

Nordic R&D Brief

- 1.
- 2.
- 3.
- 4.
- 5.

북유럽과학기술협력센터

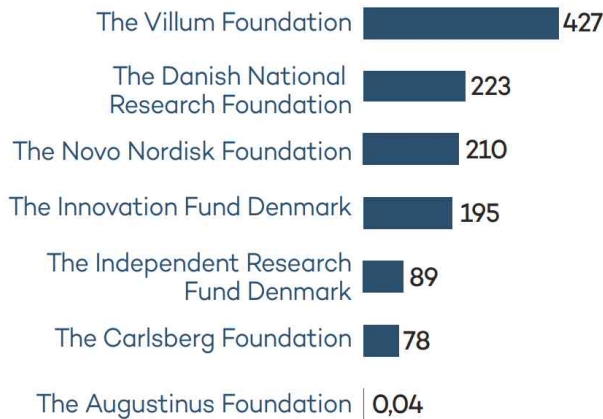
저자 박희웅 센터장(북유럽과학기술협력센터)

1. 개요

- 1922년 닐스 보어는 원자 이론과 양자 역학 연구로 노벨 물리학상을 수상하였으며, 이는 덴마크가 양자 연구 분야의 세계적 선두 국가로 입지를 다지는 계기가 됨
 - 이러한 유산으로 닐스보어 연구소를 보유한 코펜하겐대학교, 양자 분야 우수 센터를 보유하고 있는 덴마크 공과대학은 덴마크 양자기술 연구의 핵심 기관임
- 그간 덴마크는 민간 및 공공 연구기금*을 통해 양자 연구 및 관련 인프라에 상당한 투자를 진행해 왔으며, 2014~2020년까지 약 12억 DKK(약 2,380억원)가 양자 연구에 투자됨¹⁾

* 빌룸 재단(Villum Foundation), DNRF(덴마크 연구재단), 노보노디스크(Novo Nordisk) 재단, 덴마크혁신기금(The Innovation Fund Denmark), 덴마크 독립연구기금(The Independent Research Fund Denmark) 등

From foundations, 2014-2021, million DKK



〈그림 1〉 주요 재단별 양자기술 분야에서의 연구지원 규모(2014~2021)

- 2020년대 이후, 민간 부문(Novo Nordisk 재단)에서의 양자 기술 연구에 장기적 투자, 양자 분야의 해외기업 투자 및 유치에 이어 정부의 양자전략 수립 등 연구 및 혁신과 상용화에 이르는 양자생태계 구축을 강화하고 있음

1) Strategy for Quantum Technology, 2023, Ministry of Higher Education and Science

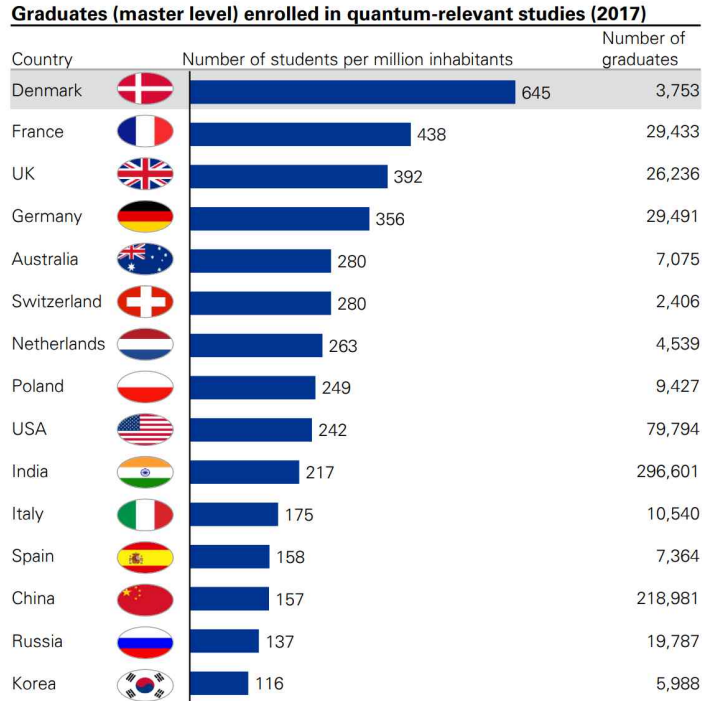
- 덴마크의 노보 노디스크 재단은 '22년에 2034년까지 범용 양자 컴퓨터 완성을 목표로 15억 DKK를 투자함(닐스보어 연구소)
- 덴마크 수출 및 투자기금(EIFO)은 2024.6월, 미국에 본사를 둔 Atom Computing*사에 70백만DKK(약 138억원)을 투자하고 양자기술 사업화를 촉진하고자 함. 이에 맞춰 Atom Computing은 유럽본부를 덴마크에 설립할 예정임²⁾
 - * Atom Computing: 2018년 미국 캘리포니아에서 설립된 양자컴퓨팅 선도기업으로 평가받고 있으며, 2023년 1,000큐비트 초과하는 새로운 양자 컴퓨터를 발표함
- 민간 및 공공부문의 기금을 통한 투자 외, 글로벌 기업 및 기관과 덴마크 주요 양자 기술 연구기관과의 협력 체계도 구축
 - 마이크로소프트(MS)는 이미 2017년 코펜하겐대(닐스보어연구소)에 Microsoft Quantum Lab Copenhagen을 설립하여 협력관계를 구축함. 또한 2019년에는 덴마크공대(DTU)와 협력, 양자 재료 연구소(Microsoft Quantum Materials Lab)을 설립함³⁾
 - 또한 KPMG는 2023년 덴마크 코펜하겐에 글로벌 양자 기술 허브를 설립함. 이를 통해 제2의 양자 혁명의 주요 세 가지 영역인 양자 센서를 사용한 초정밀 측정, 양자 컴퓨터의 계산 속도 향상, 그리고 양자 암호화를 통한 사이버 보안 개선에 중점⁴⁾
 - 2022년에는 양자기술의 개발 및 상업화를 지원하는 양자기술 개발센터 NATO DIANA Quantum Center(DIANAQ)를 운영하고 있음
- 이러한 민간 및 공공부문의 노력에 맞춰, 정부는 지난 2023년 국가 양자기술 전략(National Strategy for Quantum Technology – Part I & II)을 발표함. 여기서 덴마크 정부는 연구 및 혁신에 4년간 10억DKK, 상용화 분야에 2억DKK를 투자하기로 함
- 덴마크 정부는 미국 등 양자기술 선진국과의 연구협력 확대 및 교류 촉진 등 협력을 강화하고 있으며(4. 국제협력 동향 참조), 인구 100만명당 양자관련 졸업생(Master level) 수는 전세계에서 가장 높은 수준으로 양자 분야 고급 인력 배출 또한 높은 수준임⁵⁾

