



Összefoglalás

Írásunkban áttekintettük az atomenergia felszabadításának főbb témaköreit, a maghasadás folyamatát, a láncreakció megvalósításának és szabályozásának lehetőségeit. Bemutattuk egy atomerőmű működésének fizikai alapjait, valamint az atomerőművek különböző típusait, termikus és a gyorsreaktorokat egyaránt. Ezek egy része régóta megépült vagy kereskedelmi forgalomban van, mások viszont még csak a tervezőasztalon léteznek. Fontosnak tartottuk ez utóbbiak, főleg a tenyésztőreaktorok bemutatását is, hiszen az egyre növekvő energiaigény és a fogyatkozó készletek következtében ezek közül kell majd választania az elkövetkező generációknak, ha a következő évszázadban is hasznosítani szeretné az atomenergiát. Emellett ezek jelentik a jelenlegi kutatások főbb irányvonalait, és a kutatások folytatására rengeteg atomenergia iránt érdeklődő fiatalra lesz szükség a jövőben is.



IRODALOM

- [1] Vidovszky István: A jövő atomerőművei. Fizikai Szemle (2005) 55/4, 118–122. <http://www.fizikaiszemle.hu/archivum/fsz0504/VidovszkyI.pdf>
 - [2] Kiss Attila, Vágó Tamás, Aszodi Attila: Az SCWR-FQT tesztszakasz be- és kilépő részének CFD analízise. Nukleon (2014) 7, 169. http://nuklearis.hu/sites/default/files/nukleon/7_3_169_KissA.pdf
 - [3] A IV. generációs atomerőművek fóruma (GIF). https://www.gen-4.org/gif/jcms/c_59461/generation-iv-systems
 - [4] Keresztúri András, Pataki István, Tóta Ádám: Negyedik generációs reaktorok. Fizikai Szemle (2014) 4, 112–119. http://fizikaiszemle.hu/archivum/fsz1404/Kereszturi_A_PatakiI_TotaA.pdf
 - [5] Király Márton: Lehetséges megoldások az atomenergia-ipar jelenlegi problémáira I–II. Fizikai Szemle (2013) 4–5, 121–125, 162–166. <http://fizikaiszemle.hu/archivum/fsz1304/FizSzem-201304.pdf>
 - [6] Moir, Ralph, Teller Ede: Tórium alapon működő, sóoldékony föld alá telepített atomreaktor lehetősége. Fizikai Szemle (2011) 61/11, 365–371. <http://fizikaiszemle.hu/archivum/fsz1111/FizSzem-201111.pdf>
 - [7] Yamaji Bogdán, Aszodi Attila: Sóoldékony reaktorkonceptió kísérleti vizsgálata. Nukleon (2014) 7, 161. http://nuklearis.hu/sites/default/files/nukleon/Nukleon_7_2_161_Yamaji.pdf
- Az internetes hivatkozások letöltésének dátuma: 2023. 03. 26.
Az ábrák letöltésének dátuma: 2023. 03. 26. (Az ábrák szövegét magyarul adtuk meg.)

Adorján Ferenc

■ Országos Atomenergia Hivatal, nyugdíjas

A kisméretű moduláris atomerőművek (SMR-ek) lehetőségei a klímavédelemben

Az utóbbi években jelentős felpezsdülés volt tapasztalható a kisméretű moduláris reaktorokon (SMR) alapuló atomerőművekkel kapcsolatban: tervek, prototípusok, viták. Az SMR-ek segítségével – bizonyos feltételek teljesülése esetén – az atomenergia részaránya tovább növelhető, és ez reális lehetőséget kínál a kitűzött klímavédelmi célok elérésére. A már kidolgozott és kidolgozás alatt álló SMR-ek egyszerre célozzák meg a nukleáris energiatermelés gazdaságosságának és biztonságosságának növelését. A közelmúlt eseményei alapján úgy tűnik, hogy az Európai Unió szervei és több európai ország is támogatják, illetve érdeklődést mutatnak a téma iránt.

Bevezetés

A tavaly november végén tartott ENSZ Klímakonferencia (COP27 – Sarm es-Sejk) [1] megnyitóján az IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) elnöke azt mondta: „A tudomány hangja a klímaváltozásról már nem tud élesebb, erősebb és kijózanítóbb lenni: *nem azon a pályán haladunk, amely képes korlátozni a felmelegedést 1,5 °C alatt.* Itt az ideje a közös cselekvésnek – most!”

