

# **Reaktorta**

**Nukleáris erõmûvek és környezetünk**

## Tartalomjegyzék:

<b>1. APERITIF, AVAGY KEDVCSINÁLÓ .....</b>	<b>3</b>
<b>2. A MAGHASADÁSTÓL AZ ÚJ GENERÁCIÓS ATOMREAKTOROKIG .....</b>	<b>4</b>
<i>AZ ELSŐ 15 ÉV.....</i>	<i>4</i>
<i>ATOMKAMASZKOR, AVAGY AZ ELSŐ REAKTOROK.....</i>	<i>7</i>
<i>BIZTONSÁGI KONCEPCIÓK.....</i>	<i>8</i>
<b>3. A FŐFOGÁS: AZ EMBERI TÉNYEZŐ .....</b>	<b>9</b>
<b>4. A RECEPT: 33 T DÚSÍTOTT URÁN.....</b>	<b>11</b>
<i>AZ ÜZEMANYAG ÚTJA .....</i>	<i>11</i>
<i>HOGYAN MŰKÖDIK? .....</i>	<i>13</i>
<b>5. REAKTORTA, AVAGY AZ ERŐMŰTÍPUSOK BIZTONSÁGOSSÁGA .....</b>	<b>14</b>
<i>NYOMOTTVIZES REAKTOR (PWR).....</i>	<i>16</i>
<i>VVER 440/230.....</i>	<i>17</i>
<i>VVER 440/213.....</i>	<i>18</i>
<i>VVER 1000.....</i>	<i>19</i>
<i>RBMK REAKTOR .....</i>	<i>20</i>
<i>CANDU REAKTOR.....</i>	<i>21</i>
<i>GÁZHŰTÉSŰ REAKTOR.....</i>	<i>22</i>
<i>SZAPORÍTÓ REAKTOR.....</i>	<i>23</i>
<b>6. HAB A TORTÁN – VALÓSZÍNŰSÉG, KOCKÁZAT, KÖVETKEZMÉNY .....</b>	<b>24</b>
<b>7. UTÓÉTEL .....</b>	<b>26</b>
<b>ÖSSZETEVŐK, AVAGY A SZÖVEGBEN SZEREPLŐ FOGALMAK.....</b>	<b>28</b>
<b>FORRÁSOK .....</b>	<b>30</b>

## 1. Aperitif, avagy kedvcsináló

E kiadvány célja, hogy bemutassa, hogyan lesz a kibányászott uránércből villamos energia, és megismertessen az atomerőmű működésének alapjaival. Mindeközben felhívja a figyelmet azokra a tényezőkre (műszaki és emberi hibák), amelyek oly labilissá teszik az atomerőművek biztonságát. Kiadványunkat ajánljuk mindazoknak, akik szeretnének megismerkedni a témával, akár foglalkozásuk miatt (például tanárok, újságírók), akár mert állást szeretnének foglalni a témában, akár csak egyszerű érdeklődésből.

Ha az atomenergiára gondolunk, ritkán jut eszünkbe a „biztonságos” szó és ez nem véletlen. Bár lassan már ötven éve ígéreti az atomipar az „*inherens*” biztonságú atomerőműveket, mind a mai napig nem épült egy sem, mely bármilyen üzemzavar esetén százszázalékos biztonsággal önmagában elfojtana és meggátolna egy katasztrófát. 1979-ben például épp egy ilyen inherens biztonságúnak tartott reaktorban, az amerikai Three Mile Island-en történt a világ második legsúlyosabb atomerőművi balesete. És nem csak az atomerőmű üzemelése rejt magában veszélyeket, hiszen voltak már balesetek az urán dúsítása során, például 1999-ben a japán Tokai-mura-ban, és a radioaktív hulladék tárolásakor is, például 1957-ben a volt szovjetunióbeli Kistim közelében, hogy csak a legsúlyosabbakat említsük!

Ha a biztonságról beszélünk, nem feltétlenül kell balesetekre gondolnunk. Elég, ha például eszünkbe jut az uránbányászat és a vele együtt járó foglalkozási ártalom: a tüdőrák. Az egykori NDK Wismut vállalatának uránbányászai közül 9000 halt meg ebben a betegségben 1946 és 1990 között. Megválaszolatlan kérdés a radioaktív sugárzás egészségügyi hatása is, mellyel egy korábbi kiadványunk foglalkozik részletesebben („*A bomlás virágai*” – *Radioaktív sugárzások és környezetünk*). A radioaktív hulladékok, elsősorban a nagy aktivitásúak biztonságos elhelyezése a 21. századba is átnyúló megoldatlan probléma. A nukleáris ipar már több mint fél évszázada működik úgy, hogy a döntéshozóknak és az üzemeltetőknek fogalma sincs a visszamaradt hulladékok hosszú távú biztonságos tárolásának mikéntjéről (akit ez a téma érdekel, ajánljuk figyelmébe az Energia Klub *Melyik kert végébe?* – *Radioaktív hulladékok és környezetünk* című kiadványát). És ott van még a nukleáris fegyverkezés – a biztonság ellentéte: fenyegetés.

Térjünk vissza a balesetekhez. Az atomtudósok a balesetek bekövetkezésének valószínűségét a kockázatbecslés módszerével vizsgálják. E számítások szerint egy atomerőművi baleset valószínűsége nagyon kicsi (nagyságrendileg tíz-a-mínusz-sokadikon), vagyis körülbelül ezer és egymillió reaktor-üzemév alatt várható a bekövetkezése. Nem ezt igazolják azonban az atomerőművek működésének kezdete óta bekövetkezett balesetek. Az elmúlt ötven évben minden naptári napra esett legalább egy esemény, üzemzavar vagy baleset az atomiparral szoros összefüggésben (lásd az Energia Klub *Perpetuum Csernobile* című kiadványát).

Az atomerőmű-balesetek oka általában a műszaki problémák és az emberi tévedés együttes előfordulása. Mint már említettük, a műszaki zavarok bekövetkezésének valószínűségét matematikailag – még ha a valóság nem is ezt a számot igazolja – ki lehet számítani. Figyelembe kell venni azonban, hogy a rendszerben szerepet játszik az úgynevezett „emberi tényező”, mely úgyszólván kiszámíthatatlan. Igaz ugyan, hogy az emberi beavatkozás akadályozott már meg súlyos zavarokat, ám a reaktorok történetében a nagyobb balesetek mindegyikénél inkább rontott a helyzeten. Az ember nélkül pedig atomerőművek nem működhetnek: ha másképp nem is, mindig is emberek tervezik a reaktorokat, és az emberek írják az erőművet működtető programokat is.

## **2. A maghasadástól az új generációs atomreaktorokig**

*„A fizika tartalmi kérdése a fizikusok ügye. A fizika hatása: mindnyájunk ügye.” (Dürrenmatt)*

Hogyan is ment végbe az atomenergia fejlődése? Milyen eseményeken keresztül jutottunk el a mai napig? Milyenek voltak a biztonsági körülmények és mit tartottak régen az atomenergiáról? Ezekre a kérdésekre érdemes megtalálni a választ, hogy megértsük, mik vezettek az atomenergia-hasznosítás mai helyzetéhez, mennyi áldozatot kívánt (átvitt értelemben és szó szerint is) ennek a tudományágnak a fejlődése.

*Az első 15 év...*

A történetbe 1939-ben kapcsolódunk be, egy hideg januári napon, amikor Niels Bohr hajón vitte a hírt Amerikába: „Sikerült az atommag felbontása!”. Ez a felfedezés óriási megdöbbenést és izgalmat keltett a fizikusok körében, hiszen a tudomány akkori állása szerint az atom felbonthatatlan volt, maga a szó is azt jelenti: oszthatatlan. A fizikus-kutatók tábora teljesen felbolydult, mindenki részt akart venni az atommag-bontás kísérletében.

Szilárd Leó, aki minden más fizikust megelőzött az ügy gyakorlati jelentőségének felismerésében, azonnal Washingtonba utazott, hogy Teller Edével tárgyaljon. Ő volt az első, aki egy nukleáris láncreakció lehetőségét mérlegelte, és Tellerrel, Wigner Jenővel és Fermivel kísérletsorozatot szervezett. A kísérletsorozat célja az volt, hogy az elméletben lehetséges láncreakcióhoz folyamatos neutronforrást találjanak. A kérdés pontosan így hangzott: ha a neutronok kiválthatnak maghasadást, termelhet-e a hasadás neutronot? A tudósok feszülten dolgoztak a megoldáson, míg végül 1939-ben, egy márciusi estén Szilárd izgatottan hívta fel telefonon Tellert: „Megtaláltam a neutronokat!”

A láncreakció lehetőségének bizonyítása során rengeteg tudományos probléma várt megoldásra. Többek között az, hogy az elméletileg lehetséges láncreakciót kísérletileg is

előállítsák. Fermire, Szilárdra és segítőikre várt, hogy ezt a problémát megoldják. Felmérték a láncreakció bizonyításának gyakorlati jelentőségét (ebben az időszakban dúlt a második világháború) és anyagi vonzatait, és rájöttek: az Egyesült Államok kormányát meg kell győzni arról, hogy életbevágóan fontos a náci németeket megelőzve előállítani az atombombát. Levelet írtak Einsteinnel Roosevelt elnöknek, arra számítva, hogy az ő véleménye majd felkelti az elnök figyelmét. Ennek meg is volt a kellő hatása. Az engedélyt megkapták, a kutatás székhelyeként Chicagót választották, hogy ott együttes erővel lássanak hozzá a nagy feladathoz. A kormány eközben új terveken dolgozott, és végül megszületett a Manhattan-terv, az atombomba-kutatások programja – a kutatás központját ekkor Los Alamosba helyezték át. *Az atomkutatás katonai hasznosítása az adott körülmények között minden egyéb felhasználás lehetőségét zárójelbe tette.*

1942. december 2-án az Enrico Fermi által vezetett csoport létrehozta az első mesterséges, szabályozott láncreakciót a Chicagói Egyetem futballpályájának egyik lelátója alatt (bár ekkor a kutatások már Los Alamosban folytak, a kísérlet színhelye a már rég nem használt chicagói Stagg Field stadionban maradt). A 7,5 m széles és 6 m magas chicagói *atommáglya* építéséhez 350 t grafitot és 40 t uránium-oxidot, illetve fém-urániumot használtak fel. A máglya építése közben egy mondás járta az építők között: „Ha az emberek látnák, hogy *mit* csinálunk több mint másfél millió dollárjukkal, azt *hinnék* örültek vagyunk. Ha tudnák *miért* csináljuk, *biztosak* lennének benne.”

