

양자 컴퓨팅 하드웨어 플랫폼 유형별 기술 개발 및 경쟁 평가 논의 동향

Trends in Technology Development and Competition Assessment Discussions Across Quantum Computing Hardware Platforms

설성호 (S.H. Seol, ssh1517@etri.re.kr)

통신정책연구실 책임연구원

ABSTRACT

This study analyzes recent trends in the development of quantum computing hardware technologies, focusing on case studies of leading companies across six platform types. It also examines key discussions related to competition assessment among platforms. The case analysis of leading companies indicates that they are focusing on the development of quantum error correction technologies and making substantial efforts to mitigate the inherent weaknesses of each platform while improving performance. Based on a review of major perspectives on the current state of inter-platform competition and future prospects, as well as an analysis of policy initiatives in major countries, this study recommends that the competent authority in Korea undertake research on the development of indicators to establish a system to assess competition among quantum computing hardware platforms regularly, taking the European Union's approach as a reference.

KEYWORDS QBI, QPU, QuIC, 경쟁 평가, 양자 오류 정정, 큐비트, 플랫폼

I. 서론

지난 2025년은 양자역학이 탄생한 지 100주년이 되는 해로서 양자 기술에 대한 각종 투자 발표와 함께 관련 기업에 대한 큰 폭의 주가 상승이 다수 목격된 바 있다. 양자 기술은 기술 혁명의 미래 파도에 해당하는 게임체인저로 중첩(Superposition), 얽힘(Entanglement) 등 양자역학의 기본 원리를 활용함으로써 기존 첨단 기술의 한계를 뛰어넘어 성능을 한층 더 비약적으로 개선할 수 있다. 이에 실험실에 머

무르던 양자 기술을 실제 산업 현장에 활용하기 위한 상업화가 추진되고 있으며, 이를 지원하고 가속화하기 위한 정책이 많은 국가에서 발표되고 있다.

양자 기술은 크게 양자 통신, 양자 컴퓨팅, 양자 센싱으로 범주화되는데, 그중에서 가장 주목해야 할 분야는 양자 컴퓨팅인 것으로 판단된다. 그 이유는 양자 컴퓨팅이 전체 양자 기술 시장에서 차지하는 규모가 가장 클 것으로 예상될 뿐만 아니라 기술 혁신 활동 또한 가장 역동적으로 전개되고 있기 때문이다. 양자 기술 시장 규모를 전망한 매किन지 보고

* DOI: <https://doi.org/10.22648/ETRI.2026.J.410210>

* 본 연구는 한국전자통신연구원 기본사업의 일환으로 수행되었음[25ZF1100, 국가지능화 기술정책 및 표준화 연구]



본 저작물은 공공누리 제4유형

출처표시+상업적이용금지+변경금지 조건에 따라 이용할 수 있습니다.

©2026 한국전자통신연구원

서에 따르면, 양자 컴퓨팅은 2040년까지 최대 1,310억 달러 규모로 성장하여 전체 양자 기술 시장의 약 66%를 차지할 것으로 예상된다[1]. 유럽특허청과의 공동 연구를 토대로 최근 발간된 OECD 보고서에서는 분야별 누적 특허 개수는 양자 통신이 가장 많았으나, 가장 역동적인 성장세는 양자 컴퓨팅에서 나타나고 있는 것으로 분석되었다[2].

한편, 양자 컴퓨팅 기술의 발전과 시장 성장을 위해서는 소프트웨어 발전보다 하드웨어의 발전이 현 시점에서 더욱 중요한 과제로 여겨진다. 양자 컴퓨팅이 금융, 제조, 항공우주, 국방 등 다양한 응용 분야에서 실질적인 가치를 창출하기 위해서는 성능 개선이 선행되어야 하는데, 현재 필요한 성능 달성에 있어 주요 병목은 대량의 물리적 큐비트 제조 및 조작, 높은 오류율 등 주로 하드웨어 부문에 존재하기 때문이다[3]. 대량의 물리적 큐비트로 규모를 확장하기 위해서는 재료 및 제조, 배선, 전력, 제어 분야에서의 여러 과제가 해결되어야 하며, 오류율 개선을 위해서는 오류 정정 기술의 개발 및 고도화가 특히 중요하다[4].

그러나, 양자 컴퓨팅 하드웨어는 단일 기술 방식으로 수렴되지 않고, 초전도, 포획 이온, 중성원자, 광자 기반, 실리콘 스핀, 다이아몬드 NV 센터 등 6대 플랫폼 기반 기술이 병렬적으로 발전하고 있으며, 치열한 혁신 경쟁이 전개되고 있다. 장기적으로 어떤 플랫폼이 최종적으로 우위를 점할지를 전망하는 것은 매우 어려우므로, 현 경쟁 구도에 대한 주기적인 모니터링과 평가의 중요성이 더 커지고 있다.

이러한 배경하에서 본고는 양자 컴퓨팅 하드웨어 기술 개발의 최신 동향을 6대 플랫폼 기반 선도 기업을 중심으로 분석하고, 플랫폼 간 기술 개발 경쟁 평가와 관련된 주요 논의 동향을 고찰한다. 이를 위해 II장에서는 기존 문헌 검토를 토대로 양자 컴퓨팅 하드웨어 6대 플랫폼의 주요 특징을 요약·정리

한다. 이어 III장에서는 최근 이루어진 하드웨어 기술 개발 동향을 플랫폼별 선도 기업 사례를 중심으로 분석한다. 그리고 IV장에서는 플랫폼 간 경쟁 현황을 진단하거나 장기적 승자에 대한 전망을 제시한 주요 견해를 검토하고, 이와 관련된 해외 주요국의 정책 추진 동향을 분석한다. 마지막으로 V장에서는 본고의 주요 결론과 정책적 시사점을 제시한다.

II. 양자 컴퓨팅 하드웨어 6대 플랫폼 개요

양자 컴퓨터의 큐비트를 물리적으로 구현하고 제어하는 하드웨어 플랫폼에 대해, 많은 문헌은 6가지 기술 방식으로 나누어 설명하고 있다. 표 1은 양자 컴퓨팅 하드웨어 6대 플랫폼의 주요 특징에 대하여 요약 정리한 것이다¹⁾.

초전도 방식(Superconducting)은 매우 낮은 온도에서 전기 저항이 사라지는 초전도체 사이에 얇은 절연층을 끼워 넣는 조셉슨 접합을 활용한다. 조셉슨 접합은 비선형 인덕턴스가 생성되게 함으로써 전자 회로가 비조화 진동자(Anharmonic Oscillator)가 되게 만든다. 비조화 진동자는 에너지 준위 간격이 서로 다르므로, 적절한 주파수의 마이크로파를 사용하여 0과 1 상태를 선택적으로 제어할 수 있게 된다[5].

보다 세부적으로 초전도 큐비트는 인코딩 방식(자유도)에 따라 전하 큐비트, 플럭스 큐비트 그리고 위상 큐비트로 구분된다. 전하 큐비트의 일종인 트랜스몬 큐비트는 지배적인 초전도 큐비트 구현 방식으로서 IBM과 Google은 이 방식을 활용하고 있다[6]. 트랜스몬 큐비트는 좋은 성과를 보이고 있으나, 오류에 매우 민감하므로 캐트 큐비트 등 보소닉 코드 계열(Bosonic Code Family)이 유망하다고 여겨지고

1) 표 1에서 제시된 장점 및 단점은 대표적인 사항들임. 이 외에도 더 많은 장점 및 단점이 있음

표 1 양자 컴퓨팅 하드웨어 6대 플랫폼의 주요 특징

구분	개요	주요 기업	장점	단점
초전도	초전도체 사이에 얇은 절연층을 끼워 넣는 조셉슨 접합을 활용하여 비조화 진동자 회로를 구현하고, 이 회로에 마이크로파를 가해 두 에너지 준위 간 전이를 제어	IBM(미국), Google(미국), Rigetti(미국), IQM(핀란드) 등	<ul style="list-style-type: none"> 게이트 속도가 빠름 기존 반도체 제조 공정의 일부를 활용하므로 확장성 우수 	<ul style="list-style-type: none"> 양자 결맞음 시간이 짧음 극저온 냉각 장치가 필요
포획 이온	전자기장을 통해 전하를 띤 이온을 초고진공 챔버에 가두고, 레이저나 마이크로파를 이용하여 이온의 두 에너지 준위 간 전이를 제어	IonQ(미국), Quantinuum(미국·영국) 등	<ul style="list-style-type: none"> 균일한 큐비트 특성 긴 양자 결맞음 시간 	<ul style="list-style-type: none"> 게이트 속도가 느림 대규모의 큐비트 개수로 확장이 어려움
중성원자	레이저빔을 사용하여 개별 중성원자를 포획하여 어레이를 형성하고, 여러 다른 레이저를 조사하여 원자의 두 에너지 준위 간 전이를 제어	QuEra(미국), Pasqal(프랑스) 등	<ul style="list-style-type: none"> 긴 양자 결맞음 시간 재구성 가능한 원자 어레이 형성으로 확장성 우수 	<ul style="list-style-type: none"> 게이트 속도가 느림 복잡한 레이저 시스템 필요
광자	광자의 특성에 큐비트를 인코딩하고, 인코딩된 광자는 선형 광학 소자를 포함한 광집적회로를 통해 전파됨	PsiQuantum(미국), Xanadu(캐나다) 등	<ul style="list-style-type: none"> 상온에서 동작 가능 장거리 전송에 적합 & 기존 인프라와 호환 긴 양자 결맞음 시간 	<ul style="list-style-type: none"> 결정론적 단일 광원 필요 2큐비트 게이트 구현의 어려움 광자 손실
실리콘 스핀	반도체 내 양자점 또는 도너 원자에 국소화된 전자의 스핀을 큐비트로 주로 활용하며, 스핀 상태는 전자기장을 사용하여 조작됨	Diraq(호주), Quantum Motion(영국) 등	<ul style="list-style-type: none"> 반도체 산업의 CMOS 공정과 높은 호환성 소형화로 높은 공간 효율성 	<ul style="list-style-type: none"> 극저온 냉각 장치가 필요 스케일업 시 배선 병목 문제 발생
다이아몬드 NV 센터	음전하 상태인 질소-공석 결함의 전자 스핀을 큐비트로 주로 활용하며, 마이크로파를 통해 스핀 상태를 조작	SaxonQ(독일), Quantum Brilliance(호주·독일) 등	<ul style="list-style-type: none"> 상온에서 동작 가능 긴 양자 결맞음 시간 	<ul style="list-style-type: none"> 대규모의 큐비트 개수로 확장이 어려움 고정밀 공정과 높은 제조 비용 필요

출처 참고자료 활용하여 저자 작성[4-7,12-14,16,18].

