



Współczesne wyzwania - rozwój technologii wodorowej

Prof. dr hab. inż Jarosław SĘP

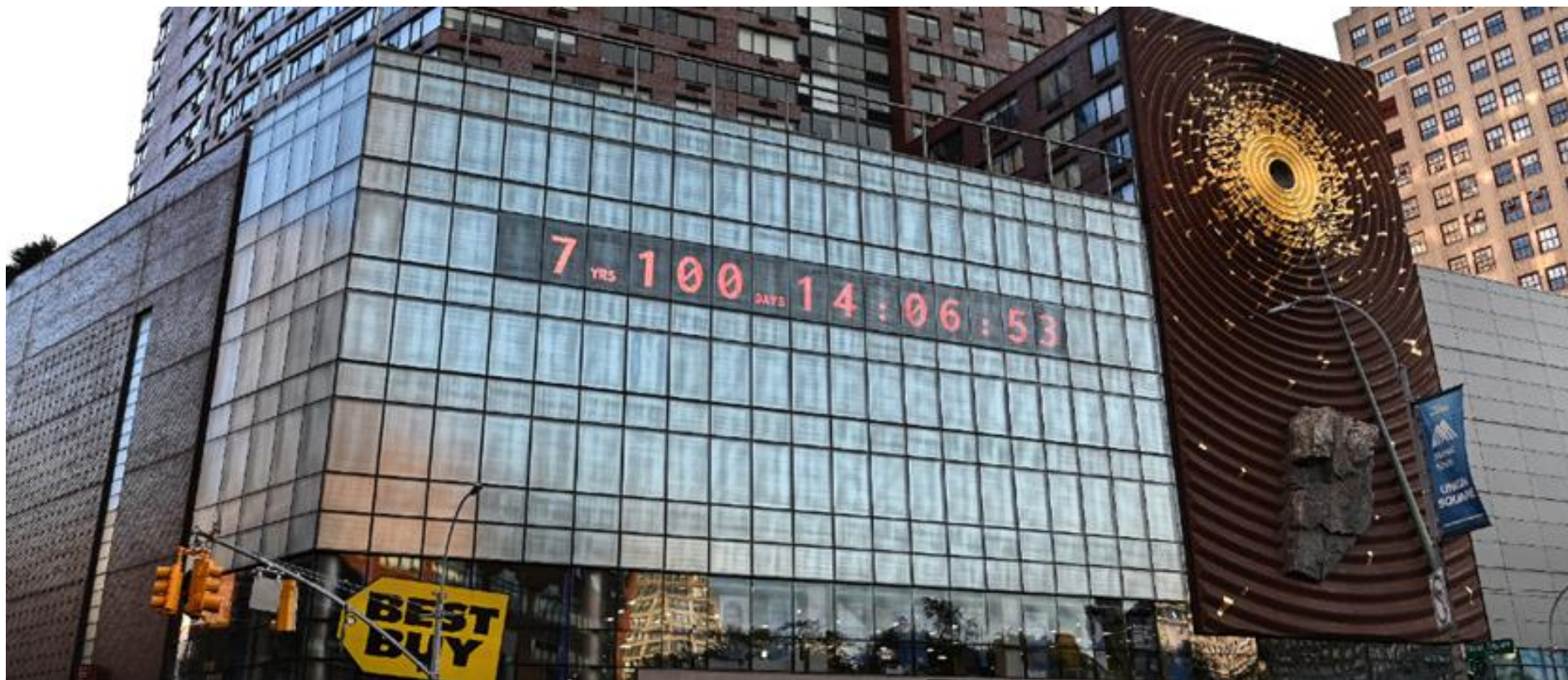
Politechnika Rzeszowska



Transformacja energetyczna – kierunki zmian, możliwości realizacji, 4-5.11.2021 r

https://www.teraz-srodowisko.pl/images/illustrations/artykul/8824_fb.jpg

Światu zagraża katastrofa klimatyczna – na Manhattanie w Nowym Jorku uruchomiono we wrześniu 2020 r zegar odmierzający czas do katastrofy

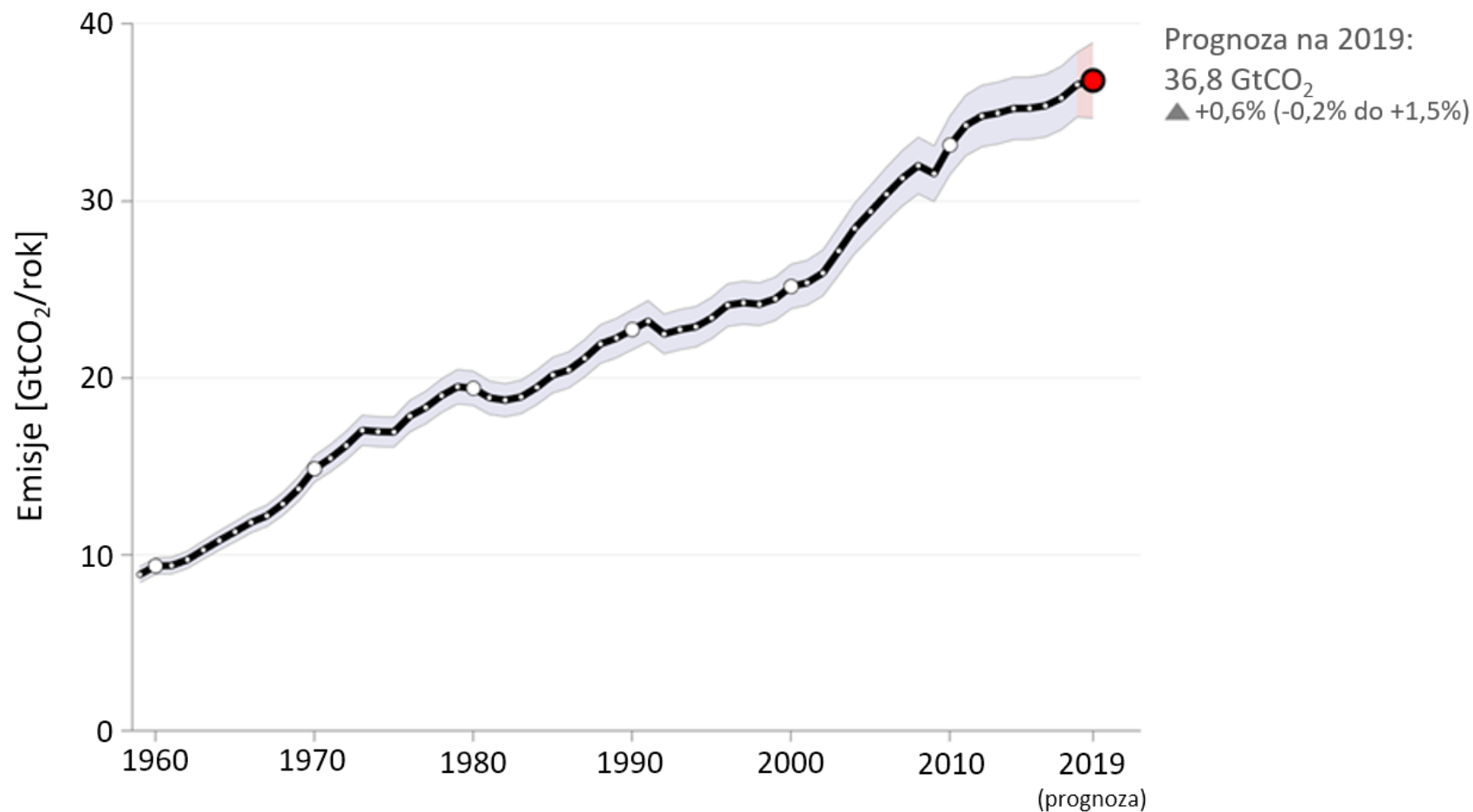


Transformacja energetyczna – kierunki zmian, możliwości realizacji, 4-5.11.2021 r

<https://www.national-geographic.pl/uploads/media/default/0014/22/zegar-na-manhattanie-odlicza-do-katastrofy-klimatycznej-zostalo-7-lat-i-100-dni-fot-getty-images.jpeg>



