

# A kisméretű moduláris atomerőművek (SMR), mint a klímavédelem ígéretes eszközei

Adorján Ferenc, Rétfalvi Eszter

Országos Atomenergia Hivatal  
1036 Budapest, Fényes Adolf utca 4.

*Az utóbbi években jelentős felpezsdülés volt tapasztalható a kisméretű moduláris reaktorokon (SMR) alapuló atomerőművekkel kapcsolatban, ezért időszerű, hogy áttekintsük a jelenlegi helyzetet és a kilátásokat. Az SMR-ek segítségével – különös tekintettel a modularitásra – az atomenergia klímavédelmi potenciálja tovább növelhető, és ez most különös fontosságot kölcsönöz a témának. Az SMR-ek fejlesztése egyszerre célozza meg a nukleáris energiatermelés gazdaságosságának és biztonságosságának növelését. A közelmúlt eseményei alapján úgy tűnik, hogy az Európai Unió szervei és több európai ország is támogatással és érdeklődéssel állnak hozzá a témakörhöz.*

## Bevezetés

Kilenc év telt el az [1] összefoglaló cikk óta, ahol a szerző nagy alaposággal járta körül a témát, bemutatta számos SMR típus alapvető jellemzőit, a tervek, a megvalósítás akkori helyzetét. Most egyrészt kiegészítjük az ott leírtakat az újabb fejleményekkel; másrészt bemutatjuk, hogy milyen új motivációk léptek fel elsősorban az SMR-ek klímavédelmi potenciálját illetően.

Az elmúlt 9 év alatt látszólag kevés előrehaladás történt, de az utóbbi néhány évben jelentős felpezsdülés tapasztalható. Ezt jelzi a Nemzetközi Atomenergia Ügynökség (NAÜ) 2021-ben megjelent [2] „roadmap”-je a kis moduláris reaktorok elterjesztéséről, valamint az OECD/NEA szintén 2021-es kiadványa [3], amely az SMR-ekkel kapcsolatos lehetőségeket és kihívásokat veszi számba. Az Európai Bizottság Közös Kutatóközpontjának (JRC) tanulmánya [52] alapján a közelmúlt fontos hírévé vált, hogy az EU 2020/852-es ún. „Taxonomy” rendeletében a nukleáris energiát is klímabarát energiaként kívánják szerepeltetni. A tanulmány megállapítja, hogy a klímapolitikai célok eléréséhez jelentősen hozzá tud járulni az atomenergia és azon belül az SMR-eken alapuló erőművek.

Melyek a kisméretű moduláris reaktorok alapvető jellemzői:

- az egy reaktorra (modulra) eső villamos teljesítmény maximum néhány száz MWe, bár a valóban modulárisnak tekinthető tervek esetén ez inkább max. 100 MWe;
- a tervek lehetővé teszik, vagy eleve olyanok, hogy egy erőmű több ilyen modulból álló rendszer legyen, ezáltal jelentős létesítési és üzemeltetési költségek takaríthatók meg;
- hasznosítva az eddigi atomerőművek tervezési és üzemeltetési tapasztalatait, azoknál modulonként lényegesen egyszerűbb és kevesebb elemet tartalmaznak a rendszerek;
- a biztonsági rendszerek elsősorban vagy kizárólagosan passzív megoldásokat alkalmaznak, így üzemzavar,

baleset esetén semmi, vagy csak minimális operátori beavatkozásra van szükség;

- a reaktor és az erőmű fődarabjait, rendszereit ipari körülmények között sorozatban lehet (és érdemes) gyártani, ellenőrizni és a minőséget biztosítani.

A fenti tulajdonságok eredményeképpen az ilyen rendszerek engedélyezése, építése, létesítése és üzembe helyezése lényegesen gyorsabban, hatékonyabban történhet meg a hagyományos atomerőművekhez képest. Bizonyos darabszám fölött nagyon valószínű, hogy az SMR-ek gazdaságossági mutatói jobbak lesznek a nagy atomerőművek mutatóinál [38, 39].

További jelentőséggel bír, hogy az SMR-ek klímavédelmi előnyökkel is kecsegtetnek. Tekintettel arra, hogy az atomerőművek „karbonlábnyoma” elsősorban a beépített anyagok és berendezések gyártásából származik, a kompakt konstrukciók, a kevesebb elemszám, a kisebb tömegű egységek miatt az építésükhöz szükséges anyagmennyiség (elsősorban acél és beton) – szerencsés esetben még egyégszerű teljesítménykapacitásra vonatkoztatva is – kevesebb. Ez CO<sub>2</sub>-kibocsátás megtakarítását eredményezi a nagy atomerőművekhez képest is. A klímavédelem szempontjából szintén fontos, hogy többféle lehetőség is kínálkozik az SMR-ek rugalmas teljesítménykövető („load follow”) üzemmódjára, ami által növelik a megújuló energiaforrások alkalmazásának lehetőségét. Aktívan hozzájárulhatnak a tiszta energiahordozók (pl. hidrogén vagy metán) termeléséhez is [14, 39, 40].

## Előzmények és motivációk

A könnyen kezelhető, nagy megbízhatóságú kiserőművekről korábban azt gondolták, hogy távoli, ritkán lakott területeken (pl. Kanada [4], Oroszország északi területei), vagy fejlődő országokban lehet létjogosultságuk. Általában az volt az elképzelés, hogy a helyszínen csak az egyszerű, rutin üzemeltetési tevékenységet kell végezni, a karbantartást, fűtőelem cserét stb. vagy úgy oldják meg, hogy az egész berendezést elszállítják és helyette egy másikat telepítenek, vagy egy arra szakosodott csapat, megfelelő felszereléssel ellátva néhány évenként a

helyszínre látogat. Ilyennek tekinthető az orosz KLT-40S úszó reaktor, [18].

Újabban az SMR-ekkel kapcsolatos motivációk lényegesen kiegészültek:

- a hosszú idő alatt létesíthető, egyedi, nagyteljesítményű blokkok helyett egy kisteljesítményű modulokból (blokkokból) álló erőmű sokkal gyorsabban termelővé válik, majd az újabb modulok elkészültével a termelés fokozatosan nő;
- az egyes modulok gyári, sorozatban való előállításuk jobb minőséget és alacsonyabb költséget biztosít;
- nagyszámú azonos modul esetén a karbantartási, átrakási műveletek is hatékony, rutin ipari tevékenységekké válnak;
- a számos kis modulból álló rendszer jó lehetőséget kínál a leadott teljesítmény változtatására, a rugalmas, „load follow” üzemmódra;
- több olyan terv is rendelkezésre áll, amely különböző „co-generation”-ra is képes, tehát a „völgyidőszakban” a rendszer rugalmasan átáll hidrogén (H<sub>2</sub>) termelésre, tengervíz sótalánításra, vagy valamely más, nagy energiaigényű, de megszakítható ipari folyamat támogatására [14];
- így az SMR rendszerek jelentős szerepet játszhatnak a klímaváltozás megfékezésében és a klímaváltozás egyes következményeinek kompenzálásában;
- a jelentősen megnövelt megbízhatóságú és biztonságosságú kis modulok az elképzelhető legsúlyosabb balesetek esetén is csak egészen szűk területen okozhatnak potenciális veszélyt;
- a megnövelt megbízhatóság és biztonság, kiemelt lehetőséget biztosít olyan országok számára, amelyek csekély nukleáris tapasztalattal és korlátozott technológiai háttérrel rendelkeznek;
- több olyan SMR is tervezés alatt van, amely a transzuránok és a hasadási termékek elégetésére, illetve hasadóanyag tenyésztésre is alkalmas. Ezekkel - azon túl, hogy lényegesen megnövelik az üzemanyag kihasználását - jelentősen lerövidíthető a visszamaradó nagy aktivitású hulladék mennyisége és szükséges tárolási ideje;
- az SMR-ek gazdaságossága összetett kérdés [39], de jó esély van arra, hogy a modularitás, a rövid létesítési idő, a kisebb fajlagos anyagigény (beton, acél), a kisebb területigény stb. miatt versenyképes, sőt akár gazdaságosabb lehet a nagy erőművekhez képest;
- az egyszerűbb, tipizált, gyárilag szerelt elemek, modulok gyorsabb létesítést, rövidebb építési időt biztosítanak, ami jobban tervezhető költségeket és gyorsabb megtérülést ígér a befektetők számára;
- a fentiek alapján a lakossággal való elfogadtatás is (remélhetőleg) egyszerűbb és problémamentesebb lesz.