주) ()는 기업의 본사가 위치한 국가

있다[3].

초전도 방식은 게이트의 연산 속도가 빠르다는 점과 기존 반도체 제조 공정의 일부(포토리소그래피, 식각 공정 등)를 활용할 수 있어 확장성이 높다는 점이 주요 장점이다[4,7]. 이에 반해 큐비트의 양자 결맞음 시간이 짧고 초전도 큐비트 칩을 위해 극저온 냉동기가 필요하다는 점이 주요 단점이다. 이에 결맞음 시간 향상은 큐비트 개수 증대와 함께 초전도 방식의 중요한 연구 방향이 되어왔다.

포획 이온(Trapped Ions) 방식은 전자기장을 통해 전하를 띤 이온을 초고진공 챔버에 가둔다. 이를 구현하기 위해 Group-II 알칼리 토금속이나 이들과 유사한 최외곽 전자구조를 갖는 원소의 원자에서 전

자를 하나 제거한 양이온이 주로 이용된다[8]. 다른 외부 입자와의 충돌 가능성이 최소화되도록 이온들은 전자기장을 통해 초고진공 챔버에 갇히게 되며, 개별 이온의 두 에너지 준위가 큐비트 역할을 하게 된다.

포획 이온 방식은 포획 방법, 큐비트 제어 방법, 이온의 종류 등에 따라 구분할 수 있다. 포획 방법에는 RF 트랩이나 페닝 트랩이 많이 활용되며 큐비트 제어에는 레이저를 주로 이용하지만, 대안으로 레이저 대신 마이크로파를 이용하기도 한다[3,9]. 포획 이온 방식의 양자 컴퓨터를 개발하고 있는 IonQ는 이터븀 이온을, Quantinuum은 이터븀과 바륨 이온을 함께 사용하고 있다[10,11].

포획 이온 방식에 의해 포획된 이온들은 서로 완전히 동일하므로 큐비트 특성이 균일하며, 이는 매우 정밀한 제어를 가능하게 한다. 또한 초고진공 내에서 매우 고립된 환경에 있기 때문에, 많은 결어긋남(Decoherence)²⁾ 소스가 제거되어 양자 결맞음 시간이 길다[4]. 그러나, 게이트 속도가 느리고 대규모의 큐비트 개수로 확장하기가 어렵다는 점이 주요 문제점이다[12]. 특히, 단일 체인에서 효과적으로 제어 가능한 큐비트 개수가 제한적이므로 확장성 문제 해결이 가장 중요한 과제이다.

중성원자(또는 차가운 원자로 불림) 방식은 원자의 에너지 준위에 큐비트 상태가 인코딩되고, 균일한 특성을 보이는 원자를 초고진공 챔버에 가두며, 제어를 위해 레이저를 활용하는 등 포획 이온 방식과 여러 가지 공통점이 있다. 이러한 공통점으로 인해 양자 결맞음 시간이 길다는 장점과 게이트 속도가 느리다는 단점이 서로 유사하다. 반면, 개별 큐비트를 포획하는 방법과 2큐비트 게이트 구현 방법 등에서 포획 이온 방식과 차이가 있다[4].

중성원자 방식에서는 알칼리 금속 또는 알칼리 토금속 계열의 중성원자를 극저온으로 냉각하고³⁾, 레이저빔(광집계)을 사용하여 포획하여 원자 어레이를 형성한 다음, 여러 다른 레이저를 조사(Irradiation)하여 원자의 두 에너지 준위 간 전이를 제어한다[12,13]. 2큐비트 게이트는 리드버그 상태(Rydberg State)⁴⁾로의 전이로 활성화되는 강한 상호작용을 이용하여 구현되므로, 이온의 공통 운동 모드를 내부 상태와 결합하여 구현되는 포획 이온 방식과 대비된다[4]. 또한, 재구성 가능한 기하학적 원자 어레이

를 형성할 수 있어 확장성이 우수하다[14]. 그러나, 레이저의 역할이 다양하고 정밀한 큐비트 제어가 필요하므로 복잡성이 증대된다는 단점이 있다.

광자 기반 방식은 물질의 상태보다는 광자의 특성(예: 편광, 시간빈(Time-Bin), 경로, 주파수 등)에 큐비트를 인코딩하며, 인코딩된 광자는 빔 분할기(Beam Splitter) 및 위상 변조기(Phase Shifter)와 같은 선형 광학 소자를 포함한 광집적회로를 통해 전파된다[12,14]. 빔 분할기는 중첩과 얽힘을 생성하는 역할을 하고 위상 변조기는 위상을 조절하며 광자 검출기는 큐비트의 양자 상태를 측정한다[15].

광자 기반 방식은 상온에서 동작이 가능하고 장거리 전송에 적합하며 기존 인프라 및 첨단 광기술을 활용할 수 있다는 점 등이 장점이다. 이에 반해 결정론적 단일 광원(Deterministic Single Photon Source)⁵⁾이 요구되고, 2큐비트 게이트 구현이 어려우며, 광자 손실이 발생한다는 점 등이 단점이다[14,16]. 2큐비트 게이트 구현의 어려움으로 인해 발생하는 확장성 문제는 측정 기반 양자 컴퓨팅(Measurement Based Quantum Computing) 아키텍처를 채택함으로써 이를 극복할 수 있다[17].

실리콘 스핀(또는 전자 스핀 또는 양자점으로 불림) 방식은 반도체 내 양자점 또는 도너 원자에 국소화된 전자의 스핀을 큐비트로 주로 활용하며, 스핀 상태는 전자기장을 사용하여 조작된다. 이 방식은 현행 반도체 칩 제조 기술을 기반으로 하므로 확장성이 우수하며, 큐비트 사이즈가 작아 공간 효율성이 높다[14,18]. 주요 단점은 극저온 냉각 장치가 필요하고, 대규모 확장 시 배선 병목 문제가 발생할 수 있다는 점이다⁶⁾. 실리콘 스핀 방식에 관한 연구는

2) 외부 영향으로 양자 결맞음이 붕괴하는 현상을 지칭
3) 극저온을 유지해야 하는 공간은 매우 작음(즉, 극저온 냉동기 불필요)
4) 원자가 높은 에너지 준위로 전이된 상태를 의미하며 주양자 수가 큼

5) 필요할 때 한 개의 광자만을 높은 품질로 방출하는 광원을 의미함
6) 초전도 방식보다는 동작 온도가 높으며 동작 온도가 점점 개선되고 있음[4]

특히 호주(Diraq사, 시드니대학교 등)에서 활발하다고 알려지고 있다[3].

다이아몬드 NV(Nitrogen-Vacancy) 센터는 다이아몬드 탄소 격자 구조 내에서 탄소 원자 하나가 질소 원자로 치환되고 그 옆에 공석이 있는 결합을 의미한다. 이 질소-공석 결합 중에서 음전하 상태인 NV⁻의 전자 스핀을 큐비트로 주로 활용하며(핵 스핀은 보조적으로 활용), 마이크로파를 통해 상태를 조작하고 레이저를 통해 초기화 및 관독을 수행한다. 이 방식은 상온에서 구동이 가능하고 긴 양자 결맞음 시간을 제공한다는 장점이 있다. 그러나, 균일한 특성을 갖는 결합의 재현과 얽힘 구현이 어렵기 때문에 확장성이 제한적이며, 고정밀 공정과 높은 제조 비용이 요구된다는 단점이 있다. NV 센터 기반 방식에 관한 연구는 독일(SaxonQ사, 올름대학교 등)을 포함한 유럽에서 활발하게 전개되고 있다[3].

III. 플랫폼 유형별 선도 기업의 기술 개발 동향

1. 초전도

초전도 방식의 양자 컴퓨팅 연구를 선도하고 있는 대표적인 기업으로 IBM과 구글을 들 수 있다. 이외에 스타트업으로 Rigetti와 IQM도 주목할 만하지만, 본고는 지면상 IBM과 구글을 중심으로 이들의 기술 개발 동향을 살펴본다.

IBM은 비교적 최근까지 주로 큐비트 개수를 늘리는 방향으로 양자 프로세서 개발을 추진해왔다(이에 관한 세부 내용은 송경주 외(2025)를 참조하길 바란다). IBM의 양자 프로세서 개발 역사에서 큐비트 개수 측면에서 가장 크게 확장된 것은 Condor(2023년 발표, 1,121개 큐비트)였다[19]. 1,000큐비트를 돌파한 Condor 발표를 분기점으로, IBM의 전략 방향은 큐비트 개수 증가에서 고성능 양자 프로세

서 개발로 전환되었다. 적은 큐비트 개수에도 불구하고 높은 연산 효율성을 구현한 Heron r1을 공개(2023.12.)하였고, 이의 업그레이드 버전인 Heron r2를 공개(2024.07.)하였다.

