

## A 2021. évi főbb nukleáris ipari történések

*Kirchkeszner Csaba – 2022. 02. 01.*

Elemző Percünk jelen számában bemutatjuk, hogy a 2021. évben milyen fontos események történtek a nukleáris iparban. Az összefoglalóban bemutatjuk a különböző országok energetikai célú atomerőműépítési projektjeinek jelenlegi állását, majd ismertetjük a 4. generációs atomerőművek terén elért sikereket és törekvéseket. Elemző percünkben helyet kapnak a nukleáris ipart érintő innovációk, fejlesztések mellett az üzemanyag-gyártással és radioaktív hulladékkezeléssel kapcsolatos hírek összefoglalása is. Mindezen témák mellett – egyáltalán nem mellékvágányként, sokkal inkább mint a nukleáris technológia sokrétű és nemes felhasználási módjaként kívánjuk bemutatni az nukleáris medicinában (orvosi diagnosztikában és terápiában) elért sikereket és eredményeket.

### ATOMERŐMŰÉPÍTÉSI PROJEKTEK A NAGYVILÁGBÓL

2021-ben számos országban kezdődtek vagy folytatódtak az energetikai célú atomerőműépítési projektek. Ezeket áttekintve megállapítható, hogy **jelenleg Kínában épül a legtöbb atomerőmű, melyek főként a kínai fejlesztésű Hualong One és néhány esetben orosz VVER-1200-as blokkok** lesznek. Ahogy korábbi, Kínáról szóló Elemző Percek sorozatunkban (EP 81, 82, 84–86) is bemutattuk **Kína nemhogy jelentős atomerőműépítési tapasztalatra tett szert az elmúlt két évtizedben, hanem saját maga fejlesztett atomerőművi technológiákat, alakított ki atomerőművi nagyberendezések (pl. reaktortartály, gőzfejlesztők, főkeringtető szivattyú) gyártására alkalmas infrastruktúrát, mi több, az általa fejlesztett Hualong One (vagy HPR-1000) atomerőművi technológiát más országokba is exportálta (Karachi atomerőművi blokkok Pakisztánban)**. Kínában 2021-ben három Hualong One blokk építése kezdődött (Changjiang-3, 4. és San'ao 2). A Changjiang 3-as és 4-es blokkok építésével kapcsolatos érdekesség, hogy Kína megállapodást kötött az amerikai Westinghouse-zal a turbinavezérlő és -védelmi rendszerek szállításáról és telepítéséről. A szintén Hualong One reaktorral szerelt kínai Fuqing-5 blokk 2021. január 30-án kezdte meg kereskedelmi üzemét, míg a mellette található Fuqing-6 blokk is hamarosan felzárkózik mellé, hiszen e blokkot 2022. január 1-jén csatlakoztatták a villamos hálózathoz. Magas készültségi szinten áll a Zhangzhou-1 blokk is, ahol 2021 októberében emelték helyére a Hualong One reaktortartályt, majd ezt követően a konténment acélkupoláját. A tervek szerint e blokk 2024-re állhat üzembe. Folyik a Zhangzhou-2 blokk építése is, mely 2020 szeptemberében kezdődött. Ahogy azt korábban említettük, Kína a saját fejlesztésű Hualong One blokkjából exportált Pakisztánba. Pakisztánban a Karacsi-2 Hualong One reaktorral szerelt blokkja 2021 márciusában kapcsolódott az ország villamos hálózatára, míg a Karacsi-3 blokk üzembe helyezése és tesztelése a Fuqing-6 blokk üzembehelyezésével szinte párhuzamosan zajlott.

**Kína elkötelezettséget mutat az orosz atomerőművi technológiák iránt is**, amit jól igazol az, hogy jelenleg kettő (Xudabao-3 és Tianwan-7) orosz VVER-1200 nyomottvizes reaktorral szerelt blokk épül az országban. 2022-ben Kína tovább bővíti atomerőművi flottáját további VVER-1200-as blokkokkal, hiszen a tervek szerint elkezdik építeni a Xudabao-4 és Tianwan-8. blokkokat is. A Tianwan-7. és 8. blokkok építése során a primerkörü technológiát az orosz Roszatom szállítja, azonban a gőzturbinákat a China Energy Engineering (CCE) gyártja.