Ebben az évtizedben ki kell, hogy derüljön, hogy ezek a motivációk elegendőek-e az SMR-ek elterjedéséhez.

## Technológiai és biztonsági jellemzők

### Általános technológiai jellemzők

A modularitást is alapvető jellemzőnek tekintjük, tehát elsősorban olyan SMR-ekkel foglalkozunk, ahol a tervezők figyelembe veszik a többmodulos kiépítések előnyeit. Ugyanakkor biztonsági szempontból a modulok közelsége, - esetleges kölcsönhatásuk miatt, - inkább hátrányt jelenthet, tehát fontos bizonyítani, hogy ezek a hátrányok elenyészőek.

A NAÜ „Roadmap” [2] dokumentuma szerint is a modularizáció kulcseleme a koncepciónak, mind a tervezés, mind a létesítés és az elrendezés tekintetében. A moduláris tervezés arra utal, hogy az egyes komponenseket - lehetőleg tipizálható és külön tervezhető - modulokból kell felépíteni. A létesítés modularizálása arra utal, hogy gyárilag összeszerelt és tesztelt modulokat szállítanak a létesítés helyszínére. A moduláris elrendezés azt jelenti, hogy egy-egy reaktor és a hozzá tartozó biztonsági rendszerek egymástól függetlenül is működőképes modulokat képeznek, és üzemzavar esetén függetlenül is képesek a biztonságos állapotot elérni. Ugyanakkor a modulok számos termelési rendszeren, eszközön osztozhatnak növelve ezáltal a gazdaságosságot.

Alapvetően az SMR-ek két fő csoportját különböztethetjük meg:

- valamely kipróbált és széles körben ismert alaptípus evolúciós alapon való továbbfejlesztését (A csoport);
- alapvetően új megoldásokat, amelyekhez hasonlóak kommerciálisan még sehol sem működtek (B csoport).

Az A csoportba (3+ generáció) tartozónak tekintjük a nyomott vizes [9-11, 17-21] és forralóvizes típusokat [15, 16], valamint a CANDU elvei alapján működőket [5], továbbá a folyékonyfém-hűtésű gyorsreaktorokat [27-30]. A nagy hőmérsékletű gázhűtéses típusokat [22-25] a B csoportba tartozónak (4. generációs) tekintjük annak ellenére, hogy létezett már ilyen üzemelő reaktor, amit megoldatlan technikai problémák miatt leállítottak [42]. Szintén ide tartoznak azok is, amelyek valamilyen sóolvadékba kevert üzemanyaggal működnek [31-36].

Igen részletes ismertetést találhatók a NAÜ 2020-ban megjelent „Előrehaladás a kisméretű moduláris atomerőművek technológia fejlődésében” című kiadványában [7].

### Biztonság

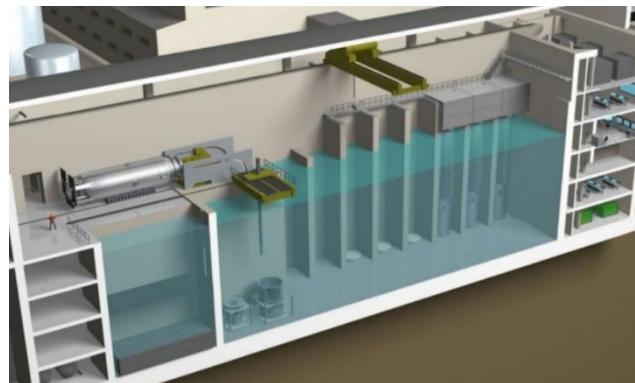
A biztonság tekintetében a tervezett SMR-eket tipikusan a passzív megoldások elsődleges, vagy kizárólagos alkalmazása jellemzi. A tervek jelentős része olyan, hogy bármely üzemzavar, baleset, környezeti vagy természeti katasztrófa esetén is teljesül a „walk away” feltétel, azaz akkor sem történhet jelentős, környezetet, lakosságot érintő hatás, ha az esemény közben, vagy azt követően a rendszer hosszabb időre magára marad [7, 37]. A passzív biztonságok lényeges eleme a külső szolgáltatásoktól való függetlenség is, azaz, hogy ne függjön a rendszer biztonsága a külső elektromos hálózattól, hűtővízellátástól, dízlelüzemanyagtól stb.

A fenti célok elérését segíti a viszonylag kis egységteljesítmény, de ez önmagában nem elegendő. Szükségesek olyan innovatív megoldások is, amelyek hasznosítják az atomerőművekkel kapcsolatban eddig összegyűlt összes pozitív és negatív tapasztalatot, valamint a legmodernebb technológiák által kínált lehetőségeket. A modern technológiák egyik fontos eredménye (az anyag- és gyártástechnológián túl) az is, hogy a biztonságot érintő komplex fizikai-technológiai folyamatok valóság-hű modellezésére ma nagyságrendekkel pontosabb, hatékonyabb lehetőségek állnak rendelkezésre, mint 30-50 évvel ezelőtt, a ma üzemelő harmadik generációs erőművek tervezésének idején. Így a terveknek megfelelő normál üzemi és baleseti folyamatoknak a rendszerek biztonságát igazoló modellezése sokkal megbízhatóbb és részletesebb. Ennek köszönhetően válhatnak egyszerre egyszerűbbé és megbízhatóbbá az SMR-ek.

A kompakt, passzív és nagy megbízhatóságú rendszerek működése az „evolúciós” fejlesztésű, „A” csoportba tartozó terveknel, prototípusoknál a legkönnyebben megérthető. Ilyenek például az amerikai NuScale [9], vagy az argentin CAREM-25 [10, 11] típusok, amelyek nyomottvízes erőművek. A NuScale egyértelműen modernebb tervezés, így ezen keresztül érzékeltejük az „A” csoportba tartozó SMR-ek tipikus jellemzőit:

- alapvetően moduláris tervezés: a reaktorépületben, egy talajszint alatti medencében, falakkal elválasztott rekeszekbe merülve 6-12 reaktormodul helyezkedik el, amelyek egyenként 60-75 MWe teljesítményt szolgáltatnak;
- a reaktormodulok egyenként egy nagynyomásra tervezett konténment-tartályban foglalnak helyet (ezek a tartályok merülnek a medence rekeszeibe), amely tartályokból (lényegében) csak a tápvíz- és gőzvezetékek ágaznak ki;
- a konténmentben a legnagyobb egység a gőzfejlesztővel egybeépített reaktortartály;
- a reaktor és a gőzfejlesztő között normál üzemben a primer hűtőközeg természetes cirkulációval kering;
- átrakáskor, karbantartáskor az adott konténment-tartályt leválasztják a külső csatlakozásairól, és a teljes modult egyben átemelik a medencén belül a karbantartó pozícióba, ahol szétszerelik és elvégzik a szükséges műveleteket, miközben a többi modul zavartalanul üzemelhet (lásd 1. ábra);
- több modul (pl. 6) párhuzamosan csatlakozik egy szekunder rendszerre, turbogenerátorra, illetve egy közös vezénylőhöz.

Kisebb üzemzavarok, nem hűtőközeg vesztéssel (LOCA) járó balesetek esetén, operátori beavatkozás nélkül a maradványhő elvonása természetes cirkulációval a konténment falán elhelyezett lehűtő radiátorokon keresztül a medence vizének adja át a hőt, amely még azután is biztosítja a megfelelő hőelvonást, amikor a medence vize teljesen elpárolog (kb. 30 nap után), mivel addigra a maradványhő már annyira lecsökken, hogy a légűtés is elegendő.



