

Chapter 3

셀이 시스템을 결정한다:

운전 조건에서 시스템 경제성까지 – SOFC/SOEC 셀 설계의 모든 것

Voltacera Research | 2026년 8월 25일

VoltaCera

요약 (Executive Summary)

왜 셀이 시스템을 결정하는가?

SOFC와 SOEC 시스템의 성능은 스택이나 BOP(Balance of Plant)만으로 결정되지 않습니다. 시스템의 가장 작은 반복 단위인 **전기화학 셀의 구조, 소재, 두께, 미세구조 및 운전 특성**이 시스템의 효율, 출력밀도, 열관리, 내구성 및 경제성을 결정하는 출발점이 됩니다.

그러나 여기에서 중요한 점은 단순히 **“성능이 높은 셀이 좋은 셀”은 아니라는 것**입니다.

동일한 Solid Oxide Cell이라도 발전을 수행하는 SOFC와 수소를 생산하는 SOEC에서는 전기화학적·열적 운전조건이 다릅니다. 또한 같은 SOFC에서도 24시간 연속 운전하는 데이터센터용 발전시스템과 반복적인 시동·정지 및 부하변동을 경험하는 모빌리티 시스템은 셀에 요구되는 특성이 다릅니다.

따라서 셀 개발의 핵심 질문은 다음과 같이 바뀌어야 합니다.

▶ '최고 성능의 셀은 무엇인가?' → '시스템에 맞는 셀은 무엇인가?'

본 백서는 다음 핵심 주제를 다룹니다.

- SOFC와 SOEC는 같은 플랫폼이지만 운전 거동(operating physics)이 다르며, 이 차이가 셀 요구사항을 결정합니다.
- SOEC의 thermoneutral voltage 개념과 외부 폐열 활용 전략이 시스템 경제성에 미치는 영향을 분석합니다.
- 전류밀도와 열화율의 trade-off, 그리고 이것이 LCOE/LCOH에 어떻게 연결되는지를 살펴봅니다.
- Stationary vs. Mobility 적용 분야의 duty cycle 차이가 ESC/ASC 등 셀 아키텍처 선택에 미치는 영향을 검토합니다.
- 소재 조성에서 미세구조, 전기화학 성능, 내구성으로 이어지는 연속적 제조·성능 chain을 설명합니다.
- Voltacera의 ESC 플랫폼이 이 모든 요소를 어떻게 통합하여 고객의 시스템에 최적화된 셀을 제공하는지를 제시합니다.

1. 서론: 셀에서 시스템까지

SOFC/SOEC 시스템은 크게 Cell → Stack → Module → System의 단계로 구성됩니다. 셀의 특성은 스택, 모듈, 시스템으로 올라갈수록 고스란히 누적되며 그 영향이 더욱 크게 나타납니다. 셀 한 장의 성능 차이는 스택에서 수십 배로 확대되고, 시스템 수준에서는 CAPEX, OPEX, 유지보수 비용, 수명 전체에 걸쳐 경제적 영향을 미칩니다.

셀의 면적당 출력 또는 수소 생산량이 증가하면 동일한 시스템 출력을 구현하는 데 필요한 셀 수와 스택 크기를 줄일 가능성이 있습니다. 그러나 높은 전류밀도 운전은 전극 polarization과 ohmic loss를 증가시키고, 셀 내부의 온도 분포와 열화 거동에도 영향을 줍니다. 이처럼 셀 수준에서의 선택은 시스템 수준에서의 결과와 밀접하게 연결됩니다.

따라서 시스템 설계에서는 단순한 최대 출력보다 다음 요소를 동시에 고려해야 합니다.

설계 요소	시스템 경제성에 미치는 영향
전력 / 수소 생산 밀도	단위면적당 출력 또는 생산량 — 시스템 크기와 CAPEX를 직접 결정
전기 효율	연료비 또는 전력비로 이어지는 운전 비용(OPEX)의 핵심 레버
작동 온도	소재 선택, 열관리 복잡성, 스택 설계에 직접 영향
열화율	스택 교체 주기와 유지보수 비용을 결정하는 수명 지표
열 관리	시스템 효율 최적화와 셀 내 온도 균일성 확보의 핵심
제조 비용	양산성·수율·소재 비용으로 연결되는 경제성의 출발점

예를 들어 높은 전력밀도를 가진 셀이 초기 시스템 크기를 줄여주더라도, 열화율이 높아 스택 교체 주기가 짧아진다면 장기적인 시스템 경제성은 오히려 악화될 수 있습니다. 반대로 낮은 전력 밀도에서 운전하면 수명은 길어지지만 CAPEX가 과도하게 커질 수 있습니다. 시스템 경제성의 최적점은 이 두 극단 사이 어딘가에 존재하며, 그 위치는 응용 분야와 운전 조건에 따라 달라집니다.

결국 셀의 진정한 성능은 단일 I-V curve가 아니라, 시스템의 전체 운전 기간 동안 생산되는 전력 또는 수소의 양과 비용으로 평가되어야 합니다. 이것이 Chapter 3의 핵심 명제입니다.

2. SOFC vs. SOEC - 같은 셀, 다른 운전 거동

SOFC와 SOEC는 기본적으로 동일한 Solid Oxide Cell 플랫폼에서 역방향의 전기화학 반응을 수행합니다. 이 가역성(reversibility)은 단일 세라믹 플랫폼으로 발전과 수전해를 모두 구현할 수 있다는 강력한 기술적 이점입니다. 그러나 가역성이 곧 동일한 운전 물리학을 의미하지는 않습니다.

