

# 국내 청정수소 온실가스 산정 체계 개발을 위한 전과정평가 기반 설계 인자 연구

정인홍\* · 김선빈\* · 노형주\*\* · 이재영\*\* · 황용우\*\*\*†

\*인하대학교 순환경제환경시스템전공 석사과정, \*\*인하대학교 순환경제환경시스템전공 박사과정, \*\*\*인하대학교 환경공학과 교수

## Design factors for a domestic LCA-based framework for greenhouse gas quantification of clean hydrogen

Jung, In Hong\* · Kim, Sun Bin\* · Roh, Hyung Joo\*\* · Lee, Jaeyoung\*\* and Hwang, Yong Woo\*\*\*†

\*Master's Student, Program in Circular Economy Environmental System, Inha University, Incheon, Korea

\*\*Ph.D. Student, Program in Circular Economy Environmental System, Inha University, Incheon, Korea

\*\*\*Professor, Dept. of Environmental Engineering, Inha University, Incheon, Korea

### ABSTRACT

Korea has introduced one of the world's first legally mandated Clean Hydrogen Certification Schemes as part of its national strategy to achieve carbon neutrality by 2050. However, certification outcomes are highly sensitive to methodological choices, making assurance of credibility and fairness a critical challenge. To strengthen robustness, this study compared international life cycle assessment (LCA) guidelines and standards to identify elements applicable for institutional adoption. Thirteen policy-oriented hydrogen LCA studies were reviewed to derive design factors for improving Korea's scheme. Five core factors of functional units, system boundaries, co-product definition, allocation procedures, and data quality were identified, along with three additional factors of cut-off criteria, GWP (Global Warming Potential), and electricity procurement rules. Analysis of international guidelines revealed uncertainties and barriers to comparability in the Korean scheme. Suggested improvements include specifying pressure conditions in functional unit definitions, predefining co-product lists, stipulating allocation methods differentiated by co-product categories, and establishing data quality criteria for items lacking default values. The additional factors also require refinement. For cut-off rules, clear thresholds and application criteria should be codified. Regarding electricity procurement, ensuring low-carbon integrity requires more granular reporting intervals and explicit rules for calculating emissions from power supplied through energy storage systems. In conclusion, while Korea's Clean Hydrogen Certification Scheme provides a pioneering framework, refinements are essential to ensure consistency, reproducibility, and international alignment. By systematically identifying uncertainties and proposing improvements, this study contributes to enhancing the credibility and fairness of institutional LCAs for clean hydrogen certification.

*Key words : Climate Change, Clean Hydrogen, Life Cycle Assessment (LCA), Functional Unit, System Boundary*

### 1. 서론

한국은 파리협정 이행과 기후변화 대응을 위해 2030 국가온실가스감축목표(Nationally Determined Contribution, NDC)와 2050 탄소중립 달성을 국가 비전으로 설정하였다

(MOFA and MOE, 2021). 이를 달성하기 위해 수소를 에너지 안보와 온실가스 감축의 핵심 전략 기술로 육성하고 있으며, 국내 수소 사용량을 2021년 약 22만 톤에서 2030년 390만 톤 수준으로 확대할 계획이다(MOTIE, 2021). 정부는 청정수소 생산기지 구축, 공급망 확충, 혼소 발전

†Corresponding author : [hwangyw@inha.ac.kr](mailto:hwangyw@inha.ac.kr) (100, Inha-ro, Michuhol-gu, Incheon, 22212, Korea. Tel. +82-32-860-8765)

ORCID 정인홍 0009-0001-4979-1208  
김선빈 0009-0001-8179-8485  
노형주 0009-0005-4164-5934

이재영 0009-0003-0865-0972  
황용우 0000-0001-9844-7596

확대, 수소 모빌리티 보급 등 수소경제 전반을 포괄하는 정책을 추진하고 있으며, 그 일환으로 2023년 「수소경제법」을 개정하여 청정수소 인증제를 도입·법제화하였다.

청정수소 인증을 취득한 사업자는 정부 보조금, 전력 분야의 장기 구매계약, 수소발전 의무화제도(Hydrogen Energy Portfolio Standard, HPS) 참여 자격 등 다양한 제도적 인센티브를 제공받는다(KEEI, 2021). 이러한 인센티브 구조는 시장 수요 창출과 기술 확산을 촉진하는 동시에, 수소 산업의 기술 및 시장 구조를 재편하는 강력한 경제적 메커니즘으로 작용한다. 특히 인증 등급이 곧 수익성과 직결되는 환경이 조성되면서, 제도의 설계와 운영에서 평가 결과의 신뢰성과 형평성 확보가 핵심 과제로 부각되고 있다.

이에 본 연구는 청정수소 온실가스 산정 체계의 개발에 필요한 설계 인자를 도출하고, 이를 국제적으로 제시된 수소 전과정평가(Life Cycle Assessment, LCA) 지침과 비교·분석하는 것을 목적으로 한다. 이를 통해 산정 체계의 일관성, 재현성, 비교가능성을 높이고자 한다.

## 2. 연구방법

본 연구는 제도 설계에 참고할 주요 인자를 도출한 후, 이를 기반으로 해외 수소 전과정평가(Life Cycle Assessment, LCA) 지침과 표준을 비교·분석하여 국내 청정수소인증제의 보완점을 도출하였다.

첫째, 정책목적 LCA 활용 사례 및 기존 불확실성 분석 연구 13편을 검토하여 설계 인자를 도출하고, 중요도에 따라 핵심 설계 인자와 부가적 설계 인자로 구분하였다.

둘째, 국제적으로 활용되는 ISO/TS 19870 (Hydrogen technologies — Methodology for determining the greenhouse gas emissions associated with the production, conditioning and transport of hydrogen to consumption gate), FCH-LCA 가이드라인(D2.2 Definition of FCH-LCA guidelines), 영국의 저탄소 수소 표준(UK Low Carbon Hydrogen Standard, 이하 UK LCHS), 45VH2-GREET를 활용한 수소 생산 경로의 Well-to-Gate 온실가스 배출량 산정 지침(Guidelines to Determine Well-to-Gate Greenhouse Gas (GHG) Emissions of Hydrogen Production Pathways using 45VH2-GREET (Rev. June 2025), 이하 45VH2-GREET 지침) 등 네 가지 수소 관련 지침 및 표준을 선정하였다.

