Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego

Rzeczpospolita Polska

Dofinansowane przez Unię Europejską

POLITECHNIKA GDAŃSKA

Platforma PGEDU+: Rozwój kwalifikacji i kompetencji osób dorosłych

Wysokotemperaturowe ogniwa paliwowe i elektrolizery – przykładowe rozwiązania

Prof. dr hab. inż. Piotr Jasiński

Gdańsk 2026

Projekt współfinansowany przez Unię Europejską ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021 - 2027

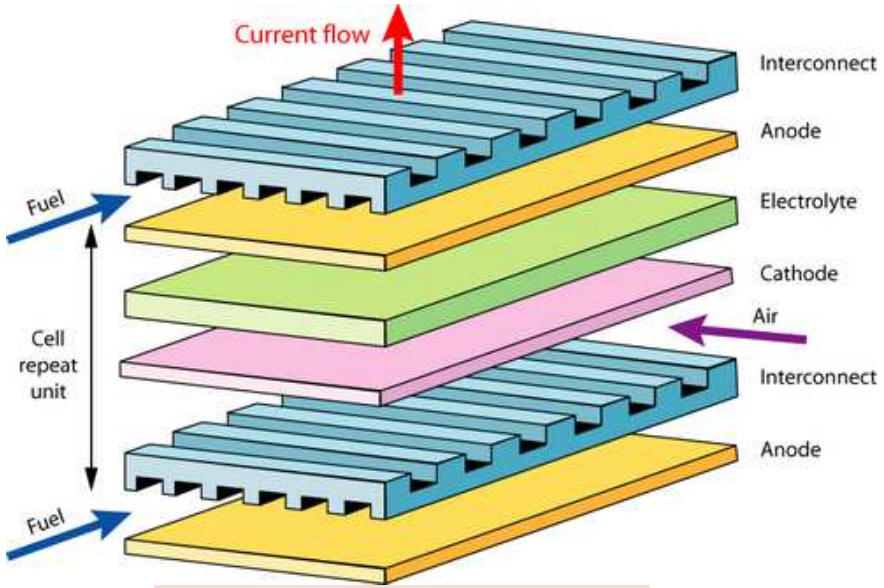
POLITECHNIKA GDAŃSKA

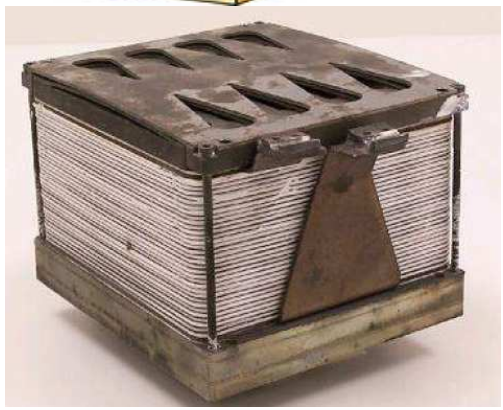
Zużycie energii stosu dla różnych typów elektrolizerów

Elektrolizer	Alkaliczny	PEM	AEM	SOEC
Zużycie energii stosu (DC) (kWh/kg H_2)	47-66	47-66	51-66	34

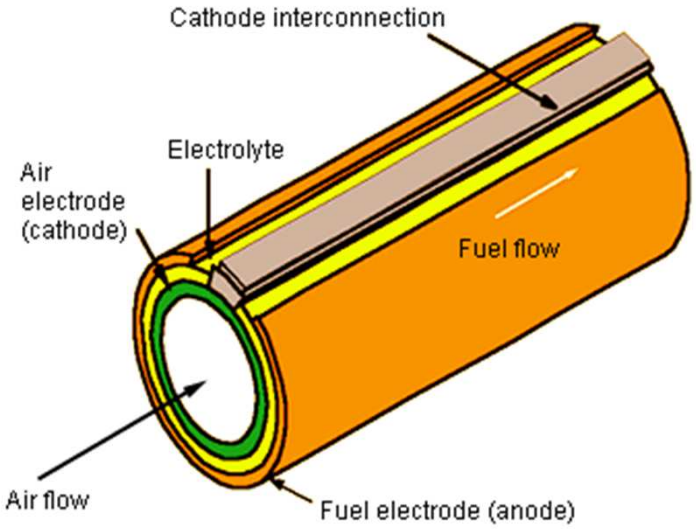
POLITECHNIKA GDAŃSKA

Konfiguracje ogniw





rozwiązanie Dephi

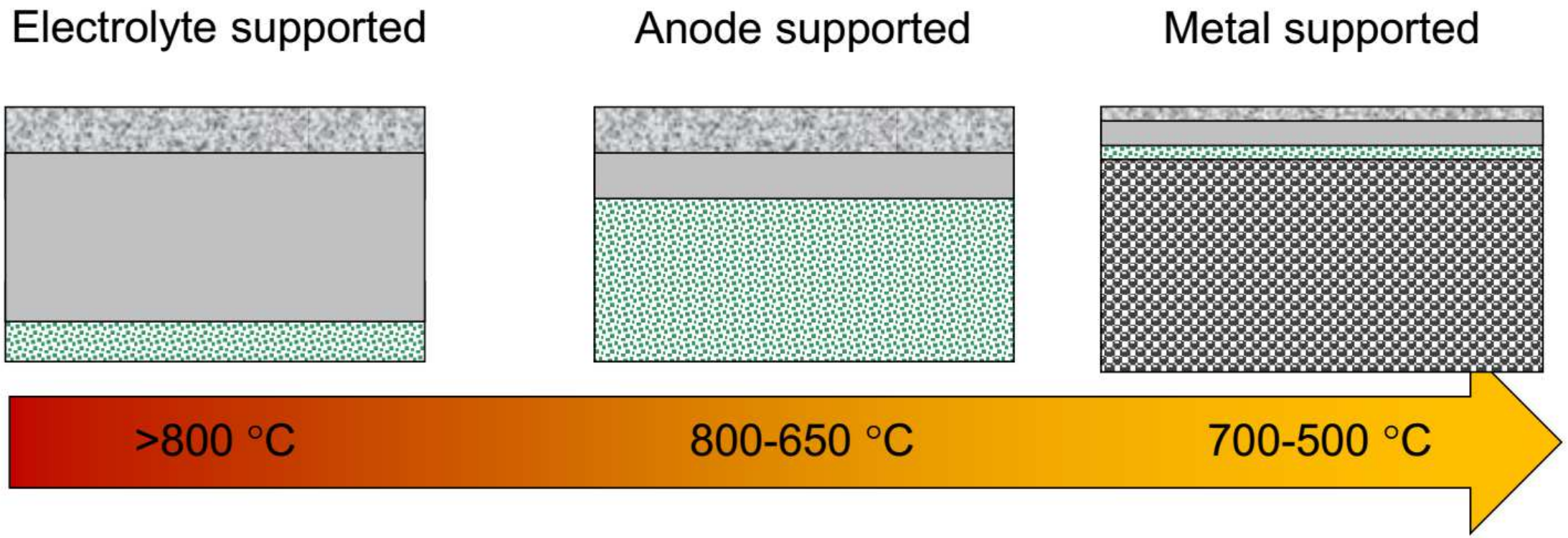




rozwiązanie Siemens Westinghouse

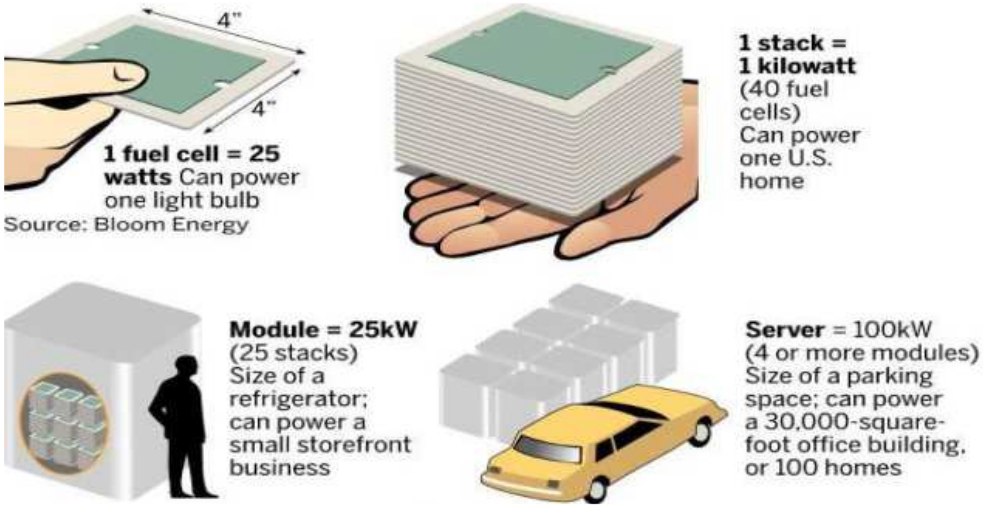
POLITECHNIKA GDAŃSKA

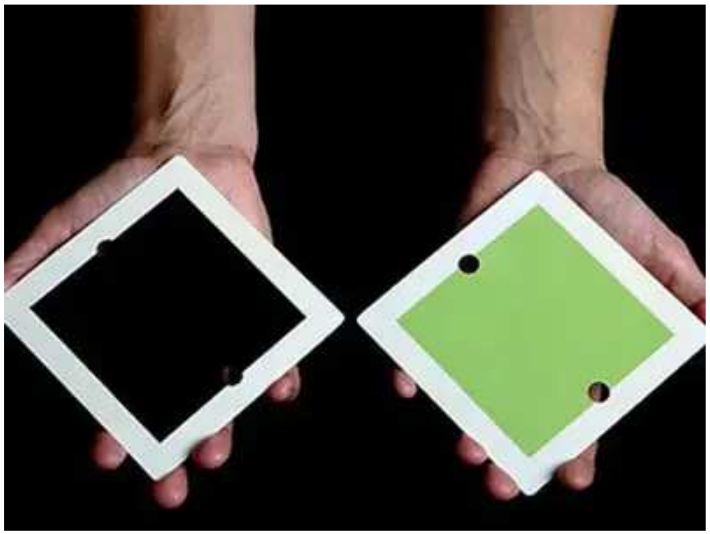
Kolejne generacje ogniw paliwowych



POLITECHNIKA GDAŃSKA

Bloom Energy







System w technologii SOFC pracuje w temperaturze 980 °C i może być zasilany różnymi rodzajami paliwa. Najmniejszy Bloom Energy Server to system o mocy 100 kW, którego koszt szacowano na 700–800 tys. dolarów.

https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2015.04.056

POLITECHNIKA GDAŃSKA

Porównanie systemów back-up

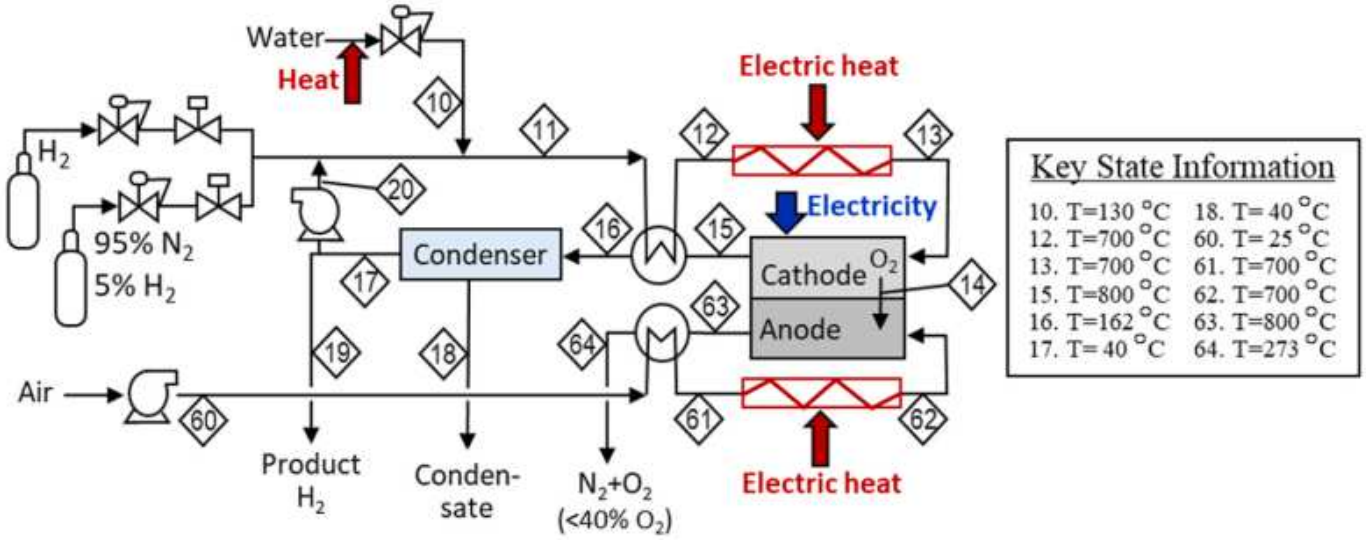
	Silnik spalinowy diesla	Bateria	Bloom energy server
Cena zakupu	$20 000	$42 000	$700 000
Max moc	100 kW	50 kW	100 kW
Hałas	96 db	–	70 db
Czas pracy	~ 8 h	~6.4 min	ciągły
Emisja CO_2	675 kg CO_2/MWh	–	386 kg CO_2/MWh

https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2015.04.056

POLITECHNIKA GDAŃSKA

High-temperature steam electrolysis Bloom Energy testowany przez Idaho National Lab w latach 2022-2024





