

붙임**신규과제 RFP 목록**

RFP번호	과제명
2025-양자-지정공모형-06	극저온 양자신호 제어 저손실 저자기장·고신뢰성 수동 부품 국제공동연구실
2025-양자-지정공모형-07	중성원자-광격자 양자 시뮬레이터의 충실도 향상을 위한 측정·제어 고도화 기술 공동개발 국제공동연구실
2025-양자-지정공모형-08	양자네트워크용 고체점결함 하이브리드 광연결 양자소자 국제공동연구실
2025-양자-지정공모형-09	광자 얽힘 기반 양자이미징 및 센싱 국제공동연구실
2025-양자-지정공모형-10	위상양자 큐비트 구현 기술 개발을 위한 국제 공동 연구실
2025-양자-지정공모형-11	압축광 고차원 클러스터 상태기반 양자컴퓨팅 국제공동연구실
2025-양자-지정공모형-12	이종 양자시스템 상호작용 제어 국제공동연구실

RFP관리번호	2025-양자-지정공모형-06		공모유형	지정 공모형		
해당여부	<input checked="" type="checkbox"/> 국가전략기술 <input type="checkbox"/> 탄소중립 <input checked="" type="checkbox"/> 글로벌 R&D <input type="checkbox"/> 미래소재 <input type="checkbox"/> 전략연구사업(MPX(예정)) <input type="checkbox"/> 국방전략기술(예정)					
국책연구기획평가전문분야	PM분야	양자기술	RB분야	전 분야	RB세부분야	전 분야
사업명	양자기술국제협력강화사업 - 기술분야별 국제공동연구실					
RFP명	극저온 양자신호 제어 저손실 저자기장·고신뢰성 수동 부품 국제공동연구실 (TRL : [시작] 3단계 ~ [종료] 5단계)					
RFP유형코드	사업목적·내용	성과물 특성		지원대상	보안과제 분류	일반
	I	0	-	1		
1. 국제공동연구 추진 배경						
<input type="checkbox"/> 양자컴퓨터는 양자역학의 원리를 활용하여 전통적인 컴퓨터 시스템에서 해결하기 어려운 복잡한 문제를 효율적으로 계산할 수 있는 혁신적인 컴퓨팅 기술로, 다양한 방식의 양자컴퓨터들이 개발되고 있음. 현재 양자컴퓨팅 기술은 초전도, 이온 트랩, 광자 기반, 반도체 양자점, 중성 원자, 위상학적 양자컴퓨터 등 다양한 방식으로 상용화를 위한 연구개발이 진행되고 있음						
<input type="checkbox"/> 대부분의 플랫폼은 극저온 환경을 필요로 하며 특히 집적회로 기반의 양자컴퓨팅 플랫폼은 큐비트의 양자 상태를 판독하고 외부 잡음으로부터 보호하기 위해, 양자신호 전달 및 제어를 위한 다양한 형태의 비가역적(non-reciprocal) RF 신호전달용 수동 부품을 필요로 함						
<input type="checkbox"/> 단일 큐비트 신호 처리를 위한 RF 신호전달 케이블에 장착되는 수동부품은 대략 20~30 개 수준이며, 양자컴퓨터의 의미있는 활용을 위한 큐비트 확장 및 고밀도화 구현을 위해, 수동부품의 소형화 및 고집적화 기술이 시급함. 현재 사용되는 RF 신호전달 수동부품의 재료적인 한계로 소형화 및 고집적화의 한계가 있으며, 향후 큐비트수가 증가함에 따라, 신호 간섭에 의한 큐비트 결맞음(coherence) 파괴가 유발되어, 양자신호 오류가 급증할 것으로 예상됨.						
<input type="checkbox"/> 따라서 양자컴퓨터의 확장 및 고밀도화를 위하여 외부전원이 필요 없는 단독 구동 방식의 초소형 RF 신호전달 수동부품이 개발되어야 하지만, 해당 부품의 온도 신뢰성(극저온~상온) 및 RF신호처리 성능 등의 향상을 위해서는 소재 및 부품화 기술과 병행하여 개발 되어야 함						
<input type="checkbox"/> 더욱이 소재 및 부품화 기술과 병행된 초소형 RF 신호전달 수동부품 개발은 ¹⁾ 큐비트 구현 기반기술 및 확장기술 실현을 위한 핵심 기반기술이며 ²⁾ 양자 신기술 확보형 유형인 ‘초전도·이온트랩·중성원자 기반의 양자컴퓨터 하드웨어(H/W) 공동연구’의 일환으로, 해외 선도그룹과의 국제공동연구를 통한 개발 전략이 필요						
<input type="checkbox"/> 양자컴퓨터의 고성능화 및 확장을 위하여 수동 부품의 기술적 한계를 넘어서는 연구개발						

1) 양자과학기술 기술분류체계 및 중점협력기술

2) 2024.06.26. 과기정통부 보도자료 “국가·연구기관·연구자·다자 차원에서 과학기술 국제협력을 전방위로 지원한다”

발이 국내·외에서 제안되고 있으며, 해외 선도그룹에서는 이미 연구가 진행 중임

- 초전도(IBM社 Condor, Google社 Sycamore), 반도체 양자점(Intel社, SQC社), 이온 트랩(IonQ社 및 Quantinuum社), 중성원자(QuEra社, Atom Computing社), 위상학적(Microsoft社) 양자컴퓨터들은 모두 해외 기업 및 연구기관들 중심으로 적극적인 연구개발이 진행 중
 - 양자컴퓨터에 사용되는 RF 신호전달 수동부품에 대한 고성능화 및 소형화 등에 대한 연구개발은 Low Noise Factory社 (스웨덴), Quantum Microwave社 (미국), Quantum Circuits社 (미국), Zurich Instruments社 (스위스/일본) 등의 기업들과 National Physical Laboratory(영국), NIST Quantum Devices Group (미국), CEA-Leti (프랑스), Max Planck Institute for Quantum Optics (독일), Niels Bohr Institute-Center for Quantum Devices (덴마크) 등의 연구기관들 중심으로 진행이 되고 있음
- 국내 연구진은 자성체 및 유전체 기반의 상온에서의 고주파 통신 수동 부품 분야에서 우수한 실험적 역량이 있고 다양한 연구개발 경험도 있으나, 극저온 환경에서의 고주파 신호 전달 및 제어를 위한 부품 연구분야는 해외 선도그룹에 비해 부족한 면이 있음.
- 양자신호 제어를 위한 RF 신호전달 수동 부품 분야의 글로벌 선도그룹과 협력연구를 통해 관련 선진 연구 역량 및 기술을 빠르게 확보하고, 나아가 부품 소형화 및 양자컴퓨터 대규모 확장을 위한 글로벌 연구의 선도가 필요

2. 국제공동 연구개발목표

- 극저온 구동 RF 신호전달용 수동 부품 개발을 위한 차세대 양자소재 및 부품설계 원천기술 개발
- RF 신호전달 특성 (동작대역폭, 삽입손실, 극저온 안정성) 확보를 위한 신규 양자엔지니어링 소재 조성 설계 및 구현
 - RF 신호전달 수동부품의 소형화를 위한 전자세라믹스 domain 제어 기술 개발
 - RF 신호전달 수동부품 구현을 위한 양자엔지니어링 소재 적용 임피던스 매칭 향상 복합화 기술 개발
 - RF 신호의 정확한 전달 및 손실제어를 위한 임피던스 정합도 향상 신호전송로의 기하학적 설계 최적화 기술과 측정기술 확보
 - RF 신호전달 수동부품 소형화 구현을 위한 전자기 해석 및 설계 기술 확보
- 극저온 구동 RF 신호전달용 수동부품 소형화 개발 및 극저온 RF 신호특성 평가 기술 개발
- 차세대 양자엔지니어링 수동부품 소재 및 임피던스 매칭 향상 기술 적용 극저온 RF 신호전달 수동부품 개발 (예시: 서큘레이터/아이솔레이터, 감쇄기, 필터, 다중 전송선로 등)
 - RF 신호전달 수동 부품의 극저온 양자신호 전달 특성 평가 및 표준화 기반 기술 확보
 - RF 신호전달 수동부품의 적용 다양화를 위한 온도 안정성 분석법과 평가 및 표준화 기술 확보

- 양자컴퓨터 적용을 위한 RF 신호전달 수동부품 평가 플랫폼 구축 및 이를 활용한 큐비트 연계형 수동부품 정합성 평가

최종 목표 : 큐비트 신호 처리를 위한 초소형 저손실 저자기장 고신뢰성 극저온 수동부품 개발

단계별 목표

구분	목표
1단계 (25~27)	<ul style="list-style-type: none"> ○ RF신호전달 수동부품 개발을 위한 양자엔지니어링 소재 핵심요소기술 개발 ○ RF신호전달 수동부품용 소재 복합화 기술 개발 ○ 양자 RF신호 전달성 향상 및 손실제어를 위한 부품 설계 구현 및 호환성 평가 ○ 양자 RF신호전달 수동부품 설계, 제작 및 시뮬레이션 기술개발 ○ 극저온 RF 신호전달 수동부품 특성 평가 플랫폼 구축
2단계 (28~30)	<ul style="list-style-type: none"> ○ 양자컴퓨터 적용을 위한 큐비트 연계형 극저온 RF 신호전달 수동부품 특성 평가 플랫폼 구축 ○ 임피던스 매칭 향상 RF 신호전달 수동부품 개발 ○ RF 신호전달 수동부품의 양자신호 전달 특성 평가 및 표준화 기술 확보

3. 국제공동 연구개발내용 및 성과목표

연구 개발 내용

구분	연구 내용
1단계 (25~27)	<ul style="list-style-type: none"> ○ RF신호전달 수동부품 개발을 위한 양자엔지니어링 소재 기술 개발 <ul style="list-style-type: none"> - 상온~극저온 환경에서 자기이방성 향상을 위한 다양한 신규 조성과 결정구조 제어를 위한 소재 합성 및 평가 기술 개발 - RF신호전달 수동부품 소재의 극저온 소재특성 효과 극대화 및 최적화를 위한 유전체 소재 합성공정 개발 - 신규 양자소재의 domain 제어를 위한 격자치환 및 첨가원소 도핑 기술 개발 ○ RF신호전달 수동부품용 소재 복합화 기술 개발 <ul style="list-style-type: none"> - 전자세라믹스 소재를 활용한 복합부품 계면접합 기술 개발 - 복합부품 반사손실 제어 계면결함 제어 및 최적화 기술 개발 - 계면조건에 따른 반사손실간 상관성 추론을 통한 공정 최적화 ○ 수동 부품의 양자 RF신호 전달성 향상 및 손실제어를 위한 설계 구현 및 호환성 평가 <ul style="list-style-type: none"> - 복합부품 적용 조건별 구조결합에 따른 격리도(dB) 제어 최적 설계 및 평가 기술 개발 - 온도 변화에 따른 성능 평가 및 설계 최적화 ○ 양자 RF신호전달 수동부품 설계 및 시뮬레이션 기술 <ul style="list-style-type: none"> - 양자수동부품용 전자세라믹스 및 복합체 최적 전자기장 시뮬레이션 기술 개발 - 소재 및 임피던스 매칭 향상 기술 적용 극저온 RF 신호전달 수동부품 설계 - 최적 설계 위한 전자기장 시뮬레이션 및 선행개발품 교차검증 평가
2단계 (28~30)	<ul style="list-style-type: none"> ○ 신규 조성 양자엔지니어링 소재부품 최적화 기술 개발 <ul style="list-style-type: none"> - RF신호전달 수동부품 소형화를 위한 신규 소재 조성 최적화 기술 개발 - 양자엔지니어링 소재 열팽창계수(CTE) 및 열전도도를 고려한 최적 복합체 설계 - 양자엔지니어링 복합소재의 온도 조건별 최적 평가 기술 개발 - 극저온 환경에서 최적의 주파수 특성을 가진 수동부품 소형화 설계 기술 개발 ○ RF 신호전달 수동부품용 소재 및 소형수동부품 광대역주파수 평가 기술 개발 <ul style="list-style-type: none"> - 다양한 온도 환경에서 광대역 범위 주파수 시험 및 평가 기술 확보 - 복합소재 조건별 부품 시험 및 평가

구분	연구 내용
	<ul style="list-style-type: none"> 양자컴퓨터 적용을 위한 큐비트 연계형 수동 부품의 RF 신호전달 및 증폭 특성 평가 플랫폼 구축 및 부품 성능치 확보 <ul style="list-style-type: none"> 온도 및 주파수 조건 변화에 따른 극저온 RF신호전달 수동부품 평가 플랫폼 구축 다양한 극저온 환경에서 광대역 RF 신호특성 및 온도 안정성 측정 검증 하드웨어 및 소프트웨어 플랫폼 구축 및 표준화 기술 확보 개발한 부품의 성능치 목표달성 검증 및 큐비트 연계성능 검증

성과 목표 : 3포트 수동부품 기준 대표적인 성능지표이며 개발하려는 수동부품의 종류와 소재특성에 따라 연구과제의 목표치를 도전적으로 제시할 것. 또한, 각 성능이 상충관계 (trade-off)인 경우 목적하는 양자신호 응용처에 부합하는 성능치 최적조합을 도전적으로 제시할 것

구분	항목	1단계	2단계 (최종목표)	평가방법 (예시)
수동부품용 소재 성능치	유전손실 (tanδ@4K)	≤ 5×10 ⁻⁴	≤ 1×10 ⁻⁴	극저온 환경에서 개발된 소재의 주파수별 고주파 유전율과 S-파라미터 측정
	소재 삽입손실 (dB@4K)	< 0.5	< 0.2	핵심소재의 극저온 S-파라미터 측정
	포화자화 (4πMs@4K)	≥ 2300 G	≥ 2500 G	벌크 시편 기준, ±7 Tesla 범위 (4~300 k)
극저온 부품 성능치	포트간 격리도 (dB@4K)	> 20	≥ 25	극저온 환경에서 전력 및 주파수별 S-파라미터 측정
	작동 주파수 범위 (GHz@4K)	4-8	2-12	극저온 환경에서 전력 및 주파수별 S-파라미터 측정
	포트 매칭률 (dB @4K)	> 20	≥ 25	극저온 환경에서 전력 및 주파수별 S-파라미터 측정
	부품 삽입손실 (dB@4K)	< 0.6	≤ 0.4	하우징을 포함한 부품단위의 극저온 S-파라미터 측정
부품과 큐비트 연계 성능	시스템 온도 상승 (K)	< 0.05 K	≤ 0.01 K	부품 동작 전후의 큐비트단위의 온도변화 측정
	기존부품 대비 큐비트 결맞음 시간 감소 (%)	< 5	< 1	동일한 큐비트를 상용부품과 개발한 부품으로 제어한 경우의 결맞음 시간 변화를 교차검증
자율	논문, 특허 등	단계별 자율제시		JCR 상위 10 % SCI(E) 논문 실적 목표 포함 ※ 국제협력기관과 공동저자 논문을 목표로 제시할 것
	공동워크샵, 세미나, 인력교류, 파견 등	단계별 자율제시		일시, 횟수, 명단, 기간 등
	추가 성능 수치	단계별 자율제시		소재-부품 등과 관련된 추가적인 성능 지표 (소재 온도 안정성, 부품 외장 규격, 자기장 호환성, 최대전력 등)

