

Europe Quantum Brief 유럽 양자기술 핵심성과지표(KPI)



Europe Quantum Brief
유럽 양자기술 핵심성과지표(KPI)

- [발행일] 2024년 5월
[저 자] 송 예 인, 이 정 원
[발행인] 이 정 원
[발행처] 한-유럽 양자과학기술협력센터 (KE-QSTCC)
[주 소] Korea-Europe Quantum Science Technology Cooperation Center
Rue de la Science 14A
1040 Brussels, Belgium
[자 문] 홍 창 기 (이스라엘 와이즈만 연구소)
[문 의] 송 예 인
E-mail. janesong@k-erc.eu

※ 본 내용은 무단 전재할 수 없으며, 가공·인용할 때는 원문출처를 명시하셔야 합니다.
※ 본 자료는 KE-QSTCC 웹페이지(<https://k-erc.eu/ke-qstcc/>)를 통해서도 보실 수 있습니다.



- 01 개요 1
- 02 양자기술 분야별 KPI 지표 및 성과 ... 3
- 03 시사점 11

- 참고문헌 14

01 개요

◆ 유럽 양자기술(6대 영역)별 핵심성과지표(KPI) 수립('21) 및 모니터링('22~'24)

- 유럽 양자 플래그십(European Quantum Flagship)은 향후 10년간 유럽 내 양자기술 발전을 모니터링하기 위하여 핵심성과지표(Key Performance Indicator, KPI)를 제시
 - 양자 플래그십의 프로그램뿐만 아니라 기초과학에서 산업화*까지 아우르는 유럽 전반의 양자기술 발전 상황을 모니터링하고 평가
 - * 산업화 관련 지표(예: 일자리 창출, 인프라 등 상용화)와 생태계, 교육 등 지표 포괄
 - (KPI 추진경과) '22년부터 KPI 지표 및 목표값을 매년 논의를 통해 업데이트하여 KPI 보고서를 발간 중이며, 2024년 3번째 KPI 보고서를 발표
 - ※ Key Performance Indicator for Quantum Technologies in Europe (March 2024)
 - (KPI 거버넌스) 양자 플래그십 전략자문위원회(SAB) 위원으로 구성되며, 조정지원사무국(QUCATS)의 지원을 받아 모니터링 및 평가를 진행, 또한 2030년까지의 목표를 설정하여 KPI 측정 프로세스 설계
 - * '21년 이후 매년 연말 양자조정위원회(QCB)와 유럽양자산업컨소시엄(QuIC) 포함, 유럽 양자 커뮤니티의 산업·연구계 전문가를 대상으로 광범위한 설문조사를 실시, 조사 결과를 태스크포스의 검증을 거쳐 매년 발표
- (지표구성) 전략자문위원회(SAB)는 유럽연합 집행위원회와 합의를 통해 6개 핵심 영역(4대 양자기술 분야+교육+생태계) 내 23개 KPI를 정의('21) 후 업데이트 중
 - * ① 양자컴퓨팅 (4개), ② 양자시뮬레이션 (3개), ③ 양자통신 (4개), ④ 양자센서 및 계측 (2개), ⑤ 교육 (4개), ⑥ 생태계 (6개)
- 금번 '24년 보고서는 23개 KPI 중 양자컴퓨팅과 양자통신 2개 영역에서 세부지표*를 새롭게 지정, 이와 관련된 지표의 현재 성과를 측정하여 제시하였으며, 2030년 목표치 설정값에 대해서는 아직 논의가 진행 중
 - * (양자컴퓨팅) 기존 기술리더십 1개 지표(양자 볼륨)를 5개 세부지표(양자 볼륨, GHZ-state 규모, Clifford Unitary 규모, 오류 보정, Shor 알고리즘)로 세분화
 - ** (양자통신) 기존 기술리더십 1개 지표(양자 정보 네트워크)를 2개 세부지표(양자 정보 네트워크(km), 양자 보안 네트워크(km 및 bits/s))로 세분화

