AZ ATOMENERGIA ÉS A RADIOAKTÍV HULLADÉKOK ESETE

– avagy szemelvények egy felelőtlenül működtetett rendszer végnapjairól

ENERGIAKLUB
SZAKPOLITIKAI INTÉZET
MÓDSZERTANI KÖZPONT

Szerzők:

Dr. Munkácsy Béla

Tanár, okleveles környezetmenedzser, PhD. Az ELTE TTK Környezet- és Tájföldrajzi Tanszékének adjunktusa, az Energiaklub tanácsadója. Atomenergiával kapcsolatos tanulmányait a BME-n végezte, energiatervezést az Osloi Egyetemen tanult.

Kovács Bence

Földtudományi kutató. Energiaföldrajzi tanulmányait az ELTE TTK-n végezte.

Szakmai lektor:

Méhes Martina

Az Energiaklub ügyvezető és szakmai igazgatója. Okleveles környezetgazdálkodási agrármérnök megújuló energetika műszaki szakirányon. Nukleáris energia tanulmányait a Szent István Egyetem műszaki tanszékén folytatta.

ISBN 978-615-5052-14-9

A tanulmány az Energiaklub Szakpolitikai Intézet és Módszertani Központ honlapján is megtalálható, onnan letölthető: www.energiaklub.hu

ENERGIAKLUB
SZAKPOLITIKAI INTÉZET
MÓDSZERTANI KÖZPONT

ENERGIAKLUB 2021. március 18.

Minden jog fenntartva.

Az adatok közlésére a *„Nevezd meg! – Ne add el! – Ne változtasd!”* licence érvényes.

TARTALOM

Tartalom 3
Ábrajegyzék 4
Vezetői összefoglaló 6
Bevezető 7
A számok tükrében 10
Egy máig megoldatlan probléma – a kiégett fűtőelemek végleges elhelyezése 16
Kudarcok - az Asse II. tároló 19
Kudarcok - a carlsbadi baleset és tanulságai 21
Az atomerőművi katasztrófák által generált hulladék-problémák 23
Remények és elképzelések Magyarországon 24
Összegzés 28
Irodalomjegyzék 29

ÁBRAJEGYZÉK

1. ábra: Az atomlobbi azt a látszatot igyekszik kelteni, mintha olyan aprócska probléma volna a radioaktív hulladékok kezelése, mint a fűtőelem-pasztillák maguk. Az elmúlt 70 év történései azonban azt igazolják, hogy a hulladékok okozta kihívásokat nem ilyen egyszerű kézben tartani (a kép forrása: www.nrc.gov) 11

2. ábra. A nukleáris üzemanyagciklus során keletkező radioaktív hulladékok 13

3. ábra: Az INES skála 15

4. ábra: Radioaktív hulladékok lerakása a világtengerek (http://large.stanford.edu/courses/2017/ph241/jones-a2/images/f1big.png) 16

5. ábra: Európa földtani képe. 18

6. ábra: A carlsbadi radioaktívhulladék-lerakó 2014. évi baleseteinek helyszínei (https://wipp.energy.gov/wipprecovery-accident-desc.asp) 22

7. ábra: Radioaktív hulladék Püspökszilágyon 25

8. ábra: a Bodai Agyagkő Formáció (BAF) térségének felszíni kutatási területe - az eddigi vizsgálódások szerint a fűtőelemek végleges elhelyezését hazánkban itt lehet optimálisan (vagy inkább legkevésbé rosszul) megoldani 26

"Of all the changes introduced by man into the household of nature, large-scale nuclear fission is undoubtedly the most dangerous and profound. As a result, ionising radiation has become the most serious agent of pollution of the environment and the greatest threat to man's survival on earth."[1]
(Ernst Friedrich Schumacher, 1973)

Az iskolateremtő közgazdász ***„A kicsi szép"*** című legendás tanulmánykötetében is megfogalmazta határozott álláspontját az atomenergiával kapcsolatban. Véleménye szerint ez a technológia a létező legnagyobb veszélyt jelenti a természeti környezetre és az emberiség fennmaradására. Schumacher felvetésére a hazai atomlobbi képviselői szokás szerint reagálhatnak úgy, hogy egy közgazdász (értsd nem energetikai szakember) nem számít hozzáértőnek ezekben a súlyos kérdésekben (bár Európa boldogabb felében energetikai ügyekben évtizedek óta szakembernek tekintenek nem csak közgazdászokat, de akár még társadalomtudósokat is). Nekik ajánlunk egy másik figyelemre méltó gondolatot:

„az atomerőművek építésével és üzemeltetésével az ember már a képességei határát kísérti, ezért jó lenne még idejében abbahagyni. De hiszen tudják ezt a szakmabeliek, a bennfentesek is… Úgy gondolom, hogy a kockázat túl nagy, és haszontalan minden egyéb kockázattal az összehasonlítás. Az atomenergia a sugárveszély miatt olyan alattomos, hogy nem szabad e tűzzel tovább játszadozni. Ez túl komoly játék...Szükségesnek tartom megemlíteni, hogy a témakörhöz nem focidrukkerként a lelátóról szólok hozzá, szakmailag átlátom, és személyes tapasztalatokra is szert tehettem. A felelősség késztet a megszólalásra. Persze az atomlobbik, élükön az atomenergia-ügynökséggel biztosan másképp látja. Az ő egzisztenciájuk is a tét."

Petz Ernő (a Paksi Atomerőmű igazgatója 1991-1994 között)[2]

[1] E. F. Schumacher (1973). Small is Beautiful: A Study of Economics as if People Mattered https://terebess.hu/keletkultinfo/Schumacher-Small-is-Beautiful.pdf

[2] Polgári Szemle 7. évfolyam, 4. szám, 2011 https://polgariszemle.hu/archivum/125-2011-szeptember-7-evfolyam-4-szam/gazdasagstrategia/446-mi-van-ha-megsem-igaz

VEZETŐI ÖSSZEFOGLALÓ

Az atomerőművekben a gőzturbinák működéséhez szükséges hőt biztosító fűtőelem-pasztillák nem nagyok, akár a tenyerünkben is elférnek, ám az ezek teljes életciklusában keletkező hulladékmennyiség hatalmas. Az extrém alacsony, 0,1%-os átlagos urán-oxid-koncentráció miatt a bányászat során 20 000-25 000-szeres mennyiségben kell kőzetet megmozgatni, feldolgozni – aminek természetesen igen jelentős energiaigénye is van. A mennyiség mellett a radioaktív hulladékok egy kikerülhetetlen minőségi jellemzője, a rendkívül alattomos és sokszázezer éves időtávban jelentkező ionizáló tulajdonság. Ennek köszönhetően a hulladékok – nyilvánvalóan ugyanebben az időléptékben – folyamatos felügyeletet, őrzést; a lerakók pedig rendszeres karbantartást és monitorozást igényelnek. Mindezek költségei lényegében felmérhetetlenek, ezért hiányoznak az atomáram árának kalkulációiból, ezeket a mai fogyasztó nem fizeti meg.

A kiégett fűtőelemek elhelyezése – 70 évvel a technológia megjelenését követően – még sehol nem megoldott. A nemzetközi tapasztalatok alapján egyetlen dolog látszik bizonyosnak, éspedig az, hogy a költségek várható nagyságrendje egy atomerőmű építésével vethető majd össze. Az egyéb radioaktív hulladékok elhelyezését szolgáló lerakók üzemeltetése szerte a világon, így hazánkban sem zökkenőmentes. A rengeteg rendellenesség és komoly üzemzavar arra hívja fel a figyelmet, hogy egyes érdekelt szakmai csoportok optimizmusa ezen a téren semmiképpen nem indokolt, folyamatos mellébeszélésük kifejezetten akadályozza, hogy a döntéshozók felelősen felmérhessék a probléma súlyát, jelentőségét.

Radioaktív hulladékok nem csak a normális üzemeltetés során, de atomerőművi létesítményeket ért katonai támadások és balesetek következtében is keletkeznek. Ezek törvényszerűen sokkal nagyobb problémát jelentenek, ahogyan azt a 10 éve történt fukusimai baleset példája is igazolja, ahol az egyre halmozódó, immár 1,2 millió tonna radioaktív hűtővíz elhelyezésére nem találtak megnyugtató megoldást – mint ahogyan a több millió köbméter szennyezett talaj elhelyezése sincs megoldva.

A radioaktív hulladékokkal kapcsolatos súlyos balesetekről és műszaki problémákról az általunk vizsgált, hazai mérnökhallgatók számára készített releváns tankönyvek nem tesznek említést, ami azért elfogadhatatlan, mert a hallgatókban így csak azt az idealizált, és sajnálatosan torz képet erősítik, miszerint az atomenergia esetében minden a megfelelő mederben folyik, és mintha nem volnának elemi problémák, illetve megoldatlan (vagy megoldhatatlan) feladatok.

Az atomenergia az eddigi üzemeltetési tapasztalatok alapján tehát nem olcsó, nem biztonságos és a legkevésbé sem tiszta.

