

## A gázhűtésű atomreaktorok és 4. generációs változataik

*Kirchkeszner Csaba – 2022. 08. 15.*

A negyedik generációs atomerőművekről, valamint a kis moduláris reaktorokról (SMR-ekről) szóló minisorozatunk második számában a gázhűtésű atomreaktorokat (GCR) mutatjuk be. Ezek közös jellemzője, hogy a láncreakció során keletkező gyors neutronok lassítására (moderátorként) grafitot és a reaktor hűtőközegeként valamilyen gázt (pl. szén-dioxid, hélium) használnak.

### **Szén-dioxiddal hűtött gázhűtésű atomreaktorok**

A GCR-ek története egészen az 1950-es évekre nyúlik vissza. Az első kis teljesítményű, kísérleti prototípusok aktív zónáját még levegővel hűtötték, azonban egy bizonyos teljesítmény fölött a léghűtés már komoly üzembiztonsági kockázatot jelentett. Így megjelentek az első szén-dioxid-gázzal hűtött reaktorok. Ilyenek voltak például az Egyesült Királyságban tervezett és megépített Magnox reaktorok. E reaktor nevét a nukleáris üzemanyag-kazetták speciális magnézium-alumínium ötvözetből készült burkolatáról kapta. A magnox burkolat a hőmérséklet emelkedésével egyre reakcióképesebbé válik, így az üzembiztonsági szempontokat figyelembe véve a Magnox reaktorokat 360 °C kimenő üzemi hőmérsékletig lehetett üzemeltetni. További hátrányuk az volt, hogy a magnox burkolat vízzel reakcióba lép, így a kiégett üzemanyag-kazetták víz alatt történő hosszú távú tárolása helyett más megoldásokat kellett kidolgozni. E reaktorok üzemanyaga a természetes urán volt. Az Egyesült Királyságban összesen 26 Magnox reaktorral szerelt blokk épült, ugyanakkor az Egyesült Királyság Olaszországba (Latina) és Japánba (Tokai-1) is exportált Magnox reaktorokat.

A franciák is építettek természetes uránnal működő, grafit moderátorú, szén-dioxiddal hűtött reaktort, ez volt az ún. UNGG reaktor (Uranium Natural Graphite Gaz). Ebből a típusból 8 épült meg Franciaországban, és egy Spanyolországban (Vandellos).

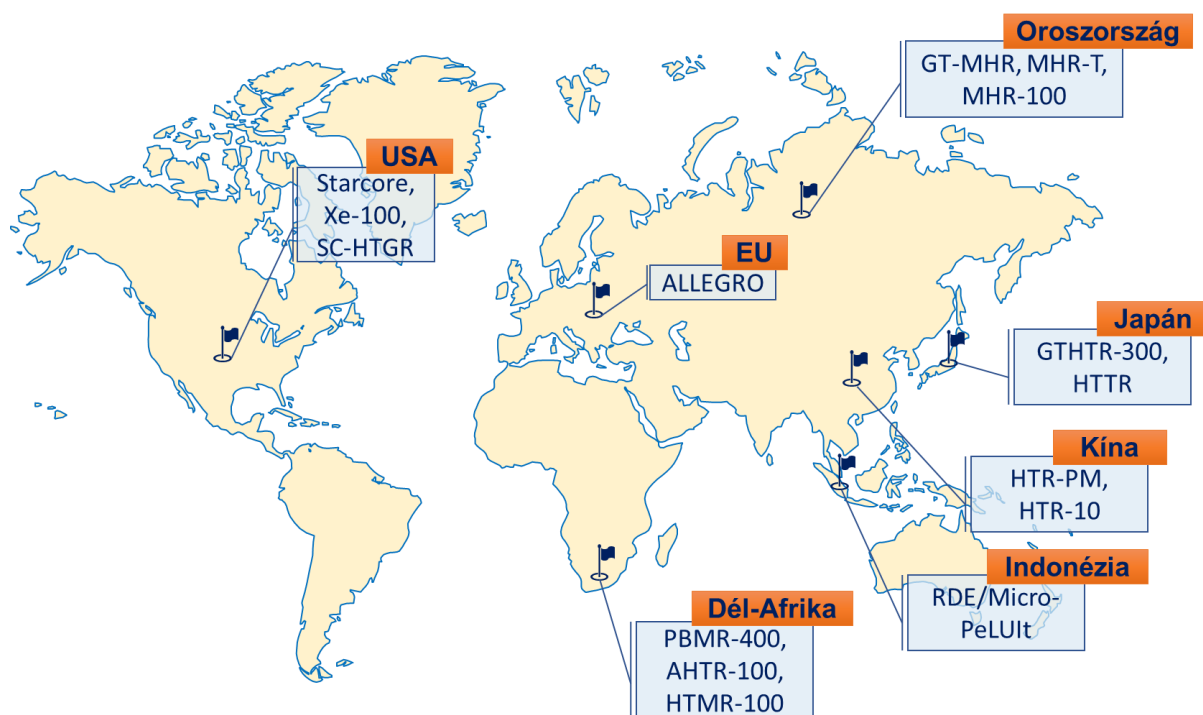
Később a Magnox reaktorok továbbfejlesztésével kialakultak az AGR (Advanced Gas Cooled Reactor) reaktorok. Az első AGR-t 1976-ban csatlakoztatták az elektromos hálózatra. Ez volt a Hinkley Point B az Egyesült Királyságban. A Magnox reaktorokhoz hasonlóan az AGR-ek szintén szén-dioxid-hűtésűek voltak, azonban a kimenő hőmérséklet az AGR-eknél jóval magasabb (648 °C) volt. A magasabb kiadott hőmérséklet miatt az AGR-ek termikus hatásfoka a PWR reaktorok 32–35%-os hatásfokához képest magasabb (kb. 41–42%). Az AGR-ek a Magnox reaktorokhoz képest nem természetes, hanem 2,5–3,5% dúsítottaságú uránalapú üzemanyaggal működtek. A nukleáris üzemanyag-pálcák burkolata a Magnox-nál alkalmazott magnézium-alumínium ötvözet helyett rozsdamentes acél volt.

