

한국형 바이오 핵심 원료(탄소원/질소원) 확보

- 비식용 탄소원 활용과 On-Site 암모니아 생산 -

LOCUS: LOcal Carbon & Nitrogen Utilization for Sustainability

문서번호	ASTRA03_2601PPR1	담당PM	조광명 책임PM
------	------------------	------	----------

세부사업명 [내역사업명]	미래개척융합과학기술개발사업[미래유망융합기술파이오니어(도전형 - 한계돌파 R&D)]				
지원정보 (과제별)	[기간] 6년(3단계: 2+2+2) [규모] 연간 6억원 내외	공모유형	☐ 지정공모 ☒ 품목공모(분야공모) ☐ 자유공모	보안과제 여부	☐ 보안 ☒ 일반
지원 과제 수	3개 내외	세부 프로그램	[Track 1]: 탄소원 [Track 2]: 질소원	연구개발기관 구성요건	[Track 1] -기업참여 필수 [Track 2] -3단계: 기업참여 필수

1. 연구주제 개요

본 과제는 전량 해외 수입에 의존하는 바이오산업의 핵심 원료인 탄소원과 질소원을 우리나라에서 직접 확보할 수 있는 기술 개발을 목표로 하며, [Track 1] 탄소원, [Track 2] 질소원 과제中 한 개 Track만 선택하여 지원 가능.

☐ 한계돌파 질문

[Track 1] 식량자원과 경쟁하지 않는 우리나라만의 탄소원을 사용할 수 있을까?
[Track 2] 친환경 암모니아를 우리나라에서 직접 생산해서 사용할 수 있을까?

☐ 문제해결 핵심 기대 수준

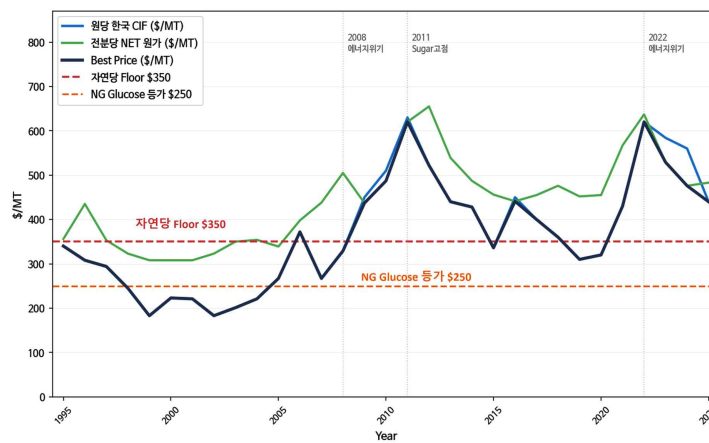
- 국내 활용 가능한 탄소원을 활용한 상업화 수준 바이오제품 생산기술 확보
 - 국내 대량 방출中인 산업용 폐가스의 실효적 활용 기술 개발
 - 경쟁력이 약화 된 국내 석유화학 기초소재의 바이오 탄소원으로 전환
 - 상업성 기반 유용 바이오제품 생산기술 완성 및 사업화 계획 제시
- 전량 수입하는 암모니아의 친환경, 모듈형, On-Site 생산기술 확보
 - 기존 Haber-Bosch 공법을 대체하는 친환경 기술 개발
 - 기존 Haber-Bosch 공법 대비 현저한 친환경성 분석 제시
 - 단위설비 10만톤/年 규모의 모듈화, On-Site 생산時 경제성 제시

2. 추진배경 및 기대효과

□ 글로벌 현황 및 한계

○ [Track 1] 탄소원

- 바이오 산업의 제1대 원료인 탄소원은 인류의 식량자원인 전분당 유래 포도당(옥수수, 타피오카 유래)과 원당(사탕수수, 사탕무 유래)인데, 기후와 경작지 등의 천연적 제한요소에 의해 특정 국가들 (미국, 중국, 브라질, 태국, 호주 등)이 독점적으로 생산, 공급하는 구조인데, 이들 국가들은 국제관계의 변화에 따라 언제라도 이러한 탄소원의 수출을 제한하는 자원 무기화 가능성이 상존하는 불안정한 공급 구조를 갖고 있음. 또한 20세기 비료 및 농업 기술의 급격한 발전으로 작물 생산성의 급속한 개선에도 불구하고, 최근 기후변화 및 기상재해 등으로 인한 글로벌 작황의 변동성 증가에 따라 가격 변동성이 매우 크게 나타나고 있으며, 인구의 급속한 증가 지속에 따라 식량자원과의 경쟁 논란도 지속되고 있음. 이러한 사유로 아래 [그림1]에서 보듯이 국제 탄소원 거래 가격은 지속적으로 상승하여 현재는 \$350/톤 이하로는 다시는 구매할 수 없는 상황으로 예상됨.