2) <https://www.eifo.dk/en/knowledge/news/eifo-invests-in-more-quantum-technology/>

3) <https://nbi.ku.dk/english/industrial-collaboration-at-nbi/cases/microsoft-quantum-lab-copenhagen/>

4) <https://kpmg.com/dk/en/home/insights/2020/04/quantum-hub-at-kpmg-denmark.html>

5) <https://assets.kpmg.com/content/dam/kpmg/dk/pdf/dk-2020/11/Quantum-technology-in-Denmark.pdf>



〈그림 2〉 Graduates(master level) enrolled in quantum-relevant studies(2017)

2. 양자 기술 정책

□ 양자기술 전략(Part I – World Class Research and Innovation)

- 덴마크 정부의 양자기술 전략 Part-I은 연구 및 혁신에 초점을 두고, 양자기술의 장기적인 잠재력을 최대한 활용하여 글로벌 최고 수준의 연구와 혁신을 통한 국제적인 위상을 강화하는데 목표를 두고 있음
- Part-I에서는 3개의 중점 영역(Key Focus area)과 9개의 이니셔티브를 제시하고 있음. 이를 위해, 정부는 2023-2027(4년간) 기간동안 10억 DKK(약 1,980억원)을 투자하여, 세계에서 가장 선도적인 양자 연구 환경을 구축하고, 연구 결과를 새로운 실용적 기술로 효과적으로 전환할 수 있는 능력을 갖추는 것을 목표로 함

① (Area 1) 1연구 및 혁신에 대한 장기적이고 전략적인 투자(Long term and strategic investments in research and innovation)

① 새로운 연구 및 혁신 전략 프로그램

- 덴마크의 연구 환경을 세계적 수준으로 유지하고, 양자 기술을 실용적인 기술로 전환하는 데 필요한 혁신을 지원

- 초기 연구 단계부터 응용 및 상업화 단계에 이르기까지 연구와 혁신의 전 과정을 포괄하며, 2030년까지 장기적으로 진행
- 정부는 '23년에만 덴마크혁신기금(IFD)을 통해 150백만 DKK를 할당함

② 국가 양자 기술 포럼 설립

- 주요 이해관계자(연구기관, 공공 및 민간 재단, 스타트업, 기업 등)로 구성된 포럼을 통해 우선순위, 도전 과제, 요구 사항 등을 논의

③ 양자 분야의 혁신 강화

- 연구 및 혁신 프로젝트를 통한 양자기술의 잠재성을 기업에도 확산
- 덴마크교육연구청(Danish Agency for Education and Research)은 이미 GTS 기관(Research and Technology Organization)의 시범 프로젝트를 승인하여 양자 기술 지식 축적 지원함
- 중소기업이 양자 연구의 잠재력을 이해하고 활용할 수 있도록 지원 강화

② 덴마크의 이익을 위한 국제 협력 강화(International Cooperation on Research and Innovation for the Benefit of Denmark)

