

A paksi atomerőmű földrengésbiztonsága

Az atomerőműveknek biztonságosnak, védettnek kell lenni a természeti, vagy emberi tevékenységből eredő katasztrófák hatásaival szemben. Erre figyelmeztetett az Onagawa atomerőművet ért földrengés 2005-ben, a Shika és a Kashiwazaki-Kariwa atomerőmű esete 2007-ben és a Hamaoka atomerőmű esete 2009-ben, vagy a Blayais-i atomerőmű elárasztása 1999-ben, illetve 2005-ben. Újólaj pedig intően figyelmeztet erre a japán Honshu sziget keleti partjának közelében 2011. március 11-én bekövetkezett földrengés, majd az azt követő szökőár, amely nukleáris katasztrófához vezetett a Fukushima Daiichi atomerőműben.

Alapvető biztonsági követelmények

Az atomreaktorok akkor biztonságosak, ha minden körülmények között a láncreakció leállítható, a reaktor lehűthető és a hűtés folyamatosan biztosítható, és a radioaktív közegek nem kerülnek ki a környezetbe.

Az első követelmény érthető, hiszen így megállítható a maghasadásokból származó energiatermelés, illetve a kritikusság kialakulása, és a láncreakció ellenőrizetlen felgyorsulása is kizárható. Ezt a funkciót neutronelnyelő anyagok reaktorba való bejuttatásával lehet elérni, ami történhet abszorbens rudakkal vagy a hűtőközegben oldott abszorbenssel, a gyakorlati esetekben bórral.

A leállított reaktor hűtésére azért van szükség, mert a maghasadás következtében az üzemanyag-magokból (mint a ^{235}U) instabil magok keletkeznek, amelyek különféle bomlási láncok eredményeként és az instabil magok természetének megfelelően különböző idő alatt stabil magokká alakulnak, s ebben a folyamatban hő keletkezik, amit maradvány hőképződésnek nevezünk. Ezt a hőt több okból is ki kell vonni a rendszerből:

- Az üzemanyag ne hevüljön túl, s megmaradjon a szerkezeti integritása, ami úgy a hűhetőség feltétele, mint a reaktivitás kézben tartásának, de egyúttal a radioaktív anyagok visszatartása tekintetében is fontos, hiszen az üzemanyag (megjelenését tekintve egy kerámia) anyagában visszatartva marad ekkor az aktivitás nagy része, a gáznemű és halogén anyagok kivételével.
- Másfelől, a lehűtött rendszerben alacsony nyomást lehet tartani, és ez azért fontos, mert legyen bár a legkisebb tömörtelenség a reaktor aktív zónáját magában foglaló rendszeren, azon a szivárgás hajtóereje a külső és belső nyomás közötti különbség - belátható, hogy ennek célszerű a legkisebbnek lenni.
- A harmadik ok pedig az, hogy az üzemanyag pasztillákat magába foglaló csövecskék anyaga cirkónium, amely ha túlhevül, $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ felett a vízgőzzel reakcióba lépve oxidálódik és ennek következtében hidrogén keletkezik. A hidrogén, mint robbanóképes gáz jelenléte a rendszerben új veszélyt jelent. Ezért erre az esetre ma már az atomerőművekben, így a paksi erőműben is, hidrogén-rekombinátorokat telepítenek a robbanás-képes hidrogén-koncentráció kialakulásának megelőzése céljából.

A hűtéshez, az üzemzavari hűtőrendszerek működéséhez két dolog feltétlenül kell: hűtőközeg, azaz a könnyűvízes reaktorokban víz, és villamos energia a hűtőrendszer működtetéséhez, valamint ahhoz, hogy azok a műszerek működjenek, amelyek elengedhetetlen információt szolgáltatnak az erőmű állapotáról.

A maradványhő termelése – a gyorsan stabil állapotba kerülő magoknak köszönhetően – gyorsan csökken, s amíg a reaktor leállítása után ez az üzemi teljesítmény 7 %-át teszi ki, néhány óra után már egy százaléknyi, majd néhány nap után ez a teljesítmény a százalék tört része lesz. A kiégett és a reaktorból kirakott üzemanyag hőtermelése általában öt év után éri el azt a szintet, hogy átmeneti tárolókba helyezhető legyen, addig a kiégett üzemanyag a reaktorok melletti tárolókban, folyamatos hűtés mellett tárolható.

A radioaktív anyagok visszatartását több fizikai gát biztosítja: az üzemanyag maga, az üzemanyagot magába foglaló burkolat, a reaktor és a primerkör szerkezete, mint nyomástartó rendszer, és legvégül a konténment szerkezete.

Miként lehet az atomerőművet biztonságossá tenni?

A biztonsághoz elengedhetetlen, a fentiekben áttekintett funkciók mindenkori, és nagy megbízhatósággal történő megvalósulását az alábbiakkal érhetjük el:

1. A tervezési alap adekvát meghatározása: a mértékadó veszélyek és azok jellemzőinek meghatározása.
2. A veszélyek hatásainak figyelembe vétele a tervezés során, beleértve a megfelelő üzemzavari, balesetkezelési és következménycsökkentő eszközök betervezését.
3. A veszélyek potenciális hatásaira minősített termékek alkalmazása.
4. Üzemzavar-elhárítási, balesetkezelési és következménycsökkentő eljárások kidolgozása, bevezetése.
5. A biztonság elemzése.
6. A biztonság, azaz a fenti 1-5 pont időszakos felülvizsgálata, s az ebből eredő biztonságnövelő intézkedések foganatosítása.