4. 지원기간/예산/추진체계

- 기간: 2025.07.01.~2030.06.30. (총 60개월 내외, 3+2)
 - ※ 당초 기한('23년~'27년)이 있던 사업을 계속사업으로 전환 중으로 상황에 따라 기간이 변동될 수 있음
 - ※ 과제 착수 3년 후 단계평가*를 통해 계속지원(2년) 여부 결정. 연구목표 달성 가능성이 작거나 불성실한 과제로 판단되는 경우 연구중단 가능
 - * 단계평가 지표 : 1단계 연구성과 및 2단계 연구계획 등으로, 향후 변동 가능
- 정부지원연구개발비: 4,975,000 천원
 - ※ 정부 지원규모는 평가 결과, 예산 확보 상황, 해외연구실 참여 확대에 따른 추가지원 등에 따라 변동될 수 있음
- 과제형태: (일반)연구개발과제

주관연구개발기관: 대학/출연(연)/기업부설연구소 등

기술료 징수여부: 징수

5. 특기사항

(수행체계) 국내외 연구기관연구자(각 기관별 해당 연구자가 운영하는 연구실 단위)가 참여하는 '국제공동연구실 구성·운영'을 통한 협력연구 수행

○ 해외 선도연구실(권역 무관)을 1개 이상 포함(중점협력연구실)하되, 참여 연구실별 적정 역할 분담 및 유기적 연계체계 구축

- 과제기간 중 국내외 연구실연구자 참여 확대를 권장하고 이를 위한 연구비 구조 등 유연한 과제체계 구축

※ 필요시 해외 연구실 참여 확대를 위한 추가 연구비 지원 예정

< 중점협력연구실 예시 >

· 미국: Quantum Microwave社, Quantum Circuits社, NIST Quantum Devices Group 등

· 영국: National Physical Laboratory, Queen Mary University of London 등

· 스웨덴: Low Noise Factory社 등

· 스위스/일본: Zurich Instruments社 등

· 프랑스: CEA-Leti 등

· 독일: Max Planck Institute for Quantum Optics 등

· 덴마크: Niels Bohr Institute-Center for Quantum Devices 등

○ 실질적 공동연구 수행 및 선진기술 습득 등을 위해 중점협력연구실이 반드시 포함된 해외 참여 연구실에 국내 연구자가 체류하는 현지거점연구실 1곳 이상 설치·운영

- 체류요건 : 연간 6개월 이상 필수

※ 동일 기관에 최대 2명 체류기간 인정(연구자 1인 2개월 이상 체류기간만 인정)

○ 주관기관(연구실)이 해외 참여기관(연구실)과 별도의 연구개발과제 협약을 체결하고 해외 기관(연구실)에 인건비, 국제공동연구개발비, 외부전문기술 활용비 등 항목으로 연구비 지원

※ 과제신청 시 과제 참여의지를 확인할 수 있는 서류(LoI, MoA, MoU 등) → 2차년도 협약용 계획서 제출 시 주관기관과 해외기관 간 계약서(Research Agreement, MoU 등) 제출

※ 주관기관과 해외기관 간 계약서에는 특허 등 성과물을 둘러싼 분쟁 예방을 위해 '지식재산권에 관한 합의' 포함 필수

○ 각 연구실은 현재 지원 중인 국제공동연구실 포함 1개 과제만 주관 가능

※ 현재 지원 중인 국제공동연구실의 주관 연구실은 공동·위탁 형태로 참여 가능하며(주관×), 한 개의 연구실이 복수 과제의 주관 연구실로 신청 불가능

(성과) 해외 선진 기술 및 연구역량의 국내 확보 관점에서 연구개발 목표의 달성 여부를 정량적으로 측정·판단할 수 있는 논문 발표, 특허 등록, 국내-외 트윈 실험장비 구축, 프로토타입 공동개발, 기술이전, 인력교류 등 대표 성과물 제시

○ 연구계획서에 단계별 성과목표 및 성과물의 특성(성능), 자체 평가 기준 등 연구

개발 최종 목표 달성 검증 방법을 구체적으로 제시해야 함

□ 연구 범위 및 내용 관련

- 신청 과제명은 RFP명과 동일하게 작성
- 해외 연구파트너와 국내 연구자가 각각 다른 주제의 연구를 진행하는 것은 본 사업의 취지와 맞지 않으므로 허용되지 않음
- 상기 연구개발 목표 및 내용 외에 해당 분야(RFP명) 내에서 필요시 연구 범위 확대 가능
 - 추가 연구 수행 계획 및 성과 창출 여부 등은 제시된 연구개발 목표 달성에 저해되지 않는 범위 내에서 관련 평가 시 우대 적용

□ 연구성과 관리 및 활용

- 연구목표 달성 가능성이 작거나 불성실한 과제로 판단되는 경우 연구중단 가능
- 공개 워크숍 등을 통해 동 분야 연구자들에게 연구성과를 공개하고 피드백을 받아 연구 결과의 완성도를 높일 수 있는 추진전략 수립 권장
- 동 과제의 연구개발 기간을 포함하여 과제종료 후 연구성과의 발전 가능성을 보여주는 중장기 연구계획과 비전 제시

RFP관리번호	2025-양자-지정공모형-07		공모유형	지정 공모형		
해당여부	<input checked="" type="checkbox"/> 국가전략기술 <input type="checkbox"/> 탄소중립 <input checked="" type="checkbox"/> 글로벌 R&D <input type="checkbox"/> 미래소재 <input type="checkbox"/> 전략연구사업(MPX(예정)) <input type="checkbox"/> 국방전략기술(예정)					
국책연구기획평가전문분야	PM분야	양자기술	RB분야	전 분야	RB세부분야	전 분야
사업명	양자기술국제협력강화사업 - 기술분야별 국제공동연구실					
RFP명	중성원자-광격자 양자 시뮬레이터의 충실도 향상을 위한 측정·제어 고도화 기술 공동개발 국제공동연구실 (TRL : [시작] 1단계 ~ [종료] 4단계)					
RFP유형코드	사업목적·내용	성과물 특성		지원대상	보안과제 분류	일반
	I	0	-	1		
1. 국제공동연구 추진 배경						
<input type="checkbox"/> 양자 시뮬레이터(특수목적 양자컴퓨팅 시스템)는 강상관계 물질 연구와 같이 고전 컴퓨터로 연산이 어려운 허바드 해밀토니안 문제 풀이에 적용할 수 있어, 차세대 양자기술 (Quantum 2.0-3.0) 개발의 기반이 되는 양자물질 연구 등에 절실히 요구됨.						
<input type="checkbox"/> 중성원자-광격자 시스템은 큐비트 규모 확장에 유리하여 다양한 양자 플랫폼 중 대규모 큐비트 얽힘을 모사할 수 있는 양자 시뮬레이터로 가장 적합함.						
<input type="checkbox"/> 최근 중성원자-광격자 양자 시뮬레이터는 광집계 혹은 초격자 시스템을 조합하면 새로운 냉각법을 개발할 수 있을 뿐 아니라, 수행할 수 있는 모델 해밀토니안도 대폭 늘어남이 알려짐 (분자 내의 전자동역학, 고에너지 게이지 이론 및 양자 게이트 기반의 연산 등).						
<input type="checkbox"/> 이에 따라 새로운 중성원자-광격자 양자 하드웨어 개발이 절실히 요구되며, 하드웨어를 정량화하고 수치화하여 시스템을 보다 효율적으로 구동 및 활용할 수 있는 방법론 및 양자 알고리즘의 개발 및 상호 융합 또한 중요해지고 있는 추세임.						
<input type="checkbox"/> 현재 국내의 중성원자-광격자 양자 시뮬레이터 하드웨어 개발연구는 활발히 이루어지고 있는 상황으로, 핵심 강상관계 물질 모델인 허바드 모델을 구현할 수 있는 단계임. 다만, 광격자 플랫폼에 특화된 양자 시뮬레이션 알고리즘 개발연구는 아직 미흡함.						
<input type="checkbox"/> 차세대 양자 시뮬레이터의 성능 고도화에 있어 가장 시급한 사항은 잡음이 존재하는 환경에서 시뮬레이션 결과의 충실도 측정 및 평가로 이를 위한 중성원자 하드웨어에 특화된 방법론 및 양자 알고리즘의 개발이 요구되는 시기임.						
<input type="checkbox"/> 중성원자-광격자 양자 시뮬레이터 연구 분야의 글로벌 경쟁력을 갖추기 위해 국외의 중성원자 플랫폼 알고리즘(이론) 선도 연구그룹과 국내의 중성원자 양자 시뮬레이터(실험) 연구그룹이 공동연구를 수행해 원천기술을 개발하고, 이를 국내 차세대 양자 시뮬레이터 하드웨어 구축에 활용하는 연구가 요구됨.						
2. 국제공동 연구개발목표						

□ 최종 목표 : 중성원자 플랫폼 측정제어 방법론 및 알고리즘 분야를 선도하고 있는 국외 연구그룹과 상호협력을 통하여 국내 중성원자-광격자 양자 시뮬레이터의 충실도 평가 및 성능 향상에 필요한 핵심 기초 및 원천기술 확보

- 양자 시뮬레이터로 모사 가능한 해밀토니안을 확장하는 양자 하드웨어 기술 개발
- 양자 시뮬레이터의 충실도 성능을 정량화할 수 있는 벤치마킹 기술 개발
- 양자 시뮬레이터로 모사할 수 있는 양자 다체문제 발굴
- 양자 시뮬레이션의 결과를 해석하는 방법론 및 알고리즘 개발

□ 단계별 목표

구분	목표
1단계 (‘25~’27)	- 양자 시뮬레이터 충실도 정량화가 가능한 중성원자-광격자 양자 시뮬레이터 하드웨어 개발 - 국내 연구진이 개발하는 양자 시뮬레이터 하드웨어에 특화된 양자 다체문제 해밀토니안 개발 - 중성원자-광격자 양자 시뮬레이터 벤치마킹 알고리즘 및 시퀀스 하드웨어 개발
2단계 (‘28~’30)	- 1단계에서 개발한 벤치마킹 기법을 양자 시뮬레이터 하드웨어를 대상으로 실증 - 양자 시뮬레이터의 연산 결과 해석 방법론을 개발 - 중성원자-광격자 양자 시뮬레이터 하드웨어를 활용하여 양자 연산 실증 및 충실도 향상 기술 개발

3. 국제공동 연구개발내용 및 성과목표

□ 연구개발 내용

구분	연구 내용
1단계 (‘25~’27)	- 임의의 원자 배열 생성 기술 개발 (수득률: 80 % 이상) - 국내 하드웨어로 모사할 수 있는 양자 다체문제 해밀토니안 연구 - 초격자 기반 양자 기체 현미경 시스템 구현 (분해능: 800 nm 이하, 이미징 정확도: 97 % 이상) - 중성원자-광격자 양자 시뮬레이터 하드웨어에 특화된 정량화 벤치마킹 알고리즘 개발 및 새로운 문제 탐색
2단계 (‘28~’30)	- 하드웨어 기반의 벤치마킹 기법 실증 (해밀토니안 변수 예측 정확도: 90 % 이상) - 중성원자-광격자 양자 시뮬레이터의 연산 결과 해석 방법론 및 알고리즘 개발 및 실증 - 초격자를 활용한 양자 다체문제 양자 시뮬레이션

□ 성과 목표

구분	항목	목표 기술수준 (SPEC 등)	현재 기술 수준	비고
핵심	원자 배열 생성 기술	1단계: 수득률 80 % 이상 2단계: 수득률 90 % 이상	95 %	Nature 471, 319 (2011)
	초격자 기반 양자 기체 현미경 시스템 개발	1단계: 초격자 시스템 구성 2단계: 단일 격자 분해 가능 (분해능: 800 nm 이하)	분해능 800 nm	Phys.Rev.Lett 134 , 053402 (2025)
	양자 시뮬레이터 벤치마킹 평가 성능	1단계: 개별 변수 예측 90 % 2단계: 해밀토니안 변수 예측 정확도: 90 % 이상	99 %	리드버그 플랫폼 기준 Nature 628 , 71 (2024)

	벤치마킹 알고리즘 개발	1단계: 제한적인 범위에서 벤치마킹 알고리즘 적용 2단계: 측정 횟수 수천 번 이하	측정 횟수 수만 번	리드버그 플랫폼 기준 Nature 613 , 468 (2023)
	초격자를 활용한 문제 발굴	1단계: 기존 문제 탐색 및 새로운 방향성 제시 2단계: 초격자 기반 양자 다체문제 제시 및 알고리즘 개발	클러스터 상태 생성 알고리즘	New Journal of Physics 10 , 023005 (2008)
자율	논문, 특허 등	단계별 자율제시 ※ 국제협력기관과 공동저자 논문을 목표로 제시할 것	-	JCR 상위 10 % SCI(E) 논문 실적 목표 포함
	공동워크샵, 세미나, 인력교류, 파견 등	단계별 자율제시	-	일시, 횟수, 명단, 기간 등

※ 핵심지표는 필수로 설정하여야 하며, 자율지표는 추가하여 제시할 수 있음

※ 제시된 핵심지표의 조정 및 자율지표 추가시 다음의 내용을 제시하여야 함

항목	국제선도수준 (SPEC 등)	목표 기술 수준(SPEC 등)	현재 기술 수준	설명 및 근거
				논문, 특허, 보도자료 등

□ 기대 성과

- 양자 시뮬레이터의 최대 난제인 비이상적인(non-ideal) 실험 환경에서의 시뮬레이션 결과의 충실도 평가에 대한 탐구를 국외 선도 연구그룹과의 공동연구를 통해 수행함으로써 글로벌 경쟁력을 강화.
- 대규모 양자얽힘 시스템의 평가 및 충실도 향상 방법론을 제시함으로써 차세대 양자기술의 기초 원천 기술 습득을 위한 필수 요소인 양자물질 개발에 선도적 역할 수행.

