

LÁTOGATÁS A CSERNOBILI ATOMERŐMŰBEN

1. rész: az RBMK reaktor – a legnagyobb atomerőmű-baleset

Radnóti Katalin
ELTE TTK Fizikai Intézet

1986. április 26-án történt minden idők legnagyobb nukleáris katasztrófája, a csernobili atomerőmű balesete. 31 évvel a tragédia után a Magyar Nukleáris Társaság (MNT) Fiatalok a Nukleáris Energiáért (FINE) szakcsoportja 2017 júniusában tanulmányutat szervezett a csernobili atomerőműbe és a körülötte kialakított lezárt zóna megtekintésére. Két részes írásom első felében áttekintem a nukleáris baleseteket, a Csernobilban üzemelt RBMK reaktorok főbb jellemzőit, a baleset okait és körülményeit, majd a második részben a látogatás tapasztalatait.

Nukleáris balesetek besorolása

Egy nemzetközi szakembergárda – a Nemzetközi Atomenergia Ügynökség felkérésére – az eddig megtörtént nukleáris baleseteket tanulmányozva kidolgozta a Nemzetközi Nukleáris Eseményskálát (International Nuclear Event Scale, INES). Ezt olyan eszköznek szánták, amely segítségével egy – esetleges – nukleáris baleset súlyosságáról gyorsan lehet informálni a közvéleményt. A skálát – hasonlóan a földrengések jellemzéséhez – 7 fokozatúra, a súlyosság mértékével növekvő számokkal, tervezték.

Az alsó három szint üzemzavarnak felel meg, a felsőbb szinteket már balesetnek nevezik. A bekövetkezett eseményt három fő kritérium szerint szokás vizsgálni. Az első arra vonatkozik, hogy történt-e a környezetbe radioaktív kibocsátás. A közvéleményt érthetően ez izgatja leginkább. A második az erőmű belsejére vonatkozik: ott az esemény hatására hogyan változott a sugárzási szint. A harmadik pedig a beépített többszintű védelmi rendszerek állapotára vonatkozik.

Ez a skála a gyors tájékoztatást hivatott szolgálni, így természetesen előfordulhat, hogy egy eseményt később, a vizsgálatok befejeztével átminősítenek. Az 1. táblázatban néhány példát mutatunk be.

A táblázatban jelzett első nukleáris baleset 1957-ben történt az angliai Windscale-ben. A reaktor grafit-

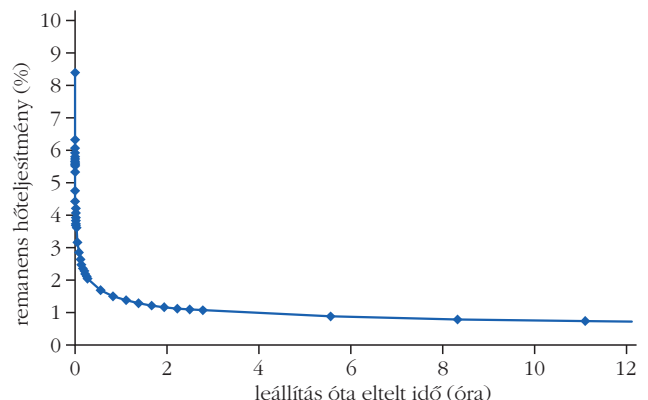
moderátoros és léghűtéses volt, katonai célokot szolgált, vagyis fő feladatként az atombombához szükséges plutóniumot termelt. A hirtelen felmelegedés hatására a grafit meggyulladt, amelyet Wigner Jenő előre „megjósolt”, ezt a jelenséget azóta Wigner-effektusnak is nevezik. Radioaktív termékek kerültek a levegőbe, így a környezeti hatások miatt sorolják az 5 szintű események közé. Két 7-es szintű eseményt tartanak nyilván, amelyek közül az első a Csernobili Atomerőmű 4. blokkjában bekövetkezett baleset, ez írásunk tárgya, a második pedig a 2011-ben a földrengés és az azt követő cunami hatására bekövetkezett esemény a Fukushimai Atomerőmű 4. blokkjában.

Mikor tekinthető biztonságosnak egy atomerőmű?

1. Ha a láncreakció minden körülmények között stabil és bármikor leállítható [3].
2. A reaktor minden pontja lehűthető és a hűtés folyamatosan biztosítható.
3. Radioaktív anyagok még üzemzavar esetében sem kerülnek ki a környezetbe.

A második pont azért lényeges, mert az atomreaktorok üzemanyagában a leállás után sem szűnik meg a hőtermelés, hiszen a hasadás során keletkező hasadási termékek bomlása is energiafelszabadulással jár (béta-, majd az azt követő gamma-sugárzás). A reaktor leállítása pillanatában a hőteljesítmény a névleges érték 7-8%-a, ami közel 4 óra elteltével 1% alá, 2 nap után pedig 0,5% alá csökken. Ezt remanens hőnek nevezzük (1. ábra), amelynek elvonása csak úgy lehetséges, ha az üzemzavari hűtőrendszerek vizet juttatnak a reaktorba és hőcserélőkön keresztül elszállítják a hőt a hermetikus védőépületből.

1. ábra. Atomreaktorok remanens hőteljesítményének változása a leállítás után eltelt idő függvényében.