Kína további két atomerőművi blokkot épített, majd helyezett üzembe a Hongyanhe-II atomerőmű projekt keretében. Mind a Hongyanhe-5, mind a Hongyanhe-6 kínai gyártmányú

ACPR-1000 nyomottvízes reaktorral szerelt blokkok. Előbbit 2021 júniusában csatlakoztatták a hálózathoz, míg utóbbiban folynak az üzembe helyezési tesztek.

**Az Egyesült Arab Emirátusok történelmében 2021 a tiszta energiaforrásokra történő áttérésnek és a megbízható áramellátás előmozdításának éve volt**, hiszen április 6-án üzembe állt a Barakah-1 APR-1400 koreai gyártmányú nyomottvízes reaktorral szerelt blokk. A Barakah-1 mellett további három – szintén APR-1400 – blokk állhat hamarosan üzembe. A Barakah-2-t már csatlakoztatták 2021 augusztusában a hálózathoz, míg a Barakah-3 és 4. blokkok készültsége rendre 94% és 89%-os volt 2021. áprilisi értesüléseink szerint (újabb hírt erről azóta nem hallottunk).

**2021-ben sokat hallhattunk az indiai Kudankulam atomerőműépítési óriásprojektről, melynek keretében a tervek szerint 6 orosz VVER-1000 reaktortechnológiával felszerelt blokk** építésével kell számolni. A Kudankulam-1 és 2. blokkok már 2013 és 2016 óta termelik a villamos energiát, míg a Kudankulam-3., 4., 5. és 6. blokkok – különböző készültségi fokkal – építés alatt állnak. A tervek szerint a 3. és 4. blokk 2023-ban, míg az 5. és 6. blokk rendre 2026 végén és 2027 őszén kezdhetik meg kereskedelmi üzemüket. Indiában a Kudankulam projekttel párhuzamosan fut a Kakrapar-3 700 MW teljesítményű, indiai tervezésű PHWR-rel szerelt blokk üzembe helyezése is, melyet 2021 elején kapcsoltak a hálózatra.

**Az orosz Roszatom, talán a világ egyik legmeghatározóbb atomerőművek építésére szakosodott vállalata 2021-ben is számos atomerőmű építését kezdte, s folytatta nemcsak Oroszországban, hanem a világ több országában is. A Roszatom**



**1. ábra:** Az Akkuyu török atomerőmű VVER-1200 reaktortartályának helyére emelése

**jelenlegi legnagyobb több-blokkos atomerőműépítési projektjei**

**Törökországban és Bangladesben futnak.**

Mindkét előbb említett országban VVER-1200-as blokkok épülnek. A törökországi Akkuyu projekt keretében négy VVER-1200-as, míg a bangladesi Rooppur projektben kettő VVER-1200-as blokk épül. Az Akkuyu négyblokkos atomerőmű Törökország villamosenergia-igényének mintegy 10%-át fedezi majd. Az első két blokk építése 2018 áprilisában és 2020 júniusában kezdődött, míg az Akkuyu-3 blokk

első betonöntése 2021. március 11-én történt. A 4. blokk első betonjának öntése várhatóan 2022-ben történik majd meg, de az építést előkészítő munkálatok 2021 augusztusában elkezdődtek a kb. 600 000 m<sup>3</sup> talaj exkavációjával. A bangladesi atomerőműépítési projekt 2017. november 30-án indult az első blokk betonjának öntésével, majd 2018 júliusában elkezdődött a Rooppur-2 blokk építése is. 2021-ben a bangladesi kormány bejelentette, hogy a Rooppur 1-es és 2-es blokkok elkészülését követően újabb atomerőművi blokkok építését tervezi, ugyanis fontosnak tartják az ország villamosenergia-ellátásának stabilizálását, amelyhez jelentős mértékben hozzájárulna egy újabb atomerőmű.

A Roszatom Fehéroroszországban két atomerőművi blokkot épít, az Osztrovec 1-es és 2-es blokkokat, melyek mindegyik VVER-1200 nyomottvízes reaktorral szerelt blokk. Az 1. blokk 2021. január 12-én elérte a 100%-os teljesítményszintet, majd ez év júniusában megkapta az üzemeltetési engedélyt, s 2021. június 10-én megkezdte a kereskedelmi üzemet. A 2. blokk melegjáratási tesztjei 2021 októberében fejeződtek be, ezt követően, 2021 végén helyezték be a nukleáris üzemanyag-kazettákat a reaktorba. 2021 márciusában engedélyt kapott a Leningrád II-2. VVER-1200-as blokk a kereskedelmi üzem megkezdésére. Ugyanebben az évben az orosz Roszatom tesztelte a Leningrád II-1. blokkot mentrendtartó (load-following)

