

미국의 양자과학기술 정책 및 R&D 동향

서민경 정보통신기획평가원 정책기획팀 책임

1. 머리말

양자과학기술은 기존 기술의 한계를 뛰어넘는 초고속 대용량 연산(양자컴퓨팅), 초신뢰 보안(양자통신), 초정밀 계측(양자센서)을 가능케 할 기술잠재력을 인정받고 있다. 이에 따라, 양자과학기술은 AI 기술을 잇는 차세대 게임체인저 기술로 주목받고 있으며, 미국, 중국, 일본, EU(유럽연합, European Union), 영국 등 주요국은 정부 차원에서 육성 정책 및 선제적 투자 지원을 추진하고 있다.

특히, 양자과학기술 기술력 종합 1위로 평가받고 있는 미국은 가장 적극적으로 육성 정책을 추진하는 국가 중 하나다. 미국은 1990년대부터 국가안보 및 국방 차원에서 양자과학기술에 투자 해왔으며, 2018년 12월엔 세계 최초로 'NQI법(국가 양자 이니셔티브법, National Quantum Initiative Act)'을 제정해 국가 차원의 지원 기틀을 마련했다. 미국은 'NQI법'을 근거로 거버넌스를 정비하고 대규모 예산을 승인했으며, 이후 정책적 보완을 위해 세부 전략들을 발표했다. 미국 연방정부와 기관들은 법안과 'NQI(국가양자 이니셔티브, National Quantum Initiative)'를 근거로 정책 및 R&D 활동을 진행하는 중이다.

이번 원고에선 'NQI법'을 중심으로 미국의 양자과학기술 정책 및 R&D 동향을 살펴보고자 한다.

2. NQI법에 기초한 정책 추진 동향

2.1 NQI법

미국은 1994년 피터 쇼어(Peter Shor)의 알고리즘 발명¹⁾ 이후, DARPA(미국 국방고등연구계획국, Defense Advanced Research Projects Agency)와 정보기관 주도로 암호해독을 위한 양자컴퓨터 개발에 투자를 시작했다. 2000년대 이후엔 암호해독보다 양자통신, 센서, 시뮬레이터처럼 기존 기술의 한계를 뛰어넘는 것으로 투자 방향성이 변했다.

이러한 맥락에서 미국 연방정부의 최초 양자과학기술 정책이라 할 수 있는 NSTC(미국 국가과학기술위원회, National Science and Technology Council) '양자정보과학을 위한 연방 비전' 보고서가 2009년 발표됐다. 해당 보고서를 계기로 정부 기관, 대학 등이 주관하는 커뮤니티가 활성화 됐으며, 이는 향후 양자 분야 전문가가 결집하는 기반이 됐다. 이후, 실험실에서 개발된 기술을 상용화하기 위한 인프라 및 생태계 구축, 난제 해결을 위한 학제간 연구 및 대규모 자금 지원

1) 소인수분해나 이산대수 문제를 고전 컴퓨터보다 기하급수적으로 빠르게 처리 가능한 양자 알고리즘. 현재 널리 사용 중인 RSA 암호화 체계는 큰 소수의 합성수를 기반으로 해 고전 컴퓨터에서는 해독이 불가능하지만, 쇼어 알고리즘이 통용될 경우 무력화될 수 있음

필요성, EU·중국과 같은 경쟁국 대비 미흡한 지원 실정 등 여러 이유로 인해 국가전략의 필요성이 제기됐다. 그리고 2016년경부터 'NQI'에 대한 논의가 급물살을 타기 시작했다.

미 하원은 2017년 학계·산업계 요구에 따라 공청회 등을 주관했으며, 2018년 6월 'NQI법'을 발의해 당해 9월 통과시켰다. 이는 2018년 12월 상·하원의 만장일치에 가까운 찬성으로 승인돼, 발의 6개월 만인 2018년 12월 21일 'NQI법'이 공식 제정됐다. 한편, 연방정부도 이에 발맞춰 2018년 9월 해당 법안의 기반이 되는 전략인 '양자정보과학 국가전략 개요'를 발표해 6개의 권고사항을 제시했다.