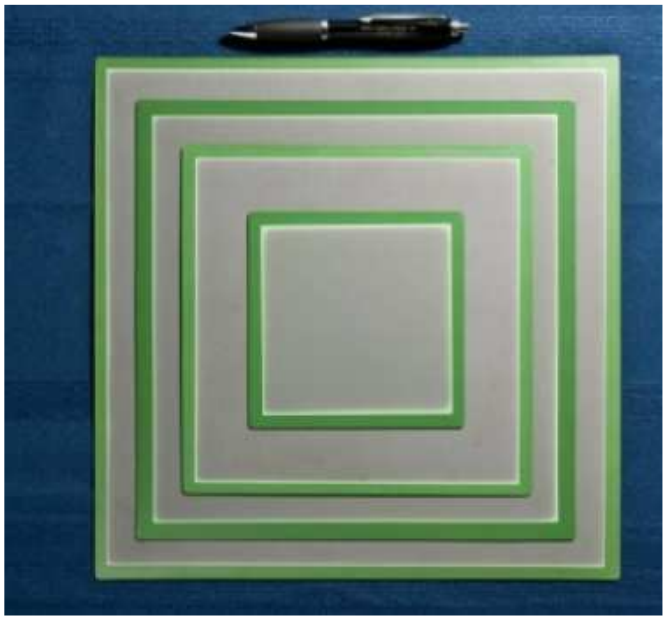
System SOEC o mocy 100 kW pozwolił uzyskanie zużycia energii elektrycznej (DC) w procesie produkcji wodoru na poziomie zaledwie 36,7 kWh/kg H_2.

Degradacja systemu była mniejsza niż 0,2% na 1000 godzin pracy
Pokazano zdolność systemów do zmiany mocy ze 100% do 10% w czasie krótszym niż 10 minut

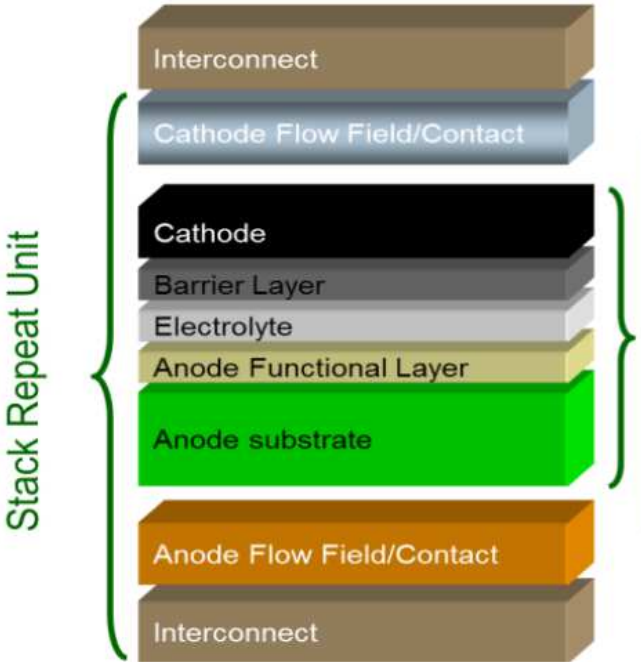
https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2025.150283

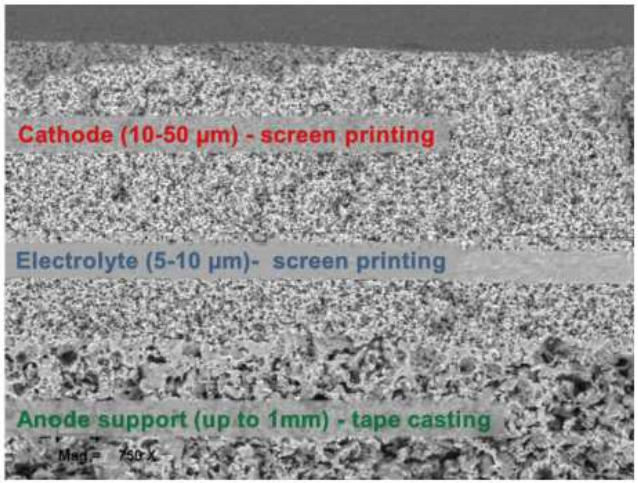
POLITECHNIKA GDAŃSKA

FuelCell Energy Inc.



do 1000 cm^2





Component	Materials	Thickness	Porosity	Process
Anode	Ni/YSZ	~0.3 mm	~ 40%	Tape casting
Electrolyte	YSZ	5 - 10 µm	< 5%	Screen printing
Cathode	Conducting ceramic	10 - 50 µm	~ 30%	Screen printing

POLITECHNIKA GDAŃSKA

FuelCell Energy Inc.



Cell with active area of 81 cm^2

SOFC Stack



7 kW DC Power Generation
36 kW DC / 25 kg H_2/day electrolysis
350 cells, 17” height



Power Generation Stack Module – Only runs in power generation mode on a wide range of fuels, including natural gas, biofuels, propane, and hydrogen



200kW Power Generation System



Electrolysis Stack Module – Produces hydrogen from steam with power input



Electrolysis
4,000 kg/day H2 from 7.3 MW



Energy Storage Stack Module – Alternates between power generation on hydrogen fuel and electrolysis producing hydrogen from water