1. ábra: A NuScale SMR medencéjének metszete hat modulhellyel, háromban már moduldal

A LOCA lehetősége lényegében csak a primer-szekunder átfolyást jelenti. Ilyenkor a reaktor leállítását követően a tápvíz- és gőzvezetékek lezáródnak a konténment falán kívül, és a reaktortartály túlnyomására kinyitnak a megfelelő lefúvató szelepek a konténment felé. Ennél a tervnél a „biztonsági zónahűtő rendszer”-t mindössze ezek a szelepek képviselik. A szelepek nyitásával a konténment és a reaktortartály nyomása kiegyenlítődik. A medencébe merülő konténment belső falán a víz kondenzálódik és a visszafolyást biztosító szelepeken keresztül visszajut a reaktorba. Ettől kezdve a létrejövő természetes cirkuláció folyamatosan szállítja a hőt a konténment falán keresztül a medencébe, tehát a nem-LOCA esetekhez hasonlóan, külső beavatkozás és aktív elem nélkül a hőelvonás időhatár nélkül biztosított (3. ábra).

Potenciális környezeti hatással járó baleset csak zónaolvasás és a konténment-tartály sérülése esetén történhet, de a tervezők valószínűségi elemzései szerint az ilyen esetek gyakorisága  $3 \cdot 10^{-10}$ /év körüli érték egy-egy modulra, tehát gyakorlatilag kizártnak tekinthető. A kis egységteljesítménynek köszönhetően, valamint azért, mert egy ilyen helyzet nem, vagy csak meglehetősen hosszú idővel a kezdeti eseményt követően alakulhat ki, balesetelhárítási intézkedések csak egy igen szűk zónán belül válhatnak szükségessé. Egyes típusok tervezői (pl. NuScale) szerint a hagyományos balesetelhárítási zónára egyáltalán nincs szükség, semmilyen baleset hatása nem nyúlhat túl a telephely határain.

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

## Főbb típusok

A NAÜ 2020-as, összefoglaló kiadványa [7] több mint 70 különféle SMR típust mutat be: egyesek már üzemelnek, vagy az üzembe helyezés, létesítés fázisaiban vannak; mások már elnyerték bizonyos hatósági engedélyeket és a közeljövőben létesítésük megkezdése várható; mások még a tervezés különböző fázisaiban tartanak. Az 1. táblázatban megadjuk az általunk legfontosabbnak ítélt SMR típusokat a [2, 7, 8] referenciák alapján, de a státusz megadásánál figyelembe vettük az interneten elérhető legfrissebb információt. A táblázat szerkezete megegyezik az [1] referencia 1. táblázatával a könnyebb összevethetőség végett, de kihagytunk néhány olyan típust, amelyek a

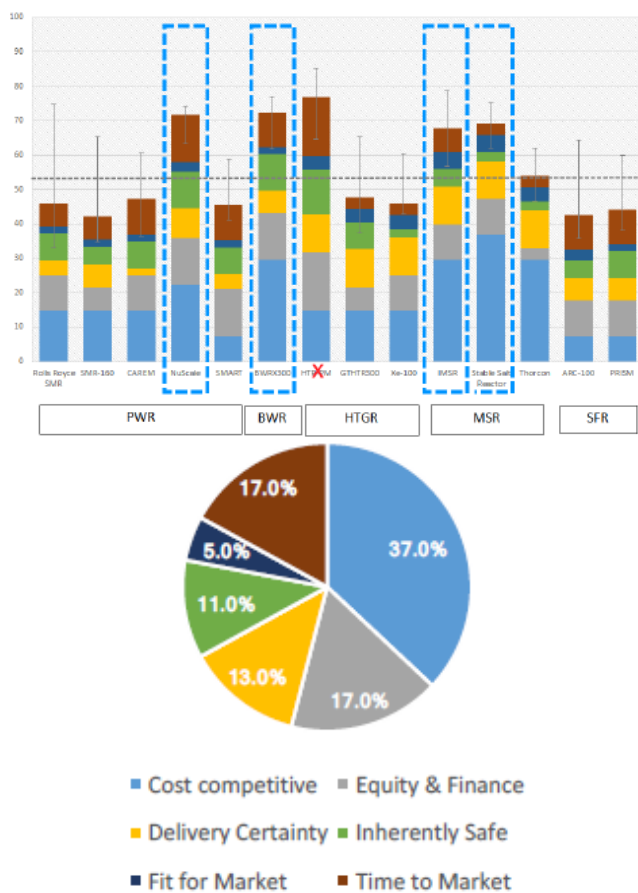
terveit az utóbbi években nem fejlesztették, és bevettünk néhány olyat, amelyek ígéretes és lényegesen előre haladt a tervezésük.

A táblázatból látható, hogy pillanatnyilag három üzemelő prototípus létezik, de azok közül egy (a japán HTTR) csak demonstratív prototípus, amely villamosenergiát nem termel. Két további prototípus erőmű épül, azaz rendelkezik létesítési engedéllyel. Típusengedéllyel három rendelkezik, amelyeknél várható, hogy hamarosan a létesítési engedélyezés megindul. A többi típus még a tervezés valamilyen fázisában tart.

A NuScale esetében már kiválasztották az első telephelyet is (az Idaho National Laboratory területén) [12], amelyre hamarosan benyújtják a kombinált létesítési és üzemeltetési engedélykérelmet (COLA) a US NRC-hoz. Erre a típusra jelentős nemzetközi érdeklődés van, többek között Románia, Bulgária, Lengyelország és Ghana a közelmúltban hivatalos szándéknyilatkozatokat írtak alá [13].

A különböző típusok alapos összehasonlítását 2020-ban a Tractebel cég mutatta be [37], amelyben a legfontosabb jellemzők, úgymint:

- gazdaságosság (cost competitive)
- fenntarthatóság (sustainability)
- inherens biztonság (inherently safe)
- piackészség (fit for market)
- legkorábbi piaci rendelkezésre állás (time to market) alapján, több különböző értékelési modellel vetették össze a legígéretesebb típusokat (2. ábra).



2. ábra: A legígéretesebb SMR típusok összevetése Tractebel [37] alapján

A tanulmány szerint a súlyozott követelményrendszernek leginkább öt típus, az amerikai NuScale, az amerikai-japán BWRX300, a kanadai IMSR és a brit-kanadai SSR-W felelnek meg, valamint a versenyből – ismeretlen indokkal kizárt – kínai HTR-PM.

## Engedélyezési kérdések

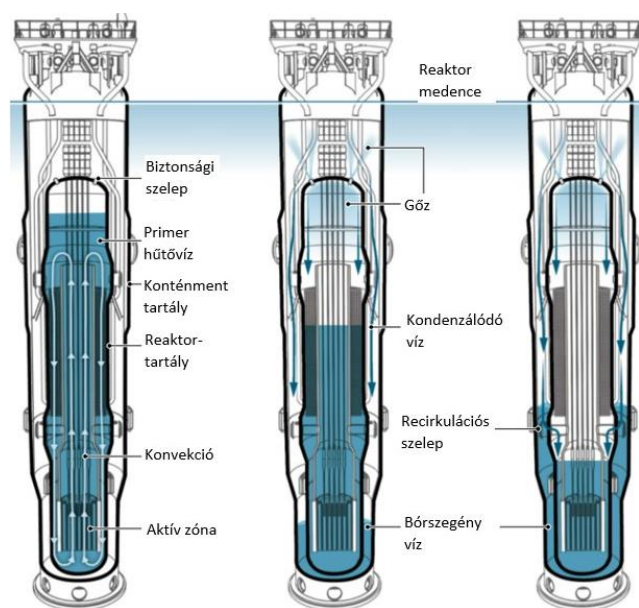
Az A csoportba tartozó tervek engedélyezése lényegesen egyszerűbb a B csoporthoz képest, de itt is sajátos problémákat okoz az, hogy a hatósági szabályozás szinte kizárólag a már létező, vagy a létesíteni szándékozott erőmű alaptípusokra van kidolgozva. Magyarországon – és még sok más országban – ez a nyomottvízes atomerőműveket jelenti. Másutt idetartoznak még a forralóvízes reaktorok, a CANDU (nehézvizes, természetes urános, „nyomott csöves” reaktor), valamint egyes gyorsneutronos tenyésztőreaktorok (LMFBR). A különböző SMR tervek, még ha valamelyest hasonlítanak is egyes „hagyományos” típusokra, lényeges újdonságokat tartalmaznak, amelyek közül némelyik ellentétes az engedélyezési követelményekkel. Mindezeket talán legjobban a US NRC hatóság által a NuScale típusra [12] a közelmúltban kiadott típusengedély [43] egyes részletei illusztrálják.

