年内拨给能源部、国家标准与技术研究院、国家科学基金会12.75亿美元，用于开展量子信息科技研究。同年9月，美国公布了《量子信息科学国家战略概述》，计划在从2019年开始的5年里，最高投入13亿美元，由美国能源部和国家科学基金会牵头，建成10个研发和人才培养基地。2019年2月，美国国家科学基金会发布“量子跃迁挑战研究所”项目指南，拟投资9400万美元推动量子信息科学与工程前沿研究，研究内容涵盖量子计算、量子通信、量子模拟和量子传感等方向。2020年7月，美国能源部公布了一项致力于打造量子互联网的计划，目标是十年内建成与现有互联网并行的第二互联网——量子互联网。美国2020财年预算提案中量子信息科学领域研发资金为4.35亿美元，2020财年实际批准5.79亿美元，2021财年预算请求额为6.99亿美元，比2020财年预算请求增加约60%<sup>[1]</sup>。

欧盟于2018年启动总额10亿欧元的量子技术项目，希望借此促进包括通信网络安全和通用量子计算机等在内的多项量子技术发展。德国政府于2019年5月宣布将拨款6.5亿欧元开展大型量子通信研究项目，以强化德国及欧洲在量子通信技术领域的自主性。2020年5月，欧盟“欧洲量子技术旗舰计划”官网发布《战略研究议程（SRA）》报告。报告显示，未来三年欧盟将推动建设欧洲范围的量子通信网络，完善和扩展现有数字基础设施，为未来的“量子互联网”远景奠定基础<sup>[1]</sup>。

日本文部科学省于2018年开始实施“光·量子跃迁旗舰计划（Q-LEAP）”，其项目周期为2018~2027年，第一年度投资额为32.04亿日元，重点关注量子信息处理、量子模拟器和量子计算机等

相关技术领域。日本内阁会议于2019年7月发布《集成创新战略2019》，分析过去一年日本国内外形势的变化，指出日本未来在生物技术、量子技术、人工智能、环境能源及安全等关键领域的发展目标和发展建议。美国和日本于2019年12月签署了《东京量子合作声明》，正式确立两国在量子科学领域的合作关系。根据《声明》，两国未来将在量子信息科学技术研究与开发方面持续合作，具体合作领域包括但不限于量子计算、量子网络和量子探测；合作培育下一代量子信息科学家和工程师；利用多边合作机会解决国际性重要问题和关键政策问题；促进研究方法、基础设施和数据的共享等<sup>[1]</sup>。

澳大利亚联邦科学与工业研究组织（CSIRO）于2020年5月制定并发布了《量子技术路线图》，该路线图确定了可以支持量子生态系统的行动，行动将通过澳大利亚新兴高科技产业的发展，将澳大利亚的智力资本转化为经济价值<sup>[1]</sup>。

英国下议院科学技术委员会于2018年12月发布了《量子技术》报告，分析了量子技术给英国带来经济增长和社会效益的机会与潜在风险，提出下一步发展的政策建议。英国国防科学与技术实验室（Dstl）代表英国国防部、英国战略司令部于2020年7月发布了《量子信息处理技术布局2020：英国防务与安全前景》研究报告。报告认为，量子技术的进步能够有效提升军事指挥官作出有效决策的高效性、准确性和果断性<sup>[1]</sup>。

## 5. 德尔菲调查结果中的量子科技评价及未来展望分析

### 5.1 德尔菲调查概况

日本科技政策研究所的德尔菲调查共选取了7个科技领域中有望在2050年实现的702个主题，并向产业界、学术界和政府的专家进行了两次网络问卷调查，调查内容包括每个专题的重要程度、