2020년에 처음 발표된 'IBM 양자 개발 로드맵'은 이후 여러 차례 업데이트되었는데, 특히 2023년 12월 발표가 주목할 만하다. 2023년 12월 'IBM 퀀텀 서밋'⁷⁾에서는 그로스 코드(Gross Code) 기반의 오류 정정 기술을 적용한 스타링 프로세서(Starling Processor)를 2029년까지 구현하고, 2,000개 논리 큐비트에서 10억 개의 게이트를 실행할 수 있는 양자 컴퓨팅 시스템인 블루 제이(Blue Jay)를 2033년까지 구현하겠다는 내용을 담은, 10년 기간으로 확장된 로드맵을 공개하였다[20]. 2025년 6월에는 스타링 프로세서 개발 이전 단계를 더 구체화하고 재편성한 로드맵을 발표하였다.

IBM은 논리적 큐비트를 구성할 때 많은 물리적 큐비트가 소요되어 생기는 오버헤드를 줄이기 위해 표면 코드(Surface Code)보다는 qLDPC(quantum Low-Density Parity-Check) 계열의 그로스 코드를 선호하고 있다. 이 코드를 사용하면 288개의 물리적 큐비트로 약 100만 번의 오류 검사 주기 동안 12개의 논리적 큐비트를 보호할 수 있다(표면 코드 대비 효율성 약 10배)[21]. 그러나, 그로스 코드는 표면 코드보다 더 많은 연결성이 요구되고 디코딩 난이도가 높아 이를 해결하기 위한 다양한 노력을 기울이고 있다(실험용 양자칩 'Loon' 공개(2025.11), 디코더 알고리즘 Relay-BP 발표(2025.08) 등).

IBM과는 달리 구글(Google Quantum AI)은 양자 컴퓨팅 연구에서 주요 이정표가 되는 프로세서들을 개발하여 발표해온 것이 특징적이다. 구글은 2019

7) 133큐비트의 양자 프로세서인 Heron r1과 모듈화되어 확장가능한 양자 컴퓨팅 아키텍처인 IBM Quantum System Two도 함께 공개됨

년 10월에 공개한 Sycamore를 통해, 고전적인 슈퍼 컴퓨터로는 1만 년이 소요될 특정 계산작업(무작위 회로 샘플링)을 200초 만에 해결했다며 양자 우위 달성을 주장했다(이 주장에 대해 IBM은 반론을 제기). Sycamore는 54개의 트랜스몬 큐비트로 구성된 2차원 배열의 양자 프로세서인데, 각 큐비트는 조절 가능한 커플러를 사용하여 4개의 이웃한 큐비트와 연결되는 구조로 설계되었다[22].

2024년 12월에는 양자 오류 정정 기술 적용을 통해 오류율을 대폭 줄일 수 있고, 가장 빠른 슈퍼컴퓨터로 10²⁵년 걸리는 계산을 불과 5분 만에 해결할 수 있는, 105큐비트의 최신 양자 프로세서 Willow를 발표하였다⁸⁾[23]. 이때 구글이 발표한 논문에 따르면, 임계값 아래에서 동작하는 표면 코드 메모리에서 코드 거리를 3에서 5, 7로 증가시킬 때 논리적 오류율이 단계마다 2배 이상 감소하는 것이 관측되었으며, 특히 코드 거리 7에서는 논리적 오류율이 최상의 물리적 큐비트 오류율보다 낮아지는 손익분기점(Break-Even)을 초과하였다[4,24]. 2025년 10월, 구글은 Willow와 자체 개발한 Quantum Echoes 알고리즘을 통해 ‘검증 가능한 양자 우위’를 최초로 입증했다고 발표하였다⁹⁾[25].

참고로 구글의 양자 컴퓨팅 로드맵은 표 2에 제시된 바와 같이, 대규모 오류 정정 양자 컴퓨터를 구축하는 마일스톤 6에 이르기까지 총 6단계로 구성된다. 현재는 양자 오류 정정의 시작 단계라고 할 수 있는 마일스톤 2를 지나, 장기 생존하는 논리 큐비트를 구축하는 마일스톤 3을 향해 나아가고

8) 단일 큐비트 게이트 충실도: 99.96%, 2큐비트 게이트 충실도: 99.67%

9) 양자 검증 가능성(Quantum Verifiability)이란 구글의 양자 컴퓨터 또는 동일한 수준의 다른 양자 컴퓨터에서 동일한 결과가 반복적으로 도출되어 결과의 정확성과 신뢰성을 직접 입증할 수 있다는 의미임

표 2 구글의 양자 컴퓨팅 로드맵

	마일스톤 1	마일스톤 2	마일스톤 3	마일스톤 4	마일스톤 5	마일스톤 6
구분	고전 컴퓨팅 추월	양자 오류 정정	장기 생존 논리 큐비트 구현	논리 게이트 구현	엔지니어링 스케일업	대규모 오류 정정 양자 컴퓨터
물리 큐비트	54	10 ²	10 ³	10 ⁴	10 ⁵	10 ⁶
논리 큐비트 오류율	-	10 ⁻²	10 ⁻⁶	10 ⁻⁶	10 ⁻⁶	10 ⁻¹³

출처 참고자료 활용하여 저자 작성[26].

있다[26].

2. 포획 이온

포획 이온 방식의 양자 컴퓨팅을 연구 개발하고 있는 주요 기업으로는 IonQ, Quantinuum 등을 들 수 있다. 본고는 지면상 IonQ의 기술 개발 동향을 중심으로 살펴본다. 이에 앞서 독자를 위해 간략하게 이 기업을 소개한다.

IonQ는 2015년에 크리스 먼로와 김정상 교수에 의해 설립된 스타트업으로, 2021년 10월에 뉴욕 증권거래소에 상장되었다(세계 최초의 양자 컴퓨팅 순수 플레이어에 해당)[10]. 사업분야는 양자 컴퓨팅뿐만 아니라 양자 네트워킹, 양자 센싱, 양자 보안까지 아우르고 있으며, 높은 매출 성장률에도 불구하고 연구개발비를 포함한 비용 및 지출이 커서 상당한 영업 손실을 기록 중이다¹⁰⁾[27]. 현재 판매되고 있는 양자 컴퓨터는 Aria(25큐비트), Forte(36큐비트), Forte Enterprise(36큐비트)이며, 우리나라 KISTI에서 도입 예정인 Tempo(100큐비트)는 2026년 중에 판매가 개

10) 2024년 매출은 43,073천 달러(2023년 대비 약 2배)이고 영업손실은 232,455천 달러를 기록함

시될 예정이다¹¹⁾.

앞서 II장에서 설명한 바와 같이, 포획 이온 방식의 양자 컴퓨터를 개발하고 있는 IonQ는 이전 세대에서는 이터븀 이온을 기반으로 하였으나, 게이트의 충실도(Fidelity) 향상과 느린 속도 개선을 위하여 Tempo 등 차세대에서는 바륨 이온 기반으로 전환하였다[27]. 2025년 2월에는 초고진공 구현을 위해 극저온 환경이 더 이상 필요하지 않은 소형 상온 XHV(Extreme High Vacuum) 진공 챔버 프로토타입 개발 완료를 발표하였다. 이 기술 혁신으로 인해 에너지 비용이 대폭 절감되고, 시스템의 내구성이 향상되며 유지보수 부담이 감소하게 된다[28].

한편, 2025년 6월에 발표된 IonQ의 최신 로드맵에 따르면, 2030년까지 2백만 물리 큐비트와 4만~8만 논리 큐비트로의 대규모 확장을 통해 전 세계에서 가장 강력한 양자 컴퓨팅을 구현할 계획이다. 이는 2028년까지 1,024큐비트의 알고리즘 큐비트를 구현하겠다는 기존 #AQ 로드맵을 변경하여, 오류 정정 기반 대규모 스케일링으로 방향을 전환한 가속 로드맵이다. 이 가속 로드맵으로의 이행을 위하여 모듈식 접근법을 강조하고 있으며, Lighsynq(2025.05. 인수)의 양자 메모리 기반 포토닉 인터커넥트 기술과 Oxford Ionics(2025.09. 인수)의 2D 이온 트랩 기술 등이 함께 활용될 예정이다[29,30].

3. 중성원자

중성원자 방식의 양자 컴퓨팅을 연구 개발하

11) IonQ 홈페이지에 의하면 Aria와 Forte는 3대 메이저 클라우드 플랫폼을 통한 액세스나 IonQ 자체 클라우드 서비스를 통한 선택만 가능(즉, 온프레미스 형태의 구입은 불가능). Tempo의 단일 큐비트 게이트 충실도는 99.99%이고, 2큐비트 게이트 충실도는 99.9%임

고 있는 주요 기업으로는 QuEra Computing(이하, QuEra), Pasqal, Atom Computing 등을 들 수 있다. 본고는 상업화 측면에서 가장 주목할만한 기업이라고 판단되는 QuEra의 기술 개발 동향을 중심으로 살펴본다. 이에 앞서 간략하게 이 기업을 소개하고 대표 시스템인 Aquila에 대해 설명한다.

QuEra는 중성원자 기반 기술을 통해 확장 가능하고 고성능을 가진 양자 컴퓨터 구현을 위하여 하버드대학교와 MIT 연구자들에 의해 2018년에 설립되었다. 2021년에는 256큐비트의 프로그램 가능한 양자 시뮬레이터를 시연하였고, 2022년에는 256 큐비트 중성원자 시스템 Aquila를 Amazon Braket를 통해 전 세계 연구자들이 접속할 수 있도록 개방하였다¹²⁾. 주요 투자자로는 구글, QVT 패밀리 오피스, 엔비디아, 라쿠텐 등이 있으며, 현재까지는 비상장 기업이다[31].

