KTR KOREA TESTING & RESEARCH INSTITUTE

2026 Critical Review Report

검토 의견서

■ 1차 ■ 2차 □ 3차

Final Critical Review Report

LCI DB 검토의견서

2026. 11. 11.

Korea Testing and Research Institute

작성기관 및 작성자		
작성기관:	㈜엔스타알앤씨	

Note 1: 이 문서는 2026년 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행한 연구 결과물로서, 국토교통분야 수소 기술의 LCI DB에 대한 정보를 포함하고 있습니다.

Note 2: 해당 문서에 기재된 사항은 외부에 공개할 수 없으며, 정밀검토 후 해당 자료는 폐기하여야 합니다.

1. LCI DB 보고서

Dataset Documentation 'hydrogen production, AEM electrolysis, from renewable electricity'

** 참고: 이 문서는 데이터세트 정보의 일부만 발췌하여 제공합니다. 교환 속성, 수학적 관계, 매개변수, 저자 및 검토자의 연락처 정보에 대한 추가 데이터는 별도 파일 형식으로 제공되어야 합니다.*

1 데이터 세트 식별 정보

	구분	내용
1	데이터 이름	hydrogen production, AEM electrolysis, from renewable electricity
2	지역	Korea (KR)
3	기간	2026-01-01 to 2028-12-31 - Valid for the entire period
4	참조 제품	hydrogen (1 kg)
5	데이터 세트 유형	Unit process
6	기술 수준	TRL(Technology Readiness Level 6)

지리적 위치를 나타낼 수 있는 사진 기입 (선택)

데이터의 지역적 범위: 대한민국(기술 대표 데이터, 한국 공급 배경 데이터 연결)

2 데이터 세트 작성자 정보

	구분	내용
1	Data entry	인하대학교
2	Data generator	이광원, ㈜엔스타알앤씨
3	Review (1st)	이름, 소속
4	Review (2nd)	이름, 소속
5	Review (3rd)	이름, 소속

3 물질 흐름(요약)

	Reference product	By-product classification	Amount
1	hydrogen		1 kg

	Inputs from technosphere	Amount
1	시스템 전력	54 kWh
2	직접 용수(DI)	10.13 kg
3	KOH (0.1M 원문)	3.20E-05 kg
4	황산 중화	2.86E-05 kg
5	팔라듐	6.80E-08 kg
6	알루미나	2.26E-05 kg
7	제올라이트	1.94E-05 kg
	Outputs	Amount
1	폐촉매 처리	2.27E-05 kg
2	중화 후 폐수 처리	9.59E-08 m3
3	산소 대기방출	8.004 kg
4	공정 폐수 처리	3.47E-04 m3
5	폐열 대기방출	47.95 MJ

4 일반사항

(1) 데이터 개요

본 LCI DB의 대상은 음이온 교환막 수전해(AEM) 시스템의 운영, 즉 수소 1 kg을 생산하는 데 드는 전력 · 용수 · 약품 투입과 배출물 · 폐기물 산출이다.

설비(스택 · BOP) 제조는 별도 데이터셋이며 본 데이터셋에는 포함하지 않는다(설비 상각 없음).

음이온 교환막 수전해(AEM)는 알칼라인 환경에서 음이온 교환막을 쓰는 기술로, PEM의 컴팩트한 셀 구조와 AWE의 비귀금속 촉매 사용 가능성을 함께 갖는다. 상용 제품은 kW~MW급 모듈 단계이며, 시스템 수준 설비 목록(BOM) 공개 자료가 매우 적다.

(2) 시장조사 및 대상업체 선정

현재 수전해 기술 시장은 상업화 초기 단계이며, 설비 제조사의 BOP 설비 목록(BOM)과 운전 데이터는 대부분 공개되지 않는다. 따라서 특정 제조업체의 시장 점유율이나 생산량을 기준으로 대표 기업을 선정하는 것은 현재 단계에서 불가능하다.
본 LCI 모듈은 특정 상용 제품이 아닌, 공개 학술 문헌 · 공공 보고서를 기반으로 한 '기술 대표' 목록을 구축하는 것을 목표로 하며, 향후 국내 설비 데이터가 확보되면 보완 · 개정될 기초 데이터베이스이다.
운영 투입량은 2021~2026년 문헌 조사에서 시스템 경계(인도 압력, 압축 · 냉각수 포함 여부 등)가 같은 값만 모아, 독립 출처가 2건 이상이면 기하평균, 1건이면 해당 값을 대표값으로 선정하였다.
조사 · 채택 문헌: Enapter Multicore 2023; NEWELY D6.3 2023; Schropp et al. 2024; Wei et al. 2024

(3) 기능단위 설정

	내용	
기능	국가 에너지 공급을 위한 수소 생산	
기능단위	AEM 기술을 통한 수소 1 kg 생산(설비 제조 제외)	
기준흐름	AEM 기술로 생산되는 수소 1 kg	

(4) 시스템 경계

	원료채취	물질/제품 제조		사용		폐기		재활용
	Raw material extraction	Transportation	Product manufactuing	Use	Maintenance	Transportation	Final disposal	Transportation
공정	●	×	●	×	×	×	×	×

원료채취(전력 · 용수 · 약품의 상위 생산)와 제품(수소) 제조를 포함한다. 설비(스택 · BOP) 제조는 별도 데이터셋이다. 원료 운송은 사용한 시장 데이터셋에 평균 운송이 포함되어 있어 전경에 별도로 추가하지 않았고(×), 제품 운송 · 설치는 설치 장소가 특정되지 않은 기술 대표 데이터이므로 제외하였다. 근로자 편의시설 · 사무공간 등 생산과 직접 관련 없는 활동은 제외하였다. 스택은 2차년도 LCI DB에서 별도로 구축하였으므로 본 모듈에서 제외하였다.

