

A nukleáris biztonság érdekében fontos, hogy az atomerőművek üzemeltetése minden tekintetben megfelelő legyen. Jelen cikkben azokat az alapvető atomerőmű-tervezési és -létesítési szempontokat vizsgálom meg, amelyekre a jogi szabályozás is kiemelt figyelmet fordít. Az atomerőművek kiemelten fontos és veszélyes üzemeknek minősülnek, ezért a veszélyes üzemekre vonatkozó szabályozókon túl további speciális kritériumoknak kell megfelelniük már a tervezési fázisban is. A jól lefektetett alapok hivatottak szavatolni a későbbi nukleáris biztonságot.

Kulcsszavak: atomerőmű, nukleáris biztonság, veszélyes üzem, villamos energia

Bevezetés

Napjainkra a villamos energia a mindennapi élet nélkülözhetetlen elemévé vált, viszont nagy mennyiségben nem vagyunk képesek tárolni, ezért folyamatos előállításra van szükség. A villamos energia könnyen előállítható és sokoldalúan felhasználható a háztartásokban és az iparban egyaránt, továbbá a mai infokommunikációs világban nélkülözhetetlen mind a magán-, mind az üzleti életben. Magyarországon az atomerőmű adja a megtermelt villamos energia legnagyobb részét, hiszen az ország áramfelhasználásának mintegy 50%-át biztosítja.

A világ biztonságos működéséhez hozzátartozik, hogy minden olyan folyamatot, amely veszélyes lehet a társadalmunkra és a környezetünkre, besorolunk valamilyen ellenőrzési irányelv alá annak érdekében, hogy a veszélyesség mértékét és a protokollokat lehesse mihez viszonyítani. Ebből adódik, hogy az irányelvek és egyezményes szintek támogatást adnak a technológiai, ipari rendszerek és folyamatok biztonságos létesítéséhez és üzemeltetéséhez. [1] Az atomerőművek építése és üzemeltetése olyan követelményeken alapul, melyek betartásával már az atomerőmű tervezési folyamatai során többszintű védelem valósul meg, ami aztán biztosítja mind az építkezés, mind pedig a későbbi üzemeltetés során a biztonságos működés feltételeit. Az atomerőművek minden stádiumában a kockázat megítélésének egyik legjelentősebb szempontja az, hogy mértéke mennyiben felel meg a nemzetközi biztonsági elvárásoknak.

A Paksi Atomerőművet alapul véve, a kockázat mértékét illetően jelenleg, az atomerőmű négy blokkjának a kockázati (biztonsági) szintje közel azonosnak tekinthető. A blokkok kiegyenlített műszaki konstrukciójúak, azaz nincs olyan berendezés, rendszer, illetve tényező, amely aránytalan mértékben járulna hozzá az erőmű kockázatához.

Az atomerőmű biztonsága azt jelenti, hogy különböző intézkedésekkel kizártuk, hogy a sugárzás az emberi életet, a mostani és a jövő nemzedékek egészségét, a környezetet és az anyagi javakat az elfogadott kockázati szint felett veszélyeztesse. Hogy ezen elvek tarthatók legyenek, feleljenek meg a következő feltételeknek:

- a reaktorban keletkezett hőt minden esetben el kell tudni szállítani;
- a leállított blokkon is biztosítani kell a kazetták hűtését;
- a kiégett üzemanyagot is hűteni kell;
- meg kell gátolni a radioaktív anyagok környezetbe kerülését (mérnöki gátak);
- a láncreakció gyors leállítására eszközökkel kell rendelkezni (szabályozó és biztonságvédelmi rudak);
- üzemzavar esetén is biztosítani kell a hűtést. [2]