출처: ICE No.11/OM-FRED/국제원(CBOT/Purdue ag/benchmark 2025)

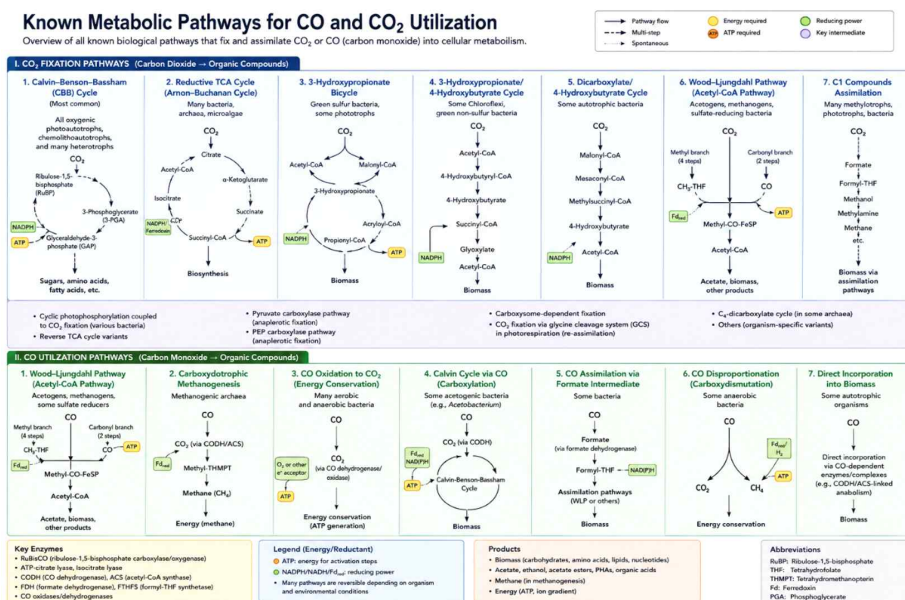
[그림 1] 지난 30년간 탄소원 (포도당, 원당) 가격 동향

이러한 탄소원의 여러 가지 이슈를 극복하기 위해 1980년대 이후 다양한 대체원료를 개발하기 위한 연구개발이 진행됐으며, 목질계 바이오매스, 해조류 바이오매스, 산업용 폐가스, 천연가스, 폐플라스틱 분해/가스화, 폐식용유 활용 등의 연구개발을 통해 일부 산업화 가능성을 보였으나, 현실은 여전히 기존의 탄소원에 절대적으로 의존하고 있음.

가스(Gaseous Sources)류를 탄소원으로 사용하는 글로벌 바이오 사업

현황을 살펴보면, 천연가스의 주원료인 메탄(CH_4)과 철강 및 석유화학의 부생 가스인 일산화탄소/이산화탄소(CO/CO_2)를 이용한 상업화 성공 사례가 있음. 미국의 Calysta社¹⁾는 메탄가스를 원료로 미생물 균체를 미국 및 중국에서 상업 생산하여 이를 사료용 및 식품용 단백질로 판매하고 있으며, 뉴질랜드의 LanzaTech社²⁾는 일산화탄소/이산화탄소(CO/CO_2)를 원료로 이용하여 바이오에너지인 에탄올을 생산하는 공장을 중국, 인도, 벨기에 등 총 6개를 건설하여 총 30만톤 규모로 상업 가동중에 있음. 이러한 상업화 성공에도 불구하고, 이들의 경우 메탄 이용성을 보유한 천연 미생물(Methylophil)이나 CO/CO_2 가스 대사경로(Wood-Ljungdahl pathway)를 가진 천연 미생물(Acetogen)에 간단한 에탄올 대사경로를 추가하는 수준에 머물러 있어, 바이오 산업의 다양한 제품을 생산하는데 적용할 수 있는 Main 탄소원으로는 아직은 매우 제한적인 성공이라 할 수 있음.

현재까지 가스(CO/CO_2)를 탄소원으로 사용하는 미생물의 대사경로는 아래 [그림 2]에서 정리한 바와 같이 광합성으로 널리 알려진 CBB pathway를 포함하여 매우 다양함. 그러나 이러한 대사경로는 반응속도, 에너지 및 환원력의 결합 및 요구조건, 부대 전자전달계 기작(Machinery)의 필요 등 그 특성이 매우 다르고 이들 가스 탄소원의 이용성을 보유한 천연 미생물의 가스 이용률 및 성장속도, 특정 물질 생산속도 등은 당류를 탄소원으로 대표적 미생물에 비해 1/10 이하로 현저히 낮은 수준임.



[그림 2] 가스(CO/CO_2)를 탄소원으로 사용하는 천연 대사경로들

1) <http://calysta.com>
2) <http://lanzatech.com>

이렇게 대표적인 가스(CO/CO₂) 탄소원을 사용하는 대사경로가 기존의 당 대사 경로 대비 낮은 효율성을 가진 이유는 아래 [표 1]의 계산에서 보여 지듯이 에너지 효율성 관점에서 단위 가스(CO/CO₂)당 매우 높은 에너지가 필요하기 때문임. 따라서 이러한 가스 탄소원 대사의 효율성을 개선하기 위한 획기적인 아이디어의 발굴이 경쟁력있는 가스 탄소원 이용 산업용 미 생물 개발의 핵심 기술이 될 것으로 생각됨.