(5) 제외 기준

대표 문헌이 보고한 모든 투입물과 산출물을 질량 · 에너지 기여도와 관계없이 포함하는 것을 원칙으로 하였다. 대표 문헌이 보고하지 않은 항목은 임의로 채우지 않았다(가정 및 제한사항 참조).
스택은 2차년도 LCI DB에서 별도로 구축하였으므로 본 모듈에서 제외하였다.
근로자 편의시설 · 사무공간 등 생산과 직접 관련 없는 활동은 제외하였다.
사용값이 0인 항목(질소 퍼지 미사용)은 인벤토리에서 제외하였다.

(6) 데이터 범주

	구분		물질명
투입	원료물질		
	보조물질		KOH (0.1M 원문), 황산 중화, 팔라듐, 알루미나, 제올라이트
	용수		직접 용수(DI)
	에너지		시스템 전력
산출	제품		hydrogen
	부산물(할당)		
	잔여물	매립	폐촉매 처리
		소각	
		재활용	
	배출물	대기	산소 대기방출, 폐열 대기방출
		수계	중화 후 폐수 처리, 공정 폐수 처리
		토양	

(7) 데이터 품질 평가 출처

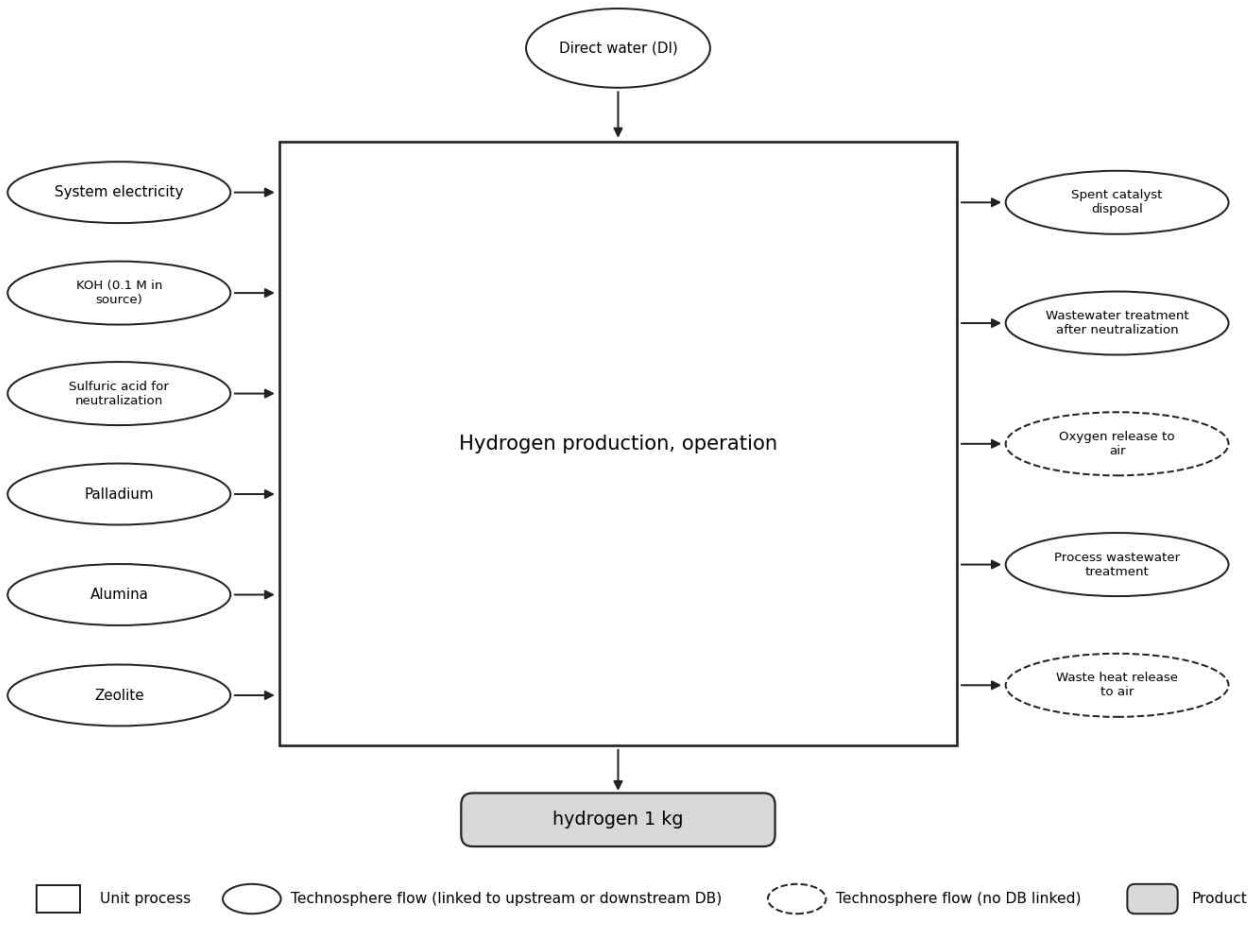
	특정데이터	일반데이터
정밀도(P)		
시간적 대표성(TiR)		2.00
지역적 대표성(GeR)		1.00
기술적 대표성(TeR)		2.00
Total DQR		1.67 (매우 좋음)

