

III. Évfolyam 3. szám - 2008. szeptember

Halász László

Zrínyi Miklós Nemzetvédelmi Egyetem
halasz.laszlo@zmne.hu

Hanka László

Zrínyi Miklós Nemzetvédelmi Egyetem
hanka.laszlo@zmne.hu

Vincze Árpád

Országos Atomenergia Hivatal
vincze@haea.gov.hu

A NUKLEÁRIS ERŐMŰVEK NEGYEDIK GENERÁCIÓJÁNAK ÉS EGY KORSZERŰBB REPROCESSZÁLÁSI ELJÁRÁS JÖVŐBELI ALKALMAZÁSÁNAK LEHETŐSÉGE A NUKLEÁRIS HULLADÉKOK NÖVEKVŐ MENNYISÉGÉNEK ÉS ELHELYEZÉSI PROBLÉMÁJÁNAK TÜKRÉBEN

Absztrakt

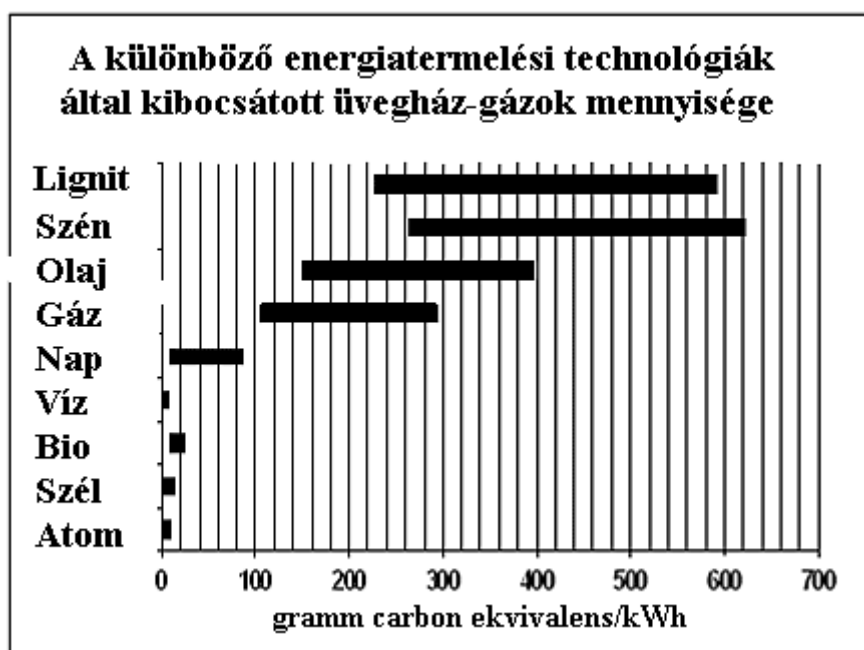
A nukleáris energetika hosszú távon csak az erőművek új generációjának kifejlesztésével tartható fenn. Az fémolvadékkal hűtött gyorsreaktorokban – ellentétben a hagyományos termikus reaktorokkal –, gyorsneutronokkal tartják fenn a láncreakciót. Ennek köszönhetően az uránium és a nagyobb rendszámú elemek atommagjai lényegesen nagyobb százalékban hasadnak, így az urán fűtőanyag energiájának sokkal nagyobb részét lehet kinyerni. Ez a technológia felkínálja egy alternatív reprocesszási eljárás alkalmazásának lehetőségét, melynek során a tiszta plutónium előállítása nem kerül szóba. A pyrometallurgiai eljárás során elkülöníthetők a transzuránok, melynek köszönhetően a transzurán összetevőknek csak elenyésző mennyisége kerül a hulladéktárolókba, drasztikusan lecsökkentve ezáltal a tárolás időtartamát. Minden erőművi reaktor működése során évente több tonna hulladék keletkezik melynek tárolásáról gondoskodni kell. A jövő reaktorai újra tudják majd hasznosítani a kiegészített fűtőanyagot, csökkentve ezáltal a felhalmozódott mennyiséget, de a nukleáris hulladék mennyisége az elkövetkező évtizedekben akkor is növekszik majd, ha egyetlen új termikus reaktort sem helyeznek üzembe. Már napjainkban is több nukleáris hulladék van a Földön, mint amennyit az erre kijelölt tározókban el lehet helyezni. Az Egyesült Államok kormánya ezért 1987-ben úgy döntött, hogy épít egy geológiai megőrzőhelyet a Nevada állambeli Yucca-hegy gyomrában, nagy aktivitású nukleáris hulladékok számára. Ez a létesítmény azonban biztosan nem nyílik meg 2017 előtt. Azon reaktorok lebontása, amelyek működési idejük végére értek, egyrészt új kihívást másrészt összetett feladatot jelentenek, de jelentős mértékben hozzájárulnak a nukleáris hulladékok tárolásával kapcsolatos problémákhoz.

A safer, more sustainable nuclear power cycle could be based on the new generation of reactors. An ALMR reactor system – in contrast with current thermal reactors –, would use fast-moving neutrons. This process permits all the uranium and heavier atoms to be consumed, thereby allowing vastly more of the fuel's energy to be captured. This technology permits an alternative recycling strategy – called pyrometallurgical process –, that doesn't involve pure plutonium at any stage. Pyroprocess collects virtually all the transuranic elements, only a very small portion of the transuranic component ends up in the final waste, which reduces the needed isolation time drastically. Each of the power generating reactors annually produces tones of debris that must be stored. Future reactors may recycle spent fuel and reduce waste, but the amount of spent fuel will rise in coming decades even if no new thermal reactors are built. There is already more nuclear waste than the currently operating repository facilities can hold. In 1987 US government decided to build a new geological repository at Yucca Mountain in Nevada for high level waste, but it won't open before 2017. Dismantling a nuclear power plant that has reached the end of its life is a new challenge and a complicated task, which operation contributes to the problem of storing nuclear waste.

Kulcsszavak: *Nukleáris erőmű, kiégett fűtőelemek, nukleáris hulladék, reprocessálás, pyrometallurgiai eljárás, termikus reaktor, gyors reaktor, ALMR reaktor, plutónium és transzuránok, nukleáris hulladékok tárolása, Yucca-hegy, reaktorok lebontása ~ Nuclear power plant, spent nuclear fuel, nuclear waste, reprocessing, pyrometallurgical process, thermal reactor, fast reactor, advanced liquid metal reactor, plutonium and transuranics, repository of nuclear waste, Yucca Mountain, dismantling reactors.*

A NUKLEÁRIS ENERGIA JELENLEGI SZEREPE A FÖLD ORSZÁGAIBAN

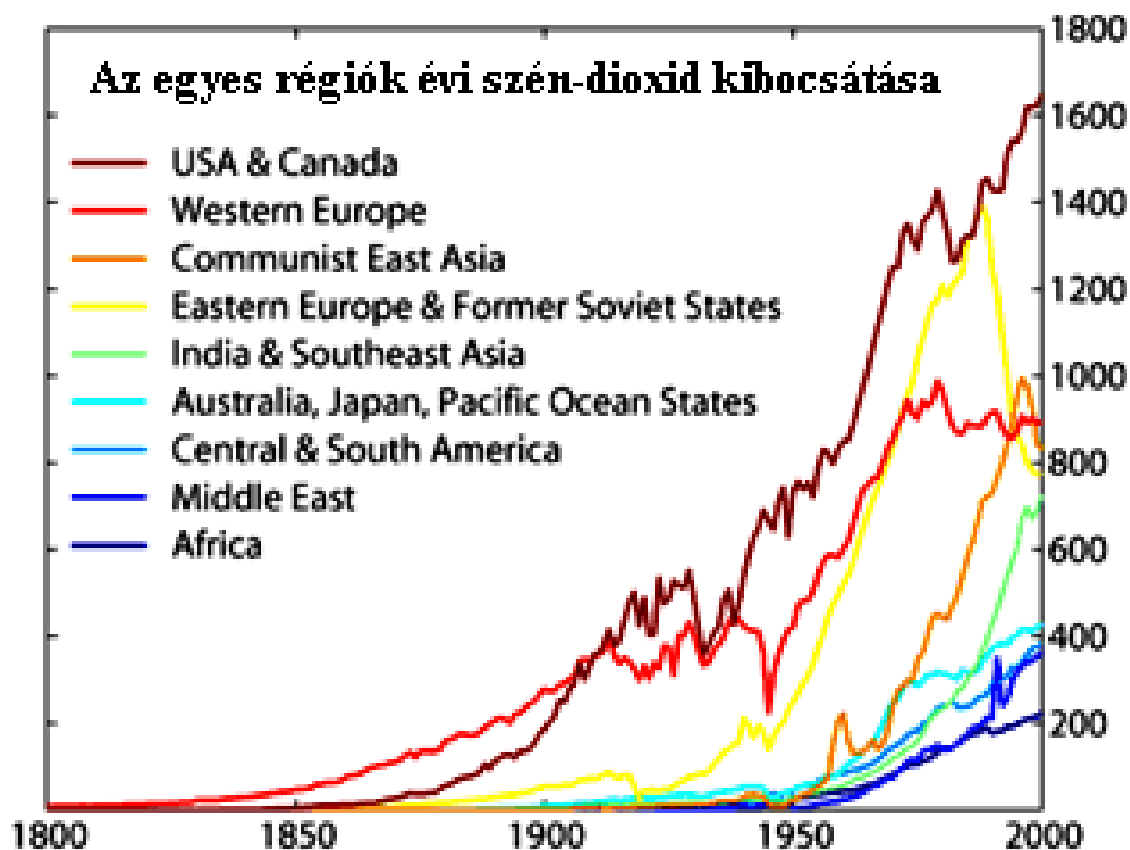
Az energiatermelés jövőjével kapcsolatosan napjaink egyik legfontosabb és a „nem szakértő publikum” által is a legtöbbet emlegetett problémája, hogy mi legyen az atomenergia sorsa a jövőben. Kérdés, hogy szükség van-e újabb erőművekre, a hagyományos típusokra vagy új generációs erőművekre, vagy éppen ellenkezőleg, ne épüljön több reaktor, sőt a meglévőket is be kellene zárni és le kellene bontani. Az iparilag fejlett és az intenzíven fejlődő országok hozzáállása a kérdéshez nagyjából egybehangzó. A szakértők a világ minden pontján egyetértenek abban, hogy az atomerőművek működtetési költsége relatíve a legalacsonyabb, továbbá az általuk termelt villamos energia is olcsóbb mint a gáz vagy széntüzelésű erőművek által termelt energia. Azt külön hangsúlyozni kell, hogy az utóbbiakkal ellentétben, a nukleáris erőművek nem szennyeznek a légkört üvegházhatást okozó szén-dioxiddal. Ha manapság egy nukleáris energetikával foglalkozó mérnök vagy fizikus lelkébe látnánk, valószínűleg egy agilis természetvédőt fedeznénk fel benne. Számos környezetvédő, aki egy évtizeddel ezelőtt említeni sem volt hajlandó a nukleáris erőművek létjogosultságát, ma már alkalmanként helyeslően nyilatkozik a kérdést illetően. Az egyik legfontosabb fegyvertény, hogy az atomerőművek nem bocsátanak a légkörbe az éghajlatváltozásért felelős üvegház-gázokat (1.ábra). Természetesen nem szabad megfeledkezni az érme másik oldaláról, az erőművi balesetokról, a nukleáris hulladék tárolásának problémájáról, a gigantikus építési költségekről, a nukleáris fegyverek gyártásáról, vagy akár a lehetséges terrorcselekményekről. Ezek a problémák korántsem elhanyagolhatóak, különösen akkor, ha új erőművek építése kerül szóba. Mindezek ellenére a vezető környezetvédők részéről kissé csökkent az ellenállás az atomenergiával szemben.



1. ábra: Az egyes erőműtípusok légszennyezése CO₂-ekvivalens egységben [1.]

Az Amerikai Egyesült Államokban jelenleg 104 erőművi reaktor működik, tehát a Földön működő összes reaktorok egynegyede. Ennek ellenére az Egyesült Államok arra kényszerül, hogy villamos energia szükségletének a felét – a nukleáris erőművek esetén több milliárd dollárra rúgó építési költségeknél sokkal olcsóbban megépíthető, ámbár költségesebb működésű és környezetszennyező – fosszilis erőművekkel biztosítsa. Ennek az a következménye, hogy évente 2 milliárd tonna szén-dioxidot juttat a légkörbe [1].

Az 1970-es és 80-as években az előforduló üzemzavaroknak, baleseteknek, karbantartás és biztonsági átvizsgálás miatt bekövetkező leállásoknak köszönhetően az Egyesült Államok erőművei a teljes kapacitásuknak mindössze 65%-át szolgáltatták. Ma a biztonságosabb működési feltételeknek, a felhalmozódott tapasztalatoknak köszönhetően ez az arány meghaladja a 90%-ot. A szakértők véleménye egybehangzóan az, hogy a nukleáris energetika a reneszánszát éli napjainkban. Azt hangoztatják, hogy a nukleáris energetika már bizonyította alkalmasságát, hogy a 21. század energiaforrása legyen. Szerintük nem szükséges lebontani az erőműveket, nem kell elkeseredetten tiltakozni az atomenergia ellen, hanem meg kell barátkozni a gondolattal, mert a közeli jövőben nincs jobb lehetőség az emberiségnek (2. ábra).



2. ábra: A Föld egyes területein kibocsátott szén-dioxid mennyisége millió tonna/év egységben [II.]