4. 지원기간/예산/추진체계

□ 기간: 2025.07.01.~2030.06.30. (총 60개월 내외, 3+2)

※ 당초 기한('23년~'27년)이 있던 사업을 계속사업으로 전환 중으로 상황에 따라 기간이 변동될 수 있음

※ 과제 착수 3년 후 단계평가*를 통해 계속지원(2년) 여부 결정. 연구목표 달성 가능성이 작거나 불성실한 과제로 판단되는 경우 연구중단 가능

* 단계평가 지표 : 1단계 연구성과 및 2단계 연구계획 등으로, 향후 변동 가능

□ 정부지원연구개발비: 4,975,000 천원

※ 정부 지원규모는 평가 결과, 예산 확보 상황, 해외연구실 참여 확대에 따른 추가지원 등에 따라 변동될 수 있음

□ 과제형태: (일반)연구개발과제

□ 주관연구개발기관: 대학/출연(연)/기업부설연구소 등

□ 기술료 징수여부: 징수

5. 특기사항

□ (수행체계) 국내외 연구기관연구자(각 기관별 해당 연구자가 운영하는 연구실 단위)가

참여하는 '국제공동연구실 구성·운영'을 통한 협력연구 수행

- 해외 선도연구실(권역 무관)을 1개 이상 포함(중점협력연구실)하되, 참여 연구실별 적정 역할 분담 및 유기적 연계체계 구축
 - 과제기간 중 국내외 연구실연구자 참여 확대를 권장하고 이를 위한 연구비 구조 등 유연한 과제체계 구축
- ※ 필요시 해외 연구실 참여 확대를 위한 추가 연구비 지원 예정

< 중점협력연구실 예시 >

- . 미국: Soon Won Choi (MIT), Markus Greiner (Harvard University), Adam Kaufman (NIST) 등
- . 유럽: Immanuel Bloch (Max-Planck Institute of Quantum Optics), Tilman Esslinger (ETH-Zürich) 등

- 실질적 공동연구 수행 및 선진기술 습득 등을 위해 중점협력연구실이 반드시 포함된 해외 참여 연구실에 국내 연구자가 체류하는 현지거점연구실 1곳 이상 설치·운영
 - 체류요건 : 연간 6개월 이상 필수
 - ※ 동일 기관에 최대 2명 체류기간 인정(연구자 1인 2개월 이상 체류기간만 인정)
 - 주관기관(연구실)이 해외 참여기관(연구실)과 별도의 연구개발과제 협약을 체결하고 해외 기관(연구실)에 인건비, 국제공동연구개발비, 외부전문기술 활용비 등 항목으로 연구비 지원
 - ※ 과제신청 시 과제 참여의지를 확인할 수 있는 서류(LoI, MoA, MoU 등) → 2차년도 협약용 계획서 제출 시 주관기관과 해외기관 간 계약서(Research Agreement, MoU 등) 제출
 - ※ 주관기관과 해외기관 간 계약서에는 특허 등 성과물을 둘러싼 분쟁 예방을 위해 '지식재산권에 관한 합의' 포함 필수
 - 각 연구실은 현재 지원 중인 국제공동연구실 포함 1개 과제만 주관 가능
 - ※ 현재 지원 중인 국제공동연구실의 주관 연구실은 공동·위탁 형태로 참여 가능하며(주관×), 한 개의 연구실이 복수 과제의 주관 연구실로 신청 불가능
- (성과) 해외 선진 기술 및 연구역량의 국내 확보 관점에서 연구개발 목표의 달성 여부를 정량적으로 측정·판단할 수 있는 논문 발표, 특허 등록, 국내-외 트윈 실험장비 구축, 프로토타입 공동개발, 기술이전, 인력교류 등 대표 성과물 제시
- 연구계획서에 단계별 성과목표 및 성과물의 특성(성능), 자체 평가 기준 등 연구개발 최종 목표 달성 검증 방법을 구체적으로 제시해야 함
- 연구 범위 및 내용 관련
- 신청 과제명은 RFP명과 동일하게 작성
 - 해외 연구파트너와 국내 연구자가 각각 다른 주제의 연구를 진행하는 것은 본 사업의 취지와 맞지 않으므로 허용되지 않음
 - 상기 연구개발 목표 및 내용 외에 해당 분야(RFP명) 내에서 필요시 연구 범위 확대 가능
 - 추가 연구 수행 계획 및 성과 창출 여부 등은 제시된 연구개발 목표 달성에 저해되지 않는 범위 내에서 관련 평가 시 우대 적용

□ 연구성과 관리 및 활용

- 연구목표 달성 가능성이 작거나 불성실한 과제로 판단되는 경우 연구중단 가능
- 공개 워크숍 등을 통해 동 분야 연구자들에게 연구성과를 공개하고 피드백을 받아 연구 결과의 완성도를 높일 수 있는 추진전략 수립 권장
- 동 과제의 연구개발 기간을 포함하여 과제종료 후 연구성과의 발전 가능성을 보여주는 중장기 연구계획과 비전 제시

RFP관리번호	2025-양자-지정공모형-08		공모유형	지정 공모형		
해당여부	<input checked="" type="checkbox"/> 국가전략기술 <input type="checkbox"/> 탄소중립 <input checked="" type="checkbox"/> 글로벌 R&D <input type="checkbox"/> 미래소재 <input type="checkbox"/> 전략연구사업(MPX(예정)) <input type="checkbox"/> 국방전략기술(예정)					
국책연구기획평가전문분야	PM분야	양자기술	RB분야	전 분야	RB세부분야	전 분야
사업명	양자기술국제협력강화사업 - 기술분야별 국제공동연구실					
RFP명	양자네트워크용 고체점결합 하이브리드 광연결 양자소자 국제공동연구실 (TRL : [시작] 2단계 ~ [종료] 4단계)					
RFP유형코드	사업목적·내용	성과물 특성		지원대상	보안과제 분류	일반
	I	0	-	1		

1. 국제공동연구 추진 배경

- 고체 내 원자 수준의 결합(점결합)을 활용한 양자소자는 양자컴퓨팅, 양자통신, 양자센싱 등 다양한 분야에 활용 가능한 차세대 핵심 플랫폼으로 주목받고 있음
 - 고체점결합 기반 스핀 큐비트는 긴 결맞음 시간을 갖는 특징을 바탕으로, 양자컴퓨팅(큐비트), 양자 네트워크(양자메모리), 양자 자기 센싱 등 광범위한 응용 분야에서 중요성이 부각되고 있음
- (핵심기술의 중요성) 스핀 큐비트와 광자 간 상호작용을 정밀 제어하는 스핀-광자 인터페이스 기술은 양자정보의 저장(스핀)과 전송(광자)을 매개하는 기술로 미래 양자 시스템 간 연결의 키가 되는 기술
 - 양자중계기, 양자인터넷, 분산형 양자컴퓨팅 등을 구현하기 위한 핵심 기술로, 고체점결합이 가지는 고유의 스핀-광자 간 간섭이 가능한 특징을 활용하여, 다양한 기초 실증이 이루어짐
 - 본격적인 양자 응용을 위해서는 스핀-광자 간의 결합을 혁신적으로 강화시킬 돌파구가 필요.
 - 이러한 돌파구의 핵심 해법으로 고체점결합 스핀을, 광자상태를 제어하는 양자소자(예, 나노공진기, 도파로, PIC 등)와 결합한 하이브리드 광연결 양자소자가 제시되고 있음
- (국제협력의 필요성 및 시급성) 양자기술 선도국가들에서 다이아몬드, SiC 등의 고체점결합 기반 소재를 활용한 cavity QED, waveguide QED 기반의 스핀-광자 결합 양자 소자 개발 및 양자 네트워크 시스템 구축 연구를 활발히 진행 중
 - 국내의 고체점결합을 활용한 스핀-광자 인터페이스 기술은 빠르게 발전하고 있으나, 세계 선두그룹의 이은 추격 형태의 연구로 진행 중이며, 양자소자와 결합하지 않은 벌크 형태의 연구가 주로 이루어짐.
 - 고체점결합의 양자소자화를 통한 스핀-광자 상호작용 증대 및 이를 양자 네트워크에 적용하는 연구는 현재 최근 미국, 유럽, 일본 등 선진국에서 분명히 선도

하고 있으나, 아직 추가적인 기술발전이 많이 필요한 분야로, 국제협력을 통한 기술 개발 및 기술 선점의 효과가 크게 기대됨.

- 선도그룹이 양자인터넷 초기 노드 상용화를 목표로 특허·표준을 선점하고 있어, 지금 국제공동연구에 참여하지 않으면 기술·표준 경쟁에서 소외될 위험이 큼.

□ 이에 따라 국내외 공동연구를 통해 글로벌 선도 연구진과의 협력체계를 바탕으로 고체점결함 기존 선도기술을 신속히 흡수하고, 국내 광학·집적 회로 강점과 결합하여 고체점결함 기반 하이브리드 광연결 양자소자 원천기술을 조속히 확보할 필요가 있음

2. 국제공동 연구개발목표

□ 최종목표: 고체점결함 기반 하이브리드 광연결 양자소자 기술 공동개발을 통해 차세대 양자네트워크 및 분산형 양자 시스템의 기반을 구축할 수 있는 원천기술 확보

- 고체점결함 기반 스핀-광자 인터페이스 구현을 위한 나노 공진기 및 waveguide 기반 포토닉스 집적 플랫폼 기술 개발
- 하이브리드 양자소자 내, 양자메모리(스핀) 제어 기술 구현
- 스핀 큐비트(메모리)로 활용가능한 고체점결함 소재(다이아몬드, SiC 등, 재료 특정 없음)의 광집적회로 구현 기술 확보
- 하이브리드 양자 소자 내 양자메모리-광자 얽힘 상태 구현 기술 확보

□ 단계별 목표

구분	목표
1단계 (25~27)	<ul style="list-style-type: none"> ○ 1단계: 기초 구성요소 확보 및 기반 기술 정립 <ul style="list-style-type: none"> - 스핀-광자 인터페이스 구현을 위한 공진기 및 도파로 구조의 설계 및 제작 - 양자소자 내 고체점결함의 광자 상호작용 실험 검증 - 하이브리드 양자소자 구성에 필요한 스핀 큐비트 제어 및 얽힘 구조의 작동 원리 확보 - 고체점결함 소재(다이아몬드, SiC 등)의 포토닉 회로 상 초기 집적 기술 개발 (박막화 등)
2단계 (28~30)	<ul style="list-style-type: none"> ○ 2단계: 성능 고도화 및 통합 시스템 구현 <ul style="list-style-type: none"> - 스핀-광자 상호작용의 효율을 높이기 위한 결합 구조 최적화 및 인터페이스 성능 고도화 - 하이브리드 양자소자 내 스핀-광자 얽힘 생성·유지·제어 기술의 정밀 구현 - 점결함 기반 스핀 큐비트와 포토닉 회로 간 통합 집적 기술 확립 - 분산형 양자 시스템 적용을 위한 다중 소자 간 동기화, 제어, 확장성 확보

3. 국제공동 연구개발내용 및 성과목표

□ 연구개발내용

구분	연구 내용
1단계 (25~27)	<ul style="list-style-type: none"> ○ 스핀-광자 인터페이스 기술 기반 확립 <ul style="list-style-type: none"> - 점결함 기반 스핀 큐비트 제어 및 얽힘 구현을 위한 정밀 제어 시스템 확보

	<ul style="list-style-type: none"> - 스핀-광자 인터페이스 성능 검증을 위한 방출 광자의 간섭 기반 상호작용 실험 ○ 하이브리드 양자소자 구현 <ul style="list-style-type: none"> - 고체점결함 기반 광자 방출 효율 향상 및 결합 계수 증대를 위한 나노 공진기 및 도파로 구조의 설계 및 제작 - 고체점결함 기반 스핀-광자 상호작용 제어 구현 및 특성 평가 - 광자 기반 연결성을 고려한 소자 간 광섬유 인터페이싱 기술 개발 및 연결 안정성 확보 ○ 고체점결함 양자소자용 광집적 플랫폼 기반 기술 개발 <ul style="list-style-type: none"> - 고체점결함 양자재료(다이아몬드, SiC 등 스핀큐비트 메모리재료) 양자소자화 및 집적화를 위한 나노가공 및 집적화 기반 기술 개발 - 나노광학 소자(공진기, 도파로 등)와의 이종 집적 실증을 통한 고체점결함 기반 스핀 큐비트의 광소자 통합 가능성 확보
2단계 (28~30)	<ul style="list-style-type: none"> ○ 하이브리드 양자소자 성능 고도화 및 얽힘 제어 <ul style="list-style-type: none"> - 하이브리드 양자 소자 내 스핀-광자 간 얽힘 생성 및 상태 판별 기술 구현 - 스핀-광자 인터페이스 강화를 위한 하이브리드 양자소자 소재, 소자, 시스템 고도화 기술 개발 - 다중 양자소자 간 동기화 및 통합 제어 시스템 기반의 분산형 양자 네트워크 적용 가능성 탐색 ○ 포토닉스 집적 플랫폼 기술 고도화 <ul style="list-style-type: none"> - 고체점결함 기반 스핀 큐비트와 포토닉 회로 간의 이기종 통합을 위한 박막화 등 고집적화 공정 기술 고도화 - 양자소자의 대규모 배열 구성을 위한 다중 집적 소자 제작 기술 검토 및 샘플 구현 - 하이브리드 양자소자의 광섬유 연결 효율 개선 실증

□ 성과목표(정량)

