

과제계획요청서

PROJECT PROPOSAL REQUEST (PPR)

최소 에너지를 이용하는 탄소(C^{12}) 순환 기술
(MinergyCOP: Minimal Energy Carbon Optimization for Planet)

PPR No. ASTRA02_2401PPR1

과제계획요청서(PPR) 공고일: 2024. 4. 4.

연구개발계획서 접수 마감일: 2024. 5. 9.

공모유형: 분야공모

보안과제여부: 일반



과학기술정보통신부



한국연구재단

한계도전전략센터

Advanced Science & Technology Research Agency (ASTRA)

1. 과제 개요

한국연구재단 한계도전전략센터에서는 지구계(해양-육상-대기) 탄소 순환 관련 연구개발 수준이 글로벌 선단에 이를 수 있는, 최소 에너지를 이용하는 탄소(C¹²) 순환 기술 (MinergyCOP¹⁾) 프로젝트를 추진합니다.

이 프로젝트는 “지구 온난화는 다량의 화석에너지를 사용하는 과정에서 발생하는 이산화탄소가 지구계 탄소 순환 불균형 문제를 일으켜 발생하는 것인데, 이를 해결하기 위해서는 또다시 에너지가 필요하다” 라는 문제 인식에서 출발합니다. 이 문제를 해결하기 위해 해양에 녹아있는 이산화탄소를 최소 에너지를 사용하여 자연계 흡수, 고정하는 기술 개발을 시도합니다. 이런 도전적 시도와 신재생 에너지 기술과의 연계를 통해 대기과 해양 사이의 탄소 순환 속도 증가, 궁극적으로는 대기 중 이산화탄소 농도 변화 속도가 감소할 수 있기를 기대합니다.

이 시도가 성공한다면 온난화 문제 해결 가능성과 의미를 보여주는 세계 선단의 기술이 될 것이며, 그 과정에서 얻는 새로운 지식을 바탕으로 지구계 탄소 순환 메커니즘에 대한 이해도 더 빠른 속도로 달성될 것입니다.