참고

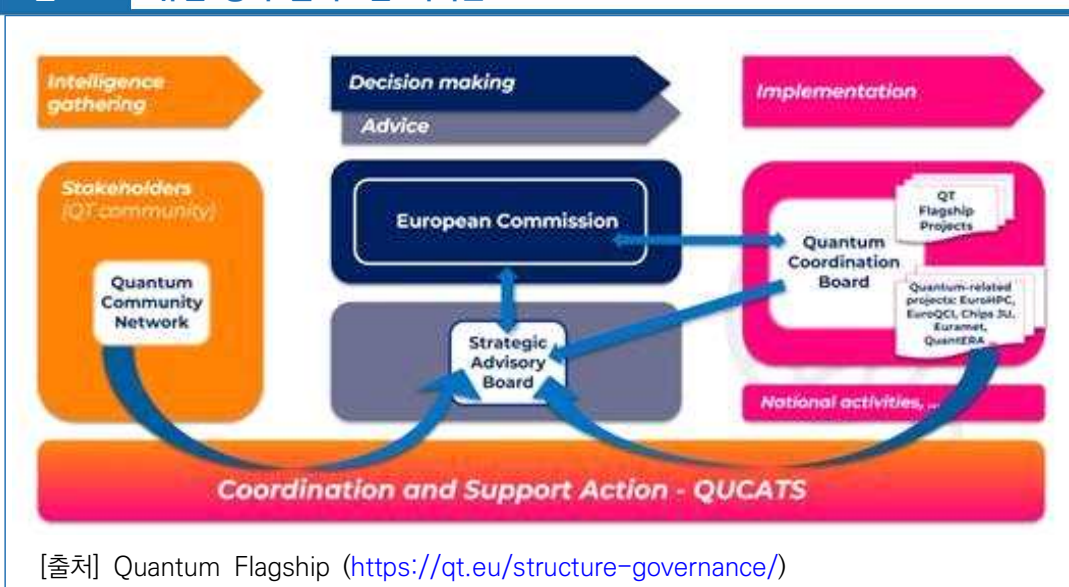


◆ 유럽 양자 플래그십 거버넌스

※ 유럽의 과학적 리더십과 우수성을 통합 및 확장하기 위한 대규모 연구·혁신 이니셔티브로, 집행위의 자금을 지원받아 10년간('18~'28) 총 €1B 규모의 예산으로 추진

- 각 EU 회원국의 양자기술 전문가 의견을 결집(QCN)하고 집행위와의 의사결정을 통해 유럽의 전략을 수립(SAB), 유럽의 지원사업 활동을 조율하여 프로그램 시행 지원(QCB)
 - (SAB) 양자 플래그십 전략의 진행 상황을 모니터링하고 전략 아젠다 수립을 지원하며 관련 주제에 대해 의사결정 기관에 자문을 제공하는 감독기관
 - (QCB) 각 프로젝트를 대표하는 코디네이터를 결집, EU의 양자기술 지원사업 활동을 조율
 - * △집행위의 양자기술 자금지원 이니셔티브 조정 및 조율, △양자기술 플래그십 프로젝트 활동 조율, △교차 주제 식별 및 공동 솔루션 제안
 - (QCN) EU 회원국 및 참여국을 대표하는 32개 전문가(EU27+영국, 노르웨이, 스위스, 이스라엘, 터키)로 구성되어 있으며, 각국의 연락책(liaison) 역할 수행과 전략아젠다 수립을 위해 의견 제공
 - (QUCATS) 유럽의 11개 산학연 파트너로 구성되어 있으며, 다른 거버넌스 주체의 업무 등을 지원하고 다양한 주제의 워킹그룹* 주최
 - * (워킹그룹, WG) 양자 플래그십은 ① 공평성, 다양성 및 포용성, ② 유럽 양자기술 컨퍼런스, ③ 핵심성과지표(KPI), ④ 표준화 등 4개 Working Groups로 구성

그림 1-1 ◉ 유럽 양자 플래그십 거버넌스



[출처] Quantum Flagship (<https://qt.eu/structure-governance/>)

02 양자기술 분야별 KPI 지표 및 성과

양자컴퓨팅 KPI (4개)

① 지표 정의

- 양자컴퓨팅 시스템의 성능, 기술과 영향력에 대한 리더십, 양자컴퓨팅 시설에 대한 접근성 측면에서 성과 측정
- EU의 기술리더십 지표가 1개('양자블룸')에서 5개*로 세분화되었으며, 해당 세부지표에 대한 2030년 목표치를 설정하는 작업이 진행 중

