

VOLTACERA White Paper Series

Chapter 2

고온 수전해의 도전:

왜 SOEC가 그린수소 경쟁의 게임체인저인가

Voltacera Research | 2026년 8월

VoltaCera

요약 (Executive Summary)

2050 탄소중립 목표가 구체적인 산업 과제로 전환되면서, 그린수소는 철강·화학·모빌리티·발전 분야의 탈탄소화 경로를 잇는 핵심 매개체로 부상하고 있습니다. 그러나 그린수소의 대량 보급을 가로막는 핵심 병목은 생산 기술의 효율성과 비용입니다. 현재 상업적으로 검증된 수전해 기술인 알칼라인(ALK)과 양성자교환막(PEM) 방식은 각각의 장점에도 불구하고, 전력 소비 효율과 고온 폐열 활용이라는 측면에서 구조적 한계를 안고 있습니다.

고체산화물 전해조(SOEC)는 이 한계를 열역학적으로 넘어섭니다. 600~900°C의 고온에서 작동하는 SOEC는 물 분자를 분해하는 데 필요한 전기 에너지 일부를 열로 대체하고, 산업 공정에서 발생하는 폐열을 직접 투입함으로써 시스템 전체의 에너지 효율을 근본적으로 높입니다. 여기에 CO₂와 H₂O를 동시에 전해하는 Co-electrolysis 능력은 ALK나 PEM에서는 구현할 수 없는 e-메탄올, e-암모니아 등 차세대 e-fuel 합성의 출발점이 됩니다.

본 챕터의 핵심 내용은 다음과 같습니다.

- SOEC의 시스템 효율은 폐열 연계 시 최대 85~90%에 달하며, 이는 ALK(65~75%) 및 PEM(70~80%) 대비 구조적으로 높은 수치입니다.
- Co-electrolysis를 통한 합성가스(Syngas) 직접 생산은 기존 수전해 기술(PEM이나 ALK)이 제공하지 못하는 고유한 경쟁 우위입니다.
- 글로벌 주요 플레이어(Sunfire, Topsøe, Bloom Energy, Ceres Power, thyssenkrupp nucera)의 기술 로드맵은 SOEC의 기가와트급 상업화 경로를 뚜렷이 보여주고 있습니다.
- Voltacera는 SOFC와 동일한 세라믹 플랫폼으로 SOEC를 구현함으로써, 단일 기술 기반 위에서 발전·수소 생산·열 공급을 통합하는 온사이트 에너지 허브 모델을 지향합니다.

1. 서론: 수전해 시장의 구조적 전환 – 왜 지금 그린수소인가

2.1 탄소중립이 만들어낸 수소 수요

IEA의 2023년 넷제로(Net Zero) 시나리오에 따르면, 2050년까지 글로벌 수소 수요는 연간 약 5억 2,000만 톤에 달할 것으로 전망됩니다. 이 가운데 그린수소(재생에너지 기반 수전해)가 차지하는 비중은 현재 사실상 0%에서 2050년 전체의 40% 이상으로 급증해야 합니다. 2023년 말 전 세계 수전해 설비는 약 1.4 GW에 불과했지만, IEA의 Net Zero Emissions 시나리오에서는 2030년 약 560 GW가 요구됩니다. 발표된 프로젝트를 모두 합하면 약 520 GW에 이르지만, 상당수는 아직 초기 개발 단계에 머물러 있습니다.

수요 측면에서의 요구는 더 구체적입니다. 유럽연합은 2030년까지 역내 그린수소 생산 10 Mt 및 수입 10 Mt를 목표로 하는 REPowerEU 계획을 시행하고 있으며, 한국은 2030년 그린수소 25만 톤 생산을 국가 수소 로드맵에 명시했습니다. 미국의 인플레이션 감축법(IRA)은 kg당 최대 3달러의 청정수소 세액공제(\$45V)를 통해 그린수소 생산 원가를 1.5~2달러/kg 수준으로 끌어내릴 수 있는 조건을 만들었습니다.

2.2 현재 수전해 시장의 한계와 기회

글로벌 수전해 시장은 2023년 약 3조 원 규모에서 2030년 40조 원, 2040년 200조 원 이상으로 성장할 것으로 전망됩니다. 그러나 현재 시장을 지배하는 알칼라인(ALK)과 PEM 기술은 각각 구조적 제약을 안고 있으며, 이는 고온 수전해(SOEC/AEM)가 치고 들어올 수 있는 공간을 만들어내고 있습니다.

ALK는 성숙한 기술과 낮은 초기 투자 비용을 강점으로 하지만, 전류 밀도가 낮고 부하 변동 대응이 느려 재생에너지와의 직접 연계에 한계가 있습니다. PEM은 빠른 응답성과 높은 전류 밀도를 제공하지만, 백금족 촉매에 대한 의존성이 높고 스택 수명이 ALK 대비 짧습니다. SOEC는 현재 상업화 초기 단계에 있지만, 고온 작동이 가져오는 열역학적 이점이 장기적인 비용 경쟁력의 핵심이 될 것으로 평가받고 있습니다.