Aquila는 루비듐(Rb-87) 원자를 진공 셀 내부에 레이저 빔으로 mK 수준의 온도까지 냉각시킨 상온 양자 장치로, 다음의 4가지 핵심 요소를 활용한다: (1) 물리 큐비트 역할을 하는 개별 루비듐 원자, (2) 최대 256개의 원자를 배열할 수 있는 재구성 가능한 광집계 어레이, (3) 원자의 전자 궤도에서 양자 역학 현상을 유도하는 매우 안정적인 레이저, (4) 원자 간 강한 상호작용을 유도하는 리드버그 상태. Aquila는 현재 FPQA(Field-Programmable Qubit Arrays) 구조 기반 아날로그 모드로 운용되며, 향후 디지털 게이트 기반 모드 또는 아날로그/디지털 이중 모드로 확장될 수 있다[32].

2024년 1월, QuEra는 2024년에 10개의 논리 큐비트 및 256개 이상의 물리 큐비트를 가진 양자 컴퓨터 개발을 시작으로, 2026년까지 100개의 논리 큐

12) 2025년 5월, 일본 산업기술종합연구소(AIST)에 온프레미스 형태의 게이트 기반 중성원자 양자 컴퓨터를 설치함

비트와 10,000개 이상의 물리 큐비트를 갖춘 3세대 양자 오류 정정 모델 도입을 목표로 하는 3개년 로드맵을 발표하였다¹³⁾. 이러한 발전 방안은 하버드대학교 연구팀 주도로 QuEra, MIT, NIST, 메릴랜드대학교 등이 협력하여 이룩한 연구 성과를 바탕으로 마련되었다[33]. 해당 연구는 48개 논리 큐비트에서 양자 오류 정정 기반 논리 연산을 시연하여, 대규모 양자 컴퓨팅으로 확장될 수 있음을 보여주었다.

2025년 9월, 하버드대학교와 MIT 및 QuEra는 공동 연구를 통해 새로운 성과를 발표하였다. 해당 논문에 따르면, 광학 격자 컨베이어 벨트와 광집계를 이용하여 손실된 원자를 고속으로 재보급함으로써 3,000개 이상의 원자로 구성된 어레이를 2시간 이상 유지하는 데 성공하였다. 이 연구 결과는 중성원자 방식의 주요 문제점 중 하나인 원자 손실 문제를 효과적으로 완화하고, 대규모의 지속 작동이 가능한 내결함성(Fault-Tolerant) 양자 컴퓨터 구현을 위한 기반을 마련했다는 데 의의가 있다[34].

4. 광자 기반

광자 기반 양자 컴퓨팅을 연구 개발하고 있는 기업으로는 PsiQuantum, Xanadu, Quandela 등을 꼽을 수 있다. 본고는 대규모 투자 유치 실적으로 많은 주목을 받은 PsiQuantum사를 중심으로 기술 개발 동향을 살펴본다. 이에 앞서 간략하게 이 기업을 소개한다.

PsiQuantum은 광자 기반 큐비트와 성숙한 반도체 제조 공정을 활용하여 상업적으로 유용한 양자 컴퓨터를 빠르게 구현한다는 비전을 바탕으로 2016년에 설립되었다. 2021년 1월에는 FBQC

(Fusion-Based Quantum Computing)를 제안하고, 얽힘 측정을 활용한 내결함성 양자 컴퓨팅의 토대를 제시하는 프레임워크를 발표하였다. 2024년 4월에는 호주 정부의 투자를 받아 브리즈번에 유틸리티 스케일의 내결함성 양자 컴퓨터를 구축하겠다고 발표하였다¹⁴⁾. 이후 광자 기반 양자 컴퓨팅을 위하여 산업적으로 제조 가능한 포토닉 칩셋 ‘Omega’를 발표(2025.02.)하였고, 시리즈 E 라운드에서 총 10억 달러의 투자를 유치하였다(2025.09.)[35].

PsiQuantum이 제안한 FBQC는 측정 기반 양자 컴퓨팅(MBQC)의 일종으로, 광자 큐비트의 특성을 적극 활용하는 방식이다. MBQC와는 유사한 점이 많지만, 광자 기반의 소규모 양자 얽힘 상태를 생성하는 장치들이 요구되고 퓨전 연산이 수행된다는 점 등에서 차이가 있다. 즉, 대규모 양자 얽힘 상태의 안정적 유지가 필요하지 않은 FBQC는 광자 손실이라는 약점을 가진 광자 기반 양자 컴퓨팅을 더 효과적으로 구현할 수 있다. 이러한 장점을 기반으로 PsiQuantum의 초기 연구는 FBQC에서 표면 코드 기반 양자 오류 정정의 성능 등을 분석했다[36].

PsiQuantum사가 호주 브리즈번(2024.04. 계획 발표)과 미국 시카고(2024.07. 계획 발표)에 구축하려는 유틸리티 스케일의 내결함성 양자 컴퓨터는, 오류 정정이 가능한 100만 개 규모의 물리 큐비트를 목표로 하는 대형 시스템으로 소개되고 있다[37]. 이러한 유틸리티 스케일의 양자 컴퓨터를 위하여 특별히 설계된 포토닉 칩셋 Omega(2025.02. 발표)는 대량생산이 가능하여 기술적 성숙도와 규모 확장 측면에서의 진전을 보여준다. Omega는 초전도 단일

13) 2025년까지는 3,000개 이상의 물리 큐비트와 30개 논리 큐비트로 향상

14) 이 발표에 따르면, 호주 연방정부와 퀸즈랜드 주정부는 940백만Au\$를 PsiQuantum에 공동으로(50:50) 투자하며 PsiQuantum은 아시아-태평양 지역 본사를 브리즈번시에 설립하고 세계 최초 유틸리티 스케일의 내결함성 양자 컴퓨터를 구축하게 됨

광자 검출기, 단일 광자 소스, 고성능 광 스위치를 하나의 초저손실 실리콘 나이트라이드 플랫폼에 집적하였다. 이 플랫폼을 사용하여 테스트한 결과 높은 충실도와 성능을 제공하는 것으로 확인되었다¹⁵⁾ [35,38].

5. 실리콘 스핀

실리콘 스핀 방식의 양자 컴퓨팅을 연구 개발하고 있는 기업으로는 Intel, Diraq, Quantum Motion (이하, 퀀텀 모션) 등을 꼽을 수 있다. 본고는 단기적 상업화 가능성 측면에서 가장 앞서 있는 기업이라고 판단되는 퀀텀 모션의 기술 및 제품 개발 동향을 중심으로 살펴본다. 이에 앞서 간략하게 이 기업을 소개한다.

2017년에 영국 런던에 설립된 퀀텀 모션은 CMOS 공정과 호환되는 100만 큐비트 이상의 내결함성 양자 컴퓨터를 빠른 속도로 개발하는 것을 목표로 하고 있다. 주요 이력으로는 CMOS 공정을 활용해 1,024개의 양자점을 단일 칩(Bloomsbury)에 집적하는 데 성공했다고 발표(2022.10.)했으며, 시리즈 B 라운드를 통해 42백만\$의 투자를 유치(2023.02)하였다. 이어 2025년 9월에는 CMOS 칩 제조 공정을 사용하여 구축된 업계 최초의 풀스택 양자 컴퓨터를, 영국 국립 양자 컴퓨팅 센터(NQCC)에 인도하고 설치하였다[39].

2022년 10월에 이루어진 발표 내용을 상세히 살펴보면, Bloomsbury 칩은 300mm 웨이퍼 기반 표준 CMOS 공정을 활용하여 실리콘 스핀 기반 소자로 제작되었으며, 극저온 환경에서의 동작 특성이 평

가되었다. 이 칩의 국소 면적(0.1mm² 미만)에는 큐비트 구현이 가능한 1,024개의 양자점 어레이를 집적하였고, 자동화된 특성 분석을 12분 이내에 수행할 수 있음을 시연하였다. 이는 기존 기술 대비 약 100배 빠른 속도로, 표준 반도체 공정을 통해 대규모 큐비트 어레이를 균일하게 제조하고 조정할 수 있음을 입증한 것이다[40].

한편, NQCC 테스트베드 프로그램에 따라 퀀텀 모션이 2025년 9월에 납품한 풀스택 양자 컴퓨터는 희석 냉동기, 양자처리장치(QPU), 사용자 인터페이스 및 제어 스택을 통합한 시스템이다. 전체 시스템은 19인치 서버 랙 3개로 구성되며, QPU는 향후 수백만 개의 큐비트를 수용할 수 있도록 확장 가능한 타일 기반 아키텍처를 바탕으로 설계되었다. 다만, 큐비트 개수, 게이트 충실도 등 구체적인 성능 지표는 공개되지 않았으며, 양자 오류 정정 기술의 적용 여부도 명시되지 않아 실증 용도의 초기 시스템으로 생각된다[41,42].

그러나, 이 기업이 공식적으로 내세우고 있는 목표와 풀스택 양자 컴퓨터에서의 확장 가능한 타일 기반 아키텍처를 고려해보면, 결국 퀀텀 모션도 양자 오류 정정 기술 개발과 적용을 염두에 두고 있다고 사료된다. 참고로 퀀텀 모션은 영국 정부가 지원하는 실리콘 양자 오류 정정(SiQEC) 프로젝트를 최근에 수주했고, 미국 국방고등연구계획국(DARPA)의 QBI(Quantum Benchmarking Initiative)에도 참여하고 있다.