Az IPCC 6., 2022-ben kiadott értékelő jelentése [2] bemutatta, hogy azonnal és drasztikusan csökkenteni kell az üvegházhatású gázok (ÜHG) kibocsátását (1. ábra), továbbá azt is, hogy globálisan a kibocsátásért döntő többségben a fejlett ipari országok energiatermelése felelős (2. ábra). Ebből az látszik, hogy – elsősorban – az energiatermelés forradalmi megújítására lenne szükség. Természetesen a megújuló energiák hasznosítása is attraktív

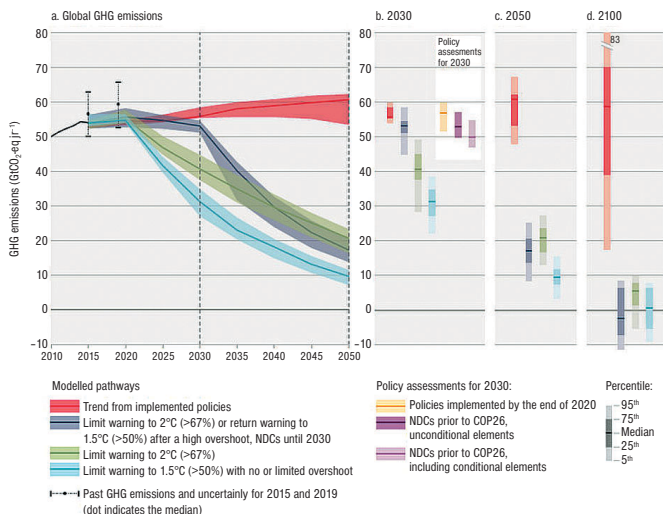
lehetőség, de ennek jelentős korlátai vannak. Ezeken kívül csak az atomenergia képes ÜHG-mentes energiatermelésre.

A 2021-ben, Glasgow-ban tartott COP26 értekezleten, az OECD Nuclear Energy Agency igazgatója egy olyan elemzés eredményeit mutatta be [3], amely szerint a 2050-re tervezett kibocsátási célok ugyan elérhetőek kizárólagosan a megújuló energiák alkalmazásával is, de ennek elfogadhatatlan (finanszírozhatatlan) költségvonzatai lennének. Természetesen a magas költségek elsősorban a járulékos tényezők, főleg a kínálat és az igények összeegyeztetése miatt lépnek fel. A bemutatott eredmények szerint a még drágának tartott atomenergia alkalmazása is a finanszírozható keretek között marad.

Ezek alapján azt látjuk, hogy sürgős váltásra van szükség az energiatermelés terén, és ez csak úgy valósítható meg, ha a nukleáris energiatermelés részarányát gyorsan és jelentősen felfuttatjuk a következő évtizedekben.



Projected global GHG emissions from NDCs announced prior to COP26 would make it *likely* that warming will exceed 1.5°C and also make it harder after 2030 to limit warming to below 2°C.



1. ábra. Az ÜHG-kibocsátás lehetséges trendjei az IPCC 6. értékelő jelentése szerint

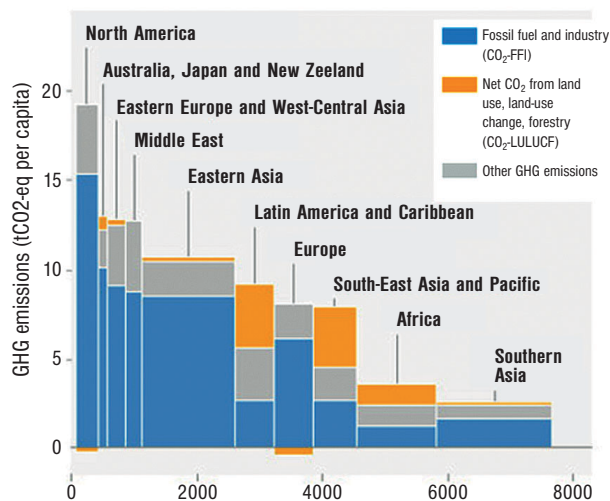
Az atomerőművek lehetőségei és a nagy erőművek „csapdája”

A kétezres évek elejéig az atomerőművek tervezése folyamatosan az egyre nagyobb egységteljesítmény irányába haladt, aminek a motivációja elsősorban a fajlagos költségek csökkentése volt. Ehhez jöttek hozzá a fukusimai katasztrófa által indukált aggodalmak, illetve az ezek kivédésére szükségesnek látott további biztonsági megoldások. Ez hatalmas, igen összetett és igen bonyolult rendszereket eredményezett. Ezért ezeknek az erőmű-létesítéseknek az lett az elriasztó tapasztalata, hogy a tervezettnél lényegesen hosszabb idő alatt és jelentős költségtúllépéssel készültek(-nek) el. Erre az egyik eklatáns példa a finnországi Olkiluoto-ban közelmúltban üzembe helyezett, francia–német tervezésű EPR-1650MWe teljesítményű erőmű, amelynek az építési ideje a tervezett 5 év helyett 18 év lett, és a költségek több mint 2,5-szeresükre emelkedtek. Ez és a hasonló tapasztalatok alapján sokan úgy látják, hogy a maghasadáson alapuló energiatermelés korszaka a végéhez közeledik. (A fúziós energiatermelés korszaka viszont még el sem kezdődött.)