[표 1] 주요 가스(CO/CO₂) 탄소원 대사경로의 에너지 효율성

Pathways	CO ₂	H ₂ CO ₃	"[H ₂]"	"~P"	Total "[H ₂]"
CBB	6	0	12	14	19
3HP/glyoxylate	0	6	12	14	19
3HP/4HB	2	4	12	12	18
reductive TCA	6	0	12	4	14
Wood-Ljungdahl	6	0	12	2	13

1 CO₂ 고정화시 필요한 환원력 "[H₂]" and ATP "~P"

"[H₂]" : NAD(P)H, Flavin-H₂, or 2X Ferredoxins(reduced).

Total "[H₂]" = "[H₂]" + "~P"/2 (P/O ratio = 2 가정 기준)

최근 기존의 탄소원과는 완전히 새로운 화합물을 합성하여 미생물의 탄소 원으로 사용하고자 하는 연구³⁾가 진행중에 있음. 일본의 Osaka대학이 주 도하는 본 연구는 원시지구 대기환경에서 유기물이 합성되는 반응인 "Formose Reaction"을 응용하여, 현재 미생물이 활용하는 탄소원과는 전혀 다른 형태의 당류(C₄~C₇)를 화학적으로 합성한 후, 비생물학적으로 생성 된 당(Abiotic sugar)을 대사할 수 있는 미생물을 스크리닝하는 연구를 진 행함. Formose Reaction 기반의 본 연구는 아직은 정량적으로는 초보적 수준이지만, 바이오 산업의 대표적 미생물(*Corynebacterium*)도 신규 탄소 원 활용성 가능성이 있다는 점에서 향후 주목할 필요가 있음.

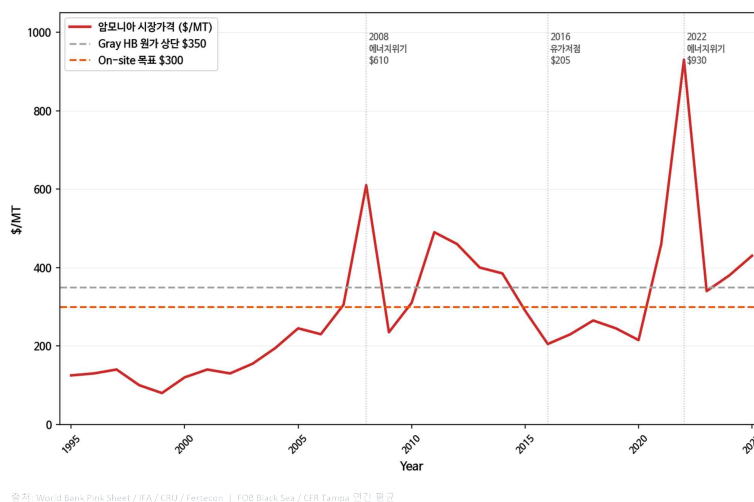
마지막으로 아직은 미지의 영역이지만, 우리 인류가 이미 보유한 다른 산 업의 탄소원을 바이오 산업의 탄소원으로 경쟁력 있게 전환할 수 있다면, 앞서 기술한 바이오 산업이 직면하고 있는 탄소원의 다양한 이슈들을 해결 할 수 있는 혁신적 기술이 되리라 생각됨.

3) Chem.Sci. 14:13475-13484(2023), Sci.Reports 16:734 (2026)

○ [Track 2] 질소원

- 바이오 산업의 제2대 원료인 암모니아는 1908년 개발되어 1913년 상업화된 Haber-Bosch(HB) 공정이 전세계 표준 생산공정이며, 이를 통해 현재 약 2억톤/년 규모의 세계 2대 기초 화학제품임. 이 기술을 통해 생산된 암모니아가 질소비료로 전환되어 근대 농업생산성의 비약적 발전을 통한 인류 기아문제 해결 공로가 인정되어 그 동안 세 차례에 걸쳐 노벨상을 수상한 바 있음. 하지만, 이 HB 공정은 고온(400~500℃), 고압(200~300bar) 조건으로 인해 오늘날 전 세계 에너지 소비량 및 이산화탄소 배출량의 1~2%를 차지하여 심각한 환경문제를 야기하고 있어, 관련 산업계에서도 그린 암모니아로 전환하고자 하는 노력이 진행중에 있음.