Radnóti Katalin az ELTE-n végzett kémia-fizika szakos tanárként. A budapesti Kölcsey Ferenc Gimnáziumban nyolc éven keresztül tanított. Jelenleg az ELTE Fizikai Intézetében főiskolai tanár. Kutatási területe a fizika és a természettudományok tanításának módszertana. Publikációs tevékenysége is e témához kapcsolódik, tanári segédletek, tanulmányok, könyvek, könyvfejezetek. A *Nukleon*, a Magyar Nukleáris Társaság internetes folyóirata főszerkesztője.

A Nemzetközi Nukleáris Eseményskála

fokozat/név	zavar/baleset jellemzői	példa
7 nagyon súlyos baleset	nagy környezeti és egészségi károsodás	1986. Csernobil, Ukrajna, 2011. Fukushima, Japán
6 súlyos baleset	jelentős környezeti kibocsátás	
5 baleset	korlátozott kibocsátás, reaktor komoly károsodása	1957. Windscale, Anglia, 1979. Three Mile Island, USA
4 baleset	kis környezeti kibocsátás, reaktor részleges károsodása	1980. Saint-Laurent, Francia., 1999. Tokai Mura, Japán [1]
3 súlyos üzembiztos	kis környezeti kibocsátás, majdnem baleset	1989. Vandellós, Spanyolo., 2003. Paks [2]
2 üzembiztos	technikai zavar	
1 rendellenesség	kis eltérés az engedélyezett üzemi állapottól, amely működésbe hozta a védelmi rendszert	
0 a skála alja	nincs biztonsági jelentősége	

pust különálló egységekből lehetett összerakni. A csupán 1,8%-osra (Pakson átlagosan 4,2%-ban dúsított urán-dioxid van a reaktorban) dúsított uránt, a moderátor grafitot és a vízvezetékcsöveket tartalmazó oszlopokat kellett egymás mellé helyezni és a vízvezetékot bekötni. A reaktor teljesítményét további ilyen oszlopok hozzáadásával lehetett növelni. Nincs szükség külön reaktortartályra, amelyre a vízmoderátor esetében igen, így semmi sem szabhatárt a méret növelésének (3. ábra). További nagy előnye, hogy a fűtőelemeket üzem közben is lehet cserélni, így nem kellett évente leállni karbantartás és a kiégett fűtőelemek kicserélése céljából, mint a nyomottvízes típus esetében. (A kiégett, tehát a sok hasadási termék miatt kezelhetetlenül magas sugárzású fűtőelemekkel ellentétben, a reaktorban kevesebbet tartózkodó, de az urán 238-as izotópból keletkező plutóniumban már gazdag fűtőelemek kifejezetten alkalmasak atombomba előállítására. A csernobili erőművet ilyen katonai célra nem használták, de bármikor alkalmas lehetett volna.) Csernobilban négy ilyen típusú reaktor üzemelt (egy-egy blokk hasznos – elektromos – teljesítménye 1000 MW, szokásos jelöléssel: 1000 MWe), az ötödik blokk már majdnem kész volt, a hatodik építését is elkezdték, amikor 1986-ban bekövetkezett a baleset. Egy-egy reaktorban 190 tonna üzemanyagot helyeztek el, amelyhez 200 szabályozórúd tartozott. Ezek összehangolt mozgatása már önmagában is bonyolult műszaki feladat volt.

Az RBMK reaktorban a víz egyetlen körben kering. A turbinára a reaktoron is keresztüláramló víz gőze kerül. A víz nyomása 70-80 bar körüli. (Több helyen csupán 6,5 bar olvasható, de a víz fázisdiagramja alapján az kevés lenne ahhoz, hogy 280 °C-on is folyékony maradjon!) Egy-egy vízcsőben kettő, az 1661 csőben összesen 3322 darab üzemanyagköteg található. Egy kö-

telem

A csernobili atomerőmű felépítése

Korábbi cikkünkben írtunk a Csernobilban üzemelt, de azóta leállított RBMK reaktortípus fő működési elveiről [4]. Azt kiegészítendő, a baleset szempontjából lényeges kérdés a *reaktor stabilitása*, azaz a reaktor *alulmoderált* vagy *túlmoderált* (a felülmoderált kifejezés is használatos).

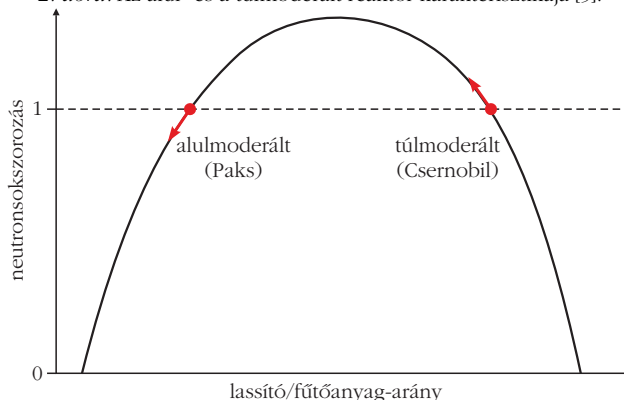
Az alulmoderált rendszer szerkezetileg stabil, azaz a lassító közeg részleges vagy teljes elvesztése a sokszorozási tényezőt csökkentve leállítja láncreakciót. Vízzel moderált reaktorok esetében a víz felforr, eltávozik a rendszerből, nincs további moderálás, ezért megszűnik a láncreakció, és a reaktor leáll.

