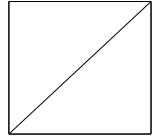


공 개



의안번호	제 1 호
제 출 연 월 일	2021. 4. 30. (제 17 회)

디지털을 넘어 퀀텀 시대를 준비하는  
양자 기술 연구개발 투자전략(안)

과학기술관계장관회의

제 출 자	과학기술정보통신부장관 최기영
제출 연월일	2021. 4. 30.



# 양자 기술 연구개발 투자전략(안) [요약]

## 1. 추진배경

- 양자 고유의 특성(얽힘, 중첩 등)을 활용한 차세대 혁신기술로 전체 산업 생태계의 판도를 바꿔놓을 것으로 전망

- 슈퍼컴퓨터로 1만년 걸릴 문제를 양자컴퓨터는 200초에 해결(양자우위)

※ 기하급수적으로 증가하는 데이터를 고전 컴퓨터로 처리하는데 한계에 직면(“무어 법칙” 한계)



- 양자 기술은 AI, 5G 등과 함께 미중 기술패권 경쟁의 중심에 있으며, 선도국들은 앞다퉀 전략과 투자계획을 발표\*하고 지원 중

\* 미국('08년 국가양자정보과학비전/18년 국가양자정보과학전략), 일본('20년 양자혁신전략), EU('16년 양자성명서), 영국('15년 국가양자전략) 등

☞ 미래 성장 가능성이 높으나 기술적 난이도가 높고 산업 기반이 없는 초기 기술로, 특히 최근 글로벌 기술 블록화에 따라 정부 주도의 선제적 대응 필요

※ 보안 강화(양자암호통신)와 암호체계 무력화(양자컴퓨팅)라는 양면성으로 전략 기술로 분류, 수출입 통제 강화

## 2. 기술산업 동향

- **(양자컴퓨팅)** '30년대 후반경 본격 상용화가 예상되는 가운데 그 이전부터 중간단계로 現수준의 양자컴퓨팅 기술을 최적화하여 활용 전망

- 구글, IBM 등 글로벌 IT기업을 중심으로 본격적으로 기술개발 진행 중

※ (구글) '양자우위' 입증('19.10), (IBM) 전세계 100여개 기관이 참여하는 IBMQ네트워크를 구성, 시범 서비스 제공

- **(양자통신)** 현재 유선암호통신은 초기 상용화 단계, 무선암호통신은 아직 초기 개발단계로 장차 정보를 양자상태 전송하는 양자인터넷으로 발전 전망('30~)

- 양자암호통신 시범 서비스 및 개발 장비 위주의 초기 시장이 형성 중

※ (퀀텀 익스체인지) 美 워싱턴-뉴욕뉴저지간 약 1,000km에 양자암호통신 시범 서비스 제공

- **(양자센서)** 기존 센서를 뛰어넘는 민감도/분해능에 대해 실험실 수준에서 가능성을 입증하고, 실제 활용이 가능하도록 소형화, 저전력소모 등 최적화 연구 진행 중

※ (록히드 마틴) 양자자기장 센서를 활용, 전파방해에 영향 받지 않는 항법시스템을 개발 중

### 3. 해외 현황

- **(미국)** 세계 최초로 「양자법(National Quantum Initiative Act)」 제정('18.12), 조직화된 지원체계를 구축\*하고 전방위적으로 종합 지원('19~'23 1.4조원)
  - \* 백악관 직속 국가양자조정실(NQCO), 국가과학기술위원회 산하 양자정보과학소위원회 신설 등
  - ※ 미국 안보 우위를 위한 20대 핵심유망기술로 “양자정보과학” 선정(美 NSC, '20.10)
- **(중국)** 국립양자과학연구소 설립(13조원, '17년~)을 추진 중이며, 최초 양자암호 통신위성(묵자호)을 발사하여 위성양자통신 기술 구현('16)
  - \* 중국 정부는 연간 1,700억원 규모의 투자계획을 발표하였고, '18년 미국 대비 2배의 특허 출원
- **(EU)** '16년 “양자 선언문(Quantum Manifesto)”을 통해 개발 로드맵을 발표하고, '18.10월부터 “양자 플래그십 프로젝트”를 통해 10억 유로를 지원 중

### 4. 우리의 현황 및 문제점

- **(낮은 기술수준)** 최선도국 대비 약 81% 수준으로 국내 ICT 기술내 최하위 수준
  - ※ 양자 기술 평균 81.3% (양자센서 84.7%, 양자통신 84.5%, 양자컴퓨팅 71.8%)
  - 우리나라 ICT 기술 평균 87.4% (이동통신 97.8%, 인공지능 87.4%) ('19년 ICT 기술수준조사)
- **(인력양성체계 미흡)** 국내 핵심연구인력은 약 150명 내외로 추산 높은 학문적 난이도와 산업 미형성으로 국내외 인재 유입이 낮은 상황
- **(특화 인프라 미비)** 국내 양자 특화 소자 제작 인프라가 미비하고 알고리즘 및 SW개발을 위한 양자컴퓨팅 서비스는 해외(IBM 등)에 의존
- **(투자 및 전략성 부족)** '19년을 이후 정부 R&D 투자가 증가\*하고 있으나 선도국 대비 규모도 작고, 투자 전략성도 부재
  - \* ('14) 127억원 → ('16) 284억원 → ('19) 636억원 (연평균 美 2,600억원, 中 1,700억원~1조원)

#### 시 사 점

- ◆ 양자기술은 미래 기술 패권을 정할 게임체인저 기술로 세계 각국과 글로벌 기업들이 각축전을 벌이고 있어 우리도 시급한 대책 마련이 필요한 상황
  - ⇒ 그러나, 본격 사업화 이전으로 추격의 기회는 열려 있으므로 우리에게 강점이 있는 ICT 인프라 및 역량을 바탕으로 민관이 함께 신속히 대응 필요

## 5. 비전 및 추진전략

<b>비전</b>	<b>디지털을 넘어 퀀텀의 시대로</b> <i>- From Digital to Quantum -</i>		
<b>목표</b>	<b>2030년대 양자 기술 4대 강국 진입</b> <i>- 초 산업 혁신 촉진 및 국가 안보 강화 -</i>		
<b>단계별 목표</b>	<b>Phase I (2021~2024)</b>	<b>Phase II (2025~2030)</b>	<b>Phase III (2031~2035)</b>
	<b>인력 양성, 요소 기술 개발 등 기반 마련</b>	<b>학문적·산업적 활용 가능성(성공사례) 입증</b>	<b>양자기술 상용화 본격 추진</b>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 50큐비트급 양자프로세서 확보</li> <li>• 초소형 유선양자암호통신 확보</li> <li>• 요소기술(공간해상도, 정밀도 등) 고도화, 소형화</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• NISQ 양자컴퓨팅시스템 확보</li> <li>• 초고속·정밀 무선양자암호통신(양자 드론·항공기) 확보</li> <li>• 양자센서 산업(반도체, 의료) 활용</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 오류정정 범용양자컴퓨터 확보</li> <li>• 양자인터넷 기술 확보</li> <li>• 양자센서 응용영역 확대(초장거리 방위경, 양자현미경 등)</li> </ul>

## 6. 중점 추진과제

### ① 도전적 원천연구 강화

#### ◆ 기존 컴퓨팅의 한계를 뛰어넘는 초고속 양자컴퓨팅 기술 개발

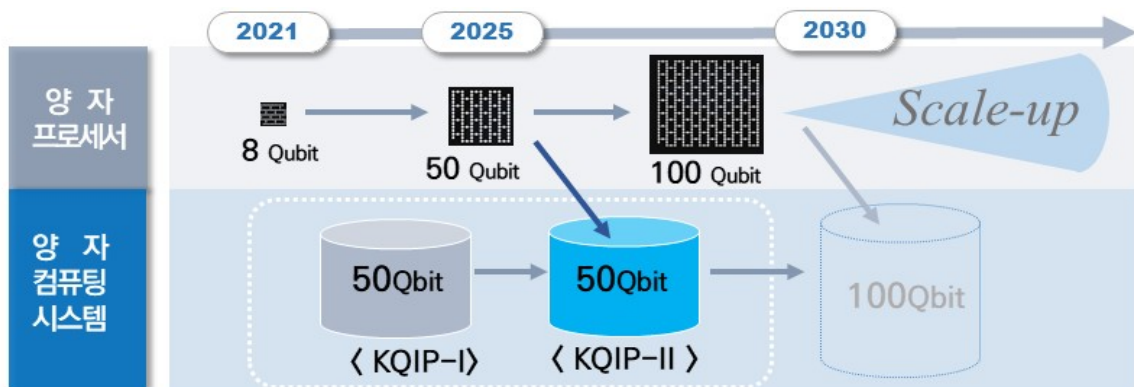
- **(범용 양자컴퓨팅 기술)** '30년대 후반 범용 양자컴퓨터 상용화에 대비하여 핵심요소기술(양자 프로세서\*, 오류보정, 알고리즘, 응용 SW 등) 중점 지원

\* 양자 프로세서 : '21년 8큐비트 → ~'24년 50큐비트 → ~'28년 100큐비트

- **(양자컴퓨팅시스템)** 한국형 양자컴퓨팅 시스템(KQIP\*)을 조기 구축하고 국내 독자 양자 프로세서(QPU) 개발과 연계하여 단계적으로 고도화

- (1단계 : '22-'24) 국내외 역량을 활용하여 50큐비트급 양자컴퓨팅시스템 구축
- (2단계 : '26-'28) 경쟁을 통해 채택된 주력 소자 기반으로 2단계 시스템 구축

\* KQIP : Korea Quantum Innovation Platform



◆ 고도의 보안환경에서 양자세계를 연결하는 초신뢰 양자통신 기술 개발

- (양자 암호통신) 국내 양자 기술 중 앞서있는 유선 양자암호통신의 시장성을 강화하고, 무선암호통신 기술력 확보를 통해 단계적으로 커버리지 확장
  - (유선) 부품 장비 성능 고도화 및 소형화 저가격화(~'24), 국제표준 특허 선점으로 시장성을 강화하고 미래 핵심원천기술 개발도 병행
  - (무선) 초소형 휴대용(모바일 결재), 해양·우주를 아우르는 장거리 기술(드론-위성) 확보



- (양자 인터넷) 중장기적으로 개별 양자기기(양자컴퓨터, 양자센서)를 연결하는 미래 양자인터넷을 구현하기 위한 원천기술 확보 추진

※ 1단계(~'26년) 1:1 양자노드 (km급) → 2단계(~'30년) 다중노드 양자 ARPANET(수십km급) → 3단계(~'35년) 기존 인터넷 연계 유무선 Quantum Network(양자 중계기 초기 모델 적용)

◆ 산업 경쟁력을 획기적으로 높이는 초정밀 양자센서 기술 개발

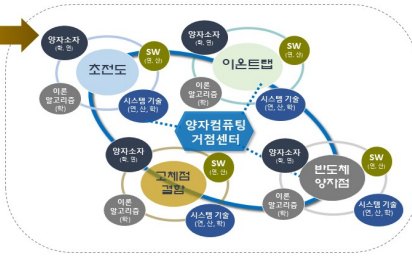
- (양자 센서) 국내 수요가 분명한 센서에 대해 수요연계형 R&D로 상용화를 촉진, 연구·산업의 선순환 고리 확보('21~)

< 양자 센서 기술 목표 및 활용 >

구분	자기장 센서	관성 센서	이미징 센서
개발 목표	기존 센서 대비 100배 이상 공간 분해능의 자기장 측정 센서 개발	기존 센서 대비 10배 이상 정밀도를 가진 가속도 측정 센서 개발	광학현미경 대비 10배 이상 분해능 확보, 가시적 관찰이 불가능한 대상 센싱
활용 분야	반도체소자 누설전류 측정(~'26), 미세암·뇌질환 검진(~'30)	양자컴파스와 중력 지도를 이용한 無GPS 항법, 자원탐사 재해 예측등(~'30)	반도체 설계, 의료·미생물용 양자현미경, 초장거리 이미지(양자라이다) 등(~'30)

② 전문인력 확보 및 국내외 협력 기반 구축

- (연구-교육 허브) 양자분야별 출연(연)(표준연, KIST, ETRI 등) 중심의 허브기관(Hub)을 지정, 이와 연계한 협력기관(Spoke)과 연계·협력을 통한 조속한 기술 확보
  - \* 각 거점별로 개발 목표 및 공동연구과제 도출, 성과 교류·점검, 석박사급 공동 교육훈련 등
- 적용 분야(컴퓨팅/통신/센서), 소자 방식에 구분을 두지 않는 기초기반 기술\*에 대해 대학 중심의 집단연구(SRC/ERC, IBS연구단)를 통해 장기 지원
  - \* 양자결맞음, 양자소재, 마이크로파 생성·제어, 나노패 공정기술(미세가공, 3차원 적층 등) 등



▪ 예를 들어, 양자 컴퓨팅의 경우, 시스템 통합 기관(출연(연) 중심)을 거점기관(Hub)으로 소재, 알고리즘 SW, 기반기술 관련 협력기관(Spoke)이 산·학·연 공동연구 추진

○ (전문인력양성) 양자 전문인력을 '21년 총 150명에서 '30년 총 1,000명 수준으로 확대하고, 초중고 대상 양자 기초교육을 통한 양자 네이티브 육성

- 석·박사 대상 이론·실습·프로젝트를 통합 제공하는 교육 프로그램 운영

※ 英 EPSRC는 기업 파트너십을 기반으로 박사급교육센터 3곳(브리스틀대, 임페리얼 칼리지, UCL) 운영 중('14~)

< 양자 박사급 교육 프로그램(예시) >

- (이론) 교육-연구거점 중심으로 복합·다학제 기반의 대학 간 공동과정 운영
  - (실습) 출연(연)·나노팩 등의 인프라를 활용한 현장형 실험·실습 교육 제공
  - (프로젝트) 산업계 매칭을 통한 프로젝트 과정(기업 매칭 최대 50%) 포함
- ⇒ 1년 이론 수업 + 2년 연구·실습 + 1년 기업 인턴십 총 4년 과정으로 구성

○ (국제협력) 미국·EU 등 선도국과의 정부 간 채널을 통한 실질적 공동연구 확대 및 양자 연구용 소재·부품·장비에 대한 수출입 규제 완화 추진

※ 최근 미국은 對 중국 기술패권 경쟁을 의식, 수출통제개혁법 제정('18) 등을 통해 양자기술을 포함한 전략기술에 대한 수출입 통제를 강화

③ 특화 연구 인프라 확충 및 연계·고도화

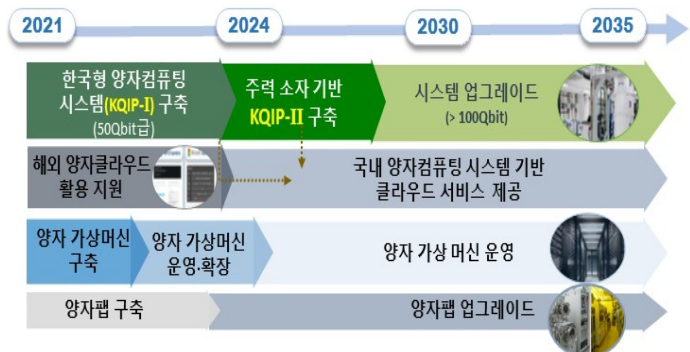
○ (양자컴퓨팅 연구인프라) 알고리즘에 대한 연구·검증 지원을 위해 양자컴퓨터를 모사하는 양자가상머신을 구축·제공('21~)하고,

- 우리 독자 양자컴퓨팅 시스템을 조속히 구축하여 산·학·연이 공동 활용할 수 있는 테스트 베드 제공('25~)

○ (양자소자 제작공정) 고비용 고사양 공정장비를 보유한 양자 전용 팹(파운더리)을 구축('20~'24)하여 연구용 양자 소자 제작 지원

※ 공정개발 및 사용자 교육, 설계·제작 컨설팅 및 제작·시험평가 대행 등

< 양자 컴퓨팅 연구인프라 구축(안) >



#### ④ 양자 기술의 활용 및 산업 혁신 촉진

- **(유용한 문제 발굴)** ① 학문적 난제, ② 산업혁신, ③ 공공·사회 문제 등 양자 기술 활용에 적합한 난제 발굴
  - ※ ① 화합물 구조, 고에너지 물리 ② 금융, 신약 개발, 배터리·비행체 설계, ③ 교통량 분석, 사이버 공격/방어 대응, 싱크홀/매설물(가스관), 지진 탐지 등
- **(활용 성과 창출)** 우리 주력 산업 분야(반도체, 자동차, 배터리 등)와의 연계성이 높은 분야를 중심으로 민관 파트너십을 기반으로 한 활용성과 조기 창출
  - ※ 양자 학회·포럼 등을 중심으로 문제해결 방안을 산업계와 공동 모색하고, 서비스 모델 발굴, 민관 공동연구, 기술 이전 추진