우리나라는 과거 울산석유화학 단지(舊삼정밀화학)에서 17.5만톤/년 규모의 HB 공정을 가동한 바 있으나, 백만톤 이상의 규모와 원료 경쟁력을 보유한 다른 나라에 밀려 2011년 가동을 중단하였고, 현재는 국내 시장 130만톤 (CAGR=4.3%)을 전량 수입하는 취약한 구조임. 실제 대규모 발효설비에 기반한 그린 바이오산업의 대표적인 국내 업체들(CJ, 대상)이 해외 공장에서 사용하는 암모니아를 포함하면 150만톤 이상이 국내 기업이 수입 사용하고 있는 것으로 파악됨.



[그림 3] 지난 30년간 질소원 (암모니아) 가격 동향

암모니아의 가격동향을 살펴보면, 현재 HB공정 기반의 Gray 암모니아의 평균 도착도 가격은 \$\$400~500/톤 수준이나 위 그림2에서 보듯이, 지정학적 리스크에 매우 크게 노출되어 있어 \$1000/톤 이상으로 폭등하는 경우도 빈발하고 있는 등 그 변동폭이 매우 큼. 특히, 암모니아 특성상 보관

탱크 설비가 적어, 재고량을 많이 가져갈 수 없어 대외 변수 (전쟁, 생산이슈, 원료가격 변동, 선물시세 조작 등)에 의한 가격 탄력성이 매우 큼.

최근 전 세계적으로 친환경 암모니아 생산에 대한 관심이 매우 높는데, 먼저 기존의 HB공정의 운전조건을 개선하여 친환경성을 강화하는 열화학 공법과 재생에너지를 통해 생산한 수소를 활용하는 그린 암모니아, 그리고 전기화학 등 완전히 새로운 친환경 공법을 통한 암모니아 생산 등의 기술 개발이 경쟁적으로 진행중에 있음. 그린 암모니아의 경우 \$600~700/톤 규모에서 수요가 충분하여 각국의 관심이 매우 높는데, 중국의 경우 내몽고 풍력발전 기반이 상당한 경쟁력을 보유한 것으로 보이며, 그 밖에도 중동 국가(사우디아라비아 네옴프로젝트中 10조원 투자, 암모니아 100만톤 생산계획), 인도, 호주, 미국, 유럽, 한국, 일본 등에서도 그린 암모니아 기술개발이 활발히 진행 중임.

현재 표준공법인 HB 기술을 극복하고자 하는 신기술 동향을 살펴보면 다음과 같음. 첫째 열화학적 접근 (Modified HB 공법)인데, 저온 저압의 고활성 촉매를 통한 저속 반응공법과 질화물 매개의 질화, 수소화 단계 분리형 공법으로 크게 나뉘는데, 저속 저압 공법의 경우 대부분 귀금속 촉매 (Ru)을 촉매로 사용하고 있고, 질화물 루핑 공법은 비귀금속(Li, Ca, Mn) 등이 가능하나, 반복 사이클시 응집발생과 단계별 열관리 공정이 병목공정임. 두 번째는 Li을 이용한 전기화학적 접근인데, 실험실 수준의 소형 시스템에서는 90% 이상의 Faraday Efficiency나 1 A/cm^2 전류밀도 등을 달성했다고 보고한 바 있으나, 시스템 전체의 규모나 성능, 속도와 성능의 동시 달성 등 상업화를 위한 핵심 지표에는 아직 큰 괴리가 있는 상황임. 특히, 전기화학적 접근법의 경우 질소의 전해액내 용해도와 Li이온의 전기화학적 재생 등에 여전히 많은 에너지 비용이 예상되어 대규모 상용화 수준($10^{-6} \text{ mol/cm, sec}$)을 위해서는 기술적 혁신이 필요한 상황임. 세 번째는 플라즈마 방식인데, 이는 상온, 상압에서 질소를 고에너지 전자가 해리시켜 질소 산화물 형태의 활성화 물질을 생성한 후 이를 촉매 표면에서 고선택도 (>95%)로 암모니아로 전환시키는 기술임. 하지만 플라즈마 반응과 재순환에 사용하는 에너지가 과도하여 (총 $197 \text{ GJ/톤}_{\text{NH}_3}$)와 에너지 최적화가 필요한 상황임. 네 번째는 국내 기술진이 개발한 기계화학적 접근인데, 이는 촉매와 기계적 충돌에너지에 의한 암모니아 전환으로 비귀금속 촉매, 상온 상압에 근접한 친환경조건에서 장기간 고효율의 암모니아 생산이 가능한 것으로 보임. 하지만, 2단계 공정의 개선과 연속공정, 기계적 에너지

사용량 및 촉매 마모 등을 종합적으로 고려한 시스템 경제성에 대한 체계적 분석 및 개선이 필요함. 마지막으로 광화학 및 생물학적 공법은 현재 보고된 수준이 실용화 가능성과는 큰 격차를 보이고 있어, 높은 에너지 효율성 가능성에도 불구하고 단기적으로 상용화 수준으로 발전시키기에는 상당한 기술적 진보가 필요한 상황임.