2.1 반응의 방향성과 에너지 흐름

SOFC에서는 연료의 화학에너지가 전기에너지와 열로 변환됩니다. 연료극(Anode)에서 수소 또는 탄화수소 연료가 산화되고, 공기극(Cathode)에서 공급된 산소 이온(O^{2-})이 고체 세라믹 전해질을 통과하여 반응합니다. 이 과정에서 전류, 열, 물, 이산화탄소가 생성됩니다.

반면 SOEC에서는 외부에서 공급되는 전기에너지와 열을 이용하여 H_2O 또는 CO_2 를 분해합니다. 연료극(Cathode)에서 수증기가 환원되어 수소가 생성되고, 공기극(Anode)에서 산소가 방출됩니다. 에너지 흐름의 방향이 완전히 역전되는 것입니다.

이러한 에너지 흐름의 차이는 셀이 경험하는 전기화학적·열적 환경을 근본적으로 다르게 만듭니다.

항목	SOFC	SOEC
에너지 흐름	화학에너지 → 전기 + 열	전기 + 열 → 화학에너지
셀 전압	OCV보다 낮음 (발전 손실)	E_{rev} 보다 높음 (과전압 인가)
연료극 분위기	환원성 (H_2 , CO 존재)	고수증기 조건 (H_2O 고농도)
공기극 역할	O^{2-} 수용 (Cathode 역할)	O^{2-} 방출 (Anode 역할)
내부 열 발생	항상 발열 (저항열 + 반응열)	운전 전압에 따라 흡열/발열
전극 열화 주요 원인	Ni coarsening, 산화, 탄소 침적	SOEC: 공기극 delamination, Ni 재산화 리스크
열관리 방향성	잉여열 제거	외부 열 공급 또는 내부 열 균형
운전 전압 범위	0.6~0.9 V (전형적 운전점)	1.0~1.5 V (E_{rev} 이상)

▶ 동일한 전기화학 플랫폼이 동일한 운전 물리학을 의미하지는 않는다.

2.2 SOEC 운전에서의 고유한 극복 과제

SOEC 운전에서는 SOFC와 구별되는 몇 가지 고유한 기술적 과제가 존재합니다. 첫째, 고전류밀도 운전에서 공기극(Oxygen Electrode)의 delamination 현상이 SOEC 열화의 주요 원인 중 하나로 보고되고 있습니다. SOEC 모드에서 공기극은 Anode로 기능하며 O²⁻를 방출하는데, 이 과정에서 전해질/공기극 계면에 국부적인 산소 분압 상승과 기계적 응력이 발생할 수 있습니다.

둘째, Ni 기반 연료극(Fuel Electrode)은 SOEC 모드에서 높은 수증기 분압에 노출됩니다. 운전 중 수소 분압이 낮아지는 조건에서는 Ni의 부분 산화 리스크가 증가하고, 이는 microstructure 변화와 성능 저하로 이어질 수 있습니다. 이러한 이유로 Co-electrolysis(CO₂+H₂O 동시 전해) 시에는 탄소 침적(coking) 억제를 위한 추가적인 소재 설계가 필요합니다.

셋째, SOFC-SOEC 전환(reversible 운전) 시에는 각 모드 간의 온도, 가스 조성, 전류 방향 변화에 따른 전기화학적·열기계적 응력이 셀 수명에 복합적으로 영향을 미칩니다. 이러한 이유로 reversible 운전을 목표로 하는 시스템에서는 셀 소재와 구조의 선택이 단방향 운전보다 훨씬 신중하게 이루어져야 합니다.

3. 열중성점 (Thermoneutral Voltage) - SOEC의 최적 운전점은 어디인가?

고온 수전해의 가장 중요한 특징 중 하나는 물 분해에 필요한 전체 에너지 중 일부를 전기가 아닌 열에너지로 공급할 수 있다는 것입니다. 이 특성이 SOEC를 PEM이나 ALK와 근본적으로 차별화하는 열역학적 이점의 출발점입니다.

3.1 에너지 분배와 핵심 전압

반응에 필요한 총 에너지 ΔH는 전기에너지에 해당하는 깁스 자유에너지(ΔG)와 열에너지 기여분(TΔS)으로 나눌 수 있습니다.

$$\Delta H = \Delta G + T\Delta S$$

이로부터 두 개의 중요한 기준 전압이 정의됩니다.

전압	정의	의미
Reversible Voltage	$E_{rev} = \Delta G / nF$	열역학적 최소 전압. 실제 운전에서는

전압	정의	의미
(Erev)		과전압 때문에 이보다 높은 전압이 필요.
Thermoneutral Voltage (VTN)	$VTN = \Delta H / nF$	반응의 총 엔탈피를 전기로만 공급할 때의 전압. 800°C 부근 steam electrolysis에서 약 1.29 V.

3.2 세 가지 운전 영역과 시스템 함의

VTN을 기준으로 SOEC 운전은 세 가지 열적 영역으로 구분됩니다. 이 구분은 단순한 이론적 분류가 아니라, 시스템 설계에서 가장 중요한 열수지 결정 변수입니다.