BEVEZETŐ

A fukusimai atomerőmű-katasztrófa 10. és a csernobili baleset 35. évfordulóján emlékeztetni szükséges a társadalmat – és a társadalom érdekeit szolgálni köteles döntéshozókat – arra, hogy az atomenergia nem egyeztethető össze napjaink elvárásaival sem gazdasági, sem társadalmi, sem pedig környezeti szempontból - sőt, az energiarendszer néhány kulcsszereplője szerint mára már energetikai nézőpontból is eljárt felette az idő.[3] Mindezen felvetések többségét az Energiaklub egy másik, most megjelent kiadványa járja körbe, a lehetőségekhez képest röviden, tömören. Jelen írás csak a legfontosabb, ám agyonhallgatott környezeti problémára, a ***kiégett fűtőelem-hulladékokra*** fókuszál. Jellemző, hogy ezek sorsára a ***Paks II. projekt 230 oldalas „környezeti hatástanulmány közérthető összefoglalója"[4] egy 7 mondatos fejezetet[5] szán***. A valódi nehézségek helyett néhány lényegesen szerényebb, ám szép eredményekkel kecsegtető területre igyekeznek a figyelmet ráirányítani, így például a Dunára gyakorolt hatásokat 45 oldalban mutatja be ugyanez a dokumentum.[6]

Az is jellemző, hogy az atomenergia kapcsán egyes energetikával foglalkozó mérnökök úgy képzelik, hogy ebbe más tudományterület képviselőinek nincs beleszólása. A helyzet azonban az, hogy az atomenergia messze túlmutat az erőmű kerítésén belül zajló történéseken, és ezernyi kiágazása és kapcsolata van akár egészen távoli tudományterületek felé, amiben viszont a műszaki szakemberek mozognak – jól láthatóan – igen bizonytalanul. A megoldás nyilvánvaló: csak multidiszciplináris kutatócsoportok képesek az atomenergiával kapcsolatos számos összefüggés kellően alapos áttekintésére és megértésére, illetve érdemi stratégia kidolgozására, mégpedig olyanra, ahol a környezeti szempontok az eddigieknél sokkal hangsúlyosabban jelennek meg. Az atomerőművek üzemeltetése ugyanis törvényszerűen – már az alapműködés következményeként is – olyan környezetterhelésekkel jár, amelyek minden más negatívumot figyelmen kívül hagyva, alkalmatlanná teszik arra, hogy az emberiség felelősen és komolyan számításba vegye energiaigényeinek kielégítésére. A problémák közül messze kiemelkedik a normál működés során is keletkező ***nagy aktivitású radioaktív*** hulladékok témaköre, amelyre a mai napig nem áll rendelkezésre működő és bizonyítottan elfogadható, százezer éves időléptékben is elfogadhatónak tekinthető technológia. Az a tény pedig, hogy a *Homo sapiens sapiens* felbukkanása alig 30 000 évvel ezelőttre tehető (az ipari forradalom pedig csak 250 éves múltra tekint vissza), egészen különös dimenziót ad a radioaktív hulladékok többszázezer évre történő elhelyezésének és az ezzel kapcsolatos kihívásoknak. Ennek kapcsán ugyancsak

[3] https://energypost.eu/interview-steve-holliday-ceo-national-grid-idea-large-power-stations-baseload-power-outdated/

[4] https://www.paks2.hu/documents/20124/60046/K%C3%B6rnyezeti+hat%C3%A1stanulm%C3%A1ny+-+K%C3%B6z%C3%A9rthet%C5%91+%C3%B6sszefoglal%C3%B3.pdf/5ea368ee-fa34-f276-0c78-eff7f369f2ef

[5] 20.6.2. fejezet: Kiégett fűtőelem-kazetták

[6] 12. fejezet: A tervezett fejlesztés és a környezeti adottságok várható hatásai a Duna vízhőmérsékletére, árvízi érintettségére, a hűtővízkivételi biztonságára és mederváltozására

jellemző egyes hazai műszaki szakemberek által gyakran hangoztatott vélemény, miszerint indokolatlan ilyen szigorú elvárásokat támasztani a nagy aktivitású hulladékok elhelyezése kapcsán, elegendő volna 50-60 éves távlatot figyelembe venni. Ez ugyancsak arra világít rá, hogy milyen fontos a témakörben jártas társadalomtudósok és természettudósok bevonása, akik képesek más, ugyancsak releváns összefüggések felismerésére (például geológiai, nemzet- és környezetbiztonsági szempontok). Nyilván nem véletlen, hogy a svéd kutatók millió éves felső határvonal alkalmazását tartják indokoltnak ezen a téren.[7]

A radioaktív hulladékok témakörében tankönyvek, kézikönyvek és egyéb szakirodalmak állnak rendelkezésre, akár magyar nyelven is.[8][9] Jelen kiadvány készítői nem törekednek arra, hogy szisztematikusan tárják fel a témakör minden részletét. Céljuk sokkal inkább az, hogy a kiégett fűtőelemek elhelyezésével kapcsolatos néhány különösen fontos, kiragadott problémát felvessenek – olyanokat, amelyek a tankönyvekből sajnálatosan kimaradtak, pedig a korrekt ismeretátadáshoz a problémák megismertetésén keresztül vezet az út. A szerzők szándéka tehát az, hogy jelen kiadvány az e témát érintő meglehetősen hiányos hazai tájékoztatást legalább részben pótolja, és újabb lendületet adjon az atomenergiával kapcsolatos érdemi vitának Magyarországon.

Jó hír, hogy a problémával behatóan foglalkozó összefoglaló kézikönyv is megjelent a közelmúltban – az Energiaklub közreműködésével – ***World Nuclear Waste Report*** címmel. A teljes angol nyelvű dokumentum elérhetősége: https://worldnuclearwastereport.org/

A magyar nyelvű összefoglaló:

https://energiaklub.hu/files/news/WNWR_%C3%96sszefoglal%C3%B3_0.pdf

A kiadvány ***hazai vonatkozásokkal foglalkozó fejezete*** magyarul:

https://energiaklub.hu/files/news/WNWR_Hungary_1.pdf

[7] Kautsky, U., Saetre, P., Berglund, S., Jaeschke, B., Nordén, S., Brandefelt, J., … Andersson, E. (2016). The impact of low and intermediate-level radioactive waste on humans and the environment over the next one hundred thousand years. Journal of Environmental Radioactivity, 151, 395–403. doi:10.1016/j.jenvrad.2015.06.025 https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0265931X15300370#!

[8] Szűcs I. (2013). A nukleáris ipar hulladékkezelési kihívásai. https://dtk.tankonyvtar.hu/xmlui/bitstream/handle/123456789/7657/0021_Nuklearis_ipar_hulladekkezelese.pdf?sequence=1&isAllowed=y

[9] Zagyvai P. et al. (2013). A nukleáris üzemanyagciklus radioaktív hulladékai. https://www.energia.mta.hu/~osan/SH_7_2_11/Nuklearis_uzemanyagciklus_radioaktiv_hulladekai_MTA_EK.pdf

"When addressing the potential effects from a geological repository for low- and intermediate-level nuclear waste in Sweden, time frames of up to 100,000 years are of interest. For a geological repository for spent nuclear fuel even longer time frames, up to one million years, have to be considered according to the Swedish regulations."[10]

A Svéd Nukleáris Üzemanyag és Hulladékgazdálkodási Rt (SKB) munkatársainak egy 2016-ban megjelent tudományos közleményében kijózanító gondolatok olvashatók a kiégett fűtőelemek okozta probléma súlyát és időléptékét illetően: ***bármiféle műszaki megoldásról legyen is szó, annak 1 millió éves távlatban kell garantálnia a környezettől való teljes elszigeteltséget***. Jellemző, hogy az atomerőműveket üzemeltető EDF szerint nem kell ebből ekkora ügyet csinálni, elegendő csupán 300 évre gondoskodni a tárolásról.[11]

[10] Kautsky, U., Saetre, P., Berglund, S., Jaeschke, B., Nordén, S., Brandefelt, J., … Andersson, E. (2016). The impact of low and intermediate-level radioactive waste on humans and the environment over the next one hundred thousand years. Journal of Environmental Radioactivity, 151, 395–403. doi:10.1016/j.jenvrad.2015.06.025 https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0265931X15300370#!

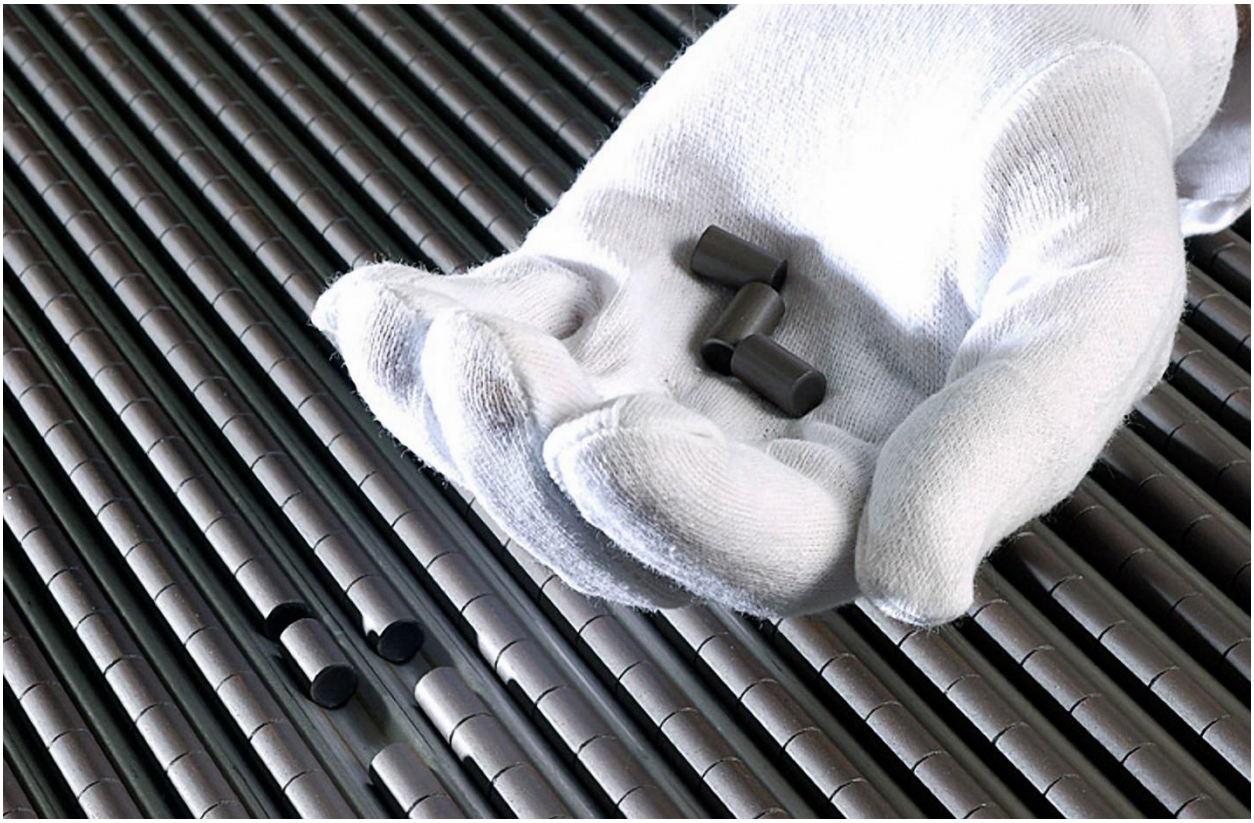
[11] https://www.edfenergy.com/for-home/energywise/busting-myths-about-nuclear-energy

A SZÁMOK TÜKRÉBEN

Az első kereskedelmi atomerőmű 1954-ben kezdte meg működését a Szovjetunióban, míg az Amerikai Egyesült Államokban 1958-ban üzemelték be az első ilyen létesítményt – és ezzel a jelentős ionizáló sugárzást kibocsátó hulladékok nagy mennyiségű „termelése" is új lendületet kapott (mindaddig ugyanis csak katonai célú projektek keretében keletkeztek ilyen anyagok).