* ① 양자 블룸, ② GHZ-state 규모, ③ Clifford Unitary 규모, ④ 오류 보정 ⑤ Shor 알고리즘

표 2-1 양자컴퓨팅 KPI 정의 (24 기준)

KPI	KPI 세부정의 및 측정기준
성능	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 양자 우위를 입증한 유럽 고유의 양자컴퓨팅 하드웨어 스택 시스템/서비스의 수
기술 리더십	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 유럽 벤치마크 기반의 최대 양자컴퓨팅 용량 <ol style="list-style-type: none"> ① 양자 블룸 ② 충실도 $P \geq 50\%$(다자간 양자 얽힘)의 최대 GHZ-state 규모 (양자 오류 완화가 없는 상태와 있는 상태로 구분) ③ 5% 미만의 오류로 무작위 큐비트 클리포드 암호를 실행할 수 있는 최대 N개의 큐비트 수 ④ 확장 가능한 오류 수정 기법을 사용하여 능동 오류 수정에서 메모리 오류율의 상대적 감소 ⑤ 신뢰할 수 있는 가장 큰 Shor 알고리즘 사례
영향력 리더십	<ul style="list-style-type: none"> ▪ UN 및 EU 2030 목표와 연계하여 기초과학, 응용과학, 산업 및 공공 부문에서 명확한 영향력을 보이는 양자 알고리즘 및 활용 사례
접근성	<ul style="list-style-type: none"> ▪ (시설) 산학연에 유럽형 양자컴퓨팅 시설을 제공하는 기관의 수 ▪ (HPC/QCS 네트워크) 디지털 10년 KPI*에 따른 HPC/QCS 네트워크를 통한 액세스 횟수

* HPC 슈퍼컴퓨터의 가속기로서 작동 중인 양자 컴퓨터 또는 양자 시뮬레이터의 수

② 측정결과

- 지난 3년간 성과를 보이지 못하고 있는 HPC/QCS 네트워크의 접근성 측면을 제외하고 모든 측면에서 목표 대비 비교적 좋은 성과를 기록

- 특히 활용 사례를 통한 유럽의 영향력과 양자컴퓨팅 관련 시설에 대한 접근성 측면에서 2030년 목표치와 비교해 원활한 발전 속도(달성률 60%)를 보이는 것으로 판단
 - 양자컴퓨팅 시설을 제공하는 공급(60%)* 측면과 비교하여 사용자의 고성능컴퓨팅/양자컴퓨팅 서비스 네트워크 연결**은 아직 비활성화 단계(0%)에 있는 것으로 판단
- * 접근성(시설) KPI, ** 접근성(HPC/QCS 네트워크) KPI

표 2-2 연도별 양자컴퓨팅 KPI 측정 결과 ('21~'24)

KPI 구분		'21 지표	'22 지표	'23 지표	연간목표	'30 목표	달성률	진행도
성능 (양자우위 달성 양자컴퓨터)		0	0	0*	-	3	0%	●
EU 기술리더십	양자 볼륨	32	128	128 ¹⁾	-	n/a	-	●
	GHZ-state 규모	-	-	24 ²⁾	-	n/a	-	●
	Clifford Unitary 규모	-	-	20	-	n/a	-	●
	오류 보정	-	-	-3 ³⁾	-	n/a	-	●
	Shor 알고리즘	-	-	15 ⁴⁾	-	n/a	-	●
유럽의 영향력 리더십 (활용사례)**		70	70	97	x1.3	500	19.4%	●
접근성	시설*	0	4	6 ⁵⁾	-	10	60%	●
	HPC/QCS 네트워크*	0	0	0	-	5	0%	●

목표 달성 진행도 ● 초기 달성 중 ● 일정대로 진행 중 ● 진행 필요 ● 일정 대비 지연

* 설문조사 결과

** QuIC의 컴퓨팅 및 시뮬레이션 활용사례 데이터베이스

양자시뮬레이션 KPI (3개)

