HADMÉRNÖK
KÖRNYEZETBIZTONSÁG

21. évfolyam (2026) 3. szám 119–135.
DOI: 10.32567/hm.2026.3.8

Takács Dániel,[1] Négyesi Imre[2]

A nukleáris energia hasznosításának új korszaka

SMR – a megszelídített atombomba

A New Era in Nuclear Energy Utilisation

SMR – The Tamed Atomic Bomb

Absztrakt

A tanulmány a nukleáris technológia fejlődését a nukleáris háború fenyegetésének, a bipoláris világrend sajátosságainak és a jellemző háborúforma alakulásának összefüggésében vizsgálja, különös tekintettel a katonai nukleáris fegyverek geopolitikai hatásaira és a fegyverkezés, valamint az energiatermelés dualitására. Elemzi a kiégett fűtőanyagok hosszú távú kezelésének környezeti és biztonsági kockázatait, valamint azt, hogy a kis moduláris reaktorok (small modular reactor, SMR) decentralizált, szigetüzemű működésükkel hogyan járulnak hozzá az energiafüggetlenséghez, az ellátásbiztonsághoz és a fosszilis energiahordozóktól való függés csökkentéséhez. A fűtőelemek fogyasztásának optimalizálása, az üzemanyagciklusok meghosszabbítása és a moduláris felépítés révén az SMR-ek csökkentik az üzemeltetési költségeket, növelik a rendszer rugalmasságát, miközben méretük, rövidebb telepítési idejük és időjárástól független termelésük stabil, tervezhető energiaellátást biztosít a nagyfogyasztók és a kritikus (különösen a katonai és a kritikus információs) infrastruktúrák számára. A „megszelídített atombomba" metaforáján keresztül a nukleáris technológia olyan kontrollált, precíziós energiamegoldásként jelenik meg, amely a hideg háború nukleáris elrettentésének logikájától eltérően a fenntartható fejlődés, a nemzetbiztonság és a globális stabilitás metszéspontjában helyezkedik el, ugyanakkor a radioaktív hulladékkezelés,

[1] Doktori hallgató, Nemzeti Közszolgálati Egyetem Katonai Műszaki Doktori Iskola, e-mail: takacs.daniel@uni-nke.hu
[2] Egyetemi tanár, Nemzeti Közszolgálati Egyetem Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar Katonai Infokommunikációs Intézet Informatikai Tanszék, e-mail: negyesi.imre@uni-nke.hu

a potenciális balesetek és a szabályozási-felügyeleti követelmények továbbra is meghatározó korlátokat jelentenek.

Kulcsszavak: nukleáris energia, small modular reactor, szigetüzemű energiaellátás, energiafüggetlenség, kritikus infrastruktúra

Abstract

This study examines the evolution of nuclear technology in the context of the threat of nuclear war, the characteristics of the bipolar world order, and the development of modern warfare, with a particular focus on the geopolitical impacts of nuclear weapons and the dual nature of weaponisation and energy production. It analyses the environmental and security risks of the long-term management of spent nuclear fuel, as well as how small modular reactors (SMRs), through their decentralised, island-mode operation, contribute to energy independence, security of supply, and the reduction of reliance on fossil fuels. By optimising fuel consumption, extending fuel cycles, and leveraging a modular design, SMRs reduce operating costs and increase system flexibility. Meanwhile, their compact size, shorter deployment times, and weather-independent generation ensure a stable, predictable energy supply for large-scale consumers and critical (especially military and information) infrastructures. Through the metaphor of the "tamed atomic bomb", nuclear technology is presented as a controlled, precision energy solution that – diverging from the logic of Cold War nuclear deterrence – lies at the intersection of sustainable development, national security, and global stability, even as radioactive waste management, potential accidents, and regulatory oversight requirements continue to represent significant constraint.

Keywords: nuclear energy, small modular reactor, island-mode energy supply, energy independence, critical infrastructure

Bevezetés

A modern háború folyamatosan változó jelenség, amely a technológiai fejlődés hatására kaméleonszerűen alkalmazkodik a politikai és társadalmi környezethez.[3] A fegyverzetek, harcmodorok és stratégiai megfontolások nem izoláltak, hanem szoros kölcsönhatásban állnak a korszak technológiai újításaival, így a háború és a politika kapcsolata állandó újraértelmezést igényel. A nukleáris technológia és a mesterséges intelligencia megjelenése radikálisan átalakította a biztonsági stratégiákat, különösen egy bipoláris világrend fényében, ahol a kockázatkerülő háború és a technológiai bátorság egyensúlya dominál.[4] Ebben a komplex rendszerben a nukleáris energia kettős szerepe – a békés energetikai alkalmazások és katonai célok – egyaránt kulcsfontosságú a geopolitikai dinamikák alakításában.

[3] Boda 2024a.
[4] Boda 2024b.

Az utóbbi évtizedekben a kis moduláris reaktorok technológiája új horizontokat nyit az energiaellátás decentralizációja és rugalmassága terén, miközben a nukleáris fegyverek fenyegetése mellett a fenntartható és stabil energiatermelés elengedhetetlen kritériummá vált. Ez a tanulmány a nukleáris háború, a katonai technológia fejlődése és az energetikai innovációk összefüggéseit elemzi, kiemelve a modern háború információvezérelt, technológiailag komplex természetét, amely a hagyományos hatalmi és bátorságfogalmakat új keretek közé helyezi. Az elemzés során különös figyelmet kap a nukleáris technológiák dualitása, a biztonsági kockázatok és a nemzetbiztonsági kihívások, valamint az SMR-ek[5] mint a 21. századi hadviselés és energiaellátás kulcsfontosságú elemei. E kutatás célja hozzájárulni a modern háború interdiszciplináris megértéséhez, és iránymutatást nyújtani a fenntartható és biztonságos jövő felé vezető úton.