① EU 협력 및 EU 연구 자금 확보 강화

- Horizon Europe(2021-2027) 프로그램 내에서 양자 기술 프로젝트에 주도적으로 참여할 수 있도록 지원
- ※ EU의 연구 및 혁신 프레임워크 프로그램을 통해 2014-2020년 동안 덴마크는 양자 연구에 약 5억 DKK의 연구 자금 확보
- ※ EU는 2018년 유럽이 글로벌 리더십 확보를 위해 Quantum Flagship 프로그램을 착수하고, Horizon Europe 내 2021-2022년 동안 양자 기술 분야에 약 20억DKK 할당
- (EuroQCI 프로젝트) EuroQCI 프로젝트 자금으로 1,200만DKK를 2023년에 할당함. 이를 통해 덴마크 대학과 국가 기관 간의 협력을 통해 양자 통신을 위한 실험적 네트워크를 구축 추진
- (양자 분야에서의 덴마크 이익 보호 강화) 호라이즌 유럽의 프로그램 내 관련 제안서 홍보, 파트너십 구축 촉진, 제안서 제출 과정 자문 활동 강화

② 덴마크의 이익과 리스크에 중점을 둔 글로벌 협력

- 전략적 양자(Quantum) 프로그램을 통해 국제적 연구협력을 지원하고, 강력한 국제적 네트워크 구축 및 참여를 촉진함
- EUREKA 등의 프로그램을 통한 덴마크 연구자와 기업의 글로벌 협력 구축
- 덴마크 혁신 센터(ICDK)를 통해 양자기술 분야에서의 국제협력에 대한 지침과 정보를 강화하고 파트너십 구축 추진

③ 유럽 우주 협력에서의 양자 기술 중점화

- 유럽우주국(ESA)의 지구관측 및 우주통신 프로그램과 같은 분야에 양자기술을 우선적으로 참여 추진

※ EU는 미래 지구 관측 위성에 양자 기술을 장착 가능성 탐색 이니셔티브 시작

- EruoQCI*와 같은 EU 우주 부분의 프로그램 참여 적극 지원

* European Quantum Communication Infrastructure의 약자로, 때가 주도하는 양자 통신 인프라 구축 프로젝트로 양자 기술을 활용, 유럽 전역에 안전하고 신뢰할 수 있는 통신 네트워크 구축 목표

③ 디지털 연구 인프라 접근성 개선(Improved Access to Digital Research Infrastructure)

① 양자 컴퓨터에 대한 접근성 강화

- 덴마크 e-인프라 협력(DeiC)을 통해 양자 컴퓨터 및 슈퍼컴퓨터(HPC) 시설에 대한 접근성 제고하고, 이를 위해 정부와 덴마크 의회는 2023년 연구 예비비 협정을 통해 5천만 DKK를 할당
- 장기적으로, 덴마크가 국제협력을 통해 덴마크 내 슈퍼컴퓨터 시설에 가속기 컴포넌트로서 양자 컴퓨터를 구축하고 운영

② 국가적 역량 구축 노력 강화

- DeiC를 통한 국가적 역량 구축과, 덴마크의 지식 및 비즈니스 클러스터, 지역 비즈니스 허브("Erhvervshusene"), 연구 및 기술 조직(GTS 기관) 등 관련 주체들과 전략적 파트너십 체결
- EU의 역량 구축 활동과 연계하여 진행하고, 슈퍼컴퓨터 분야에서의 EU 협력(EuroHPC)은 연구자와 기업이 역량을 키울 수 있는 틀을 제공

③ 양자 알고리즘 개발 및 테스트를 위한 양자 우수 센터

- 미래 양자 컴퓨터와 양자 시뮬레이터를 위한 차세대 알고리즘 및 소프트웨어 개발
- 덴마크 e-인프라 협력(DeiC)하에 유럽 양자 소프트웨어 및 알고리즘 우수 센터를 유치하여, 양자 소프트웨어 및 양자 알고리즘에 대한 국제적 수준의 연구개발 수행

□ 양자기술 전략(Part II – Commercialization, International Cooperation)

- Part-II에서는 3개의 우선 조치(Priorit Action)와 11개의 이니셔티브를 제시하고 있음. 이 전략에서 정부는 양자기술 상용화, 보안 및 국제협력 분야에 2023-2027(4년간) 동안 2억DKK (약 396억원)을 투자하기로 함

① (Priority Action 1) Commercializing Quantum Technology(양자기술 상용화)

① 덴마크 양자 하우스(Quantum House Denmark, QHD)

- 양자 기술 이해관계자에게 테스트 및 측정 장비, 비즈니스 개발 지원 등 환경을 조성하고 지식 네트워크를 구축하기 위한 물리적 허브 설립
- 이를 통해 DTU, KU, DIANA, 덴마크 양자 커뮤니티 등 기존 이해관계자의 교류를 촉진하고 스타트업과 기업들로 구성된 양자 산업 발전의 물리적 틀을 제공
- QHD 관련, 정부는 노보 노디스크 재단(Novo Nordisk Foundation)과 협력하여 연구와 혁신뿐만 아니라 스타트업과 대학 스핀아웃 기업 등 소규모 기업의 요구를 반영하는 국가 테스트 센터를 설립 추진

〈참고〉 Quantum House Denmark(QHD)