A tervezés alapja

Ahhoz, hogy az atomerőmű biztonságos legyen a külső hatásokkal szemben, a tervezéshez meg kell határozni a biztonság szempontjából releváns, a telehelyre jellemző mértékadó veszélyeket, s azokat jellemezni kell olyan módon, hogy azt a tervező teherként, hatásként, működést befolyásoló feltételként, körülményként figyelembe vehesse, illetve meg kell határozni azokat a kritériumokat, amelyek minősítik a terv megfelelését az adott hatások, terhek, körülmények vonatkozásában.

A tervezés alapjaként figyelembe veendő veszélyek definiálhatók valószínűségi vagy determinisztikus alapon, vagy – minden egyéb feltételtől függetlenül – posztulálva.

A valószínűségi alapon történő meghatározás lényege az, hogy azt az eseményt tekintjük mértékadónak, amelynél nagyobb az atomerőmű üzemideje alatt csak igen kis valószínűséggel fordulhat elő. Így például, ha ötven évet veszünk teljes üzemidőnek, akkor

azt a természeti eseményt, mondjuk földrengést vesszük mértékadónak, amelynél nagyobb csak 0,005 valószínűséggel fordulhat elő az 50 év alatt. Ez éves gyakoriságban kifejezve az az esemény, amelynek gyakorisága 10^{-4} /év, azaz a visszatérési ideje 10000 év. A tervezés alapjának ilyen meghatározása maga után vonja azt is, hogy a tervezési alapba kerülő veszélyeket is valószínűségi módszerrel kell meghatározni, amely a természeti folyamatok inherens véletlenszerűségét és az erre vonatkozó ismereteink bizonytalanságát egyaránt figyelembe veszi.

A tervezési alapba tartozó veszély meghatározható determinisztikus módon. Ennek az alapja az, hogy a múltban bekövetkezett események egyértelműen meghatározzák azt az eseményt, ami az atomerőmű üzemideje alatt bekövetkezhet. Itt nincs értelme visszatérési időről vagy éves gyakoriságról beszélni még akkor sem, ha a múltbeli események feldolgozásánál a bizonytalanságokat statisztikai módszerekkel értékelik és erre tekintettel a mértékadó esemény jellemzőit bizonyos rátartással határozzák meg. Elég nyilvánvaló, hogy ez a módszer alig alkalmas arra, hogy ritka események - például egy mérsékelt szeizmicitású területen egy nagy földrengés bekövetkezésének - lehetőségéről bármit állíthassunk, illetve a szinguláris jelenségeket megfelelően figyelembe vehessük. Szakmai példaként említhető az USA-ban a New Madrid szeizmikus zóna, ahol 1811-ig, az írott történelem híján, semmi történelmi ismeret nem volt egy pusztító rengést produkálni képes szerkezet létezéséről.

Tervezés biztonságra

Az alapvető biztonsági funkciók megvalósítását három konstrukciós elv alkalmazásával lehet elérni:

- Az adott funkciót megvalósító rendszerek többszörözésével, azaz kétszeres, háromszoros, sőt négyszeres redundanciával. Így például a paksi atomerőműben a szükség villamosenergia-ellátást minden blokkon három dízelgenerátor biztosítja, amelyek teljesítménye egyenként is elégséges az üzemzavari energiaszükséglet kielégítésére, és ezen kívül van még biztonsági akkumulátor telep is.
- Az azonos funkciót teljesítő rendszerek egymástól eltérő gyártmányú, kivitelű, működési elvű elemekből való felépítésével, azaz diverzitásával, ezzel csökkentve annak lehetőségét, hogy a redundáns rendszerek egyszerre essenek ki, hiszen az azonos elemek azonos módon és időben hibásodhatnak meg.
- A redundáns biztonsági rendszerek térbeli szétválasztása pedig azt szolgálja, hogy egy tűz vagy más meghibásodást okozó hatás egyszerre ne érhesen több rendszert is.

A külső veszélyekre történő tervezési sajátosságai

Az atomerőművek tervezési alapjában a rendkívül ritka természeti eseményeket és külső hatásokat, körülményeket, és emberi tevékenységből eredő veszélyeket, sőt a különböző veszélyek egymással korrelált vagy egymástól független egyidejű bekövetkezésének lehetőségét is figyelembe veszik. Elég természetes feltételezés például, hogy a szélsőséges hőteher és szélvihar egyidejűleg következik be. Egy földrengés esetén a rezgés jellegű hatás mellett a biztonsági funkciók megvalósulását akadályozhatják a földrengés következtében keletkezett tüzek, vagy egyes térrészek elárasztása, mint újabb veszélyek.

A külső természeti vagy emberi tevékenységből eredő veszélyek különlegesek abban a tekintetben, hogy a biztonságot szolgáló tervezési elvek közül a megsokszorozás alkalmazása nem javít a helyzeten, hiszen – legyen bár több azonos felépítésű rendszer, amelyekből akár egy működőképessége is elég lenne a biztonsági funkció megvalósításához – azokat mind egyaránt károsíthatja például egy földrengés, hiszen az az egész telephelyet érinti. Az azonos funkciót megvalósító redundáns rendszerek diverz kiépítése már hatásosabb, hiszen van esély arra, hogy a különböző gyártmányú, netán működési elvű komponensek nem egyszerre mennek tönkre.