Módszertan

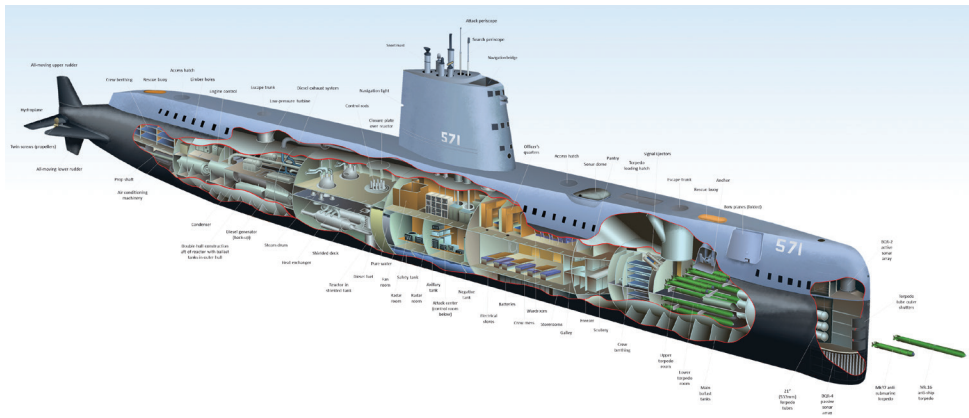
Ebben a tanulmányban primer kutatást nem végeztem, az adatokat és információkat elsősorban nyílt forrásokból, tudományos folyóiratokból, akadémiai publikációkból, hivatalos kormányzati és nemzetközi szervezetek jelentéseiből gyűjtöttem össze. Emellett széles körű irodalmi áttekintést végeztem könyvek, tanulmányok és szakirodalmi összefoglalók alapján, amelyek a nukleáris technológia, a hadiipar, a geopolitika, valamint az energetikai innovációk témaköreit ölelik fel. A források megbízhatóságát és hitelességét kiemelten kezeltem, párhuzamosan értékelve a különböző nézőpontokat és módszertani megközelítéseket, hogy átfogó és objektív képet kapjak a modern háború és a nukleáris technológia összefüggéseiről.

A minőségi és mennyiségi elemzés fókuszába a szövegelemzés, összehasonlító történeti adatok, valamint a technológiai fejlesztések és geopolitikai események kvantitatív mutatóinak figyelembevétele került. Különös hangsúlyt fektettem a hagyományos, illetve a kis moduláris reaktorok összehasonlítására teljesítmény, tüzelőanyag-felhasználás, beszerzési források, valamint a keletkező hulladék mennyisége szerint, történelmi áttekintéssel kiegészítve.

Történelmi áttekintés

Az SMR technológiájának gyökerei a hidegháborús korszakig nyúlnak vissza, amikor a nukleáris energia katonai alkalmazásai, elsősorban az atom-tengeralattjárók hajtóműveiben, ösztönözték a kompakt, nagy teljesítményű reaktorok fejlesztését. Az első működő példa az amerikai USS Nautilus (SSN-571) volt 1954-ben (1. ábra), amely a világ első nukleáris meghajtású tengeralattjárójaként forradalmasította a tengeri hadviselést: a kis méretű, magas dúsítású urán-235-öt használó reaktora akár 60 000 tengeri mérföldet is megtett oxigén nélkül, lehetővé téve a hónapokig tartó álcázott műveleteket a bipoláris világrend konfliktusaiban.

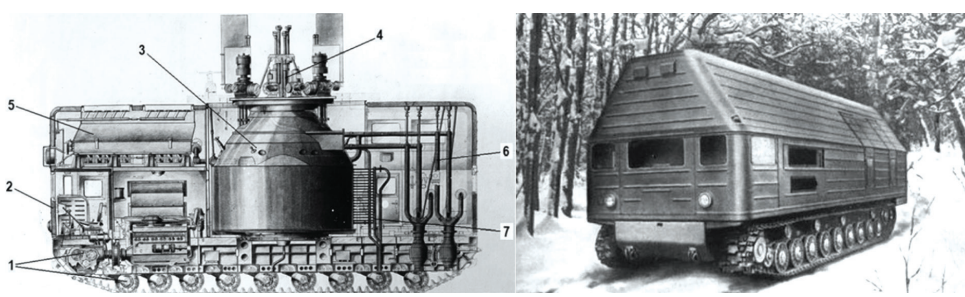
[5] Adorján–Rétfalvi 2022.



1. ábra: USS Nautilus (SSN-571)
Forrás: www.hisutton.com/USS-Naultius-First-Nuclear-Submarine.html

A szovjet válasz a K–3 Leninszkij Komszomol (Project 627A) tengeralattjáró volt 1958-ban, amely hasonló kompakt VM-A reaktort használt.

A szovjet mérnökök további fejlesztéseket végeztek. Kifejlesztették a TESZ-3 (Транспортная Электростанция 3, Transportable Electric Station 3) mobil erőművet (2. ábra). Ez a Szovjetunió egyik legambiciózusabb hidegháborús projektje volt, amelyet 1957-ben rendelt meg a Közepes Gépegyesítés Minisztériuma távoli, elérhetetlen területek energiaellátására, elsősorban katonai célokra. A leningrádi Kirov gyárban fejlesztették ki, és 1961-ben sikeresen tesztelték szibériai terepen, ahol 1,5 MW villamos teljesítményt termelt körülbelül 250 napig, napi 14 g U-235 fogyasztással.[6] Érdekessége, hogy a modulokat egy-egy nehéz harckocsi (T–10) megnyújtott alvázára építették, így szinte teljes körű szárazföldi mobilitással rendelkeztek.



2. ábra: A TESZ-3 erőmű egy modulja
Forrás: https://nucet.pensoft.net/article/89356

[6] Naumenko–Mokhireva 2022.

A T–10 alvázat úgy alakították át, hogy a futóművet 10 támogatógörgőre bővítették (a standard 7 helyett), a láncszélességet növelték a talajnyomás csökkentése érdekében, és két 750 lóerős dízelmotort szereltek be a közel 200 tonnás összsúly mozgatásához. A maximális sebességük 15 km/h volt.[7]

Egy működőképes reaktor telepítéséhez 4 egységre volt szükség, amelyből az első két modul egy kéthurkos, vízhűtéses nukleáris reaktor volt a kapcsolódó berendezésekkel (hűtés, vezérlés), a másik két modulban volt a gőzturbina-generátor, irányítórendszerek és segédberendezések.