De mi a helyzet túlmoderált reaktor esetében? Nézzük meg az urán-grafit rendszert, amelynek csak a hűtőközege víz. Ha a reaktor kritikus állapotú, akkor a sokszorozási tényező 1, és ha bármilyen ok miatt túlhevül a rendszer, a hűtővíz felforrhat és eltávozik. Ez azonban nemcsak kevesebb lassítást jelent, hanem kevesebb „reaktormérget” is, mivel – mint azt már említettük – a könnyűvíz protonjai kis mértékben ugyan, de befognak neutronokat. A szilárd halmazállapotú grafitmoderátor viszont nem távozik el, a neutronokszorozódás fokozódik, a láncreakció „megszalad” (2. ábra). A túlmoderált reaktor tehát *szerkezetileg instabil*.

Instabilitásuk okán az ilyen típusú reaktorokat az 1950-es években – Teller Ede javaslatára – Amerikában leállították. Egyetlen országban – a hidegháború okán –, a Szovjetunióban, többek közt Csernobilban építettek ilyen atomerőműveket, ugyanis e típus rendkívül alkalmas nukleáris robbanófejben használatos plutónium termelésére.

Az RBMK (Реактор Большой Мощности Канальный, átírásban: Reaktor Bolsoj Mosnosztyi Kanalnij, fordításban: Csatorna-típusú, nagy energiakimenetű reaktor) gazdaságos megoldásnak látszott. Ezt a reaktortí-

2. ábra. Az alul- és túlmoderált reaktor karakterisztikája [5].

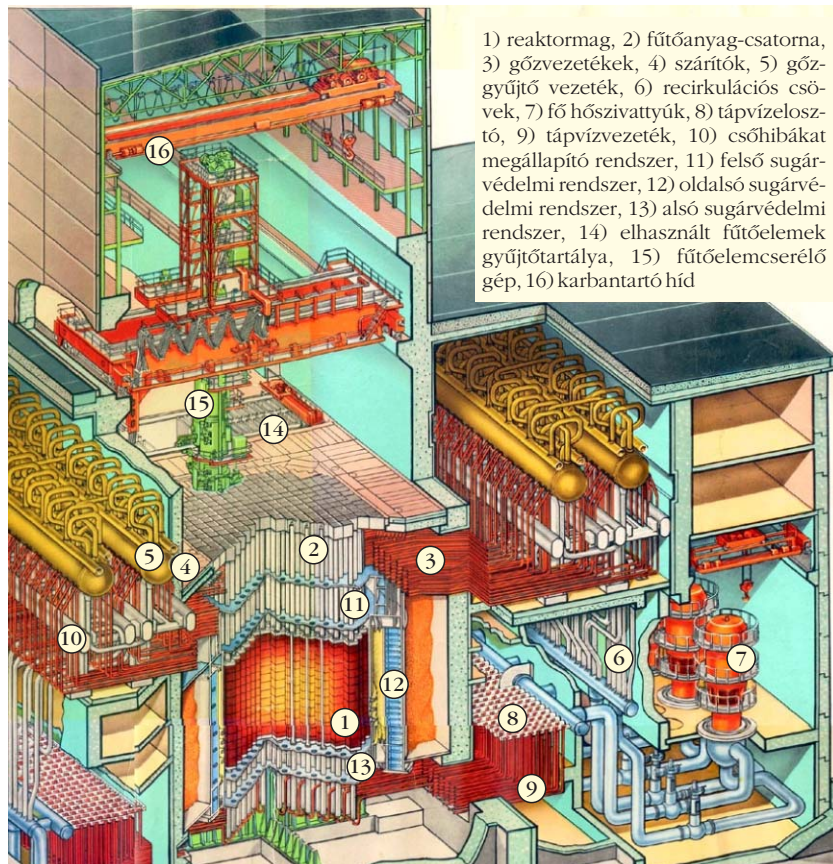


teg 18 darab 7 m hosszúságú urán-oxidrúdból áll. A víz mennyisége nem elegendő az urán hasításához szükséges neutronok lassítására, így ezek a csövek grafitömbökben helyezkednek el. A közel 1700 tonna grafitot kis túlnyomásra méretezett acélköpeny veszi körül.

Ha az urán-grafit + vízvezeték-oszlopokból kis méretű rácsot készítenek, a neutronok nagy része megszökik a felületen. Azonban, minél több ilyen rácsot rakunk össze, annál kevesebb neutron szökik ki a rendszerből, az üzemeltetés egyre gazdaságosabb lesz. A grafit a neutronreflektor szerepét is betöltötte, ezért a zóna aljára is raktak. Így a Csernobilban épült reaktorok túlmóderáltakká váltak. A szerkezeti instabilitást járulékos biztonsági rendszerekkel próbálták ellensúlyozni, amelyek a neutronsokszorozódás vagy a hőmérséklet gyors emelkedése esetében neutronelnyelő rudak betolásával, illetve szintén neutronelnyelő bóros vízzel történő elárasztással leállíthatják a reaktort. *Ha az operátorok ezeket az üzemképes biztonsági rendszereket szándékosan nem kapcsolták volna ki, a baleset nem következett volna be!*