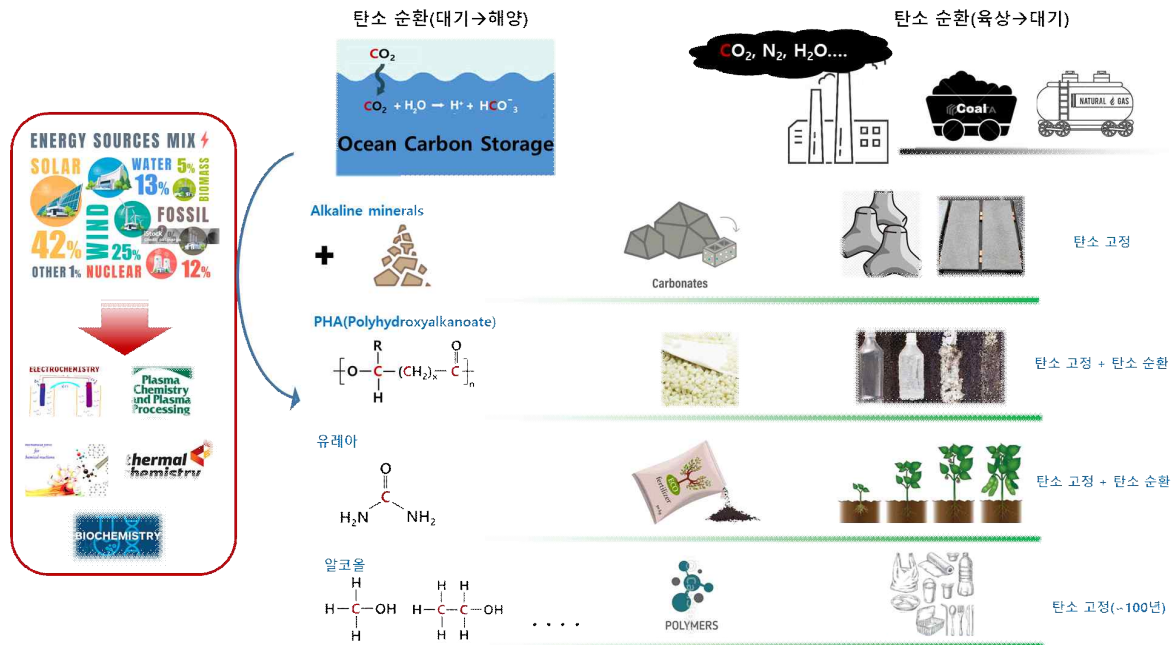


그림 1. 프로젝트(MinergyCOP) 설명도

1) MinergyCOP: Minimal Energy Carbon Optimization for Planet

2. 추진 배경

화석자원에서부터 에너지를 얻는 과정에서 한해 37 Gt 이상의 이산화탄소가 발생합니다.²⁾ 글로벌 관점에서 기후 변화 문제를 극복하기 위해서는 2050년까지 평균 온도 상승을 최대 1.5도 이하 수준으로 유지해야 합니다.³⁾ 이 목표를 달성하기 위해 2030년까지 약 35 Gt의 이산화탄소를 감축하여야 하고, 이후 지속해서 한해 10~20 Gt의 감축이 필요하다고 알려집니다.⁴⁾ 이를 위해서는 개별국가에 한정된 환경이 아닌, 글로벌 공통 환경에 적용 가능한 혁신적인 이산화탄소 처리 솔루션이 필요합니다.

탄소중립 로드맵 이행을 위한 CCUS(Carbon Capture Utilization and Storage) 기술은 이산화탄소 발생 감축에 이바지해야 하는 중요한 분야인데, 우리나라는 11.2 백만톤('30년, NDC⁵⁾) 및 84.6 백만톤(' 50년, B안⁶⁾) 감축을 목표로 합니다(그림2). 그런데, CCU 기술의 경우 이를 처리하는 과정에서 필요한 에너지의 GWP(Global Warming Potential) 및 사용량, 그리고 해당 기술이 적용될 산업의 규모와 특성을 충분히 참작하지 않으면(그림3), 해당 기술이 탄소중립 로드맵에 얼마나 이바지할 수 있을지 예상하기 어렵고, 오히려 이산화탄소 발생을 더 자극하게 됩니다.

화석 연료의 전환 과정에서 발생하면서 열역학적으로 안정한 이산화탄소를 고부가 화학 원료 또는 연료로 전환하는 연구는, 탄소중립 이슈가 아닌 석유 자원이 부족하거나 고유가로 인한 위기 상황에 대비할 탄소 자원화 연구 개념에서 먼저 시작되었습니다. 따라서 이를 탄소중립 정책 실현을 위한 도구로 활용하기 위해서는 에너지 사용에 따른 GWP 고려와 같은 매우 제한된 조건에서 수행해야 하기에, 해당 연구가 극복해야 하는 난제 수준은 매우 높습니다. 그리고, 우리나라 산업은 수입 에너지 의존도가 매우 높아서 실용적 솔루션 제공 관점의 연구 범위도 매우 제한적입니다.

2) United Nations Environment Programme. Emissions Gap Report 2019; United Nations Environment Programme: Nairobi, 2019.

3) Core Writing Team. Pachauri, R. K.; Meyer, L. A. Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change; IPCC: Geneva, Switzerland, 2014.

4) National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. Negative Emissions Technologies and Reliable Sequestration: A Research Agenda; National Academies Press, 2019.