Az atomerőművekben a gőzturbinák működéséhez szükséges hőt biztosító ***fűtőelem-pasztillák*** **(**1. ábra**)** köztudomásúlag nem nagyok (ez az atomlobbi egyik fő üzenete), ám a teljes életciklusban keletkező hulladékmennyiség hatalmas (erről viszont már mélyen hallgatnak). Az extrém alacsony – világátlagban 0,1%-os – urán-oxid-koncentráció miatt a bányászat során ugyanis ***20 000-25 000-szeres mennyiségben*** kell kőzetet megmozgatni, feldolgozni (1. táblázat)[12] - és előbb vagy utóbb, de mindebből végül hulladék keletkezik (2. ábra). Ezt egy oszlopdiagramon ábrázolva: ha a gyártási folyamat végén szereplő fűtőelem mennyiségét egy 1 cm-es oszloppal jelölnénk, akkor a kiindulási anyagmennyiséget mutató oszlop 25 méter hosszú kellene legyen, vagyis a 8. emeletig érne (éppen ezért ennek a törvényszerűségnek ilyetén látványos ábrázolásától ezúttal el kell tekintsünk). A legnagyobb mennyiségű hulladék a bányában keletkezik, hiszen a megmozgatott anyagtömeg ~85%-a - a meddő - már az első lépésben hulladékká válik. A problémát tehát a mennyiség és a minőség (radioaktivitás) együttesen jelenti. Ráadásul egyéb, veszélyes hulladéknak minősülő anyagok is képződnek a technológia során, hiszen a fűtőelemek gyártásakor savas vagy lúgos zagy keletkezésével is számolni kell.

[12] Thomson, J. (2020). Nuclear power is clean – if you ignore all the waste. Compare the annual waste produced by a coal-burning power plant and a nuclear generating station. https://www.hcn.org/issues/52.1/nuclear-energy-nuclear-power-is-emissions-free-but-at-what-cost-waste



1. ábra: Az atomlobbi azt a látszatot igyekszik kelteni, mintha olyan aprócska probléma volna a radioaktív hulladékok kezelése, mint a fűtőelem-pasztillák maguk. Az elmúlt 70 év történései azonban azt igazolják, hogy a hulladékok okozta kihívásokat nem ilyen egyszerű kézben tartani (a kép forrása: www.nrc.gov)

Ha nem hagyományos bányászat révén hozzák a felszínre a nyersanyagot, hanem a kioldásos technológiával (*in situ leaching*), akkor sem állunk sokkal jobban, hiszen a ***visszamaradó nagy mennyiségű savas oldófolyadékban*** jelentős mennyiségű kadmium, arzén, nikkel, urán található (például a német Königstein térségében az ivóvízre vonatkozó határértékek 80-400-szorosa) - és ez esetben is megoldatlan a meddőkőzet, meddőzagy biztonságos tárolása, „eltüntetése".[13] A tapasztalatok szerint ez a technológia a korlátozottan rendelkezésre álló, jó minőségű ivóvízkészletek elszennyezésével járhat.

[13] Diehl, P. (2011). Uranium Mining in Eastern Germany: The WISMUT Legacy. https://www.wise-uranium.org/uwis.html

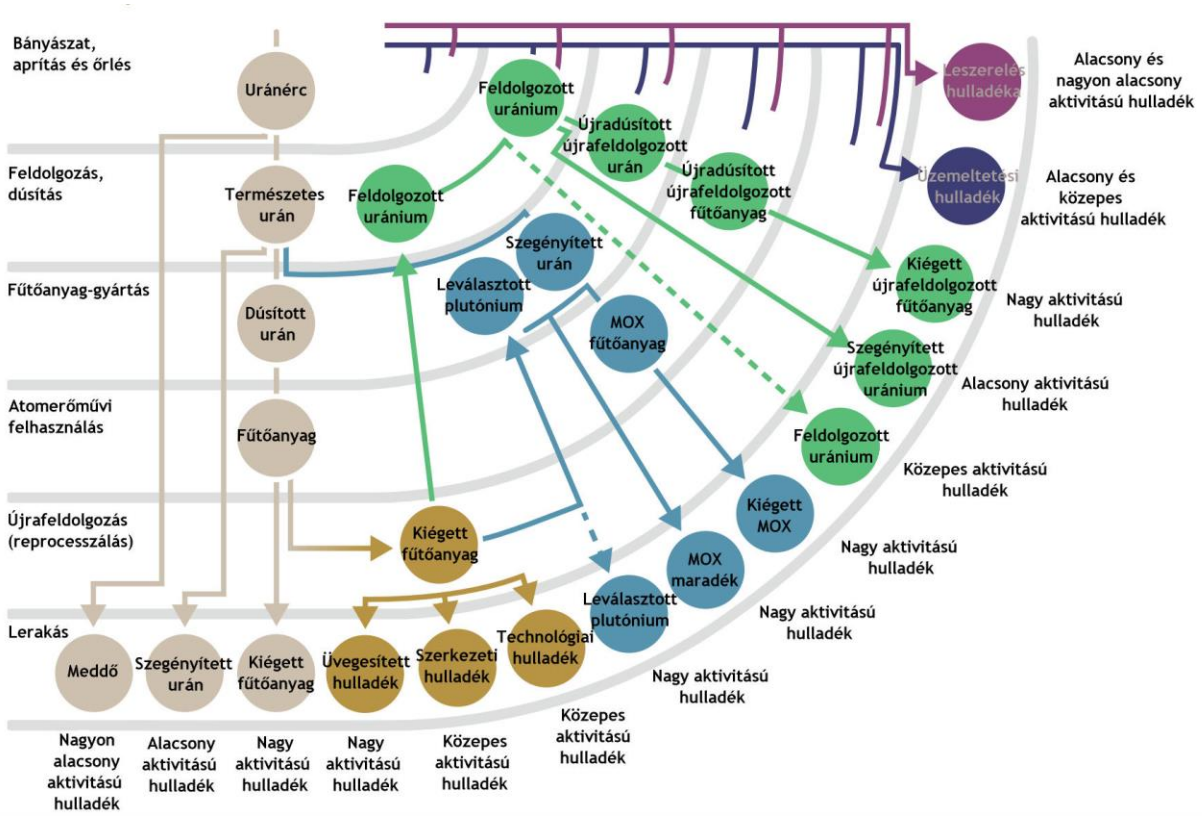
Anyag megnevezése	Tömeg (tonna)	Arány (tömeg%)
Kőzet a geológiai rétegsorban	1 943 624	100,000
Enyhén radioaktív bányameddő	1 620 000	83,349
Kitermelt érc	323 624	16,651
Feldolgozott UF_6	912	0,047
Dúsított UF_6	113	0,006
Fűtőelem	87	0,004

1. táblázat. A Palo Verde (3937 MW_e) atomerőmű éves villamosenergia-termeléséhez (31 000 GWh/év) kapcsolódó anyagáram

Egyszóval az atomenergetika hulladékkibocsátása az egyik olyan probléma, amivel – ha meg akarjuk érteni a technológiával kapcsolatban élesen megfogalmazódó kritikát - foglalkozni szükséges.

A kritikák közül a leggyakoribb az atomipar és az azzal szorosan összefonódó politikai csoportok felelőtlen működési és döntési gyakorlatára hívja fel a figyelmet. Ennek lényege az, hogy – bár az erőművekből kikerülő kiégett fűtőelemek évről évre egyre nagyobb mennyiségben halmozódnak –, ténylegesen működő megoldást még 70 esztendő után sem látni. Ígéretekből és fogadkozásokból viszont évtizedek óta nincs hiány. Ez azonban messze nem elég, hiszen a probléma mértéke példátlan, lévén a radioaktív hulladékok két tulajdonságuk miatt különleges figyelmet igényelnek. Egyrészt az ionizációt kiváltó hatásuk miatt, ami lényegében minden élő szervezetre káros. Az emberben bizonyítottan rákos megbetegedéseket, genetikai elváltozásokat okoz, utóbbiak öröklődhetnek is, ami például a csernobili baleset által érintett térségben statisztikai elemzései világosan igazolják[14]. Égetéssel sem lehet megszabadulni a problémától, mert a radioaktív izotópok a levegőben is szabadon terjednek, így az élővizeket, a talajt, ezeken keresztül pedig az emberi fogyasztásra kerülő élelmiszert is károsítják.