2. 고온수전해의 열역학 – PEM·ALK 대비 근본적 이점

2.1 물 분해의 에너지 이론

물(H_2O)을 수소와 산소로 분해하는 데 필요한 총 에너지(ΔH)는 온도와 무관하게 약 286 kJ/mol로 일정합니다. 그러나 이 에너지가 전기(ΔG , 깁스 자유에너지)와 열($T\Delta S$, 엔트로피 기여분)로 어떻게 배분되는지는 온도에 따라 크게 달라집니다. 온도가 높아질수록 열 기여분($T\Delta S$)이 증가하고, 이에 따라 전기로 공급해야 하는 에너지(ΔG)는 줄어듭니다.

25°C(상온)에서는 총 에너지의 약 93%를 전기로 공급해야 합니다. 그러나 800°C에서는 이 비율이 약 70%로 낮아지며, 나머지 30%는 열로 충당할 수 있습니다. 이것이 SOEC가 전기 소비 측면에서 구조적으로 유리한 이유입니다. 고온 환경에서 반응 속도론(kinetics)도 개선되어 과전압(overpotential)이 감소하므로, 실제 운전 효율의 이점은 열역학적 이점보다 더 큼니다.

2.2 세 기술의 비교: ALK vs. PEM vs. SOEC

아래 표는 상업적으로 가장 널리 활용되는 세 가지 수전해 기술의 핵심 지표를 비교한 것입니다.

항목	ALK	PEM	SOEC
작동 온도	60~80°C	50~80°C	600~900°C
전해질	KOH 수용액	나피온(Nafion) 고분자	ScSZ/YSZ/GDC 세라믹
전기 효율 (LHV)	65~75%	70~80%	80~90%*
시스템 효율 (폐열 포함)	65~75%	70~80%	85~95%*
전류 밀도	0.2~0.5 A/cm ²	1.0~3.0 A/cm ²	0.3~1.0 A/cm ²
스택 수명	80,000~100,000h	50,000~80,000h	장기수명 검증 지속 (목표 80,000h)
부하 추종성	느림 (분 단위)	빠름 (초 단위)	제한적 (열 관성)
귀금속 촉매 의존	없음	높음 (Pt, Ir)	없음
Co-electrolysis	불가	불가	가능 (CO₂+H₂O→Syngas)
상업화 수준	성숙 (TRL 9)	성숙 (TRL 8~9)	초기 상업화 (TRL 6~8)

* 폐열(산업 공정열 또는 자체 발열) 연계 운전 기준. 전기 효율만 기준으로는 약 80~85% 수준.

2.3 고온이 가져오는 추가 이점

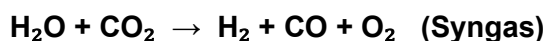
SOEC의 고온 작동은 단순히 전기 효율 개선에 그치지 않습니다. 높은 온도에서는 전극 반응의 활성화 에너지가 낮아져 귀금속 촉매 없이도 충분한 반응 속도를 달성할 수 있습니다. 이는 ALK 및 PEM 대비 소재 비용 구조에서 근본적인 이점을 제공합니다. 또한 SOEC 스택에서 발생하는 고온 폐열(600°C 이상)은 별도의 열교환기 없이 인근 산업 공정에 직접 공급하거나, 역으로 산업 공정의 폐열을 SOEC에 투입하는 통합 설계가 가능합니다. 이 열 통합 설계야말로 SOEC가 단독 수전해 설비가 아닌 산업 에너지 시스템의 핵심 노드로 기능할 수 있게 하는 근거입니다.

3. Co-electrolysis — CO₂+H₂O → Syngas, e-fuel의 가능성

3.1 Co-electrolysis 란 무엇인가

Co-electrolysis(공동 전해)는 SOEC의 고온 환경에서 수증기(H₂O)와 이산화탄소(CO₂)를 동시에 전해하여 합성가스(Syngas: H₂+CO 혼합물)를 직접 생산하는 기술입니다. 이 반응은 ALK나 PEM에서는 물리적으로 불가능합니다. 두 기술 모두 저온에서 작동하기 때문에 CO₂의 전기화학적 환원에 필요한 반응 속도론적 조건을 충족시키지 못하기 때문입니다.

Co-electrolysis의 반응식은 다음과 같습니다:



생성된 Syngas($H_2:CO$ 비율은 반응 조건에 따라 조정 가능)는 피셔-트롭쉬(Fischer-Tropsch) 합성을 통해 e-메탄올, e-암모니아, e-디젤, e-항공유(SAF) 등 다양한 e-fuel로 전환될 수 있습니다.