양자정보과학 국가전략 개요(2018.9)의 6대 권고사항

- (과학 우선 접근법) 핵심적이고 장기적인 R&D 프로그램 투자 등 연구 지원
- (인력양성) 초중고 교육, 산학 수요를 고려한 교육 등을 추진하며, 인력 확대 지원
- (민·관협력 강화) 산·학·연·관 협력 생태계 구축으로 기술사업화 촉진
- (주요 인프라 구축) 실험실, 테스트베드, 파운드리 등 필요 인프라 구축
- (국가·경제 안보) 국가안보, 경제성장 유지, 국방 측면에서 검토
- (국제협력 강화) 산업계, 파트너 국가 등과의 협력 증진

미국은 'NQI법'으로 향후 10년간 국가 차원에서 양자연구에 집중한다는 의지를 표명했으며, 양자 컴퓨팅, 양자통신, 양자센서 등 양자과학기술을 종합적으로 지원하는 것을 목표로 설정했다. 연구개발뿐만 아니라, 거버넌스, 연구소 설립, 인력양성, 민관협력, 연계 지원 법률 등도 명시했다. 이에 따라, OSTP(백악관 과학기술정책실, Office of Science and Technology Policy) 산하에 NQI 시행을 전담하는 NQCO(국가양자조정실, National Quantum Coordination Office)를, NSTC 산하에 SCQIS(양자정보과학분과위원회, Subcommittee on Quantum Information Science)를 신설해 정책과 예산의 총괄 업무를 분장하는 등 거버넌스를 정비했다. 또한, 미국은 초기 5년간('19~'23) 12억 달러의 예산 권한을 승인해, NIST(미국 국립표준기술연구소, National Institute of Standards and Technology), NSF(미국 국립과학재단, National Science Foundation), DOE(미국 에너지부, United States Department of Energy)에 각각 역할과 책임을 부여했다.

2.2 이후 정책 추진 동향

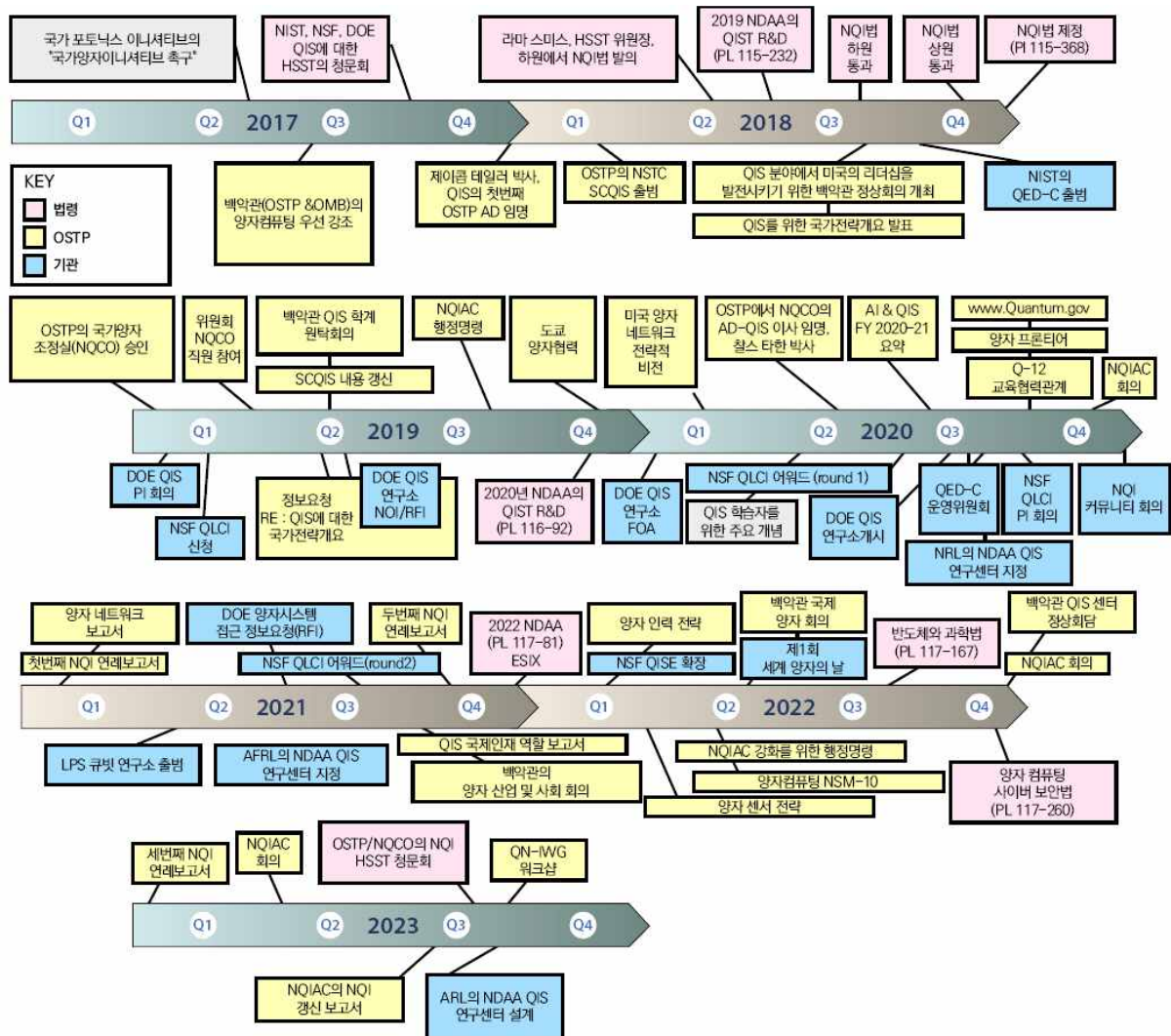
'NQI법'은 '국방수권법(FY 2019, 2020, 2022)', '반도체와 과학법(2022.8)'에 의해 개정됐으며, 또한 '양자 프런티어(2020.10)', '양자 네트워크에 대한 조정된 접근 방식(2021.1)', '양자센서의 실현(2022.3)' 등 새로 발표된 전략에 따라 조정됐다. 그럼에도 불구하고, 연방정부의 정책은 위의 6대 권고사항에 따라 추진되고 있다. 각 권고에 따라 추진 중인 정책을 살펴보고자 한다.