- 국가 양자 기술 전략-Part 2에 따라, 양자 기술의 상업화를 촉진하고, 연구성과를 실제 산업에 적용하기 위한 물리적 허브 전략으로 '덴마크 양자 하우스(Quantum House Denmark)를 코펜하겐대에 설립 추진
- 전략에 따르면 정부는 '23~'27년간 총 63백만DKK(한화 약 125억원)를 투자할 예정인데, 2023년 코펜하겐대는 QHD 설립을 위해 10백만DKK를 투자하기로 함⁶⁾
- ※ 코펜하겐대는 QHD 설립을 위해 닐스보어연구소의 구건물을 QHD로 전환

6) https://news.ku.dk/all_news/2023/09/dkk-10-million-for-new-quantum-businesses/

② 양자펀드 설립

- 덴마크 수출 및 투자펀드(EIFO)내 유럽 양자 펀드(European Quantum Fund) 설립 추진
- 양자 펀드는 QHD의 활동을 지원하고, BioInnovation Institute의 Deep Tech Laboratory-Quantum과 같은 이니셔티브와 연계

③ 시연을 통한 양자 활성화(Activate the Danish strongholds in quantum technology through use cases and demonstration projects)

- 양자 기술의 상업적 성공을 위한 시연 프로젝트와 사용 사례 개발을 촉진하고, Quantum House Denmark와 국가 테스트 센터를 통해 양자 기술을 연구하고 테스트할 수 있는 환경을 조성

④ 양자기술 인재 양성(More quantum talent in Denmark)

- 고등교육 기관에 새로운 양자 과학 관련 교육 프로그램 개발을 위한 기금 마련
- 주요 이해관계자들이 참여하는 'National Forum on Quantum Technology' (양자기술을 위한 국가 포럼)을 통해 연구 상업화 및 에코시스템 개선
- 양자 과학에 재능이 있는 학생들을 위한 국제 여름학교 설립

⑤ 양자 기술을 위한 국가 포럼 (National Forum on Quantum Technology)-전략 Part-1에 따른 이니셔티브

- 주요 이해관계자 간의 협력을 바탕으로 국가 차원의 포괄적인 접근 방식을 촉진하기 위한 국가 포럼 마련(에코시스템 개선과 연구상용화 등 논의)

② (Priority Action 2) Security as a Foundation for Quantum Technological Development(양자기술 보안 강화)

⑥ 양자기술로 부터의 위협 대비한 핵심 디지털 인프라 강화(Strengthen Denmark's critical digital infrastructure against the threats from quantum technologies)

- 양자 컴퓨터와 같은 새로운 위협에 대비하여 핵심 디지털 인프라를 강화하기 위해 사무국을 설립하고 전문가 그룹의 지원을 받아 보안 지침과 권고안을 마련하며, 기업 및 연구기관과 협력해 사이버 보안 강화

⑦ 양자 사회 보안강화(Increased security in the Danish quantum society)

- 덴마크 양자 기술 개발자들이 보안을 전략적 우선순위로 삼고, 보안 정책이 중요한 책임임을 인식하도록 함

⑧ 양자 기술의 효과적인 규제와 보호(Effective regulation and protection of quantum technology)

- 양자 기술의 악용을 방지하기 위해 관련 기술에 대한 규제와 보호를 강화
- 이를 위해, 수출 통제와 외국인 투자 심사가, 기업들이 규제 여부를 쉽게 확인할 수 있도록 유연하고 효율적인 절차 마련

○ (Priority Action 3) Advancing Danish Quantum Interests Internationally
(덴마크 양자 기술 이익 증진)

⑨ 유럽에서 양자 기술 개발 선도(Denmark in a leading role in the development of quantum technology in Europe)

- 유럽에서의 양자 기술 선도를 위해 유럽 국가들과 협력을 강화하고, EU 이니셔티브에 적극적 참여를 통해 글로벌 경쟁력 제고, 규제 완화, 자금 및 인프라 확보 등 덴마크 이익 보호

⑩ 국제 양자 허브로 덴마크의 전략적 양자 파트너십 강화(International quantum hub will strengthen Denmark's strategic quantum partnerships)

- 국제 양자 허브(International Quantum Hub)를 설립하여 양자 기술 분야에서 전략적 국제 파트너십을 강화하고, 덴마크의 양자 생태계를 글로벌 수준으로 발전

* (예) 덴-미국간 Quantum declaration('22)과 '23년 덴-영국간 협력 선언

⑪ 양자 분야에서 국제 표준화(Danish footprint in international standardisation in the quantum field)

- 유럽 양자 사무국 주도로 유럽의 양자 기술 표준 개발에서 중요한 역할을 하고, 양자기술 표준화 활동을 전략적으로 추진

3. 주요 기관 및 이니셔티브

- 덴마크의 양자연구는 대부분 코펜하겐대학교(KU), 덴마크공대(DTU), 아르후스대학교(AU, Aarhus University)에서 수행되고 있음
- 다음은 코펜하겐대의 닐스 보어 연구소, 덴마크공대의 양자 센터와 양자관련 단체를 소개함