양자컴퓨팅	양자통신	양자센서
1단계(~'24)에서는 학문 분야 2단계(~'30)에서는 반도체, 배터리 등 우리 주력산업 분야	금융·의료 등에 유선양자암호 통신시범 적용('20년~), 국방 등에 무선양자암호통신 적용('26년~)	주력 산업 관련성(반도체자동차 등), 국방·공공(잠수함스텔스 탐지 등)

- **(산업화 지원)** 양자 R&D를 위한 IP전략 수립을 지원하고, 국제 표준화 그룹에 참여 지원, 벤처 창업 지원 등으로 산업생태 활성화
  - ※ 중소·벤처기업이 개발한 양자소자·부품의 시제품 제작 → 시험·검증·인증 → 기술사업화 지원

#### ⑥ 양자 R&D 사업 투자 전략성 강화

- **(역할 분담)** 거점(Hub)-협력(Spoke) 체계를 중심으로 기존 정부사업과 출연(연) 주요사업 간 역할 분담(안)에 따라 중복되지 않도록 기획·편성

정부사업 (공모사업)	<ul style="list-style-type: none"> <li>· (기술) 기술 분야 간 또는 산·학·연 간 협력 연구, 대학 중심의 기초·이론 연구, 공동활용 연구인프라 구축 등</li> <li>· (인력) 대학을 중심으로 핵심 연구인력 양성 지원</li> </ul>
출연(연) (주요사업)	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 각 출연(연) 보유기술을 기반으로 장기 연구를 통한 특정 난제 해결 연구</li> </ul>

- **(Q-플래그십 프로젝트)** 양자기술(컴퓨팅, 통신, 센서)을 활용한 산업혁신·공공난제 해결 프로젝트 추진
  - ※ 문제정의로부터 R&D 수행, 현장적용(실증)으로 이어지는 쏘 과정을 학·연·산 협력 하에 공동 추진

#### 7. 향후 계획

- 관계 부처들은 역할분담에 따라 중복없이 사업을 기획하여 과기혁신본부에 요구(4~5월)
- 과학기술혁신본부는 '22년 국가연구개발예산 배분·조정 시 반영(5~6월)

과학기술관계장관회의

회 차

2021-17  
(제1호)

디지털을 넘어 퀀텀 시대를 준비하는  
**양자 기술 연구개발 투자전략(안)**

2021. 4. 30



과학기술정보통신부



# 목 차

I. 추진배경 .....	1
II. 해외 정책 동향 .....	2
III. 기술·산업 동향 .....	4
IV. 국내 현황 분석 및 시사점 .....	7
V. 비전 및 목표 .....	14
VI. 투자 전략 .....	15
VII. 기대효과 .....	33
VIII. 향후 계획 .....	36



# I. 추진배경

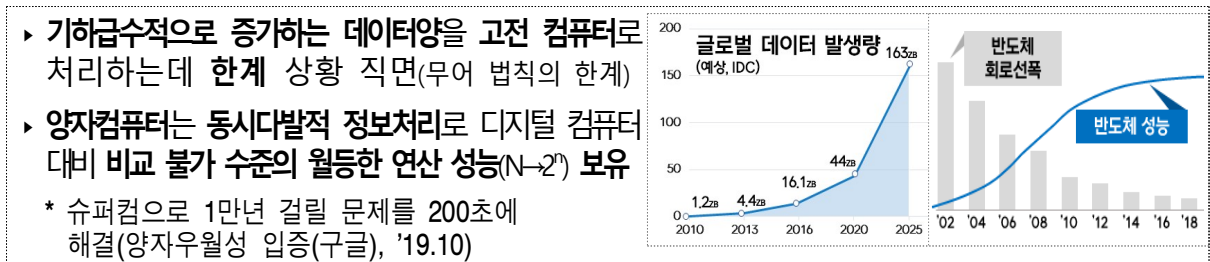
## ◆ 양자 기술은 미래 산업안보의 게임체인저가 될 파괴적 혁신기술

- 양자 고유의 특성(얽힘, 중첩 등)을 활용한 차세대 혁신기술로 전체 산업 생태계의 판도를 바꿔놓을 것으로 기대

\* 미국 안보 20대 핵심유망기술(美 NSC, '20.10), 세계경제포럼·MIT 10대 혁신기술('17, '18)



- 특히, 반도체 집적화(“무어의 법칙”)의 한계를 양자 기술로 극복하여 신약개발, 금융 등 다양한 산업에 활용될 것으로 전망



## ◆ 장기 상용화 시점에도 불구하고, 기업·국가간 글로벌 경쟁이 가속화

- 미·영·일·중 등 주요국은 양자기술의 폭발적 파급력에 주목하여 주도권 확보를 위해 치열하게 경쟁 중

※ 미국 : 양자법(National Quantum Initiative Act) 제정('18), 영국 : 국가양자기술전략('15, '19) 발표, 일본 : 양자혁신전략('20.1) 발표 등

- Google, IBM, AT&T 등 글로벌 기업들도 원천기술 확보를 통한 글로벌 시장\* 선점 준비에 만전

\* 글로벌 양자 시장은 '35년에 400조원 규모로, 반도체 글로벌 시장('18년 529조)과 비슷한 규모의 시장 형성 전망 (2017년, Communications Industry Researchers)

## ◆ 차세대 선도기술로 R&D 투자전략을 마련, 선제적 대응 필요

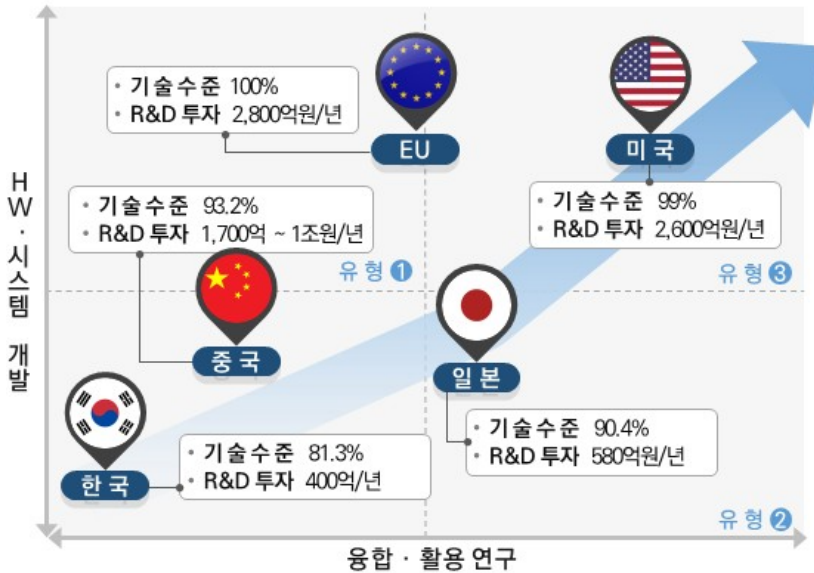
- 미래 성장 가능성이 높으나 기술적 난이도가 높고 산업 기반이 없는 초기 기술로 정부 주도의 R&D 투자 필요

- 양자 기술은 보안성 강화(양자암호통신)와 암호체계 무력화(양자컴퓨팅)\*라는 양면성을 가져 장차 전략 기술화 가능성이 높으므로 선제적 확보 필요

\* 現 공개열쇠 암호방식은 기존 컴퓨터가 소인수분해에 취약한 점에 착안되었으나 양자컴퓨팅 기술 완성 시 짧은 시간 내 소인수분해가 가능해져 암호체계 위협

## II. 해외 정책 동향

◆ 빠른 기술 진보와 활용 가능성이 가시화되면서 각 국은 양자기술을 유망기술 우선순위에 포함시키고 다양한 투자 프로그램을 포함한 투자전략을 발표



◆ 우리나라는 부족한 투자와 기술력으로 이론 및 HW 기술 추격에 집중해 왔으나,

- 양자 기술의 융합·활용을 포함하는 전략적 투자로 기술산업 생태계 확보 필요

\* 유형① (중국) HW 및 시스템에 집중  
 유형② (일본) 양자기술 활용 중시  
 유형③ (미국) 발달된 HW를 기반으로 활용연구까지 전방위 지원

\* 기술수준 : '19년 ICT 기술수준조사  
 R&D투자 : 각국별 최근 투자계획에 근거한 연평균 금액

### < 주요국 양자 기술 발전 비전 및 전략 현황 >



□ (미국) 미-중 기술패권 경쟁에 있어 5G, AI, 빅데이터, 로봇, 항공우주, 양자컴퓨터를 핵심기술로 인식\*하여 집중 투자 중

\* 미국 안보 우위를 위한 20대 핵심유망기술로 “양자정보과학” 선정(美 NSC, '20.10)

○ 세계 최초로 「양자법(National Quantum Initiative Act)」을 제정('18.12), 조직화된 지원체계를 구축\*하고 전방위적으로 종합 지원('19~'23 1.4조원)

\* 백악관 직속 국가양자조정실(NQCO), 국가과학기술위원회 산하 양자정보과학소위원회 신설 등

○ 또한, 양자인터넷 전략비전\*('20.7) 및 5개 양자정보과학연구센터(MS, 하버드大, 코넬大, 인텔, 록히드마틴 참여) 설립·지원(7천억원) 발표('20.8)

\* 美 에너지부, 10년 내 양자인터넷의 전국적 구현을 위한 청사진 제시

- **바이든 행정부도 양자정보과학을 우선순위에 두고 집중 지원 전망**
  - \* '바이든 정부는 연구 우선순위에 있어 인공지능과 양자정보과학에 중점을 두었던 트럼프 행정부의 기초를 이어갈 것(Nature News, '20.10)'
  
- **(영국) 높은 수준의 기초과학 기반을 토대로 영국 기업이 미래 양자 시장에서 우위를 차지하도록 향후 10년 이상 정부 주도의 투자 천명**
  - '14년 국가양자기술프로그램을 출범 후 2차례 '국가양자기술전략('15, '19) 발표
  - 상용 양자컴퓨팅 시스템을 도입('20~'22, 158억원)하고, 국가양자컴퓨팅 센터('19~'24, 3,400억원)를 설립, 실용화 가능한 양자컴퓨터·SW 개발
  - 최근 38개 신규 양자기술\*에 7천만파운드(1,100억원) 투자 계획 발표('20.6)
    - \* 암세포 구별 이미징 기술(Adaptix社-맨체스터大), 양자기반 가스센서(BP社-QLM社), 양자 컴퓨터용 OS (Riverlane社), 고성능 전기차용 배터리(Phasecraft社) 등
  
- **(일본) 「제5기 과학기술기본계획('16.3)」부터 양자기술을 우선순위에 포함 하였고, 최근 인공지능, 바이오, 양자를 3대 국가전략기술로 지원 중**
  - '양자과학기술의 새로운 전개방안('17.2)', '양자혁신전략('20.1)'을 잇달아 발표하여 기술로드맵 제시, 양자혁신거점 지정 등 추진
  - 광·양자 퀀텀도약 플래그십(Q-LEAP)('18), 문샷 프로그램('20.2)\* 추진
    - \* '30년까지 NISQ양자컴퓨팅 시스템 개발, '50년 오류정정 범용양자컴퓨터 확보 추진
  
- **(중국) '30년 국가전략구현 6대 중대 프로젝트에 포함하여 양자굴기를 추진 중이며, 최고 지도층의 관심으로 범국가적 차원의 투자 확대 중**
  - 「제13차 중국 5개년 계획('16)」부터 국가 전략적 연구개발 분야로 설정, 양자과학기술 인재 양성, 중대형 프로젝트의 본격 추진
    - \* 중국 중앙정부는 연간 10억 위안(1,700억원)의 투자계획 발표하였고, '18년 최선도국인 미국 대비 2배의 특허 출원
  - 국립양자과학연구소 설립(13조원, '17년~)을 추진 중이며, 최초 양자 암호통신위성(묵자호)을 발사하여 위성양자통신 기술 구현('16)
    - \* '25년까지 슈퍼컴퓨터급 계산속도를 가진 양자 시뮬레이터를 개발하고, '30년 500~1000 큐비트급 범용 양자컴퓨터 개발 목표 제시

### Ⅲ. 기술 · 산업 동향

#### 1 양자 컴퓨팅

□ **(기술 동향)** '30년대 후반 경 본격 상용화가 예상되는 상황으로 다양한 후보기술(플랫폼) 간 경쟁 중

○ 현재 초전도·이온트랩 방식이 가장 앞서 있으나, 각 방식별 장단점이 있어 향후 기술발달 양상에 따라 주도 방식이 바뀔 가능성 존재

< 양자 프로세서 구현 방식 유형 >

방식	초전도 소자	이온트랩	반도체 양자점	위상큐비트	고체결합	광자 기반
장점	빠른 게이트 속도, 반도체기술 활용	소자 안전성, 높은 신뢰도	소자의 안전성, 반도체기술 활용	오류 미발생	상온 작동	제어와 전송 용이
단점	초전온 유지, 짧은 양자상태 유지시간	느린 게이트 속도, 복잡한 레이저 장치	얽힘 구현 난이도, 초저온 유지	구현가능성 미입증	얽힘 구현 난이도 높음	대규모 얽힘 생성 어려움

○ 본격 상용화 이전 **중간단계**('30년 전후)로 現 **NISQ\*** 수준의 양자 컴퓨팅 기술을 최적화·활용 예상

\* Noisy Intermediate-Scale Quantum : 미래 고성능 양자컴퓨터(오류 내성이 있는 수백만 큐비트)에 앞서 現 수준에서 구현 가능한 50-100큐비트 수준의 오류를 포함하는 양자컴퓨팅 기술로도 유용한 활용이 가능

□ **(산업 동향)** 양자컴퓨팅의 가능성에 주목하여 구글, IBM 등 글로벌 IT 대기업 중심으로 본격 추진 중

구글	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ '양자 우월성(Quantum Supremacy)' 최초 입증('19.10)</li> <li>▪ NASA와 양자인공지능연구소 공동 설립하여 공동 연구</li> <li>▪ 양자기계학습틀(Tensorflow Quantum), SW 양자시뮬레이터 개발('20) 등 추진</li> </ul>
IBM	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ IBM Q 네트워크(삼성, JP모건 등 106개)를 구축, 클라우드 기반 양자컴퓨팅 서비스를 제공하고, 다양한 활용분야를 탐색 중</li> <li>▪ '20년 65큐비트에서 '23년 1,121큐비트 양자컴퓨터 개발 계획 발표('20.9)</li> </ul>

○ 인공지능 의료·제약 화학 등의 다양한 분야에서 혁신을 가져올 것으로 기대

구분	컴퓨팅 기술	양자+ 컴퓨팅
의료 제약 화학	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 복잡한 분자구조는 많은 경우의 수를 가져 사실상 계산 불가</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 단백질의 3차원 구조 분석 등에 최적화된 새로운 알고리즘 활용 가능 → 신약, DNA분석, 신소재 개발 등에 적용</li> </ul>
인공 지능	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 인공지능 학습을 위해 많은 리소스(GPU, 전력 등) 및 시간 필요</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 인공지능에 특화된 양자 알고리즘으로 복잡한 계산의 고속 연산 가능</li> <li>▪ 슈퍼컴퓨터대비 1/600 수준의 전력소모</li> </ul>

## 2

## 양자 통신

- **(기술 동향)** 현재는 1:N 암호키 교환이 가능한 양자암호통신 기술이나, 장기적으로는 정보의 양자상태 전송이 가능한 양자인터넷으로 발전 예상
  - 양자암호통신의 경우 유선통신은 초기 상용화 단계이며,
    - 무선통신은 최근 금융 사용자 인증을 위한 초근거리 무선 암호통신 기술 및 위성간 통신 등을 위한 장거리 무선통신 기술 개발이 진행 중

유선		북경-상해 간 2,000km 양자암호 백본망 구축('16), 드론을 이용한 무선양자암호 분배기술('20)		뉴욕 등 동부지역 양자암호통신 서비스 중(Quantum Xchange, '18)		KT, SKT 등이 참여, 공공·산업·의료분야 시범망 (8개 컨소시엄) 구축 중('20~)
무선		ATM용 초근거리 양자암호('18)		목자위성을 중계기로 북경-비엔나 간 (7,600km) 양자광자 전송('18)		