Az atomreaktorokban az alapvető biztonsági funkciók megvalósítását az úgynevezett mérnöki gátakra alapozták. Ennek értelmében a lakosság és környezete védelmét a radioaktív anyagokkal szemben egy esetleges baleseti szituáció esetén egy szivárgásmentes gátakból álló sorozat biztosítja. Az első gát az üzemanyag pálca burkolata, amely ideális esetben megakadályozza a maghasadás során keletkező radioaktív izotópok kijutását a hűtőközegbe. A pálca esetleges tömörtelensége miatt a hűtőközegbe került, illetve az egyéb okokból felaktiválódott hűtőközezből a radioaktív szennyeződés kijutását második gátként a primer körű hűtőkör berendezéseinek nagy nyomás elviselésére tervezett fala biztosítja. A harmadik mérnöki gát a primer körű főberendezéseket magába foglaló helyiségek és a lokalizációs torony által alkotott hermetikus tér fala, amelynek elsődleges feladata a maximális tervezési üzemzavar során a hermetikus térbe kikerült radioaktív szennyező anyagok környezetbe való kijutásának megakadályozása. Mindezen gátakat már az atomerőmű tervezési periódusában mérnöki pontossággal át kell gondolni, hiszen az ehhez tartozó rendszerek tervezése és kivitelezése további biztonsági szempontok megvalósulását veti fel, amelyek által lesz a teljes kivitelezés a végén egy jól működő, biztonságos egység. [3]

A biztonság továbbfejlesztése és a kockázati tényezők csökkentése a mélységben tagolt védelem elvének tervezésére és alkalmazására épül. Műszaki biztonsági célkitűzés, hogy az üzemzavarok bekövetkezése megakadályozható legyen, a létesítménynél figyelembe vett valamennyi üzemzavar esetén a lehetséges következmények az előírt mértékeken belül legyenek, valamint hogy a jelentős következményekkel járó súlyos balesetek valószínűsége a lehető legalacsonyabb legyen. Ennek biztosítása érdekében az atomerőmű biztonsági filozófiáját meghatározó alapvető elv a mélységben tagolt védelem alkalmazása.

A mélységben tagolt védelem olyan alkalmazott műszaki megoldások és intézkedések egymásra épülő összessége, amelyben bármelyik hatástalansága esetén is megvalósul a kockázatcsökkentett biztonsági célkitűzés. Ez azt jelenti, hogy az egész erőművet úgy kell megtervezni, hogy belső hibákkal, valamint a lehetséges külső hatásokkal szembeni ellenállása minél nagyobb legyen, illetve a belső hibák minél kisebb gyakorisággal forduljanak elő, és a műszaki megoldások megfelelő alkalmazása minél nagyobb mértékben kizárja az emberi hiba lehetőségét. A létesítés során biztosítani kell a magas szintű kivitelezési minőséget, az üzemeltetés során pedig törekedni kell a normál üzemi állapottól való eltérés megakadályozására. [4]

A magas szintű tervezés, kivitelezés és üzemeltetés, a folyamatos ellenőrzés, tesztelés ellenére sem zárhatók ki olyan események (pl. belső anyaghiba miatti csőtörés, természeti katasztrófa stb.), amelyek üzemzavarhoz vagy balesethez vezethetnek. Ezért olyan biztonsági rendszerekre és üzemzavar-elhárítási utasításokra van szükség, amelyek segítségével kezelni lehet a várható helyzetet. A biztonsági rendszereket úgy indokolt megtervezni, hogy a méretezési üzemzavarok esetén az aktív zóna épsége megmaradjon.

Mindemellett fel kell készülni a nagyon csekély valószínűséggel bekövetkező, de súlyos következményekkel járó balesetek kezelésére is. Ilyen esetekben a biztonsági rendszerek már nem nyújtanak megfelelő védelmet, előfordulhat a reaktorok számára legveszélyesebb szituáció, a zónaolvadás, amely magas radioaktív kibocsátással járhat. Ezen események bekövetkezésének kockázati tényezőjét a lehető legkisebbre kell csökkenteni olyan rendszerek beiktatásával, amelyek a zónaolvadás mértékét csökkentik vagy legalábbis késleltetik, időt hagyva egyéb intézkedésekre (pl. lakosság kitelepítése).