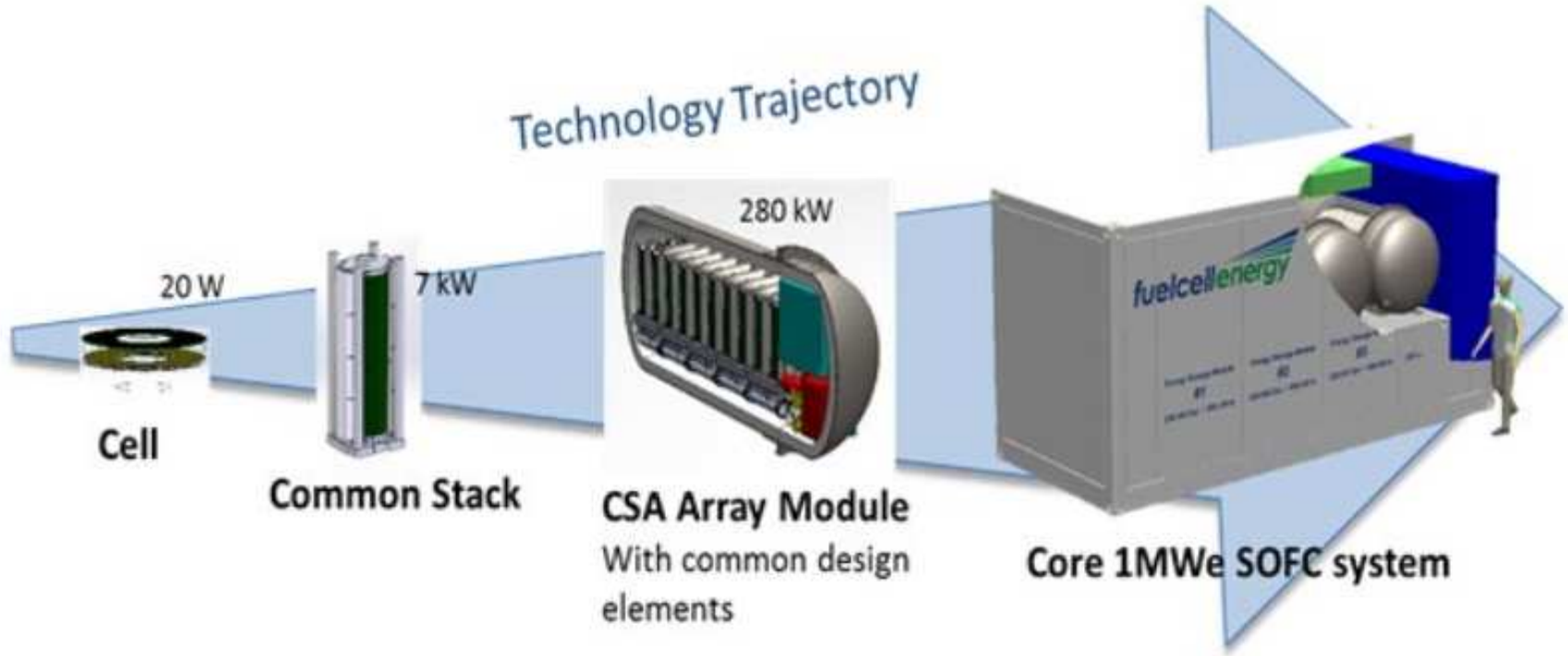


Energy Storage System
1MW 8 MWh

koszt: $2400/ 1 kW

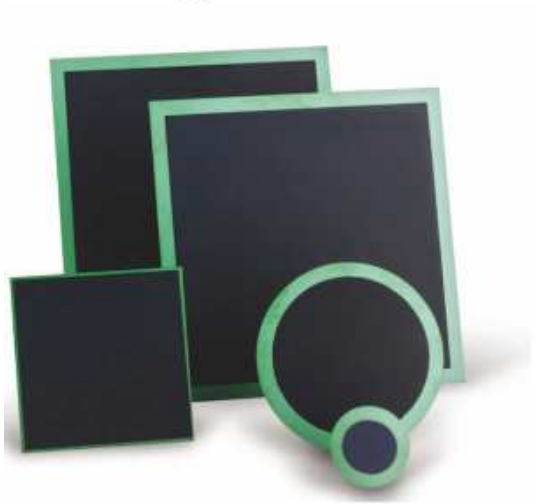
POLITECHNIKA GDAŃSKA

Skalowalność



Elcogen

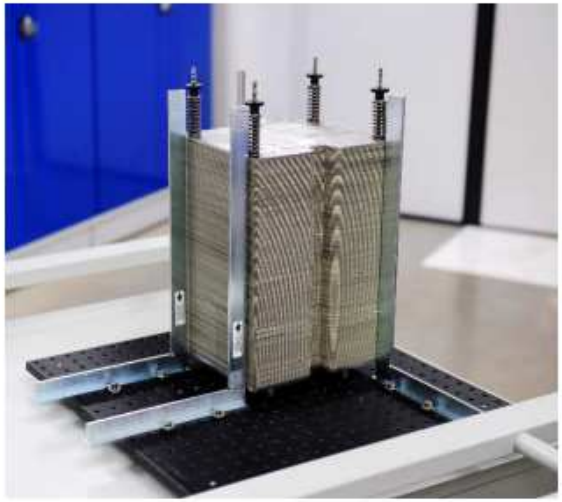
Single cells



1 kW stack



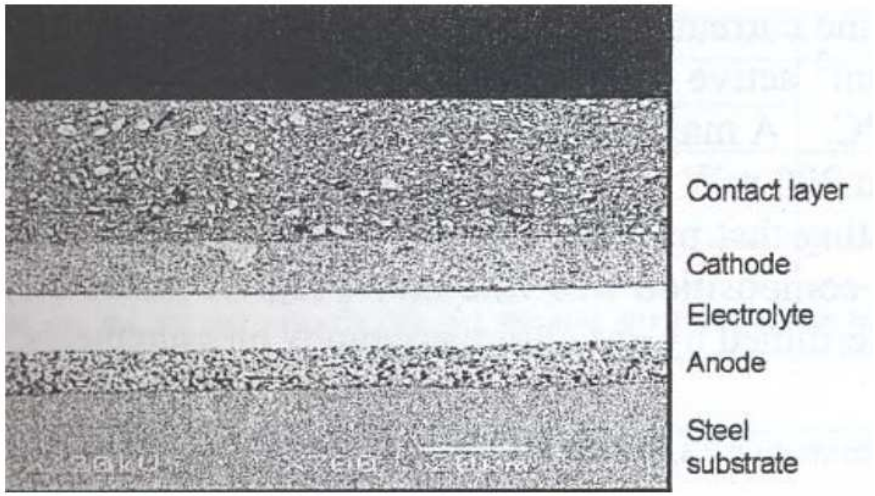
3 kW stack

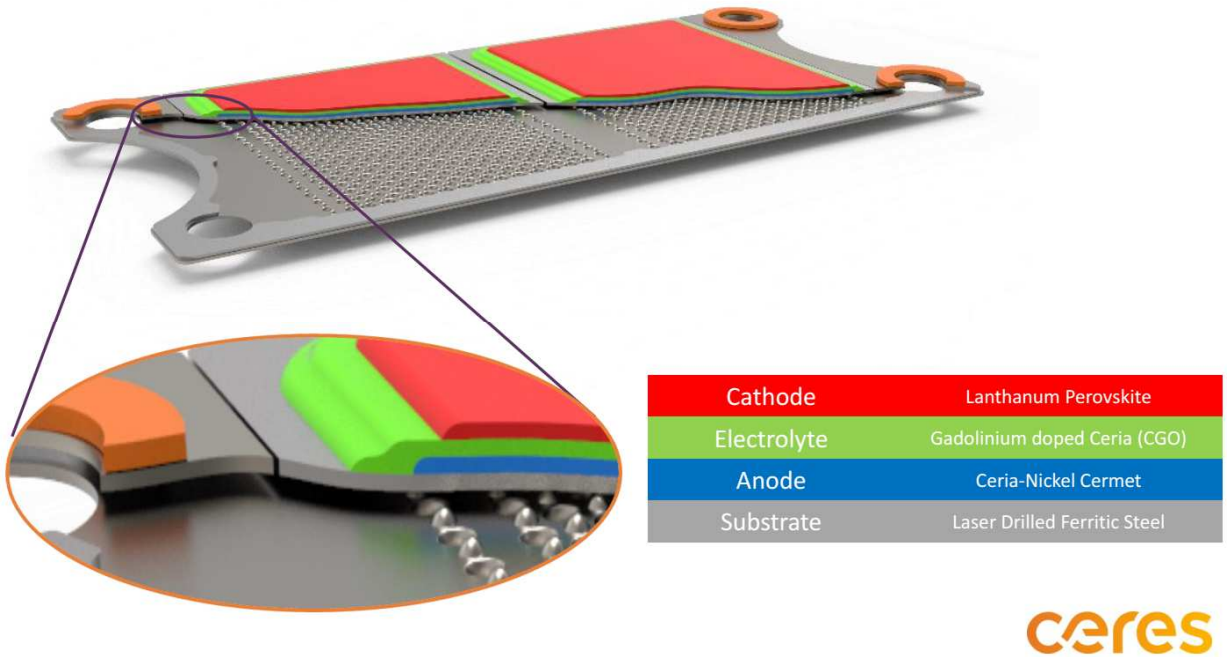


http://www.elcogen.com/technology

POLITECHNIKA GDAŃSKA

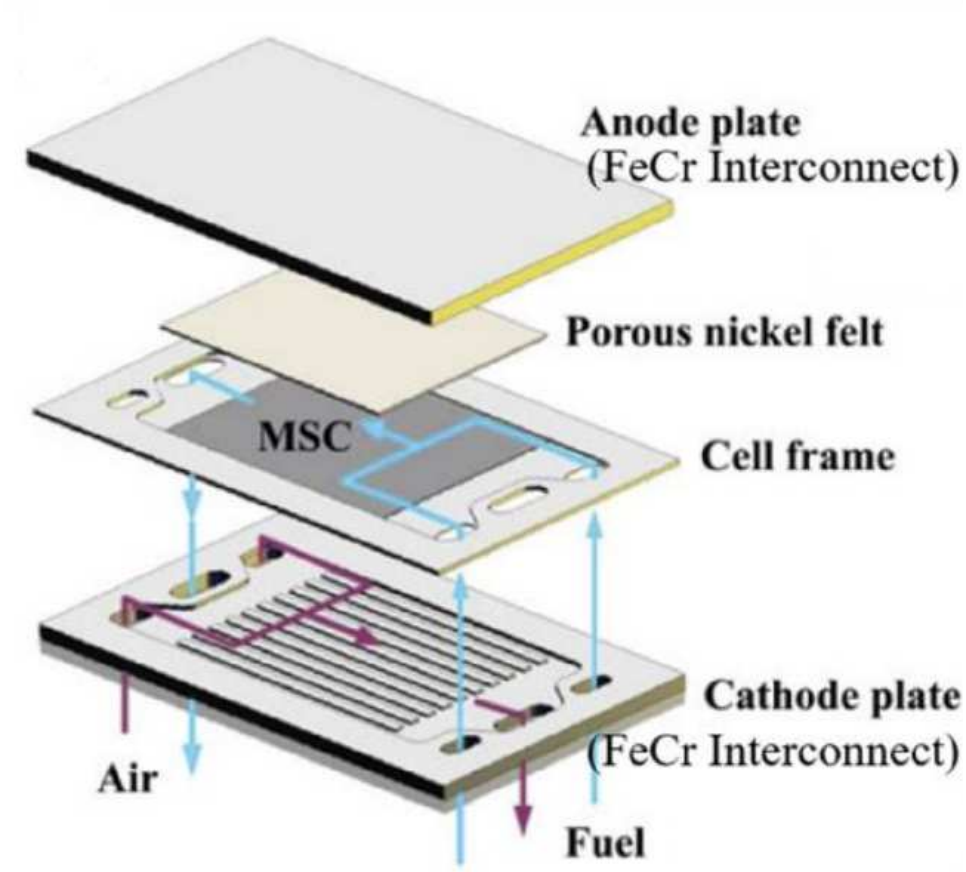
Ceres Power

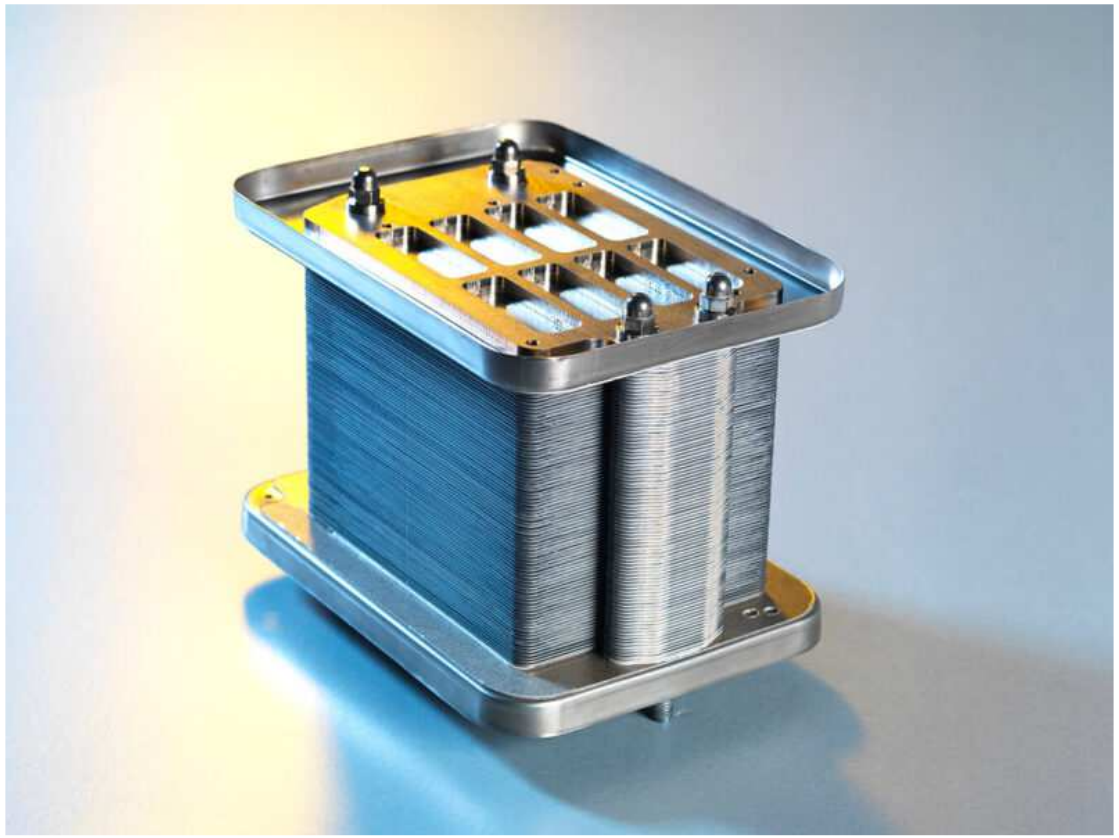




R.T. Leah, A. Bone, E. Hammer, A. Selcuk, M. Rahman, A. Clare, S. Mukerjee, M. Selby ECS Transactions. 78 (2017) 87
Ceres Power, Electrochemical Society Proceedings, Vol. 2005-07, 113-122 (2005)

POLITECHNIKA GDAŃSKA | Ceres Power





1kW stack

Zhou, Z.; Nadimpalli, V.K.; Pedersen, D.B.; Esposito, V. Degradation Mechanisms of Metal-Supported Solid Oxide Cells and Countermeasures: A Review. *Materials* **2021**, *14*, 3139.

POLITECHNIKA GDAŃSKA

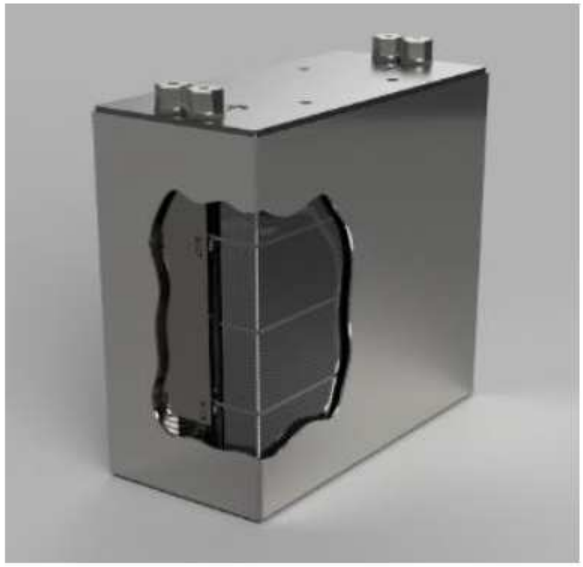
Produkty



Specification

- Weight 11 kg
- Volume 5 l
- Cells ~100/stack
- Dimensions: W 190mm D 140mm H 180mm
- Sealing by welding and compressive gaskets