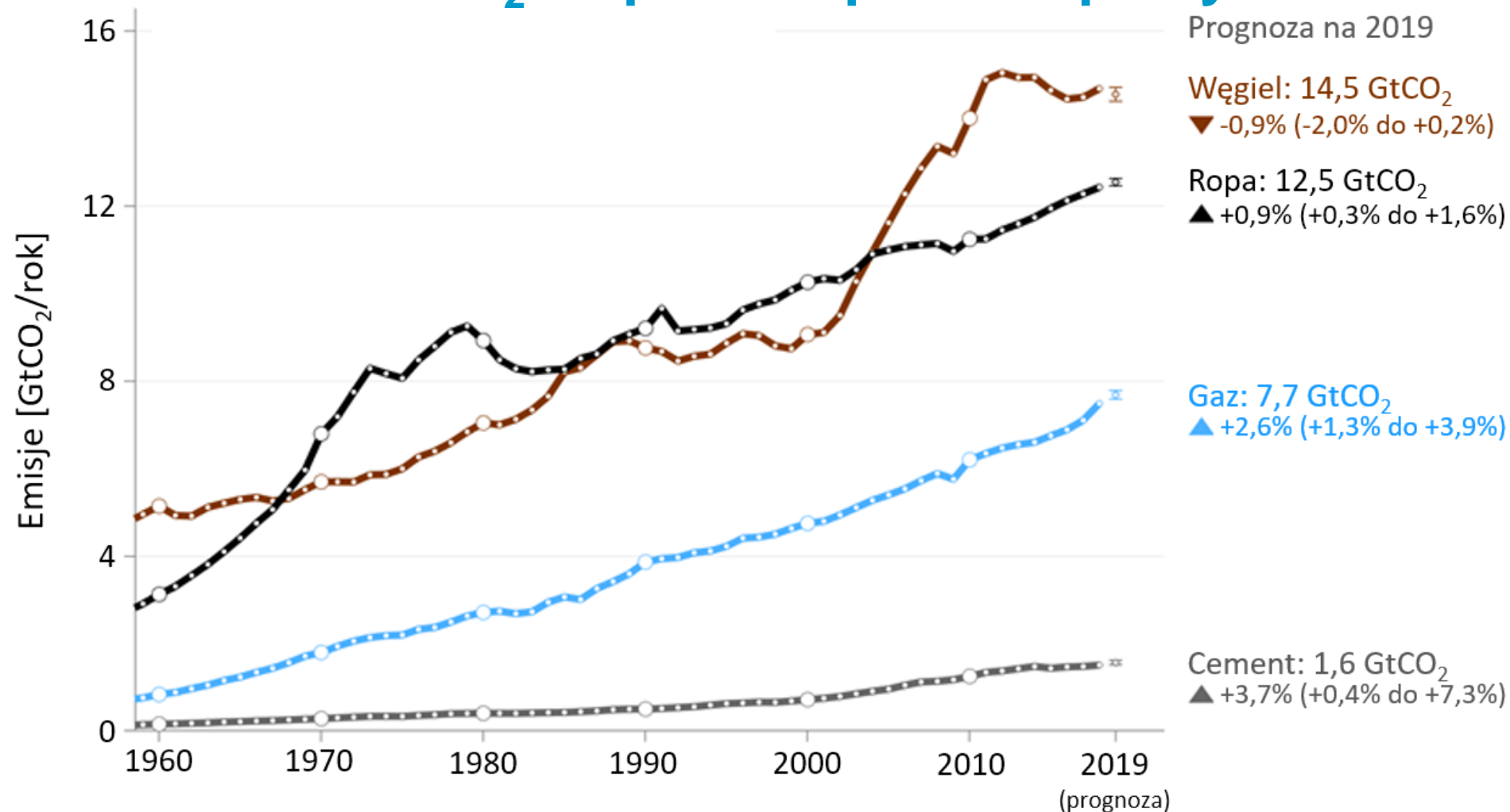
Globalna emisja CO₂ cały czas zwiększa się



Transformacja energetyczna – kierunki zmian, możliwości realizacji, 4-5.11.2021 r



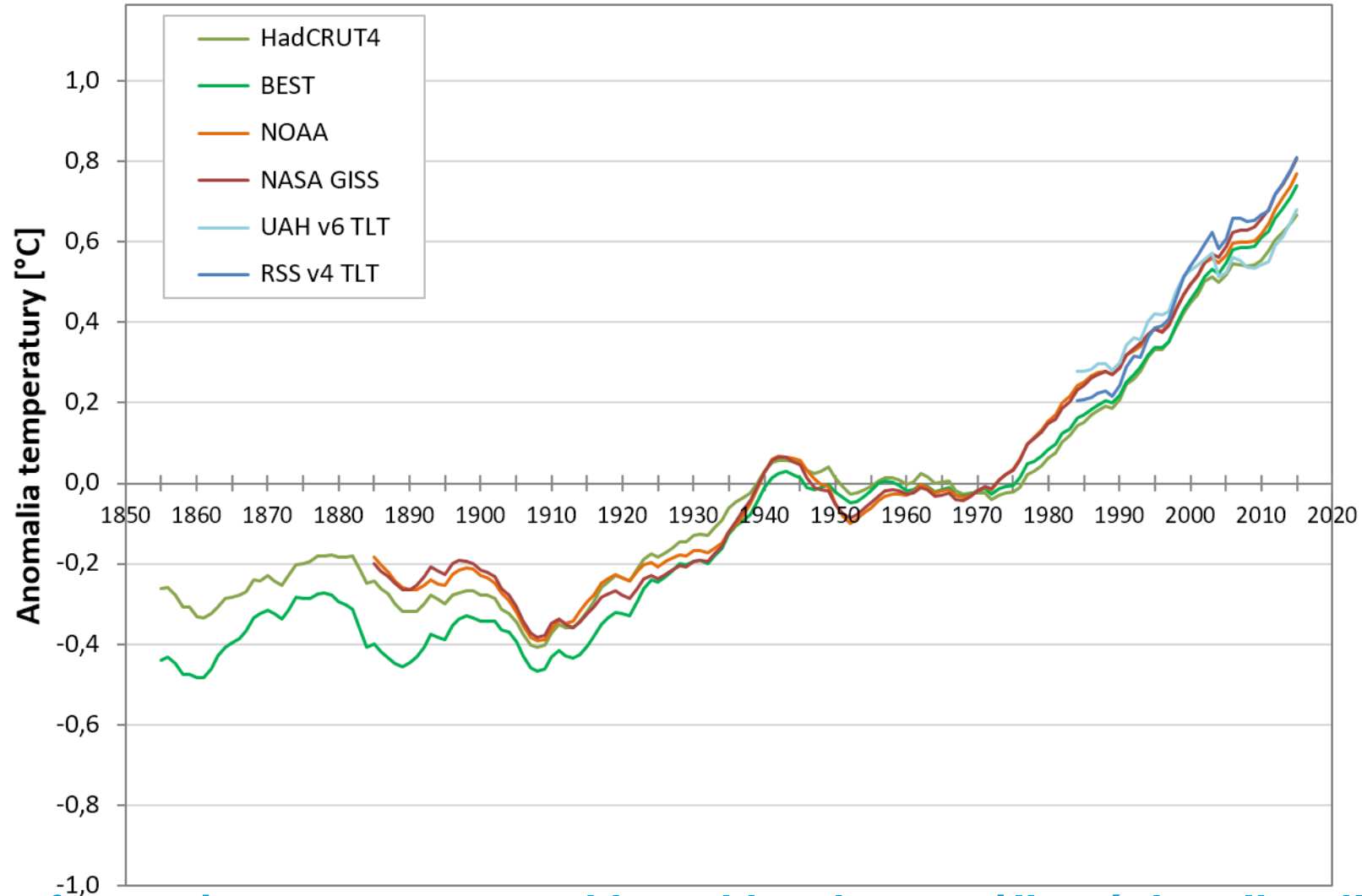
Źródła CO₂ - spalanie paliw kopalnych



Transformacja energetyczna – kierunki zmian, możliwości realizacji, 4-5.11.2021 r



Odchylenie temperatury powierzchni Ziemi od średniej



Transformacja energetyczna – kierunki zmian, możliwości realizacji, 4-5.11.2021 r