① 지표 정의

- 양자시뮬레이터 및 애플리케이션의 수를 파악하여 성능과 상용화에 대한 성과를 측정하고, 양자시뮬레이터의 큐비트 수를 통해 유럽의 기술리더십을 평가
- 총 3개의 KPI 가운데 2개가 이른바 ‘문샷(Moonshot)⁶⁾’ 지표로 구성

표 2-3 양자시뮬레이션 KPI 정의 ('24 기준)

KPI	KPI 세부정의 및 측정기준
성능*	고전 컴퓨터에서 실행되는 알고리즘을 능가하는 성능을 보유한 EU 양자 시뮬레이터 (서비스)의 수
시장준비성*	양자 시뮬레이션을 기반으로 한 EU 기업의 애플리케이션(제품 및 서비스) 수
기술리더십	EU의 27개 회원국의 최첨단 양자 시뮬레이터의 큐비트 또는 시뮬레이션 입자 수

* '문샷' KPI로, 현재까지 전 세계적으로 도달하지 못한 지표

② 측정결과

- 성능(양자우위 달성 시뮬레이터의 수)과 시장 준비성 측면에서 지난 3년간 뚜렷한 성과를 보이지는 못함
- 다만, 유럽은 기술리더십 측면에서 100개 큐비트 시뮬레이션을 달성('22)하였으며, 2개의 '문샷' KPI가 현재까지 전 세계적으로 달성되지 못한 목표임을 고려하였을 때, 지연되고 있는 것은 아니지만, 글로벌 기술을 선도하지는 못하고 있음

표 2-4 연도별 양자시뮬레이션 KPI 측정 결과 ('21~'24)

KPI 구분	'21 지표	'22 지표	'23 지표	연간목표	'30 목표	달성률	진행도
성능 (양자 우위 달성 시뮬레이터)	0	0	0*	+1	8	0%	●
시장 준비성 (애플리케이션)**	0	0	0	1(~'23), 향후 +2/년간	12	0%	●
유럽 기술리더십 (큐비트)	-	100	100***	x1.75	5000	2%	●

목표 달성 진행도 ● 초기 달성 중 ● 일정대로 진행 중 ● 진행 필요 ● 일정 대비 지연

* 현재 사례는 원칙적으로만 작동하며, 실제적인 문제 해결이 필요

** 설문조사 결과

*** PASQAL 및 MPQ-LMU Munich

양자통신 KPI (4개)

① 지표 정의

- 양자통신을 위한 시스템 수와 양자네트워크에 대한 기술리더십, 실질적인 기술

활용 및 보급 현황을 파악

- 기존 기술리더십 KPI에 ‘양자 보안 네트워크’ 세부지표를 추가하여 2개로 세분화 하였으며, 이에 따라 새로 추가된 세부지표에 대한 2030년 목표치 설정값을 논의 중

표 2-5 양자통신 KPI 정의 ('24 기준)

KPI	KPI 세부정의 및 측정기준
성능	▪ 양자통신 네트워크 구축에 필요한 상호보완적 하위 시스템의 수
기술 리더십	▪ (양자정보네트워크) 양자 네트워크의 얽힘 거리와 충실도 및 전송률 ▪ (양자보안네트워크) △‘Prepare & Measure (P&M)’ 방식 양자 키 교환의 물리적 거리와 키 전송률, △P&M QKD를 넘어 새로 구현된 프로토콜의 수
보급	▪ 최소 100bit/s의 보안 키 전송률 갖는 지상파 및 위성 QKD 링크를 포함하여 상업용 통신 인프라와 통합된 유럽 대도시 지역 (및 노드)에 연결된 QKD의 수
도입	▪ 공공 및 민간 부문에 상업적으로 도입 가능한 양자통신 서비스 및/또는 활용 사례 수

② 측정결과

- 양자정보네트워크 기술리더십 지표를 제외한 모든 지표에서 전반적으로 양호한 성과를 보이고 있으며, 특히 서브시스템 성능 측면에서 목표치를 조기 달성 중
 - 2개 지표에서 50% 이상의 목표 달성률을 보이고 있으며, 아직 연간 목표치가 정의되지 않은 양자보안네트워크 기술리더십은 얽힘 기반 프로토콜(BBM92)을 기반으로 '23년도에 성과 창출
 - 특히 성능(서브시스템) 측면에서 '23년에 '22년 대비 2배 이상의 성과를 보이며 전년대비 연간 목표치(1.2배)를 초과 달성
 - 반면, 양자정보네트워크에 대한 기술리더십(양자정보네트워크, km) 측면에서 지난 3년간('21~'23년) 성과 진전을 보이지 않았으며, 달성률도 0.26% 수준으로 저조