Home CHP System



Specification

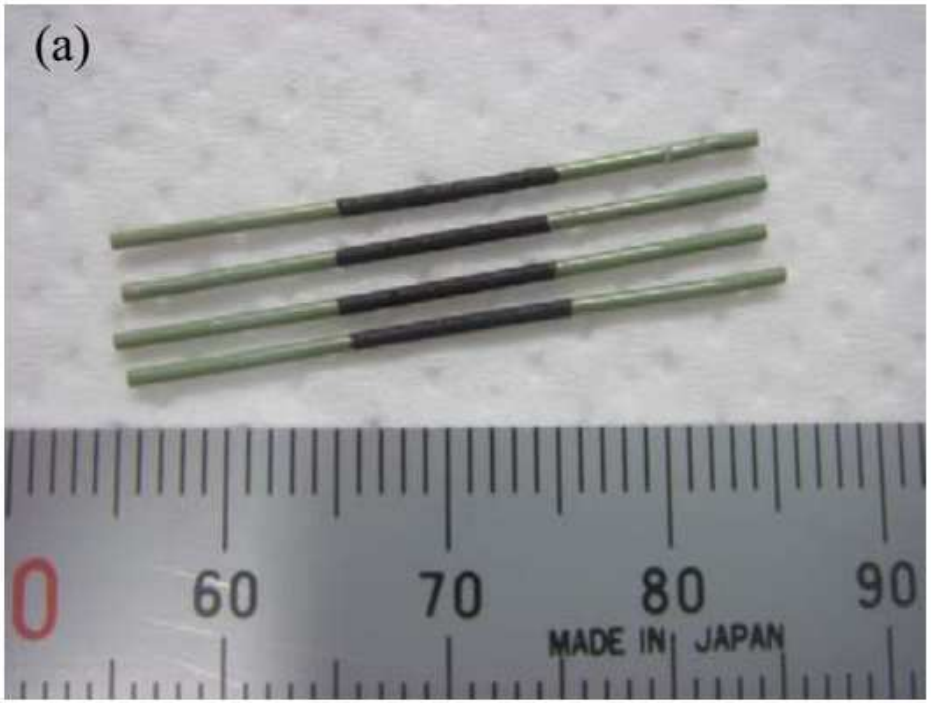
- Weight 58 kg
- Volume 16.5 l
- Cells 250/stack
- Dimensions: W 300mm D 140mm H 393mm
- Sealing by welding and compressive gaskets

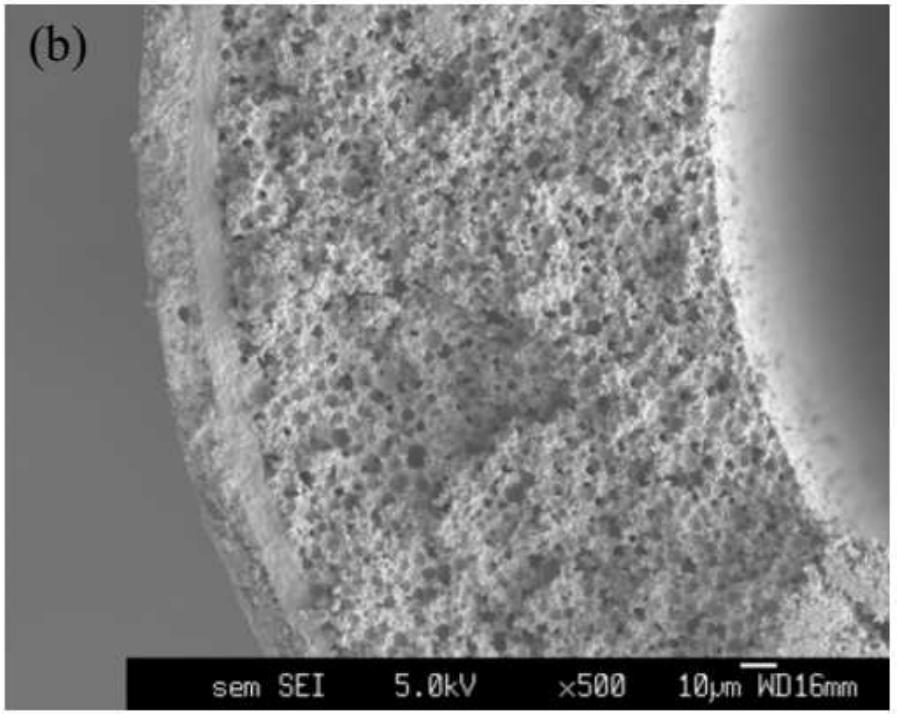
5-10kW Commercial CHP, Data Centres
30kW+ Buses, 100kW+ Power Generation

POLITECHNIKA GDAŃSKA

Microtubular SOFC

Rurowe ogniwa paliwowe typu SOFC o średnicy 0,8 mm

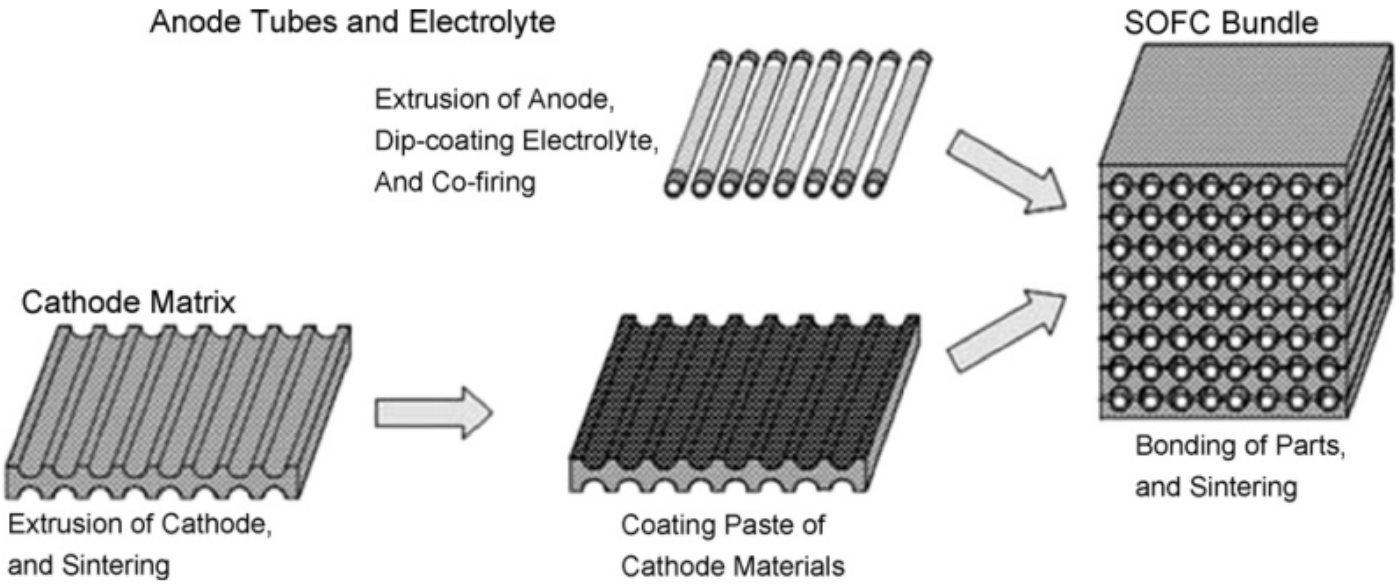


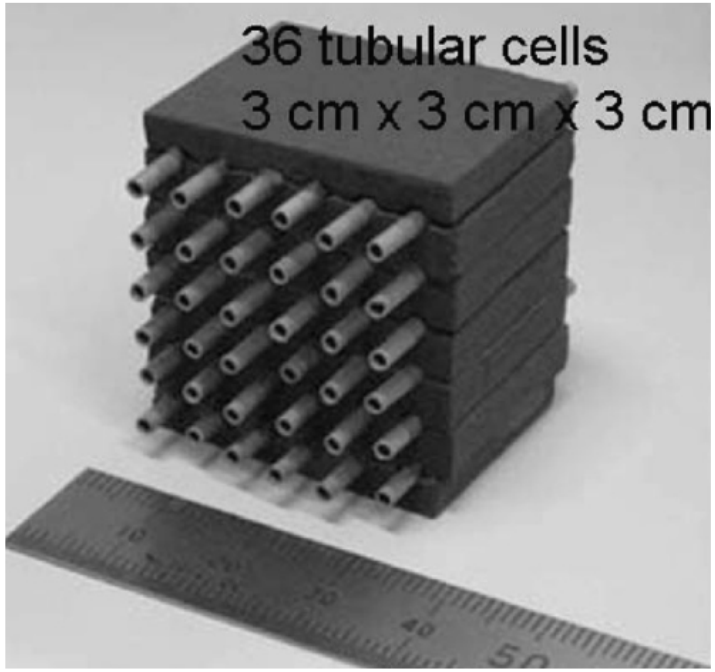


Nowa mikrostruktura anody o wysokiej porowatości wynoszącej 46% (przed redukcją) oraz zmniejszonej grubości anody poniżej 200 µm

10.1149/1.3038914

POLITECHNIKA GDAŃSKA

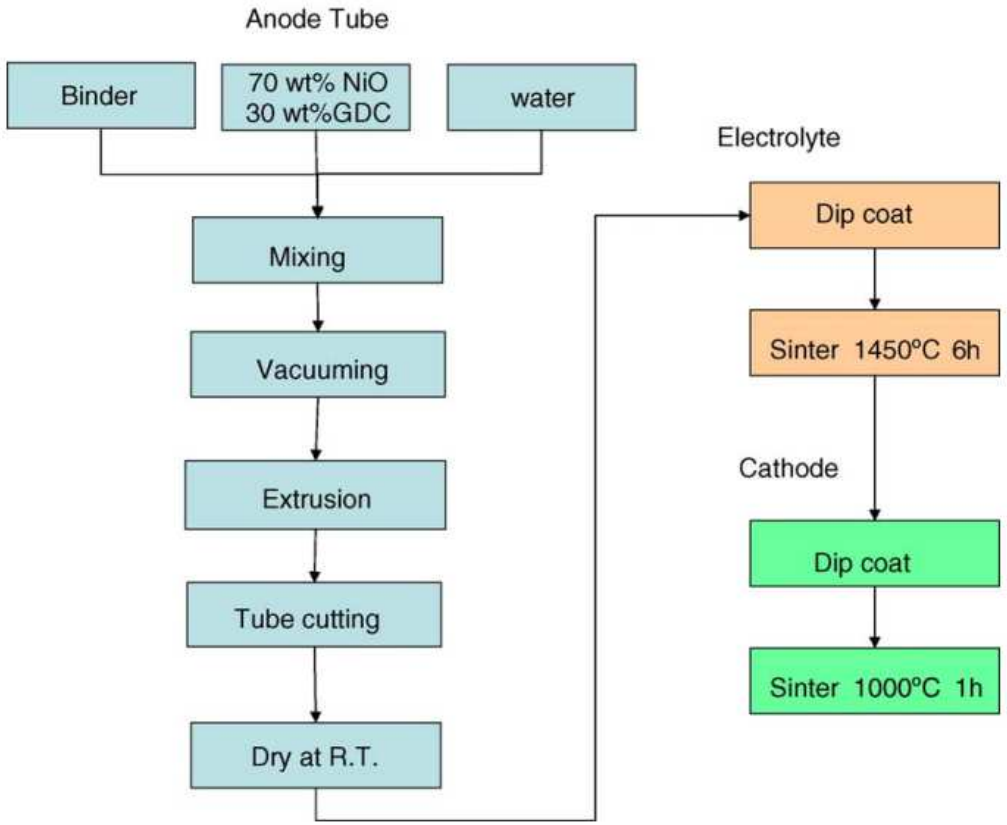




10.1016/j.jpowsour.2006.10.002

POLITECHNIKA GDAŃSKA

Wykonanie



Rurki anodowe wykonano z proszku tlenku niklu (NiO) firmy Sumitomo Metal Mining, stabilizowanego tlenkiem itru tlenku cyrkonu (YSZ) (8YSZ, Tosoh), kulek poli(metakrylanu metylu) (PMMA) firmy Sekisui Plastics oraz celulozy firmy Yuken Kogyo.

Proszki mieszano przez 1 godzinę, a po dodaniu odpowiedniej ilości wody mieszaninę mieszano przez 30 minut w komorze próżniowej. Otrzymaną masę pozostawiano do sezonowania przez ponad 15 godzin.

Rurki formowano metodą wytłaczania z wykorzystaniem wcześniej przygotowanej masy, stosując ekstruder tłokowo-cylindrowy firmy Ishikawa-Toki Tekko-sho oraz metalową matrycę.

Zawiesinę do powlekania elektrolitu metodą zanurzeniową przygotowano poprzez mieszanie proszku YSZ, rozpuszczalników (toluen i etanol), lepiszcza (poliwinylobutyral), dyspergatora (polimeru aminowego) oraz plastyfikatora (ftalanu dioktylu) przez 24 godziny.

Rurki anodowe zanurzano w zawiesinie i powlekano przy prędkości wyciągania wynoszącej 1,5 $mm \cdot s^{-1}$. Powłoki suszono w powietrzu, a następnie współspiekano w temperaturach 1250, 1300, 1350 lub 1400 °C przez 1 godzinę w atmosferze powietrza.