A csernobili atomerőmű balesete

A csernobili atomerőmű 4-es blokkját, amelyben a baleset bekövetkezett, 1983 decemberében helyezték üzembe. A baleset idejéig nem is kellett leállítani. Éppen 1986. április 25-ére tűzték ki az első tervszerű karbantartást. Ezért a fűtőelemek többsége (közel 75%-a) még az első töltetből származott, így azokban tetemes mennyiségű radioaktív hasadási termék halmozódott fel. A leállítás előtt egy *tesztet* (amelyet korábban *kísérletnek* neveztek, de látogatásunk során több esetben is hangsúlyozták, hogy az teszt volt) kívántak végrehajtani, amelynek célja röviden a következő volt: ha az erőmű bármilyen okból leszakad a hálózatról, akkor az erőműhöz tartozó dízelgenerátorok azonnal indulnak, hogy árammal lássák el az irányítórendszert és a kiégett radioaktív fűtőelemeket hűtő üzemzavari szivattyúkat. (A hasadványok hűtésének fontosságára a bevezető részben utaltunk.) A generátorok viszont körülbelül 2 perc alatt pörögnek csak fel, így ezt az időszakot valahogy át kell hidalni. Az erőmű tervei szerint a turbógenerátoroknak ez idő alatt még forogniuk kell, de az ellenőrzések szerint a gyakorlatban ez még sincs így. E hiányosság megszüntetésére egy speciális fordulatszám-szabályozó eszközt fejlesztettek ki, ezt akarták kipróbálni. A kí-



- 1) reaktormag, 2) fűtőanyag-csatorna, 3) gőzvezetékek, 4) szárítók, 5) gőzgyűjtő vezeték, 6) recirkulációs csövek, 7) fő hőszivattyúk, 8) tápvízelosztó, 9) tápvízvezeték, 10) csőhibákat megállapító rendszer, 11) felső sugárvédelmi rendszer, 12) oldalsó sugárvédelmi rendszer, 13) alsó sugárvédelmi rendszer, 14) elhasznált fűtőelemek gyűjtőtartálya, 15) fűtőelemcserélő gép, 16) karbantartó híd

3. ábra. Az RBMK erőmű felépítése.

sérletet 700-1000 MW hőteljesítmény mellett kellett volna elvégezni. (A reaktor egy hőgép, amelynek hőteljesítménye a hasznos teljesítmény körülbelül 3-szoros.) A teszthez ki kellett kapcsolni a reaktor számítógépes szabályozó rendszerét.

A baleset leírása során néhány esetben összehasonlítást teszünk a Fukushima-ban történekkkel, hogy a kétféle esemény közötti különbségek egyértelműek legyenek.

Az 1986-ban, Csernobilban bekövetkezett eseményt utólagosan a következőképp rekonstruálták [4-8]:

1986. április 25., péntek, 1:00 óra

Csökkenteni kezdik a reaktor teljesítményét.

13:05

A hőteljesítmény 1,6 GW, a két turbina közül az egyiket lekapcsolják.

14:00

Lekapcsolják a vészleállító rendszert, amely bóros vízzel árasztaná el a reaktort, hogy a neutronok elnyelése által megszakítsa a láncreakciót. Az operátorok kizárólagosan akarják irányítani a reaktort.

14:05

Az energiafelügyelet váratlanul további elektromos teljesítményt kér a hálózatra. Megszüntetik a teljesítmény további csökkentését és 0,5 GW-ot juttatnak a hálózatra. (A reaktor üzemi teljesítménye 1 GW.)

23:10

Az operátor engedélyt kap a reaktor leállítására, újból csökkenteni kezdi a teljesítményt.

1986. április 26., szombat 0:28

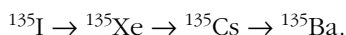
Lekapcsolják a neutronműködés lokális ellenőrzését, így a biztonsági automatika csak globális szabályozást szolgáltat. (Az ilyen típusú reaktorokban a neutronműködés elég nagy eltéréseket mutathat a hely függvényében.) Továbbá szabályellenesen a megengedett maximális érték fölé fokozzák a vízáramlás sebességét, így annak nincs ideje lehűlni és hőmérséklete megközelíti a forráspontot. A reaktor az instabilitás jeleit mutatja, teljesítménye hirtelen 0,03 GW-ra esik.

1:07

A reaktor 0,7 GW hőteljesítményen stabilizálódik, mérsékelik a hűtővíz áramoltatását.

1:22

A neutronelnyelő rudak szabályellenesen magasra vannak kihúzva. Az üzemszerű működés során, az urán hasadásakor a hasadványok további bomlása során elég sok neutronokat elnyel – ezért reaktorméregnek is nevezett – ^{135}Xe -izotóp keletkezik. A xenon nagyrészt a maghasadás során keletkező ^{135}I béta-bomlásából jön létre:



A ^{135}Xe , bár elenyésző mennyiségben, de a maghasadás direkt termékeként is létrejöhet. Ez az izotóp instabil (9,1 órás felezési idővel céziummá alakul), így a reaktor beindítása után beáll az egyensúlyi helyzet. A reaktor leállítása után egy ideig még termelődik a xenon (a fennmaradt jódból), de pár nap elteltével elbomlik, és újra lehet indítani a reaktort. A neutronelnyelés során keletkező ^{136}Xe gyakorlatilag stabil (a természetes előfordulás 8,9%-a).

A ^{135}Xe -izotóp – annak dacára, hogy atommagja az egyensúlyi aránynál jóval több, 81 neutronot tartalmaz – azért fog be, ráadásul nagy hatáskeresztmetszettel, újabb neutron, mert így a mag 82, mágikus számnyi

neutronnal rendelkezhet. A jelenség a halogénatomok nagy reakciókészségéhez hasonlítható, ahol mindössze egyetlen elektron hiányzik a stabil nemesgázszerkezet eléréséhez.