Franciaországban a teljes villamos energia szükséglet 78%-át biztosítják atomerőművekkel, az előregedett erőműveket pedig újakkal helyettesítik. A villamos energia ipar intenzív virágzásnak indult Ázsiában is. Kínában egyre másra épülnek a széntüzelésű erőművek, és ambiciózus terveik vannak új atomerőművek építésére. Napjainkban 9 erőművi reaktoruk összesen 6600 MW teljesítménnyel dolgozik, de a tervek szerint ezt 40.000 MW-ra szeretnék növelni. Az 1,1 milliárd lakosú Indiában jelenleg 15 reaktor termel energiát és további 8 építése van folyamatban, több mint a világ bármely más országában. Az Indiai Atomenergia Hivatal hangoztatja a nukleáris erőművek üvegházhatással kapcsolatos előnyeit, a fő mozgatórugó azonban a „gigawattok iránti vágy”. Balder Raj, az Indira Gandhi Atomkutató Központ igazgatója az ország energiapolitikáját röviden az alábbi módon fogalmazza: „Ha van rá mód, hogy energiát termelj, akkor mi azt mondjuk, hogy termelj olyan sokat, amennyit csak tudsz.” Ezzel a politikával összefér, hogy annyi atomreaktort üzemeltetnek majd, amennyire csak lehetőségük adódik. Napjainkban is épül kettő 220 MW teljesítményű nehézvizű reaktor India délnyugati partvidékétől 30 km-re a dzsungelben a „tigris és a királykobra hazájában”. Ez a két reaktor 3 millió ember energiaigényét hivatott majd fedezni. A tervek szerint e kettő mellé épül még két hasonló, a távolabbi jövőben pedig két újabb, melyek teljesítménye kétszerese lesz a most épülőeknek. A teljes képhez azonban hozzátartozik az is, hogy az Indira Gandhi Központban jelenleg épül egy 500 MW teljesítményű tenyésztőreaktor is, amely 2010-ben kezdi meg működését. Ezt további 4 tenyésztőreaktor követi majd 2020-ig. Ezek arra szolgálnak, hogy az urán fűtőanyagban az urán egy részét átalakítsák plutóniummá. Így egyrészt lehetőség nyílik arra, hogy az erőművek nagyobb teljesítményűvé és nagyobb hatásfokúvá váljanak, de ugyanakkor előáll a lehetősége annak is, hogy a plutóniumból nukleáris fegyvert gyártsanak, illetve, hogy a plutónium illetéktelen kezekbe kerüljön.

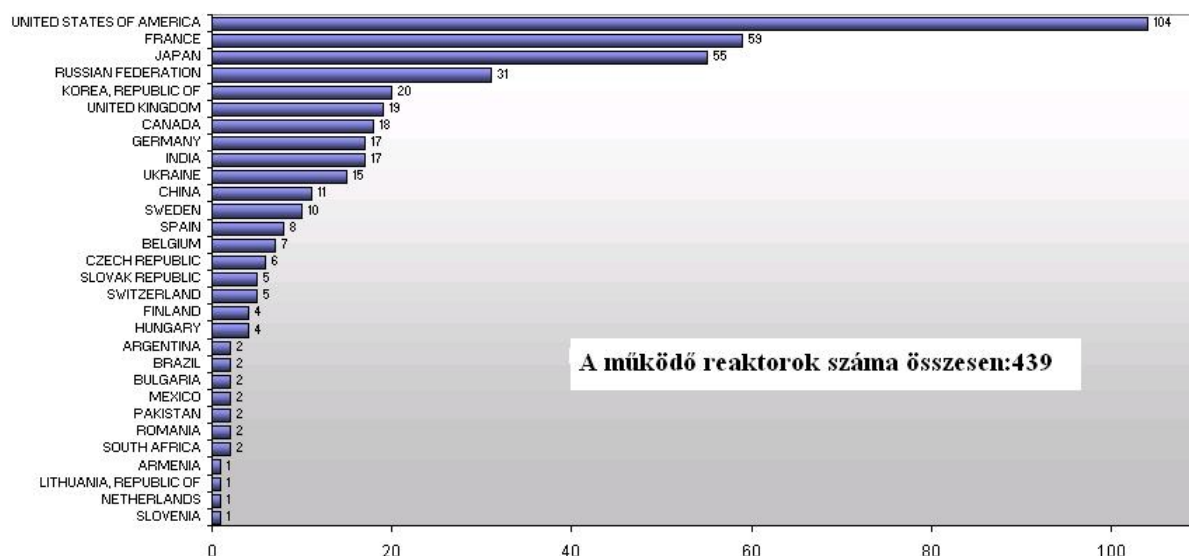
NEGYEDIK GENERÁCIÓS REAKTOROK

A nukleáris energetika biztonságával kapcsolatos, évtizedek óta tapasztalható fenntartások ellenére egyre inkább elfogadottá válik a gondolat, hogy jelen pillanatban az atomenergia az egyetlen környezetbarát módszer nagy mennyiségű villamos energia előállítására. Számos nemzet, köztük Brazília, Kína, Egyiptom, Finnország, India, Japán, Pakisztán, Oroszország, Dél Korea, Vietnam vagy tervezi atomerőművek építését, vagy ezek építése már folyamatban van. Érdekes, hogy ez a globális tendencia nem érvényesül az Egyesült Államok energiapolitikájában, ott ugyanis az utolsó ilyen projekt több mint 30 éve kezdett megvalósulni. Azonban még az atomenergia elkötelezett hívei is egyetértenek abban, hogy a jövőben csak új típusú, a hagyományos termikus reaktoroktól eltérő szerkezetű reaktorok alkalmazásának van perspektívája. Ha a tervek megvalósulnak, két-három évtized múlva az atomipar olyan negyedik generációs erőműveket üzemeltet majd, melyek magasabb hőmérsékleten, nagyobb hatásfokkal működnek. Ezek az urán fűtőanyag nagyobb hányadát hasznosítják a lánc-reakcióban, így egyrészt több energiát termelnek majd, másrészt – és ez legalább annyira fontos tulajdonság –, a nagyobb hatásfokú lánc-reakciónak és a reaktor termikustól eltérő szerkezetének, működésének köszönhetően a nukleáris hulladékok mennyisége és aktivitása is csökkenni fog, így rövidebbé válik a hulladékok tárolásának minimálisan szükséges időtartama. A tervek szerint ezeknek a reaktoroknak sokkal áttekinthetőbb lesz a biztonsági rendszere és kevésbé kifinomult vezérlést igényelnek majd.

Az új fejlesztéseknek köszönhetően a nukleáris energetika – melynek forrásai gyakorlatilag kimeríthetetlenek –, fenntarthatónak látszik a jövőben, anélkül, hogy ez az energiatermelő tevékenység hozzájárulna a klímaváltozásokhoz. A nukleáris technológia fejlesztéseinek köszönhetően úgy tűnik, a nukleáris ipar és a Föld lakossága megszabadulhat a jelenlegi technológia hátrányaitól, a reaktorbalesetektől, a nukleáris fűtőanyag és hasadási termékeinek proliferációjától, a nukleáris hulladékok kezelésének problematikájától.

Az innovációnak két aspektusa van [2]. Egyrészt kidolgoztak egy korszerűbb reprocesszási módszert az ún. pyrometallurgiai eljárást, melynek során magas hőmérsékleten ismét alkalmassá teszik a reaktorban keletkezett kiegészítő fűtőelemet arra, hogy egy reaktorban ismét fűtőanyagként legyen alkalmazható. Ehhez azonban – és ez a fejlesztés másik iránya –, erre alkalmas, gyors neutronokkal is működő új típusú reaktorokra van szükség. A hatékony láncreakció létrejöttének feltétele, hogy a neutronok vagy lassúak (termikusak) vagy nagyon gyorsak legyenek. A termikus neutronok kinetikus energiája $E_{\text{term}} = 0,004 \text{ eV} = 4 \cdot 10^{-21} \text{ J}$, míg a gyors neutronoké $E_{\text{gyors}} = 0,3 \text{ MeV} = 3 \cdot 10^{-13} \text{ J}$, tehát a két energia között van 8 nagyságrend eltérés. A Földön jelenleg működő energetikai reaktorok túlnyomó része, 439 db, termikus reaktor. (3.ábra) Ezekben a fűtőanyag az urán 235 tömegszámú izotópja, az ún. hasadóanyag („fissile”), amely nagy valószínűséggel elsősorban termikus neutronok hatására hasad. A természetes urán azonban nagyobb részben, ~99,3%-ban tartalmazza a nagyobb tömegszámú U-238 izotópot, amely termikus neutronokkal „csak hasítható” („fissionable”), de a termikus hasítás esélye jelentősen kisebb, sokkal nagyobb valószínűséggel hasad gyors neutronok hatására. További fontos sajátja ennek az izotópnak, hogy befoghat úgy neutron, hogy ennek következtében nem jön létre hasadás, hanem 239 tömegszámú plutónium izotóp keletkezik. A Pu-239 azonban az U-235 izotóphoz hasonlóan hasadóanyag, alkalmazása esetén biztosítva van az önfenntartó láncreakció. A termikus reaktorok viszonylag olcsón, jó hatásfokkal termelik a villamos energiát, de komoly hátrányuk, hogy szerkezetükből adódóan nem lehet csökkenteni a működés során keletkező radioaktív hulladék mennyiségét.

A jelenleg működő atomreaktorok száma a Föld országaiban



3. ábra: Atomreaktorok a Föld országaiban [III.]

Egy termikus erőmű üzemelése során a fűtőanyagban a nagy tömegszámú hasadóanyag(ok) atomjainak száma csökken, a fűtőelem „kiég”. Egy új fűtőelem dúsított uránt tartalmaz amelyben az U-235 aránya 3-5% körüli érték a konkrét típustól függően. Ez az arány a reaktor 3 évi működése során nagyjából 1%-ra csökken. Ekkor az U-235 lecsökkent mennyisége és a sugárzás okozta anyagszerkezeti változások miatt a fűtőelemet a reaktorból el kell távolítani. Hangsúlyozzuk, hogy ebben az állapotban az U-238-ból termelődött Pu-239 izotóp hasadása már több mint 50%-át szolgáltatja a fűtőelem által termelt összes energiának. Mindent egybevetve, amikor a technikusok eltávolítják a reaktorból a „kiégett” fűtőelemet, az még tartalmazza a kezdetben benne levő, hasadásra képes atomok 95%-át. Másképpen fogalmazva, a fűtőelem eltávolításakor, a benne rejlő nukleáris energiának mindössze 5%-a hasznosult. Ehhez még hozzátartozik az is, hogy a bányából kitermelt uránércnek mindössze egytizede alakul át nukleáris fűtőanyaggá a dúsítási eljárások során. E két adatot egybevetve az adódik, hogy a napjainkban működő termikus erőművi reaktorokban a kitermelt uránércben rejlő energiának kevesebb mint 1%-a hasznosul [2].

Ha ezekre a számadatokra gondolunk, nem meglepő, hogy sok tudósban megérlelődött a gondolat, miszerint a „kiégett” fűtőelemek még alkalmasak lennének további energiatermelésre. Ha figyelembe vesszük, hogy a Föld uránkészletei végesek, továbbá azt, hogy az egyre növekvő számú termikus reaktor néhány évtizeden belül kimeríti a rendelkezésre álló készleteket, akkor nyilvánvalónak tűnik az igény, hogy a kiégett fűtőelemektől, a nukleáris hulladéktól illetve a dúsítási eljárás során keletkező meddőtől nem megszabadulni kell, hanem alkalmas folyamatokkal újra hasznosíthatóvá kell tenni azokat.

A kiégett fűtőanyag alkotórészei lényegében három osztályba sorolhatók. A hasadási termékek a nehéz magok hasadása során keletkező kisebb tömegszámú elemek atommagjai. Ezek keveréke nem haladja meg a fűtőelem teljes mennyiségének 5%-át. Ennek ellenére a hasadási termékek jelentik egyrészt a tényleges nukleáris hulladékot, mely különösen az első néhány évtizedben számottevően radioaktív. Az első évtized elteltével azonban a legtöbb izotóp gyakorlatilag elbomlik, a maradék aktivitás dominánsan két komponenstől, a Cs-137 és a Sr-90 izotóptól származik (1.táblázat). Mindkét anyag vízben oldható, így nagyon körültekintő módon kell megoldani a hosszú távú tárolás problémáját. Nagyjából 300-500 év elteltével csökken az aktivitás a kezdeti aktivitás szintjének 1/1000 része alá, innentől tekinthető a nukleáris hulladék veszélytelennek.

Néhány hasadási termék radiológiai tulajdonságai				
Rendszám	Ismert izotópok száma	Izotóp	Felezési idő	A radioaktív bomlás típusa
27	29	Cobalt-60	5,27 év	béta, gamma
38	33	Stroncium-90	28,1 év	béta
39	33	Yttrium-90	2,66 nap	béta
53	37	Jód-131	8,02 nap	béta, gamma
55	40	Cézium-137	30,23 év	béta, gamma
77	36	Iridium-192	73,8 nap	béta, gamma
84	33	Polónium-210	138,37 nap	alfa, gamma
86	34	Radon-222	3,823 nap	alfa
88	29	Radium-226	1590 év	alfa, gamma
1. táblázat				
Néhány hasadási termék radiológiai tulajdonságait tartalmazza a táblázat. Tartalmazza még a táblázat a jelenleg ismert egyéb izotópok számát is, melyek 1-2 kivétellel szintén radioaktívak				

A kiégett fűtőelem legszámottevőbb része maga az uránium, részaránya a teljes mennyiségnek körülbelül a 94%-a. Ez a fűtőelemben kezdetben meglevő uránium el nem hasadt része. Ebben az állapotban az U-235 részaránya megközelíti az uránércben tapasztalható természetes ~0,71% arányt. A fűtőanyagnak ez a komponense csak kevésbé radioaktív, ha sikeresen elválasztják a hasadási termékektől és az egyéb anyagoktól, akkor alkalmas arra, hogy jövőbeli felhasználás céljára, nem túl szigorú körülmények között raktározzák.