2.2.1 과학 우선 접근법

과학 우선 접근법의 목표는 기술 기반 구축을 위한 기초연구 투자를 비롯해, R&D를 강화하고, 양자센터를 설립하며, 양자 관련 도전적 과제를 탐색해 우선 지원하는 것이다. 이는 양자과학기술을 다루는 모든 연방기관은 물론, 민간 연구개발에 대한 포괄적인 지원과 활동까지 포함한다.

연구개발과 이를 지원하는 기관으로는 NSF, DOE, IARPA(미국 정보고등연구기획국, Intelligence Advanced Research Projects Activity), NIST, NIH(미국 국립보건원, National Institutes of Health), DOD(미국 국방부, United States Department of Defense), DHS S&T(미국 국토안보부 과학기술국, Department of Homeland Security Science and Technology Directorate) 등이 있다. 각 기관은 연구개발 이외에도 인력양성, 커뮤니티 활성화, 인프라 구축 등을 위한 프로그램을 운영한다. 이와 관련한 세부내용은 3.2에서 후술하고자 한다.

거버넌스 측면에서는 NQCO가 정책 활동 등을 조정하고, SCQIS는 새로운 전략을 개발하며 매년 추진 현황을 개괄한다. 또한, 협력, 정보교류, 정책 개발, 행사 등을 원활하게 추진하기 위해 'IWG(관계기관워킹그룹, Interagency Working Group)'도 출범했다. IWG에 참여하는 3개 조직은 이해관계자 등을 소집해 R&D와 정책 방향성 논의를 주도하고 있다.



