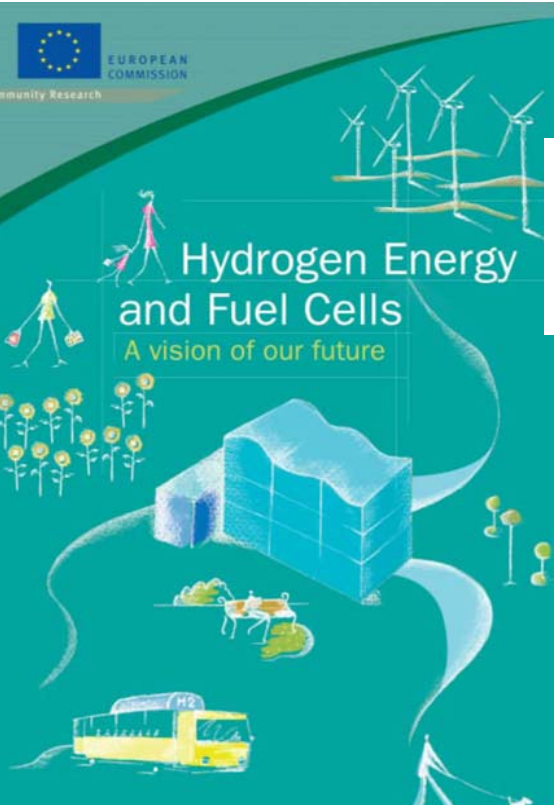


Wootsch Attila



Hidrogénforradalom



Energia rendszerek

Primer energia „forrás”

Nap (geotermikus, urán, stb...)



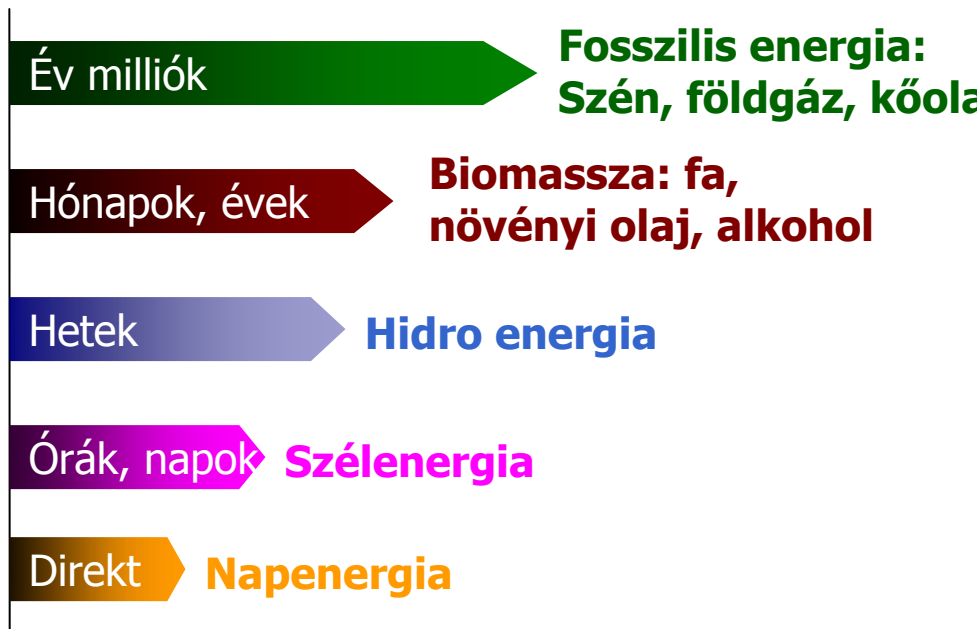
Szekunder energia hordozók

Szél, víz, fosszilis, stb...

Megújuló energiaforrás?

A napenergiából származó források bizonyos idő után újra „termelődnek”

- 1. Megújuló energia hordozó, amelynél a megújulási idő kicsi. (Megújulás egy emberöltő alatt többször megtörténik)**
- 2. Az energia kivétel nem befolyásolja számottevően az energia hordozó mennyiségét.**



Energia rendszerek problémái

Primer energia „forrás”

Nap (geotermikus, urán, stb...)



Primer energia hordozók

Szél, víz, fosszilis, stb...

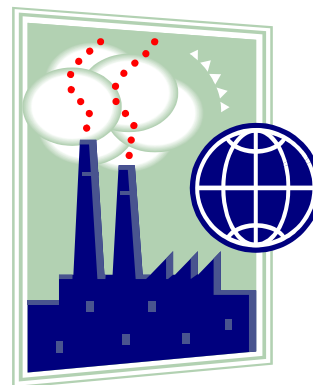


ÁTALAKÍTÁS

Szekunder energia hordozók

Áram, benzin, stb...

SZÁLLÍTÁS



Felhasználók

Alacsony rendszer hatásfok:

34% (erőművek Magyarországon)

Magas fosszilis részarány:

>50% (a világ áramtermelésében!)

Fenntarthatóság: a fosszilis hordozók előbb vagy utóbb elfognak, de ha nem is fogynak el, az üvegházhatás miatt korlátozandók.

Energia biztonság: politikai biztonság, technológiai biztonság (nagyobb kapcsolt rendszerek vagy lokális ellátás?)



Megoldási lehetőségek

Megújuló energia hordozók arányának növelése:

Közlekedés és megújuló energia hordozók összekapcsolása

Rendszer hatások növelése:

Átalakítások hatáskának növelése, átalakítási igény csökkentése

Gazdasági és marketing szempontok:

- A régi és az új rendszer kapcsolhatósága
- Az új rendszer kialakításának ne „csak” politikai, hanem gazdasági motivációi is legyenek
- Az új energiarendszer kialakítása érdeke legyen az energia piac mai szereplőinek

A hidrogén alapú rendszer megfelel-e a fenti szempontoknak?

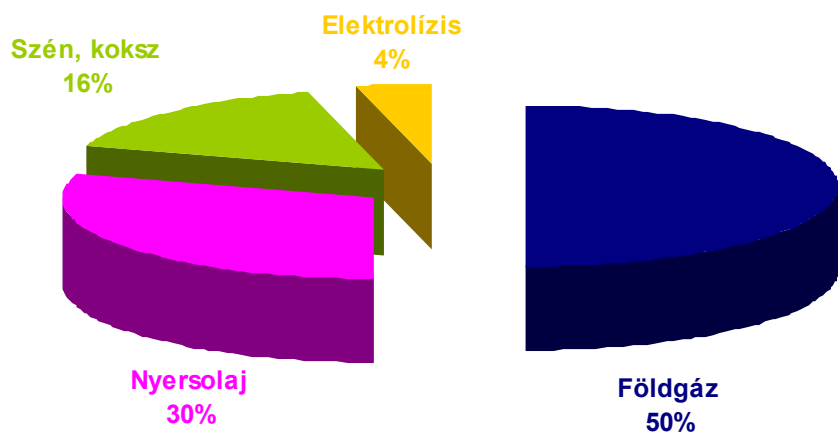
Döntse el mindenki saját belátása szerint!!!

Hidrogén ma

Termelés 45 millió tonna / év

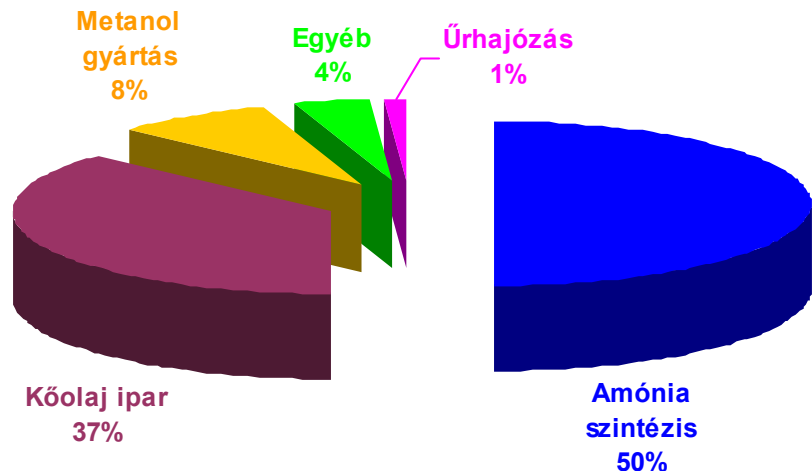
Piaci növekedés: 6% / év

Termelés



A hidrogén 96%-át fosszilis energia hordozóból állítják elő.

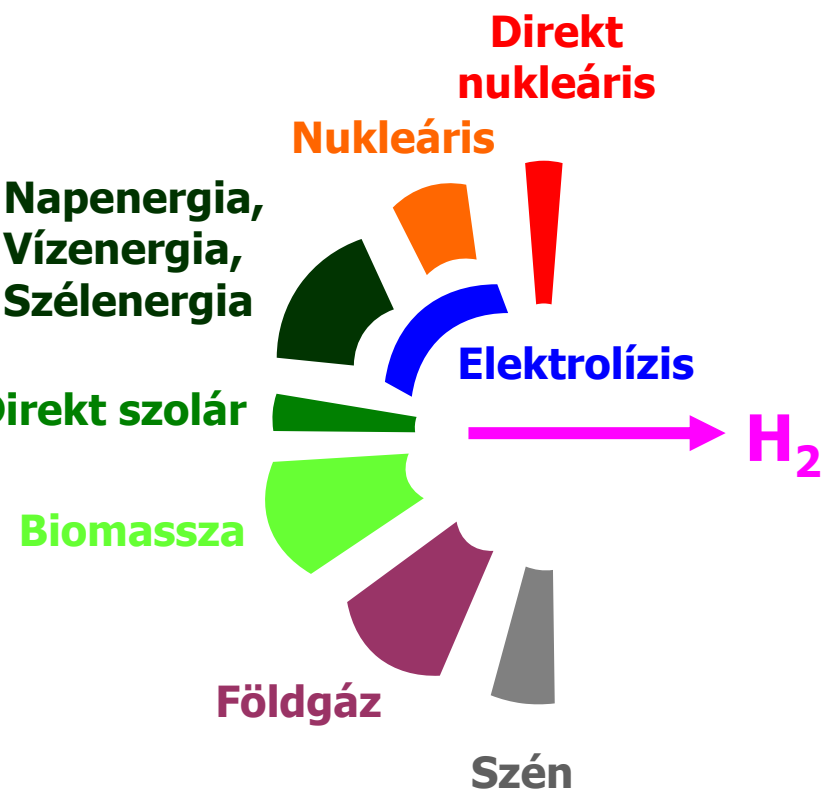
Felhasználás



Elhanyagolható a tüzelőanyag cellában történő felhasználás.