A kiégett fűtőanyag fennmaradó és egyben legtöbb problémát okozó komponense a 89 és 104 rendszám közötti transzurán elemek, az aktinidák periódusa, melyek között a legnagyobb részt előforduló elemek a plutónium, amerícium és kúrium. A 2. táblázatban összefoglaltuk a kérdéskör szempontjából legfontosabb transzuránok radiológiai tulajdonságait. A 2. oszlopban a jelenleg ismert izotópok számát tüntettük fel, míg a következő három oszlop a leghosszabb felezési idejű izotóp adatait tartalmazza. A táblázatból kimaradt transzuránok felezési ideje csupán néhány nap, illetve néhány óra nagyságrendű, így a tárolás, kezelés szempontjából érdektelenek. Habár a transzuránok részaránya kevesebb mint 1%, napjainkban mégis ezen elemek okozzák a nukleáris hulladékok kezelésével, tárolásával kapcsolatos legtöbb gondot és problémát. Ezen izotópok felezési ideje ugyanis több tízezer sőt több milliárd év is lehet. Ez az oka annak, hogy a nukleáris hulladékok tárolását több ezer-tízezer év időskálán kell megoldani.

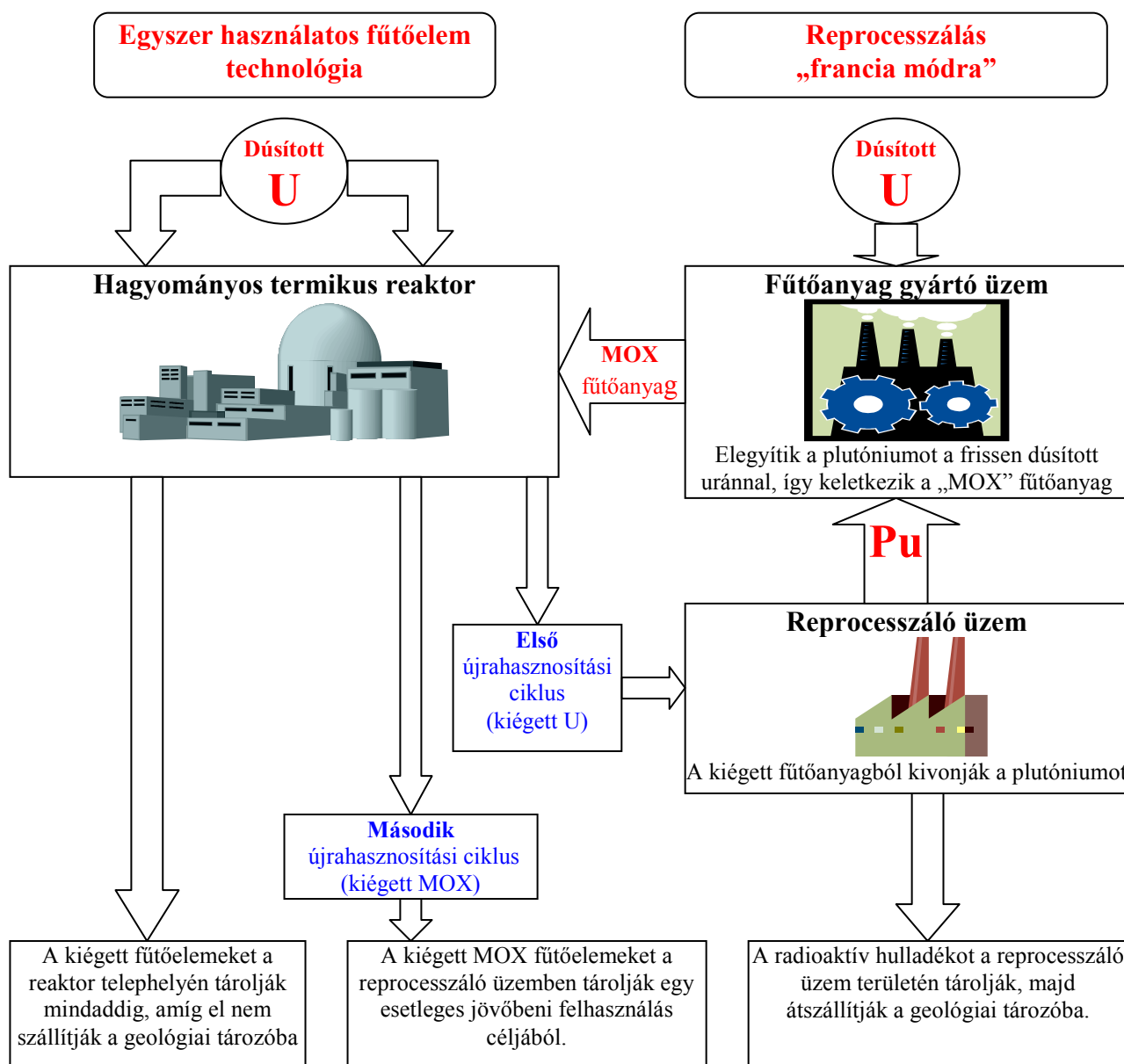
Aktinidák radiológiai tulajdonságai				
Rendszám	Ismert izotópok száma	Izotóp	Felezési idő	A radioaktív bomlás típusa
89	31	Actínium-227	21,7865 év	béta
90	30	Thorium-232	$1,406 \cdot 10^{10}$ év	alfa
91	29	Protactínium-231	32,788 év	alfa
92	26	Urán-238	$4,47 \cdot 10^9$ év	alfa
93	20	Neptunium-237	$2,145 \cdot 10^6$ év	alfa
94	20	Plutónium-244	$7,93 \cdot 10^7$ év	alfa
95	19	Amerícium-243	7388 év	alfa
96	20	Kúrium-247	$1,56 \cdot 10^7$ év	alfa
97	20	Berkelium-247	1379 év	alfa
98	20	Californium-251	900,6 év	alfa
99	19	Einsteinium-252	1,2922 év	alfa
2. táblázat				

REPROCESSZÁLÁS

A termikus reaktorok fűtőanyagában keletkező plutónium reprocesszáló üzemekben elkülöníthető és alkalmazható gyors neutronokkal működő tenyésztőreaktorokban. A reprocesszálás technológiája nem újdonság. Ezen üzemek legnagyobb része Franciaországban és az Egyesült Királyságban működik továbbá 2006 óta, egy 20 milliárd \$-os beruházásnak köszönhetően, már Japánban is működik egy ilyen létesítmény. Ezekben a gyors tenyésztőreaktorokban, szerkezetükből adódóan, több neutron termelődik, mint amennyi a működés során elhasad. A reprocesszálás művelete kezdetben gyakorlatilag a plutónium kivonásának folyamatával volt egyenértékű. Ezt a reprocesszálási technológiát nevezik PUREX eljárásnak (*plutonium uranium extraction*). A PUREX eljárást céltudatosan a fegyverek gyártásához szükséges tiszta plutónium előállítása érdekében fejlesztették ki. Azonban már a nukleáris energetika megszületését követően megfogant a gondolat a tudósokban, hogy a plutóniumot, a nagyobb hatásfok miatt, alkalmazni lehetne energetikai reaktorokban is. Azonban a plutónium kiválóan alkalmas hasadóanyag nukleáris bomba előállításához. A plutónium energiatermelési célokkal működő reaktorokban történő alkalmazása így előrevetítette a plutónium illetve a belőle előállított nukleáris fegyverek ellenőrizetlen proliferációjának problémáját. Egy nukleáris fegyver előállításához nagy tisztaságú Pu-239 izotópra van szükség. A hagyományos termikus reaktorokban alkalmazott fűtőanyag azonban számottevő mennyiségben tartalmaz egyéb izotópokat is, így közvetlen fegyvergyártásra alkalmatlan. Mindazonáltal nem elképzelhetetlen, hogy megfelelő technikai háttérrel a plutónium elkülönítése megoldható. Ennek okán Jimmy Carter 1977-ben, az Egyesült Államokban korlátozta a kiegészített nukleáris fűtőanyag reprocesszálásának lehetőségét a polgári szférában. Carter elnök példát szeretett volna állítani ezzel a lépéssel a Föld többi nemzete számára. „Természetesen” voltak országok amelyek nem csatlakoztak a kezdeményezéshez. Így Franciaország, Oroszország, az Egyesült Királyság és Japán napjainkban is üzemeltet reprocesszáló üzemeket [2].

A hagyományos technológiájú reprocesszálás volumenében vezető Franciaország üzemében, a fűtőanyag a plutónium-dioxidnak és az U-238 oxidjának keveréke, amit röviden „MOX”-nak neveznek (*mixed oxide*). Egy kiegészített MOX-fűtőelem plutónium tartalma azonban még mindig eléri a reprocesszálás eredményeként adódó koncentráció 70%-át, tehát a reprocesszálás folyamata sem biztosítja a reaktorokban a hasadóanyag hasznosítás hatásfokának jelentős növekedését. Ezek után kerül a kiegészített fűtőelem a reprocesszáló üzem telephelyén kialakított megőrzőhelyre, határozatlan idejű tárolásra. Ezáltal Franciaországban a nukleáris hulladékok tárolásának problematikáját, az újrahasznosítási eljárás közbeiktatásával, egyszerűen áthelyezik az erőművek hatásköréből a reprocesszáló üzemekébe (4. ábra). Japán követi Franciaország példáját. Az Egyesült Királyság és Oroszország szintén tárolja tiszta plutónium-készleteit. A felhalmozódott nem katonai vonatkozású készletek mennyisége összesen 120 tonna volt 2005 végén. Ez nagyjából 15.000 atombomba készítéséhez elegendő. Ezek az országok azonban nem csak a saját erőműveikben keletkező kiegészített fűtőelemeket alakították/alakítják újrahasznosíthatóvá, hanem exportálják is e tevékenységüket. Olyan nemzetek szállítottak/szállítanak ezen országokba kiegészített fűtőanyagot reprocesszálás céljából, ahol vagy nem rendelkeznek ezzel a technológiával és a szükséges infrastruktúrával, vagy ahol a helyi antinukleáris aktivisták rábírták a kormányt – például Németországban –, hogy állítsa le az ilyen irányú tevékenységet. De világosan kell látnunk, hogy ezek az országok is csak átmenetileg oldják meg, inkább csak elodázzák ezzel összefüggő problémáikat, mert a tárolás feladatát, ha néhány évvel később is, de mindenképpen meg kell oldaniuk. A külföldön történő újrahasznosítás költségei is csillagászatiak, tonnánként 1 millió \$, ami tízszerese a tároláshoz szükséges száraz konténerek előállítási költségének. Ezen okok miatt lassan megszűnik a külföldön történő reprocesszálásra vonatkozó igény. Ezért például az Egyesült Királyság azt tervezi, hogy néhány éven belül bezárja üzemait. Az érintett területek megtisztításával, rekultiválásával kapcsolatban felmerülő költségek előreláthatólag eléri majd a 92 milliárd \$-t. Oroszországban mindössze egy ilyen üzem működik, amely az országban keletkező nukleáris hulladéknak mindössze a 15%-át

képes újrahasznosíthatóvá alakítani. Tervezték, hogy bővítik a kapacitásokat, de az 1980-as gazdasági összeomlás után a tervek nem valósultak meg.



4. ábra: Az uránium alkalmazásának és kezelésének két hagyományos lehetősége.

Az „egyszer használatos fűtőelem technológia” és a PUREX eljárás alkalmazása során az urán fűtőelemek életútja, és a nukleáris hulladék kezelésének módja. [3]

Japán is elkötelezett a reprocesszálás terén, ez azonban egy kényszerhelyzet is, ugyanis Japánban nem sikerült hatóságilag engedélyeztetni a reaktorok területén a tárolókapacitás növelését. Franciaország 2000-ben még azt tervezte, hogy 2010-re bezárja az összes reprocesszáló üzemét, de ez súlyos anyagi hátrányokkal, a villamos energia termeléséből származó bevételek jelentős csökkenésével járna. Az Egyesült Államok a hidegháború idején Washington államban és Dél Carolinában működtetett egy-egy üzem kifejezetten katonai célokkal. Ezekben a létesítményekben nukleáris fegyverekhez állítottak elő tiszta plutóniumot, mintegy 100 tonna mennyiségben. A plutónium tárolásával, kezelésével, a létesítmények további üzemeltetésével, tisztítási munkálatokkal kapcsolatosan a jövőben felmerülő költségek elérik a 115 milliárd \$-t. New York államban is működött egy kizárólag polgári célokat szolgáló újrahasznosító üzem 1966-tól, ahol

„mindössze” 1,5 tonna plutónium halmozódott föl. Mivel a létesítmény működése nem volt gazdaságos, ezért 1972-ben bezárták. Az üzem átalakításával, a környezet megtisztításával kapcsolatos munkák több mint 5 milliárd \$-t emésztettek fel [3].