※ AFRL:공군 연구소 / DOE: 미국 에너지부 / ESIX: 양자과학의 경제·안보 영향에 관한 소위원회 / HSST: 하원 과학우주기술위원회 / LPS: 국가안보국 물리과학연구소 / NDDA: 국방수권법 / NQCO: 국가양자조정실 / NQIAC: 국가양자이니셔티브 자문위원회 / NSF: 미국 국립과학재단 / NSTC: 미국 국가과학기술위원회 / OSTP: 백악관 과학기술정책실 / QED-C: 양자경제개발연합체 / QLCI: 양자도약챌린지연구소 / QIS: 양자정보과학 / QIST: 양자정보과학기술 / QN-IWG: 양자 네트워크 기관 간 워킹그룹 / SCQIS: 양자정보과학분과위원회

출처: SCQIS, National Quantum Initiative Supplement to The President's FY 2024 Budget, 2023.12.1. p.56

[그림 1] 미국의 NQI 추진 타임라인(2017~2023)

양자통신 분야에선 2021년 1월 발표된 '양자 네트워크에 대한 조정된 접근방식'에 따라 R&D 지원이 이뤄지고 있으며, 수 km 규모 네트워크 테스트를 위한 인프라 구축에 다수 기관이 참여 중이다. 이에 더해, 가장 상용화 시점이 빠를 것으로 예상되는 양자센서 분야 촉진을 위해 4대 권고사항²⁾을 제시한 '양자센서의 실현' 전략이 2022년 3월 발표됐다. 이를 기초로 주요 기관에서 응용기술개발과 사업화 촉진을 위한 전용 R&D 프로그램을 신설·지원하는 중이다.

2.2.2 인력양성

미국은 최근 몇 년간 양자 관련 인력 수요가 공급을 초과하면서, 인력 부족 현상이 심화되고 있다고 진단했다. 이에 2022년 2월 '양자정보과학기술 인력양성 국가전략계획' 발표를 통해 4대 조치³⁾를 제시하고, 추진 현황을 점검했다. 연방정부는 학계·산업계 수요를 분석하고, 주요 기관은 주기적인 단기 인턴십과 학부·대학원·박사후연구원을 위한 프로그램을 운영한다. 더불어, 양성한 인력의 경력경로 개발 또한 지원된다. 한편, 대중의 인식 제고를 위해, '세계 양자의 날' 개최, 초중고 프로그램 개설, 교육자를 위한 프로그램 제공 등도 추진되고 있다.

2.2.3 민관협력 강화

양자과학기술이 국가 경제에 이바지하기 위해선 관련 산업이 발전해야 하며, 실험실에서 개발된 양자기술이 산업으로 전환되기 위해선 혁신 생태계 구축이 선행되어야 한다. 여기서 정부는 혁신 커뮤니티, 사업화 및 응용연구, 초기 산업화 등 다양한 분야에 대한 지원을 수행할 필요가 있다. 이를 위해 미국은 기존 SBIR(Small Business Innovation Research) 및 STTR(Small Business Technology Transfer) 프로그램을 활용해 스타트업을 지원하고 있으며, DOE, NSF는 R&D 프로그램에 사업화 촉진에 대한 지원을 포함시켰다. 특히, NIST가 2019년 설립하고, 지속적으로 지원하고 있는 'QED-C(양자경제개발연합체, Quantum Economic Development Consortium)'가 핵심적인 역할을 수행하고 있다. 산업계 주도로 운영되는 QED-C는 사용사례, 기술, 표준 및 성능 지표, 인력개발, 양자 관련 법률, 국가안보를 위한 양자 등을 다루며, 산업기반과 공급망의 성장 촉진을 지원한다.

2.2.4 주요 인프라 구축

양자기술이 고도화되면서 더욱 복잡한 인프라가 필요해졌다. 이에 NSF, DOE 등은 R&D장비·시설을 제공하는 한편 협업을 촉진하기 위한 인프라를 구축·운영하고 있다. NSF는 양자컴퓨터, 양자재료 등을 지원하기 위해 기존 인프라를 바탕으로 파운드리를 구축했다. NSF는 STAQ(Software-Tailored Architecture for Quantum co-design) 프로젝트를 바탕으로 양자컴퓨터 구축을 지원하고, 국립고자기장연구소, 고에너지X-선과학센터를 통해 양자재료 분야를 지원하고 있다.