3.2 산업적 의미와 시장 기회

Co-electrolysis의 산업적 의미는 탄소 포집과 에너지 저장을 동시에 해결한다는 점에 있습니다. 철강·시멘트·화학 플랜트에서 불가피하게 배출되는 CO_2 를 포집하여 SOEC에 투입하면, 이를 단순 배출 또는 저장(CCS)하는 대신 고부가가치 연료로 전환할 수 있습니다. 이 접근법은 '탄소 순환 경제(Carbon Circular Economy)'의 핵심 기술 경로로 주목받고 있습니다.

시장 규모 측면에서도 Co-electrolysis는 단순 수소 생산 시장을 넘어서는 잠재력을 가집니다. e-fuel 시장은 2030년 약 20조 원에서 2050년 500조 원 이상으로 성장할 것으로 전망되며, 특히 탈탄소화가 어려운 항공·해운 분야에서의 수요가 핵심 동인이 될 것으로 보입니다. SOEC는 이 시장에서 현재 유일하게 상업적 규모로 접근 가능한 Co-electrolysis 기술입니다.

3.3 기술적 과제

Co-electrolysis는 SOEC의 가장 강력한 차별점이지만, 동시에 기술적 과제도 동반합니다. CO_2 와 H_2O 의 혼합 환경에서는 연료극(Ni-YSZ 서멧) 표면에 탄소 침적(coking)이 발생할 수 있으며, 이는 셀 성능 저하의 주요 원인이 됩니다. 이를 억제하기 위한 소재 개선(Ru 도핑, A-site 결핍 페로브스카이트 전극 등)과 운전 조건 최적화가 현재 글로벌 연구의 핵심 주제이기도 합니다.

4. SOEC 성능 지표 — 효율·열화율·내구성, 그리고 폐열 활용의 경제성

4.1 핵심 성능 지표 현황

SOEC의 상업적 경쟁력은 세 가지 핵심 성능 지표에 의해 결정됩니다: 전기 효율, 열화율(degradation rate), 스택 수명(lifetime). 현재 선도 기업들의 기술 수준과 중장기 목표는 다음과 같습니다.

지표	현재 수준	중장기 목표	비고
전기 효율 (LHV, 단독)	현재 80~85%	목표 85~90%	폐열 연계 시 추가 5~10%p 향상 가능
열화율 (셀 기준)	현재 1~3%/1,000h	목표 <0.5%/1,000h	수명 목표 달성의 핵심 과제
스택 수명	현재 10,000~20,000h	목표 80,000h 이상	ALK의 장수명에 근접하는 것이 목표
수소 생산 단가	현재 \$4~8/kg	목표 \$1.5~2/kg (2030)	IRA §45V와 결합 시 달성 가능

지표	현재 수준	증장기 목표	비고
(LCOH)			
스택 전력 밀도	0.5~1.0 W/cm ²	목표 1.5 W/cm ² 이상	설비 소형화·비용 절감의 레버

4.2 폐열 활용: SOEC의 숨겨진 경제성

SOEC의 경제성 분석에서 흔히 간과되는 요소가 폐열 활용입니다. SOEC는 작동 과정에서 600°C 이상의 고온 폐열을 지속적으로 발생시키며, 역으로 외부의 고온 열원을 직접 투입받을 수 있습니다. 이 양방향성이 SOEC를 산업 에너지 시스템과 통합할 때 특별한 경제적 가치를 만들어냅니다.

열 투입의 경제성

SOEC에 전기 대신 열을 투입하면, 동일한 수소 생산량을 위해 필요한 전력 소비가 줄어듭니다. 예를 들어 산업 플랜트의 300°C 이상 폐열을 SOEC 열 투입에 활용하면, 전기 소비 기준 수소 생산 효율이 추가로 10~15%p 향상되는 효과가 있습니다. 전기 요금이 높은 한국·일본·유럽 시장에서 이 절감 효과는 수소 생산 단가(LCOH)를 결정적으로 낮추는 레버가 됩니다.

열 출력의 활용

SOEC 스택에서 배출되는 고온 폐열은 인근 공정에 직접 공급될 수 있습니다. 화학 플랜트의 반응기 가열, 식품·제지 산업의 건조 공정, 지역난방 시스템 등에 활용 가능하며, 이 경우 SOEC 운영자는 수소 판매 수익에 더해 열 공급 수익까지 확보하는 이중 수익 구조를 만들 수 있습니다.

SOFC와의 열 통합 시너지

Voltacera가 지향하는 SOFC-SOEC 통합 플랫폼에서는 이 열 활용이 더욱 정교해집니다. SOFC 발전 시 발생하는 고온 배열을 SOEC의 열 투입으로 직접 연결하면, 시스템 전체의 에너지 효율이 개별 운전 대비 5~10%p 추가 향상됩니다. 즉, 동일 부지에서 SOFC(발전)와 SOEC(수소 생산)를 동시에 운전할 경우, 두 설비의 열이 서로를 지원하는 자기 강화적 구조가 형성됩니다.