Az atommáglya két órán át árasztotta magából a hőt. A láncreakció „megszaladásának” elkerülése érdekében kétféle biztonsági rendszert dolgoztak ki. A reaktor tetején egy ember állt fejszével a kezében, készen arra, hogy egy felgyorsuló láncreakció esetén elvágja a neutronokat elnyelő kadmium szabályozórudak kötelét, és azok a reaktorba essenek. (A mai biztonsági leállító rendszereket az ő tiszteletére ma is SCRAM-nek hívják, ami az angol Safety Control Reserve Axed Man rövidítése, és szabadon fordítva magyarul annyit tesz: biztonsági fejszés ember.) A második védelmi vonalat egy „öngyilkos brigád” biztosította. Néhány fiatal tudós kadmiumoldatot tartalmazó vödröket tartott a kezében, hogy vészhelyzet esetén a máglyára zúdítsa őket. Szerencsére egyikükre sem volt szükség. A „védelem” ellenére egy baleset minden embert megölt volna Chicago déli részén, és hatalmas mennyiségű radioaktivitás került volna a környezetbe. Bár ennek valószínűségét a kísérletben résztvevő fizikusok minimálisnak tartották, a lehetőségével tisztában voltak. Éppen ezért senkinek nem árulták el az atommáglya beindításának veszélyeit, esetleges súlyos következményeit.

A sikeres kísérlet után Arthur Compton, a kísérlet egyik vezetője felhívta a Nemzeti Védelmi Kutatási Bizottság vezetőjét, James Conantot, és a következőket mondta: „Az olasz hajós partra szállt az Újvilágban.” „Az őslakók hogy fogadták?”– kérdezett vissza Conant. „Nagyon

barátságosan.” – hangzott a válasz. Ezek voltak az előre megbeszélte titkos kódok, melyek jelentést adtak a kísérlet lefolyásáról, annak biztonságosságáról.

Működésének harmadik évében a Manhattan-program végül elérte célját, elkészült az első atomfegyver. A tudósok között számos kétely és nézeteltérés merült fel az atomrobbantás erkölcsi jogosultságát illetően. Ahogy a Manhattan-program a befejezéshez közeledett, úgy törtek fel a tudósokban a társadalmi és politikai aggályok. Különösen nagy dilemmát jelentett az a tény, hogy Németország 1945 májusában aláírta a feltétel nélküli megadásról szóló okmányt, és tulajdonképpen a második világháború ekkor már véget ért. Albert Einstein kérelemmel fordult az Egyesült Államok kormányához, melyben többek között kijelentette: „Az atomenergia véleményem szerint hosszú távon nem szolgálja az emberiség érdekeit, ezért meggyőződésem, hogy a jelenre nézve az semmi több, mint pusztító fenyegetés.” Mindezek ellenére az Egyesült Államok a kísérleteket továbbfolytatta.

1945. július 16-án reggel fél hatkor robbantották fel az első kísérleti atombombát, a Trinity-t, az új-mexikói Alamogordo sivatagban, 330 km-re Los Alamostól. A robbantáson nemcsak az ottani tudósok, de a Manhattan-program egész személyzete is részt vett. 30 km-re a robbanás színhelyétől kísérték figyelemmel az eseményeket. Robert Oppenheimer a Bhagavad Gitából, egy hindu vallásos szövegből vett idézettel kommentálta a robbantást: „Halállá válok magam is, a világ elpusztítójává!”

Nem egész egy hónap múlva, augusztus 6-án az Egyesült Államok ledobta Hirosimára a Little Boy névre keresztelt atombombát, mely több mint 90.000 azonnali és az év végéig további 145.000 áldozatot követelt. Ezt követte augusztus 9-én a Fat Man nevű bomba Nagasakira, ahol 70.000 ember halt meg és ugyanennyi sérült meg a robbanás következtében.

Az amerikai eseményekkel párhuzamosan 1942-ben a Szovjetunió is belekezdett az atomkutatásokba. Flerov hívta fel Sztálin figyelmét arra, hogy mire készülnek az amerikaiak. Sztálin felismerte az ügy súlyát és elindította a szovjet atomprogramot. A program tudományos vezetője Kurcsatov lett. Az első szovjet atomrobbantásokat 1949-ben hajtották végre. Ennek hírére az amerikaiak emelték a tétet az atomfegyver-verseny licitjében: elindították hidrogénbomba-kutatásaikat. Ennek szinte természetes következménye volt a szovjet hidrogénbomba-kutatások megkezdődése. 1952. november 1-jén az Egyesült Államok felrobbantotta első hidrogénbombáját, Mike-ot, a Marshall-szigetekhez tartozó Enewetok korallzátonyon. A bomba pusztító ereje a nagaszakiénak 500-szorosa volt. 1953. augusztus 12. a szovjetek első kísérleti hidrogénbomba-robbantásának napja.

Az 1940-es és az 50-es évek elején létesült atomerőművek mind a hadipar céljait szolgálták, kísérleti-, kutató-, illetve plutónium-termelő reaktorok voltak. A szovjet kísérleti hidrogénbomba felrobbantása után fogalmazódott meg először a gondolat, hogy az atomenergiát más célra is lehetne használni. Ekkor mondta Kurcsatov: „Az atomkard már a kezünkben van. Eljött az ideje,

hogy gondolkozni kezdjünk az atomenergia békés felhasználásáról”. Sztálintól kért engedélyt egy atomreaktor felépítésére, amit meg is kapott. 1954 júliusában az obnyinszki grafitmoderálású és vízhűtésű szovjet atomreaktor a világon elsőként rákapcsolódott a villamos hálózatra. Tizenöt év telt el a maghasadás felfedezése óta, az atomenergiát ennyi éven át kizárólag hadászati célokra használták.

### *Atomkamaszkor, avagy az első reaktorok*

Ezalatt az idő alatt a biztonság nem játszott jelentős szerepet az atomerőművek világában. Ez lehetett az oka 1957-ben két súlyos balesetnek az angliai Windscale-ben (hatalmas tűz ütött ki a gázhűtésű, grafitmoderátoros reaktorban, és három napig tartott, amíg meg tudták fékezni a lángokat) és a szovjet Kistimben (a plutóniumgyártás során keletkezett hulladék berobbant, a robbanás 1000 km<sup>2</sup>-nyi területet szennyezett be radioaktivitással). A 70-es évek végéig a biztonsági intézkedések szinte kizárólag műszaki fejlesztések voltak. Kifejlesztették a konténment szerkezetet (a reaktort körülvevő szigetelő és védő burkolatot) és az üzemzavari hűtőrendszert, és mindkettőnek 100%-os megbízhatóságot tulajdonítottak. Úgy gondolták, hogy a konténment a végső védelmi vonal, és így még egy súlyos baleset következményei is az építmény falain belül maradnak. Ebben az időben vált azonban ismertté a „Kína szindróma” fogalma (az ismert film is ezt a címet viseli). Ezen elmélet szerint a baleset során olvadt fűtőanyag akkora energiát tárol magában, hogy áttörheti a sérthetetlennek hitt konténmentet és a föld mélyén szilárdulna meg. Azért hívják Kína szindrómának, mert ha egy amerikai atomerőműben a hatalmas energiájú olvadt fűtőanyag áttörné a Földet, Kínában bukkanna elő (bár ez sem földrajzilag, sem fizikailag nem helytálló, ezzel a névvel a dolog súlyosságára akartak utalni. Csernobilban a baleset után is elkezdtek a földre olvadt anyag hűtését, homokot, vizet eresztettek rá. *a szerk.*)

Az 1970-es években kidolgozták a valószínűségi kockázatelemzés módszerét, mely Norm Rasmussen, amerikai professzor nevéhez fűződik. Ez a módszer a különböző reaktorbalesetek bekövetkezésének valószínűségét számítja ki. 1975-ben készült el a Rasmussen-jelentés, mely rávilágított arra, hogy az emberi hiba nagyban hozzájárul a kockázathoz. Négy évvel később, 1979-ben az amerikai Three Mile Island-i atomerőműben bekövetkező súlyos baleset megerősítette ezt a következtetést. Itt történt ugyanis, hogy a baleset előtti napon karbantartási munkálatokat végeztek az erőműben. Ezek során néhány szelep a hűtőközeg pótszivattyúinak vezetékein zárva maradt. Másnap valamilyen oknál fogva leálltak a szivattyúk, melyeknek hideg vizet kellett volna juttatniuk a gőzfejlesztőbe (a gőzfejlesztőben adja át a reaktorból vezető, nagy hőmérsékletű vizet szállító primer kör a hőt a viszonylag hidegebb szekunder körnek, lásd 9. ábra). Hideg víz híján a hó a reaktorban maradt, a hőmérséklet növekedni kezdett. A pótszivattyúk ugyan működésbe léptek, de nem tudtak hideg vizet szállítani, mert a

vezetékeken a szelepek zárva voltak az előző napi mulasztás miatt. A hőmérséklet tovább növekedett, a reaktorban gőz kezdett fejlődni. A biztonsági szelep, ami ilyen esetekben kinyílik és kiereszti a gőzt, működésbe is lépett. Amikor azonban a reaktorban lecsökkent a nyomás, nem zárult vissza. Ezt a helyzetet az irányítópulton két kijelzőnek is mutatnia kellett volna. Az egyik nem jelzett, a másikat pedig eltakarta egy papírlap, így a kezelők nem vették észre, és azt hitték, hogy a szelep bezárult. Ennek következményeként a hűtővíz több mint 2/3-a kiszökött a primer körből. A reaktormag annyira felhevült, hogy több mint a fele teljesen megolvadt.

### *Biztonsági koncepciók*

A Three Mile Island-i baleset után az emberi tényező kutatása vált az egyik legfontosabb teendővé a nukleáris biztonság fejlesztése terén. Ez a törekvés az egész világon nyomon követhető volt, de más-más irányban. Kelet és Nyugat különbözőképpen próbálta megoldani a sorozatosan felmerülő problémákat. Keleten az anyagmennyiséggel próbálták ellensúlyozni a műszaki és emberi okokból keletkező zavarokat. E szerint, még ha baleset is történik, a nagy mennyiségű beépített anyag megakadályozza a radioaktív anyagok környezetbe jutását. Rengeteg acélt, vastag betontömböket építettek be az atomerőművekbe. Ezzel szemben Nyugaton a számítógépek kerültek hatalomra. Emberek helyett inkább a sok kis chip végezze el a feladatokat, hiszen azok stresszhelyzetben is ugyanúgy teljesítenek. A nyugati atomerőműveket az informatika világa, a bonyolult visszacsatolások jellemezték és jellemzik a mai napig. Teller Ede elképzelése például egy olyan atomerőmű volt, ami a föld alá épülne, ahová emberek nem tennék be a lábukat és amit kizárólag számítógépek vezérelnek.

A 20. század legnagyobb atomerőművi balesetének egyik fontos okozója is – a reaktor felépítésén kívül, mely természeténél fogva veszélyes – az emberi tényező volt. A csernobili katasztrófa bebizonyította, hogy még rengeteg teendő van a reaktorbiztonság fejlesztésének terén (a balesetről bővebb információ az Energia Klub „*A bomlás virágai*” – *Radioaktív sugárzások és környezetünk* illetve a *Mennyi egy baleset felezési ideje – 15 éve történt a csernobili baleset* című kiadványaiban olvasható). Ez volt az az esemény, amely rávilágított a nemzetközi összefogás fontosságára. Az első együttműködések a szovjet tervezésű atomreaktorok biztonságának fejlesztése érdekében jöttek létre. Később elterjedté váltak az országok közötti csereprogramok, a nemzetközi továbbképzések, és az oktatási központok alapítása.