Az atomerőművekre általánosságban jellemző, hogy erősen beruházásigényesek, és a hozzájuk kapcsolódó ÜHG-kibocsátás is döntő többségben az építés fázisához kapcsolódik (acél és beton...). Természetesen ez a megújuló energiatermelésnél sincsen másképpen, csak hogy ott kifejezetten kis egységek (modulok) vannak, amelyek rövid létesítési időt követően azonnal megkezdik a termelést. Így a beruházónak nem kell sokat várni a megtérülésre. Tehát ezek az energiatermelő rendszerek annál környezetbarátabbak és egyben gazdaságosabbak, minél hosszabb ideig sikerül őket működtetni. Ezért érdemes az atomerőművek élettartamát „hosszabbítani”, ami alapvetően azt jelenti, hogy az eredeti tervező által garantált élettartam végén részletesen értékelni kell az egyes komponensek állapotát; amit szükséges és lehet, ki kell cserélni, és meg kell állapítani, hogy a teljes rendszer biztonságos és üzembiztos működése mennyi időre garantálható még. Számos vizsgálat támasztja alá, hogy az élettartam-hosszabbítási eljárások a leggazdaságosabb energiatermelési módszert jelentik [8].

A fentiekben alapszik az Európai Bizottság EU 2020/852-es „Taxonomy” rendelete, amely a nukleáris energiát is mint klímaba-

c. Net anthropogenic GHG emissions per capita and for total population, per region (2019)



2. ábra. Az üvegházhatású gázok (GHG) antropogén kibocsátása régióinként a 2019-es év során a népesség függvényében (a színes területek mérete a kibocsátás össz mennyiségével arányos)

rát energiát szerepelteti. Ennek háttere az EU JRC kutatóintézetének tanulmánya [4], amely megállapítja, hogy a klímapolitikai célok eléréséhez jelentősen hozzájárulhat az atomenergia.

Mik is az SMR-ek?

A kis moduláris atomerőművek (Small Modular Reactor – SMR) tervezői a fentebb vázolt problémakörre igyekeznek választ találni. Ezt az igyekezetet több nemzetközi szervezet (pl. a Nemzetközi Atomenergia Ügynökség) és kormány is támogatja [5,6,7]. A „kis, moduláris atomerőművek”, SMR-ek alapvető jellemzőinek az alábbiakat tekintjük:

- az egy reaktorra (modulra) eső villamos teljesítmény maximum néhány száz MWe, bár az *igazán modulárisnak* tekinthető tervek esetén ez inkább max. 100 MWe (MWe: a kimenő elektromos teljesítmény MW-ban);
- a tervek tipikusan olyanok (de legalábbis lehetővé teszik), hogy az erőmű *több reaktormodulból* álljon, ezáltal jelentős létesítési és üzemeltetési költségek takaríthatók meg;
- a modulok egy erőművön belül és az egy sorozathoz tartozó erőművekben teljesen azonosak;
- a modulok függetlenek egymástól a termelés is biztonság szempontjából, de a lehető legnagyobb mértékben hasznosítanak közös erőforrásokat;
- a modulok összeállíthatók és tesztelhetők gyári körülmények között, majd egyben szállíthatók a felhasználás helyére;
- a modulok egyenként üzembe helyezhetők, így az erőmű hamar megkezdheti a termelést és lépésekben bővíthető;
- az eddigi atomerőművek tervezési és üzemeltetési tapasztalatainak hasznosítása révén a korábbiaknál modulonként lényegesen *egyszerűbb, kevesebb elemet tartalmazó rendszerek*;
- a biztonsági rendszerek elsősorban vagy kizárólagosan *passzív megoldásokat* alkalmaznak, így üzemzavar, baleset alkalmával a rendszerek a fizika törvényeinek engedelmeskedve, vagy csak minimális operátori beavatkozás útján kerülnek biztonságos állapotba.

A fenti tulajdonságok alapján az ilyen rendszerek építése, létesítése és üzembe helyezése lényegesen gyorsabban, hatéko-



nyabban történhet a hagyományos atomerőművekhez képest. Az első prototípusok engedélyezése lényegében nem tér el más atomerőművektől, de a sorozatok egyes elemeinek engedélyezésének már elsősorban csak a telephely megfelelőségére kell koncentrálnia. Bizonyos darabszámú sorozat elérése esetén várhatóan az SMR-ek gazdaságossági mutatói is jobbakké lesznek, mint a nagy atomerőművéké.