A térbeli szétválasztásnak igen jelentős szerepe van. Az egymástól térben szeparált, netán a telephely különböző pontján lévő biztonsági rendszereket a földrengés egyformán érintheti, de korántsem lesznek azonos körülmények a földrengést követően, ha tűz, elárasztás, vagy szomszédos tárgy rázuhanása szempontjából vizsgáljuk a helyzetüket. Magyarán, van esély arra, hogy ha megőrizték a működőképességüket a földrengés alatt, azután majd a keletkezett egyéb károk, tüzek, elárasztások nem egyformán veszélyeztetik őket, s a funkció megvalósulásához legalább egy rendszer működőképes marad. A térbeli szétválasztásnak különös szerepe van például a repülőgép-rázuhanás, a külső emberi tevékenységből származó veszélyek, mint például közúti szállítási baleset következtében fellépő robbanás esetén. Ezeknek az eseményeknek térben koncentráltabb hatása van, mint a földrengésnek, de bizonyos módon az egész telephelyet érinthetik; bár a lezuhanó repülőgép egy épületet eltalálva ott okoz maximális károsodást, de az ütközés következtében a telehely több pontján is keletkezhetnek tüzek, vagy egyéb, például repülő tárgytól származó károk.

Mivel a külső események egyszerre érinthetik a reaktor üzemzavari hűtőrendszereit, annak integritását, működőképességét és a működéshez szükséges üzemzavari villamosenergia-ellátás rendszerét, egyre inkább teret nyernek a külső energiaellátást nem igénylő eszközök, mint például a gravitációs hűtővíz betáplálás, természetes cirkulációs hűtés, vagy a konténmentből történő hőelvitel természetes léghuzattal.

Van egy tervezési elv, amelyet kötelezően alkalmazva ellensúlyozhatjuk azt, hogy külső veszélyek és azok jellemzői csak korlátozott bizonyossággal határozhatók meg. Konstruktív megoldásokkal és mérnöki tartalékokkal biztosítani kell, hogy hirtelen tönkremenetel ne következessen be, ha a tervezésnél figyelembe vett terheknél némileg nagyobb, a tervezettnél némileg súlyosabb hatások következnenek be. Az, hogy ennek a tartaléknak milyen mértékűnek kell lenni, nem megkötött, egyes megközelítésekben például földrengésre a tervezési alaphoz képest 40 % „túllövés”, nagyobb gyorsulásokat kell az atomerőműnek elviselnie. Ennek minden határon túli növelése egyfelől nem célszerű, másfelől ez sem ad abszolút biztonságot, mivel az elméletileg sem értelmezhető.

Arra az esetre, ha mégis egy fatális következményekkel járó esemény bekövetkezne, és a biztonsági rendszerek nem lennének képesek az alapvető funkciójukat teljesíteni, balesetkezelési és következmény-csökkentő eszközöket és eljárásokat kell kidolgozni, s azok alkalmazását épp úgy kell elsajátíttatni és gyakoroltatni a személyzettel, mint a többi üzemzavar-elhárítási eszközök és eljárások alkalmazását. A balesetelhárítás és a következmény-csökkentés lényege nem más, mint az alapvető funkciók, a reaktivitás

ellenőrzése, a hűtés és a radioaktív közegek visszatartása immáron bármilyen erre bevethető eszközzel. A bevethető eszközök lehetnek előre elkészítettek, mint például a mobil tartalék biztonsági dízelgenerátor a telephelyen, baleseti körülményekre installált hidrogén-rekombinátorok a hidrogén spontán robbanásának elkerülése és a konténment védelme érdekében, a reaktortartály külső hűtésének kialakítása arra az esetre, hogy a tartály visszatartsa az esetleges megolvadt zónát, a konténment nyomás hosszú távú kontrollja a konténment-hűtés és a szűrt lefűvátás megoldásával, stb.

A külső események, akár a természeti, akár pedig az emberi tevékenységből eredőek, rendkívül próbára tehetik az üzemeltető személyzetet, hiszen ezen események következtében egyszerre több meghibásodás lehetséges, rendkívüli állapot lehet az egész erőműben, több-blokkos telephelyet tekintve akár minden blokkon, és blokkonként eltérő módon, sőt a telephely egészén is.

Mi történt a Fukusima Daiichi atomerőműben?

2011. március 11-én hatalmas, kilences magnitúdójú földrengés pattant ki Japán keleti partjától mintegy 150 km-re. Ez a földrengés messze méretében meghaladta a Japán-árok mentén a huszadik században észlelt rengéseket, amelyek mind 8-nál kisebb magnitúdójúak voltak. Ehhez hasonló pusztító rengés 869-ben történt, amelyet követően Sendai várost elpusztította a szökőár. A 2011. március 11-ei nagy rengés egyike az elmúlt száz év legnagyobb földrengéseinek.

