

Az atomerőművek potenciális szerepe a tiszta hidrogéntermelésben

Kirchkeszner Csaba^{1,2}

¹Unicam Magyarország Kft.

1144 Budapest, Kőszeg u. 29.

²Eötvös Loránd Tudományegyetem, Hevesy György Kémia Doktori Iskola

1117 Budapest, Pázmány Péter sétány 1/A.

A hidrogén kulcsfontosságú szerepet tölthet be a dekarbonizációban és a klímacélok elérésében, ha megfelelő mennyiségben és karbonsemleges technológiákkal előállítható, valamint megfelelő biztonsággal tárolható, majd szükség esetén gyorsan mobilizálható, felhasználható. A jövőben a hidrogéngazdaság fejlődésében és a hidrogéntermelésben egyre inkább meghatározóvá válhatnak mind a legelterjedtebb könnyűvízes reaktorral szerelt atomerőművek, mind pedig a IV. generációs atomerőművek. Előbbiek az általuk megtermelt, karbonsemleges villamos energia egy részét képesek felhasználni alacsony hőmérsékletű vízelektrolizáló cellákkal történő hidrogéntermelésre, míg a IV. generációs atomreaktorok a termokémiai körfolyamatok révén megvalósított hidrogéntermelés igen magas hőmérsékletű hőigényét tudják biztosítani. Mindkét esetre számos példát találunk már napjainkban is, és egyre több ország részt vesz a nukleáris hidrogéntermeléssel kapcsolatos fejlesztések, innovációk kidolgozásában.

Bevezetés

Napjainkban a hidrogén és a hidrogéngazdaság egyre gyakrabban kerül a figyelem középpontjába, hiszen a hidrogén számos szempontból jelentős szerepet tölthet be a nemzetközi klímavédelmi és klímasemlegességi célok elérésében, stratégiák megvalósításában. A hidrogén mint nyersanyag, üzemanyag és energiahordozó meghatározó lehet számos ipari ágazat – pl. vas- és acélipar – dekarbonizációjában, valamint a fosszilis energiaforrásoktól való függőség mértékének csökkentésében. Másrészt kulcsszerepe lehet a villamosenergiaellátó-rendszerek rugalmasságának növelésében is. A hidrogén előmozdíthatja az időjárásfüggő megújuló energiaforrások hatékonyabb rendszerintegrációját. Mindezek mellett nem szabad megfeledkezni arról sem, hogy a hidrogénnek nagy szerepe van az alternatív üzemanyagok kémiai szintézisében, termelésében is.

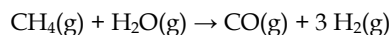
2020-ban a globális tiszta hidrogénigény mintegy 90 Mt volt. A Nemzetközi Energia Ügynökség (IEA) előrejelzése szerint ez a szám 2025-re kb. 130 Mt-ra, 2030-ra pedig kb. 210 Mt-ra növekedhet [1]. A következő években a tiszta hidrogénfelhasználás diverzifikációjára is számítani lehet, hiszen amíg ma főleg a kőolaj- és más vegyipari folyamatok során használnak nagy mennyiségben tiszta hidrogént, addig a jövőben megnőhet a szerepe a közlekedésben a hidrogénalapú tüzelőanyagcellás járművek elterjedésével, az alternatív üzemanyagok gyártásában és az energiatermelésben egyaránt.

Ahhoz, hogy a hidrogén beválthassa a hozzá fűzött nagy reményeket, alapvetően három feltételnek kell eleget tenni. Az egyik, hogy a jelenleg elterjedten alkalmazott hidrogéngyártási technológiákat (pl. a metán gőzreformálása) dekarbonizálni kell, szükség esetén kiváltani más, tisztább technológiákkal. Ez újabb