[14] Burridge, T. (2016). Chernobyl's legacy 30 years on. https://www.bbc.com/news/world-europe-36115240



2. ábra. A nukleáris üzemanyagciklus során keletkező radioaktív hulladékok[15]

A másik tulajdonság, ami tetézi az első probléma okozta amúgy sem elhanyagolható gondokat, a radioaktív anyagok hosszú felezési ideje, ami a gyakorlatban azt jelenti, hogy ***az atomenergia alkalmazásával generált műszaki kihívások kétségkívül sokszorosan túlélik a ma ismert civilizációt***. Márpedig a folyamatos felügyelet fontossága a terrorizmus erősödésével minden felelősen gondolkodó döntéshozó számára nyilvánvaló kellene legyen, különösen annak fényében, hogy a radioaktív anyagokkal való visszaélés egészen elképesztő léptéket öltött az elmúlt évtizedekben. A Nemzetközi Atomenergia Hivatal ezzel foglalkozó adatbázisa (Incident and Trafficking Database) csaknem 4000 olyan esetet tart nyilván, amikor efféle problémákra derült fény.[16] Tipikus példája a radioaktív hulladékok okozta rizikófaktornak a ***brazíliai Goiania incidens***, amikor egy használaton kívüli, eredendően sugárkezelésekre használt orvosi eszköz eltulajdonítása és a szakértelmet teljes mértékben nélkülöző szétszerelése 249 ember sugárfertőzését, 4 áldozat halálát okozta alig egy évvel a

[15] Mycle Schneider (2008). Nuclear Power Made in France The Model? http://npolicy.org/article_file/Nuclear_Power_Made_in_France-The_Model.pdf

[16] IAEA 2020: Incident And Trafficking Database (ITDB). Incidents of nuclear and other radioactive material out of regulatory control. 2020 Fact Sheet https://www.iaea.org/sites/default/files/20/02/itdb-factsheet-2020.pdf

csernobili balesetet követően, 1987-ben. Azonban a radioaktív hulladékok elhelyezését szolgáló létesítményeket nem csak őrizni, de rendszeresen ellenőrizni és karbantartani is szükséges, mert enélkül a radioaktív izotópok bekerülhetnek a talajvízbe vagy folyókba, és akkor bizonyosan bejutnak a táplálékláncba is, amivel előbb-utóbb a teljes ökoszisztémát kitesszük a sugárzás káros hatásainak. Érdekes, de a fukusimai baleset következményei kapcsán éppen egy ilyen „megoldás", a tengeri ökoszisztémába történő „elhelyezés" körvonalazódik - erről részletesen az ezt bemutató fejezetben szólunk.

A radioaktív hulladékokat leggyakrabban aktivitásuk alapján csoportosítják, ennek gyakorlata azonban országonként, illetve szakmai szervezetenként eltérő. A World Nuclear Association (WNA) – nem a teljes életciklusra vonatkozó – adatai alapján ***az atomerőművekből kikerülő radioaktív hulladékok*** össztérfogatának mindössze kb. 3%-át teszik ki a ***nagy aktivitású hulladékok***, azonban ezek adják az összes keletkező radioaktivitás 95%-át (2. táblázat). Szállításuk és tárolásuk csak nagyfokú sugárvédelem mellett lehetséges, ráadásul a keletkező bomlási hő mennyisége miatt folyamatos hűtést igényelnek. Ide tartoznak a kiégett fűtőelemek, illetve az azokkal közvetlen kapcsolatba kerülő anyagok.

Csak a jelenleg működő atomerőművekből mindösszesen ***874 000 m^3 kiégett fűtőanyag*** fog felhalmozódni, mire ezek az életidejük végét elérve bezárnak (és önmaguk is radioaktív hulladékká válnak).[17] Azonban, bár a technológia a végnapjait éli, elsősorban néhány erősen centralizált irányítású országban, így például Kínában Indiában, Oroszországban, még új erőművek építése is folyik, ami majd tovább növeli a mennyiséget és az elhelyezéssel járó nehézségeket.

Radioaktivitás mértéke	Térfogat részaránya	Radioaktivitás részaránya
Kis	90%	1%
Közepes	7%	4%
Nagy	3%	95%

2. táblázat: Az atomerőművekből származó radioaktív hulladékok legfontosabb paraméterei (WNA 2020)[18]

A hulladékok elhelyezésére kidolgozott eddig alkalmazott műszaki megoldások hiányosságai, a balesetek sokasága sokkal inkább arra világítottak rá, hogy a probléma mértéke lényegesen nagyobb annál, mint amit biztonsággal kezelni vagyunk képesek. Ugyanakkor ***radioaktív szennyezés „nem***

[17] Jungjohann, A. ed. (2019). World Nuclear Waste Report. https://worldnuclearwastereport.org/

[18] WNA 2020: Radioactive Waste Management. *World Nuclear Association,* London. https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-wastes/radioactive-waste-management.aspx

tervezett" módon, balesetek és üzemzavarok következtében is időről időre a környezetbe kerül. Az ilyen esetek súlyosságának meghatározására szolgáló nemzetközileg elfogadott 7 fokozatú INES skálán (3. ábra) a 4-es fokozatú és az annál nagyobb értékek igen súlyos rendellenességekre utalnak, amikor a környezet radioaktív szennyezését jellemzően nem sikerült megakadályozni. A rendelkezésre álló ismereteink szerint ezidáig legalább ***17 ilyen esemény történt*** világszerte – ezek mindegyike járt radioaktív hulladékok keletkezésével. A bizonytalanságot az okozza, hogy a rendellenességeket, katasztrófákat sok évtizeden át igyekeztek eltitkolni, így több esetben csak utólagos kutatások segítségével lehet következtetni az okozott környezeti károk mértékére.

3. ábra: Az INES skála[19]

[19] Rhodes, C. J. (2014). The Fukushima Daiichi nuclear accident. Science Progress, 97(1), 72–86. doi:10.3184/003685014x13904938571454

EGY MÁIG MEGOLDATLAN PROBLÉMA – A KIÉGETT FŰTŐELEMEK VÉGLEGES ELHELYEZÉSE

A szakemberek és döntéshozók tájékozatlanságát (vagy felelőtlenségét?) jelzi, hogy az atomhulladékokat az 1940-es évektől 1993-ig - szinte teljes egészében - az óceánokban „helyezték el”. Az érintett országok ***85 100 terabecquerel*** (TBq) mértékű sugárszennyezést tartalmazó hulladéktól szabadultak meg ilyen módon, összesen mintegy ***száz helyszínen***[20]. A környezetterhelés mértékét jelzi, hogy egy nukleáris balesetet ***10 000 TBq-nél nagyobb mértékű szennyezés fölött már a legsúlyosabb, 7. fokozatba***[21] sorolhatják (bár a kategóriákba sorolás ennél lényegesen összetettebb folyamat). Hivatalosan mindeddig kettő 7. kategóriába sorolt baleset (és környezetszennyezés) történt, a csernobili és a fukusimai.

4. ábra: Radioaktív hulladékok lerakása a világtengerek
(http://large.stanford.edu/courses/2017/ph241/jones-a2/images/f1big.png)

Azonban a tengervízben a radioaktív hulladék nincsen elszigetelve a környezetétől, tehát a szennyezés előbb vagy utóbb bekerül az ökoszisztémába. A tápláléklánc csúcsán elhelyezkedő ragadozók, például fókák és delfinek különösen veszélyeztetettek, mert szervezetükben felhalmozódik és ténylegesen ki is

[20] IAEA (1999). Inventory of radioactive waste disposals at sea.
https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/te_1105_prn.pdf

[21] Nemzetközi Nukleáris Eseményskála (INES) kézikönyv
https://www.haea.gov.hu/web/v3/oahportal.nsf/AB534110DEE39331C1257BE400746F05/$File/INES%20k%C3%A9zik%C3%B6ny%20ford%C3%ADt%C3%A1s%20honlapra%20-%20kieg%C3%A9sz%C3%ADt%C3%A9sek.pdf

mutatható a radioaktív plutónium és cézium[22]. Természetesen ugyanez történik a tengeri eredetű élelmiszereket nagyobb mennyiségben fogyasztó emberek esetében is.[23]

Az 1993. évi betiltást követően másfajta hulladékelhelyezési lehetőségeket kellett fontolóra venni, így számos olyan hamvába holt ötlet született, mint az űrbe való kilövés vagy az asztenoszférába juttatás[24]. Bár több példa is van sikertelen helyszínkiválasztási folyamatokra és félbehagyott tárolókra, a kiégett fűtőelemek esetében a ***geológiai elhelyezés*** lett a preferált megoldás.[25] Földtani szempontból a legnyugodtabb, ezért a tárolók kialakítására legalkalmasabb helyek az ***ősidei (prekambriumi) masszívumok*** (5. ábra). ***Finnországban***, ahol a leginkább előrehaladott az építkezés, a tároló ilyen területen épül. A tervek szerint a 2020-as évek közepére készül el a létesítmény, a hozzá kapcsolódó sokévtizedes projekt teljes költségvetése 3,5 milliárd euró (miközben a Paks II. beruházás tervezett becsült költsége 12 milliárd euró). ***Svédországban***, ahol a geológiai adottságok hasonlóan jók, éppen nagy a bizonytalanság azt követően, hogy a svéd Környezetvédelmi Bíróság 2018-ban úgy határozott, hogy a benyújtott dokumentumok alapján nem találja megnyugtatónak a műszaki szakértők által kidolgozott módszert (az alkalmazni kívánt réz tokozat lehetséges alkalmazási korlátaira hivatkozva) és egyelőre nem adja meg a hozzájárulását a geológiai elhelyezést biztosító lerakó megépítésére sem.[26]

Még kedvező geológiai adottságok mellett is elgondolkodtató a hatalmas, évmilliós időlépték, hiszen a legutóbbi eljegesedést követően, alig 10 000 éve indult meg az éghajlat enyhülése. Ezt megelőzően a hatalmas, mozgó jégtakaró sokhelyütt, akár Európában is, több száz méter vastagságú felszíni kőzetet gyalult le, ami kérdéseket vet fel egy radioaktív hulladékok elhelyezését célzó létesítmény kialakításának néhány fontos paraméterét illetően is.