### **A 4. generációs gázhűtésű reaktorok – a héliumhűtésű atomreaktorok**

Amíg a korábbi, nyugati típusú gázhűtésű reaktoroknál főként szén-dioxidot használtak hűtőközegeként, addig a napjainkban tervezett, építés alatt álló vagy megépített gázhűtésű reaktorokban inkább héliumot használnak hűtőközegeként, és grafitot moderátorként. A hélium előnyei közé tartozik a gyenge moderálóképesség, ami lehetővé teszi azt, hogy a gázhűtésű reaktor gyorsneutronos reaktorként működhessen, valamint alkalmas legyen a másodlagos aktinidák transzmutálására. Emellett előnyös tulajdonsága a szén-dioxiddal szemben, hogy kémiaiilag inert, így a korróziós folyamatok magas hőmérsékleten is kevésbé jelentkeznek, továbbá maga a hélium hűtőközeg nem aktiválódik fel. Héliumgáz esetén nem lehetséges a reaktorban fázisátalakulás (a hűtőközeg nem tud felforrni, mivel eleve gáz halmazállapotú), így forráskriszis sem léphet fel

(ellentétben a könnyűvízes és a forralóvízes reaktorokkal). A hélium hűtőközegként történő alkalmazásának hátránya a hélium kis hőkapacitásában, kis hőtehetetlenségében áll. Ez azt jelenti, hogy a kényszeráramlás megszűnése esetén az aktív zóna igen gyorsan felforrósodik, így nagyon kevés idő áll rendelkezésre a szükséges biztonsági beavatkozásra. Egy másik kihívás, hogy súlyos baleset esetén a héliumgáz nem képes a radioaktív izotópok visszatartására (retenciójára). A héliummal kapcsolatos további hátrány, hogy ugyan világegyetemünk második leggyakoribb eleme a hidrogén után, azonban a Földön rendkívül ritka. Általában a földgázkutakból, a földgáz melléktermékeként komplex és költséges elválasztástechnikai eljárásokkal nyerik ki. A Földünk földgázútjaiban átlagosan 0,5% a héliumtartalom, ugyanakkor vannak olyan lelőhelyek, ahol a 10–12%-ot is elérheti (pl. Dél-Afrika).