Porównanie spalania paliw kopalnych i wodoru

Wodór spala się bez emisji CO₂

Nośnik energii	Wzór chemiczny (umowny*)	Stan skupienia nośnika energii	Stopień złożoności stosowania nośnika energii	Reakcja spalania	Opis reakcji	obecność CO ₂ w gazach spalinowych
węgiel kamienny	C*	stały	niski	$C + O_2 \rightarrow CO_2$	oprócz CO ₂ powstają szkodliwe związki (mikropyły), prowadzące do smogu	+
benzyna	C ₅ H ₁₂ *	ciekły	niski	$C_5H_{12} + 8 O_2 \rightarrow 5 CO_2 + 6 H_2O$	do całkowitego spalania (do CO ₂ i H ₂ O) konieczne jest stosowanie kosztownych katalizatorów platynowych	+
gaz ziemny (metan)	CH ₄	gazowy**	średni	$CH_4 + 2 O_2 \rightarrow 2 CO_2 + 2 H_2O$	spalanie gazu eliminuje powstawanie mikropyłów, oraz zmniejsza emisję CO ₂ o ok. połowę w porównaniu z węglem przy generowaniu tej samej ilości energii	+
wodór	H ₂	gazowy**	duży	$2 H_2 + O_2 \rightarrow 2 H_2O$	paliwo bezemisyjne (nie powstaje CO ₂)	-

** konieczne są zbiorniki ciśnieniowe / kriogeniczne lub sieci przesyłowe

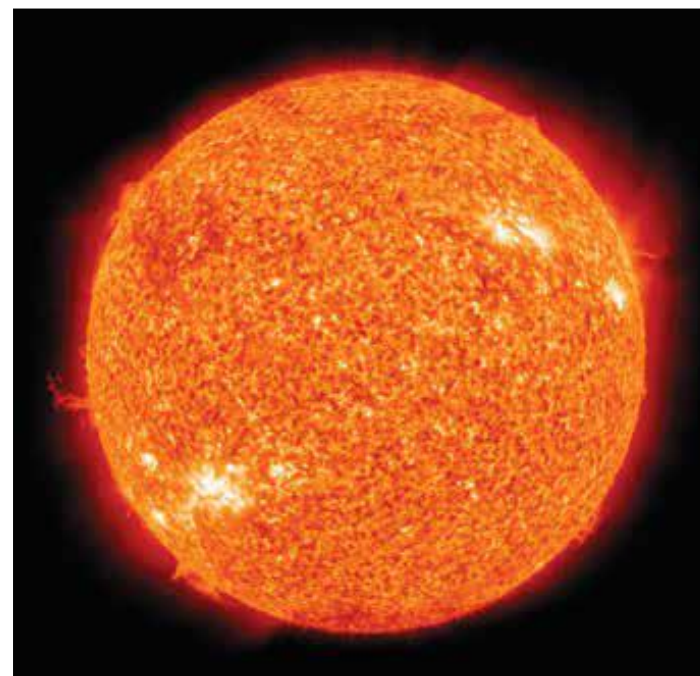
Transformacja energetyczna – kierunki zmian, możliwości realizacji, 4-5.11.2021 r



Wodór jest bardzo dobrym nośnikiem energii

- ❑ Ze wszystkich stosowanych paliw charakteryzuje się najwyższą wartością opałową- 120 MJ/kg (dla przykładu - węgiel 22 MJ/kg, benzyna 47 MJ/kg).
- ❑ Zestawienie porównawcze wartości opałowych dla wybranych materiałów w kWh/kg:

➤	H₂	33,33
➤	ropa naftowa	11,6
➤	benzyna	12,0
➤	metanol	5,47
➤	metan	13,9
➤	gaz ziemny	10,6 - 13,1
➤	propan	12,88
➤	gaz miejski	7,57





Inne pozytywne cechy wodoru jako paliwa

- W reakcji spalania wodoru powstaje woda, nie wywołująca negatywnych skutków w środowisku naturalnym
- Posiada niską energię inicjacji zapłonu, co powoduje wysoką wydajność jego spalania
- Ma szeroki zakres zapalności - od 4% do 70 % wodoru w mieszaninie z powietrzem
- Jego zapasy są praktycznie niewyczerpalne – trzeci pod względem rozpowszechnienia pierwiastek na Ziemi



Wady wodoru jako paliwa

- Praktycznie nie występuje w stanie wolnym- musi więc zostać wyprodukowany
- Produkcja wodoru pochłania znaczne ilości energii, w niektórych procesach więcej niż się uzyska w wyniku jego „spalania”
- Trudno go zmagazynować
- Przesyłanie i transportowanie wodoru są trudne technicznie i wymagają utworzenia złożonej infrastruktury
- W dość powszechnej opinii jest niebezpieczny



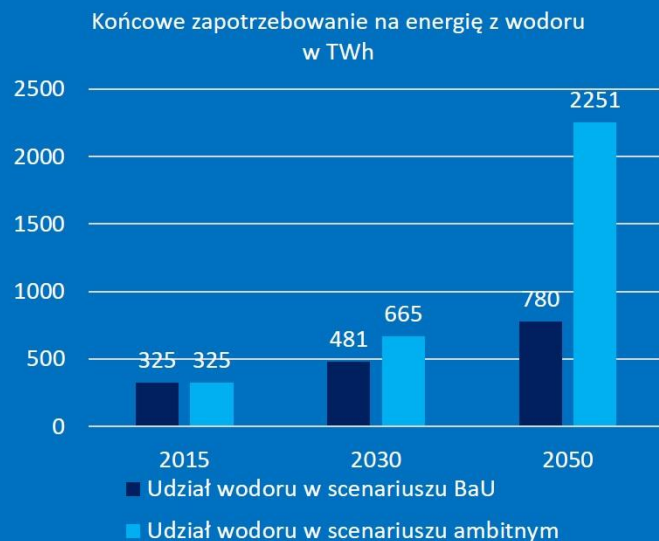
Technologie wodorowe – łańcuch wartości





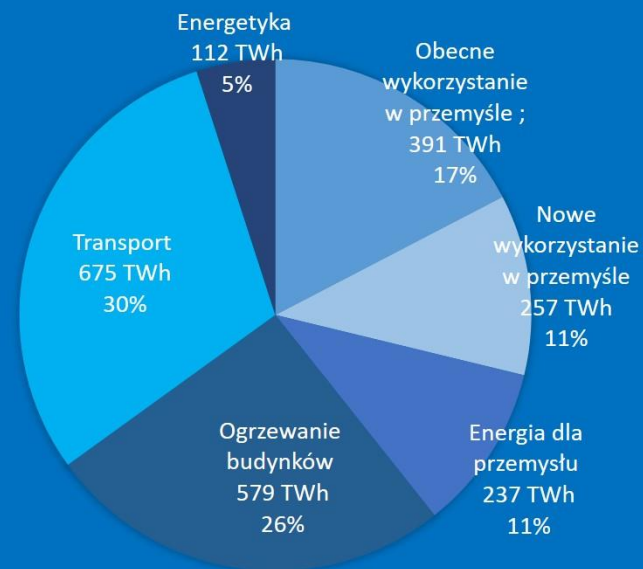
Przyszłe wykorzystane wodoru

Rola wodoru w Unii Europejskiej wzrośnie



Źródło: Hydrogen Road Map Europe FCH
Fuel Cell Hydrogen 2
Czerwiec 2020

Wykorzystanie wodoru w 2050 r. w ambitnym scenariuszu



wysokie  napięcie.pl

<https://obserwatorgospodarczy.pl/gospodarka/2118-japonia-buduje-pierwsza-elektrownie-wodorowa-inne-kraje-nie-zostaja-w-tyle>

Transformacja energetyczna – kierunki zmian, możliwości realizacji, 4-5.11.2021 r



Sposoby wytwarzania wodoru wraz z umownym opisem

- wodór zielony** – otrzymany w wyniku rozkładu wody, z wykorzystaniem odnawialne źródła energii: elektryczności z OZE elektrowni wiatrowych, paneli fotowoltaicznych, itp.. – **tylko kilka procent produkcji** ;
- wodór niebieski** – z metanu (gazu ziemnego) – reforming metanu największy udział w skali produkcji światowej ok 50%;
- wodór fioletowy** – z elektryczności wytworzonej w elektrowniach atomowych;
- wodór szary** – z ropy naftowej;
- wodór czarny** – z węgla kamiennego.