A kiadott engedélyezési dokumentációból [44] számos figyelemre méltó dolog derül ki:

- Vezénylői személyzet: a terv szerint a 12 modulból álló rendszert mindössze 6 operátor irányítja egy közös vezénylőteremből. Ez nem felel meg a hatályos jogszabályi követelményeknek, így felmentést kellett kérni a követelmény alól.
- Egyes problémák esetén a US NRC elegendőnek ítélte, ha azok feloldása csak a kombinált létesítési és üzemeltetési engedélyezés (COLA) során történik meg. Ilyenek:
  - Az árnyékoló fedél tervei (nem eléggé részletes információ).
  - Potenciális konténmentszivárgás az éghető gázok monitorozására szolgáló rendszeren keresztül.
  - A gőzfejlesztő helikális csöveinek stabilitása a sűrűség hullámok rezonanciájával szemben visszaáramlás esetén.
- Az újszerű (first-of-a-kind, FOAK) megoldások számos kérdésben speciális megítélést igényeltek. Ezek közül néhány érdekesség:
  - A passzív biztonsági zónahűtőrendszer lefúvató szelepeinek indokolatlan nyitását megakadályozó szelep (IAB), amely nem rendelkezik redundanciával. Az engedélyezés során elvégzett kisebb áttervezés után a US NRC – a kockázat alapú döntéshozási elvei alapján – elfogadta a megoldást.
  - A NuScale SMR nem tartalmaz biztonsági besorolási elektromos ellátási rendszereket (Class 1E AC or DC systems). A tervező megfelelő módon bizonyítani tudta, hogy ilyen rendszerekre nincs szükség a reaktor biztonságos állapotba hozásához és annak hosszú idejű fenntartásához (> 30 nap). Így a US NRC felmentést adott az ilyen rendszerek megkövetelése alól.
  - Kampányvégi időszakban, bizonyos üzemzavari helyzetekben a hosszú távú passzív hőelvonó

rendszer működése során (akár üzemzavart, akár balesetet követően) elvi lehetősége van annak, hogy a kontémennt belső falán kondenzálódó bórmentes víz a reaktorba kerülve rekritikusságot okozzon (lásd: 3. ábra). A tervező részletes elemzéssel bizonyította, hogy a kialakuló teljesítmény nem haladná meg a névleges érték 10%-át, amit viszont az üzemzavari zónahűtő rendszer kezelni képes, és a fűtőelemek teljes hosszukban vízzel fedettek maradnak. Így a US NRC elfogadta a rekritikussággal kapcsolatos felmentési kérelmet.

A felmentéssel feloldott tételek eseteiben a NuScale javaslatot tett az előírások módosítására, amelynek elfogadási eljárását elindította a US NRC. A NuScale SMR típusengedély iránti kérelem elbírálása több mint 3,5 évet vett igénybe, de ezt követően a létesítési és üzemeltetési összevont engedély (COLA) megadása már lényegesen gyorsabb.



3. ábra: A NuScale modul felépítése, és a baleseti zónahűtő rendszer működése, illetve annak során a bórígulás elvi lehetősége

A NAÜ is jelentős erőfeszítéseket tesz arra, hogy a nemzeti hatóságokat felkészítse az SMR-ek engedélyezésére, hogy segítse azok gyorsabb elterjedését [50]. Ebben az anyagban hangsúlyozzák, hogy az SMR-ek engedélyezésének előmozdítására a nemzeti hatóságoknak technológiaselemleges szabályozást kell létrehozni és alkalmazni. A NAÜ egy külön projektet is indított arra, hogy vizsgálja a jelenlegi NAÜ-s 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 klímaselemlegesség csak úgy érhető el, ha a nukleáris erőművi kapacitás nem csökken a jelenlegi érték alá [52]. Az elemzések megmutatták, hogy egy 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.

A fentiek érdekében egy EU szintű együttműködési program létrehozását tervezik [51], 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, Franciaország, Finnország és Románia hatóságai tesztfeladatként egy-egy már létező SMR terv értékelését határozták el, amely együttműködéshez szándéknyilatkozatot írtak alá. Az előzetes engedélyeztetés lehetősége (típusengedély) és a mélységi védelem elvének SMR-ekre való adaptálása gyorsíthatja az engedélyezési folyamatokat. Az engedélyezésnek kiemelt figyelmet kell fordítania a vészhelyzeti tervezési zóna szabályozására [53] is. Egyes SMR típusok esetében a biztonsági elemzések azt támasztják alá, hogy súlyos baleset bekövetkezése kizárható. Ilyenkor vészhelyzeti tervezési zónára akár nem is feltétlenül van szükség.

A vonatkozó nemzetközi egyezmények (NSD, Espoo-i, Aarhusi, stb) felülvizsgálatának érdekében az európai együttműködés az információgyűjtés fázisában tart. Távlati célként azt határozták meg, hogy 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 4. ábra).

## Klíma- és környezetvédelmi aspektusok

A világ jelentős részén az új atomerőművek létesítése az utóbbi egy-két évtizedben lelassult, az atomerőművi park egyre inkább elöregszik, és az élettartam-hosszabbításnak nyilvánvalóan korlátai vannak. A jelenlegi egyre magasabb biztonsági elvárásoknak megfelelő 3+ generációs (3G+) nagyerőművek létesítése viszont egyre hosszabb időt vesz igénybe, és az eredetileg tervezett költségek jelentős túllépése is jellemző (lásd: Olkiluoto 3, Flamanville 3). Így a nukleáris energiatermelés részarányának egy-két évtized alatt történő jelentős növelése meglehetősen reménytelennek tűnik. Erre kínálnak megoldást az SMR-ek.

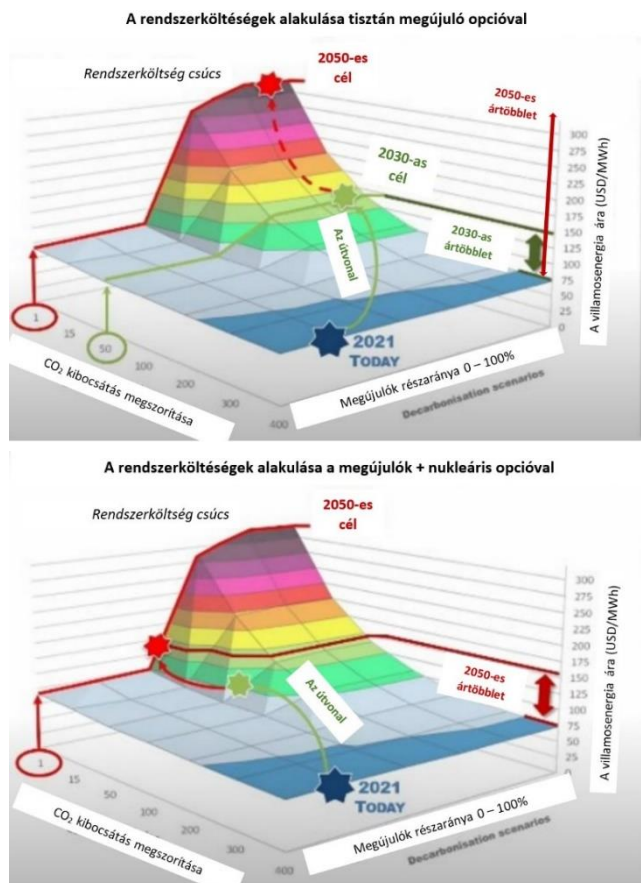
Az atomenergia legfontosabb környezetvédelmi problémájának a kiegészítő fűtőelemek kezelését és végleges elhelyezését tekintik. Erre a problémára hatékony és ráadásul gazdaságos megoldást ígér az SSR-W típus [34].

### Klímavédelmi lehetőségek

A glasgow-i klímacsúcson (COP26) [45] elhatározott célok eléréséhez ma már az országok jelentős része szerint nélkülözhetetlen az atomenergia felhasználásának lényeges bővítése [46] a megújuló energiahordozók mellett. Nyilvánvaló, hogy a szükséges bővítési rátát csak az SMR-ek gyors elterjesztésével lehet biztosítani. Úgy tűnik, hogy erre a technikai lehetőség rendelkezésre áll, és számos jel

utal arra, hogy sok helyen a politikai elhatározás is biztosított [6-14].