-
- 2) ▲R&D 주도 기관은 새로운 양자센서 개발을 가속화하고, 최종 사용자와의 적절한 파트너십을 우선시하여 기술준비도 (TRL) 제고, ▲센서를 활용하는 기관은 타당성 조사를 수행하고, R&D 리더와 공동으로 시제품을 테스트하여 유망기술을 식별하고 기관의 임무를 해결하는 양자센서에 집중, ▲R&D 공학부문을 지원하는 기관은 양자기술 개발 및 규모의 경제를 촉진하기 위해, 광범위하게 적용 가능한 구성 요소 및 하위 시스템을 개발, ▲기관은 양자센서 기술개발과 조기 채택을 장려하기 위해 기술이전 및 취득 관행을 간소화
 - 3) 단기 및 장기적 관점에서 양자정보과학기술 생태계 인력 수요에 대한 이해 개발 및 유지, ▲일반대중 홍보 및 교육자료를 통해 더 많은 사람들에게 양자정보과학기술 소개, ▲전문교육 및 훈련 기회를 통해 양자정보과학기술 격차 해소, ▲양자정보과학기술 및 관련 분야 경력에 대한 접근성과 공평성 제고

NSF는 또한, 실험과 시제품 제작을 위한 양자 파운드리를 2019년과 2021년에 걸쳐 2개 설립했다. DOE는 연구에 필요한 동위원소 생산시설을 건설하는 중이며, 파운드리, 양자컴퓨팅 테스트베드 구축을 통해 연구자를 지원하고 있다.

2.2.5 국가·경제안보

미국은 양자과학기술이 국가 및 경제안보에 미칠 영향을 분석하는 한편, 기술 발전으로 이득을 취할 수 있도록 종합적인 접근 방식을 취하고 있다. NSTC는 2022년 'ESIX(양자과학의 경제·안보 영향에 관한 소위원회, Economic and Security Implications of Quantum Science)'를 신설해 해당 사안을 총괄·조정하도록 했으며, 백악관은 2023년 5월 국가표준전략을 발표해 표준개발 촉진을 강조했다.

NIST는 표준 관련 움직임을 주도하고 있다. 이를 통해 올해 8월 PQC(양자내성암호, Post Quantum Cryptography)에 대한 3개 표준을 지정하는 성과가 있었다. NIST는 또한 QED-C를 통해 산업계의 표준개발을 지원하고 있다. 한편, NSF는 연구안보 프레임워크를 개발해 순차적용을 앞두고 있으며, 2025년 양자분야부터 우선 적용할 예정이다.

2.2.6 국제협력

미국은 동맹국들과의 협력을 강화함으로써 자국 및 동맹의 기술역량을 유지하는 한편, 기타 국제협력을 통해서도 활발하고 안전한 국제 양자정보과학 생태계 조성을 유도하고자 한다. 이를 위해 2023년 4월 체결된 '양자정보과학을 위한 공동 협력 성명', EU와의 TTC(무역기술위원회, Trade and Technology Council), 국제행사 개최 등 다양한 방법으로 협력을 강화했다. 한편, NSF는 독일, 스위스, 캐나다, 영국, 프랑스 등과의 협력 프로젝트를 운영하는 중이다.