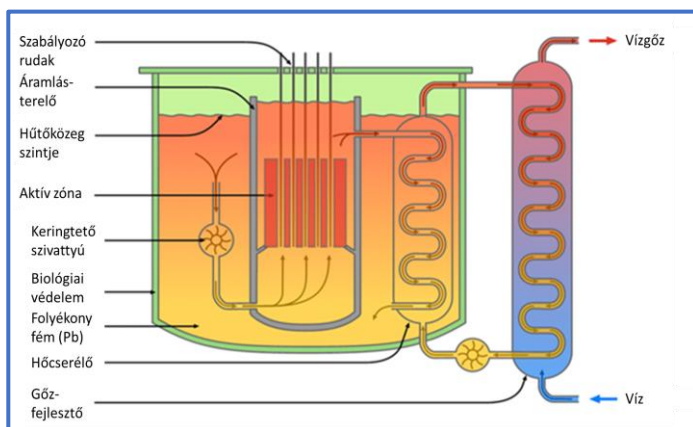
üzem módban. A teszt során a reaktor teljesítményét 100%-ról 75%-ra, majd 100%-ról 50%-ra csökkentették, majd a teljesítményváltoztatásokat 5 ciklusban megismételték. A vizsgálat – a Paks 2 blokkok szempontjából is – fontos eredménnyel zárult, hiszen megállapítást nyert, hogy a VVER-1200 reaktor menetrendtartó üzemmódban kiválóan üzemeltethető.

**A Roszatom Kurszk-II projektének keretében megépülő két blokk egyedülálló abban a tekintetben, hogy mindegyikük az orosz VVER-TOI nyomottvizes blokk lesz. A Kurszk-II-1. blokk VVER-TOI reaktortartályának, mely egyben a világ első VVER-TOI reaktortartálya – tesztelése, majd szállítása 2021-ben történt. Emellett ebben az évben kezdték el a turbinagépház építését, a 179 méteres hűtőtorony betonozását, valamint a kettősfalú konténment építését. 2021 szeptemberében a Kurszk-II-2. blokk VVER-TOI reaktor gyártásával is elkészült a Roszatom.**

A finnországi Olkiluoto-3 1650 MW<sub>e</sub> elektromos teljesítményű EPR blokkja 2021 decemberében érte el az első kritikusságot, és várhatóan 2022 elején csatlakoztatják az elektromos hálózatra. Mindezek mellett a szlovák Mohi-3 atomerőművi (VVER-440) blokk 2021. május 13-án megkapta az üzembe helyezési engedélyt. Továbbá a dél-koreai Shin Hanul atomerőmű 1. blokkjának APR-1400 nyomottvizes reaktorába 2021 októberében befejeződött a nukleáris üzemanyag-kazetták berakása, így várhatóan 2022 közepén ez a blokk is megkezdheti kereskedelmi üzemét.

#### 4. GENERÁCIÓS ATOMREAKTOR-FEJLESZTÉSEK 2021-BEN

Az előzőekben bemutatott, építés alatt álló vagy már átadott atomerőművi blokkok mindegyike 3., illetve 3+ generációs atomerőművi blokkok voltak. **Azonban egyre nagyobb igény mutatkozik a 4. generációs atomreaktorok fejlesztésére. A 4. generációs reaktorokkal kapcsolatos K+F+I-ben elől jár a két atomnagyhatalom: Oroszország és Kína.**

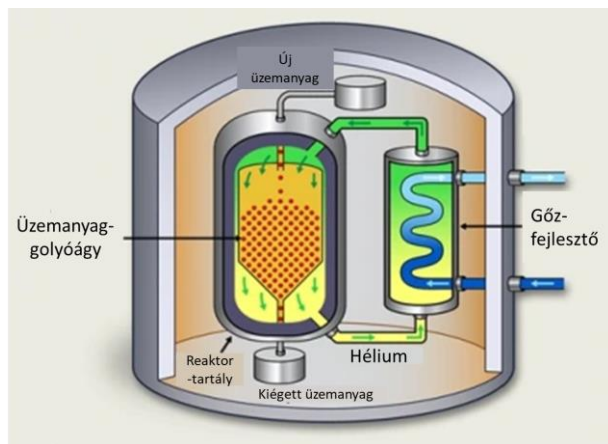


**2. ábra:** A folyékony ólomhűtésű gyorsneutronos reaktor felépítése

**Oroszország a világ első demonstrációs célú, 300 MW<sub>e</sub> teljesítményű, ólomhűtésű gyorsneutronos reaktorának, a BREST-OD-300-nak az építését 2021 közepén kezdte. A BREST-OD-300 reaktor mellett tervezik egy kevert urán-plutónium-nitrid alapú nukleáris üzemanyaggyártó és egy kiegészítő nukleáris üzemanyag-feldolgozó**