(8) 가정 및 제한사항

	내용
공통사항	• 대상제품 생산 활동데이터는 현장데이터 수집이 불가하여 공개 문헌데이터를 사용하였다. • 기술별로 단일 대표 문헌의 보고 범위를 따르며, 대표 문헌이 보고하지 않은 설비 · 투입물을 다른 문헌이나 다른 기술의 값으로 채우지 않았다. • 배경(상위흐름) 데이터는 ecoinvent 3.12 Cutoff System을 사용하고, 한국 공급 우선순위(KR → Asia → RoW → GLO)로 연결하였다. 한국 데이터셋이 없는 재료 · 가공은 GLO/RoW 시장 데이터셋을 사용하였다. • 원료 운송은 전경 공정에 별도로 추가하지 않았다. 사용한 ecoinvent 시장(market) 데이터셋에 평균 운송이 포함되어 있으며, 대표 문헌이 공급처 · 운송거리를 보고하지 않아 전경 운송을 추가하면 이중계상 또는 근거 없는 가정이 된다. KTR 「LCI DB 구축 가이드라인」 표 4는 자원/원료 수송을 필수 수집 범주로 두되, 데이터 수집이 어렵거나 영향이 미미한 경우 제외 물질과 사유를 보고서에 명시하도록 하므로(p.10~11) 이에 따라 제외 사유를 기재한다. • 제품 운송 · 설치는 설치 장소가 정해지지 않은 기술 대표 데이터셋이므로 제외하였다.
AEM 운영	• 운영 전력 · 용수는 NEWELY D6.3과 제조사(Enapter) 자료의 기하평균이다. NEWELY 전력은 광범위 시험 전 추정값이고 Enapter는 초기(BOL) 사양으로, 독립 실측값이 아니다. • 운영 전력은 국가 LCI DB 태양광(LCI-2022-004, 0.1283 kg CO_2 -eq/kWh) 91.2 %와 풍력(LCI-2022-028, 0.0183 kg CO_2 -eq/kWh) 8.8 %를 EPSIS 2025 발전량 비중(91.18 % : 8.82 %)으로 합성한 재생 믹스(openLCA EF 3.1 산정 0.1185 kg CO_2 -eq/kWh)로 연결하였다. 계통 전력(국가 LCI DB LCI-2022-023, 0.530 kg CO_2 -eq/kWh)을 적용하면 기후변화 결과는 6.42에서 28.6 kg CO_2 -eq/kg H_2 (약 4.5배)가 된다. 국가 LCI DB 태양광 · 풍력 데이터셋의 유효기간(2024)은 지났으며, 구축 시점에 확인한 최신본을 사용하였다. • 약품(KOH · 황산) · 촉매(Pd · 알루미나) · 흡착제(제올라이트) · 폐촉매 · 폐수는 NEWELY 단일 출처이다. 알루미나(촉매 담체)는 담체 전용 데이터셋이 없어, 알루미늄 제련용이 아닌 화학 · 촉매 등급 산화알루미늄 데이터셋(aluminium oxide, non-metallurgical)을 proxy로 사용하였다. 담체 성형 공정은 반영하지 않았다. • 냉각수는 경계에서 제외하였다. 질소 퍼지는 제조사 설계(no-purge)상 사용값이 0이므로 인벤토리에서 제외하였다. • 폐촉매는 국가 LCI DB 지정폐기물 매립, 중화 폐수는 국가산단 폐수처리 데이터셋으로 처리하였으며, 원문 처리 방식과의 동등성은 가정이다. • 폐촉매(2.27E-05 kg/kg H_2)의 매립장 수송은 포함하지 않았다. KTR 가이드라인 표 4는 최종폐기 수송을 필수로 하고 자료가 없으면 평균 수송거리 30 km 적용을 제시하나, 투입량이 극미량이고 결과 영향이 미미하여 제외하며 가이드라인 p.10에 따라 제외 물질과 사유를 본 항에 명시한다. 중화 폐수(9.59E-08 m^3)도 별도 수송을 고려하지 않았다.