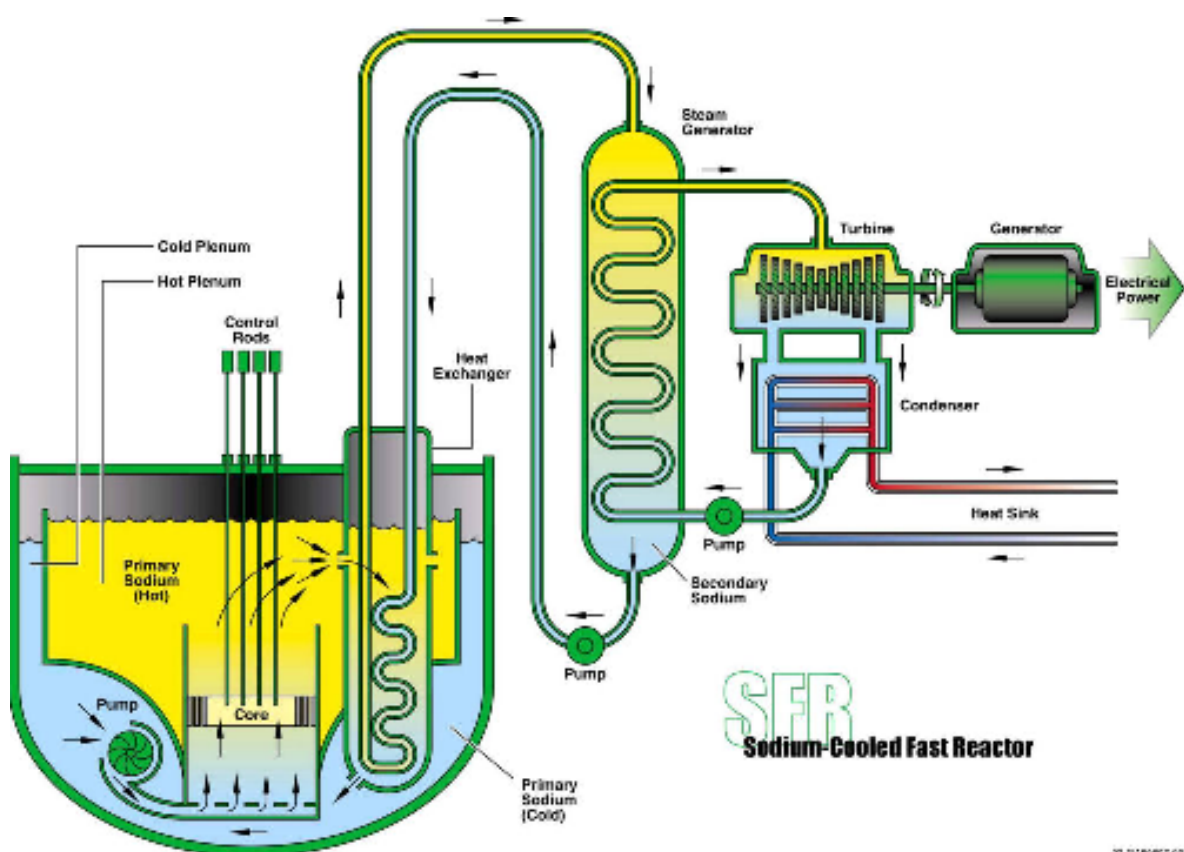
Felmerül a kérdés, hogy ilyen tetemes költségvonzatok mellett miért volt egyáltalán igény ilyen üzemek építésére és működtetésére. Az egyik ok, hogy a nukleáris ipar létét veszélyeztette az, hogy esetleg elfogynak a bányákból az uránkészletek. Ekkor azonban még csak elméletileg merült fel a plutónium proliferációjának problémája, amely később gyakorlatilag is megvalósult. 1974 májusában India felrobbantotta kísérleti plutónium bombáját, melyhez a plutóniumot a saját – mellesleg az Egyesült Államok közreműködésével felépített – reprocesszáló üzemében állította elő. A tudósok figyelmeztetés képpen ekkor emelték fel a szavukat, hogy a plutónium illetéktelenek, akár terroristák kezébe is kerülhet. Az Egyesült Államok, felismerve ennek veszélyét, a Ford-kormány kezdeményezésére, majd később a Carter-adminisztráció csatlakozásával felülvizsgálta a kérdést. A reprocesszáló üzemeket feleslegesnek sőt gazdaságtalannak minősítette és bezárta azokat, továbbá felszólította többek közt Franciaországot és Németországot, hogy szüntessék be reprocesszási technológiájuk exportját Pakisztánba, Dél-Koreába és Braziliába. Később Reagan elnök megpróbálta újjáéleszteni a technológiát, de mivel a súlyos költségvonzatok miatt nem volt versenyképes a hagyományos, termikus reaktorokban alkalmazott, „egyszer használatos fűtőelemek” technológiájával, az ilyen irányú tervekkel, legalábbis az Egyesült Államokban, úgy tűnik felhagytak.

A gyors reaktorok új generációja azonban egy korábbiaktól eltérő alternatívát kínál a kiégett fűtőelemek reprocesszálása terén. Ennek az újrahaznosítási folyamatnak egyetlen lépcsőjében sem kerül szóba a tiszta plutónium elkülönítése. Ezáltal az új, negyedik generációs gyorsreaktorok a minimálisra csökkentik a lehetőségét és a kockázatát annak, hogy a nukleáris fűtőanyagot fegyverek gyártására felhasználják, és jelenleg az egyetlen lehetőséget jelenti arra vonatkozólag, hogy a fűtőanyagból a maximális mennyiségű energiát kinyerjék. Ez utóbbi tulajdonság annak köszönhető, hogy a gyors neutronok nagyobb valószínűséggel okoznak hasadást mint a termikus neutronok. Ez két okra vezethető vissza. Egyrészt a termikus neutronok nagyobb része abszorbeálódik, vesz részt olyan magreakciókban amely nem hasadás, másrészt a neutronok számottevő része reakció nélkül elhagyja a reaktort. A nagy kinetikus energiájú, gyors neutronok az ütközés során nagyobb valószínűséggel hasítják a nagy tömegszámú izotópokat, többek között az U-238 magot is, ami azt jelenti, hogy nem kizárólag az U-235 és a Pu-239 izotóp a „hasadóanyag”. Ennek továbbá az is egy következménye, hogy a gyors reaktorok működtetéséhez nincs szükség urándúsításra.

A termikus reaktorokban a primer körbeli víz kettős szerepet játszik. Egyrészt hűtőközeg, a víz szállítja el a fűtőelemekben keletkezett hőt a hőcserélőkbe, másrészt moderátor, tehát neutron lassító közegként is funkcionál. Innen világos, hogy gyors reaktorokban nem alkalmazható víz hűtőközeggént, mert az lelassítaná a neutronokat. A gyors reaktorokkal kapcsolatos kutatások az 1950-es években kezdődtek az Egyesült Államokban. Ilyen reaktorok több típusát is kifejlesztették az elmúlt évtizedekben. Vannak köztük gázhűtésűek, és vannak olyanok amelyeket fémolvadék hűt. Az Argonne Nemzeti Laboratórium által az 1980-as években kifejlesztett típusban, amelyet alkalmasnak tartanak a közeli jövőben a széleskörű elterjedésre, folyékony nátriumot alkalmaznak hűtőközeggént. Innen származik az elnevezés is: Advanced Liquid Metal Reactor, ALMR, azaz „Korszerű folyékony fémrel hűtött reaktor”. A folyékony fémnek, azon túl, hogy számottevően nem lassítja a neutronokat és nagy fajhője miatt hatékonyan szállítja el a keletkezett hőt, van egy óriási előnye a vízzel szemben. A vízhűtéses rendszerek nagyon nagy, néhány száz atmoszféra nyomáson működnek. Ennek a rendszernek komoly hátránya, hogy a primer vízkörben előálló bármely sérülés egyrészt azzal járhat, hogy a reaktorcsarnok megtelik gőzzel, a csarnokban túlnyomás keletkezhet, az épület ennek következtében sérülhet, másrészt gyorsan lecsökkenhet a reaktor hűtőközegének mennyisége. A folyékony fémrel hűtött rendszer azonban normál légköri nyomáson működik. Vízzel érintkezve azonban könnyen meggyulladhat, tehát körültekintő kezelést igényel. Megnyugtatónak tűnik azonban a kísérletekkel eltöltött évtizedek során felgyűlt jelentős mennyiségű tapasztalat, melynek birtokában a rendszert úgy fejlesztették, hogy relatíve egyszerűen

kezelhető és biztonságosan működtethető legyen. Előfordultak „természetesen” nátrium tüzesetek és valószínűleg a jövőben is előfordulnak majd. Egy ilyen eset történt 1995-ben a Monju gyorsreaktorban Japánban. Az eset azonban nem veszélyeztette a reaktorépület egységét, senki sem sérült meg és nem kapott számottevő többletdózist. A mérnökök nem tekintik a nátrium gyúlékonyságát jelentős problémának.

A termikus reaktorokban a fűtőanyag egy kerámia, az urán-oxid. Egy további eltérés ehhez képest, hogy a fémolvadékkal hűtött gyorsreaktorokban azonban a hasadóanyag fémes állapotú urán illetve plutónium és egyéb transzuránok. Az elmúlt évtizedek során számos gyorsreaktor típust kidolgoztak és tanulmányoztak, az ALMR számos előnnyel rendelkezik a többivel szemben. Egyrészt nagyobb biztonsággal működtethető, (a reaktor üzemelése során aktív biztonsági rendszerek a következők: 1. Működés közben nagy teljesítményű szivattyúk áramoltatják a folyékony fémeket a primer körben. A rendszer úgy van kialakítva, hogy abban az esetben ha a szivattyú leáll a gravitáció keringteti tovább az olvadékot. 2. Ha a szivattyúk meghibásodnak, leállnak, akkor egy speciális biztonsági berendezésnek köszönhetően nagy számú neutron lép ki a reaktormagból, így szubkritikussá válik a rendszer és a hőmérséklet csökken. 3. Vészhelyzet esetén 6 db neutron elnyelő anyagból készült szabályozórúd esik a magba, így leállítja a láncreakciót. 4. Ha a láncreakció valamilyen oknál fogva mégis „megszalad”, akkor több ezer, neutron elnyelő bór-karbid-ból készült golyót juttatnak a reaktormagba, ezzel garantálva a reaktor leállítását.), másrészt a többi gyorsreaktor típushoz képest nagyobb sebességgel lehet bennük reprocessálni a kiégett fűtőanyagot, végül működése összekapcsolható a pyrometallurgiai eljárásnak nevezett újrahasznosítási folyamattal (5.ábra).

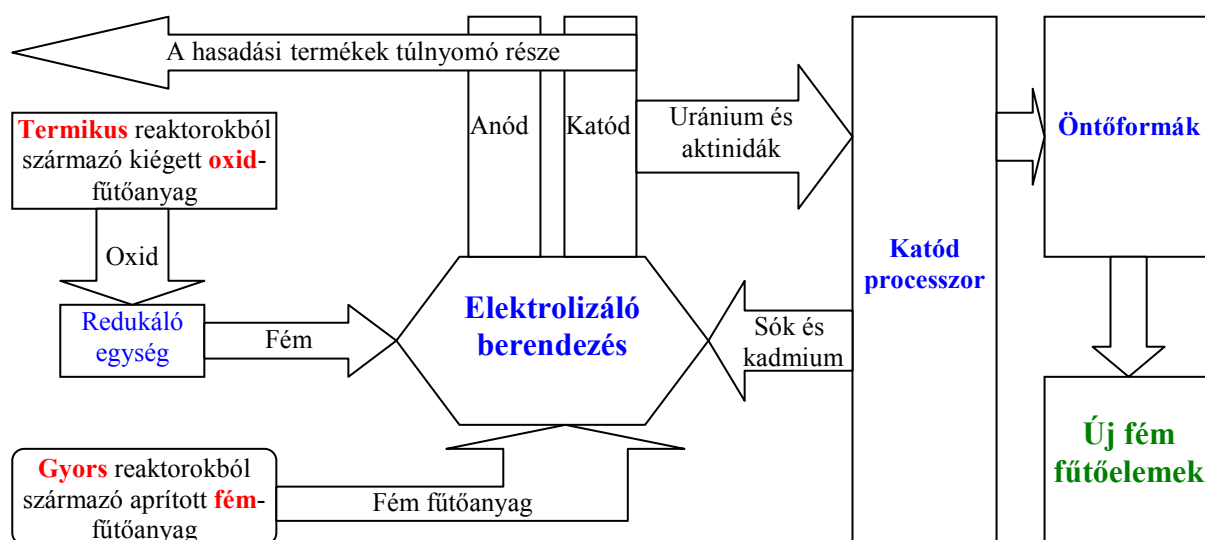


5. ábra: Folyékony nátrium hűtésű gyors reaktor szerkezete.

A reaktormagban (Core) keletkező hő a primer körű radioaktív nátriumnak (Primary Sodium) adja le a hőt közvetlenül.

A hő egy közbúlsó hőcserélőben (Heat Exchanger) adódik át a szekunder körbeli nem radioaktív nátriumnak (Secondary Sodium). A hőt ez a közeg a gőzgenerátorba szállítja (Steam Generator) Itt adódik át a hő a harmadik körben keringő víznek, ahol az gőzzé alakul és magforgatja a turbinát (Turbine). [IV.]