Az 1990-es évek az „új generációs” reaktorok kutatásának és fejlesztésének jegyében teltek. A cél egy egységes, egyszerűbb tervezésű modell megalkotása volt, melyet könnyebb kezelni, hosszabb ideig képes működni, masszív és kevésbé sérülékeny. Bár már sokféle terv készült el azóta, a megvalósításuk még várat magára, hiszen a megépítés költsége olyan nagy, hogy egyetlen bank sem nyújt kölcsönt a finanszírozására.



### 3. A főfogás: az emberi tényező

*„Tévedni emberi dolog”*

A reaktorbalesetek alapvetően két tényezőre vezethetők vissza: műszaki és emberi okokra. Műszaki ok lehet például a berendezések meghibásodása, elöregedése, rossz minősége. Az emberi tényező igen összetett, néha szinte meghatározhatatlanul befolyásolja az atomerőművi üzemzavarokat, illetve baleseteket. Ha belegondolunk, tulajdonképpen a műszaki hibák is visszavezethetők emberi okokra, hiszen egy üzemzavar vagy a berendezés rossz tervezése, megépítése vagy rossz karbantartása miatt fordul elő, melyek mindegyike emberi feladat.

Az ember nem tévedhetetlen. Elkerülhetetlen, hogy néha egy-egy hiba csússzon akár a számításba, akár a kivitelezésbe. De nem mindegy, hogy a hibának mekkora és milyen természetű következményei vannak. Egy atomerőmű működtetésénél a hibák megengedhetetlenek, hiszen azok katasztrófához is vezethetnek. Viszont az, hogy „megengedhetetlen”, nem jelenti azt, hogy nem is történik meg. Éppen ezért fontos, hogy megértsük: az ember jelenléte, kvázi kontrollja az atomenergia felett nem hogy nem megnyugtató, hanem inkább aggodalomra ad okot.

Az emberi tényező fogalma az 1979-es Three Mile Island-i baleset után kezdett előtérbe kerülni, ahol egy emberi mulasztás miatt elindult a balesethez vezető események sora. Ennek hatására – elsősorban Amerikában – bizottságokat állítottak fel, "Emberi tényező" programokat indítottak és minden ötödik évben konferenciákat szerveztek, hogy jobban megismerjék az emberi tevékenység hatását a reaktorok működésére. E kérdés vizsgálata lényeges volt mind a szakértők számára (fontos érv lett az atomenergiát ellenzők körében), mind a társadalom szempontjából (ekkor kezdett széles körűvé válni, hogy milyen veszélyeket rejt az atomenergia). Az emberi tényezőt most már mindenhol elfogadják, és számításba is veszik, hiszen egy hiba súlyos következményekkel járhat. Lássuk, mi is az emberi hibák oka, mik befolyásolják a teljesítőképességet.

Az emberi tényező figyelembe-vétele már az atomreaktorban elvégzendő feladat vizsgálatánál megkezdődik. A feladat típusa fogja meghatározni, hogy milyen személyzetre van szükség. A személyzet kiválasztásánál nagy gondot kell fordítani az általános tulajdonságokra, mivel azok nagymértékben befolyásolhatják a teljesítőképességet. A tudás és tapasztalat mellett meg kell nézni az egyes személyek képességeit, személyiségét, hozzáállását és nem utolsósorban stressz-kezelő képességét. Hihetetlennek tűnhet, de egyes kutatások kimutatták, hogy még az irányítóterem hőmérséklete is hatással van a teljesítőképességre. Ezenkívül stressz-állapotot befolyásoló tényező lehet a folyamatos készenlét (a tudat, hogy nem hibázhat), a váltóműszak

és az állandó ellenőrzés. A megfelelő személyzet kiválasztása után ugyanis nagyon fontos a rendszeres továbbképzés és tesztelés. Az is fontos, hogy a hirtelen jött stresszhelyzetben milyen gyorsan tud a személyzet reagálni és ez hogy befolyásolja a problémamegoldóképességet. Előfordulhat ugyanis, hogy egyik pillanatban még nyugodtak a körülmények (a személyzet éppen kávézik, beszélget, stb.), a következő pillanatban meg megszólal egy riasztó és a keletkezett üzemzavart el kell hárítani.

Nemcsak az egyes személyek biztonságához való viszonyulása a fontos azonban, hanem a teljes személyzet magatartása is. Ezek együttese határozza meg a biztonsági kultúrát. A kelet-európai országokban a biztonsági kultúra általában alacsony szinten volt, sőt, egyes országokban még ma is rossz a személyzet hozzáállása ezekhez a kérdésekhez. Egy 1994-ben a NAÜ (Nemzetközi Atomenergia Ügynökség) által végzett felmérés alapján a Paksi Atomerőmű hiányosságai között az egyik szereplő éppen a biztonsági kultúra volt. A jelentés szerint az egyik fő probléma a szabályzati útmutatók hiánya, illetve azok figyelmen kívüli hagyása volt, de bírálták azt is, hogy a személyzet nem volt tisztában a biztonság jelentőségével, ami az emberi hibák gyakori előfordulásához vezetett. Ez az állapot a 90-es évek végére javult, de más kelet-európai országban még mindig nem fordítanak kellő gondot a biztonsági kultúra fejlesztésére.

Mint azt korábban említettük, egy-egy műszaki hiba háttérében is állhat emberi tényező. Ha egy berendezés nem a megfelelően van megtervezve, megépítve, vagy esetleg karbantartva, súlyos hibákhoz vezethet. Erre egy példa, ha az irányítópult tervezésénél nem veszik figyelembe az emberi teljesítőképesség határait (több vészjelző is bekapcsol egyszerre, túl messze vannak egymástól a gombok vagy éppen túl kicsik), nem egyértelmű egy kapcsoló jelentése, vagy az egyes kijelzők kódjai nehezen memorizálhatók (a kezelő hirtelen nem tudja, hogy melyik berendezés vészjelzője villog). Másik példa lehet a reaktortartály és a csövek hegesztési pontjainak ellenőrzése. A több száz helyen összehegesztett berendezések vizsgálata nagyon fontos, hiszen a varratokon keresztül, amelyek a leggyengébb pontjai a reaktornak és csöveinek, radioaktív folyadék szivároghat ki a környezetbe. A litvániai Ignalina-1 számú reaktorban például 1993 októberében egy svéd szakértőkből álló független vizsgálócsoport 1400-1600 hegesztési nyomot talált, melyből 230 hibás volt és több mint száz már legalább 15 milliméteres repedéseket is tartalmazott. Ennyi varrat rendszeres vizsgálata és karbantartása meghaladhatja az emberi képességeket, és könnyen balesethez vezethet. A berendezések rossz tervezése vagy megépítése is a műszaki-emberi hibák kategóriájába tartozik. Általában igaz az a tény, hogy ha egy rendszerből kimeneti teljesítményt akarunk nyerni, a rendszer maga gyakorlatilag nem lehet tökéletesen zárt. Így van ez az atomerőműveknél is. Szinte képtelenség teljesen hermetikus reaktort építeni, hiszen vannak

kivezető csövei, amelyek aztán újabb csövekkel érintkeznek, kapcsolatot teremtve a rendszer és a külső környezet között.

Az emberi tényező vizsgálata manapság nagy szerepet játszik az atomerőművek működtetésénél. Kétféle módszert használnak megismeréséhez: a kvalitatív és a kvantitatív módszert. A kvalitatív módszer lényege, hogy bármilyen eseményről, amit emberi hiba okozott – még ha az nem is közvetlenül a reaktorhoz kapcsolódik – jegyzőkönyvet vesznek fel, valamint rögzítik a munkakörülményeket, amiket később elemeznek. A módszer célja, hogy az előforduló emberi hibák adatbázisa egyre bővüljön, és így egyre nagyobb az esélye annak, hogy egy újabb esetenél fel tudják használni a korábbi tapasztalatokat. A módszer hátránya, hogy az atomerőmű dolgozói általában csak a jelentősebb következményekkel járó eseményeket jelentik.

A másik módszer a kvalitatív analízis, mely, mint a neve is mutatja, matematikai számításokon alapul, és adott emberi hiba bekövetkeztének valószínűségét vizsgálja. Ennek alapja a részletes kvalitatív elemzés, valamint a megfelelő valószínűségi törvény alkalmazása. Ez viszonylag egyszerűen hangzik, a probléma azonban az, hogy az emberi reakció általában olyan összetett és annyi tényező befolyásolja, hogy ma még egyszerűen nem létezik olyan modell, amely ezt képes leírni.

Mindezek alapján láthatjuk, hogy az emberi tényező szerepe milyen nehezen megfogható, meghatározható és ami a legfontosabb: nem kiküszöbölhető jelenség. Amíg az ember szerepet játszik az atomerőművek működtetésében (márpedig mindig is fog, hiszen ha mást nem is, legalább a reaktorok működését irányító programokat ő írja), addig hibák is történni fognak.

#### **4. A recept: 33 t dúsított urán...**

*„Az atomerőmű a vízforralás legbonyolultabb módja” (Einstein)*

A fejezet célja az, hogy bemutassa, hogyan jut el az üzemanyag az atomerőműbe és megismertessen az atomreaktorok működésének alapjaival. Erre azért van szükség, hogy megértsük, mik azok a jellegzetességek, melyek az egyes reaktorok biztonságát befolyásolják. Természetesen az egyes reaktortípusok néhány műszaki megoldásban eltérnek egymástól, működési elvük azonban megegyezik.

##### *Az üzemanyag útja*

Az atomerőművekben leggyakrabban használt üzemanyag az urán, melyet ércként bányásznak mélyművelésű vagy külszíni fejtésekben. A világ több országában is termelnek ki uránt, a régióinkban Csehországban és Romániában. Magyarországon a Mecsekben, Kővágószőlősen

volt uránbánya, ahol a kitermelést gazdaságossági megfontolások miatt 1997 folyamán beszüntették.

A kibányászott érc túlnyomó része nem tartalmaz annyi uránt, hogy gazdaságos legyen a feldolgozása, így körülbelül csak az egytizedét szállítják a bányákból a feldolgozóüzemekbe. A visszamaradt kőzetet meddőhányókban tárolják a bánya mellett. Az elszállított érc feldolgozása több lépésben és több helyszínen történik. Mivel az ércnek csak kis hányada (1-2 százaléka) az urán, így azt a kőzetből ki kell nyerni. Az ércet először a bányához közel **megőrlik**, majd különböző kémiai folyamatok útján (például kénsavas kioldás) kivonják belőle az uránt. E folyamatok eredménye az úgynevezett „**sárga pogácsa**”, amelynek általában 60 százaléka urán. A gyártási folyamat rendkívül környezetszennyező, a visszamaradt salak a feldolgozott érc 99 százaléka. Ezt a hulladékot általában visszaviszik a bánya területére és mindenféle műszaki védelem nélkül tárolják.

A sárga pogácsa még nem használható üzemanyagként, a benne lévő uránt először más kémiai formába kell hozni. Ezt a folyamatot hívják **konverzió**nak, melynek során a sárga pogácsa uránvegyületeit urán-hexafluoriddá ( $UF_6$ ) vagy urán-dioxiddá ( $UO_2$ ) alakítják át.