5 물질 흐름(상세 정보)

(1) 공정흐름도 작성



(2) 데이터 수집 및 계산

[1] 데이터 수집

구분			물질명	데이터 구분				LCI DB		
				실측	계산	추정	일반	명칭	출처	연도
투입	원료물질									
	에너지		시스템 전력				●	electricity production, renewable mix, photovoltaic 91.2% wind 8.8%, EPSIS 2025 (KR)	국가 LCI DB (LCI-2022-004, LCI-2022-028)	2022(데이터 2021)
	용수		직접 용수(DI)				●	순수(탈이온수) / Deionized water (KR)	국가 LCI DB (LCI-2022-118)	2022(데이터 2021)
	보조물질		KOH (0.1M 원문)				●	market for potassium hydroxide (GLO)	ecoinvent 3.12 Cutoff	2011-2025
	보조물질		황산 중화				●	market for sulfuric acid (RoW)	ecoinvent 3.12 Cutoff	2011-2025
	보조물질		팔라듐				●	market for palladium (GLO)	ecoinvent 3.12 Cutoff	2011-2025
	보조물질		알루미나				●	market for aluminium oxide, non-metallurgical (RoW)	ecoinvent 3.12 Cutoff	2015-2025
	보조물질		제올라이트				●	market for zeolite, powder (GLO)	ecoinvent 3.12 Cutoff	2011-2025
	수송									
산출	제품		hydrogen							
	부산물									
	폐기물	매립	폐촉매 처리				●	지정폐기물 매립처리 / Sanitary landfill, hazardous waste (KR)	국가 LCI DB (LCI-2023-198)	2023(데이터 2022)
		대기	산소 대기방출				●			
			폐열 대기방출				●			
		수계	중화 후 폐수 처리				●	국가산단 폐수처리(평균) / Wastewater treatment, industrial complex,average (KR)	국가 LCI DB (LCI-2023-192)	2023(데이터 2022)
			공정 폐수 처리				●	국가산단 폐수처리(평균) / Wastewater treatment, industrial complex,average (KR)	국가 LCI DB (LCI-2023-192)	2023(데이터 2022)

[2] 데이터 할당

본 데이터셋은 수소 1 kg만을 산출물로 모델링하여 할당을 수행하지 않았다. 산소는 대기 배출 기본흐름으로 기재하였으며 부산물로 보지 않아 할당 및 환경부담 공제를 적용하지 않았다.

구분		물질명	할당인자
1	대상 모듈공정	hydrogen	100%
2	부산물		-

[3] 데이터 계산

구분		내용
1	상 · 하위 흐름 연결을 위한 계산	openLCA 2.7.0에서 배경 provider를 UUID로 직접 지정. 물질별 기여(투입량 × 공급 공정 1단위당 상류 포함 영향)의 합이 openLCA 계산 총량과 일치함을 확인하였다.
2	물질수지/물수지 검증 및 조정	직접 용수(DI) 10.13 kg/kg H_2 는 화학양론 소요량(8.94 kg)보다 13.3% 많다. 냉각수는 경계 제외이다. 산출 측으로 수소 · 산소 · 공정 폐수 · 중화 후 폐수 · 폐열를 문헌값으로 기재하였으나, 투입수 대표값(기하평균)과 산출 문헌값(단일출처)의 출처 조합이 달라 물수지(투입수 − 수소 · 누출 · 산소 · 폐수)에 +0.78 kg/kg H_2 의 불일치가 남는다(수전해 db 기준_가정 B55). 누락 흐름을 계산으로 만들지 않았으며, 냉각수(경계 제외)는 자료가 없어 KTR 가이드라인 p.16의 물수지(공정수 + 냉각수 + 기타 = 수계배출물 + 제품 함수량 + 증기량)는 완결되지 않는다. 운영 대표값(기하평균)은 독립 재계산으로 확인하였다.
3	연료 연소에 따른 배출량 계산	[미해당] 본 공정은 전경에서 연료를 연소하지 않는다.

(3) 물질 투입 · 산출표

	구분	물질명	데이터 출처				양	단위
			실측	계산	추정	일반		
투입	원료물질							
	에너지	시스템 전력				●	54	kWh
	용수	직접 용수(DI)				●	10.13	kg
	보조물질	KOH (0.1M 원문)				●	3.20E−05	kg
	보조물질	황산 중화				●	2.86E−05	kg
	보조물질	팔라듐				●	6.80E−08	kg
	보조물질	알루미나				●	2.26E−05	kg
	보조물질	제올라이트				●	1.94E−05	kg
산출	제품	hydrogen					1	kg
	폐기물	폐촉매 처리				●	2.27E−05	kg
	폐기물	중화 후 폐수 처리				●	9.59E−08	m3
	폐기물	공정 폐수 처리				●	3.47E−04	m3
	배출물	산소 대기방출				●	8.004	kg
	배출물	폐열 대기방출				●	47.95	MJ

(4) 목록분석 결과

* 별도 엑셀파일 참조

6 환경영향평가 결과

(1) 영향평가 정보

	지표	내용
1	평가 소프트웨어	openLCA 2.7.0
2	평가 방법론	Environmental footprint 3.1 (EF v3.1, ecoinvent 3.12 Methods)
3	배경 데이터베이스	ecoinvent 3.12 Cutoff System (2026-04-14) + 국가 LCI DB
4	계산 대상	openLCA 공정 hydrogen production, AEM electrolysis, from renewable electricity (수소 1 kg)