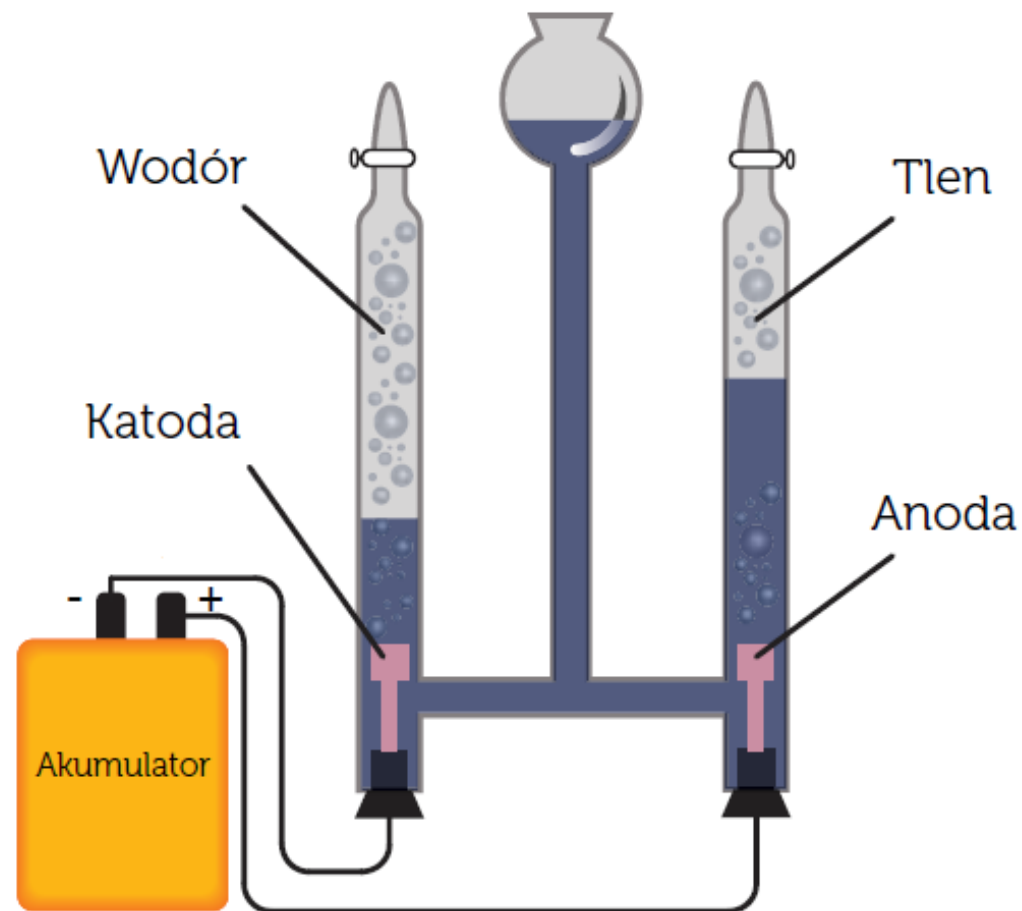
Metody rozkładu wody

- Elektroliza – reakcja rozkładu wody pod wpływem stałego prądu elektrycznego,
- Fotoelektroliza – ogniwo fotoelektryczne wraz z katalizatorem funkcjonuje jak elektrolizer,
- Termoliza – termiczny rozkład wody,
- Fotoliza – rozkład wody po wpływie światła słonecznego,
- Biofotoliza – produkcja wodoru z wody z wykorzystaniem energii świetlnej i mikroorganizmów.



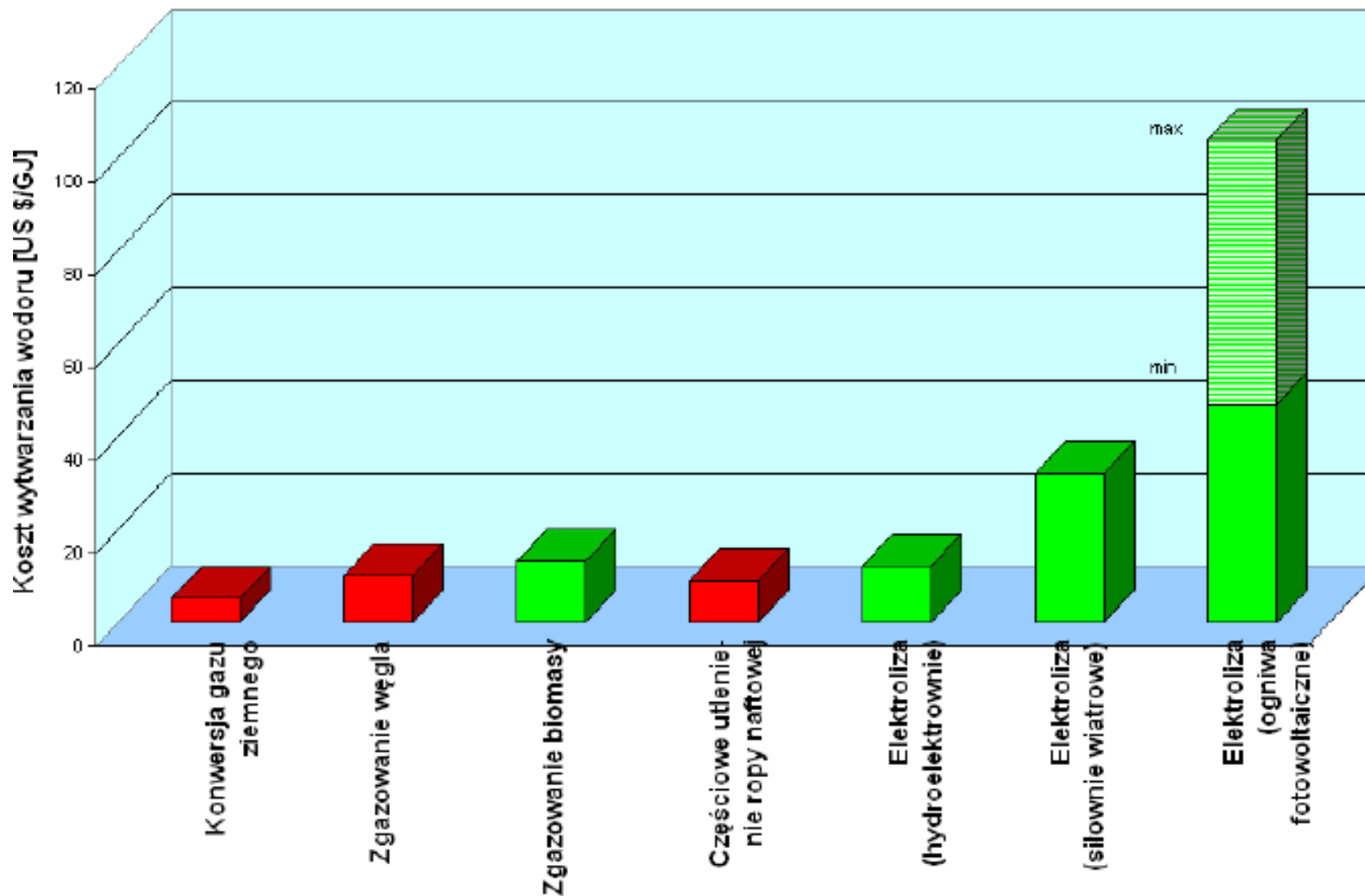
Elektroliza

- Elektroliza – reakcja rozkładu wody została odkryta w 1800 roku,
- Elektrolizery alkaliczne – ciekły elektrolit,
- Elektrolizery wykorzystujące polimerową membranę wymiany protonów (PEM),
- Wysokotemperaturowe elektrolizery parowe HTPEM





Koszty wytwarzania wodoru





Elektroliza



Instalacja do wytwarzania zielonego wodoru – elektrolizer o mocy 10 MW z wykorzystaniem instalacji fotowoltaicznej (Japonia) – 100 kg wodoru na godzinę

Transformacja energetyczna – kierunki zmian, możliwości realizacji, 4-5.11.2021 r



Fotoelektrokataliza

Konsorcjum dwóch firm energetycznych uruchomi w Hiszpanii zakład produkcji zielonego wodoru. Główny proces technologiczny będzie opierać się na zjawisku fotoelektrokatalizy, które praktycznie nie wymaga dostarczenia energii elektrycznej z zewnątrz. Instalacja rozpocznie pracę w 2024 roku, osiągając początkową zdolność produkcyjną w ilości 100 kg H₂ w ciągu doby