ISO/TS 19870은 ‘Technical Specification (기술규격)’으

로서 2023년에 발간되었으며, 현재 이를 대체하기 위한 국제표준(ISO 19870 시리즈) 제정 작업이 진행 중이다. 해당 표준은 총 4개 문서(ISO/DIS 19870-1, ISO/CD 19870-2, ISO/CD 19870-3, ISO/CD 19870-4)로 분리·대체될 예정이며, 이 중 ISO/DIS 19870-1은 2025년판 Draft International Standard (DIS)로 발간되어 현재 ISO 회원국 투표 단계(enquiry phase)에 있다. 본 연구에서는 2025년 9월 기준 ISO 공식 홈페이지에서 열람 가능한 ISO/DIS 19870-1을 검토 대상으로 삼았다. ISO/DIS 19870-1은 수소 생산과 관련된 온실가스 배출을 다루고 있으며, 정식 명칭은 ‘Hydrogen technologies — Methodology for determining the greenhouse gas emissions associated with the hydrogen supply chain — Part 1: Emissions associated with the production of hydrogen to production gate’이다.

이들 지침과 현재까지 공개된 국내 「청정수소인증제 업무규정(2025.04)」을 앞서 도출한 설계 인자 항목별로 비교·분석하고, 각 제도에서 강조하는 평가 항목과 특징을 검토하였다.

Table 1은 이들 국제 지침과 국내 인증제 간의 주요 특성을 비교한 결과를 요약한 것이다. 이를 바탕으로 국내 제도 설계 및 운영 과정에서 도입 가능하거나 보완이 필요한 요소를 개선 방안으로 제시하였다.

먼저, ISO/DIS 19870-1은 ISO 14044 및 ISO 14067에 근거하여 수소 제품의 탄소발자국(CFP, Carbon Footprint of Product) 또는 부분 CFP를 산정하기 위한 방법론을 제시한다.

FCH-LCA 가이드라인(SH2E Consortium, 2022)은 수소와 연료전지 시스템의 전과정평가(LCA)를 경제성 평가(LCC)와 사회적 LCA(SLCA)로 확장하였다. 이를 통해 통합적 지속가능성 평가(LCSA) 프레임워크를 구축한 것이 특징이다. 이 가이드라인은 과거 FC-Hy Guide (2011, FCH-JU)에서 제시된 초기 LCA 방법론을 기반으로 발전한 것으로, 환경적 측면뿐 아니라 경제·사회적 요소를 포괄한다는 점에서 의의가 크다.

또한, 45VH2-GREET 지침(Argonne National Laboratory, 2025)은 미국 정부 지원으로 개발된 45VH2-GREET 모델의 방법론을 설명하며, 특히 내국세법 45V에 근거한 청정수소 세액공제 적용을 위한 Well-to-Gate 배출량 산정 기준을 제공한다.

마지막으로, 영국의 저탄소 수소 표준(UK LCHS)은 수소 생산 과정의 온실가스 배출 산정과 준수 조건을 정의

Table 1. Comparison of international and domestic Life Cycle Assessment (LCA) guidelines in the hydrogen sector

Item	International and foreign guidelines				Korea guideline
	ISO/DIS 19870-1	FCH-LCA guideline	UK LCHS	45VH2-GREET guideline	
Year	2023	2022	2023	2025	2025
Issuing Body	International Organization for Standardization (ISO)	SH2E Project Consortium (Clean Hydrogen Partnership, IMDEA Energy, etc.)	DESNZ (Department for Energy Security and Net Zero)	Argonne National Laboratory (Under U.S. Department of Energy)	Korea Testing & Research Institute, KTR
Purpose	Calculation of carbon footprint in hydrogen sector	Ensures consistent LCA for fair comparison of fuel cells and hydrogen.	Defines low-carbon hydrogen and GHG standards for certification.	Sets the Well-to-Gate GHG method for hydrogen under 45V, based on Argonne's GREET model.	To certify hydrogen as clean for support when its emissions are below a defined threshold.
Functional Unit	1 kg of hydrogen	1 kg or 1 MJ of hydrogen	1 MJ of hydrogen	1 kg of hydrogen	1 kg of hydrogen
System Boundary	Raw material extraction-to-production gate' (excluding capital goods)	Cradle-to-gate or Cradle-to-Grave	Well-to-Gate (excluding capital goods)	Well-to-Gate (excluding capital goods)	Well-to-Gate (excluding capital goods)
Definition of Co-products	Presentation of co-products by technology	Distinction between the definition of Co-product and By-product	Presentation of co-products by technology	Presentation of co-products by technology	Economically valuable secondary output
Co-product Allocation Procedure	(1) Attributional approach : No system expansion, (2) Consequential approach : No physical/economic allocation	System expansion → Physical allocation (by Energy content) → Allocation (Moles → Economic value → Mass)	Allocate by Net Calorific Value (for heat and steam, by effective energy)	System expansion ⇒ physical allocation	1. Carbon-containing co-products: System expansion 2. Non-carbon-containing co-products: Energy allocation
Data Quality	Perform quality evaluation considering 10 items including temporal, geographical, and technological scope	Target: LCA dataset, inputs and outputs, etc. Items: Temporal, geographical, and technological scope, accuracy, completeness, modeling options, etc. UN GLAD method recommended	Perform quality evaluation considering 10 items including temporal, geographical, and technological scope. Specify data types to consider by data category.	Only use administratively certified data such as EPA's GHGRP, and if certification is not possible, use default values.	Use the provided database as a priority, and use pre-approved appropriate data (no data quality criteria specified).

Cut-off Criteria	International and foreign guidelines				Korea guideline
	Insignificant flows can be excluded	Not recommended for application	Exclude items less than 0.2 g CO <sub>2</sub> e / MJ LHV hydrogen product	Not mentioned	Not mentioned
Applied GWP (Global Warming Potential)	IPCC AR5 GWP100	EF3.1 (IPCC AR6 GWP100)	IPCC AR5 GWP100	IPCC AR5 GWP100	IPCC AR5 GWP100
Power Procurement Rules	Contract power allowed	-	PPA allowed	EACs allowed	PPA allowed, partial allowance for EAC indirect emission reduction

한다. 이는 단순한 기술 지침을 넘어, 영국 내 저탄소 수소 인증 제도의 기반이자 정부 지원 및 인센티브와 직접적으로 연계되는 정책 도구로 기능한다.

### 3. 분석결과

#### 3.1. 설계인자의 도출

정책목적 수소 LCA의 특징과 불확실성 요인을 도출하기 위해, 정책적 활용을 직접 전제로 한 연구와 일반 LCA 불확실성 분석 중 제도 설계에 시사점을 줄 수 있는 13편의 연구를 검토하였다.