Na warstwę elektrolitu nanoszono metodą zanurzeniową zawiesinę warstwy pośredniej GDC firmy Seimi Chemical, a następnie spiekano ją w temperaturze 1100 °C.

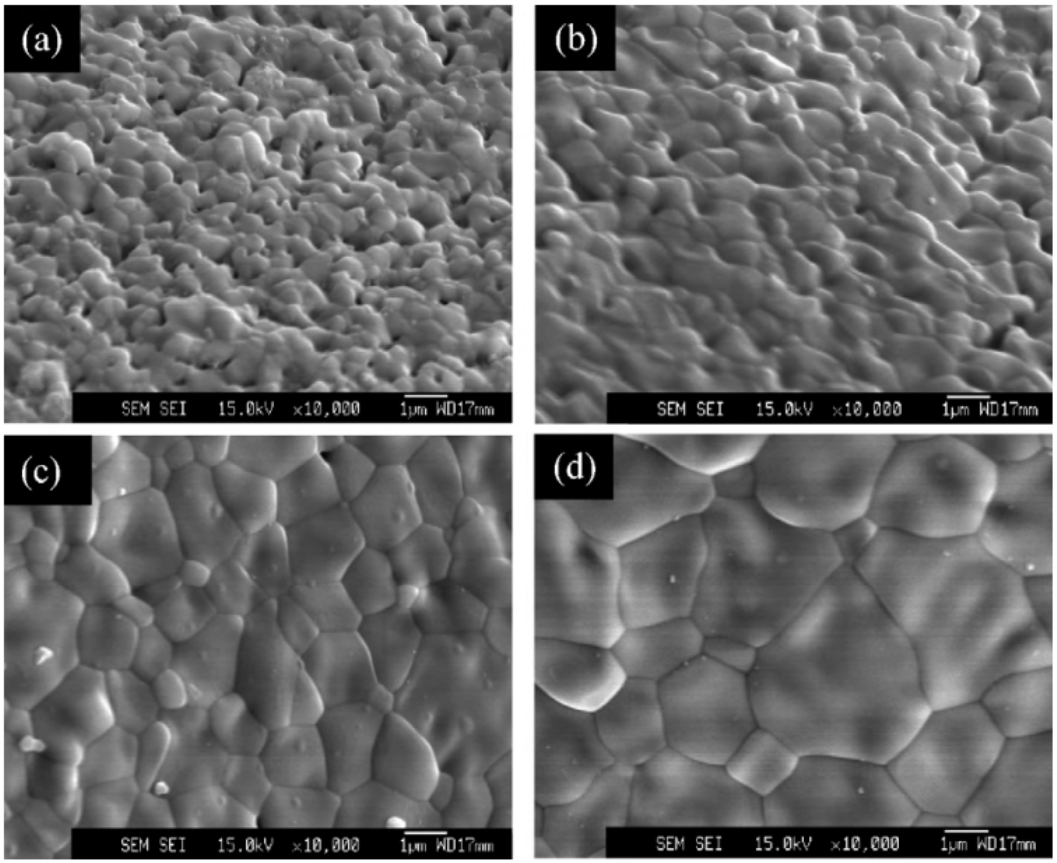
Zawiesinę katodową $La_{0.6}Sr_{0.4}Co_{0.2}Fe_{0.8}O_{3-\delta}$ (LSCF) wraz z proszkiem GDC (LSCF/GDC) nanoszono metodą zanurzeniową na warstwę pośrednią. Kompletne ogniwa SOFC otrzymano po końcowym spiekaniu w temperaturze 1000 °C.

10.1016/j.jpowsour.2006.01.037

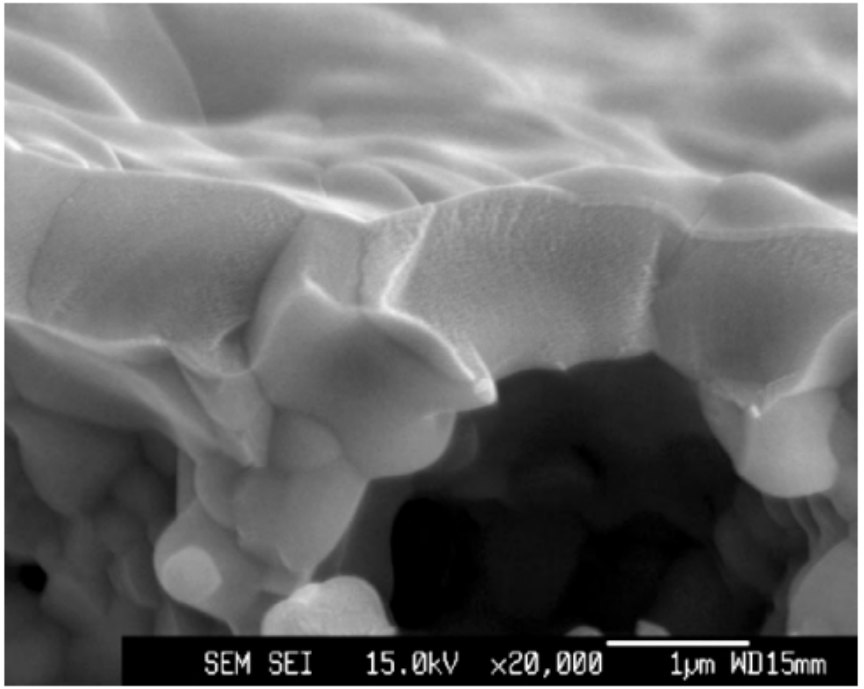
10.1016/j.jpowsour.2009.11.149

POLITECHNIKA GDAŃSKA

Microtubular SOFC



Powierzchnia elektrolitu przygotowanego na porowatym podłożu anodowym. Struktura współspiekana w temperaturach: (a) 1250 °C, (b) 1300 °C, (c) 1350 °C oraz (d) 1400 °C



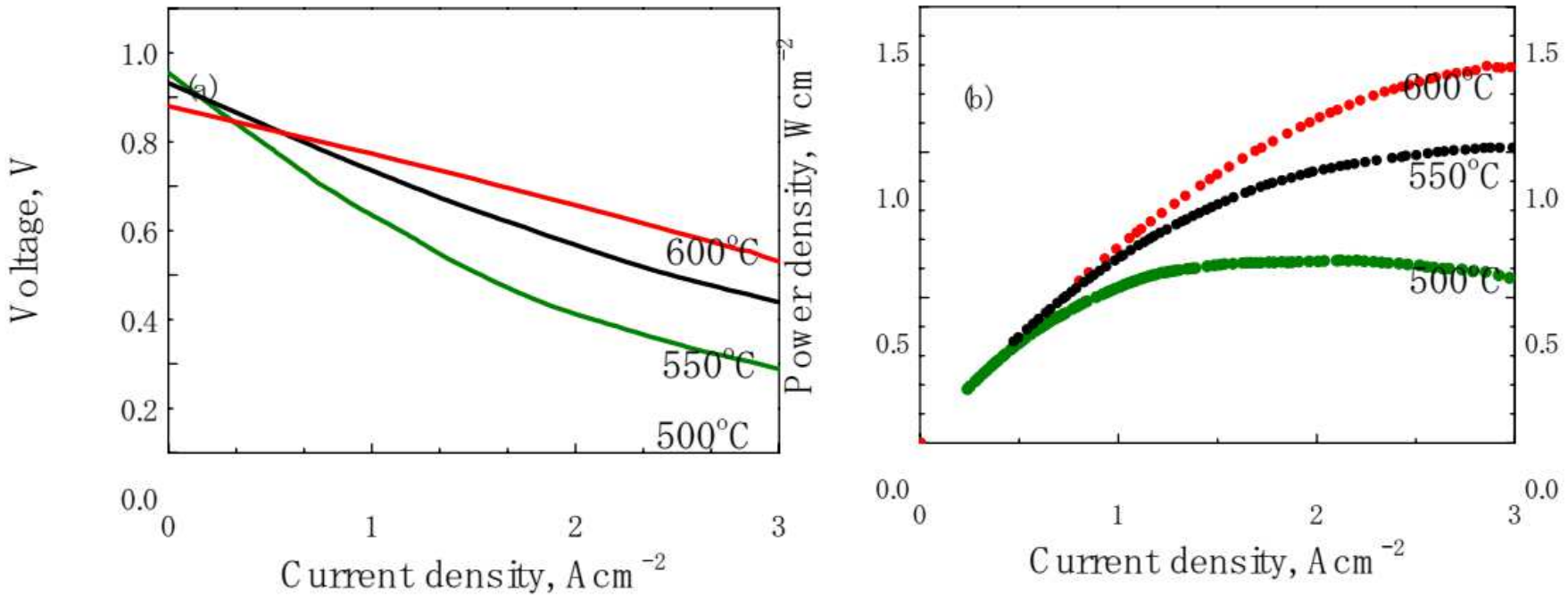
Elektrolit naniesiony na porowatą anodę współspiekaną w temperaturze 1350 °C.

10.1016/j.jpowsour.2009.11.149

POLITECHNIKA GDAŃSKA

Microtubular SOFC

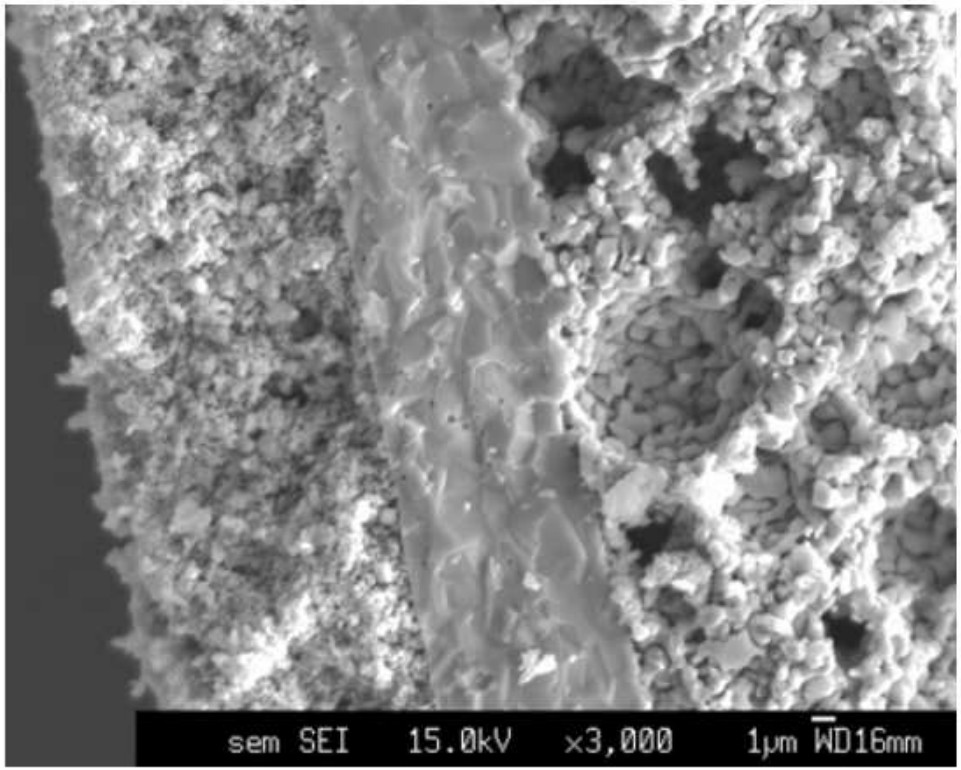
Napięcie obwodu otwartego (OCV) było stosunkowo niskie i mieściło się w zakresie od 0,85 do 0,78 V przy temperaturze pracy od 500 do 600 °C. Gęstość mocy ogniwa oszacowano na podstawie powierzchni katody wynoszącej 0,13 cm². Maksymalną gęstość mocy równą odpowiednio 628, 1017 oraz 1293 mW/cm² przy zastosowaniu wilgotnego wodoru jako paliwa uzyskano w temperaturach 500, 550 oraz 600 °C