A rengés által érintett területen öt atomerőmű telephely van, 15 atomerőművi blokkal, ebből három, az Onagawa, a Fukushima Daiichi és a Fukushima Daini összesen 13 blokkja a földrengés és a szökőár által legjobban érintett partszakaszon. A földrengést követően minden üzemelő reaktor automatikusan leállt és elindult a reaktorok lehűtése. Az Onagawa és a Fukushima Daini erőművek példáját tekintve igazoltnak tűnik, hogy a földrengés hatására biztonságot veszélyeztető kár nem történt. Feltehetően így volt ez a Fukushima Daiichi erőműben is, ahol hat blokk van, amelyek közül három üzemben volt a földrengés előtt, három pedig karbantartáson. A földrengés után mintegy 34 perccel később érte el a szökőár a Fukushima Daiichi atomerőmű telephelyét, és tönkretette a villamos energiát adó dízelgenerátorokat. Ettől a kezdve a véges időtartamra elégséges és korlátozott teljesítményű akkumulátorok álltak rendelkezésre a reaktorok ellenőrzéséhez. Mobil dízelgenerátorok helyszínre szállására, vagy a villamosenergia-ellátás helyreállítására volt szükség egy olyan hátszázgból, ahol rendkívüli állapotok uralkodtak a földrengés és a cunami következtében. A hűtés elvesztése után rendkívüli állapotot hirdettek meg az atomerőműben és elkezdték a környéken lakók kitelepítését. Ezek után lényegében az alábbi eseménysorozat indult el minden blokkon: a hűtés hiányában a hőmérséklet és ezzel együtt a nyomás is megnőtt a reaktorokban, és a reaktor sérülését megelőzendő a reaktorokat lefűvatták a belső, acél konténmentbe. Megjegyezzük, a biztonságra való tervezés elveinek megfelelően kettős konténment van, egy belső acélkonténment és egy külső vasbeton védőépület. Ám egy idő után a belső konténmentekben is veszélyes túlnyomás alakult ki, amelyet a konténment sérülését megakadályozandó lefűvattak. A túlhevült üzemanyag-burkolat oxidációja során keletkező és kiszivárgó hidrogén felrobbant és lerombolta a reaktor feletti csarnokot. Ez az

eseménysorozat következett be mindhárom blokkon, különbség a hidrogénrobbanás helyében, a konténment állapotában van. A reaktorok üzemzavari hűtését ebben a helyzetben csak rendkívüli eszközökkel, tengervíz bejuttatásával lehetett biztosítani, amelyhez a reaktivitás kontrollja érdekében még bórt is keverték. A lefűvátások során, majd a sérüléseken főleg gáznemű aktív anyagok és jód, illetve cézium került a környezetbe.

A pihentető medencékben lévő üzemanyag hűtése és felmelegedése volt a második gond, amivel meg kellett küzdeni. A túlhevülés itt is kibocsátásokhoz vezetett.

A helyzetet súlyosbították a tüzek, amelyek a blokkokon lévő kábelek, s egyéb éghető anyagok kigyulladásából és hidrogénrobbanásokból keletkeztek.

A sérült három reaktorblokk, mint termelő kapacitás elveszett: helyreállíthatatlanok, azokat megfelelően el kell zárni a környezettől. A környezetbe kijutott aktivitás a katasztrófa méreteihez képest és a csernobili katasztrófában kibocsátotthoz képest mérsékelt. Az evakuációnak köszönhetően a lakosság biztonságban van. Bár a környezetben, sőt igen nagy távolságokon is mérhető a japán nukleáris kibocsátásból származó sugárzás, de a mérhetőség még nem jelent egészségi kockázatot, s ennek a kibocsátásnak hazánkban egészségügyi kockázata nincsen.

A helyzet még továbbra is súlyos, a biztonsági rendszerek így a reaktor és a pihentető medencék hűtésének helyreállítása, a kikerült radioaktív közeg visszatartásának megoldása, majd az egész erőmű izolálása, illetve a terület maximális mértékű mentesítése igen bonyolult és még megoldandó feladat. Nap, mint nap várhatók még komplikációk az elhárítási munkálatok során, de ma már biztosak lehetünk abban, hogy a folyamat a reaktorok és a pihentető medencék feletti teljes ellenőrzés megvalósítása felé halad.

Fentiekből látható, hogy az egyik alapvető biztonsági funkció elvesztése, azaz a reaktor, illetve a kiégett üzemanyag hűtésének elvesztése a szükség villamosenergia-ellátás elvesztése következtében milyen súlyos következményekkel, köztük a másik biztonsági funkció, az aktív közegek visszatartása is sérül. Igaz, ehhez nem volt elég a világ egyik ismert legnagyobb földrengése, ehhez egy, a tervben figyelembe vettnél jóval nagyobb szökőár is kellett.

A 2011. március 11-ei földrengés és szökőár egy alapvető ok miatt okozott nukleáris katasztrófát, az árhullám magasságának alábecslése miatt. Nem vonható kétségbe a japán szakemberek szakmai felkészültsége és lelkiismeretessége, sőt azt is tudjuk, hogy a közelmúltban felülvizsgálták a földrengés és szökőár tervezési alapot, de a veszély alábecslését ma a tények sajnálatosan igazolják. Elterjedt az a vélemény, hogy ha valószínűségi módszerrel értékelnék a földrengés- és szökőár-veszélyt, akkor a mostanin egy $\geq 10^{-3}$ /év gyakoriságú eseményként foghatnánk fel, és korántsem lehetne ezt a tervezés alapjának tekinteni, tehát egy 10^{-4} /éves gyakoriságú vagy annál ritkább eseménynek.