3. 예산 및 R&D 동향

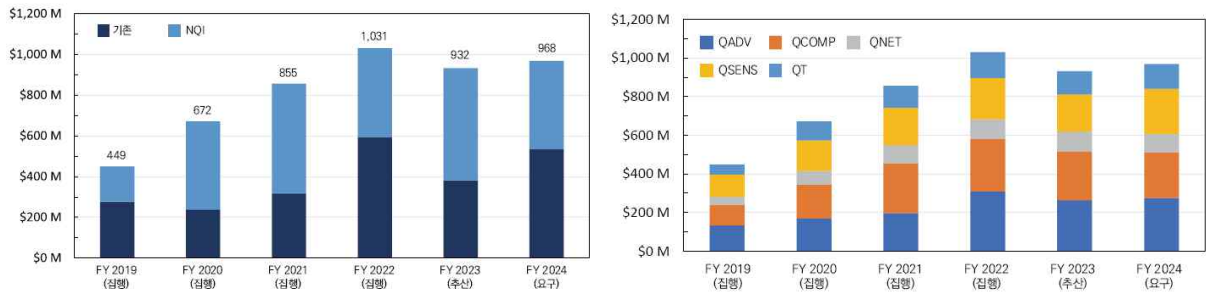
3.1 예산 동향

미국 연방정부는 최근 3년간 양자과학기술에 연평균 9.8억 달러(약 1.3조 원)를 투자했다. 이는 [그림 2]에서 보이는 바와 같이, 'NQI법' 제정 전인 2019년도 예산 대비 2배 이상 증가한 것이다. 증액된 예산의 상당 부분은 NIST의 양자 컨소시엄, NSF의 QLCI(양자도약챌린지연구소, Quantum Leap Challenge Institutes), DOE의 국립양자정보과학연구소 등 여러 기관의 핵심 양자정보과학 프로그램 조정·강화에 사용됐다. 또한, 2024년 기준 분야별 예산 규모는 기초과학 발전을 위한 양자정보과학(QADV), 양자컴퓨팅(QCOMP), 양자센싱·계측(QSENS), 양자기술(QT), 양자통신(QNET) 순이다. 'NQI법' 이후 특히, QADV 및 QCOMP 예산이 약 3배 이상 큰 폭으로 증가했다.

3.2 R&D 동향

NIST, NSF, DOE, DOD 등 주요 연방기관은 각자 독립적으로 R&D 프로그램을 추진하고 있으며, 각 기관의 중점분야는 상이하다.

NIST는 기술, 공급망, 표준, 인력의 격차를 파악하고 협력을 통해 이를 해소하고자, QED-C를 설립해 다양한 활동을 지원하고 있다. 또한, NIST는 표준개발을 주도하고 있으며, 기초·응용 R&D



※ 국립표준기술연구소(NIST), 국립과학재단(NSF), 에너지부(DOE), 항공우주국(NASA), 국토안보부(DHS) 등 여러 기관에서 집계된 연방 예산을 포괄해 산정하며, 'NQI법'에 근거해 승인된 예산을 구분해 표시

출처: SCQIS, National Quantum Initiative Supplement to The President's FY 2024 Budget, 2023.12.1. pp.8-10

[그림 2] 미국 정부의 양자과학기술 FY 2019~FY 2024 예산 추이

프로그램, 내부 인력 대상 양자 관련 지원 프로그램, 인력양성을 위한 펠로우십 프로그램 등도 운영하는 중이다.

NSF는 미국의 대표적인 과학기술 인재양성 및 R&D 프로그램 지원 기관으로, 가장 많은 양자 관련 예산을 배분받았다. NSF는 증액된 예산으로, 'NQI법'에 따라 QLCI를 2021~2022년에 걸쳐 총 5개 설립했다. QLCI는 양자정보과학 및 공학 연구·교육을 위한 대규모 다학제 센터 역할을 수행한다. 이 외에도 기존운영 중인 과학기술센터, 공학연구센터, 물리학프런티어센터 등을 통한 프로그램도 운영하는 중이다.

또한, NSF의 여러 부서에서는 핵심 프로그램을 지원한다. 그중 '양자정보과학공학 역량확충(ExpandQISE)' 프로그램은 인재육성·확보를 주요 목표로 센터 또는 연구기관 간의 협력을 지원하고, '양자 시스템의 획기적 발전(TAQS)' 프로그램은 다학제 프로젝트를 지원한다. 더불어, 국립양자가상연구소(NQVL) 프로그램을 통해서도 기술사업화와 혁신 주체 간의 협업을 촉진하고, NSF 핵심 프로그램에선 기초연구 등을 지원한다. 이러한 R&D 투자는 인력양성을 전제로 하고 있으며, 주로 센터를 지원하는 방식으로 추진된다. 한편, NSF는 대학과 협력해 양자 파운드리를 구축함으로써 연구 및 산업발전에 기여하고자 노력 중이다.