- 장기적으로는 양자인터넷(Quantum Web)으로 발전하여, 양자 기기간 (양자센서, 양자컴퓨터) 또는 다수의 양자컴퓨터를 연결·활용 전망



※ 6단계 발전모델에서 현재 기술수준은 중·단거리 노드 간 양자암호키를 교환하는 1-2 단계 수준

- **(산업 동향)** 현재는 양자암호통신 구현을 위한 테스트베드 성격의 시범 서비스 및 개발장비 위주의 초기 시장이 형성 중

<b>SKT·IDQ</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ SKT는 '18년 양자암호통신장비 세계1위 기업인 IDQ를 인수하고 양자암호장비를 상용화*한 데에 이어 양자 라이다 등 양자센서에도 도전</li> <li>* '16년 세종-대전간 LTE망(정부 R&amp;D 지원)에, '19년 서울-대전-대구 5G망에 적용</li> </ul>
<b>Quantum Xchange</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 미국 워싱턴-뉴욕시-뉴저지간 19개소 약 1,000km에 대해 양자암호를 이용한 암호통신 서비스 중</li> </ul>

- '20년대 중반이후 통신·네트워크 서비스, 암호인증 및 데이터 보안을 중심으로 본격적인 상용화 시장 형성 전망

구분	통신 기술	양자+통신
통신	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 해저 광케이블에 국제적인 도감청</li> <li>▪ 근거리(NFC), 장거리(항공) 무선통신 도청·해킹</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 금융/의료/국방 등에 활용 도감청 및 해킹 원천 차단</li> <li>▪ 양자컴퓨터 간 연결로 대규모 양자컴퓨터 구현 등 시스템 확장</li> </ul>
분산 컴퓨팅	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 양자상태를 전기적 신호로 변환해서 전달(확장 제약)</li> </ul>	

- **(기술 동향)** 양자센서는 민감도·해상도 등에서 고전 센서의 한계치를 극복 후 이를 극대화하는 방향으로 전개
  - 현재 가능성이 보이는 양자 관성, 자기장, 이미징 센서 위주로 정밀도·분해능 향상, 상온동작 등 기술적 난제 해소에 중점 투자
    - 실험실 수준에서 이미 기존의 기술을 뛰어넘는 민감도를 활용해 가속도·전기장·자기장·회전을 탐지하는 양자센서가 가능성을 입증
  - 실험실 단계에서 입증된 센서 중 실제 응용이 가능할 수 있도록 **SWaP-C\*** 최적화 등을 위한 연구 추진 중
    - \* 크기(Size), 무게(Weight), 전력소모(Power) 및 가격(Cost)
- **(산업 동향)** 현재 대부분의 양자센서가 실험실 단계의 연구 중이며, 관성·자기장 센서는 항법·의료 등 일부 분야에서 상업적으로 이용

록히드 마틴	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 합성 다이아몬드 기반 양자자기장센서와 NOAA 지자기 지도를 이용하여 전파 방해 등에 영향 받지 않는 항법시스템 개발 중</li> </ul>
Bosch	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 100여개의 센서를 사용하는 자동차부품 전문회사로서 네비게이션용 양자자이로 및 자기장센서 개발. 나이트 비전용 양자이미징센서 등을 개발 중</li> </ul>

- 양자센서가 현실적인 문제에 어떻게 접목될 수 있는지 입증된다면 의료·항해·자율주행·자원개발 등을 중심으로 시장 형성 전망
  - 특히, 잠수함 운행, 스텔스 탐지 등 국방분야에서 전략기술로서 중요성이 높아질 전망

구분	센서 기술	양자+센서
의료 영상	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ MRI는 5mm 이상의 암세포 식별 가능</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 미세암(0.05mm이하) 발견 가능</li> </ul>
위치 정보	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ GPS 수신 오차(10~50m 오차)</li> <li>■ 수중, 광산, 건물 등 GPS 사용 제약</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 초정밀 측위 가능(10cm이내 오차)</li> <li>■ 수중, 광산, 건물 등에서 정밀측위 가능 위치측정 가능(서비스 확장)</li> </ul>
지하 탐사	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 현재는 지구 중력의 1/5억 감지</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 자원 탐사, 싱크홀·화산활동 등 초정밀 감지(최소 지구 중력의 1/100억 감지)</li> </ul>
라이다	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 100m 내외 탐지, 투과 불가능</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 장거리(45km 등) 탐지 가능</li> <li>■ 숨겨진 물체를 투과 탐지(스텔스, 사각지대)</li> </ul>

## IV. 국내 현황 분석 및 시사점

### 1 현황 및 문제점

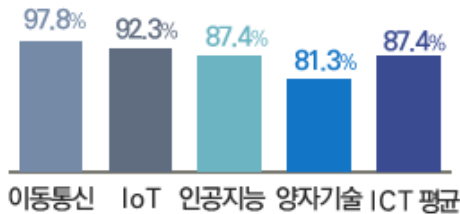
#### ① 기술 수준 : 양자 R&D 후발국으로 주요국과의 기술격차가 현격

□ 선도국(EU) 대비 우리나라의 양자기술은 약 **81.3%** 수준으로 국내 전체 ICT 기술내 최하위 수준

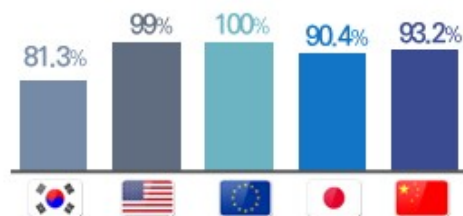
※ ICT 기술 평균 : 87.4%, 이동통신 : 97.8%, 인공지능 : 87.4% ('19년 ICT 기술수준조사)

○ 기술성숙도는 양자통신(85%), 양자센서(85%), 양자컴퓨팅(72%) 順

< 국내 ICT 기술 간 비교 >



< 주요국 간 상대 비교(최선도국 100% 대비) >



#### 현장 목소리

"양자이론, 초전도, 소재 등 다양한 기반기술과 HW/SW 전반에서 기술 수준이 낮고, 초기버전 시제품을 출시하고 있는 해외와 달리 국내 기업들은 탐색 수준에 그치고 있어 산학연 역량 결집을 통해 시너지 창출 필요"

< 국내외 기술현황 비교 >

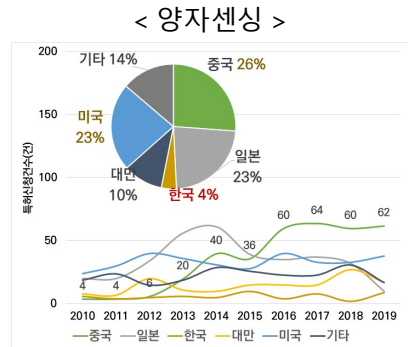
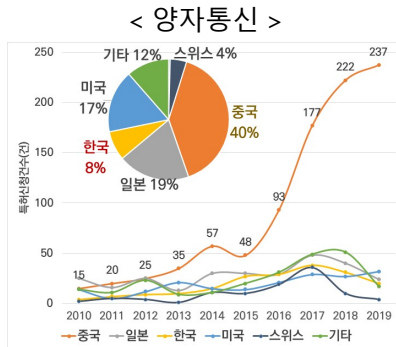
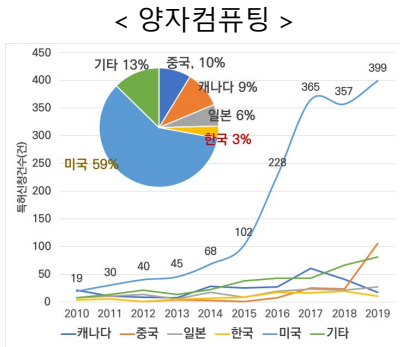
구 분	현 황
양자 컴퓨팅	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ (선도국) 50~70큐비트 양자컴퓨팅 시스템 시제품 개발, 일부 클라우드로 서비스 중이며, 큐비트 확장, 오류보정 등 성능 고도화 추진 중</li> <li>* IBM은 '20년 65큐비트 → '22년 433큐비트 → '23년 1,121큐비트 계획 발표('20.10)</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ (우리나라) 8큐비트 양자 프로세서를 개발(표준연). 소재, 기반 기술(냉동공학, 초전도 등)도 선진국에 비해 뒤쳐져 있으며, SW 알고리즘은 세계적으로도 초기 단계</li> </ul>
양자 통신	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ (선도국) 양자암호통신은 초기 상용화 수준의 시범서비스를 운영하고 있으며, 전송 한계 (100km) 극복과 유무선 채널 다변화 연구 진행</li> <li>※ 현재 양자상태가 구간별로 단절된 장거리 통신이 가능하나(신뢰노드), 양자의 보안성과 확장성의 한계로 위성 및 얽힘 기반 양자 중계기 연구 필요</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ (우리나라) SKT(5G 서울-대전-대구 380km), KT(전남도청-해군사령부간 45km) 등 일부 유선 시범 서비스 운영 등 초기상용화 기술은 확보했으나 생산성 향상·기존 인프라 연동·장거리 양자전송·유무선 채널 등 연구 필요</li> </ul>
양자 센서	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ (선도국) 시장성이 큰 분야(의료/네비게이션)에서 상용 동작 가능한 소형화 연구 중</li> <li>※ AOsense(미국), Cold QuantBosch(독일), Qnami(스위스) 등 일부 기업에서 시제품 개발</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ (우리나라) 실험실단위에서 초소형 원자시계(표준연), 양자 자기장·자이로센서(ADD) 시제품 등을 개발하였으며, 현재 표준연(관성·자기장)·서울대(자기장), SKT(양자라이다), 우리로(단일광자) 등에서 기술 개발 진행 중</li> </ul>

## <참고> 양자 기술 특허 신청 동향(21년, 특허청)

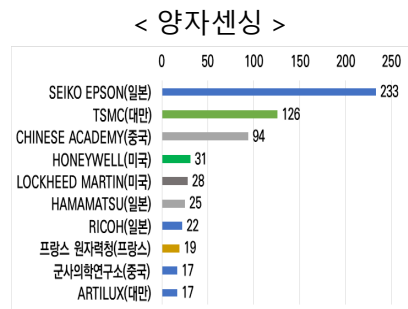
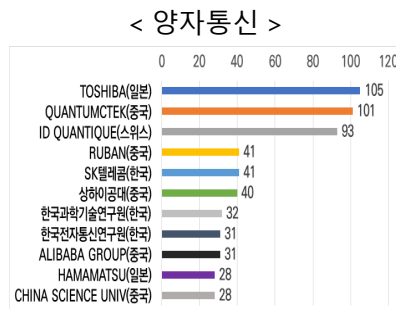
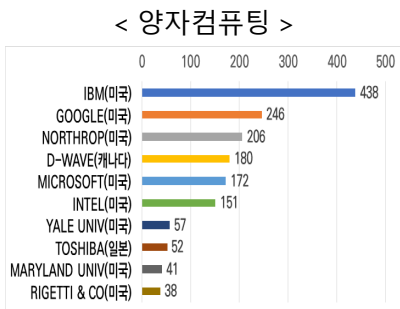
- **(국가별)** 미국은 양자컴퓨팅(창), 중국은 양자통신(방패) 분야에 집중, 양자센싱은 미·중·일의 특허신청점유율이 유사
  - 우리나라는 양자컴퓨팅과 양자센싱 분야 대비 양자통신 분야에서 높은 특허신청점유율을 유지

< 국가별·세부기술별 특허신청 및 점유율 현황 (출처: '10년~, Derwent DB) >

특허신청점유율(%)	한국	미국	중국	일본	캐나다	대만	스위스	기타
양자컴퓨팅	3.3%	59.5%	10%	5.9%	8.7%	-	0.2%	12.5%
양자통신	7.9%	16.8%	39.9%	19.3%	0.4%	0.6%	4.4%	10.9%
양자센싱	4%	22%	26%	23%	0.8%	10%	0.5%	14%



- **(기업별)** 양자컴퓨팅은 IBM(미), 양자통신은 TOSHIBA(일), 퀴텀텍(중국), 양자센싱은 SEIKO(일)과 TSMC(대만)이 출원 주도
  - IBM, 구글 등 **Big Tech**는 양자컴퓨팅 분야에 특허신청을 집중하고 있고, **SEIKO**는 양자시계, **TSMC**는 광센서 분야에 집중
  - 국내 신청인으로는 **SK텔레콤**, 과학기술연구원, 전자통신연구원이 양자통신 분야에서 TOP 10에 위치
  - 양자컴퓨터 분야는 KAIST가 29위, 양자센싱에서는 표준연구원이 15위



- **(출원인 유형별)** 미국·일본·유럽 등은 기업 위주로 출원되는 반면, 한국은 공공연·대학의 출원인 비율이 매우 높은 편

< 국가별·세부기술별 특허신청인 유형 (출처: '10년~, Derwent DB) >

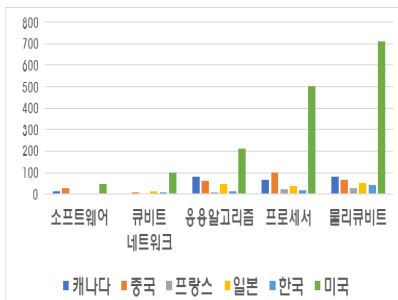
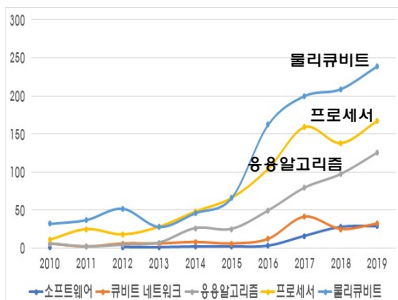
분야	한국	미국	중국	일본	유럽
양자컴퓨팅					
양자통신					
양자센싱					

- 한국은 정부 R&D가 기술력을 견인하는 역할, 공공연·대학의 우수한 기술을 민간으로 이전하기 위한 노력이 필요

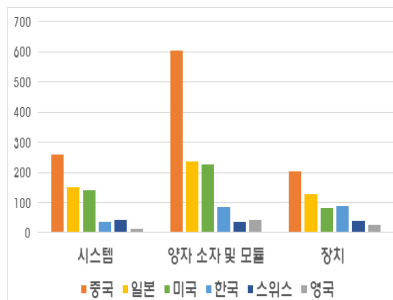
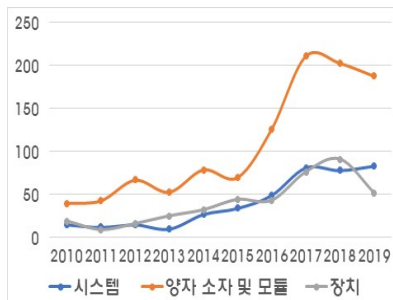
- **(세부기술별)** 양자컴퓨팅은 물리큐비트, 프로세서 분야, 양자통신은 양자 소자/모듈, 양자센싱은 광센서 분야 위주로 출원

- 물리큐비트·프로세서는 미국, 양자 소자/모듈은 중국이 주도하고 있고, 광센서는 미국과 중국이 경쟁 중

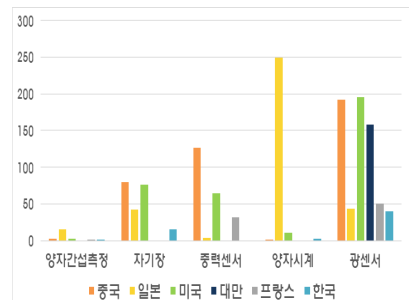
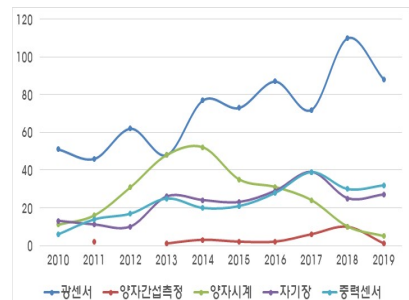
< 양자컴퓨팅 >



< 양자통신 >



< 양자센싱 >



## 2 전문 인력 : 산업 미형성으로 전문인력 부족, 인력양성 체계 미흡

□ 양자 기술 분야 고급 전문인력이 크게 부족

- 현재 국내 핵심연구인력은 약 150명 내외로 추산되며, '30년 핵심 연구인력 수요는 1,000명 수준으로 인력양성 강화 필요

\* 우수 논문 게재 연구인력('16년 기준) : 중 1,913명, 미 1,217명, 독 554명, 영 453명, 한 78명

□ 최근 양자기술 인력양성을 착수하였으나, 그간 프로젝트 기반 인력 교육·연구 지원이 부족

- 국내 연구생태계가 아직은 미비하여 해외 우수인재 유입도 어려운 상황

< 국내 양자 인력양성 사업 현황 >

사업명	지원 내용	배출인력(연간)
정보통신방송인재양성 (ITRC)('18~'23)	실무능력 향상을 위한 산학연 연계 R&D 프로젝트 수행, 기업가정신 교육 등	석·박사 매년 : 30명
과학기술혁신인재양성 (양자정보과학)('20~)	해외 Post-Doc(2년), 석·박사 인턴십(6개월), 위탁 교육(석사대상, 2~4개월)	6개월 이상 : 15명 6개월 미만 : 35명