표 2-6 연도별 양자통신 KPI 측정 결과 ('21~'24)

KPI 구분	'21 지표	'22 지표	'23 지표	연간목표	'30 목표	달성률	진행도
성능 (서브시스템)	2	5	11*	x1.2	20	55%	●

KPI 구분		'21 지표	'22 지표	'23 지표	연간목표	'30 목표	달성률	진행도
EU의 기술리더십	양자 정보 네트워크(km)	1.3km**	1.3km**	1.3km**	-	500km	0.26%	●
	양자보안 네트워크(km 및 bits/s)	-	-	248km @1.4bit s/s***	-	n/a	-	●
보급: 연결된 대도시 지역 (노드 수)		1(8)	15(10)*	16(10) ⁷⁾	-	25(75)	64(13)%	●
도입 (서비스/활용사례)		5	9	10 ⁸⁾	+2.7	30	33.3%	●

목표 달성 진행도 ● 조기 달성 중 ● 일정대로 진행 중 ● 진행 필요 ● 일정 대비 지연

* 설문조사 결과

** 네덜란드 델프트 공대 내 양자인터넷연합(QIA) 관련 네트워크로, 400m 간격의 건물 사이를 광섬유 스푼(spool)로 33km 이동

*** 얽힘 기반 프로토콜(BBM92)

양자센싱 및 계측 KPI (2개)

① 지표 정의

- 기업의 양자센서 활용 사례를 통해 시장준비성을 분석하고 시연된 양자 기반 센서 기술의 수를 파악

표 2-7 양자센싱 및 계측 KPI 정의 ('24 기준)

KPI	KPI 세부정의 및 측정기준
시장준비성	유럽 기업이 개발, 구현 및 판매하거나 EU에 배포한 양자 센서를 기반으로 하는 제품 및 서비스, 또는 활용 사례의 수
차세대 기술	양자 효과(양자 얽힘, 집단 결맞음 등)를 활용하고 시연된 센서 기술의 수

② 측정결과

- 다른 양자기술 영역 대비 상대적으로 높은 목표 달성률을 기록하고 있으며, 차세대 센싱 기술 측면에서 '23년 기준 2030년 목표의 70% 이상을 달성
 - '23년까지 누적 5개 차세대 기술이 시연되며 '22년 대비(2개 기술) 성과 2.5배 증가

표 2-8 연도별 양자센싱 및 계측 KPI 측정 결과 ('21~'24)

KPI 구분	'21 지표	'22 지표	'23 지표	연간목표	'30 목표	달성률	진행도
시장준비성 (상품/서비스)	3	5	6*	+2	20	30%	●
차세대 기술	0	2	5**	+1	7	71.4%	●

목표 달성 진행도 ● 초기 달성 중 ● 일정대로 진행 중 ● 진행 필요 ● 일정 대비 지연

* 활용사례 목록 : Optical atomic clocks; cold-atom gravimeters; NV-centre magnetometers; superconducting single photon detectors; NV-centre in diamond for signal frequency measurements; Non-destructive testing for metal defect detection

** 설문조사 결과 : Subshot-noise Imaging, NV Centres, Quantum Optical Coherence Tomography, Quantum Imaging, Laser threshold magnetometry

교육 KPI (4개)

① 지표 정의

- 양자기술에 대한 대중의 인식 제고와 교육·훈련 관련 프로그램 및 행사 현황과 이를 도입한 기관의 수를 파악, 이를 기반으로 성과 측정

표 2-9 교육 KPI 정의 ('24 기준)