DOE는 주로 대형 인프라 구축에 투자하며, 자체 연구도 수행한다. DOE는 'NQI법'에 따라 5개 '국립양자정보과학연구소'를 설립했으며, 핵심 프로그램 전반에 걸친 양자정보과학 연구를 강화·조정하고 있다. 특히, 첨단 인프라를 구축해 연구자들이 연구자원에 접근할 수 있도록 하며, 이를 통해 생태계 육성을 지원한다. 또한, DOE는 나노과학연구센터, 양자컴퓨팅·통신 테스트베드, 스핀·초전도 큐비트용 파운드리, 양자 시스템에 필요한 동위원소 생산 기술개발·관리 등을 통해 다양한 인프라를 개발·구축하고 있다. 이에 더해, 연구자에게 첨단 컴퓨팅 리소스, 양자 컴퓨터 리소스 등을 제공하는 프로그램도 운영한다.

DOD는 양자과학기술을 국방 분야 핵심기술 중 하나로 선정하고, 주로 국방 임무 수행, 군사적 우위 유지를 위한 기술에 투자한다. 관련 연구는 DARPA, 육·해·공군 연구시설 등을 통해 이뤄지고 있다. 특히 중점을 두는 기술은 원자시계의 기술성숙도(TRL) 발전, 정보·감시·정밀항법·시간유지(PNT) 등을 위한 양자센서, 보안 암호화 솔루션에 관한 양자컴퓨팅이다.

4. 맺음말

미국은 'NQI법'을 근거로, 안정적인 체계 속에서 연방정부 차원의 조정된 정책을 추진하고, 예산을 집행하고 있다. 이를 통해 미국은 글로벌 기술리더십을 유지하고 있으며, 급변하는 상황에 따라 법안을 개정하고 새로운 전략을 발표하고 있다. 이에 더해, 공공과 민간의 역량 집중을 꾀하는 등 적극적인 대응에 나서고 있는 중이다.

최근, 2023년을 기점으로 NQI가 출범한 지 5년이 경과해 정부 지원기간이 만료됐다. 이에 따라 하원에선 양자과학기술의 잠재력 등을 고려해 2023년 11월 '국가 양자 이니셔티브 재승인법'을 발의한 상태다. 해당 법안은 향후 5년간의 대규모 추가 지원을 뒷받침하기 위한 것이다.

한편, DOC(미국 상무부, Department of Commerce)는 올해 9월부터 양자컴퓨터 관련 기술을 수출제한 품목으로 지정해 관리하는 규칙을 제정·발표했다. 이는 양자과학기술이 국가안보를 위협할 수 있을 정도로 강력한 기술이라는 판단하에, 이전보다 적극적이고 전략적인 투자가 필요하다는 점을 시사한다. DOC는 관련 산업 육성을 위한 안정적인 정책 환경을 조성하는 한편 국가 경쟁력을 확보하고자 한다.

우리나라 또한 국가 차원의 지원 및 역량 결집을 위해 '양자산업법'을 입법했으며, 올해 11월 시행을 앞두고 있다. 또한, 올해 4월 3대 이니셔티브 중 하나로 '퀀텀 이니셔티브'를 발표했으며, 2023년부터 추진하던 '양자과학기술 플래그십 프로젝트'의 예비타당성 조사 면제가 확정돼 2025년부터 본격적으로 추진할 예정이다.

현재 우리나라의 양자기술력은 선도국 대비 약 10년 정도 뒤쳐진 것으로 추정된다. 하지만 양자산업은 아직 태동기로, 압도적 기술력이나 시장 지배력이 높은 국가 혹은 기업이 부재한 상태다. 본격적인 상용화를 앞둔 지금 이 시점이 마지막 골든타임이라 할 수 있다. 따라서 이번 대규모 투자 결정은 기술 추격형 국가에서 기술 선도국으로 도약할 수 있는 기회가 될 것이다.

[참고문헌]

- [1] IITP 서민경, 주요국의 양자과학기술 정책 및 미국의 정책·R&D 추진 동향, 스팟이슈 2024-4호, 2024.7.15.
- [2] SCQIS, National Quantum Initiative Supplement to The President's FY 2024 Budget, 2023.12.1.
- [3] 미국 국가양자조정실(NQCO) 홈페이지(www.quantum.gov)
- [4] 과학기술정보통신부, 2023 양자정보기술 백서, 2024.1.
- [5] Michael G.R-Christopher M, The US National Quantum Initiative, Quantum Sci. Technol. Vol.4 No.2, 2019

※ 출처: TTA 저널 제215호