검토 결과, 첫째 Wardenaar et al. (2012)와 Reale et al. (2017)은 정책목적 LCA에서는 기능단위 정의, 시스템 경계 설정, 배분 원칙 고정 등 비교가능성 확보 수단이 필요함을 강조하였고, 둘째, Igos et al. (2019), Mahmood et al. (2022), Barahmand and Ezzati (2022), Nurdiawati et al. (2025)는 제도 목적에 맞는 불확실성·민감도 분석의 최소 요구 수준과 보고 형식 표준을 갖출 것을 제안하였다. 셋째, Guinée and Heijungs (2011), Ciroth et al. (2020), Guo and Murphy (2012), Weidema et al. (2018), Scrucca et al. (2020), Khoo et al. (2018)은 데이터 품질 지표 정의, LCI 데이터셋 검토·승인 절차, 투명한 문서화, 실무자 편차 (practitioner effect) 완화 등 데이터 및 모델링 선택의 신뢰성 확보 방안을 논의하였다. Gonçalves Dias Ponzi et al. (2024)은 특히 LCA 맥락에서 경계·배분·전력조달 규칙의 명확화와 데이터 품질 관리가 제도적 과제임을 강조하였다.

분석목적 LCA와 달리 정책목적 LCA에서, 이들 연구에서는 공통적으로 결과의 절대적 정확성보다는 일관성과 비교가능성 확보가 우선되어야 한다고 지적하고 있다. 특히 기능단위 정의, 시스템 경계 설정, 부산물·폐기물 구

분 및 할당 기준, 데이터 품질 및 대표성, 불확실성 분석 수준과 보고 형식 등에서의 표준화 필요성이 반복적으로 제기되었다. 이러한 선행연구의 권고사항을 종합하여, Table 2와 같이 정책목적 LCA 설계 시 고려해야 할 검토 항목과 권장사항을 도출하였다. 목적 및 범위 설정, 기능 단위, 경계, 부산물 처리, 데이터 품질, 배경 시나리오, 불확실성 분석 수준, 보고 형식 등 구체적 검토항목과 권고사항을 정리한 것이다.

Table 2에서 제시된 검토항목 가운데, 본 연구는 청정 수소 인증제의 불확실성 저감과 비교가능성 확보에 직접적으로 영향을 미치는 다섯 가지를 핵심 분석대상으로 선정하였다. 다섯 항목은 1) 기능단위 정의, 2) 시스템 경계 설정, 3) 부산물 정의, 4) 부산물 할당 절차, 5) 데이터 품질이다. 이 다섯 항목은 선행연구에서 반복적으로 결과 변동성을 좌우하는 요인으로 지적되어 왔으며, 제도 시행 시 사업자 간 형평성과 인증 결과의 신뢰성을 보장하는데 필수적이다. 추가적으로, 핵심 항목 외에도 6) Cut-off 기준, 7) GWP 적용 버전·평가기간, 8) 전력조달 규칙 (PPA·REC 포함) 등 3개 항목의 추가 검토가 필요한 사항을 분석 범위에 포함시켰다.

#### 3.2. 핵심 설계인자의 평가에 의한 청정수소인증제의 개선방안

##### 3.2.1. 기능 및 기능단위

Table 1에서와 같이, ISO/DIS 19870-1은 기능단위를 ‘이후 단계에서 요구하는 압력과 순도를 가진 수소 1 kg’으로 설정한다.

FCH-LCA 가이드라인에서는 수소 1 kg 또는 수소 1 MJ (저위발열량 기준)를 기능단위로 설정하며, 수소의 온도, 압력, 온도는 반드시 명시해야 한다.

Table 2. Review items and recommendations for policy-oriented LCA design

Category	Recommendations	13 No. of Ref.
Setting of Functional Unit	Fix a single functional unit according to policy objectives (comparison·ranking, regulatory compliance)	Wardenaar et al. (2012) Reale et al. (2017)
System Boundary Setting	Explicitly state a list of processes to be included·excluded (e.g., inclusion of facilities·infrastructure)	Reale et al. (2017)
Co-products·Waste Classification and Allocation	Clearly define criteria for classifying co-products and waste (e.g., economic value, functional use) Explicitly state the allocation method (fixed among physical·economic·substitution) and exception rules for co-products	Wardenaar et al. (2012) Reale et al. (2017)
Data Quality·Priorities·Assumptions	Set criteria for temporal·geographical·technological representativeness, mandate recording of DB selection priorities and reasons. Document and publicly disclose the source and assumptions of all data for verifiability. Define quality dimensions (completeness, consistency, reproducibility, etc.). Introduce a DB review·approval checklist. Explicitly state DB selection priorities and recording	Reale et al. (2017) Guinée and Heijungs (2011) Ciroth et al. (2020) Khoo et al. (2018) Weidema et al. (2018)
Background System Scenarios	Construct background data such as power mix·fuel supply chain as scenarios and reflect them in sensitivity analysis	Nurdiawati et al. (2025)
Uncertainty·Sensitivity Analysis Level	Minimize result fluctuations due to practitioner subjective choice by reducing·standardizing selection autonomy	Igos et al. (2019) Mahmood et al. (2022) Scrucca et al. (2020)
Standardization of Sensitivity Analysis Reporting Format	Standardize reporting format to report top sensitive variables, impact ranking, and confidence intervals in table·graph form	Mahmood et al. (2022) Barahmand and Ezzati (2022) Guo and Murphy (2012)
Standardization of Terminology Definition	Prevent confusion of terms related to uncertainty·sensitivity, create·distribute glossaries for each system	Barahmand and Ezzati (2022)
Comparability·Verification Procedures	Verify adherence to same assumptions·data·allocation rules, conduct critical review if necessary	Reale et al. (2017) Igos et al. (2019)

UK LCHS는 ‘기능 단위’라는 용어를 직접 사용하지는 않지만, 온실가스 배출량 산정 시 수소 1MJ (저위발열량 기준)를 기준으로 삼는다. 또한, 최소 순도 조건(부피 기준 99.9%)과 압력 조건(3MPa)을 명시하고 있으며, 해당 조건 충족에 따른 배출량을 포함한다.

45VH2-GREET 지침은 압력 300 psia, 순도 100 mol%의 수소 1 kg을 기능단위로 설정하며, 이 압력과 순도로 보정하는 과정에서 발생하는 추가적인 배출량도 반영한다.