(2) 영향평가 결과

[1] 영향범주별 평가 결과

	영향범주	지표	단위	평가결과	기여도(%)
1	*Acidification*	Accumulated Exceedance (AE)	mol H+-Eq	4.68E-02	시스템 전력(98.9%), 팔라듐(1.0%), 직접 용수(DI)(0.1%), KOH (0.1M 원문)(0.0%), 제올라이트(0.0%), 황산 중화(0.0%), 알루미나(0.0%), 공정 폐수 처리(0.0%), 폐촉매 처리(0.0%), 중화 후 폐수 처리(0.0%), 산소 대기방출(0.0%), 폐열 대기방출(0.0%)
2	*Climate change*	Radiative forcing as Global Warming Potential (GWP100)	kg CO2-Eq	6.42E+00	시스템 전력(99.7%), 직접 용수(DI)(0.2%), 팔라듐(0.0%), KOH (0.1M 원문)(0.0%), 공정 폐수 처리(0.0%), 제올라이트(0.0%), 알루미나(0.0%), 황산 중화(0.0%), 폐촉매 처리(0.0%), 중화 후 폐수 처리(0.0%), 산소 대기방출(0.0%), 폐열 대기방출(0.0%)
3	*Climate change: biogenic*	GWP100	kg CO2-Eq	4.57E-02	시스템 전력(99.5%),

					직접 용수(DI)(0.4%), 공정 폐수 처리(0.0%), 폐촉매 처리(0.0%), 팔라듐(0.0%), KOH (0.1M 원문)(0.0%), 제올라이트(0.0%), 알루미나(0.0%), 황산 중화(0.0%), 중화 후 폐수 처리(0.0%), 산소 대기방출(0.0%), 폐열 대기방출(0.0%)
4	*Climate change: fossil*	GWP100	kg CO2-Eq	6.36E+00	시스템 전력(99.7%), 직접 용수(DI)(0.2%), 팔라듐(0.0%), KOH (0.1M 원문)(0.0%), 공정 폐수 처리(0.0%), 제올라이트(0.0%), 알루미나(0.0%), 황산 중화(0.0%), 폐촉매 처리(0.0%), 중화 후 폐수 처리(0.0%), 산소 대기방출(0.0%), 폐열 대기방출(0.0%)
5	*Climate change: land use and land use change*	GWP100	kg CO2-Eq	1.65E-02	시스템 전력(99.7%), 직접 용수(DI)(0.3%), 팔라듐(0.0%), 공정 폐수 처리(0.0%), KOH (0.1M 원문)(0.0%), 제올라이트(0.0%), 알루미나(0.0%), 황산 중화(0.0%), 폐촉매 처리(0.0%), 중화 후 폐수 처리(0.0%), 산소 대기방출(0.0%), 폐열 대기방출(0.0%)
6	*Ecotoxicity: freshwater*	Comparative Toxic Unit for ecosystems (CTUe)	CTUe	5.78E+01	시스템 전력(99.7%), 직접 용수(DI)(0.3%), 팔라듐(0.1%), KOH (0.1M 원문)(0.0%), 제올라이트(0.0%), 공정 폐수 처리(0.0%), 황산 중화(0.0%), 알루미나(0.0%), 폐촉매 처리(0.0%), 중화 후 폐수 처리(0.0%), 산소 대기방출(0.0%), 폐열 대기방출(0.0%)
7	*Ecotoxicity: freshwater, inorganics*	Comparative Toxic Unit for ecosystems (CTUe)	CTUe	5.57E+01	시스템 전력(99.7%), 직접 용수(DI)(0.3%), 팔라듐(0.1%), KOH (0.1M 원문)(0.0%), 제올라이트(0.0%),