운전 조건	열적 거동	시스템 설계 함의
Vcell < VTN	$V_{cell} < VTN$	반응이 진행되기 위해 외부에서 열을 공급해야 함. 산업 폐열이 풍부한 환경에서 전략적으로 채택 가능. 전기 소비 최소화 효과.
Vcell ≈ VTN (~1.29 V @ 800°C)	$V_{cell} \approx VTN$ (~1.29 V @ 800°C)	반응열과 내부 저항열이 균형을 이루어 외부 열 교환 없이 등온 운전 가능. 열관리 단순화. 시스템 설계의 기준점.
Vcell > VTN	$V_{cell} > VTN$	내부 저항열이 반응 흡열을 초과하여 잉여열 발생. 냉각 시스템 필요. 고전류밀도 운전 시 온도 구배 리스크 증가.

이처럼 SOEC에서 운전 전압은 단순한 전기적 성능 지표가 아니라 시스템의 열수지를 결정하는 설계 변수입니다. 동일한 셀이라도 어떤 전압에서 운전하느냐에 따라 시스템이 필요로 하는 열 관리 인프라가 완전히 달라집니다. 이 점은 셀 선택 이전에 시스템 열 설계가 먼저 확립되어야 한다는 것을 의미합니다.

4. 폐열 활용 - 외부 폐열은 SOEC 운전조건을 어떻게 바꾸는가

SOEC의 가장 큰 잠재적 장점 중 하나는 외부에서 공급되는 고온 열을 수전해 에너지의 일부로 활용할 수 있다는 것입니다. 산업 공정, 원자력, 합성 연료 생산 공정 등에서 활용 가능한 열원이 존재한다면, SOEC 시스템은 전기만으로 모든 에너지를 공급할 필요가 없습니다.

4.1 열원 활용 전략의 분기점

폐열 존재 여부와 비용에 따라 SOEC 시스템의 최적 운전 전략은 크게 달라집니다. 값싼 폐열이 풍부한 산업 환경(예: 철강·화학 플랜트, 원자력 발전소 인근)에서는 $V_{cell} < V_{TN}$ 인 흡열 영역에서 의도적으로 낮은 셀 전압으로 운전하는 전략을 취할 수 있습니다. 이 경우 전기 소비를 줄이고 전력 비용이 높은 환경에서 LCOH를 크게 낮출 수 있습니다. 실제 Sunfire의 Neste Rotterdam 프로젝트에서는 산업 폐증기를 SOEC 열 투입에 활용하여 최대 약 84% LHV 전기 효율을 달성했습니다.

반대로 활용 가능한 외부 열원이 부족한 환경에서는 thermoneutral 또는 일부 exothermic 운전과 내부 열 회수 전략이 시스템적으로 유리합니다. 이 경우 스택에서 발생하는 고온 배출 가스의 현열을 회수하여 스팀 예열이나 반응물 가열에 활용하는 열통합 설계가 핵심이 됩니다.

4.2 열통합이 LCOH에 미치는 영향

외부 열원 활용의 경제적 가치는 전기 요금 수준에 따라 크게 달라집니다. 한국·일본·유럽과 같이 전력 단가가 높은 시장에서는 폐열을 10~15%p 추가로 활용함으로써 수소 생산 단가(LCOH)를 0.3~0.8달러/kg 수준으로 낮출 수 있습니다. 이는 그린수소 생산 비용 목표(\$1.5~2/kg, 2030년)를 달성하는 데 있어 결정적인 레버가 됩니다.

또한 SOFC-SOEC 통합 플랫폼에서는 이 열통합이 더욱 정교해집니다. SOFC 발전 시 발생하는 고온 배기열(600°C 이상)을 SOEC 열 투입에 직접 연결하면, 시스템 전체의 에너지 효율이 개별 운전 대비 5~10%p 추가 향상됩니다. 이것이 Voltacera가 SOFC-SOEC 단일 플랫폼을 추구하는 시스템 경제성 측면의 핵심 근거입니다.

▶ **최적의 SOEC 운전 전압은 셀뿐만 아니라, 활용 가능한 열원에 따라서도 달라진다.**

5. 성능 vs. 내구성 - 전류밀도를 높이면 무엇을 얻고 무엇을 잃는가

SOFC/SOEC 시스템의 경제성을 개선하는 가장 직접적인 방법 중 하나는 단위면적당 전력 또는 수소 생산량을 높이는 것입니다. 높은 전류밀도에서는 동일한 생산량을 더 작은 셀 면적에서 달성할 수 있기 때문에 셀 스택 수량과 시스템 크기를 줄일 잠재력이 있습니다.

5.1 고전류밀도 운전의 이점과 trade-off

그러나 전류밀도가 증가하면 일반적으로 polarization 및 ohmic loss가 증가하고, SOEC에서는 내부 열 발생도 증가합니다. 이는 전압 효율 저하와 직결됩니다. 더 중요한 것은 장기 내구성에 미치는 영향입니다.

항목 (전류밀도 ↑ 시)	변화 방향	시스템 영향
생산 밀도 (Production Density)	↑ 증가	동일 출력에 필요한 셀 면적 감소 → CAPEX 절감
필요 셀 면적 (Required Cell Area)	↓ 감소	스택 크기 축소, 시스템 소형화 가능
분극 손실 (Polarization Loss)	↑ 증가	전압 효율 저하, 전기 소비 증가 (SOEC 기준)
발열 (Heat Generation)	↑ 증가	냉각 부하 증가, 열관리 복잡성 상승
온도 구배 리스크 (Temperature Gradient Risk)	↑ 증가	셀 내 국부 과열 → 소재 열화 가속
열화 리스크 (Degradation Risk)	↑ 증가	전극 Ni coarsening, 계면 delamination 가속

5.2 열화율과 시스템 경제성의 연결

장기 SOEC 운전 연구에서 열화율은 가장 중요한 성능 지표 중 하나로 다루어집니다. ESC 기반 장기 steam electrolysis에서는 23,000시간 이상의 운전과 약 0.56%/1,000h 수준의 voltage degradation이 보고된 사례가 있습니다. 이를 기준으로 열화율이 시스템 경제성에 미치는 영향을 개략적으로 살펴보면 다음과 같습니다.