- 구체적인 성능 목표는 아래 예시를 참고하되, 점결함 종류에 따른 장단점 분석 및 선택하는 점결함 시스템의 국제 수준 대비 도전적 목표를 제시

구분	항 목	1단계	2단계 (최종목표)	비고
핵심	단일 점결함-광자 결합 구조에서의 Purcell factor (ZPL)	≥ 10	≥ 30	
	하이브리드 양자 소자 내 양자 메모리 결맞음 시간(T2)	≥ 50 μs	≥ 200 μs	
	양자 소자 방출 단일광자 간 간섭 가시도	≥ 80 %	-	
	하이브리드 양자소자의 광섬유 손실	< 5 dB	< 3 dB	
	스핀-광자 상호작용 크기	-	> 100 kHz	
	하이브리드 양자 소자 스핀-광자 간 얽힘 충실도	-	≥ 80 %	
	하이브리드 양자 소자 스핀-광자 간 얽힘 생성률	-	100 Hz	
자율	논문, 특허 등 ※ 국제협력기관과 공동저자 논문을 목표로 제시할 것	단계별 자율제시		JCR 상위 10 % SCI(E) 논문 실적 목표 포함
	공동워크샵, 세미나, 인력교류, 파견 등	단계별 자율제시		일시, 횟수, 명단, 기간 등

※ 핵심지표는 필수로 설정하여야 하며, 자율지표는 추가하여 제시할 수 있음
 ※ 제시된 핵심지표의 조정 및 자율지표 추가시 다음의 내용을 제시하여야 함

항목	국제선도수준 (SPEC 등)	목표 기술 수준(SPEC 등)	현재 기술 수준	설명 및 근거
				논문, 특허, 보도자료 등

4. 지원기간/예산/추진체계

- 기간: 2025.07.01.~2030.06.30. (총 60개월 내외, 3+2)
 - ※ 당초 기한('23년~'27년)이 있던 사업을 계속사업으로 전환 중으로 상황에 따라 기간이 변동될 수 있음
 - ※ 과제 착수 3년 후 단계평가*를 통해 계속지원(2년) 여부 결정. 연구목표 달성 가능성이 작거나 불성실한 과제로 판단되는 경우 연구중단 가능
 - * 단계평가 지표 : 1단계 연구성과 및 2단계 연구계획 등으로, 향후 변동 가능
- 정부지원연구개발비: 4,975,000 천원
 - ※ 정부 지원규모는 평가 결과, 예산 확보 상황, 해외연구실 참여 확대에 따른 추가지원 등에 따라 변동될 수 있음
- 과제형태: (일반)연구개발과제
- 주관연구개발기관: 대학/출연(연)/기업부설연구소 등
- 기술료 징수여부: 징수

5. 특기사항

- (수행체계) 국내외 연구기관연구자(각 기관별 해당 연구자가 운영하는 연구실 단위)가 참여하는 '국제공동연구실 구성·운영'을 통한 협력연구 수행
 - 해외 선도연구실(권역 무관)을 1개 이상 포함(중점협력연구실)하되, 참여 연구실별 적정 역할 분담 및 유기적 연계체계 구축
 - 과제기간 중 국내외 연구실연구자 참여 확대를 권장하고 이를 위한 연구비 구조 등 유연한 과제체계 구축
- ※ 필요시 해외 연구실 참여 확대를 위한 추가 연구비 지원 예정

< 중점협력연구실 예시 >

- . 미국: Univ., Prof. Jelena Vučković (스핀-광자 인터페이스), MIT, Prof Dirk Englund (스핀-광자 인터페이스), University of Chicago, Prof. David Awschalom (스핀-광자 인터페이스), Harvard University, Prof. Marko Loncar (스핀-광자 인터페이스), University of California, Berkeley, Prof. Alp Sipahigil (Si 점결함, 스핀-포톤 인터페이스), Univ. of Colorado&UCLA, Prof. Shuo Sun (하이브리드 양자소자)
- . 독일: Univ. of Stuttgart, Prof. J. Wrachtrup (NV 기반 양자소자 및 센싱)
- . 네덜란드: QuTech, Prof. Tim H. Taminiau 및 Prof. Ronald Hanson (NV 기반 다중 노드 얽힘)
- . 일본: Kyoto Univ., Prof. Takashi Asano (점결함 재료 광공진기 및 포토닉스 집적), NIMS, Dr. Tokuyuki Teraji (점결함 재료 성장)

- 실질적 공동연구 수행 및 선진기술 습득 등을 위해 중점협력연구실이 반드시 포함된 해외 참여 연구실에 국내 연구자가 체류하는 현지거점연구실 1곳 이상 설치·운영
 - 체류요건 : 연간 6개월 이상 필수
 - ※ 동일 기관에 최대 2명 체류기간 인정(연구자 1인 2개월 이상 체류기간만 인정)
- 주관기관(연구실)이 해외 참여기관(연구실)과 별도의 연구개발과제 협약을 체결하고 해외 기관(연구실)에 인건비, 국제공동연구개발비, 외부전문기술 활용비 등 항목으로 연구비 지원
 - ※ 과제신청 시 과제 참여의지를 확인할 수 있는 서류(LoI, MoA, MoU 등) → 2차년도 협약용 계획서 제출 시 주관기관과 해외기관 간 계약서(Research Agreement, MoU 등) 제출

※ 주관기관과 해외기관 간 계약서에는 특허 등 성과물을 둘러싼 분쟁 예방을 위해 '지식재산권에 관한 합의' 포함 필수

○ 각 연구실은 현재 지원 중인 국제공동연구실 포함 1개 과제만 주관 가능

※ 현재 지원 중인 국제공동연구실의 주관 연구실은 공동·위탁 형태로 참여 가능하며(주관x), 한 개의 연구실이 복수 과제의 주관 연구실로 신청 불가능

□ (성과) 해외 선진 기술 및 연구역량의 국내 확보 관점에서 연구개발 목표의 달성 여부를 정량적으로 측정·판단할 수 있는 논문 발표, 특허 등록, 국내-외 트윈 실험장비 구축, 프로토타입 공동개발, 기술이전, 인력교류 등 대표 성과물 제시

○ 연구계획서에 단계별 성과목표 및 성과물의 특성(성능), 자체 평가 기준 등 연구개발 최종 목표 달성 검증 방법을 구체적으로 제시해야 함

□ 연구 범위 및 내용 관련

○ 신청 과제명은 RFP명과 동일하게 작성

○ 해외 연구파트너와 국내 연구자가 각각 다른 주제의 연구를 진행하는 것은 본 사업의 취지와 맞지 않으므로 허용되지 않음

○ 상기 연구개발 목표 및 내용 외에 해당 분야(RFP명) 내에서 필요시 연구 범위 확대 가능

- 추가 연구 수행 계획 및 성과 창출 여부 등은 제시된 연구개발 목표 달성에 저해되지 않는 범위 내에서 관련 평가 시 우대 적용

□ 연구성과 관리 및 활용

○ 연구목표 달성 가능성이 작거나 불성실한 과제로 판단되는 경우 연구중단 가능

○ 공개 워크숍 등을 통해 동 분야 연구자들에게 연구성과를 공개하고 피드백을 받아 연구 결과의 완성도를 높일 수 있는 추진전략 수립 권장

○ 동 과제의 연구개발 기간을 포함하여 과제종료 후 연구성과의 발전 가능성을 보여주는 중장기 연구계획과 비전 제시

RFP관리번호	2025-양자-지정공모형-09		공모유형	지정 공모형		
해당여부	<input checked="" type="checkbox"/> 국가전략기술 <input type="checkbox"/> 탄소중립 <input checked="" type="checkbox"/> 글로벌 R&D <input type="checkbox"/> 미래소재 <input type="checkbox"/> 전략연구사업(MP)(예정) <input type="checkbox"/> 국방전략기술(예정)					
국책연구기획평가전문분야	PM분야	양자기술	RB분야	전 분야	RB세부분야	전 분야
사업명	양자기술국제협력강화사업 - 기술분야별 국제공동연구실					
RFP명	광자 얽힘 기반 양자이미징 및 센싱 국제공동연구실 (TRL : [시작] 3단계 ~ [종료] 4단계)					
RFP유형코드	사업목적·내용	성과물 특성		지원대상	보안과제 분류	일반
	I	0	-	1		

1. 국제공동연구 추진 배경

- 양자광학 기반 양자이미징 및 센싱 기술은 측정의 근본적인 한계로서 설정되어 왔던 고전적인 측정감도, 분해능, 저잡음, 측정대역의 한계를 뛰어넘는 양자 응용 기술임
 - 1990년대부터 양자얽힘 광자쌍 기반의 고스트이미징, 산탄잡음 이하 초저잡음 양자이미징, 광자수 얽힘을 이용한 초고분해능 양자이미징 기술이 구현되어 왔고, 최근에는 유도결맞음 현상 등을 포함한 비선형 양자광학계를 이용하여 측정 파장 영역의 한계를 돌파하거나 분해능을 향상시키는 양자분광·이미징 기술이 급격히 발전하고 있음
 - 양자 얽힘 기반 이미징은 초저광량에서도 고해상도 이미지를 구현할 수 있으며, 특히 생세포나 민감한 조직을 비파괴적으로 촬영할 수 있음. 암 진단, 뇌신경 영상, 바이러스 감염 등 조기 진단이 중요한 영역에서 양자 이미징은 기존 기술로는 해결할 수 없는 문제를 해결할 수 있음.
 - 양자광기반 이미징 및 센싱 기술은 바이오 이미징 분야 뿐 아니라, 원격 탐사, 재료 과학, 천문학 등 여러 분야에서 그 가능성을 보여주고 있음.
 - 이러한 많은 가능성에도 불구하고, 실제 구현은 여러 도전에 직면해 있음. 예를 들어, 대부분의 양자 이미징 기법은 비고전적 광원들의 낮은 강도와 효과의 불안정성 때문에 활용 제약이 있어, 실제 환경에서 사용할 수 있는 견고한 양자 이미징 기술을 개발하기 위해 노력하고 있음.
- 소수의 연구그룹이 연구를 진행하고 있는 국내와는 달리, 국제적으로 1990년대부터 양자광기반 이미징 및 센싱 연구가 시작되어 2010년대 중반을 지나면서 광결맞음단층영상 및 현미경, 비결출광자 양자이미징, 중적외선 분광측정 등이 다양한 국가와 연구그룹에서 시연되고 있음
 - 양자 얽힘을 이용한 고스트 이미징 및 양자 보안 이미징(QSI) 기술은 광학 위장 및 간섭을 회피하고, 낮은 신호 환경에서도 물체를 감지할 수 있는 레이더 기술에 활용 가능하여 국방/보안 기술로서의 전략적 가치 높은 기술로서, 중국, 미국, 영국 등은 이미 대규모 정부 주도의 투자를 실행 중임
 - 양자 이미징 기술은 회절한계 이하의 패턴 구현이 가능한 양자 리소그래피와 초정밀 비파괴 검사에도 활용이 가능하며, 첨단 반도체 공정 경쟁에서 뒤처지지 않

기 위해서는 양자 기반 검사와 제작 기술 확보가 필수적임

- 광범위한 응용연구로서의 가능성을 갖는 주제로서, 국제협력을 통한 양자이미징 및 센싱 연구역량 강화와 새로운 다중광자-복합대역 양자얽힘을 위한 광학 플랫폼을 마련할 수 있을 것으로 기대됨
- 현재 기술력 격차가 심화되는 시점에서, 향후 기술 종속 및 경제적 종속 위험을 회피하기 위해서 국제공동 연구를 통한 기술 확보가 필요함

2. 연구개발목표

최종목표: 얽힘 광자쌍 기반의 양자이미징·센싱 기술 개발과 넓은 파장 대역의 분광센싱·이미징 등 실용화 범위 확장 및 양자이득을 강화하는 새로운 양자측정법 개발

단계별 목표

구분	목표
1단계 (25~27)	<ul style="list-style-type: none"> ○ 양자얽힘 다광자 광원 및 양자간섭계 제작 <ul style="list-style-type: none"> - 다광자 양자얽힘 광원 생성 - 파장 대역 간 양자얽힘 광자쌍 생성 - 얽힘광자 기반 양자간섭계 구현
2단계 (28~30)	<ul style="list-style-type: none"> ○ 2단계: 양자이미징·센싱 장치 시연 <ul style="list-style-type: none"> - 양자간섭계 기반의 응용계측 기술 구현 - 얽힘 광자의 동시계수에 기반한 측정방법 또는 양자간섭 현상을 이용하여 동시계수 측정에 의존하지 않는 측정방법을 활용하여 분해능과 감도를 개선할 수 있는 새로운 양자측정법 개발 - 양자이미징·센싱 기술의 양자이득 분석 및 검증

3. 연구개발내용 및 성과목표

연구개발내용

구분	연구 내용
1단계 (25~27)	<ul style="list-style-type: none"> ○ 양자얽힘 다광자 광원 및 양자간섭계 개발 <ul style="list-style-type: none"> - 다광자 양자얽힘 광원 생성: 펄스레이저의 분해능 한계를 극복하는 광자수 얽힘 광원 - 파장 대역 간 양자얽힘 광자쌍 생성: 가시광/근적외선 - 적외선/THz 간 얽힘 광원 - 얽힘광자 기반 양자간섭계 구현: 다광자 양자얽힘을 이용한 양자간섭계, 유도결맞음 양자간섭계, 또는 복수의 광자쌍광원을 이용한 비선형 양자간섭계의 간섭신호 가시도 제시 <ul style="list-style-type: none"> ※ 예시 : 중적외선의 경우 양자간섭계 가시도 20 % 이상 등
2단계 (28~30)	<ul style="list-style-type: none"> ○ 광자 얽힘 기반 양자센싱 구현 및 응용 플랫폼 개발 <ul style="list-style-type: none"> - 기존 이미징·분광 계측법과 융합된 응용 센싱 플랫폼 구현 - 가시광-근적외선 광자 측정을 통한 적외선/THz 이미징 및 분광 측정 <ul style="list-style-type: none"> ※ 예시 : 양자 현미경, 양자광결맞음단층 영상, 홀로그래피, 적외선 분자 흡수 가스 센싱 등 ○ 광자 얽힘 기반 양자이미징 및 센싱 기술의 양자이득 실증

<ul style="list-style-type: none"> - 양자이미징·분광 기술의 새로운 계측법 제안 - 양자이미징·분광 기술의 실질적 양자이점을 고전 측정방식과 비교하여 한계 극복 및 향상 부분 이론적·실험적으로 검증 ※ 예시 : SNR(양자) > SNR(고전) 등