					공정 폐수 처리(0.0%), 황산 중화(0.0%), 알루미나(0.0%), 폐촉매 처리(0.0%), 중화 후 폐수 처리(0.0%), 산소 대기방출(0.0%), 폐열 대기방출(0.0%)
8	*Ecotoxicity: freshwater, organics*	Comparative Toxic Unit for ecosystems (CTUe)	CTUe	2.09E+00	시스템 전력(99.7%), 직접 용수(DI)(0.3%), 팔라듐(0.0%), 공정 폐수 처리(0.0%), 알루미나(0.0%), 제올라이트(0.0%), KOH (0.1M 원문)(0.0%), 황산 중화(0.0%), 폐촉매 처리(0.0%), 중화 후 폐수 처리(0.0%), 산소 대기방출(0.0%), 폐열 대기방출(0.0%)
9	*Energy resources: non-renewable*	Abiotic resource depletion - fossil fuels (ADP-fossil)	MJ, net calorific value	9.20E+01	시스템 전력(99.7%), 직접 용수(DI)(0.3%), 팔라듐(0.0%), KOH (0.1M 원문)(0.0%), 공정 폐수 처리(0.0%), 제올라이트(0.0%), 알루미나(0.0%), 황산 중화(0.0%), 폐촉매 처리(0.0%), 중화 후 폐수 처리(0.0%), 산소 대기방출(0.0%), 폐열 대기방출(0.0%)
10	*Eutrophication: freshwater*	Fraction of nutrients reaching freshwater end compartment (P)	kg P-Eq	2.99E-03	시스템 전력(99.8%), 직접 용수(DI)(0.1%), 팔라듐(0.1%), 공정 폐수 처리(0.0%), KOH (0.1M 원문)(0.0%), 제올라이트(0.0%), 알루미나(0.0%), 황산 중화(0.0%), 폐촉매 처리(0.0%), 중화 후 폐수 처리(0.0%), 산소 대기방출(0.0%), 폐열 대기방출(0.0%)
11	*Eutrophication: marine*	Fraction of nutrients reaching marine end compartment (N)	kg N-Eq	7.15E-03	시스템 전력(99.7%), 직접 용수(DI)(0.1%), 팔라듐(0.1%), KOH (0.1M 원문)(0.0%), 제올라이트(0.0%), 공정 폐수 처리(0.0%), 알루미나(0.0%), 황산 중화(0.0%), 폐촉매

					처리(0.0%), 중화 후 폐수 처리(0.0%), 산소 대기방출(0.0%), 폐열 대기방출(0.0%)
12	*Eutrophication: terrestrial*	Accumulated Exceedance (AE)	mol N-Eq	1.32E-01	시스템 전력(99.8%), 팔라듐(0.1%), 직접 용수(DI)(0.1%), KOH (0.1M 원문)(0.0%), 제올라이트(0.0%), 공정 폐수 처리(0.0%), 알루미나(0.0%), 황산 중화(0.0%), 폐촉매 처리(0.0%), 중화 후 폐수 처리(0.0%), 산소 대기방출(0.0%), 폐열 대기방출(0.0%)
13	*Human toxicity: carcinogenic*	Comparative Toxic Unit for humans (CTUh)	CTUh	5.48E-09	시스템 전력(99.9%), 직접 용수(DI)(0.1%), KOH (0.1M 원문)(0.0%), 팔라듐(0.0%), 제올라이트(0.0%), 알루미나(0.0%), 공정 폐수 처리(0.0%), 황산 중화(0.0%), 폐촉매 처리(0.0%), 중화 후 폐수 처리(0.0%), 산소 대기방출(0.0%), 폐열 대기방출(0.0%)
14	*Human toxicity: carcinogenic, inorganics*	Comparative Toxic Unit for humans (CTUh)	CTUh	3.20E-09	시스템 전력(99.9%), 직접 용수(DI)(0.1%), 팔라듐(0.0%), 제올라이트(0.0%), KOH (0.1M 원문)(0.0%), 공정 폐수 처리(0.0%), 황산 중화(0.0%), 알루미나(0.0%), 폐촉매 처리(0.0%), 중화 후 폐수 처리(0.0%), 산소 대기방출(0.0%), 폐열 대기방출(0.0%)
15	*Human toxicity: carcinogenic, organics*	Comparative Toxic Unit for humans (CTUh)	CTUh	2.29E-09	시스템 전력(99.9%), 직접 용수(DI)(0.1%), KOH (0.1M 원문)(0.0%), 팔라듐(0.0%), 제올라이트(0.0%), 알루미나(0.0%), 공정 폐수 처리(0.0%), 황산 중화(0.0%), 폐촉매 처리(0.0%), 중화 후 폐수 처리(0.0%), 산소

					대기방출(0.0%), 폐열 대기방출(0.0%)
16	*Human toxicity: non-carcinogenic*	Comparative Toxic Unit for humans (CTUh)	CTUh	1.91E-07	시스템 전력(99.8%), 직접 용수(DI)(0.2%), 팔라듐(0.0%), KOH (0.1M 원문)(0.0%), 제올라이트(0.0%), 황산 중화(0.0%), 공정 폐수 처리(0.0%), 알루미나(0.0%), 폐촉매 처리(0.0%), 중화 후 폐수 처리(0.0%), 산소 대기방출(0.0%), 폐열 대기방출(0.0%)
17	*Human toxicity: non-carcinogenic, inorganics*	Comparative Toxic Unit for humans (CTUh)	CTUh	1.86E-07	시스템 전력(99.8%), 직접 용수(DI)(0.2%), 팔라듐(0.0%), KOH (0.1M 원문)(0.0%), 제올라이트(0.0%), 황산 중화(0.0%), 공정 폐수 처리(0.0%), 알루미나(0.0%), 폐촉매 처리(0.0%), 중화 후 폐수 처리(0.0%), 산소 대기방출(0.0%), 폐열 대기방출(0.0%)
18	*Human toxicity: non-carcinogenic, organics*	Comparative Toxic Unit for humans (CTUh)	CTUh	5.13E-09	시스템 전력(99.8%), 팔라듐(0.1%), 직접 용수(DI)(0.1%), KOH (0.1M 원문)(0.0%), 공정 폐수 처리(0.0%), 황산 중화(0.0%), 제올라이트(0.0%), 알루미나(0.0%), 폐촉매 처리(0.0%), 중화 후 폐수 처리(0.0%), 산소 대기방출(0.0%), 폐열 대기방출(0.0%)
19	*Ionising radiation: human health*	Human exposure efficiency relative to U	kBq U235-Eq	7.34E-01	시스템 전력(99.5%), 직접 용수(DI)(0.5%), 팔라듐(0.0%), 공정 폐수 처리(0.0%), KOH (0.1M 원문)(0.0%), 제올라이트(0.0%), 알루미나(0.0%), 황산 중화(0.0%), 폐촉매 처리(0.0%), 중화 후 폐수 처리(0.0%), 산소 대기방출(0.0%), 폐열 대기방출(0.0%)