A Nemzetközi Atomenergia Ügynökség „*Advances in Small Modular Reactor Technology Developments*” c. összefoglaló tanulmányának – legfrissebb – 2020. évi kiadása 14 gázhűtésű reaktor építési szándékát említi. Ezek országok szerinti megoszlását az alábbi térképen foglaltuk össze.



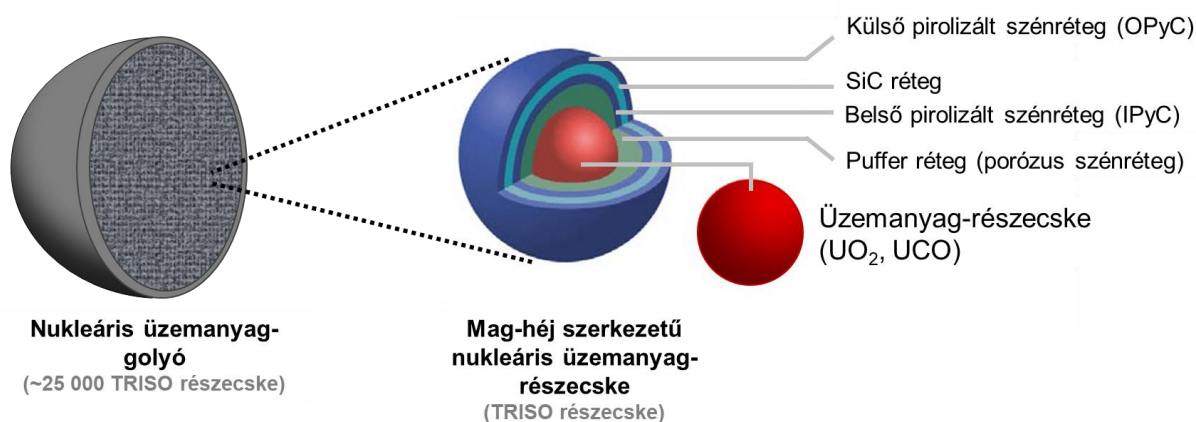
1. ábra: Negyedik generációs gázhűtésű reaktorokkal aktívan foglalkozó országok

Ezek többsége azonban még a koncepcionális tervezés fázisban van. Elemző Percünk jelen számában részletesebben a már működő kínai HTR-PM blokkot és a Japán HTTR-t mutatjuk be. Ezt követően röviden szót ejtünk a tervezőasztalon lévő ALLEGRO gyorsneutronos gázhűtésű reaktorról is, melynek magyar vonatkozásai is vannak.

### A kínai golyóágyas magas hőmérsékletű gázhűtésű reaktor (HTR-PM)

A kínai demonstrációs célú Shidao Bay HTR-PM atomerőmű építése 2012 decemberében kezdődött. Az erőmű két, egyenként 250 MW<sub>t</sub> termikus teljesítményű héliumhűtésű, golyóágyas magas hőmérsékletű reaktorból áll. A két reaktor egy közös szekunder körrel rendelkezik, melyben egy 210 MW<sub>e</sub> villamos teljesítményű gőzturbina található. Az első blokk 2021. szeptember 12-én, míg a második blokk ugyanezen év november 11-én érte el az első kritikusságot. Az első blokkot 2021. december 20-án csatlakoztatták az ország villamos hálózatához.