hidrogéntermelési technológiák fejlesztését és méretnövelését teheti szükségessé. Másrészt mindezek mellett olyan hidrogéntárolási technológiák kidolgozására van szükség, melyek lehetőleg alacsony hőmérsékleten és nem túl nagy nyomáson üzemeltethetők (a robbanásveszély csökkentése érdekében), és jelentős tárolókapacitással rendelkeznek (nagy térfogatra és tömegre vonatkoztatott energiasűrűség). Harmadrészt a tárolási technológiának lehetővé kell tennie a hidrogén gyors felszabadítását, azaz a hidrogén felvétele, illetve leadása gyorsan megvalósítható legyen mindamelllett, hogy a felvételi-leadási ciklusok száma nagy. Cikkemben az első kérdéskörrel foglalkozom részletesebben, tehát olyan hidrogéntermelési eljárásokkal, amelyek révén jelentősen csökkenthető a hidrogéngyártás szén-dioxid-emissziója. Ezek az eljárások a víz elektrokémiai (elektrolízissel) és a termokémiai (termolízissel) úton történő bontása. Áttekintjük továbbá azt, hogy mind az elektrolízisben, mind pedig a termokémiai vízbontással történő hidrogéntermelésben milyen szerepet tölthetnek be a modern és biztonságos atomerőművek különböző generációi.

A hidrogén előállítása napjainkban

2020-ban a közel 90 Mt tiszta hidrogénnek csaknem a teljes mennyiségét fosszilis forrásokból állították elő. Ezek közül a legjelentősebb és egyben talán a legismertebb a metán (a földgáz főkomponensének) katalitikus gőzreformációja (1. ábra), melynek során a metánt (CH₄) nikkelalapú katalizátor jelenlétében jellemzően 700–1000 °C hőmérsékleten és 3–25 bar nyomáson vízgőzzel reagáltatják:

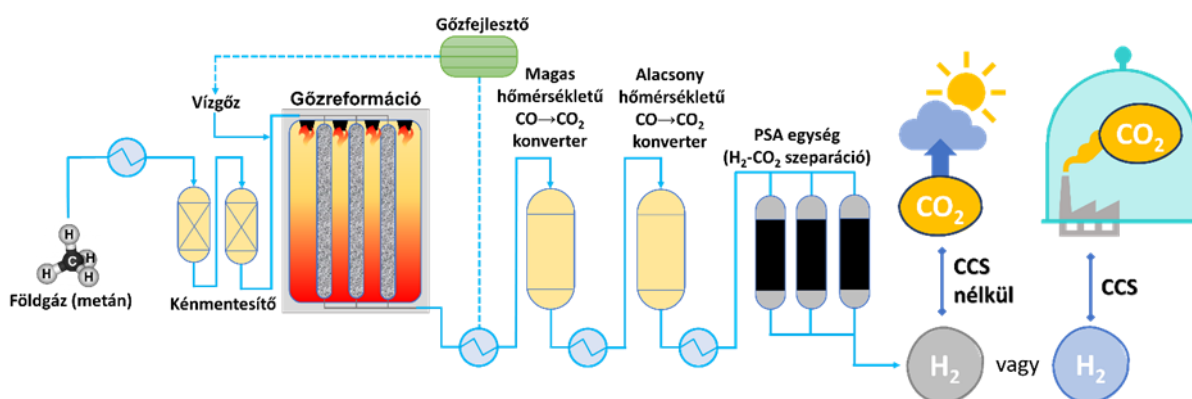


A gőzreformáció során kapjuk az ún. szintézisgázt, ami szén-monoxid (CO) és hidrogén (H₂) elegye. A gőzreformációt követően a szintézisgázban található CO gázt szén-dioxiddá (CO₂) oxidálják, majd elválasztják a

hidrogéntől. A technológia paramétereitől függően a gőzreformáció konverziós hatásfoka 70–85% közötti, és az előállított hidrogén tisztasága akár a 99,9%-ot is elérheti. A gőzreformáció hátránya azonban az, hogy óriási mennyiségű szén-dioxidot termel. Léteznek már olyan eljárások, melyek a felszabaduló szén-dioxidot megkötik és tárolják (CCS: Carbon Capture and Storage), vagy megkötik, majd más technológiákban felhasználják (CCU: Carbon Capture and Utilisation). Azonban a 2020. évi termelési adatok alapján az látható, hogy mindösszesen 8,15 Mt hidrogén termelése során használtak CCS-t, és 0,71 Mt esetén CCU-t a felszabaduló CO₂ leválasztására (IEA, 2021).