Ahhoz, hogy az események úgy alakuljanak, ahogy azok történtek, a terv sajátosságai is hozzájárultak. A terv sajátossága, hogy az üzemzavari villamosenergia-ellátást adó dízelgenerátorok a turbinaépület alsó szintjén helyezkedtek el, így a földrengésálló

dízelgenerátorokat az elárasztás egyszerre veszélyeztette, s feltehetően a villamos kábelnyomvonalakat, sőt a biztonsági hűtővíz szivattyút is. Könnyen belátható, hogy a redundancia mellett a térbeli szétválasztás elengedhetetlen. A dízelgenerátorok szerencsésebb diszpozíciója, és a gépek, kábelnyomvonalak térbeli szeparációja sokat segíthetett volna. Nagy szerencse, hogy a reaktorok hűtéséhez a tengervíz bejuttatására volt megfelelő provizórium. Az üzemzavari körülmények között keletkezett hidrogén robbanóképes koncentrációjának kialakulását ezekben a konténmentekben nitrogén atmoszférával tervezték megoldani. Baleseti körülmények között ez a megoldás elégtelennek bizonyult. Baleseti hidrogén-rekombinátorok, amilyeneket számos atomerőműben, így a paksiban is a közelmúltban balesetkezelési céllal felszereltek, talán segíthettek volna elkerülni hidrogénrobbanást vagy csökkenthették volna annak mértékét. Úgy tűnik, nem volt megfelelő a konténment szűrt leeresztésének konstrukciója sem.

Ma még számos lényeges kérdés van a Fukushima Daiichi atomerőműben történetekkel kapcsolatban, amire a választ aligha lehet kívülállóként megtalálni. Ezek főleg a baleset-elhárítás során a személyzet és az elhárítás irányítói által hozott intézkedések alapjával, tartalmával, időzítésével és az intézkedések megvalósításának problémáival, hatásosságával függenek össze. A végleges értékelés ezek nélkül nem végezhető el, mint ahogy anélkül sem, hogy direkt vagy indirekt jelekből megfejtjük, milyen állapotban volt az erőmű a rengést követően és a szökőár megérkezése előtt, és milyen állapotba került pontosan a szökőár után, illetve később a beavatkozások eredményeképpen.

A paksi atomerőmű földrengésbiztonsága

Jogosan megfogalmazhatjuk a kérdést, mennyire biztonságos a paksi atomerőmű egy súlyos természeti katasztrófa, egy a paksi telephelyen elképzelhető nagy földrengés esetén. Ennek megértéséhez két dolgot kell tisztázni:

1. Milyen földrengésre lehet számítani a paksi telephelyen, illetve milyen földrengésre kell tervezni az atomerőművet?
2. Hogyan lehet az atomerőművet földrengésbiztossá tenni, és ehhez mit kellett tenni a paksi atomerőműben?

Mekkora földrengésre kell tervezni a paksi atomerőművet?

A magyarországi követelmények szerint az atomerőműveket a tízezer év alatt előforduló legnagyobb földrengés hatásaira, az általa kiváltott telephelyi gyorsulásokra kell tervezni. Megjegyezzük, a nem nukleáris létesítmények esetében a tervezés a 475 év alatt elképzelhető legnagyobb földrengésre történik.

Az olyan területeken, mint a Pannon-medence, ahol a szeizmicitás mérsékelt, és az erre vonatkozó ismereteink is bizonytalanabbak, valószínűségi módszert alkalmaznak, alkalmaztunk a telephely földrengés-veszélyeztetettségének meghatározására, amely módszer épp a bizonytalanságok megfelelő figyelembe vételére alkalmas. A valószínűségi módszer alkalmazása során meghatározzák a rengések forrászónáit, amelyek jellemzésére az ott elképzelhető rengések magnitúdójának valószínűségi eloszlásfüggvényét használják. Így a magnitúdógyakoriság-eloszlás, illetve az adott zónában elképzelhető legnagyobb magnitúdó

fontos adat az elemzésekben. A helyi megrázottság azonban nem egy konkrét helyen kipattanó, adott méretű rengés, hanem minden lehetséges szerkezeten és forrás-zónában elképzelhető rengés figyelembevételével adódik. Így történt a földrengés veszély, illetve a tízezer évenként előforduló legnagyobb megrázottság meghatározása a paksi telephelyre is.

Az atomerőmű tervezéséhez a mértékadó vagy biztonsági földrengést jellemezni kell. A földrengés erősségének jellemzésére különféle skálákat használnak. A legelterjedtebb a Richter-skála, amely a rengés magnitúdóját adja meg és a rengésben felszabaduló energiával arányos. Az érzékelhető rengések magnitúdója 2-nél nagyobb. A történelmi feljegyzésekből és a mérésekből ismert magyarországi földrengések magnitúdója kisebb, mint 6,6. A legnagyobb az érmelléki rengés volt, a sokak által megélt berhidai rengés magnitúdója $\approx 4,9$ volt. Használnak még intenzitás-skálákat, amelyek a földrengés által okozott károk szerint kategorizálnak, általában egy 12 fokozatú skálán. Az intenzitás-skálán a fokozatok a tapasztalt károk fenomenologikus leírása alapján határozhatók meg, például megbillenek a kémények, téglafalak megrepednek.