5. 산업별 적용 – 데이터 센터·철강·화학

5.1 데이터센터: 온사이트 수소 생산의 새로운 패러다임

Chapter 1에서 살펴본 바와 같이, 데이터센터 운영자들은 전력망 의존도를 줄이기 위해 BTM(Behind-

the-Meter) 발전을 적극 도입하고 있습니다. SOEC는 여기서 한 걸음 더 나아가, 온사이트 수소 생산을 통한 에너지 저장과 연료전지 백업 전원의 통합이라는 새로운 가치 제안을 가능하게 합니다.

구체적으로, 재생에너지 전력이 풍부한 시간대에 SOEC로 수소를 생산·저장하고, 전력 수요가 높은 피크 시간대에 SOFC로 수소를 전기로 전환하는 Power-to-X-to-Power 사이클은 배터리 저장장치(BESS)가 제공할 수 없는 장주기(Long-duration) 에너지 저장 솔루션을 제공합니다. Microsoft, Amazon, Google 등 하이퍼스케일 데이터센터 운영자들이 수소 기반 에너지 시스템에 관심을 보이는 것도 이 맥락에서 이해될 수 있습니다.

5.2 철강 산업: 수소환원제철(DRI-H₂)의 핵심 공급원

철강 산업은 전 세계 CO₂ 배출량의 약 7~9%를 차지하는 대표적인 탈탄소화 난제 산업입니다. 수소환원제철(DRI-H₂: Direct Reduction of Iron with Hydrogen)은 기존 고로(용광로)에서 코크스(석탄) 대신 수소를 환원제로 사용하는 방식으로, 이론적으로 제강 공정의 CO₂ 배출을 90% 이상 줄일 수 있습니다. SSAB(스웨덴), thyssenkrupp(독일), POSCO(한국) 등 주요 철강사들이 이 경로를 2030년대 주력 탈탄소 전략으로 채택하고 있습니다.

DRI-H₂ 공정에서 SOEC는 두 가지 핵심 역할을 합니다. 첫째, 고온 수소를 대량으로 공급하는 수전해 원으로서, 제철 공정에서 발생하는 고온 폐열을 직접 투입받아 에너지 효율을 극대화할 수 있습니다. 둘째, 제철 공정의 배기가스에 포함된 CO₂를 포집하여 Co-electrolysis로 투입함으로써, 탄소를 e-fuel 원료로 전환하는 탄소 순환 사이클을 완성할 수 있습니다.

5.3 화학 산업: 그린 암모니아와 e-메탄올

화학 산업에서 SOEC의 가장 큰 시장은 그린 암모니아와 e-메탄올 생산입니다. 현재 연간 약 1억 8,000만 톤이 생산되는 암모니아의 98% 이상이 천연가스 기반 스팀 메탄 개질(SMR) 방식으로 만들어집니다. 이 과정에서 암모니아 1톤당 약 2.4톤의 CO₂가 배출됩니다. SOEC로 생산된 그린수소를 하버-보쉬 공정에 투입하면, 이 배출량을 0에 가깝게 줄일 수 있습니다.

e-메탄올의 경우 Co-electrolysis의 강점이 더욱 직접적으로 발휘됩니다. 화학 공장이나 바이오매스 플랜트에서 포집한 CO₂와 수증기를 SOEC에 투입하면 직접 합성가스를 얻을 수 있으며, 이를 메탄올 합성 공정과 통합하면 공정 단계를 줄이고 전체 시스템 효율을 높일 수 있습니다. Haldor Topsøe가 덴마크 Kasso 프로젝트에서 실증하고 있는 경로가 바로 이 접근법입니다.

6. 글로벌 경쟁 구도 — Sunfire, thyssenkrupp nucera, Bloom Energy, Ceres Power, Topsøe

SOEC 시장은 현재 소수의 선도 기업이 기술과 레퍼런스를 선점하는 초기 상업화 단계에 있습니다. 주요 플레이어들의 기술적 포지션과 전략을 이해하는 것은 Voltacera가 공급망 내 역할을 설계하는 데 있어 핵심적인 출발점입니다.