반면, 국내 청정수소인증제 업무규정에서는 수소 1 kg을 기능단위로 설정하고 있으나, 압력 조건은 명시되어 있지 않다. 그러나 압축 조건에 따라 에너지 소비와 온실가스 배출량이 달라지기 때문에, 압력 조건이 부재할 경우 서로 다른 압력 조건의 수소 간 비교가 불가능해지는 문제가 발생한다. 따라서, UK LCHS 및 45VH2-GREET 지침과 같이 국내 청정수소인증제에서도 기준 압력 조건

과 보정 배출량 반영 방식을 도입함으로써, 다양한 청정수소 간의 비교 가능성을 높일 필요가 있다.

Table 6에는 기능단위를 포함한 핵심 설계인자별 국내 청정수소인증제의 개선방안을 정리하였다.

### 3.2.2. 시스템 경계

ISO/DIS 19870-1은 ‘raw material extraction-to-production gate’ 시스템 경계를 적용한다. 이는 원료·자원 채취 및 회수, 원료의 운송, 수소 생산 단계를 포함하지만 수소의 컨디셔닝(Conditioning)과 최종사용자로의 운송 단계는 제외된다. 자본재(수소 생산 장치 등)의 건설, 제조, 교체, 해체에서 발생하는 배출량은 제외한다. 제외의 이유는 이러한 배출량이 다른 배출량에 비해 미미하기 때문이다. 하지만 자본재에 의한 배출량이 증대해지는 일부 경우(재생에너지 이용 수전해 설비의 수소 생산)가 존재하므로 자본재에 의한 배출량을 별도로 보고한다.

Table 3. Co-products of hydrogen production technologies in ISO/DIS 19870-1

Technology	Co-product Represented
Methane Reforming (with or without Carbon Capture and Storage)	Steam, CO, CO <sub>2</sub> (CCU)
Autothermal Reforming (with or without Carbon Capture and Storage)	Steam, CO <sub>2</sub> (CCU)
Water Electrolysis	Oxygen
Chlor-alkali	Caustic soda, Chlorine
Steam cracking	Methane-rich fuel gas, Ethylene, Propylene, C4 products, Gasoline, Benzene, Toluene, Xylene, Miscellaneous other co-products
Gasification with or without carbon capture	Steam, CO <sub>2</sub> (CCU)
Methane pyrolysis	Steam (if applicable), Carbon, Carbon (CCU, if applicable)
Chemical Looping Water Splitting with or without carbon capture	Steam, Nitrogen, CO <sub>2</sub> (CCU)
Geologic Hydrogen Production	Helium, CH <sub>4</sub>
Catalytic Naphtha Reforming	Steam, Reformate

Table 4. Co-products of hydrogen production technologies in 45VH2-GREET

Technology	Co-products Represented
Low-temperature water electrolysis	Oxygen
High-temperature water electrolysis	Oxygen
Steam methane reforming with potential CCS	Steam
Autothermal reforming with potential CCS	Steam, Nitrogen
Biomass gasification with potential CCS	None
Coal gasification with potential CCS	Nitrogen

FCH-LCA 가이드라인은 비교 연구에서 시스템 경계 설정의 중요성을 강조하며, 수소 생산, 사용, 생산+사용 등 세 가지 경우로 구분하여 조건을 정의한다. 수소 생산에는 Cradle-to-Gate 경계를 적용하며, 나머지 두 경우에는 Cradle-to-Grave를 원칙으로 한다. 특히 사용 후 단계 (End-of-Life, EoL)는 필수적으로 포함되며, 적용된 EoL 모델링 접근법(Cut-off, Recycling, Circular formula 등)에 따라 시스템 경계를 설정해야 한다. 또한, 자본재의 포함을 필수로 명시하고 있으며, 실제 서비스 수명을 기준으로 선형 감가상각(Linear Depreciation)을 적용한다. 네 가지 지침 중에서 EoL과 자본재 반영을 모두 의무화한 것은 이 가이드라인이 유일하다.

UK LCHS는 생산 시점까지의 배출만을 다루며, Scope 1-2 및 일부 Scope 3(상류 공급망)만 포함한다. 분배와 사용 등 하류 활동은 시스템 경계에서 제외된다.

45VH2-GREET 지침은 Well-to-Gate 경계를 적용하며, 원료 채굴·가공·수송, 전력 사용, 생산 공정의 직접 배출, 정제 과정, 그리고 CO<sub>2</sub> 포집 단계까지 포함한다.

국내 청정수소인증제 업무규정에서도 시스템 경계는 Well-to-Gate로 설정되어 있다. 산정 항목은 다음과 같다.

1) 원료 공급에 대한 간접 배출량, 2) 연료 공급에 대한 간접 배출량, 3) 주요 투입물질에 대한 간접 배출량, 4) 공정 배출량, 5) 탈루성 온실가스 배출량. 다만, 수소 생산과 직접적인 관련이 없는 활동(예: 설비 제조 등)으로부터의 배출량은 제외된다.

그러나 재생에너지 사용한 수전해 설비에서의 수소 생산과 같이 설비 제조로 인한 배출량이 크게 작용하는 경우가 있기 때문에, 향후 청정수소인증제에서는 자본재에 의한 환경영향도 포함할 필요가 있다.

3.2.3. 부산물(Co-product) 정의

ISO/DIS 19870-1은 ISO 14040:2006의 정의를 준용하여, 하나의 단위공정에서 동시에 산출되는 제품(폐기물로 간주되지 않는)을 부산물로 본다. 부속서에서는 SMR, ATR, 수전해 등의 생산기술별 잠재적인 부산물 예시를 Table 3과 같이 제공한다.

FCH-LCA 가이드라인은 Co-product와 By-product를 구분한다. Co-product는 수소와 함께 경제적 가치가 있는 산출물이 주요 목적에 따라 함께 생산되는 경우, By-product는 공정의 주목적과 무관하게 부수적으로 발생

하는 산출물(예: 스팀 크래킹)이다.

UK LCHS는 부산물을 전기, 유용한 열, 물질로 한정하며 폐기물과 구분한다. 폐기물은 소유자가 폐기하려 하거나 폐기해야 하는 물질로 정의되며, 부산물과 폐기물의 구분에는 경제적 가치와 향후 사용 가능성 등을 종합적으로 고려하지만, 명확한 기준은 제시되어 있지 않다.

45VH2-GREET 지침은 수소 생산 과정에서 수소와 분리되어 실질적인 용도나 판매 가능성이 있는 산출물을 부산물로 정의한다. Table 4에서 확인할 수 있듯이 현재 지침에서의 대표적인 부산물은 스팀, 산소, 질소 등이다.