A COP26 keretében 2021 november 5-én egy speciális értekezlet zajlott „A Path Towards Affordable Zero Carbon Technologies” (A finanszírozható szénmentes technológiák eléréséhez vezető út) címen. Az értekezlet egyik legfontosabb előadását Dr. Diane Cameron, az OECD/NEA igazgatója tartotta [47]. Dr. Cameron előadásában az alábbi ábrákkal szemléltette, hogy milyen költségekkel lehet elérni a 2030-as és 2050-es klímacélok különböző stratégiák mellett (4-5. ábrák).

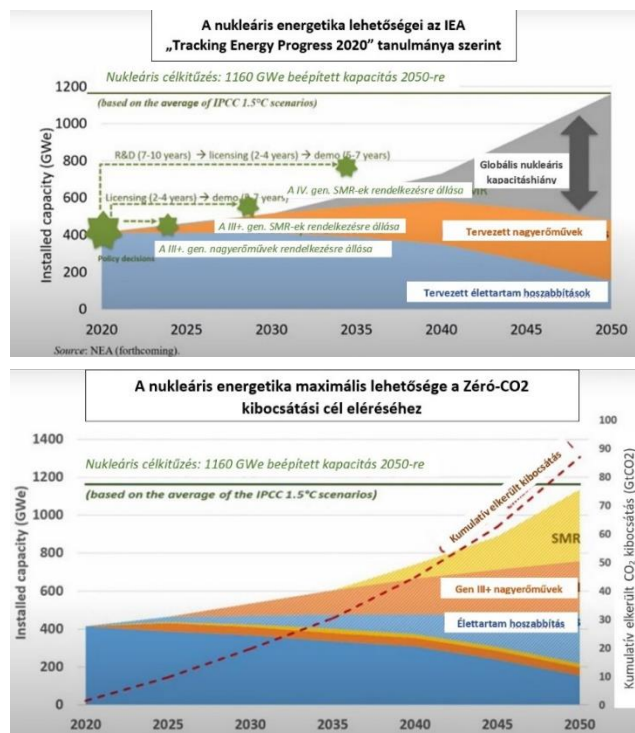


4. ábra: A 2030-as és 2050-es célok elérésének lehetséges útjai és költségei az OECD/NEA szerint [47]

A 4. ábra első diájáról látható, hogy ha a prognosztizált igénynövekedést csak megújulókkal kívánjuk fedezni, akkor – figyelembe véve az ahhoz kapcsolódó jelentős járulékos költségeket (hálózati költségek, a megújuló változó rendelkezésre állásának kiegyenlítése stb.) – a 2030-as célok még finanszírozhatók akár tisztán megújulókkal is, a 2050-es „net-zéró” szint elérése azonban elfogadhatatlanul magas költségekkel járna. A második dia egy „kiegyensúlyozott útvonalat” szemléltet a megújuló és a nukleáris energiatermelés párhuzamos felfuttatásával, amely végig vállalhatóan tűnő többletköltségeket mutat.

Az 5. ábrán bemutatott két dia szemlélteti a világ nukleáris energiatermelésének várható (vagy kívánatos) alakulását a következő évtizedekben. Mindkét ábrából kitűnik, hogy az OECD az SMR-eknek jelentős szerepet szán. A könnyűvízes SMR-ek (az „A” csoportba tartozók) már 2030 előtt is jelentékeny részt vállalhatnak, de 2030 után egyre nagyobb mértékben kell belépniük a más elveken alapuló konstrukcióknak is („B” csoport). Az OECD/IEA 2020-as

részletes riportja [48] alátámasztja az itt bemutatott gazdasági adatokat.



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

Az előadás [47] megerősítette, hogy az SMR-ek jelentősen segíthetik a nukleáris energiatermelés felfuttatását, mivel lényegesen gyorsabb létesítést tesznek lehetővé alapvetően két tényező révén: a típusengedélyezés alkalmazása és a modularitásból eredő gyorsabb létesítési technológia. A gyorsabb üzembeállítás miatt a befektetett tőke megtérülése hamarabb megindul, ami csökkenti a kamatterheket, javítja a finanszírozási lehetőségeket.

A World Nuclear Association (WNA) 2020-as riportja [14] is alátámasztja, hogy a nukleáris energiatermelés gyors elterjesztése nélkül nem lehetséges elérni a kitűzött célokat. A 6. ábra alapján egyértelmű, hogy a jelenlegi hozzáállás alapján a hosszú távú célok nem érhetők el, így a hozzáállás drasztikus megváltoztatására van szükség. Az egyetlen lehetőséget az atomenergia felfuttatása jelenti, amely viszont csak az SMR-ek alkalmazásával lehetséges.

A megújuló energiákkal kapcsolatban közismerten a legnagyobb probléma a változó rendelkezésre állás, ami nem felel meg a pillanatnyi igényeknek. Szükséges lenne valamilyen nagy volumenű energiatárolási rendszerre a szél- és napenergia optimális kihasználásához. Jelenleg az egyetlen ilyen megoldást a szivattyús-tárolós erőművek jelentik, azonban ilyenek kialakítása csak bizonyos speciális helyeken lehetséges, így ez a kapacitás potenciálisan is erősen korlátozott. Az SMR-ek erre a problémára is megoldást kínálnak. Ugyanis lehetséges olyan összetett rendszereket kialakítani, amelyekben a nukleáris energiaforrás folyamatosan, egyenletes teljesítménnyel üzemel, de amint a villamosenergia-igény csökken, a megtermelt energia egy részét a rendszer átirányítja egy olyan kémiai folyamat támogatására, amely energiát igényel, és amelynek a végterméke folyamatosan gyűjthető [1, 41].

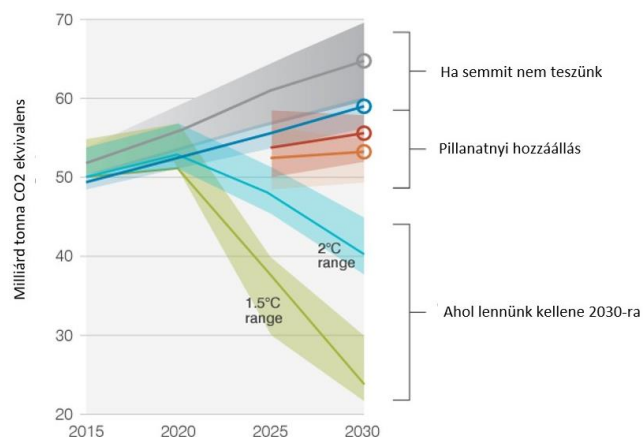
Ilyen kémiai folyamatok lehetnek például a következők:

- hidrogéntermelés alacsony vagy magas hőmérsékletű elektrolízissel;
- metántermelés víz és befogott széndioxid felhasználásával;
- tengervíz sótalanítása.

Az első két folyamat tipikusan energiát tárol, amely később más helyen felhasználható. A harmadikra viszont folyamatosan növekszik az igény a területek elsivatagosodásával és a népesedés növekedésével a tengerpartokon.

Az ilyen kettős felhasználású rendszerek úgy oldhatják meg a teljesítménykövető villamosenergia-termelést, hogy közben a nukleáris üzemanyagfelhasználás hosszútávon kiszámítható és tervezhető marad, a nukleáris berendezések öregedését nem gyorsítják a gyakori teljesítményváltozások. Megfelelő méretezés esetén a kémiai folyamattal termelt termék mennyisége hosszabb időátlagban szintén tervezhető.

Ilyen co-generációs lehetőségek persze - elvben - a hagyományos atomerőművek esetében is fennállnak, de azok nagyobb mérete igen nehézkessé tenné az ilyen termelés megszervezését, és ezért feltehetően nem is lenne gazdaságos. Az SMR-ek esetében ezek a problémák sokkal könnyebben áthidalhatók és az SMR-ek teljesítménytartománya is sokkal inkább megfelel az ilyen folyamatok igényeinek.