A Shidao Bay HTR-PM reaktor egyik érdekessége, hogy szemben a nyomott- és forralóvízes reaktorokkal, nem nukleáris üzemanyag-kazetták, hanem üzemanyag-golyók alkotják az aktív zónáját. A HTR-PM reaktor nukleáris üzemanyagának alapja az ún. TRISO (**tr**istructural-**iso**tropic fuel particle) nukleáris üzemanyag-részecske, melynek mag-héj jellegű felépítését a **2. ábrán** mutatjuk be. A TRISO üzemanyag-részecske magját maga a hasadóanyag alkotja, melynek fő összetevője a dúsított urán-dioxid (esetleg urán-nitrid vagy urán-oxid-karbid). Ezt a magot veszik körbe egy kb. 100  $\mu\text{m}$  vastagságú porózus grafit pufferréteggel, melynek célja a láncreakció során keletkező hasadási gázok visszatartása (számukra tér biztosítása), valamint a hasadások során a hasadóanyagot tartalmazó mag térfogatváltozásának követése. A pufferréteg után következik a kb. 40  $\mu\text{m}$  vastagságú, ún. IPyC-réteg (**I**nnner **P**yrolytic **C**arbon, belső pirolizált szénréteg), melynek szerepe kettős: egyrészt megfelelő felületet biztosít a következő réteg, a szilícium-karbid (SiC) felhordásához, másrészt visszatartja a nemfémes hasadási termékeket. Ezt követi a kb. 35  $\mu\text{m}$  vastagságú SiC réteg, melyet kémiai gőzfázisú leválasztással alakítanak ki metil-triklórszilán (MTS) reagenssel hidrogén/argon atmoszférában. A SiC réteg gyakorlatilag a nukleáris üzemanyag-részecske mikro méretű nyomástartó rendszere, mely magába zárja az üzemanyagot tartalmazó magot, és visszatartja a fémes hasadási termékeket. Mindez hasonlít az atomreaktor mérnöki gát szerepéhez. A SiC réteg védelme érdekében a TRISO üzemanyag-részecskét kívülről még egy kb. 40  $\mu\text{m}$  vastagságú pirolizált szénréteg (OPyC, **O**uter **P**yrolytic **C**arbon) borítja. Miután ezeket a kis üzemanyag-részecskéket legyártották, azt követően grafit mátrixba ágyazzák, így kapjuk az üzemanyag-golyókat, melyek átmérője 60 mm. A kínai Shidao Bay HTR-PM reaktorban használt üzemanyag-golyók darabonként 7 gramm 8,5%-os dúsítási fokú uránt tartalmaznak. A golyóágyas reaktor aktív zónáját megközelítőleg 420 000 üzemanyag-golyó alkotja. Az üzemanyag-golyók berakása két lépésből áll: először a golyókat egy ideiglenes üzemanyag-tartályba töltik, majd az az üzemanyag-adagolórendszer segítségével történik az aktív zónába való betöltésük.



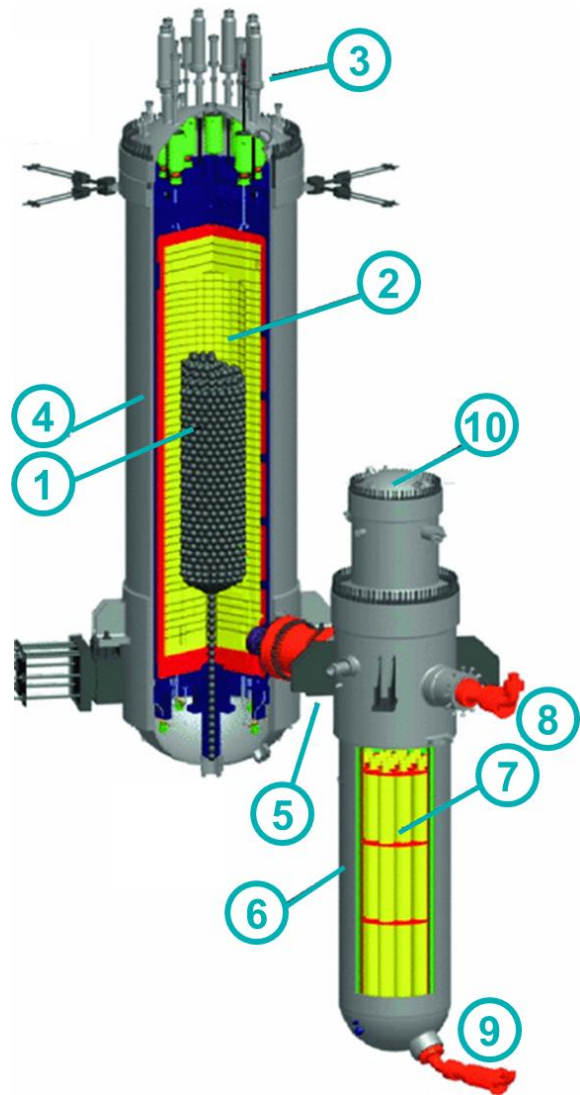
**2. ábra:** A TRISO nukleáris üzemanyag-részecske és -golyó felépítése

A TRISO üzemanyag a szilícium-karbid-réteg összetételétől függően 1250–1650 °C közötti tartományban mondható hermetikusnak, ami lehetővé teszi, hogy biztonságosan alkalmazzuk magas hőmérsékletű gázhűtésű reaktorokban. Érdekes összevetni a TRISO-t a könnyűvízes reaktorokban alkalmazott cirkóniumalapú nukleáris üzemanyag-kazettákkal. Utóbbiak esetében 1200 °C felett meghatározóvá válik a cirkónium és a víz között lejátszódó kémiai reakció, amely hidrogéngáz felszabadulásával, és potenciálisan az üzemanyag-pálcák hermetikusságának megszűnésével jár.