6. 다이아몬드 NV 센터

다이아몬드 NV 센터 방식의 양자 컴퓨팅을 연구 개발하고 있는 주요 기업으로는 SaxonQ, Quantum Brilliance(이하, 퀀텀 브릴리언스), XeedQ 등을 꼽을 수 있다. 본고는 상업화 측면에서 가장 주목할만한

15) 단일 큐비트 상태 준비 및 측정(SPAM) 충실도: 99.98%±0.01%, 칩 간 큐비트 인터커넥트 충실도: 99.72%±0.04%, 양자 간섭 가시성: 99.50%±0.25%, 2큐비트 퓨전 게이트 충실도: 99.22%±0.12%

기업이라고 판단되는 퀀텀 브릴리언스의 기술 및 제품 개발 동향을 중심으로 살펴본다. 이에 앞서 간략하게 이 기업을 소개한다.

퀀텀 브릴리언스는 다이아몬드가 일상 기술의 초석이 될 수 있다는 신념을 바탕으로 2019년에 설립된 스타트업이다¹⁶⁾. 2021년에는 NV 센터 기반 실온 양자 가속기 프로토타입을 발표하였고, 2023년 2월에는 26백만Au\$ 규모의 투자를 유치하였다. 2024년 9월에는 미국 오크리지 국립연구소(ORNL)와의 전략적 파트너십을 발표하였고, 2024년 11월에는 2세대 실온 양자 가속기를 독일 프라운호퍼 연구소에 판매하였다. 최근에는 세계 최초 실온 다이아몬드 클러스터 시스템을 ORNL에 설치(2025.09.)하였으며, 세계 최초의 상업적 양자 다이아몬드 파운드리 팍을 개소(2025.11.)하였다[43].

이 기업의 주요 특징은 대규모 내결함성 양자 컴퓨터 구축보다는 NV 센터 기반의 소형 실온 양자 가속기 개발에 주력하고 있다는 점이다. 프라운호퍼 연구소가 구매한 2세대 QB-QDK2.0은 19인치 랙 마운트형 양자 가속기로, 여기에는 여러 가지 오픈 소스 소프트웨어들도 포함되어 있다[44]. 세계 최초의 실온 다이아몬드 클러스터 시스템으로 알려진 Quoll은 QPU, GPU, CPU로 구성된 하이브리드 양자 시스템으로, ORNL의 '첨단 컴퓨팅 에코시스템' 테스트베드에 설치되어 슈퍼 컴퓨팅 인프라와의 통합이 추진되고 있다[45].

한편, 퀀텀 브릴리언스는 호주 주요 대학들과의 산학 협력 연구 개발 활동을 활발히 전개하고 있다. 예를 들어 호주국립대학교(ANU), RMIT 대학교 등과의 공동 연구를 통해 최근 발표한 논문에서는, 확장 가능하고 나노미터 수준의 정밀도로 다이아몬드

NV 센터를 제작할 수 있는 수소 탈패시베이션 리소그래피(Hydrogen Depassivation Lithography) 기반 다단계 공정 절차를 제시하였다[46]. 해당 연구는 실세계 응용 및 상용 시스템이 요구하는 조건을 충족하는 실온의 양자 칩 기술 기반을 마련했다는 점에서 의미 있는 성과로 평가된다.

IV. 플랫폼 간 경쟁 평가 논의 동향

1. 플랫폼 간 경쟁 현황 진단 및 미래 전망 관련 주요 견해

앞서 II장에서 요약 설명한 바와 같이, 양자 컴퓨팅 하드웨어 6대 플랫폼은 각각 고유한 장점과 단점을 지니고 있다. 이러한 이유로 인해 어떤 플랫폼이 장기적으로 우위를 차지할 것인지를 전망하는 것은 매우 어렵다. 실제로 많은 문헌들은 미래에 어떤 플랫폼이 지배적인 기술 방식으로 자리 잡을지 단정하기 어렵다는 식의 단편적인 결론에 머무르고 있다. 이 장에서는 이러한 단편적이고 일반적인 관점을 넘어, 플랫폼 간 경쟁 현황 및 향후 전망에 대해 보다 구체적인 논의를 시도한 문헌들에서 제시된 주요 견해를 소개한다.

먼저 MIT 양자 인덱스 보고서(2025.06.)는 글로벌 시장 관점에서, 초전도 방식(상용화된 40개 QPU의 50% 차지, 표 3 참고)이 제조 공정상의 이점과 연구 개발 선점 효과에 힘입어, 타 플랫폼을 압도하고 있다고 평가하였다. 향후에는 광자 기반, 포획 이온, 중성원자 및 실리콘 스핀 방식의 점유율이 확대될 것으로 전망하였다. 그러나, 플랫폼 유형별 최고 성능 QPU를 대상으로 큐비트 수, 2큐비트 게이트 충실도, 게이트 속도 등 주요 물리적 벤치마크를 종합 비교한 결과, 아직은 확실한 승자가 존재하지 않는다는 신중한 견해를 제시하였다[12].

동 보고서의 QPU 벤치마크에 대한 분석 내용

16) 호주국립대학교(ANU)에서 분사한 스타트업으로 호주 외에 독일, 영국, 일본에도 현지 법인을 운영 중

표 3 전 세계 상용 QPU의 플랫폼별 및 국가별 분포

구분	초전도	포획이온	중성원자	포토닉스	실리콘 스핀 & NV 센터	어닐러
미국	6	5	2	3		
핀란드	4					
중국	4					
네덜란드	3			1		
프랑스			1	2		
일본	2					
캐나다						2
영국	1			1		
오스트리아		1				
호주					1	
독일					1	
합계	20	6	3	7	2	2

출처 참고자료 활용하여 저자 작성[12].

을 상세히 살펴보면, 종합 비교에 앞서 물리적 성능 평가를 위한 시범적 접근으로, 두 가지 2차원 벤치마크를 적용하여 검토하였다. 큐비트 수 vs. 2큐비트 게이트 오류율의 2차원 벤치마크에서는 IBM의 Heron r2가 가장 우수한 것으로 평가되었으며, 2큐비트 게이트 오류율 vs. 2큐비트 게이트 속도의 2차원 벤치마크에서는 IBM의 Heron r2와 IQM의 Garnet이 최상위 성능을 보인 것으로 평가되었다¹⁷⁾. 또한, 동 보고서는 산업계의 관심이 단순한 큐비트 수 증가에서 벗어나 오류 정정, 게이트 및 판독 충실도, 게이트 속도 개선으로 변화하고 있음을 지적하였으며, 이러한 추세에 부합하는 벤치마크 지표를 고려할 필요가 있다는 견해를 제시하였다.

IQM & Omdia 보고서(2025)는 시장 관점에서 MIT 보고서와 유사한 판단을 내리고 있다. 해당 보

17) 다만, 두 번째 2차원 벤치마크에서는 게이트 속도가 공개되지 않은 포획 이온 방식 및 중성원자 방식의 QPU가 다수 존재하여 적용에 한계가 있었음

고서에 따르면, QPU 제조사의 기술 방식 채택 현황을 모니터링한 결과 초전도 방식을 채택하고 있는 제조사 비중이 31%로 가장 높은 것으로 조사되었다(이어 광자 기반(23%), 실리콘 스핀(20%) 순)[15]. 또한, 동 보고서는 초전도 방식이 가장 방대한 지식과 경험을 축적하고 있으며, 가장 오랫동안 운영된 양자 컴퓨터도 이 방식을 기반으로 하고 있다는 점을 언급하였다. 이를 기술 채택 현황과 결합해보면, 상업적으로 초전도 방식이 가장 널리 채택되고 있는 배경에는 연구 개발 선점 효과가 주요 요인으로 작용하고 있는 것으로 해석된다.

한편, 동 보고서는 향후 어떤 기술 방식이 지배적 플랫폼이 될 것인가에 대한 질문을 포함하여 전문가 인터뷰를 수행하였다¹⁸⁾. 일부 전문가는 특정 방식(예: 초전도, 광자 등)에 대한 선호를 언급하였지만, 전체적으로는 기술 방식들이 상호보완적일 가능성이 높다는 견해가 우세하였다. 이는 서로 다른 양자 컴퓨팅 플랫폼이 서로 다른 이점을 제공하기 때문에, 하나의 기술 방식이 대세를 이루기보다는 최소 두 가지 이상의 플랫폼이 공존하면서 응용 분야별로 상당한 수준의 전문화가 진행될 가능성을 시사한다[15]. 이러한 전망은 확실한 승자가 나타나기보다는, 서로 다른 영역 및 작업에 특화된 플랫폼들이 병존할 가능성이 높다고 본 Tony Blair 연구소 보고서(2025.11.)의 견해와도 유사하다[18].

D. D. Awschalom 외(2025.12.04.)는 기술준비수준(TRL: Technology Readiness Levels)을 활용하여 양자 컴퓨팅의 6대 플랫폼 간 상대적 기술 성숙도를 평가하

18) Omdia는 2025년 3월~5월 기간에 주요 선진국의 국립 고성능 컴퓨팅(HPC) 센터 및 연구기관의 양자 컴퓨팅 전문가, 투자자 및 기타 관계자 총 11명을 대상으로 심층 인터뷰를 진행하였으며, 상기 보고서에서는 미래의 지배적 플랫폼에 대하여 견해를 밝힌 4명의 주요 응답 내용을 소개하고 있음

였다¹⁹⁾. 저자들이 제시한 평가 결과에 따르면, 현재 초전도(TRL 6-8)와 포획 이온(TRL 6-7)이 가장 높은 성숙도를 보이며, 중성원자(TRL 4-6)와 광자 기반(TRL 4-6) 플랫폼이 그 뒤를 잇고 있다. 또한, 저자들은 미래의 승자를 단정적으로 전망하기보다는 스케일업을 위한 과제 해결의 중요성을 강조하였다. 스케일업을 위해서는 모듈화가 특히 중요한데, 여러 모듈을 효과적으로 연결하는 데는 포토닉스가 유리하다고 보고 있다[4].