Természetesen gondoltak a sugárzásvédelemre is, ezért háromszintű árnyékolás jellemezte:

1. szint: ólomtartály a reaktor körül
   Az aktív zónát (ahol a maghasadás zajlik) vastag ólomtartály vette körül, amely a gamma-sugárzást abszorbeálta. Az ólom a sűrűsége (11,34 g/cm³) miatt kiválóan alkalmas erre, akár már 10–20 cm vastagsággal elnyelheti a dózis 99%-át.
2. szint: bórsavval töltött tartály
   A reaktor körül bórsavoldattal töltött víztartály helyezkedett el, amely neutronmérséklőként működött: a bórium-10 izotóp neutronokat fog el, megakadályozva a további láncreakciót és csökkentve a neutronfluxust.[8]
3. szint: földbe ásás vasbeton lefedéssel
   Üzembe helyezés előtt a modulokat gödörbe süllyesztették (kb. 2–3 m mélyre), majd vasbetonnal zárták le: a földréteg szerves neutronmérséklő (hidrogén), a beton tartós gamma-védelem, így a felszíni sugárzást a minimálisra csökkentették.

A TESZ-3 sikeres tesztjei ellenére az 1960-as évek közepén a szovjet kormány költségvetési okokból leállította a fejlesztést, de egyik modulját ma is Obnyinszkben őrzik. Ez a projekt előrevetítette a modern SMR-ek decentralizált, katonai alkalmazásait.

Még radikálisabb volt a szovjet atomautó-kísérlet legendája: egyes források szerint az 1958–1960 közötti NM-2 prototípus egy kis méretű, folyékonyfém-hűtésű reaktort tartalmazott, amely 6 kW teljesítményű, de akár 50 évig működőképes lett volna egyetlen töltettel. Valóban létezett-e, vagy csak egy városi legenda volt? Internetes források egy 1965-ös szovjet atommeghajtású autóról írnak, amelyet egy Volga alapjaira építettek (3. ábra). Több forrás technikai paramétereket is tartalmaz, de a jármű létezése inkább anekdotikus, mint valóságos.

[7] Retro Transport 2024.
[8] Neutronfluxus: a sugárzás intenzitásának mérőszáma, amely a tér egy adott pontján áthaladó neutronok mennyiségét jelöli.



3. ábra: „Atom Volga" (Ядерная „Волга")
Forrás: https://russian7.ru/post/yadernaya-volga-kak-v-sssr-postroili-a/

Az ihletet minden bizonnyal a nagy versenytárs, az USA adta, ahol már 1957-ben bemutatták a Ford Nucleont[9] (4. ábra). Természetesen csak egy 3/8 arányú modellig jutottak el, de így is megadták a pontos fogyasztási adatokat, amelyek szerint nagyjából 8000 km-t tudna megtenni egy urániumpellettel, amelyet a kiégés után a benzinkutakon cseréltek volna.



4. ábra: Ford Nucleon atomautó
Forrás: https://medium.com/@KDKR/nuclear-cars-a-futuristic-dream-of-the-1950s-bb426876cd97

[9] The 1958 Ford Nucleon 2021.

Mint a példák mutatják, a hidegháború alatt a nukleáris ipar nem korlátozódott az atombomba-kísérletekre, mint a Trinity-teszt (1945, USA, 21 kt), valamint a szovjet RDSZ–1 (amerikai kódneve „Joe–1", 1949, 22 kt) vagy a Cár-bomba (1961, 50 Mt), hanem párhuzamosan dübörgött a békés és katonai energiatermelés. Az USA-ban az Atoms for Peace program (1953) keretében épült az első kereskedelmi reaktor, a Shippingport (1957, 60 MW), míg a Szovjetunió RBMK-prototípusa (1954) gyorsította az áramtermelést. Repülőgéphajtómű-kísérletekben az USA NB-36H (1955–1957) hordozott működő reaktort, a szovjet Tu–95LAL pedig 1961-ig tesztelte a technológiát. Tengerhajózásban az NS Savannah (1962, USA, 74 MW) konténerhajóként kereskedelmi útra indult, szemben a szovjet Leninszkij Komszomol jégtörővel (1959, 30 MW).

Ezzel párhuzamosan űrprogramok is indultak: az USA SNAP-10A (1965) első, űrben működő reaktora 500 W teljesítménnyel termelt orbitális energiát (sajnos csak 42 órán át működött), a reaktor még 4000 évig pályán marad 1300 km magasságban,[10] míg a szovjet RORSZAT műholdak (1967–) BES-5 reaktorral 3–10 kW-ot biztosítottak a működéshez. Mobil erőművekben a kanadai WR-1 (1962) kísérleti reaktora mellett a francia Pamir projekt (1962–1968) 25 kW-os egysége támogatta az Antarktisz-kutatást. Haditengerészeti hordozókban az USA Enterprise repülőgép-hordozó (1961, 8 reaktor) 280 MW-ot adott, míg a szovjet Kirov osztály (1978–) KN-3 reaktorai 300 MW felettit. Ezek a projektek azt mutatják, hogy a nukleáris ipar robbanásszerűen terjeszkedett, a fegyverkezés mellett az energiatermelést, a közlekedést és a kutatást szolgálva, megalapozva a mai SMR-eket. Ezek a fejlesztések a bipoláris világrend háborúformáinak válasza volt: az elrettentés és a proxykonfliktusok igényelték a rugalmas, önellátó energiát, ami ma polgári SMR-ekben éled újjá.

Az SMR-ek műszaki paraméterei és összehasonlítása

A kis moduláris reaktorok napjaink egyik legígéretesebb nukleáris energetikai innovációját képviselik,[11] különösen a rugalmas telepíthetőség, a magas biztonsági szint és a gazdaságosság miatt. Teljesítményük tipikusan 10 és 300 MW között mozog, így többszörösen kisebbek, mint a hagyományos nagy teljesítményű atomerőművek, amelyeket gyakran gigawattos kategóriában mérnek. Ez lehetővé teszi a moduláris felépítést, azaz több egység sorba vagy párhuzamosan kapcsolható, optimalizálva az energiaigényhez való alkalmazkodást és minimalizálva az üzemeltetési kockázatokat.