A HTR-PM reaktor primerkörének sematikus felépítését a **3. ábrán** mutatjuk be. A HTR-PM-be a hélium a reaktor alsó részén kerül betáplálásra. A gáz halmazállapotú hűtőközeget keringtető ventilátoregység a gőzfejlesztő tetején található, azzal összeépítve (lásd **3. ábra**). Belépő hőmérséklete 250 °C, tömegárama 96 kg/s. A primerköri nyomás 7,0 MPa (70 bar), míg ugyanez a paraméter a jelenleg üzemelő paksi nyomottvízes blokkban 12,3 MPa (123 bar). A hélium először felfelé áramlik az

oldalsó reflektorcsatornákon keresztül az aktív zóna felső részéig, ahol az áramlási iránya megfordul, s a nukleáris üzemanyagot tartalmazó golyóágyon keresztül újra lefelé áramlik. A kezdetben 250 °C belépő hőmérsékletű héliumgáz az aktív zónán áthaladva 750 °C-ra melegedve hagyja el a reaktort, és kerül a gőzfejlesztőbe, ahol a szekunder körű tápvizet felmelegíti, ami ennek hatására elpárolog. A párolgás során keletkező gőz [melynek nyomása 13,25 MPa (132,5 bar) és hőmérséklete 567 °C, összehasonlításképpen a jelenleg üzemelő paksi blokkok esetén a frissgőz nyomása 4,6 MPa (46 bar) és hőmérséklete 260 °C] felhasználható különféle vegyipari folyamatok hőellátására és villamos energia termelésére is.

- ① Aktív zóna (golyóágy)
- ② Reflektor (grafit)
- ③ Szabályozó rudak
- ④ Reaktortartály
- ⑤ A reaktor és a gőzfejlesztő összekapcsolása
- ⑥ Gőzfejlesztő
- ⑦ Hőátadó csövek
- ⑧ Gőz ki
- ⑨ Tápvíz be
- ⑩ Hélium keringtetése



3. ábra: A HTR-PM reaktorának és gőzfejlesztőjének sematikus felépítése

E kimenő hőmérsékletértékek láttán felmerül a kérdés, hogy milyen anyagok bírják ki ezt a magas hőmérsékletet úgy, hogy azt egyúttal erős sugárterhelés is éri. Ennek nyitja a reaktor felépítésében van: maga a reaktortartály szénacélból készül, azonban az aktív zónát kibélelik egy sajátos kerámiával, amely belülről tartalmazza a grafit reflektorokat, kívülről pedig egy speciális szénréteggel van bevonva, továbbá ez az egész egy fémtartályba van beleültetve, és mindez egyben helyezkedik el a reaktortartályon belül. Ez a rétegrend biztosítja, hogy a reaktortartály falát sokkal kevesebb gyorsneutron éri el, így a tartályfal ridegedését is elősegítő sugárterhelés a tartályfalnál már alacsony.

A reaktivitásszabályozást szabályozó rudakkal valósítják meg. A HTR-PM biztonsági rendszerei között találunk aktív és passzív biztonsági rendszereket is. Előbbiek működtetése villamos energiát igényel, míg utóbbiak akkor is működnek (a „kikapcsolhatatlan” fizikai törvényeknél fogva), ha a telephelyen teljes feszültségvesztés miatt az aktív biztonsági rendszerek már nem tudnak üzemelni. Amíg egy könnyűvízes atomerőműnél általában négy mérnöki gát (pasztilla kerámiaszerkezete, üzemanyag-pálca burkolata, reaktortartály, konténment) akadályozza a radioaktív anyagok kijutását a környezetbe, addig a HTR-PM esetén ugyancsak négy mérnöki gát van, amelyből a legfontosabb a kémiai módszerrel kialakított szilícium-karbid réteg, amely önmagában egy mikroszkopikus nyomástartó és a hasadási termékeket visszatartó rendszer.