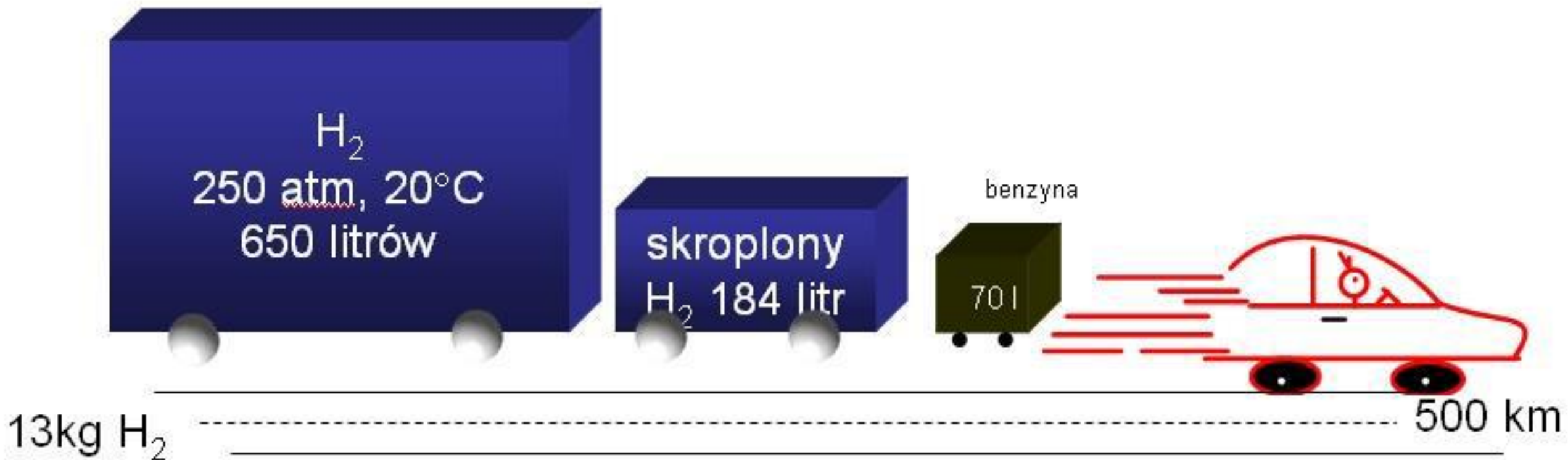


Magazynowanie wodoru

- ❑ postaci gazowej, sprężony w zbiornikach ciśnieniowych; energia sprężania to ok. 10% energii cieplnej – ciśnienie 350 -700 barów,
- ❑ skroplony w silnie opancerzonych i termostatowanych zbiornikach, skroplenie pochłania 30% wartości energetycznej wodoru, temperatura 20K ,
- ❑ „chemiczne” magazyny wodoru: nienasycone związki organiczne, kwas mrówkowy, ciecze jonowe, węglowodany, amoniak, wodorki (np. jedna jednostka objętości litu jest w stanie pochłonać w trakcie reakcji z wodorem ok. 1600 objętości wodoru; uzyskany wodorek w zetknięciu z wodą uwalnia wodór).
- ❑ „fizyczne” magazyny wodoru; węgiel (porowaty lub warstwowy), syntetyczne porowate materiały, klatraty wodoru w wodzie, elastyczne szklane rurki kapilarne, szklane mikrosfery,
- ❑ w kawernach solnych.



Porównanie metod magazynowania wodoru



S. Niaz, T. Manzoor, A.H. Pandith, *Renew. Sustain. En. Rev.*, 2015, 50, 457–469. doi: 10.1016/j.rser.2015.05.011

Dystrybucja (przesyłanie) wodoru

rurociągi gazowe,
Z powodu właściwości wodoru np. skłonności do przenikania przez ścianki metali, czy zwiększania kruchości metali, wynikających z niewielkiego rozmiaru cząsteczki H_2 , konieczne jest przystosowanie istniejącej infrastruktury gazowej do przesyłania wodoru, np. przez wyłożenie wewnętrznych ścianek, ew. ich przebudowa (w przypadku stosowania wodorowej sieci przesyłowej wysokiego ciśnienia).

- cysterny (samochodowe, kolejowe),
- produkcja lokalna



Dystrybucja (przesyłanie) wodoru



Autostrada wodorowa – 120 GWh z zielonego wodoru w roku 2030

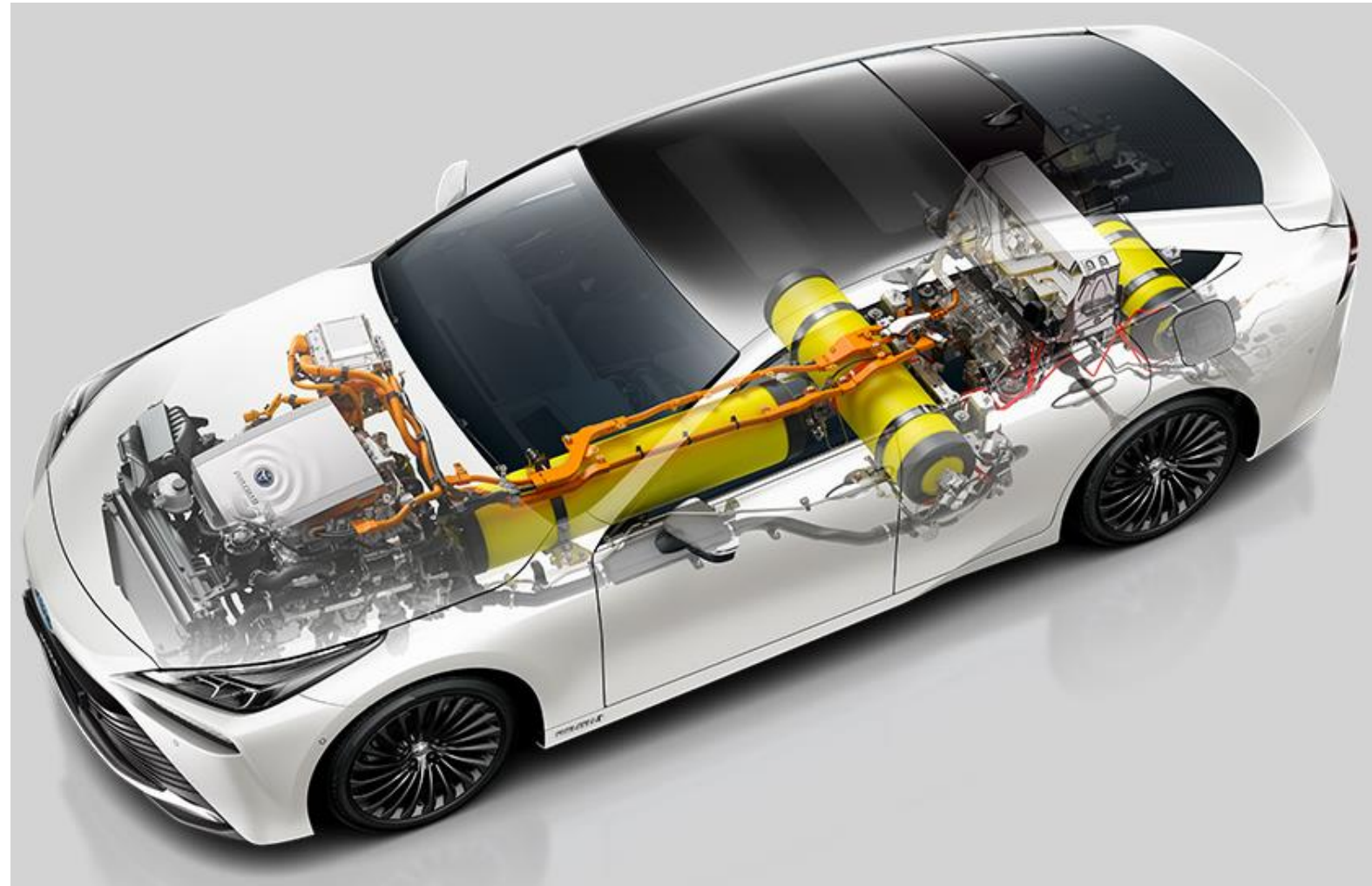
<https://www.onet.pl/biznes/biznesalert/autostrada-wodorowa-z-ukrainy-do-niemiec-bez-polski-ale-z-polskim-sladem/ks5evpt,30bc1058>

Transformacja energetyczna – kierunki zmian, możliwości realizacji, 4-5.11.2021 r



Wodór jako paliwo w niskoemisyjnym transporcie

Napęd – ogniwo paliwowe
Ogniwo paliwowe wytwarza energię elektryczną poprzez wiązanie wodoru pobieranego ze zbiorników z tlenem z powietrza. Energia ta zasila silnik elektryczny i ładuje akumulator. Samochody zasilane wodorem w czasie jazdy nie emitują żadnych szkodliwych gazów ani innych zanieczyszczeń, a jedynie wodę.