3-1. 코펜하겐대학교 Niels Bohr Institute(NBI, 닐스 보어 연구소)⁷⁾

□ 개요

- 덴마크 코펜하겐대학교에 위치한 세계적인 물리학 연구소로, 1921년 덴마크의 물리학자 닐스 보어 교수에 의해 설립(1921.3)
- 현재 430명의 연구자, 100명의 행정 및 기술직원, 140명의 박사과정이 소속되어 있으며, 천체물리학, 양자물리학, 입자물리학, 고체물리학 등 폭넓은 물리학을 다룸

□ 주요 연구분야

- NBI는 양자물리, 입자물리학 등 양자기술 관련 분야 외 천문학, 지구물리학, 나노물리학, 물물리학 등 다양한 분야에서 가장 작은 아원자 입자부터 별과 행성, 감마선, 그리고 우주의 먼 은하에 이르기까지 다양한 주제를 탐구
- 이 중 양자 기술 연구그룹(양자 광학 및 광자학, 응축물질 물리학)의 주요 연구 분야는 다음과 같음

① Quantum Optics and Photonics

- QUANTOP(Quantum Optics Center) : 닐스보어연구소에서 2001년에 설립된 Quantop은 덴마크 국립연구재단(DNRF)의 "탁월성 센터(Center of Excellence)"로 시작했으며, 빛과 물질의 경계에서 양자 효과를 탐구하는 연구에 중점을 두고 있음. 빛과 물질의 중첩 상태 및 얽힘 상태를 기반으로 한 미래의 양자 기술 개발을 목표로 함
- Hy-Q(Center for Hybrid Quantum Networks) : DNRF의 탁월성 센터로, 양자 광자학, 이론 양자 광학, 양자 광기계학, 이론 그룹 등 4개 그룹으로 구성
- Solid-Q(Solid-state quantum simulators for biochemistry) : 노보 노디스크 재단으로부터 기금을 받고 있는 공동연구 컨소시엄으로, 양자 우위를 활용하여 약물 발견에 중요한 단백질 접힘 문제를 시뮬레이션에 궁극적 목표를 둠

7) <https://nbi.ku.dk/english/>

- Theoretical Quantum Optics (이론 양자 광학): DNRFG가 지원하는 하이브리드 양자 네트워크 센터(Hy-Q)의 일원이며, 이론 양자 광학의 다양한 주제를 다루며, 특히 양자 정보 처리를 실현하는 방법에 중점을 둠
- 그 외, Quantum Metrology (양자 측정학), Quantum Photonics (양자 광학), Quantum Optomechanics 그룹이 있음

② **Condensed Matter Physics**: 자연적으로 발생하는 물질과 인공적으로 생성된 고체와 액체의 물리적 특성을 이해하는 데 중점을 둔 물리학으로 나노, 양자 정보 등의 분야와 다학제적 연구가 이루어 지고 있음. 연구 분야 중 양자 관련 프로그램은 다음과 같음⁸⁾

- **Q-MAT(Magnetism and Quantum Materials)**: Q-MAT는 자기 및 초전도 물질을 포함한 양자 물질을 다루는 연구 프로젝트로, NUFF(Nationalt Udvalg for Forskningsinfrastruktur (National Committee for Research Infrastructure)에서 자금을 지원하고 있으며, 6개의 덴마크 대학의 10개 연구소가 협력(20.12~25.10)
- **The Novo Nordisk Foundation Quantum Computing Programme**: 결합 내성 양자 컴퓨팅 하드웨어와 생명과학 관련 화학 및 생물학적 문제를 다루는 양자 알고리즘의 개발(23~35)(※3-5의 주요 기관 현황에서 부연)
- **Center for Quantum Devices(QDev)**: 고체 상태 큐비트, 스핀 큐비트 및 양자점 회로, 양자 재료, 위상학적 양자 시스템, 등의 분야를 연구하고 있음. 특히, 초전도 큐비트는 양자 컴퓨터 개발의 주요 방법 중 하나로, 최근 50-100개의 큐비트 시스템이 시연됨