表1 德尔菲调查问卷

项目	内容	选择项
重要度（单项选择）	日本实现30年后的理想社会的重要性	非常高、高、都不高、低、非常低、不知道
国际竞争力（单项选择）	现在日本国际竞争力排位情况	非常高、高、都不高、低、非常低、不知道
科技实现的前景（单项选择）	日本科学技术的实现时间	已实现、2025年之前、2026-2030年、2031-2035年、2036-2040年、2041-2045年、2046-2050年、2051年及以后、不能实现、不知道
科技实现的政策措施（多项选择）	实现科学技术所需的政策措施	人力资源、研发资金投入、基础设施、国内合作、国际合作、制定法律法规、应对伦理问题等、其他
社会实现前景（单项选择）	日本实现社会前景的时间	已实现、2025年之前、2026-2030年、2031-2035年、2036-2040年、2041-2045年、2046-2050年、2051年及以后、未实现、不知道
社会实现的政策措施（多项选择）	日本实现社会目标所需的政策措施	人力资源、项目补助、商业环境、国内合作、国际合作、制定法律法规、应对道德法律和社会问题

注：科技实现意味着建立技术环境，如获得预期的效果，可以在实验室阶段获得技术发展的前景。社会实现是指实现的技术可以作为产品或服务得到广泛应用。

国际竞争力、科技实现前景、社会实现前景、政策措施等，结果如表1所示。

## 5.2 德尔菲调查结果：实现时间

根据德尔菲调查的结果，表2显示按社会实现时间顺序排列的主题表，并展示了重要程度、国际竞争力和受访者人数等数据。本次调查确定的702个主题，量子相关的主题有22个（不包括与量子束应用相关主题），其中量子计算机和量子模拟器的量子信息处理（●）主题最多，共确定10个主题；量子通信与量子密码（■）确定6个主题；量子传感（▲）确定5个主题；新材料（◆）确定1个主题。

从社会实现时间的结果（以问卷调查回答的中位数衡量）来看，日本量子科技的不同主题大概在2032年-2040年实现社会目标。本次调查研究的702个主题的平均实现时间是2032年，量子科技实现的时间较晚。

在量子信息处理领域（●），用于量子退火机<sup>1</sup>的专门量子计算机、混合动力系统、量子模拟器和计算材料特性的方法将陆续实现，到2035年将建成日本首台门控量子计算机。此外，到2038年，将实现手掌大小的混合量子计算机和量子神经网络，包括量子通信和量子存储器。量子通信与量子密码方面（■），到2034年将实现超1000公里的量子中继技术，2036-2038年将实现高性能单光子器件、金融系统的量子存储器和量子通信技术。量子传感（▲）方面，高相干量子传感器将较早实现，随后2036-2038年将有一批生物和生命科学应用主题相继实现。到2038年，将实现在室温下长时间保持量子相干性的新材料（◆），这将有助于提高所有应用程序的性能。

## 5.3 德尔菲调查结果：重要程度和国际竞争力

图1显示了22个量子科技主题的重要程度与

<sup>1</sup> 日本科研人员用光学器件构成的量子退火机。

表2 量子科技主题的社会实现时间、重要程度、国际竞争力和受访人数

社会实现时间	分类	科技主题	重要程度	国际竞争力	受访人数 (人)
2032	▲	量子传感器（例如超导量子 and 氮空位中心）相干时间超过10毫秒	1.16	0.64	114
2033	●	研发通用量子计算机难度较大，使研发难度相对较低的量子退火机成为可能	0.58	0.23	99
	●	量子模拟器，可基于量子化学计算的药物和催化剂设计	1.09	0.27	127
2034	■	量子中继技术可实现维持1000公里量子状态的量子密码通信	1.17	0.63	118
	●	使用量子计算机计算材料特性的方法	0.93	0.30	144
	■	使用量子密码学创新安全的量子通信技术	1.00	0.43	96
2035	●	由传统计算机、量子退火机和门控量子计算机组成的混合系统，可将药物研发、投资和财务决策的效率提升三个数量级	1.08	0.22	116
	●	一种基本的量子算法本质上改进了Shor算法和Grover算法之外的经典算法	0.58	0.21	96
	■	随着量子信息通信技术的发展，信息通信技术的安全基础已经从现有的密码技术转向量子技术的新安全框架	0.94	0.34	70
	▲	利用量子测量技术了解蛋白质功能中量子（机械）层面运行机制所需要的参数	0.47	0.18	282
	●	通过改进目前的量子门实现方法（如核磁共振和超导性）的可扩展性来维持数百位相干性的门控量子计算机	0.82	0.25	103
	●	以单旋为信息载体的信息器件，同时具备CMOS器件无法实现的高速度和低功耗	1.10	0.70	134
2036	●	与经典量子计算机相比，利用门控计算机特性的算法可以减少10个数量级以上的运算次数	0.81	0.08	145
	■	能够在需求时高速产生单光子的新设备	0.78	0.41	121
	■	利用量子密码实现金融系统的量子存储器	0.97	0.19	127
	▲	利用量子纠缠光的超高精度测量，阐明新的生物和生化现象	0.48	0.33	103
2037	▲	研发出超小型的量子传感器	0.74	0.40	121
2038	◆	新材料可在室温下长时间保持量子相干性	0.73	0.37	344
	■	量子通信技术可实现量子计算机之间的量子互联	1.00	0.31	127
	●	手掌大小的量子计算机加速器，可集成到现有计算机中	0.93	0.19	121
	▲	使用量子纠缠的成像技术，在没有光照的情况下不会对被测对象(活体)造成任何损伤	0.51	0.33	116
2040	●	通过量子信道和量子存储器实现量子神经网络	0.74	0.14	100