KPI	KPI 세부정의 및 측정기준
인식 제고 (행사)	양자기술 인식 제고를 위해 양자 플래그십 웹사이트에 공고된 프로그램 및 교육 행사의 건수
교육 모듈 (검증된 모듈)	양자 플래그십을 통해 접근 가능한 오픈 소스 양자기술 교육 및 훈련 모듈의 수 (검증된 수)
도입 (법인/기관)	범유럽 기관에서 양자기술 교육 및 훈련을 지원하는 역량 프레임워크를 채택한 비율 및 기관의 수
다양성 및 평등 (법인/기관)	양자기술 교육·훈련에 평등 및 다양성 이니셔티브 통합 추진 : 양자 플래그십의 조정지원사무국(CSA*)이 개발한 가이드라인을 따르는 양자 플래그십 활동에 기여하는 단체(기업 및 교육기관)의 수

* QUCATS의 전신

② 측정결과

- 유럽은 모든 KPI 지표에서 지난 3년간 꾸준한 성과 기록 중
 - 가장 최근 지표('23)는 전년('22)과 비교하여 연간 목표치를 초과 달성하였으며, 특히 교육 관련 법인 또는 기관의 수가 최근 급증하는 추세

표 2-10 연도별 교육 KPI 측정 결과 ('21~'24)

KPI 구분	'21 지표	'22 지표	'23 지표	연간목표	'30 목표	달성률	진행도
인식 제고 (행사)*	7	33	38	+10	100	38%	●
교육: 모듈 (검증된 모듈)**	0(0)	20(12)	45(21)	+20 (+10)	180(90)	25(23)%	●
도입 (법인/기관)	1	17	43 ⁹⁾	+25	225	19%	●
다양성 및 평등 (법인/기관)	0	10	15 ¹⁰⁾	+10	90	17%	●

목표 달성 진행도 ● 초기 달성 중 ● 일정대로 진행 중 ● 진행 필요 ● 일정 대비 지연

* QTEdu 정보

** QTEdu 정보 및 QURECA 정보¹¹⁾

생태계 KPI (6개)

① 지표 정의

- 생태계 영역 관련 지표는 투자, 상용화와 공급망, 지식재산권 등과 관련된 성과를 측정
- 6개의 KPI 지표 가운데 '일자리 창출'과 '특허 창출 및 IP 보유' 지표와 관련하여 산업계 (QuIC)의 데이터를 기반으로 측정

※ 유럽양자산업컨소시엄(European Quantum Industry Consortium, QuIC)

표 2-11 생태계 KPI 정의 ('24 기준)

KPI	KPI 세부정의 및 측정기준
투자	▪ 집행위의 투자 총액 (벤처캐피탈, 기업 시드펀딩, EU 공공투자)
연구 상용화 (Lab-to-market)	▪ 양자기술 스타트업, 스핀오프(spun-off), 인큐베이터, 유럽 민관 공동 투자 기업 등의 수
Lab-to-Fab 인프라 및 가치사슬	▪ 개방형 응용 연구실, 테스트베드, 클린룸 등을 제공하는 EU 연구기관의 수 (TRL 2~6 범위)
일자리 창출	▪ 양자기술 분야 관련 직업 수
특허 창출 및 IP 보유 (순위)	▪ 국제 특허 분포 대비 유럽 출원 양자기술 관련 특허
공급망 및 전략적 자율성 (구성요소)	▪ EU에서 생산한 양자기술의 구성요소(공급망) 수

② 측정결과

- 유럽은 평균적으로 57.2%의 목표 달성률을 보이며, 다른 영역과 비교했을 때 모든 KPI에서 준수한 성과를 기록
- 특히 지식재산권(달성률 100%)과 전략적 자율성(73.3%) 측면에서 목표치를 조기 달성

표 2-12 • 연도별 생태계 KPI 측정 결과 ('21~'24)

KPI 구분	'21 지표	'22 지표	'23 지표	연간목표	'30 목표	달성률	진행도
투자*	344M€	408M€	551M€	+90M€	1,000M€	55.1%	●
연구상용화** (Lab-to-market)	79	95	99	+20	250	39.6%	●
인프라 및 가치사슬 (Lab-to-fab)	1	9	22 ¹²⁾	-	60	36.7%	●
일자리 창출***	n/a	n/a	3850	+15%	10,000	38.5%	●
특허 창출 및 IP 보유	n/a	n/a	세계 2위 ****	-	세계 2위	100%	●
공급망 및 전략적 자율성 (구성요소)*****	0	35	44	+3	60	73.3%	●