A konverzió utáni lépés a **dúsítás**. Az átalakított urán körülbelül 70-90 százalékban kétféle izotópból áll: a 235-ös illetve 238-as tömegszámú uránból. Az atomreaktorokban üzemanyagként a  $^{235}U$  izotópra van szükség, mert ez képes legkönnyebben a maghasadásra. Mivel a sárga pogácsa csak 0,7 %  $^{235}U$  izotópot tartalmaz, fel kell dúsítani, hozzávetőleg 4-5 százalékra, hogy hatékonyabb legyen az energiatermelés az atomerőművekben. Ezt a műveletet már egy másik üzemben, a bányától távolabb végzik. Dúsítóüzemek a világ kilenc országában működnek: Nagy-Britanniában, Franciaországban, Németországban, Hollandiában, Oroszországban, az Egyesült Államokban, Pakisztánban, Kínában és Japánban. A japán urándúsításhoz kapcsolódik egy súlyos baleset, 1999-ben Tokai-murában. Itt történt, hogy a két munkás a megengedett maximum 2,4 kg urán helyett 16,6 kg uránt öntött össze különböző oldatokkal. Ez a mennyiség meghaladta a kritikus tömeget, aminek következtében beindult a láncreakció. A két férfi a megengedett sugárdózis 17.000-szeresét kapta, amibe néhány hét alatt bele is haltak.

A feldolgozás végső szakasza a **fűtőelem-gyártás**. A dúsított uránt kis kapszulákba, ezeket pedig – általában cirkónium ötvözetből készült – fémcsövekbe zárják. Ezek alkotják a fűtőelemeket. Minden reaktortípushoz más-más fűtőelem kell, melyek nehezen felcserélhetők egymással. Így az egyes erőművek nagy mértékben függhetnek a fűtőelemgyártó országoktól illetve cégektől, tekintve, hogy mindössze 14 üzem működik a világon és látja el fűtőelemmel a világ 430 reaktorát. Egy Európai Uniói kívánság szerint a Paksi Atomerőműnek például diverzifikálnia kell a fűtőanyagát, Oroszország mellett nyugatról is kell hozatnia, amelyek viszont igen drágák. Magyarország a függőséget részben úgy oldja meg, hogy két évre elegendő

fűtőelemeket tárol az atomerőmű területén, ami elegendő idő lehet ahhoz, hogy egy esetleges válságot megoldjon.

### *Hogyan működik?*

Az atomerőmű működésének lényege, hogy forró vizet állítson elő, melynek gőzéből – ami megforgatja a turbinákat – mechanikai energia nyerhető. A mechanikai energia generátorok segítségével villamos energiává alakítható. Ugyanezen elvet használja áram-termelésre a hőerőmű is, a különbség a víz felforralásának módjában van. Míg egy szén-erőműben a szén elégetésével nyernek hőenergiát – ami felforralja a vizet –, addig az atomerőműben egy bonyolult folyamat, a maghasadás szolgál erre a célra.

A maghasadás az a jelenség, amikor egy atom spontán, vagy némi külső behatásra két kisebb atommagra esik szét. E folyamat során hő formájában energia termelődik. Az urán 235-ös izotópja is képes a maghasadásra, neutronbombázás hatására. Egy-egy atommag széthasadásakor két kisebb atommag és két vagy három neutron keletkezik. A keletkező neutronok újabb uránatomok széthasítására képesek, mely során további neutronok keletkeznek. Így a folyamat önfenntartó. Az ilyen önfenntartó folyamatokat hívjuk láncreakciónak. Az atomreaktorokban szabályozott láncreakció zajlik: a maghasadás során keletkező neutronok egy részét elnyeletik, hogy csak annyi maradjon, amennyivel a maghasadás folyamata egyensúlyban marad, és a láncreakció nem „szalad meg”.

Az atomerőműben a víz felforralásához szükséges hő a reaktorban termelődik. A reaktorban található a fűtőelemek, melyekben az urán 235-ös izotópjának maghasadása, illetve a láncreakció során folyamatosan energia szabadul fel hő formájában. Ahhoz, hogy a reaktor ne melegedjen fel túlságosan, és a keletkezett hőt hasznosítani lehessen, a hőt a hűtőközeg segítségével el kell vezetni. A hűtőközeg lehet könnyű- vagy nehézvíz, gáz (például CO<sub>2</sub>) vagy folyékony fém. A hűtőközeget a reaktoron keresztül keringtetik. A reaktorból eltávozó hűtőközeg egy gőzfejlesztőbe kerül, majd a turbinákon átáramló gőzt egy kondenzátorban lecsapatják és visszavezetik a reaktorba.

A hőelvezetés és gőzfejlesztés megvalósulhat kétkörös rendszerben is. Az elsődleges vagy primer körben csak a hűtőközeget keringtetik. A primer és szekunder kör csövei a reaktoron kívül érintkeznek, a kettő közötti határfelület nem más, mint a gőzfejlesztő csövei.

Az urán maghasadásakor a keletkező neutronok túl gyorsak ahhoz, hogy képesek legyenek újabb atomokat hasítani. Ahhoz, hogy ez lehetővé váljon, a neutronokat le kell lassítani. A legmegfelelőbb lassító a neutronhoz hasonló méretű atom, például a hidrogén. A legtöbb esetben ezért használnak vizet lassító közegként, vagy más néven moderátorként. Egy másik moderátor a grafit.

Ahhoz, hogy a reaktorban lejátszódó láncreakció ne szabaduljon el, szabályozni kell. Ezt úgy érik el, hogy a maghasadás során keletkező neutronok egy részét elnyeletik, ezáltal a kevesebb neutron kevesebb uránatomot fog hasítani. Az uránatomok maghasadásának száma határozza meg a reaktor teljesítményét: minél több maghasadás játszódik le, annál több hő termelődik, és annál nagyobb lesz a teljesítmény. A teljesítményt úgynevezett szabályozórudakkal vezérlik. Ha a teljesítményt növelni akarják, akkor a rudakat kijebb húzzák, ha csökkenteni, akkor visszaengedik. A szabályozórudak anyaga lehet kadmiumból, bórból és hafniumból.

A fűtőelem 3-4 év alatt „kiég”: hasadóanyag-tartalma lecsökken, és felhalmozódnak benne a különböző magreakciók során keletkező hasadási termékek. Ilyenkor ki kell azokat cserélni. Nem az összes fűtőelemet cserélik ki azonban egyszerre, hanem csak körülbelül egyharmadát, így a reaktort évente le kell állítani. A kiégett fűtőelemek vagy hulladékká válnak, vagy újrafeldolgozó (reprocesszáló) üzembe kerülnek. Ez utóbbi egy igen bonyolult és drága művelet, minek következtében igen kevés (körülbelül tíz) reprocesszáló üzem működik a világon. A kiégett fűtőelemek nagyobb részéből hulladék válik. A kiégett fűtőelemek újrafeldolgozása az egyik legtöbb radioaktív kibocsátással járó művelet. Európában három üzem működik – Sellafield (Nagy-Britannia), Le Hague (Franciaország) és Cseljabinszk (Oroszország) –, melynek mindegyike a nagy radioaktív szennyezéseiről elhíresült. Sellafield rendszeresen az Ír-tengerbe ereszti folyékony hulladékát, melynek radioaktív izotóp tartalma az elmúlt néhány évben többszörösére emelkedett. Le Hague az Atlanti-óceánt szennyezi, legalább annyira, mint Sellafield az Ír-tengert. Cseljabinszk pedig az egyik legjobban szennyezett régió, sok éven át bocsátott nagyaktivitású radioaktív hulladékot egy, az emberek által is használt közeli folyóba.

## **5. Reaktorta, avagy az erőműtípusok biztonságossága**

*„Ami elromolhat, az el is romlik” (Murphy)*

A különböző reaktortípusokat sokféle szempont alapján lehet osztályozni, nincs egy egységesen elfogadott koncepció. Alapvetően megkülönböztetünk termikus (vagy lassú neutronos), illetve szaporító (vagy gyorsneutronos) reaktorokat. A termikus reaktorokat osztályozhatjuk a hűtőközeg alapján (lehetnek könnyűvízes, nehézvízes vagy gázhűtésű reaktorok), a reaktortartályban uralkodó nyomás alapján (nyomottvízes, illetve forralóvízes reaktorok), valamint a moderátor alapján (víz- vagy grafitmoderálású reaktorok). A reaktorok azonban – típusaiktól függetlenül – egyedi tervezésűek, nincs két, minden részleteiben megegyező atomerőmű a világon.

Az atomreaktorok biztonsági rendszerei, mint minden más a világon, fejlődnek. Egyre több a tapasztalat ezen a téren (amelyért sajnos nagy árat kell fizetni, hiszen sokszor balesetek árán szerezték meg azokat). Azt viszont nagyon fontos megértenünk, hogy bármilyen fejlett is egy atomreaktor vagy egy biztonsági rendszer, 100 százalékos garanciát nem nyújthat.

A legfontosabb, amit egy biztonsági rendszernek tudnia kell, a radioaktivitás környezetbe való kikerülésének megakadályozása. Ezt két védelmi vonal biztosíthatja. Először is, a radioaktív anyag (elsősorban a hűtőközeg) nem kerülhet ki a reaktortartályból. A tartály minősége az anyagától és a hegesztések minőségétől függ. A folyamatos neutronbombázás miatt, ami a reaktortartály falát éri, az anyag egyre jobban elridegedik, könnyen keletkeznek rajta repedések, törések. A hegesztési varratok pedig a tartály leggyengébb pontjai, ha a hegesztést nem a legkörülményesebb módon végezték, az apró repedések mentén lassanként kiszivároghat a radioaktív folyadék.

A második védelmi vonal a konténment. Ez egy hozzávetőleg gömb alakú betontömb, ami körbeveszi a reaktortartályt, így biztosítva védelmet a radioaktivitás környezetbe kerülése ellen. Amerikában nem engedtek konténment nélküli atomerőműveket építeni, sajnos a régióinkban üzemelő szovjet tervezésű reaktorok nagy része nem rendelkezik vele. Ehelyett egy úgynevezett lokalizációs torony vagy más néven kondenzációs nyomáscsökkentő szolgál erre a célra. A lokalizációs toronyban a nyomást alacsony értéken tartják, így ha baleset következtében kiszabadul a radioaktív gőz, a hermetikus tér levegőjével együtt a kisnyomású torony felé áramlik. Itt vízzel teli tálcákon lekondenzálódik, ezzel csökkentve a nyomást, majd egy úgynevezett sprinkler rendszer bóros vizet porlaszt a hermetikus térbe. A bóros víz azért szükséges, mert a víz idővel be tud jutni a reaktorba, ahol a bór neutronelnyelő képessége segít elkerülni a láncreakció újraindulását. A konténment és a lokalizációs torony közötti alapvető különbség az, hogy míg az előbbi bizonyos mértékig védelmet biztosít a külső hatások ellen, az utóbbi nem szolgál ilyen célokat. Az is kérdéses, hogy egy ilyen nyomáscsökkentő kondenzátor mennyire képes felvenni azt a hirtelen keletkező nyomást, ami egy reaktortartály megrepedésekor keletkezne. A konténment már csak a szferikus kialakítása miatt is erősebb szerkezetre vall, hívják más néven teljes nyomású konténmentnek, míg a lokalizációs tornyot nem teljes nyomású konténmentnek.