üzem létesítését is. A zárt nukleáris üzemanyagciklus demonstrációjára tervezett komplexum a tervek szerint 2026-ban léphet üzembe, míg az üzemanyag-gyártó és kiegészítő üzemanyag-feldolgozó üzem 2023-ra és 2024-re készül el. A BREST-OD-300 abból a szempontból is érdekes, hogy biztonsági rendszere teljes mértékben passzív rendszerű lesz.

Míg Oroszország az ólomhűtésű gyorsneutronos reaktorok irányába indult, addig **Kína a sóolvadékos reaktorok és a golyóágyas magas hőmérsékletű gázhűtésű reaktorok fejlesztése mellett tette le a voksát.** Kína 2021 júliusában mutatta be egy kereskedelmi célú, tóriumos sóolvadékos reaktor terveit, melynek első, 2 MW-os prototípusát Wuwei-ben építették meg. Ebben a reaktorban a hűtőfolyadék és az üzemanyag szerepét is a sóolvadék tölti be, hiszen a sóolvadékba keverik bele a tóriumot mint nukleáris üzemanyagot (és a primer neutronforrásként szolgáló  $^{233}\text{U}$ -t). A demonstrációs célú sóolvadékos reaktor tesztelését 2021 szeptemberében kezdték meg. Kína 2030-ra egy 373 MW-os sóolvadékos reaktorral szerelt erőművi blokk építését tervezi. **Kína nemcsak a sóolvadékos reaktorok területén próbál kitűnni, hanem a golyóágyas, magas hőmérsékletű gázhűtésű reaktorok területén is.**



3. ábra: A HTR-PM reaktor sematikus felépítése

A kínai Shidaowan atomerőmű második demonstrációs célú HTR-PM reaktora 2021 novemberében érte el az első kritikusságot. A két, egyenként 250 MW<sub>t</sub> termikus teljesítményű HTR-PM blokk építése 2012 decemberében kezdődött – nem sokkal azután, hogy Kína elindította a sóolvadékos reaktorokkal kapcsolatos kísérleteit. A két HTR-PM reaktor egy 210 MW<sub>e</sub> teljesítményű turbógenerátor gépcsoportot fog meghajtani, és hosszú távon akár szénerőművek kazánjainak kiváltására fogják felhasználni, ezáltal a szénerőművek teljes mértékben dekarbonizálhatóvá válhatnak. Az első HTR-PM reaktort 2021 decemberében csatlakoztatták a hálózathoz.

**A 4. generációs reaktorok fejlesztésének versenyébe Kína és Oroszország mellett más országok is beszálltak.** Hollandia konzorciumot hozott létre a TU Delft, a DIFFER és a Thorizon reaktorfejlesztővel együtt a sóolvadékos reaktorok fejlesztésének felgyorsítása érdekében. A Thorizon célul tűzte ki egy tóriumos sóolvadékos reaktor üzembe helyezését 2035-ben. Románia és Svédország inkább az ólomhűtésű reaktorok fejlesztése mellett kötelezte el magát. 2021-ben az olasz Ansaldo Nucleare és a román Reinvent Energy 20 millió eurós szerződést írtak alá egy ólomhűtésű kutatóreaktor tervezésére, megépítésére és üzembe helyezésére. Az Advanced Thermo-Hydraulics Experiment for Nuclear Application (ATHENA) projekt a dél-romániai Pitesti melletti RATEN-ICN kutatóközpontban fog megvalósulni. Az ATHENA egy 2,21 MW<sub>t</sub> termikus teljesítményű medence típusú reaktor lesz, mely kb. 880 tonna folyékony ólomot fog tartalmazni. Oroszország és Románia mellett 2021-ben az Uniper, a svéd LeadCold és a szintén svéd Royal Institute of Technology (KTH) vegyesvállalatot alapítottak egy új típusú ólomhűtésű kis moduláris reaktor (SMR) fejlesztésére. Céljuk egy 3–10 MW<sub>e</sub>-os reaktor fejlesztése.