성과목표(정량)

- 구체적 성능 목표는 아래 기준 이상으로 하되, 국내외 수준을 고려해 도전적으로 제시

구분	항 목	1단계	2단계 (최종목표)	비고
핵심	양자간섭계 가시도	> 20%	-	
	양자이미징 분해능 향상도	-	≥ 2 배	
자율	논문, 특허 등 ※ 국제협력기관과 공동저자 논문을 목표로 제시할 것	단계별 자율제시		JCR 상위 10 % SCI(E) 논문 실적 목표 포함
	공동워크샵, 세미나, 인력교류, 파견 등	단계별 자율제시		일시, 횟수, 명단, 기간 등

※ 핵심지표는 필수로 설정하여야 하며, 양자엄힘 충실도와 양자이미징·센싱 고전 대비 양자이득 실증에 대한 정량목표 제시 필요

※ 그 외 자율지표 추가하여 제시할 수 있음

※ 제시된 핵심지표의 조정 및 자율지표 추가시 다음의 내용을 제시하여야 함

항목	국제선도수준 (SPEC 등)	목표 기술 수준(SPEC 등)	현재 기술 수준	설명 및 근거
				논문, 특허, 보도자료 등

4. 지원기간/예산/추진체계

기간: 2025.07.01.~2030.06.30. (총 60개월 내외, 3+2)

※ 당초 기한('23년~'27년)이 있던 사업을 계속사업으로 전환 중으로 상황에 따라 기간이 변동될 수 있음

※ 과제 착수 3년 후 단계평가*를 통해 계속지원(2년) 여부 결정. 연구목표 달성 가능성이 작거나 불성실한 과제로 판단되는 경우 연구중단 가능

* 단계평가 지표 : 1단계 연구성과 및 2단계 연구계획 등으로, 향후 변동 가능

정부지원연구개발비: 4,975,000 천원

※ 정부 지원규모는 평가 결과, 예산 확보 상황, 해외연구실 참여 확대에 따른 추가지원 등에 따라 변동될 수 있음

과제형태: (일반)연구개발과제

주관연구개발기관: 대학/출연(연)/기업부설연구소 등

기술료 징수여부: 징수

5. 특기사항

(수행체계) 국내외 연구기관·연구자(각 기관별 해당 연구자가 운영하는 연구실 단위)가 참여하는 '국제공동연구실 구성·운영'을 통한 협력연구 수행

○ 해외 선도연구실(권역 무관)을 1개 이상 포함('중점협력연구실')하되, 참여 연구실별 적정 역할 분담 및 유기적 연계체계 구축

- 과제기간 중 국내외 연구실·연구자 참여 확대를 권장하고 이를 위한 연구비 구조 등

유연한 과제체계 구축

※ 필요시 해외 연구실 참여 확대를 위한 추가 연구비 지원 예정

< 중점협력연구실 예시 >

- 미국 : University of Rochester, Prof. Robert W. Boyd, 양자광학, 양자이미징
- 독일 : Humboldt University of Berlin, Prof. Sven Ramelow, 양자얽힘, 양자이미징
- 이탈리아 : INRIM, Dr. Marco Genovese, 양자이미징, 양자측정
- 일본 : Kyoto University, Prof. Shigeki Takeuchi, 양자얽힘, 양자이미징
- 호주 : University of Queensland, Prof. Warwick Bowen, 양자측정, 양자센싱, 양자정보

- 실질적 공동연구 수행 및 선진기술 습득 등을 위해 **중점협력연구실이 반드시 포함된 해외 참여 연구실에 국내 연구자가 체류하는 현지거점연구실 1곳 이상 설치·운영**
- 체류요건 : 연간 6개월 이상 필수

※ 동일 기관에 최대 2명 체류기간 인정(연구자 1인 2개월 이상 체류기간만 인정)

- 주관기관(연구실)이 해외 참여기관(연구실)과 별도의 연구개발과제 협약을 체결하고 해외 기관(연구실)에 인건비, 국제공동연구개발비, 외부전문기술 활용비 등 항목으로 연구비 지원

※ 과제신청 시 과제 참여의지를 확인할 수 있는 서류(LoI, MoA, MoU 등) → 2차년도 협약용 계획서 제출 시 주관기관과 해외기관 간 계약서(Research Agreement, MoU 등) 제출

※ 주관기관과 해외기관 간 계약서에는 특허 등 성과물을 둘러싼 분쟁 예방을 위해 '지식재산권에 관한 합의' 포함 필수

- 각 연구실은 현재 지원 중인 국제공동연구실 포함 1개 과제만 주관 가능

※ 현재 지원 중인 국제공동연구실의 주관 연구실은 공동·위탁 형태로 참여 가능하며(주관×), 한 개의 연구실이 복수 과제의 주관 연구실로 신청 불가능

- (성과) 해외 선진 기술 및 연구역량의 국내 확보 관점에서 연구개발 목표의 달성 여부를 정량적으로 측정·판단할 수 있는 논문 발표, 특허 등록, 국내-외 트윈 실험장비 구축, 프로토타입 공동개발, 기술이전, 인력교류 등 대표 성과물 제시

- 연구계획서에 단계별 성과목표 및 성과물의 특성(성능), 자체 평가 기준 등 연구개발 최종 목표 달성 검증 방법을 구체적으로 제시해야 함

- 연구 범위 및 내용 관련

- 신청 과제명은 RFP명과 동일하게 작성

- 해외 연구파트너와 국내 연구자가 각각 다른 주제의 연구를 진행하는 것은 본 사업의 취지와 맞지 않으므로 허용되지 않음

- 상기 연구개발 목표 및 내용 외에 해당 분야(RFP명) 내에서 필요시 연구 범위 확대 가능

- 추가 연구 수행 계획 및 성과 창출 여부 등은 제시된 연구개발 목표 달성에 저해되지 않는 범위 내에서 관련 평가 시 우대 적용

- 연구성과 관리 및 활용

- 연구목표 달성 가능성이 작거나 불성실한 과제로 판단되는 경우 연구중단 가능
- 공개 워크숍 등을 통해 동 분야 연구자들에게 연구성과를 공개하고 피드백을 받아 연구 결과의 완성도를 높일 수 있는 추진전략 수립 권장
- 동 과제의 연구개발 기간을 포함하여 과제종료 후 연구성과의 발전 가능성을 보여주는 중장기 연구계획과 비전 제시

RFP관리번호	2025-양자-지정공모형-10	공모유형	지정 공모형			
해당여부	<input checked="" type="checkbox"/> 국가전략기술 <input type="checkbox"/> 탄소중립 <input checked="" type="checkbox"/> 글로벌 R&D <input type="checkbox"/> 미래소재 <input type="checkbox"/> 전략연구사업(MPX(예정)) <input type="checkbox"/> 국방전략기술(예정)					
국책연구기획평가전문분야	PM분야	양자기술	RB분야	전 분야	RB세부분야	전 분야
사업명	양자기술국제협력강화사업 - 기술분야별 국제공동연구실					
RFP명	위상양자 큐비트 구현 기술 개발을 위한 국제공동연구실 (TRL : [시작] 1단계 ~ [종료] 3단계)					
RFP유형코드	사업목적·내용	성과물 특성		지원대상	보안과제 분류	일반
	I	0	-	1		

1. 국제공동연구 추진 배경

국책연구 필요성

- 위상 양자컴퓨팅은 기존 양자컴퓨터들이 직면한 오류 문제를 근본적으로 해결할 수 있는 가장 유망한 대안 중 하나임
 - 비가환 애니온 교환 통계를 이용한 연산 방식으로 자체적인 오류 내성을 지니고 있어 복잡한 오류 정정 코드의 부담 없이 안정적인 계산이 가능
- 위상양자 큐비트는 오류 내성을 지닌 차세대 양자 컴퓨팅 핵심 기술로서 기술적 난이도가 매우 높아서 초전도/이온트랩/중성원자/불순물 등을 이용한 다른 큐비트 기술에 비해 상대적인 기술 성숙도가 더딘 편임
- 오류 내성을 지닌 위상양자 큐비트의 집적화를 실현할 경우, 양자 컴퓨터 산업의 게임 체인저가 될 가능성이 매우 높음. 특히, 관련 기술이 세계적으로도 이제 시작 단계이므로 국가적인 집중 지원을 통해 단기간에 선두 그룹의 기술을 추격/추월 하는 것이 가능함

국내·외 기술 및 산업 현황

- 마이크로소프트社 (미국): 위상초전도체 기반 양자 프로세서 유닛 Majorana 1 공개
 - 2025년 Microsoft 연구진은 반도체 나노선과 초전도체로 이루어진 위상 전도체를 이용하여 마요라나 상태를 형성한 후, quantum capacitance 측정을 통해 마요라나 패리티 전이 시간이 2 msec가 됨을 실측하는데 성공함으로써 세계 최초로 마요라나 큐비트를 기술적으로 구현이 가능함을 제시함 [Nature 638, 651 (2025)]. 향후 100 만 위상 큐비트로 확장함으로써 실용적인 양자 컴퓨터의 게임 체인저가 될 수 있을 것으로 전망함.
- 반도체-초전도체 하이브리드 위상양자 큐비트 연구는 마요라나/애니온 이론 연구 그룹, 이차원 전자 가스 및 위상 절연체 박막 성장 그룹, 위상양자 큐비트 소자 제작 및 극저온 측정 그룹 등의 유기적인 협동 연구를 통해 이루어짐.
 - 대표적인 국외 연구 그룹은 Microsoft, Harvard, UCSB (이상 미국), TU Delft, TU Eindhoven (이상 네덜란드), Univ. Koln, Wurzburg Univ. (이상 독일), Niels

Bohr Institute (덴마크), Weizmann Institute (이스라엘) 등임.

- 국내는 마요라나/애니온 이론 연구 그룹이 카이스트, 한양대, IBS(대전), 공주대 등에서 PRL, Nature 등지에 최신 연구 결과들을 발표하고 있고, 반도체(그래핀 포함)-초전도체 소자 연구 그룹으로는 KAIST, POSTECH, GIST, DGIST, KRIS, 서강대, 성균관대 등에서 Nature, Nature Materials, Nano Letters, ACS Nano 등지에 세계적 수준의 연구 결과들을 발표하고 있음.
- 국내에서 이차원 전자 가스 및 위상 절연체 박막을 성장하는 그룹은 KIST, SNU 등이 있으나, 위상양자 큐비트 연구에 필수적인 분자선 에피택시 시스템(MBE)을 활용하여 초전도 박막을 in-situ 성장시킨 고품질의 양자 소재(이차원 전자가스 및 위상 절연체/디락 물질 박막) 연구는 국내에서 전혀 진행되지 않고 있어서 국제적인 협력 연구가 필요함.
- 국내의 우수한 이론/소자 연구 그룹들이 국외의 양자 소재 전문 그룹과 긴밀하게 국제 협력을 수행할 수 있다면 단기간에 위상양자 큐비트 분야의 국제 선도 그룹으로 진입이 가능할 것임. 국외 위상양자 소재 전문 연구 그룹들의 예를 들자면, UCSB (Palmstrom 교수, InAs 이차원 전자가스), Princeton (Pfeiffer 교수, 이차원 전자가스), Weizmann (Heiblum 교수, 이차원 전자가스), Rutgers Univ. (오성식 교수, 위상절연체), Univ. Tennessee (이준수 교수, 이차원 전자가스 및 위상절연체), TU Eindhoven (Bakkers 교수, 위상절연체), UC Davis (Dong Yu 교수, 위상절연체/디락준금속) 등과 같음.
- 위상양자 큐비트 기술은 세계적으로도 이제 시작 단계이므로 국내의 연구 역량을 집중할 때, 선두 그룹의 기술을 추격하는 것이 상대적으로 용이함.
- 기존의 초전도/스핀/중성원자/이온트랩 큐비트 분야와 기술 중복도가 매우 낮아서 위상양자 큐비트 소자의 제작, 측정, 결과 해석을 위한 이론 개발 등에 전문화된 국내외 공동 연구 그룹을 양성할 필요가 있음.

□ 문제 정의

- 본 과제는 위상 전도체를 기반으로 세계 최고 수준의 마요라나 큐비트 구현 및 마요라나 꼬임(braiding) 핵심원천기술 개발을 목표로 함.
- 비가환 애니온 큐비트 플랫폼으로 Microsoft 연구진이 실증한 마요라나 위상초전도체 플랫폼을 중심으로 기술 개발을 진행
- 다양한 고품질 하이브리드 위상전도체 플랫폼과 위상양자 측정 방식들을 시도하여 패리티 전이 시간 정량화
- 마요라나 융합/꼬임 기술 개발을 통한 위상양자 큐비트 기술 선진화 구현

2. 국제공동 연구개발목표

□ 최종 목표 : 세계 최고 수준의 마요라나 큐비트 구현 및 마요라나 꼬임(braiding) 기술 개발

□ 단계별 목표

구분	목표
1단계 (25~27)	- 세계 최고 수준의 마요라나 패리티 전이 시간 달성 - 마요라나-트랜스몬 큐비트 기술 개발 (세계 최초)
2단계 (28~30)	- 마요라나 융합(fusion) 위상양자 기술 개발 (세계 최초) - 마요라나 꼬임(braiding) 위상양자 기술 개발 (세계 최초)

- 1단계 전반기 연구 목표는 Microsoft 연구 결과를 능가하는 세계 최고 수준의 마요라나 패리티 전이 시간을 달성하는 것임. 이 목표를 달성하기 위해서는 위상양자 큐비트에 최적화된 하이브리드 위상전도체 플랫폼을 확립하고 게이트 전압을 이용하여 위상양자 상태를 제어하는 기술을 확립하는 것이 필수적임.
- 1단계 후반기 연구 목표는 하이브리드 위상전도체를 트랜스몬 큐비트와 결합한 마요라나-트랜스몬 큐비트를 세계 최초로 구현하는 것임. 혼성 마요라나 상태에 의한 energy level splitting을 트랜스몬 큐비트를 써서 측정함으로써 마요라나 존재를 입증할 수 있을 것임[이론 제안 Nature communications, 5, 4772 (2014)].
- 2단계 연구 목표는 위상양자 큐비트의 고유한 특성인 융합(fusion)과 꼬임(braiding) 기술을 개발하는 것임. 이 목표 기술은 1단계에서 확보된 위상양자 플랫폼을 이용한 위상양자 큐비트의 설계 및 제작, 양자 상태 측정 방식 등을 포괄하는 내용으로서 성공한다면 세계 최초로 위상양자 연산을 실질적으로 구현하는 기념비적인 성과가 될 것임.