Ha ez a két védelmi vonal – a hegesztések és a konténment – létezik és jó minőségű, akkor mondhatjuk, hogy egy közepes méretű balesetnél meg tudják akadályozni a radioaktivitás környezetbe kerülését.

Alábbiakban az egyes reaktortípusok hiányosságaira próbálunk rávilágítani biztonsági szempontból. Fontos megjegyezni, hogy a hiányosságok egy része utólag sem pótolható (például konténment), vagy javítható (ilyen például a reaktortartály mérete), tehát nagy gondot jelentenek a biztonság szempontjából. Amelyik hibák utólag javíthatóak, azok pedig rendszerint

igen költségesek, és további hibákat okozhatnak (például, ha a primer köri hűtő csővezetékek túl vékonyak, könnyen eltörhetnek, ha viszont kicserélik őket vastagra, akkor egy esetleges törés esetén túl gyorsan veszítené el a hűtővizet, ami a reaktor olvadásához vezethet). Köztudomású, hogy régiókban az orosz típusú reaktorok az elterjedtebbek, melyek biztonságtechnikai felszerelése általában elavult – bár találunk kanadai gyártmányút is (Románia), vagy amerikai (Szlovénia). Éppen ezért elsősorban ezeknek a típusoknak a felépítésével és biztonsági színvonalával foglalkozik ez a fejezet, de szó lesz a nyugati típusú atomreaktorokról is.

### *Nyomottvizes reaktor (PWR)*

Ezekben a reaktorokban mind a hűtőközeg, mind a moderátor könnyű víz, a fűtőanyag pedig általában kis mértékben (3-4 százalékban) dúsított uránium, ritkábban urán-plutónium-oxid (MOx) keverék. A fűtőelemek burkolata cirkónium ötvözetből készül. A nyomottvizes típus nevét a magas primer körű nyomásról (130-150 bar) kapta. A primer kör egy zárt hűtő- és hőelvezető kör a reaktormagban, ahol a vizet nagy nyomáson tartják, így az még a maghasadásból származó magas hőmérsékleten (300-330 °C) sem forr fel. Az állandó nyomást az úgynevezett térfogatkompenzátor biztosítja. A primer körű víz a gőzfejlesztőbe kerül, ahol átadja hőjét a szekunder kör vizének, s az így lehűlve jut vissza a reaktorba. A gőzfejlesztő csövei, amelyek meglehetősen vékonyak, választják el határfelületként a primer és szekunder kört. A gőzfejlesztőben jóval kisebb nyomás uralkodik mint a primer körben, így ott a magas hőmérsékletű víz felforr, és gőz keletkezik. Ez a gőz hajtja meg a turbinákat, amelyek a generátorhoz kapcsolódnak és áramot fejlesztenek. A primer kört általában számos alegységre tagolják, ellátva őket megfelelő számú gőzfejlesztővel és szivattyúval.

A régióban leggyakoribb nyomottvizes reaktortípus az orosz tervezésű VVER. Ez vízhűtéses, vízmoderátoros reaktor. Ennek első generációs modellje a VVER 440/230, későbbi a VVER 440/213, legújabb pedig a VVER 1000 modell. Ilyen reaktorok üzemelnek Bulgáriában, Csehországban, Oroszországban, Örményországban, Szlovákiában, Ukrajnában és Magyarországon.

### Biztonsági tényezők:

Az összes VVER reaktor a 60-as és 70-es években kezdett el épülni, amikor a biztonsági kultúra még nem volt olyan fejlett szintű. Az anyag- és varratminőség nemhogy típusonként, de reaktoronként is változik, így nehéz általánosítani, de sajnos sok reaktorról elmondható, hogy mind a biztonsági megoldásokat, mind a technikai konstrukciót és az alapanyagokat tekintve rossz minőségűek. Az egyéb biztonsági tényezők típusonként eltérnek, így ezeket külön foglaljuk össze.



Külön említést érdemelnek az úgynevezett hibrid reaktorok, amelyek szovjet tervezésűek ugyan, de a biztonsági berendezéseik nyugati típusúak. Ez bár pozitívan hangzik, mégsem annyira az. Mivel a nyugati biztonsági rendszerek drágák, így előfordul, hogy pénzügyi megfontolásból késik a telepítésük, esetleg el is marad. A másik gond a hibrid reaktorokkal, hogy a nyugati technológia nem minden esetben kompatibilis a szovjettel, és gyakran jelentkeznek technikai problémák. A régióban a mochovcei VVER-213-as, és a temelini VVER-1000-es reaktorok hibridek.

### *VVER 440/230*

Egy Európai Unió kívánság szerint a csatlakozni kívánó közép- és kelet-európai országokban a VVER-230-as típusú atomreaktorokat le kell állítani, mert mind a NAÜ, mind a DoE szerint ez a típus az egyik legveszélyesebb. A volt NDK területén lévő greifswaldi atomerőművet, amelynek két reaktora szintén VVER-230-as típusú, a németországi egyesülés után biztonsági megfontolásokból leállították. A régióban még üzemelő ilyen típusú reaktorok: Kozloduj (Bulgária), Kola (Oroszország), Metsamor (Örményország), Bohunice (Szlovákia).

A típus egyik legsúlyosabb, és utólag sem pótolható hiányossága, hogy a reaktornak nincs konténmentje, amely balesetek esetén megakadályozná a nagy mennyiségű radioaktív anyag kijutását, és amely a külső hatásoktól védené a reaktort. Az örményországi Metsamor erőművet például évekre leállították, mert erősen földrengés-veszélyes területen üzemel, és a konténment hiányában nincs semmi, ami enyhíteni tudná az esetleges földrengéskor keletkező károkat. Az oroszországi Kola-félszigeten két VVER-230-as reaktor üzemel. Azon kívül, hogy egyáltalán nincs konténmentjük, annyira rossz a konstrukciójuk, hogy a madarak akadálytalanul repülhetnek ki-be a reaktorépületbe.

A 230-asok közül van amelyik reaktor nem rendelkezik üzemzavari hűtőrendszerrel, ahol pedig van, annak kapacitását egykoron nem a legnagyobb átmérőjű cső törése esetére méretezték, hanem közepes törésre. Ha a legvastagabb cső eltörne, a hűtőközeg folyamatosan elszivárogná, amely nyomáscsökkenést okozhat. Ennek következtében a maradék hűtőfolyadék a nagy hőmérséklet de kisebb nyomás miatt felforr és gőzzé válik, ami reaktormag-olvadáshoz vezet. Hasonló eset történt Kozlodujban 1999-ben, ahol eltört a fő tápvíz-szivattyú, ami a hűtővizet pumpálja a reaktorba. Mivel ott nincs üzemzavari hűtőrendszer, az nem is léphetett működésbe, a hűtővíz folyamatosan elfolyt. Akkor megakadályozták a katasztrófát, de ha ez nem sikerült volna, semmi nem védte volna meg a környezetet a kijutó radioaktivitástól, hiszen a kozloduji reaktoroknak sincs konténmentjük. Súlyosbíthatja a körülményeket az az eset, amikor gőz keletkezik, és az reakcióba lép a fűtőanyagot tartalmazó cirkónium-ötvözetrel.

Ennek hatására hidrogén keletkezik, mely a levegő oxigénjével vegyülve durranógázt alkot, és könnyen felrobbanhat.

A modellre jellemző, hogy a reaktortartály aktív zónájának magasságában lévő hegesztési varratok a nagy réztartalom miatt fokozottan elridegednek a neutron-besugárzás hatására. Mint már korábban említettük, a hegesztési varratok amúgy is a legsérülékenyebb részei a reaktortartálynak, ám a réztartalom miatt (ami kevésbé ellenálló a neutronsugárzással szemben mint az acél) ez a veszély még nagyobb.

### *VVER 440/213*

A régióban üzemelő ilyen típusú reaktorok: Dukovany (Csehország), Kola (Oroszország), Mochovce (Szlovákia), Bohunice (Szlovákia), Paks.

Még ennél a második generációs modellnél sincs konténment, ezt a típust egy kondenzációs nyomáscsökkentő rendszerrel felszerelt hermetikus épület veszi körül. Többször érte kritika ezt a konstrukciót, hiszen a külső hatások ellen nem nyújt védelmet. Az 1994-ben készült, a Paksi Atomerőmű biztonsági elemzését tartalmazó úgynevezett AGNES projekt is hangsúlyozza, hogy az ilyen „konténment” lényegesen különbözik a nyugati típusú, teljes nyomású konténmentektől.

A szlovákiai Mochovcét is igen erős kritikák érték. A DoE által készített tanulmány szerint a reaktortartály rossz minőségű, a leállító és baleset-lokalizáló rendszerek megbízhatatlanok, és egy súlyos üzemzavar esetén a biztonsági rendszerek valószínűleg nem jól működnének. Kulcsfontosságú hibája ennek a tervezésnek az, hogy az üzemzavari hűtőrendszer kapacitása – ami ennél a típusnál már megtalálható, ám még mindig kevésbé megbízható, mint a jelenlegi nyugati típusoké – „veszélyesen alulméretezett”. Hibrid reaktor lévén, nehéz a nyugati biztonságtechnikát összeegyeztetni a keleti konstrukcióval, ami a nehézségek egyik okául szolgál.

A cseh Dukovany erőmű már több vészleállást is megért (legalább egyet évente és reaktoronként). Legtöbbször a berendezések jelentős öregedése volt ennek az oka, ami azért érdekes, mert a Dukovany erőmű a tervezett élettartamának még csak a felét élte le. Már a kezdetektől gondok voltak a reaktorokkal: a szabályzórudak motorjai többször is hibásan működtek, egyes kábelek rossz helyre voltak bekötve, illetve az üzemzavari hűtőrendszer is csődöt mondott már. Az erőmű egyre növekvő trícium-tartalmú folyékony és egyéb hulladékot bocsát a közeli folyóba.

## VVER 1000

A régióban üzemelő ilyen típusú reaktorok: Kozloduj (Bulgária), Temelin (Csehország), Tver (Oroszország), Rovno (Ukrajna), Zaporozsje (Ukrajna), Balokovo (Oroszország), Kmelnyitszk (Ukrajna)

Bár a VVER 1000/320 reaktoroknak van egyfajta konténmentje, ez sokkal sérülékenyebb, mint a nyugati típusoké, s csakúgy mint a 213-as modellek lokalizációs tornya, nem véd a külső hatások ellen.

A reaktortartály átmérője újabb hátrányt jelent: kis mérete következtében nem megfelelő a víz áramlása a neutronkibocsátó fűtőanyag és a tartály fala között. Ez a reaktorblokk anyagának gyorsabb öregedését okozza.