Hidrogén vízió

Termelés



Hidrogén vízió

Termelés

**Direkt
nukleáris**



**Nukleáris energia közvetlen
átalakítása, pl. víz radiolízise.
Kiforratlan technológia,
inkább elvi lehetőség.**

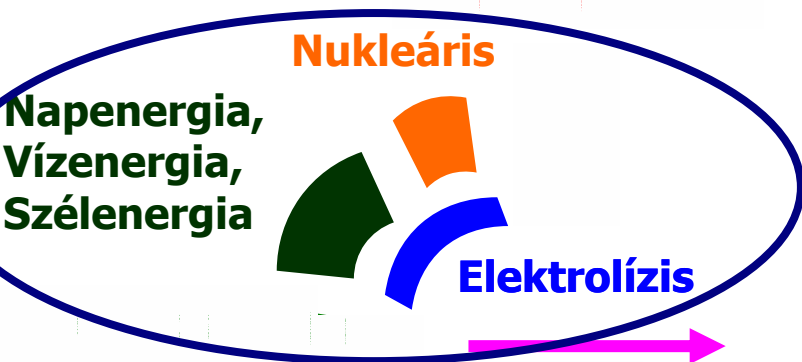


H₂

Hidrogén vízió

Termelés

Áram tárolás H₂-ben



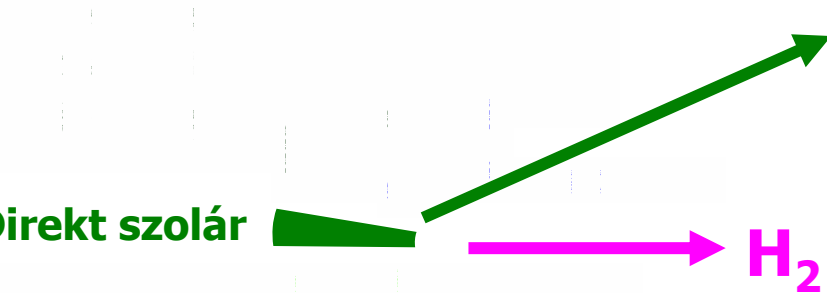
- Kiforrott technológia
- Tiszta hidrogén előállítás
- Oxigén termelés
- Elvileg tökéletes megújuló energiaforrás is lehet



- Másodlagos energiahordozót használ (áram)
- Magas energiaigény
4,5kWh/Nm³ H₂
- Magas működési költségek
(különösen kis méretben)
- Nagynyomású elektrolízis még nem kiforrott technológia

Hidrogén vízió

Termelés

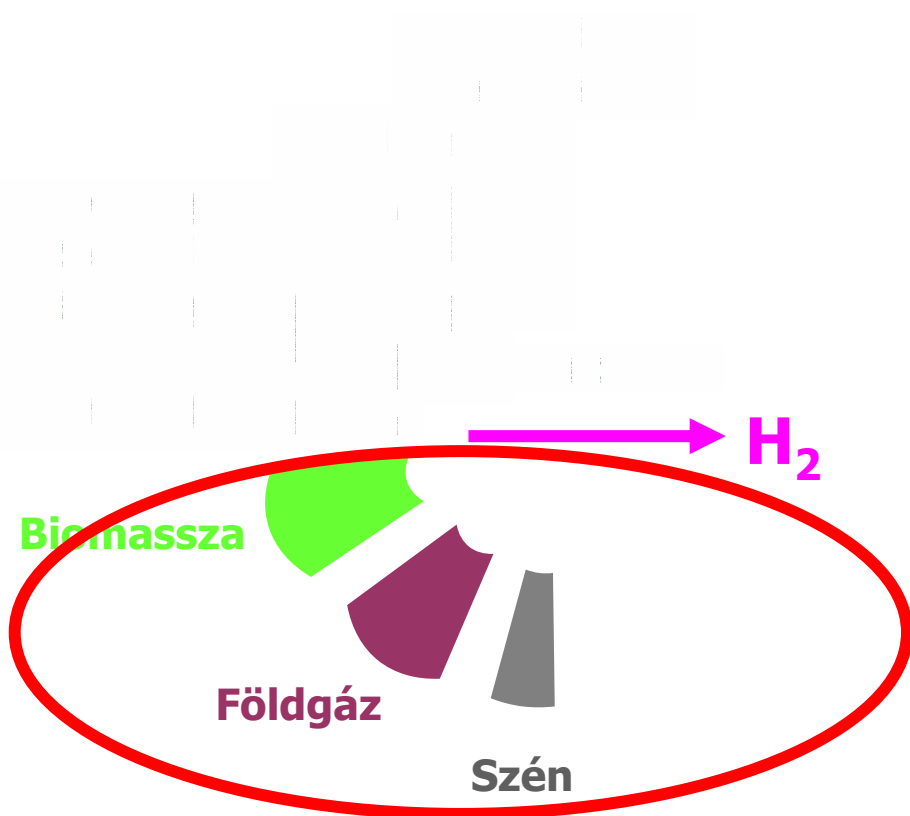


- **Fotóelektrolízis**
Víz bontás fotóelektrolízissel (PEC)
- **Szolár-termál**
Napsütésből generált koncentrált hővel végzett metán (vagy víz) bontás

**Kísérleti vagy félüzemi fázis.
Ígéretes terület lehet.**

Hidrogén vízió

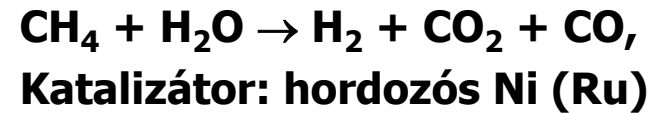
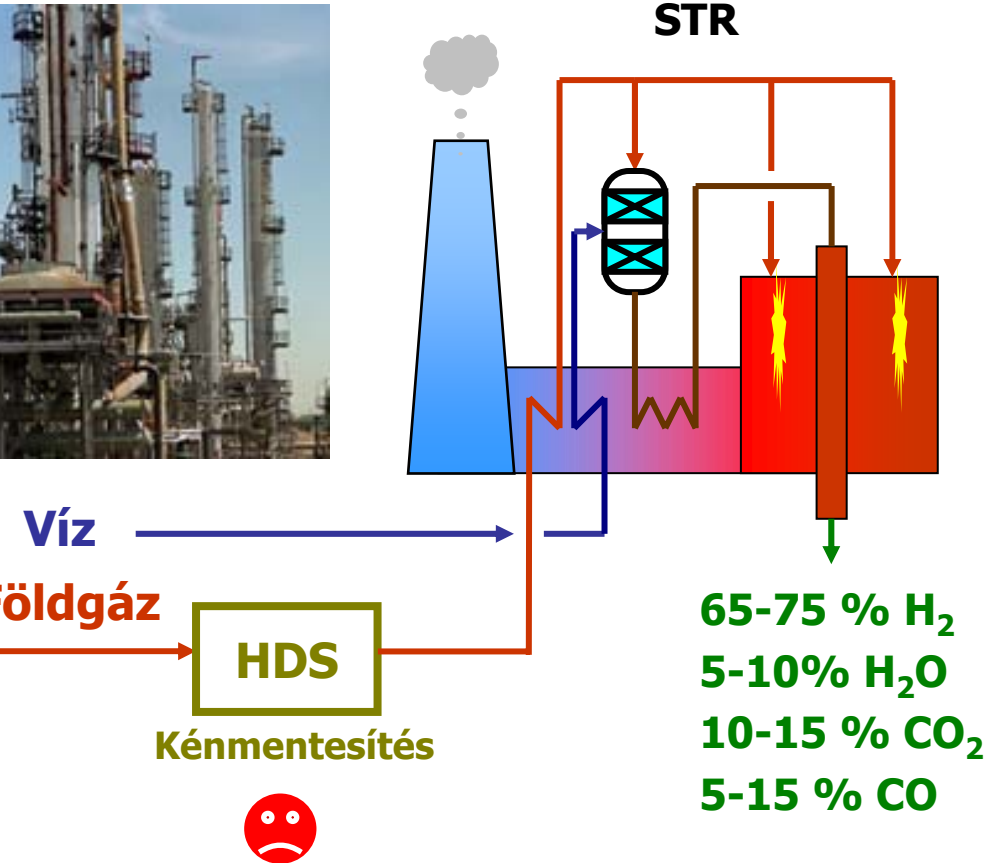
Termelés



**Hasonló eljárások,
Pl. gőz-reformálás
(reakció vízgőzzel)**

Hidrogén előállítása földgázból

Katalitikus gőz-reformálás (steam reforming, STR)



T=700-1000°C (850-900°C)

P=3-25 bar (p<40 bar)

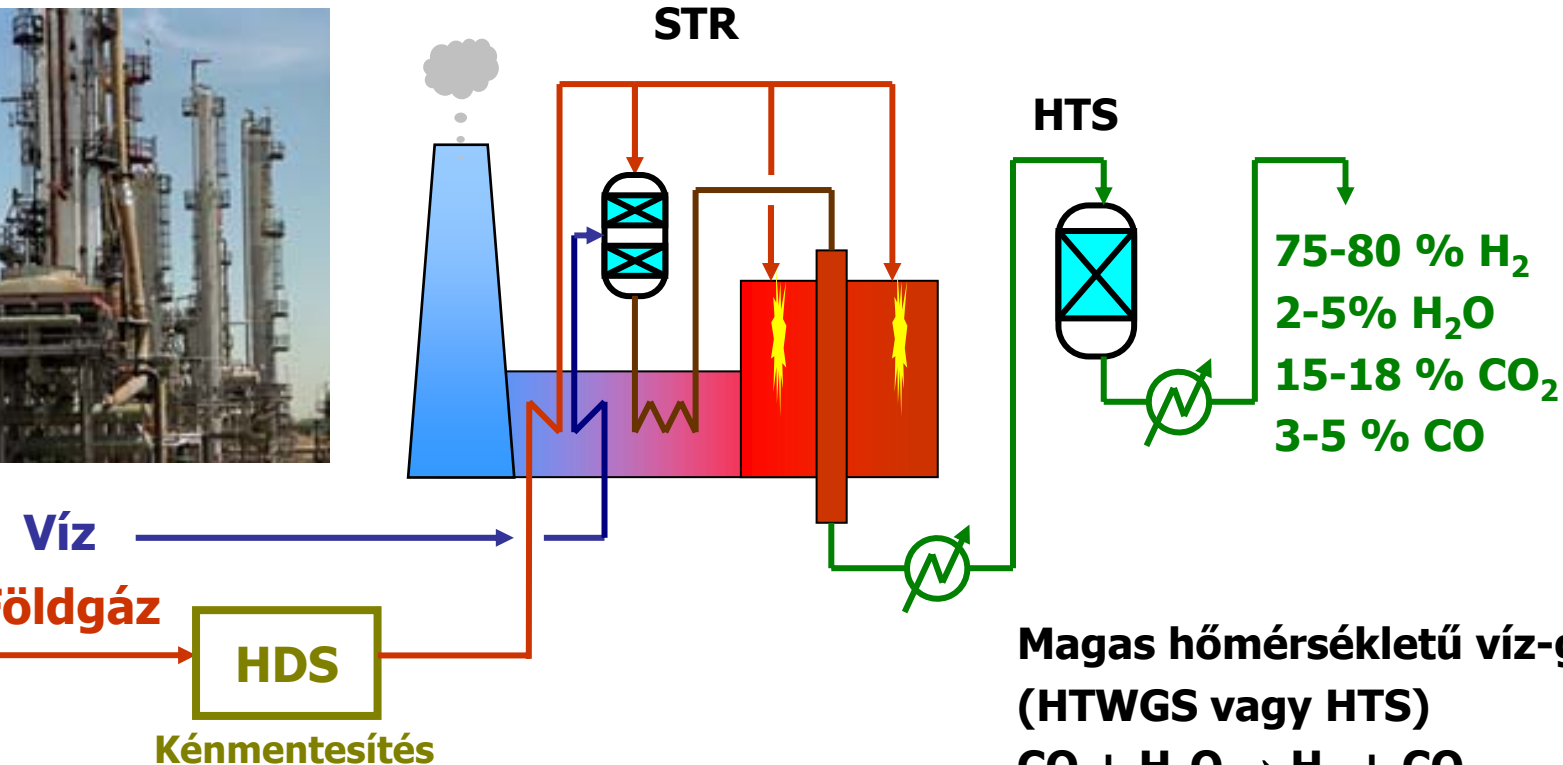
Endoterm reakció, $\Delta H = +205$ kJ/mol



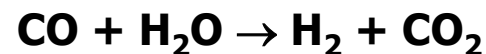
**A felhasznált földgáz 1/3-a
folyamat energiaigényének
biztosításához szükséges**

Hidrogén előállítása földgázból

Katalitikus gőz-reformálás (steam reforming, STR)



Magas hőmérsékletű víz-gáz reakció (HTWGS vagy HTS)