A ^{135}Xe -izotóp mennyiségének alakulását a következő differenciálegyenlet írja le:

$$\frac{dN_{\text{Xe}}}{dt} = \frac{\ln 2}{T_{\text{I}}} N_{\text{I}} - \frac{\ln 2}{T_{\text{Xe}}} N_{\text{Xe}} - \sigma I N_{\text{Xe}},$$

ahol az indexek a ^{135}Xe - és ^{135}I -izotópra utalnak, N az adott izotópmagok száma, T pedig felezési ideje, σ a ^{135}Xe neutronbefogási hatáskeresztmetszete és I a neutronáram nagysága.

Az egyenletből látható, hogy az állandó üzemmód nagy neutronáram-sűrűsége esetén alacsony és állandó (az egyenlet mindkét oldala nulla) ^{135}Xe reaktorméreg-sűrűség adódik. Ha csökkentjük a teljesítményt, akkor a korábbi, nagy teljesítményhez tartozó ^{135}I -izotóp magas mennyisége – ez csak lassan, 6,6 óra felezési idővel csökken – magas ^{135}Xe -keltési képesség mellett alacsonyabb I neutronáram szerepel, a ^{135}Xe fogyása kisebb, az egyenlet jobb oldala pozitívvá válik, azaz ^{135}Xe -izotóp felgyülemlik a reaktorban.

Az erősen xenonmérgezett reaktor instabil állapotú, ha a neutronműködés hirtelen megugrik, akkor elűnteti a mérget, a neutronokszorozás megnő, ez pozitív visszacsatolást jelent. Ha a neutronelnyelő rudak magasra vannak kihúzva, akkor leesésükhöz hosszabb idő szükséges, mint a reaktor pozitív visszacsatolással szembeni reakcióideje, ezért **xenonmérgezett reaktorban tilos bármiféle kísérletet végezni!** A jelenséget először John Archibald Wheeler és Wigner Jenő – az 1940-es években, a Hanfordban működő, az atombomba előállításához szükséges plutóniumot előállító reaktorban – vette észre.

1:23:04

Elkezdik a kísérletet és kikapcsolják a vészleállító automatikát.

1:23:20

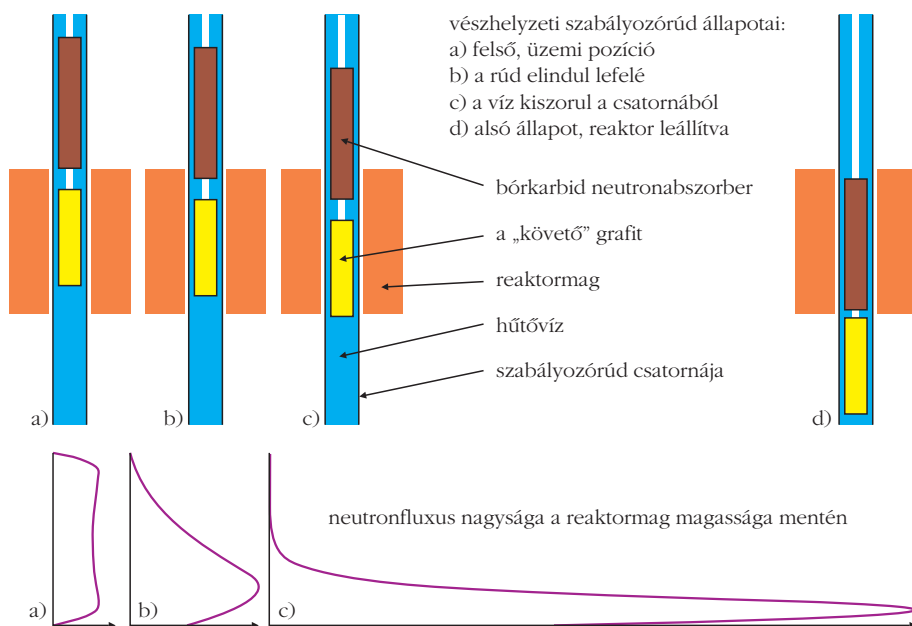
Emelkedik a hőmérséklet. A vészleállító automatika a szabályozórudak beejtésével leállítaná a reaktort, de azt már előbb kikapcsolták.

1:23:21

A szabályozórudakat kézi vezérléssel lefelé moztatják, de lassan. A szabályozórudak alsó része ráadásul grafitból készült és amint az behatol a reaktorba, a sokszorozási tényező emelkedik! Pozitív visszacsatolás.

Nézzük meg részletesebben (4. ábra) a reaktorban alkalmazott szabályozórudak szerkezetét és az egyes részek

4. ábra. A szabályozórudak szerkezete, működése az RBMK reaktorokban [9].



funkcióját! A szabályozórudak nem közvetlenül a grafitba ágyazva, hanem a vízűtésű csatornákban vannak. Felépítésük a paksi követő kazettához hasonlítható. Pakson üzem közben a szabályozórudak kint vannak a zónából (kivétel az alsó 55 cm-es rész) és gyakorlatilag üzemanyagként viselkednek, mert a végükön egy úgynevezett követő kazetta van. Az RBMK reaktor esetében is hasonló volt a terv: üzem közben a szabályozórúd kint van, a helyén sem üres teret, sem vizet, hanem grafitot hagytak. E „követő” grafit rövidebb a zóna magasságánál, fölötte és alatta még 1-1,5 méternyi víz van. Tehát üzem közben a zóna közepén helyezkedik el a 4,5 méteres grafit rész, ami fölött és alatt – még mindig a zónán belül – 1,5 m-nyi vízoszlop, és közvetlenül a zóna fölött kezdődött a rúd bórkarbidos szabályozó, neutronelnyelő része. Tehát, ha a rúd elindul lefelé, akkor az első 1,5 méteren negatív reaktivitást visz a zóna tetejére, viszont pozitív reaktivitást ad az aljára!