A tervezéshez azonban olyan input kell, amely a kárt okozó közvetlen hatást jellemzi. Ez pedig a talajmozgás, annak is a gyorsulása, sebessége, illetve az elmozdulás. A tervezés során a talajgyorsulást (legtöbbször annak vízszintes összetevőjét) szokták inputként használni, amelyet a gravitációs gyorsulás (g) hányadában adnak meg.

Mivel a mérnöki munkákban használt, egy konkrét telephelyen feltételezhető talajgyorsulás és a területet megrázó, valahol kipattanó rengés magnitúdója között csak minőségi összefüggés van, nem szakszerű az olyan kijelentés, hogy az atomerőművet valamilyen magnitúdójú földrengésre tervezték, s főleg nem méretezték, ámbar a közbeszédben és a médiában ezeket a kifejezéseket használják.

Bár a tervezés inputja a maximális vízszintes gyorsulás, abból, hogy egy földrengés során milyen maximális vízszintes gyorsulás alakul ki, önmagában nem ítéltető meg az, hogy a létesítmények megsérülnek-e vagy sem. A kilences magnitúdójú Tohoku földrengés által a Honshu sziget partvidékén kiváltott átlagos vízszintes gyorsulás $0,3-0,35g$ lehetett. Ez az érintett 14 blokk esetében a tervezési alaphoz figyelembe vett biztonsági földrengésnél némileg nagyobb megrázottságot jelent.

A Niigataken Chuetsu-Oki földrengés csak 6,6-6,8 magnitúdójú volt, de a Kashiwazaki-Kariwa atomerőműnél $\approx 0,68g$ maximális vízszintes gyorsulást okozott a reaktorépületek alaplemezen. Ez több mint kétszerese volt az ottani blokkok tervezési alapját képező rengés gyorsulásának. A fenti két esetben a talajmozgás által kiváltott igénybevételeket a nukleáris szabványok szerint tervezett berendezések és szerkezetek sérülés nélkül elviselték. A kárt jobban jellemzi például a kumulatív abszolút sebesség, amelynek értéke nem csak a gyorsulás-időfüggvény amplitúdójától, hanem az erős rengés időtartamától is függ. Ez a mostani, Nagy Tohoku rengés esetében mintegy $10 g \text{ sec}$ értékű lehetett, míg a Niigataken Chuetsu-Oki földrengésnél a Kashiwazaki-Kariwa atomerőmű telephelyén legfeljebb $2 g \text{ sec}$.

A tapasztalat azt mutatja, hogy a rezgés jellegű hatásra való tervezés nem műszaki, hanem beruházási költség kérdése.

Nincsenek azonban megbízható műszaki megoldások az olyan esetekre, ha a földrengés a felszínen is tapasztalható elvetődéshez, elcsúszáshoz vezet. Ez felveti a következő kérdést.

Lehet-e törésvonal a telephely környezetében?

A fentiekből egyértelmű, hogy csak az olyan törésvonal jelent a telephely kiválasztásánál alkalmasságot kizáró körülményt, amely képes felszínre kifutó elvetődést okozni. A telephelyet nem szabad kijelölni az ilyen szerkezetek felett, a minimális távolságnak legalább 8-10 km-nek kell lenni. Azt, hogy egy szerkezet képes-e felszínre kifutó elvetődést okozni, azt a nagy aktivitású területeken mintegy tízezer év, míg a kis aktivitású területeken $\approx 2,5$ millió év (földtörténeti negyedkor) alatti aktivitás alapján állapítható meg.

Felmerül a kérdés, hogy veszélyesek-e a paksi telephely közelében lévő törések. Minden aktív törésvonalra érvényes az, hogy talajmozgást okozhat a rajta kipattanó földrengés. Ezt a hatást figyelembe vettük az atomerőmű telephelyén várható megrázottság meghatározásánál. A Pannon-medence töredezett, de az adott földtani körülmények között általában nem tud akkora rugalmas energia felhalmozódni, hogy az a felszínen tapasztalható relatív elmozdulást okozzon, ha az egy földrengés formájában felszabadul. Ezért az ilyen törésvonalak, s a paksi telephely közelében lévők sem zárják ki a telephely alkalmasságát.

A paksi földrengés-biztonsági program keretében kiépült az atomerőműben és annak ötven kilométeres körzetében egy mikroszeizmikus megfigyelő hálózat, amely a telephely és lényegében az egész régió szeizmikus aktivitását monitorozza. Nem szabad azonban azt hinni, hogy a blokkokon lévő szeizmikus műszerezés vagy akár a mikroszeizmikus hálózat arra szolgálhat, hogy földrengéseket előre jelezzenek.

Mit okozhat még a földrengés?

A földrengésnek lehetnek egyéb következményei is a talajmozgáson kívül. Ilyen volt a szökőár Japánban. Erről a paksi és dunai körülmények között nincs értelme beszélni. Van azonban más jelenség is, mint például a talajfolyósodás, ami abban nyilvánul meg, hogy a rezgés hatására a vízzel telített laza talajok elveszítik a nyírószilárdságukat, magyarán, folyadékszerűen viselkednek. Ez az alapozás és az épület stabilitásának elvesztését, illetve a jelenség után épületsüllyedést okoz. A paksi atomerőmű esetében a talajfolyósodás tervezésen túli esemény, előfordulás valószínűsége kisebb, mint $10^{-4}/\text{év}$.