Az is nagy jelentőségű, hogy az SMR-ek speciális klímavédelmi előnyökkel kecsegtetnek. Mivel az atomerőművek „karbonlábnyma” döntően a beépített anyagok és berendezések gyártásából származik, a kompakt konstrukciók, a kevesebb elemszám, kisebb tömegű egységek miatt az építésükhöz szükséges anyagmennyiség (elsősorban acél és beton) – szerencsés esetben még egységnyi teljesítménykapacitásra vonatkoztatva is – kevesebb lehet. Ez a CO₂-kibocsátás csökkentését eredményezi a nagy atomerőművekhez képest. A klímavédelem szempontjából szintén fontos, hogy többféle lehetőség is kínálkozik az SMR-ek rugalmas terheléskövető („Load follow”) üzemmódjára, ami által növelik a megújuló energiaforrások alkalmazásának lehetőségét. Aktívan hozzájárulhatnak a tiszta energiahordozók (pl. hidrogén vagy metán) termeléséhez is [7]. A legfontosabb pedig az, hogy az atomenergia gyors felfuttatása kizárólag az SMR-ek kiterjedt alkalmazásával érhető el.

A jelenlegi erőművektől eltérő megoldásokon, elveken alapuló SMR-tervek (negyedik generációs atomerőművek) fontos lehetőségeket kínálnak az atomenergia talán legkevésbé megoldott problémájára, vagyis a kiégett fűtőelemek, azaz a nagy aktivitású hulladék kezelésére, illetve hasznosítására is.

Az SMR-ek mint a klímavédelem kihagyhatatlan lehetősége

A fentiekben láttuk, hogy a klímavédelmi célok eléréséhez gyors változtatásra lenne szükség az energiatermelés terén, és azt is, hogy ehhez az atomenergia fokozott alkalmazása is szükséges. Ugyanakkor az egyre nagyobb és bonyolultabb új erőművek létesítésével ez aligha érhető el, hiszen azok esetében a döntéstől az üzembe helyezésig akár két évtized is eltelhet. A gyorsított felfuttatásra azonban az SMR-ek valódi lehetőséget kínálnak azzal, hogy néhány standardizált típust lehetne számos országban párhuzamosan létesíteni, jelentős méretű sorozatok formájában.

Az SMR-ek attraktivitása az alábbiakban foglalható össze:

- A viszonylag rövid létesítési idő miatt a befektetés gyorsabban térül meg.
- A vízhűtéses reaktorokat alkalmazó SMR-ek – a számos újdonság ellenére – kiforrott technológiát alkalmaznak, magas megbízhatósági és biztonsági szint mellett.
- Az inherens biztonsági tulajdonságok és a típusengedélyezés alkalmazása miatt az engedélyezés is felgyorsítható.
- Az ipari sorozatgyártás jelentős költségcsökkentést kell, hogy eredményezzen.
- A feltörekvő, kis országok számára is elérhető, kezelhető lehetőséget jelentenek.
- Telepíthetők üzemben kívül helyezett fosszilis erőművek telephelyére, ahol már rendelkezésre áll a szükséges infrastruktúra.
- A jobb manőverezhetőség miatt megoldható a hektikusan rendelkezésre álló megújuló energiatermelési rendszerekkel való együttműködés.
- Vegyes alkalmazás lehetősége: alternatív H₂-termelés, tengervíz-sótalanítás, ipari hőszolgáltatás stb.
- A lakossággal való elfogadtatás is (remélhetőleg) egyszerűbb és problémamentesebb.

További lényeges attraktív tulajdonságként tekinthető a nagy aktivitású radioaktív hulladékok radiotoxicitásának csökkentésének lehetősége, amelyet a későbbiekben kissé részletezünk.

Biztonság

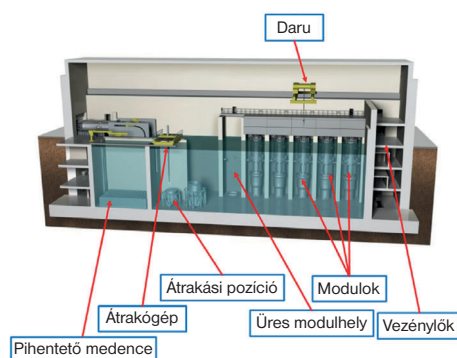
Az új SMR-tervek jelentős része olyan, hogy bármely üzemzavar, baleset, környezeti vagy természeti katasztrófa esetén is teljesül a „walk away” feltétel, azaz akkor sem történhet jelentős környezeti, lakosságot érintő hatás, ha az esemény közben vagy azt követően a rendszer hosszabb időre magára marad [9]. A passzív biztonság lényeges eleme a külső szolgáltatásoktól való függetlenség is: az a követelmény, hogy ne függjön a rendszer biztonsága a külső elektromos hálózattól, hűtővízellátástól, dízelüzemanyagtól stb. A mai technológiai lehetőségeknek köszönhetően mind a normál üzemi, mind a baleseti folyamatok modellezése sokkal megbízhatóbb és részletesebb. Ennek köszönhetően vált lehetővé, hogy a tervezett rendszerek egyszerűbbek legyenek, ugyanakkor magasabb biztonsági szintet nyújtsanak.