20	*Land use*	Soil quality index	dimensionless	2.27E+01	시스템 전력(99.7%), 직접 용수(DI)(0.2%), 팔라듐(0.1%), KOH (0.1M 원문)(0.0%), 제올라이트(0.0%), 공정 폐수 처리(0.0%), 알루미나(0.0%), 황산 중화(0.0%), 폐촉매 처리(0.0%), 중화 후 폐수 처리(0.0%), 산소 대기방출(0.0%), 폐열 대기방출(0.0%)
21	*Material resources: metals/minerals*	Abiotic resource depletion (ADP ultimate reserves)	kg Sb-Eq	3.00E-04	시스템 전력(99.9%), 직접 용수(DI)(0.0%), 팔라듐(0.0%), KOH (0.1M 원문)(0.0%), 황산 중화(0.0%), 제올라이트(0.0%), 알루미나(0.0%), 공정 폐수 처리(0.0%), 폐촉매 처리(0.0%), 중화 후 폐수 처리(0.0%), 산소 대기방출(0.0%), 폐열 대기방출(0.0%)
22	*Ozone depletion*	Ozone Depletion Potential (ODP)	kg CFC-11-Eq	4.10E-07	시스템 전력(99.7%), 직접 용수(DI)(0.3%), 팔라듐(0.0%), 제올라이트(0.0%), KOH (0.1M 원문)(0.0%), 공정 폐수 처리(0.0%), 알루미나(0.0%), 황산 중화(0.0%), 폐촉매 처리(0.0%), 중화 후 폐수 처리(0.0%), 산소 대기방출(0.0%), 폐열 대기방출(0.0%)
23	*Particulate matter formation*	Human health effects associated with exposure to PM2.5.	disease incidence	5.56E-07	시스템 전력(99.8%), 팔라듐(0.1%), 직접 용수(DI)(0.1%), KOH (0.1M 원문)(0.0%), 공정 폐수 처리(0.0%), 제올라이트(0.0%), 알루미나(0.0%), 황산 중화(0.0%), 폐촉매 처리(0.0%), 중화 후 폐수 처리(0.0%), 산소 대기방출(0.0%), 폐열 대기방출(0.0%)
24	*Photochemical oxidant formation: human health*	Tropospheric ozone concentration increase	kg NMVOC-Eq	2.44E-02	시스템 전력(99.7%), 팔라듐(0.2%), 직접 용수(DI)(0.1%), KOH (0.1M 원문)(0.0%), 제올라이트(0.0%),

					알루미나(0.0%), 공정 폐수 처리(0.0%), 황산 중화(0.0%), 폐촉매 처리(0.0%), 중화 후 폐수 처리(0.0%), 산소 대기방출(0.0%), 폐열 대기방출(0.0%)
25	*Water use*	*User deprivation potential (deprivation-weighted water consumption)*	*m3 world Eq deprived*	*8.35E+00*	*시스템 전력(99.9%), 직접 용수(DI)(0.1%), 팔라듐(0.0%), 공정 폐수 처리(0.0%), KOH (0.1M 원문)(0.0%), 제올라이트(0.0%), 황산 중화(0.0%), 알루미나(0.0%), 폐촉매 처리(0.0%), 중화 후 폐수 처리(0.0%), 산소 대기방출(0.0%), 폐열 대기방출(0.0%)*

[2] 물질별 영향평가 결과

	구분	흐름	물질명	목록		평가결과 (kg CO_2 eq.)	기여도(%)
				양	단위		
1	투입	중간	시스템 전력	54	kWh	6.40E+00	99.74
2	투입	중간	직접 용수(DI)	10.13	kg	1.43E-02	0.22
3	투입	중간	KOH (0.1M 원문)	3.20E-05	kg	1.51E-04	0.00
4	투입	중간	황산 중화	2.86E-05	kg	4.72E-06	0.00
5	투입	중간	팔라듐	6.80E-08	kg	2.10E-03	0.03
6	투입	중간	알루미나	2.26E-05	kg	2.46E-05	0.00
7	투입	중간	제올라이트	1.94E-05	kg	9.82E-05	0.00
8	산출	중간	폐촉매 처리	2.27E-05	kg	4.24E-06	0.00
9	산출	중간	중화 후 폐수 처리	9.59E-08	m3	3.63E-08	0.00
10	산출	기본	산소 대기방출	8.004	kg	0	0.00
11	산출	중간	공정 폐수 처리	3.47E-04	m3	1.31E-04	0.00
12	산출	기본	폐열 대기방출	47.95	MJ	0	0.00
13	산출	중간	hydrogen	1	kg	합계 6.42E+00	100.00