Az atomerőművek tervezésének és létesítésének alapvető szabályozói

Az atomerőművekre vonatkozó jogi szabályozás vizsgálata

A villamos energia atomerőmű általi megtermeléséhez olyan nukleáris létesítményt kell üzembe helyezni, amely megfelel a jogi szabályozók követelményeinek és a józan ész dikta, alaposan végiggondolt biztonsági intézkedéseknek.

Az első alapvető törvényi szabályozás az atomenergiáról szóló 1996. évi CXVI. törvény és a hozzá kapcsolódó nukleáris létesítmények *nukleáris biztonsági követelményeiről és az ezzel összefüggő hatósági tevékenységről* szóló 118/2011. (VII. 11.) Korm. rendelet.

A törvény és a hozzá kapcsolódó rendelet célja, hogy a Magyarország területén létesíteni kívánt nukleáris üzemek rendszereinek és rendszerlemeinek tervezése, létesítése, üzemeltetése és leszerelése olyan keretek között maradjon, amelyek révén a nukleáris biz-

tonság mindenkor megvalósítható, ugyanakkor lefekteti azokat az irányelveket is, amelyek a nem kívánt üzemi események során megoldásként szolgálnak az üzem helyreállítása, továbbá az emberi élet, az anyagi javak és a környezet védelme érdekében.

Az atomerőmű-létesítés biztonsági célkitűzései

Számos kritériumnak kell megfelelnie egy atomerőmű létesítésének már a megelőző, tervezési periódusban is. A legalapvetőbb elv az, hogy bár súlyosan károsíthatja az ember és az élővilág egészségét, illetve a természeti környezetet, de ugyanakkor az atomenergia biztonságos és békés célú alkalmazása a tudományos kutatások számos területén és az emberiség életfeltételeinek javítása érdekében olyan előnyökkel jár, amelyek kiaknázása a megfelelő biztonsági feltételek betartásával a legkedvezőbb eredményeket hozza. Az atomerőmű-tervezés első célkitűzése tehát megállapítani azt, hogy miként lehet olyan optimális kivitelezési és üzemeltetési rendszereket kiépíteni, amelyek maradéktalanul garantálják a biztonsági irányelvek teljesülését, és olyan elfogadható határértékek belül tartanak minden lehetséges következményt, hogy az energiatermelés gazdaságos legyen. [5]

Ezek teljesüléséhez az atomerőmű nukleáris biztonság szempontjából fontos rendszereinek és rendszerelemeinek igazodniuk kell a Nukleáris Biztonsági Szabályzatokban [6] foglaltakhoz, továbbá minden biztonsági tervezést a nukleáris létesítmény teljes életciklusára kell vonatkoztatni, és alapvető fontosságú a biztonsági funkciók teljesülésének igazolása. A létesítményt úgy kell megtervezni, hogy a nukleáris üzemeltetésből származó veszélyforrások kezelése mellett a biztonsági konstrukció aktív szabályozó és biztonsági rendszer vagy rendszerelem beavatkozása nélkül is biztosítsa az esetlegesen veszélyforrásokhoz vezető folyamatok megelőzését, vagy a veszélyforrások hatásaival szembeni védelmet. A tervezés során érdemes felhasználni minden elérhető megelőző tervezési tapasztalatot, amelyekben a biztonsági funkciókat ellátó rendszereket hasonló körülmények között már kipróbálták, és igazodni azok bevált konstrukciók megoldásaihoz.