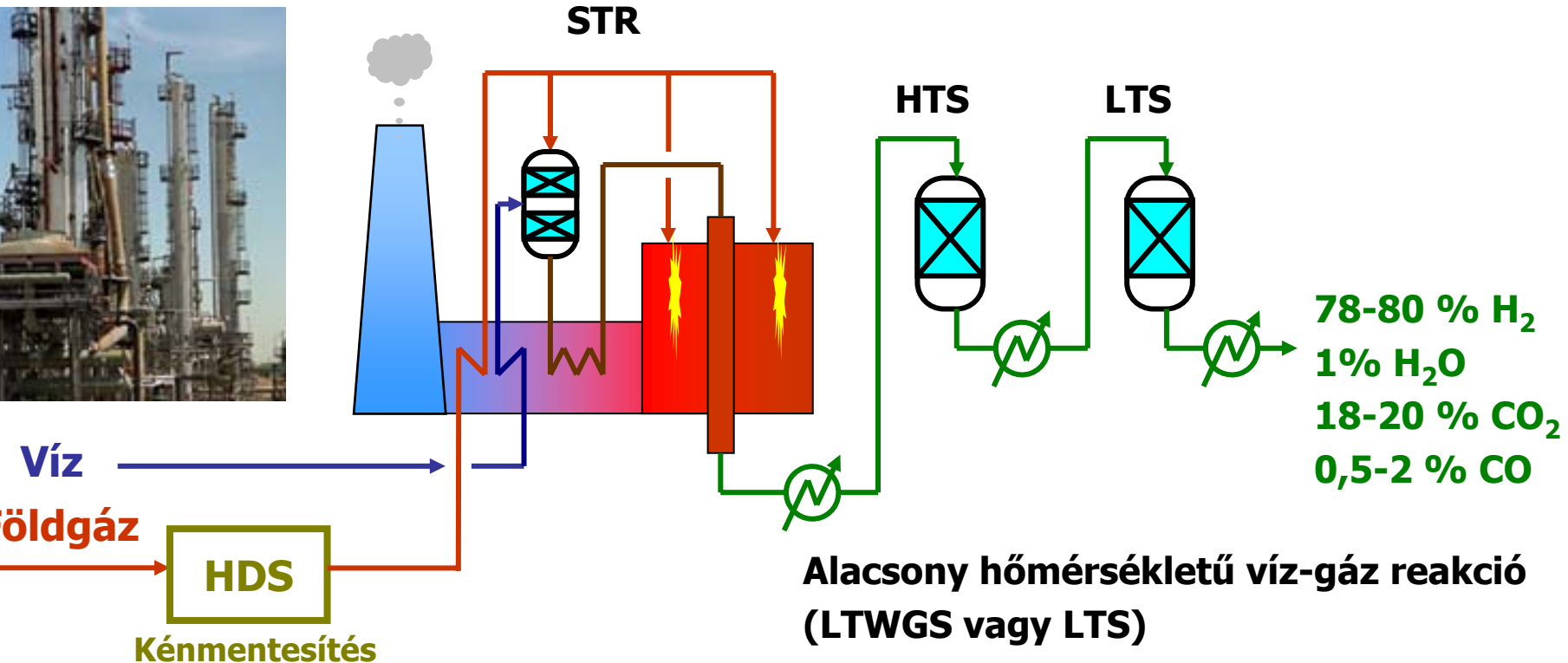
Katalizátor: Fe-Cr, Co-Cr, Co-Mn

T=300-500°C (400-500°C)

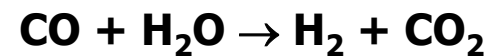
$\Delta H = +41 \text{ kJ/mol}$

Hidrogén előállítása földgázból

Katalitikus gőz-reformálás (steam reforming, STR)



Alacsony hőmérsékletű víz-gáz reakció
(LTWGS vagy LTS)



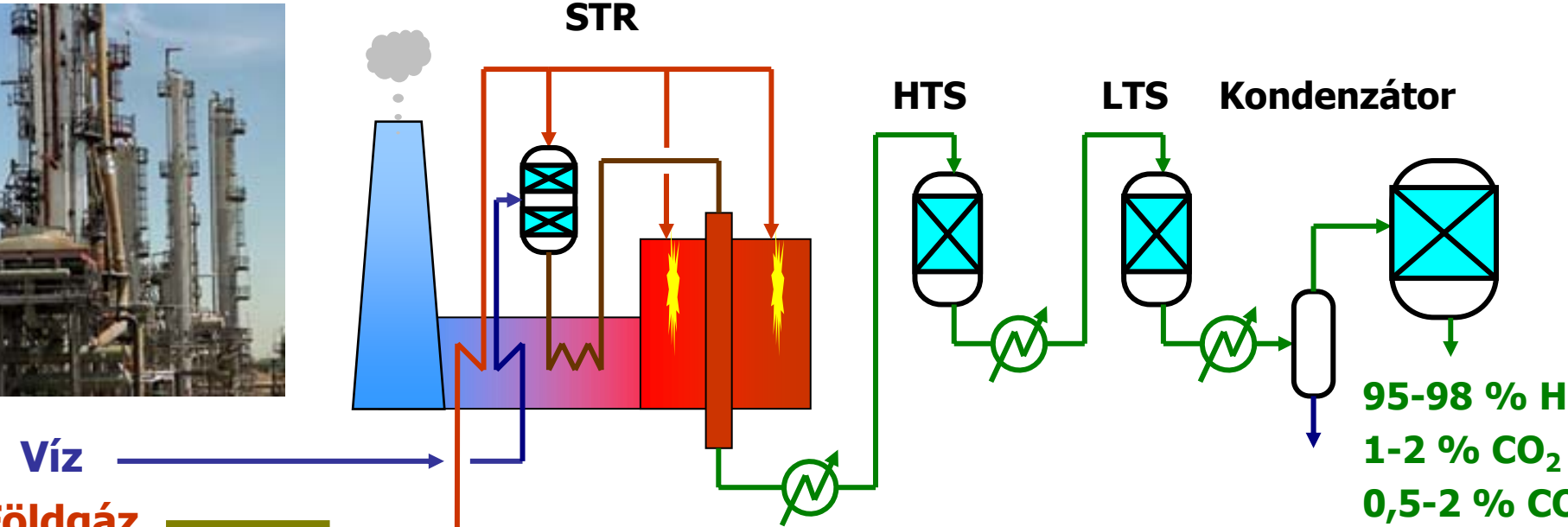
Katalizátor: Cu-CuO_x, M/CeO₂ (M=Pt, Au)

T=200-300°C (~250°C)

ΔH=+41 kJ/mol

Hidrogén előállítása földgázból

Katalitikus gőz-reformálás (steam reforming, STR)



Víz
Földgáz
HDS
Kénmentesítés

- ☹️ A CO₂ eltávolítás 20-30 %-kal növeli a költségeket
- Az elválasztott CO₂-t kezelni kell

A CO₂ eltávolítható:



- Aminos abszorpció (kidolgozott)
- Membránok, szorbensek (kidolgozás alatt)

95-98 % H₂
1-2 % CO₂
0,5-2 % CH₄

Hidrogén előállítása földgázból

Katalitikus gőz-reformálás (steam reforming, STR)



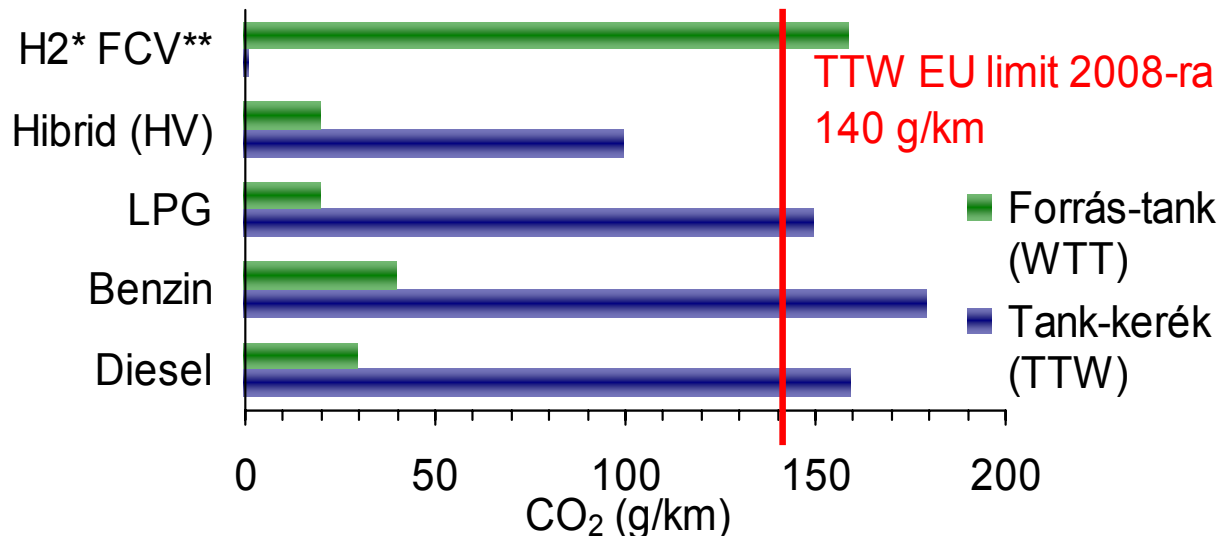
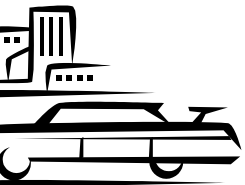
Mennyire sok a CO₂ kibocsátás?

Különböző gépjárművek CO₂ kibocsátása

Forrás-tank
(WTT)



Tank-kerék
(TTW)

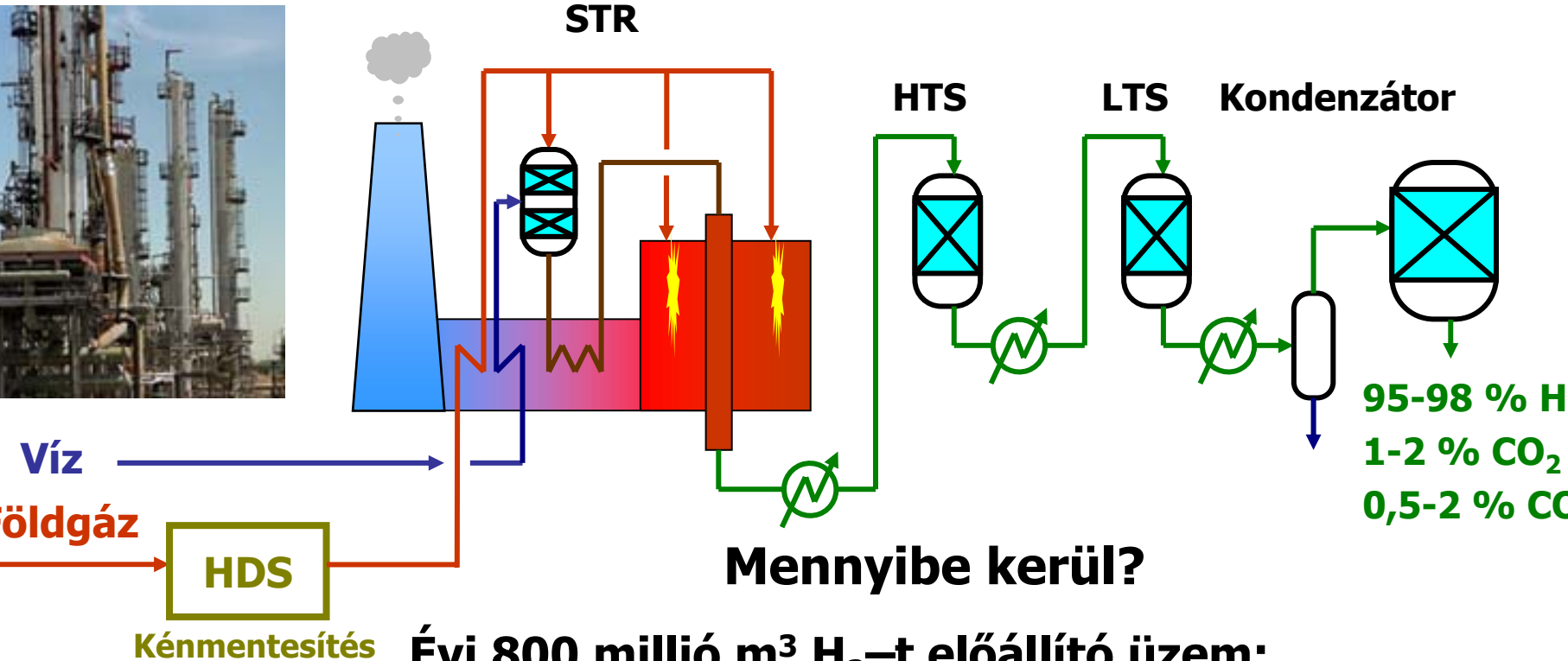


*H₂: forrás földgáz (STR)

**FCV: off-board-H₂ fuel cell vehicle

Hidrogén előállítása földgázból

Katalitikus gőz-reformálás (steam reforming, STR)



Mennyibe kerül?