5) Nationally Determined Contributions(NDCs), 각 당사국이 자국의 상황과 역량을 감안하여 자체적으로 정한 탄소 감축 및 적응에 대한 목표, 절차, 방법론

6) 화력발전 전면 중단 등 배출 자체를 최대한 줄이는 안(A안)과 비교되는 안으로서, 화력발전이 잔존하는 대신 CCUS 등 제거기술을 적극적으로 활용하는 안

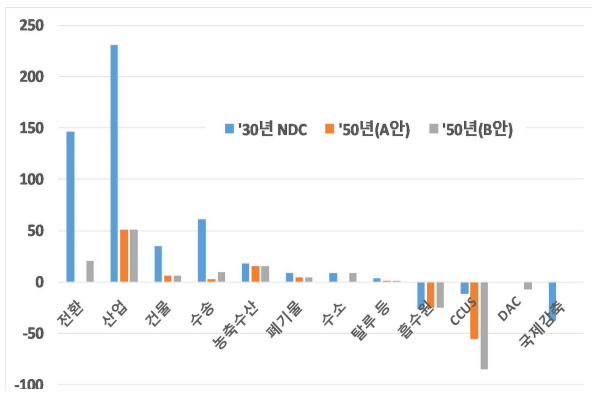


그림 2. 탄소중립 로드맵 이행계획 (백만톤 CO₂)

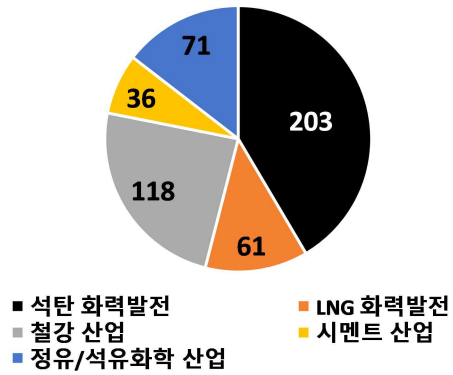


그림 3. 국내 산업별 CO₂ 발생 현황 (백만톤/년, '20)

지구의 해양-육상-대기 사이에서 나타나는 탄소의 생화학적 순환과정에서, 대기 중의 탄소는 대부분 이산화탄소로 존재합니다(그림3)⁷⁾. 그런데, 인구 증가, 문명 발달, 경제 규모 증가에 따라 막대한 양의 탄소자원(석탄, 석유 등)을 에너지원으로 사용하면서, 대기권의 이산화탄소 농도가 비정상적으로 증가하게 되었습니다(그림4)⁸⁾. 이로 인해 자연적 탄소 순환 불균형이 발생하면서, 지구 온난화라는 심각한 문제를 초래하게 되었습니다.