예를 들어 SOEC 스택 초기 전기 효율이 85%이고 열화율이 1%/1,000h라면, 10,000시간(약 14개월 연속 운전) 후 효율은 약 75%로 저하됩니다. 이 경우 동일한 수소 생산량을 유지하기 위해서는 전기 투입량을 약 13% 늘려야 하며, 전기 단가가 \$0.05/kWh라고 가정하면 운전 기간 동안 추가 전기 비용이 상당히 증가합니다. 반면 열화율이 0.5%/1,000h로 절반이라면, 동일한 10,000시간 후 효율은 약 80%를 유지하여 추가 전기 비용 증가를 크게 억제할 수 있습니다.

이것이 Voltacera가 높은 초기 성능만큼이나 낮은 열화율을 셀 개발의 핵심 목표로 설정하는 이유입니다. 열화율 0.5%p 개선이 LCOH에 미치는 영향은 초기 효율 1~2%p 향상보다 오히려 클 수 있습니다.

▶ **최고 효율 운전점이 반드시 최저 비용 운전점은 아니다.**

6. 운전 패턴이 중요하다 - 고정형 vs. 모빌리티 SOFC

같은 SOFC라고 하더라도 적용 분야에 따라 셀이 경험하는 운전 환경은 크게 달라집니다. '운전 패턴(Duty Cycle)'이란 시스템이 얼마나 자주, 얼마나 오래, 어떤 조건으로 운전되는지를 나타내는 개념입니다. 이 운전 패턴의 차이가 셀 설계 요구사항을 근본적으로 다르게 만듭니다.

▶ **응용 분야가 운전 패턴을 결정하고, 운전 패턴이 셀 요구사항을 결정한다.**

6.1 고정형 vs. 모빌리티 요구사항 비교

요구 특성	고정형 (Stationary)	모빌리티 (Mobility)	비고
연속 운전 능력	★★★★★	★★★	고정형: 장시간 안정적 출력이 핵심
낮은 열화율	★★★★★	★★★★★	고정형: 스택 교체 비용 최소화 우선
출력 밀도	★★★★★	★★★★★	모빌리티: 경량·소형화가 중요
Start/Stop 내구성	★★	★★★★★	모빌리티: 잦은 기동·정지 사

요구 특성	고정형 (Stationary)	모빌리티 (Mobility)	비고
			이클
열 사이클 내구성	★★	★★★★★	모빌리티: 상온~작동온도 반복
부하 추종성	★★★	★★★★★	모빌리티: 빠른 출력 변동 대응
무게 / 부피	★★	★★★★★	모빌리티: 탑재 공간 제약
기계적 강건성	★★★	★★★★★	모빌리티: 진동·충격 환경

따라서 고정형 SOFC에 최적화된 셀이 반드시 모빌리티 SOFC에서도 최적이라고 볼 수 없습니다. 고정형 시스템에서는 낮은 열화율과 높은 전기 효율이 가장 중요한 반면, 모빌리티 시스템에서는 열 사이클 내구성, Start/Stop 내구성, 높은 출력밀도가 우선순위를 차지합니다. 이 우선순위의 차이가 소재 조성, 전해질 두께, 전극 구조, 그리고 셀 아키텍처 선택을 다르게 만드는 근본 원인입니다.

7. Start/Stop, 열 사이클링 및 부하 추종 - 동적 운전은 셀에 무엇을 요구하는가

SOFC 시스템이 일정한 조건에서 장시간 운전한다면 셀은 비교적 안정적인 온도와 전기화학적 환경을 경험합니다. 그러나 start/stop이 반복되거나 부하가 크게 변동되는 환경에서는 상황이 근본적으로 달라집니다.

7.1 열 사이클의 기계적 영향

고온에서 작동하는 SOFC/SOEC에서는 전해질, 연료극, 공기극, 접합층 등 서로 다른 소재가 층상으로 결합되어 있습니다. 각 소재는 고유한 열팽창 계수(Coefficient of Thermal Expansion, CTE)를 가지며, 가열과 냉각 과정에서 서로 다른 속도로 팽창·수축합니다. 반복적인 열 사이클은 이 CTE 불일치로 인해 계면에 기계적 응력을 지속적으로 누적시키며, 장기적으로 계면 박리(delamination), 균열(cracking), 또는 구조 파손으로 이어질 수 있습니다.

이것이 ESC 구조가 열 사이클 내구성 측면에서 유리할 수 있는 이유 중 하나입니다. 두꺼운 전해질 기판이 기계적 지지체 역할을 함으로써 열 사이클 시 발생하는 계면 응력을 분산시키는 효과가 있습니다. 실제로 연료극 지지체형(ASC)과 전해질 지지체형(ESC) 셀의 열 사이클 내구성 비교

연구에서 ESC가 더 높은 기계적 안정성을 보이는 사례가 보고되고 있습니다.