3. 국제공동 연구개발내용 및 성과목표

□ 연구 개발 내용

구분	연구 내용
1단계(25~27)	- 고품질 위상전도체 플랫폼 확립 및 극저온 특성 측정 - 마요라나 양자소자의 게이트 전압 제어 기술 개발 - 마요라나 패리티 전이 시간 측정 및 최적화 조건 확립 - 마요라나-트랜스몬 큐비트 제작 및 극저온 특성 측정
2단계(28~30)	- 위상양자 큐비트 제어 기술 구현 - 마요라나 융합(fusion) 기술 개발 및 구현 - 마요라나 꼬임(braiding) 기술 개발 및 구현

- 반도체-초전도체 하이브리드 위상전도체 플랫폼 확립: 위상전도체는 Microsoft가 채택한 반도체-초전도체 접합 외에도 위상절연체-초전도체, 디락 준금속-초전도체 등을 활용할 수 있음. 위상전도체를 구성하는 반도체/위상물질/초전도체 등의 다양한 조합을 활용한 위상양자 소자들을 제작하고 각각의 극저온 특성을 비교함으로써 Microsoft 연구진이 사용한 기존 플랫폼을 능가하는 위상전도체 플랫폼을 확립하는 것을 목표로 함.
- 마요라나 패리티 전이 시간 최적화 조건 확립: 마요라나 위상양자 큐비트의 성능 지표로서 마요라나 패리티 전이 시간을 제시함. Microsoft 연구진이 발표한 결과(~2 msec)를 능가하는 패리티 전이 시간을 구현하는 것을 목표로 함.

- **마요라나-트랜스몬 큐비트 기술 구현:** 하이브리드 위상전도체를 트랜스몬 큐비트와 결합함으로써 혼성 마요라나 상태의 energy level splitting 특성을 측정하는 것을 목표로 함. 이를 위해서는 마요라나 상태의 게이트 전압 제어 기술을 확보할 필요가 있음.
- **마요라나 융합(fusion) 및 꼬임(braiding) 실증:** 마요라나 융합 현상과 꼬임 현상은 위상양자 큐비트 연산에 있어 반드시 구현해야할 과제임. 구체적인 기술 구현 방식은 기존의 이론적 제안을 따르거나 1단계에서 확보한 최적화된 위상전도체 플랫폼에 적합한 방식을 다양하게 적용할 수 있음.

□ 성과 목표

구분	항목		목표 기술 수준(SPEC 등)	현재 기술 수준	비고
핵심	1단계 ('25~'27)	마요라나 패리티 전이 시간	10 msec	2 msec	Microsoft (Nature, 2025)
		topological-nontopological 상태 제어	gate-voltage control	gate-voltage control	Microsoft (Nature, 2025)
		Majorana-Transmon qubit	T1, T2 ~ 1 μ s	T1, T2 < 10 μ s (비위상 게이트몬 큐비트)	M-T 큐비트 이론제안: Nature communications, 5:4772 (2014); 비위상 게이트몬 실형: PRL 120, 100502 (2018)
	2단계 ('28~'30)	마요라나 융합 (fusion)	실험적 검증 (TRL 3)	이론적 제안	Nature communications, 13:1738 (2022); PRX 6, 031016 (2016)
		마요라나 꼬임 (braiding)	실험적 검증 (TRL 3)	이론적 제안	PRX 6, 031016 (2016)
		위상양자 큐비트 집적도	1 위상양자 큐비트	1 위상양자 큐비트	Microsoft (Nature, 2025)
자율	단계별 자율 제시	논문, 특허 등	-	-	JCR 상위 10 % SCI(E) 논문 실적 목표 포함 ※ 국제협력기관과 공동저자 논문을 목표로 제시할 것
		공동워크샵, 세미나, 인력교류, 파견 등	-	-	일시, 횟수, 명단, 기간 등

※ 핵심지표는 필수로 설정하여야 하며, 자율지표는 추가하여 제시할 수 있음

※ 제시된 핵심지표의 조정 및 자율지표 추가시 다음의 내용을 제시하여야 함

항목	국제선도수준 (SPEC 등)	목표 기술 수준(SPEC 등)	현재 기술 수준	설명 및 근거
				논문, 특허, 보도자료 등

□ 기대 성과

- 국제 저널(Q1 rank) 발표 및 국제 특허 출원/등록

4. 지원기간/예산/추진체계

□ 기간: 2025.07.01.~2030.06.30. (총 60개월 내외, 3+2)

※ 당초 기한('23년~'27년)이 있던 사업을 계속사업으로 전환 중으로 상황에 따라 기간이 변동될 수 있음

※ 과제 착수 3년 후 단계평가*를 통해 계속지원(2년) 여부 결정. 연구목표 달성 가능성이 작거나 불성실한 과제로 판단되는 경우 연구중단 가능
 * 단계평가 지표 : 1단계 연구성과 및 2단계 연구계획 등으로, 향후 변동 가능

- 정부지원연구개발비: 4,975,000 천원
 ※ 정부 지원규모는 평가 결과, 예산 확보 상황, 해외연구실 참여 확대에 따른 추가지원 등에 따라 변동될 수 있음
- 과제형태: (일반)연구개발과제
- 주관연구개발기관: 대학/출연(연)/기업부설연구소 등
- 기술료 징수여부: 징수

5. 특기사항

- (수행체계) 국내외 연구기관연구자(각 기관별 해당 연구자가 운영하는 연구실 단위)가 참여하는 '국제공동연구실 구성·운영'을 통한 협력연구 수행
 - 해외 선도연구실(권역 무관)을 1개 이상 포함(중점협력연구실)하되, 참여 연구실별 적정 역할 분담 및 유기적 연계체계 구축
 - 과제기간 중 국내외 연구실연구자 참여 확대를 권장하고 이를 위한 연구비 구조 등 유연한 과제체계 구축
- ※ 필요시 해외 연구실 참여 확대를 위한 추가 연구비 지원 예정

< 중점협력연구실 예시 >

- 미국: Microsoft Quantum, Harvard Univ. (Prof. Philip Kim), UC Santa Barbara (Prof. Palmstrom), Princeton (Prof. Pfeiffer), Univ. Tennessee (Prof. Joon Sue Lee), Rutgers Univ. (Prof. Seongshik Oh), UC Davis (Prof. Dong Yu)
- 네덜란드: TU Eindhoven (Prof. E. Bakkers)
- 독일: Univ. Köln (Prof. Y. Ando), Wurzburg Univ. (Prof. L. Molenkamp)
- 이스라엘: Weizmann Institute (Prof. M. Heiblum)

- 실질적 공동연구 수행 및 선진기술 습득 등을 위해 중점협력연구실이 반드시 포함된 해외 참여 연구실에 국내 연구자가 체류하는 현지거점연구실 1곳 이상 설치·운영
 - 체류요건 : 연간 6개월 이상 필수
 - ※ 동일 기관에 최대 2명 체류기간 인정(연구자 1인 2개월 이상 체류기간만 인정)
- 주관기관(연구실)이 해외 참여기관(연구실)과 별도의 연구개발과제 협약을 체결하고 해외 기관(연구실)에 인건비, 국제공동연구개발비, 외부전문기술 활용비 등 항목으로 연구비 지원
 - ※ 과제신청 시 과제 참여의지를 확인할 수 있는 서류(LoI, MoA, MoU 등) → 2차년도 협약용 계획서 제출 시 주관기관과 해외기관 간 계약서(Research Agreement, MoU 등) 제출
 - ※ 주관기관과 해외기관 간 계약서에는 특허 등 성과물을 둘러싼 분쟁 예방을 위해 '지식재산권에 관한 합의' 포함 필수
- 각 연구실은 현재 지원 중인 국제공동연구실 포함 1개 과제만 주관 가능
 - ※ 현재 지원 중인 국제공동연구실의 주관 연구실은 공동·위탁 형태로 참여 가능하며(주관x), 한 개의 연구실이 복수 과제의 주관 연구실로 신청 불가

(성과) 해외 선진 기술 및 연구역량의 국내 확보 관점에서 연구개발 목표의 달성

여부를 정량적으로 측정·판단할 수 있는 논문 발표, 특허 등록, 국내-외 트윈 실험장비 구축, 프로토타입 공동개발, 기술이전, 인력교류 등 대표 성과물 제시

- 연구계획서에 단계별 성과목표 및 성과물의 특성(성능), 자체 평가 기준 등 연구개발 최종 목표 달성 검증 방법을 구체적으로 제시해야 함

□ 연구 범위 및 내용 관련

- 신청 과제명은 RFP명과 동일하게 작성
- 해외 연구파트너와 국내 연구자가 각각 다른 주제의 연구를 진행하는 것은 본 사업의 취지와 맞지 않으므로 허용되지 않음
- 상기 연구개발 목표 및 내용 외에 해당 분야(RFP명) 내에서 필요시 연구 범위 확대 가능
 - 추가 연구 수행 계획 및 성과 창출 여부 등은 제시된 연구개발 목표 달성에 저해되지 않는 범위 내에서 관련 평가 시 우대 적용

□ 연구성과 관리 및 활용

- 연구목표 달성 가능성이 작거나 불성실한 과제로 판단되는 경우 연구중단 가능
- 공개 워크숍 등을 통해 동 분야 연구자들에게 연구성과를 공개하고 피드백을 받아 연구 결과의 완성도를 높일 수 있는 추진전략 수립 권장
- 동 과제의 연구개발 기간을 포함하여 과제종료 후 연구성과의 발전 가능성을 보여주는 중장기 연구계획과 비전 제시

RFP관리번호	2025-양자-지정공모형-11	공모유형	지정 공모형			
해당여부	<input checked="" type="checkbox"/> 국가전략기술 <input type="checkbox"/> 탄소중립 <input checked="" type="checkbox"/> 글로벌 R&D <input type="checkbox"/> 미래소재 <input type="checkbox"/> 전략연구사업(MPR)(예정) <input type="checkbox"/> 국방전략기술(예정)					
국책연구기획평가전문분야	PM분야	양자기술	RB분야	전 분야	RB세부분야	전 분야
사업명	양자기술국제협력강화사업 - 기술분야별 국제공동연구실					
RFP명	압축광 고차원 클러스터 상태기반 양자컴퓨팅 국제공동연구실 (TRL : [시작] 1 단계 ~ [종료] 3 단계)					
RFP유형코드	사업목적·내용	성과물 특성		지원대상	보안과제 분류	일반
	I	0	-	1		
1. 국제공동연구 추진 배경						
<input type="checkbox"/> 국책연구 필요성						
<ul style="list-style-type: none"> ○ 글로벌 기술패권 경쟁으로 과학기술 블록화가 심해지고 있으며, 주요 전략기술인 양자기술에 대한 우방국과의 과학기술 협력이 중요해 짐. ○ 기존 고전 컴퓨팅으로는 해결하기 어려운 계산 문제를 효율적으로 해결할 수 있는 양자컴퓨팅 개발을 위해서 국제 협력 중요성이 대두됨. ○ 광기반 플랫폼은 상온 동작 및 모듈화가 가능하고, 광통신 기술과의 자연스러운 접목이 가능하여 양자통신-컴퓨팅-네트워킹의 통합 플랫폼으로 발전할 수 있음. ○ 압축광 고차원 클러스터 상태 기반 양자컴퓨팅 기술은 연속변수(CV, Continuous variable) 기반의 광기반 양자컴퓨팅 기술로서, 단일 광자를 활용한 접근 방법과 비교하여 자원 효율성 등의 장점이 있으며, 전세계적으로 활발한 연구 개발이 진행되고 있음. ○ 관련 기술의 국제적인 동향으로는, 2019년 일본 동경대와 덴마크 DTU그룹에서 2차원 클러스터 상태를 시간-다중화 기반으로 생성하는데 성공하고 해당 플랫폼의 실현 가능성과 스케일업 가능성을 실증하였으며(Larsen et al., Asavanant et al.), 2025년에는 캐나다 기업 Xanadu에서 압축광 기반 1차원 클러스터 상태를 대규모로 생성하는데 성공하였음(H. Aghaee Rad et al.). ○ 반면, 국내에서는 관련 핵심기술이 여전히 미흡하며, 압축광을 발생시키는 펄토 초 레이저, SPDC 결정 기술, 광자 검출기 및 시간-다중화 광학계 등 기반 기술의 통합 개발이 요구됨. ○ 따라서, 미래의 광자 기반 양자정보 인프라 확보를 위해, 해당 기술 즉, 2차원 클러스터 상태 발생 및 측정기반 양자컴퓨팅 기술의 국제협력을 통한 확보가 필요하며, 이에 따라 국책 연구개발 사업으로의 추진이 타당함. 						
<input type="checkbox"/> 국내·외 기술 및 산업현황						

○ 해외 기술 수준

- 2019년, 덴마크 공과대학 (DTU)의 Larsen et al. 및 일본 동경대의 Asavanant et al.에 의해 시간-다중화 된 2차원 클러스터 상태의 결정론적 생성이 각각 독립적으로 보고됨 [1,2].
 1. M. Larsen et al., Deterministic generation of a two-dimensional cluster state, Science 366, 369 (2019).
 2. W. Asavanant et al., Generation of time-domain-multiplexed two-dimensional cluster state, Science 366, 373 (2019).
- 해당 연구는 수백~수천 개 모드에 걸친 클러스터 상태를 생성하여, 선형광학 연산과 측정기반 양자컴퓨팅이 가능함을 입증함.
- 2025년 캐나다 Xanadu 사에서는 압축광 기반 1차원 클러스터 상태를 10^9 크기의 대규모로 생성하는데 성공하였음 [3].
 3. H. Aghaee Rad et al., Scaling and networking a modular photonic quantum computer, Nature 638, 919 (2025).
- 특히, 시간-다중화 (Time-domain multiplexing) 는 기존의 공간-다중화 대비 소형화와 확장성 면에서 압도적인 장점을 가짐.