Alapvető tervezési állapot

Az atomerőművek tervezéséhez meg kell vizsgálni a létesítmény alapvető normál üzemű működését, figyelembe véve minden ettől eltérő üzemállapotot generáló eseményt. A tervezési alaptól (továbbiakban: TA) eltérő üzemállapotokra vezető eseményeket azok gyakorisága alapján tudjuk rendezni úgy, hogy a bekövetkezésének valószínűségét határozzuk meg éves viszonylatban. [6]

1. táblázat. Atomerőmű blokkjának üzemállapota [4]

Üzemállapot	Megnevezés	Esemény gyakorisága (f [1/év])
TA1	Normál üzem	–
TA2	Várható üzemi események	$f \geq 10^{-2}$
TA3	Kis gyakoriságú tervezési üzemzavarok	$10^{-2} > f \geq 10^{-4}$
TA4	Nagyon kis gyakoriságú tervezési üzemzavarok	$10^{-4} > f \geq 10^{-5}$

Az atomerőmű-tervezéshez meg kell határozni minden olyan feltételezhető eseményt, amely a létesítmény és a környezet biztonságát veszélyeztetheti. A tervezés során a nukleáris biztonság szempontjából meg kell határozni a tervezési alap üzemállapotokra vonatkozó két kiterjesztett (továbbiakban: TAK) [6] kategóriáját:

- TAK1: az üzemzavar során olyan komplex hiba lép fel, amely nem jár az aktív zónában és a pihentetőmedencében található üzemanyag olvadásával;
- TAK2: jelentős üzemanyag-olvadással járó súlyos baleset.

Az atomerőművekre vonatkozó tervezési alap kiterjesztése olyan átmenetet képez a tervezési alapba tartozó, nagy megbízhatósággal kontrollált folyamatok és a jelentős külső, környezeti hatással járó, tervezett eszközökkel már nem kontrollálható, nagy kibocsátással járó súlyos balesetek között, amely nem része a tervezési alapnak, de nem tartozik a gyakorlatilag kizárható kategóriába.

Ahhoz, hogy a normál állapotú üzemi tevékenység tartható legyen, meg kell határozni minden lehetséges külső vagy belső veszélyeztető tényezőt, ideértve az időjárási, környezeti, emberi és technológiai hibafaktorokat mint lehetséges veszélyeztető tényezőket, hogy minden reális kombinációval számolva elkerülhetők legyenek a TA4 vagy TAK üzemállapotok. A tervezésnek azonban ki kell terjednie arra is, hogy az eltérő üzemállapotokra olyan eljárásokat dolgozzon ki, amelyek az észszerűen elérhető legrövidebb idő alatt ellenőrzött, biztonságos, esetlegesen leállított üzemállapotot eredményezzenek.

A tervezésnek ki kell terjednie a legfontosabb veszélyeztető eseményekre:

- teljes feszültségvesztés;
- a TA2 üzemállapot során szükséges reaktorleállítási funkciót ellátó rendszerek elvesztése;
- gőzvezetéktrés a gőzfejlesztő hőátadó felületének járulékos sérülésével;
- a konténment (hermetikus tér) megkerülésével közvetlen környezeti kibocsátáshoz vezető események;
- teljes tápvízvesztés;

- hűtőközegvesztés valamelyik zónaüzemzavari hűtőrendszer típus teljes elvesztésével;
- szabályozatlan szintcsökkenés a részlegesen feltöltött hurok melletti természetes cirkulációs üzemállapot vagy átrakás során;
- az alapvető biztonsági funkciót ellátó berendezések egy vagy több segédrendszerének teljes elvesztése;
- az aktív zóna hűtésének elvesztése a maradványhő elvezetése során;
- a pihentetőmedence hűtésének elvesztése;
- ellenőrizetlen bórhiágulás;
- gőzfejlesztő több hőátadó csövének egyidejű törése;
- egy feltételezett kezdeti esemény kezeléséhez hosszú távon szükséges biztonsági rendszerek elvesztése;
- a végső hőelnyelő elvesztése;
- üzemanyag-olvadással járó egyéb események.