Évi 800 millió m³ H₂-t előállító üzem:

Beruházás: 100 millió €, működés: 10 € cent/m³ H₂

Kis méretben 5-20.000 €, 10-20 €/m³ H₂

Hidrogén előállítása földgázból

Katalitikus gőz-reformálás (steam reforming, STR)

Árak összehasonlítása

Benzinár adóval	Ár € cent/kWh
USA	4
Németország	10

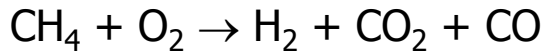
H ₂ ár adó nélkül		H ₂ portfólió	
Földgázból	6,5	50 %	} → 10 € cent/kWh (adó nélkül!)
Vízi energia	8	8 %	
Biomassza	11	14 %	
Szélergia	16	24 %	
Napenergia	21	4 %	

Hidrogén előállítása földgázból

Egyéb technológiák



Parciális oxidáció (POX)



Katalizátor (nem feltétlenül szükséges): módosított Pt, Ni,

T=1200-1500°C, P= 3-25 bar



- **Bármely szénhidrogénre alkalmazható**
- **Jól kiforrott technológia**
- **Exoterm folyamat, nincs reakcióhő-igény**



- **Alacsony hatásfok 40-60%**
- **Általában tiszta oxigén szükséges**
- **A keletkező H₂-t további tisztításnak kell alávetni (HTS, LTS, CO₂ eltávolítás)**



Mennyibe kerül?

Évi 800 millió m³ H₂-t előállító üzem:

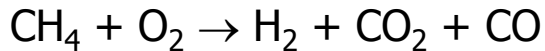
Beruházás: 250 millió €, működés: 13 € cent/m³ H₂

Hidrogén előállítása földgázból

Egyéb technológiák



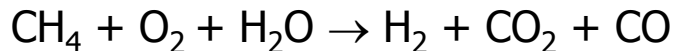
Parciális oxidáció (POX)



Katalizátor (nem feltétlenül szükséges): módosított Pt, Ni,
T=1200-1500°C, P= 3-25 bar



Autótermális reformálás (ATR)



Katalizátor: többfémű Ni-Ru-Pt rendszer
T=1300-1500°C, P= 3-25 bar



A gőz-reformálás és a parciális oxidáció együttes végrehajtása

- **Hő egyensúlyú reakció**
- **Bármely szénhidrogénre használható**
- **Levegő is használható oxidálószerként**
- **Jó hatásfok**



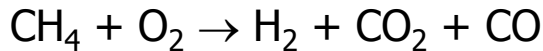
- **Pontos levegő/H₂O arány szabályozása szükséges**
- **A keletkező H₂-t további tisztításnak kell alávetni (HTS, LTS, CO₂ eltávolítás)**



Hidrogén előállítása földgázból

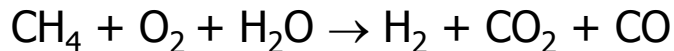
Egyéb technológiák

→ **Parciális oxidáció (POX)**



Katalizátor (nem feltétlenül szükséges): módosított Pt, Ni,
T=1200-1500°C, P= 3-25 bar

→ **Autótermális reformálás (ATR)**



Katalizátor: többfémes Ni-Ru-Pt rendszer
T=1300-1500°C, P= 3-25 bar

→ **Pirolízis (hőbontás)**



Plazma reaktor, T=1600°C
(oxigénmentes környezet)



- **Nem keletkezik CO₂**
- **Aktív szén hasznosítható komponens**
- **Bármely szénhidrogén használható**



- **Drága:**
6 millió m³ H₂/év beruházás: 150 millió €
- **Fejlesztés alatt**



Egyéb fosszilis források

→ Hidrogén előállítása hosszabb szénláncú szénhidrogénekből

A földgáznál ismertetett technológiák használhatók



▪ Kiforrott technológiai módszerek

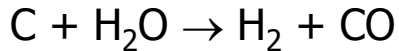


▪ A szűkös olajkészletek felhasználása nem előnyös
Középtávon az LPG és a (bio)diesel reformálásának
lehet gyakorlati jelentősége

Egyéb fosszilis források

→ Hidrogén előállítása hosszabb szénláncú szénhidrogénekből

→ Hidrogén előállítása szénből, kokszból (víz-gáz reakció)



▪ Kiforrott (klasszikus) technológiai - városi gáz gyártás



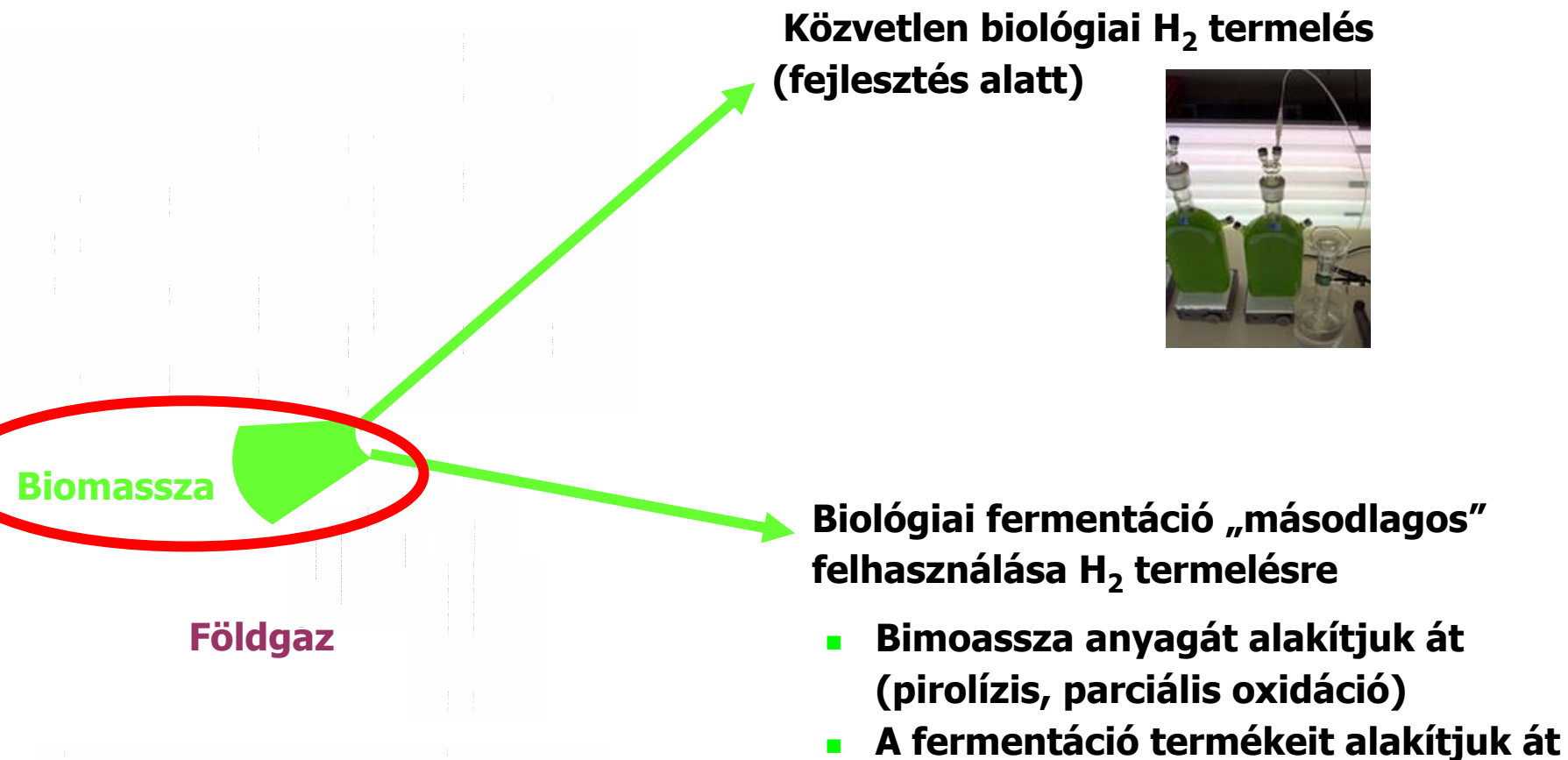
▪ Szűkös szénkészletek (alkalmazása Pl.: Dél-Afrikában)

▪ Drága:

800 millió m³ H₂/év üzem beruházása: 250 millió €, 15 € cent/m³ H₂

Hidrogén előállítás

Hidrogén vízió




H₂ előállítás biomasszából

- **Közvetlen parciális oxidáció**
- **Közvetlen pirolízis**

A földgáznál ismertetett technológiák módosított változatai használhatók

 ■ **CO₂ kibocsátás szempontjából semleges eljárás**

-  ■ **Még kidolgozás alatt lévő eljárások**
- **A termékgázban sok szennyező található (S, N, P, stb. tartalmú vegyületek)**
 - **Több utólagos tisztítólépés szükséges**

H₂ előállítás biomasszából

→ **Közvetlen parciális oxidáció**

→ **Közvetlen pirolízis**

→ **Bioalkoholok gőz- vagy autoterm reformálása**

Pl.: $C_2H_5OH + H_2O \rightarrow H_2 + CO_2 + CO + \dots$ Katalizátor: hordozós Ni, Ru, Rh stb...