注：● 量子信息处理、■ 量子通信与密码、▲ 量子传感、◆ 新材料。重要程度和国际竞争力根据非常高 (+2)、高 (+1)、两者都不是 (0)、低 (-1) 和非常低 (-2) 算出得分。来源：根据调查报告整理所得。

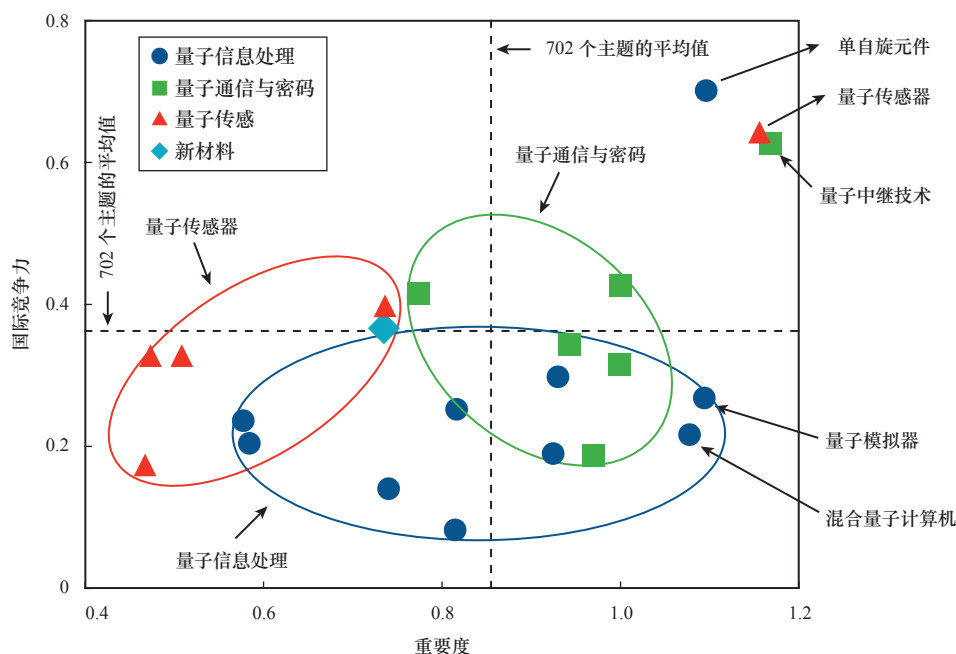


图1 量子科技主题的重要度与国际竞争力的关系

注: 根据德尔菲调查结果的数据制作, 数据来源: NISTEP。

国际竞争力的关系。单自旋元件、量子传感器和量子中继技术（1000公里以上）在重要程度和国际竞争力评价较高。量子态的“叠加”和“纠缠”器件每个主题的重要程度不同，其国际竞争力相对较低。量子计算机模拟器等量子信息处理相关领域的国际竞争力较低，近年来备受关注的量子模拟器和混合量子计算机在重要程度评价上尤为突出。量子通信与密码相关的主题重要程度较高。量子传感器（相干性超过10ms）的重要程度较高且具有较高的国际竞争力，与量子传感相关的其他主题，如生物和医疗应用的主题重要程度相对偏低，国际竞争力不高。