Lengyelország és az Egyesült Királyság Japánnal kooperálva a magas hőmérsékletű gázhűtésű reaktorok (HTGR) fejlesztése és építése mellett kötelezte el magát. Az Egyesült Királyság 2029-re tervezi a héliumhűtésű, TRISO üzemanyaggal működő HTGR megépítését, mely a tervek szerint 950 °C-ig biztosít majd hőt vegyipari (pl. termokémiai hidrogéngyártási) célokra.

**K+F+I A NUKLEÁRIS TECHNOLÓGIÁBAN**

Az atomerőművek és más nukleáris technológiák esetén kiemelt és alapvető szerepe van a nukleáris biztonságnek, aminek hosszú távú és minél magasabb fokú garantálása a technológiák folyamatos fejlesztése mellett képzelhető el és valósítható meg. **2021 a nukleáris technológiákkal kapcsolatos kutatások és fejlesztések területén a robotizáció és az automatizálás éve volt. A robotizáció mellett számos nukleáris üzemanyag-fejlesztéssel kapcsolatos kutatási program zárult kimagasló és biztató eredményekkel, melyek szintén a nukleáris biztonság fokozásának égisze alatt zajlottak.**

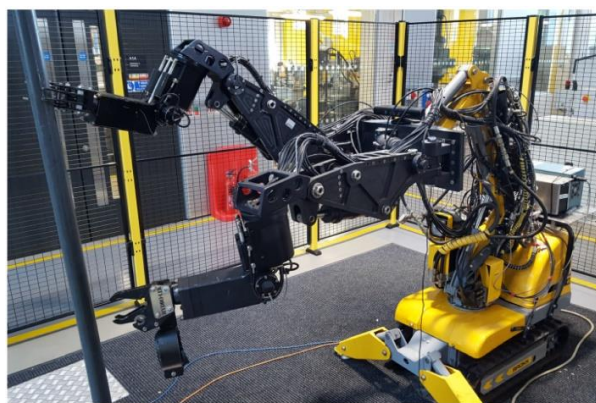
A robottechnológiák területén számos fejlesztéssel és ezek valós – atomerőművi környezetben történő – tesztelésével találkozhattunk 2021-ben. A következőkben ezeket ismertetjük:

- **orosz fejlesztésű robotkar a gőzfejlesztők hőátadó csöveinek lehegesztésére:** a robotkart az orosz fejlesztők örvényáram-detektorral látták el a gőzfejlesztő csöveiben a hibák detektálására, majd a hibákat megtalálva a robot képes a hibás csövek lehegesztésére. A technológiát a VVER-1000 és VVER-1200 reaktorok gőzfejlesztőiben már tesztelték.
- **A finn Jyväskylä Egyetem (JAMK) és a Fortum közös fejlesztése az a robot, melyet a finn Loviisa atomerőmű gőzfejlesztőinek tisztítására és ellenőrzésére fejlesztettek.** A robotot 2020 szeptemberében tesztelték először a Loviisa 1. blokkban.
- Az orosz fejlesztők Leningrád II-2. pihentető medencéjében tesztelték azt **a robotot**, amely **a medencefal szerkezeti integritásának in situ vizsgálatát teszi lehetővé** a hűtőközeg leengedése és a tárolt üzemanyag-kazetták eltávolítása nélkül.
- Az orosz Kalinin atomerőműben olyan **robotizált tűzoltórendszert** tesztelték, amely **folyamatosan monitorozza az éghető gázok (pl. hidrogén) koncentrációját a levegőben és a léghőmérsékletet, s a mesterséges intelligencia révén dönt arról, hogy szükség van-e beavatkozásra**, tűzoltásra vagy sem. A Rosenergoatom a 690 000 USD költségvetésű robotizált tűzoltórendszer fejlesztésével kapcsolatos projektjét 2021 februárjában indította el.
- A svájci drónfejlesztő vállalat, **a Flyability bemutatta 2021-ben a kompenzált Geiger-Müller detektorral felszerelt, Elios 2 RAD névre keresztelt beltéri drónt.** A drón az ellenőrző repülés során, a repülési útvonal mentén feltérképezi a radioaktív sugárterhelés mértékét, megmutatva a veszélyes dózisszintek pontos helyét egy nukleáris intézményen belül.