A jelenlegi technológiákkal lényegében azonos elvek szerint működő kompakt, passzív és nagy megbízhatóságú rendszerek „evolúciós” fejlesztési módszerek eredményei. Ilyenek például az amerikai NuScale cég VOYGR [9] rendszere mellett az argentin CAREM-25 típusok, amelyek alapelvükben a paksi erőműhöz hasonló, nyomottvízes erőművek (PWR). A BWRX-300 (GE-Hitachi) a főleg az Egyesült Államokban elterjedt forralóvízes típusba tartozik.

Az SMR-ek felépítésének és biztonságának illusztrálása

Talán a NuScale cég VOYGR-12-es típusa [9] a legalkalmasabb arra, hogy az SMR-ek lényeges jellemzőit bemutassuk (3. ábra):

- a reaktorépületben, egy talajszint alatti medencében, falakkal elválasztott rekeszekbe merülve 12 (vagy 4–6) reaktormodul helyezkedik el, amelyek egyenként 60–75 MWe teljesítményt szolgáltatnak;
- a reaktormodulok külső burka egy-egy nagy nyomásra tervezett konténment-tartály (ezek a tartályok merülnek a medence rekeszeibe), amely tartályokból csak a tápvíz- és gőzvezetékek, valamint az ellenőrzéshez és vezérléshez szükséges kábelek ágaznak ki;
- a konténmenten belül a legnagyobb egység a gőzfejlesztővel egybeépített reaktortartály;
- a reaktor és a gőzfejlesztő között a primer hűtőközeg normál üzemben is természetes cirkulációval kering;
- üzemanyag-átrakáskor, karbantartáskor az adott konténment-tartályt leválasztják a külső csatlakozásairól, és a teljes

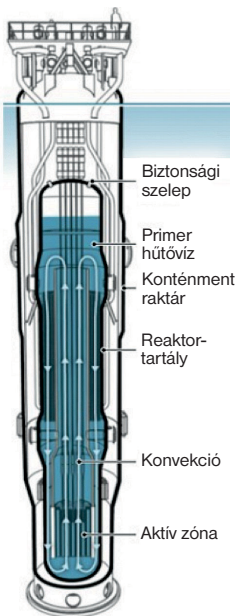


3. ábra. A NuScale VOYGR-12 SMR rendszerének hosszmetzeti képe 6 modulhellyel, amelyből 5 van betöltve



- modult egyben átemelik a medencén belül a karbantartó pozícióba, ahol szétszerelik és elvégzik a szükséges műveleteket, miközben a többi modul zavartalanul üzemelhet;
- a modulokat közös vezérlőteremből irányítják.

A 4. ábra egy modul szerkezetét szemlélteti. Kisebb üzemzavarok esetén a maradványhő elvonása operátori beavatkozás nélkül, természetes cirkulációval, a konténment falán elhelyezett lehűtő radiátorokon keresztül valósul meg, illetve a reaktortartály integritásának elvesztése esetén a konténment falán keresztül, a medence vizének adódik át a maradványhő. Ez a megoldás még azt követően is biztosítja a megfelelő hőelvonást, hogy (kb. 30 nap után) a medence vize teljesen elpárolog, mivel addigra a maradványhő már annyira lecsökken, hogy a léghűtés is elegendő. Mindez azt jelenti, hogy a rendszer kielégíti az ún. „walk-away” feltételt. Lényeges az is, hogy mivel minden biztonsági rendszer teljesen passzív, így a rendszer biztonságos állapotának megtartása nem függ semmi külső kapcsolattól, például elektromosenergia-ellátástól, hűtővíztől. Ez a lehető legmagasabb szintű biztonsági követelmény, amelynek sem a jelenlegi atomerőművek, sem más ipari rendszerek nem felelnek meg.



4. ábra. A NuScale modul felépítése.
A modul magassága kb. 10 m

A NuScale VOYGR terve a múlt évben megkapta az US NRC (az USA nukleáris biztonsági hatósága) „Design Certificate”-jét [10], és hamarosan várható a létesítési engedélykérelem benyújtása egy már korábban hatóságilag elfogadott telephelyre a prototípus megépítése érdekében. Erre a típusra jelentős a nemzetközi érdeklődés is, Lengyelország, Románia, Bulgária, Ghana és Dél-Korea például már hivatalos szándéknyilatkozatot írtak alá.