현재까지 살펴 본 HB공법을 대체하고자 하는 신기술 개발 동향을 살펴보면 아래 그림3에 정리한 것과 같은데, 첫 번째로는 열화학 기반의 공법인데 저온 저압공정은 귀금속 의존도 극복 및 저온시 반응속도 저하 문제 극복이 필요하며, 질화물 루핑기반 열화학 공법은 여전히 높은 반응 온도와 반복사이클 열관리 이슈, 두 번째 Li 기반의 전기화학적 기술은 상온, 저압 조건이지만, 시스템 차원의 획기적 성능개선, 셀전압, 수명저하, 스택화 문제의 극복이 필요함. 세 번째로는 플라즈마 촉매기술은 에너지 과사용 문제, 네 번째 기계화학 기술은 저온, 저압 가능하나 에너지 계상 및 연속공정 문제 해결, 마지막으로 광촉매 및 생물학적 공정은 생산성의 획기적 개선 등 실용성 문제가 여전히 해결되어야 도전적인 과제로 판단됨.

경로	원리	작동 조건	핵심 병목
열화학 (저온 촉매)	전자 공여 고활성 촉매로 저온저압 합성	200~400 °C · 저압	귀금속(Ru) 의존 · 저온에서 속도 저하
열화학 (질화물 루핑)	질화/수소화 두 단계를 분리해 각각 최적화	300~500 °C · 저압	반복 사이클 열화 · 열관리
전기화학 (Li 매개)	Li 도금-질화를 거쳐 N ₂ 를 전기화학적으로 환원	상온 · 1~20 bar	셀 전압 · 수명 · 스택화
플라즈마 촉매	비평형 플라즈마로 N ₂ 를 활성화 후 촉매 반응	상온 · 상압	에너지 최적화
기계화학	볼밀의 기계적 활성화로 N ₂ 삼중결합을 해리	45 °C · 1~9 bar	에너지 계상 기준 · 연속공정화
광촉매 · 생물학적	광에너지 또는 nitrogenase 효소로 질소 고정	상온 · 상압	생산성이 실용 수준에 크게 미달

[그림 3] HB공정 대체 분산모듈형 대안기술 개발현황⁴⁾

이러한 상황에서 분산모듈형 On-Site 생산기술에 적합하면서, 상업적 실현가능성을 염두에 둘 때, 상온/저온, 상압/저압 기반으로 우리나라 상황에서 자원안보, 수급 안정성, 친환경성 및 확장성, 수소 확보 등과 연계된 가장 적합한 공정에 대해 신속히 완성도(TRL)을 높여 상업화 준비로 진행하는 것이 시급히 요구되는 과제로 판단됨.

4) Nature 583:391-395(2020), Science 379: 707(2023), Nat. Nanotechnol. 16:325(2021) (UNIST modified)

□ 기획 의도

○ [Track 1] 탄소원

- 특정국가 독점성 및 자원무기화, 기후변화에 의한 변동성, 식량자원과의 경쟁 이슈등 탄소원의 글로벌 수급은 우리나라 바이오 산업의 가장 큰 잠재적인 리스크中 하나이며, 국내 기업들이 국내 투자를 하지 못하는 가장 큰 이유이기도 하여 이에 대한 근본적인 대책이 필요한 상황임. 본 과제에서는 우리나라가 이미 가지고 있는 탄소원으로부터 바이오 산업의 원료를 확보해 보자는 의도로 기획을 추진하고자 함.

[표 1] 우리나라의 온실가스(CO/CO₂) 배출량

부문	발생량 (억톤)	발생원
발전	2.5	석탄, LNG
산업	2.5	철강, 석화 등
운송	1.0	휘발유, 경유
기타	0.7	난방, 농축산, 기타

우리나라는 [표 1]에서 보듯이 현재 연간 약 6.7억톤 정도의 온실가스를 배출하고 있는데, 이중에서 산업용 폐가스의 경우 철강 및 석유화학 공장을 통해 집약적 배출이 발생하고 있어서 이를 활용하는 것이 가장 직접적 효과를 볼 수 있다고 판단됨. 예를 들어 철강산업의 경우 포스코, 현대제철 두 업체의 연간 온실가스 배출량이 1.1억톤 규모로 이를 효율적으로 활용하기 위한 연구개발에 대해 집중할 필요가 있음. 최근, 선진 외국업체들은 해외에서의 성공사례를 활용하여 국내업체들에 높은 로열티를 요구하면서 사업협력을 제안하고 있어 자체기술 개발을 통한 기술독립이 시급한 상황임.

두 번째로 우리나라가 가지고 있는 중요한 탄소 자원은 석유화학 산업의 기초소재임. 아래 [표 2]에서 정리한 바와 같이, 우리나라는 세계 3위의 석유화학 산업을 보유한 전통적인 석유화학 강국이나, 최근 중동의 천연가스 기반 석유화학산업 자체 투자 육성과 중국의 석탄기반 석유화학 산업육성 등에 밀려 경쟁력을 상실해 가고 있으며 이에 따라 NCC 등 석유화학 3사의 생산설비 합리화 및 생산량 구조조정이 국가 경제 및 고용시장에 심각한 우려를 끼치며 진행되고 있는 상황임.