6.1 Sunfire GmbH (독일)

- SOEC 분야의 선도적 상업화 기업으로, 현재까지 MW 급 SOEC 시스템의 실증 운전 경험을 가장 많이 보유하고 있습니다.
- 덴마크 Ørsted 와의 협력을 포함한 다수의 산업 파일럿 프로젝트를 통해 Co-electrolysis 기술을 실증했습니다.
- 2023 년 기준 단일 모듈 2.6 MW 급 SOEC 시스템을 출시했으며, 모듈 적층을 통한 100 MW 급 이상 시스템 구현을 목표로 합니다.
- 강점: 가장 성숙한 SOEC 상업화 실적 / 과제: 스택 열화율 개선 및 양산 비용 절감

6.2 thyssenkrupp nucera (독일)

- 전통적으로 ALK 수전해의 글로벌 선두 기업(20 GW 이상 누적 설치)이었으나, SOEC 를 포함한 차세대 수전해 기술로 포트폴리오를 확장하고 있습니다.
- Fraunhofer IKTS 와의 협력을 통해 ESC(Electrolyte-Supported Cell) 기반 SOEC 스택 개발을 진행 중이며, 이는 Voltacera 와 기술적으로 가장 유사한 접근법입니다.
- 철강 모기업(thyssenkrupp Steel)의 수소환원제철 프로젝트와의 수직 통합이 강력한 내부 수요처를 확보하는 전략적 이점입니다.
- 강점: ALK 양산 인프라·고객 기반 활용 가능 / 과제: SOEC 기술 성숙도가 Sunfire 대비 낮음

6.3 Bloom Energy (미국)

- SOFC 분야의 글로벌 최대 상업화 기업으로, 동일한 세라믹 셀 플랫폼을 역방향으로 운전하는 SOEC 기술(Bloom Electrolyzer)을 상용화했습니다.
- 2023 년 미국 에너지부(DOE)로부터 SOEC 기술 개발 지원을 받았으며, NASA 와의 협력으로 수전해 기술을 우주 응용 분야에도 적용하고 있습니다.

- SOFC와 SOEC의 동일 플랫폼 전략은 Voltacera가 지향하는 방향과 정확히 일치하며, 시장 검증의 선례를 제공합니다.
- 강점: SOFC 양산 인프라·고객 네트워크 활용, BTM 모델의 검증된 비즈니스 청사진 / 과제: 현재 SOEC 사업 규모는 SOFC 대비 초기 단계

6.4 Ceres Power (영국)

- 금속 지지체(Metal-Supported Cell, MSC) 기반의 차세대 SOEC 플랫폼을 개발 중으로, 기존 세라믹 지지체 대비 낮은 작동 온도(500~600°C)와 빠른 기동·정지를 강점으로 합니다.
- Bosch, Weichai Power(중국), Doosan(한국) 등 다수의 글로벌 파트너에게 기술 라이선싱 방식으로 사업을 전개하는 '플랫폼 기업' 모델을 채택하고 있습니다.
- 2025년 3월 Bosch의 SOFC/SOEC 사업 철수 후, Ceres의 라이선싱 파트너 생태계에도 영향이 있었으나 Doosan 등과의 협력은 지속 중입니다.
- 강점: 낮은 작동 온도로 인한 소재·밀봉 관련 장점, 라이선싱 모델의 자본 효율성 / 과제: 기가와트급 상업 배치까지 수년의 시간 필요

6.5 Haldor Topsøe (덴마크)

- 촉매·공정 기술 분야의 글로벌 선두 기업으로, SOEC를 e-fuel(e-메탄올, e-암모니아, SAF) 생산 공정에 통합하는 데 초점을 맞추고 있습니다.
- Topsøe는 스페인 Forestal del Atlántico의 Triskelion e-methanol 프로젝트에 55 MW 규모의 SOEC 기술을 공급할 예정이며, SOEC와 downstream methanol synthesis를 결합하는 대규모 Power-to-X 상용화 모델을 추진하고 있습니다.
- 자체 SOEC 스택 생산과 함께, 다운스트림 화학 공정과의 통합 시스템 엔지니어링 역량을 결합하는 '공정 통합자(Process Integrator)' 포지션을 취하고 있습니다.
- 강점: Co-electrolysis 및 e-fuel 공정 통합에서 독보적 / 과제: SOEC 단독 판매보다는 대형 공정 프로젝트 중심으로, 단위 셀·스택 시장과는 거리가 있음

6.6 경쟁 구도 요약 및 VoltaCera의 포지션

앞서 살펴본 주요 기업들의 전략을 종합하면, SOEC 시장의 경쟁력은 크게 세 가지 축을 중심으로 형성되고 있습니다.

① 셀·스택의 성능 및 내구성, ② 제조 비용과 양산 역량, ③ 다운스트림 공정과의 통합 역량입니다.

글로벌 선도기업들은 각자의 기술적 기반과 사업 전략에 따라 이러한 영역에서 차별화된 경쟁력을 구축하고 있습니다. 일부 기업은 셀·스택 기술과 대규모 제조 역량을 강화하고 있으며, 다른 기업들은 수소·e-Fuel 등 다운스트림 공정과의 통합을 통해 시장을 확대하고 있습니다.