Ez a típus komoly problémát mutat a szabályozórudak tekintetében is, mert a reaktorokban nem lehet biztonságosan betolni azokat, és a fűtőanyag deformálódhat. Ez a probléma azért fontos, mert ha ezek a rudak nem nyomulnak be időben a zónába, akkor annak végzetes következményei lehetnek.

A VVER-1000-es típusú erőművek tervezési hibája, hogy a reaktorok nincsenek külön huzalozva, melyek súlyos tűzvédelmi problémákhoz vezethetnek (erre a hibára egy amerikai atomerőmű balesete révén jöttek rá, amikor két reaktort tett működésképtelenné egy csatlakozódobozban kiütött tűz). A temelini erőmű hibrid, azaz biztonsági szempontból a nyugati technológiákat és követelményeket kívánja alkalmazni. A kábelrendszerét éppen ezért át kellett telepíteni, ami az építés legköltségesebb és legbonyolultabb problémájává vált. A lecserélendő kábelek becsült mennyisége az elmúlt években folyamatosan növekedett, és ily módon előfordult olyan helyzet, hogy a beépítendő kábelek fizikailag egyszerűen nem fértek be a nekik szánt helyre.

A temelini erőművel más gondok is adódtak. 2000 októbere óta számos szivárgás és vészleállítás történt a reaktorban, 2001-ben pedig a szekunder kör turbinája okozott súlyos problémát. Már 30-45 százalékos teljesítménynél a turbinák erősen rezonáltak, együttrezegettek, számos cső megrepedezett, köztük olajcsövek is, melyekből a kiszivárgó olaj meggyulladt. Ennek ellenére – kisebb javítások után – a reaktort újra üzembe helyezték. Az újraindítás után két nappal a turbinák ismét annyira berezonáltak, hogy az összes előző javítást tönkretették. A reaktorban dolgozók jelentése szerint a rezgés mértéke akkora volt, hogy meghaladta a rezgést mérő műszer mérési tartományának felső határát. A figyelmeztetések ellenére a turbinát néhány nap múlva újra beindították. Az ekkor történt esemény után a turbina készítői is bevallották végre: a turbina súlyosan megsérült, tengelye meghajlott, nem használható tovább.

### *RBMK reaktor*

A szovjet tervezésű RBMK a forralóvízes reaktorok egyik típusa. A forralóvízes reaktorok hűtőközege és moderátora a könnyűvíz, fűtőanyaga pedig kismértékben dúsított uránium. A nyomottvízes reaktorokhoz képest a legfőbb különbség az, hogy ennél a típusnál a reaktormagban lévő hűtővíz – mivel nincs nagy nyomáson tartva – forrásban van, és az így módon keletkezett gőzt gőzfejlesztők közbeiktatása nélkül egyenesen a turbinákhoz vezetik. Az RBMK reaktor annyiban más, mint egy általános forralóvízes reaktor, hogy nem könnyűvíz, hanem grafit a moderátora. A hűtése – a többi forralóvízes reaktorhoz hasonlóan – könnyűvízzel történik és fűtőanyagként kismértékben dúsított urániumot használnak. Az RBMK reaktor „nyomócsöves”, ami azt jelenti, hogy nem az egész reaktortartály áll nyomás alatt, hanem csak az aktív zónában elhelyezkedő, fűtőelemeket és a közöttük áramló hűtőközeget magukba foglaló csövek. Ez a megoldás lehetővé teszi, hogy a hasadóanyagot az atomerőmű működése közben cseréljék ki. A „forralóvízes” kifejezés arra utal, hogy a turbinákat meghajtó gőz nem egy gőzfejlesztőben keletkezik, hanem magában a reaktormagban forr fel. Ez egy víz-gőz fázisú keveréket eredményez, amelyet a cseppléválasztóban (gőzszeperatorban) különítenek el. Míg az egyik körön a száraz gőz táplálja a turbinákat, addig a víz a gőzkondenzátorból származó csapadékkal keveredve eljut a fő keringető szivattyúkhöz. Az RBMK reaktorok csak a volt Szovjetunió területén találhatóak meg: Ignalina (Litvánia), Szosznovij Bor (Oroszország), Kurszk (Oroszország), Szmolenszk (Oroszország).

### Biztonsági tényezők:

Az RBMK reaktorok legfontosabb sajátossága a pozitív üregegyűthetőség. Ez azt jelenti, hogy ha a reaktor a hűtőfolyadék elszökése vagy túlmelegedés következtében vizet veszít, akkor teljesítménye növekszik. Ennek oka, hogy ennél a típusnál a víz-gőz keverék neutronelnyelő hatású. Ha a gőzfázis aránya növekszik, kevesebb neutronot nyel el, tehát több képes az uránium atomok hasítására. Az intenzívebb maghasadás nagyobb teljesítményt eredményez, ami gyorsabban forralja a vizet, melynek hatására egyre növekszik a gőzfázis. Ez a pozitív visszacsatolás olyan gyors, exponenciálisan növekvő öngerjesztő folyamat, hogy szabályozhatatlanná válhat, és súlyos balesethez vezethet. Mint ahogy vezetett is, 1986-ban Csernobilban. Akkor egy kísérletet végeztek, hogy megtudják: áramkimaradás esetén is biztosítva marad-e a reaktor hűtése. Folyamatosan csökkentették a reaktor teljesítményét, kikapcsolták a vészleállító rendszert és az egyik turbinát is leállították. A maradék turbinák azonban nem vették fel azt a mennyiségű gőzt, amennyi keletkezett, így egyre növekedett a hűtővíz hőmérséklete és gőztartalma. A pozitív üregegyűthetőség miatt a teljesítmény és a gőzfázis egyre növekedett, ami végül gőzrobbanáshoz vezetett.

A balesethez hozzájárult az is, hogy az RBMK vészleállító rendszere nagyon lassú. A szabályzórudak bejuttatása 20 másodpercbe telik, ami elegendő ahhoz, hogy a láncreakció felgyorsuljon.

A típus hátránya az is, hogy az aktív zóna nagy mérete és a sok csatorna rendkívül megnehezíti azok vizsgálatát és karbantartását. A litvániai Ignalina-1 reaktorban is ez lehetett az oka annak, hogy egy svéd szakértőkből álló csoport 230 hibás hegesztési nyomot talált, és több mint százon már legalább 15 milliméteres repedés mutatkozott. A primer hűtőkört az üzemzavari hűtőrendszerrel összekötő csövek egyike szivárgott is, percenként másfél liter folyadékot veszített. A repedt csöveket – a Nyugaton ilyenkor megszokott eljárással ellentétben – nem kicserélték, hanem a repedéseket újrahegesztették. Az oroszországi Szosznovij Bor erőmű is nemrégiben (2001. októberében) leállásra kényszerült. Az egyik cső egy szelepe eltört, és mivel a reaktortartályban csövek és szelepek százai találhatóak, rengeteg időbe telt, amíg a hibát megtalálták. (A sors furcsa fintora, hogy miközben a munkások a hibát keresték, több másik szelepet is eltörték.)

A VVER-230 és VVER-213-as reaktorokhoz hasonlóan az RBMK reaktoroknak sincs konténmentjük, csak egy biztonsági védőburkolatuk, amit nem arra terveztek, hogy ellenálljon az összes lehetséges baleseti nyomásnak. Ezért történhetett az, hogy a csernobili baleset során akkora mennyiségű radioaktivitás került ki a környezetbe.

További negatívum, hogy a reaktormagban elhelyezett igen nagy mennyiségű grafit miatt (hozzávetőleg 1700 t) fennáll annak a veszélye, hogy bizonyos balesetek során rendkívül intenzív tűz alakuljon ki. A grafit ezenkívül magas hőmérsékleten hevesen reagál a vízzel hidrogént fejlesztve, ami robbanáshoz vezethet. Ez is része volt a csernobili balesetnek.

### *CANDU reaktor*

A CANDU reaktort Kanadában fejlesztették ki, a régióban Romániában (Csernavoda) üzemel ilyen típus. Nehésvízet (deutérium-oxid,  $D_2O$ ) használnak moderátorként és hűtőközegként, fűtőanyaga pedig természetes (nem dúsított) urán. Hasonlóan az RBMK reaktorokhoz a CANDU is nyomócsöves tervezésű, így a hasadóanyag a reaktor működése közben újratölthető. A nyomás alatt tartott csövekben helyezkednek el a fűtőanyag rudak, illetve az ezeket körülvevő nehésvíz hűtőközeg. A csöveken kívüli teret atmoszferikus nyomáson tartott nehésvíz moderátor tölti ki. A nyomócsövekben lévő nehésvíz a nyomás miatt nem forr fel, hanem a nyomottvízes reaktorokhoz hasonlóan a gőzfejlesztőbe kerül, ahol felforralja a szekunder kör oldalon lévő könnyűvizet.

### Biztonsági tényezők:

A reaktor nagy mérete miatt előfordulhat az úgynevezett szétcsatolódás. Ez azt jelenti, hogy a neutronfluxus nem egyenletes, a reaktormag különböző részein jelentősen változhat. Ez teljesítmény-ingadozáshoz vezet, amely igencsak megnehezíti a szabályozást.

Egyes források szerint az RBMK reaktorokhoz hasonlóan bizonyos körülmények között a CANDU-ban is lehet pozitív az üregegyűtthető. Ha a hűtőközeg elfolyik, megnövekszik a teljesítmény, ami balesethez vezethet.

A CANDU reaktorok konténmentje nem képes ellenállni a nagyobb baleseteknek, s így nem akadályozza meg a radioaktív anyagok környezetbe jutását. Egy intenzív cirkónium–gőz reakció, hidrogén- vagy gőzrobbanás, vagy akár egy törés a hűtőkörökben a konténment megsemmisülését okozhatja.

A romániai Cernavoda atomerőművéről és annak biztonsági színvonaláról nem sok tanulmány készült. A Nyugat-európai Nukleáris Szabályozók Szövetsége (WENRA) szerint azonban az erőmű jelenlegi rossz anyagi helyzete miatt nem sokáig tudják fenntartani a biztonság színvonalát.

### *Gázhűtésű reaktor*

A gázhűtésű reaktorok egyik fajtája a Magnox reaktor. Ezeket Nagy-Britanniában fejlesztették ki, a régióban ilyen típus nem üzemel. A legrégebbi reaktortípusok közé tartozik. Nevét az üzemanyag speciális magnéziumötvözetből készült burkolata miatt kapta. Grafit moderátoros, szén-dioxid-hűtésű, fűtőanyaga természetes urán. A hűtőcsatornák a lazán összeillesztett grafit téglák közepén helyezkednek el, bennük foglalnak helyet a fűtőelemek. A fűtőanyagot működés közben is ki lehet cserélni.

A gázhűtésű reaktoroknak van továbbfejlesztett változata is (az úgynevezett AGR). Ez már nem Magnox burkolattal készült, fűtőanyaga enyhén dúsított urán. A reaktormag kialakítása hasonló a Magnox reaktorokéhoz.