**현장 목소리** "뉴튼의 고전역학적 발상을 깨는 완전히 다른 사고를 요구하는 학문으로 종교에 비유하면 개종에 해당하여 기존 인력의 전환이나 양성이 쉽지 않은 분야"

## 3 인프라 : 양자 특화 연구 및 실증 인프라 미비

□ **(컴퓨팅)** 최근 정부 R&D 확대 등으로 양자소자 제작, 양자컴퓨팅서비스 수요는 증가세이나 국내 소자 제작 공정 인프라 미비\*

\* 각 기관에 구축된 소규모 전용장비의 집적·연계가 미비하고 기존 연구용 반도체 공정 (나노팜 등)의 용량·공정차이로 공동 활용에 한계

- 또한, 국내 연구자들은 양자 알고리즘 및 SW개발을 위해 해외 양자컴퓨팅 서비스(IBM 등, 클라우드 기반)에 의존

□ **(암호통신)** 양자암호통신 시범망을 구축, 실증 및 레퍼런스 확보를 위한 양자암호통신 인프라 구축 시범사업('20~'21, 290억원, 비R&D) 추진 중

※ 미국, EU 등은 분산 양자컴퓨팅(얽힘 전송)을 위한 테스트베드를 구축하고 연구에 활용 중 (美 서부(칼텍, CQNET), 중부(페르미랩, FQNET), EU(QIA 컨소시엄) 등)

**현장 목소리** "국내 양자 프로세서 소자 제작·공급, 성능테스트를 위한 장비·시설의 미비로 희귀 소재 및 핵심 공정 대부분을 해외에 의존, 최근에는 미국의 전략기술 수출입 통제로 핵심 부품 및 소재 확보가 더욱 어려워지고 있는 상황"

#### 4 R&D 투자 : 초기 정부 투자단계, 전략성 강화 필요

- (정부) 소액과제(기초연구 또는 출연(연) 사업) 추진되던 양자 R&D는 전용사업들이 신설되기 시작한 '19년을 기점으로 본격 증가

\* ('14) 127억원(69과제) → ('16년) 284억원(82과제) → ('19년) 636억원(269과제) (※ NTIS 기준)

- 전용사업 예산\*은 '19년 106억원에서 '21년 326억원으로 대폭 증액

< 양자 R&D 예산 현황(억원)>



\* ① 양자컴퓨팅기술개발('21년 96억원), ② 양자암호통신집적화 및 전송기술 고도화('21년 73억원), ③ 양자센서핵심원천기술개발('21년 58억원), ④ 양자정보과학 연구개발생태계조성('21년 60억원), ⑤ 과학기술혁신인재양성(양자)('21년 39억원)

- (민간) 민간 기업은 정부 R&D 매칭을 통한 원천연구(통신) 및 일부 소규모 자체 탐색연구(컴퓨팅)에 투자

- 삼성종합기술원을 중심으로 양자컴퓨팅 관련 연구팀을 구성, 시카고 대학과 공동연구, IBM Q 네트워크에 참여·협력을 추진 중
- 통신사업자(SKT, KT), 장비·부품개발회사(코위버, 우리넷, 우리로 등) 등이 양자암호시스템 장비·부품 개발

#### 현장목소리

① "선도국들은 15년 이상 꾸준히 투자 해온 반면, 우리나라는 연구 개발 투자가 늦었음. 최근 들어 정부의 투자가 늘고 있으나, 기업의 투자 불확실성을 낮추고 초기 기술의 마중물 역할을 할 수 있도록 정부의 집중적 투자 필요"

② "우리나라는 정책적 구심점이 없는 상황. 양자기술은 국방·우주 기술과 같이 Top-Down 방식에 기반한 장기적이고 전략적인 지원이 시급"

#### 5 국제 협력 : 국가 간 협력 채널 부재, 인력교류 수준

- 공동위 등에서 정부간 공식 협력의제로 논의된 바 없음
- 해외우수기관에 인력을 파견\*하거나, 네트워킹 수준의 공동연구(연 1~2억원)\*\* 추진

\* 석박사, Post-Doc 등 4개월~2년 파견('21년 미국, 영국, 캐나다, 일본 등에 8명 파견 예정)

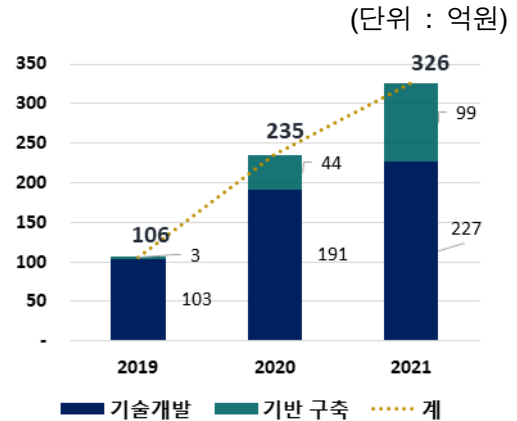
\*\* '20년부터 8개 과제(미국, 영국, 남아공, 일본 등) 총 12억원 규모로 미국이 50% 이상 차지

## 〈참고〉 양자 기술 전용사업 투자 현황('19~'21, 전용사업 기준)

□ 양자 R&D 전용사업은 총 5개로 '19년 106억원에서 '21년 326억원으로 증가 (연평균 75.4% 증)

○ 기술개발(522억원), 기반구축(146억원)에 3년간 총 668억원 투입

※ 이와는 별도로 출연(연) 주요사업으로 ('19)114억원→('20)109억원→('21)133억 지원



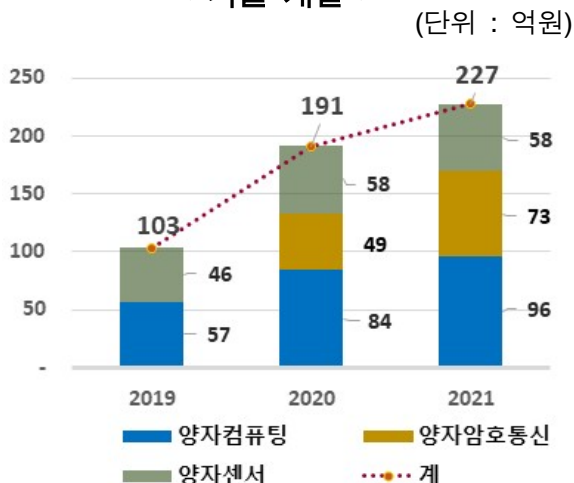
○ (기술 개발) 양자컴퓨팅, 양자센서, 양자통신 R&D에 3년간 522억원 지원

- (양자컴퓨팅, 46%) 양자소자(36.6%), 양자 시뮬레이터(20.3%), SW 및 알고리즘(18.1%), 기타 기반 기술(25%) 개발에 238억원
- (양자통신, 31%) 유선 양자암호통신 상용화를 위한 시스템 집적화(42%), 단일광자 생성 얽힘 기술 등 원천기술 고도화(58%)에 122억원
- (양자센서, 23%) 관성 센서(30%), 이미징 센서(19%), 자기장 센서(17%), 기타 기반기술(양자광원, 광주파수 등 34%) 개발에 161억원

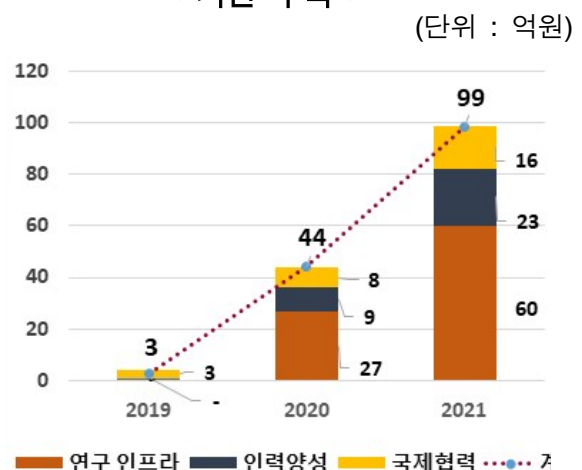
○ (기반 구축) 인력양성, 연구인프라 구축, 국제협력 등에 3년 간 146억원 지원

- (인력양성, 21.5%) 석·박사, Post-Doc 단기 해외연수 중심으로 31.5억원  
※ 이 외에 ITRC사업으로 양자 분야 3개 센터에 연간 약 20억원 지원
- (연구인프라, 60%) 양자팍 구축, 해외클라우드 사용 지원 등에 87억원
- (국제협력, 18.5%) 신진연구자 교류 지원, 국제포럼 개최 등에 27억원

< 기술 개발 >



< 기반 구축 >



## 2

### 기회 요인

- 본격 사업화 이전 단계로 지배적 기술이 정립되지 않아 추격의 기회는 열려 있는 상황
  - 양자컴퓨팅 기술의 경우, 기술 초기 단계로 다수 연구 그룹들이 다양한 기술 방식으로 경쟁 중이며, 암호통신도 글로벌 수준에 근접
- 우리가 강점을 가지고 있는 ICT인프라, 반도체 역량 활용하여 총력 대응한다면 추격 가능
  - 우수한 반도체 제조 기반(메모리 1위, 파운드리 2위), 세계 최고의 ICT 인프라 및 풍부한 SW 개발인력을 보유
    - \* ICT기술 수준 1위/인프라 6위(World Economic Forum), 세계 최초 5G 상용화
  - 수요산업인 반도체, 자동차, 배터리 분야에서 다수의 글로벌 선도기업 보유

## 3

### 시사점

- ◆ 양자기술은 미래 기술 패권을 정할 게임체인저 기술로 세계 각국과 글로벌 기업들이 각축전을 벌이고 있어 우리도 시급한 대책 마련이 필요한 상황
  - ⇒ 그러나, 본격 사업화 이전으로 추격의 기회는 열려 있으므로 우리에게 강점이 있는 ICT 인프라 및 역량을 바탕으로 민관이 함께 신속히 대응 추진

기술 개발	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 중장기적 관점에서 초기에는 다양한 후보기술을 폭넓게 지원하되, 평가를 통해 경쟁력 있는 기술을 선별, 주력기술에 대해 집중 지원</li> <li>• 우리 강점 기술/산업 기반과 시너지를 낼 수 있는 활용 분야에 집중 투자하여 의미있는 활용 성공사례 도출로 산업화 촉진</li> </ul>
인력 양성	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 일정 수준의 양자 기술 상용화 시점까지 관련 정부 주도의 인프라 구축 및 R&amp;D 투자를 통한 양자기술 전공인력 배출·유지</li> <li>* 양자 특화(다학제) 인력 양성을 위한 교육프로그램 강화</li> </ul>
인프라 확충	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 부족한 양자 소자·소재 공정 인프라를 확충하고, 산재되어 있는 개별 공정 설비·장비의 활용 연계 강화</li> <li>• 자원 투입을 체계화·집중화하여 양자 알고리즘 SW 개발·검증을 지원할 국내 인프라(양자컴퓨팅 시스템)의 단계적 확충 추진</li> </ul>
전략화	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 기술 간 경쟁 및 산학연 파트너십 강화를 위한 추진체계를 구축</li> <li>• 부족한 투자 확충을 위해 민-관 공동 플래그십 프로젝트 추진</li> </ul>

## V. 비전 및 목표

### 비전

디지털을 넘어 퀀텀의 시대로  
- From Digital to Quantum -

### 목표

2030년대 양자 기술 4대 강국 진입  
- 全 산업 혁신 촉진 및 국가 안보 강화 -

단계별 목표	Phase I (2021~2024)	Phase II (2025~2030)	Phase III (2031~2035)
	<p><b>인력 양성, 요소 기술 개발 등 기반 마련</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 50큐비트급 양자프로세서 확보</li> <li>• 초소형 유선양자암호통신 확보</li> <li>• 요소기술(공간해상도, 정밀도 등) 고도화, 소형화</li> </ul>	<p><b>학문적·산업적 활용 가능성(성공사례) 입증</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• NISQ 양자컴퓨팅시스템 확보</li> <li>• 초고속·정밀 무선양자암호통신 (양자 드론·항공기) 확보</li> <li>• 양자센서 산업(반도체, 의료) 활용</li> </ul>	<p><b>양자기술 상용화 본격 추진</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 오류정정 범용양자컴퓨터 확보</li> <li>• 양자인터넷 기술 확보</li> <li>• 양자센서 응용영역 확대 (조장거리 방위경, 양자현미경 등)</li> </ul>

### 투자 전략

#### 1. 도전적 원천 연구 강화

- ① 기존 컴퓨팅의 한계를 뛰어넘는 초고속 양자컴퓨팅 기술 개발
- ② 고도의 보안환경에서 양자세계를 연결하는 초신뢰 양자통신 기술 개발
- ③ 산업 경쟁력을 획기적으로 높이는 초정밀 양자센서 기술 개발

#### 2. 전문인력 확보 및 국내외 협력기반 구축

- ① 거점 중심의 협업체계 구축 및 글로벌 협력 강화
- ② 기술 경쟁력 확보를 위한 인력 양성 지원

#### 3. 특화 연구 인프라 확충 및 연계·고도화

- ① 연구용 양자컴퓨팅 인프라 단계적 구축
- ② 양자 소자 제작 공정 지원 인프라 구축 및 연계 강화

#### 4. 양자 기술의 활용 및 산업 혁신 촉진

- ① 경제·사회적으로 유용한 문제 발굴
- ② 민관 파트너십에 기반한 활용 성과 사례 창출
- ③ 양자 시장 창출을 위한 산업화 지원

#### 5. 양자 R&D 사업 투자 전략성 강화

## VI. 투자 전략

### 1 도전적 원천연구 강화

#### ① 기존 컴퓨팅의 한계를 뛰어넘는 초고속 양자컴퓨팅 기술 개발

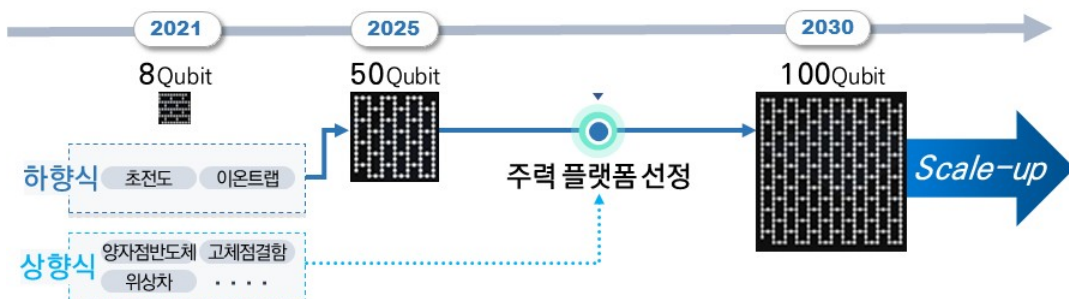
- ◆ 현재는 선도국에 비해 기술력이 많이 부족하나, 범용 양자컴퓨터 상용화는 '30년대 후반 이후로 예상되는 만큼,
- ◆ 향후 10년간 핵심 원천기술을 확보하고, 이후 우리의 강점인 엔지니어링·제조역량을 적용, 조속한 상용화를 통한 선도국 도약 추진



#### ① 범용 양자컴퓨터 핵심 요소기술 개발

- **(양자 프로세서)** 컴퓨터의 중앙연산처리장치(CPU)에 해당하는 양자프로세서(큐비트 기술) 개발
  - 1단계('21~'24년) 50(물리)큐비트 → 2단계('28년) 100(물리)큐비트 → 3단계 신뢰도 향상을 통한 성능 고도화를 목표로 추진
    - (5큐비트) 現 양자컴퓨팅 기술개발사업('19~'23)에서 설정한 초기 사업 목표
    - (50큐비트) 기존 슈퍼컴에 비해 양자 우월성(Quantum Supremacy) 구현이 가능한 최소 단위
    - (100큐비트) 큐비트 성능 고도화 측면에서 확장성 확보가 용이해지는 기점
  - 초기에는 경쟁형 R&D를 통해 다양한 소자 방식의 가능성을 탐색하고, 2단계에서 전문가 평가를 통해 주력 방식을 선정·중점 지원