○ 국내 기술 수준

- 국내에서도 클러스터 상태를 만드는데 기초가 되는 압축광 제작 연구가 대학 및 연구소에서 진행되고 있음.
- 최근 소규모의 3차원 클러스터 상태의 제작에 대한 연구가 보고되었음 [4].
 4. C. Poh et al., Generation of three-dimensional cluster entangled state, Nat. Photon. 19, 526 (2025).

○ 산업 현황

- 광학 기반 양자컴퓨팅 회사인 캐나다의 Xanadu는 해당 방법을 활용한 양자 시뮬레이터 및 양자컴퓨팅 연구를 수행하고 있음.
- 2022년 연구에서는 자체 생산한 programmable photonic processor를 활용, 양자 시뮬레이션을 통해 양자 계산 이득을 보이려는 시도를 수행하였음 [5].
 5. Lars. S. Madsen et al., Quantum computational advantage with a programmable photonic processor, Nature 606, 75 (2022).
- 2025년에는 modular photonic quantum computer 에 대한 연구를 발표함 [3].
- 또한, 해당 기술은 상온에서 동작하며, 광통신 기반 요소를 활용할 수 있어 기존 통신 및 센서 산업과의 연계가 용이함.

□ 문제 정의

- 현재의 압축광 기반 양자컴퓨팅 플랫폼은 스케일업과 정밀도 확보의 측면에서 여러 가지 기술적 한계에 직면
 - 통신 파장(예 1550 nm)에서 -8 dB 이상의 압축광 압축률 달성이 아직 기술적으로 어려움.
 - 클러스터 상태의 모드 수를 늘리기 위한 시간-다중화 기술의 안정성과 제어 기술 부족
 - 양자 측정을 기반으로 하는 feedforward 제어 및 오류 처리 기술 부재

- 따라서, 다음의 세부 문제를 해결할 필요가 있음:
 - OPA(Optical Parametric Amplifier) 기반 통신파장 압축광 발생 기술의 고도화 (압축률 -8 dB 이상)
 - 선형광학계를 이용한 2차원 이상의 시간-다중화 클러스터 상태의 안정적인 생성
 - 2차원 클러스터 상태를 이용한 회전, 변위 및 압축 양자 게이트 구현
 - 측정 기반(Measurement-based) 양자 연산 및 선형광학 feedforward 회로 설계와 이를 통한 양자컴퓨팅 연산 구현
- 또한, 향후 오류정정을 위한 GKP(Gottesman-Kitaev-Preskill) 상태 생성 및 오류정정 기반 범용 양자컴퓨터의 구현을 목표하기 위해서는, 압축광 기반 클러스터 상태의 고정밀 생성과 측정 안정성 확보, 비가우시안 연산을 위한 다중 모드 광자 추출 기술 등의 요소기술 개발이 필요

2. 국제공동 연구개발목표

□ 최종 목표 (Overall Goal)

- 해외 그룹과 국제 공동연구를 통해서 압축광 광원, 고차원 클러스터 상태 생성, 고속 측정 및 제어 기술 등의 연속변수(CV) 광기반 양자컴퓨팅 분야의 핵심기술을 개발하고, 향후 측정 기반 범용 양자컴퓨팅 시스템 개발을 위한 원천기술 확보
 - 통신파장 -8 dB 이상 고압축률 OPA 기반 압축광 발생장치 개발
 - 고신뢰도 광자 연속변수 시간-다중화 기반 고차원 클러스터 상태 생성
 - 균형 빔 분할기 및 시간 지연 광섬유 회로를 이용한 확정적 고차원 양자 클러스터 상태 구현
 - 호모다인 2중 레일 측정 기반 고속 시간-다중화 측정장치 구현
 - 2차원 클러스터 상태를 이용한 회전, 압축 및 변위 양자 게이트 구현
 - 비가우시안 연산을 위한 광자 다중모드 추출 기술 개발

□ 특히, 구체적 성능 목표는 아래 기준을 참고하되, 국내의 수준을 고려해 도전적으로 제시

□ 단계별 목표

구분	목표
1단계 (25~27)	<ul style="list-style-type: none"> - 통신 파장 (예 1550 nm)에서 -6 dB 이상 압축률을 갖는 압축광 발생 기술 개발 - 높은 측정 속도 (> 100 MHz) 및 신호대 잡음비 (> 17 dB)를 갖는 호모다인 검출기 구현 기술 - 광자 연속변수 기반 2차원 시간-다중화 클러스터 상태 구현 기술 개발
2단계 (28~30)	<ul style="list-style-type: none"> - 통신 파장 (예 1550 nm)에서 -8 dB 이상 압축률을 갖는 압축광 발생 기술 개발 - 클러스터 상태를 이용한 회전, 압축, 비틀림 양자 게이트 구현 기술 및 신뢰도 평가 - 광자의 연속변수 기반 양자컴퓨팅을 위한 얽힘 게이트 구현 기술 및 신뢰도 평가 - 비가우시안 연산을 위한 다중모드 광자 추출 기술

3. 국제공동 연구개발내용 및 성과목표

□ 연구 개발 내용

구분	연구 내용
1단계 (‘25~’27)	- 통신 파장 (예 1550 nm)에서 -6 dB 이상 을 갖는 압축광 발생 기술 개발 - 높은 측정 속도 (> 100 MHz) 및 신호대 잡음비 (> 17 dB)를 갖는 호모다인 검출기 구현 기술 - 광자 연속변수 기반 2차원 시간-다중화 클러스터 상태 구현 기술 개발
2단계 (‘28~’30)	- 통신 파장 (예 1550 nm)에서 -8 dB 이상 압축률을 갖는 압축광 발생 기술 개발 - 클러스터 상태를 이용한 회전, 압축, 및 비틀림 양자 게이트 구현 기술 및 신뢰도 평가 - 광자의 연속변수 기반 양자컴퓨팅을 위한 얽힘 게이트 구현 기술 및 신뢰도 평가 - 비가우시안 연산을 위한 다중모드 광자 추출 기술

□ 성과 목표

- 구체적인 성능 목표는 아래 기준을 참고하되, 국내의 수준을 고려해 도전적으로 제시

구분	항 목	1단계	2단계 (최종목표)	비고
핵심	압축광 발생 기술	통신 파장에서 -6 dB 이상의 안정적 squeezing	통신 파장에서 -8 dB 이상의 안정적 squeezing	2023년 일본 OPA 기반 -8 dB
	2차원 시간-다중화 클러스터 상태 구현	20 x 1250 개 이상의 시간-다중화 클러스터 상태 안정적 생성	30 x 8000 개 이상의 시간-다중화 클러스터 상태 안정적 생성	2019년 덴마크, 24 x 1250, 2019년 일본, 5 x 1240
	고속 호모다인 검출기 구현	측정 속도 : 100 MHz 이상 신호대 잡음비 : 17 dB 이상	-	2013년 영국 측정속도 : 80 MHz 신호대 잡음비 : 14.5 dB
	연산용 양자 게이트 구현	-	양자 게이트 종류 3종 이상	2021년 덴마크 2종
	양자 얽힘 게이트 잡음	-	4 dB 이하	2021년 덴마크 5 dB
	다중모드 광자 추출기술	-	광학모드 수 5개 이상	2023년 프랑스 광학모드 수 3개
자율	논문, 특허 등	단계별 자율제시 ※ 국제협력기관과 공동저자 논문을 목표로 제시할 것		JCR 상위 10 % SCI(E) 논문 실적 목표 포함
	공동워크샵, 세미나, 인력교류, 파견 등	단계별 자율제시		일시, 횟수, 명단, 기간 등

※ 핵심지표는 필수로 설정하여야 하며, 자율지표는 추가하여 제시할 수 있음

※ 제시된 핵심지표의 조정 및 자율지표 추가시 다음의 내용을 제시하여야 함

항목	국제선도수준 (SPEC 등)	목표 기술 수준(SPEC 등)	현재 기술 수준	설명 및 근거
				논문, 특허, 보도자료 등

□ 기대 성과

○ 양자컴퓨팅 구현 방법 중 하나로 주목받고 있는 광기반 연속변수(CV) 측정기반

양자컴퓨팅 구현을 위한 핵심 기술인 압축광 광원 기술, 고차원 클러스터 상태 생성, 효과적인 측정 및 제어 기술을 국제 공동연구로 확보하여 해당 플랫폼 기술의 글로벌 경쟁력 강화.

- 확보된 기술을 GKP 상태 등 비가우시안 상태의 고신뢰도 고효율 생성 및 제어 기술 개발로 연계하고, 향후 오류정정 기반 범용 양자컴퓨팅 시스템 개발을 위한 원천 기술로 활용.

4. 지원기간/예산/추진체계

- 기간: 2025.07.01.~2030.06.30. (총 60개월 내외, 3+2)
 - ※ 당초 기한('23년~'27년)이 있던 사업을 계속사업으로 전환 중으로 상황에 따라 기간이 변동될 수 있음
 - ※ 과제 착수 3년 후 단계평가*를 통해 계속지원(2년) 여부 결정. 연구목표 달성 가능성이 작거나 불성실한 과제로 판단되는 경우 연구중단 가능
 - * 단계평가 지표 : 1단계 연구성과 및 2단계 연구계획 등으로, 향후 변동 가능
- 정부지원연구개발비: 4,975,000 천원
 - ※ 정부 지원규모는 평가 결과, 예산 확보 상황, 해외연구실 참여 확대에 따른 추가지원 등에 따라 변동될 수 있음
- 과제형태: (일반)연구개발과제
- 주관연구개발기관: 대학/출연(연)/기업부설연구소 등
- 기술료 징수여부: 징수

5. 특기사항

- (수행체계) 국내외 연구기관연구자(각 기관별 해당 연구자가 운영하는 연구실 단위)가 참여하는 '국제공동연구실 구성·운영'을 통한 협력연구 수행
- 해외 선도연구실(권역 무관)을 1개 이상 포함(중점협력연구실)하되, 참여 연구실별 적정 역할 분담 및 유기적 연계체계 구축
 - 과제기간 중 국내외 연구실연구자 참여 확대를 권장하고 이를 위한 연구비 구조 등 유연한 과제체계 구축
 - ※ 필요시 해외 연구실 참여 확대를 위한 추가 연구비 지원 예정

< 중점협력연구실 예시 >

- 일본 : 동경대학교 A. Furusawa, S. Takeda 그룹 등
- 미국 : 버지니아 대학교 O. Pfister 그룹 등
- 덴마크 : Technical University of Denmark의 Ulrik L. Andersen 그룹 등
- 프랑스 : Laboratoire Kastler Brossel의 V. Parigi 그룹 등

- 실질적 공동연구 수행 및 선진기술 습득 등을 위해 중점협력연구실이 반드시 포함된 해외 참여 연구실에 국내 연구자가 체류하는 현지거점연구실 1곳 이상 설치·운영
 - 체류요건 : 연간 6개월 이상 필수
 - ※ 동일 기관에 최대 2명 체류기간 인정(연구자 1인 2개월 이상 체류기간만 인정)

○ 주관기관(연구실)이 해외 참여기관(연구실)과 별도의 연구개발과제 협약을 체결하고 해외 기관(연구실)에 인건비, 국제공동연구개발비, 외부전문기술 활용비 등 항목으로 연구비 지원

※ 과제신청 시 과제 참여의지를 확인할 수 있는 서류(LoI, MoA, MoU 등) → 2차년도 협약용 계획서 제출 시 주관기관과 해외기관 간 계약서(Research Agreement, MoU 등) 제출

※ 주관기관과 해외기관 간 계약서에는 특허 등 성과물을 둘러싼 분쟁 예방을 위해 '지식재산권에 관한 합의' 포함 필수

○ 각 연구실은 현재 지원 중인 국제공동연구실 포함 1개 과제만 주관 가능

※ 현재 지원 중인 국제공동연구실의 주관 연구실은 공동·위탁 형태로 참여 가능하며(주관×), 한 개의 연구실이 복수 과제의 주관 연구실로 신청 불가능

□ (성과) 해외 선진 기술 및 연구역량의 국내 확보 관점에서 연구개발 목표의 달성 여부를 정량적으로 측정·판단할 수 있는 논문 발표, 특허 등록, 국내-외 트윈 실험 장비 구축, 프로토타입 공동개발, 기술이전, 인력교류 등 대표 성과물 제시