이러한 산업 구조에서는 모든 기술과 제조 역량을 단일 기업이 내부화하기보다는, **소재-셀-스택-시스템-플랜트**에 걸친 전문기업 간 협업의 중요성이 더욱 커질 것으로 예상됩니다.

VoltaCera는 이러한 가치사슬에서 고성능 세라믹 소재 및 ESC 기반 셀 기술을 제공하는 전문 기술 파트너로 포지셔닝하고자 합니다. 자체적인 **소재 합성, 전극 잉크 제조, tape casting, 셀 제조 및 평가 역량**을 기반으로 셀·스택 및 시스템 기업의 개발 요구에 유연하게 대응하는 것을 목표로 합니다.

특히 대규모 시스템 사업자와 경쟁하기보다는, 맞춤형 셀 개발, 빠른 프로토타이핑, 소량·중량 생산 및 공동개발을 통해 글로벌 SOFC/SOEC 생태계를 지원하는 것이 VoltaCera의 핵심 전략입니다.

7. 볼타세라의 SOEC 전략 – SOFC와 동일 플랫폼의 의미

7.1 단일 플랫폼 전략의 기술적 근거

VoltaCera의 핵심 기술 전략은 단일 세라믹 셀 플랫폼으로 SOFC(연료전지 발전)와 SOEC(수전해) 양방향 운전을 구현하는 것입니다. 이는 단순한 기술적 선택이 아니라, 사업 모델과 자본 효율성을 근본적으로 재설계하는 전략적 결정입니다.

기술적으로, SOFC와 SOEC는 동일한 전기화학 반응의 정방향(연료전지)과 역방향(전해)에 해당합니다. 따라서 고성능 SOFC 셀을 개발하면, 소재 조성의 미세 조정과 운전 조건 최적화를 통해 SOEC 성능을 함께 향상시킬 수 있습니다. Bloom Energy와 Sunfire가 이 접근법의 상업적 타당성을 먼저 증명했으며, VoltaCera는 ESC(Electrolyte-Supported Cell) 구조에서 이를 구현합니다.

7.2 ESC 구조의 SOEC 적용 이점

SOEC는 SOFC와 동일한 고체산화물 셀 플랫폼을 공유하지만, 운전 환경은 반드시 동일하지 않습니다. SOFC와 달리 SOEC 운전에서는 외부 전압이 인가된 상태에서 높은 전류밀도로 수증기 전기분해

가 진행되며, 고온·고수증기 조건과 전극 및 계면에서의 높은 전기화학적 구동력이 동시에 작용합니다. 특히 고전류밀도 운전에서는 전극 열화, 계면 박리(delamination), 국부적인 열·기계적 응력 등 장기 내 구성에 영향을 미치는 요인이 더욱 중요해질 수 있습니다.

따라서 SOEC 셀은 높은 성능뿐 아니라 **전기화학적·열적·기계적 스트레스에 대한 구조적 안정성**이 중요합니다. 이러한 관점에서 VoltaCera가 채택한 ESC(Electrolyte-Supported Cell, 전해질 지지체형 셀) 구조는 SOEC 적용에서 몇 가지 고유한 이점을 제공합니다.

Voltacera가 채택한 ESC(전해질 지지체형 셀) 구조는 SOEC 적용에서 몇 가지 고유한 이점을 제공합니다.

- 기계적 안정성: 전해질이 기계적 지지체 역할을 하므로, SOEC 운전 시 발생하는 고온·산화·환원 분위기의 교대 노출에도 셀 구조적 건전성이 유지됩니다.
- 열 사이클 내구성: 데이터센터 BTM 모델에서 SOEC는 재생에너지 가용성에 따라 빈번한 기동·정지를 반복할 수 있습니다. ESC 구조의 전해질 두께는 이 열 사이클 스트레스에 대한 내성을 높여줍니다.
- 소재 개발 시너지: LSCF 공기극, GDC 버퍼층, NiO-GDC 연료극 등 Voltacera가 자체 개발하는 소재 스택은 SOFC와 SOEC 양방향에 최적화될 수 있어, 연구개발 투자의 효율이 높습니다.

7.3 사업 모델: 온사이트 에너지 허브로의 진화 경로

VoltaCera의 단일 플랫폼 전략은 고객에게 단계적인 응용 확장 경로를 제공합니다. 1단계에서는 SOFC를 활용한 고효율 온사이트 발전, 2단계에서는 SOEC를 통한 수소 생산으로 확장하고, 3단계에서는 H₂O와 CO₂의 co-electrolysis를 통해 syngas를 생산하여 e-Fuel 및 화학원료 생산으로 응용 영역을 확대하는 구조입니다.

특히 SOEC의 co-electrolysis는 H₂O와 CO₂를 동시에 전환하여 H₂와 CO로 구성된 syngas를 생산할 수 있으며, 이는 methanol, synthetic fuel 및 SAF 등 다양한 Power-to-X 공정의 중간원료로 활용될 수 있습니다.