< 양자 프로세서 개발 로드맵 >



## < 양자 프로세서 방식별 맞춤형 전략(안) >

◆ (추격형) 초전도, 이온트랩 등 빠른 기술 추적이 필요한 초전도, 이온트랩 방식에 대해서는 하향식(Top-down) 지원

방식	기술 특징 및 국내 수준(현황)	지원 전략
<b>초전도</b>	<p><b>[기술특징]</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>· 상대적으로 가장 발달한 소자공정 방식으로 단계적 기술점프(5→20→50→100Qbit) 필요</li> </ul> <p><b>[국내외 수준]</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>· (해외) 선도기업(구글, IBM 등)이 시스템화하여 클라우드로 제공(5~65큐비트 수준)</li> <li>· (국내) 20큐비트 수준의 설계 및 제작이 가능하며 8큐비트 초전도칩 제작작동 시연</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 50~100큐비트 급으로 빠른 업그레이드를 위해 핵심기술 고도화, 다중큐비트 제조를 위한 초전도 공정 및 적층소자 기술 확보</li> <li>· 시스템 레벨의 개발·구축을 통해 요소기술을 통합하여 집약된 연구개발 지원 추진</li> </ul>
<b>이온트랩</b>	<p><b>[기술특징]</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>· 큐비트 상태 유지가 안정적이지만 높은 수준의 제어 정밀도를 요구</li> <li>· 레이저 장비 구축 및 제어기술 확보가 이온트랩의 핵심 성공요인(다양한 방식 제한 중)</li> </ul> <p><b>[국내외 수준]</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>· (해외) IonQ社에서 11큐비트 급의 시스템 확보 및 클라우드 서비스 중</li> <li>· (국내) SKT에 연구팀이 있었으나 최근 스피노프 및 특허를 해외에 매각. 전반적 기반 미흡</li> </ul>	

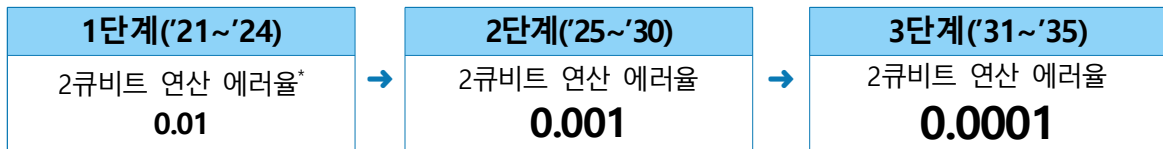
◆ (선도형) 탐색단계인 반도체 양자점, 고체결합, 위상차 방식 등에 대해서는 연구자의 창의적 아이디어에 기반한 상향식(Bottom-up) 지원

반도체 양자점	고체결합	광자	위상차 방식
<p><b>[기술특징]</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>· CMOS 공정과 높은 호환성</li> <li>· 큐비트 얽힘이 어려워 5큐비트 이내 수준</li> <li>· 고순도 실리콘이나 실리콘 동위원소 소재는 해외 의존</li> </ul> <p><b>[국내외 수준]</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>· (해외) Si-2, Ge-4큐비트</li> <li>· (국내) Si-1, GaAs-3큐비트</li> </ul>	<p><b>[기술특징]</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>· 점결합 발생위치 제어가 어려움(핵심기술)</li> <li>· 소재(다이아몬드) 의존도가 높음</li> </ul> <p><b>[국내외 수준]</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>· (해외) 10큐비트 수준 시연</li> <li>· (국내) 3~4큐비트 수준 연구</li> </ul>	<p><b>[기술특징]</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>· 상온에서 동작하는 안정적 큐비트 구현 가능</li> <li>· 20큐비트 수준까지 구현가능 (확장성 제한)</li> </ul> <p><b>[국내외 수준]</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>· (해외) 4~6개의 광자를 집적광학계에 넣어 실험</li> <li>· (국내) 1~2개의 광자 구현</li> </ul>	<p><b>[기술특징]</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>· 양자오류수정이 필요 없어 성공 시 파급효과는 매우 큼</li> <li>· 아직 기술발전 단계가 낮음</li> </ul> <p><b>[국내외 수준]</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>· (해외) 연구실 수준의 가능성 시연(마이크로소프트)</li> <li>· (국내) -</li> </ul>

- **(오류 보정 기술)** 안정적인 양자컴퓨팅 구현을 위해 양자 교란 등으로 발생하는 오류에 대한 복구·보정 기술 확보

※ 고전 컴퓨터시스템에 사용되는 오류 정정 기법은 양자컴퓨팅 시스템에 적용 불가

- 오류율을 단계적으로 줄여 장기적으로 범용으로 사용할 수 있는 오류정정 양자컴퓨팅 기술(논리 큐비트) 확보



※ 현재 국내 오류율 수준은 0.1~0.2(초전도 방식 기준)

- 양자게이트 제어 정확도 향상을 위해 양자오류 보정코드를 개발하고, 물리적 오류 모델을 이용한 오류 제거 등 양자오류 완화연구 지원

- **(알고리즘)** 양자컴퓨팅의 특징을 활용\*하여 고전 컴퓨터에 비해 획기적인 속도로 계산을 수행할 수 있는 알고리즘 개발

\* 양자컴퓨팅은 양자병렬성이라는 특징을 통해 특정한 유형의 계산을 일반컴퓨터와는 비교할 수 없을 정도로 빨리 수행할 수 있는데, 이러한 양자병렬성을 이용하기 위해서는 특수 알고리즘이 필요

- 활용도가 높고 분야별 레퍼런스가 될 수 있는 최적화 계산, 양자 기계학습 등 특정 문제\*를 푸는 대표 응용알고리즘 개발

\* 시뮬레이션(화학, 제약, 신약, 전기 배터리), 최적화(교통체증, 물류경로, 작업 스케줄링, 금융)

- 활용에 연동되는 다양한 알고리즘을 개발하여 라이브러리로 제공

- **(응용SW)** 사용자 편의성 및 접근성 증대를 위한 양자 컴퓨팅 프로그래밍 환경 구축

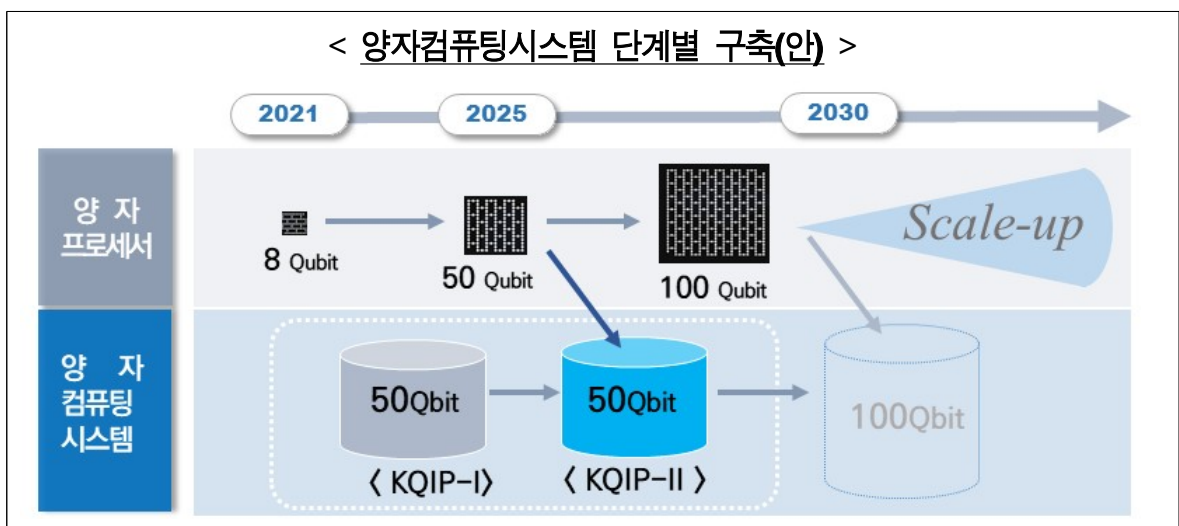
- SW 설계 및 검증 기술, 양자 컴파일러(큐비트 매핑, 게이트 스케줄링 등), 미들웨어 등 개발

- 플랫폼별 구동방식을 면밀히 모의한 환경에서 SW 기술 구현 및 실환경 통합형\* SW의 단계적 구현을 위한 개발 역량 확보

\* 양자컴퓨팅 HW 종류에 관계없이 사용되는 시스템 SW(front-end compiler 등)

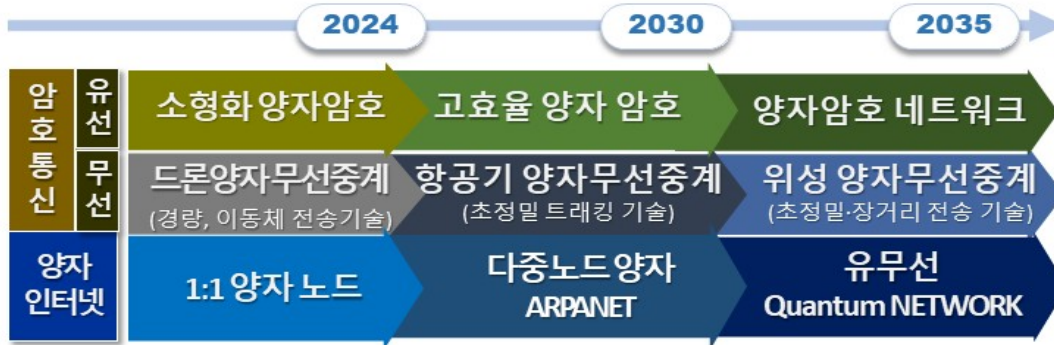
## ② 양자컴퓨팅 시스템 통합 구축

- **(시스템 요소 기술)** 소자, 냉각기, 제어기 등을 최적화하여 시스템으로 구축하기 위한 요소 기술(원천 및 엔지니어링) 개발
  - 1단계(~24) 50큐비트급 양자컴퓨팅 시스템 구축에 필요한 시스템 설계·제어·SW 기술 등 개발에 주력
    - **(시스템 설계·제어)** 양자신호의 전달(감쇄·증폭·집적화 등) 및 상태유지(초저온)를 위한 양자 소자·프로세서 제어시스템의 설계 최적화·고신뢰화 기술 등
    - **(시스템 SW)** 고속·실시간 제어를 위한 고신뢰 신호 생성·분석기, 최적 구조화 기반의 양자회로 구동기술 및 시스템 검증·디버깅 기술 등
  - 원거리의 다수 양자컴퓨팅 시스템을 연결, 대규모 리소스 효과를 내기 위한 양자 인터페이스 기술 개발
- **(시스템 통합구축)** 국내 소자, 시스템, SW 기술 역량을 집약하여 '한국형 양자컴퓨팅 시스템(KQIP\*)' 구축 추진
  - \* KQIP : Korea Quantum Innovation Platform
  - **(1단계)** 국내외 역량을 활용하여 50큐비트급 양자컴퓨팅시스템(KQIP-I)을 구축('22~'24)하고, 국내 자체 클라우드 서비스 제공('25~)
  - **(2단계)** 1단계 시스템 구축 노하우를 토대로 주력으로 선정된 소자 기반의 2단계 시스템(KQIP-II) 구축('26~'28)



## 2] 고도의 보안환경에서 양자세계를 연결하는 초신뢰 양자통신기술 개발

- ◆ 국내 양자 기술 중 앞서있는 양자암호통신은 시장성 강화 및 전송 기술 고도화와 무선을 통한 커버리지 확장으로 기술 우위를 지키고,
- ◆ 양자컴퓨터, 양자센서를 연결하는 양자인터넷 기술의 핵심 기초·응용기술개발을 통해 양자기술 선도국 대열에 진입



### ① 유무선 양자암호통신 핵심기술 고도화

- **(유선)** 초기 상용화 단계의 우리 양자암호통신 기술을 고도화하고, 시장성 있는 기술을 발굴하여 산업 활성화의 기반 마련
- 단일광자검출기(~'23) 및 고효율 송수신 부품(~'25) 등 양자암호통신 주요 부품·장비를 세계적(美·EU) 수준으로 고도화
  - 양자암호 프로토콜 개발, 소형화·저가격화 기술개발(~'24)과 국제 표준·특허 선점 등 시장성 강화 병행을 통한 글로벌 시장 확보 추진
    - ※ 암호화 SW모듈 개발 및 소형화(기존 대비 30%), 비용 절감(50%) 추진
- 업힘기반 미래 양자암호통신 기술, 양자암호통신 소재·부품·장비 등 양자암호네트워크의 기반이 되는 미래 핵심원천기술\* 개발 지원
  - \* 업힘기반 양자암호통신 전송기술(~'26), 고신뢰 양자채널 광모듈 개발 등(~'27)

#### < 참고 : 양자내성암호(Post Quantum Cryptography, PQC) 지원 >

- **(R&D 지원)** 양자기술을 활용하지 않으나 양자컴퓨팅 기술 발달에 따라 국제 표준화 동향 등을 고려하여 PQC 안전성 검증 기술 등 양자내성암호 관련 R&D 지원
  - ① PQC 안전성·성능 검증(~'24), ②미래컴퓨팅 대비 암호안전성 검증(~'26)
- **(도입환경 구축)** IoT기기, 스마트시티 등 실제 환경에서 양자내성암호 성능 검증을 위한 시범사업과 시험환경 구축\*(22년~)
  - \* PQC 도입 컨설팅, 성능·안전성 검증 시험환경, 응용기술 개발, 이용 가이드라인 개발·배포 등

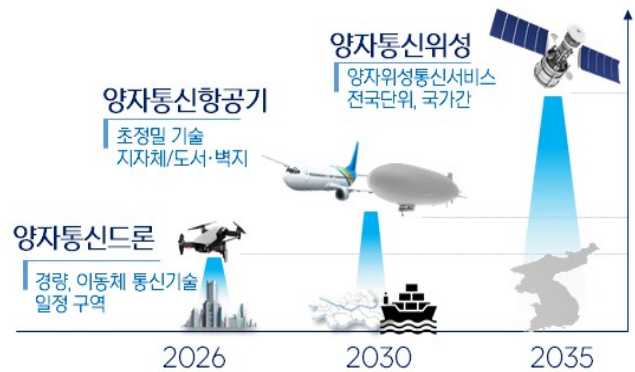
□ **(무선) 유선 양자통신의 한계를 보완, 양자암호통신의 활용성을 확장하는 무선 양자암호통신 기술 개발**

- 현금인출, 모바일 결제 인증 등 일상에서 활용되는 **초소형 휴대용 무선 양자암호통신 기술(근거리(2m內) 집적화칩(10cm 이내) 개발(~'26)**
- 광케이블 미설치지역, **해양, 우주까지 공간 제약 없는 암호통신 적용을 위해 초정밀 트래킹·경량화·장거리 무선 양자암호통신기술 확보**

- 무선 양자암호통신용 **초정밀·경량화 기술을 단계적으로 개발** < 무선양자암호통신 기술개발 단계별 목표 >

- 산업적으로 활용 가능한 드론, 항공기 등에 **단계적으로 개발·실증**

※ 대기권 무선양자암호전송(~'26), 우주용 무선양자암호통신 부품(~'28) 개발



② 양자인터넷 구현을 위한 핵심기술 개발

□ 중장기적으로 개별 양자 기기(양자컴퓨터, 양자 센서)를 연결하는 미래 양자인터넷을 구현하기 위한 원천기술 확보 추진

- 인터넷 연결의 기반이 되는 라우터와 같이 양자 기기를 연결하고 네트워크 환경을 구성하는 **양자 중계기 핵심 기초·응용기술 개발**

- 초기 단계 **단순 릴레이형 양자 중계기**를 우선 개발(~'26)하고, **양자메모리 기반 양자 중계기 개발을 위한 기술력 확보**(~'35)

※ 확정형 단일광자소스, 양자메모리, 파장변환기 등 요소기술을 집중적으로 개발하되, 다양한 방식(광, 점결합, 원자 등)별 가능성을 연구·평가하여 실용적 양자중계기 개발

- 기존 인터넷과 연계 가능한 유무선 양자네트워크 초기 모델(Quantum Network) 구현을 위해 주요기술을 단계적으로 실증

- 1단계 **1:1 양자노드** (km급 ~26년) → 2단계 **다중노드 양자 ARPANET**(수십km급, ~30년) → 3단계 기존 인터넷 연계 **유무선 Quantum Network**(중계기 초기 모델, ~35년)

