

Az atomenergia történetében gyakran szerepelnek magyar nevek: *Szilárd Leó*, *Wigner Jenő* és *Teller Ede*. Hogy ezt emlegetjük, nem egyszerűen a nemzeti büszkeség következménye, ők valóban kimagasló szerepet játszottak. A reaktorok alapműve *Weinberg* és *Wigner* 1959-ben megjelent könyve: *Neutronok láncreakciójának fizikai elmélete* [1]. Weinberg volt a chicagói kritikussági kísérlet 50. számú résztvevője, később Oak Ridge igazgatója. Nemcsak magyarországi látogatásán, hanem mindenütt fennen hirdette, hogy „gyakorlatilag mindent a magyarok találtak ki”.

Wigner Jenő tervezte a Hanfordban (Washington állam) működő reaktorokat, amelyek megtermelték az atombombákhoz szükséges plutóniumot. Ezért Wignert szokták az első reaktormérnöknek nevezni. Szilárd Leó mindig néhány évvel megelőzte a korát. Ő ismerte fel elsőnek a láncreakcióban rejlő katonai és energetikai lehetőségeket, az ő ösztönzésére indult el az amerikai atombombaprogram. Fermivel karöltve közreműködött az első atommáglya létrehozásában, és a továbbiakban is vezető szerepet játszott. A háború végén ő figyelmeztetett elsőnek az atomkorszak várhatóan vészterhes fejleményeire, ő vetette fel elsőnek a nemzetközi ellenőrzés szükségességét.

Teller Edét a hidrogénbomba atyjának tartják, amiben sok igazság van. Vezető szerepe volt az amerikai hidrogénbomba létrehozásában. Kevésbé közismertek azonban az atomerőművek biztonsága területén hozzá kapcsolható eredmények. Az 1950-es években tagja volt az Egyesült Államok Atomenergia Bizottságánál működő, a nukleáris biztonságért felelős bizottságnak, amely máig érvényes alapelveket mondott ki. Jelen írásban elsősorban ezekről lesz szó.

Ha kinyitunk egy modern szakkönyvet a reaktorbiztonság alapelveiről, nem az alábbi alapelveket fogjuk megtalálni benne. Ennek az az oka, hogy az atomenergetika elmúlt 60 évében történt reaktor- és atomerőművi balesetek tanulságai az alapelvek többszöri újrafogalmazását és kibővítését eredményezték. Ez azonban nem jelenti azt, hogy a Teller és társai

által kimondott elvek és szabályok bármelyike is érvényét veszítette volna. Mivel témánk Teller szerepének kidomborítása, visszamegyünk az 1950-es évekbe, és az akkori szemléletnek megfelelően fogalmazunk. Helyenként – természetesen – elkerülhetetlen lesz előre nézni a jelenkorba.