#### 5.4 德尔菲调查结果：促进科技和社会实现的政策措施

图2显示了量子科技主题中必要政策选择的百分比。60%~70%的受访者认为“人力资源”是促进科技和社会实现最重要的政策，超过50%的受访者认为需要对“研发费用”和“项目补助”，“科研基础设施”和“营商环境”等进行持续的政策支持。在量子信息处理领域，“人力资源”政策是呼声最高

的。总体而言，量子通信与密码的政策需求相对较高，尤其是法律法规和社会问题（ELSI）方面的需求是其他领域的两倍。

在实现量子科技的政策措施中，无论是科技实现还是社会实现，“人力资源”、“研发经费”和“项目补助”的选择比例较高。表3和表4是选择比例较高的科技主题。

在人力资源方面，科技实现中量子传感器的选择比例最高。量子传感器、材料特性计算方法 and 门控量子计算机等在科技和社会实现方面占比较高（表3）。研发经费和项目补助方面，量子通信与密码、量子传感器、单自旋器件和门控量子计算机等相关主题选择比例较多。另外，在社会实现中，量子通信、量子中继技术、量子传感器和混合计算机相关主题的选择比例较高（表4）。

## 6. 总结

量子计算机有望迅速处理大量信息，提供更强的计算能力，无论是公共部门还是私营部

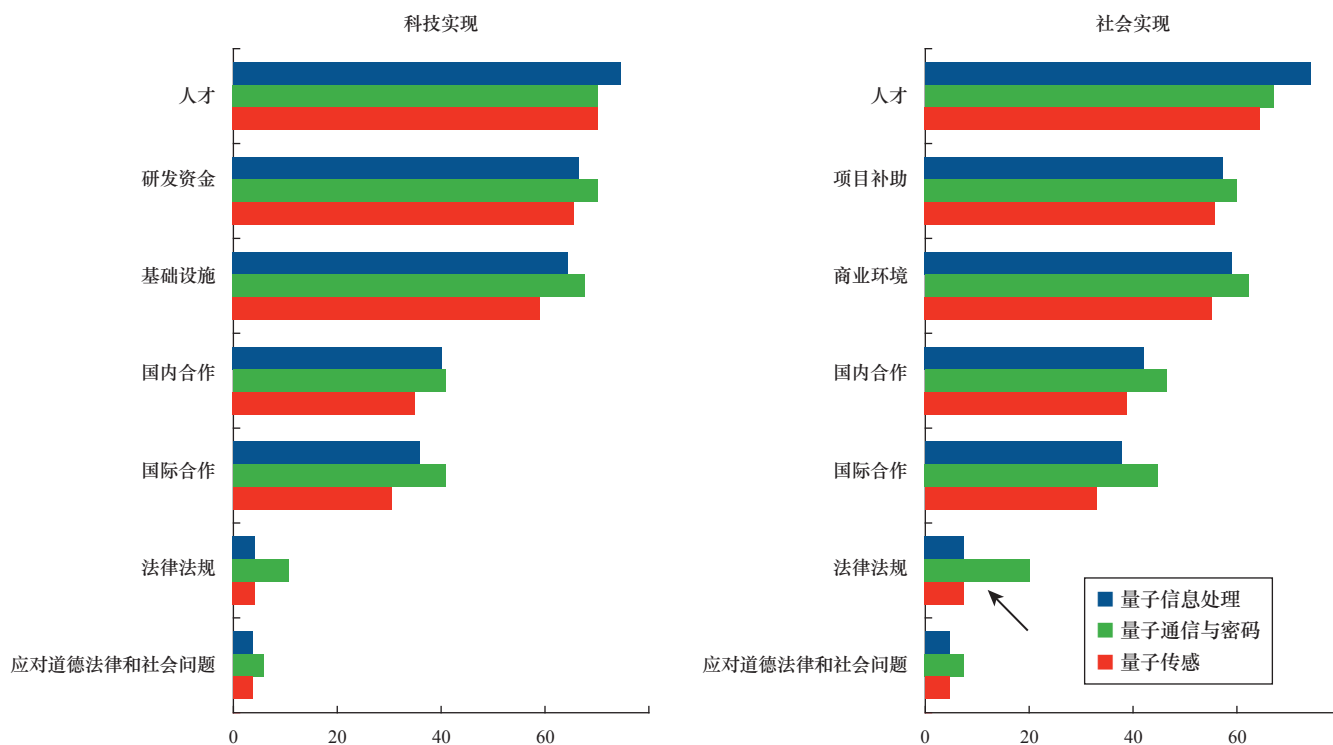


图2 量子科技主题中必要政策选择的百分比 (%)

数据来源: NISTEP。

表3 人力资源选择比例较高的科技主题

项目	选择比例 (%)	分类	科技主题
科技实现	78	▲	量子传感器 (例如超导量子 and 氮空位中心) 相干时间超过10毫秒
	74	●	使用量子计算机计算材料特性的方法
	73	●	由传统计算机、量子退火机和门控量子计算机组成的混合系统, 可将药物研发、投资和财务决策的效率提升三个数量级
	73	■	量子中继技术可实现维持1000公里量子状态的量子密码通信
	72	●	与经典量子计算机相比, 利用门控计算机特性的算法可以减少10个数量级以上的运算次数
社会实现	76	●	通过改进目前的量子门实现方法 (如核磁共振和超导性) 的可扩展性来维持数百位相干性的门控量子计算机
	72	●	使用量子计算机计算材料特性的方法
	72	●	研发通用量子计算机难度较大, 使研发难度相对较低的量子退火机成为可能