11:23:31

A neutronsűrűség lokálisan gyorsan növekszik, azonban a lokális ellenőrző rendszert már előzőleg kikapcsolták, így nem észlelik.

1:23:40

Fél perc alatt hatalmasat növekszik a hőteljesítmény, ezért az operátor a vészleállítás mellett dönt. Az operátor az összes szabályozórudat egyszerre indítja lefelé, és a beesés első 2 másodpercében mindegyik pozitív reaktivitást ad a zóna alsó részébe. Ezt nem tudja kiegyensúlyozni, hogy a reaktor teteje eközben leáll. A körülbelül 7 méter magas zóna alsó fele szinte külön reaktorként viselkedik, és ez az alsó rész megszalad.

1:23:43

A hőteljesítmény 1,4 GW és másodpercenként duplázódik. A reaktor lokálisan kritikussá válik. A hirtelen felmelegedés miatt a szabályozórudak elgörbülnek, így nem esnek le a reaktor aljára.

1:23:45

A hőteljesítmény 3 GW, a reaktor most már globálisan megszalad.

1:23:46

A hűtővíz – amely több neutronot nyel el, mint amennyit moderál – elforr, a neutronsokszorozás tovább fokozódik.

1:23:47

Az urán fűtőelemek a magas hőmérséklet miatt felrepednek, a láncreakció leáll.

1:23:48

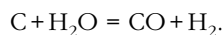
A vízvezetékcsövek is felrepednek.

1:23:49

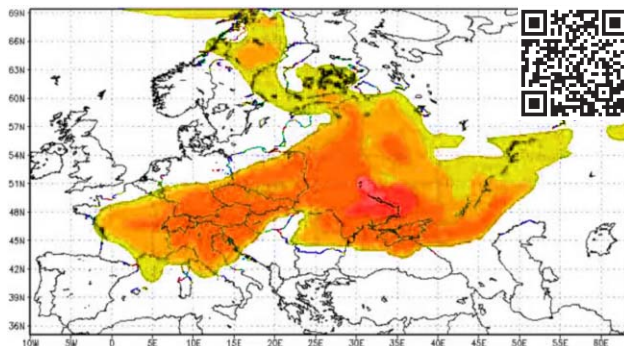
A reaktor belseje kinyílik, a víz forrása termikus robbanást okoz.

1:24

Különböző kémiai reakciók indulnak be. A felszabaduló forró vízgőz reakciója a grafittal:

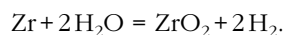


(Ez a reakció Japánban nem lépett fel, hiszen az erőműben könnyűvíz-moderátort alkalmaztak, grafitot nem tartalmazott.)

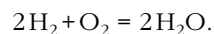


5. ábra. A csernobili radioaktív felhő, szennyeződés 1986. május 1-jén. Az 1986. április 26. és május 10. közötti terjedés megtekinthető a Youtube-on [10], illetve a QR-kód segítségével.

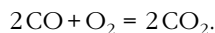
Magas hőmérsékleten a cirkónium is reakcióba lép a vízzel:



Mindkét kémiai reakció során hidrogén keletkezik, ami a külső levegő oxigénjével hevesen egyesül, vagyis *kémiai robbanás* megy végbe:



A keletkező szén-monoxid tovább oxidálódik:



(Ilyen reakció sem volt Japánban.)

A reaktor nem volt biztonsági épületbe zárva, ezért a robbanás következtében beomlik a tetőszerkezet, radioaktív anyagok kerülnek a levegőbe.

Nem történt nukleáris robbanás, de a robbanás és a tűz a radioaktív anyagokat nagy távolságra szórta ki a környezetbe. (A japán reaktor biztonsági épületben volt, a földrengés hatására beestek a szabályozórudak, az aktív zónában leállt a láncreakció. A japán operátorok nem kapcsolták ki a biztonsági berendezéseket.)

1986. április 26. – május 5.

Az épületben keletkező tüzet hamar eloltják, de a felnyílt reaktorban a grafit mind nagyobb részére terjed ki a tűz. A füst a légkörbe juttatja az illékony hasadási termékeket, a szél pedig messze hordja azokat (5. ábra). A baleset következtében főleg a következő hasadási termékek kerülnek ki: számos rövid felezési idejű izotóp, mint ^{132}Te , ^{132}I , ^{131}I , ^{140}Ba , ^{140}La és ^{136}Cs , amelyek azóta már gyakorlatilag lebomlottak. Ma már csak a ^{137}Cs -izotóp mennyisége – felezési ideje csaknem 30 év – jelentős, de ezen izotóp gamma-sugárzásának energiája szerencsére csekély.

1986. május 5.

Elfojtják a tüzet, a reaktort homokkal, ólommal takarják le. A radioaktivitás kiáramlása gyakorlatilag megszűnik.

A baleset után

A baleset hétvégén, hajnalban történt, és nem adtak ki megfelelő tájékoztatást. A balesetet épülettűzként értelmezték. A lakosság, körülbelül 350 ezer ember kitelepítése is későn indult meg.