● 목표 달성 진행도 ● 조기 달성 중 ● 일정대로 진행 중 ● 진행 필요 ● 일정 대비 지연

* 집행위 데이터, ** QuIC 회원 중소기업 수, *** QuIC 회원 대상 설문조사 결과 (산업계 일자리)

**** QuIC 보고서¹³⁾: 국제 특허군 내 출원 국가별 상대적 순위, ***** '21년 값 0을 기준으로 '21년 대비 진행 상황 값

03 시사점

- 유럽연합(EU)과 유럽 양자 플래그십은 유럽 양자기술의 발전 상황을 주기적으로 평가하고 잠재적인 개선 영역을 식별하기 위해 6대 영역의 핵심성과지표(KPI)를 설정, 매년 EU의 양자기술 활동과 성과를 파악하여 발표 중
- 2024년 KPI 보고서에 따르면 유럽은 핵심 양자기술 분야 가운데 양자컴퓨팅 시설접근성, 상업적 양자통신 보급·도입과 양자센싱 분야 내 차세대 기술 활용 및 시연 등에서 높은 목표 달성률을 기록, 양자기술 활용 부문의 성과 창출에 노력
 - 또한, 생태계 분야에서 특히 창출 등 지식재산권과 공급망 및 전략적 자율성 측면에서 뚜렷한 성과를 달성
- 국내에서도 양자기술의 전 영역에 대해 객관적이고 구체적인 양자과학기술의 발전 상황과 기술 수준을 정기적으로 모니터링이 가능한 KPI 수립을 고민할 필요
 - 특히, 최근 발표된 ‘대한민국 양자과학기술 비전(‘23.6)’ 및 ‘퀀텀이니셔티브(‘24.4)’의 장기적인 정책목표에 맞춰 체계적인 성과 측정에 대한 고려
- 유럽의 양자기술 KPI 측정 결과를 기반으로 유럽 내 양자기술의 강·약점을 객관적으로 평가, 이를 기반으로 국제협력 추진 시 한국과의 상호 이익이 될 수 있는 영역을 구체적으로 파악하여 반영하는 국제협력 전략 수립이 필요

각주

- 1) AQTION: 10.1103/PRXQuantum.2.020343
- 2) AQT. (n.d.). AQT AND COLLABORATORS DEMONSTRATE 24 QUBIT ENTANGLEMENT. <https://www.aqt.eu/24-qubit-entanglement/>
- 3) Lukas Postler et al. (2023). Demonstration of fault-tolerant Steane quantum error correction. arXiv. <https://arxiv.org/abs/2312.09745>
- 4) Thomas Monz et al. (2016). Realization of a scalable Shor algorithm. Science. Vol. 351, No. 6277. pp. 1068-1070. <https://www.science.org/doi/10.1126/science.aad9480>
- 5) 풀스택 시스템에 대한 접근성을 제공하는 EU 산학연 명단 : PASQAL, Quantum Inspire, LUMI supercomputing centre, AQT, Leibniz Rechen Zentrum (LRZ), DLR Quantencomputing Initiative.
- 6) 1969년 미국의 달착륙 프로젝트 아폴로계획처럼 기존의 틀을 깨는 혁신적인 연구나 도전. 출처 : 연합인포맥스(<https://news.einfomax.co.kr>)
- 7) 연결된 대도시 지역 : Bristol, Vienna, Graz, Geneva, Cambridge, Cambridge-London, Delft, Poznan-Warsaw, Poznan, Berlin, Madrid, Barcelona, Ostrava, Paris, Padua, Trieste/Rijeka/Postojna/Ljubljana.
- 8) 호라이즌 2020 프로그램의 과제인 OpenQKD 프로젝트 파트너를 포함한 명단: IDQuantique, Toshiba, BT, Airbus, Thales, Q-Bird, QO Jena, ThinkQuantum, LuxQuanta, TIM.
- 9) 전체 기관 명단: TU Delft; U Helsinki; TU Braunschweig; PTB; Qureca; Airbus Space and Defense; Aquantum Investor Mentorship Programme; Aarhus University; ICFO; CTU Prague; Science Melting Pot; University of Pisa; Quarks Interactive; University of Barcelona; Instituto Superior Tecnico - University of Lisbon; RWTH Aachen; University of Strasbourg; Copenhagen University; Danish Technical University; Utrecht University; FAU Erlangen-Nurnberg; TU Dresden; University of Pavia; CNR; University of Ljubljana; UC Limburg; The Hebrew University of Jerusalem; Copenhagen University; University of Twente; ICN2; Heidelberg University; University of Paris Saclay; Centrale Supélec; Ecole Normale Supérieure; Barcelona University; LMU Munich; TU Munich; University of Troyes; Sorbonne University; PQI - Portuguese Quantum Institute; Deloitte; QTLabs.
- 10) ICFO; CNR; Switzerland; QURECA; University of Paderborn; CSIC; University of York; Forschungszentrum Julich; PQI - Portuguese Quantum Institute; Spanish Foundation for Science and Technology; Technical University Braunschweig; Leibniz University Hannover; University of Barcelona; RWTH Aachen University; Science Melting Pot
- 11) QTedu (<https://qt.eu/events/?q=&tags%5B%5D=education-outreach>) and QURECA (<https://platform.quireca.com/courses/>)
- 12) Quantum Information Technology Testing Facility (QITT), TNO, NL; 2) Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica (INRIM); 3) Quantum Technology Competence Center (QTZ); 4) Kavli Nanolab, TU Delft; 5) Nanofabrication lab, MC2, Chalmers University of Technology; 6) CSIC open facility for quantum circuit testing; 7) Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives - Information and Electronics technologies Lab (CEALeti, FR); 8) Imec (BE); 9) VTT, Finland; 10) LNE-SYRTE; 11) Centre National d'Études Spatiales (CNES) Laboratoire Temps/Fréquence - DTN/TPI/STR; 12) European Space Research & Technology Centre (ESTEC); 13) Münster Nanofabrication Facility (MNF); 14) Paris Saclay - C2N; 15) Fraunhofer Institute for