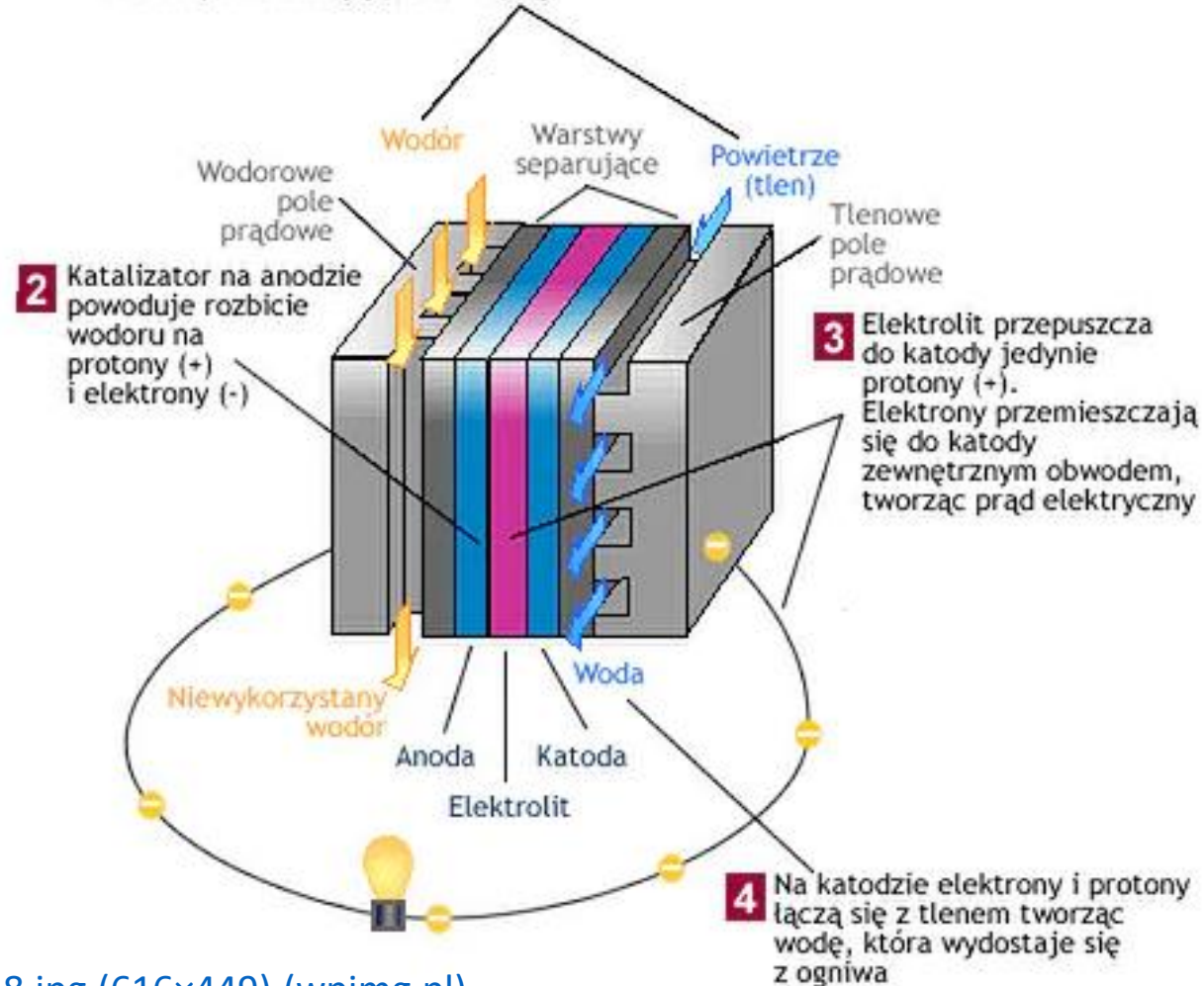
[Nowa Toyota Mirai Executive 4-drzwiowy sedan | Zero emisji](#)

Transformacja energetyczna – kierunki zmian, możliwości realizacji, 4-5.11.2021 r



Wodorowe ogniwo paliwowe

- 1 Wodór doprowadzany jest do anody
Tlen doprowadzany jest do katody





Wodór jako paliwo w niskoemisyjnym transporcie

Wodór zasila flotę 100 ciężarówek budowlanych w prowincji Hebei. Ciężarówki zostaną wyposażone w ogniwa paliwowe firmy FTXT Energy. Napęd wodorowy marki FTXT Energy bazuje na ogniwie paliwowym o mocy 111 kW. Ogniwo wodorowe FTXT jest przystosowane do pracy przy -30 stopniach Celsjusza i ma wytrzymałość 10000 roboczogodzin



Ciężarówki na wodór – 100 nowych pojazdów od Great Wall Motors – gasHD.eu – LNG, CNG i wodór dla silników dużej mocy

Transformacja energetyczna – kierunki zmian, możliwości realizacji, 4-5.11.2021 r



Wodór jako paliwo w niskoemisyjnym transporcie

Coradia iLint to pierwszy na świecie pociąg pasażerski wyposażony w ogniwa paliwowe do przetwarzania wodoru w energię elektryczną. Jest cichy i w pełni bezemisyjny – emituje jedynie parę wodną i wodę. Został wyposażony w innowacyjne rozwiązania takie jak m.in. technologię czystej konwersji energetycznej, systemu efektywnego dostarczania i magazynowania energii w bateriach oraz inteligentnego zarządzania mocą napędową i dostępną energią.



ashd.eu/2021/07/03/pierwszy-w-polsce-pociag-na-wodor-alstom-coradia-na-pokazie/

Transformacja energetyczna – kierunki zmian, możliwości realizacji, 4-5.11.2021 r



Wodór jako paliwo w niskoemisyjnym transporcie

Napęd wodorowy dla statków został wskazany w 2019 roku jako najlepsze bezemisyjne źródło napędu w żegludze. Przykładem jest statek zaopatrzeniowy Ulstein SX190 Zero Emission DP2. Źródłem napędu jest tutaj ogniwo wodorowe Nedstack. Pierwszy statek na wodór tego typu ma wypłynąć w morze w 2022 roku. Ogniwo paliwowe na pokładzie Ulstein SX-190 będzie posiadało moc 2 MW. Ogniwo na wodór dostarczy firma Nedstack i będzie wykonane w technologii PEM



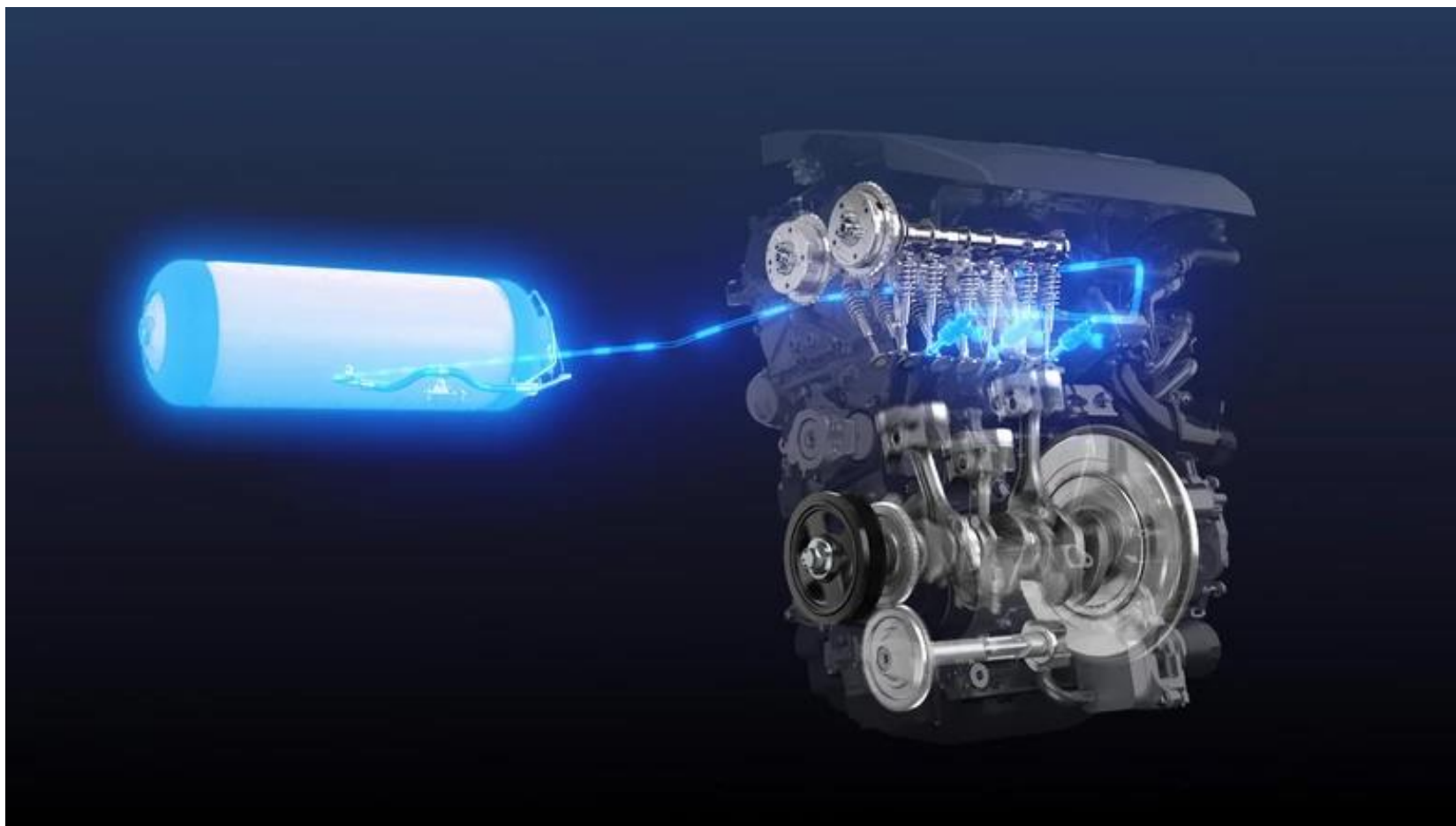
ashd.eu/2019/11/23/statek-na-wodor-do-budowy-platform-wiatrowych-od-ulstein/