A teljesen új elveken nyugvó SMR-rendszerek tervei általában még közel sem ennyire kidolgozottak, de ezek biztonságával kapcsolatban is megállapíthatjuk, hogy hasonló célokat tűznek ki, mint amit fentebb körvonalaztunk.

Engedélyezési kérdések

A Nemzetközi Atomenergia Ügynökség (NAÜ, angolul IAEA) jelentős erőfeszítéseket tesz arra, hogy a nemzeti hatóságokat felkészítse az SMR-ek engedélyezésére, hogy segítse azok gyorsabb elterjedését [50]. A NAÜ hangsúlyozza, hogy az SMR-ek engedélyezésének előmozdítására technológiasemleges szabályozást kell létrehozni és alkalmazni. A NAÜ külön projektet is indított arra, hogy vizsgálja a jelenlegi biztonsági szabványok SMR-re való alkalmazhatóságát, és a rendszeres felülvizsgálati szempontok közé bekerültek az SMR-re vonatkozó sajátosságok is.

Az Európai Unió is magas szinten támogatja az SMR-eket, miután az Európai Bizottság által végeztetett elemzések alapján az Unióban a klímasemlegesség csak úgy érhető el, ha a nukleáris erőművi kapacitás nem csökken a jelenlegi érték alá [4]. Az elemzések megmutatták, hogy az európai szinten sikeres közös stratégia alapvető elemei a következők:

- egységes európai tervek, lehetőleg európai tervezőtől,

- engedélyekkel rendelkező európai beszállítói lánc,
- tagországok között harmonizált engedélyezési feltételek,
- közös európai finanszírozási modellek a K+F területen SMR-témában.

Ennek érdekében egy EU-szintű együttműködési program létrehozását tervezik, amelyet az Európai Bizottság támogat. A programban egyaránt képviseltetik magukat a nemzeti hatóságok, az ipari szereplők és a kutató-fejlesztő intézmények. Az EU-szintű egységes engedélyeztetés kialakításánál kihívást jelent egyrészt, hogy az eltérő reaktortípusok között jelentős technológiai különbségek vannak, másrészt, hogy a tagországok jogi szabályozása is jelentős eltéréseket mutat. A harmonizálás előkészítése érdekében Csehország, Románia, Franciaország és Finnország hatóságai tesztfeladatként egy-egy már létező SMR-terv értékelését határozták el, és az együttműködéshez szándéknyilatkozatot írtak alá. Az előzetes engedélyeztetés (típusengedély) lehetősége és a mélységi védelem elvének SMR-ekre való adaptálása gyorsíthatja az engedélyezési folyamatokat. Az engedélyezés kiemelt figyelmet kell, hogy fordítson a vészhelyzeti tervezési zóna szabályozására is. Egyes SMR-típusok esetében a biztonsági elemzések azt támasztják alá, hogy súlyos baleset bekövetkezése kizárható. Ilyenkor akár nincs is szükség vészhelyzeti tervezési zónára.

Újabb fejlesztések (negyedik generációs tervek) és azok speciális lehetőségei

A negyedik generációs tervekre és prototípusokra jellemző, hogy a hagyományos atomerőműveknél magasabb hőmérsékleten működnek, ami önmagában is kedvezőbb termikus hatásfokot biztosít. Ezen túlmenően ezek speciális tulajdonságokkal rendelkeznek: például alkalmazásuk nem teszi szükségessé az urán 235-ös izotópjának dúsítását, hanem akár természetes uránból vagy tóriumból lehet megtermelni a hasadóképes Pu-239, illetve U-233 izotópokat.

Három alapvető konstrukciós megoldás ismeretes: a magas hőmérsékletű gázhűtéses (HTGR), a folyékonyfém-hűtésűek (LMFBR) és a sóolvadékos (MSR) reaktorok [11]. Az új fejlesztésekről Király Márton és Radnóti Katalin cikkében olvashattak az előző oldalakon.

Az MSR (sóolvadékos) reaktorok különösen nagy ígéretet jelentenek ebből a szempontból (is), mert azok reaktortartályait és konténmentjeit (a reaktort és rendszereit a környezettől elzáró szerkezetet) nem kell nagy nyomásra tervezni. Az MSR-en belül az SSR altípus (Stable Salt Reactor, SSR) [12,13] – ahol az üzemanyag és a radioaktív anyagok nem keringenek együtt a hűtőközeg szerepét játszó sóolvadékkal, hanem külön csövekben vannak elhelyezve – további egyszerűsítést jelent, hiszen a primer körű hőt átadó rendszerben (gőzfejlesztőkben) nincs radioaktív anyag, így azok nem igényelnek biológiai védelmet. Az egységnyi teljesítményre vonatkoztatott helyigény és anyagigény tekintetében – a tervek szerint – ezek a típusok a legtakarékosabbak.