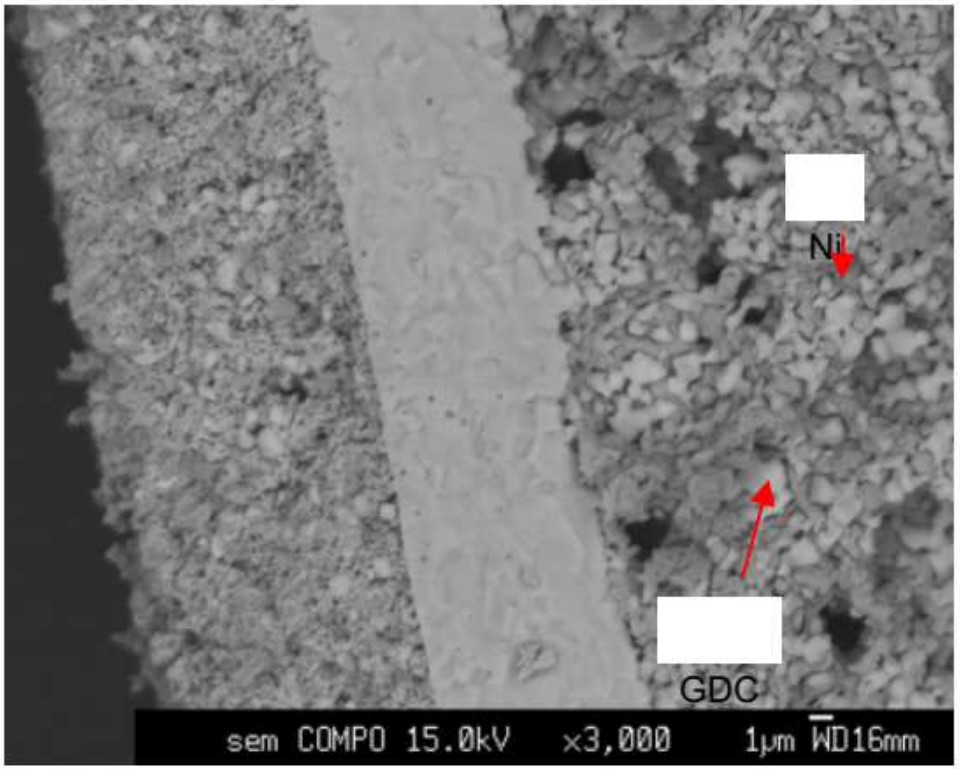


10.1149/1.3038914

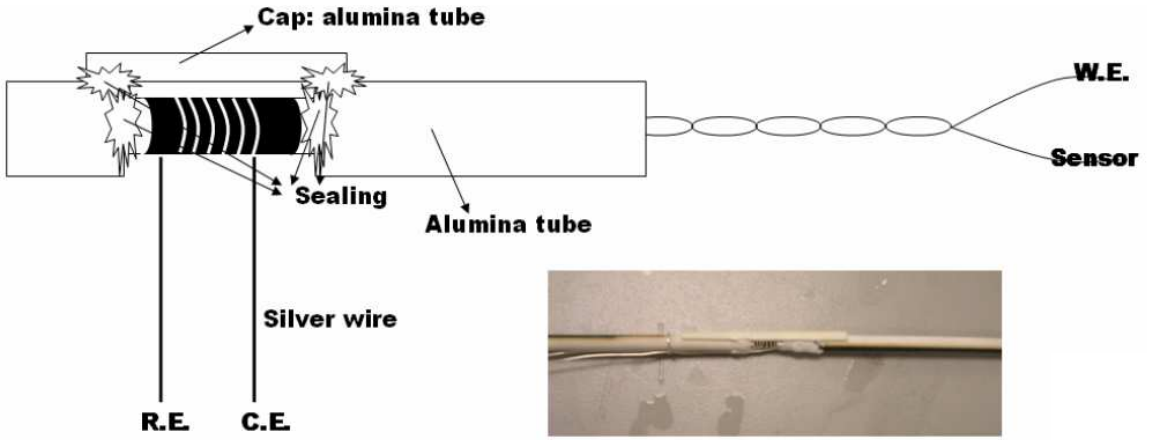
POLITECHNIKA GDAŃSKA

Mikrostruktura rurowego ogniwa po pomiarach





10.1149/1.3038914



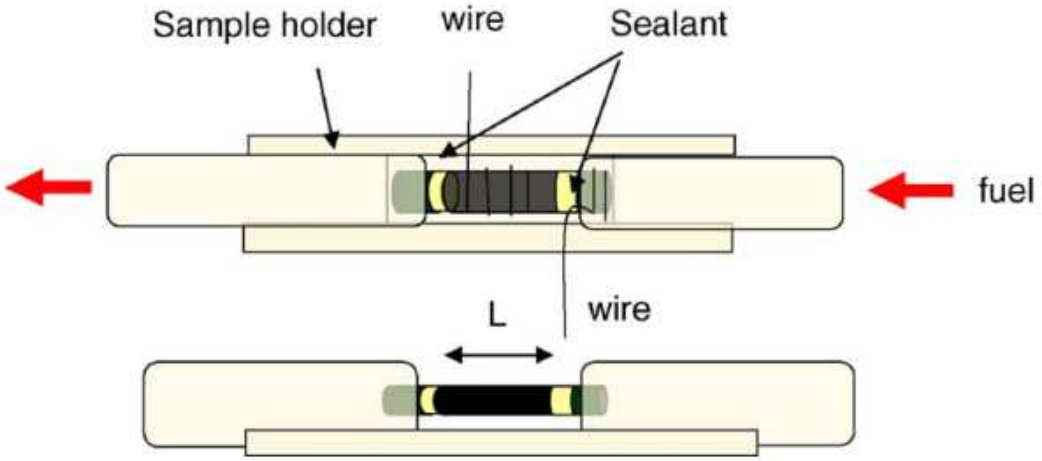


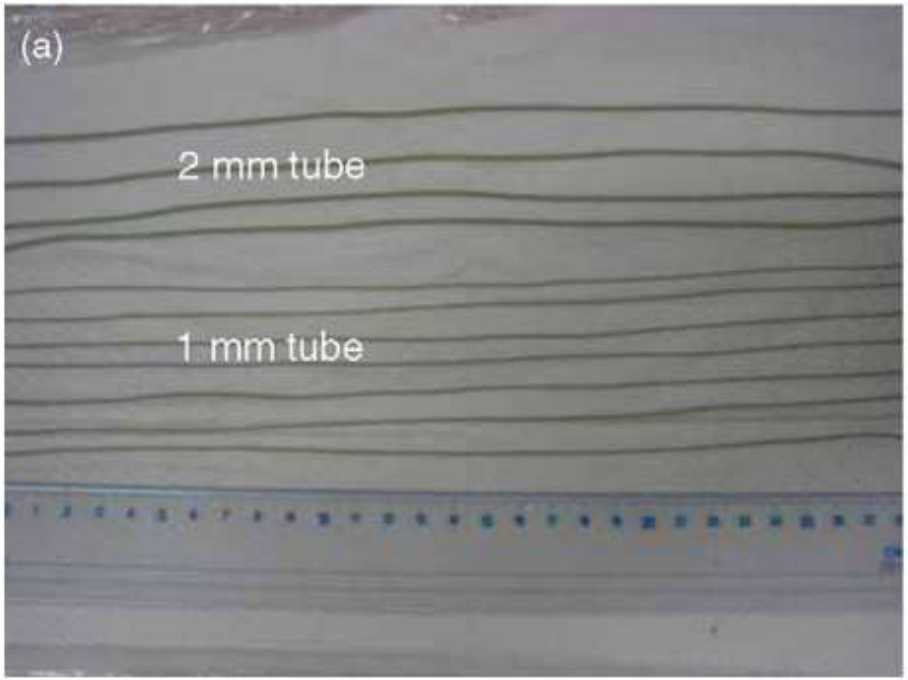
Fig. 2. Experimental apparatus of the single tubular cell measurement.

10.1016/j.jpowsour.2006.01.037

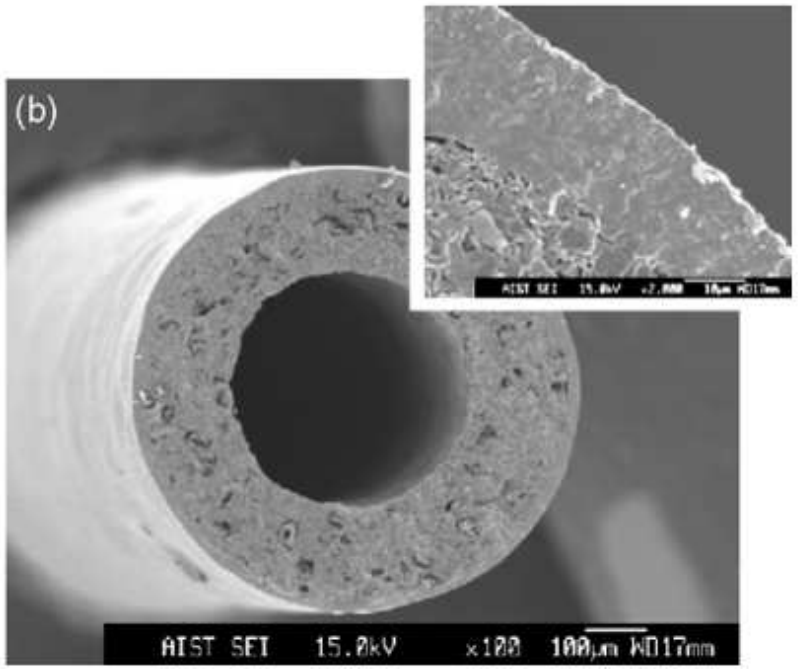
POLITECHNIKA GDAŃSKA

Przygotowywanie

After Extrusion

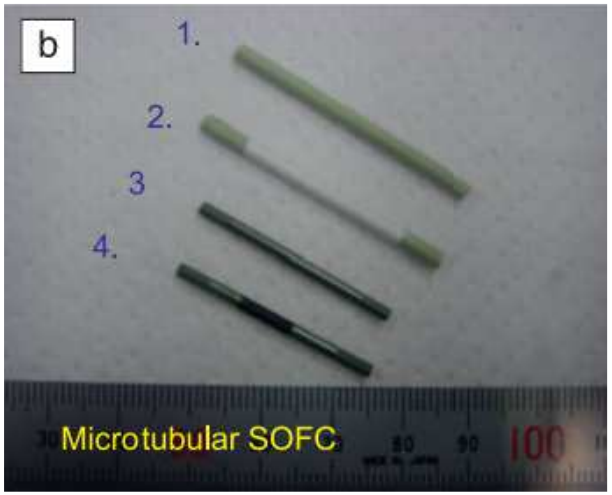


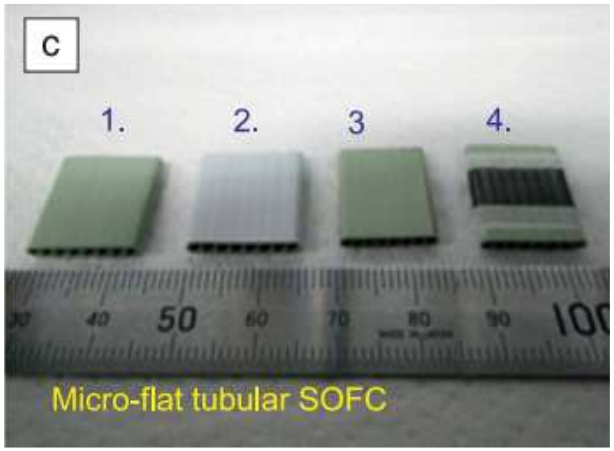
After sintering with electrolyte at 1450°C 6h