Csernobil	Fukushima
A reaktor <i>belsejéből</i> induló robbanás szétvetette a reaktort és az épületet is.	Főleg a reaktorépület teteje sérült meg, a reaktorteret nem érintette a robbanás.
A robbanások pillanatában az erőmű <i>üzemelt</i> .	A robbanások pillanatában a reaktorok már napok óta <i>nem üzemeltek</i> , álltak.
A reaktor nem volt vasbeton konténmentben.	A reaktorok vasbeton konténmentben voltak, amely épen maradt, illetve csak mérsékelten sérült.
A robbanás a hasadóanyag körül történt.	A robbanás a hasadóanyagtól távol történt.
10 napig égett grafit, emiatt a szennyezés magasra jutott.	<i>Nem volt grafit a rendszerben.</i>
Ok: emberi hibák sorozata.	Ok: extrém méretű természeti katasztrófa.
A lakosság előtti titkolózás volt a jellemző.	Azonnali tájékoztatás és kitelepítés.

Az első, a reaktorblokkot beborító szarkofágot 4 hónap alatt, igen mostoha körülmények között, 90 ezer ember áldozatos és gyors munkájával húzták fel (6. ábra).

A szarkofág állapota később rohamosan romlott, repedések jelentek meg, ezért 2005-ben elkezdték a ma látható második szarkofág építését, amelyet az elsőre, mintegy ráhúztak.

Következmények

A radioaktív anyagok két nagyobb hullámban jutottak ki a reaktorból.

1. Az első nagyobb kibocsátás közvetlenül a robbanás után volt, ebben a szétszóródott üzemanyag és a nemesgázok domináltak.

2. A második hullámot a baleset utáni 7–10. napokon tapasztalták, amelynek a reaktorbeli grafitfűz magas hőmérséklete volt az oka.

6. ábra. Az első szarkofág.



telephely / blokk	üzembe helyezés éve	teljesítmény (MWe)	tervezett üzemeltetés	
Kursk	1	1976	925	2021
	2	1979	925	2024
	3	1984	925	2029
	4	1986	925	2030
Leningrád	1	1973	925	2019
	2	1975	925	2021
	3	1979	925	2025
	4	1981	925	2026
Smolensk	1	1983	925	2028
	2	1985	925	2030
	3	1990	925	2034

A Leningrád, mint telephelynév ne lepjen meg senkit, csak a várost nevezték át Szentpétervárra.

A légkörbe került radioaktív anyagok vagy egyszerűen lesüllyedve, vagy a lehulló csapadékkal együtt kerültek a földfelszínre. A talaj szennyezettségét általában a ¹³⁷Cs négyzetméterenkénti aktivitásával adják meg, ez az izotóp ugyanis könnyen mérhető és a közel 30 éves felezési ideje miatt még ma is mérhető mennyiségben van jelen a talajban [11, 12]. Ezek alapján a legszennyezettebb területek: az oroszországi Bryansk, a fehérorosz Gomel és Mogilev régiók.

- Közvetlen halálest: az első napokban, az elhárításban részt vett emberek közül 50 fő.

- Várható halálestek becslése: 30 év alatt 4000 fő. Sokan, különböző statisztikai módszerekkel próbálták megbecsülni az áldozatok várható számát. E becslésekben annyi mindenképpen közös, hogy egyik sem számol néhány ezernél több járulékos halálesttel a volt Szovjetunió területén. További közös elem, hogy mindegyik becslés azt is hangoztatja, hogy ezek statisztikailag nem lesznek kimutathatók. Kivétel a pajzsmirigyrák és a leukémia, amely egyértelműen az erőműből kikerült anyagok hatásának tulajdonítható. A pajzsmirigy-megbetegedések száma eddig 4000 fő volt, közülük 9 ember halt meg.

- Hány embert érintett a baleset? 7 millió főt, amelybe beletartoznak a kitelepítettek, a szennyezett területen élők és a likvidátorok.

Az egész eset végső tanulságaként levonható az a következtetés, hogy a kísérlet során *nem következett volna be a baleset, ha az akkor meglévő és üzemképes biztonsági rendszereket nem helyezik üzemem kívül!*

A közvélemény sok esetben összemosza a Csernobilban és a Fukushimában történt baleseteket, ezért a 2. táblázatban összefoglaljuk ezek fő jellemzőit, kiemelve a hasonlóságokat és a különbségeket.

Napjainkban működnek még RBMK reaktorok?

RBMK reaktorblokkok már csak Oroszországban (11) működnek (3. táblázat), a Litvániában (2) és Ukrajnában (3) használtakat fokozatosan leállították [13].