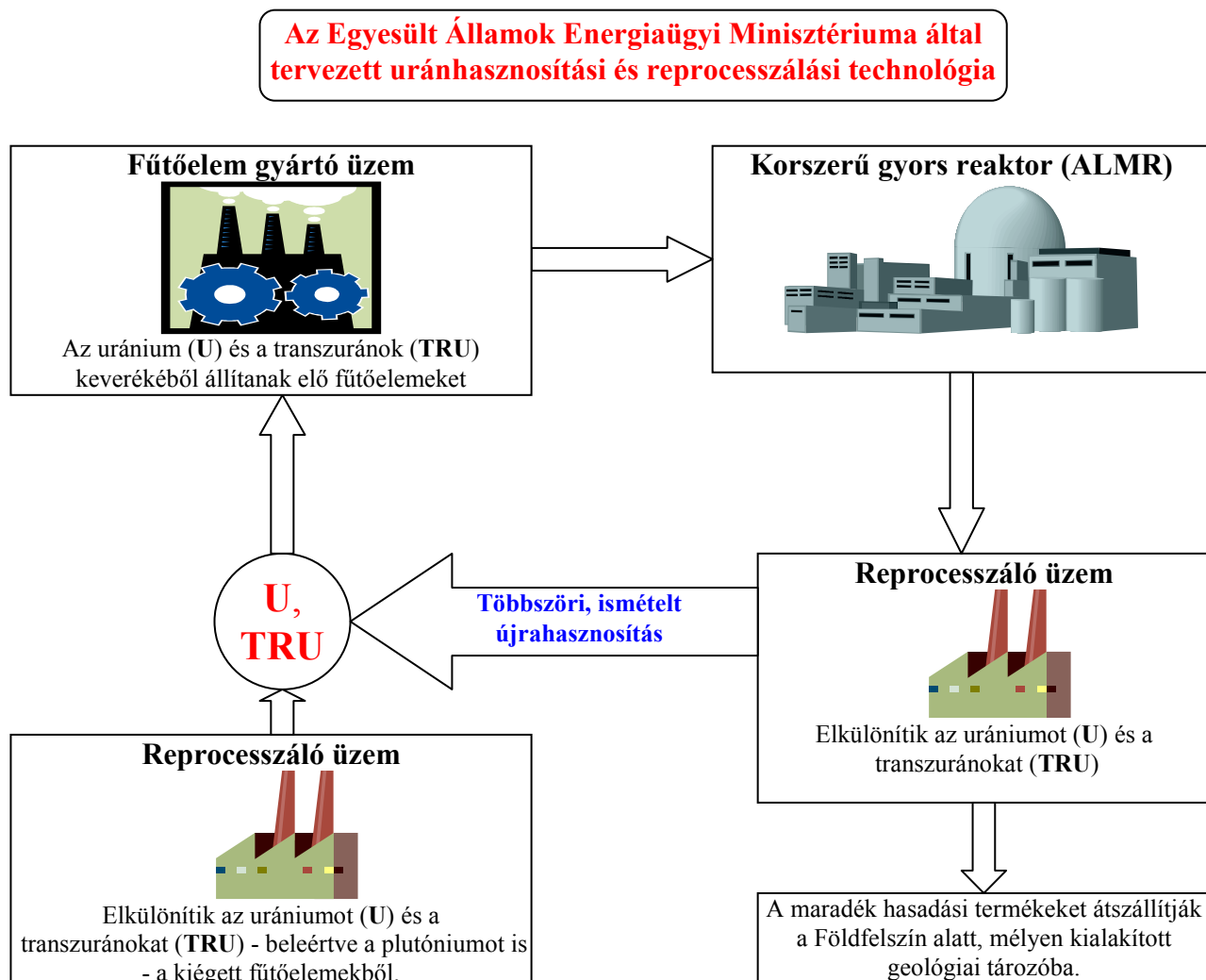
Két hasonló pyrometallurgiai reprocesszási folyamatot is kidolgoztak, amely a kiégett fűtőelemek hasznosításának új módszere, az egyiket Oroszországban a másikat az Egyesült Államokban. Mindkettő tulajdonképpen egy elektrolízis, leglényegesebb különbség a kettő között az, hogy az oroszok kerámia, tehát oxid-formájú üzemanyagot alkalmaznak, míg az ALMR reaktorban a fűtőanyag fémes állapotú urán illetve plutónium. Utóbbi esetben a kiégett fűtőanyagot magas hőmérsékleten egy kémiai fürdőben feloldják. A gyors reaktorok fűtőelemei felaprítás után közvetlenül az elektrolizáló berendezésbe, egy magas hőmérsékletű kémiai fürdőbe kerülnek. A termikus reaktorok kiégett fűtőelemei pedig egy közvetett redukciós átalakítás után, szintén már fémes állapotban jutnak el az elektrolízisig. Erős villamos árammal elektrolizálva az oldatot, a katódon – amely egy fém elektróda –, kiválik az urán, a plutónium és a többi transzuránok, tehát nem kizárólag a plutónium. Ebből a keverékből a „katód processzor” kivonja a sókat és a kadmiumot. Ezeket az anyagokat újra hasznosítják. A hasadási termékek jelentős része és elenyésző mennyiségű uránium és aktinida az oldatban marad. Ha az elektródára kellő mennyiségű anyag kivált, a technikusok eltávolítják azt az oldatból, leolvasztják róla a kivált keveréket, öntőformába töltik, majd lehűtik. Ha az oldat a hasadási termékekre vonatkozólag telítetté válik, akkor elkülönítik ezek keverékét az oldószertől és a végleges tárolóhelyre továbbítják. Végül pedig az uránium-aktinida keverék egy öntőberendezésbe kerül, ahol gyors reaktorok számára fűtőelemekké formálják. Az alkalmazott folyamatok áttekintését segíti elő a 6. ábra. A pyrometallurgiai eljárás során tehát hatékonyan szétválasztják az uránt és a transzuránokat – beleértve a plutóniumot is –, a hasadási termékektől. A transzuránoknak csak egy elenyésző hányada kerül így a hasadási termékekkel együtt nukleáris hulladék tárolókba, drasztikusan lecsökkentve így a biztonságos, elszigetelt tárolás minimálisan szükséges időtartamát.



6. ábra: Reprocesszási pyrometallurgiai eljárással [2]

Az uránnak és a transzuránoknak az elektrolízis során keletkező keveréke teljesen alkalmatlan mind fegyverek előállítására, mind pedig arra, hogy termikus reaktor üzemanyagául szolgáljon, kiválóan alkalmas viszont arra, hogy egy gyors reaktor, az ALMR fűtőanyaga legyen. Az eljárás még nem alkalmas arra, hogy segítségével ipari méretekben állítsanak elő villamos energiát, mindazonáltal demonstrációs céllal mind az Egyesült Államokban mind pedig Oroszországban sikeres és biztató kísérleteket végeztek.

Az urán és a transzuránok jövőbeli, tervezett felhasználásának, kezelésének folyamata követhető végig a 7. ábrán.



7. ábra: Energiatermelés és reprocesszálas gyors (ALMR) reaktorok alkalmazásával [3]

Összehasonlítva a termikus és a gyors reaktorok működését, azokban számos hasonlóságot fedezhetünk fel, viszont bizonyos téren óriásiak a különbségek. Tekintsünk például egy 1000 MW elektromos teljesítményű termikus reaktort. Ennek működése során évente átlagosan 100 tonna radioaktív hulladék keletkezik, mely aktivitásához számottevő módon hozzájárulnak a transzuránok. Ezzel szemben egy gyors reaktor, ugyanekkora villamos teljesítményt számításba véve „mindössze” 1 tonna hulladékot termel, melyben csak nyomokban vannak transzuránok. Ennek köszönhetően jelentősen kevesebb gondot okoz a nukleáris hulladék tárolása. Mivel az ALMR reaktor működése során keletkező nukleáris hulladékban nincsenek nagyon hosszú felezési idejű aktinidák, a termikus erőművek hulladékainak tárolásához szükséges több tízezer év tárolási idő lecsökken néhány száz évre. Ennyi idő elteltével ugyanis, a hulladék aktivitása lecsökken az uránérc aktivitásának szintjére.

A 3. táblázatban összefoglaltuk a két, gyakorlatban már működő eljárás, illetve a tervezett uránhasznosítási technológia főbb lépéseit, a szükséges tevékenységeket és a nukleáris hulladékok kezelésének módját.

A nukleáris üzemanyag felhasználásának és további kezelésének három lehetősége		
Egyszer használatos fűtőelemek Az üzemanyagot termikus reaktorban használják, utána nem történik újrahasznosítás. (USA)	Egy lépéses reprocesszálás, PUREX eljárás Az üzemanyagot termikus reaktorban használják, majd a kiegészített fűtőelemekből kivonják a plutóniumot. (Egyéb iparilag fejlett országok, Franciaország)	Több lépéses, ismételt reprocesszálás A termikus reaktorokban kiegészített üzemanyagot pyrometallurgiai eljárással teszik újra hasznosíthatóvá, amelyet gyors ALMR reaktorokban tudnak ismét hasznosítani (Prototípus technológia)
Az üzemanyag hasznosítása		
5% hasznosul 95% hulladék A kitermelt uránérc energiatartalmának kevesebb, mint 1%-a hasznosul, a fennmaradó urán hulladéknak minősül. A kiegészített fűtőelemeket nem hasznosítják tovább.	6% hasznosul 94% hulladék A kitermelt uránérc energiatartalmának kevesebb, mint 1%-a hasznosul, a fennmaradó urán hulladéknak minősül. A kiegészített fűtőelemeket nem hasznosítják tovább.	5% hasznosul termikus reaktorokban 94% hasznosul gyors reaktorokban A fűtőelemek energiájának a 99%-a hasznosítható. A kiegészített fűtőelemekből újra fűtőanyagot készítenek gyors reaktorok számára.
Szükséges létesítmények és műveletek		
- uránium bányászat - urán dúsítás - fűtőelem gyártás - erőművek - telephelyen történő hulladék tárolás - legalább 10.000 éven át történő elszigetelt hulladéktárolás	- uránium bányászat - urán dúsítás - telephelyen kívüli fűtőelem gyártás - telephelyen kívül történő PUREX reprocesszálás - erőművek - telephelyen történő hulladék tárolás - a hulladék telephelyen kívüli kezelése - legalább 10.000 éven át történő elszigetelt hulladéktárolás	- helyszíni fűtőelem előállítás - helyszíni pyrometallurgiai eljárás - erőművek - a hulladékok helyszíni kezelése - legalább 500 éven át történő elszigetelt hulladéktárolás - évszázadokig nem szükséges uránium bányászat, soha többé nem szükséges urándúsítás
A plutónium sorsa		
Egyre növekvő mennyiségű plutónium a kiegészített fűtőelemekben. A felhalmozódott plutónium mennyisége, a fűtőanyagba történő keveréssel csak lassan csökken.	Egyre növekvő mennyiségű plutónium a kiegészített fűtőelemekben. Ipari mennyiségben is rendelkezésre áll tiszta formában. A felhalmozódott plutónium mennyisége, a fűtőanyagba történő keveréssel csak lassan csökken	A felhalmozott mennyiség pontosan annyi amennyi a működő reaktorok fűtőelemeiben illetve amennyi a reprocesszáló üzemekben van. A felhalmozott egyéb készletek gyorsan felhasználhatók a fűtőelem gyártáshoz. A fűtőelemekben levő plutónium fegyvergyártáshoz nem elég tiszta.
A nukleáris hulladék formái		
Az energiában gazdag használt fűtőelemek felszíni konténerekben és felszín alatti tárolókban vannak elhelyezve. A hulladék olyan mértékben aktív, plutónium tartalma olyan magas, hogy még évszázadok múlva is alkalmas nukleáris fegyver gyártására.	Az energiában gazdag, stabilan sugárzó radioaktív hulladék. A hulladék olyan mértékben aktív, plutónium tartalma olyan magas, hogy még évszázadok múlva is alkalmas nukleáris fegyver gyártására.	A relatív rövid felezési idejű hulladék 500 év elteltével veszélytelenné válik. A hulladékban gyakorlatilag nincs plutónium, így az nukleáris fegyver gyártásához alkalmatlan.

3. táblázat [2]

A gyors reaktor rendszer a pyrometallurgiai eljárással társítva figyelemreméltóan sokoldalú, mondhatni rugalmas. Működhet a rendszer „fogyasztóként”, amikor is a működés során elhasad a plutónium és a többi, fegyver gyártására alkalmas anyag. Működhet „termelő” üzemmódban. Ekkor a rendszer arra képes, hogy más gyorsreaktorokba üzemanyagot illetve plutóniumot állítson elő. Ekkor az uránium befogja a neutronokat és plutóniummá illetve egyéb transzuránokká alakul. Végül működhet „stacionárius” módusban, amikor a reaktor „kiégett”, tehát lecsökkent U-235 tartalmú üzemanyagot igényel a működéshez. Ekkor a fűtőelemben időegység alatt annyival növekszik a transzuránok mennyisége a neutronbefogás miatt, amennyivel csökken ezen izotópok száma a hasadás miatt, átlagos mennyiségük tehát időben állandó.

Az elemző tanulmányok azt mutatják, hogy az új technológia gazdaságilag versenyképes lehetne a már meglevő nukleáris technológiával. A pyrometallurgiai eljárás lényegesen olcsóbb, mint a jelenleg működő reprocesszási eljárások, a hosszú távú életképessége azonban csak akkor derülhet majd ki, ha a rendszer már széles körben, ipari méretekben működik.

Egy energiaforrás átfogó értelmű gazdaságossága azonban nem csak a közvetlen költségeken múlik. Ennek megítéléséhez figyelembe kell venni a technológia alkalmazásának következtében beálló hatásokat, következményeket is, amelyeket nehéz költség formában jellemezni. (Ilyen hatás például a fosszilis erőművek esetén a környezetszennyezés és az ennek következtében kialakuló egészségügyi ártalmak.) Figyelembe kell tehát venni egy ilyen erőmű társadalomra gyakorolt közvetett és közvetlen hatásait is, amely nem egyszerű dolog, de egy ezek nélkül elvégzett gazdasági elemzés irreális és félrevezető.

A napjainkban működő termikus reaktorok lassan az 50-60 évre tervezett működési idejük végéhez érnek. Ezeket mind helyettesíteni lehetne gyors reaktorokkal. Ha ez bekövetkezne, a jövőben évszázadokon át szükségtelen lenne az uránium bányászata és soha többé nem volna szükség urándúsításra sem, ugyanis a gyors reaktorok olyan hatékonyan működnének, hogy a meglevő urániumkészletek gyakorlatilag örökre biztosítanák a szükséges fűtőanyagot. Ha napjainkban elkezdődne ezeknek az erőműveknek a kivitelezése, akkor nagyjából 15 év múlva indulhatna be az első ilyen reaktor. Ha figyelembe vesszük a Földön nukleáris hulladékok számára jelenleg rendelkezésre álló, illetve a közeli jövőben tervezett tárolókapacitást, akkor ez az időskála figyelemreméltónak tűnik, ugyanis 15 év elteltével a termikus reaktorok kiégett üzemanyagát egyenesen a gyors reaktorokba lehetne szállítani, az addig felhalmozódó készletek nagy része pedig a meglevő illetve épülő hulladékmegőrzőkbe kerülhetne.