Az SMR-ek egyik kulcsfontosságú eleme a tüzelőanyag típusa: általánosan használtak a magas próbaértékű alacsony dúsítású urán (HALEU[12]), valamint a fejlettebb, TRISO[13] (TRi-structural ISOtropic) kerámiával bevont részecskék, amelyek jelentősen növelik a reaktorbiztonságot és az üzemanyag élettartamát.

[10] *System for Nuclear Auxiliary Power* 2025.

[11] Adorján–Rétfalvi 2022.

[12] A HALEU *(high-assay low-enriched uranium)* egy speciális uránüzemanyag-kategória, amelynek neve paradoxonnak tűnik, de pontosan írja le a tulajdonságait: „magas próbaértékű alacsony dúsítású urán", vagyis a hasadóképesebb urán-235 (U-235) izotóp aránya magasabb a szokásosnál, de még mindig az alacsony dúsítású (LEU) tartományban marad (<20%).

[13] Fejlett nukleáris üzemanyagtípus, amely mákszem méretű (kb. 1 mm átmérőjű) gömböcskékből áll, kifejezetten magas hőmérsékletű, gázhűtésű reaktorokhoz, SMR-ekhez (például Xe-100, HTGR) fejlesztve.

1. táblázat: A nukleáris üzemanyagok típusai

Üzemanyag-típus	U-235 dúsítottság (%)	Átlagos égésfok (%)	Hőmérséklettűrés (°C)	Hulladéktermelés	Biztonsági jellemzők	Hol használják?
Természetes urán (NU)	~0,7	0,5–1	~800	Magas	Korlátozott	CANDU (Kanada: Bruce), Magnox (UK: Sizewell A)
Alacsony dúsítású urán (LEU)	<5	3–5	1200	Közepes	Szabványos PWR-biztonság	Paks (VVER-440, 30–4,95% UO_2), PWR (USA: Vogtle), BWR (Japán: Fukusima)
HALEU	5–19,75	10–20	1200–1400	Alacsony	Nagyobb hatékonyság, kevesebb hulladék	NuScale SMR (77 MW, <5% LEU/HALEU), Natrium (TerraPower)
Nagy dúsítású urán (HEU)	>20	20–90	1400–1600	Magas	Katonai, proliferációs kockázat	Atom-tengeralattjárók (USS Nautilus, K-3), fegyverek
TRISO gömböcskék	10–20 (HALEU alapú)	30–99	>1600	Nagyon alacsony	Önzáró, extrém sugárzásállóság	Xe-100 (X-energy), HTGR (UK: HTR-PM, Kína)
Urán-oxid (UO_2)	3–5	40–50	1200	Közepes	Standard pálcák	Paks (UO_2 tabletták), Westinghouse PWR
Urán-oxikarbid (UCO)	3–5	40–60	1500	Kisebb mint UO_2	Hőállóbb, sűrűbb	Fejlett SMR-ek (NuScale prototípusok), HTGR-ek
MOX (kevert-oxid)	4–7 (Pu-val)	5–8	1200	Közepes (újrahasznosított)	Plutóniumtartalmú, biztonsági protokollok	Paks kísérleti kazetták, EDF (Franciaország)

Forrás: a szerzők szerkesztése

Érdemes megemlíteni, hogy a paksi atomerőmű többféle üzemanyagot használ (és használhat) a VVER-440 reaktorokban.[14] Tesztelik az új generációs üzemanyagokat is a hatékonyság növelése érdekében, miközben a fő típus a standard LEU/UO_2 marad.

Az SMR-ek katonai alkalmazásokban rejlő potenciálját jól mutatja a Project Pele (USA) – amely egy mobil, gyors telepítésű, így akár hadszíntéri energiaellátást is képes biztosítani –, valamint az amerikai haditengerészet és a NATO érdeklődése a moduláris energiaforrások iránt. A technológiai fejlődés egyre inkább előtérbe helyezi a biztonságos, környezetbarát és decentralizált nukleáris energia szerepét a 21. századi energiarendszerekben.

[14] *Hogyan működik* 2021.

Az SMR-ek hulladéktermelése, kezelése és költséghatékonysága

A hulladéktermelés terén az SMR-ek akár 30–40%-kal kevesebb kiégett üzemanyagot termelhetnek az ugyanolyan villamos energia előállítása mellett, mivel nagyobb üzemanyag-hatékonyságot tesznek lehetővé. Egy hagyományos PWR (nyomásvízkazános reaktor) blokk, mint a paksi 4×1000 MW egység, évente kb. 25–30 tonna kiégett kazettát termel 1 GWe-nyi[15] termelés mellett, ahol az urán-235-ös égésfok mindössze 4-5% (a maradék 95% U-238 és hasadási termékek). Ezzel szemben az SMR-ek – különösen a TRISO- vagy HALEU-alapúak – 10–20%-os égésfokot érnek el, így 1 GWe-re vetítve csak 15–20 tonna hulladék keletkezik, radikálisan csökkentve a tárolási igényt.

Hogy mindez nagyságrendileg érzékelhető legyen: egy 300 MW-os BWRX-300 SMR (GE-Hitachi) 40 év alatt kb. 200–250 m^3 hulladékot termel, szemben egy AP1000 (1100 MW) 800–1000 m^3-jével – ez egy focipályányi terület 3 m magasságban szemben a kétszer akkora mennyiséggel. A TRISO-gömböcskék különösen hatékonyak: 99%-os égésfok mellett a radioaktív frakció <1%, főleg rövid felezési idejű izotópok (Cs-137: 30 év, Sr-90: 29 év), míg a hagyományos UO_2-pálcákban 5–10% hosszú élettartamú (például Pu-239: 24 000 év, Am-241: 432 év) izotópok találhatók, amelyek sokkal tovább terhelik a környezetet.