Az első ilyen reaktor már üzemben van, a második nemsokára megkezdí a kereskedelmi üzemet. Kína a jövőben a Shidao Bay HTR-PM-hez hasonló golyóágyas magas hőmérsékletű gázhűtéses reaktorról szerelt atomerőművi blokkból további 18-at kíván építeni. Kínában az új HTR-PM reaktorokat a széntüzelésű erőművek teljes dekarbonizálására kívánják felhasználni, méghozzá úgy, hogy a széntüzelésű erőművek kazánjainak helyébe ilyen atomreaktorokat építenek, majd a HTR-PM-ek szekunder körét a meglévő széntüzelésű erőművi szekunder körök üzemi paramétereire hangolják. Így a régi szénerőművek gőzturbinái és villamos generátorai tovább használhatók. Ugyanakkor a HTR-PM reaktorokat alkalmazni kívánják tiszta (CO<sub>2</sub>-kibocsátás-mentes) hidrogéngyártáshoz is, hiszen a reaktor által kiadott hőmérséklet elegendő bizonyos termokémiai vízbontási ciklusok megvalósításához is.

### **A japán magas hőmérsékletű gázhűtésű tesztreaktor, a HTTR (High-Temperature Test Reactor)**

Japánban a magas hőmérsékletű, gázhűtésű reaktorok tervezése az 1960-as évekig nyúlik vissza. Az általuk fejlesztett magas hőmérsékletű gázhűtésű tesztreaktor, az ún. HTTR reaktor (4. ábra) termikus teljesítménye 30 MW<sub>t</sub> volt, 1998-ban érte el az első kritikusságot és 2001-ben a 100%-os teljesítményszintet. A HTTR grafitmoderátorú, héliumgázzal hűtött reaktor. 2010-ben az 50 napos próbaüzeme során a kilépő hőmérséklet 950 °C volt. Ez az igen magas hőmérséklet, már elegendő ahhoz, hogy tiszta hidrogént állítsunk elő a víz termokémiai körfolyamattal (pl. jód-kén ciklus) történő bontásával. A magas hőmérséklet további előnye, hogy az ilyen reaktorok termikus hatásfoka elérheti a 48–50%-ot is (szemben a nyomottvízes reaktorok körülbelül 32–35%-os termikus hatásfokával).

A HTTR reaktor egyik érdekessége, hogy a kínai HTR-PM reaktorokkal szemben az aktív zóna nem golyóágyas, hanem hatszögletű, hasábszerű ún. grafitprizmákból épül fel, melyben megtalálhatók az átlagosan 6%-os dúsítási fokú (3–10%) urán-dioxidot tartalmazó üzemanyagrudak. Ezek a kínai HTR-PM-nél ismertetett mag-héj szerkezetű TRISO üzemanyag-részecskékből épülnek fel. A grafitprizmának nemcsak moderátor szerepe van, hanem további funkciója, hogy a reaktortartály anyagát megvédje az igen magas hőmérséklettől. A reaktortartály alján történik a hélium hűtőközeg bevezetése 395 °C hőmérsékleten. A kilépő hőmérséklet átlagosan 850 °C, de a maximálisan elérhető kilépő hőmérséklet 950 °C. A hélium primerköri nyomása mindösszesen 4 MPa (40 bar, emlékezzünk vissza: a HTR-PM-nél 70 bar, a jelenleg üzemelő paksi blokkoknál pedig 123 bar).





4. ábra: A HTTR metszeti ábrája

Míg Kína a HTR-PM reaktorokkal inkább a széntüzelésű erőművek kazánjainak kiváltását tervezi, addig Japán a HTTR-t elsősorban tiszta hidrogén előállítására használná. Ehhez már megépítették az első kén-jód termokémiai cikluson alapuló hidrogéntermelési üzemet is, mely 2015-ben 50 napon keresztül folyamatos üzemben termelte tiszta hidrogént  $30 \text{ Nm}^3 \text{ H}_2/\text{h}$  sebességgel.