국내 청정수소인증제 업무규정에서는 부산물을 ‘경제적 가치가 있어 상업적 판매나 재사용이 가능한 2차 산출물’로 정의하고 있다. 그러나 폐기물과의 구분 기준이나 경제적 가치 판정 기준은 구체적으로 제시되어 있지 않다. 이로 인해 동일한 산출물이 상황에 따라 부산물 또는 폐기물로 상이하게 분류될 가능성이 존재한다. 청정수소인증제 업무규정에서는 부산물을 수소 생산 기술별로 제시하고 있지는 않지만, 산정방법 중간에 ‘카본블랙, 열 또는 스팀’을 부산물로 간주함을 언급하고 있다.

국제 지침 모두 부산물을 ‘주 산물 이외의 경제적 가치가 있는 산출물’로 본다는 점에서는 공통되나, 정의의 구체성이나 구분 기준의 명확성은 차이를 보인다. 특히 ISO/DIS 19870-1과 45VH2-GREET 지침은 생산 방식별 잠재적 부산물 예시를 제공함으로써 해석상의 모호성을 줄이고 있다.

따라서, 국내 청정수소인증제에서는 단순히 경제적 가치만으로 부산물을 정의하기보다는, 기술별 잠재적 부산물 목록을 제시하고, 폐기물과 부산물 간의 명확한 구분 기준을 설정하며, 경제적 가치 판단을 위한 정량적 지표를 도입하는 방식이 필요하다.

### 3.2.4. 부산물 할당 방식

ISO/DIS 19870-1은 기본적으로 ISO 14044에 제시된 할당 절차를 따르며, LCI 모델링 체계(귀속적(Attributional) 또는 결과적(Consequential))에 따라 다른 할당 절차를 다르게 적용한다. 귀속적(Attributional) 접근법에서는 시스템 확장이 적용 불가능하다. 그 외 공정세분화, 물리적 할당, 경제적 할당은 적용 가능하다. 반면, 결과적(Consequential) 접근법에서는 공정 세분화, 시스템 확장이 적용 가능하지만, 물리적 할당과 경제적 할당은 적용 불가능하다. 이는 Attributional LCA가 평균적 책임을 분배하는 데 초점을 두는 반면, Consequential LCA는 의사결정에 따른 변화

(결과)를 모델링한다는 차이에서 기인한다. 부속서 D에서는 수소 생산방식별로 공정 세분화 방법과 적용 가능한 할당방식을 언급한다. 언급된 할당인자로는 에너지 함량, 엔탈피 차이, 질량, 몰수가 있다.

FCH-LCA 가이드라인은 ISO 14044의 할당 절차(공정 세분화 → 시스템 확장 → 할당)를 따른다. 수소가 주제품인 경우 공정 세분화가 어렵다면 시스템 확장을 우선 적용하고, 그마저도 불가능한 경우 에너지 함량 기준의 물리적 할당을 적용한다. 이 방법 또한 적용이 어려운 경우, 몰 수 → 경제적 가치 → 질량 순으로 할당 기준을 선택한다. 수소가 부산물일 경우에도 동일한 원칙이 적용되나, 공정 세분화와 시스템 확장이 더 어려워 할당이 필수적이 된다.

UK LCHS는 에너지 기반 할당 방식을 사용하며, 저위 발열량(LHV) 비율에 따라 배출량을 배분한다. 열이나 증기와 같은 부산물은 카르노 효율을 적용해 유효 에너지만을 고려한다.

45VH2-GREET 지침은 스팀, 산소, 질소 등의 부산물에 대해 시스템 확장을 적용하고, 이들이 대체할 수 있는 외부 제품의 환경 부하를 차감하는 방식으로 크레딧을 부여한다. 다만 지침 자체에서는 크레딧 산정 방법을 구체적으로 제시하지 않고 있으며, 배출계수는 45VH2-GREET 모델(엑셀버전)을 통해 연산된 값을 통해 확인할 수 있다. 45VH2-GREET 모델(엑셀버전)에서는 연도별, 기술별 부산물의 크레딧 값을 고정값으로 주어준다. 예를 들어, 산소 부산물의 경우, 1 kgO<sub>2</sub>당 0.0268 kgCO<sub>2e</sub>의 크레딧 값을 가진다(시뮬레이션 연도 2023년, 고온 수전해).

Table 5는 부산물별 할당방식을 나타낸 표이다. 다만, 미국 에너지부(Department of Energy, DOE)는 수소 생산 시설에서 생산될 수 있는 모든 부산물에 대해 시스템 확장이 적절한 회계 접근법이 아닐 수 있으며, 시스템 확장이 부적절한 경우에는 물리적 할당을 활용해야 한다고 권고했다. 특히, 기존 부산물 생산 방식의 수명주기 온실가스 배출량이 매우 변동성이 크거나 불확실한 경우, 또는 부산물 시장이 충분히 작아 수소 생산자가 생산하는 부산

Table 5. Co-product in 45VH2-GREET and accounting mechanisms

Co-product	Accounting Mechanism
Steam	System Expansion
Oxygen	System Expansion
Nitrogen	System Expansion

물의 규모가 기존 기술을 대체하기보다는 오히려 해당 부산물의 시장 규모를 확대할 가능성이 있는 경우 등(이에 국한되지 않음) 시나리오에서 수소 생산에 대한 수명주기 온실가스 배출량이 인위적으로 낮게 산출될 경우 시스템 확장은 부적절할 수 있다.

국내 청정수소인증제 업무규정에서는, 탄소를 포함한 부산물에는 시스템 확장을, 탄소를 포함하지 않은 부산물에는 에너지 기반 할당을 적용한다고 명시하고 있다. 그러나 시스템 확장이 불가능할 경우의 대체 절차는 제시되어 있지 않고, 확장 대상 부산물이 어떤 공정을 대체하는지 평가하는 기준 역시 부재하다. 이로 인해 동일한 부산물에 대해 사업자별로 상이한 해석이 발생할 수 있으며, 결과의 신뢰성과 일관성에 영향을 줄 수 있다. 이를 방지하기 위해, 시스템 확장 대상 부산물이 대체하는 공정을 45VH2-GREET (엑셀버전)과 같이 고정값으로 설정하는 방안을 검토할 필요가 있다.

또한, 탄소 미함유 부산물에 대한 에너지 기반 할당의 전제는 해당 부산물이 연소 가능하다는 가정에 기반한다. 하지만 연소가 불가능한 부산물에 대해서는 업무규정 내에 별도의 설명이 없다. 따라서, 이러한 할당 방식을 채택한 근거와 적용 범위를 명확히 설명하고, 45VH2-GREET 과 같이 부산물 종류별 할당 기준을 지정하는 방식으로 제도의 일관성을 높일 필요가 있다.