### Biztonsági tényezők:

A másodlagos védőburkolat hiánya a legnagyobb veszélyforrás a Magnox reaktoroknál: a primer kör sérülésekor a radioaktív szennyeződések közvetlenül a környezetbe kerülnek.

A reaktormagban elhelyezett jelentős mennyiségű grafit miatt fennáll a veszélye annak, hogy bizonyos balesetek után intenzív tűz keletkezzen. Ez a kockázat a reaktor öregedése folyamán növekszik. Grafit-tűz okozta az 1957-es windscale-i balesetet is.

Mindkét reaktortípusra jellemző, hogy biztonsági rendszerük túl egyszerű a vízhűtésűekéhez képest. Általánosan jellemző rájuk a modern technológiák hiánya.

### *Szaporító reaktor*

A szaporító-, vagy más néven tenyésztő reaktorok arról kapták nevüket, hogy az üzemeltetés során nemcsak elhasználdik, hanem folyamatosan termelődik a fűtőanyag. Az előzőekben ismertetett termikus (lassúneutronos) reaktorok  $^{235}\text{U}$ -öt használnak üzemanyagként, mivel ez az izotóp képes a maghasadásra. Csakhogy a természetes urán alig egy százalékát alkotja ez az izotóp, nagyobb részét az  $^{238}\text{U}$  teszi ki. A szaporító reaktorok célja, hogy – az energiatermelés mellett – az  $^{238}\text{U}$ -ból olyan más izotópot állítson elő, ami már fűtőanyagként használható.

A szaporító reaktorok központjában helyezik el a hasadóanyagot (20-30 százalék  $^{239}\text{Pu}$  az  $\text{UO}_2$ -ban). A mag körül található az úgynevezett tenyésztőburok, amely  $^{238}\text{U}$  izotópokból épül fel. A reaktorzónában lévő plutónium maghasadásakor neutronok keletkeznek, amit az  $^{238}\text{U}$  izotópok a burokban befognak. Ennek során  $^{239}\text{U}$  izotóp keletkezik, melynek béta-bomlása után két lépcsőben  $^{239}\text{Pu}$  izotóp jön létre, amit már üzemanyagként lehet használni. A tenyésztési hányados nagyobb mint egy, ami azt jelenti, hogy több plutónium képződik a tenyésztés során, mint amennyi a maghasadás során elbomlik.

A reaktormag nem tartalmaz moderátort, ami a neutronokat lelassítaná, mert a plutóniumot legjobban a gyors neutronok hasítják. Így ezt a típust gyorsneutronos reaktornak is szokták nevezni. A hűtőközeg ennél a típusnál nem lehet víz, mert az lelassítaná a neutronokat, így ehelyett folyékony fémeket, elsősorban nátriumot használnak. A primer kör folyékony nátriuma adja át a hőt a szekunder nátrium körnek a közbülső hőcserélőkön keresztül. A reaktor működését szabályzó rudakkal irányítják, melyeket vészleállítás esetén a biztonsági rudak helyettesítenek.

A világon összesen tíz szaporító reaktor üzemel, ami a termikus reaktorok számához képest igen kevés. A még működő szaporító reaktorok közül a legrégebbi 1963-ban épült az USA-ban, a legújabb pedig az 1988-ban épült franciaországi Super-Phenix. Tenyésztőreaktor üzemel még Indiában, Japánban és Oroszországban.

### Biztonsági tényezők:

A gyorsneutronos szaporító reaktorokban használt plutónium rendkívül mérgező, és ez nagy környezeti kockázatot teremt a hagyományos atomerőművek veszélyein túl is.

A nátrium hűtőközeggé váló alkalmazása – függetlenül attól, hogy vegyes oxid vagy fém formájában van jelen – különösen problémás, mivel rendkívül reaktív és levegővel vagy vízzel való érintkezése során meggyullad. Így a primer vagy szekunder kör esetleges nátrium-szivárgása tüzet okozhat. Ha valamilyen módon víz jutna a nátrium körbe, annak robbanás

lenne a következménye, a biztonsági védőburkolat szétrepedése pedig jelentős radioaktív kibocsátáshoz vezetne.

A nátrium hűtőközeg további sajátossága, hogy üregegyütthatója pozitív (lásd RBMK reaktorok). Ennek következménye lehet egy szabályozhatatlan, ugrásszerű teljesítménynövekedés, az azt követő reaktormag-olvadás és a fűtőanyag gőzzé válása. Gyakorlatilag lehetetlen olyan konténmentet tervezni, amely meg tud birkózni egy ekkora mértékű energia-felszabadulással.

A szaporítóreaktorok biztonsági rendszerei általában kevésbé összetettek mint a termikus reaktoroké, meghibásodásuk súlyos következményekkel járhat. Az előző pontban leírt teljesítménynövekedés olyan hirtelen végbemehet, hogy a reaktor manuális leállítása lehetetlenné válik, a megnövekedett hőmérséklet következtében a nátrium felforr, és a reaktor „megszaladhat”.

## **6. Hab a tortán – valószínűség, kockázat, következmény**

Az előzőekben bemutatottakat a tényezőket, amelyek az egyes reaktortípusok biztonságát veszélyeztetik, és azt is, hogy ezek a tényezők nem csak elméletben léteznek. A példaként felsorakoztatott események csak töredékei az elmúlt évtizedek alatt történteknek.

A nukleáris iparban előszeretettel számolják ki az egyes balesetek bekövetkezésének valószínűségeit, és az eredmények általában a  $10^{-3}$ – $10^{-6}$  értékek körül mozognak. Ez azt jelenti, hogy ezer és egymillió reaktor-üzemév év alatt várható egy adott baleset bekövetkezése. Ezekkel a számításokkal több probléma is van. Először is a valóságban megtörtént események nem ezt a számot igazolják. Ha igaz lenne, akkor az atomerőművek működésének kezdete óta alig egy-két baleset vagy üzemzavar fordult volna elő, pedig valójában több száz esetet említhetünk. Ez feltehetőleg azért van így, mert nagyon nehéz minden körülményt, ami a balesethez vezethet, a számításoknál figyelembe venni, különösen az emberi tényezőt és az olyan külső hatásokat, mint például a terrorcselekmény vagy a szabotázs. A bizonytalanságot növeli, ha a vizsgált területről nincs adat; ha ugyan rendelkezésre állnak adatok de nem elegendő vagy nem megbízhatóak; ha olyan dolognak kell szerepelnie a számításokban, ami nehezen számszerűsíthető, illetve ha nincs olyan modell ami megfelelően leírja a szituációt.

További probléma, hogy a valószínűségi számítások elfednek (és elfeledtetnek) egy nagyon fontos dolgot: az okozott kár nagyságát. A számok nem beszélnek arról, hogy ha mégis bekövetkezne az a bizonyos baleset, mekkora és milyen hatással lenne a környezetre. Ezt egy másik módszer, a valószínűségi kockázatelemzés veszi csak figyelembe (angolul Probabilistic Safety Assessment (PSA) vagy Probabilistic Risk Assessment (PRA)), amely egy esemény



kockázatát – egyszerűen megfogalmazva – a bekövetkezési valószínűség és az okozott kár nagyságának szorzatával adja meg. Minél nagyobb valamelyik szám, annál nagyobb az eredmény, azaz a kockázat. Ezt figyelembe véve a nukleáris balesetek már jóval előrébb kerülnek a kockázatos események listáján, hiszen itt az okozott kár igen hatalmas méreteket tud ölteni (a sugár- és nukleáris balesetek környezeti hatásairól információ az Energia Klub „A bomlás virágai” – *Radioaktív sugárzások és környezetünk* című kiadványában olvasható).

Egy esemény kockázatát ugyanúgy nehéz kiszámítani, mint a valószínűségét, hiszen a kár nagyságát is sokszor nehéz számszerűsíteni. Van, amikor az abszolút kockázat helyett az érzékelt kockázatot vesszük figyelembe, például egy új létesítmény építésénél. Érzékelt kockázatnak a társadalmi megítélést nevezzük, azaz azt, hogy az emberek, mindenféle számítások nélkül mekkora veszélyt éreznek egy-egy dolog mögött. Erre példa, amikor egy hulladék tároló létesítésekor az érintett lakosság elutasítja, hogy közelében megépítsék a depóniát, mert nagynak érzi a veszélyt és nem vállalja a kockázatot. Az érzékelt kockázat nagyságát sok tényező befolyásolja. Nagynak érezzük a veszélyt, ha az értékelendő dolgot nem magunk választhatjuk meg, ha nem mi irányítjuk, ha már történtek vele balesetek, ha a működését nem ismerjük, ha a hatása visszafordíthatatlan, vagy ha az emberi tényező is közrejátszik. Mindezek egyszerre igazak, ha egy nukleáris létesítményről van szó, azonban építésüknél csak igen ritkán vették eddig figyelembe az érzékelt kockázatot (például Ausztriában, ahol népszavazás döntött egy atomerőmű üzembe helyezése ellen).

Mint már többször is hangsúlyoztuk, a valószínűség, és a kockázat csak elméleti síkon foglalkozik egy baleset lehetőségével. Azt, hogy valójában mi, mikor és hogyan fog történni, a matematikai számítások nem mondják meg. És nem foglalkoznak a baleset következményeivel sem. A különböző mértékű nukleáris üzemzavaroknak illetve baleseteknek különböző hatásai vannak. A Nemzetközi Atomenergia Ügynökség összeállított egy nemzetközi nukleáris esemény skálát (INES: International Nuclear Event Scale), ahol egytől hétig terjedően osztályozzák az egyes eseményeket. A csernobili baleset a skála legmagasabb, azaz hetes szintjén áll. Hatos szintű volt az 1957-es baleset Kistimben, ötös a Three Mile Island-i és az 1957-es windscale-i baleset volt. Hármasszintű üzemzavar pedig már Pakson is volt.

Egy nukleáris baleset következményei azért is lehetnek súlyosak, mert a sugárzást közvetlenül nem tudjuk érzékelni. Nem lehet látni, hallani, megszagolni, csak a műszerek tudják érzékelni. Nem tudunk előle elmenekülni, mert lehet, hogy nem is tudjuk, hogy ott van. Sőt mi több, az esetlegesen kialakult megbetegedések egyikéről sem lehet egyértelműen azt állítani, hogy a sugárzás okozta (kivéve a pajzsmirigy rákot), mert minden betegségnek több oka is lehet. Így lehet azt mondani, hogy a csernobili balesetnek csak körülbelül harminc halottja van, hisz a többi több ezer megbetegedést más kiváltó okok számlájára is lehet írni. És van még egy nagyon súlyos etikai kérdés: ha véletlenül bekövetkezne egy baleset, ki vállalná a likvidálást?

Csernobil óta pontosan tudjuk mi lehet ennek a következménye, mi történt azokkal a kiskatonákkal, akiket kivezényeltek a romok eltakarítására. Ki fog ezek ismeretében vállalkozni egy ilyen feladatra, és hozhat-e felelősséggel döntést ebben a kérdésben bármilyen hatóság?