A földgáznál ismertetett technológiák módosított változatai használhatók

- **A szénhidrogéneknél alacsonyabb nyomás (p=1-5 bar) és hőmérséklet (T=450-600°C) is elégséges**
- **A metanol átalakítása egyszerűbb, mint az etanol átalakítása**
- **A legnagyobb gyakorlati jelentősége az etanol gőz-reformálásának lehet**
- **Kidolgoztak olyan Rh-CeO₂-Al₂O₃ katalizátor rendszert, amely az oxigén tartalmú szennyezőket (savak, éterek, észterek) is reformálja H₂-vé**
- **A jelenlévő kén-tartalmú vegyületek zavarják a katalizátor működését**



Alkoholok előállítása kidolgozott folyamat
Kis méretben is gazdaságos lehet
A megújuló energia és a közlekedés összekapcsolása lehetséges (on-board)



- **Még kidolgozás alatt lévő eljárások**
- **Mérgezőségek elkerülése, toxicitás**
- **Utólagos tisztítás HTS, LTS szükséges**

H₂ előállítás biomasszából

→ **Közvetlen parciális oxidáció**

→ **Közvetlen pirolízis**

→ **Bioalkoholok gőz- vagy autoterm reformálása**

Pl.: $C_2H_5OH + H_2O \rightarrow H_2 + CO_2 + CO + \dots$ Katalizátor: hordozós Ni, Ru, Rh

→ **Anaerob gázok reformálása (CO₂ reformálás)**

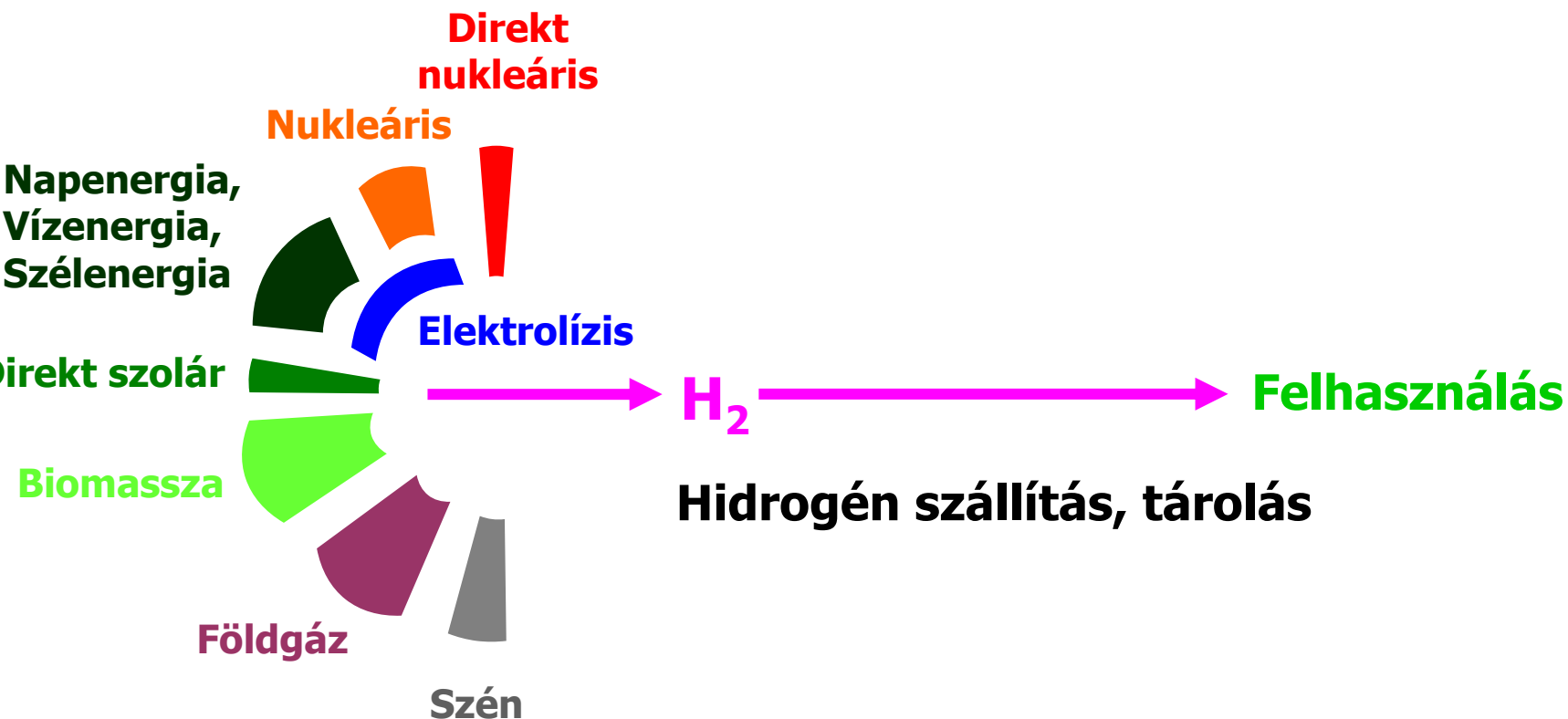
$CH_4 + CO_2 \rightarrow 2 H_2 + 2 CO$ Katalizátor: hordozós Ni, Rh – CeO₂

- **Pl.: hulladéktestben keletkező depóniagáz reformálása (kaliforniai kísérleti telep)**
- **Magas hőmérséklet, alacsony nyomás**
- **Vízgőz hozzákeverése előnyös**
- **Kénmentesítés szükséges**
- **Többlépcsős utótisztítás és átalakítás (LTS, HTS)**



Hidrogén vízió

Termelés



Hidrogén tárolás, szállítás

Prekurzor szállítása

„kémiai tárolás”, pl.: földgáz, etanol, stb... - infrastruktúra létezik?
„elektromos szállítás” – infrastruktúra létezik

Hidrogén szállítása

A mai infrastruktúra képes szállítani a hidrogént?
Milyen halmazállapotban érdemes szállítani?
Hidrogén és földgáz keverése?

Hidrogén tárolás

Gázpalack

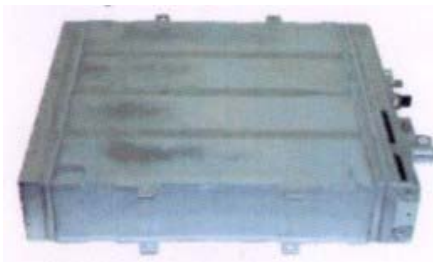


Használatban van



Méret

Adszorpciós gáz tank



Nagy kapacitás



Nagy tömeg

Cseppfolyós tank



Magas energia sűrűség

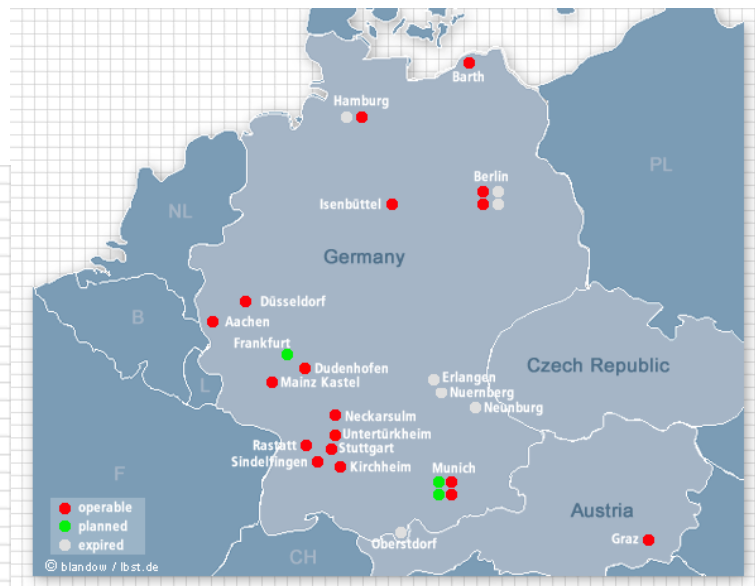
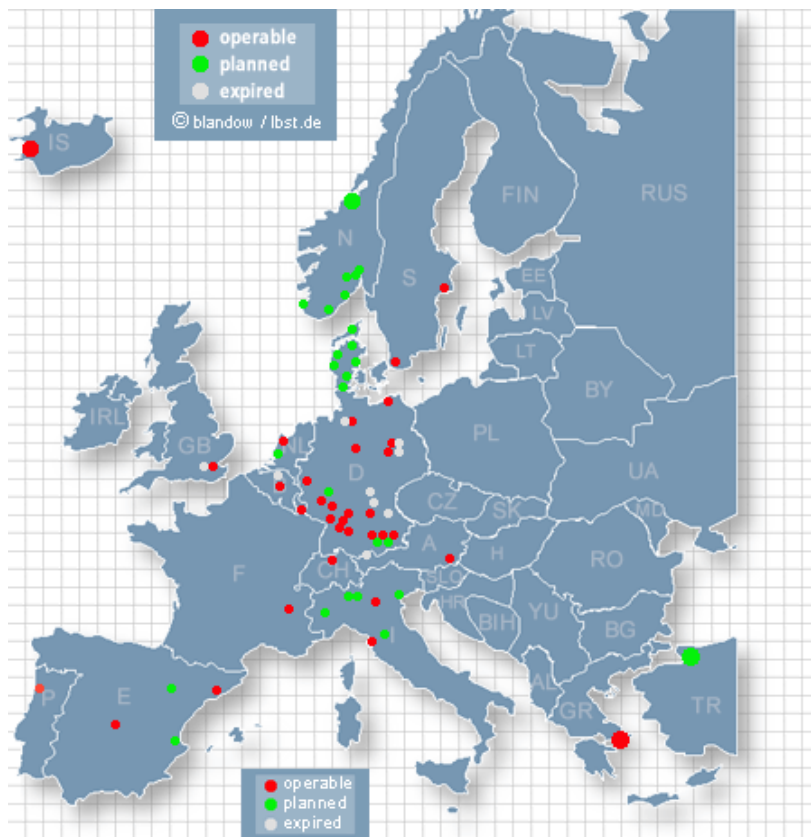