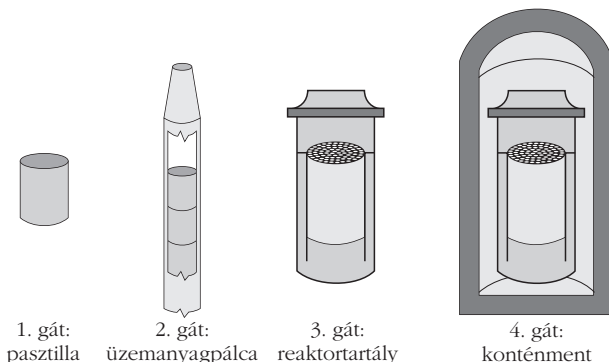
A konténment

Az egyik legfontosabb alapelv szerint egy atomerőművet akkor tekintünk biztonságosnak, ha belőle nem kerül ki a környezetet meg nem engedhető mértékben szennyező radioaktív anyag. Az erőmű felépítéséből következik, hogy a normális üzem során ilyen kibocsátás nem történhet. Nem zárhatók ki azonban üzemzavarok, amelyek során a reaktor hermetikussága megsérül, és emiatt radioaktív anyagok kerülhetnek ki belőle. A várhatóan fellépő nyomások és kiszabaduló anyagtömegek miatt egy közönséges épület nem lenne képes ezeket lokalizálni. Ezért írták elő, hogy minden atomerőművi reaktort egy konténmenttel (védőburkolattal) kell körülvenni, amely a várható nyomásoknak ellenállva a radioaktív anyagokat lokalizálja, és így a környezetet megvédi.¹ Az Egyesült Államokban konténment nélkül nem engedélyeztek atomerőművet. A koncepció helyességét igazolta a TMI-2 reaktor² 1979. március 28-án történt balesete. Az indította el, hogy egy látszólag jelentéktelen szelepet zárva felejtettek. Ennek hatására – bonyolult áttételeken keresztül – a reaktorban nőni kezdett a nyomás, a nyomástartó edény biztonsági szelepe rendben kinyílt, de a nyomás csökkenését követően nem zárt vissza. Az operátor a vezérlőben számos jelzést helytelenül értelmezett, és kikapcsolta az automatikusan, szabályszerűen megindult üzemzavari szivattyúkat. Végeredményben a reaktor aktív zónája megolvadt, nagy anyagi kár keletkezett, de a reaktorból kikerült radioaktív anyagok nem jutottak túl a konténmenten. Személyi sérülés nem történt. Más kérdés, hogy a baleset kiindulása és lefolyása számos hiányosságra derített fényt. Tárgyalásuk azonban Teller-től már messze vezetne.

A konténment szerepét ma a „mélységi védelem” részének tekintjük, amelyből kiindulva mérnöki gátakat építenek ki. Az *1. ábrán* a leggyakoribb, nyomottvízes atomerőművekben szemléltetjük ezeket:

1) *üzemanyagmátrix*: az üzemanyagot (urán-dioxidot) pasztillákba préselik; a hasadási termékek

1. ábra. Mérnöki gátak a nyomottvízes atomerőműben



¹ A magyarosított „védőburkolat” kifejezés nem tudott a magyar szaknyelvben meggyökeresedni. Ezért – nem nagy örömünkre – az angol containment szó kiejtését a magyar fonetika szerint leírva használjuk, mert ez már meghonosodott jövővényszónak tekinthető.

² A Three Mile Island (USA, Pennsylvania) atomerőmű 2. reaktora.

beépülnek az üzemanyagmátrix kristályrácsába, ahonnan csak a gáz halmazállapotú hasadási termékek és egyes illékony anyagok (például jód) kerülhetnek ki;

2) *fűtőelem-burkolat*: a pasztillákat fémből készült, nagy nyomásra és hőmérsékletre méretezett fűtőelem-burkolatba helyezik, hogy a gáz halmazállapotú és az illékony hasadási termékek ne kerülhessenek ki a primerköri hűtővízbe;

3) *reaktortartály*: a reaktortartály és a primerköri berendezések nagy nyomásra méretezett fala megakadályozza, hogy a fűtőelem-burkolat esetleges sérülése esetén a hűtővízbe kikerülő radioaktív anyagok kijuthassanak a primer körön kívülre;

4) *konténment*: az egész primerköri rendszert egy túlnyomásra méretezett épület, a konténment (biztonsági védőburkolat) veszi körül, ami a primerköri csővezetékek törése esetén kiszabaduló hűtőközeget és annak radioaktív szennyezőit az épületen belül tartja.