A földrengés-biztonsági program

A paksi atomerőmű telephelyét a hatvanas években a történelmi feljegyzések és a műszeres mérések alapján az ország egyik legkisebb veszélyeztetettségű területén jelölték ki, s ennek alapján, illetve az 1970-es években érvényes földrengés-biztonsági követelmények figyelembe vételével tervezték és építették. A külső környezeti hatásokkal összefüggő biztonsági követelmények a nyolcvanas években radikálisan megváltoztak, szigorúbbak lettek, így a történelmi feljegyzésekből és műszeres regisztrátumokból meghatározható intenzitás alapján származtatott gyorsulás értéknél jóval kisebb valószínűségű, $10^{-4}/\text{év}$ meghaladási valószínűséggel jellemezhető megrázottság vált a tervezés alapjává. Arra, hogy ennek milyen súlyos következményei lehetnek, a nyolcvanas évek második felében a paksi

telephelyen végzett geológiai, szeizmológiai vizsgálatok rámutattak. Nyilvánvalóvá vált, hogy a tervezés alapjaként figyelembe veendő maximális vízszintes gyorsulásérték legalább tízszer nagyobb, mint amit a tervezésnél számításba vettek.

A probléma értékelését a paksi atomerőmű első korszerű módszerekkel végzett, szisztematikus biztonsági elemzése tartalmazta 1993-ban. A telephely szeizmicitásának előzetes értékelése és a biztonsági probléma elemzése alapján az atomerőmű vezetése – a Nemzetközi Atomenergia Ügynökség szakértő támogatásával és az Országos Atomenergia Hivatal felügyelete mellett – egy átfogó biztonságnövelő projektet indított a létesítmény földrengésbiztonságának növelése céljából.

A követelmények értelmezése és teljesítése azt jelentette, hogy:

- a telephelyi földrengésveszély elemzését el kellett végezni, és meg kellett határozni a 10^{-4} /év meghaladási valószínűségű, biztonsági földrengés jellemzőit; ez a paksi telephely esetében 0,25g maximális vízszintes gyorsulással jellemezhető;
- erre az új tervezési alapra el kellett végezni az atomerőmű ellenőrzését majd a megerősítések tervezését;
- végre kellett hajtani az atomerőmű teljes körű minősítését/megerősítését úgy, hogy még a 10000 évenként egyszer előforduló rengés esetén is a reaktor leálljon, lehűthető és tartósan hűthető maradjon, és az aktivitás visszatartása biztosított legyen.

A program két szakaszban valósult meg. A könnyen végrehajtható, legsürgősebb megerősítések még egy előzetes, felülbecsült földrengés-inputra 1994-1995-ben megtörténtek. Ekkor a kábeltálcák, a villamos- és irányítástechnikai keretek, szekrények, az akkumulátor-telepek rögzítésének ellenőrzése, illetve a főépület különböző helyiségeit elválasztó, nem szerkezeti válaszfalak állékonyságának ellenőrzése, illetve mindezek megerősítésének megtervezése és kivitelezése történt meg. A komoly előkészítést igénylő megerősítések tervezése és kivitelezése 1998-ban kezdődött és 2002 végéig befejeződött. Ennek jellemzésére elég egy számot ismertetni: több mint 2500 tonna acélszerkezetet építettek be az erőmű megerősítésére.

A feladat egyedülálló komplexitású volt, hiszen egy lényegében földrengésre nem tervezett erőművet kellett egy jelentős megrázottságra megerősíteni és minősíteni.

A feladat megvalósíthatósága érdekében a szerkezetek és a rendszerek dinamikai számításának módszerét és a minősítési eljárást azok biztonsági és földrengés-biztonsági osztálya szerint differenciáltuk. Kombináltuk az atomerőmű tervezéshez előírt, szabványos módszereket és az újraminősítéshez kidolgozott elemzési és empirikus minősítési módszertant. A módszertan kiválasztását egyedülálló robbantásos kísérletekkel, próbaszámításokkal, numerikus kísérletekkel alapoztuk meg.

A program végén valószínűségi biztonsági elemzés igazolta, hogy az elvégzett intézkedések a biztonság „szükséges és elégséges” szintjét eredményezték. A 2007-ben elvégzett időszakos biztonsági felülvizsgálat pedig megerősítette, hogy a földrengésbiztonság megvalósítása megfelel az aktuális nemzeti és a nemzetközi normáknak.

Ez a projekt a paksi atomerőmű legnagyobb, s másfél évtizedig tartó biztonságnövelő programja lett, amelynek csak a megerősítésekre fordított költsége több mint 200 millió USD-t tett ki.

Néhány megerősítésre mutatnak példát az 1-3. ábrák a gőzfejlesztők alatt, a reaktorcsarnokban és a lokalizációs tornyoknál.



1. ábra. Viszkózus lengéscsillapítók a gőzfejlesztők alatt



2. ábra: Hosszirányú megerősítések a reaktorcsarnokban



3. ábra. Hídszerkezet a lokalizációs tornyok között a reaktorcsarnok szerkezetének megerősítésére

Mi történik az atomeróműben földrengés esetén?