6. ábra: A CO<sub>2</sub> kibocsátás kívánatos és szükséges menete 2030-ig [14]

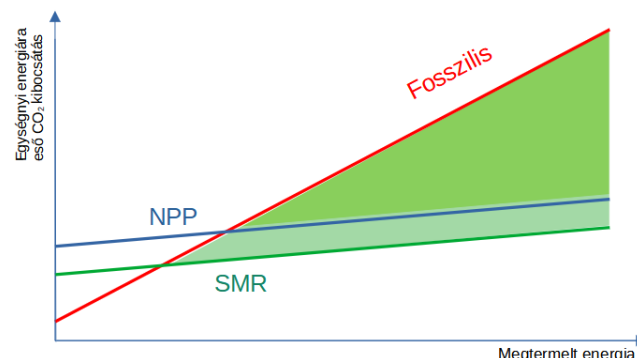
Fontos azonban megjegyezni, hogy az energiatermelés során a kiegészítő vagy fő funkcióként alkalmazott kémiai folyamatot, a lehetséges kölcsönhatásokat a biztonsági elemzésekben és a veszélyhelyzet-kezelés tervezése során is figyelembe kell venni. Lényegében az összes SMR-re igaz, hogy az egyszerűsített, kompakt kiépítésének több lényeges környezetvédelmi előnye is van. Ezek:

- a kisebb telephelyszükséglet;
- a kisebb anyagfelhasználás (acél, beton);
- a kevesebb kis és közepes aktivitású radioaktív hulladéktermelés.

Talán meglepő, de ezek a megállapítások egységnyi megtermelt energiamennyiségre számítva is igazak a legtöbb esetben [8]. Ez onnan adódik, hogy a kompakt, integrált kiépítés eleve kisebb befogadó épületet kíván, a több azonos modul osztozni tud a kiszolgáló épületeken,

berendezéseken stb. Számos olyan terv létezik, ahol több, függetlenül működő reaktormodul lát el egyetlen turbógenerátor egységet. Fontos egyszerűsítés a reaktortartállyal egybeépített gőzfejlesztő (integrált kivitel), valamint a természetes cirkuláció alkalmazása normál üzemben és üzemzavari hőelvonás esetében. Talán az egyik legfontosabb méretcsökkentő hatás a kisméretű konténment-tartályok alkalmazása, amelyek anyagszükséglete még úgy is csak egy töredéke egy szokásos méretű konténmentnek, hogy egy moduláris erőműben több ilyen „kis” konténment-tartály szükséges (lásd: 1. és 3. ábrák).

A kis méreteknek és a csökkentett anyagszükségletnek azért van jelentős környezetvédelmi és klímavédelmi jelentősége, mert az atomerőművek esetében a CO<sub>2</sub> kibocsátás legnagyobb része a létesítés, gyártás során történik, elsősorban a cement és az acél gyártása során. Ezért a fosszilis erőművekhez képesti kibocsátásmegtakarításról attól az időponttól kezdve beszélhetünk, amikor az atomerőmű már megtermelt annyi energiát, ami megfelel annak a mennyiségnek, amennyit egy átlagos fosszilis erőmű termelne az atomerőmű létesítése kapcsán kibocsátott CO<sub>2</sub> mennyiség árán. Ezt szemlélteti a 7. ábra. Sajnos, megbízható adatokat nem találtunk, így csak a viselkedés jellegét tudjuk szemléltetni. Az egyenesek indulási pontjai megfelelnek a létesítés során kibocsátott CO<sub>2</sub>-nek, a színezett területek meg a fosszilis energiatermeléshez képest megtakarított CO<sub>2</sub> kibocsátást jelentik. Nyilván hasonló ábrák érvényesek a megújuló energiaforrásokat használó energiatermelésre is (víz, szél, nap stb.).



7. ábra: Az egységnyi teljesítményre eső összes CO<sub>2</sub> kibocsátás alakulásának jellege az átlagos fosszilis erőművek, a hagyományos atomerőművek és az SMR-ek esetében

Az MSR (sóolvadékos) reaktorok [32] különösen nagy ígéretet jelentenek ebből a szempontból (is), mert azok reaktortartályait és konténmentjeit nem kell nagy nyomásra tervezni. Az MSR-en belül az SSR altípus (Stable Salt Reactor) [34, 35] - 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 gőzfejlesztőkben nincs radioaktív anyag, így nem igényelnek biológiai védelmet. Az egységnyi teljesítményre vonatkoztatott helyigény és anyagigény tekintetében - a tervek szerint - ezek a típusok a legtakarékosabbak.

Sajátos lehetőséggel bír a Moltex Energy cég SSR-W típusa, amely nemrég nyerte el az előzetes típusengedélyt a kanadai hatóságtól [49]. Ez a modell - megfelelő reprocesszási háttérrel - lehetővé teszi, hogy a

kiegített üzemanyagban megmaradó és keletkező hasadóképes anyagokat (uránt és transzuránokat) tovább égesse. Amennyiben ilyen reaktorok jelentős mértékben elterjednének, lehetővé válna, hogy egyrészt jelentősen megnövekedjen a hasadóanyag kihasználtsága és ezáltal csökkenjenek a bányászati igények, másrészt visszamaradó nagy aktivitású hulladékban a nagyon hosszú felezési idejű, tartósan nagy radio-toxicitású anyagmennyiség is jelentősen lecsökkenjen. Mindamellettt a tervezők értékelése szerint egy ilyen reaktor létesítése lényegesen olcsóbb, mint a folyékonyfém-hűtésű gyorsreaktorok. Ha ez beigazolódik, akkor az [52]-ből kölcsönvett 8. ábra utolsó két oszlopa is jóval alacsonyabbá válna. Így a hulladék hosszútávú eltemetésének problémája is jelentősen egyszerűsödne, mivel, ha a nagy aktivitású hulladék mennyisége jelentősen lecsökken, és nem tartalmaz jelentős mennyiségű transzuránt és más hosszú felezési idejű izotópot (lásd. [52], 103. oldal), akkor akár már 1000 év biztonságos tárolás elegendő ahhoz, hogy a hulladék aktivitása a természetben előforduló uránérccek aktivitásával összemérhetővé váljon.

## Kilátások, potenciális hatások

Úgy tűnik, hogy 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 politikusi 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 a versenybe szállni, azonban a jelenleg üzemelő vagy épülő SMR-ek kis száma azt mutatja, hogy a felfuttatáshoz előbb ki kell épülnie a stabil fejlesztői és ipari háttérnek, és kormányzati támogatás is szükséges lehet [2,3].

Magyarország jelenlegi stratégiájában csak az SMR projektek nyomon követése szerepel. Igaz, hogy Magyarország a méretéhez képest a jelentősebb nukleáris programmal rendelkező országok közé tartozik, azonban a meglévő és a tervezett paksi blokkokhoz kapcsolódó

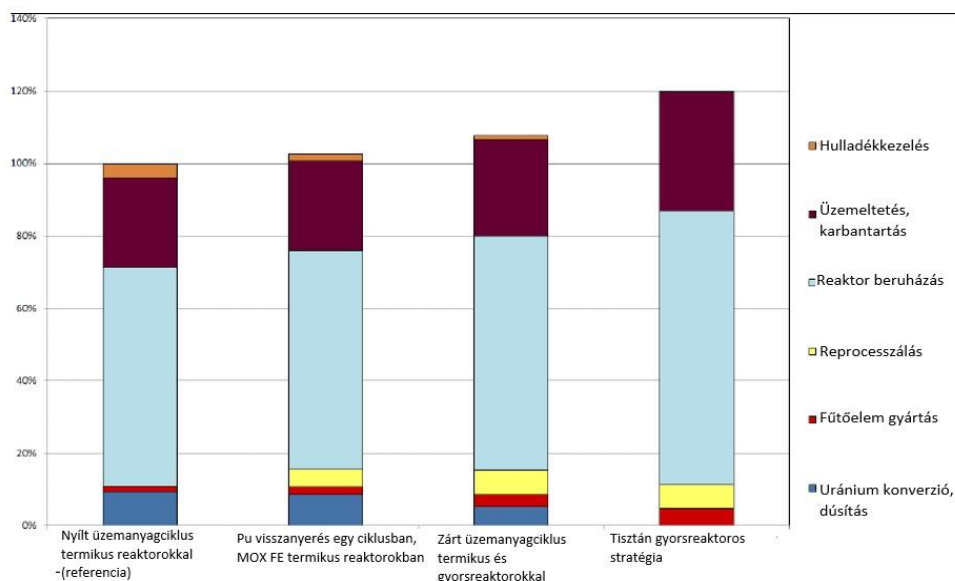
tevékenységek lekötik az ország ezirányú erőforrásainak nagy részét. Mivel az SMR-ek klímavédelmi és más előnyei nem vitathatók, hosszabb távon számolni kell hazai SMR létesítésével is. Ezért fontos, hogy mind a hazai szakembergárda, mind a politikai döntéshozók folyamatosan képesek legyenek.