A TAK eseményekre vonatkozó terveknek észszerű megoldást és intézkedési folyamatot kell szolgáltatniuk a súlyos balesetek megelőzésére és a folyamat eredményességétől függetlenül tartalmazniuk kell a bekövetkezett súlyos baleset kezelésére vonatkozó eljárásokat is. Az atomerőmű tervezésénél a normál üzemállapot fenntartásához és a felsorolt események elkerüléséhez érdemes a gyakorlati kizárhatóság elvét alkalmazni a feltételezésekkel és valószínűsítésekkel szemben, azaz a fizikai lehetetlenségen alapuló tervezési struktúrát követni.

A nukleáris biztonság szempontjából fontos rendszerek és rendszerelemek tervezése

A nukleáris biztonság szempontjából fontos rendszer és rendszerelem tervezése során figyelmet kell fordítani a rendszerek egymástól elválasztott és független működésének megvalósulására, hiszen az egyes biztonsági rendszerek meghibásodása nem okozhatja más rendszerek vagy rendszerelemek meghibásodását. Ezenfelül a meghibásodás lehetőségének okán a tervezésnek ki kell terjednie arra, hogy a meghibásodott rendszerek funkcióit más független rendszerek átvegyék a veszélyhelyzet és a normáltól eltérő üzemállapot elkerülése érdekében. Minden biztonsági rendszer tervezésénél az egyes feltételezett kezdeti események elemzésénél fel kell tételezni egy véletlen hibát, és ezzel együtt tervezni a biztonsági kritériumok teljesülését. Fontos, hogy ezen tervezés a lehető legsúlyosabb következményt eredményező meghibásodást vegye alapul, beleértve az emberi hibákat. [6]

A normál üzemi rendszerek villamosenergia-ellátása és vezérlése független legyen a biztonsági rendszerektől. Alkalmazni kell a fizikai elválasztás elvét is, amely biztosítja,

hogyan meghibásodás esetén sem a biztonsági rendszerekben, sem az üzemi működés kiszolgálására hivatott rendszerekben – beleértve a segédrendszereket is – ne keletkezhesen kár.

A biztonsági rendszerelemeknek aktív és passzív beavatkozó funkciókkal kell rendelkezniük, és olyan konstrukciójúak és működésűek legyenek, hogy vezérlésükben az üzemi személynél a kiépített irányítási helyekről se tudja megakadályozni az automatikus működést. [7]

Minden rendszer és rendszerelem a lehető legkevésbé lehet felaktiválódásra hajlamos, és anyagszerkezeti tulajdonságaiból fakadóan fontos, hogy a rendeltetési helyén maradjon.

Az atomerőművek vízüzemi rendszerek, és mint alapvető üzemi működésű rendszer-elemek, tervezésük során a leglényegesebb, hogy a primer, szekunder, valamint segéd- és kiszolgáló vízrendszerek megfeleljenek és összhangban legyenek a biztonsági funkciókat ellátó rendszerekkel. A víz kémiai összetétele, annak a szerkezetekre gyakorolt hatása és a korróziós folyamatokkal járó hatások ellenére is a közegben lévő radioaktív anyagok mennyiségének mindig az észszerűen elérhető legalacsonyabb szinten kell maradnia. Biztonsági rendszernek számítanak a korrózió eltávolítására tervezett rendszerek és a víztisztító rendszerek is, valamint a megtisztított és eltávolított radioaktív hulladékok kezelésére szolgáló rendszerek is, melyekben a tervezés során szükséges kidolgozni azokat a folyamatokat, melyek során a radioaktív hulladék mennyisége és aktivitása a lehető legalacsonyabb marad.