---

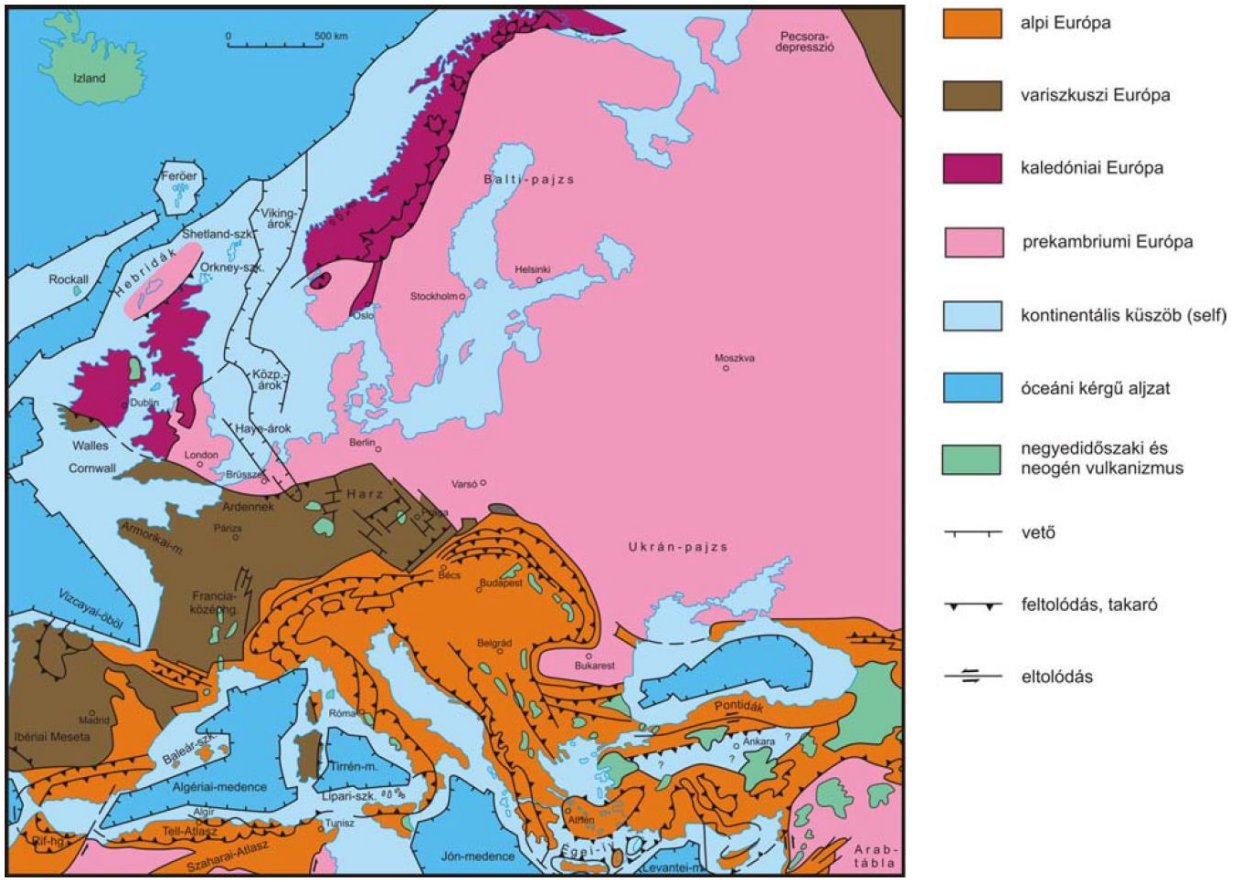
[22] Watson, W. S., Sumner, D. J., Baker, J. R., Kennedy, S., Reid, R., & Robinson, I. (1999). Radionuclides in seals and porpoises in the coastal waters around the UK. Science of The Total Environment, 234(1-3), 1–13. doi:10.1016/s0048-9697(99)00118-7 https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/10507144/

[23] European Environment Agency (n.d.). EN13 Nuclear Waste Production. https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/en13-nuclear-waste-production-1/en13

[24] Alden, A. (2017). Why Not Dispose of Waste in Ocean Trenches? https://www.thoughtco.com/dont-dispose-waste-in-ocean-trenches-1441116

[25] The World Nuclear Waste Report 2019 - Összefoglaló. Energiaklub, Budapest. 10p https://energiaklub.hu/files/news/WNWR_%C3%96sszefoglal%C3%B3_0.pdf

[26] Palm, J. (2020). Knowledge about the Final Disposal of Nuclear Fuel in Sweden: Surveys to Members of Parliament and Citizens. Energies 2020, 13, 374; doi:10.3390/en13020374 https://www.mdpi.com/1996-1073/13/2/374/pdf



5. ábra: Európa földtani képe. [27] Az ábra világosan érzékelteti, hogy földtani értelemben hazánk Európa legfiatalabban kialakult térséghez, az alpi hegységképződés által érintett régióhoz tartozik. Nem lényegtelen az a tény, hogy ez a hegységképződés egy napjainkban is zajló folyamat, ami egyfelől izosztatikus mozgásokkal (így földtörténeti értelemben viszonylag rövid idő alatt akár jelentős kiemelkedésekkel) és az átlagoshoz képest gyakoribb földrengésekkel is jár. A kiégett fűtőelemek elhelyezése szempontjából sem egyik, sem másik körülmény nem megnyugtató.

[27] Budai T. - Konrád Gy. (2011). Magyarország földtana. http://enfo.agt.bme.hu/drupal/sites/default/files/Mof_jegyzet.pdf

KUDARCOK - AZ ASSE II. TÁROLÓ[28]

A svéd kutatók óvatossága – a radioaktív hulladékok elhelyezési gyakorlatának ismeretében[29] – nem indokolatlan. Még a precizitásukról méltán híres német szakemberek is teljes kudarcot vallottak a radioaktív hulladékok elhelyezése kapcsán, aminek egyik iskolapéldája az Asse II. lerakó, amely egykori sóbányaként, 1967 és 1978 között fogadott kis- és közepes aktivitású hulladékokat. Az első banális, ám a korra mégis jellemző probléma a nyilvántartások hiányos vezetése volt. Ám ez az állítás nem csak a beérkező hulladékokra vonatkozik, de az üzemeltetési problémákra is. A rendelkezésre álló dokumentumok szerint korábban is folyamatosan jelentkeztek a bányában vízbetörések[30], amelyekből egyetlen is sok, egy radioaktív hulladékokat tároló létesítmény esetében. Nem világos, hogy ennek ismeretében hogyan merülhetett fel egyáltalán egy ilyen kényes felhasználás lehetősége. Mindenesetre az atomenergia világában nem ritka megoldásként, a jelenség eltitkolásával igyekezett az üzemeltető időt nyerni. A projektre a végső csapást az jelentette, amikor már a térség karsztvizeiben is kimutathatóvá vált a radioaktív szennyezés, ami a lakosság széles körű tiltakozását eredményezte.

A lerakót végül ki kellett üríteni, ám a vízbetörések következtében a szennyezett anyag mennyisége ötszörösére nőtt, mert a radioaktív hulladék összekeveredett a sóval. A kármentés 2010-ben indult, és a tervek szerint 2065-öt írunk majd, mire a feladat végére jutnak. Ha a jelenlegi elképzelések szerint sikerül haladni, és nem adódnak váratlan kiadások, a teljes költség mai árakon eléri majd az 5 milliárd Eurót[31] (a Paks II. projekt tervezett költségvetésének közel felét). Ugyanakkor általában is felmerül a kérdés, hogy a német atomerőművek leszerelése, a hulladékok elhelyezése hogyan is fog történni, különösen annak fényében, hogy az előzetes számítások szerint ennek kapcsán 100 milliárd Euro nagyságrendű költségek körvonalazónak a 2170-ig tartó időszakban, amikorra minden szükséges folyamatot be tudnak fejezni. Ezeket a problémákat az atomlobbi mindeddig igyekezett véka alá rejteni, lépten-nyomon azt üzenve, hogy ez egy olcsó technológia.

Számos elemző szerint mindez – sok egyéb tényező mellett – meghatározó szerepet játszott abban a politikai és szakmai döntésben, hogy Németország felhagy az atomenergia alkalmazásával. Ennek tükrében elgondolkodtató, hogy az általunk vizsgált ***két terjedelmes hazai tankönyv, amelyek a radioaktív hulladékok témakörét szándékoznak bemutatni a műszaki értelmiségünk következő***

[28] Nagy G. M. (2019). A sóbánya, amely a német atom múltját rejti. https://magyarnarancs.hu/kulpol/csak-ne-az-udvaromba-117275

[29] Atomcsapda blog - Ha csak egy cikket olvasol el az atomtemetőkről, ez legyen az! https://atomcsapda.blog.hu/2017/07/30/ha_csak_egy_cikket_olvasol_el_az_atomtemetokrol_ez_legyen_az

[30] Schwartz, M.O. (2010). Clearing out Asse 2. https://www.neimagazine.com/features/featureclearing-out-asse-2

[31] Stonington, J. (2016). Sticker Shock: The Soaring Costs Of Germany's Nuclear Shutdown https://e360.yale.edu/features/soaring_cost_german_nuclear_shutdown

generációjának, ezen eseményeknek sem műszaki, sem környezeti, sem gazdasági, sem társadalmi aspektusait nem mutatja be. Az egyikben – noha a címéből (*A nukleáris ipar hulladékkezelési kihívásai*[8]) következne, egyáltalán nem szerepel az „Asse" kifejezés, és általában bármelyik konkrét problémás eset (más szóval valós kihívás) bemutatása. De a másik tankönyv sem szán egy apró utalást sem arra, hogy a német projekt megvalósítása milyen drámai fordulatot vett: „*Németországban évtizedekkel ezelőtt sóbányákban alakítottak ki mélységi tárolókat (Morsleben, Asse). A német nukleáris ipar kis- és közepes aktivitású hulladékainak befogadására a 2000-es évektől kezdődően, a korábbi koncepciót elvetve a Konrad volt vasbányában 800 és 1300 m mélységi szint között építendő új vágatokat szánják.*"[9] Ennyi. Se nem több, se nem kevesebb. A problémákat bemutató esettanulmányokat ne keressünk ebben a kötetben sem.

KUDARCOK - A CARLSBADI BALESET ÉS TANULSÁGAI

Az Amerikai Egyesült Államokban már létezik olyan létesítmény, amely sok szempontból hasonló egy olyan lerakóhoz, ami kiégett fűtőelemek tárolására szolgálhatna. Ennek az a magyarázata, hogy itt már az 1940-es évektől kezdve folytak atomkísérletek, amely során nagy mennyiségű radioaktív hulladék halmozódott fel, amelynek elhelyezését meg kellett oldani. A National Academy of Sciences javaslatára 1957-től nagy mélységben található sóösszleteket kerestek a végleges geológiai tárolás céljából. 1974-ben az Új-Mexikó állambeli Carlsbad városától keletre jelöltek ki egy területet, ahol a kivitelezési munkákat követően 1999-ben kezdte meg működését a Waste Isolation Pilot Plant (WIPP). Ez a kísérleti üzem – az általános vélekedés szerint – az egész világon egyedülállóan magas technológiai szintet képvisel, hiszen tízezer éves időtávlatban tervezik itt biztonságosan megóvni a betárolt hulladékanyagot.[32]

Azonban 15 év üzemelést követően fordult a kocka. Az addig szuperbiztosnak tekintett létesítményben két súlyos baleset is történt alig 10 nap leforgása alatt. 2014. február 5-én egy teherautó gyulladt ki a radioaktív hulladékokkal teli üregrendszerben, aminek következtében 6 dolgozót kellett orvosi kezelésben részesíteni. Néhány nappal később, február 14-én, már a sugárzás mértékének emelkedését is detektálták. A problémát egy olyan tartály sérülése okozta, ami plutóniumbomba készítéséből származó radioaktív hulladékot tárolt. A szellőzőrendszerbe is került radioaktív anyag, így az üzem földalatti járatainak harmada elszennyeződött, sőt az üzem közvetlen környezetébe is kijutott. A baleset során 21 munkás kapott kisebb sugárdózist.