□ 덴마크 최대 양자컴퓨터 구축

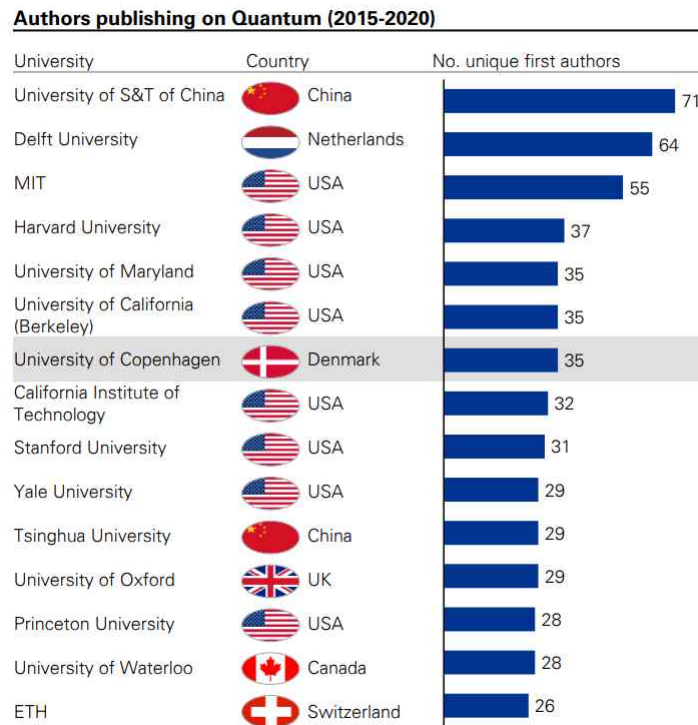
- 덴마크 혁신기금(Innovation Fund Denmark)은 닐스보어 연구소에 덴마크 최대 개방형 25큐비트 양자컴퓨터 구축을 지원하기 위해 3,960만DKK를 투자함. 이 프로젝트의 총 예산은 5년 간 5,320만DKK(약 104억원)임⁹⁾(2023.10)
- 이 프로젝트는 닐스보어 연구소에 초전도 양자 컴퓨터를 구축하는 것으로 NBI의 'Superconducting Quantum Information Device Lab'과 코펜하겐대학교 수학부의 'Quantum Theory Center (QMATH)', 그리고 오르후스 대학교와 협력하여 개발

8) <https://nbi.ku.dk/english/research/condensed-matter-physics/>

9) <https://innovationsfonden.dk/en/news/one-europes-largest-open-quantum>

□ 기타

- 코펜하겐대학교는 닐스보어 연구소를 기반으로 하여 대형 저널에 논문을 게재하는 저자 수, 논문 수 및 인용 횟수 측면에서 높은 평가를 받고 있음¹⁰⁾



〈그림 4〉 양자 분야 독창적 저자 수 비교

3-2. 덴마크 공대 양자기술센터(Quantum DTU(Center for Quantum Technologies))¹¹⁾

- Quantum DTU는 덴마크 공과대학교(DTU) 내의 여러 연구그룹, 연구소, 센터를 연결하는 중심 허브로, 양자 기술에 관한 연구와 혁신을 지원
 - 센서, 통신, 컴퓨터, 시뮬레이터 등 다양한 분야에서 양자 기술의 핵심 연구
- 덴마크공대는 양자컴퓨팅 등 세가지 영역에 중점을 두고 있으며, 각각 덴마크 국립 연구재단(DNRF)의 우수연구센터(Center of Excellence) 프로그램을 통한 연구 센터를 운영¹²⁾

10) <https://assets.kpmg.com/content/dam/kpmg/dk/pdf/dk-2020/11/Quantum-technology-in-Denmark.pdf>

11) <https://quantum.dtu.dk/en/>

12) <https://quantum.dtu.dk/en/#research>

① 양자 컴퓨팅

- DTU의 두 연구 센터(bigQ와 NanoPhoton)을 통해 주로 광자 기반 양자 컴퓨팅 하드웨어 개발에 중점

〈참고〉 BigQ(거시적 양자 상태 센터(Center for Macroscopic Quantum States))

- 덴마크 국립연구재단(DNRF)의 우수 연구 센터로 2018.1월 설립
 - 주요 목표는 광학 및 기계 시스템의 거시적 양자 상태를 생성, 제어, 탐지하고 양자 우월성을 입증
 - 덴마크공대 물리학부 QPIT섹션(Quantum Physics and Information Technology)와 협력

〈참고〉 NanoPhoton(Center for Nanophotonics)

- 덴마크 국립연구재단(DNRF)의 우수 연구 센터로 2020.4월 설립
 - 주요 목표는 빛-물질 상호작용을 활용, 칩 스케일 정보기술 관련 문제 해결
 - 양자광학 이론과 나노 기술을 결합한 새로운 광학 나노 구조 연구

② 양자 통신

- bigQ, NanoPhoton 외 SPOC 등 세 연구센터를 중심으로 양자 통신 장치를 연구하고 있으며, bigQ와 SPOC는 각각 연속 변수 및 이산 변수 양자 정보 관련, NanoPhoton은 양자점에서 발생하는 식별 불가능한 단일 광자의 방출을 포함한 빛-물질 상호작용을 중점적으로 연구

〈참고〉 SPOC(Center for Silicon Photonics for Optical Communication)

- 덴마크 국립연구재단(DNRF)의 우수 연구 센터로 2014년 설립
 - 미래의 광통신 인프라를 다루며, 다학문적 접근 방식을 통해 통신 시스템의 주요 과제인 에너지 소비와 잠재적 용량 문제를 해결하는 것을 목표로 함
 - 덴마크공대 Fotonik에서 운영

③ 양자 센싱

- DTU 물리학과 소속의 bigQ, 코펜하겐 생의학 양자센싱센터(Copenhagen Center for Biomedical Quantum Sensing) 중심으로 근육의 생물학적 신호를 연구하는 양자 센싱 중점