A hulladékkezelés megoldásai az SMR-eknél diverzifikáltak:

- Átmeneti tárolás: szárazkazetta-rendszerek (VASCO, Holtec), ahol a kazettákat hűtött, passzív légkeringtetésű konténerekben tartják 10–20 évig, amíg a hőtermelés 90%-a elmúlik.
- Újrafeldolgozás: PUREX-eljárással (La Hague, Franciaország) a Pu és U kinyerhető és 96%-ban újrahasznosítható – SMR-eknél ez 50–70%-ra növelhető HALEU-visszanyeréssel.
- Geológiai elhelyezés: mélyfúrásos *repositoryk*[16] (például Yucca Mountain koncepció, 500–1000 m kvarcitban), ahol a hulladékot réz/vitrifikált üveg konténerekben zárják el 100 000 évre.
- Transzmutáció: gyorsreaktorokban (például Natrium) neutronbombázással a hosszú élettartamú aktinoidákat (Np-237, Am-243) rövidebb feleződésűvé alakítják.
- Sugárzási időtartam: az SMR-hulladék 90%-a 300 év alatt <1 mSv/órára csökken (természetes háttérszint), a maradék 10% (aktinoidok) 10 000 évig jelent kockázatot, de vitrifikációval ez 1% alá csökkenthet. Összehasonlítva: a szénalapú erőművek évente 100 000 tonna hamut termelnek nehézfémekkel (arzén, higany), sugárzása 100-szorosa az atomerőmű hulladékának térfogatára vetítve.

A szén, mivel a földből bányásszák, nyomokban mindig tartalmaz természetes radioaktív elemeket (urán, tórium, kálium-40), valamint ezek bomlástermékeit (például rádium, radon). Ezek az anyagok a földkéregben mindenhol ott vannak, így a szénben

[15] GWe (Gigawatt-electric): elektromos teljesítmény-mértékegység. Az erőmű által a villamosenergia-hálózatba táplált hasznos elektromos teljesítményt jelöli, megkülönböztetve a reaktorban keletkező hőteljesítménytől.

[16] *Repository* (végleges tároló): a radioaktív hulladékok hosszú távú, biztonságos elhelyezésére és a környezettől való elszigetelésére szolgáló létesítmény.

is. Amikor a szenet elégetik, az éghető szerves anyag (a szén maga) elég és CO_2 formájában távozik. A radioaktív elemek azonban nem égnek el, hanem visszamaradnak a hamuban és a pernyében. Mivel a szén térfogata az égés során drasztikusan lecsökken, e maradványban pedig ezen radioaktív anyagok koncentrációja akár a 10-szerese is lehet az eredeti szénének.

2. táblázat: SMR és „hagyományos" atomerőművek összehasonlítása

Paraméter	**Hagyományos atomerőmű (PWR/VVER, 1000 MW)**	**SMR (SMR, 60–300 MW)**	**Hatékonyság és megjegyzések**
Teljesítmény (MW)	1000	60–300	SMR kisebb egységekben, moduláris bővítés
Személyzet	600–800 fő	20–50 fő	SMR automatizált, kisebb személyzet, 75–95% költségmegtakarítás személyzeti téren
Hulladéktermelés	25–30 tonna/év/GWe	15–20 tonna/év/GWe	SMR akár 30–40%-kal kevesebb hulladék, hatékonyabb üzemanyag-felhasználás
Üzemanyag-dúsítás	301505% U-235	5–20% (HALEU)	Magasabb dúsítás SMR-eknél növeli a hatékonyságot és csökkenti hulladékot
Bekerülési költség	6–9 milliárd USD/GWe	4–6 milliárd USD/GWe	SMR gyorsabb telepítés, moduláris, kevesebb újraegyesítés, alacsonyabb kockázat
Üzemanyagköltség	5–7 USD/gj	4–6 USD/gj	SMR kevesebb üzemanyagot használ, de a HALEU drágább
Területigény	2–4 km²	0,1–0,5 km²	SMR sokkal kisebb, jobb telepítési rugalmasság
Telepítési idő	10–15 év	2–4 év	SMR lényegesen gyorsabb kapacitásnövelést tesz lehetővé
Üzemanyagégési hatékonyság	4–5%	10–20%	SMR magasabb égésfok, kevesebb hulladék
LCOE *(levelized cost of electricity)*	70–95 USD/MWh	40–60 USD/MWh	SMR költséghatékonyabb, különösen a kisebb méret és automatizálás miatt

Forrás: a szerzők szerkesztése

A telepítési idő lényegesen rövidebb, míg egy hagyományos atomerőmű (például Vogtle-3/4, USA) megépítése 10–15 évet (és kb. 30 milliárd USD-t) vesz igénybe engedélyezéssel, tervezéssel, építéssel együtt, addig egy SMR 2–4 év alatt telepíthető – gyári előgyártott modulokból (a NuScale gyártási kapacitása 12 modul/év), gyors hatósági jóváhagyással (NRC: 18 hónap). Ez különösen fontos a gyors energetikai válaszlépések szempontjából, például háborús helyzetben (ukrán mintára) vagy klímaváltozási katasztrófák utáni helyreállításban.

Üzemeltetési költségeik akár 30–40%-kal alacsonyabbak is lehetnek a moduláris felépítés, az automatizált rendszerek és az egyszerűbb karbantartás miatt: az LCOE[17] 40–60 USD/MWh, míg a hagyományos 70–90 USD/MWh (2025-ös becslés). A kisebb személyzet (20–50 fő vs. 800), a passzív biztonsági rendszerek (termoszifonhűtés, nincs aktív pumpa) és hosszabb üzemanyagciklus (8–12 év vs. 18 hónap) mind csökkentik a kiadásokat, miközben a modulcserével *plug-and-play* karbantartás lehetséges.

Nukleáris hulladék kezelése: Újrahasznosítás és innovatív megoldások az SMR-eknél

A nukleáris hulladék nem csupán „mélyre ásás" kérdése – a hagyományos geológiai elhelyezés (például olyan 500–1000 m mély kvarcit repositoryk, mint a finn Onkalo vagy a tervezett Yucca Mountain) mellett számos fejlett technológia létezik, amelyek akár 96%-os újrahasznosítási arányt tesznek lehetővé, különösen az SMR-ek esetében. A kiégett üzemanyag nem homogén: 94–96%-a újrahasznosítható urán (U-238 → U-235 dúsításra), 1% plutónium (újrahasznosítható MOX üzemanyagként), és csak 4–5% valódi hosszú élettartamú hulladék (minor aktinoidok: americium, neptunium). Az SMR-eknél ez az arány még kedvezőbb: magasabb égésfok (10–20% vs. 4–5%) miatt kevesebb hulladék keletkezik kezdetben, és a TRISO-gömböcskék önzáró mikrokapszulái extrém biztonságot nyújtanak olvadás vagy baleset esetén.