Negatív reaktivástényezők

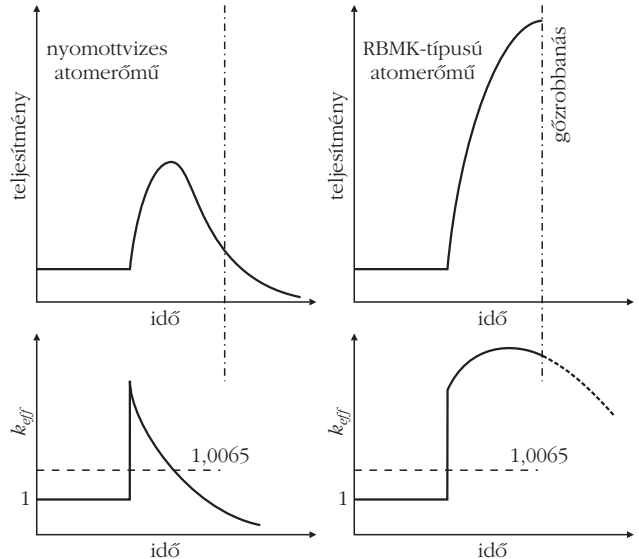
A konténment elsősorban olyan balesetek elhárítására szolgál, amelyekben a reaktor elveszti a hűtőközeget. A reaktorbalesetek másik csoportját a *reaktivitás-balesetek* alkotják: a sokszorozási tényező olyan nagyra válik, hogy a reaktor a késő neutronok nélkül is kritikus. Csak uránt tartalmazó reaktorokban ez a határ körülbelül 1,0065.³ Ilyen állapotban a reaktor teljesítménye olyan gyorsan nő, hogy azt mechanikus beavatkozó szervekkel (szabályozórudakkal) nem lehet megállítani. Ezt a jelenséget nevezzük megszaladásnak. Csak inherens módon, a reaktor szerkezetébe épített, önszabályozó, negatív visszacsatolások képesek a balesetet megállítani. Ezért Tellerék kimondták azt az alapelvet, hogy minden reaktivástényezőnek negatívnak kell lennie. Mielőtt kifejtjünk, hogyan szolgálja ez a reaktorbiztonságot, néhány dolgot meg kell beszélnünk.

Mindenek előtt definiáljuk a reaktivástényezőket:

$$\alpha_x = \frac{\partial \rho}{\partial x}, \quad \rho = \frac{k_{eff} - 1}{k_{eff}}$$

Ahol k_{eff} a sokszorozási tényező. Az x mennyiség lehet a moderátor vagy az urán hőmérséklete, a reaktor teljesítménye, a hűtőközegben levő gőzbuborékok térfogataránya stb. Ilyen értelemben beszélünk rendre a moderátor vagy az urán hőfoktényezőjéről, teljesítménytényezőjéről, üregegyütthatóról stb.

Mint mondtuk, Tellerék előírták, hogy mindegyik reaktivástényezőnek külön-külön negatívnak kell lennie. A hanfordi reaktorok moderátora grafit, hűtőközege víz volt. A hidrogén abszorpciós hatáskeresztmetszete termikus neutronokra 331 mbarn, a grafité pedig 4 mbarn. Emiatt egy ilyen reaktorban a



2. ábra. Egy nyomottvízes reaktor (bal oldal) és egy RBMK (jobb oldal) feltételezett megszaladása

víz ritkulása csökkenti az abszorbeálódó neutronok számát, tehát növeli a sokszorozási tényezőt. Következésképpen az ilyen reaktorok üregegyütthatója pozitív, tehát az Egyesült Államokban ezeket a reaktorokat nem fejlesztették tovább kereskedelmi típusra. Nem erre a következtetésre jutottak a Szovjetunióban: a grafitmal moderált és vízzel hűtött, plutóniumtermelő reaktorokból sorozatban gyártott típusokat fejlesztettek ki. Ez lett az RBMK-típus,⁴ amelyből az egyik Csernobilban katasztrofális balesetet szenvedett.⁵