A katalitikus gőzreformáció mellett más technológiákat is alkalmaznak a hidrogén fosszilis forrásokból történő előállítására, mint a parciális oxidáció (POX), az autotermikus reformáció (ATR) és a pirolízis. A parciális oxidáció során a földgáz fő alkotóját, a metánt kevés oxigén

jelenlétében alakítják hidrogénné és szén-monoxiddá. Előnye a gőzreformációval szemben, hogy önként végbemenő, exoterm folyamat révén nincs szükség katalizátorra, s maga a technológia kevesebb hőcserélővel is megvalósítható. Viszont a POX konverziós hatásfoka alapvetően kisebb, mint a gőzreformációé. Az autotermikus reformáció a katalitikus gőzreformáció és a parciális oxidáció házasításával született. Itt a reformáló reaktorba vízgőz mellett oxigént is vezetnek, ami a reformációs és oxidációs folyamatok szimultán lejátszódásához vezet. Az ATR esetén a konverziós hatásfok megközelítőleg a POX és a gőzreformációs technológiák hatásfokai közötti. További petrokémiai technológia a szénhidrogének (pl. metán) magas hőmérsékleten, oxigéntől elzárt környezetben történő hevítése. Ez az ún. pirolízis, amely technológia nagy előnye, hogy megfelelően magas hőmérsékleten nem keletkezik szén-dioxid, hiszen az adott szénhidrogén elemi alkotóira – szénre és hidrogénre – bomlik.



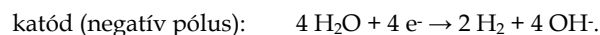
1. ábra: A metán katalitikus gőzreformációjának sematikus folyamatábrája (Kirchkeszner, 2022)

Karbonsemleges hidrogéntermelés atomerőművekkel a víz elektrolízise révén

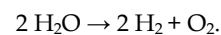
Az előbbieken röviden ismertetett fosszilis alapú hidrogéntermelési eljárások legnagyobb hátránya – a pirolízis kivételével –, hogy jelentős mennyiségű CO₂ kibocsátásával járnak. Azonban ahhoz, hogy a hidrogén betölthesse a dekarbonizációban és klímavédelemben neki szánt szerepet, első körben maga a hidrogéntermelés szorul dekarbonizációra. Ennek egyik lehetséges módja a víz elektrolízise, míg a másik a víz termolízise. Az előbbi megoldható az időjárásfüggő megújuló technológiákkal termelt villamos árammal, azonban az utóbbi – az igen komoly hőigénye miatt – nem. A karbonsemleges hidrogéntermelésben nagy szerepük lehet az atomerőműveknek. Azonban a hidrogéngyártási technológia kiválasztása nagyban függ az atomreaktor főbb paramétereitől (pl. reaktortípus, kiadott hőmérséklet).

A világon található atomerőművek többsége főleg nyomottvízes (PWR: Pressurized Water Reactor), forralóvízes (BWR: Boiling Water Reactor) és CANDU reaktorral szerelt atomerőmű, melyek közül a legelterjedtebbek a PWR-ek. Az ilyen reaktorok által leadott maximális hőmérséklet meg sem közelíti a víz termikus bontásához szükséges hőmérsékletet, így a víz alacsony hőmérsékletű elektrolízisével megvalósított hidrogéntermelésben lehet szerepe az ilyen reaktorokkal

szerelt atomerőművi blokkok által termelt áramnak. Az alacsony hőmérsékletű elektrolizáló cellák egyik legígéretesebbnek tűnő képviselői a protoncserélő membrános (PEM: Proton Exchange Membrane) elektrolizáló cellák. Azonban mielőtt e cella felépítését és működését bemutatnánk, tekintsük át, hogy mit nevezünk elektrolízisnek és hogyan épül fel egy elektrolizáló cella. Az elektrolízis során elektromos áram (azon belül is főleg egyenáram) hatására történik meg különböző kémiai vegyületek bontása. Az elektrolizáló cella egy sóhíddal (diafragmával) elválasztott két félcéllából épül fel, melyek mindegyike tartalmaz egy-egy fémes vezetőt, melyek mindegyike megfelelő elektrolitoldatba merül. Ha a két fémes vezetőre egyenáramot kapcsolunk, akkor megindul az elektrolízis. Az elektrolizáló cella anód oldalán oxidáció, míg a katód oldalán redukció történik. Az elektrolízis folyamatának megindulásához azonban szükséges, hogy az elektromos potenciálkülönbség a két elektród között egy bizonyos értéknél – a bomlásfeszültségnél – nagyobb legyen. Tekintsük a víz elektrolízisének kémiai egyenleteit:

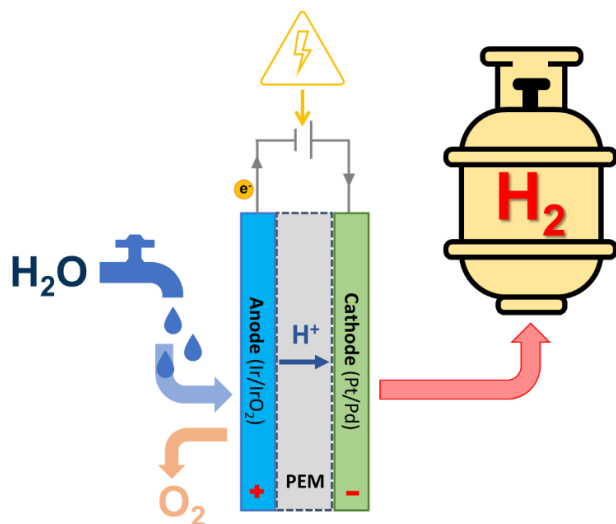


Amennyiben a két reakcióegyenletet összegezzük, akkor azt kapjuk, hogy:



A PEM elektrolizáló cellák (2. ábra) hasonlítanak az előbb bemutatott elektrolizáló cellához azzal a különbséggel, hogy

itt az elektrolit maga a jó protonvezető tulajdonságú és kis gázpermeabilitású polimer a protoncserező membrán. A PEM cellákban katódként (ahol a H_2 termelődik) nemesfémeket (pl. Pt/Pd), anódként (ahol az O_2 termelődik) például Ir/IrO₂-ot használnak. A PEM magasabb elektromos áramsűrűségének köszönhetően jobb hatásfokkal rendelkezik, mint a hagyományos alkalikus elektrolizáló cellák. A PEM cellákban a vízbetáplálás általában az anód oldalán történik. Az anód oldalon keletkező protonok a PEM membránon áthatolva a katód oldalon egyesülnek molekuláris hidrogénné.



2. ábra: A protoncserező membrános elektrolizáló cella sematikus felépítése (Kirchkeszner, 2022)

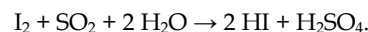
Manapság a PEM elektrolizáló cellák atomerőmű közelében történő telepítése, s az atomerőmű által termelt elektromos árammal történő vízbontás még nem mondható elterjedtnek, habár vannak példák. A svédországi Oskarshamn forralóvízes reaktorral szerelt 3. blokkja által termelt villamos energia egy tekintélyes részét vízelektrolízisre használják fel, hogy így nyerjenek tiszta hidrogént [5]. 2021 augusztusában a Nel Hydrogen szerződött egy 1,25 MW-os PEM elektrolizáló egység megépítésére az amerikai Exelon Nine Mile Point atomerőműve szomszédságában. Az elektrolizáló egység által termelt hidrogént az atomerőmű turbogenerátor gépcsoportjának hűtésére és a nukleáris láncreakció szabályozására használnák. A hidrogéngyártó üzem várhatóan 2022-ben kezdi meg a termelést [6]. A szintén amerikai Davis-Besse atomerőmű mellett is folyamatban van egy PEM elektrolizáló telepítése. Itt az atomerőmű villanyával előállított hidrogént a tömegközlekedésben és a vaskohászatban – mint redukálószer – tervezik felhasználni [7].

Az atomerőművekkel történő hidrogéntermelésnek egyik fontos aspektusa a nukleáris biztonság és az atomerőmű biztonságos működésének biztosítása a védőtávolságok révén vagy akár más műszaki megoldásokkal. Mindazonáltal gondoskodni kell a hidrogén hatékony és biztonságos tárolásáról. Továbbá fontos megemlíteni, hogy az atomerőművek által kiadott áram váltóáram, az elektrolízishez viszont egyenáram szükséges, így az atomerőmű és az elektrolizáló cella közé be kell építeni egy AC/DC invertert.