A következő újrahasznosítási technológiákat használják a leggyakrabban:

- PUREX eljárás (Franciaország, La Hague): a kiégett kazettákat nitrilsavval oldják fel, majd oldószeres extrakcióval választják szét az uránt (96% visszanyerés), a plutóniumot (1%) és a hulladékot. Az újrahasznosított U/Pu MOX-ként kerül vissza a reaktorokba – Franciaország 30 éve működik ezel a modellel, évente 1100 tonna hulladékból 1000 tonna új üzemanyag készül. Az SMR-eknél ez különösen hatékony: a HALEU visszanyerése olcsóbb, mivel kisebb dúsítási lépcső kell (5–19% vs. 3–5%).
- Transzmutáció gyorsreaktorokban: a hosszú élettartamú izotópokat (Pu-239: 24 000 év, Am-241: 432 év) neutronbombázással rövidebb feleződésűvé alakítják. Az USA Natrium SMR-je (TerraPower) nátriumhűtésű gyorsreaktor, amely hagyományos hulladékot „eszik": 60 év alatt 90%-át transzmutálja, maradékát 300 évre csökkenti. Oroszország BN-800-ja ugyanezt teszi, és Paks is feldolgozhatná a hulladékát.
- Pirometallurgia (elektrolízis): száraz eljárás, ahol a fémhulladékot olvadt sóban (chlorkálium) elektrolízissel választják szét, amellyel a plutóniumot úgy módosítják, hogy ne legyen felhasználható fegyvergyártásra.
- Vitrifikáció: a maradék 4% hulladékot (hasadási termékek: Cs-137, Sr-90) bórszilikát üvegbe olvasztják 1100 °C-on, titánium konténerekbe zárva. A boroszilikát üveg 500 000 évig stabil.

[17] *Levelized cost of electricity:* fajlagos energiatermelési költség. Egy erőmű teljes élettartamára vetített összes költségének (beruházás, üzemeltetés, tüzelőanyag, finanszírozás) és az ezalatt megtermelt összes villamos energiának a hányadosa. Azt az átlagárat jelöli, amelynél a beruházás a teljes életciklus alatt megtérül.

3. táblázat: Nukleárishulladék-feldolgozási módszerek

Módszer	Hatékonyság	Időtartam-csökkentés	SMR-előny	Példa
PUREX újrahasz-nosítás	96%	–	HALEU-vissza-nyerés	La Hague
Transzmutáció	90%	10 000 → 300 év	Kis volumen	Natrium
Vitrifikáció	100% stabil	500 000 év	Kompakt	Onkalo
Piroprocesszus	99%	–	Fegyverbiztonság	Dél-Korea

Forrás: a szerzők szerkesztése

SMR-specifikus hulladékkezelés: miért hatékonyabb?

Az SMR-eknél a hulladékmennyiség 30–40%-kal kisebb GWe-re vetítve a magasabb égésfokú üzemanyag-használat miatt. Egy NuScale 77 MW modul 40 év alatt 50 m^3 hulladékot termel, míg egy 1000 MW-os PWR 500 m^3-t. Ez tízszeres térfogatcsökkenés, ami logisztikai és költségelőnyök sorozatát eredményezi.

Mennyiségi összehasonlítás részletesen, példaszámítás 1 GWe/év termelésnél:

- PWR: 25 tonna kiégett kazetta → PUREX után 1 m^3 vitrifikált hulladék;
- NuScale SMR: 15 tonna → 0,6 m^3 vitrifikált hulladék;
- 40 évre vetítve: 40 m^3 vs. 24 m^3 (focipálya 10 cm vs. 6 cm magas halom);
- sugárzás 300 év után természetes háttérszint (<0,1 mSv/h) mindkettőnél, de az SMR kisebb volumene 10-szer olcsóbb tárolást jelent (500 m mély repositoryként).

4. táblázat: Nukleáris hulladék termelése hagyományos vs. SMR reaktorokban 1 GWe-re vetítve

Paraméter	PWR (1000 MW)	NuScale SMR (77 MW)	Hatékonyság, előny
Hulladék/GWe/év (tonna)	25–30	15–20	30–40%
Égésfok (%)	4–5	10–20 (TRISO: 99)	2–4-szer magasabb
40 év hulladék (m^3)	500	50	10-szer kisebb térfogat
Vitrifikált végtermék (m^3)	40	2,4	16-szer kompaktabb
Tárolási költség (MUSD)	100–150	10–15	90% megtakarítás
Sugárzási idő (effektív)	300+ év	300 év (<1% marad)	Ugyanaz, kisebb volumen

Forrás: a szerzők szerkesztése

TRISO[18]-kapszulák alkalmazása SMR-ekben: előnyök és hátrányok

A TRISO-gömböcskék használata kis moduláris reaktorokban drámaian fokozza a biztonságot, mivel a mákszem méretű mikrokapszulák négyszeres kerámia páncéllal (puffer-szén-SiC-szén) körülzárják a radioaktív részecskéket, megakadályozva a kioldódást még 2000 °C feletti hőmérsékleten is. Ez a passzív biztonsági paradigma lehetővé teszi a *walk-away safe* üzemmódot: teljes áramkimaradás esetén a termoszifonhűtés mellett a TRISO önzáró tulajdonsága garantálja, hogy semmilyen radioaktív anyag ne jusson a környezetbe, a dózisküszöb <0,01 mSv/h marad. Az üzemeltetés jelentősen egyszerűsödik, mert a 99%-os égésfok miatt 40 évig elhanyagolható töltéscserére van szükség, a személyzetigény 35 főre csökken, a karbantartás a modulcserére korlátozódik. Előnyök: kiváló proliferációellenes[19] tulajdonság (fegyverminőségű plutónium előállítása gyakorlatilag lehetetlen), 10-szer kisebb hulladékmennyiség, magasabb termikus hatékonyság (45–50%), balesetbiztos működés. Hátrányok: gyártási költség 2-3-szor magasabb, HALEU-beszállítói lánc korlátozott (Oroszország-dominancia), gyári infrastruktúra-fejlesztés szükséges (például X-energy Oak Ridge üzem – 2025),[20] a kezdeti licencelési procedúrák pedig elhúzódnak. Összességében a TRISO az SMR-ek stratégiai biztonsági magja, amely a polgári és katonai alkalmazásokban egyaránt paradigmaváltást jelent, hosszú távon kompenzálva a magasabb kezdeti befektetést.