이 외에 디지털 전문 매체 Biforesight에 게재된 기고문(2024.09.11.)에 따르면, 저자가 인터뷰한 6명의 전문가 중 5명은 특정 플랫폼이 모든 것을 독식하는 시나리오는 현실화되기 어려울 것이라고 응답하였다. 해당 기고문은 플랫폼 간 경쟁의 향방을 단정하기 어렵다는 점에서 신중한 접근이 필요하다는 태도를 유지하면서도, 장기적으로는 광자 기반 방식이나 실리콘 스핀 방식, 또는 이 둘의 조합이 승자가 될 가능성이 높다는 H. Hauser의 견해를 상대적으로 비중 있게 다루고 있다. 그는 현재의 경쟁 구도에 대해 초전도 방식과 포획 이온 방식이 앞서 있는 가운데, 중성원자 방식이라는 새로운 유망주가 등장한 상태라고 진단하였다[47].

기존 문헌에서 논의된 플랫폼 간 경쟁 현황 및 전망에 관한 주요 견해를 종합하면, 초전도 방식이 현재 가장 앞서 있는 플랫폼이라는 점에서는 대체로 의견이 일치하고 있다. 다만, 초전도 방식의 뒤를 이어 2위를 차지하는 플랫폼이 무엇인지에 대하여는 견해가 엇갈리는 상황이다. 포획 이온 방식을 2위로 평가하는 시각이 상대적으로 우세하지만, 이러한 판단이 물리적 벤치마크나 시장 지표를 통해 명확히 입증되고 있다고 보기는 어렵다. 이에 따라 플랫폼

19) 외부의 종합적 관점을 제시하기 위해 논문에서 제시한 TRL 값은 ChatGPT와 Gemini의 쿼리로부터 가져왔다고 밝히고 있음

폼 간 경쟁 상황을 더욱 객관적으로 진단할 수 있는 일관된 평가체계 구축이 필요하다고 판단된다.

또한, 특정 플랫폼이 향후 지배적 위치를 차지하게 될 것이라는 식의 단정적인 전망은 적절하지 않은 것으로 사료된다. 플랫폼별 연구 개발 착수 시점이 상이하며, 기술 개발 과정에서의 불확실성 또한 매우 크기 때문이다. 더불어 기존 산업과의 호환성이나 연계 효과까지 고려할 경우, 특정 플랫폼의 우위는 향후 변화하거나 역전될 가능성도 존재한다. 현재 발전 중인 6대 플랫폼은 구현 방식과 강점이 상이하므로, 단일 플랫폼으로 수렴하기보다는 복수 플랫폼이 공존하는 방향으로 전개될 가능성 역시 높다. 따라서 기술 발전 추세와 시장 환경을 주기적으로 관찰하여 플랫폼별 발전 수준을 진단하고, 이를 정책 및 전략 수립에 반영하는 것이 중요하다.

2. 해외 주요국 정책 추진 동향

이 절에서는 플랫폼 간 경쟁 평가와 관련된 해외 주요국의 정책 추진 동향에 대해 살펴본다. 정책적 중요성과 산업적 파급력이 모두 큰 유럽연합과 미국을 중심으로 분석한다.

2025년 7월에 발표된 유럽양자전략(Quantum Europe Strategy)은 유럽을 양자 기술의 글로벌 리더로 도약시키기 위해 연구 및 혁신, 양자 인프라, EU 양자 생태계, 우주 및 이중용도, 양자 스킬 등 5개 전략 영역에 초점을 맞춘 포괄적인 종합 계획이다. 이 가운데 두 번째 전략 영역인 양자 인프라의 첫 번째 세부 분야인 ‘양자 컴퓨팅 및 시뮬레이션’에서는 각 플랫폼을 점진적으로 확장하여 2030년까지 시스템당 약 100개의 오류 정정 큐비트 확보에 도달하고, 나아가 2035년까지는 플랫폼당 수천 개 수준의 오류 정정 큐비트 달성을 목표로 하고 있다.

이러한 목표 달성을 위한 계획의 일환으로 유럽

집행위원회(EC)는 2026년에 ‘EU 양자 컴퓨팅 및 시뮬레이션 로드맵’을 발표할 예정이다. 이와 함께 EuroHPC 기반 양자 컴퓨팅 시스템의 개수와 용량을 지속적으로 확대해 나가면서 ‘양자 컴퓨팅 모니터링 프레임워크’ 구축도 추진할 예정이다. 특히 이 로드맵에는 다양한 양자 플랫폼의 기술적 진보와 성숙도를 추적하기 위한 명확한 벤치마크와 모니터링 프로세스가 마련될 예정이다. 이를 통해 어떤 플랫폼이 가장 발전했는지, 또는 장기적으로 유망한지를 정기적으로 평가할 수 있게 된다. 유럽집행위원회는 이러한 증거 기반 접근법이 유럽의 전략적 의사결정을 적절히 가이드하고, 미래 공공 투자 우선순위를 결정하는 데 도움이 될 것으로 보고 있다 [48].

2025년 8월, 유럽 양자 산업계를 대표하는 산업 주도 컨소시엄인 QuIC는 유럽양자전략에 대한 입장을 담은 포지션 페이퍼를 발간하였다. 이 페이퍼에서 QuIC는 해당 전략에 대해 전반적으로 환영하는 기조를 보였으나, 전략의 더욱 효과적인 이행을 위해 필요하다고 판단한 몇 가지 권고사항을 제시하였다. 특히, QuIC는 유럽양자전략의 ‘양자 컴퓨팅 및 시뮬레이션’ 세부 분야에서 밝힌 측정 가능한 목표치(예: 2030년까지 100개의 오류 정정 큐비트 달성) 도입을 긍정적으로 평가하였다. 다만 이러한 목표치가 더 구체화되어야 하며, 2026년에 발표될 ‘양자 컴퓨팅 및 시뮬레이션 로드맵’에서 한층 정교한 형태로 제시될 필요가 있다고 제안하였다.

이러한 제안의 구체적인 내용은 다음과 같다. 먼저, 목표치는 성능 중심의 KPI(Key Performance Indicator)²⁰⁾와 시장·생태계 중심의 KPI²¹⁾를 기반으로 하

20) 예: 결맞음 시간, 큐비트 커넥티비티, 속도, 논리 큐비트 연산 충실도, 액세스 가능한 양자 게이트 또는 상호작용 세트 및 확장성 등

21) 예: 큐비트당 비용, 상업적 양자 이용자 수, 선도 시장 성장 등

여 플랫폼별로 명확하고 야심찬 수준으로 정의되어야 한다. EU는 단기적으로는 다양하고 상호운용이 가능한 양자 컴퓨팅 플랫폼을 폭넓게 수용해야 하지만, 산업화 단계에서는 경쟁적이고 성과 중심의 평가를 통해 독립적인 전문가들이 선정한 제한된 범위의 양자 컴퓨팅 플랫폼에 집중할 필요가 있다. 또한, 이러한 선정이 투명하게 이루어질 수 있도록 하는 프레임워크를 개발해야 한다[49].

미국 DARPA는 2033년까지 유틸리티 스케일(Utility-Scale)²²⁾의 양자 컴퓨터 개발이 실현 가능한지를 엄격하게 검증·확인하고, 선정된 기업에 자금을 지원하는 QBI 프로그램을 2024년 7월부터 추진하고 있다. QBI 프로그램은 3단계로 구성되며, 1단계에서는 개념의 타당성을 평가하고, 2단계에서는 연구 개발 계획의 적절성을 평가한다. 이어 3단계에서는 제안된 설계가 실제로 구축 가능한지를 검증·확인하는 데 중점을 둔다[50]. 2025년 11월, DARPA는 QBI 프로그램의 1단계를 통과하여 2단계로 진입한 11개 기업 명단을 발표하였다²³⁾(표 4 참고)[51].

DARPA는 QBI 2단계 양자 컴퓨팅 연구 개발 계획 평가에 있어 기술 방식의 다양성이 중요한 고려 사항이란 점을 인정하면서도, 프로그램 목표가 소수의 승자를 고르는 데 있지 않다고 강조한다. 각 기업이 채택한 접근방식의 우열을 평가하기보다는 해당 방식이 지닌 고유한 장점과 실현 가능성을 중심으로 평가할 것임을 밝히고 있다[50]. 이는 특정 기

22) 양자 컴퓨터의 계산 가치가 비용을 초과하는 수준

23) 이 발표 이전에 구글은 QBI 1단계에 합류했고(2025.09. 발표) 마이크로소프트와 PsiQuantum은 QBI의 전신인 US2QC 프로그램의 최종 단계에 진입함(2025.02. 발표). QBI는 산업적으로 유용한 내결함성(fault-tolerant) 양자 컴퓨터를 구축하는 것이 가능하기를 평가하는 하드웨어 검증 중심의 US2QC 프로그램과 양자 컴퓨팅의 영향력 기준 정립을 목표로 하는 양자 벤치마킹(QB) 프로그램이 합쳐진 것임

표 4 DARPA QBI 2단계 진출 기업 명단

기업	본사 위치	기술 방식
Atom Computing	미국 캘리포니아주 버클리	중성원자
Diraq	호주 시드니	실리콘 스피ن 큐비트 (CMOS)
IBM	미국 뉴욕주 아몽크	초전도
IonQ	미국 메릴랜드주 칼리지파크	포획 이온
Nord Quantique	캐나다 퀘벡주 세브룩	초전도(보소닉 오류 정정을 갖춘)
Photonic Inc.	캐나다 밴쿠버	실리콘 스피ن 큐비트 (광 연결 구조)
Quantinuum	미국 콜로라도주 브룸필드 & 영국 케임브리지	포획 이온
Quantum Motion	영국 런던	실리콘 스피ن 큐비트 (CMOS 기반)
QuEra Computing	미국 보스턴	중성원자
Silicon Quantum Computing	호주 시드니	실리콘 스피ن 큐비트 (실리콘 내 정밀 원자)
Xanadu	캐나다 토론토	포토닉

출처 참고자료 활용하여 저자 작성[50,51].