A szabálytalan tárolásból fakadó baleset és a környezetbe jutó radioaktív szennyezés okán a mélységi tároló működését le kellett állítani.[33] A példátlanul költséges, 500 millió dolláros kárelhárítást követően 2017 januárjában nyílt meg újra a létesítmény. A teljes helyreállítás költsége a számítások szerint elérheti majd a 2 milliárd dollárt, ami a pennsylvaniai Three Mile Island atomerőmű 1979-es súlyos balesetét követő beavatkozások költségeivel összevethető[34]. A pénzt a katonai költségvetés kénytelen mielőbb megfinanszírozni, mert a tárolóra óriási szükség van, hiszen az amerikai hadiipar még az atomerőműveknél is sokkal több sugárzó hulladékot termel.[35]

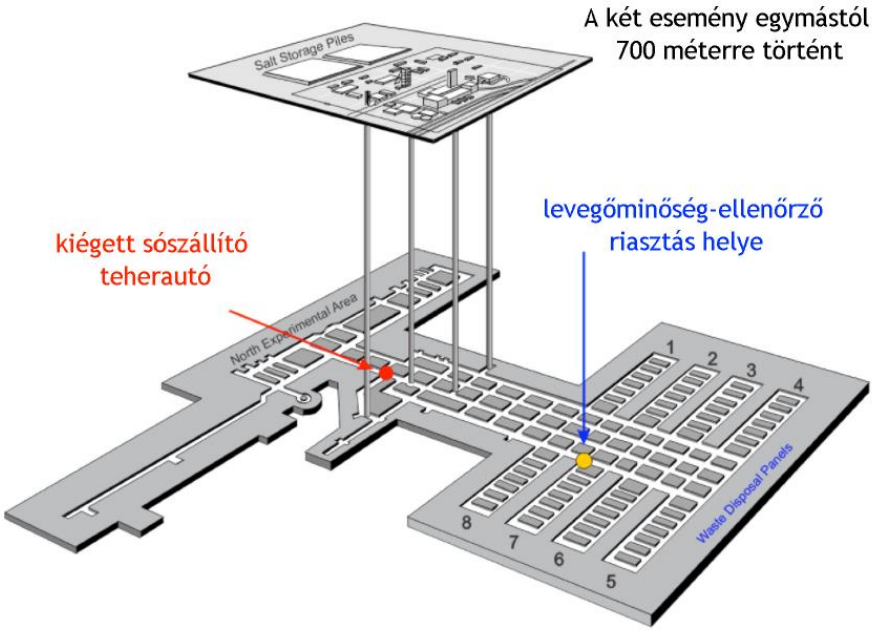
---

[32] The Waste Isolation Pilot Plant – History https://wipp.energy.gov/historytimeline.asp

[33] Malone, P. (2015). Repository's future uncertain, but New Mexico town still believes. https://www.santafenewmexican.com/special_reports/from_lanl_to_leak/repository-s-future-uncertain-but-new-mexico-town-still-believes/article_38b0e57b-2d4e-5476-b3f5-0cfe81ce94cc.html

[34] Vartabedian, R. (2016). Nuclear accident in New Mexico ranks among the costliest in U.S. history. https://www.latimes.com/nation/la-na-new-mexico-nuclear-dump-20160819-snap-story.html

[35] Conca, J. (2017). WIPP Nuclear Waste Repository Reopens For Business. https://www.forbes.com/sites/jamesconca/2017/01/10/wipp-nuclear-waste-repository-reopens-for-business/?sh=4704c232052a



6. ábra: A carlsbadi radioaktívhulladék-lerakó 2014. évi baleseteinek helyszínei (https://wipp.energy.gov/wipprecovery-accident-desc.asp)

AZ ATOMERŐMŰVI KATASZTRÓFÁK ÁLTAL GENERÁLT HULLADÉK-PROBLÉMÁK

Fukusima esete

Évtizedekkel az egyes katasztrófákat követően is fel-felbukkannak a médiában a nagy balesetek következményeiről szóló híradások, merthogy ezek nem számolhatók fel néhány nap alatt, legtöbbször inkább évezredekben mérhetők. A Fukusimai Atomerőműben éppen 10 éve következett be az a baleset, amelyben egy nagy erejű földrengést követő szökőár olyan súlyosan megrongálta az erőmű három reaktorát, hogy azokban teljes zónaolvadás történt. Ennek következményeként a csernobili baleset során a környezetbe került radioaktív szennyezésnek mintegy 20-40%-a került a légkörbe. A japán kormány számára készített független parlamenti bizottsági jelentés ***emberi felelőtlenség*** következményeként határozott meg[36]. A beszámoló szerint „a megkérdőjelezhetetlen atomerőművi nukleáris biztonság" tévképzetében élő mindkét központi szereplő, tehát az üzemeltető (Tokióí Villamosenergia-szolgáltató Vállalat - TEPCO) és az állami ellenőrző hatóság is alábecsülte a kockázatokat, emiatt nem tettek meg alapvető biztonsági intézkedéseket.

A baleset egyik következményeként a megolvadt fűtőelemek még évtizedekig jelentős mennyiségű hőt termelnek, ami folyamatos hűtést tesz szükségessé. Az e célra szolgáló ***hűtővíz*** mindeközben radioaktív hulladékká alakul, amiből immár ***~1,2 millió tonna*** mennyiség gyűlt össze az erőmű telephelyén, ám ennél több ott már nem helyezhető el. Egy japán szakértői bizottság arra tett javaslatot, hogy juttassák a Csendes-óceánba a radioaktívan szennyezett vizet – de a felvetést komoly civil tiltakozás fogadta. Mindeközben a hűtővíz mennyisége még legalább egy további évtizedig, a megolvadt fűtőelemek eltávolításáig, növekszik majd. Minden fontos érdekelt számára egyaránt elfogadható elképzelés egyelőre nem látszik körvonalazódni. Időközben ***több millió köbméter szennyezett talaj*** ártalmatlanításának és elhelyezésének feladata is bekerült a sürgető tennivalók közé.[37] Az atomenergia által okozott káosz lassan végképp áttekinthetetlenné válik.

[36] NAIIC (2012). The official report of The Fukushima Nuclear Accident Independent Investigation Commission. Executive summary. (The National Diet of Japan, NAIIC) https://www.nirs.org/wp-content/uploads/fukushima/naiic_report.pdf

[37] McCurry, J. (2019). Fukushima grapples with toxic soil that no one wants. https://www.theguardian.com/world/2019/mar/11/fukushima-toxic-soil-disaster-radioactive

REMÉNYEK ÉS ELKÉPZELÉSEK MAGYARORSZÁGON

Hazánkban az 50-es években merült fel az igény egy sugárzó hulladékok befogadására szolgáló hely kijelölésére, leginkább annak köszönhetően, hogy megkezdte működését a kutatóreaktor Csillebércen. A solymári kísérleti radioaktívhulladék-tároló[38] 1960-tól 1974-ig fogadott be hulladékot, majd ezt felszámolva, szerepét a Püspökszilágyon létesített telephely vette át. Jelenleg Magyarországon két helyszínen helyezik el véglegesen a kis- és közepes aktivitású radioaktív hulladékot. Váctól délkeletre található Püspökszilágyon, illetve a Szekszárdtól délre található Bátaapátiban.[39]

A radioaktív hulladékok kezelésében mutatkozó elképesztő hazai állapotokat jól illusztrálja, hogy a 2017-ben kelt *Időszakos Biztonsági Felülvizsgálat* Határozati jegyzőkönyve szerint ***„a püspökszilágyi telephelyen 1976 és 2016 között – jogszabályi előírás hiányában – nem került sor időszakos biztonsági felülvizsgálatra”***.[40] Nyilván ennek is köszönhető, hogy a most végre megindult vizsgálódás számos, évtizedek alatt felhalmozódott problémát és hiányosságot tárt fel, így például ***„a talajvízben észlelt trícium- és radiokarbon-aktivitáskoncentráció emelkedést”***. A telepen találtak olyan hosszú felezési idejű hulladékokat is, amiket egy köztes lépés után a 2060-as években átadni tervezett mélygeológiai tárolóban kell elhelyezni.