7.2 산화·환원 내성 (Redox Tolerance)

Ni 기반 연료극은 SOFC의 가장 일반적인 연료극 소재이지만, 산화·환원 조건 변화에 민감합니다. Shutdown 과정에서 연료 공급이 차단되면 연료극이 산화 분위기에 노출될 수 있으며, 이때 Ni 이 NiO로 산화되면서 체적이 팽창합니다. 이후 재기동 시 환원 분위기에서 다시 Ni로 환원되면 체적이 수축합니다. 이 산화·환원 사이클이 반복되면 연료극 microstructure의 비가역적 변화와 기계적 손상이 누적됩니다.

이 문제를 완화하기 위한 접근법으로는 Redox-stable 소재 개발(GDC 기반 복합 연료극, 페로브스카이트계 연료극), shutdown 프로토콜 최적화(불활성 가스 purging), 그리고 최소 환원성 분위기 유지 등이 연구되고 있습니다.

7.3 부하 변동과 셀 내 열·기계적 응력

급격한 부하 변동(Load Change)은 셀 수준에서 연쇄적인 영향을 유발합니다. 전류가 급격히 변하면 셀 내 전류 분포가 재편되고, 이에 따라 국부적인 열 발생량이 변합니다. 이 국부 발열 변화는 셀 내 온도 구배를 형성하고, 온도 구배는 다시 열기계적 응력을 유발합니다.

따라서 동적 운전이 많은 시스템에서는 초기 최대 출력과 전기 효율만큼이나 다음 특성이 중요한 셀 설계 목표가 됩니다.

▶ 열 사이클 내구성 / 산화환원 내성 / 기계적 건전성 / 과도 응답 특성

8. 셀 아키텍처 - ESC vs ASC – 응용분야 맞춤형 설계

Solid Oxide Cell은 기계적 지지 구조에 따라 대표적으로 ESC(Electrolyte-Supported Cell, 전해질 지지체형)와 ASC(Anode/Fuel-Electrode-Supported Cell, 연료극 지지체형)로 구분됩니다. 두 구조는 각각 고유한 장점과 제약을 가지며, 적합한 적용 분야가 다릅니다.

8.1 ESC 와 ASC 의 구조적 차이와 특성

항목	ESC	ASC
전해질 두께	100~250 μm (두꺼운 지지체)	5~20 μm (얇은 치밀층)
기계적 지지체	전해질 자체	연료극 (Ni-YSZ 서멧)
Ohmic 저항	높음 (두꺼운 전해질)	낮음 (얇은 전해질)
작동 온도	800~1,000°C (높은 이온 전도도 필요)	650~800°C 가능
출력 밀도	상대적으로 낮음	상대적으로 높음
열 사이클 내구성	우수 (두꺼운 전해질의 기계적 안정성)	제한적 (계면 응력 취약)
Redox 내성	비교적 우수	Ni 기반 연료극 취약
SOEC 적합성	우수 (특히 reversible 운전)	SOEC 고전류밀도에서 delamination 리스크
제조 복잡성	상대적으로 단순	다층 박막 공정 필요
양산 비용	상대적으로 유리	공정 최적화 필요

8.2 아키텍처 선택의 기준

따라서 셀 구조 선택에서 핵심 질문은 'ESC가 ASC보다 우수한가?'가 아닙니다.

▶ 어떤 구조가 요구되는 운전 조건에 가장 적합한가?

장시간 고온 운전, 반복적인 thermal cycle, SOFC/SOEC reversible 운전을 목표로 하고 제조 비용과 양산성을 중시하는 시스템에서는 ESC가 유리합니다. 반면 최고 출력밀도와 낮은 작동 온도가 우선이고 열 사이클 빈도가 낮은 대형 고정형 발전 시스템에서는 ASC가 선택될 수 있습니다.

Voltacera는 특정 셀 구조를 모든 응용 분야에 적용하기보다는, 목표 운전 조건에 맞춰 소재·두께·전극 및 셀 구조를 함께 설계하는 접근을 지향합니다. 이 접근법이 'Application-Specific Design'의 핵심입니다.

9. 소재와 미세구조 - 소재가 셀의 특성을 결정한다.

동일한 셀 아키텍처에서도 소재 구성과 microstructure에 따라 전기화학 성능과 내구성은 크게 달라질 수 있습니다. 소재 선택은 셀 개발의 출발점이자, 시스템 경제성의 가장 근본적인 레버입니다.

9.1 전해질 소재

전해질에서는 높은 이온 전도도(ionic conductivity)와 기밀성(gas-tightness)뿐 아니라 기계적 안정성이 동시에 요구됩니다. 현재 가장 널리 사용되는 전해질 소재는 이트리아 안정화 지르코니아(YSZ, 8mol% Y_2O_3)이며, 스칸디아 안정화 지르코니아(ScSZ)는 YSZ 대비 이온 전도도가 높아 저온 운전 또는 ESC 구조에서 ohmic 손실을 줄이는 데 유리합니다. GDC(가돌리늄 도핑 세리아)는 중저온(500~700°C)에서 높은 이온 전도도를 보이지만, 단독 전해질로 사용 시 전자 전도성이 나타날 수 있어 YSZ와의 이중층 구조로 활용되기도 합니다.

Voltacera는 ScSZ 기반 전해질 기판의 tape casting 공정을 자체 개발하고 있으며, 소결 후 치밀도와 기계적 강도를 최적화하는 데 집중하고 있습니다.