이러한 단계적 접근을 통해 VoltaCera는 단순한 셀 공급을 넘어, Power → Hydrogen → Syngas / e-Fuels로 확장되는 고온 전기화학 플랫폼의 기술 파트너로서 역할을 확대하고자 합니다.

8. 결론 및 다음 chapter 예고

SOEC는 '미래 기술'이 아닙니다. Sunfire의 MW급 상업 시스템, Topsøe의 산업 규모 Co-electrolysis 실증, Bloom Energy의 SOFC-SOEC 통합 플랫폼 상용화는 모두 지금 이 순간 진행 중인 현실입니다. 동시에 ALK와 PEM이 채울 수 없는 영역 - 고온 폐열 활용, Co-electrolysis, SOFC와의 통합 운전 - 은 구조적으로 SOEC만이 제공할 수 있는 고유한 가치입니다.

그린수소 시장이 2030년을 향해 기가와트 규모로 성장하는 과정에서, 고성능 SOEC 셀·스택 기술을 보유한 기업의 공급망 내 전략적 가치는 지속적으로 높아질 것입니다. 이 기술 사이클에서 소재 혁신과 공정 개발을 통해 SOEC 셀 제조 비용을 체계적으로 낮추는 기업이 시장 확산의 최대 수혜자가 될 것입니다.

Voltacera는 바로 이 포지션을 향해 기술과 역량을 구축하고 있습니다.

▶ 다음 챕터 예고: Chapter 3

Chapter 3에서는 "왜 셀이 시스템을 결정하는가"라는 질문에 답합니다. Voltacera의 ESC 기반 SOFC/SOEC 셀 기술이 경쟁 셀 대비 어떤 성능 우위를 가지는지, 그 우위가 시스템 레벨의 LCOE와 연료비에 어떻게 전환되는지를 구체적인 수치와 함께 보여드릴 것입니다.

참고문헌 (References)

-
- [1] IEA. (2023). Net Zero by 2050: A Roadmap for the Global Energy Sector. International Energy Agency. <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>
 - [2] IEA. (2024). Global Hydrogen Review 2024. International Energy Agency. <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2024>
 - [3] European Commission. (2022). REPowerEU Plan. COM(2022) 230 final.
 - [4] U.S. Department of Energy. (2023). Inflation Reduction Act: Clean Hydrogen Production Tax Credit (\$45V). <https://www.energy.gov/oced/inflation-reduction-act>
 - [5] Sunfire GmbH. (2023). Sunfire-Hylink SOEC Product Datasheet. <https://www.sunfire.de>
 - [6] Topsøe. (2024). SOEC Technology & e-fuels: Kasso Project Overview. <https://www.topsoe.com>
 - [7] Bloom Energy. (2023). Bloom Electrolyzer: Solid Oxide Electrolyzer Technical Overview. <https://www.bloomenergy.com>
 - [8] Ceres Power. (2024). Annual Report 2024: Technology Licensing Strategy. <https://www.cerespower.com>
 - [9] thyssenkrupp nucera & Fraunhofer IKTS. (2023). Solid Oxide Electrolysis for Industrial Decarbonization. Internal Research Collaboration Report.
 - [10] Hauch, A. et al. (2020). Recent advances in solid oxide cell technology for electrolysis. Science, 370(6513). <https://doi.org/10.1126/science.aba6118>
 - [11] IRENA. (2023). Green Hydrogen Cost Reduction: Scaling Up Electrolysers to Meet the 1.5°C Climate Goal. International Renewable Energy Agency.
 - [12] Lazard. (2024). Levelized Cost of Hydrogen Analysis — Version 3.0. <https://www.lazard.com>
 - [13] McKinsey & Company. (2023). Hydrogen Insights 2023: Demand Outlook and Technology Trends.
 - [14] Voltacera 내부 분석. (2026). SOEC vs. ALK vs. PEM 기술 비교 분석. Voltacera Research.

면책 고지: 본 백서는 Voltacera가 정보 제공 목적으로만 작성하였습니다. 본 문서에 포함된 정보는 2026년 기준으로 신뢰할 수 있다고 판단되는 공개 자료에 기반하고 있습니다. Voltacera는 인용된 제3자 데이터의 정확성이나 완전성에 대해 어떠한 진술이나 보증도 하지 않습니다.