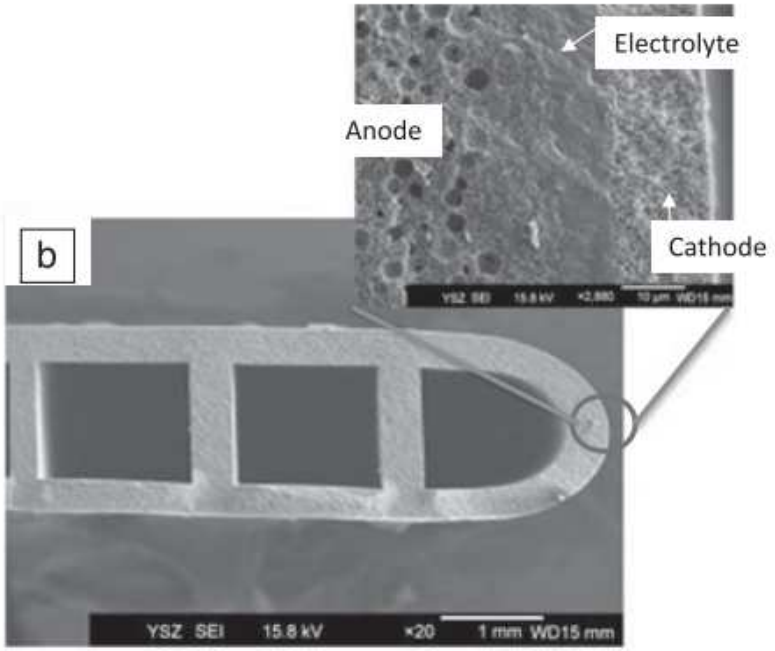


POLITECHNIKA GDAŃSKA

Micro-flat tubular SOFC





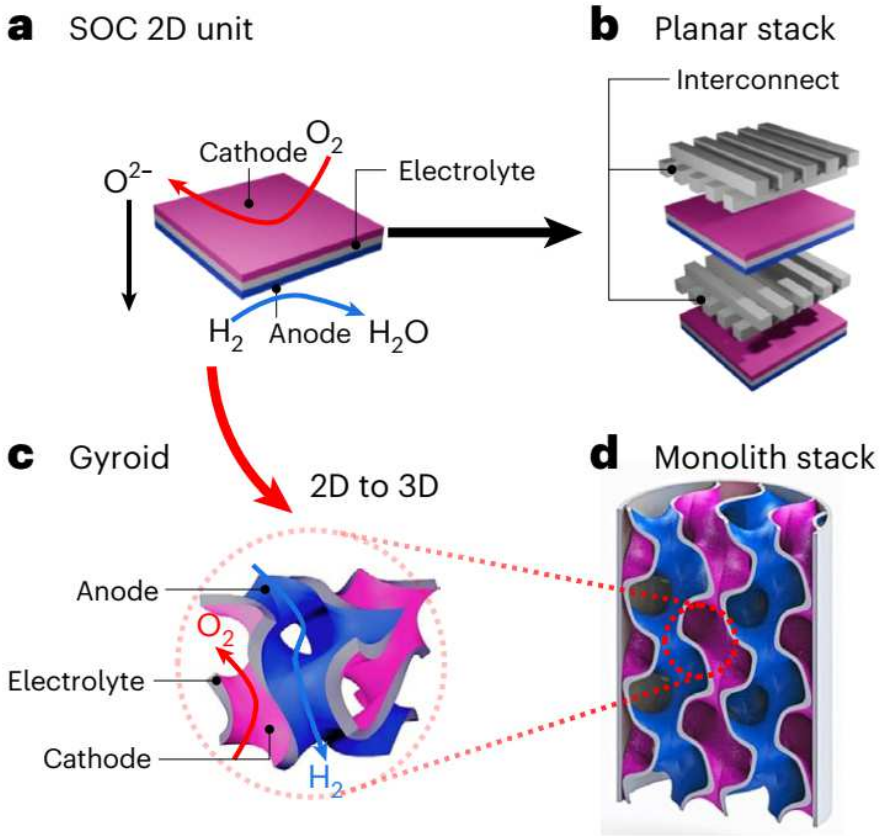


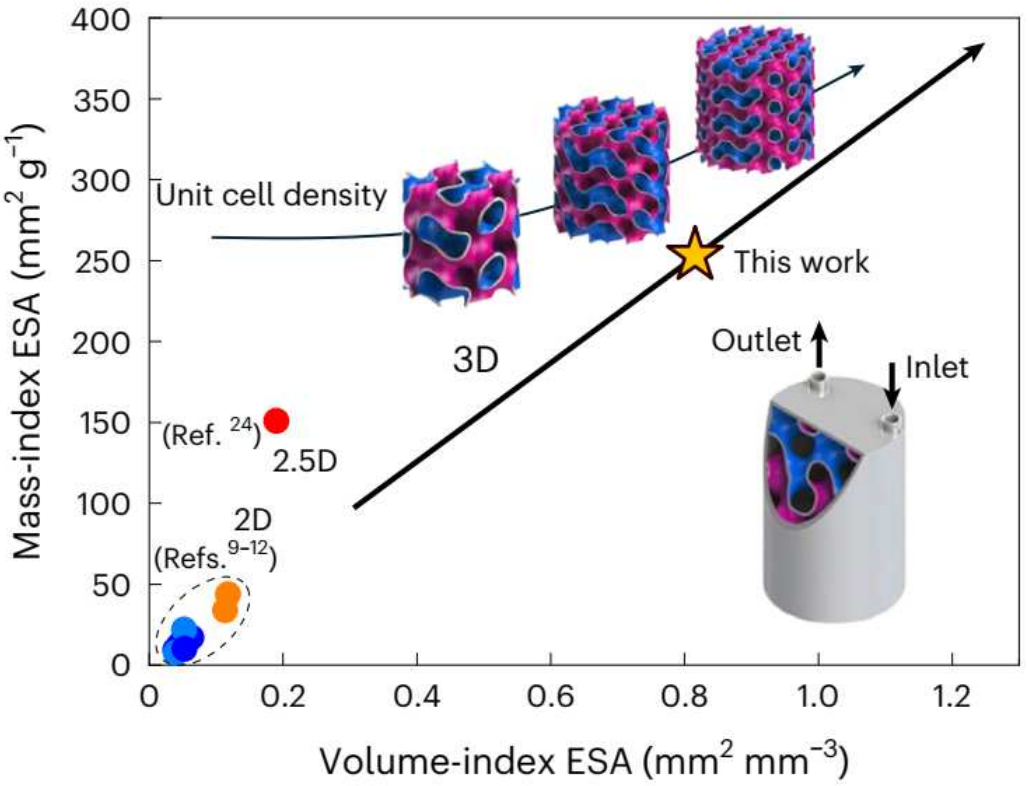
10.1557/mrs.2014.172

POLITECHNIKA GDAŃSKA

Ogniwo monolityczne typu gyroid

Gyroid to nieskończona, okresowa powierzchnia minimalna o trójwymiarowej strukturze, przypominająca labirynt lub skomplikowaną gąbkę.





https://www.nature.com/articles/s41560-025-01811-y

POLITECHNIKA GDAŃSKA

Przygotowanie

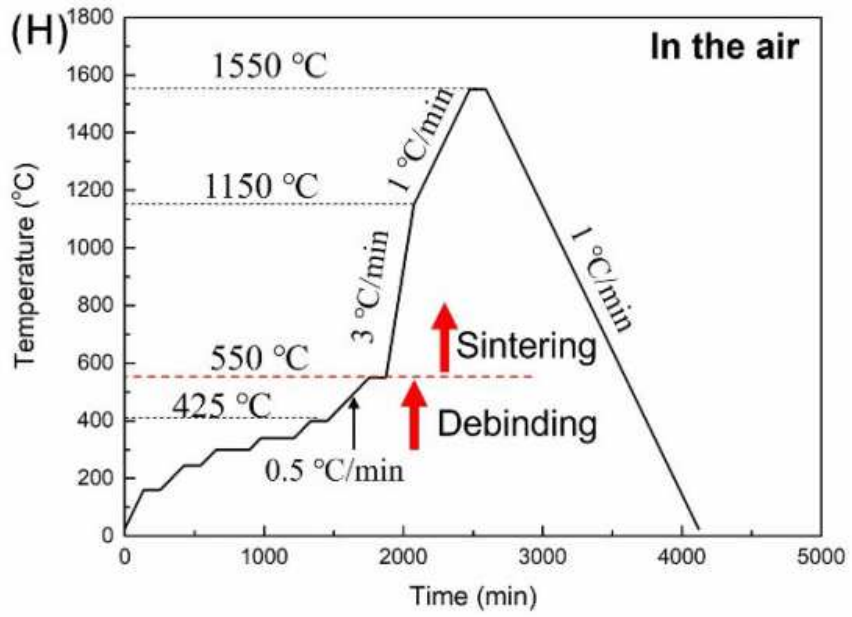
UV-utwardzalną zawiesinę przygotowano poprzez zmieszanie proszków 8YSZ, żywicy fotopolimerowej, dyspergatora oraz dodatków modyfikujących. Do przygotowania zawiesiny wykorzystano komercyjne proszki 8YSZ firmy Tosoh o powierzchni właściwej wynoszącej 16 ± 3 $m^2 \cdot g^{-1}$. Proszki 8YSZ zmieszano z komercyjną żywicą fotopolimerową firmy 3Dresyn, zawierającą dyspergatory oraz dodatki modyfikujące FT1 i LB1, otrzymując zawiesinę zawierającą 37% objętościowych proszków 8YSZ.

Do utwardzenia pierwszych 15 warstw zastosowano dawkę energii świetlnej (Ei) równą 42 $mJ \cdot cm^{-2}$, co zapewniło trwałe związanie materiału z platformą roboczą. Dla kolejnych warstw funkcjonalnych zastosowano Ei = 36 $mJ \cdot cm^{-2}$ w celu utrzymania wysokiej rozdzielczości druku.

POLITECHNIKA GDAŃSKA

Przygotowanie

Proces usuwania lepiszcza oraz spiekania próbek przeprowadzono w piecu komorowym o maksymalnej temperaturze pracy wynoszącej 1700 °C, przy ciągłej wentylacji, bez przykładania obciążeń (spiekanie swobodne) oraz w atmosferze powietrza.



Kompozyty NiO-YSZ (w stosunku masowym 1:1) oraz LSM-YSZ (w stosunku masowym 1:1) przygotowano jako proszkowe prekursory zawiesin. LSM $(La_{0.80}Sr_{0.20})_{0.95}MnO_{3\pm x}$. YSZ stanowił materiał 8YSZ, identyczny jak zastosowany w elektrolicie.

Zawiesina zawierała lepiszcze, rozpuszczalnik, dyspergator oraz proszki ceramiczne. Udział masowy proszków wynosił odpowiednio 74% wag. dla NiO-YSZ oraz 65% wag. dla LSM-YSZ.

W celu nanoszenia elektrod na powierzchnię elektrolitu o strukturze gyroidalnej opracowano metodę mokrego powlekania wspomaganą strumieniem powietrza. Najpierw kanały próbki wypełniano zawiesiną poprzez jej wtrysk. Następnie przy użyciu pistoletu pneumatycznego przykładano do wejścia kanału stały strumień powietrza pod ciśnieniem 5 barów. W rezultacie nadmiar zawiesiny pozostający w kanałach był usuwany dzięki działaniu ciśnienia gazu. Operację powtarzano dla różnych wejść kanałów aż do momentu, gdy nie obserwowano już wypływu zawiesiny. Ostatecznie na powierzchni elektrolitu gyroidalnego formowała się cienkowarstwowa elektroda dzięki adhezji zawiesiny.