9.2 연료극 소재

연료극(Fuel Electrode)에서는 전기 전도도, 이온 전달 경로(ionic pathway), 가스 확산(gas diffusion) 및 전기화학 반응 사이트(TPB: Triple Phase Boundary)가 균형을 이루어야 합니다. 현재 주류 소재는 Ni-YSZ 서멧으로, Ni의 전자 전도성과 YSZ의 이온 전도성이 결합된 복합 구조입니다.

그러나 Ni-YSZ 서멧은 SOEC 모드에서 고수증기 조건에 노출될 때 Ni 입자 성장(coarsening)이 가속될 수 있으며, redox 사이클에도 취약합니다. 이를 보완하기 위해 GDC를 기반으로 한 NiO-GDC 복합 연료극이 활발히 연구되고 있으며, 페로브스카이트계 혼합 이온-전자 전도체(MIEC) 소재도 차세대 연료극으로 주목받고 있습니다.

9.3 공기극 소재

공기극(Oxygen Electrode)에서는 높은 ORR(산소 환원 반응)/OER(산소 산화 반응) 활성과 함께 장기 고온 운전에서의 화학적·미세구조적 안정성이 요구됩니다. LSCF($La_{0.6}Sr_{0.4}Co_{0.2}Fe_{0.8}O_{3-\delta}$)는 높은 혼합 이온-전자 전도성을 가져 현재 가장 많이 사용되는 공기극 소재입니다. 그러나 SOEC 모드에서 고전류밀도 운전 시 전해질과의 계면에서 delamination이 발생할 수 있어, GDC 버퍼

층의 역할이 중요합니다.

Voltacera는 LSCF 분말 합성에서 입자 크기 분포와 소결 활성을 제어하는 공침(co-precipitation) 공정을 핵심 역량으로 개발하고 있으며, 이는 Chapter 2에서 언급한 심영재 교수와의 공동 연구를 통해 지속적으로 고도화되고 있습니다.

9.4 연속적인 제조·성능 Chain

따라서 실제 셀 개발은 단순한 소재 선택의 문제가 아닙니다. 소재 조성에서 최종 셀 성능까지 이어지는 전 과정은 하나의 연속적인 chain으로 이해해야 합니다.

단계	역할 및 영향
분말 조성 (Powder Composition)	입자 크기, 조성 균일성, 표면적이 모든 이후 공정의 기반
입자 크기 및 분산성 (Particle Size & Dispersion)	슬러리/잉크 유변학과 성형 균일성에 직접 영향
슬러리/잉크 유변학 (Slurry / Ink Rheology)	Tape casting 두께 균일성, Screen printing 해상도 결정
성형체 형성 (Green Body Formation)	기공 구조와 수축률 균일성의 출발점
소결 (Sintering)	최종 치밀도, 결정립 크기, 계면 접합 품질 결정
기공률 및 미세구조 (Porosity & Microstructure)	가스 확산 경로, TPB 밀도, 유효 이온·전자 전도도
전기화학 성능 (Electrochemical Performance)	ASR(면적 비저항), 활성화 에너지, 운전 전압 특성
내구성 (Durability)	열화율, 열 사이클 안정성, 운전 수명

10. 볼타세라 ESC 플랫폼 - 소재에서 전기화학 셀까지

Voltacera는 Solid Oxide Cell을 단순한 완제품으로 접근하기보다 소재-공정-미세구조-전기화학 성능을 연결하는 세라믹 플랫폼으로 개발하고 있습니다. 이 접근법의 핵심은 고객의 시스템과 운전 조건에 따라 Materials → Cell Architecture → Electrochemical Performance를 함께 최적화 하는 것입니다.

10.1 핵심 기술 역량

역량 영역	세부 내용
세라믹 분말 합성 및 formulation	LSCF 공기극 분말의 공침법(co-precipitation) 합성, ScSZ/YSZ 전해질 분말 배합 최적화
Tape casting을 이용한 전해질 기판 제조	얇고 균일한 ESC 기판 구현, 소결 후 치밀도 및 기계적 강도 제어
Screen printing용 전극 잉크 설계	공기극·연료극·기능층(functional layer)별 잉크 유변학 최적화
기능층 및 전극 구조 설계	GDC 버퍼층, functional cathode layer, graded electrode 구조 설계
소결 프로파일 및 세라믹 co-processing	다층 세라믹 구조의 공소결(co-sintering) 조건 최적화, 계면 품질 관리
ESC 기반 SOFC/SOEC 셀 제조	단전지(single cell) 완성, SOFC-SOEC 양방향 운전 가능 셀 개발
단전지 전기화학 평가	임피던스 분광법(EIS), I-V 특성, 장기 열화 시험, 가스 조성별 성능 평가

10.2 응용 분야별 셀 설계 유연성

Voltacera의 ESC 플랫폼은 단일 고정된 셀 사양을 제공하는 것이 아닙니다. 고객의 응용 분야와 우선순위에 따라 다음과 같은 설계 파라미터를 조정할 수 있습니다.