Alacsony forráspont

Hidrogén infrastruktúra

Kísérleti projektek a hidrogén infrastruktúra kialakítására

EU: H₂ tankolás ma

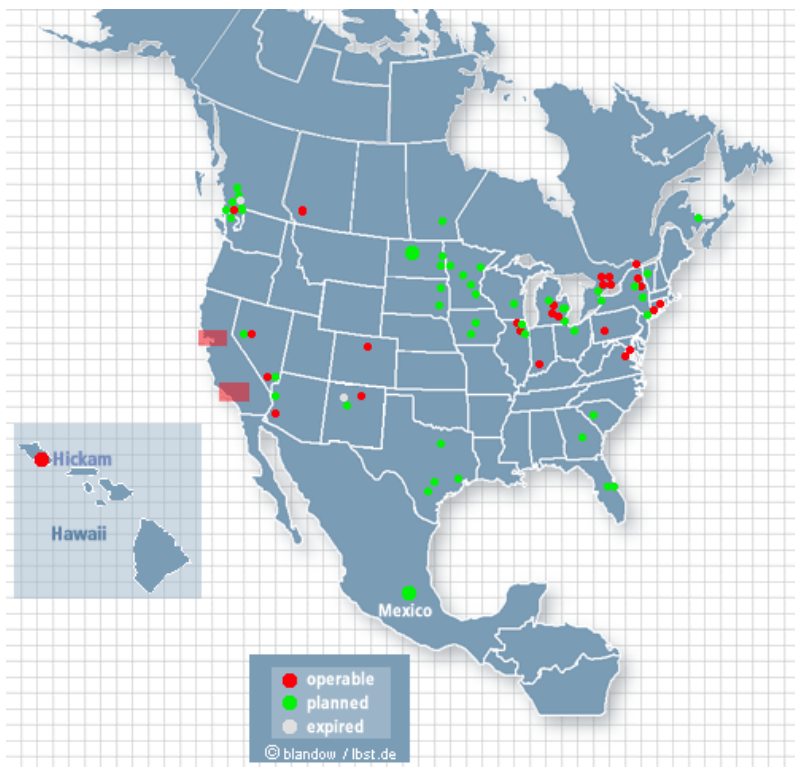


Hidrogén infrastruktúra

Kísérleti projektek a hidrogén infrastruktúra kialakítására

➔ **EU: H₂ tankolás ma**

➔ **USA: - HyWay Project California**



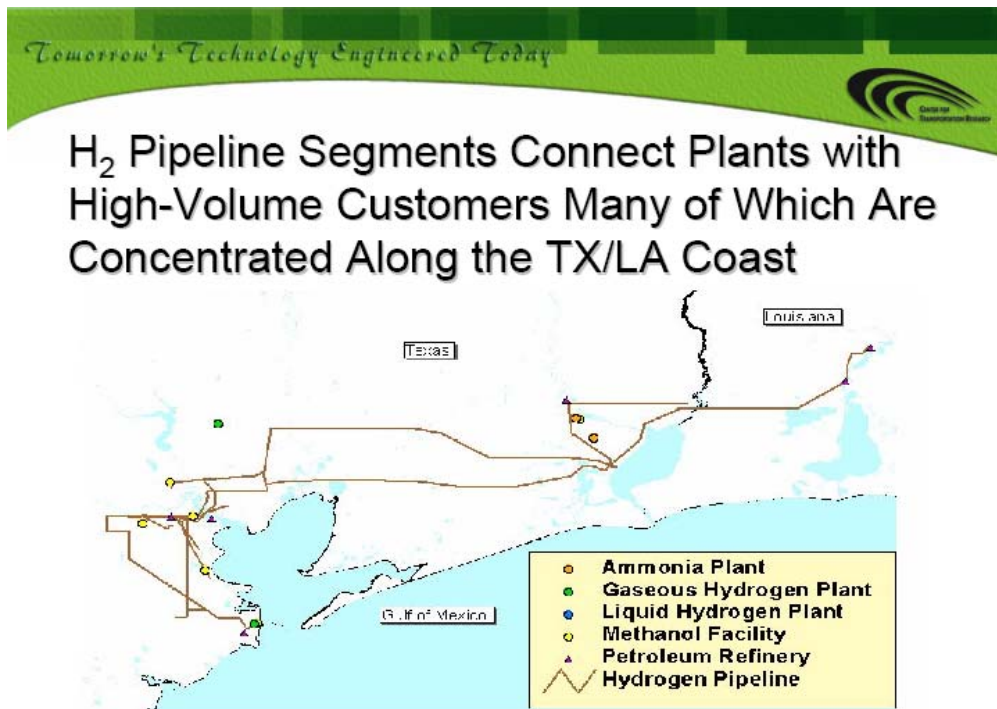
Hidrogén infrastruktúra

Kísérleti projektek a hidrogén infrastruktúra kialakítására

➔ **EU: H₂ tankolás ma**

➔ **USA: - HyWay Project California**

- H₂ Pipeline



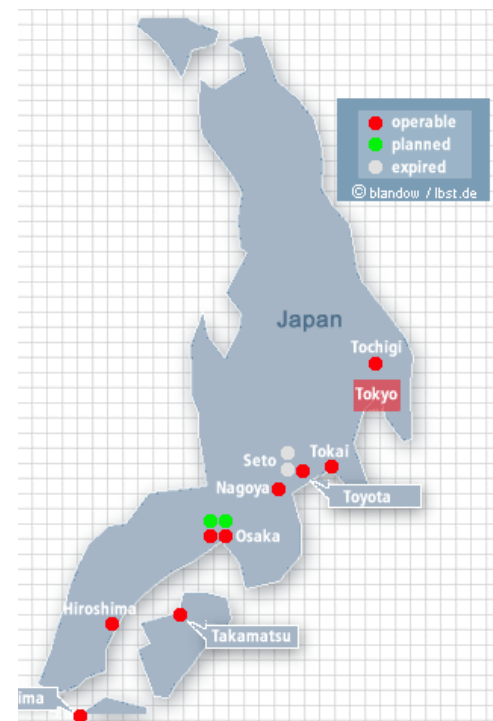
Hidrogén infrastruktúra

Kísérleti projektek a hidrogén infrastruktúra kialakítására

➔ **EU: H₂ tankolás ma**

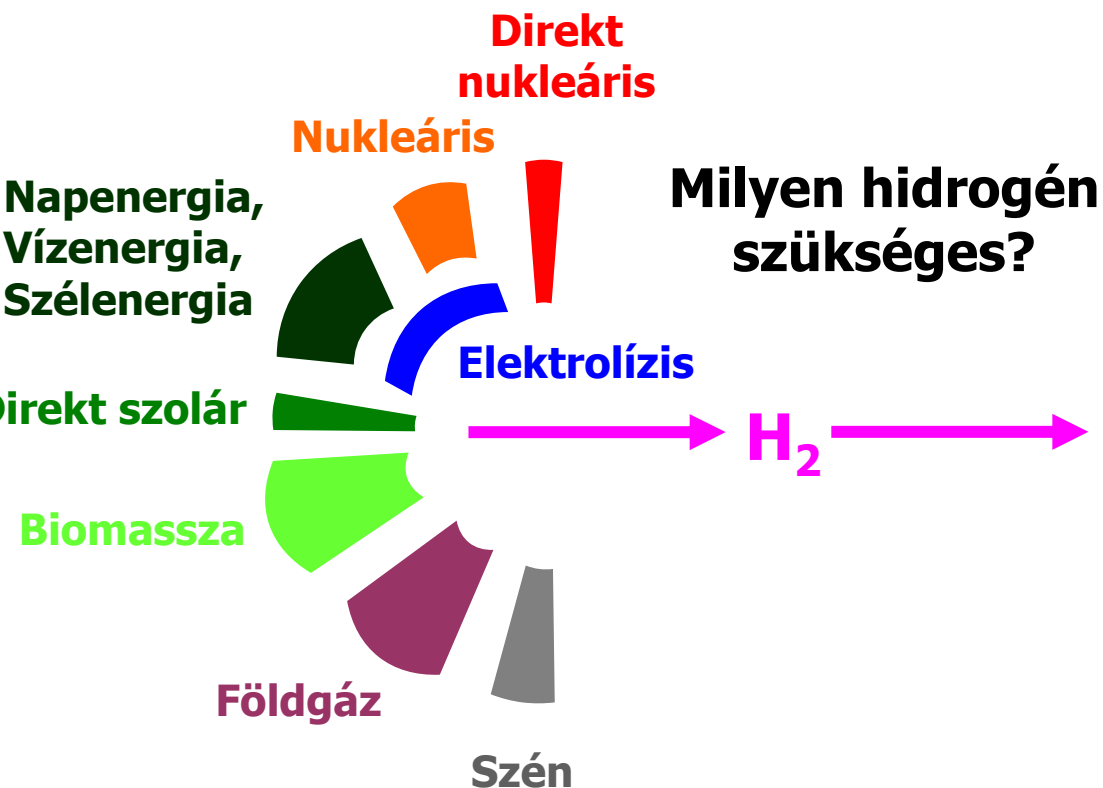
➔ **USA: - HyWay Project California
- H₂ Pipeline**

➔ **Ázsia: - Japán (tankolás ma)
- India, Kína tervezett projektek**



Hidrogén felhasználás

Termelés



Felhasználás



Hidrogén felhasználás

Milyen hidrogén
szükséges?

Felhasználás

Ammónia
gyártás



A módszertől függ.
Általában kis mennyiségű
CO₂ és CO nem zavaró.
Nagy-mennyiségű
kísérőgáz jelenléte növeli
a költségeket.

Szintézis

Energia termelés
H₂-turbinák, stb.

Belső égésű
H₂-motorok

Belső égésű
H₂-motorok:
Pl.: Ford, BMW,
Crysler



Hidrogén vízió

Tüzelőanyag
cellák

„A tüzelőanyag cellákra nem igaz a
termodinamikus főtétel”
(Előadás a hidrogen ...)

HÜLYESÉG!!!

A félreértés okozója, hogy a
tüzelőanyag cella **NEM** hőerőgép!

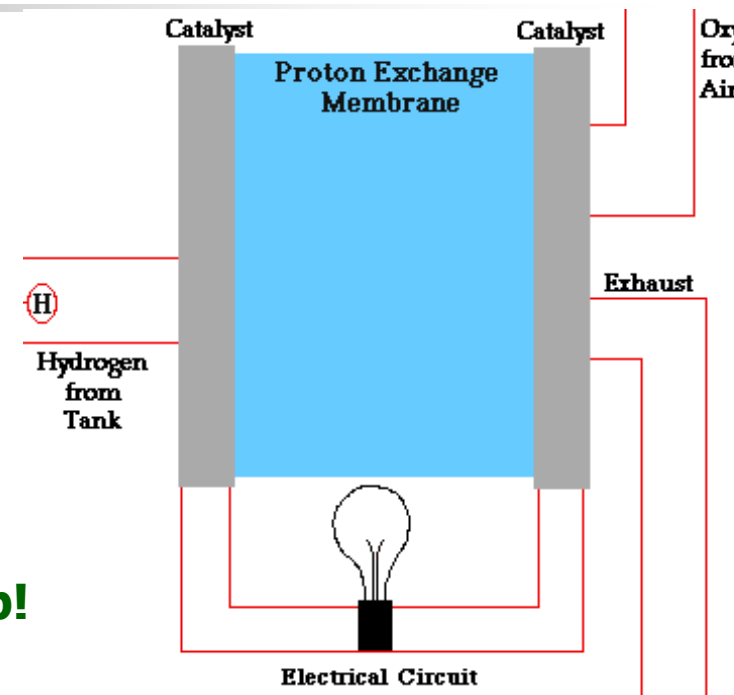
Tökéletes hőerőgép esetén

$$T_{be} = 530^{\circ}\text{C}, T_{ki} = 25^{\circ}\text{C}$$

Ha nincs semmilyen veszteség,
tökéletes a szigetelés, stb...

A hatásfok (Carnot- folyamat):

$$\eta = (T_{be} - T_{ki}) / T_{be} = 0,62$$



Tökéletes tüzelőanyag cella eseté

$$T_{be} = 25^{\circ}\text{C}, T_{ki} = 25^{\circ}\text{C}$$

Ha nincs semmilyen veszteség,
tökéletes elektrolitok, nincs
ellenállás, stb...

Az elvi hatásfok 100%

Hidrogén vízió

Tüzelőanyag cellák

→ Alkáli hidroxidos (AFC) (elektrolit: pl. KOH)

- 10-100 kW
- $T < 80^{\circ}\text{C}$
- $\eta(\text{FC}) = 60-70\%$
- $\eta(\text{rendszer}) = 62\%$

- **Legrégibb technológia**
- **Ma a NASA használja**
- **Magas hatásfok**
- **CO tolerancia magas (0,5-1%)**

- **CO₂ érzékeny!!**
- **Alacsony teljesítmény**

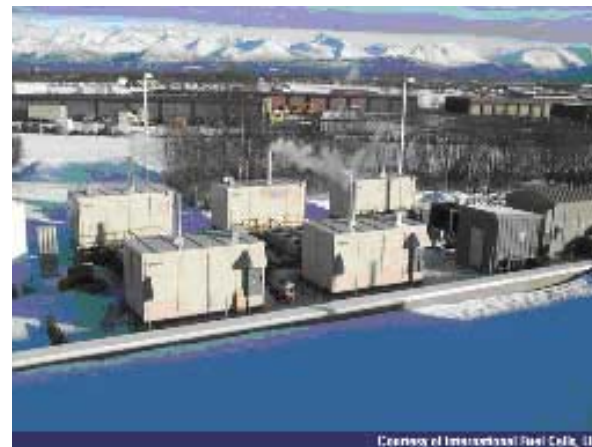
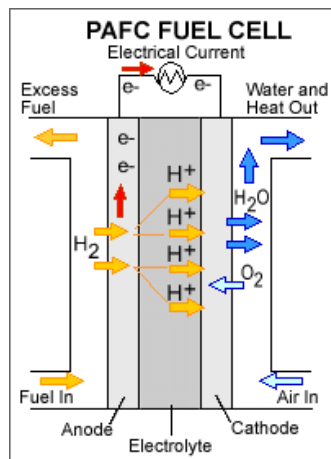
Hidrogén vízió

Tüzelőanyag cellák

➔ **Alkáli hidroxidos (AFC)**

➔ **Foszforsavas (PAFC)
(elektrolit: H_3PO_4)**

- <100 MW
- $T=150-200^{\circ}C$
- $\eta(FC)=55\%$
- $\eta(\text{rendszer})=40\%$