Kockázatok, nemzetbiztonsági alkalmazások és geopolitikai dimenziók

Az SMR-eket mint nemzetbiztonsági eszközt érdemes bemutatni. Európában elsősorban az energiaszuverenitás, Magyarországon az ellátásbiztonság, a Magyar Honvédségnél pedig a harctéri és kritikusinfrastruktúra-ellátás[21] szempontjából lehetnek kulcsfontosságúak ezek a megoldások.[22]

Európai energiaszuverenitás és kritikus[23] infrastruktúra

Európában az SMR-eket nem elsősorban katonai, hanem stratégiai energetikai eszközként kezelik: cél az orosz fosszilis forrásokról való leválás, a gázfüggőség csökkentése és a megújuló energiaforrások ingadozásának kiegyenlítése. A kockázat főként

[18] TRISO-mikrokapszulák technológiája. A TRISO-gömböcskék önzáró mikrokapszulái a nukleáris biztonság csúcsa: 10^{12} gömböcske/modul, mindegyik négyrétegű páncélban:
- pórusos szénpuffer: fissziós gázok (Xe, Kr) befogására;
- pirolitikus szén (PyC): mechanikai védelem;
- szilícium-karbid (SiC): 2000 °C-ig olvadásbiztos kerámia;
- külső PyC: végső tömítés.

[19] Azt a célt szolgáló műszaki vagy jogi megoldás, amely megakadályozza, hogy a polgári nukleáris technológiát és anyagokat atomfegyverek előállítására használják fel.

[20] Újfajta nukleáris termék gyártására készül az USA 2025.

[21] Munk 2002.

[22] Végvári 2016.

[23] Kovács 2007; Haig 2007.

szabályozási (engedélyezés, társadalmi elfogadottság) és pénzügyi (kezdeti magas CAPEX,[24] piaci bizonytalanság), nem pedig technológiai jellegű.

Magyarországi SMR-ek mint nemzetstratégiai tartalék

Magyarország középtávon 2030 utáni üzembe helyezésre készül, akár több SMR-rel is, 10–20 milliárd dolláros beruházási sávban, részben amerikai technológiára támaszkodva.

A fő célok:

- villamosenergia-ellátás diverzifikálása Paks I–II mellett;
- regionális exportképesség;
- nagyipari fogyasztók (például hadiipari, akkumulátor- és hidrogénüzemek) lokális nukleáris ellátása.

Az Országos Atomenergia Hivatal már részt vesz az EU SMR-hatósági munkacsoportban, ami jelzi, hogy már zajlik a jogi-szabályozási előkészítés. Kockázatot jelent azonban a beszállítói függőség (HALEU, nyugati–orosz üzemanyag-szétválás), társadalmi kommunikáció, valamint az, hogy a hazai hálózati és ipari struktúrát időben adaptálni kell.

Magyar Honvédség: energialogisztika és harctéri ellátás

A Magyar Honvédség békeidőszaki energiaköltsége a teljes magyar villamosenergia-felhasználás kevesebb mint 0,2%-a, ugyanakkor az infrastruktúra (laktanyák, logisztikai központok, bázisok, kommunikációs és irányítóközpontok) nagy mértékben függnek a civil hálózattól. Ezek sebezhetősége (például kibertámadás, hálózati zavar, regionális áramszünet) erősen veszélyeztetheti a katonai képességeket.

Egy vagy több, honvédségi területen telepített SMR:

- szigetüzemű, önálló támaszpont-energiaellátást biztosíthat (radarok, vezetési pontok, UAV-bázisok, híradó hálózat);
- kiválthatja a nagy mennyiségű dízelüzemanyag-tárolást és konvojlogisztikát, csökkentve a támadási felületet;
- integrálható harctéri energiaellátó koncepciókkal (konténeres SMR-projektekhez hasonlóan, Project Pele-analógia[25]).

A rendvédelmi és katasztrófavédelmi szervek számára az SMR-ek a kritikus infrastruktúrák (ivóvíz, kommunikáció, egészségügy, irányítóközpontok) szünetmentes ellátását jelenthetik nagyobb katasztrófák (árvíz, hosszú idejű hálózati zavar, regionális konfliktus) esetén.

[24] Tőkeberuházási költség: a létesítmény megépítéséhez szükséges egyszeri, kezdeti kiadások (tervezés, építés, technológia) összessége.

[25] Az Egyesült Államok Védelmi Minisztériumának (DoD SCO) fejlesztési programja, amelynek célja egy szabványos konténerekben szállítható, közúton és légi úton is mozgatható, 1–5 MWe teljesítményű, biztonságos (TRISO-tüzelőanyagot használó) nukleáris mikroreaktor kifejlesztése katonai bázisok energiaellátására.

5. táblázat: Kockázatok és honvédelmi szempontok

Dimenzió	Hagyományos nagyerőmű	SMR hazai/katonai telepítése	Magyar Honvédség szempontja
Ellátás függése a civil hálózattól	Nagyfokú	Részlegesen függetleníthető	Kritikus bázisok leválaszthatók
Harctéri/logisztikai sérülékenység	Magas (üzemanyag-konvojok)	Alacsonyabb (helyben termelés)	Kevesebb konvoj, kisebb támadási felület
Telepítési rugalmasság	Korlátozott (fix telephely)	Magas (moduláris, regionális)	Tábori és állandó bázisok differenciált ellátása
Szabályozási/jogi komplexitás	Bejáratott	Növekvő, kevés precedens	Honvédelmi kivételek + polgári keretek összehangolása
Célpontkockázat *(strike value)*	Nagyon magas	Kisebb, szétszórt modulok	Decentralizált, nehezen bénítható energiarendszer