3.2.5. 데이터 품질

ISO/DIS 19870-1은 데이터 품질을 정량적·정성적으로 특성화할 것을 의무화하며, 평가 시 시간적, 지리적, 기술적 범위뿐 아니라 정밀성, 대표성, 재현성, 출처, 불확실성 등을 고려해야 한다. ISO/DIS 19870-1에서는 데이터 품질 평가 시 일반적으로 사용되는 pedigree matrix 방법을 이용한다는 명시는 없고, 정밀성, 대표성, 재현성 등 고려해야 하는 항목만 규정하고 있다.

FCH-LCA 가이드라인은 데이터 품질은 반드시 문서화 되어야 하며, 다양한 데이터 품질 지표가 적용된 데이터 품질 관리체계가 마련되어야 한다고 규정하고 있다. 이에 더해 데이터 품질 지표 체계는 UN GLAD (Global LCA Data Access) 데이터 품질 시스템을 따르는 것을 권장하고 있다. 즉, 기본적으로 UN GLAD 방식에 기반한 pedigree table 접근법과 total DQR 산정 방식을 권장하되, 기타 데이터 품질 평가 체계의 적용도 허용한다.

UK LCHS는 모든 데이터에 대해 출처와 사용 근거를 기록하고, 시간·지리·기술적 범위, 완전성, 일관성, 불확실성 등을 평가한다. 또한 데이터 항목을 활동흐름(Activity Flow), 배출강도(GHG Emission Intensity), 수소생산량 (Total quantity of Hydrogen Product)의 범위로 구분하고, 측정(Measured), 추정(Estimated), 예상(Projected), 전형적(Typical), 비전형적(Non-typical), 기본(Default)의 6가지 유형으로 분류하여 적용한다.

ISO/DIS 19870-1, UK LCHS 지침은 데이터 품질 평가 항목과 이를 의무적으로 수행해야 함을 명시하고 있으나 구체적인 평가 방법을 언급하지는 않는다.

45VH2-GREET는 별도의 품질 기준을 제시하지 않으며, EPA 등 공인기관의 검증 데이터를 인정하고, 그 외에는 기본값을 제공한다.

이처럼 지침별 데이터 품질 관리 방식은 크게 세 가지 유형으로 구분할 수 있다.

- (1) 기본값 제공 중심형: 45VH2-GREET처럼 모든 항목에 대해 기본값을 제공하고 별도의 품질 평가를 하지 않는 방식
- (2) 혼합형: UK LCHS처럼 일부 항목은 기본값을 제공하고, 나머지 항목에 대해서는 사용자가 품질 평가를 수행해야 하는 방식
- (3) 사용자 평가 중심형: ISO 19870처럼 기본값 없이 모든 항목에 대해 품질 평가를 요구하는 방식

Table 6. Improvement measures for the clean hydrogen certification system based on the evaluation of key design factors

Key Design Factors	Measures to Improve the Clean Hydrogen Certification System
Functions & Functional Units	Add pressure conditions.
System Boundary	Revise to include capital goods when their emissions are significant (e.g., renewable-based electrolysis).
Definition of By-products	Present a list of potential by-products by technology.
Allocation Procedure	An explanation is needed for why the allocation method is categorized by carbon content, and specific allocation methods for each type of by-product should be specified.
Data Quality	Specify data quality evaluation criteria to be applied to items for which default values are not provided.

국내 청정수소인증제는 이 중 UK LCHS와 유사한 ‘혼합형’에 해당한다. 따라서 기본값이 제공되지 않는 항목에 대해서는 적용 가능한 데이터 품질 평가 기준을 구체적으로 제시하고, 관련 사례를 함께 제공하여 사용자의 이해를 도울 필요가 있다. 이는 사업자 간 해석 차이를 줄이고, 평가 결과의 신뢰성을 확보하는 데 기여할 수 있다. Table 6은 핵심 설계인자별로 국내 청정수소인증제의 개선방안을 제시하였다.

### 3.3. 부가적 설계인자의 평가에 의한 청정수소인증제의 개선방안

#### 3.3.1. 제외기준(Cut-off)

ISO/DIS 19870-1은 중요성이 낮은 특정 공정 및 흐름을 제외하기 위해 사용되는 제외기준은 목표 및 범위 정의 단계에서 명확하고 일관되게 규정되어야 하며, 총합이 0.05 kgCO<sub>2</sub>e/kgH<sub>2</sub> 이하여야 한다고 규정한다.

FCH-LCA 가이드라인은 제외기준의 적용을 원칙적으로 권장하지 않는다. 다만 적용 시에는 반드시 명확하게 기술하고, 그 정당성을 설명해야 한다고 강조한다.

UK LCHS는 ‘제외기준(Cut-off)’이라는 용어 대신 ‘중대성(Materiality)’ 용어를 적용한다. 중대성 기준(Materiality Threshold)은 GHG 배출 강도 기준(20 g CO<sub>2</sub>e/MJ LHV 수소제품)의 1%인 0.2 g CO<sub>2</sub>e/MJ LHV로 정의된다. 개별 배출원이 이 기준 미만이며, 동시에 전체 비중대 배출원(Immaterial Emission Source)의 총합이 1 g CO<sub>2</sub>e/MJ LHV 미만일 경우, 해당 배출원은 배출 강도 산정에서 제외할 수 있다.

45VH2-GREET 지침은 제외기준에 대해 별도의 언급이 없다.

국내 청정수소인증제 업무규정에서는 현재 제외기준을 제시하지 않고 있으며, 경미한 공정이나 재료의 포함 여부에 대한 명확한 기준이 없다. 이에 따라 LCA에서 통상

적으로 확립된 제외 개념이 제도 내에 반영되지 않고 있으며, 이로 인해 사업자 간 결과의 일관성이 저해될 우려가 있다. 따라서, 국내 청정수소인증제는 Cut-off 개념 자체를 제도에 반영하고, 적용 기준 및 임계치를 명문화할 필요가 있다. 이는 어떤 수치를 기준으로 삼느냐 보다, LCA의 기본 원칙이 제도 설계에서 누락되지 않는 것이 더 중요하기 때문이다.

#### 3.3.2. GWP 적용

영향평가 수행 시, FCH-LCA 가이드라인은 필수적으로 EU의 환경발자국 방법론(Environmental Footprint Method)의 최신 버전을 사용하도록 되어 있다. 현재는 EF 3.1이 최신 버전이며, 해당 버전에서는 IPCC AR6에 제시된 GWP100 값을 이용하고 있다.