[표 2] 우리나라의 석유화학 기초소재 생산량

기초소재	생산량 (만톤)	주요 용도
에틸렌	1100	PE, EO/EG, VCM (세계4위)
프로필렌	910	PP, AN, PO, Acrylic Acid
부타디엔	140	BR, SBR, ABS
BTX	1190	SM, TDI, PTA etc.

비록 현재까지는 석유화학계 탄소원과 바이오 산업의 탄소원이 그 구조나 기능면에서 상호 괴리되어 성장해 왔으나, 새로운 기술을 통해 이들의 연결고리를 확보할 수 있다면, 우리나라의 강점을 활용할 수 있는 우수한 한국형 바이오 탄소원의 탄생도 기대해 볼 수 있음.

○ [Track 2] 질소원

- 전 세계 연간 2억톤(세계 2대 화학제품) 생산되는 기초 화학소재인 암모니아는 전통적인 비료, 화학 산업뿐만 아니라 반도체, 바이오, 의약품 등 첨단 산업에도 다양하게 사용이 확대되고, 최근에는 선박 및 발전용 무탄소 에너지원, 그린 암모니아, 그린 수소 생산 등으로 확대되어 2050년에는 10억톤⁵⁾ 수준으로 전 세계 생산량이 증가할 것으로 예측되고 있음.

최근 우리나라도 10차 전력수급 계획에 따른 암모니아 혼소 발전, 선박 및 발전용 무탄소 연료원 확대, 그린 암모니아 확대, 그린 수소(7대 SEED, 한계돌파형 재생에너지/수전해 시스템 국산화) 확대 및 2050년 국가 탄소중립 목표 달성을 위해 노력중이며, 이 경우 암모니아 수입 및 필요 공급량은 현재 130만톤 수준에서 최대 900만톤까지 확대될 것으로 예상됨.

이러한 상황에서 암모니아를 전량 해외 수입에 의존하는 취약한 공급구조를 갖고 있는 우리나라는 지정학적 공급 리스크(이란전쟁, 우크라이나 전쟁 등)에 따른 비료가격 폭등, 요소수 사태 재발 및 연관 산업 파급효과 등을 고려할 때 기초 화학소재인 암모니아는 갈수록 자원이 무기화되는 국제사회에서 미래 에너지/자원 안보의 든든한 방어막이 될 수 있기에 국내 투자 및 생산이 가능한 친환경 소형 모듈형, On-Site 생산 기술의 개발이 시급한 과제임.

5) IFA (International Fertilizer Association): Industrial Efficiency Technology Database, 2020.

□ 기대효과

○ [Track 1] 탄소원

(사회경제적 효과)

- 국내 방출 산업용 온실가스(2.5억톤)의 활용을 통한 국가 탄소중립 목표 기여
- 국내 석유화학 기초소재의 바이오 탄소원 전환時 석유화학 가치 제고
- 전량 해외수입에 의존하는 바이오 산업의 새로운 한국형 탄소원 확보
- 국내 자체적 탄소원을 활용한 국내 바이오 산업의 직접 투자 기회 확대
(국내 투자 확대를 통한 바이오 신사업 창출 및 고용 확대 효과)
- 기존 선진사 기술에 의존한 고액 로열티 지불 구조의 신사업 추진 방지

(수혜자)

- 국내 그린 바이오 사업자(CJ, 대상 등) 및 잠재 사업자(GS, POSCO 등)
- 다량의 온실가스 방출 업체(철강社, 석유화학社 등): 온실가스 배출 저감
- 석유화학 업체: 기초소재의 새로운 활로 개척

○ [Track 2] 질소원

(사회경제적 효과)

- 향후 2050년 500조(10억톤) 규모로 시장 확대時 신성장 동력 기술
(선박, 발전용 무탄소 에너지원, 그린 암모니아, 그린 수소로 확대)
- 암모니아 생산기지 국내 건설을 통한 신사업 창출 및 고용확대 효과
- 연관 산업(운송, 저장 및 다운스트림 산업) 동반 성장 효과
- 기존 용도(비료, 화학, 바이오 질소원 등)와 신규 용도의 친환경성 강화
- 소형 모듈화 및 On-Site 생산 가능時 암모니아 수요업체 투자 확대
(암모니아 수요업체(ex, 바이오 등)의 국내투자 활성화 및 Re-Shoring 투자)
- 국내 생산을 통한 국가 에너지 및 자원 안보 확보

(수혜자)

- 국내 암모니아 사업자(롯데정밀화학, 남해화학 등) 및 잠재 사업자
- 국내 다수의 암모니아 수요 업체들: 공급 및 가격 안정성 확보
- 국내외 암모니아 원료 사용업체들: 직접 투자 통한 경쟁력 제고

3. 과제 목표 및 범위

□ 최종 목표

- 본 프로젝트는 “목표달성의 불확실성은 높으나 과제 수행결과에 파급효과가 상당히 큰 연구개발”을 대상으로 하는 「한계도전R&D」*로서, 글로벌 기술·시장 우위 수준의 도전적 목표를 지향함.