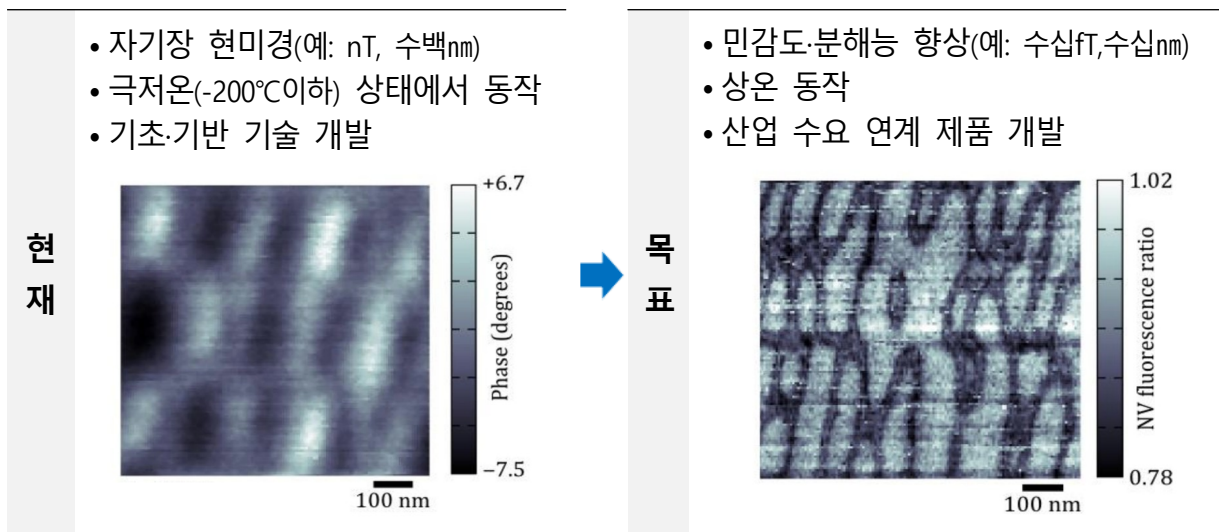
※ 양자 소자 특성 모델링, 양자채널 네트워크 분석, 네트워크 안정성 평가 및 양자SDN 제어연동 추진

### 3 산업 경쟁력을 획기적으로 높이는 초정밀 양자센서 기술 개발

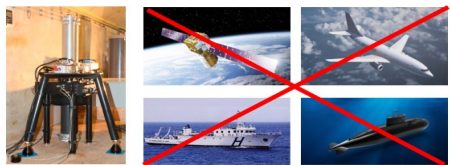
- ◆ 소형화, 고속측정 등을 위한 신소재·신소자 원천기술을 개발하고,
- ◆ 배터리·반도체 등 양자센서 수요가 높은 산업에 수요 연계형 기술개발로 상용화를 촉진하여 연구·산업의 선순환 고리 확보



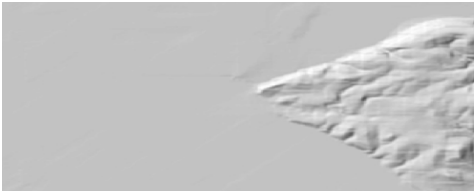
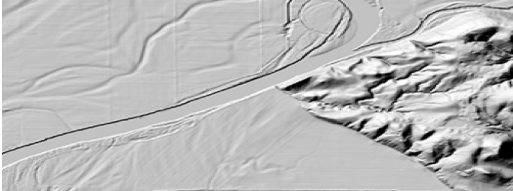
- **(자기장)** 산업 수요와 연계하여 기존 상용기술보다 **100배 이상**의 민감도·공간 분해능을 가진 자기장 측정 센서 개발로 첨단산업분야 혁신 창출
  - 센서의 **민감도·분해능을 고도화**하고, 다이아몬드 활용 소재 등 신소재·신소자 원천 기술을 개발하여 상온동작 실현(~'26)
    - \* 기존의 자기장센서는 수 nT( $10^{-9}$ ) 정도를 측정할 수 있으나 약 십만배 감도가 좋은 상온동작 양자자기장 센서로 수십 fT(뇌자도,  $10^{-15}$ ), 수 pT(심자도,  $10^{-12}$ )의 신체 발생 자기 측정 가능
  - **배터리 전기화학적 원리 규명, 반도체소자(국소부위) 누설전류 측정** 등에 실증(~'26), **미세암·뇌질환 검진용 자기공명영상·뇌자도 측정**(~'30)



- **(관성)** 기존 대비 **10배 이상 정밀도**의 이동형 가속도(양자compass 포함) 측정센서로 해양자원탐사, 지진/화산 예측 등 과학/안전 분야 혁신 촉진
  - 초정밀 가속도 측정을 위한 고순도 원자가스 발생기, 양자물리간섭계, 소형화·안정성을 위한 칩기반 원자포획·저잡음 포토닉스 소자 신기술 개발(~'26)
  - 양자**compass**, 중력센서 및 중력지도\*를 이용한 **無GPS 항법**, 자원탐사 및 자연재해 예측 시스템 등 혁신 제품 개발(~'30) 추진
    - \* ESA(유럽우주국)는 비행기·선박에 **1mGal(3m정도의 높이 차)급** 양자센서를 탑재하여 중력지도 작성

<p><b>현재</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 지구 중력의 1/5억 감지</li> <li>• 이동 측정 불가(연속 동작 불가)               <ul style="list-style-type: none"> <li>- 물체 낙하로 중력값 왜곡</li> </ul> </li> <li>• 수 m급</li> </ul>	➔	<p><b>목표</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 가속도 측정 정밀도 10배 이상 향상</li> <li>• 위성, 선박, 항공기 등 이동체에서 연속 측정 가능</li> <li>• 수십cm급으로 소형화</li> </ul>
		

- **(이미징)** 광학현미경 대비 **10배 이상 분해능**을 확보, 양자 얽힘을 이용, 가시적 관찰이 어려운 대상을 센싱하여 의료·첨단 산업 분야 혁신
  - ※ 예) 전자현미경에서는 관측이 힘든 살아있는 코로나 바이러스 등의 분석 활용, 숨은 물체 감지 등
  - 산업 수요와 연계된 이미징 센서 구현을 위해 **고품질 다파장 단광자광원, 다중양자얽힘광원, 고속광자수분해능 검출기, 이미징 개선 알고리즘** 등 개발(~'26)
  - 반도체 설계 및 의료·미생물학용 **양자현미경, 양자 리소그래피, 초장거리 이미지 획득(양자라이다)** 등 플래그쉽 제품 개발(~'30)

<p><b>현재</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 일부 영역 광학으로 관찰 불가               <ul style="list-style-type: none"> <li>- 바이러스(100nm) 관찰 불가</li> <li>- 원거리 물체 관측</li> </ul> </li> <li>• 100nm 이하 동영상 관찰 불가</li> </ul>	➔	<p><b>목표</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 고분해능 이미지 획득               <ul style="list-style-type: none"> <li>- 수 nm급 분해능으로 바이러스 관측</li> <li>- 광학 관측이 힘든 원거리 물체 관측</li> </ul> </li> <li>• 100nm 이하 동영상 관찰 가능</li> </ul>
		

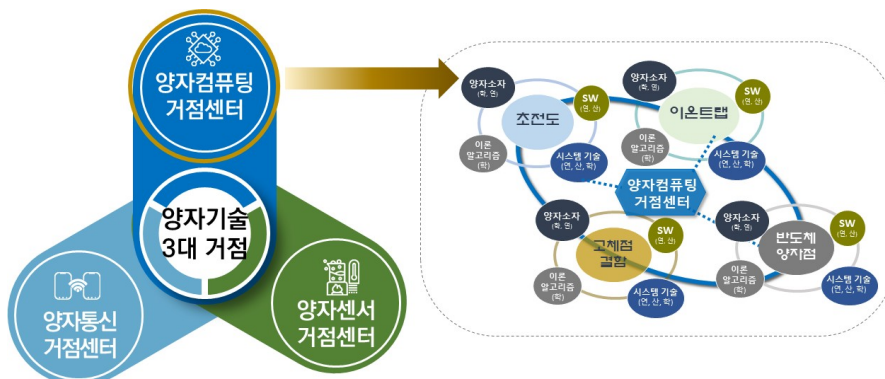
## 2 전문인력 확보 및 국내외 협력 기반 구축

- ◆ 양자기술 분야는 학문적 난이도가 높아 고급 전문인력이 필요하나, 국내 전문 인력이 절대적으로 부족한 만큼,
- ◆ 전문 인력을 지속적으로 확충하는 한편, 국내외 인적자원을 최대한 활용하고 산학연이 함께하는 협력 생태계 구축 필요



### 1 거점 중심의 협업 체계 구축 및 글로벌 협력 강화

- **(연구-교육 허브)** 컴퓨팅, 통신, 센서 3대 분야별 허브기관을 지정, 연구-교육의 유기적 지원 체계 구축('21~)
  - 각 거점을 중심으로 경쟁 기술 플랫폼별 거점기관(Hub)-협력기관(Spoke)을 지정하여 경쟁과 협력에 기반한 기술개발 추진
    - ※ 예를 들어, 양자 컴퓨팅의 경우, 시스템 통합 기관(출연(연) 중심) 을 거점기관(Hub)으로 소자, 알고리즘·SW, 기반기술 관련 협력기관(Spoke)이 산·학·연 공동연구 추진
  - 각 거점별로 개발 목표 및 공동연구과제 도출, 성과 교류·점검, 석박사급 공동 교육훈련 등을 통해 소통·융합 강화
  - 양자통신연구센터, 양자센서연구센터, 양자정보연구센터(컴퓨팅) 3대 거점을 연계하여 정례적으로 성과 발표 및 교류



#### ◀ 양자 교육연구 거점

: 거점을 중심으로 플랫폼 간 경쟁을 통해 우수한 성과 분야에 대한 지원 강화 (양자 컴퓨팅 분야 예시)

- **(집단연구) 적용 분야**(컴퓨팅/통신/센서) 및 **소자 방식**에 구분을 두지 않는 기초·기반 기술\*에 대해 **대학 중심의 집단연구** 방식으로 장기 지원

\* 양자결맞음, 양자소재, 마이크로파 생성·제어, 나노패 공정기술(미세가공, 3차원 적층 등) 등

< 양자 기반 기술 관련 선도연구센터 현황(단위 : 억원, 명) >

센터명	주관기관	과제기간	총예산	참여인력
응집상 양자 결맞음 연구센터(SRC)	KAIS	'16-'23	85.6	83
확장형 양자컴퓨터 기술융합 플랫폼 센터(ERC)	포스텍	'19-'26	135	62
모듈과 공간의 양자구조 연구센터(SRC)	서울대	'20-'27	104	26
양자동역학 연구센터(SRC)	포스텍	'20-'27	104	60
양자나노과학연구단(IBS연구단)	이화여대	'17~	302(~'20년)	31

- **(글로벌 협력)** 해외 우수 연구소·대학 등과의 인력교류 중심 **국제공동 연구 확대 및 국내외 협력 네트워크 운영**

- **선도국과의 기술격차 빠른 단축 및 유망 신기술의 조기 선점을 위해 해외 석학 초빙\*** 등을 통한 실질적 공동연구 추진 지원

\* IBS연구단 지정, Brain Pool, 글로벌연구네트워크 확산 등

- 해외 기술동향 습득 및 우수연구인력 확보를 위해 **평가위원 초빙, 정기 교류 프로그램 운영** 등을 통해 해외 협력네트워크 활성화

- 기술패권 경쟁에 따라 강화되는 전략기술 수출입 통제에 대응하기 위해 **주요 선도국과의 정부 간 협력 강화**

- 양자·다자 정부 간 채널을 통해, **공동연구 및 인적 네트워크 강화, 양자 연구용 소재·부품·장비 도입을 위한 수출입 규제 완화 협의** 등

※ 미국은 對 중국 기술패권 경쟁을 의식, 양자기술을 전략기술에 포함하여 수출입 관리를 강화 (미국 안보 우위를 위한 20대 핵심유망기술, 美 국가안보위원회, '20.10)

**< 참고 : 글로벌 기술 블록화와 미국의 양자 기술 수출입 통제 현황 >**

▶ 미국은 2018년 제정된 수출통제개혁법(ECRA)에 따라 산업안보국(BIS) 주관으로 “중국제조 2025” 관련 첨단 기술과 “14개 신기술 및 기초기반 기술(양자정보 및 양자센싱 기술 포함)”을 상거래 통제 목록에 포함하고, 정기적으로 검토하는 프로세스를 운영

▶ **양자 소자 제작을 위한 고사양의 소재·부품 대부분을 미국에 의존 중**으로, 미국의 수출통제에 대응 필요

\* 광학변조기(모듈레이터), 극저잡음 증폭기, RF 차폐 물질 등

## 2 기술 경쟁력 확보를 위한 인력 양성 지원

- **(전문인력 양성)** 학제 간 융합 기반의 교육·연구를 통한 양자 핵심 인력을 '21년 총 150명에서 '30년 총 1,000명 수준으로 확대
  - 대학, 출연(연)을 중심으로 형성한 연구-교육 거점(Hub)을 중심으로 석·박사급 양자 연구인력 지속적 배출 지원
  - 석·박사 대상으로 양자 이론·실습·프로젝트를 통합 제공하는 교육 프로그램 신설·제공

### < 양자 박사급 교육 프로그램(예시) >

- (이론) 교육-연구거점 중심으로 복합·다학제 기반의 대학 간 공동과정운영
- (실습) 출연(연)·나노팜 등의 인프라를 활용한 현장형 실험·실습 교육 제공\*
  - \* 양자정보이론, 광학, 컴퓨터공학, 냉동과학, 전자기학 등 이론 교육과 양자엔지니어링용 나노팜 공정 교육을 위한 설비 등을 종합 제공
- (프로젝트) 산업계 매칭을 통한 프로젝트 과정(기업 매칭 최대 50%) 포함
  - ☞ 1년 이론 수업 + 2년 연구·실습 + 1년 기업 인턴십 총 4년 과정으로 구성
  - ※ 英 EPSRC는 기업 파트너십을 기반으로 박사급교육센터 3곳(브리스톨大, 임페리얼 칼리지, UCL)을 운영('14~'22, 1,420만 파운드/약 211억원+α)

- **(기초교육 확대)** 기존 인식을 뛰어넘는 양자 세계의 체화 인력으로서 초·중·고등학생 대상 양자 기초교육(Quantum Native 육성) 추진
  - 국공립 과학관용 전시·프로그램 개발, 초중고 양자과학교실 등 실시
  - 영재학교·과학고를 중심으로 양자 R&E(연구&교육) 과제 발굴 지원
  - 대학 내 수학·물리·전기전자·컴퓨터 등 관련 학과를 대상으로 양자 교과목 및 학제간 융합 기반 교과과정 개발·적용 지원

### 3 특화 연구 인프라 확충 및 연계·고도화

◆ 소자, 알고리즘 등 핵심 요소기술을 검증하기 위한 양자컴퓨팅 시스템이 반드시 필요하여 단계적으로 자체 시스템 구축 추진

※ 시스템구축 없이는 요소기술 개발 효과가 제한적이며, 해외 클라우드 서비스를 계속 이용할 경우 기술 종속 우려

◆ 개별 기관 및 민간에서 구축하기 힘든 양자 전용 팹(파운더리) 등 공공 인프라 구축·운영 필요



#### 1 연구용 양자컴퓨팅 인프라 단계적 구축

□ **(양자 가상머신)** 고전 컴퓨터를 활용, 양자컴퓨터 작동 원리를 모사한 컴퓨터 시뮬레이션\*을 개발하여 연구자 활용 지원('21~)

\* 현존 세계 최고 슈퍼컴퓨터로 46큐비트급 양자컴퓨팅 시뮬레이션까지 가능

○ **KISTI**(국가초고성능컴퓨팅센터 슈퍼컴 5호기), **ETRI**(컴퓨팅 인프라) 등 출연(연) 인프라를 기반으로 구축

○ 양자 회로·알고리즘, 프로그래밍 작동성 사전 검증, 양자컴퓨팅 시스템 컴포넌트 성능 검증 지원

○ 우선 '21년까지 가상머신 인프라(40큐비트급)를 구축·개방('21)하고, 활용성과·수요를 평가하여 추가 구축 및 성능 개선('22~)

- **(양자 컴퓨팅 테스트베드)** 구성요소 및 알고리즘에 대한 검증을 지원하기 위해 '한국형 양자컴퓨팅 시스템(KQIP\*)'를 테스트베드로 제공

\* KQIP : Korea Quantum Innovation Platform

- (1단계) 50큐비트급 국내 자체 양자컴퓨팅 시스템(KQIP I)을 기반으로 국내 연구자들에게 클라우드 서비스 제공('25~)
- (2단계) **KQIP I·II**를 테스트베드로 제공하여 양자알고리즘·SW에 대한 연구·검증 및 소자 및 구성요소 시험 검증 지원('29~)

- **(해외 클라우드 서비스)** 국내 양자컴퓨팅 시스템(K-QIP) 구축('24), 전 알고리즘·SW 연구를 위한 해외 클라우드 서비스\* 활용 지원('20~'24)

- 국내 자체 양자컴퓨팅 시스템 기반 클라우드 서비스의 개시 이후, 평가를 통해 해외 클라우드\* 지원 유지 필요성 검토

\* IBM Q네트워크, 마이크로소프트(Azure), 아마존(아마존 웹서비스) 등



## 2 양자 소자 제작 공정 지원 인프라 구축 및 연계 강화

- **(양자팹 구축)** 고비용·고사양 장비 및 최상의 공정기술을 보유한 양자 전용 팹(파운더리) 구축 및 세계적 수준의 서비스 제공('20~)