[38] RHK 2016: Magyarország nemzeti programja a kiégett üzemanyag és a radioaktív hulladék kezelésére. *Radioaktív Hulladékokat Kezelő Kft*. *https://rhk.hu/storage/304/Magyarorsz%C3%A1g-nemzeti-programja.pdf*

[39] OAH 2017: Hatodik jelentés - készült a kiégett fűtőelemek kezelésének biztonságáról és a radioaktív hulladékok kezelésének biztonságáról szóló közös egyezmény keretében. *Országos Atomenergia Hivatal*, Budapest https://www.haea.gov.hu/web/v3/OAHPortal.nsf/79B4771B89AE733AC1258240004AE34C/$FILE/6_Nemzeti_Jelent%C3%A9s.pdf

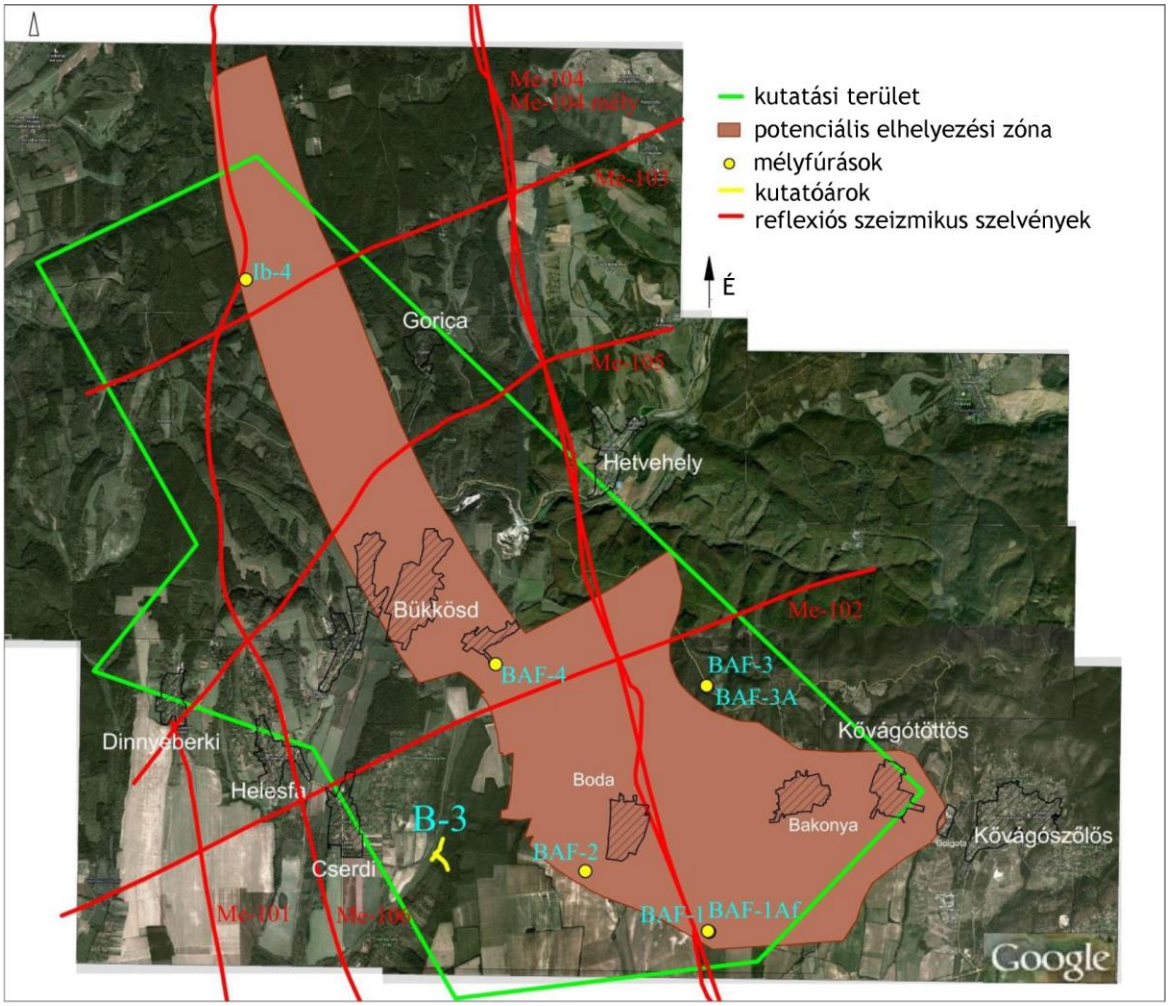
[40] OAH 2017: A püspökszilágyi Radioaktív Hulladék Feldolgozó és Tároló Időszakos Biztonsági Felülvizsgálatának lezárása. Határozat. https://drive.google.com/drive/folders/1a8AagDBukXJIZhO0g8DW6atgItAEXqiX

7. ábra: Radioaktív hulladék Püspökszilágyon[41]

Ami a mélygeológiai tárolást illeti, azt első látásra leszögezhetjük, hogy hazánkban nem található az észak-európaival összevethető, kedvező geológiai környezet. Ahhoz hasonló sincs, és különösen nincs a paksi atomerőmű közelében. Amire szükség volna, az egy kemény, de nem töredező és nem vízáteresztő kőzettest. A hazai kutatások régóta a Pécs közelében található Boda környékére összpontosítanak. Az itt felszínre bukkanó Bodai Agyagkő Formáció sokak szerint alkalmasnak látszik egy tároló létesítésére, azonban egyes geofizikus szakértők véleménye alapján az agyagkőbe temetés kockázatokkal jár. A merev kőzet ugyanis jelentősebb nyomás hatására megrepedezhet, a repedéseken keresztül pedig be tud jutni a víz a tárolóhoz, ami közvetítő közegként szolgál a radioaktív anyagok és a földi ökoszisztéma között. Ráadásul a Mecsek térsége jelenleg is enyhe kiemelkedést mutat, ami több százezer év alatt jelentős mértéket is elérhet. Mivel a felszín eközben erodálódik, a tároló folyamatosan egyre közeledne a felszínhez, amennyiben az emelkedés folytatódik.[42] Ugyan a nemzetközi jog előírja, hogy minden ország saját maga oldja meg ezt a problémát, egyelőre úgy tűnik, hogy a hazai geológiai adottságok egyáltalán nem alkalmasak ilyen tároló építésére. Ez is egy fontos érv az atomenergia hazai alkalmazása ellen.

[41] Fülöp O. 2019: Kicsit reped, kicsit ereszt, de a miénk – a püspökszilágyi atomtemető. https://energiaklub.hu/hirek/kicsit-reped-kicsit-ereszt-de-a-mienk-a-puspokszilagyi-atomtemeto-4686

[42] Atomcsapda: a dokumentumfilm 2-4. részek. Energiaklub, 2018



8. ábra: a Bodai Agyagkő Formáció (BAF) térségének felszíni kutatási területe[43] - az eddigi vizsgálódások szerint a fűtőelemek végleges elhelyezését hazánkban itt lehet optimálisan (vagy inkább legkevésbé rosszul) megoldani

Ami a költségeket illeti, az egészen bizonyos, hogy az 1998 óta működő ***Központi Nukleáris Pénzügyi Alap***ból csak azok töredéke lesz finanszírozható. Az áramfelhasználók tehát nem fizetnek be elegendő összeget – ezért lehet napi szinten ismételgetni, hogy az atomenergia olcsó, illetve ilyen áron lehet életben tartani a rezsicsökkentést. Tehát a mai fogyasztásunk árát jórészt majd a gyermekeink, unokáink és az ő utódaik fogják kifizetni.

A kiégett fűtőelemek ***ideiglenes tárolása*** már önmagában felemészti a befizetések mintegy felét. Ebből következően a maradék 50%-ot lehet a végleges tárolásra fordítani. Az meglehetősen

[43] RKH (2019). A Bodai Agyagkő Formáció telephelykutatási keretprogramjának engedélykérelme Közérthető összefoglal ó. Radioaktív Hulladékokat Kezelő Kft. http://www.nymtit.hu/docs/2019/rhk_kozertheto_osszefoglalo.pdf

problémásnak tűnik, hogy ez az összeg ***alig tizede a tervezettnek***. További aggodalomra ad okot, hogy a betervezett összeg nemzetközi összevetésben korántsem tűnik reálisnak, hiszen például Németországban 2-3-szoros költségekkel kalkulálnak hasonló feladatok esetében. Az alultervezett költségvetés nyilvánvalóan a műszaki biztonság és a környezeti terhelés nézőpontjából aggasztó, hiszen félmegoldásokkal ezen a kritikus területen nem volna szabad próbálkozni.

ÖSSZEGZÉS

Az atomenergia békés és háborús célú alkalmazásai olyan léptékű problémákat generálnak, amelyek alapján határozottan kijelenthető, hogy az emberiségnek távol kell magát ezektől tartania. A radioaktív hulladékok – minden, az atomenergetikára jellemző energetikai, társadalmi és gazdasági problémán túlmutatóan – már önmagukban olyan kihívást jelentenek, amely a tudomány mai állása szerint nem tekinthető megnyugtató módon megoldhatónak. Például ezzel a felismeréssel is magyarázható, hogy a fejlett gazdaságok többsége az atomenergia teljes leépítésén fáradozik (és a maradék kisebbség is a részleges leszerelés mellett döntött, első lépésben), hiszen az energetikában lényegesen olcsóbb, biztonságosabb és megbízhatóbb alternatívák sokasága áll a 21. századi emberiség rendelkezésére.

Világviszonylatban az országok döntő többsége, 84%-a nem működtet atomerőművet, közülük csak néhány jelentősebb európai állam Ausztria, Dánia, Portugália, Olaszország és Lengyelország. Az atomenergia-mentes országok köre hamarosan bővülni fog, mert a technológia nem váltotta be a hozzá fűzött reményeket: ***az atomenergia nem olcsó, nem biztonságos és nem tiszta***. Németország 2022-ig, Belgium 2025-ig, Spanyolországban 2035-ig, Svájc legkésőbb 2050-ig számolja fel a még működő atomerőműveit. Sőt, a világ számos országa már a megújuló energiaforrásokra való teljes átállás mellett tette le a voksát. A hazai lehetőségek kapcsán – számos egyéb kutatás mellett – az ELTE energiaföldrajzi kutatócsoportjának szoftveres elemzései igazolták, hogy egy komoly szabályozási fordulat és a kapcsolódó komplex beavatkozás, így például az energiahatékonyság jelentős javítása révén nálunk is elérhető volna akár a 100% megújulóenergia-részarány elérése.[44] [45]

[44] Munkácsy B. et al. (2011). Erre van előre! Egy fenntartható energiarendszer keretei Magyarországon - Vision 2040 Hungary
http://munkacsy.web.elte.hu/ERRE%20VAN%20ELORE%201.2x.pdf

[45] Munkácsy B. et al. (2014). Erre van előre! A fenntartható energiagazdálkodás felé vezető út. – Vision 2040 Hungary 2.0
http://ktf.elte.hu/wp-content/uploads/2014/09/ERRE-VAN-ELORE-2.0.pdf

IRODALOMJEGYZÉK

Alden, Andrew. 2017. Why Not Dispose of Waste in Ocean Trenches?
https://www.thoughtco.com/dont-dispose-waste-in-ocean-trenches-1441116