Sajátos lehetőséggel bír a kanadai Moltex Energy cég SSR-W típusa, amely nemrég nyerte el az előzetes típusengedélyt a kanadai hatóságtól [14]. Ebben a modellben mind az üzemanyag, mind a hőátadó anyag nátrium-kloridból és bizonyos redoxpotenciál-csökkentő adalékanyagokból áll, ahol az üzemanyag maga is a megfelelő lantanida/aktinida-kloridok formájában van jelen. Megfelelő újrafeldolgozási (reprocessálási) háttérrel mellett lehetővé teszi, hogy a kiégett üzemanyagban megmaradó és keletkező hasadóképes anyagokat (uránt és transzuránokat) tovább égesse. Amennyiben ilyen reaktorok je-



lentos mértékben elterjednének, lehetővé válna, hogy – amellet, hogy jelentősen megnövekedne a hasadóanyag kihasználtsága és ezáltal csökkentenének a bányászati igények – a visszamaradó nagy aktivitású hulladékban a nagyon hosszú felezési idejű, tartósan nagy radiotoxicitású anyagmennyiség is jelentősen lecsökken. Az újrafeldolgozás közben elválasztott nagy radiotoxicitású (hosszú felezési idejű és jelentős hozamú) hasadási termékeket is vissza lehet helyezni a reaktorba, és ezek az izotópok a neutronbesugárzás hatására rövidebb felezési idejű izotópokká alakulnak. Mindamellet a tervezők értékelése szerint egy ilyen reaktor létesítése lényegesen olcsóbb, mint a folyékonyfém-hűtésű gyorsreaktoroké. Így a hulladék hosszú távú eltemetésének problémája is jelentősen egyszerűsödne, mivel ha a nagy aktivitású hulladék mennyisége jelentősen lecsökken, és a hulladék nem tartalmaz jelentős mennyiségű transzurán- és más hosszú felezési idejű izotópot ([4], 103. oldal), akkor már nem több, mint kb. 1000 év biztonságos tárolás elegendő ahhoz, hogy a hulladék aktivitása a természetben előforduló uránérccek aktivitásával összemérhetővé váljon. A szándék szerint, amit a kanadai kormány is támogat, a közeljövőben megkezdik a prototípus engedélyeztetését és létesítését, amelyet (a későbbi sorozatban építendő SSR-W-ekkel együtt) a kanadai CANDU reaktorok kiégett fűtőelemeinek újrahasznosítására kívánnak alkalmazni az energiatermelésen túlmenően.

Kilátások, potenciális hatások

Úgy tűnik, számos nemzetközi szervezet (NAÜ, WNA, OECD/NEA, ENSREG, WENRA) elhatározta, hogy érdemes elindulni az SMR-ek elterjesztése útján, és már különböző konkrét lépéseket is tettek az adott szervezet hatáskörének megfelelően. Egyre több ország döntéshozó politikusai és befolyásos személyiségei (pl. USA, Kanada, Oroszország, Kína, Franciaország, Belgium, Lengyelország, Románia, Szlovákia, Csehország, Észtország) komolyan gondolják, és már lépéseket is tettek arra, hogy belátható időn belül SMR-eket létesítsenek. Láthattuk, hogy sok szereplő próbál különböző tervekkel beszállni a versenybe, azonban a jelenlegi kis számú üzemelő vagy épülő SMR azt mutatja, hogy a felfuttatáshoz előbb ki kell, hogy épüljön a stabil fejlesztői és ipari háttér, és kormányzati támogatás is szükséges lehet [2,3].

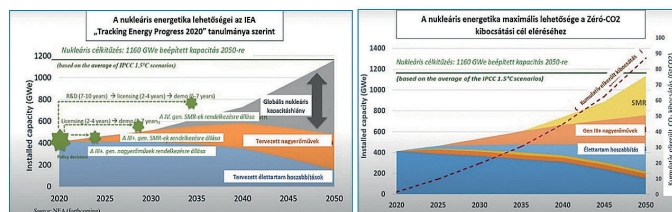
Az EU jogrendje és a vonatkozó nemzetközi egyezmények (Nuclear Safety Directive, Espoo-i, Aarhusi stb.) felülvizsgálatának érdekében az európai együttműködés az információgyűjtés fázisában tart. Távlati célként azt határozták meg, hogy a 2030-as évek elejére elkészüljön az európai SMR koncepciója és kialakuljon a megfelelő jogi és ipari környezet. Ugyanakkor, az OECD/NEA szerint ez esetleg túl lassú lehet a klímavédelmi célok elérésének szempontjából (lásd 1. és az 5. ábrát!).