POLITECHNIKA GDAŃSKA

Przygotowania

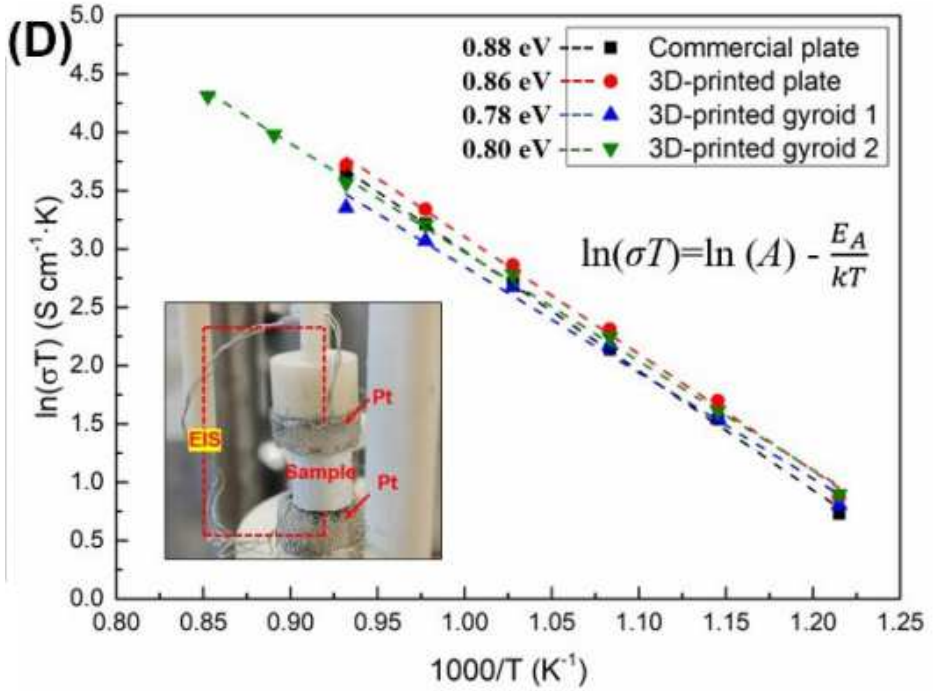
W przypadku elektrody NiO-YSZ pierwsza warstwa powłoki została poddana kalcynacji w temperaturze 1000 °C przez 1 godzinę. Następnie na pierwszą skalcynowaną warstwę nanoszono drugą warstwę, którą również wygrzewano w temperaturze 1000 °C przez 1 godzinę. Po naniesieniu warstwy końcowej całą elektrodę paliwową spiekano w temperaturze 1320 °C przez 2 godziny.

Dla elektrody LSM-YSZ pierwsze dwie warstwy poddawano wstępnemu spiekaniu w temperaturze 900 °C przez 1 godzinę, natomiast po naniesieniu warstwy końcowej całą próbkę spiekano w temperaturze 1150 °C przez 2 godziny.

Po każdym etapie obróbki cieplnej elektroda NiO-YSZ wykazywała średni przyrost masy pojedynczej warstwy równy 77,9 ± 7,1 mg, podczas gdy dla elektrody LSM-YSZ wartość ta wynosiła 72,5 ± 8,2 mg. Przyrost masy próbek odpowiadał zwiększaniu grubości elektrod.

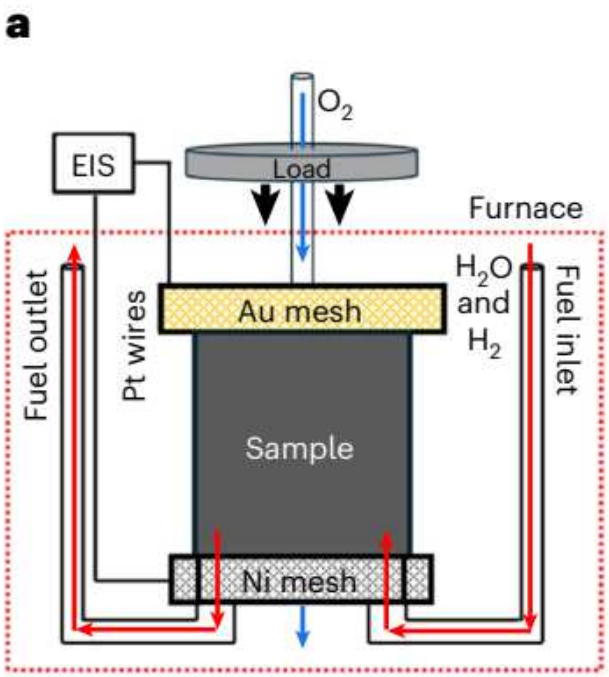
Przed przeprowadzeniem testów elektrochemicznych kompletnego ogniwa na powierzchnie elektrod nanoszono pastę platynową (Pt) Kanały wypełniano pastą Pt, a następnie przy użyciu strumienia powietrza usuwano nadmiar pasty z kanałów. Warstwą Pt poddawano kalcynacji w temperaturze 950 °C przez 2 godziny.

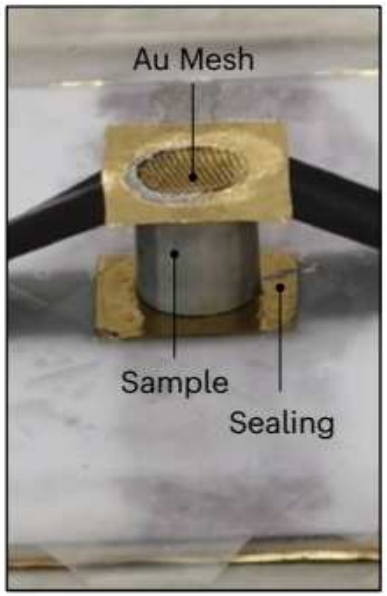
Do testów przewodnictwa próbkę pokrytą Ag poddawano kalcynacji w temperaturze 800 °C przez 2 godziny.

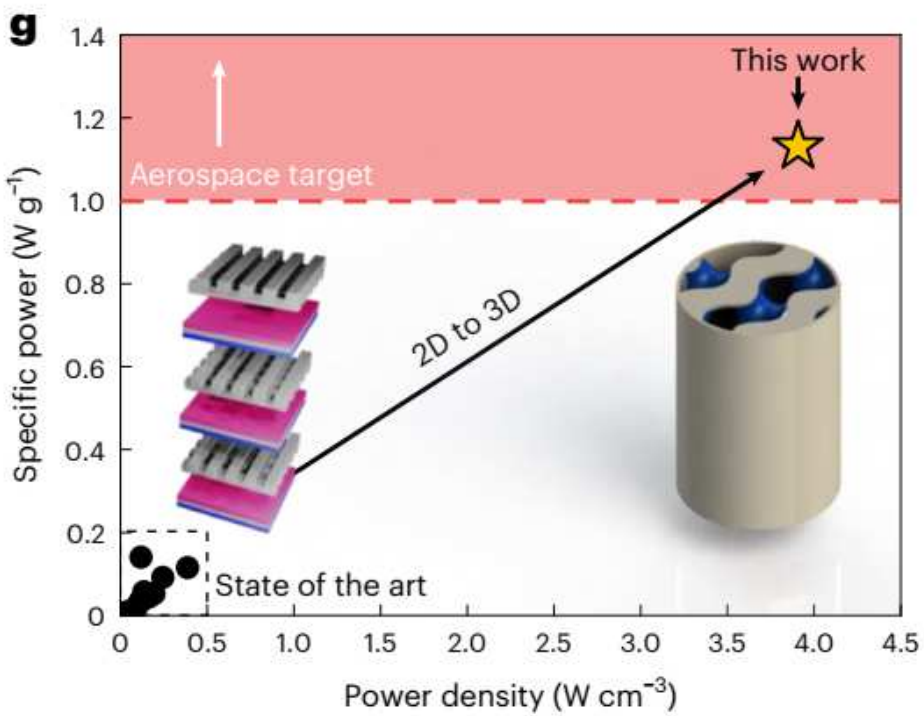


POLITECHNIKA GDAŃSKA

Ogniwo monolityczne typu gyroid



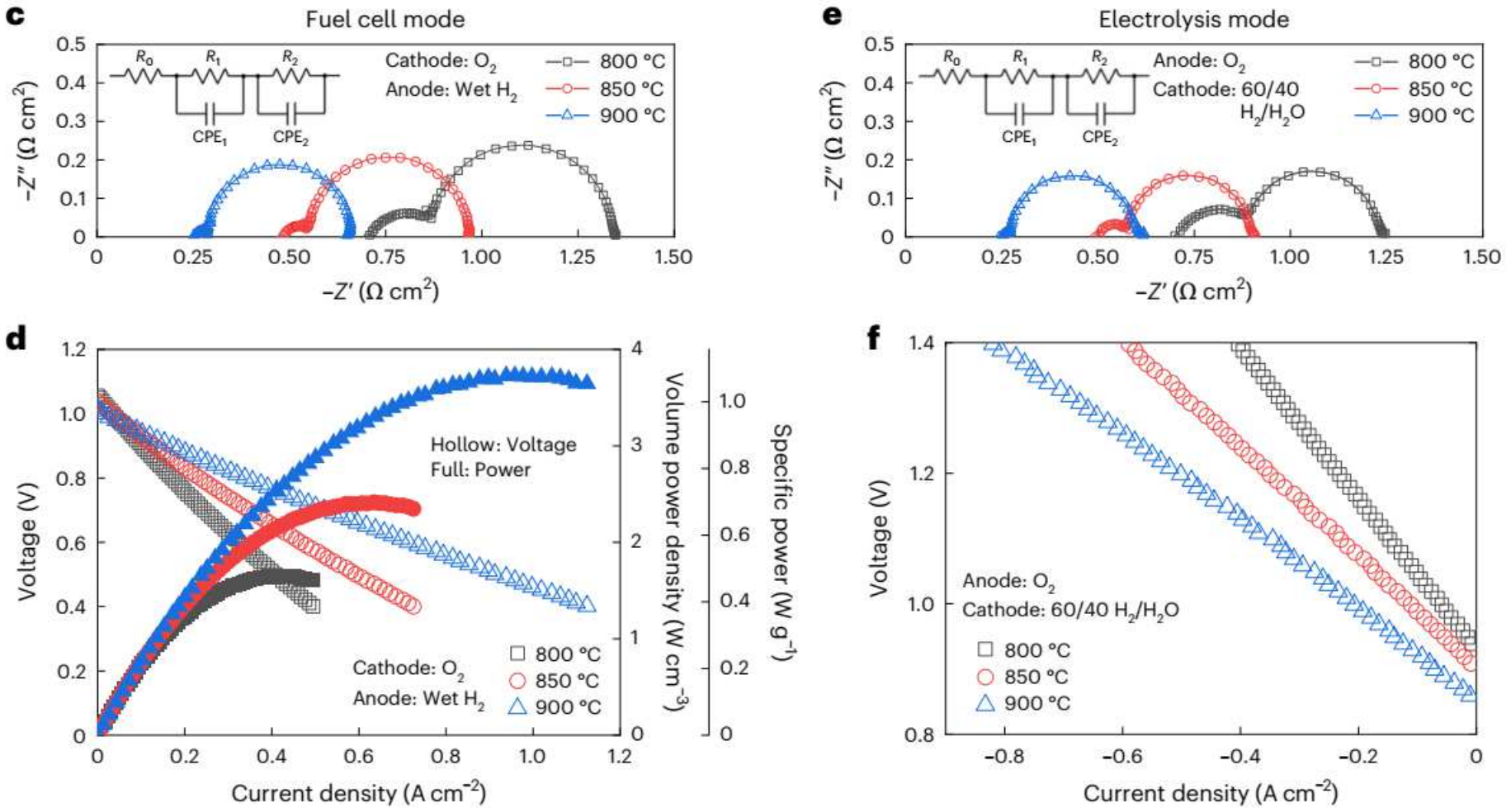




https://www.nature.com/articles/s41560-025-01811-y

POLITECHNIKA GDAŃSKA

Ogniwo monolityczne typu gyroid



https://www.nature.com/articles/s41560-025-01811-y

POLITECHNIKA GDAŃSKA

Solid oxide electrolyzers

STATUS

Cells and Stacks

- High performances: current density of 0.6 A/cm² and above at the thermoneutral voltage (1.3V)
- Durability : degradation < 2%/1000h

Modules and Systems

- First demonstration systems installed
- Upscaling and in-field deployment for various use cases

TARGETS

Ambitious improvement of key performance indicators (KPIs)

Source: Strategic Research and Innovation Agenda, Clean H2 partnership, Feb 2022

No	Parameter	Unit	SoA	Targets	
			2020	2024	2030
1.	Electricity consumption @ nominal capacity	kWh/kg	40	39	37
	Heat demand @ nominal capacity	kWh/kg	9.9	9.0	8
2.	Capital cost	€/(kg/d) (€/kW)	3,550 (2,130)	2,000 (1,250)	800 (520)
3.	O&M cost	€/(kg/d)/yr	410	130	45
4.	Hot idle ramp time	sec	600	300	180
5.	Cold start ramp time	h	12	8	4
6.	Degradation @ U_{TN}	%/1,000hrs	1.9	1.0	0.5
7.	Current density	A/cm²	0.6	0.85	1.5
8.	Roundtrip electrical efficiency	%	46	50	57
9.	Reversible capacity	%	25	30	40



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską





Projekt współfinansowany przez Unię Europejską ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus
w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021 - 2027