- (1단계) 초기 수요를 고려하여 나노팹과의 효율적 연계·활용을 고려한 양자팹 설계·구축\*, 공정 개발 및 사용자 교육 등 지원('21~'24)

\* 초기에는 초전도 방식 중심으로 병목공정 해결에 집중하고, 단계적으로 쇼공정 고도화

- (2단계) 양자소자 수요 확대에 따른 전담기술 인력을 통한 소자의 설계·제작 컨설팅 및 제작·시험평가 대행 등 전문 서비스 제공('25~)

※ 대상 플랫폼을 확대하되, 기술 경쟁을 통한 플랫폼 발전 양상을 반영

< 양자팹 구축 사업 개요 >

- (사업내용) 기존 반도체 공정설비로는 어려운 양자소자 특화공정에 대해 전용 설비 구축 및 나노팹 장비 연계를 통해 제작 지원
- (사업기간 및 예산) '20~'24/ 235억원
- (위치 및 규모) 한국나노기술원(KANC) 및 성균관대(수원)내 약 470m<sup>2</sup> 규모
- (주요장비) 증착, 노광, 식각, 후처리 장비 등
  - ※ 초전도 박막증착 스퍼터, 전자빔 증착기, 광학적 접촉 노광 장비, 고속 전자빔 리소그래피 등



□ (장비 공동활용) 전국적으로 산재하는 양자 소자 공정 인프라의 연계 활용 지원

- 전국 양자 소자 제작 인프라\* 보유 기관 및 관련 주요 공정(증착·패턴·식각) 설비·장비를 목록화하여 관리

\* 국가 나노팹 인프라(한국나노기술원, 나노종합기술원 등), 출연(연)(KIST, ETRI, 표준(연)), 서울대(반도체공동연구소), UNIST, DGIST 등 대학 부설 나노 인프라 시설 등

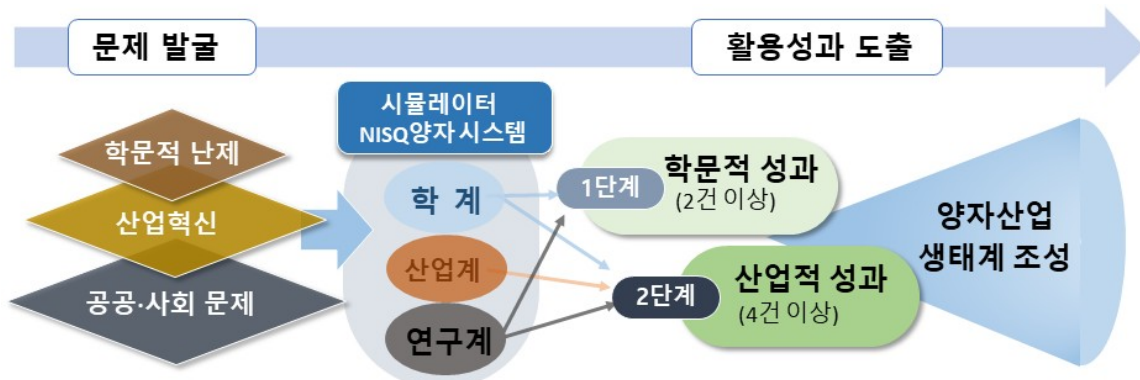
- 연구용 양자 소자 제작 수요에 대해 분산된 공정 인프라를 연계하여 제작을 지원하는 매칭 서비스 지원

※ 양자 소자 제작은 공정 표준화 전으로 주로 반도체 공정 장비를 조정하여 제작에 활용

## 4

# 양자 기술의 활용 및 산업 혁신 촉진

- ◆ 양자기술 시장 자체도 중요하지만 양자기술을 활용한 경제·사회 전반에 걸친 혁신촉발의 2차 효과가 더 클 것으로,
- ◆ 조속히 민관 파트너십을 통해 양자컴퓨팅 기술 활용이 유용한 문제를 지속 발굴하여 파급력 있는 성과 창출 필요



### 1 경제·사회적으로 유용한 문제 발굴

- **(학문적 난제)** 과학·공학 등 학문 분야에서 양자 기술 활용이 적합한 난제 발굴
  - (예) 화합물 구조, 고에너지 물리, 복잡계 통계특성, 양자중력 등
- **(산업혁신)** 산업계 수요를 토대로 부가가치 창출이 가능한 문제를 도출하여 기술개발에서 실증까지 민·관 공동프로젝트로 추진
  - (예) 금융, 신약 개발, 배터리·비행체 설계, 물류, 공정(작업 스케줄링) 최적화, 첨단의료 고도화(뇌자도 측정, 미세 국소암 진단) 등
- **(공공·사회)** 국방, 공공·사회문제 해결 분야 등에 양자기술 활용 문제 도출
  - (예) 교통량 분석, 비행제어, 작전 지휘/통제, 사이버 공격/방어 대응, 야간감시(국방, 치안), 싱크홀/매설물(가스관) 탐지 등

## 2 민관 파트너십에 기반한 활용 성과 사례 창출

- **(중점 과제 선정)** 우리 주력 산업 분야와의 연계성, 기술 발달 단계를 고려한 단계적 접근으로 활용성과 조기 창출
  - **(양자컴퓨팅)** 발굴된 문제에 타겟화된 양자 시뮬레이터 및 NISQ 양자컴퓨팅 기술 적용을 통한 양자 유용성 확보
    - 1단계(~'24)에서는 학문 분야 중심으로, 2단계(~'30)에서는 반도체, 배터리 등 우리 주력산업 분야를 중심으로 양자 이득 실증사례 창출
  - **(양자 통신)** 상대적으로 높은 기술 성숙도로 조기 상용화가 가능한 양자암호통신의 시범 서비스 등을 통한 산업 확산 지원
    - 금융·의료·산업 등 유선 양자암호통신 시범서비스 적용·확산('20~), 국방 분야 등에 무선분야 양자암호통신 기술 개발·적용('28~)
  - **(양자 센서)** 국내 수요와 연계하여 목적지향적 센서 제품 개발 추진
    - 주력 산업 관련성(반도체·자동차 등), 국방·공공(잠수함·스텔스 탐지 등)

< 주력산업분야와 연계한 활용 분야(예) >

구 분	반도체	의료·신약	배터리	자동차
<b>양자 컴퓨팅</b>	· 반도체 공정 프로세스 최적화	· DNA 구조분석을 통한 신약개발,	· 배터리 설계	· 교통·물류 경로 최적화
<b>양자 센서</b>	· 반도체 미세구조 설계 · 반도체 공정용 양자노광	· 정밀 MRI · 뇌자도 측정 · 미세암 진단	· 배터리 누설 전류 탐지 분석	· 자율차용 양자 라이다

- **(민관 공동프로젝트)** 문제 발굴 - 해결방안 모색(R&D) - 실증 순 과정에서 민관이 함께 추진하는 산학연 공동 프로젝트 방식으로 지원
  - 양자 학회·포럼 등을 중심으로 챌린지 또는 캐글(Kaggle)\* 방식을 통해 문제해결 방안을 산업계와 공동 모색하고, 이를 기반으로 서비스 모델 발굴
    - \* 기업·단체에서 데이터와 해결과제를 등록하면 데이터 과학자들이 경쟁하여 해결모델을 개발
  - 발굴된 서비스 모델의 산업화를 위한 민관 공동연구, 기술 이전 및 자문을 실시

### 3 양자 시장 창출을 위한 산업화 지원

- **(지식재산)** 양자 R&D 투자 효율성 제고를 위한 IP전략수립 지원
  - 양자기술 분야별로 주요국가 및 핵심 플레이어(기업, 연구소, 대학 등)의 논문·특허 동향 분석 결과 제공
  - 양자컴퓨팅, 양자통신, 양자센서 등 관련 기술 개발 초기에 특허 공백 영역을 분석하여, 공백기술 분야의 우수특허 확보 지원
    - ※ 연구자들 대상으로 지식재산 인식제고, 지식재산 전략 등에 대한 교육프로그램 운영
- **(표준화)** 연구 단계에서부터 향후 산업화를 고려하여 국제 표준화에 대한 전략적 지원을 추진
  - 관련 기관·단체 및 산학연 전문가로 양자 표준화 연구반을 구성·운영
  - 국제 공동연구와 국제 표준화 연계, 국제 표준화 그룹\* 참여 등을 통해 국제 표준화 동향 및 표준 확보를 위한 글로벌 네트워크 구축 지원
    - \* 양자암호통신은 ITU-T SG13(네트워크), SG17(보안) 참여하여 표준 공동 개발 중
- **(벤처·창업 지원)** 양자 통신·센서·컴퓨터 및 관련 파생 기술을 기반으로 하는 벤처·창업 지원으로 산업 생태계 활성화 추진
  - 연구소랩의 벤처기업화(Lab-to-Startup), 대학·연구소의 멘토링 등 지원
  - 중소·벤처기업이 개발한 양자소자·부품 및 장비 등에 대한 시제품 제작→시험·검증·인증→기술사업화 지원
- **(초기시장 조성)** 양자 산업의 기술적 성숙도에 맞추어 단계적인 시험·실증 기반을 조성, 기업의 상용화 및 시장 수요 창출을 지원
  - 산업 여건의 성숙을 고려하여 산학연의 상용 기술 연구 및 제품 개발을 지원할 수 있는 테스트베드를 구축 추진
    - ※ 시장 및 산업 여건과 기술성숙도를 고려하여 양자산업클러스터 구축을 검토
  - 시장 상황을 고려하여 양자기반 서비스의 실증을 통해 수요 기반으로 양자 기술의 발전을 촉진하고 초기시장 조성을 지원
    - ※ 예) 폭스바겐·오렌지텔레콤은 스페인 바르셀로나에 양자컴퓨터를 활용하여 교통 제어를 실증

## 5 양자 R&D 사업 투자 전략성 강화

◆ 투자 전략의 효율적 이행을 위해 사업 구조 개편 및 신규 투자 등 추진 방향을 설정하고 차년도 R&D 예산 배분·조정 반영 추진

□ **(역할 분담)** 부처-출연(연) 사업, 정부-민간 투자 역할 분담 및 연계 추진

○ **(부처-출연(연))** 거점(Hub)-협력(Spoke) 체계를 중심으로 기존 정부 사업과 출연(연) 주요사업 간 내용 조정 검토

- 신규 사업(과제)은 **역할 분담(안)**에 따라 중복되지 않도록 기획·편성

< 부처 - 출연(연) 사업 간 역할 분담(안) >

정부 연구 개발 사업 (공모)	기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 기술 분야 간 또는 산·학·연 간 협력 연구, 대학 중심의 기초·이론 연구, 공동활용 연구인프라 구축 등</li> <li>- (목적 기술) 양자컴퓨팅 기술개발, 양자센서핵심기술개발, 양자암호통신 기술개발, 양자생태계 기반조성 등</li> <li>- (기반 기술) SRC/ERC, 개인기초연구지원 등</li> </ul>
	인력	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 대학을 중심으로 핵심 연구인력 양성 지원</li> </ul>
출연(연) (주요사업)	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 각 출연(연) 강점 기술을 기반으로 장기 연구를 통한 특정 기술적 난제 해결을 위한 연구</li> </ul>	

○ **(정부-민간)** 1단계('20~'24)는 초기 기반 확충을 위해 정부 주도로 투자하고, 2단계('25~'30)부터는 활용 성과 창출을 위한 민·관 공동 투자 비중 확대

□ **(Q-플래그십 프로젝트)** 양자기술(컴퓨팅, 통신, 센서)을 활용한 산업혁신·공공난제 해결 프로젝트 추진("혁신도전프로젝트"로 추진)

○ 문제정의로부터 임무설정, R&D 수행, 현장적용(실증)으로 이어지는 쉰 과정을 학·연·산 협력 하에 공동으로 추진

\* 문제 발굴 및 사업 기획('21) → PM 선정 및 R&D 착수('22)

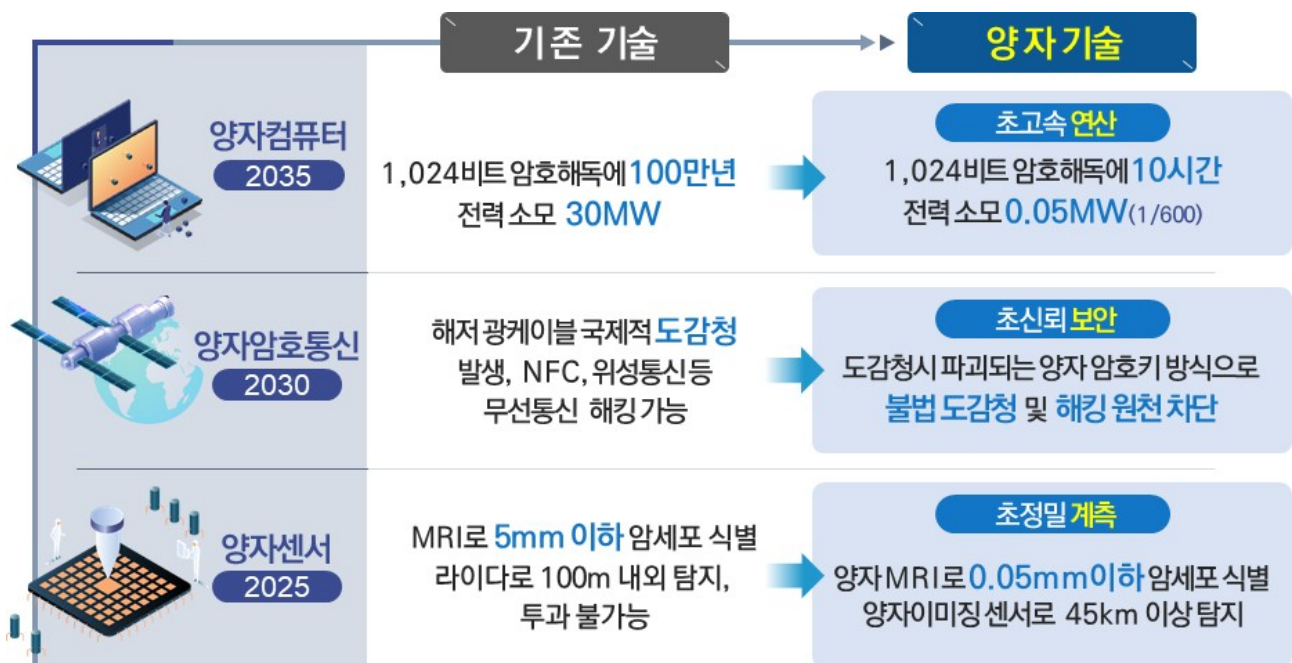
○ 기초·응용 기술을 포괄하고 기술집약적 성격과 시장 파급력이 큰 목적지향적 기술 및 제품 개발

< Q-플래그십 프로젝트(예시) >

- (예시 ①) 최적화된 반도체/배터리 공정 설계를 위한 양자시뮬레이터 및 미세공정(나노미터 이하)을 처리를 위한 양자 자기장 센서 개발
- (예시 ②) 높은 보안성을 요구하는 군용/해상 통신용으로 수 시간 운행이 가능한 양자드론 기반의 무선양자암호통신시스템 개발

## VII. 기대효과

- 산학연, 민·관의 역량을 총결집하여 협력체계를 구축, R&D 및 산업 생태계를 강화하고, 꾸준히 인력을 양성하여 **2030년대 세계 4대 양자 강국에 진입**
- 디지털 혁명으로 촉발된 **4차 산업 혁명을 양자 혁명(Quantum Innovation)**으로 완성
  - “미시세계 모델링”, “최적 조합 찾기”, “양자 컴퓨팅 기반 AI” 등으로 현재의 컴퓨터로는 불가능한 **과학난제 해결** 및 **수 산업 영역에서 혁신 촉발**
  - 6G, 독자 항법위성 등 커져가는 위성통신에 대한 **정보유출 이슈를 사전 차단**하고, 모든 사물과 사람이 연결되는 **IoT 세상에서 안전한 정보 송수신**
  - **공공·국방·안전 분야에서 국민 삶의 질 향상**, 반도체·배터리·바이오 등의 영역에서 **기존 기술의 한계를 돌파하여 4차 산업혁명의 기반 마련**
- 글로벌 ICT 판도 변화를 주도하고 나아가 **반도체를 잇는 10년 후 우리나라 미래 먹거리 산업으로 육성**