A 2. ábra jobboldali rajzain egy olyan reaktor megszaladását mutatjuk be, amelyben az üregegyüttható pozitív. Amikor k_{eff} értéke valamilyen okból hirtelen a biztonságos határ fölé kerül (jobb alsó rajz), a teljesítmény azonnal emelkedni kezd, és a hűtőközeg felforr (jobb felső rajz). A forrás miatt keletkező pozitív visszacsatolás hatására k_{eff} értéke ezzel párhuzamosan tovább nő, a teljesítmény emelkedése gyorsul. Jóllehet egy bizonyos teljesítményemelkedés után hatni kezdenek a mindig meglévő negatív visszacsatolások, tehát k_{eff} növekedése megszűnik, de a teljesítmény tovább nő, mivel k_{eff} értéke még mindig a biztonságos határ felett van. Jóval később ez a reaktor is leállna a negatív visszacsatolások miatt, ha a reaktor ezt ki tudná várni. Sajnos azonban jóval előbb gőzrobbanás következik be, ami szétveti az egész berendezést. A baloldali ábrákon egy nyomottvízes atomerőmű megszaladása látható: amint a teljesítmény növekedni kezd, a sokszorozási tényező azonnal csökken (bal alsó rajz), a növekedés üteme lassul, végül meg is áll. Ha a teljesítménytényező abszolút értéke elég nagy, a megszaladást még az előtt megállítja, mielőtt a reaktor károsodna (bal felső rajz).

⁴ RBMK = Reaktor Bolsoj Moscsnoszti Kanalnogo Tipa (nagy teljesítményű, csatornatípusú reaktor).

⁵ A részleteket illetően lásd Szatmáry és Aszódi e tárgyban írt könyvét [2].

Üzemeltetési szabályok

Mielőtt Tellerék megkezdték működésüket, már több halálos megszaladási beleset történt kísérleti reaktorokban. Ezekből szűrték le azokat az üzemeltetési szabályokat, amelyek a hasonló baleseteket kizárják. E szabályok annyira szerteágazók, hogy csak illusztrációként említhetünk meg néhányat. Kimondták:

- A reaktorban bármilyen műveletet csak kihúzott biztonságvédelmi szabályozórudak mellett szabad végezni. Ekkor bármilyen téves művelet következményeit a rudak beejtésével meg lehet állítani – ha eleendően hatékonyak a rudak.

- A reaktorban a neutronfluxust folyamatosan mérni kell, hogy idejében észlelni lehessen a biztonságot veszélyeztető folyamatok megindulását.

- Automata irányítórendszerre van szükség, amely ilyen folyamatok megindulásakor automatikusan beejti a rudakat a reaktorba.

- A biztonságvédelemben szerepet játszó eszközök (neutrondetektorok, szabályozórudak stb.) számát meg kell kétszerezni (háromszorozni), hogy szükség esetén elég legyen, ha csak az egyik működik.

Az utóbbi követelményt ma a redundancia elvének nevezzük: minden, a biztonságot érintő berendezésből többet (háromat-négyet) kell beépíteni.

Az irányítórendszerrel kapcsolatban szintén Tellerék mondták ki a „bolondbiztos” alapelvet. A kísérleti reaktorok akkoriban egyszerűen voltak megközelíthetők, és ki kellett zárni, hogy arra illetéktelen személyek a reaktort elindíthassák. Úgy kellett az irányítórendszert tervezni, hogy ha valaki a vezénylőben (egy bolondhoz hasonlóan) találomra elkezd a gombokat nyomkodni, a reaktor ne indulhasson el. E szerint az alapelv szerint a reaktort csak tudatosan, a műveleteknek az üzemi szabályok szerinti egymásutánjával lehet elindítani. Manapság egy reaktor fizikai megközelítését is szigorúan szabályozzák, tehát ennek az elvnek a jelentősége csökkenni látszik. Oktatási célú reaktorok esetében azonban fennáll: minden tanulót potenciálisan „bolondnak” kell tekinteni.