## Összegzés

A klímavédelmi célok elérése érdekében egyre több szereplő egyetért abban, hogy a nukleáris energiatermelés felfuttatása szükségszerű. A nagy erőművek létesítése azonban egyre vontatottabban megy különösen a fejlett, nyugati országokban. Ennek legfőbb oka az lehet, hogy az egyre növekvő biztonsági elvárások miatt az alapvetően több évtizeddel ezelőtti koncepciókon nyugvó tervek egyre bonyolultabbá váltak. Így mára már elengedhetetlen, hogy tiszta lappal induló, új koncepciókon nyugvó terveket dolgozzanak ki. Alapos okunk van azt feltételezni, hogy a kisméretű moduláris reaktorokon alapuló tervek egyszerre gazdaságosabbak, biztonságosabbak lesznek a hagyományos nagyerőműveknél, valamint 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 IV. generációs technológiák fokozatos beléptetése közép- és hosszútávon további előnyökkel kecsegtet elsősorban a zárt üzemanyagciklus és a tóriumciklus széleskörű bevezetésével, valamint a nagy aktivitású hulladék mennyiségének jelentős csökkentésével.

Az Európai Unióban a taxonómia rendelet módosítása, az ENSREG és a WENRA kezdeményezései az engedélyezés fejlesztésére és egységesítésére, valamint az egységes típustervek kidolgozásának várható támogatása tovább növelheti az esélyét az SMR-ek európai elterjedésének. Számos EU ország támogatja, vagy legalábbis komolyan érdeklődik ezen a lehetőségek iránt.



8. ábra: A különböző nagyreaktoros üzemanyagciklus modellek költségbecslése ([52] alapján)



1. táblázat: A legfontosabb SMR típusok jellemzői és állapotuk

Reaktor (fejlesztő/szállító) ország	Típus, Hő/ Vill. telj. (MW)	Kialakítás, Reaktor méret (m)	Üzemanyag, kampány	Moderátor/ hőhordozó, paraméterei	Hűtés	Státusz
mPower (B&W + Bechtel) USA [15]	BWR 575 / 195	Integrált 27,4 × 4,15	69 köteg, 17 × 17 2,4 m aktív hossz 24 hó	víz / víz 319 °C, 148 bar	N: A S: P	KT
BWRX-300 (GE-Hitachi) USA-Japán [16]	BWR 900 / 300	Integrált n/a	240 köteg, 10 × 10 ABWR-rel lényegében azonos	víz 287 °C, 72 bar	N: P S: P	TE folyamatban (USA, Kanada)
SMR-160 (Holtec Int) USA [17]	PWR 525 / 160	Integrált ~31 × 3	57 köteg, 17 × 17 3,7 m aktív hossz 48 hó	víz / víz 321 °C, 155 bar	N: P S: P	TE (1. fázis, Kanada)
NuScale (NuScale) USA [9]	PWR 200(250) / 60(75)	Integrált 6-12 modul 17,7 × 2,7	37 köteg, 17 × 17 1,8 m aktív hossz 24 hó	víz / víz 321 C, 138 bar	N: P S: P	TE (NRC)
Úszó atomerőmű, (Afrikantov KLT-40S) Oroszország [18]	PWR 150 / 35	nem integrált hajón 1-2 modul	121 köteg, hatsz. 1,2 m aktív hossz 36 hó	víz / víz, 316 °C, 127 bar	N,S:A	Ü
ACP100 Kína [19]	PWR 385 / 125	integrált 10 × 3,35	57 köteg, 17 × 17 1,8 m aktív hossz 24 hó	víz / víz, 319,5 °C, 150 bar	N: A S: P	É
SMART D-Korea [20]	PWR 330 / 100	Integrált 18,5 × 5,9	57 köteg, 17 × 17 2 m aktív hossz 30 hó	víz / víz, 322 °C, 150 bar	N: A S: P	TE
CAREM (CNEA, INVAP) Argentína [10,11]	PWR 100 / 27	Integrált 11 × 3,3	61 köteg, hatsz. 1,4 m aktív hossz 18 hó	víz / víz, 326 °C, 122,25 bar	N: P S: P	É
NUWARD (EDF) Franciaorsz. [21]	PWR 540 / 170	Integrált 13 × 4 2 modul	76 köteg, 17 × 17 24 hó	víz / víz, 307 °C, 150 bar	N: A S: P	KT
HTR-PM (Csinhua) Kína [22]	HTGR 2x250 / 210	reaktor + GF 11 × 3 2 reaktor, 1 turbógenerátor	golyós fűtőelem 420000/reaktor folyamatos	grafit / He 750 °C, 70 bar	N: A S: P	Ü
SC-HTGR (Framatome, General Atomics) Franciaország, USA [23]	HTGR 625 / 272	Reaktor 24 × 8,5 + 2 GF moduláris	UCO TRISO hatszögletű hasábokban 18 hónap	grafit / He 750 °C, 60 bar	N: A S: A/P	KT
HTTR (JAEA) Japán [24]	HTGR 30 / 0	Reaktor 13,2 × 5,5	UO2 TRISO hatszögletű hasábokban ~24 hó	grafit / He 850 °C, 40 bar	N: A S: A	Ü

...a táblázat folytatódik a következő oldalon.

<i>Reaktor (fejlesztő/szállító) ország</i>	<i>Típus, Hő/ Vill. telj. (MW)</i>	<i>Kialakítás, Reaktor méret (m)</i>	<i>Üzemanyag, kampány</i>	<i>Moderátor/ hőhordozó, paraméterei</i>	<i>Hűtés</i>	<i>Státusz</i>
XE-100 (X Energy) Kanada, USA [25]	HTGR 200 / 85 moduláris	Nem integrált 16,4 × 4,88	UCO TRISO/pebbles 15,5% folyamatos	grafit / He 750 °C, 60 bar	N: A S: P	AT
Fuji MSR (ITMSF) Japán [26]	TBR 450 / 200	Integrált 5,4 × 5,3	LiF-BeF <sub>2</sub> - ThF <sub>4</sub> -UF <sub>4</sub>	grafit / folyékony só 700 °C,	N: A S: P	KT
SVBR-100 (AKME-eng.) Oroszország [27]	FBR 280 / 100	Integrált 8,2 × 4,5	oxid U-235 ≤ 16,5 % ~8 év	nincs / Pb-Bi 485 °C	N: A S: P	RT
4S (Toshiba) Japán [28]	FBR 30 / 10	Integrált 24 × 3,5	fém U-235 ≤ 19,9% ~30 év	nincs / Na ~500 °C	N: A S: A/P	RT
MoveluX (Toshiba) Japán [28]	TBR 10 / 3-4	Integrált 2,5 × 6	U <sub>3</sub> Si <sub>2</sub> / 177 hatszögletű folyamatos üzemanyagcsere	Heat-Pipe cooled and calcium- hydride moderated ~680 °C	N: P S: A/P	KT
ARC-100 (ARC LLL) Kanada [29,30]	FBR 286 / 100	nem integrált 15,6 × 7,6	Fém U-235 ≤ 17,2% 20 év	nincs / Na 510 °C	N: A S: P	KT
IMSR (Terrestrial Energy) Kanada [31,32]	MSR 440 / 195	Integrált 10 / 3,7	Urán-fluorid só < 5% 7 év (reaktorcsere)	Urán-fluorid só, grafit 440 °C	N: A S: P	AT
ThorCon (ThorCon Int.) USA, Indonézia [33]	MSR 557 / 250	Integrált moduláris 10,3 / 7,8	UF <sub>4</sub> - ThF <sub>4</sub> 48 hó	Sóolvadék, grafit 704°C	N: A S: P	AT
SSR-Wasteburner (Moltex Energy) Nagy-Britannia, Kanada [34, 35, 36]	SSR 750 / 300 (900MWe max. 8 óra csúcsteljesítmény)	Nem integrált 6 × 10	Aktinidák, kiégett FE, reprocesszált saját FE, stabil sók formájában, zárt hexagonális fűtőelem-kazettákban (451 db)	ZrF <sub>4</sub> -KF sóolvadék 590°C	N: A S: P	AT

A táblázatban megjelenő egyes jelölések:

BWR – forralóvízes reaktor ~ (Boiling Water Reactor)

PWR – nyomottvízes ~ (Pressurized Water Reactor)

HTGR – magas hőmérsékletű, gázhűtésű ~ (High Temperature Gas Cooled Reactor)

MSR – sóolvadék üzemanyag és hőhordozó ~ (Molten Salt Reactor)

TBR – termikus szaporító ~ (Thermal Breeder Reactor)

FBR – gyors szaporító ~ (Fast Breeder Reactor)

SSR – „stable salt reactor”, azaz ahol a sóolvadékban oldott üzemanyag nem kering a hűtőközegként használt sóolvadékkal együtt.