VoltaCera

참고문헌 (References)

- [1] International Energy Agency (IEA). (2024). *Global Hydrogen Review 2024*. International Energy Agency, Paris.
- [2] International Energy Agency (IEA). (2024). *Electrolysers — Energy System Tracking*. International Energy Agency.
— 글로벌 수전해 설치용량, 2030년 프로젝트 파이프라인, NZE 기준 560 GW 전해조 수요 등에 활용.
- [3] European Commission. (2022). *REPowerEU Plan*. COM(2022) 230 final. European Commission.
— 2030년 EU 역내 재생수소 10 Mt 생산 및 10 Mt 수입 목표에 활용.
- [4] U.S. Department of the Treasury & Internal Revenue Service (IRS). (2025). *Final Regulations: Credit for Production of Clean Hydrogen and Energy Credit — Section 45V*. T.D. 10023.
— 미국 IRA 청정수소 생산세액공제 및 수소 생산 경제성 관련 정책 설명에 활용.
- [5] Hauch, A., Küngas, R., Blennow, P., Hansen, A. B., Hansen, J. B., Mathiesen, B. V., & Mogensen, M. B. (2020). Recent advances in solid oxide cell technology for electrolysis. *Science*, 370(6513), eaba6118. <https://doi.org/10.1126/science.aba6118>
— SOEC 열역학·반응속도론, 고효율, Power-to-X 및 고온 공정 통합의 핵심 기술적 근거.
- [6] International Renewable Energy Agency (IRENA). (2020). *Green Hydrogen Cost Reduction: Scaling Up Electrolysers to Meet the 1.5°C Climate Goal*. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.
— ALK, PEM, SOEC의 효율·수명·비용 및 기술 비교의 기본 자료.
- [7] Sunfire GmbH. (2023–2025). *MultiPLHY / Neste: 2.6 MW Sunfire-HyLink SOEC at the Rotterdam Refinery*. Sunfire GmbH.
— Neste Rotterdam의 2.6 MW SOEC, 60 kg-H₂/h 이상 생산, 산업 폐증기 활용 및 최대 약 84% LHV 전기효율 실증 사례.
- [8] thyssenkrupp nucera AG & Fraunhofer Institute for Ceramic Technologies and Systems IKTS. (2025). *thyssenkrupp nucera and Fraunhofer IKTS Open First SOEC Pilot Production Plant for Stacks for the Production of Green Hydrogen*. Fraunhofer IKTS.
— 전해질 지지체형 세라믹 SOEC, 연간 8 MW 규모 pilot production 및 장기 안정성·thermal cycling 관련 근거.
- [9] Topsoe A/S. (2025). *Forestal Selects Topsoe's SOEC Technology for e-Methanol Production — Triskelion Project*. Topsoe A/S.

- 스페인 Triskelion 프로젝트의 55 MW SOEC 및 e-methanol 공정 통합 사례.
- [10] Topsoe A/S. (2025). *SOEC Manufacturing Facility, Herning, Denmark*. Topsoe A/S.
- 연간 500 MW 규모의 SOEC stack 생산능력 및 향후 GW-scale manufacturing 확대 전략에 활용.
- [11] Ceres Power Holdings plc. (2025). *Shell-Ceres MW-Scale Electrolyser Project Produces First Hydrogen*. Ceres Power Holdings plc.
- 인도 Bangalore의 MW-scale SOEC demonstrator, Shell과의 공동 실증 및 대규모 산업용 SOEC 상용화 경로에 활용.
- [12] Ceres Power Holdings plc. (2024–2025). *SOEC Technology Partnerships with Denso, Delta Electronics, Shell and Other Global Partners*. Ceres Power Holdings plc.
- Ceres의 licensing-based 사업모델과 SOEC 글로벌 파트너 생태계 설명에 활용.
- [13] Bloom Energy Corporation. *Bloom Electrolyzer — Solid Oxide Electrolysis Technology*. Bloom Energy Corporation.
- SOFC 기반 ceramic platform을 활용한 SOEC 상용화 및 reversible solid oxide technology 사례에 활용.
- [14] International Energy Agency (IEA). (2024). *Hydrogen Production — Global Hydrogen Review 2024*. International Energy Agency.
- 2023년 글로벌 수전해 설치용량 약 1.4 GW, 발표 프로젝트 약 520 GW 및 프로젝트 실행 격차 설명에 활용.
- [15] Topsoe A/S. (2025). *Unlocking e-Methanol Production with SOEC Electrolysis: Forestal del Atlántico Triskelion Project*. Topsoe A/S.
- SOEC와 downstream methanol synthesis의 공정 통합, 수소 저장 최소화 및 Power-to-X 경제성 설명에 활용.

면책 고지: 본 백서는 Voltacera가 정보 제공 목적으로만 작성하였습니다. 본 문서에 포함된 정보는 2026년 4월 기준으로 신뢰할 수 있다고 판단되는 공개 자료에 기반하고 있습니다. Voltacera는 인용된 제3자 데이터의 정확성이나 완전성에 대해 어떠한 진술이나 보증도 하지 않습니다. 본 문서는 투자 조언, 청약 권유 또는 증권 매도 제안을 구성하지 않습니다.