„YUCCA MOUNTAIN”

A radioaktív hulladékok elhelyezése az Egyesült Államokban is komoly problémát jelent [4]. Jelenleg mindössze három olyan tároló létesítmény üzemel, ahová a kiégett fűtőelemek, nukleáris hulladékok illetve a leállított és bezárt erőművek lebontása során keletkező hulladékok elszállíthatók. Ezek a következők: a Utah állam északi részén fekvő Clive, Dél Carolina államban Barnwell és a Washington állambeli Hanford nukleáris központ. A legalacsonyabb aktivitású hulladék kerül Utah államba, Dél Carolinában fogadják a közepes aktivitási szintű hulladékokat, Hanford pedig a nagy aktivitású hulladékok lerakó- és tározó helye. Ha figyelembe vesszük, hogy a jelenleg működő 104 reaktor telephelyén a tárolókapacitások korlátozottak, továbbá azt, hogy ezen reaktorok mindegyikét előbb-utóbb le kell bontani, akkor világos, hogy az említett három létesítmény ehhez nem elegendő. Ezért folyamatban van egy gigantikus befogadóképességgel rendelkező megőrzőhely építése a Nevada állam déli peremén fekvő Yucca-hegy belsejében (8.ábra). A tervek szerint itt akár több tízezer évig is raktározhatják majd a radioaktív hulladékot – elsősorban a nagy aktivitású kiégett fűtőelemeket –, ennek megnyitására azonban még legalább egy-másfél évtizedet várni kell.

Az Egyesült Államok kormánya az 1970-es évek végén kezdte tanulmányozni a dél nevadai helyszínt mint lehetséges tárolóhelyet nukleáris hulladékok számára [5]. 1987-től ezt tekintették az egyetlen lehetőségnek az addigra összegyűlt 77.000 tonna kiégett fűtőelem és egyéb nagy aktivitású

nukleáris hulladék számára. Az azóta eltelt több mint 20 év során ez a mennyiség jelentősen megnövekedett, annyira, hogy a jelenlegi mennyiség az eredetileg tervezett tárolókapacitást meg is haladja, így a terveket az elmúlt két évtized során módosítani kellett. A törvénykezési és jogi eljárások elhúzódása miatt a Bush-kormányzat csak 2002-ben tudta elindítani az építkezést. Az Észak Amerikai kontinens eme központi nukleáris lerakóhelye azonban biztosan nem nyitja meg a kapuit 2017 egyesek szerint 2020 előtt. Ez azt is jelenti, hogy a mára felhalmozódott közel 100.000 tonna nagy aktivitású nukleáris hulladékot addig is országszerte – a nagy aktivitású „fiatal” hulladékot vízfürdőben, ún. pihentető medencében, a kisebb aktivitású „idősebb” hulladékot száraz konténerekben –, erőművek szomszédságában kell tárolni. Ha a létesítmény megnyílik, helyet biztosít egyrészt az erőművi hulladékoknak, de ugyanakkor helyet ad majd az Egyesült Államok nukleáris védelmi rendszerének kiépítése és üzemeltetése során keletkezett nukleáris hulladék egyharmadának. Ez utóbbi kategóriába tartozó 7500 tonna hulladéknak továbbra sincs megfelelő helye.



8. ábra: A Yucca-hegy gyomrában épülő geológiai tározó bejárata [V.]

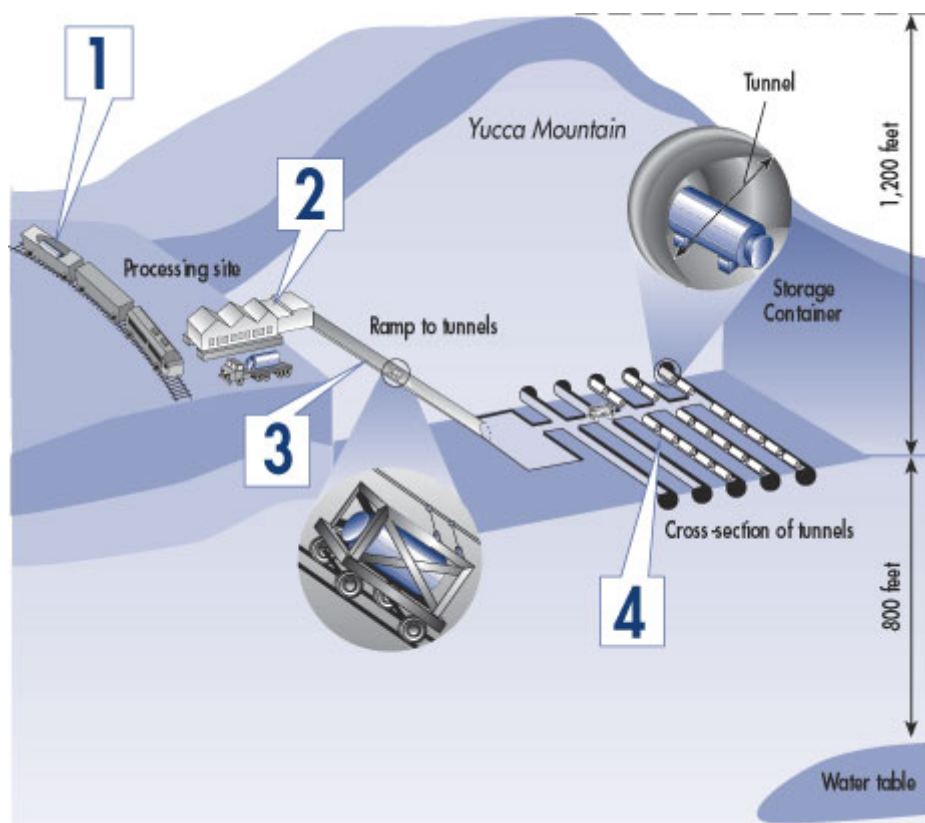
Az Egyesült Államok erőművi reaktorainak üzemelése során évente mintegy 2000 tonna nagy aktivitású nukleáris hulladék keletkezik. Ebben az ütemben haladva – a végső tervek szerint –, a Yucca-hegy-beli tároló 2035-re telik meg, amikor az országban további 42.000 tonna nagy aktivitású hulladék halmozódik föl. Így annak ellenére, hogy a terveket többször módosították a befogadó kapacitás növelésének érdekében, a nukleáris hulladékok elhelyezésének problémája ezzel a létesítménnyel csak átmenetileg lesz megoldva.

A nevadai helyszínt elsősorban az éghajlat szárazsága tünteti ki. A radioaktív hulladékot – amelyet nagy aktivitása miatt 10.000 évig „halálos”-nak, további 250.000 évig pedig „veszélyes”-nek minősítenek –, acélötvözetből készült konténerekben helyezik majd el mélyen a Yucca-hegy gyomrában, a hegygerinccel párhuzamos alagutakban, a felszín alatt 400m mélységben. (9.ábra). Az elhelyezett radioaktív hulladék aktivitásának szintje az első 300 évben intenzíven csökken majd, ahogyan a hasadási termékek között domináns szerepet játszó cézium és stroncium izotópok elbomlanak (1.táblázat). Ennyi idő elteltével az aktivitás a kezdeti értéknek mindössze néhány %-a lesz. De a hosszú felezési idejű aktinidák mennyisége nem csökken számottevően (2.táblázat), még egymillió év elteltével is megtalálhatók majd a nukleáris hulladékban. Az Energiaügyi Minisztérium által alkalmazott számítógépes szimulációk azt mutatják, hogy a nikkel-ötvözetből készült konténerek – a száraz körülményeknek köszönhetően –, legalább 10.000 évig nem korrodálódnak, becslések szerint ennyi ideig nem fognak szivárogni. Ez az a minimális időtartam,

amelyet a Környezetvédelmi hivatal előír. A projekt ellenzői szerint a szivárgás hamarabb is bekövetkezhet. Pontosabban azonban senki sem tudhat, mert a kérdéssel kapcsolatban nem végeztek kísérleteket. Az ellenzők ezen kívül felhívják még a figyelmet a hulladékok több államon keresztül történő szállításának biztonsági problémáira is.

2005 márciusában, amikor az építkezés már javában folyt, felfedezték a hegy belsejében felszín alatti vízrétegeket, melyeknek megvizsgálták az áramlási tulajdonságait. Ennek ismeretében feltételezik, hogy egy esetleges szivárgás – melynek esélye egy természeti katasztrófa, például egy földrengés esetén fokozott –, veszélyezteti a talajvíz tisztaságát, megfertőzheti a környéken élő lakosság vízkészletét. Szakértők véleménye szerint, ha erre a geológiai jellemzőre 2002 előtt fény derül, az elég lett volna ahhoz, hogy leállítsák a projektet. Kérdés, hogy mekkora dózissal kell számolni a környéken élő lakosságot illetően. Ugyancsak számítógépes modellszámításokra hivatkozva a kormány szakértői azt állítják, hogy a maximális éves dózis, 400.000 év elteltével lesz tapasztalható, melynek szintje a természetes háttér szintjének legfeljebb kétszerese lesz, amely messze alatta marad majd a Környezetvédelmi Hivatal által megszabott 15 millirem/év egészségügyi korlátnak.

Tájékoztatásul megemlítjük még azt is, hogy az építés és az első 100 év működtetési költségei becslések szerint elérik majd az 58 milliárd \$-t, az üzemeltetéshez szükséges személyzet létszáma pedig nagyjából 500 fő lesz.



9. ábra: A Yucca-hegy belsejében a nagy aktivitású nukleáris hulladékok elhelyezése a tervek szerint. [VI.]

Azonban a Yucca-hegy-beli létesítmény megnyitása már eddig is csúszott két évtizedet, az erőművekben rendelkezésre álló vízhűtésű tárolómedencék telítettsége lassan eléri a befogadóképesség maximumát. Az „idősebb”, kisebb aktivitású kiégett fűtőelemek tárolása már csak száraz, léghűtéses konténerekben lehetséges. Ezek vastag betonalapzaton álló, betonból és acélból készült henger alakú tartályok, melyek befogadóképessége 10 tonna, előállítási költségük pedig 1 millió \$ (10.ábra). Egy 1000 MW teljesítményű erőmű nukleáris hulladékai évenként átlagosan 2 ilyen tartályt töltenek meg. Ha ehhez hozzászámítjuk még a szükséges infrastruktúra

kiépítésének és üzemeltetésének a költségeit, akkor ez évi 300 millió \$ kiadást jelent. Ezek a költségek jelentik az egyik mozgatórugóját annak a tendenciának, hogy az Egyesült Államok a reprocesszáló technológiák és erőművek új generációjának kidolgozásán munkálkodik már több mint 20 éve. Azonban a nukleáris ipar ezen jövőbeli útja nagyon költséges és egyáltalán nem veszélytelen.

AZ ÚJ TECHNOLOGIA VALÓBAN A HELYES MEGOLDÁS?

Frank N. von Nippel fizikus – aki az Egyesült Államok Nemzetbiztonsági Hivatalának helyettes igazgatója és a kormány tanácsadója volt nukleáris ügyekben –, korántsem látja olyan kecsegtetőnek a jövőt, véleménye szerint felmerülnek kétségek a korszerűbb reaktorok és reprocesszálási technológiák alkalmazásával kapcsolatban [3]. Egyrészt költségek oldaláról tekintve, a kiégett fűtőelemek újrahasznosításának folyamata, a hasadási termékek kivonása majd a fűtőanyaggá történő újraalakítás jelentős költségekkel járó művelet. Másrészt a kockázatok oldaláról közelítve a kérdést, továbbra is fennáll majd a lehetősége, hogy – megfelelő technikai háttérrel –, a transzuránok keverékéből kivonható a tiszta plutónium, amiből fegyver gyártható. Az új reprocesszálási technológia tehát csak elenyésző mértékben csökkenti a korábban is fennálló gondokat.

A 2008-ban leköszönő Bush-kormányzat keltette ismét életre a nukleáris hulladékok újrahasznosításának gondolatát, amely az erőművek új generációja kialakulásának részét képezi. Ebben a programban a transzurán elemek nem egy alkalommal lesznek hasznosítva, hanem újra és újra visszakerülnek majd a reaktorba, melynek során a transzuránok kisebb rendszámú, rövidebb felezési idejű izotópokká hasadnak majd. Ennek köszönhetően redukálódik jelentős mértékben a nukleáris hulladékok tárolásának időtartama. De felmerül a kérdés, hogy ez a kétségtelenül hatékonynak tűnő eljárás valóban a problémák bölcs megoldását jelenti?

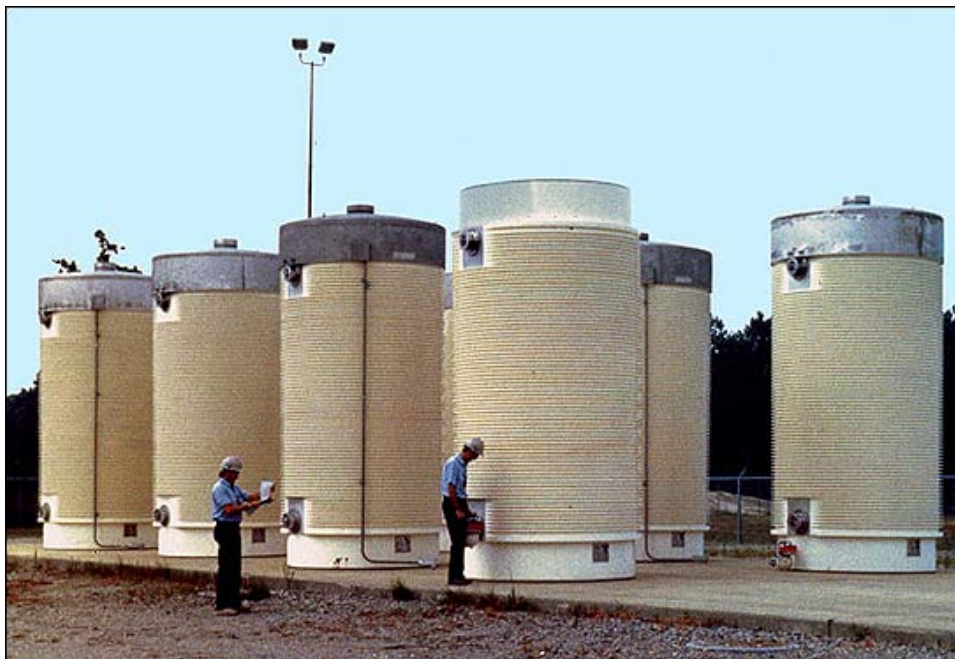
A gondolat nem új. Az Egyesült Államok Energiaügyi Minisztériuma már az 1990-es évek közepén megbízást adott az Egyesült Államok Tudományos Akadémiájának, hogy készítsen egy tanulmányt a hosszú felezési idejű radioaktív izotópok mennyisége csökkentésének lehetőségéről. Az eredmény meglehetősen elriasztónak mutatkozott, legalábbis anyagi téren. A tanulmány szerint, az addigra felhalmozódott készletből annak a 62.000 tonna nukleáris hulladéknak az újrahasznosítása, amelyet a tervek szerint a Yucca-hegy gyomrában helyeznek majd el, legalább 50 milliárd \$ költséggel járna, de az is lehet hogy a költségek elérik majd a 100 milliárd \$-t. Ez személyekre lebontva azt jelenti, hogy minden amerikai állampolgárnak 500 \$-ral kellene hozzájárulni ehhez a tevékenységhez. Ha ezt kiterjesztjük az összes működő reaktor tervezett teljes működési ideje során várhatóan felhalmozódó mennyiségre, akkor ez az összeg akár meg is duplázódhat.