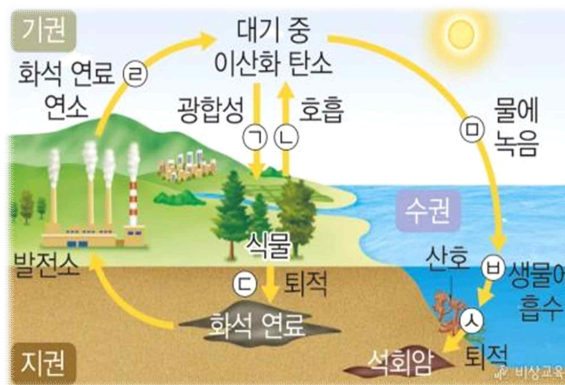


그림 3. 해양-육상-대기 사이의 탄소 순환⁷⁾

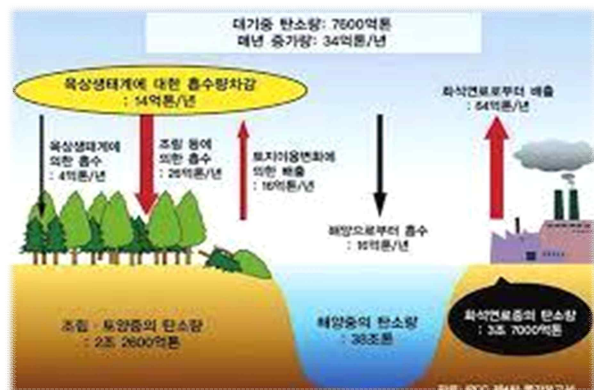


그림 4. 대기 중 탄소 농도 증가에 따른 순환 불균형⁸⁾

해양 표면은 대기 중 이산화탄소를 흡수하는 역할을 하고, 다양한 과정을 통해 일부 배출도 하면서 복잡한 지구계 탄소 순환에 큰 역할을 합니다. 일반적으로 해양은 대기보다 수십 배 이상의 탄소 저장 능력을 갖추고 있지만, 해수에 이산화탄소가 용해되면 탄산이 형성되어 중탄산염 이온과 탄산염 이온으로 해리되고, 이산화탄소 흡수 결과인 해양 산성화는 대기 중 이산화탄소 흡수에 영향을 줍니다.⁹⁾

7) <https://hanav.tistory.com/13>

8) IPCC 제4차 평가보고서

본 과제계획요청서(PPR)는 이처럼 해양-대기 사이의 탄소 순환 불균형과 에너지 문제 이슈에서 출발하고, 차별화된 도전적 목표는 해양에 용존된 이산화탄소를 안정적이고 대량으로 처리 가능한 기술을 소요 에너지 최소화 관점에서 개발하는 데 있습니다.

기후 온난화에 대응하는 목표(산업화 전 대비 지구 평균 온도 상승 1.5도 이내)를 이루기 위해서는 이산화탄소 감축 기술 개발이 중요하지만, 이러한 노력의 결과는 이때 사용하는 에너지를 얻는 과정에서 발생하는 또 다른 이산화탄소의 발생량에 의해 크게 좌우됩니다. 이산화탄소는 화석자원을 에너지로 전환하는 과정에서 발생한 필연적 결과물이기 때문에, 같은 화석에너지를 사용하여 이산화탄소를 감축하고자 하는 노력으로는 감축 효과를 얻을 수 없고, 신재생 전기와 같은 무탄소 전기 에너지를 사용하면 가장 큰 감축 효과를 기대할 수 있습니다. 그러나, 신재생 전기의 간헐성과 높은 발전 단가, 그리고 이산화탄소 감축 기술이 적용되는 장소로부터의 물리적 거리는 무탄소 전기를 이산화탄소 감축을 위해 사용하는 데 있어서 한계로 작용합니다. 또한, 무탄소 전기와 같은 고급 에너지를 탄소 기반 에너지 생산 과정 중 발생한 이산화탄소를 감축하기 위해 사용하는 것은 경제적이지 않습니다. 따라서, 안정적인 이산화탄소 저감 연구개발 차원에서 석탄, 천연가스, 원자력, 신재생 전기 등이 섞인 그리드 전기(전기 믹스) 에너지의 활용을 전제하는 것이 합리적 접근입니다. 이를 위해 참고 가능한 다양한 발전원들의 GWP(Global Warming Potential) 데이터¹⁰⁾¹¹⁾와 2050 탄소중립을 위해 수립된 전기 발전 믹스 계획¹²⁾에 따른 GWP 결과를 아래 그림 5, 6과 같이 정리합니다.

9) Annu. Rev. Environ. Resour. 47, 317 (2022).

10) LCA programe "Sphera"

11) International Journal of Hydrogen Energy 37, 2509 (2012).

12) <http://webarchives.pa.go.kr/19th/www.2050cnc.go.kr/base/board/read?boardManagementNo=4&boardNo=101&searchCategory=&page=1&searchType=&searchWord=&menuLevel=2&menuNo=15>