- 전해질 소재 및 두께: ScSZ 기반(고이온전도도) vs. YSZ 기반(높은 기계적 강도), 두께 조정을 통한 ohmic 저항과 기계적 안정성 균형
- 공기극 구조: LSCF 단층 vs. LSC/LSCF 이중층, 기능층(functional layer) 두께 및 조성

- 연료극 조성: Ni-YSZ vs. Ni-GDC, Redox-stable 조성 적용 여부
- GDC 버퍼층: 두께 및 치밀도 조절을 통한 전해질-공기극 계면 최적화
- 셀 크기 및 형상: 고궤 스택 설계에 맞춘 커스터마이징

11. 셀 → 시스템으로의 경제성 - 셀의 차이가 LCOE와 LCOH로 어떻게 전환되는가

최종적으로 셀 기술의 가치는 시스템 경제성으로 연결되어야 합니다. 셀 수준의 성능 개선이 시스템 LCOE(균등화 발전 비용) 또는 LCOH(균등화 수소 생산 비용)에 어떻게 영향을 미치는지를 이해하는 것이 셀 개발의 방향성을 결정합니다.

11.1 셀 면적과 CAPEX의 관계

셀의 power density 또는 수소 생산 밀도가 증가하면, 동일한 시스템 출력을 구현하는 데 필요한 active cell area를 줄일 수 있습니다. 개념적으로 SOFC에서는:

$$\text{필요 셀 면적} \approx \text{목표 출력} / \text{전력 밀도 (W/cm}^2\text{)}$$

SOEC 역시:

$$\text{필요 셀 면적} \approx \text{목표 수소 생산량} / \text{수소 생산 밀도 (mol/cm}^2\text{/s)}$$

예를 들어 power density가 현재 0.4 W/cm²에서 0.5 W/cm²로 25% 향상된다면, 동일한 1 MW 시스템을 구현하는 데 필요한 셀 면적은 2,500 cm² 감소합니다. 이는 직접적인 스택 CAPEX 절감으로 연결됩니다. 그러나 이것이 전부가 아닙니다.

11.2 열화율, 수명, OPEX의 연결

높은 전류밀도로 인해 열화가 빨라진다면 스택 교체 주기가 짧아지고 교체 비용(OPEX)이 증가합니다. 반대로 지나치게 낮은 전류밀도로 운전하여 수명을 극대화하더라도 필요한 셀 면적과 스택 CAPEX가 과도하게 커질 수 있습니다.

실제 시스템 경제성은 다음 요소들의 복합 함수로 이해해야 합니다.

경제성 요소	셀 수준 레버	시스템 수준 영향
전기 효율	소재 ASR, 작동 온도	연료비 / 전기 소비 (OPEX)
열화율	전극 microstructure 안정성	스택 수명, 교체 주기 (OPEX)

경제성 요소	셀 수준 레버	시스템 수준 영향
제조 비용	소재 비용, 공정 수율	스택 단가 (CAPEX)
스택 수명	열 사이클 내구성, Redox 내성	총 CAPEX 감가상각
열 통합	작동 온도, 폐열 온도	외부 열원 활용, 전력 절감 (OPEX)
출력 밀도	I-V 특성, 활성화 면적	시스템 소형화, CAPEX 절감

▶ 엔지니어링 목표는 시스템 수명 동안 유효 에너지의 비용을 최소화하는 운전점을 찾는 것이다.

12. 결론 - There Is No Universal Best Cell

SOFC/SOEC 산업에서 셀의 성능은 흔히 출력밀도, 전류밀도 또는 효율이라는 단일 숫자로 비교됩니다. 그러나 실제 시스템에서 '좋은 셀'을 결정하는 것은 훨씬 복잡적입니다.

SOEC에서는 운전 전압에 따라 셀이 흡열에서 열중립, 발열 영역으로 이동하며, 외부 폐열의 존재 여부에 따라 최적 운전 전략이 달라집니다. SOFC에서는 같은 셀이라도 고정형과 모빌리티 응용 분야에서 요구되는 duty cycle이 다르며, 이에 따라 장기 열화, 열 사이클링, Start/Stop 및 출력밀도의 상대적 중요도가 달라집니다. 그리고 이러한 요구 조건은 다시 ESC/ASC와 같은 셀 아키텍처, 전해질 두께, 전극 조성, microstructure 및 제조 공정으로 연결됩니다.

따라서 셀 개발은 시스템 개발과 분리해서 생각하기 어렵습니다.

▶ **There is no universally 'best' SOFC/SOEC cell. The best cell is the one engineered for the system it serves.**

Voltacera는 세라믹 소재와 전해질 기판에서 전극, 기능층 및 완성 셀까지 연결되는 기술 플랫폼을 기반으로, 고객의 시스템과 운전 조건에 적합한 Solid Oxide Cell을 개발하는 것을 목표로 합니다.

From ceramic materials to electrochemical cells — engineered for the system.

▶ 다음 챕터 예고: Chapter 4

Chapter 4에서는 Voltacera의 ESC 기반 셀이 경쟁 제품 대비 구체적으로 어떤 성능 지표를 달성하고 있는지, 그리고 그 성능이 실제 고객 시스템에서 어떻게 검증되고 있는지를 데이터와 함께 제시합니다.