ISO/DIS 19870-1, UK LCHS, 45VH2-GREET 등의 지침은 IPCC AR5에 제시된 GWP100의 값을 특성화 계수로 채택하였다. 국내 청정수소인증제에서도 IPCC AR5, GWP100 채택을 명시하였으므로, 별다른 보완이 필요하지 않는 것으로 평가된다.

#### 3.3.3. 전력 조달 규칙

ISO/DIS 19870-1은 전력 배출 보고 방법을 LCI 모델링 방법에 따라 나누어 접근한다. 만약 GHG 평가의 목표가 귀속적(Attributional)일 경우에 전력 배출 보고 방법은 ISO 14064-1:2018, 부속서 E에 따른다. 이 접근법은 위치 기반(Location-based) 방법과 시장 기반(Market-based) 방법으로 이루어졌으며, 전력 배출량을 계산할 때, 위치 기반 방식과 시장 기반 방식을 모두 사용해서 각각 결과를 제시해야 한다.

- 위치 기반 방법: 전력이 소비된 지역의 전력망 평균 배출계수를 사용
- 시장 기반 방법: 계약 수단(Contractual instruments)을 통해 배출계수 산정(에너지 속성 인증서(REC, GO),

Table 7. Improvement measures for the clean hydrogen certification system based on the evaluation of additional design factors

Additional Design Factor	Clean Hydrogen Certification System Improvement Plan
Cut-off	Clarify the concept of currently absent exclusion criteria within the Clean Hydrogen Certification System.
GWP	No separate supplementation is required.
Power Procurement Rules	If the goal is to secure real low-carbon properties by reflecting emission factors by hydrogen production time, set the reporting unit to a smaller time unit like UK LCHS, and specify the calculation method for ESS supplied power.

직접 구매계약(PPA), 공급자 고유 배출계수 등)

UK LCHS는 수소 생산에 사용된 모든 전력의 GHG 배출을 명확히 입증할 것을 요구한다.

수소 생산 시설의 전력 공급 방식은 다음 네 가지로 구분된다:

- 적격 전력구매계약(PPA)
- 특정 발전원에 연결되지 않은 사설망
- 전력망(Grid)
- 전력 공급 제약 회피용 전력

시설은 이들을 임의로 조합해 전력을 조달할 수 있으며, 각 방식마다 적용 가능한 인증서 유형, 배출계수, 송배전 손실률이 명시되어 있다. 또한, 에너지 저장 시설로부터 전력을 조달할 경우에도 동일한 기준이 적용되며, 이때는 저장된 전력의 평균 배출 강도를 사용한다.

45VH2-GREET 지침에서는 에너지 속성 인증서(Energy Attribute Certificates, EACs)를 확보한 경우, 해당 전력을 특정 발전원 기반으로 인정한다. 인증서가 없는 경우에는 전력망 평균 배출계수를 적용한다.

국내 청정수소인증제는 PPA 기반 전력 조달을 인정하고 있으며, '제12조(데이터 적격성 요건)'에 해당 조건을 명시하고 있다.

수소 생산 설비에 투입된 전력이 다음 두 조건을 만족해야 적격으로 간주된다:

- 저탄소 전원으로부터 생산된 전력량과 수소 생산 설비의 전력 사용량이 '월 단위'로 일치할 것
- 해당 저탄소 전원이 수소 생산 설비와 동일한 전력망에 연결되어 있을 것

월 단위 일치 기준은 행정적 단순성과 집행 가능성 면에서는 타당성이 있으나, 수소 생산 시점의 배출계수를 실질적으로 반영하기에는 시간적 정합성이 부족하다. 따라서 국내 청정수소인증제도 UK LCHS처럼 더 세분화된 시간 단위(예: 30분 또는 1시간 단위)로 GHG 배출 계산 및 보고 단위(Reporting Unit)를 설정할 필요가 있다. 또한 전력저장시스템(Energy Storage System, ESS)에서 공급되는 전력의 배출량을 어떻게 산정할 것인지에 대한 명확한 기준이 마련되어야 한다. Table 7에는 부가적 설계인자별로 국내 청정수소인증제의 개선방안을 제시하였다.

#### 4. 결론

한국은 2050년 탄소중립 달성을 위한 국가 전략의 일환으로, 세계 최초 수준의 법제화된 청정수소 인증제를

도입하였다. 그러나 인증 결과는 방법론적 선택에 따라 크게 달라질 수 있기 때문에, 제도의 신뢰성과 형평성을 확보하는 것이 핵심 과제로 부상하고 있다.

본 연구는 제도의 견고성을 강화하기 위해 주요 국제 전과정평가(LCA) 지침과 표준을 비교·분석하고, 국내 제도 설계에 적용 가능한 요소를 도출하였다. 이를 통해 다음과 같은 주요 결론에 도달하였다.

(1) 본 연구는 13편의 정책목적 LCA 선행연구를 분석하여, 국내 청정수소인증제 개선을 위한 총 8개의 설계인자를 도출하였다. 그중 핵심 설계인자는 기능 및 기능단위, 시스템 경계, 부산물 정의, 부산물 할당 방식, 데이터 품질이며, 부가적 설계인자는 제외기준(Cut-off), GWP 적용 기준, 전력 조달 규칙이다.

(2) 핵심 설계인자 분석을 통해 다음의 제도 개선 필요성이 도출되었다. 기능단위 설정 시 압력 조건을 명시하여, 수소 간 비교가능성을 확보할 필요가 있다. 잠재적 부산물 목록을 사전에 지정하고, 부산물별 할당 방식을 명확히 규정해야 한다. 기본값이 제공되지 않는 항목에 대해서는 데이터 품질 평가 기준을 구체적으로 제시할 필요가 있다.

(3) 부가적 설계인자 분석 결과, 다음과 같은 개선 방향이 제시되었다. 제외기준 과 임계치를 명문화하여, 경미한 항목의 일관된 처리 기준을 마련할 필요가 있다. 전력 조달 규칙은 월 단위 일치에서 더 나아가, UK LCHS와 같이 30분~1시간 단위의 세분화된 보고 체계 도입이 요구된다. 또한, ESS(에너지저장시스템)를 통한 전력 공급의 배출량 산정 방식에 대한 기준 마련도 필요하다.