	71	▲	量子传感器 (例如超导量子 and 氮空位中心) 相干时间超过10毫秒
	70	●	由传统计算机、量子退火机和门控量子计算机组成的混合系统, 可将药物研发、投资和财务决策的效率提升三个数量级

注: ● 量子信息处理、■ 量子通信与密码、▲ 量子传感, 根据调查报告整理, 来源为NISTEP, 表4同。



表4 研发经费和项目补助选择比例较高的科技主题

项目	选择比例 (%)	分类	科技主题
科技实现	73	■	随着量子信息通信技术的发展, 信息通信技术的安全基础已经从现有的密码技术转向量子技术的新安全框架
	71	▲	量子传感器 (例如超导量子 and 氮空位中心) 相干时间超过10毫秒
	70	●	以单旋为信息载体的信息器件, 同时具备CMOS器件无法实现的高速度和低功耗
	69	●	通过改进目前的量子门实现方法 (如核磁共振和超导性) 的可扩展性来维持数百位相干性的门控量子计算机
	69	■	使用量子密码学创新安全的量子通信技术
社会实现	62	■	量子中继技术可实现维持1000公里量子状态的量子密码通信
	61	▲	量子传感器 (例如超导量子 and 氮空位中心) 相干时间超过10毫秒
	60	●	手掌大小的量子计算机加速器, 可集成到现有计算机中
	58	●	由传统计算机、量子退火机和门控量子计算机组成的混合系统, 可将药物研发、投资和财务决策的效率提升三个数量级
	57	■	量子通信技术可实现量子计算机之间的量子互联

门, 大规模的量子计算机研发投入正在全球范围内迅速扩大。根据日本科技政策研究所实施的德尔菲调查结果显示, 日本预计在2035年建成国家首台门控量子计算机, 对社会和经济产生重要影响。量子神经网络有望在2040年成为量子信息技术的发展热点。

从调查结果来看, 日本致力于推动单自旋器件、量子传感器和量子中继技术的发展, 这些技术在重要程度和国际竞争力方面都得到了高度评价。目前, 世界各国都在抓紧研发量子模拟器、混合计算机、量子密码和量子通信技术, 对于这些技术, 日本虽然目前国际竞争力不高, 但各界专家认为这些技术重要程度最高。在量子传感方面, 新型量子传感器的重要性得到了高度认可, 但对量子传感器重要程度的评价不高, 并且处于基础研究水平。日本将不断的努力推进量子传感基础研究, 未来可能会在健康和医疗领域得