Irodalom

1. Aszódi Attila, Sükösd Csaba, Szatmáry Zoltán: Nukleáris baleset Tokai Murában. *Fizikai Szemle* 49/11 (1999) 402. <http://fizikaiszemle.hu/archivum/fsz9911/aszodi.html>
2. Szatmáry Zoltán: Súlyos üzemzavar a Paksi Atomerőműben. *Fizikai Szemle* 53/8 (2003) 266. <http://fizikaiszemle.hu/archivum/fsz0308/szatmary0308.html>
3. Jarosievitz Beáta: A radioaktivitás alapja; A Radioaktivitás feldolgozása; Radioaktív bomlási sorok tanítása; Láncreakció tanítása; Exponenciális bomlástörvény tanítása. In: Burgetti M., Demjén S., Farkas B., Holczer J., Farkas Cs. Horváth Zs., Jarosievitz B., Lakó F. P., Márton A., Mura-Mészáros Cs., Pethő B., Szabó M., Szabó V., Szalayné Tahy Zs., Takács A., Telek A., Merényi Á. (szerk.): *101 ötlet innovatív tanároknak = 101 ideas for innovative teachers*. Jedlik Oktatási Stúdió, Budapest, 2005, 54–59.
4. Király Márton, Radnóti Katalin (2016): Az atomerőművek működéséről egyszerűen, típusaik és jövőjük – 1–3. rész. *Fizikai Szemle* 66/10–12 (2016) 331–336., 372–378., 403–408.
5. Radnóti Katalin: Csernobil: hat évvel a baleset után. *Természet Világa* 123/7 (1992) 311–315.
6. Szatmáry Zoltán, Aszódi Attila: *Csernobil. Tények, okok, hiedelmek*. Typotex, Budapest, 2005.
7. Aszódi Attila: Csernobil 20 éve. *Fizikai Szemle* 56/4 (2006) 114. <http://fizikaiszemle.hu/archivum/fsz0604/aszodi0604.html>
8. Marx György: *Atommag-közelben*. MOZAIK Oktatási Stúdió, Szeged, 1996.
9. <http://accidont.ru/ENG/rodes.html>
10. <https://www.youtube.com/watch?v=AohOLOlcNgg>
11. Jarosievitz Beáta, Sükösd Csaba: *Radioactivity*. (2004) <http://www.sukjaro.eu/cikkek/radioactivity/home/index.htm>
12. Jarosievitz Beáta, Sükösd Csaba: *Radioactive chains; Bomlási sorok*. (2004) http://www.sukjaro.eu/cikkek/decay_chain/home/index.htm http://www.sukjaro.eu/cikkek/bomlasi_sor/home/index.htm
13. <http://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/appendices/rbmk-reactors.aspx>

VÉLEMÉNYEK

MEGJEGYZÉSEK A FIZIKA SZAKTERÜLETI »SHANGHAI-RANGSORRÓL«

Patkós András
ELTE Fizikai Intézet

A háromnapos szenzációk között rendszeresen visszatér a különféle nemzetközi oktatási rangsorok megjelenése és abban a magyar egyetemek hátracsúszása. Az egyetemi szervezetek belső minőségi heterogenitásának ismeretében az ELTE (vagy más egyetemek) egészének besorolására lehetetlennek tartom tudományosan hiteles kritériumok megalkotását. Így a sajtó fellángolását az Academic Ranking of World Universities (ARWU) lista 2017-es verziójának nyilvánosságra hozatalát követően vállrándítással elintézhetőnek gondoltam.

Azonban a shanghai egyetemhez kapcsolódó rangsor 2010 óta tudományterületi listákat is közzétesz. Kezdetben csak az alapvető reáلتudományokban (matematika, fizika, kémia), továbbá számítástudományban és az üzleti tudományok/közgazdaságtanban készült rangsor, 2017-ben viszont már 52 szakterületen rangsorolták az egyetemeket. A fizikai intézetek tevékenységét a tudományos aktivitás területén általánosan elfogadott mérőszámokkal lehet jellemezni, így egy szakterületi rangsor teljesítménymutatóinak és a súlyozott összegzésükkel kialakuló rangsornak van

értelmezhető üzenete. Éppen ezért több, mint tíz éve követem az ELTE Fizikai Intézet helyének alakulását a nemzetközi egyetemi rangsorokban.

Az ELTE Fizikai intézete 2012-ben került fel a rangsorolt intézetek körébe az ARWU-listán és azóta 2015-ig évente ugyanabban az előkelő csoportban, a 101–150. helyen rangsorolt fizikai intézetek csoportjában szerepelt. Megrökönyödésemre az idei listán két csoporttal hátrébb csúszva a 201–300. helyen rangsorolt intézetek között jelent meg az ELTE logója. Ez annál is fájóbb, mert a prágai Károly Egyetem fizikai intézete, amely kezdetben a 151–200. helyen soroltak csoportjában tűnt fel, ez évben a 76–100. csoport tagja lett. Továbbá, számos régióbeli egyetem fizikai intézete (lásd alább!), amelyek eddig nem is voltak rangsorolva, hirtelen előtűntek, a 151–200. csoportban bukkantak fel. Nem vigasztaló, de említést érdemel, hogy nagy hagyományú partnerintézetünk a Bécsi Tudományegyetem (korábban az 51–75. csoportban is voltak!) fizikusai velünk azonos csoportba csúsztak le.

A változás okára az ARWU-módszertan megváltozása magyarázatot kínál, egyben rávilágít az ELTE Fizikai Intézetben folyó kutatás némely érzékeny pontjára, amelyből talán nemcsak az ELTE Fizikai Intézet tagjai, hanem a hazai fizikus-közvélemény is tanulságokat vonhat le.

ARWU-mutatók fizikában

A rangsor kialakításához használt 5 mutató mindegyike a kutatási eredményesség számszerűsíthető ismérveit használja. Tehát az ARWU-rangsor kizárólag az intéz-



Patkós András (1947) akadémikus az ELTE emeritus egyetemi tanára. Elméleti fizikus, aki a kvantumtérelméletek megoldási módszereit fejleszti, az erős és az elektromágneses anyag fázisátalakulásait, azok kozmológiai szerepét kutatja. Számos tankönyv (társ)-szerzője. Rendszeresen ír tudományos-népszerűsítő cikkeket is.