* (관련규정) 한계도전 R&D 운영규정(과학기술정보통신부훈령 제268호, '24. 5. 17.)

○ [Track 1] 탄소원: 국내 탄소원 활용 상업화 수준의 바이오 기술 개발

- 산업용 폐가스 활용;
가스 이용률 >90%, Target 제품 생산성 >2 g/L,hr
- 석유화학 기초소재 활용;
탄소원 전환율⁶⁾ >90%, 신규 탄소원 기존 Target 원가 <\$350/톤,
미생물 이용성 100%, Target 제품 생산성 >2 g/L,hr
- Pilot Test (>1 톤/월 규모) 완료
- 경제성 분석 (상업화 수준 입증)

○ [Track 2] 질소원: 국내 생산이 가능한 암모니아 생산기술 개발

- 친환경 조건(온도 <50℃, 압력 <10bar)下
질소 전환율⁷⁾ >90%, 최종 암모니아 농도 >90%,
생산성 >100 Kg/m³,hr, 에너지 효율성 < 30 GJ/톤_{NH3}
- Pilot Test (>1 톤/월 규모) 완료
- 경제성⁸⁾ 분석 제시 (상업화 수준 입증)

○ (단계별 목표설정 방향)

- 총 연구기간 6년中 2년씩 총 3단계로 나누어 목표 설정 및 제시하되, 1~2 단계는 요소기술의 한계도전적 목표달성에 중심을 두고 목표를 설정하고, 최종 3단계 목표는 Pilot Test 및 상업화 가능성에 대한 분석 중심으로 설정

6) Molar Conversion 기준

7) Molar Conversion 기준

8) 예상 CAPEX/OPEX, LCA 분석 및 예상 제조원가 산정시 기준(수소가격 \$2/Kg, 탄소세(\$50/톤) 환급 반영)

▷ 1단계 목표: Lab 반응기 기준 (1~10L Scale)

○ [Track 1] 탄소원

- 산업용 폐가스 활용;
가스 이용률 >50%, Target 제품 생산성 >1 g/L,hr
- 석유화학 기초소재 활용;
탄소원 전환율 >50%, 미생물 이용성 대사 구축
신규 탄소원을 이용한 Target 제품 생산성 >1 g/L,hr

○ [Track 2] 질소원

- 친환경 조건(온도 <50℃, 압력 <10bar)下
질소 전환율 >70%, 최종 암모니아 농도 >70%

▷ 2단계 목표: Lab 반응기 기준 (1~10L Scale)

○ [Track 1] 탄소원:

- 산업용 폐가스 활용;
가스 이용률 >90%, Target 제품 생산성 >2 g/L,hr
- 석유화학 기초소재 활용;
탄소원 전환율 >90%, 신규 탄소원 원가 <\$350/톤,
미생물 이용성 100%, Target 제품 생산성 >2 g/L,hr

○ [Track 2] 질소원:

- 친환경 조건(온도 <50℃, 압력 <10bar)下
질소 전환율 >90%, 최종 암모니아 농도 >90%
생산성 >100 Kg/m³,hr, 에너지 효율성 < 30 GJ/톤_{NH₃}

▷ 3단계 목표: Pilot 기준 (100L 이상 Scale)

○ 공통 (탄소원/질소원);

- Pilot Test (>1 톤/월 규모) 완료 및 최종목표 달성
- 종합 경제성 분석 (상업화 수준 입증)

※ 단계/연차별/분기별 확정 세부 마일스톤은 과제 선정 후, 책임PM과의 협의로 확정

□ 연구개발계획서 필수 포함 사항

○ [Track 1] 탄소원

- 탄소원으로 사용할 산업용 폐가스 선정 (조성비, 연간 발생량, etc.)
or 탄소원으로 사용할 석유화학 기초소재 및 이의 전환 물질 선정
- 타겟 유용 바이오제품 선정 (상업화 가능성 및 시장성)
- 경쟁력있는 산업용 폐가스 활용 대사경로 구축 전략
or 석유화학 기초소재 유래 탄소원의 미생물 이용성 확보 전략
- 타겟 물질 생산을 위한 반응 시스템 설계 및 공정 최적화 연구 전략
- Pilot Test 상세 계획 (설비(신규 구축/기존 설비) 활용 방안)
- 국내외 경쟁 연구그룹이나 선진사 대비 경쟁력 비교 데이터 제시
- 최종 및 단계별 정량적 목표설정 및 경제성 분석 제시