Az 5. ábrán bemutatott két grafikon szemlélteti a világ nukleáris energiatermelésének várható (vagy kívánatos!) alakulását a következő évtizedekben. Mindkettőből kitűnik, hogy az OECD az SMR-eknek jelentős szerepet szán. A könnyűvízes SMR-ek már 2030 előtt is jelentékeny részt vállalhatnak, de 2030 után egyre nagyobb mértékben kell, hogy belépjenek a más elveken alapuló konstrukciók is (negyedik generációs tervek).

Magyarország jelenlegi stratégiájában csak az SMR-projektek nyomon követése szerepel. Magyarország a méretéhez képest a jelentősebb nukleáris programmal rendelkező országok közé tartozik, azonban a meglévő és a tervezett paksi blokkokhoz kapcsolódó tevékenységek lekötik az ország ez irányú erőforrásainak nagy részét. Mivel az SMR-ek klímavédelmi és más előnyei nem

OECD/NEA a COP26-on

Az IEA tanulmánya alapján, a nukleáris energiatermelés jövőbeli lehetőségeiről:



A cél csak további élettartam-hosszabbításokkal és az SMR-ek felfuttatásával érhető el!

5. ábra. A nukleáris energiatermelés globális alakulása a következő 30 év során [47]

vitathatók, hosszabb távon számolni kell hazai SMR létesítésével is. Ezért fontos, hogy mind a hazai szakembergárda, mind a politikai döntéshozók folyamatosan képpen legyenek.

Összegzés

A klímavédelmi célok elérése érdekében egyre több szereplő egyetért abban, hogy a nukleáris energiatermelés felfuttatása szükségszerű. A nagy erőművek létesítése azonban egyre vontatottabban halad, különösen a fejlett, nyugati országokban. Ennek legfőbb oka abban állhat, hogy az egyre növekvő biztonsági elvárások miatt az alapvetően több évtizeddel ezelőtti koncepciókon nyugvó tervek egyre bonyolultabbá váltak. Így mára már elengedhetetlen, hogy tiszta lapról induló, új koncepciókon nyugvó terveket dolgozzanak ki. Megalapozottnak látszik, hogy a kis, moduláris reaktorokon alapuló rendszerek gazdaságosabbak, biztonságosabbak a hagyományos nagyerőműveknél, és – nem utolsósorban – alkalmazásuk lehetővé teszi a nukleáris energiatermelés viszonylag gyors felfuttatását. Ezt jelenleg a legkidolgozottabb terveken alapuló könnyűvízes (nyomott és forraló) technológiák ígérik, hiszen a viszonylag kis modulok sorozatgyártással lényegesen olcsóbb, megbízhatóbb és a befektetők számára gyorsabb megtérülést biztosító megoldást jelentenek.

A fejlettebb, újszerű negyedik generációs technológiák fokozatos beléptetése – közép- és hosszú távon – további előnyökkel kecsegtet elsősorban a zárt üzemanyagciklus és a tóriumciklus széles körű bevezetésével, valamint a nagy aktivitású hulladék mennyiségének jelentős csökkentése által.

IRODALOM

- [1] Nuclear energy, climate change and COP27
- [2] IPCC Sixth Assessment. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/>
- [3] D. Cameron, Director OECD/NEA: Charting a Path Toward on Affordable Electricity Mix in a Net Zero Future. <https://www.youtube.com/watch?v=dYsN4RNKPMa>
- [4] S. Abousahj et al.: Technical assessment of nuclear energy with respect to the 'do no significant harm' criteria of Regulation (EU) 2020/852, JRC Science for policy report, 2021.
- [5] Advances in Small Modular Reactor Technology Developments A Supplement to: IAEA Advanced Reactors Information System (ARIS). SMR Book 2020 Edition
- [6] Small Modular Reactors: A new nuclear energy paradigm (Preprint) IAEA 2022. https://nucleus.iaea.org/sites/smr/Shared%20Documents/SMR%20Booklet_22-9-22.pdf
- [7] WNA: Small Nuclear Power Reactors, March, 2023.
- [8] OECD/IEA: Projected Costs of Generating Electricity, 2020 Edition.
- [9] NuScale: <https://www.nuscalepower.com/en/products/voygr-smr-plants>
- [10] NRC Certifies First U.S. Small Modular Reactor Design January 20, 2023. <https://www.energy.gov/ne/articles/nrc-certifies-first-us-small-modular-reactor-design>
- [11] Molten salt reactors. <https://world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/molten-salt-reactors.aspx>
- [12] MOLTEx: Moltex is developing a suite of reactor technologies that can be deployed individually or jointly. <https://www.moltexenergy.com/technology-suite/>
- [13] Wikipedia: Stable salt reactor. https://en.wikipedia.org/wiki/Stable_salt_reactor
- [14] <https://www.moltexenergy.com/molten-completes-phase-1-of-cnsc-vendor-design-review-2/>