Forrás: a szerzők szerkesztése

Következtetések, ajánlások, javaslatok

Bár az SMR-ek képesek szigetüzemű, helyi áramtermelésre, a termelt energia elosztása további kihívásokat jelent. A meglévő hálózatokat bővíteni és korszerűsíteni kell, hogy befogadják és kezelni tudják a decentralizált forrásokból érkező energiát. Fontos hangsúlyozni, hogy az SMR-ek csak villamos energiát termelnek, így nem pótolják a katonai vagy ipari szektorokban jelenleg használt gázolajat vagy más üzemanyagokat. Emellett a villamosenergia-tárolás jelenleg még nem optimális a szélerőművek vagy naperőművek területén is ismert problémák miatt, amelyek az SMR-eknél is jelentkezhetnek. Különösen problémás, hogy az SMR-ek termelése általában egy minimális kapacitás alá nem csökkenthető, így előfordulhat, hogy időszakosan jóval kevesebb energia szükséges, mint amennyit az SMR képes előállítani, ezáltal a felesleget a hálózatba kell táplálni. Ez hasonló helyzetet teremt, mint a nyári időszakokban a lakossági naperőművek esetén, amikor az energiafelesleg eladása kritikus kérdés.

Az SMR-technológia széles körű társadalmi elfogadása és támogatása nélkülözhetetlen a sikeres bevezetés és alkalmazás szempontjából. Ehhez a legfontosabb a hiteles, folyamatos és nyitott kommunikáció a lakosság és a civil szervezetek felé. Részletesen be kell mutatni, hogyan működik az SMR, milyen passzív biztonsági rendszerei vannak, és miként képesek megakadályozni a hagyományos erőműveknél előforduló baleseteket. Be kell mutatni a nukleáris hulladék hosszú távú biztonságos kezelésének módszereit. Fontos hangsúlyozni, hogy az SMR-ek üzemanyagként használják a TRISO-kapszulákat, amelyek rendkívül ellenállók, és jelentősen csökkentik a radioaktív anyagok kiszabadulásának veszélyét még extrém körülmények között is.

Fontos a szoros együttműködés az oktatási intézményekkel és médiaorgánumokkal, hogy a tudományos alapokon nyugvó tényeket széles körben terjesszék. A közösségi

részvétel és a párbeszéd elősegíti a bizalomépítést, csökkenti a technológiával kapcsolatos ellenállást.

Nem elhanyagolható az sem, hogy az SMR-ek telepítése előtt a helyi lakosságot alaposan tájékoztassák az üzemeltetés környezeti és biztonsági aspektusairól, valamint a vészhelyzeti protokollokról. A transzparens információáramlás mellett a technológia sikeressége érdekében szükséges az állami és nemzetközi szabályozók által előírt szigorú ellenőrzés és független auditálás. Ez nemcsak a biztonságot garantálja, hanem a társadalmi elfogadást is. Összességében tehát a megfelelő kommunikáció és oktatás egyaránt előfeltétele az SMR-technológia társadalmi elfogadottságának és a sikeres energetikai átmenetnek.

Felhasznált irodalom

Adorján Ferenc – Rétfalvi Eszter (2022): A kisméretű moduláris atomerőművek (SMR), mint a klímavédelem ígéretes eszközei. *Nukleon,* 15(1), 1–11. Online: https://nuklearis.hu/sites/default/files/nukleon/15_1_243_Adorjan.pdf

Boda Mihály (2024a): A háború mint kaméleon. A fegyvertechnika fejlődésének hatása a háború és a politika viszonyára a kezdetektől a mesterséges intelligenciáig. *Hadtudomány,* 34(3), 99–113. Online: https://doi.org/10.17047/HADTUD.2024.34.3.99

Boda Mihály (2024b): A kockázatkerülő háború és a bátorság a 20–21. század fordulóján. *Honvédségi Szemle,* 152(3), 113–115. Online: https://real-j.mtak.hu/26962/13/HSz_2024_3.pdf

Haig Zsolt (2007): Az információs társadalmat fenyegető információlapú veszélyforrások. *Hadtudomány,* 17(3), 37–56. Online: https://real-j.mtak.hu/29477/3/Hadtudomany_2007_3.pdf

Hogyan működik (2021). Online: https://atomeromu.mvm.hu/Tudastar/HogyanMukodik

Kovács László (2007): Kritikus információs infrastruktúrák Magyarországon. *Hadmérnök,* 2007. november 27. Online: http://hadmernok.hu/kulonszamok/robothadviseles7/kovacs_rw7.html

Munk Sándor (2002): Információs színtér, információs környezet, információs infrastruktúra. *Nemzetvédelmi Egyetemi Közlemények,* 6(2).

Naumenko, Natalia Yu – Mokhireva, Inna M. (2022): TES-3 – Transportable Nuclear Power Plant Mounted on Self-propelled Tracked Vehicles. *Nuclear Energy and Technology,* 8(2), 139–142. Online: https://doi.org/10.3897/nucet.8.89356

Retro Transport [@RetroTransport] (2024) TES-3: The Soviet Nuclear Monster on T-10 Tank Chassis. *YouTube,* 2024. november 16. Online: www.youtube.com/watch?v=KJqo2PEqHm8

System for Nuclear Auxiliary Power (SNAP) Overview (2025). Online: www.energy.gov/etec/system-nuclear-auxiliary-power-snap-overview

The 1958 Ford Nucleon: An Idea That's Still ahead of Its Time. *Nuclear Newswire,* 2021. július 12. Online: www.ans.org/news/article-3058

Újfajta nukleáris termék gyártására készül az USA – van egy erős magyar szál a történetben (2025). *VG.hu,* 2025. november 19. Online: www.vg.hu/nemzetkozi-gazdasag/2025/11/smr-x-energy-triso-uzemanyag

Végvári Zsolt (2016): Harctéri villamosenergia-ellátás. Új energetikai megoldások kutatásának szükségessége és a fejlesztési lehetőségek összevetése. *Katonai Logisztika,* 24(2), 52–74. Online: https://epa.oszk.hu/02700/02735/00082/pdf/EPA02735_katonai_logisztika_2016_2_052-074.pdf