Applied Optics and Precision Engineering; 16) Fraunhofer IAF; 17) Fraunhofer IPM; 18) OtaNano; 19) FinnLight; 20) LENS, Firenze, Italy; 21) Quantum Application Lab (QAL); 22) PSI Zuerich (attached to ETH)

13) QuIC. (2024). A Portrait of the Global Patent Landscape in Quantum Technologies



- CSA QUCATS. (2022). *Strategic Research and Industry Agenda*. European Quantum Flagship
- CSA QUCATS. (2024). *Strategic Research and Industry Agenda*. European Quantum Flagship
- CSA. (2020). *Strategic Research Agenda*. European Quantum Flagship
- European Commission. (2023), European Declaration on Quantum Technologies. <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/library/european-declaration-quantum-technologies>
- European Commission. (2023). European Commission welcomes Spanish Presidency declaration to strengthen collaboration on quantum technologies. <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/news/european-commission-welcomes-spanish-presidency-declaration-strengthen-collaboration-quantum>
- European Quantum Flagship. (2020). The Quantum Flagship officially presents the Strategic Research Agenda to the European Commission. <https://qt.eu/news/2020/the-quantum-flagship-officially-presents-the-strategic-research-agenda-to-the-european-commission>
- European Quantum Flagship. (2022). Key Performance Indicators 2030. <https://qt.eu/news/2022/key-performance-indicators-2030>
- European Quantum Flagship. (2024). New roadmap to position Europe as the 'Quantum Valley' of the world. https://qt.eu/news/2024/2024-02-14_new-roadmap-to-position-europe-as-the-quantum-valley-of-the-world
- European Quantum Flagship. (n/a). Key Performance Indicators. <https://qt.eu/working-groups/key-performance-indicators>
- European Quantum Flagship. (n/a). Quantum Coordination Board (QCB). <https://qt.eu/>



[structure-governance/quantum-coordination-board](#)

European Quantum Flagship. (n/a). Working Groups. <https://qt.eu/working-groups/>

Quantum Support Action. (2018). *Supporting Quantum Technologies beyond H2020*. https://qt.eu/media/pdf/Supporting-QT-beyond-H2020_v1.1.pdf

Watse Castelein, Sylwia Kostka, Justyna Mitan-Piłat et al. (2023), *Quantum Technologies : public policies in Europe*. QuantERA. <https://quantera.eu/quantum-technologies-public-policies-2023/>