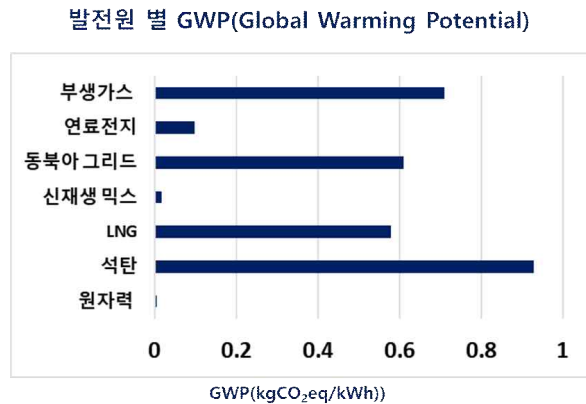


그림 5. 발전원에 따른 GWP

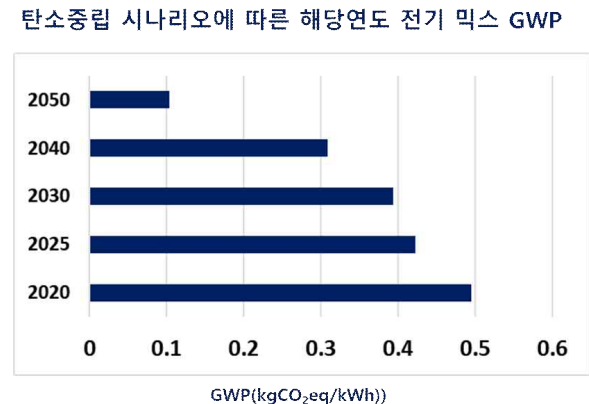


그림 6. 전기 믹스 계획에 따른 해당 연도 GWP

에너지 사용이 수반된 탄소 순환 기술의 탄소중립에의 기여와 경제적·산업적 파급효과를 분석하기 위해서는 열 및 물질 수지(heat & mass balance) 데이터 구축을 포함한 공정 개발 관점의 연구개발 계획 수립이 필요합니다. 탄소 순환을 위한 반응 및 분리 과정에서 이산화탄소가 직·간접 배출되고, 공정 운전에 필요한 에너지를 생산하기 위해 원하지 않는 이산화탄소가 추가 발생하여 전 과정 평가(Life-Cycle Assessment)가 매우 중요하기 때문입니다.

지구 온난화 문제 해결을 위한 바다의 역할에 최근 연구자들이 주목하고 있습니다. 바다는 대기 중 이산화탄소 약 27%를 헨리 법칙에 의한 dynamic equilibrium exchange를 통해 매년 흡수 처리하고 있는데, 이 과정은 바다와 대기의 이산화탄소 부분압에 의해 결정되며, 대기과 바다의 이산화탄소를 비롯한 각종 가스의 평형 부분압 조성¹³⁾에서는 실질 가스 전달(net gas transfer)이 나타나지 않습니다. 많은 연구 전문가는 해양 이산화탄소 포집(Direct Ocean Capture)을 통해 이산화탄소는 해양 표면에 자연 흡수되고, 대기보다 수십 배 이상의 농도를 갖는 경제적인 이산화탄소 처리 기회를 제공한다고 판단합니다. 그리고, 대기 중 분산된 이산화탄소 포집(Direct Air Capture) 기술보다 경제적이고, 포집 이후 탄소를 고정하기 위한 유리한 자연 여건을 제공한다고 판단하면서 electrochemical modulation¹⁴⁾, hydrolytic softening¹⁵⁾, membrane contactor¹⁶⁾ 방법을 이용한 연구를 시작했습니다. 그리고, 포집 과정을 거치지 않고 직접 해양 이산화탄소를 고정하는 연구¹⁷⁾

13) <http://www.waterencyclopedia.com/Re-St/Sea-Water-Gases-in.html>

14) Nature Communications 11, 4412 (2020).

15) https://netl.doe.gov/sites/default/files/netl-file/21DAC_Martin.pdf

16) <http://eepower.com/market-insights/membrane-contactors-for-efficient-ocean-carbon-capture/>

결과도 발표했습니다. 그러나, 여전히 희박한 해양 용존 이산화탄소 처리에 따른 많은 에너지 비용, 해양 설치에 따른 장치 부식, 각종 금속염에 기인한 불안정한 장치 운전, 포집된 이산화탄소의 친환경적이고 경제적인 처리 방법, 각종 환경 규제 등 해결해야 하는 많은 기술 난제가 있습니다.