○ [Track 2] 질소원

- 친환경 상온 상압 조건(허용 최대치: 온도 <50℃, 압력 <10bar)下 암모니아 생산기술 상세 개발 전략
- 비귀금속 촉매의 안정성 확보 방안 or 시스템 장기 안정성 확보 방안
- PFD⁹⁾ 수준의 전체 공정 설계 및 이를 이용한 Pilot Test 계획
- 최종 및 단계별 정량적 목표 제시
- 기존 Haber-Bosch 공법과 LCA(에너지소모량, 이산화탄소 발생량) 비교 분석
- 국내외 경쟁 연구그룹이나 선진사 대비 경쟁력 비교 데이터 제시
- 소형 모듈형, On-Site 암모니아 생산時 경제성 분석(CAPEX/OPEX)¹⁰⁾

9) PFD: Process Flow Diagram

10) 단위 모듈(Capa): 10만톤/년 내외

□ 최종 기대 성과물

○ [Track 1] 탄소원

- 산업용 폐가스 or 석유화학 기초소재 유래 신규 탄소원 이용 대사경로가 최적화된 유용 바이오 제품 생산용 미생물 균주 (핵심 IP 확보)
- Target 탄소원을 활용한 Lab, Pilot Test 상세 정량적 결과
- 최적화 연구를 통한 최종 공정 설계도 (PFD with 단위공정 운전조건)
- 경제성 분석 자료 및 사업화 추진 계획서

○ [Track 2] 질소원

- 친환경 조건(온도 <50℃, 압력 <10bar)下 암모니아 생산기술 (핵심 IP 확보)
- 개발 기술을 이용한 Lab, Pilot Test 상세 정량적 결과
- 최적화 연구를 통한 최종 공정 설계도 (PFD with 단위공정 운전조건)
- Haber-Bosch와 비교 LCA 데이터 및 최종 경제성 분석 자료

□ 지원 제외 범위

○ [Track 1] 탄소원

- 공지의 가스 대사경로를 가진 미생물의 단순 이용 전제 연구
- 석유화학 기초소재를 탄소원으로 직접 이용하는 연구

○ [Track 2] 질소원

- 고온(>50℃), 고압(>10bar), 귀금속 촉매 사용 연구

○ 공통

- 연구 목표 및 마일스톤에 성능지표가 정량적으로 제시되지 않는 연구
- 선행기술 유사 연구 및 변형/확장 수준의 연구(핵심 IP 확보 불가한 연구)
- 산출 기술을 활용한 사업화 전략이 구체적으로 제시되지 않는 연구

4. 연구개발 수행 및 관리 방안

□ 연구개발 지원 규모 및 수행 기간

- 선정 예상 과제 수 : [Track 1] 2개 내외, [Track 2] 1개 내외 (총 3개 내외)
- 예산 규모 : 총 18 억원 ([Track 1] 12 억원, [Track 2] 6 억원 내외)
※ 과제별 규모: [Track 1] 6 억원 내외, [Track 2] 6 억원 내외
- 연구 기간 : 최대 72개월 이내
- 연구 진행 단계 : 최대 3단계 (각 단계 24개월)
- 연구개발기관 구성 : 기업이 주관연구개발기관으로 지원하는 경우, 대학 또는 정부출연연구기관이 공동 또는 위탁연구개발기관으로 참여 필수
- 책임PM과 한계도전전략센터는 최종목표 달성을 위해 연구성과 및 기술적 리스크를 지속 점검, 그 결과에 따라 과제 범위와 목표 등을 조정할 수 있음

□ 마일스톤 기반 연구관리 및 단계(Go/No-Go) 점검

- 연구 제안자께서는 각 단계 목표 달성을 위한 각 단계 내 복수의 마일스톤*을 구체적으로 제시 요망
*마일스톤 : 연구개발 목표달성 과정의 구체적 산출물(Deliverable: 시작품, 시험성적서, 설계도, 데이터셋, 검증보고서 등)로서, 연구내용이나 수행행위가 아닌 ‘확인가능한 산출물과 그 달성 수준’을 기준으로 설정
(예시1) ...공정개발(x) → 공정도·물질수지·운전조건이 명기된 공정도(○)
(예시2) ...균주개발(x) → ...균주특허/기탁번호/테스트 성적서(○)
- 본 한계도전 R&D에서는 책임PM이 연구진행 현황 및 잠재리스크 파악을 위해 최소 분기별 1회 점검회의를 진행하며, 그 결과에 따라 과제의 범위와 목표 및 마일스톤 등을 조정할 수 있음.
- 책임PM 주관하에 단계평가를 실시하며, 주요 마일스톤 및 최종목표 달성 가능성을 확인하여, 다음 단계 진행 여부(Go/No-Go)를 결정함.

□ 연구관리 산출물 제출

- 연구책임자께서는 연구 수행기간 동안 다음과 같은 연구 결과물을 제공하셔야 하며, 책임PM의 요청에 따라 추가 자료 및 데이터를 제공하셔야 함
 - 분기별 책임PM과의 점검회의 보고자료 및 발표자료
 - 단계평가를 위한 단계보고서 및 차단계 상세계획

- 성과를 입증할 객관적 연구결과 산출물 및 목표 달성 노력 입증 자료 등