### Nemzetközi Nukleáris Esemény Skála (INES)

1	Rendellenesség	A biztonsági intézkedések olyan megszegése, mely nem jelent kockázatot sem a dolgozókra, sem a lakosságra.
2	Üzemzavar	Biztonsági következményei már lehetnek, de a dolgozók sugárterhelése nem haladja meg az éves dóziskorlátot.
3	Súlyos üzemzavar	A dolgozók sugárterhelése meghaladhatja a dóziskorlátot, de a legjobban veszélyeztetett lakosság egyedei legfeljebb csak néhány tized mSv (millisievert) dózist kaphatnak.
4	Elsősorban létesítményen belüli hatású baleset	Elsősorban létesítményen belüli hatással járó baleset: ilyen rendkívüli esemény már egy részleges zónaolvadás következménye. A dolgozók kis részénél akut egészség-károsító hatások jelentkezhetnek, de a legjobban veszélyeztetett lakosok is legfeljebb csak néhány tized mSv (millisievert) dózist kaphatnak.
5	Telephelyen kívüli kockázattal járó baleset	Telephelyen kívüli kockázattal járó baleset: a reaktorzóna súlyos károsodása következtében a radioaktív izotópok olyan mennyiségben jutnak ki a környezetbe, ami már veszélyezteti a lakosságot. Ebben az esetben a lakosságra vonatkozó baleset-elhárítási intézkedési terveket (BEIT) részlegesen végre kell hajtani.
6	Súlyos baleset	A jelentős mennyiségű radioaktív anyag kibocsátása során súlyos egészség-károsító hatások jelentkezhetnek. Ennek megelőzésére a BEIT teljes körű alkalmazása szükséges.
7	Nagyon súlyos baleset	A reaktortartályban lévő radioaktív anyagok nagy része kijut a környezetbe. Ilyen esetben fennáll a korai sugársérülés veszélye mind az atomerőműben, mind a közvetlen környezetében tartózkodó személyeknél. A késői egészség-károsító, illetve környezeti hatások pedig nagy területen (esetleg szomszédos országokban is) jelentkezhetnek.

## 7. Utóélet

Kiadványunk egy antinukleáris szervezet, az Energia Klub gondozásában készült. Célunk nem az volt, hogy megjelentessünk egy atomenergiát minden szempontból lejárató írást, hanem hogy felhívjuk a figyelmet egy nagyon fontos tényezőre: az atomerőművek biztonságának kérdésére. Bemutattuk, hogy mi minden játszik szerepet a biztonságosság mértékében (és egyáltalán meglétében), a műszaki-technikai okoktól kezdve az emberi tényezőig. Remélhetőleg rávilágítottunk arra, hogy bár már régóta terv az inherens biztonságú reaktorok megalkotása, az atomenergia éppen inherensen nem biztonságos. És hogy bár a valószínűségi számítások eredményei alapján egy atomerőművi baleset lehetősége a nullához közelít, a valóság nem ezt a képet mutatja. A kiadvány az atomerőművek leszerelésének kérdését nem érinti, mert ez olyan újabb átfogó téma, ami bár szintén a biztonság témakörébe tartozik, példák híján (hiszen a világon még sehol nem volt teljes erőmű leszerelés) nem tudhatjuk milyen veszélyeket rejt magában.

Jó, de akkor mi legyen az atomenergia helyett? – kérdezik tőlünk sokan. Válaszunk összetett, hiszen sokféleképpen lehet helyettesíteni azt.

Fontos az energia-diverzitás, vagyis hogy sokféle energiaforrást használjunk, hiszen ez az egyik alapja a fenntartható energiagazdálkodásnak. Fontos a decentralizáció is, az, hogy ne egyetlen hatalmas erőmű lássa el villamos energiával a fél országot, különösen, ha import nyersanyag az üzemanyaga – könnyű belátni, hogy ilyen esetben egy ország energiaháztartása igen sérülékeny. Azonkívül ha több kisebb erőmű látja el az ország régióit, a szállítási veszteség is csökken, nem is beszélve arról, hogy a régió adottságaihoz lehet igazítani az erőmű típusát. És végül fontos, hogy környezetkímélő legyen. A megújuló energiaforrások mindezen kritériumoknak megfelel. A diverzitás és decentralizáció esetükben könnyen teljesül: ha egy teljes országra nem is mondhatjuk, hogy nagy a szélenergia potenciálja, biztos akad egy-egy régió, ahol kihasználható ez a megújuló energiaforrás; az ország más részeiben hasznosulhat a napenergia, apró erőművekben a vízenergia, vagy a biomassa. Végül pedig a megújuló energiaforrások a fosszilis energiahordozóknál lényegesen környezetkímélőbbek.

De nem a megújulók használata az egyetlen megoldás. Az energiahatékonyság éppen olyan fontos, mind az előállítói, mind a felhasználói oldalon. Rengeteg jó megoldás született már arra nézve, hogy például hogyan lehet egy hétköznapi háztartásban csökkenteni a felhasznált energia mennyiségét anélkül, hogy a kényelmi igényeinkből bármennyit is engednénk. De nem csak a háztartásokban, hanem irodákban, üzletekben, üzemekben, gyárakban is sok energiát lehetne megspórolni, ha egy kicsit odafigyelünk rá. Sokkal jobb egy humánusabb, tisztább, stressz-mentes világban élni, kevesebb energiával és mégis ugyanazon a színvonalon, mint olyan kockázatokkal, amit az atomerőművek képviselnek.

## **Összetevők, avagy a szövegben szereplő fogalmak**

**AGR:** Mozaikszó, a továbbfejlesztett gázhűtésű reaktorok angol nevének (Advanced Gas-cooled Reactor) rövidítése.

**atommáglya:** Így nevezték az első atomreaktorokat, amelyekben az üzemanyagot alkotó uránkötegeket egy halomba, „máglyába” rakták.

**BWR:** Mozaikszó, a vízforraló reaktorok angol nevének (Boiling Water Reactor) rövidítése.

**CANDU:** Mozaikszó, a kanadai deutérium-urán reaktorok angol nevének (CANadian Deuterium-Uranium Reactor) rövidítése.

**dúsítás:** Az a folyamat az uránérc feldolgozása során, amikor a természetes uránban igen kis hányadban jelen lévő (0,7 százalék) 235-ös uránizotóp koncentrációját növelik.

**fűtőanyag:** Atomreaktorok számára előkészített hasadóanyag. Ez lehet természetes urán, dúsított urán vagy kevert urán-plutónium-oxid (MOx).

**fűtőelem:** Üzemanyag pasztillákkal töltött fémcsövek a reaktorban.

**hűtőközeg:** A reaktoron keresztül keringtetett anyag, mely hűti a reaktort és elvezeti a keletkezett hőt.

**inherens:** Benne rejlő, valamivel velejáró.

**kiegés:** Az a folyamat, amikor az üzemanyagból a reaktorban lezajló nagyszámú hasadás következtében fogy a 235-ös tömegszámú uránizotóp.

**konténment:** A reaktorblokkot körülvevő acél vagy beton védőburok.

**konverzió:** Az urán feldolgozás egy lépése, melynek során a sárga pogácsa uránvegyületeit UF<sub>6</sub>-dá vagy UO<sub>2</sub>-dá alakítják át.

**könnyűvíz:** Közönséges víz, melyet hűtővízként és moderátorként használnak egyes atomreaktorokban.

**maghasadás:** Az atom magjának kettéválása két kisebb atomra energia-felszabadulás kíséretében.

**Magnox:** Magnézium-ötvényet, amit az első generációs brit gázhűtésű reaktorokban használtak fűtőelemek burkolataként.

**moderátor:** A hasadásból származó neutronok lassítására szolgáló anyag (könnyű-víz, nehéz-víz vagy grafit) az atomreaktorokban.

**MOx:** Reaktor üzemanyag, mely urán-oxidok mellett plutónium-oxidokat is tartalmaz (hozzávetőleg 5 százalékban) fő hasadóanyagként.

**nehésvíz:** A hidrogén nehezebb – egy protont és egy neutronot tartalmazó – változatából, deutériumból álló víz.

**primer kör:** A reaktor és a hozzá csatlakozó hűtőkörök közös neve. A benne lévő közeg erősen radioaktív.

**PWR:** Mozaikszó, a nyomottvizes reaktorok angol nevének (Pressurised Water Reactor) rövidítése.

**reprocessálás:** Lásd újrafeldolgozás.

**szabályozórúd:** Neutronelnyelő anyagot (bórt, kadmiumot) tartalmazó rúd, amit a reaktor aktív zónájába jobban vagy kevésbé betolva változtathatjuk a neutronok és ezzel a hasadások számát, így a reaktor teljesítményét.

**szaporító reaktor:** Olyan reaktor, amely több hasadóanyagot termel, mint amennyit elhasznál.

**szekunder kör:** A primer körrel érintkező csövek, melyek átveszik a hőt.

**tenyésztő reaktor:** Lásd szaporító reaktor.

**újrafeldolgozás:** A besugárzott fűtőelemek anyagának kémiai szétválasztása, amely során a kiégett fűtőelemekből elkülönítik a plutóniumot és az urániumot.

**zóna:** A reaktornak az a térfogata, ahol a láncreakció végbemegy.

## **Források**

*The game of hazard. Nuclear reactor risk in the 1990s* – Greenpeace kiadvány

S. A. Blumberg – G. Owens – Egri Gy.: *A Trefort utcától a hidrogénbombáig*. Magyar Világ Kiadó 1989

WISE-Amsterdam

*Assessing human reliability in nuclear power plants*. CSNI Report No. 75. OECD Nuclear Energy Agency, 1983.

Ballard G. M. 1988. *Nuclear safety after Three Mile Island and Chernobyl*. Barking: Elsevier Applied Science Publishers Ltd.

Echenrode, R. J. and Swenson, W. H. 1992. *NRC Office of Nuclear Reactor Regulation Human Factors Programs in Nuclear Power*. IEEE 5<sup>th</sup> Conference on Human Factors and Power Plants. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers.

<http://www.antenna.nl/wise/>

<http://www.nirs.org/>

<http://www.iaea.org/>

<http://www.atomicarchive.com/>

<http://www.nuclearfiles.org/>

[http://www.anlw.anl.gov/anlw\\_history/general\\_history/gen\\_hist.html](http://www.anlw.anl.gov/anlw_history/general_history/gen_hist.html)

---

Kiadta: Energia Klub Környezetvédelmi Egyesület 2000 példányban.

1519 Budapest, Pf. 411

[www.energiaklub.hu](http://www.energiaklub.hu)

e-mail: [level@energiaklub.hu](mailto:level@energiaklub.hu)

A kiadvány elkészítésében közreműködőket gondos munkájukért illeti köszönet: Ámon Ada, Albert Gáspár, Hámori Brigitta, Dr. Katona Tamás János, Koritár Zsuzsanna, Medveczky Péter, Tóth Zsuzsa, Varga Éva.

Felelős kiadó: Energia Klub Környezetvédelmi Egyesület

ISBN 693 00 9365 0

Borítóterv: Typoézés Kft.

Nyomdai előkészítés: PARADOX Bt.

Nyomdai munka: ETO-Print Nyomdaipari Kft., Budapest, 2001

A kiadvány az Ökotárs Alapítvány támogatásával készült.