Miért ezek a gigantikus költségek? Azért mert a hagyományos reaktorok erre a célra nem alkalmazhatóak. A vízhűtéses-vízmoderátorú termikus reaktorokban a lelassított neutronok ugyanis nem tudják hasítani a transzuránokat. Ehhez a művelethez gyorsreaktorok kellenek. Az 1960-as és 70-es években a vezető ipari országok, közöttük az USA, mai értékre átszámolva nagyjából 50 milliárd \$-t költött gyorsreaktorokkal összefüggő kutatásokra. A cél az volt, hogy ipari méretekben is lehessen energiát termelni gyorsreaktorokkal, amelynek az elmúlt évtizedekben több típusát is kifejlesztették. Ezen típusok egy része alkalmas plutónium termelésére, tehát tenyésztő reaktorként is működhet. A távlati terv az volt, hogy a termikus reaktorokat intenzív ütemben lecserélik gyorsreaktorokra. A probléma nem elhanyagolható módon abban áll, hogy a gyorsreaktorok építési költsége jelentősen magasabb mint a termikus reaktoroké, és általában a biztonságos üzemeltetésük is több gondot okoz. Ezen okok miatt a legtöbb ország felhagyott az ilyen irányú terveivel.

A jelenlegi tervek olyan gyors reaktorok létesítését célozzák, amelyek – miután a reaktormag szerkezetét módosították –, plutónium termelő üzemmód helyett plutónium és transzurán fogyasztó üzemmódban is képesek működni. Az Egyesült Államok 40-75 db ilyen típusú, egyenként 1000 MW teljesítményű ilyen reaktor építését tervezi. Ezek építési költsége egyenként 1-2 milliárd \$-ral

haladja meg egy ugyanekkora teljesítményű termikus reaktor konstrukciós költségeit. Ezen felül az újrahasznosítást biztosító létesítmények és szükséges infrastruktúra építési és működtetési költsége további 100-200 milliárd \$-t igényel, de előreláthatólag még így is szükség van 40-150 milliárd \$-os további állami támogatásra. A projektet ezen jelentős költségek miatt előreláthatólag nehezen lehet majd megvalósítani.

Ha a projekt beindul, várhatóan 2020-ra épül meg az első új igényeket kielégítő, pyrometallurgiai eljárásokon alapuló reprocesszáló üzem. Ha azonban az ALMR reaktorok nem épülnek fel, akkor a nukleáris hulladékok sorsa ugyanaz, mint eddig, marad a határozatlan idejű tárolás problémája az ország számos pontján. Az 1960-as években elindult reprocesszási program öt évtizede során összegyűlt nagyjából 100 tonnányi tiszta plutónium biztonságos tárolása több tízmilliárd dollárba kerül. Azonban a nukleáris hulladékok erőművek illetve reprocesszáló üzemek telephelyén, meghatározatlan időskálán történő tárolása nem lehet a kívánatos stratégia, mert ezeken a helyeken a plutónium nagyon sérülékeny. A Royal Society 1998-ban készített egy jelentést az Egyesült Királyságban a polgári szférában keletkező, évről-évre növekvő mennyiségben felhalmozódó plutóniummal kapcsolatban. A jelentés alapgondolata, hogy „különös tekintettel kell figyelembe venni annak lehetőségét, hogy a felhalmozódott plutónium illetéktelen kezekbe kerül, és azt felhasználhatják nukleáris fegyverek előállítására”. A Royal Society 2007-ben megjelent, a kérdést érintő második tanulmánya megerősíti ezt a gondolatot: „Hosszú távon semmiképpen sem elfogadható alternatíva a plutónium és a hozzá hasonló veszélyes anyagok mennyiségének további növelése.”[3]



10.ábra: Kiegyezt fűtőelemek tárolása száraz konténerekben [VII.]

Világos, hogy biztonsági okokból nem szabad a plutóniumot olyan módon tárolni, hogy illetéktelenek eltulajdoníthassák, sőt egyáltalán nem volna szükséges a tiszta plutóniumot kivonni a kiegyezt fűtőelemekből. Mindazonáltal, amíg a Yucca-hegy-beli hosszú távú tárolóhely rendelkezésre nem áll, a nukleáris hulladék ott marad, ahol keletkezett, az erőművekben. Felmerül a kérdés, hogy mennyivel növeli meg a kockázatot a kiegyezt, alacsony aktivitású fűtőelemek száraz konténerekben történő tárolása (10.ábra). Szakértők véleménye szerint ennek járuléka a már fennálló nukleáris kockázati tényezők mellett csaknem elhanyagolható. Tekintsünk ugyanis, egy 20 éves, 10 tonna tömegű kiegyezt fűtőelem köteget, egy léghűtéses száraz konténerekben, melynek hőtárolókapacitása 10 kW. Egy páncéltörő gránáttal, vagy repülőgép becsapódással elkövetett lehetséges terrortámadás esetén egy viszonylag kis terület szennyeződne alacsony aktivitású

radioaktív szennyezőanyaggal. Ezzel szemben a „szomszédban” működő reaktor primer köre elleni terrorcselekmény esetén, ha figyelembe vesszük az esetleges hűtővíz veszteséget, és ennek következtében a fűtőelemek túlmelegedését és sérülését, akkor ez esetben percek alatt, számottevő mennyiségű, igen nagy aktivitású radioaktív szennyeződéssel kellene számolni. Akkor sem sokkal jobb a helyzet, ha a nagy aktivitású, „fiatal” kiégett fűtőelemek vízhűtéses pihentetőmedencéi elleni támadás következményeit vesszük számításba.

REAKTOROK LEBONTÁSA

A radioaktív hulladékok elhelyezésével, tárolásával, kezelésével kapcsolatos gondok nem csak a működő reaktorok kiégett fűtőelemeivel kapcsolatban merülnek fel. Meg kell oldani a már nem működő, lebontásra ítélt reaktorok szétszerelése, bontása során keletkező radioaktív és nem radioaktív hulladék, törmelék, elhasználódott szerkezeti elemek (reaktortartály, csővezetékek, hőcserélők, stb.) biztonságos elhelyezésének, tárolásának feladatát is. Ennek a kérdéskörnek a problematikáját legjobban egy konkrét példán keresztül tudjuk bemutatni [6].

Az említett probléma előbb-utóbb a Föld minden olyan országát érinteni fogja amely üzemeltetett reaktorokat. Mivel azonban az Egyesült Államok alkalmaz legrégebben nukleáris erőműveket, természetes, hogy ez a kérdés is először ebben az országban vetődött föl. Az Egyesült Államokban valaha üzembe helyezett 123 erőművi reaktorból 104 még ma is működik. A leállított 19 reaktor közé tartozik a Maine államban, Portlandtól 40 mérföldre északkeletre található „Maine Yankee” erőmű (11. ábra), amely az ország egyik első nagy teljesítményű nyomottvizes erőműve volt. Ez 1972-től 1996 végéig termelte a villamos energiát. Az erőművet lebontásra ítélték, amely szituáció számos új feladat és probléma elé állította a mérnököket, a tudósokat és a hatóságokat is. Szögezzük le mindennek előtt, hogy a lebontás, szétszerelés nem jelent „semlegesítést”, mindössze arról van szó, hogy a radioaktív anyagot az adott helyről egy másik helyre szállítják és ott a hatóságok által előírt minimális ideig tárolják. A „Maine Yankee” esetében ez jelent nagyjából 100.000 tonnányi hulladékot. Ebből a mennyiségből körülbelül 65.000 tonna beton, és valamivel több mint a fele, hozzávetőlegesen 55.000 tonna radioaktív hulladék. A kivitelezők előtt álló feladat ennek a tetemes mennyiségű hulladéknak, törmeléknek az elszállítása. A „Maine Yankee”-t követően épült 50%-kal nagyobb teljesítményű reaktorok esetében ezek az adatok némileg nagyobbak.



11. ábra. A „Maine Yankee” mielőtt befejezte működését, illetve a bontási művelet során [VIII-IX.]

A bontási művelet azzal kezdődött, hogy a reaktorcsarnok falában vágtak egy nyílást, hogy eltávolíthassák a reaktor egyes komponenseit. A 3db gőzgenerátort és a nyomás szabályozásáért felelős térfogat kompenzátorát egyenesen Barnwellbe szállították (12. ábra). Ezek után került sor a reaktortartály kiemelésére. Ezt először feltöltötték betonnal, majd ugyancsak előkészítették a barnwelli lerakóhelyre történő elszállításra. A legalacsonyabb szintű aktivitással rendelkező

komponensek a Utah állambeli Clive-ba kerülnek, a nem radioaktív törmelék pedig New York állambeli építkezéseknél használják talajfeltöltésre.



12. ábra: Nukleáris hulladék tárolása a dél carolinai Barnwell-ben. [X.]

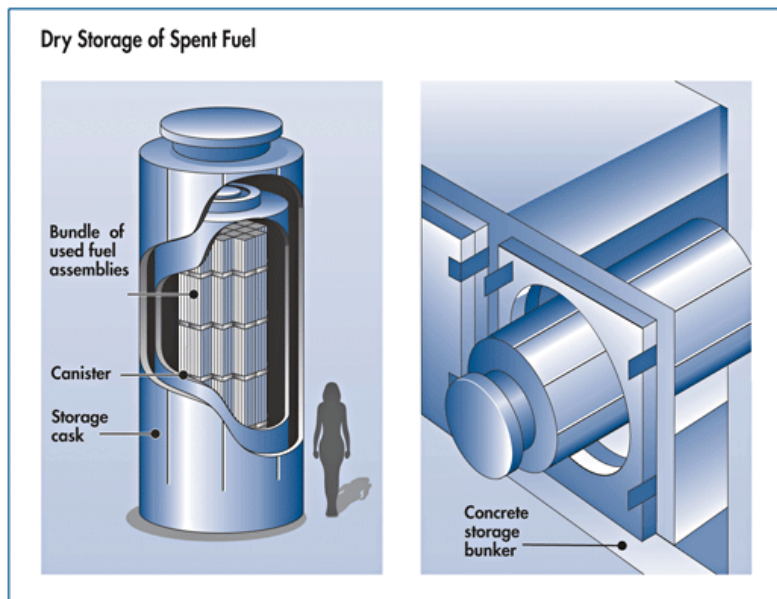
A bontás során keletkező hulladéknak a legtöbb gondot jelentő része nyilvánvalóan a radioaktív hulladék. Termikus reaktorról lévén szó, ezek között is kiemelkedő jelentőségű a kiégett fűtőelemek elhelyezésének problémája. A fűtőanyag urán-oxid kerámia, amelyet pasztillákká préselnek, majd egy fémötvözetből készült csőbe forrasztják. A reaktor működése során előfordulhat – ahogyan ez a „Maine Yankee” esetében is megtörtént –, hogy ezek a fémcsövek megrepednek, kilyukadnak és ezáltal radioaktív atommagok, hasadási termékek jutnak a primer kör vizébe. Ez a radioaktív szennyeződés ráakódik mind a reaktortartály, mind a primer kör csővezetékeinek a falára. Ezekkel a tényekkel tisztában kell lenni, hiszen ez határozza meg a kezelés módját és az elszállítás célállomását. A szállítást megelőzően, a szennyeződések csökkentése érdekében a technikusok átmosták az említett csővezetékeket olyan oldószerekkel, amelyek lemarják a csövek faláról az ott kivált csapadékot. A nagy aktivitású kiégett fűtőelem rudakat átmenetileg a helyszínen, száraz tároló konténerekben helyezték el arra az időre, amíg a központi Nevada állambeli elhelyezésre lehetőség nem nyílik. A belső szerkezeti elemek, a fémváz, amely a reaktorban a fűtőelemeket tartotta és vezette a primer kör hűtővizét, szintén a helyszínen, száraz tározóban kap átmenetileg helyet. Mindezekkel együtt összesen 64 db, külön-külön egy-egy betonbunkerbe elhelyezett tartály átmeneti felügyeletét, őrzését kell a helyszínen megoldani, még legalább egy-másfél évtizedig (13. ábra).

A felületen szennyeződött betonrétegekből vagy lefaragnak, vagy nagy nyomású légborotvával lefúvatnak szükség szerint néhány mm vagy cm vastagságú réteget. A lefúvott port nagy teljesítményű filter rendszerekkel szűrik ki a levegőből.