3-3. Danish Quantum Community¹³⁾

- 경제적 양자 기술의 실현을 위한 강력한 덴마크 양자 생태계를 구축하는 것을 비전으로 덴마크 전역의 모든 양자 이해 관계자-연구기관, 스타트업, 기업 등-를 연결하고 양자 기술 생태계를 활성화하기 위해 설립(2021년)
 - Novo Nordisk 재단으로부터 3년간 3,989천DKK(약7.9억원)의 지원을 받았으며, 2023년 기준 지출금액은 약 650천DKK임
- 덴마크 대학, 양자 스타트업, 투자자 등의 대표들이 참여하고 있으며 양자 생태계의 모든 부분에서 50개 이상의 파트너가 참여

3-4. Deep Tech Lab-Quantum¹⁴⁾

- Deep Tech Laboratory-Quantum은 코펜하겐에 위치한 BII*의 새로운 이니셔티브로, 양자 기술 분야의 혁신을 주도하며, 초기 단계의 스타트업을 지원
 - 덴마크의 세계적인 양자 물리학 연구와 BII의 생명 과학 분야에서 스타트업과 스피나아웃 회사를 창출하고 육성한 경험을 결합하여 양자 기술 발전 목표
 - NATO's DIANA Challenge Program, BII Venture Lab Program, Residence 프로그램 등을 통해 양자 스타트업들과 협력

* BII는 코펜하겐에 본사를 둔 비영리 재단으로 2018년에 설립됨. 생명과학, 헬스케어 분야 초기 단계 연구 및 스타트업 지원

3-5. The Novo Nordisk Foundation Quantum Program(NQCP)¹⁵⁾

- NQCP는 노보 노디스크 재단으로부터 '22년부터 12년간 15억 DKK(한화 약 2,970억원)을 지원받아, 코펜하겐대 닐스보어 연구소에서 2034년까지 범용 양자 컴퓨터를 완성하는 것으로 목표로 함¹⁶⁾
 - 단계별 진행을 통해 첫 7년 동안 재료와 하드웨어 개발과 동시에 최선의 양자 플랫폼을 선정(양자 알고리즘과 관련된 큐비트 플랫폼을 결정)하고, 이 과정에서 생명 과학 연구자들과 협력하여 기술 개발
 - 마지막 5년은 기존 컴퓨터로 해결 할 수 없는 생명과학 문제를 해결하는 양자

13) <https://dqg.dk/about/>

14) <https://deeptechlab.bii.dk/>

15) <https://nqcp.ku.dk/>

16) <https://novonordiskfonden.dk/en/projects/novo-nordisk-foundation-quantum-computing-programme/>

컴퓨터 개발에 중점



〈그림 3〉 NQCP 로드맵

3-6. NATO DIANA Quantum Center(DIANAQ)¹⁷⁾

- NATO가 주도하는 방위혁신 가속기(Defence Innovation Accelerator for the North Atlantic (DIANA)) 프로그램의 일환으로 2022년 코펜하겐대학교에 설립
 - DIANA는 테스트 센터와 가속기 사이트를 설립해 스타트업들이 개발하는 기술을 군대와 동맹의 지식, 역량, 능력에 기여하도록 돕는 것을 목표
 - DIANAQ는 양자 가속기(Quantum Accelerator)* 사이트와 덴마크에 위치한 네 개의 양자 테스트 및 제조 사이트**로 구성
- * 양자 가속기는 Deep Tech Lab에서 운영하며, 양자 및 양자 관련 기술에 중점을 둔 초기 단계 회사들의 발전을 지원(상업 및 방위시장에서의 진입 성공을 위한 교육, 특허 상담 등)
- ** 물리적 실험실과 테스트 시설을 갖추고 있어 양자 센서, 양자 암호화 장치, 양자 컴퓨터를 포함한 혁신적 아이디어를 개발하고 테스트하는 곳으로 코펜하겐대 닐스보어연구소, 덴마크 공대 나노랩, 덴마크 국립측정연구소(The Danish National Metrology (DFM)), 오르 후스대학교 레이저랩(LaserLab at Aarhus University (AU))) 등 4곳에 위치함

4. 정부간 국제협력 동향

- 덴마크 정부는 미국 등 양자기술 선진국과의 협정 체결 등을 통해 연구협력 확대 및 교류 촉진, 인재 유치 및 교류 등을 위한 협력을 강화하고 있음
- 최근 덴마크(고등교육과학부)와 영국(과학,연구 및 혁신부)은 양자 기술과 연구협력을 강화하기 위한 MOU를 체결('24.5)함¹⁸⁾
 - 이번 MOU는 2023년 덴마크의 국가 양자기술 전략 수립 이후 체결된 것으로, MOU를 통해 양국은 다음 사항을 이행하기로 함