8 참고자료

1) *NEWELY Consortium. TEA and LCA of the new AEMWE Technology (Deliverable D6.3), Next Generation Alkaline Membrane Water Electrolysers with Improved Components and Materials, 2023, Clean Hydrogen Partnership. https://doi.org/10.5281/zenodo.8289584*

2) *Enapter. AEM Multicore 제품 데이터시트, 2023.*

3) *Wei, X.; Sharma, S.; Waeber, A.; et al. Comparative life cycle analysis of electrolyzer technologies for hydrogen production: Manufacturing and operations. Joule 2024, 8(12), 3347-3372.*

4) *Schropp et al. 2024*

5) *환경부 · 한국환경산업기술원. 국가 LCI 데이터베이스(LCI-2022-004 태양광, LCI-2022-028 풍력, LCI-2022-118 순수, LCI-2023-192 국가산단 폐수처리, LCI-2023-198 지정폐기물 매립, LCI-2022-023 계통 전력(비교용)).*

6) *Ciroth, A. (GreenDelta) Refining the pedigree matrix approach in ecoinvent, 2013.*

9 사용 LCI DB 목록

	물질명	LCI DB 명	국가명	출처	년도	유효기간
1	시스템 전력	electricity production, renewable mix, photovoltaic 91.2% wind 8.8%, EPSIS 2025	KR	국가 LCI DB (LCI-2022-004, LCI-2022-028)	2022(데이터 2021)	2024
2	직접 용수(DI)	순수(탈이온수) / Deionized water	KR	국가 LCI DB (LCI-2022-118)	2022(데이터 2021)	2025
3	KOH (0.1M 원문)	market for potassium hydroxide	GLO	ecoinvent 3.12 Cutoff	2011	2025
4	황산 중화	market for sulfuric acid	RoW	ecoinvent 3.12 Cutoff	2011	2025
5	팔라듐	market for palladium	GLO	ecoinvent 3.12 Cutoff	2011	2025
6	알루미나	market for aluminium oxide, non-metallurgical	RoW	ecoinvent 3.12 Cutoff	2015	2025
7	제올라이트	market for zeolite, powder	GLO	ecoinvent 3.12 Cutoff	2011	2025
8	폐촉매 처리	지정폐기물 매립처리 / Sanitary landfill, hazardous waste	KR	국가 LCI DB (LCI-2023-198)	2023(데이터 2022)	2025
9	중화 후 폐수 처리	국가산단 폐수처리(평균) / Wastewater treatment, industrial complex,average	KR	국가 LCI DB (LCI-2023-192)	2023(데이터 2022)	2025
10	공정 폐수 처리	국가산단 폐수처리(평균) / Wastewater treatment, industrial complex,average	KR	국가 LCI DB (LCI-2023-192)	2023(데이터 2022)	2025

KTR 검토 반영내역

No	구분	검토의견	반영내용
1	공통	영향평가 값 차이(22.2 kg CO_2 e)	전력 데이터셋 차이입니다. 본 DB는 재생 믹스(태양광 91.2 % + 풍력 8.8 %, 0.1185 kg CO_2 e/kWh)를 썼고, 검토값은 계통 전력(0.530)으로 다시 계산한 값과 0.3 % 안에서 같습니다. 결과표 정정을 요청드립니다: 28.6 → 6.42 kg CO_2 e. 보고서에 전력 데이터셋 · 계수와 계통 전력 적용 시 값을 적었습니다.
2	공통	태양광 20년 · 30년 중 무엇인지	국가 LCI DB 태양광(LCI-2022-004) 원 데이터를 그대로 썼고, 수명은 따로 가정하지 않았습니다.
3	자체 정정	-	10/21 물질수지 보완으로 운영 4건에 산소 · 폐수 · 폐열 산출을 추가했고(제출한 목록분석결과 엑셀에 반영), 보고서 서술을 이에 맞춰 고쳤습니다. 기후변화 결과 변화는 0.03 % 이하입니다(⑥ 6.90 → 6.91).
4	공통	용수 · 폐기물 DB명을 검색 가능한 이름으로	국가 LCI DB(에코스퀘어) 검색명으로 바꿨습니다(순수(탈이온수), 공업용수(평균), 지정폐기물 매립처리, 국가산단 폐수처리(평균)). 폐수는 공정 폐수라 데이터셋은 국가산단 폐수처리(LCI-2023-192)를 유지했습니다. 예로 드신 하수처리는 생활하수 데이터셋(LCI-2023-210)이며, 바꿔도 결과 차이는 1E-05 kg CO_2 e 미만입니다.
5	개별	알루미나 보충설명	촉매 담체용 데이터가 없어 화학 · 촉매 등급 알루미나로 대리했다고 보충했습니다.
6	공통	검토 DQR은 참고용	참고하겠습니다.