A robottechnológiáknak nemcsak az atomerőművekben és egyéb nukleáris létesítményekben van nagy szerepük, hanem a nukleáris létesítmények leszerelése és a radioaktív hulladékkezelés során is. Nézzük néhány ilyen célra fejlesztett robottechnológiát 2021-ből:

- **a francia Framatome a Virtual Remote Robotics (VIBERO) projekt keretében fejlesztett robotot a nagy aktivitású (HLW) hulladékok kezelésére és szétválogatására.** A robot valós helyzetekben is jól teljesített.
- Az **orosz** Troitsk Institute of Innovative and Thermonuclear Research (TRINITY) és az LLC Demolition 2021-ben bemutatták az új távoli **lézervágási technológiájukat**, mellyel akár egy 250 mm vastagságú fémszerkezetet is el lehet vágni akár víz alatt is -50 és +40 °C hőmérséklet-tartományban úgy, hogy mindeközben **a lézervágót kezelő személyzet biztonságos távolságban maradhat a bontásra ítélt fémszerkezettől.**
- **Japán és az Egyesült Királyság megállapodást kötöttek a LongOps Projekt keretében olyan robottechnológia fejlesztésére, mely elősegítené a japán fukushima-i és az angol sellafield-i atomerőmű-leszerelési munkákat.**

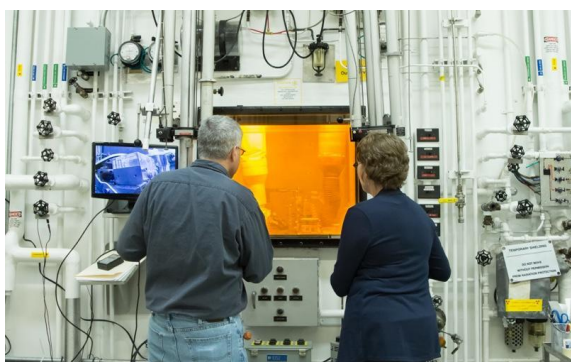
A robottechnológiák nukleáris iparban történő alkalmazása mellett a nukleáris K+F+I területén beszámolhatunk különböző nukleáris meghajtású űrhajófejlesztési projektekről, a nukleáris meghajtású (két  $175 \text{ MW}_t$ ,  $55 \text{ MW}_e$  RITM-200 reaktor), orosz Sibir jégtörőhajó megépítéséről, melyet már a Finn-öbölben tesztelnek a próbaútján. **A virtuális valóság alapú technológiák az atomerőműveket üzemeltető személyzet oktatásában is megjelentek.** A leningrádi atomerőműben például a személyzet a virtuális valóság modern eszközeivel (pl. 3D szemüvegek) sajátíthatja el adott atomerőművi berendezések karbantartásának módját. Ezenkívül 2021-ben a GE Hitachi Nuclear Energy (GEH) is bemutatta virtuális valóság alapú oktatószimulátorát, melynek segítségével az erőmű személyzete virtuális térben sajátíthatja el az atomreaktorban az üzemanyag-kazetták kivételét, berakását, átrakását mindamelllett, hogy az üzemeltetők gyakorlati tapasztalatot szerezhetnek az atomreaktorokkal kapcsolatos meghibásodások, tranziensek kezelését illetően.



4. ábra: Atomreaktorok leszerelésére specializált robot

2021 júliusában az orosz Roszatom elkezdte a bolíviai Nukleáris Kutatási és Technológiai Központ kutatóreaktorjának építését, mely egy többcélú kutatóreaktor lesz. A reaktor mellett ciklotront is épít a Roszatom a bolíviai kutatóközpontban különböző radioizotópok előállítására. Hasonló nukleáris kutatóközpont létrehozásáról kötött megállapodást 2021 második felében Szerbia is az orosz Roszatommal, melyet a következő három évben terveznek megvalósítani. A nukleáris kutatási célokat szolgáló központ építése a tervek szerint 2022-ben kezdődhet.

**A nukleáris üzemanyag-fejlesztések területén is komoly előrelépések történtek az elmúlt évben.** A nukleáris üzemanyagok-fejlesztésével kapcsolatban az egyik aktuális