Transformacja energetyczna – kierunki zmian, możliwości realizacji, 4-5.11.2021 r



Wodór jako paliwo w niskoemisyjnym transporcie

Podobnie, jak w przypadku innych silników na paliwa gazowe, czy to LPG, czy CNG, tak wodór również musi być przetrzymywany w zbiorniku pod wysokim ciśnieniem. Następnie jest on wstrzykiwany do komory silnika, gdzie następuje eksplozja, a w wyniku rozprężenia, tłok jest odpychany, kręci wałem korbowym i wytwarza się ruch obrotowy. W wyniku spalania wodoru silnik pracuje ciszej i jest bezemisyjny.



[Auta na wodór - jak działają? Dzielą się na dwie grupy - jakie mają wady i zalety? \(komputerswiat.pl\)](http://komputerswiat.pl)

Transformacja energetyczna – kierunki zmian, możliwości realizacji, 4-5.11.2021 r



Bezpieczeństwo użytkowania wodoru



Zdjęcie wykonane w 3 sek. po zapłonie.



Zdjęcie wykonane w 60 sek. po zapłonie.

Zapłon zbiornika wodoru (lewa część zdjęcia) i takiego samego zbiornika z benzyną (prawa część zdjęcia)

Transformacja energetyczna – kierunki zmian, możliwości realizacji, 4-5.11.2021 r



Wodór jako paliwo statków powietrznych

- ❑ **Wizja 2035 r – pierwszy zeroemisyjny samolot komercyjny**
- ❑ Airbus prowadzi badania nad koncepcyjnym samolotem napędzanym wodorem. ZEROe ma być przełomową technologią bezemisyjną, która pozwoli zmniejszyć emisje CO₂ transportu lotniczego nawet o 50%.
- ❑ Maszyny turbodrzutowe lub turbośmigłowe mają jako paliwo wykorzystywać wodór
- ❑ Pod uwagę wzięto spalanie ciekłego wodoru, ogniwa paliwowe i ich hybrydowe połączenie
- ❑ Prototyp ma zostać zaprezentowany pod koniec lat 20
- ❑ Modele ZEROe mają być napędzane zmodyfikowanymi silnikami z turbiną gazową, które spalają ciekły wodór jako paliwo. Jednocześnie wykorzystają ogniwa paliwowe do wytwarzania energii elektrycznej uzupełniającej turbiny. W efekcie powstanie wysokowydajny wodorowo-elektryczny układ napędowy.

<https://inzynieria.com/paliwa/wiadomosci/59511,wizja-2035-r-pierwszy-zeroemisyjny-samolot-komercyjny>

Wodorowa Przyszłość, Rzeszów, 15.04.2021 r



Wodór jako paliwo statków powietrznych – trzy modele



<https://inzynieria.com/paliwa/wiadomosci/59511,wizja-2035-r-pierwszy-zeroemisyjny-samolot-komercyjny>
Transformacja energetyczna – kierunki zmian, możliwości realizacji, 4-5.11.2021 r



Wodór jako paliwo statków powietrznych – trzy modele



<https://inzynieria.com/paliwa/wiadomosci/59511,wizja-2035-r-pierwszy-zeroemisyjny-samolot-komercyjny>
Transformacja energetyczna – kierunki zmian, możliwości realizacji, 4-5.11.2021 r



Wodór jako paliwo statków powietrznych – trzy modele



<https://inzynieria.com/paliwa/wiadomosci/59511,wizja-2035-r-pierwszy-zeroemisyjny-samolot-komercyjny>

Wodorowa Przyszłość, Rzeszów, 15.04.2021 r



Wodór jako paliwo statków powietrznych – BSP Boeing Phantom Eye



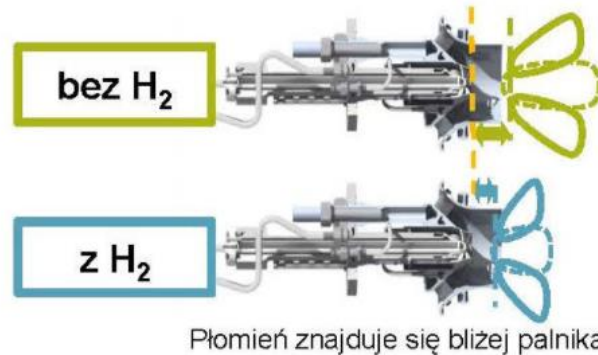
<https://motoryzacja.interia.pl/wiadomosci/ciekawostki/news-plynnny-wodor-najlepszym-paliwem-dla-samolotow,nld,2368144>
Transformacja energetyczna – kierunki zmian, możliwości realizacji, 4-5.11.2021 r



Energetyka wodorowa – spalanie wodoru w turbinach

Fizyka spalania wodoru w turbinie gazowej w porównaniu do metanu

- Wyższa temperatura/prędkość płomienia
- Niższy wskaźnik Wobbe'ego (40.6 vs. 48.5 MJ/Nm³) > większe objętości przepływu przy tej samej wartości energetycznej
- Inne charakter spalania mieszanki wodor/powietrze w porównaniu do gaz ziemny/powietrze
- Niestabilny płomień przy niskich obciążeniach turbiny gazowej