Karbonsemleges hidrogéntermelés atomerőművekkel a víz termikus bontása révén

Az alacsony hőmérsékletű elektrolízis mellett egy másik eljárás a víz termikus bontása (termolízise). Elvben ez a reakció egyetlen lépésben lejátszódik, azonban ahhoz, hogy a víz termolízise ipari szempontból számottevő mértékben végbe menjen, >2500 °C hőmérséklet szükséges. Ilyen magas hőmérséklet fenntartása nagyüzemi körülmények között gyakorlatilag teljesíthetetlen, arról nem is beszélve, hogy a keletkező gázelegyet alkotók szerint szeparálni kell. Jelenlegi ismereteink szerint több mint 350 olyan termokémiai körfolyamat van, amely használható termokémiai vízbontásra, azonban ezek közül csak néhány olyan van, amelyet valóban használnak is ilyen célokra: az egyik a kén-jód ciklus, a másik a réz-klór ciklus, de emellett vannak egzotikusabb ciklusok is, mint például a cérium(IV)-oxid-cérum(III)-oxid ciklus. Mindezen termokémiai ciklusok olyan magas hőmérsékleten játszódnak le, hogy az ilyen hőmérséklet elérése a könnyűvízes és a forralóvízes reaktorral szerelt atomerőművek esetében nem lehetséges. Itt már szükség van az ún. IV. generációs magas és nagyon magas hőmérsékletű gázhűtéses reaktorokra (HTR: High-Temperature gas-cooled Reactor), valamint ólomhűtéses gyorsreaktorokra vagy tóriumos reaktorokra.

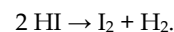
Cikkemben a kén-jód ciklussal történő termokémiai vízbontást mutatom be részletesebben. A kén-jód ciklus (3. ábra) egy háromlépéses termokémiai ciklus, melynek 1970-es évekből kidolgozása a General Atomics vállalathoz köthető [8]. E ciklus két magas hőmérsékleten lejátszódó endoterm és egy alacsonyabb hőmérsékleten lejátszódó endoterm reakcióból áll. Az első lépésnek nevezett ún. Bunsen-reakcióban megtörténik a jód és a kén-dioxid reakciója az alábbi reakcióegyenlet szerint [9, 10]:



A Bunsen-reakcióhoz szükséges kén-dioxid a kénsav termikus úton történő disszociációjából származik. Mivel a kénsav egy igen stabil vegyület, ezért termikus bontása jelentős mennyiségű hőt igényel. E hőigény kielégítésében van nagy szerepe a magas hőmérsékletű gázhűtéses atomreaktoroknak. A kénsav bontása 850 °C körüli vagy annál magasabb hőmérsékleten megy végbe az alábbi reakcióegyenlet szerint [9, 10]:



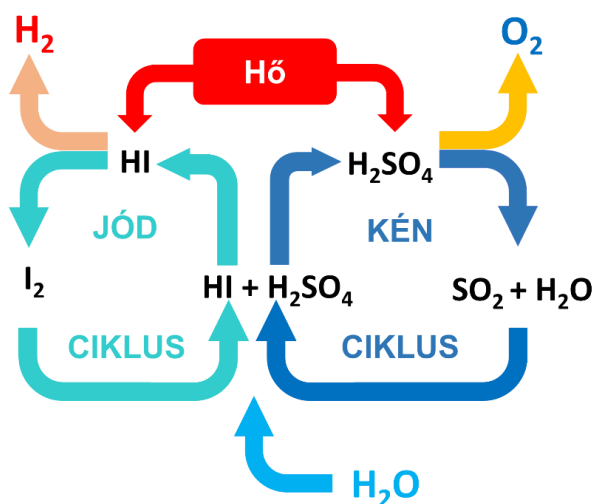
A ciklus második endoterm reakciója a hidrogén-jodid (HI) bontása, ami kb. 400–450 °C-on megy végbe az alábbi reakcióegyenlet szerint:



Látható, hogy a hidrogén-jodid bontásából származik közvetlen módon a hidrogén. Mivel a hidrogén-jodid bomlása egy egyensúlyi reakció, ezért a Le Chatelier-Braun-elv (a legkisebb kényszer elve) értelmében a bomlási sebesség növelhető a hidrogén reaktorból történő folyamatos elvételével, ami pontosan a hidrogéntermelésnek kedvez. Az előbbieken felvázolt S-I termokémiai körfolyamat valójában egy kémiai hőerőgépnél tekinthető, melynek hatásfoka 50% körüli [9, 10]. A körfolyamat előnye a nagy hatásfok mellett, hogy a reaktánsok folyadékok, melyek – a víz kivételével –