A japán HTTR reaktort a fukushima-i atomerőmű-baleset évében (2011-ben) leállították, később, 2021. július 30-án újraindították. A tesztreaktor újraindítása annak köszönhető elsősorban, hogy a Japán Atomenergia Ügynökség (JAEA) a Mitsubishi Heavy Industries-zel (MHI) összefogva kíván erőfeszítéseket tenni a hidrogéntermelés ipari léptéknövelésére magas hőmérsékletű gázhűtésű reaktorral (HTTR). A JAEA és az MHI várhatóan ez év végén kezdi majd a léptéknöveléshez szükséges átalakításokat a HTTR-en, valamint a hidrogéntermelő egység főbb berendezésein. A cél egy olyan nukleáris hidrogéntermelési technológia kidolgozása, mely nagy mennyiségű tiszta hidrogén előállítására képes, jelentősen csökkentve ezzel a jelenleg széles körben használt hidrogéntermelési mód (a metán gőzreformálás) szén-dioxid-kibocsátását.

### Az ALLEGRO magas hőmérsékletű gázhűtésű gyorsreaktor (GFR)

Az ALLEGRO projekt 2010-ben francia kezdeményezésre jött létre a V4 országok – köztük Magyarország – nukleáris kutatóintézetei között. A projekt célja egy demonstrációs gázhűtésű gyorsreaktor megépítése a V4 országok valamelyikében (várhatóan Szlovákiában). Az ALLEGRO reaktor egyelőre a koncepcionális tervezés fázisában van, ugyanakkor az elmúlt években keveset hallottunk róla.

Az ALLEGRO-t  $75 \text{ MW}_t$  termikus teljesítményű kísérleti reaktornak tervezték, megvalósításának célja nem a villamosenergia-termelés (ennek megfelelően szekunder kör sem épülne mellé), hanem a technológia működőképességének demonstrációja. A reaktor különlegességét a kemény neutron spektrum (gyorsneutronok) és a zónából kilépő magas hőmérsékletű hűtőközeg adja, ugyanakkor – főleg anyagtudományi szempontból – ezek jelentik a legnagyobb kihívást is. Az ALLEGRO is – akárcsak az előzőekben ismertetett gázhűtésű reaktorok – hűtőközegként héliumgázt alkalmazna, azonban mivel ez egy gyorsneutronos reaktor, így moderátorra nem lenne szükség.

Az aktív zóna érdekességét az adja, hogy a jelenlegi tervek szerint a reaktor három különböző zónával üzemelne:

- induló zóna: MOX (**M**ixed-**O**xide) – 25% plutóniumtartalmú – nukleáris üzemanyaggal üzemelne, és a zónából kilépő hélium átlaghőmérséklet 530 °C;
- közbenső zóna: vegyesen tartalmazna MOX és kerámia kazettákat, utóbbiakban uránium-plutónium-karbid lenne az üzemanyag (29–35%-os plutóniumtartalommal)
- végző zóna: már csak kerámia kazettákat tartalmaznak, és a zónából kilépő hélium átlaghőmérséklete 800 °C.

A magas hőmérsékletű gyorsneutronos reaktoroknak nagy szerepük lehet a nukleáris üzemanyag-ciklus zárásában és a transzmutációban, mindazon előnyök mellett, amelyeket már a termikus neutronos gázhűtésű reaktoroknál is láttunk (magas kilépő hőmérsékletek, nagy hatásfok). Azonban az egyes reaktortípusoknál még számos területen – különösen például az anyagtudomány és az anyagtechnológiák területén – komoly fejlesztések szükségesek. Mindenképpen biztató ugyanakkor, hogy a kínai HTR-PM már ipari méretű reaktorként üzemel, emellett a világ más részein is terveznek magas hőmérsékletű gázhűtésű reaktorokat építeni (pl. az Egyesült Királyságban), melyek nagy szerepet tölthetnek be többek között a vegyipar dekarbonizációjában, valamint bizonyos képviselőik – a gázhűtésű gyorsneutronos reaktorok – hozzájárulhatnak a kiegészített nukleáris üzemanyagokkal kapcsolatos kihívások megoldásához is, megvalósítva ezzel a nukleáris üzemanyag-ciklus zárását.

\*\*\*\*\*

**Ez volt az Elemző percek sorozatunk 123. tagja.**