본 연구는 국내 청정수소인증제의 규정 내 잠재적 쟁점을 체계적으로 정리하고, 선행연구 및 국제 지침에 근거한 실질적인 개선 방향을 제시했다는 점에서 의의가 있다. 향후 연구에서는 본 연구에서 제안한 개선 사항들이 실제 사업자 데이터 수집·검증 과정에 어떻게 적용되는지를 실증적으로 분석할 필요가 있다. 이를 통해 국내 청정수소 온실가스 산정 체계의 제도적 완성도를 제고하고, 국제적 정합성과 정책 신뢰성을 높이는 데 기여할 수 있을 것이다.

#### 사사

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었습니다(과제번호 RS-2024-00417444).

## Reference

- Bargiacchi E, Puig-Samper G, Campos-Carriedo F, Iribarren D, Dufour J, Citroth A, Barreiros T, di Noi C, Maister K, Zapp P, Schreiber A, Wulf C, Schonhoff A. 2022. D2.2 SH2E project - Definition of FCH-LCA guidelines. Brussels, Belgium: Fuel Cells and Hydrogen 2 Joint Undertaking (now Clean Hydrogen Partnership); SH2E Project. Grant Agreement No. 101007163. Deliverable Report D2.2.
- Barahmand Z, Eikeland MS. 2022. Life cycle assessment under uncertainty: A scoping review. *World* 3(3): 692-717. doi: 10.3390/world3030039
- Citroth A, Foster C, Hildenbrand J, Zamagni A. 2020. Life cycle inventory dataset review criteria new proposal. *Int J Life Cycle Assess* 25(3): 483-494. doi: 10.1007/s11367-019-01712-9
- Clean Hydrogen Certification Deliberation Committee; Korea Energy Economics Institute. 2025. Operational rules for the clean hydrogen certification operating agency. Revised on April 23, 2025; enforced on April 24, 2025. Ulsan, Korea: Clean Hydrogen Certification Deliberation Committee, Korea Energy Economics Institute. Regulation No. 2900.
- Gonçalves Dias Ponzi G, Jacks Mendes Dos Santos VH, De Medeiros Engelmann P, Dalla Vecchia F. 2024. The hydrogen life cycle assessment methodology: An overlooked puzzle piece in harmonizing hydrogen certification and trade. *Clean Techn Environ Policy* 26(8): 2573-2596. doi: 10.1007/s10098-024-02752-y
- Guinée JB, Heijungs R, Huppes G, Zamagni A, Masoni P, Buonamici R, Ekvall T, Rydberg T. 2011. Life cycle assessment: Past, present, and future. *Environ Sci Technol* 45(1): 90-96. doi: 10.1021/es101316v
- Guo M, Murphy RJ. 2012. LCA data quality: sensitivity and uncertainty analysis. *Sci Total Environ* 435-436: 230-243. doi: 10.1016/j.scitotenv.2012.07.006
- Igos E, Benetto E, Meyer R, Baustert P, Othoniel B. 2019. How to treat uncertainties in life cycle assessment studies? *Int J Life Cycle Assess* 24(4): 794-807. doi: 10.1007/s11367-018-1477-1
- International Organization for Standardization. 2023. ISO/TS 19870: Hydrogen technologies — Methodology for determining the greenhouse gas emissions associated with the production, conditioning and transport of hydrogen to consumption gate. Geneva, Switzerland: ISO.
- International Organization for Standardization. 2025. ISO/DIS 19870-1: Hydrogen technologies — Methodology for determining the greenhouse gas emissions associated with the hydrogen supply chain — Part 1: Emissions associated with the production of hydrogen to production gate. Geneva, Switzerland: ISO.
- Khoo HH, Isoni V, Sharratt PN. 2018. LCI data selection criteria for a multidisciplinary research team: LCA applied to solvents and chemicals. *Sustain Prod Consum* 16: 68-87. doi: 10.1016/j.spc.2018.06.002
- Korea Energy Economics Institute (KEEI). 2021. World nuclear power market insight: Hydrogen series 1 - Trends and issues in the introduction of the hydrogen power portfolio standard. Biweekly report, 2021 Sep 17. Ulsan, Korea: KEEI.
- Mahmood A, Varabuntoonvit V, Mungkalasiri J, Silalertruksa T, Gheewala SH. 2022. A tier-wise method for evaluating uncertainty in life cycle assessment. *Sustainability* 14(20): 13400. doi: 10.3390/su142013400
- Ministry of Foreign Affairs, Ministry of Environment. 2021. Submission of Korea's enhanced 2030 Nationally Determined Contribution (NDC) to the UNFCCC Secretariat. [press release]; [accessed 2025 Sep 9]. <https://www.korea.kr>.
- Ministry of Trade, Industry and Energy (MOTIE). 2021. Report on hydrogen economy achievements and the vision for a leading hydrogen nation; [accessed 2025 Sep 9]. <https://www.korea.kr>.
- Nurdiawati A, Mir BA, Al-Ghamdi SG. 2025. Recent advancements in prospective life cycle assessment: Current practices, trends, and implications for future

- research. *Resour Environ Sustain* 20: 100203. doi: 10.1016/j.resenv.2025.100203
- Reale F, Cinelli M, Sala S. 2017. Towards a research agenda for the use of LCA in the impact assessment of policies. *Int J Life Cycle Assess* 22(9): 1477-1481. doi: 10.1007/s11367-017-1320-0
- Scrucca F, Baldassarri C, Baldinelli G, Bonamente E, Rinaldi S, Rotili A, Barbanera M. 2020. Uncertainty in LCA: An estimation of practitioner-related effects. *J Clean Prod* 268: 122304. doi: 10.1016/j.jclepro.2020.122304
- UK Department for Energy Security and Net Zero. 2023. UK low carbon hydrogen standard: Greenhouse gas emissions methodology and conditions of standard compliance. Version 3, December 2023. London, UK: Crown copyright.
- US Department of Energy, Office of Energy Efficiency & Renewable Energy. 2025. Guidelines to determine Well-to-Gate greenhouse gas (GHG) emissions of hydrogen production pathways using 45VH2-GREET Rev. June 2025. Washington, DC: US Department of Energy.
- Wardenaar T, van Ruijven T, Beltran AM, Vad K, Guinée J, Heijungs R. 2012. Differences between LCA for analysis and LCA for policy: A case study on the consequences of allocation choices in bio-energy policies. *Int J Life Cycle Assess* 17(8): 1059-1067. doi: 10.1007/s11367-012-0431-x
- Weidema BP, Pizzol M, Schmidt J, Thoma G. 2018. Attributional or consequential life cycle assessment: A matter of social responsibility. *J Cleaner Prod* 174: 305-314. doi: 10.1016/j.jclepro.2017.10.340