到广泛的应用。

量子科技具有与传统固态半导体和光学器件截然不同的特性。在提高基础性能方面, 基础科学将比以往更加重要。但材料和工艺技术在半导体和光器件中的应用将是器件安装的关键。迄今为止日本积累的技术将成为其优势。虽然这些技术在投入实际应用之前, 还有很多亟需解决的问题, 想要提高量子态的相干时间和可控性, 还需要进行量子态相关硬件 (材料和器件)、系统化 (集成等)、软件 (算法等) 以及基础科学 (量子信息和量子生命等) 的研发。全面推进科技进步对于日本实现“社会5.0”和建设健康长寿社会有重要价值。

责任编辑: 刘雅琦 校对: 李琦 刘雅琦

#### 参考文献

[1] 科学技術予測センターKIDSASHIサイ

ト[EB/OL]. (2020-7-11) [2020-12-1]. <https://stfc.nistep.go.jp/horizon2030/index.php/ja>.

[2] 内閣府総合科学技術・イノベーション会議、「統合イノベーション戦略2019」（令和元年6月21日閣議決定）[EB/OL]. (2020-7-11) [2020-12-8]. [https://www8.cao.go.jp/cstp/togo2019\\_honbun.pdf](https://www8.cao.go.jp/cstp/togo2019_honbun.pdf).

[3] 首相官邸，量子技術イノベーション戦略中間整理（令和元年6月）[EB/OL]. (2020-11-11) [2020-12-11]. [https://www.kantei.go.jp/jp/singi/tougou-innovation/pdf/ryoushi2019\\_chukan.pdf](https://www.kantei.go.jp/jp/singi/tougou-innovation/pdf/ryoushi2019_chukan.pdf).

[4] 横尾淑子，赤池伸一，「ST Foresight 2019（速報版）の概要-人間性の再興・再考による柔軟な社会を目指して-」；文部科学省 科学技術・学術政策研究所STI Horizon 2019. Vol.5 No.3[EB/OL]. (2020-10-11) [2020-12-10]. <https://doi.org/10.15108/stih.00185>.

[5] 科学技術・学術政策研究所 科学技術予測センター、「第11回科学技術予測調査(速報版)」（2019年7月）：[EB/OL]. (2020-9-11) [2020-12-11]. <http://doi.org/10.15108/stfc.foresight11.101>.

[6] 川畑史郎，「超伝導量子回路を用いた量子アニーリングマシンと量子シミュレータ：動向・展望・課題」，第79回応用物理学会秋季学術講演会シンポジウム20p-145-3（2018年9月、名古屋）[EB/OL]. (2020-8-11) [2020-10-10]. <https://staff.aist.go.jp/s-kawabata/meeting.html>.

[7] 川畑史郎，「量子コンピュータと量子アニーリングマシンの最新研究開発動向ーQuantum2.0時代の幕開けー」、低温工学、53、271（2018）.[EB/OL]. (2020-9-1) [2020-10-10]. <https://tiisys.com/blog/2019/02/09/post-19573/>.

[8] 蒲生秀典，「量子コンピュータ開発の進展~化学薬品・創薬・新材料開発の加速に向けて」、KIDSASHI, NISTEP(2019) [EB/OL]. (2020-10-11) [2020-12-10]. <https://stfc.nistep.go.jp/horizon2030/index.php/ja/weekly-weakly-signals/qbit20190208>.

[9] 阿部英介，伊藤公平，「固体量子情報デバイスの現状と将来展望」、応用物理、86、453（2017）.[EB/OL]. (2019-7-15) [2020-11-13]. [https://www.jstage.jst.go.jp/article/oubutsu/86/6/86\\_453/\\_article/-char/ja/](https://www.jstage.jst.go.jp/article/oubutsu/86/6/86_453/_article/-char/ja/).

[10] 情報通信研究機構HP プレスリリース、「国際標準化機関ITU-Tで初の量子鍵配送ネットワークに係る勧告が成立」[EB/OL]. (2020-11-11) [2020-12-10]. <https://www.nict.go.jp/press/2019/07/02-1.html>.