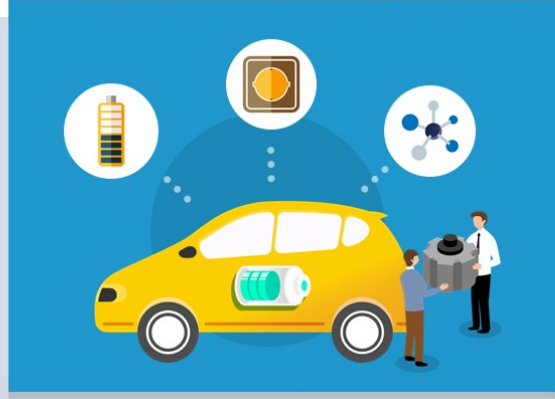
## 〈 양자 컴퓨팅 〉

위험·반복적인 실험없이 실제와 같은 시뮬레이션  
으로 신약, 자동차 소재 개발 및 설계 최적화

**신약개발에서 치료 적용까지**  
평균 12년 내외, 2조원 이상 소요

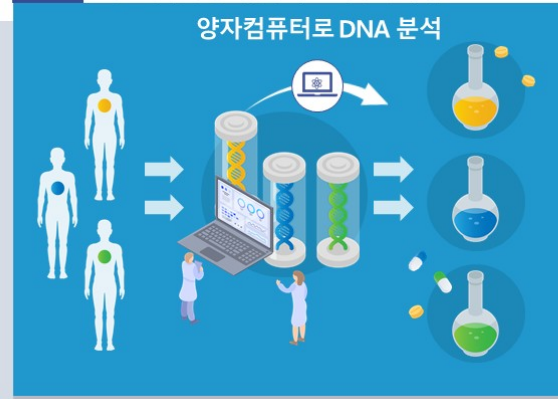


**차량용 소재(연료전지 고분자) 및**  
공정(표면코팅 공정, 고열전도 합금) 효율화



인공지능이 양자컴퓨터를 만나  
인간 수준의 고차원 인공지능 탄생

**유전체 분석 등을 통해**  
개인 맞춤형 정밀의료 구현 가능



**초단기 자율주행 학습을 통해 완전**  
자율주행 구현 촉진



자연 원리 모사로  
에너지를 절감하고 탄소 중립 실현

**식물의 질소 고정 원리를 밝혀 질소비료**  
생산공정 대체로 에너지 절감



**광합성 기작 원리를 밝혀 태양전지 생산에**  
적용함으로써 인류 전력 생산 문제 해결 가능



## 〈 양자 통신 〉

**양자암호키를 사용,  
통신과정에서 불법 도감청  
및 중간 정보탈취를 원천 차단**

송신자

도청자

수신자

훔쳐볼 경우 암호 파괴      파괴된 암호로는 정보파악 불가

**양자통신 위성 개발 타임라인**

- 1992년: 우리별 1호
- 1999년: 우리별 3호, 아리랑 1호
- 2006년: 아리랑 2호
- 2010년: 천리안 1호
- 2021년: 차세대 중형위성 1호, 나노위성 4기
- 2022년: 아리랑 6호, 차세대 소형위성 2호, 차세대 중형위성 2호, 시험용 달 궤도선
- 2023-2024년: 차세대 중형 위성 4호
- 2024년: 차세대 중형 위성 5호
- 2025년: 소형군단위성 1호
- 2026년: 차세대 소형 위성 4호
- 2027년: 차세대 중형 위성 6호
- 2028년: 아리랑 7호, 차세대 소형위성 3호

**양자통신 보안 적용 분야**

- 금융 거래 (은행, 증권)
- 국방 통신 (군사 기밀)
- 의료 데이터 (환자 정보)
- 자동차 통신 (자율주행)
- 스마트 시티 (도시 인프라)

## 〈 양자센서 〉

	미세암 조기진단	뇌기능 측정	지진·싱크홀 측정
건강 · 안전	<p>기존 MRI 3T      양자MRI</p> <p>2cm      5μm      100nm</p>		
산업 혁신	<p>자율차 초정밀 센싱</p>	<p>배터리 검증</p>	<p>無 GPS 항행</p>
			<p>자원탐사</p>

## VIII. 향후 계획

- 관계 부처들은 부처 사업과 출연(연) 사업 간 내용이 중복되지 않도록 역할분담에 따라 사업을 기획하여 과학기술혁신본부에 요구(각 부처, 4~5월)
- '22년 국가연구개발예산 배분·조정 시 반영(과학기술혁신본부, 5~6월)

## 참고 1 국내 양자 기술 주요 연구기관 현황

구분	기관명	조직 및 연구인력	연구비 ('20년)	핵심 역량/성과
출연(연)	한국표준과학연구원 (KRISS)	· 양자기술연구소 · 연구원 : 14명 박사과정/포스닥 : 4명	40억원	· 초전도 양자컴퓨팅 소자 설계·공정 * 8큐비트 초전도 칩 제작 작동 시연, 20큐비트 수준의 설계 및 제작 가능 · 광격자 초저온원자 양자시뮬레이터
	한국과학기술연구원 (KIST)	· 양자정보연구단 · 연구원 : 9명 석·박사과정/포스닥 : 2명	54억원	· 점결함 스핀큐비트 및 양자인터페이스 생성 제어 기술 * 고체결함 3~4 큐비트 생성 · 광학 기반 양자시뮬레이션
	한국전자통신연구원 (ETRI)	· 양자기술연구단 초성능컴퓨팅연구본부 · 연구원 : 20명 포스닥 : 4명	47억원	· 양자컴퓨팅활용기초기술(연산알고리즘 등) · 양자컴퓨팅시스템기술 (프로그래밍언어, 컴파일러, 합성기, 운영체제, 신호처리제어 기술 등) · 반도체기반 양자컴퓨팅 기술 (양자점 반도체 큐비트, 초전도 큐비트 구현)
대학	고등과학원 (KIAS)	· 계산과학부, 양자우주연구센터 · 교수 : 2명 석·박사과정 : 6명	8억원	· 양자정보과학 “이론” 전반 · 양자컴퓨팅, 양자기계학습
	서울대	· 물리천문학부, 컴퓨터공학부, 전기전자공학부 · 교수 : 7명 석·박사과정/포스닥 : 55명	27억원	· 5큐비트급 반도체 스핀 양자 프로세서 칩 설계·공정·양자측정 · 20개 큐비트를 동시 생성하나 큐비트 간 얽힘 미구현 · 이외, 광자기반, 중성원자 기반 양자컴퓨팅, 오류보정 기술 등
	KAIST	· 물리학과, 전기및전자공학부 · 교수 : 9명 석·박사과정/포스닥 : 47명	30억원	· 초전도체 큐비트 측정, 나노급 단일원자 현미경, 양자 계산, 리드버그 양자시뮬레이터 등
	포스텍	· 물리학과, 전자전기공학과 · 교수 : 8명 석·박사과정/포스닥 : 43명	50억원	· 양자얽힘 및 결어긋남현상 제어, 초전도 소자 및 극저온 양자수송 · 양자컴퓨팅 시스템 반도체 설계 · 이온트랩 양자컴퓨터 프로세서 설계
	고려대	· 물리학과 · 교수 : 2명 석·박사과정 : 6명	5억원	· 다이아몬드 NV 센터 기반 양자정보 연구 · 분자 큐비트 기반 양자 기술 개발
	성균관대	· 성균관나노기술원 · 교수 : 2명 석·박사과정 : 4명	2억원	· 5큐비트급 초전도 양자컴퓨팅 소자 설계 및 소자공정 가능 · 극저온 고주파 초정밀 기술기반 양자컴퓨팅 시스템 통합기술

## 참고 2

## 양자 컴퓨팅 소자 방식별 국내외 기술 수준 비교

방식	해외 수준	국내 수준	기술 장벽
초전도	<ul style="list-style-type: none"> <li>IBM*, 구글 등 선도기업들이 시스템화하여 <b>5~65큐비트</b> 수준의 양자컴퓨팅을 클라우드 서비스로 제공</li> </ul> <p>* ('19)27큐비트 → ('20)65큐비트 → ('22)433큐비트 → ('23)1,121큐비트 양자컴퓨터 개발 추진</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li><b>8큐비트</b> 초전도 칩 제작 작동 시연 성공</li> <li>20큐비트 수준의 설계 및 제작 공정 가능</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>초전도 소자의 대규모 집적기술 (3차원 적층기술) 및 극저온 고주파 신호의 증폭기술 부족</li> </ul> <p>※ 해외는 '70년부터 초전도 소자 등 관련 기술 및 연구시설 확보</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>극저온 냉동기 기반의 <b>저잡음 시스템 통합기술</b> 부족</li> </ul>
이온 트랩	<ul style="list-style-type: none"> <li>美 IonQ社에서 <b>11큐비트</b> 급 시스템 확보 및 클라우드 서비스 중</li> <li>해외는 <b>100개 이상 큐비트를 24시간 이상 유지</b></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>연구 초기단계로 <b>20개</b> 큐비트를 동시 생성하나 큐비트간 얽힘 미구현</li> <li>한국은 <b>20개의 큐비트를 10분 정도 유지</b></li> </ul> <p>※ SKT 이온트랩 기반 양자컴퓨팅 연구팀이 있었으나 최근 스피노프 및 특허 해외매각</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>큐비트를 제어하고 얽힘을 구현하는 <b>레이저 기술</b>(주파수, 파워, 펄스 타이밍, 빔의 위치 등 레이저 제어)이 부족</li> </ul> <p>※ 국내는 아직까지 레이저 장비 세트를 완비한 실험실이 전무</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>보다 많은 이온트랩 큐비트를 동시에 포획하고, 장시간 유지하는 <b>이온트랩 전용 극저온 챔버 제작·운영기술</b> 부족</li> </ul>
반도체 양자점	<ul style="list-style-type: none"> <li><b>실리콘(Si) 2큐비트, 게르마늄(Ge) 4큐비트</b> 생성</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li><b>실리콘(Si) 1큐비트, GaAs 3큐비트</b> 생성</li> </ul> <p>※ CMOS 공정 호환성이 높아 세계적 수준과의 기술격차가 상대적으로 작음</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>소재를 전적으로 해외 의존</li> <li>해외는 파운드리(예: Intel.)를 이용 대규모 칩 제작이 가능하나, 국내는 소규모 개인 연구실 공정 수준</li> </ul>
고체 결합	<ul style="list-style-type: none"> <li><b>10큐비트</b> 수준 시연, <b>7큐비트</b> 얽힘</li> <li>양자인터페이스 이용 <b>3큐비트</b> 원격 얽힘 시연에 성공</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li><b>3~4</b> 큐비트 수준 시연</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>전자스핀·핵스핀을 집적화 기반 기술인 <b>스핀 제어측정 기술</b> 부족</li> </ul> <p>※ 장기간 노하우 축적이 필요한 분야로 국내는 이제 시작단계</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>다수의 전자스핀 집적화를 위한 <b>공정 개발 미흡</b></li> </ul> <p>※ 해외 10nm 수준</p>

### 참고 3

## 글로벌 양자컴퓨팅 산업계 현황

- (구글, 美) ‘양자 우월성(Quantum Supremacy)\*’ 최초 입증(‘19.10)
  - \* 구글의 양자 프로세서(52큐비트)로 현존 최고 슈퍼컴(IBM 씨밋) 대비 우수한 연산 성능 입증
  - 후발주자에서 ‘14년 UC Santa Barbara 존 마티니스 연구팀을 영입, Quantum AI Lab 설립을 계기로 초전도 양자컴퓨팅 기술에서 우위 점유
  - 오류보정을 통한 성능 고도화, NASA와의 공동연구, 양자기계학습틀(Tensorflow Quantum), SW 양자시뮬레이터 개발(‘20) 등을 추진 중
  
- (IBM, 美) 양자컴퓨팅 서비스를 클라우드 방식으로 제공하여 다양한 활용분야를 탐색토록 하고 그 데이터를 수집하여 연구개발에 활용
  - IBM Q 네트워크를 구축(106개 유료 회원)하고 대륙별 연구허브를 선정·지원하여 IBM 중심의 양자컴퓨팅 기술 생태계 구축에 집중
    - ※ 기업 11개(삼성 JP 모건, Daimler, Barclays, Hitachi Metals 등), 벤처 30개, 대학 34개, 허브 13개
  - ‘23년 1,121큐비트 양자컴퓨팅 시스템(초전도 방식) 개발 계획 발표(‘20.9)
    - ※ ‘19년 27큐비트 → ‘20년 65큐비트 → ‘22년 433큐비트 → ‘23년 1,121큐비트
  
- (IonQ, 美) 메릴랜드 대학의 C. Monroe와 듀크 대학의 김정상 교수가 공동 창업(‘15)한 이온트랩 기반 양자컴퓨팅 벤처로 ‘28년 1,024큐비트 로드맵 발표(‘20.12)
  - \* ‘21년 22큐비트 → ‘23년 29큐비트 → ‘25년 64큐비트 → ‘26년 256큐비트 → ‘28년 1024큐비트
  - ‘19.10월 삼성과 UAE funds로부터 5,500만 달러(약 640억원) 규모의 투자를 받았으며, 최근 현대차도 전략적 투자 참여 를 발표
  
- (D-wave System, 加) ‘99년 설립된 벤처기업으로 최초의 양자컴퓨터 상용화기업
  - 세계 최초 128큐비트 상용 양자컴퓨터(D-wave1)를 출시, 구글과 NASA의 실험에 활용하였으며 ‘19년말 기준으로 118건의 양자컴퓨터 관련 특허 보유
  
- (알리바바, 中) 중국과학원과 알리바바가 공동개발하여 ‘18년 11큐비트급 양자컴퓨팅 클라우드 출시
  
- (후지쯔, 日) 세계 최고 슈퍼컴퓨터(후카쿠) 제조업체인 후지쯔도 ‘20.10월 이화학 연구소, 도쿄大, 델프트大(네덜란드)와 함께 양자컴퓨터 개발 계획 발표

## 참고 4

## 양자 기술 국제협력 현황

(단위 : 백만원)

사업명	상대국	상대 협력기관	주관기관	과제명	연구비	총연구기간
<b>【양자컴퓨팅】</b>						
과학기술 혁신인재 양성 (양자정보과학)	미국	MIT, Raytheon BBN Technologies	POSTECH	양자정보를 위한 그래핀 기반 마이크로파 단광자 검출기 개발	200	'20.8~'22.8
	미국	UMD	UNIST	하이브리드 양자 집적 광학 소자	200	'20.8~'22.8
	미국	펜실베이니아대학	UNIST	양자 광원 및 메모리용 인공 소재	200	'20.8~'22.8
	미국	하버드대학, 뉴욕시립대, 미네소타대학	서울시립대	2D van der Waals 소재 양자컴퓨팅 국제공동연구단	675	'20.9~'23.3
	영국, 중국, 미국, 오스트 리아	임페리얼 칼리지, 칭화대, 듀크대, 인스부르크 대학	서강대	양자 기술 개발을 위한 국제 공동 연구단	675	'20.9~'23.3
	일본	교토대학	KAIST	원자 및 분자 기반 양자 시뮬레이 터 개발을 위한 국제 협력 사업	675	'20.9~'23.3
과학기술 협력기반조성	남아공	Univ. of Kwazulu-Natal	KAIST	양자컴퓨팅 실용화를 위한 디지털- 양자 인터페이스와 양자프로세스 관리 기초핵심기술 협력연구	100	'18.12~'20.11
	이태리	Fondazione Bruno Kessler	ETRI	소규모 양자컴퓨팅 시스템 최적화형 제어 및 성능평가 기술 개발	562.5	'20.7~'24.3
<b>【양자통신】</b>						
정보보호 핵심원천기술 개발	미국	University of Illinois Urbana Champaign	고려대	양자정보를 위한 2차원물질 단일광 자원 구현	360	'17~'20.7
	미국	퍼듀 대학	GIST	랜덤레이저와 광전자소자를 결합한 하위 레벨 암호화 하드웨어	360	'17.8~'20.7
	미국	플로리다 아틀랜틱 대학	서울시립대	위성통신을 위한 자유공간 양자암호 시스템의 중력효과	360	'17.8~'20.7
과학기술 협력기반조성	UAE	칼리파 대학	인천대	빅데이터 위험 분석에 기반한 양자 보안 인프라스트럭처 기술 개발	29	'19.1~'20.11
<b>【양자기초·기반】</b>						
과학기술 협력기반조성	프랑스	CNRS	경북대	여기 상태 동역학을 위한 새로운 양자화학 이론 개발 및 응용에 관한 국제 협력	30	'19.7~'21.12
	독일	Physikalisch-T echnische Bundesanstalt	표준(연)	그래핀 기반 양자임피던스 표준원기 개발	450	'19.7~'22.6
전략형 국제공동연구	독일	IFW-Dresden	경희대	저차원 열전 및 위상소재 개발과 열/ 전기스핀 양자물성 측정기술 연구	999	'20.7~'23.7

과학기술정보통신부 과학기술혁신본부  
연구개발투자심의국 기계정보통신조정과

담당자

우명순 사무관

연락처

전 화 : 044-202-6853

E-mail : mswoo@mail.go.kr

mswoo0601@korea.kr