■ **Nagyüzemi méretekben főleg ezt használják**

■ **Magas maximális teljesítmény**

■ **CO tolerancia magas (0,5-1%)**

■ **CO₂-re nem érzékeny**

■ **Nagy, nehéz, robusztus**

Hidrogén vízió

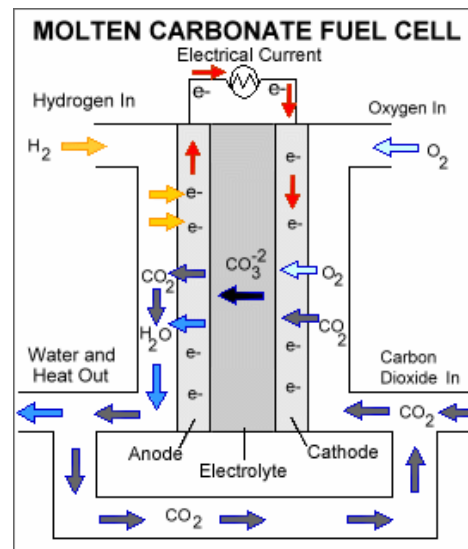
Tüzelőanyag cellák

➔ **Alkáli hidroxidos (AFC)**

➔ **Foszforsavas (PAC)**

➔ **Olvadék karbonát (MCFC)
(elektrolit: pl. NaHCO_3)**

- <100 MW
- $T=600-650^\circ\text{C}$
- $\eta(\text{FC})=55\%$
- $\eta(\text{rendszer})=47\%$



- **Nagyüzemi méretekben használható**
- **400°C-os gőz előállítás**
- **CO tolerancia magas (0,5-1%)**
- **CO₂ a működéshez szükséges**



- **Nagy, nehéz, robosztus**
- **Magas hőmérséklet**
- **Magas beruházási költség**

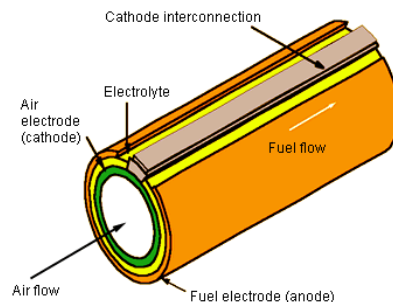
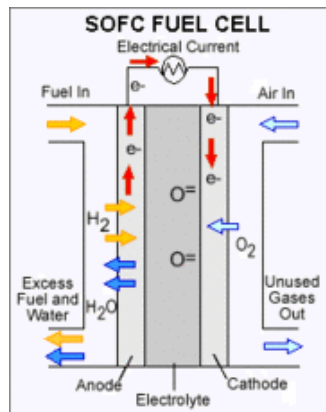
Hidrogén vízió

Tüzelőanyag cellák

- ➔ Alkáli hidroxidos (AFC)
- ➔ Foszforsavas (PAC)
- ➔ Olvadék karbonát (MCFC)
- ➔ Szilárd oxidos (SOFC)
(elektrolit: ZrO_2)

- <100 MW
- $T=600-1000^{\circ}C$
- $\eta(FC)=60-65\%$
- $\eta(\text{rendszer})=55-60\%$

- Nagyüzemi méretekben használható
- Kis teljesítményűt is készítenek (BMW)
- Telített gőz előállítása
- Hosszú üzemidő, jó hatásfok
- Bármely éghető gáz (CO , CH_4)
- CO_2 -re nem érzékeny



- Magas hőmérséklet, szerkezeti problémák
- Viszonylag magas beruházási költség

Hidrogén vízió

Tüzelőanyag cellák

→ Alkáli hidroxidos (AFC)

→ Foszforsavas (PAC)

→ Olvadék karbonát (MCFC)

→ Szilárd oxidos (SOFC)

→ Polimer elektródos (PEMFC)

- 100 W - 500 kW

- $T=70-120\text{ }^{\circ}\text{C}$

- $\eta(\text{FC})=50-70\%$

- $\eta(\text{rendszer})=30-50\%$

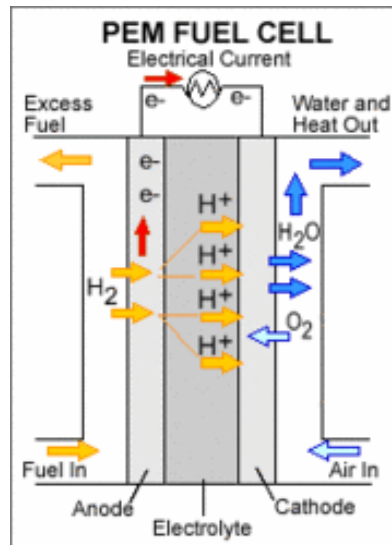
- **Ideális mobil alkalmazásokhoz (Pl. Toyota)**

- **Könnyű (az akkumulátorokhoz képest)**

- **Alacsony hőmérséklet**

- **CO₂-re nem érzékeny**

- **Kompetitív ár**



- **Pt anód (drága)**

- **Nagyon CO érzékeny**

- **CO < 1-100 ppm!!**

Hidrogén tisztítás

CO eltávolítás lehetőségei

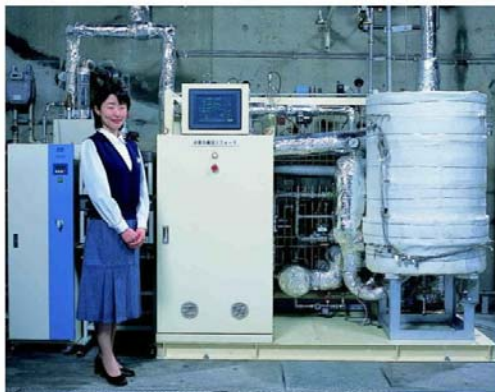
→ Szelektív membrán: Pd tartalmú membránok, pl. Ag/Pd



- Nagyon nagy tisztaság érhető el
99,9999% H₂
- Más eljárással integrálható

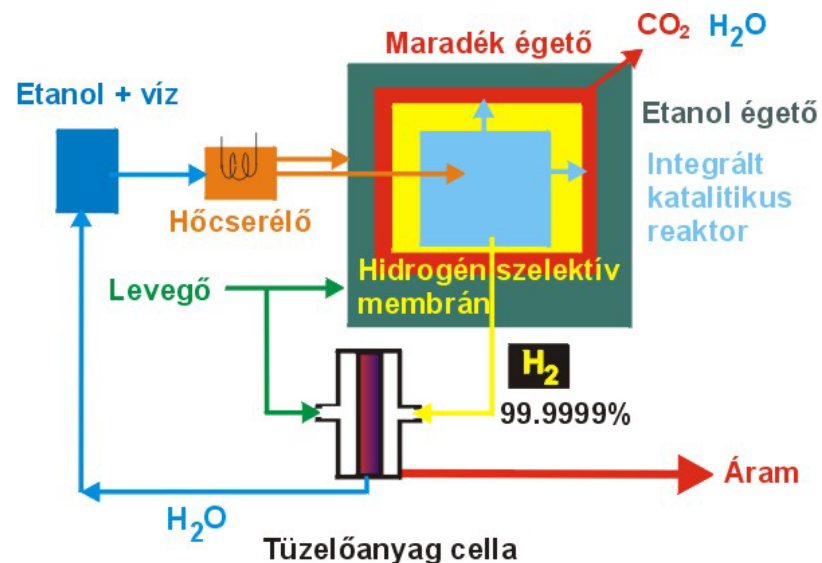


- Drága
- Nyomás szükséges



Dimension; 2050mm^W × 1200mm^D × 1650 mm^H
Feed: City gas

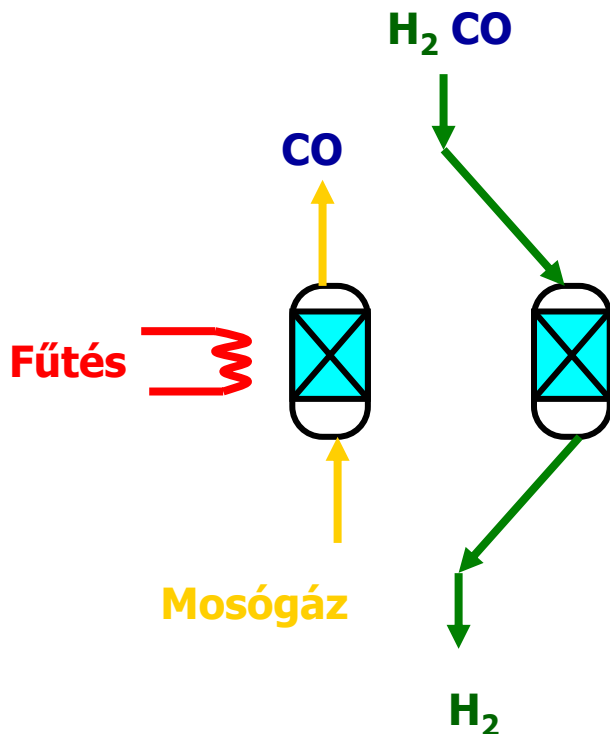
(Pilot Unit for NEDO/JGA, Picture by JGA)



Hidrogén tisztítás

CO eltávolítás lehetőségei

- Szelektív membrán: Pd tartalmú membránok, pl. Ag/Pd
- Adszorpciós módszerek (swing adszorpció)



- Alacsony beruházás
- Egyszerű eljárás
- Nem szükséges nyomás



- Nem biztosítható folyamatos H₂ tisztaság
- Szakaszos eljárás
- Szabályozás technika

Hidrogén tisztítás

CO eltávolítás lehetőségei

→ Szelektív membrán: Pd tartalmú membránok, pl. Ag/Pd

→ Adszorpciós módszerek (swing adszorpció)

→ Katalitikus módszerek

→ **Víz-gáz reakció (WGS):** $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2 + \text{CO}_2$

Magas hőmérsékletű (HTS), katalizátor: Fe-Cr, Co-Cr, Co-Mn
Alacsony hőmérsékletű (LTS), katalizátor: hordozós Cu,

Már volt róla szó

→ **Metanizálás:** $\text{CO} + 3 \text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + 2 \text{H}_2\text{O}$

Katalizátor: Ni, Ru



Jó hatásfok, kidolgozott módszer



Hidrogén veszteség

Oxidáció: $2 \text{CO} + \text{O}_2 \rightarrow 2 \text{CO}_2$ (r_1)

Kompetitív reakció: $2 \text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2 \text{H}_2\text{O}$ (r_2)

PROX: $r_1 \gg r_2$

A PROX reakció

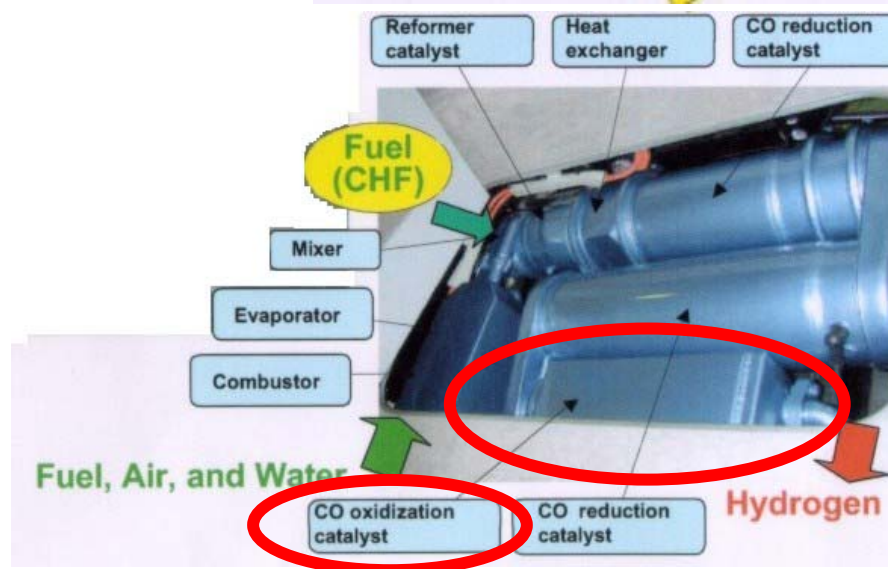
Reformer,
Shift

H₂,
H₂O,
CO₂,
CO!!