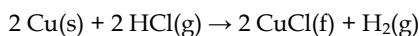
visszanyerhető és visszavezethető a technológiába, továbbá a melléktermék-képződés mértéke elhanyagolható. Azonban van két komoly hátránya: az egyik a magas (kb. 900 °C-os) hőmérsékletigénye, míg a másik, hogy jelentős mennyiségű korrozív anyag van a rendszerben, így olyan szerkezeti anyagok (pl. nióbbium-tantál ötvözetek, nikkel alapú szuperötvözetek) beépítését igényli, melyek ellenállóak a magas hőmérséklettel és a nagyfokú korrózióval szemben. Ezek a tényezők jelentősen megnövelik a beruházási költségeket.

Japánban a High-Temperature Engineering Test Reactor üzembe helyezése óta komoly kísérletek folynak a termokémiai hidrogéntermelésre. A demonstrációs reaktorhoz kapcsolt hidrogénüzemben egy 150 órás próbaüzem során 30 Nm³ H₂/óra termelési sebességgel állítottak elő hidrogént termokémiai körfolyamat segítségével [11]. A hőforrásként használt magas hőmérsékletű He-gázhűtéses atomreaktor kimeneti hőmérséklete 950 °C volt a vizsgálat során. Nagyobb léptékű hidrogéntermelést lehetne megvalósítani a 2021. december 20-án hálózatra kapcsolt kínai Shidao Bay atomerőmű magas hőmérsékletű gázhűtésű reaktorával, melynek termikus teljesítménye 500 MW, és a termokémiai körfolyamatra kiadható hőmérséklet 750 °C.

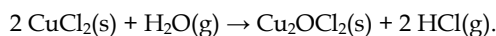


3. ábra: A kén-jód ciklus (Kírkheszner)

Egy másik lehetséges termokémiai körfolyamat a réz-klor ciklus, melyet elsősorban a CANDU SCWR (Supercritical Water-Cooled Reactor) szuperkritikus nyomású vízhűtéses reaktorral megvalósított nukleáris hidrogéntermelésre terveztek. E körfolyamat alapvetően négy reakcióból áll, melyek közül az első reakció [12]:

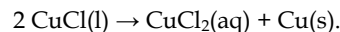


Korábbi ismereteink alapján tudjuk, hogy ha fém rézre sósavat (hidrogén-klorid vizes oldata) csepegtetünk, akkor nem történik reakció. Ehhez képest a Cu-Cl körfolyamat első fő reakciólépése ez a reakció. Ez az igazán szép és egzotikus a kémiában, hogy ez a reakció működik abban az esetben, ha a folyamatot megfelelően magas hőmérsékleten, 430–475 °C-on hatjuk végre. A következő lépés a CuCl₂ hidrolízise:

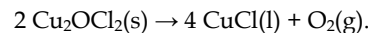


Felmerül a kérdés, hogy ha az első lépésben réz(I)-kloridot állítottunk elő, akkor a hidrolízisben miért a réz(II)-klorid

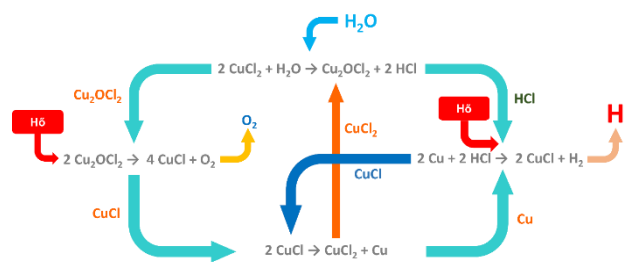
szerepel. Itt ugyanis van még egy reakciólépés, egy elektrolízis, melynek bruttó reakcióegyenlete [12]:



Mindezek után az S-I technológiából már megismert módon zárni kell a körfolyamatot, hiszen az anyagmegmaradás törvénye ezt kívánja, így a záró lépés az oxigén képződése [12]:



A folyamat kémiai termodinamikai szempontból is fontos, hiszen a négy fő reakció közül ez játszódik le a legmagasabb hőmérsékleten (kb. 500 °C-on). Látható, hogy a Cu-Cl körfolyamat hőmérsékletigénye szerényebb, mint például az S-I körfolyamaté, viszont a hatásfok is kisebb, kb. 40–44%. E körfolyamatnál is komoly kihívást jelent, hogy a munkaközeg és a reakciótermékek egy része nagyon korrozív, így a vegyipari reaktorok és csövek szerkezeti anyagainak megválasztása nem egyszerű, főképp nem olcsó. A Cu-Cl körfolyamathoz megfelelő hőmérsékletet biztosít a CANDU szuperkritikus nyomású vízhűtésű reaktora. A megcsapolt atomerőművi munkaközeg megfelelő hőmérsékletű közeget biztosít a termolízishez és a hidrolízishez, majd a hidrogénüzemet elhagyva visszavezethető a munkaközeg a kisnyomású turbinára és az atomerőmű tápvíz-előmelegítő rendszereibe [12]. Így egy igen hatékony és jó hatásfokú kapcsolt technológia valósítható meg.



4. ábra: A réz-klor ciklus (Kírkheszner)

Jelenleg azonban a termokémiai katalitikus körfolyamatokkal kapcsolatos technológiák optimalizálása és léptéknövelése, valamint az ezek hőigényét biztosítani képes 4. generációs atomreaktorok fejlesztése mellett komoly kihívás mutatkozik a két technológia biztonságos kapcsolásában, illetve a kapcsolt technológia ipari léptéknövelésében is. Ugyan már számos fejlesztés látott napvilágot e témában, és igen biztató eredmények vannak nemcsak laboratóriumi, hanem félüzemi és kisebb üzemi léptékekben is, azonban még számos mérnöki problémát meg kell oldani, hogy nagy biztonsággal és jelentős mennyiségben termelhessünk tiszta hidrogént gyakorlatilag szén-dioxid-kibocsátása nélkül.

Összegzés

Cikkem összefoglalásaként elmondható, hogy az atomerőműveknek nagy szerepe lehet a tiszta hidrogéntermelés dekarbonizációjában. A világban leggyakoribb könnyűvízes és forralóvízes reaktorokkal szerelt atomerőművi blokkok által termelt olcsó elektromos áram egy része felhasználható a víz alacsony hőmérsékletű elektrolízisének alapuló hidrogéntermelésre. Ez viszonylag könnyen megvalósítható, és a nemzetközi gyakorlatban is találhatunk már rá számos példát köszönhetően a protoncserélő membrános elektrolizátorok elterjedésének.

Az így megtermelt hidrogént az atomerőmű felhasználhatja a saját generátorainak hűtésére is, vagy értékesítheti a városi közlekedés vagy ipari szereplők (pl. ammóniagyár, vaskohászat) számára. Az elektrolízisen alapuló technológiák közül az alkalikus elektrolitikus technológia a legkidogozottabb jelenleg, s ezt követi a PEM technológia az érettségi fok tekintetében. Mindkettőnek nagy előnye, hogy alacsony hőmérsékleten és kis nyomáson üzemelnek (1. táblázat).

A nukleáris hidrogéntermelés másik útja kizárólag a IV. generációs atomreaktorokkal valósítható meg, melyek igen magas (>600 °C) hőmérsékletű munkaközéget képesek biztosítani a víz termokémiai körfolyamatokon keresztül történő termolíziséhez. Ezt a két legtöbbet vizsgált termokémiai körfolyamatot – a jód-kén és a réz-klór cikluson – keresztül mutattam be. Megállapítottam, hogy e körfolyamatok igen jó hatásfokkal működnek, azonban a magas hőmérséklet és az erősen korrozív közegek

problémát jelentenek a technológiák szerkezeti anyagainak szempontjából. Mindazonáltal napjainkban még a IV. generációs reaktorok is komoly fejlesztések és vizsgálatok alatt állnak, de elmondható, hogy már számos demonstrációs IV. generációs atomerőmű épül és üzemel. Vannak azonban már olyan biztató laboratóriumi, sőt félüzemi és kisüzemi kísérletek is, melyekben IV. generációs demonstrációs atomreaktorok kapcsolnak termokémiai körfolyamatokkal megvalósított pilot hidrogéngyártó üzemmel, s állítottak elő tiszta hidrogént.