참고문헌 (References)

- [1] 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, 고온 운전 이점, Co-electrolysis, 장기 열화 특성의 핵심 기술 근거.
- [2] Mogensen, M. B., Chen, M., Frandsen, H. L., Graves, C., Hansen, J. B., Hansen, K. V., Høgh, J., Jacobsen, T., Skafte, T. L., & Sun, X. (2019). Reversible solid-oxide cells for clean and sustainable energy. *Clean Energy*, 3(3), 175–201. <https://doi.org/10.1093/ce/zkz023> — SOFC/SOEC reversible 운전, 운전 물리학 차이, 열화 메커니즘 분석.
- [3] Graves, C., Ebbesen, S. D., Jensen, S. H., Simonsen, S. B., & Mogensen, M. B. (2015). Eliminating degradation in solid oxide electrochemical cells by reversible operation. *Nature Materials*, 14(2), 239–244. <https://doi.org/10.1038/nmat4165> — Reversible 운전을 통한 열화 억제 전략, SOEC 공기극 delamination 메커니즘.
- [4] Jensen, S. H., Sun, X., Ebbesen, S. D., & Chen, M. (2016). Pressurized operation of a planar solid oxide cell stack. *Fuel Cells*, 16(2), 205–218. — SOEC 스택 운전 조건과 성능 특성, 전류밀도와 열화율의 관계.
- [5] Fang, Q., Blum, L., & Menzler, N. H. (2015). Performance and degradation of Solid Oxide Electrolysis Cells in stack. *Journal of The Electrochemical Society*, 162(8), F907–F912. <https://doi.org/10.1149/2.0941508jes> — ESC 기반 SOEC 스택 장기 운전(23,000h 이상), 약 0.56%/1,000h 열화율 보고.
- [6] Leah, R., Bone, A., Lankin, M., Selcuk, A., Rahman, M., Clare, A., Mukerjee, S., & Selby, M. (2017). Ceres Power Steel Cell Technology: Towards a Truly Commercially Viable SOFC. *ECS Transactions*, 78(1), 175–185. — MSC(금속 지지체형 셀) 기술과 ESC/ASC와의 비교, 작동온도 및 기계적 특성 차이.
- [7] Tietz, F., Sebold, D., Brisse, A., & Schefold, J. (2013). Degradation phenomena in a solid oxide electrolysis cell after 9000 h of operation. *Journal of Power Sources*, 223, 129–135. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2012.09.061> — SOEC 장기 운전 열화 현상, 공기극 미세구조 변화, 계면 열화.
- [8] Schefold, J., Brisse, A., & Tietz, F. (2012). Nine Thousand Hours of Operation of a Solid Oxide Cell in Steam Electrolysis Mode. *Journal of The Electrochemical Society*, 159(2), A137–A144. — ESC 기반 SOEC 장기 운전 데이터, thermoneutral 운전점 분석.
- [9] Ni, M., Leung, M. K. H., & Leung, D. Y. C. (2008). Technological development of hydrogen production by solid oxide electrolyzer cell (SOEC). *International Journal of Hydrogen Energy*, 33(9), 2337–2354. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2008.02.048> — SOEC 운전 열역학, thermoneutral voltage 개념, 에너지 분배 분석.
- [10] Laguna-Bercero, M. A. (2012). Recent advances in high temperature electrolysis using solid oxide fuel cells: A review. *Journal of Power Sources*, 203, 4–16. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2011.12.019> — SOEC 운전 모드, 성능 지표, 열화 원인 종합 리뷰.
- [11] Zheng, Y., Wang, J., Yu, B., Zhang, W., Chen, J., Qiao, J., & Zhang, J. (2017). A review of high temperature co-electrolysis of H₂O and CO₂ to produce sustainable fuels using solid oxide electrolysis cells (SOECs): advanced materials and technology. *Chemical Society Reviews*, 46(5), 1427–1463. — Co-electrolysis 기술, 탄소 침적(coking) 억제 소재 전략, e-fuel 합성 경로.
- [12] Minh, N. Q. (2004). Solid oxide fuel cell technology — features and applications. *Solid State Ionics*, 174(1–4), 271–277. <https://doi.org/10.1016/j.ssi.2004.07.042> — ESC vs. ASC 셀 구조 비교, 각 구조의 장단점 및 적용 분야.
- [13] Mogensen, M., & Skaarup, S. (1996). Kinetic and geometric aspects of solid oxide fuel cell electrodes. *Solid*

State Ionics, 86–88, 1151–1160. — Triple Phase Boundary(TPB) 개념, 전극 microstructure와 전기화학 성능의 연관성.

[14] Sunfire GmbH. (2023–2025). MultiPLHY / Neste: 2.6 MW Sunfire-HyLink SOEC at the Rotterdam Refinery. — 산업 폐증기 활용 SOEC 운전, 최대 약 84% LHV 전기 효율 실증 사례.

[15] thyssenkrupp nucera AG & Fraunhofer IKTS. (2025). First SOEC Pilot Production Plant for Stacks for Green Hydrogen Production. Fraunhofer IKTS. — ESC 기반 SOEC 스택 파일럿 생산, 열 사이클 안정성 및 장기 운전 데이터.

[16] International Energy Agency (IEA). (2024). Electrolysers — Energy System Tracking. International Energy Agency. — 글로벌 수전해 시장 현황, 기술별 성능 비교, 2030년 용량 목표.

[17] International Renewable Energy Agency (IRENA). (2020). Green Hydrogen Cost Reduction: Scaling Up Electrolysers to Meet the 1.5°C Climate Goal. IRENA, Abu Dhabi. — ALK, PEM, SOEC 기술 비교, LCOH 분석, 비용 절감 경로.

[18] Stempien, J. P., Ding, O. L., Sun, Q., & Chan, S. H. (2012). Thermodynamic analysis of combined solid oxide electrolyzer and Fischer–Tropsch processes. Energy, 44(1), 542–550. — SOEC + Fischer-Tropsch 통합 시스템, Co-electrolysis Syngas 활용 경제성.

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.

VoltaCera