술에 대한 선호 여부와 관계없이, 향후 8년 이내에 산업적으로 유용한 양자 컴퓨터를 구현할 수 있는 실질적 방안이 제시될 수 있느냐를 핵심 기준으로 삼겠다는 의미이다. 최종 평가 결과에 따라서는 다수 기업이 선정될 수도 있고, 단일 기업이 선정되거나 심지어 적합한 기업이 전혀 없을 가능성도 염두에 두고 있다는 점에서 미국이 전통적으로 중시해온 기술 중립성(Technology Neutrality) 기조가 엿보인다²⁴⁾.

한편, 미국은 국가양자이니셔티브(NQI)의 법적 승인 기간 만료에 따라, 이를 2034년 12월까지 연

24) 역사적인 관점에서 살펴보면, 미국은 다양한 기술들이 경쟁을 통해 시장에서 선택되도록 하는 기술 중립적인 산업 정책이 주류를 이루어왔음. 이에 반해 유럽은 미국에 비해 상대적으로 특정 기술(예: 1990년대 GSM)을 뒷받침하거나 지원하는 산업정책들이 많이 전개되었음

장하고 산업·응용 분야에 대한 지원을 확대하는 ‘NQI 재승인 법안’을 공화당과 민주당이 공동으로 발의(2026.01.)하였다. 해당 법안은 총 22개 조로 구성되어 있으며, 이 중 제12조에서는 국립표준기술연구소(NIST)가 본 법안에 따라 추가로 수행해야 할 새로운 활동들을 규정하고 있다. 여기에는 DARPA 국장과 협력하여 ‘양자 기술의 비교 성능 및 진전에 대한 측정²⁵⁾’을 지원하기 위한 연구 수행도 포함된다[52].

이 조항의 내용을 저자 시각에서 해석해보면, 양자 컴퓨팅 하드웨어를 포함한 여러 양자 기술에 대해 성능 비교가 가능하고 기술 발전 수준을 측정할 수 있는 체계를 만들겠다는 의미로 판단된다. 특히 원래 예상되었던 문구 중 ‘기술 준비 평가를 포함하여²⁶⁾’가 삭제된 점을 고려할 때, 입법자의 의도는 프레임워크 수립 과정에서 NIST의 재량을 강화한 것으로 이해된다. NIST의 기관 성격을 고려하면, 양자 컴퓨팅 프로세서에 대한 성능 벤치마크나 플랫폼별 기술 발전을 측정할 수 있는 지표를 개발하는 것이 핵심이며, 특정 기술이나 플랫폼에 대한 직접적인 순위 판정 또는 순위 매김은 지양될 것으로 예상된다.

이와 같은 미국의 정책 추진 방향은 독립적인 평가를 통해 선정된 플랫폼으로 투자 범위를 축소해 나가려는 유럽의 정책 기조와는 차이를 보인다. 즉, 미국 DARPA의 QBI는 기술 방식 간 우위를 가리는 경쟁적 선별보다는 유틸리티 스케일 양자 컴퓨터의 구현 가능성을 판단하기 위한 절대 평가에 초점이 맞추어져 있다고 보인다. 또한, NQI 재승인을 위해 최근 발의된 미국 법안 역시 지표 개발을 통해 기술 방식 간 비교가 간접적으로 가능한 평가체계 구축

25) measurement of comparative performance and progress of quantum technologies

26) including technology readiness evaluation

에 중점을 두고 있는 것으로 판단된다. 이러한 유럽과 미국 간 정책 기조 차이는 기술 중립성에 대한 오랜 역사적 관행과 산업정책 추진 방식의 차이에 기인하는 것으로 해석할 수 있다.²⁷⁾

V. 결론 및 정책적 시사점

양자 컴퓨팅 시장은 높은 성장 잠재력과 역동적인 기술 혁신에도 불구하고, 하드웨어 부문에서 발생하는 병목이 발전의 주요 애로 요인으로 작용하고 있다. 하드웨어 부문은 단일 기술 방식으로 수렴하지 않고, 6대 플랫폼을 중심으로 병렬적인 발전 경로를 보인다. 이러한 배경하에서 본고는 양자 컴퓨팅 하드웨어 플랫폼 유형별로 선도 기업 사례를 중심으로 기술 개발 동향을 분석하였다. 아울러 플랫폼 간 경쟁 현황 및 향후 전망에 관한 주요 견해를 고찰하고, 이와 관련된 해외의 정책 추진 동향을 분석하였다.

본격적인 분석에 앞서 6대 플랫폼의 주요 특징을 요약·정리한 결과, 각 플랫폼은 큐비트를 구현하고 제어하는 방식에서 뚜렷한 차이를 보이며, 서로 대비되는 고유한 장단점을 지닌 것으로 나타났다. 특히 광자 기반 방식은 다른 물질 기반 플랫폼과 비교할 때 구현 원리와 기술적 특성 측면에서 차별성이 더욱 두드러진다. 이러한 플랫폼 간 이질성과 상이한 장단점은 향후 어떤 플랫폼이 지배적인 지위를 차지하게 될지 단정적인 전망을 내리기 어렵게 만드는 주요 원인으로 작용한다.

플랫폼 유형별 선도기업 사례를 중심으로 최신 기술 개발 동향을 분석한 결과, 다음과 같은 특징이

도출되었다. 첫째, 다수의 플랫폼에서는 대규모 내결함성 양자 컴퓨터 구현을 목표로 양자 오류 정정 기술 개발에 집중하고 있거나 이를 중장기 기술 개발 방향으로 설정하고 있다. 둘째, 각 플랫폼이 지닌 고유한 기술적인 약점을 극복·완화하거나 성능을 향상시키기 위한 기술 혁신 활동이 활발하게 전개되고 있다. 특히 플랫폼 고유의 약점을 보완하고 한계를 극복하기 위한 기술적 시도가 비교적 높은 비중으로 관찰된다. 셋째, 특정 플랫폼을 채택한 기업들은 기본적으로 해당 기술 방식을 유지하고 있으나, 필요시 일부 공정이나 구성 요소를 변경하는 등 유연한 변화를 시도하고 있다.

플랫폼 간 경쟁 현황 진단과 미래 전망에 대한 주요 견해를 고찰한 결과, 현시점에서는 초전도 방식이 가장 앞서 있다는 점에 대해 대체로 의견이 일치하고 있다. 반면, 장기적 관점에서는 특정 플랫폼이 우위를 차지하기보다는 각 플랫폼이 지닌 기술 특성과 활용 분야에 따라 전문화된 형태로, 복수 플랫폼이 공존할 가능성이 높다는 견해가 우세하다. 아울러 미래 전망에는 많은 불확실성이 수반되므로 플랫폼별 발전 수준에 대한 주기적인 모니터링과 체계적인 평가의 중요성이 높아지고 있다.

이와 관련된 정책 추진 사례로 유럽연합의 양자 전략과 이에 대한 산업계 입장, 그리고 미국 QBI 정책 기조와 NQI 재승인 법안 내 관련 조항을 분석하였다. 분석 결과에 따르면 기술 중립성에 대한 역사적 관행과 산업정책 추진 방식의 차이로 인해 평가체계 도입을 둘러싼 정책 기조가 서로 다른 것으로 판단된다. 특히 유럽연합은 기술 성능 지표와 시장·생태계 지표를 양대 축으로 하는 평가체계를 구체화하고, 이를 토대로 주기적인 평가를 수행하여 연구 개발 집중 플랫폼 범위를 조정하려는 정책 의도를 보인다.

이들에 비해 기술 개발과 정책 추진이 뒤쳐진 우

27) 최근 들어 미중 패권경쟁의 심화에 따라 미국에서도 전통적인 기술중립성 기조가 다소 약화되고 있으며, 특정 기술이나 기업을 정책적으로 지원하는 사례들이 나타나고 있음(예: 반도체 기업 인텔의 10% 지분 인수 등)

리나라는 플랫폼 간 경쟁에 대한 평가체계 구축에 있어서 미국식 접근보다는 유럽연합의 접근방식을 참고하는 것이 현실적이라고 판단된다. 기술 축적 수준이 낮고 산업 생태계가 열악한 우리나라 상황에서는 개별 플랫폼의 절대적 실현 가능성에 대한 평가에 의존하기보다는, 자원 제약하에서 플랫폼 간 상대적 경쟁력과 산업적 연계성을 종합적으로 고려한 정책적 판단이 더 합리적일 가능성이 높기 때문이다. 따라서 플랫폼 간 경쟁 현황을 정기적으로 모니터링하고 체계적으로 평가하는 시스템을 구축하여, 그 결과를 양자 컴퓨팅 연구 개발 정책 및 전략 수립에 반영하는 것이 긴요하다고 판단된다.