3. 과제 목표 및 범위

(최종 목표 및 연구 내용)

본 과제계획요청서가 제시하는 중요한 연구목표는 “최소 에너지를 이용하는 해수 중 이산화탄소 제거(Removal of Carbon Dioxide from Seawater) 시스템 설계 및 구현”입니다.

목표 달성을 위해 제안하는 개념 및 검증 방법은 현재 글로벌 연구 커뮤니티 선단 연구그룹과는 다른 새로운 접근 방식, 가설, 검증이어야 합니다. 본 연구과제에서 요청하는 이산화탄소 제거는 이산화탄소 포집, 저장, 활용(연료 또는 원료로의 전환)을 의미하지 않으며, 안정적인 고정화 또는 자연계로 흡수 가능한 물질로의 전환을 의미합니다.

연구개발 계획서는 상기 연구목표 달성을 위한 고유한 연구 내용과 함께

- a) 해양에 용존된 이산화탄소를 최소의 에너지를 이용하여 제거할 수 있는 giga ton 규모로의 확장성 및
- b) 지금까지 알려진 유사 기술이 갖는 기술적 한계를 극복하면서 낮은 투자비와 높은 경제성의 확보에 대한 가능성,
- c) 제안하는 새로운 시스템의 작동 개념과 기술목표 달성 수준을 구체적이고 정량적으로 확인하는 방법과 각종 실험계획¹⁸⁾을 포함해야 합니다.

그리고,

- d) 제안하는 아이디어를 이해할 수 있는 시스템 설명도, 해수로부터 단위 질량 이산화탄소를 안정적으로 제거하는 데 필요한 목표 에너지량 (3kWh/kg CO₂ 이하)¹⁹⁾, heat & mass balance data 수립 계획, 목표로 하는 최종 end-product의 물리 화학적 특성과 조성 정보, 전체 공정의 개요를 간략히 표현한 BFD(Block Flow Diagram)을 포함해야 합니다.

(연구 결과 산출물 및 성능 지표)

종료 단계에서 연구 결과의 우수성과 산업적 타당성 및 연구목표 달성도 검토를 위해 heat & mass balance가 포함된 PFD*(Process Flow Diagram)²⁰⁾

18) ASTM D1141-98 등을 참조한 실제 해양수 모사 방법과 이를 실험에 활용하는 계획 포함.

19) 그림 6 믹스 전기 에너지 GWP 데이터(2040년 기준)를 참고함.

20) PFD가 연구 결과 산출물의 전부가 아닐 수 있음. 연구 제안자는 고유한 아이디어에 적합한 추가 연구 결과 산출물과 이에 해당하는 성능 지표를 연구과제 목표 달성 관점의 설명과 함께 제안할 수 있음.

이 연구결과 산출물 계획 중 하나로 포함되어야 합니다.

* PFD 주요 구성 (예)

- 공정 단계(원료의 변환, 반응, 분리, 정제),
- 유체의 흐름(특성 및 조성이 포함된 유체의 특성 및 조성을 포함),
- 주요 설비(공정에 사용되는 주요 설비 및 유닛),
- 주요 제어 및 유틸리티 시스템

(제외 대상)

본 프로젝트에서는 아래에 해당하는 기술 개발을 지원 대상으로 고려하지 않습니다.