A program keretében kidolgozták az üzemeltető személyzet számára azt az üzemzavar-elhárítási utasítás rendszert, ami meghatározza a teendőket földrengés esetén. Az ilyen helyzet kezelése a személyzet rendszeres képzésének ugyanúgy része, mint bármely más rendkívüli eseményé.

Földrengés esetén, a paksi atomerómű a védelmi működéseknek köszönhetően leáll, ha bármely rendszer sérül, de rendelkezésre állnak azok a megerősített technológiai rendszerek, amelyek segítségével az atomerómű biztonságos állapotban tartható. Az ekkor szükséges technológiai műveleteket, a személyzet tevékenységét, illetve az atomerómű földrengést követő állapotának értékelését speciális műszerezés, gyorsulásérzékelők segítik. A gyorsulásérzékelők csupán kiegészítő műszerezésnek tekinthetők, hiszen a blokkokat, mint egy bonyolult idegrendszer, behálózzák a mérések és védelmek, amelyek a megfelelő védelmi működések indítják, ha bármely, a biztonság szempontjából fontos rendszer sérülne.

Földrengés esetén a talplemezen elhelyezett detektorok 0,05g vízszintes irányú gyorsulásnál jelet adnak a vezénylőkbe, illetve indítják az izoláló armatúrák zárását. Ez a védelmi működés még nem okozza a blokkok leállítását, de azokat a rendszereket kizárja, amelyek nem lettek földrengésállóvá téve, mert nincs az adott esetben biztonsági funkciójuk. A blokkot a minden biztonsági funkcióval rendelkező rendszer működőképességét felülegyelő mérés- és irányítástechnikai, illetve védelmi rendszerek leállítják, ha a funkció sérül. Így például a buborékoltató kondenzátorban egy földrengés hatására fellépő szintingadozás, vagy gőzfejlesztő szintingadozás is, ami mellett még semmilyen sérülésnek nem kell bekövetkeznie. Egy földrengés esetén a blokk így vagy leáll, vagy ha nincs semmilyen zavar vagy funkcióvesztés, tovább üzemel. Arról, hogy a blokkokat le kell-e állítani egy (kis) földrengés után, ha egyébként védelmi működés nem volt, a szabad felszínen (udvartéren) lévő gyorsulásérzékelő jelének feldolgozása alapján kell dönteni. Erre meghatározott eljárás és kritériumok vannak. Abban az esetben, ha a kritérium alapján vagy védelmi működés következtében a blokk leáll, az állapot függvényében kell az üzemzavar-elhárítást és az állapotellenőrző bejárásokat szervezni és végrehajtani. Az állapot értékeléséhez a blokkok kritikus helyein gyorsulás-regisztrálók vannak. Ez a koncepció a világ más, szeizmikusan mérsékelten aktív területein lévő atomeróművek eljárásával azonos.

Összegezve: A paksi atomerómű földrengésbiztonságát a tízezer évenként feltételezhető legnagyobb földrengésre való megerősítés és minősítés révén, a földrengés esetén követendő eljárások kidolgozásával és a személyzet erre történő kiképzésével a mai követelmények szerint biztosítjuk.

Az atomerómű biztonsága nem statikus, az folyamatos kritika és megújulás tárgya. A Fukushima Daiichi atomerómű katasztrófája bizonyára több olyan tanulsággal is szolgál majd, amelyek feldolgozásával a paksi atomerómű földrengésbiztonsága is tovább fokozható.

Richter-skála

A Richter-skála a földrengés erősségének műszeres megfigyelésen alapuló mérőszámát (a Richter-magnitúdót, vagy más szóval a méretet) adja meg. A magnitúdó a földrengéskor a fészekben felszabaduló energia logaritmusával arányos.

Eredetileg a Richter-magnitúdót egy képlettel egy bizonyos típusú szeizmográf által jelzett legnagyobb kitérésből és az epicentrumtól való távolságából határozzák meg. (Maga az érték a földrengés helyétől 100 km távolságban lévő Wood-Anderson típusú szeizmográf által mikrométerben mért legnagyobb kitérés tízes alapú logaritmus.) Ma már számos más magnitúdó-definíció létezik, amelyek között egy bizonyos földrengés méretét illetően némi eltérés is van.

Ebből értelemszerűen következik: a skála felfelé nyitott, vagyis nincs formális maximuma, bár a földrengések hatásmechanizmusa és a Föld szilárd kérgének mechanikai jellemzői alapján gyakorlatilag 10 feletti értékek nem fordulnak elő. Másik fontos jellemzője, hogy a skála két fokozata között a kipattanó energiában kb. 32-szeres különbség van.

Nagy földrengések

Dátum	Hely	Magnitúdó
1960.05.22.	Chile	9,5
1964.03.28.	Prince William, Dél-Alaszka	9,2
2004.12.26.	Szumátra, Andaman szigetek	9,1
2011.03.11.	Honshu, Japán	9,0
1952.11.04.	Kamesatka, Oroszország	9,0
1868.08.13.	Arica, Peru (most Chile)	9,0
1700.01.26.	Cascadia-zóna (Egyesült Államok, Kanada)	9,0

(Forrás: U.S. Geological Survey honlap)