경쟁 현황에 대한 정기적인 평가 결과는 현행 정책의 타당성을 점검하고, 필요시 연구 개발 투자 방향을 조정하는 판단 근거로 활용할 수 있을 것이다. 다만, 이러한 평가가 실질적인 정책도구로 기능하기 위해서는 평가 과정의 독립성과 투명성이 확보되어야 한다. 또한, 기술 성능 측면을 충실히 반영할 수 있는 지표와 시장·생태계 측면을 충실히 반영할 수 있는 지표를 사전에 정교하게 설계하고 개발할 필요가 있다.

용어해설

큐비트(Qubit) 양자 컴퓨터의 기본 정보 단위로, 일반적인 비트와는 달리 0 상태와 1 상태의 중첩이 가능함

결맞음 시간(Coherence Time) 양자 정보를 잃지 않고 유지할 수 있는 시간을 의미하며, 일반적으로는 중첩 상태의 위상이 유지되는 시간인 T2로 특성화됨

2큐비트 게이트(2-Qubit Gate) 2개의 큐비트를 입력으로 받는 게이트로 CNOT 게이트가 대표적

측정 기반 양자 컴퓨팅(Measurement Based Quantum Computing) 사전에 얽힌 클러스터 상태에서 큐비트의 적응적 측정을 반복함으로써 양자 계산을 수행하는 방식

양자점(Quantum Dot) 전자 등이 3차원적으로 양자 구속된 나노미터 크기의 반도체 구조

양자 오류 정정(Quantum Error Correction) 양자 정보를 보호하기 위해, 여러 물리 큐비트를 하나의 논리 큐비트로 묶어 오류를 검출하고 정정하는 기술

표면 코드(Surface Code) 물리 큐비트를 2차원 격자에 배치하고, 인접한 큐비트들로 정의된 stabilizer를 주기적으로 측정하여, 논리 큐비트의 오류를 추적하고 정정하는 양자 오류 정정 코드

내결함성 양자 컴퓨터(Fault-Tolerant Quantum Computer) 양자 오류 정정 기술의 적용과 결함 허용 논리 연산을 통해 신뢰성 있는 양자 계산을 수행할 수 있도록 설계된 양자 컴퓨터

CMOS(Complementary Metal Oxide Semiconductor) P형 MOSFET과 N형 MOSFET을 상호보완적으로 사용하여 논리 회로를 구성하는 반도체 기술

기술준비수준(Technology Readiness Level) 특정 기술이 기초 연구 단계로부터 실제 운용·산업 환경에 적용되기까지, 어느 정도 성숙·준비되었는지를 9단계로 구분하여 평가하는 지표

유틸리티 스케일(Utility-Scale) 실제 사용자에게 유의미한 실용적 가치를 제공하는 규모 및 성능 수준을 의미하며, 구체적인 정의는 기관이나 기업에 따라 다름

국가양자이니셔티브(National Quantum Initiative) 2018년에 제정된 미국의 NQI법에 따라 추진되는, 양자 기술 전반의 전략적 연구개발과 산업 생태계 조성을 위한 국가 차원의 이니셔티브

기술 중립성(Technology Neutrality) 정책 및 제도 설계 시 특정 기술을 사전에 지정하거나 배제하지 않고, 공정한 시장 경쟁을 통해 기술이 선택되도록 하는 원칙

참고문헌

- [1] McKinsey Digital, "Quantum Technology Monitor," 2025. 6.
- [2] OECD, "Mapping the Global Quantum Ecosystem," 2025. 12.
- [3] QulC, "Strategic Industry Roadmap," 2025. 4.
- [4] D.D. Awschalom et al., "Challenges and opportunities for quantum information hardware," Science, vol. 390, no. 6777, 2025. 12. 4.
- [5] 김영욱, "초전도체 양자 컴퓨터, 미래 ICT 기술의 판을 바꾼다," 한국과학기술정보연구원 S&T DATA, 2025. 7.
- [6] 김요셉, "초전도 양자컴퓨터의 물리적 구현," 고등과학원 Horizon, 2024. 9. 25.
- [7] 최민철, 김상훈, "양자기술 및 정책 현황과 시사점," 산업연구원 정책자료 2024-06, 2024. 8.
- [8] 김준기, "이온 포획 양자 컴퓨터: 기술적 원리와 향후 전망," 고등과학원 Horizon, 2025. 4. 24.

- [9] 배준호, “양자 컴퓨팅을 위한 이온 트랩 연구 동향과 전망,” 새물리, 제74권 제11호, 2024, pp. 1106-1115.
- [10] IonQ 홈페이지, <https://www.ionq.com/technology/>
- [11] Quantinuum, “Quantum Milestone: Turning a Corner with Trapped Ions,” 2022. 7. 11.
- [12] MIT, “Quantum Index Report 2025,” 2025. 6.
- [13] 김동규, “원자 기반 QPU를 통해 본 양자 컴퓨팅 연구 동향,” 고등과학원 Horizon, 2025. 6. 30.
- [14] Quantum Source & Quantum Insider, “From qubits to logic: Engineering Fault-Tolerant Quantum Systems,” 2025.
- [15] IQM & Omdia, “State of Quantum,” Third edition, 2025.
- [16] Quandela 홈페이지, <https://www.quandela.com/resources/quantum-computing-glossary/photonic-qubit/>
- [17] 손영익, “측정 기반 양자컴퓨팅과 광집적회로 플랫폼,” 고등과학원 Horizon, 2025. 3. 21.
- [18] Tony Blair Institute, “A New National Purpose: A UK Quantum Strategy for Sovereignty and Scale,” 2025. 11.
- [19] 송경주 외, “양자컴퓨터 발전동향,” 정보보호학회지, 제35권 제3호, 2025. 6.
- [20] <https://www.ibm.com/quantum/blog/quantum-roadmap-2033>
- [21] <https://www.ibm.com/quantum/blog/nature-qldpc-error-correction>
- [22] F. Arute et al., “Quantum supremacy using a programmable superconducting processor,” Nature, no. 574, 2019.
- [23] <https://blog.google/intl/ko-kr/company-news/technology/quantum-ai-willow-kr/>
- [24] Google Quantum AI, “Quantum error correction below the surface code threshold,” Nature, no. 638, 2024.
- [25] <https://blog.google/intl/ko-kr/company-news/technology/quantum-echoes-willow-verifiable-quantum-advantage-kr/>
- [26] https://quantumai.google/roadmap?utm_source=chatgpt.com
- [27] IonQ, “Annual Report 2024 (Form 10-K),” 2025.
- [28] <https://www.youtube.com/watch?v=3d0dLr-08vU>
- [29] <https://www.ionq.com/blog/ionqs-accelerated-roadmap-turning-quantum-ambition-into-reality>
- [30] <https://www.ionq.com/roadmap>
- [31] QuEra 홈페이지, <https://ko.quera.com/>
- [32] QuEra Computing Inc., “Aquila: QuEra’s 256-qubit neutral-atom quantum computer,” White paper v1.0, 2023. 6. 20.
- [33] QuEra Computing Inc., “QuEra Computing Releases a Groundbreaking Roadmap for Advanced Error-Corrected Quantum Computers, Pioneering the Next Frontier in Quantum Innovation,” 2024. 1. 9.
- [34] Neng-Chun Chiu et al., “Continuous operation of a coherent 3,000-qubit system,” Nature, vol. 646, 2025, pp.1075-1080.
- [35] PsiQuantum 홈페이지, <https://www.psiquantum.com/>
- [36] 이재학, 송우영, “결함허용 양자 컴퓨팅을 위한 하이브리드 기법과 퓨전 기법,” 물리학과 첨단 기술 특집호, 2024. 10.
- [37] PsiQuantum, “PsiQuantum to Build World’s First Utility-Scale, Fault-Tolerant Quantum Computer in Australia,” 2024. 4. 29.
- [38] PsiQuantum, “Introducing Omega – Inside the Chipset,” 2025. 2. 27.
- [39] Quantum Motion 홈페이지, <https://quantummotion.com/>
- [40] <https://postquantum.com/quantum-computing-companies/quantum-motion/>
- [41] Quantum Motion, “Quantum Motion Delivers the Industry’s First Full-Stack Silicon CMOS Quantum Computer,” 2025. 9. 15.
- [42] Korea-Europe QSTCC, “영국 Quantum Motion 양자컴퓨터 특징 및 한계점,” 2025. 9. 16.
- [43] Quantum Brilliance 홈페이지, <https://quantumbrilliance.com/>
- [44] Quantum Brilliance, “Quantum Brilliance Announces First Purchase of a Room-Temperature Quantum Accelerator in Europe, Powered by NVIDIA CUDA-Q,” 2024. 11. 19.
- [45] Oak Ridge National Laboratory, “Quantum Brilliance, ORNL pioneer quantum-classical hybrid computing,” 2025. 9. 2.
- [46] L. Oberg et al., “Bottom-up fabrication of scalable room-temperature diamond quantum computing and sensing technologies,” Mater. Quantum. Technol., vol. 5, 2025.
- [47] Blforesight, “The five platform problem: which quantum technology will win?,” Bristol Innovations, 2024. 9. 11.
- [48] European Commission, “Quantum Europe Strategy: Quantum Europe in a Changing World,” 2025. 7. 2.
- [49] QuIC, “QuIC Position Paper on the Quantum Europe Strategy,” 2025. 8.
- [50] <https://www.darpa.mil/research/programs/quantum-benchmarking-initiative>
- [51] Quantum Insider, “DARPA Advances Quantum Computing Initiative,” 2025. 12. 1.
- [52] The Senate of the United States, “A BILL To reauthorize the National Quantum Initiative Act, and for other purposes,” HLA26020, 2026. 1. 8.