[11] 小坂英男，「ダイヤモンドを用いた量子情報物理と量子通信への展開」，応用物理、83、928（2014）.[EB/OL]. (2019-3-18) [2020-12-1]. [https://www.jstage.jst.go.jp/article/oubutsu/83/11/83\\_928/\\_article/-char/ja](https://www.jstage.jst.go.jp/article/oubutsu/83/11/83_928/_article/-char/ja).

[12] H. Kosaka et al., "High fidelity transfer and storage of photon states in a single nuclear spin", Nature Photonics, 10, 507-511(2016).

[13] 蒲生秀典，「安全な量子情報通信ネットワークの実現に向けて ~ダイヤモンドを利用した量子テレポーテーションを実証~」，KIDSASHI, NISTEP（2017）[EB/OL]. (2020-10-11) [2020-12-09]. <https://stfc.nistep.go.jp/horizon2030/index.php/ja/weekly-weakly-signals/337>.

[14] 東京工業大学HP，「ダイヤモンドで環境を、そして社会を変える-波多野睦子」[EB/OL]. (2020-10-11) [2020-12-10]. [https://www.titech.ac.jp/research/stories/faces21\\_hatano.html](https://www.titech.ac.jp/research/stories/faces21_hatano.html).

[15] 波多野睦子，崎孝之，山崎聡，「ダイヤモンドの魅力ダイヤモンド半導体の先進パワーデバイスと高機能センサへの応用の可能性」，応用物理 85, 311(2016). [EB/OL]. (2020-10-11) [2020-12-10]. [https://www.jstage.jst.go.jp/article/oubutsu/85/4/85\\_311/\\_article/-char/ja](https://www.jstage.jst.go.jp/article/oubutsu/85/4/85_311/_article/-char/ja).

[16] 水落憲和，「NV中心の物理と応用への魅力」，応用物理，87，251(2018). [EB/OL].

(2020-10-11) [2020-12-10]. [https://researchmap.jp/read0055411/books\\_etc/12174348](https://researchmap.jp/read0055411/books_etc/12174348).

[17] 水落憲和，「量子技術を用いたNV中心量子センサの高感度化研究」，量子生命科学第1回大会p3（2019年5月，東京） [EB/OL].

(2020-10-11) [2020-12-10]. <https://researchmap.jp/read0055411/presentations/11768097>.

[18] 量子生命科学研究会・有識者会議，「量子でヒトを理解する、しあわせにする。～生命科学を場とした第二次量子革命～量子生命科学の推進に関する提言」 [EB/OL]. (2020-10-11) [2020-12-11]. <https://www.qst.go.jp/uploaded/attachment/10715.pdf>.

## Recent trends and future outlook of quantum science and technology in Japan——Analysis based on the results of the 11th technology foresight survey

Wang Da, Miao Jing-liang

(National Academy of Innovation Strategy, CAST, Beijing 100038, China)

**Abstract:** Quantum science and technology has a wide range of applications in the Internet of Things, artificial intelligence, health care and autonomous driving, and has played an important role in promoting high-quality development and safeguarding national security. This paper introduces the current research status of quantum science and technology in Japan, outlines national quantum science and technology strategies and policy documents through reports published regularly by the KIDSASHI platform of the Science and Technology Forecasting Centre of the Japan Science and Technology Policy Institute, and analyses the future development trends and application prospects of quantum science and technology in Japan from five aspects, including the importance of each topic, international competitiveness, prospects for scientific and technological realization, prospects for social realization, and policy measures, based on the results of the 11th Delphi survey on technology foresight in Japan. According to the data from the JSTPI Delphi survey results, the average time to achieve the 702 topics in this survey is 2032, and all 22 topics of quantum science and technology will achieve their social goals between 2032 and 2040; Japan will build the country's first gated quantum computer in 2035; single spin elements, quantum sensors and quantum relays are rated high in terms of importance and international competitiveness.

**Key words:** Japan; quantum computers, quantum communication and cryptography; quantum sensing; technology foresight