A „Kialakítás” oszlopban az „Integrált” kifejezés arra utal, hogy a reaktortartály és a gőzfejlesztő/cseppelválasztó/első hőcserélő egyetlen struktúrát képez. A „Hűtés” oszlopban az A aktív, a P passzív (természetes cirkulációs) hűtést jelöl, N: a normál üzemben, az S: üzemzavar/baleset esetén. A „Státusz” oszlopban: Ü – üzemel, É – épül, TE – típusengedély legalább egy országban, RT – részletes terv, AT – alapszintű terv, KT – koncepcióterv.

## Irodalomjegyzék

- [1] Cserháti András: Kisebb atomerőművekről, *NUKLEON VI. évf. (2013)* 143
- [2] IAEA Nuclear Energy Series: Technology Roadmap for Small Modular Reactor Deployment, No. [NR-T-1.18, 2021](#)
- [3] Small Modular Reactors: Challenges and Opportunities, Nuclear Technology Development and Economics series, [OECD 2021 NEA No.7560](#)
- [4] [SLOWPOKE reactor](#)
- [5] CANDU SMR: [The Original Canadian Solution](#)
- [6] A Call to Action: [A Canadian Roadmap for Small Modular Reactors](#). Canadian Small Modular Reactor Roadmap Steering Committee (2018). Ottawa, Ontario, Canada
- [7] Advances in Small Modular Reactor Technology Developments A Supplement to: IAEA Advanced Reactors Information System (ARIS) [SMR Book 2020 Edition](#)
- [8] WNA: [Small Nuclear Power Reactors](#), November 2021.
- [9] NuScale: [Making Smart Solutions Smarter](#): Our carbon-free SMR technology complements renewables, adapts to existing power plants and more
- [10] Nucleoelectrica [contracted to complete CAREM-25](#)
- [11] CAREM Prototype Construction and Licensing Status, [IAEA-CN-164-5S0](#)
- [12] NuScale [Projects in United States](#)
- [13] NuScale [Projects, Europe](#)
- [14] WNA: [The need for large and small nuclear, today and tomorrow](#), September 2020.
- [15] B&W mPower, (elérhető [itt](#) és [itt](#))
- [16] General Electric – Hitachi: BWRX-300, (információ [itt](#) és [itt](#))
- [17] NRC: [Pre-Application Documents for the SMR-160 Design](#)
- [18] JSC “Afrikantov OKBM”: [The KLT-40S Reactor Plants for Small-Sized Nuclear Power Plants](#)
- [19] WNN: [China starts construction of demonstration SMR](#)
- [20] SMART Technology: Development History, [http://smart-nuclear.com/tech/d\\_history.php](http://smart-nuclear.com/tech/d_history.php)
- [21] CEA NUWARD, [https://snetp.eu/wp-content/uploads/2021/02/Presentation\\_Eric-HANUS.pdf](https://snetp.eu/wp-content/uploads/2021/02/Presentation_Eric-HANUS.pdf)
- [22] WNN: [China's HTR-PM reactor achieves first criticality](#), 13. September 2021.
- [23] Steam Cycle High Temperature Gas-Cooled Reactor (SHTGR) (Framatome Inc.) [USA Status Report](#), 30 November 2019.
- [24] JAEA: [Recent topics concerning SMR Development in Japan](#)
- [25] X-Energy: [Reactor: Xe-100](#) - The safest, most economic & most advanced design for a small modular nuclear reactor
- [26] Status Report – MSR-FUJI, <https://aris.iaea.org/PDF/MSR-FUJI.pdf>
- [27] AKME Engineering: SVBR-100, <http://www.akmeengineering.com/svbr100.html>
- [28] Toshiba: [Pursuing Next-Generation and Advanced Reactors with Enhanced Safety](#)
- [29] ARC LLL: The ARC-100 Advanced Small Modular Reactor, <https://www.arcenergy.co/technology>
- [30] WNN: [ARC-100 passes Canadian pre-licensing milestone](#), 2 October 2019.
- [31] Terrestrial Energy, IMSR: Leading the way; [How it works](#)
- [32] Wikipedia: Integral Molten Salt Reactor, [https://en.wikipedia.org/wiki/Integral\\_Molten\\_Salt\\_Reactor](https://en.wikipedia.org/wiki/Integral_Molten_Salt_Reactor)
- [33] Status Report – [ThorCon](#) (Thorcon US, Inc.) USA/Indonesia 2020.06.22.
- [34] MOLTEx: [Moltex is developing a suite of reactor technologies](#) that can be deployed individually or jointly
- [35] Wikipedia: Stable salt reactor, [https://en.wikipedia.org/wiki/Stable\\_salt\\_reactor](https://en.wikipedia.org/wiki/Stable_salt_reactor)
- [36] WNN: [Moltex SMR clears first phase of regulatory review](#), 26 May 2021.
- [37] A. Touré, P. Monette (TRACTEBEL): *Comparative assessment of SMR technologies*, January 2020, <https://fermi.ee/wp-content/uploads/2020/02/10.20-tractebel-smrs-comparative-assessment-20200128.pdf>
- [38] B. Mignacca, G. Locatelli: Economics and finance of Small Modular Reactors: A systematic review and research agenda, *Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 118*, October 2019.
- [39] IAEA CRP: Economic Appraisal of Small Modular Reactor (SMR) Projects: [Methodologies and Applications \(I12007\)](#)
- [40] G. Locatelli et al.: Load following of Small Modular Reactors (SMR) by cogeneration of hydrogen: A techno-economic analysis, *Energy, 148, pp. 494-505*. ISSN 0360-5442
- [41] U.K Endorses nuclear for green hydrogen future, [ANS NuclearNewswire](#)
- [42] AVR reactor, [https://en.wikipedia.org/wiki/AVR\\_reactor](https://en.wikipedia.org/wiki/AVR_reactor)
- [43] Office of Nuclear Energy: [NRC Approves First U.S. Small Modular Reactor Design](#) 2 September 2020.
- [44] Federal Register: NuScale Small Modular Reactor Design Certification, [A Proposed Rule by the Nuclear Regulatory Commission](#) on 07.01.2021.
- [45] Glasgow Climate Pact ([unedited advance text](#))
- [46] WNN: [Nuclear energy, climate change and COP26](#)
- [47] D. Cameron, Director OECD/NEA: Charting a Path Toward on Affordable Electricity Mix in a Net Zero Future. [Presentation to COP26](#), Nov. 5, 2021
- [48] OECD/IEA: [Projected Costs of Generating Electricity](#), 2020 Edition
- [49] CNSC: [Phase 1 pre-licensing vendor design review executive summary](#): Moltex Energy, (2021)
- [50] IAEA: Technology Neutral: [Safety and Licensing of SMRs](#)
- [51] S. Buchholz et al.: [Improved safety features of LW-SMR](#), EURATOM
- [52] 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
- [53] J. C. de la Rosa Blul (JRC): Determination of Emergency Planning Zones distances and scaling-based comparison criteria for downsized Nuclear Power Plants, *Nuclear Engineering and Design 382* (2021)