PROX
reaktor

H₂,
H₂O,
CO₂,
no CO!!

H₂-PEMFC



A PROX reakció

Reformer,
Shift

H₂,
H₂O,
CO₂,
CO!!

PROX
reaktor

H₂,
H₂O,
CO₂,
no CO!!

H₂-PEMFC

- **PROX = Preferenciális oxidáció**
(preferential CO oxidation)
- Cél: CO nyomok eltüntetése kb. 70% hidrogént tartalmazó fejtázból.
- PROX kutatásaink céljai:
 - Szelektivitás növelése
 - H₂ veszteség csökkentése – kisebb O₂ felesleg szükséges
 - Kiindulási CO koncentráció növelhető
 - Működési tartomány bővítése (hőmérséklet, O₂ felesleg)
 - Reakció mechanizmus megismerése

Publikációink:

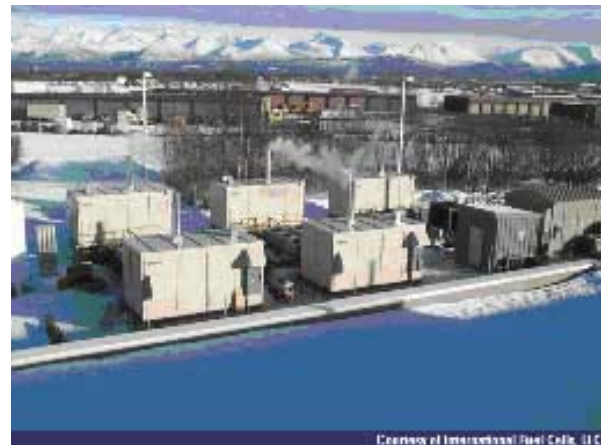
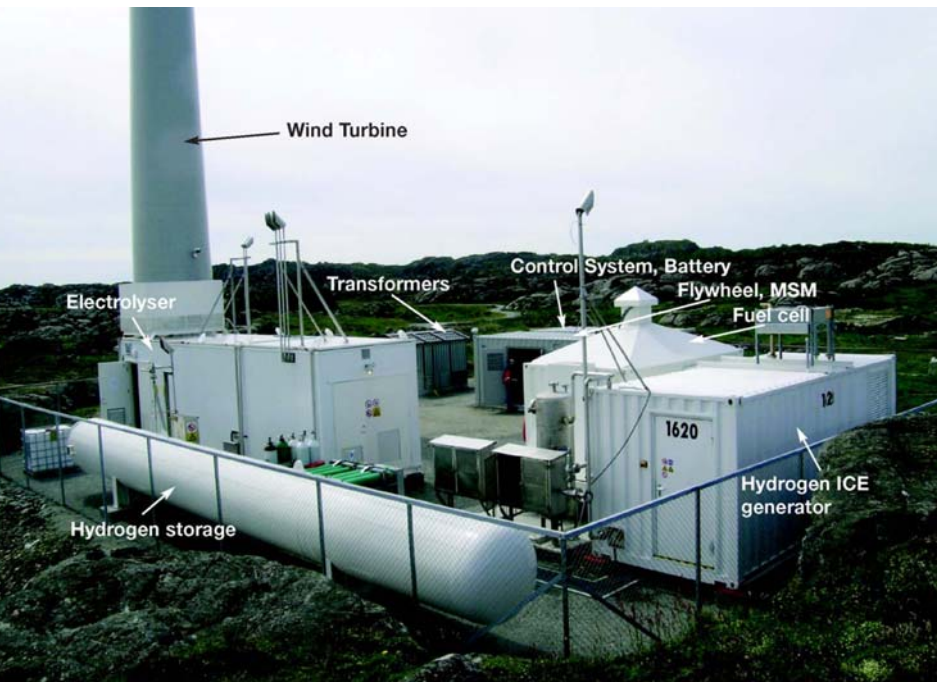
1. Wootsch, C. Descorme, D. Duprez, *J. Catal.* **225** (2004) 259.
2. O. Pozdnyakova, D. Teschner, A. Wootsch, et al *J. Catal.* **237** (2006) 1.
3. O. Pozdnyakova, D. Teschner, A. Wootsch, et al *J. Catal.* **237** (2006) 17.
4. D. Teschner, A. Wootsch, O. Pozdnyakova et al. *RKCL* **87** (2006) 235.
5. O. Pozdnyakova, A. Wootsch, et al in "Sampling Catalysis Research in the Pannonian Region" 2006, Szeged, ISBN: 963 06 0138 9, p. 214.
6. O. Pozdnyakova-Tellinger, D. Teschner, et al., *J. Phys. Chem. C*, in press
7. D. Teschner, A. Wootsch, et al. *J. Catal.*, elfogadva

„Jó téma“?
3 év alatt
7 publikáció
45 idézet
2.8 Mft

Hidrogén forradalom?

Elkezdődött a hidrogén forradalom?

- Ipari kiegészítő energiatermelés. Pl.: szélerőművek többletáramának tárolása, hulladék hidrogén hasznosítása



Hidrogén forradalom?

Elkezdődött a hidrogén forradalom?

- Ipari kiegészítő energiatermelés. Pl.: szélerőművek többletáramának tárolása, hulladék hidrogén hasznosítása
- **Hordozható áramtermelő eszközök**

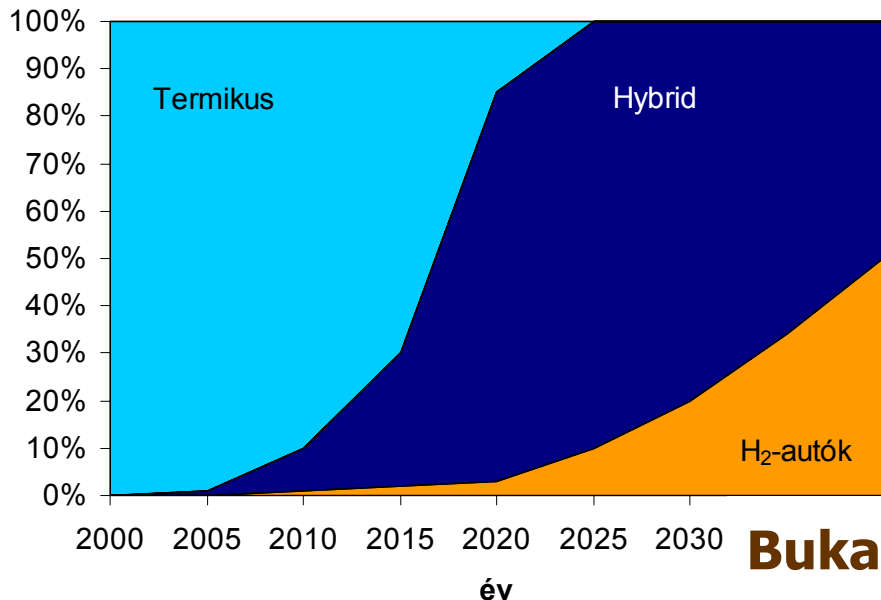


Hidrogén forradalom?

Elkezdődött a hidrogén forradalom?

- Ipari kiegészítő energiatermelés. Pl.: szélerőművek többletáramának tárolása, hulladék hidrogén hasznosítása
- Hordozható áramtermelő eszközök

➤ Közlekedés

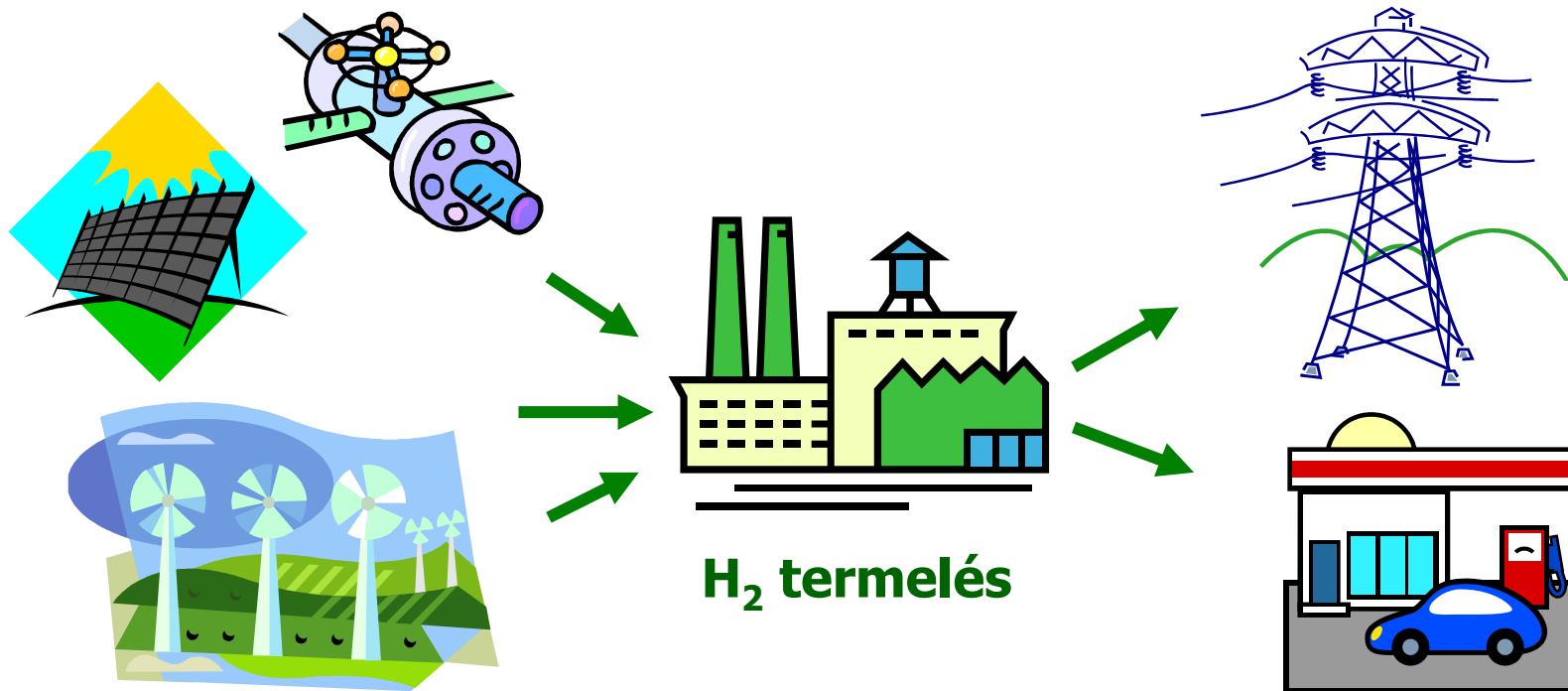


Bukarest



Hidrogén forradalom?

Elkezdődött a hidrogén forradalom?



**Rendszer független hidrogénfalú fejlesztése Bükkaranyoson 2010-ig
(Nagy-ferenczy kft.)**

Köszönetnyilvánítás



Magyar Tudományos Akadémia Bolyai János Ösztöndíj

OTKA F046216 sz. támogatás



MTA IKI – Fritz-Haber Intézet együttműködése

MAX-PLANCK-GESellschaft