17) <https://dianaq.ku.dk/about-diana-nato-quantum-centre/>

18) <https://dqg.dk/denmark-and-uk-sign-mou-on-quantum-technology/>

- ① 핵심 양자기술에 대한 학술연구 협력 확대 및 지식 교류 촉진
 - ② 양자 인재 풀 확대를 위한 새로운 학술 프로그램 탐색
 - ③ NATO DIANA 프로그램의 지속적인 지원
 - ④ 투자 심사, 글로벌 공급망, 국제 거버넌스 및 연구 보안 분야에서 양자 생태계에 대한 논의 강화
 - ⑤ 연구인프라 공유 및 사례 개발, 자금 지원을 통한 양자 산업 지원
- 한편, 2022년 6월에는 미국과 양자 정보 과학 및 기술(QIST) 협력에 관한 덴마크-미국간 공동성명을 체결함. 이 성명은 양국의 QIST분야 공급망 강화, 산업 기반 확대, 미래 세대의 양자 인재를 교육하는 것을 목표로 하고 있음.¹⁹⁾
- 동 성명을 통해 덴-미 양국은 QIST 연구개발을 위한 생태계를 조성*하고, 상업적 및 사회적 영향을 위한 경로를 지원하는 것에 방점을 둠
- * (예) 워크숍 등을 통해 QIST 연구성과 공유 및 미래 협력 분야 발굴, QIST분야 교육 및 훈련, 연구개발을 위한 인프라와 데이터를 공유하고 협력 네트워크 구축 등²⁰⁾

5. 결론 및 제언

- 덴마크는 오랫동안 양자 연구 분야에서 전세계적 선두 국가로 자리 매김해 오고 있으며, 이제 덴마크는 연구개발을 넘어 상업화를 위한 잠재력을 발휘하고 있음
 - 덴마크의 양자 연구 두 개축은 코펜하겐대(닐스보어 연구소)와 덴마크공대(DTU) 양자기술센터(Quantum DTU)로, 마이크로소프트 등 글로벌 기업들은 연구협력 관계를 구축해 오고 있음
- 특히, 지난해 발표된 정부의 국가 양자 전략(연구+상용화)은 기존 양자연구 인프라와 커뮤니티를 기반으로 양자 연구 발전 및 양자 기술 상업화를 촉진할 것으로 기대됨
 - 이를 통해, 덴마크는 QHD(양자 하우스 덴마크)의 설립과 국가 양자 테스트 센터 구축을 추진하고 덴마크를 국제 양자 허브로 도약할 것으로 정부는 기대

¹⁹⁾

<https://www.quantum.gov/the-united-states-and-denmark-take-steps-to-strengthen-quantum-cooperation/>

²⁰⁾

<https://www.state.gov/joint-statement-of-the-united-states-of-america-and-denmark-on-cooperation-in-quantum-information-science-and-technology/>

- 이러한 정부의 전략 이전에 이미 민간 부문에서 Novo Nordisk 재단은 The Novo Nordisk Foundation Quantum Program을 통해 닐스보어연구소에 3천여 억 원 (15억DKK)를 투자하기로 하는 등 덴마크는 민간과 공공부문, 그리고 정부 모두 덴마크의 양자 생태계 확장, 양자 기술의 개발을 중점적으로 추진
- 덴마크는 2022년, 2024년 각각 미국, 영국과 양자기술 분야에서 연구 및 인력 교류 등을 위한 공동성명과 MOU를 체결하는 등, 양자 기술 분야의 선진국과도 적극적인 협력체계를 구축
- 한국 또한 양자기술, AI 반도체, 첨단바이오를 국가 3대 게임체인저 기술로 꼽았듯이 이러한 덴마크의 움직임에 맞추어 양자기술 분야의 협력 기회를 모색할 필요가 있음
 - 첫째, 지난 2023년 한-덴 과기공동위에서 제시된 양자기술 협력 방안 논의에서 한 단계 나아가, 정부 차원의 양자기술 관련 포괄적 협정 체결 추진이 필요함. 이를 기반으로 양국간 공동연구와 인력 교류, 양자기술 상용화 등에 대한 세부 프로그램을 개발하고, 기관간 MOU 등을 추진할 필요가 있음
 - 둘째, 양자 기술의 인재 양성을 위한 협력방안을 모색해야 함. 덴마크는 국가 전략에서 제시되었 듯, 양자기술 분야 학생들을 위한 국제 여름학교(Quantum Summer School)를 2025년부터 추진 예정임. 따라서, 한국 관련 기관도 덴마크의 국제 여름학교 참여, 자체 양자 스쿨 운영과 교류 등의 방안도 있을 수 있음
 - 셋째, 덴마크는 양자통신과 보안, 양자컴퓨팅, 양자 알고리즘, 양자 재료 및 양자센싱 등에서 강점을 보이고 있음.²¹⁾ 코펜하겐대 닐스보어연구소와 덴마크공대의 양자 연구 센터를 중심으로 관련 분야별 연구그룹과 센터를 보유하고 있으며, 이에 한국의 양자 기술 로드맵에 맞는 맞춤형 연구개발 협력 전략을 수립하고 대응해야 함
 - 마지막으로, 북유럽과학기술협력센터의 연구자 교류 워크숍 등을 통해 연구자 네트워킹 구축, 공동연구 발굴 등의 협력을 촉진하고, 이를 기반으로 Horizon Europe 플랫폼 공동연구 참여 확대 등을 모색할 필요가 있음

21) <https://investindk.com/quantum>