5. ábra: Nukleáris üzemanyagok vizsgálatára dedikált laboratórium

kérdés, hogy az orosz VVER-1000 (majd VVER-1200) reaktorokban alkalmazható-e az ún. **REMIX üzemanyag**, mely reprocesszált urán, plutónium (max. 1,5%) és dúsított urán hozzáadásával készül. A Remix üzemanyagot 2016 óta tesztelik az orosz Balakovó-3 blokk VVER-1000 reaktorában. Az első tesztek során a reaktorba három olyan kazettát helyeztek, melyek kazettánként 5–5 REMIX-szel töltött pálcát tartalmaztak. Az ötéves tesztelés alatt a reaktor üzemeltetői nem tapasztaltak a normál üzemi működéstől eltérő jelenségeket. Ezt követően a reaktorból kivett REMIX-pálcákat a

hűtési időt követően a dimitrovgrádi kutatóintézetbe küldök további vizsgálatokra. A kísérletek után az orosz TVEL 6 REMIX kazettát gyártott, melyeket a tervek szerint egy teljes cikluson keresztül fognak vizsgálni. Mivel a REMIX neutronspektruma nem tér el jelentősen a dúsított uránt tartalmazó hagyományos üzemanyagétól, ezért **REMIX használata esetén a reaktor konstrukciója nem igényel érdemi változtatásokat.** A REMIX üzemanyag vizsgálata mellett egyre nagyobb hangsúlyt kap a **balesetálló nukleáris üzemanyagok előállítása** is. A rosztovi atomerőmű 2. blokkjának VVER-1000 reaktorában olyan üzemanyag-pálcákat vizsgáltak, melyek burkolata króm-nikkelötvözetből áll, és olyan pálcákat, melyek burkolata

krómbevonatos cirkóniumötvözetből állt. E pálcaburkolatok ugyanis lehetővé teszik, hogy súlyos baleset esetén a pálcák megőrizzék szerkezeti integritásukat azáltal, hogy ezek az anyagok jelentősen lassítják a cirkónium–vízgőz között lejátszódó kémiai reakciót. A balesetálló nukleáris üzemanyagok egy másik típusát képezi a Lightbridge Ltd. által előállított hélixszerűen csavart, **monolit nukleáris üzemanyag-pálca**, mely a hasadóanyagot a nukleáris tisztaságú cirkóniumötvözetbe ágyazva tartalmazza, s a cirkónium-nióbium burkolat ehhez a fémes tömbfázishoz metallurgiai módon kötött. Ezek besugárzásos vizsgálata még hátra van, melyet a Lightbridge Ltd az Idaho National Laboratory-val (INL) együttműködve fog végezni.

### A RADIOAKTÍV HULLADÉKKEZELÉSEL KAPCSOLATOS HÍREK 2021-BŐL

**A radioaktív hulladékkezeléssel kapcsolatban is számos előrelépés történt 2021-ben, melyek spektruma széles, hiszen a radioaktív hulladékkezelés a különböző radioaktív hulladékok szállítására és tárolására fejlesztett konténerektől a különböző hulladékkezelési eljárások kidolgozásán keresztül egészen a mélységi geológiai tárolásokkal kapcsolatos kutatásokig tart.** Ezek közül ki kell emelni, hogy Kína 2021-ben bejelentette, hogy földalatti gránitformációba épített kutatólaboratóriumot alakít ki a földfelszíntől 560 méterre, hogy tanulmányozza a formáció geológiai és hidrogeológiai tulajdonságait, s e kutatások eredményeinek fényében döntést hozzon arról, hogy a vizsgált geológiai formáció alkalmas-e a nagy aktivitású radioaktív hulladékok végleges elhelyezésére. A 13,4 km hosszúságú alagút építése mintegy 6 évet vesz igénybe és teljes becsült költsége 422 millió dollár. A földalatti laboratóriumot 50 évig tervezik üzemeltetni.

A radioaktív hulladékok kezelésére egyik lehetőség az ún. **vitifikáció**, vagyis a nagy aktivitású radioaktív hulladék üvegekészítő anyagokkal együtt, magas hőmérsékleten történő összeolvasztása, majd hirtelen lehűtése. 2021. szeptember 14-én Kína létrehozta első vitifikáló üzemét. Az üzemben a teljes üvegesítési folyamat távvezérelt berendezésekkel, automatizált módon zajlik. Kína mellett Európában is történtek előrelépések a vitifikáció alapú radioaktív hulladékkezelés terén, hiszen szintén 2021-ben a francia EDF és a Veolia közös vállalatot hoztak létre a GeoMelt vitifikációs technológia léptéknövelésére.