Az 1. összefoglalótáblázat alapján jól látható, hogy míg az elektrolitikus technológiáknak jellemzően az elektromos áram igénye nagy, addig a termokémiai technológiáknak főleg a hőigénye. Előbbi elektromos áram igényét a jelenleg elterjedt 3. és 3+ generációs reaktorokkal szerelt atomerőművekkel is biztosítani lehet, míg utóbbiak magas hőigényének biztosítása kizárólag a 4. generációs atomerőművekkel lehetséges.

1. táblázat: A főbb hidrogéngyártási technológiák fontosabb technológiai paramétereinek összehasonlítása [13]

	ELEKTROLÍZIS			HAGYOMÁNYOS	TERMOKÉMIAI VÍZBONTÁS	
	Alkáli elektrolízis	PEM elektrolízis	Szilárd oxidos elektrolízis	KÉMIAI TECHNOLÓGIA Metán gőzreformálása	Termokémiai jód-kén ciklus	Termokémiai réz-klór ciklus
Hőmérséklet (°C)	60	60	800	870	910	500
Nyomás (MPa)	0,1	0,1	0,157	4,1	4	0,1–2
Technológia érettségi mutatói	9	6–8	5	9	3–4	<3
H ₂ -termelési hatásfok (%)	29,8	27,0	35,8	79,4	35,6	43,2
Input paraméterek (/kg H₂)						
Elektromosság (MJ)	180,0	199,5	146,7	1,4	59,0	67,2
Hő (MJ)	26,2	26,2	26,7	-	309,8	161,1
Víz (kg)	11,5	11,5	83,3	10,3	9,0	9,0
Földgáz (kg)	-	-	-	2,9	-	-
Output paraméterek (/kg H₂)						
H ₂	1	1	1	1	1	1
O ₂	8	8	8	0	8	8
CO ₂	0	0	0	4,7	0	0
Termelési költségek	5,92 USD	3,56–5,46 USD	2,24–3,73 USD	1,54–2,30 USD	2,18–5,65 USD	2,36–3,86 USD

Irodalomjegyzék

- [1] <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-hydrogen-demand-by-sector-in-the-net-zero-scenario-2020-2030> (Hozzáférés: 2023.02.21.)
- [2] IEA Global Hydrogen Review 2021 (2021), *International Energy Agency*
- [3] KIRCHKESZNER CSABA (2022): *Hidrogén-előállítási technológiák*, Elemző Percek Évkönyv 2021. Paks II. Zrt., 2022.
- [4] IAEA Hydrogen Production Using Nuclear Energy (2013), *International Atomic Energy Agency*, Bécs
- [5] <https://world-nuclear-news.org/Articles/OKG-signs-hydrogen-supply-contract> (Hozzáférés: 2023.02.21.)
- [6] <https://www.world-nuclear-news.org/Articles/Nine-Mile-Point-to-produce-hydrogen-for-self-suppl> (Hozzáférés: 2023.02.21.)
- [7] <https://energyharbor.com/en/about/news-and-information/energy-harbor-and-the-department-of-energy-advance-zero-carbon-hydrogen-production-pilot-at-davis-besse-power-station> (Hozzáférés: 2023.02.21.)
- [8] K.R. SCHULTZ (2003): *Use of the modular helium reactor for hydrogen production*. <https://www.osti.gov/serolets/purl/821808>
- [9] <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/sulfur-iodine-cycle> (Hozzáférés: 2023.02.21.)
- [10] V. SUBRAMANI, A. BASILE, T. N. VEZIROGLU (2015): *Compendium of Hydrogen Energy – Volume 1: Hydrogen Production and Purification*, Woodhead Publishing & Elsevier.
- [11] <https://htr2020.org/wp-content/uploads/2020/12/IAEA-SHIBATA-Webinar-toward-HTR2021-17-Dec-2020.pdf> (Hozzáférés: 2023.02.21.)
- [12] <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/copper-chlorine-cycle> (Hozzáférés: 2023.02.21.)
- [13] R. PINSKY, P. SABHARWALL, J. HARTVIGSEN, J. O'BRIEN (2020): *Comparative Review of Hydrogen Production Technologies for Nuclear Hybrid Energy Systems*, *Progress in Nuclear Energy*, 123, 103317. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2020.103317>