Atomcsapda. 2018. Dokumentumfilm, 2-4. részek. *Energiaklub*

Atomcsapda Blog. 2017. Ha csak egy cikket olvasol el az atomtemetőkről, ez legyen az! *Energiaklub*, 2017. július 30.
https://atomcsapda.blog.hu/2017/07/30/ha_csak_egy_cikket_olvasol_el_az_atomtemetokrol_ez_legyen_az

Beckman, Karel. 2015. Steve Holliday, CEO National Grid: „The idea of large power stations for baseload is outdated". *Energypost.eu*, 2015. szeptember 11.
https://energypost.eu/interview-steve-holliday-ceo-national-grid-idea-large-power-stations-baseload-power-outdated/

Budai Tamás – Konrád Gyula 2011. Magyarország földtana.
http://enfo.agt.bme.hu/drupal/sites/default/files/Mof_jegyzet.pdf

Burridge, Tom. 2016. Chernobyl's legacy 30 years on. *BBC News*, 2016. április 26.
https://www.bbc.com/news/world-europe-36115240

Conca, James. 2017. WIPP Nuclear Waste Repository Reopens For Business. *Forbes*, 2017. január 10.
https://www.forbes.com/sites/jamesconca/2017/01/10/wipp-nuclear-waste-repository-reopens-for-business/?sh=4704c232052a

Diehl, Peter. 2011. Uranium Mining in Eastern Germany: The WISMUT Legacy. *wise-uranium.org*, 2011. április 17.
https://www.wise-uranium.org/uwis.html

European Environment Agency (n.d.). EN13 Nuclear Waste Production.
https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/en13-nuclear-waste-production-1/en13

Fülöp Orsolya. 2019. Kicsit reped, kicsit ereszt, de a miénk – a püspökszilágyi atomtemető. *Energiaklub*, 2019. február 18.
https://energiaklub.hu/hirek/kicsit-reped-kicsit-ereszt-de-a-mienk-a-puspokszilagyi-atomtemeto-4686

IAEA. 1999. Inventory of radioactive waste disposals at sea. *International Atomic Energy Agency*
https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/te_1105_prn.pdf

IAEA. 2020. Incident And Trafficking Database (ITDB). Incidents of nuclear and other radioactive material out of regulatory control. 2020 Fact Sheet
https://www.iaea.org/sites/default/files/20/02/itdb-factsheet-2020.pdf

Jungjohann, Arne ed. 2019. World Nuclear Waste Report
https://worldnuclearwastereport.org/

Kautsky, U., Saetre, P., Berglund, S., Jaeschke, B., Nordén, S., Brandefelt, J., Keesmann, S., Näslund J-E., Andersson, E. 2016. The impact of low and intermediate-level radioactive waste on humans and the environment over the next one hundred thousand years. *Journal of Environmental Radioactivity*, 151, 395–403. doi:10.1016/j.jenvrad.2015.06.025 https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0265931X15300370#!

Malone, Patrick. 2015. Repository's future uncertain, but New Mexico town still believes. *The New Mexican*, 2015. február 18.
https://www.santafenewmexican.com/special_reports/from_lanl_to_leak/repository-s-future-uncertain-but-new-mexico-town-still-believes/article_38b0e57b-2d4e-5476-b3f5-0cfe81ce94cc.html

McCurry, Justin. 2019. Fukushima grapples with toxic soil that no one wants. *The Guardian,* 2019. március 11.
https://www.theguardian.com/world/2019/mar/11/fukushima-toxic-soil-disaster-radioactive

Munkácsy Béla. et al. 2011. Erre van előre! Egy fenntartható energiarendszer keretei Magyarországon - Vision 2040 Hungary
http://munkacsy.web.elte.hu/ERRE%20VAN%20ELORE%201.2x.pdf

Munkácsy Béla. et al. 2011. Erre van előre! Egy fenntartható energiarendszer keretei Magyarországon - Vision 2040 Hungary
http://munkacsy.web.elte.hu/ERRE%20VAN%20ELORE%201.2x.pdf

MVM Paks II. Zrt. Környezeti Hatástanulmány – Közérthető összefoglaló. 12. és 20.6.2. fejezetek
https://www.paks2.hu/documents/20124/60046/K%C3%B6rnyezeti+hat%C3%A1stanulm%C3%A1ny+-+K%C3%B6z%C3%A9rthet%C5%91+%C3%B6sszefoglal%C3%B3.pdf/5ea368ee-fa34-f276-0c78-eff7f369f2ef

NAE. 2008. INES: A Nemzetközi Nukleáris és Sugaras Veszélyhelyzeti Eseményskála kézikönyv. Magyar fordítás. *Országos Atomenergia Hivatal,* 2009.
https://www.haea.gov.hu/web/v3/oahportal.nsf/AB534110DEE39331C1257BE400746F05/$File/INES%20k%C3%A9zik%C3%B6ny%20ford%C3%ADt%C3%A1s%20honlapra%20-%20kieg%C3%A9sz%C3%ADt%C3%A9sek.pdf

Nagy Gergely Miklós. 2019. A sóbánya, amely a német atom múltját rejti. *Magyar Narancs,* 2019. április 6.
https://magyarnarancs.hu/kulpol/csak-ne-az-udvaromba-117275

NAIIC. 2012. The official report of The Fukushima Nuclear Accident Independent Investigation Commission – Executive summary. *The National Diet of Japan, Nuclear Accident Independent Investigation Commission*
https://www.nirs.org/wp-content/uploads/fukushima/naiic_report.pdf

OAH. 2017. Hatodik jelentés - készült a kiégett fűtőelemek kezelésének biztonságáról és a radioaktív hulladékok kezelésének biztonságáról szóló közös egyezmény keretében. *Országos Atomenergia Hivatal*
https://www.haea.gov.hu/web/v3/OAHPortal.nsf/79B4771B89AE733AC1258240004AE34C/$FILE/6_Nemzeti_Jelent%C3%A9s.pdf

OAH. 2017. A püspökszilágyi Radioaktív Hulladék Feldolgozó és Tároló Időszakos Biztonsági Felülvizsgálatának lezárása. Határozat. *Országos Atomenergia Hivatal,* Határozat száma: RHKR-HA0021

Palm, Jenny. 2020. Knowledge about the Final Disposal of Nuclear Fuel in Sweden: Surveys to Members of Parliament and Citizens. *Energies 2020,* 13, 374; doi:10.3390/en13020374
file:///C:/Users/Bence/Downloads/energies-13-00374.pdf

Petz Ernő. 2011. Mi van, ha mégsem igaz? *Polgári Szemle,* 7. évfolyam, 4. szám
https://polgariszemle.hu/archivum/125-2011-szeptember-7-evfolyam-4-szam/gazdasagstrategia/446-mi-van-ha-megsem-igaz

Radioactive Waste Management. *World Nuclear Association,* 2020. február
https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-wastes/radioactive-waste-management.aspx

RHK. 2016. Magyarország nemzeti programja a kiégett üzemanyag és a radioaktív hulladék kezelésére. *Radioaktív Hulladékokat Kezelő Kft*. 2016. augusztus
https://rhk.hu/storage/304/Magyarorsz%C3%A1g-nemzeti-programja.pdf

RHK. 2019. A Bodai Agyagkő Formáció telephelykutatási keretprogramjának engedélykérelme Közérthető összefoglaló. *Radioaktív Hulladékokat Kezelő Kft*.
http://www.nymtit.hu/docs/2019/rhk_kozertheto_osszefoglalo.pdf

Rhodes, Christopher J. 2014. The Fukushima Daiichi Nuclear Accident. *Science Progress,* 97(1), 72-86. doi:10.3184/003685014x13904938571454

Schneider, Mycle. 2008. Nuclear Power Made in France – The Model? *NPEC*
http://npolicy.org/article_file/Nuclear_Power_Made_in_France-The_Model.pdf

Schumacher, Ernst Friedrich. 1973. Small is Beautiful: A Study of Economics as if People Mattered
https://terebess.hu/keletkultinfo/Schumacher-Small-is-Beautiful.pdf

Schwartz, Michael O. 2010. Clearing Out Asse 2. *Nuclear Engineering International,* 2010. augusztus 24.
https://www.neimagazine.com/features/featureclearing-out-asse-2

Stonington, Joel. 2016. Sticker Shock: The Soaring Costs Of Germany's Nuclear Shutdown. *Yale School of the Environment,* 2016. július 25.
https://e360.yale.edu/features/soaring_cost_german_nuclear_shutdown

Szűcs István. 2013. A nukleáris ipar hulladékkezelési kihívásai. *Pannon Egyetem Környezetmérnöki Intézet*.
https://dtk.tankonyvtar.hu/xmlui/bitstream/handle/123456789/7657/0021_Nuklearis_ipar_hulladekkezelese.pdf?sequence=1&isAllowed=y

The World Nuclear Waste Report 2019 – Összefoglaló. *Energiaklub*
https://energiaklub.hu/files/news/WNWR_%C3%96sszefoglal%C3%B3_0.pdf

Thomson, Jonathan. 2020. Nuclear power is clean – if you ignore all the waste. *hcn.org,* 2020. január 1.
https://www.hcn.org/issues/52.1/nuclear-energy-nuclear-power-is-emissions-free-but-at-what-cost-waste

Vartabedian, Ralph. 2016. Nuclear accident in New Mexico ranks among the costliest in U.S. history. *Los Angeles Times,* 2016. augusztus 22.
https://www.latimes.com/nation/la-na-new-mexico-nuclear-dump-20160819-snap-story.html

Watson, W. S., Sumner, D. J., Baker, J. R., Kennedy, S., Reid, R., & Robinson, I. 1999. Radionuclides in seals and porpoises in the coastal waters around the UK. *Science of The Total Environment*, 234(1-3), 1–13. doi:10.1016/s0048-9697(99)00118-7

WIPP History/Timeline. *Waste Isolation Pilot Plant*
https://wipp.energy.gov/historytimeline.asp

Zagyvai Péter, Kókai Zsófia, Hózer Zoltán, Breitner Dániel, Fábián Margit, Török Szabina, Börcsök Endre. 2013. A nukleáris üzemanyagciklus radioaktív hulladékai. *Magyar Tudományos Akadémia, Energiatudományi Kutatóközpont*
https://www.energia.mta.hu/~osan/SH_7_2_11/Nuklearis_uzemanyagciklus_radioaktiv_hulladekai_MTA_EK.pdf