### A NUKLEÁRIS TECHNOLÓGIÁK FELHASZNÁLÁSA AZ ORVOSI DIAGNOSZTIKÁBAN ÉS TERÁPIÁBAN

**A nukleáris technológiák mára már alapvető fontosságúak és nélkülözhetetlenek a humán egészségügyben, hiszen nemcsak az orvosi diagnosztikában, hanem az orvosi terápiában is nagy jelentősége van a különböző radioizotópoknak.** A következőkben áttekintjük, mik történtek 2021-ben a nukleáris medicina területén. A holland Quirem Medical vállalat elkezdte gyártani a QuiremShperes sugárterápiás készítményt, mely holmium-166 ( $^{166}\text{Ho}$ )  $\beta^-$ -bomló izotópot tartalmaz mikrogöbökbe zárva, melyet májdaganat-terápiában lehet használni mint szelektív belső sugárterápiás készítmény.

2021 augusztusában a Koreai Atomenergia-Kutató Intézet (KAERI) bejelentette, hogy kifejlesztett egy automatizált  $^{89}\text{Zr}$  izotópelőállító-rendszert  $^{89}\text{Zr}$ -oxalát és  $^{89}\text{Zr}$ -klorid előállítására, mely fontos szerepet játszhat különböző daganatok diagnosztizálásában.

A kanadai (CANDU reaktorokkal szerelt) Darlington atomerőmű 2021. november 9-én engedélyt kapott a  $^{99}\text{Mo}$  izotóp előállítására. A  $^{99}\text{Mo}$  az  $^{235}\text{U}$  bomlása során keletkezik. A  $^{99}\text{Mo}$  bétabomlása ( $\beta^-$ ) során keletkező technéciumizotóp ( $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ) az orvosi diagnosztikában gyakran használt izotóp. Emellett a Darlington atomerőműben a múlt évben komoly előrelépések történtek a  $^3\text{He}$  izotóp tríciumból történő előállítására, melyet a nehézvízből szeparálnak. A  $^3\text{He}$  izotópnak nagy szerepe van az orvosi képalkotó diagnosztikában, ugyanis mint nem mérgező inhalátorgáz használható a tüdő és a légutak MRI vizsgálatában. A kanadai Bruce Power 2021-ben hatósági engedélyt kapott a  $^{177}\text{Lu}$  orvosi célú radioizotóp gyártására, melyet

itterbium-176 CANDU reaktorban történő besugárzásával állítanak elő. A  $^{177}\text{Lu}$  ígéretes radioizotóp a prosztatarák és a neuroendokrin daganatok gyógyításában.

2021 második felében az amerikai Westinghouse és a francia EDF egyetértési megállapodást írt alá a  $^{60}\text{Co}$  izotóp nyomott könnyűvízes reaktorban történő előállítására. A kezdeményezés azért jelentős, mert a világ  $^{60}\text{Co}$  izotópkészletének nagyrésztét a kanadai CANDU reaktorokban állítják elő. A  $^{60}\text{Co}$ -at főleg orvosi eszközök sterilizálására és daganatterápiában radiofarmakonként használják. Jelen megállapodás értelmében a Westinghouse  $^{59}\text{Co}$ -tartalmú nukleáris üzemanyag-kazettákat gyártana az EDF számára, hogy azokat neutronnal besugározzák az EDF PWR reaktoraiban.

Összefoglalva elmondható, hogy 2021-ben folytatódtak az atomerőműépítési projektek, de új blokkok építése is kezdődött. Megállapítható, hogy az épülő és átadott blokkok többsége kínai Hualong One és orosz VVER-típusú. A 4. generációs reaktorokkal kapcsolatos fejlesztések területén szintén élen jár a két nukleáris nagyhatalom Kína és Oroszország. Előbbi inkább a sóoldékos és a magas hőmérsékletű gázhűtéses, míg utóbbi főleg az ólomhűtésű gyorsneutronos reaktorok mellett kötelezte el magát. Azonban megfigyelhető, hogy már más országok is bekapcsolódnak a 4. generációs atomreaktorokkal kapcsolatos kutatásokba. 2021-ben a nukleáris technológiákkal kapcsolatos innovációk között számos robot- és dróntechnológiát, ill. virtuális valóság alapú szimulátort találunk. A nukleáris K+F erősödését jelzi az is, hogy egyre több ország épít vagy tervez építeni ciklotronokkal és kutatóreaktorokkal felszerelt kutatóközpontokat. A nukleáris üzemanyag-fejlesztések középpontjában a balesetálló, a monolit és a REMIX nukleáris üzemanyagok álltak. Mindezek mellett 2021-ben a nukleáris medicina területén is előremutató lépések történtek.

\*\*\*\*\*

**Ez volt az Elemző percek sorozatunk 103. tagja.**