Reaktorok telepítése

Különböző nyilvános szereplései során Teller előszerepettel foglalkozott az atomerőművek telepítésének problémáival. Ő és munkatársai határozták meg, hogy milyen geológiai, szeizmológiai és környezeti feltételeknek kell eleget tenniük azoknak a területeknek, ahová atomerőmű épülhet.

A telephely kiválasztása előtt meg kell vizsgálni a hely szeizmikus tulajdonságait, a múltban előfordult földrengések gyakoriságát, erősségük valószínűségi eloszlását. Meg kell határozni a várható legerősebb földrengéskor fellépő vízszintes gyorsulás értékét, és a megépülő erőmű szerkezetét úgy kell tervezni, hogy ezt elviselje. Vizsgálni kell a hűtővíz rendelkezésre állását. Akkoriban rendszerint folyók közelébe

telepítették az atomerőműveket. Ezért a vizsgálatnak ki kellett terjednie a folyó vízállásának ingadozásaira is. Tellerék foglalkoztak elsőnek azzal a kérdéssel, hogy az erőműnek milyen távol kell esnie a legközelebbi lakott településektől.

Hosszasan lehetne még sorolni azokat a normákat, amelyeket az 1950-es években mondtak ki először. Ezek jelentőségét nem lehet túlbecsülni. Ugyanakkor az Egyesült Államokban kialakult telepítési és tervezési gyakorlat oda vezetett, hogy az atomerőművek első generációjában mindegyik erőmű egyedi tervek alapján készült, a helyi sajátosságoknak megfelelően. Ez a körülmény nagyban rontotta a versenyképességüket, mivel az engedélyezési eljárások elhúzódtak, és emiatt megnöttek a beruházások kamatterhei. Ezt a problémát Európában idejekorán felismerték, és típusterveket dolgoztak ki. Végeredményben több évvel le tudták rövidíteni a beruházáshoz szükséges időt – nagyban javítva ezzel a gazdaságosságát.

Az emberi tényező

Befejezésül utalunk arra, hogy Tellerék zseniális előrelátással felhívták a figyelmet ez emberi tényező fontosságára. Az általuk elemzett csekély számú reaktorbaleset mindegyike kísérleti berendezésekben történt. Előre látták, hogy az atomerőművekben várható üzemzavarok többsége nem (vagy nem csak) mechanikus, illetve elektromos meghibásodásra lesz visszavezethető, hanem az emberi tényező is fontos szerepet fog játszani bennük. Ez az oka annak, hogy amennyire a kor műszaki színvonala lehetővé teszi, a lehető legtöbb műveletet és beavatkozást automatizálni kell.

A már említett TMI-2 reaktor balesete két évtizeddel később világosan megmutatta, hogy az operátorok tévedései az egyébként helyesen működő automatikus védelmi rendszerek hatását is leronthatják. Tellerék korában még nem volt annyira fejlett a számítástechnika, hogy rámutathattak volna a ma érvényes megoldásra:

- Az erőművek mellé kötelező szimulátorokat telepíteni. Másképp ugyanis nem lehet feloldani a következő dilemmát: Az igazán súlyos üzemzavarokkal az operátorok sohasem találkoznak a valóságos erőműben, pedig éppen ezek elhárításához van szükségük a legtöbb tapasztalatra. Egy szimulátorban azonban veszélytelen körülmények között megszerezhetik a nélkülözhetetlen gyakorlatot.

- Egy modern atomerőmű irányítórendszere annyira automatizálva van, hogy bármilyen üzemzavar esetében az első félórán az operátoroknak nincs tennivalójuk. Egyetlen dolguk a folyamatok megfigyelése és az üzemzavar okának a megértése.

Irodalom

1. A.M. Weinberg, E.P. Wigner: *The Physical Theory of Neutron Chain Reactors*. The University of Chicago Press, Chicago, 1958.
2. Szatmáry Zoltán, Aszódi Attila: *Csernobil: tények, okok, hiedelmek*. Typotex, Budapest, 2006.