Ha egyetlen csővezeték vagy fűtőelem sem szivárog akkor is számolni kell a radioaktív szennyeződés egy másik fajtájával, ez pedig a neutronok hatására bekövetkező felaktiválódás. A reaktor szerkezeti anyagának atomjai befoghatják az urán hasadása során keletkező neutronokat anélkül, hogy hasadnának. Így instabil, radioaktív izotópok keletkezhetnek. A tartály betonfalában például még 60cm mélyen is található felaktiválódott atom. Ha egy reaktor évtizedeken át működik, egyes szerkezeti elemek olyan mértékben felaktiválódhatnak a neutronsugárzás hatására, hogy nagy aktivitású radioaktív hulladékként kell azokat kezelni. A dominánsan jelen levő felaktiválódott izotóp a Co-60. Ez vagy a Co-59 vagy a Ni-60 izotópból keletkezik neutronok hatására. Ezek az elemek jelen vannak a reaktor szerkezeti elemeit alkotó különböző ötvözetekben. A Co-60 5,27 év felezési idővel alakul át stabil Ni-60 izotóppá. Ez még viszonylag „kedvező időskálának” számít, ugyanis például a felezési idő négyszeresének, azaz kerekítve 21 évnek az elteltével a kezdetben

jelen levő izotóp mennyiségének csak az $(1/2)^4 = 1/16$ része marad meg, tehát aktivitása jelentősen csökken. Ez az időtartam a tárolás, kezelés szempontjából kellően rövidnek mondható.

A reaktorok lebontásával kapcsolatos további gondot egyrészt a magas költségek, másrészt a jogi szabályozók jelentik. Az idő előrehaladtával a költségek jelentősen növekednek, de a bontási projekt vezetői legalább ennyire tartanak a nukleáris hulladékok kezelésével kapcsolatos jogszabályok változásától. Ahogyan ezek jelentősen késleltették annak idején az erőművek építését úgy most a bontás folyamatát hátráltatják. Az ezzel kapcsolatos egyik legégetőbb kérdés a kis és közepes aktivitású hulladékok elhelyezésének a problémája. Ha ugyanis a jelenleg még működő két, e célt szolgáló megőrzőhely telítettsége eléri kapacitása maximumát, és közben nem nyitnak meg új létesítményeket, akkor a helyszínen történő ideiglenes tárolás költségei magasak lehetnek. 2003-ban például 1 m³ hulladék tárolási költsége meghaladta az évi 20.000 \$-t.



13. ábra: Nukleáris hulladékok tárolásának módja a lebontott „Maine Yankee” erőmű területén.

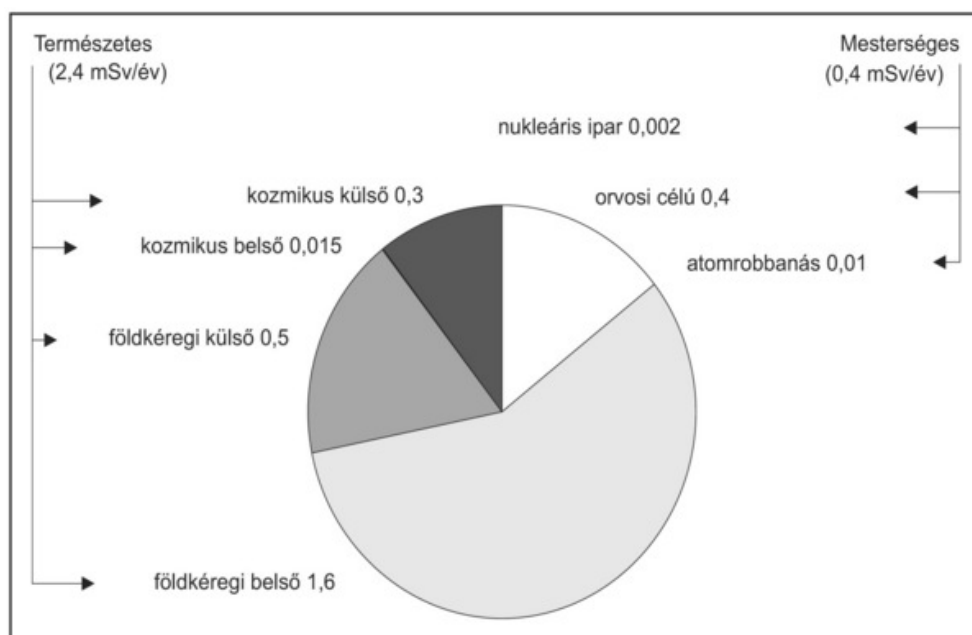
A száraz tároló konténereket vízszintes helyzetben, betonfalakkal körülvéve helyezik el az erőmű területén. Egy konténer tárolókapacitása 10 tonna kiegészített fűtőelem [XI.]

Nem kis probléma megfelelni a hatóságok által előírt sugárzási korlátozásoknak sem, amelyek az évek során egyre szigorúbbak lesznek. A Nukleáris Szabályozó Hivatal (Nuclear Regulatory Commission, NRC) által megállapított előírás, hogy a sugárzás szintje legyen „annyira alacsony amennyire csak lehet”. Kvantitatíve, a polgári lakosságot illetően, a természetes háttérsugárzás szintjét nem lehet megnövelni évi 25 millirem dózissal nagyobb értékkel (az egészségügyi korlát más mértékegységben kifejezve: 0,25 millisievert, 100millirem = 1mSv). Ugyanakkor a Környezetvédelmi Hivatal által megszabott korlát évi maximum 15 millirem többletdózis, amelynek legfeljebb 4 millirem része származhat a talajvíztől. A hivatal az utóbbi értéket arra alapozva kalkulálta ki, hogy a statisztikai kimutatások szerint 15 millirem többletdózis éppen egy milliommód értékkel növeli meg a rákos megbetegedés valószínűségét. Az NRC hangoztatja, hogy az általa előírt korlát megfelelő biztonságot garantál, ez jelenleg az Egyesült Államok egészére kiterjedő szövetségi standard. A végső döntés a kérdést illetően azonban az egyes államok hatáskörébe tartozik. Maine állam törvényhozása csökkentette ezt az egészségügyi korlátot 10 millirem többletdózissá, melynek szintén legfeljebb 4 millirem része származhat a talajvíztől. A szomszédos államok (Massachusetts, New York, New Jersey) csatlakoztak ehhez a lépéshez, bár az utóbbi kettő nem is üzemeltet olyan erőművet, amely a közeli jövőben lebontásra szorulna.

Szakértők véleménye szerint a Maine állambeli lépés rossz példa. Az egészségügyi korlátokat ugyanis szigorúan tudományos alapokon kell megállapítani, nem pedig érzelmi alappal.

Tudományos szempontból pedig a 25 millirem és a 10 millirem többletdózis lényegében ugyanazt jelenti. Ezen többletdózisok egészségügyi következményeit ugyanis kizárólag statisztikai módszerekkel lehet vizsgálni, azonban még a 25 millirem többletdózis következményeinek statisztikai megbízhatósága, szignifikanciája is kérdéses. Nincs minden kétséget kizáróan bizonyítva, hogy egy ekkora dózisnak vannak-e egészségügyi következményei. Ez a dóziskorlát annyira alacsony, hogy még a kimutatása, a mérése is komoly problémát okoz, csaknem lehetetlen. Ehhez figyelembe kell még venni, hogy ilyen alacsony dózisok esetén a mérés hibája a mért érték nagyságrendjébe esik. Célszerűbb ilyen esetben mérés helyett modelleket, szimulációkat készíteni a kérdés tanulmányozására. Fizikusok és orvosok egybehangzó véleménye szerint semmiféle egészségügyi hatást nem lehet kimutatni 10 millirem besugárzási dózis alatt. Az olyan akut következmények mint az émelygés, hányinger, hajhullás, csak akkor tapasztalható, ha a besugárzási dózis eléri a néhányszor 10 rem értéket. Ennél a pontnál azonban hangsúlyoznunk kell a különbséget az egyéni és a kollektív dózis között. A matematikai modell, amelyet az egészségügyi korlátok megállapításánál alkalmaznak, azt jósolja, hogy 10.000 rem kollektív dózis 1 és 8 közötti halálos kimenetelű rákos megbetegedést okozhat. Ez a helyzet azonban sokféle módon előállhat: 10.000 ember mindegyike kap 1 rem többletdózsot, 1.000.000 ember közül mindenki kap átlagosan 0,01 rem = 10 millirem dózsot, stb. Az egyénnel kapcsolatos következmények azonnal más fényt kapnak. Összehasonlításképpen megemlíjtük az ún. félhalálos dózsot, melynek értéke 350 rem/személy. Ez az a besugárzási dózis, amely esetén – orvosi kezelés nélkül –, a besugárzott személyek felénél alakul ki végzetes következményekkel járó rákos betegség.

A kép akkor teljes, ha figyelembe vesszük egy átlagos körülmények között élő amerikai állampolgár sugárterhelését. A természetes háttérsugárzásból és a gyógykezelésből adódó dózis átlagosan évi 280-300 millirem (14.ábra). Ez annyit jelent, hogy a lebontott reaktorok – a dóziskorlátok betartása esetén –, nagyjából egy havi „természetes” dózisnak megfelelő többletdózsissal járulnak hozzá az éves sugárterheléshez. Összehasonlításképpen ez körülbelül annyi, amennyit egy átlagos, Maine állambeli, tengerszinten élő lakos kap, amikor elutazik az 1600m tengerszint feletti magasságban fekvő Denverbe. Ezen a szinten ugyanis a vékonyabb atmoszféra miatt intenzívebb a kozmikus sugárzás. Los Alamos-i tudósok megmérték illetve kiszámították, hogy a természetes háttér részét képező kozmikus sugárzás dózisa tengerszinten évi 25-30 millirem, de 3000m tengerszint feletti magasságban azonban az évi 90 millirem értéket is elérheti.



14.ábra: Az átlagos évi 280 millirem = 2,8 mSv dózis megoszlása az egyes források között [XII.]

A bontás következtében a polgári lakossággal kapcsolatosan irányadó 25 millirem egészségügyi korlát értékéhez viszonyításképpen megemlítjük, hogy a jelenlegi szabályozás szerint, egy működő reaktor környezetében élő lakosságra vonatkozó dóziskorlát 100 millirem/év, bár hangsúlyozzuk, hogy normál üzem esetén a tényleges dózisok ennél a korlátnál lényegesen kisebbek. Az erőműben dolgozó személyzetre vonatkozó dóziskorlát pedig, a munkakörtől függően 2-5 millirem/év, de az alkalmazottak túlnyomó többsége ennek a dózisnak is csak töredékét kapja.

Visszatérve a „Maine Yankee” erőmű bontási munkálataira, a kivitelezők a minimálisra csökkentették a környező lakosságot terhelő többletdóvizt. Nagy teljesítményű elszívó- és szűrőberendezésekkel a radioaktív por nagy részét megkötik. A művelet hatékonyságát mutatja, hogy a bontás helyszínén, a munkálatok teljes időtartamára integrált teljes személyi dózis 1115 rem. Ennek értékeléséhez vegyük tekintetbe, hogy amikor a reaktor fűtőelemeit az utolsó alkalommal cserélték, az egész aktuális évre integrált személyi dózis 440 rem volt.

A felsorolt adatoknak egy átlagos állampolgárt érintő vonatkozásai megítéléséhez álljon itt ismét egy példa. Világos, hogy a környezetszennyezés fokozott mértékben érinti azokat akik sok időt töltenek a szabadban. Tegyük fel, hogy egy farmer az év 250 napján napi 8 órát dolgozik a földjén – ami nem igazán jellemző Maine államban –, majd a saját földjén termelt élelmiszert fogyasztja. Ebben a különleges esetben – ha még feltesszük, hogy a sugárzás szintje valóban eléri az egészségügyi korlátokat –, a farmer által elnyelt többletdózis kevesebb lesz, mint ha egy alkalommal repülőgéppel átrepülne a Föld egyik pólusa felett.

Hivatkozások:

1. Charles Petit: Nuclear Power. National Geographic. Április, 2006.
2. William H. Hannum, Gerald E. Marsh, George S. Stanford: Smarter use of nuclear waste. Scientific American. December, 2005.
3. Frank N. von Hippel: Rethinking Nuclear Fuel Recycling. Scientific American. Május, 2008.
4. Michael E. Long. America's nuclear waste: National Geographic. Július, 2002.
5. http://www.sacredland.org/endangered_sites_pages/yucca_mountain.html (2008.06.)
6. Matthew L. Wald: Dismantling nuclear reactors. Scientific American. Március, 2003.

Képek jegyzéke:

- I. http://www.news24.com/Images/SpecialComponents/20070302095524kenny_graph1.gif (2008.06.)
- II. <http://www.tesionline.com/intl/img/focus/emission.gif> (2008.06.)
- III. <http://www.iaea.org/cgi-bin/db.page.pl/pris.oprconst.htm> (2008.06.)
- IV. <http://nuclear.inl.gov/gen4/i/sfr-pool-layout-lg.jpg> (2008.06.)
- V. <http://www.wnfm.com/Yucca-pics/Entrance> (2008.06.)
- VI. <http://www.clemson.edu/caah/history/facultypages/PamMack/lec124/yucca-drawing.jpg> (2008.06.)
- VII. http://whyfiles.org/275nukewaste/images/dry_cask_storage.jpg (2008.06.)
- VIII. <http://eyeball-series.org/npp2/pict443.jpg> (2008.06.)
- IX. <http://www.mindfully.org/Nucs/2003/Dismantling-Reactors1mar03.htm> (2008.06.)
- X. http://i.usatoday.net/news/_photos/2007/12/10/wastex.jpg (2008.06.)
- XI. <http://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/fact-sheets/dry-cask-storage.html> (2008.06.)
- XII. <http://www.hik.hu/tankonyvtar/site/books/b108/kepek/7-6.jpg> (2008.06.)