- 태양광을 에너지원으로 사용하는 연구
- 선행된 연구 수행을 통해 이미 알려진 방법론을 본 연구과제에 적용하는 연구
- 유사 연구의 중복, 후속 또는 이것을 확장하는 연구
- 기존 기술을 활용한 점진적 성능 향상 연구
- 이산화탄소 제거 시스템 구현을 위한 소재 개발 연구

4. 추진 일정

(프로그램 구조, 과제 구성)

한계도전전략센터에서는 1인 연구 책임자 중심, 2개 내외의 과제(선정 과제 별 연간 5억 원 내외²¹⁾, 연구 기간 최대 3년 7개월) 선정을 계획하고 있습니다. 연구개발 계획서를 제출하는 전문가는 연구내용과 목표를 고려하여 센터가 계획하는 자원과 기간 범위의 계획서를 제출해야 합니다. 연구과제는 단계별 (19개월/12개월/12개월) 평가를 통해, 다음 단계 연구 수행에 대한 진행 여부(Go/No-Go)가 결정되고, 연구비는 책임PM의 연구 수행내용 검토를 통해 가감 가능할 것입니다.



그림 7. MinergyCOP 프로젝트의 주요 일정

본 연구과제는 이산화탄소가 용존된 해양을 대상으로 하면서, 필요 에너지의 최소화 관점에서 안정하고 대량으로 제거 가능한 기술 개발을 목표로 합니다. 프로젝트의 파급효과를 최대화하기 위해 여러 연구 배경에서 도전적인 연구를 시도하는 과제를 선정하여 책임PM 중심의 협력·융합 연구를 추진합니다. 그리고, 협약 전 후보 과제 워킹, 전문가 컨설팅에 따른 연구개발 계획서 변경, 후속 협력 과제 기획 등 적극적인 피보팅(pivoting)을 통해 각 과제가 갖는 약점도 보완할 계획입니다.

연구개발 계획서를 제출하는 전문가는 수행 기간 전체에 걸쳐 연구개발 로드맵과 마일스톤 목표를 구체적으로 제시해야 합니다. 연구개발 로드맵에는 중간 단계에 적용해야 하는 특정 작업 및 이의 수준을 가늠할 수 있는 성과 지표를 제공해야 합니다. 그리고, 과제 추진 일정을 준수하고 목표, 지표, 중간 및 최종 성과물을 충분히 달성할 수 있는 계획을 제시해야 합니다.

(기술 로드맵, 점검 평가 일정)

²¹⁾ 단계별 예산 규모는 공고문을 참고.

책임PM은 연구 과정의 지식화와 진화적 Risk 관리를 위해 전문가 리뷰 미팅을 계획하고 있습니다. 단계 점검을 통해 연구자가 설정한 목표가 달성되었는지 확인함으로써 다음 단계 연구과제의 진행 여부를 결정할 수 있습니다. 책임PM은 정기 리뷰 미팅에서 토론하는 실험실 데이터를 바탕으로 마일스톤 점검 보고서를 작성 및 연구진과 공유하고, 센터에 제출한 점검 보고서는 연차(단계) 보고서로 활용될 수 있습니다.

5. 제공 성과물

연구 책임자는 최소한 다음과 같은 연구 결과물을 제공해야 합니다.

- 책임PM과의 회의(현장 방문, 전문가 리뷰)에서 연구 수행의 진척 상황을 파악할 수 있는 실험 데이터 및 결과 요약 자료
- 단계 점검일 10일 전까지 제출되어야 하는 단계 완료 보고서
- 성과의 수준을 판단할 수 있는 연구 결과 산출물
- 연구 수행 과정에서 연구자의 목표 달성을 위한 노력을 설명하는 각종 자료 등

6. 기타

(협업 관련)

한계도전전략센터는 서로 다른 접근 방법으로 제안된 다수의 과제를 선정할 수 있습니다. 그리고, 모든 연구 수행자가 프로젝트의 목표 달성을 위해 협업할 것을 기대하고, 접근 방식이 다른 타 전문성에 기반한 상호 협력이 이루어지도록 운영할 것입니다. 지적 재산권 혹은 이해 상충의 문제가 없는 조건에서 투명성이 보장된 협업을 추진할 수 있습니다.