○ 연구계획서에 단계별 성과목표 및 성과물의 특성(성능), 자체 평가 기준 등 연구개발 최종 목표 달성 검증 방법을 구체적으로 제시해야 함

□ 연구 범위 및 내용 관련

○ 신청 과제명은 RFP명과 동일하게 작성

○ 해외 연구파트너와 국내 연구자가 각각 다른 주제의 연구를 진행하는 것은 본 사업의 취지와 맞지 않으므로 허용되지 않음

○ 상기 연구개발 목표 및 내용 외에 해당 분야(RFP명) 내에서 필요시 연구 범위 확대 가능

- 추가 연구 수행 계획 및 성과 창출 여부 등은 제시된 연구개발 목표 달성에 저해되지 않는 범위 내에서 관련 평가 시 우대 적용

□ 연구성과 관리 및 활용

○ 연구목표 달성 가능성이 작거나 불성실한 과제로 판단되는 경우 연구중단 가능

○ 공개 워크숍 등을 통해 동 분야 연구자들에게 연구성과를 공개하고 피드백을 받아 연구 결과의 완성도를 높일 수 있는 추진전략 수립 권장

○ 동 과제의 연구개발 기간을 포함하여 과제종료 후 연구성과의 발전 가능성을 보여주는 중장기 연구계획과 비전 제시

RFP관리번호	2025-양자-지정공모형-12	공모유형	지정 공모형			
해당여부	<input checked="" type="checkbox"/> 국가전략기술 <input type="checkbox"/> 탄소중립 <input checked="" type="checkbox"/> 글로벌 R&D <input type="checkbox"/> 미래소재 <input type="checkbox"/> 전략연구사업(MPX(예정)) <input type="checkbox"/> 국방전략기술(예정)					
국책연구기획평가전문분야	PM분야	양자기술	RB분야	전 분야	RB세부분야	전 분야
사업명	양자기술국제협력강화사업 - 기술분야별 국제공동연구실					
RFP명	이중 양자시스템 상호작용 제어 국제공동연구실 (TRL : [시작] 1단계 ~ [종료] 3단계)					
RFP유형코드	사업목적·내용	성과물 특성		지원대상	보안과제 분류	일반
	I	0	-	1		
1. 국제공동연구 추진 배경						
<input type="checkbox"/> 국책연구 필요성 <ul style="list-style-type: none"> ○ 이중 양자시스템(Hybrid quantum system)은 다른 물리적 특성을 가진 양자 시스템(광자, 초전도, 스핀, 포논, 마그논 등)간 상호작용을 구현하는 하드웨어 플랫폼으로서 기존 양자소자의 기능, 성능 및 확장성 한계를 극복해줄 수 있을 것으로 기대됨 <ul style="list-style-type: none"> - 이중 양자시스템을 통해 구현된 대표적인 연구로, 광역화소자 및 초전도-마그논 이중 양자시스템을 이용한 단일 포논/마그논의 생성 및 이의 측정제어, 압축상태, 얽힘상태 구현 등이 있으며, 반도체 양자점-초전도 회로, 나노포토닉 공진기-접결함 큐비트, 스핀-나노역화소자 등 다양한 이중 양자시스템 플랫폼에 대한 연구 역시 활발히 진행 중 - 이러한 기능을 통해 기존 양자센서의 한계를 돌파한 양자센싱 기술, 다른 물리적 플랫폼 간 양자정보의 전송 및 저장 등을 구현할 수 있을 것으로 기대됨 ○ 해당 연구분야는 초기 연구 진입장벽이 높고 국가전략분야로서 가치가 높아 기초기술에 대해 국가적지원이 시급한 분야임 						
<input type="checkbox"/> 국내외 기술 및 산업현황 <ul style="list-style-type: none"> ○ 미국, 유럽, 일본, 호주 등 관련 분야의 선도그룹에서는 이중 양자시스템 관련 원천기술 및 이용한 응용양자기술 관련 연구결과를 다수 보고하고 있음 <ul style="list-style-type: none"> - 국내 연구진은 단일 양자시스템(초전도, 광자, 중성 원자, 이온 포획, 반도체 양자점, 점결함 등)에 기반한 양자기술 개발에 집중하는 상황이며, 이중 양자시스템 관련 연구는 초기 단계임 - 본 사업을 통한 해외 선도그룹과의 협력 연구를 통해 국내 연구진의 역량 강화 및 양자원천기술 확보를 꾀할수 있을 것으로 기대됨 						
<input type="checkbox"/> 문제정의 <ul style="list-style-type: none"> ○ 이중 양자시스템 분야를 선도하고 있는 해외 우수 연구그룹과의 상호협력을 통한 기존 양자정보처리소자의 한계 돌파 원천기술 확보 <ul style="list-style-type: none"> - 저손실 고품질 이중 양자시스템 플랫폼 개발 						

- 이중 양자시스템 내 두 개 이상 양자시스템의 강한 상호작용 구현
- 양자시스템의 상호작용을 이용한 비고전적 상태 구현 및 이의 측정제어 기술 개발

2. 국제공동 연구개발목표

□ 단일 양자시스템의 한계를 뛰어넘는 이중 양자시스템 구현, 강한상호작용 구현 및 측정기술 개발

○ 최종 목표

- 제시된 이중 양자시스템의 협력계수(Cooperativity, C) > 1 실현 및 고도화
- 이중 양자시스템의 상호작용을 이용한 비고전상태 형성 및 응용법 확립

○ 단계별 목표

구분	목표
1단계 (25~27)	<ul style="list-style-type: none"> ○ 이중 양자시스템 핵심요소기술 개발 - 양자계 선정, 이중 양자시스템 셋업 구축, 양자측정법 확립 ○ 협력계수 측정 - 손실률과 공진기 품위기반 협력계수 판별법 제시 - 제안한 이중 양자계의 강한상호작용 검증 ○ 협력계수 고도화 - 손실률 최소화, 공진품위 고도화 - 중장기적 이중시스템 발전방향 제시
2단계 (28~30)	<ul style="list-style-type: none"> ○ 이중간 비고전상태 형성법 확립 - 제시한 비고전 상태에 대한 성능지표 확립 ○ 이중간 비고전상태의 응용 - 양자센싱, 장거리 양자정보 얽힘 등 이중 양자시스템 응용법 확립

□ 구현하고자 하는 이중 양자시스템은 성능, 호환성, 응용분야를 고려하여 제시하되 구체적 성능 목표는 아래 예시를 참고하고 **국내의 수준을 고려해 도전적으로** 제시

○ 이중 양자시스템 플랫폼 선정

- 상호작용을 구현할 구체적 양자상태 제시 필요
 - ※ 예시 : 광공진기(광자)-나노역학소자(포논), 마이크로파 공진기(마이크로파 광자)-자성체(마그논), 큐비트-자성체(마그논), 나노포토닉 공진기(광자)-스핀, 나노역학계 공진기(포논)-스핀 등
- 제시한 양자시스템의 명확한 최종 응용분야 목표 설정 필요

○ 저손실 고품질 이중 양자시스템 플랫폼 개발

- 강한 상호작용을 위해서는 저손실 양자시스템의 구현이 필수적. 공진모드의 경우 품위 값, 큐비트의 경우 결맞음 시간을 성능지표로 제시 필요

○ 이중 양자시스템 내 두 개 이상 양자시스템의 강한 상호작용 구현

- 강한 상호작용을 위해서는 양자시스템간 강한 결합의 구현이 필수적임. 이를 나타내는 대표적인 지표로는 협력계수(Cooperativity, C)가 있으며, 이 값이 최소

1보다 커야함. $C > 1$ 달성을 위한 결합력 극대화를 위한 구체적 방안 (예시: 손실 최소화 방안, 결맞음 시간 최대화 방안, 공진기 임피던스 최대화 방안 등) 제시 필요. 협력계수의 최종 목표치를 제시할 것.

- 양자시스템의 상호작용을 이용한 비고전적 상태 구현 및 이의 측정제어 기술 개발
 - 구현하고자 하는 비고전적 상태에 대한 제시, 구현 전략, 성능지표 제시 필요
- ※ 예시1 : 양자진공요동 대비 -2 dB 압축상태 구현
- 예시2 : $|\psi_{q_1, q_2}\rangle = |1_{q_1}0_{q_2}\rangle + |0_{q_1}1_{q_2}\rangle$ 얽힘 상태를 80%의 충실도로 구현
- 예시1,2의 경우 : 사용하는 압축정도 측정법, 얽힘 측정법 (토모그래피, concurrence, 진공라비진동 품위 등)을 명시하고 목표치를 제시할 것.

3. 국제공동 연구개발내용 및 성과목표

□ 연구개발 내용

구분	연구 내용
1단계 (‘25~’27)	<ul style="list-style-type: none"> ○ 국외 연구기관과 역할분담 체계화 ○ 제시한 이중 양자계에 대한 측정 플랫폼 구축 ○ 이중 양자계 소자 설계 및 공정법 연구 ○ 협력계수 측정법 연구 ○ 손실률과 공진기 품위기반 협력계수 측정 ○ 협력계수 최대화를 위한 손실률 최소화, 공진품위 고도화, 측정-공정의 피드백 절차 확립
2단계 (‘28~’30)	<ul style="list-style-type: none"> ○ 이중 양자시스템의 비고전상태 형성법 확립 ○ 제시한 비고전 상태에 대한 성능지표 측정 ○ 이중간 비고전상태의 응용 ○ 양자센싱, 장거리 양자정보 얽힘 등 이중 양자시스템 응용법 연구 ○ 이중 양자시스템의 품질 고도화방안 연구

□ 성과목표

아래는 대표적인 성능치 항목이며 제안하는 이중 양자시스템에 해당하는 국제적인 선도 지표를 제시하고 일부 또는 전부의 항목을 조합하여 연구과제의 목표치를 도전적으로 제시할 것.

구분	항 목	1단계	2단계 (최종목표)	비고
핵심	손실률 (MHz)	국제선도지표 대비 도전성 높게 단계별 자율제시		예시) Acoustic phonon – qubit의 경우 분야선도 지표를 근거와 함께 제시 (예: Science 365, 368-371) 하고 제안과제의 목표치를 대비하여 제시. 상충관계 (trade-off)의 목표치의 경우 이중 양자시스템의 최종 응용처에 부합하는 성능치 최적조합을 도전성있게 제시할 것.
	결맞음 시간 (us)	단계별 자율제시	단계별 자율제시	
	협력계수	단계별 자율제시	단계별 자율제시	
	공진기 임피던스 (kOhm)	단계별 자율제시	단계별 자율제시	
	압축률 (dB)	단계별 자율제시	단계별 자율제시	
자율	논문, 특허 등	단계별 자율제시 ※ 국제협력기관과 공동저자 논문을 목표로 제시할 것		JCR 상위 10 % SCI(E) 논문 실적 목표 포함

공동워크샵, 세미나, 인력교류, 파견 등	단계별 자율제시	일시, 횟수, 명단, 기간 등
핵심 성능 수치	단계별 자율제시	소재·부품, 셀 등과 관련된 추가적인 성능 지표
개발 기술의 혁신성	자율제시	기술이전 등

※ 핵심지표는 필수로 설정하여야 하며, 자율지표는 추가하여 제시할 수 있음

※ 제시된 핵심지표의 조정 및 자율지표 추가시 다음의 내용을 제시하여야 함

항목	국제선도수준 (SPEC 등)	목표 기술 수준(SPEC 등)	현재 기술 수준	설명 및 근거
				논문, 특허, 보도자료 등

4. 지원기간/예산/추진체계

기간: 2025.07.01.~2030.06.30. (총 60개월 내외, 3+2)

※ 당초 기한('23년~'27년)이 있던 사업을 계속사업으로 전환 중으로 상황에 따라 기간이 변동될 수 있음

※ 과제 착수 3년 후 단계평가*를 통해 계속지원(2년) 여부 결정. 연구목표 달성 가능성이 작거나 불성실한 과제로 판단되는 경우 연구중단 가능

* 단계평가 지표 : 1단계 연구성과 및 2단계 연구계획 등으로, 향후 변동 가능

정부지원연구개발비: 4,975,000 천원

※ 정부 지원규모는 평가 결과, 예산 확보 상황, 해외연구실 참여 확대에 따른 추가지원 등에 따라 변동될 수 있음

과제형태: (일반)연구개발과제

주관연구개발기관: 대학/출연(연)/기업부설연구소 등

기술료 징수여부: 징수

5. 특기사항

(수행체계) 국내외 연구기관연구자(각 기관별 해당 연구자가 운영하는 연구실 단위)가 참여하는 '국제공동연구실 구성·운영'을 통한 협력연구 수행

○ 해외 선도연구실(권역 무관)을 1개 이상 포함(중점협력연구실)하되, 참여 연구실별 적정 역할 분담 및 유기적 연계체계 구축

- 과제기간 중 국내외 연구실연구자 참여 확대를 권장하고 이를 위한 연구비 구조 등 유연한 과제체계 구축

※ 필요시 해외 연구실 참여 확대를 위한 추가 연구비 지원 예정

< 중점협력연구실 예시 >

· 일본: Yasunobu Nakamura, Atsushi Noguchi (University of Tokyo 및 RIKEN), Hiroshi Yamaguchi, Hajime Okamoto, Daiki Hatanaka (NTT Basic Research Laboratories) 등

· 싱가포르: Cleaven Chia (A*STAR) 등

· 호주: Warwick Bowen (University of Queensland) 등

○ 실질적 공동연구 수행 및 선진기술 습득 등을 위해 중점협력연구실이 반드시 포함된 해외 참여 연구실에 국내 연구자가 체류하는 현지거점연구실 1곳 이상 설치·운영

- 체류요건 : 연간 6개월 이상 필수

※ 동일 기관에 최대 2명 체류기간 인정(연구자 1인 2개월 이상 체류기간만 인정)

- 주관기관(연구실)이 해외 참여기관(연구실)과 별도의 연구개발과제 협약을 체결하고 해외 기관(연구실)에 인건비, 국제공동연구개발비, 외부전문기술 활용비 등 항목으로 연구비 지원

- ※ 과제신청 시 과제 참여의지를 확인할 수 있는 서류(LoI, MoA, MoU 등) → 2차년도 협약용 계획서 제출 시 주관기관과 해외기관 간 계약서(Research Agreement, MoU 등) 제출

- ※ 주관기관과 해외기관 간 계약서에는 특허 등 성과물을 둘러싼 분쟁 예방을 위해 '지식재산권에 관한 합의' 포함 필수

- 각 연구실은 현재 지원 중인 국제공동연구실 포함 1개 과제만 주관 가능

- ※ 현재 지원 중인 국제공동연구실의 주관 연구실은 공동·위탁 형태로 참여 가능하며(주관×), 한 개의 연구실이 복수 과제의 주관 연구실로 신청 불가능

- (성과) 해외 선진 기술 및 연구역량의 국내 확보 관점에서 연구개발 목표의 달성 여부를 정량적으로 측정·판단할 수 있는 논문 발표, 특허 등록, 국내-외 트윈 실험장비 구축, 프로토타입 공동개발, 기술이전, 인력교류 등 대표 성과물 제시

- 연구계획서에 단계별 성과목표 및 성과물의 특성(성능), 자체 평가 기준 등 연구개발 최종 목표 달성 검증 방법을 구체적으로 제시해야 함

- 연구 범위 및 내용 관련

- 신청 과제명은 RFP명과 동일하게 작성

- 해외 연구파트너와 국내 연구자가 각각 다른 주제의 연구를 진행하는 것은 본 사업의 취지와 맞지 않으므로 허용되지 않음

- 상기 연구개발 목표 및 내용 외에 해당 분야(RFP명) 내에서 필요시 연구 범위 확대 가능

- 추가 연구 수행 계획 및 성과 창출 여부 등은 제시된 연구개발 목표 달성에 저해되지 않는 범위 내에서 관련 평가 시 우대 적용

- 연구성과 관리 및 활용

- 연구목표 달성 가능성이 작거나 불성실한 과제로 판단되는 경우 연구중단 가능

- 공개 워크숍 등을 통해 동 분야 연구자들에게 연구성과를 공개하고 피드백을 받아 연구 결과의 완성도를 높일 수 있는 추진전략 수립 권장

- 동 과제의 연구개발 기간을 포함하여 과제종료 후 연구성과의 발전 가능성을 보여주는 중장기 연구계획과 비전 제시