Rezultaty wymagające reakcji

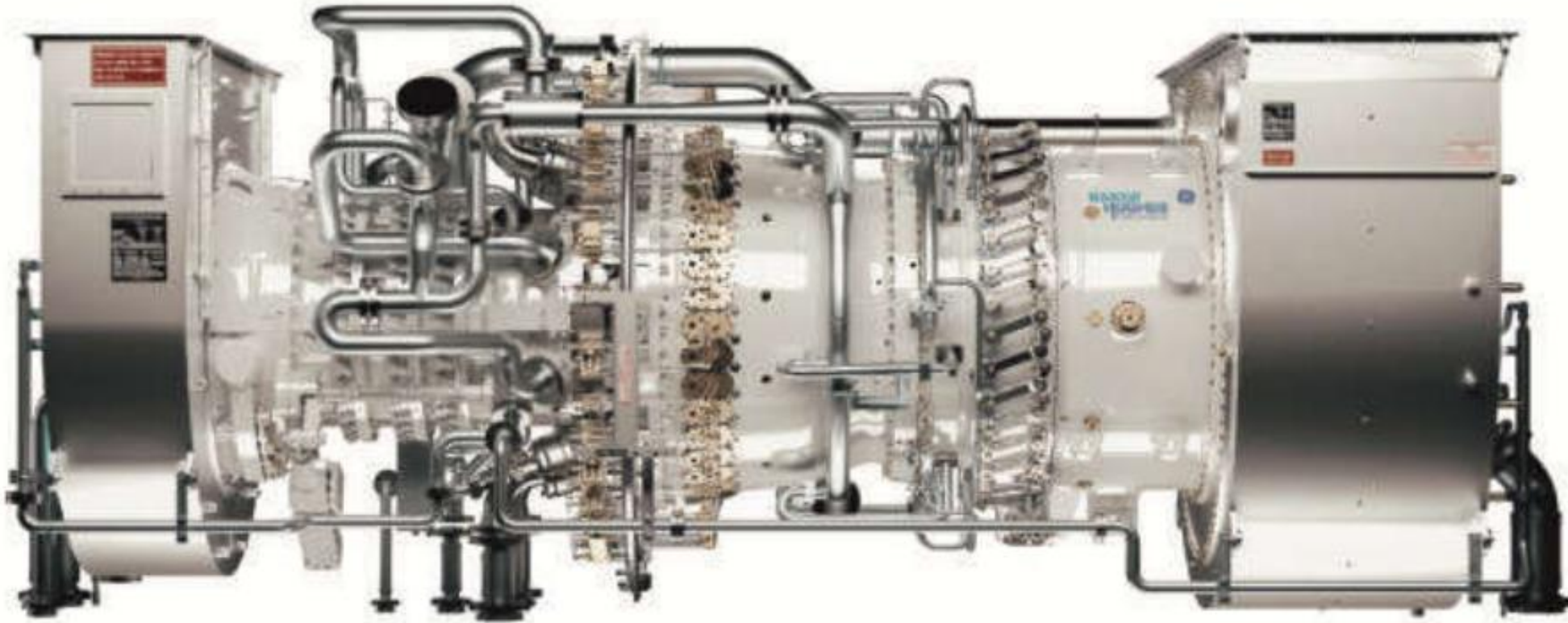
- Wzrost emisji tlenków azotu NO_x przy zwiększonej ilości H₂
- Zagrożenie cofnięcia płomienia z komory spalania przy wysokiej zawartości H₂ w paliwie
- Zagospodarowanie większej ilości paliwa w układzie paliwowym turbiny gazowej
- Zwiększone zagrożenie wybuchem mieszanki paliwowej
- Uruchomienie/Odstawienie turbiny gazowej z zastosowaniem paliwa pomocniczego (w przypadku paliwa zawierającego 100% H₂)

<https://wysokienapiecie.pl/34759-turbiny-na-wodor-pojawia-sie-na-ryнку-w-przyszlosci/>

Transformacja energetyczna – kierunki zmian, możliwości realizacji, 4-5.11.2021 r



Energetyka wodorowa – spalanie wodoru w turbinach



Turbina gazowa Baker Hughes GE typu NovaLT GT przystosowana do pracy na 100-procentowym paliwie wodorowym.

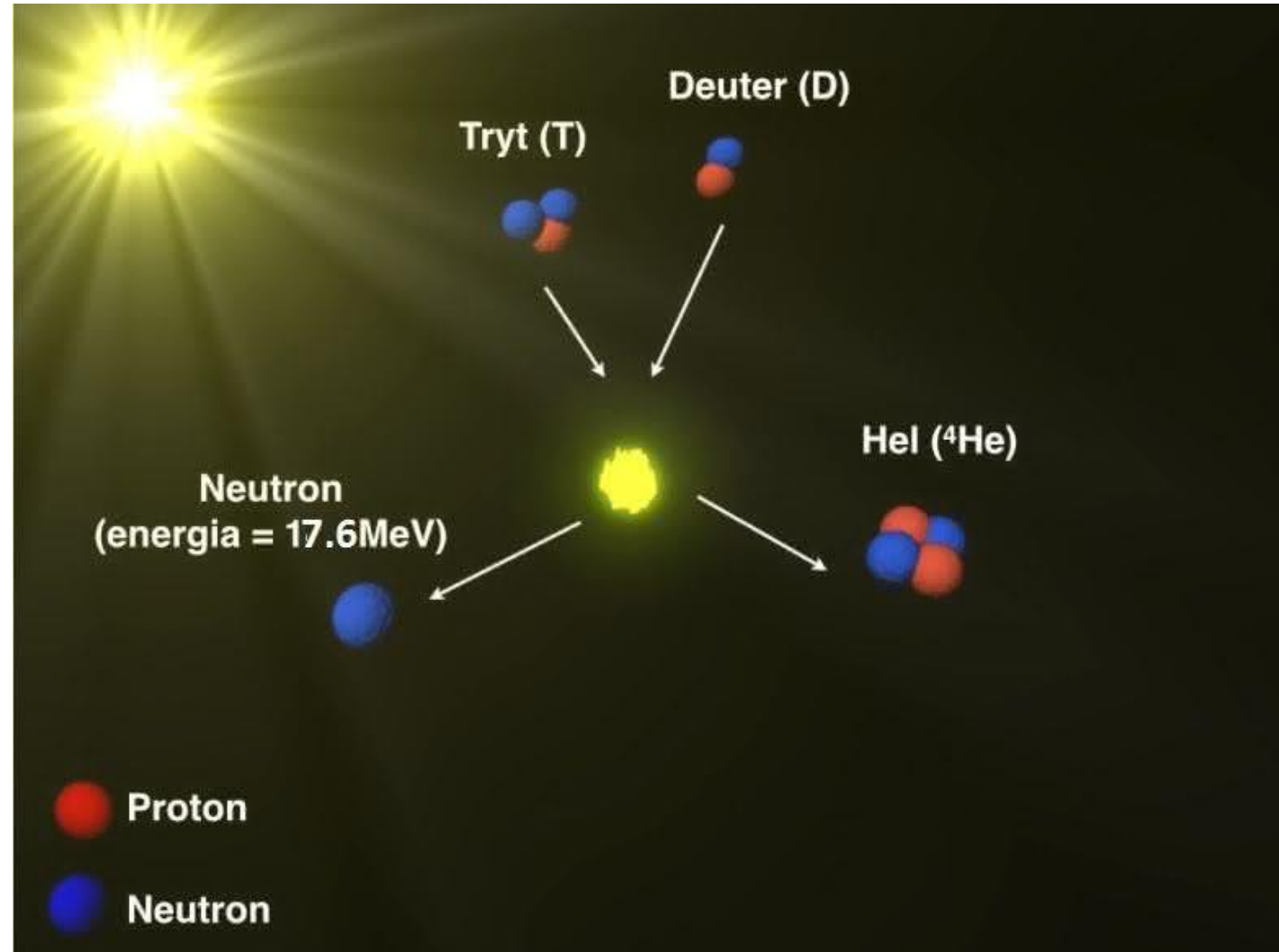
Nowicki J.: Wstęp do energetyki wodorowej. XXII SYMPOZJUM ODDZIAŁU POZNAŃSKIEGO STOWARZYSZENIA ELEKTRYKÓW POLSKICH

Transformacja energetyczna – kierunki zmian, możliwości realizacji, 4-5.11.2021 r



Energia bardziej odległej przyszłości – synteza termojądrowa

Przewiduje się, że w 2050 roku na świecie funkcjonować będą reaktory termojądrowe z dodatnim bilansem energetycznym i z możliwością praktycznego wykorzystania energii przez nie produkowaną. Teoretycznie reaktory termojądrowe mają wiele zalet. Paliwo w nich wykorzystywane występuje na Ziemi praktycznie w nieograniczonych ilościach. Reakcje termojądrowe nie powodują powstawania gazów cieplarnianych, nie stanowią więc zagrożenia klimatycznego, jak ma to miejsce podczas spalania paliw kopalnych.



<https://mlodytechnik.pl/technika/28752-synteza-termojadrowa-tak-bliska-i-tak-odlegla>

Transformacja energetyczna – kierunki zmian, możliwości realizacji, 4-5.11.2021 r



Energetyka wodorowa – szansa dla regionu

1. Możliwe jest energetyczne wykorzystanie wodoru, które niesie wiele zalet dla środowiska. Brak jest w przypadku emisji dwutlenku węgla.
2. Rozpowszechnienie energetycznego wykorzystania wodoru będzie warunkowane opracowaniem ekonomicznych metod jego wytwarzania oraz utworzeniem stosownej infrastruktury
3. Politechnika Rzeszowska jest zaangażowana w projekty wodorowe – projekt motoszybowca AOS-H₂, aktualnie wspólnie z P&W Rzeszów budujemy instalację do badania procesów spalania wodoru jako paliwa lotniczego. Pracownicy PRz aktywnie działają w Grupach Roboczych Partnerstwa Wodorowego pracując na rzecz Porozumienia Sektorowego oraz programamó kształcenia w zakresie energetyki wodorowej.
4. Szansą dla regionu może być także Podkarpacka Dolina Wodorowa



**POLITECHNIKA
RZESZOWSKA**
im. IGNACEGO ŁUKASIEWICZA

Dziękuję za uwagę



Jarosław SĘP

Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa

jsztmiop@prz.edu.pl