A nukleáris biztonság szempontjából fontos rendszerek, rendszerelemek tervezésekor vizsgálni kell a várható öregedési folyamatokat és azok hatásait. Az öregedés és a hatások nem minden esetben mutathatók ki egyszerűen, így ezekre a vizsgálatokra külön figyelmet kell fordítani. A tervezés során figyelembe kell venni, hogy az egyes rendszerek és rendszerelemek vizsgálatának és ellenőrzésének fizikai korlátai lehetnek. Amennyiben a szerkezet takarása, lefedettsége vagy egyéb korlátozott hozzáférése nem teszi lehetővé a maradéktalan ellenőrzést, akkor ennek ellensúlyozására speciális tervezési megoldásokat indokolt alkalmazni. Előfordulhat olyan rendszerelem is, melynek működése a tervezett ideig ellenőrzés és felügyelet nélkül is fenntartható, de ezen rendszerek felhasználásának szükségességét megfelelő igazolással kell alátámasztani már a tervezés során.

Az atomerőművek egyik legalapvetőbb biztonsági eleme a létesítmény épületeinek és szerkezeteinek stabilitása. A speciális körülmények közötti terheléseket, mint a TAK üzemi állapotok és a környezeti hatások, egyaránt el kell hogy viseljék, amihez a tervezés során mind az épületszerkezeti, mind pedig a felhasznált anyagok minőségi jellemzőit figyelembe kell venni. Az atomerőmű területén minden építményt és szállítási útvonalat úgy kell megtervezni, hogy semmilyen esetben se veszélyeztesse a biztonság szempontjából fontos rendszer, rendszerelem működését és funkciójának ellátását.

Mélységben tagolt védelem

Az atomerőművek tervezése során a konstrukciók és a szervezeti struktúrák olyanok legyenek, hogy több, egymásba ágyazott védelmi szinten lehetőség legyen a hibák korrigálására, kompenzálására, mielőtt azok súlyos következményekkel járnának. A mélységben tagolt védelem hivatott biztosítani, hogy az emberi hibák vagy a műszaki meghibásodások ne vezessenek súlyos balesethez, az egymásba ágyazott biztonsági gátak működése fennmaradjon, vagy védje a lakosságot és a környezetet a védelmi rendszerek hatékonyságának csökkenése esetén. [4] [6]

A mélységben tagolt védelem öt szinten valósul meg:

2. táblázat. Mélységben tagolt védelem szintjei az üzemállapotok vonatkozásában [6]

Mélységi védelem szintje	Célkitűzés	Alkalmazandó eszközök	Radiológiai következmények	Vonatkozó üzemállapot	
1.	Normál üzemi állapottól való eltérések és hibák megelőzése	Konzervatív tervezés, magas színvonalú létesítés és üzemeltetés; fő üzemi paraméterek előírt határok között tartása	Nincs a hatósági korlátokat meghaladó telephelyen kívüli radiológiai hatás	Normál üzem (TA1)	
2.	Normál üzemi állapottól való eltérések és hibák kezelése	Szabályozó és biztonságvédelmi rendszerek; egyéb felügyeleti módszerek		Várható üzemi események (TA2)	
3.	3a.	Üzemzavarok kezelése a radioaktív kibocsátás korlátozása és az üzemanyag-olvadás megelőzése érdekében	Biztonsági rendszerek, üzemzavar-elhárítási utasítások	Nincs vagy csak minimális telephelyen kívüli radiológiai hatás	Tervezési üzemzavar (TA3–4)
	3b.	Hozzáadott biztonsági eszközök komplex üzemzavarok elhárítására, üzemzavar-elhárítási utasítások, telephelyi baleset-elhárítási intézkedések		Komplex üzemzavar (Feltételezett többszörös meghibásodás) (TAK1)	

4.	A nagy vagy korai kibocsátás gyakorlati kizárása, az üzemanyag-olvasással járó balesetek kezelése a telephelyen kívüli kibocsátások korlátozása érdekében	Kiegészítő biztonsági eszközök az üzemanyag-olvasással járó balesetek kezelésére, baleset-kezelési útmutatók, telephelyi baleset-elhárítási intézkedések	A telephelyen kívüli radiológiai hatás térben és időben korlátozott lakossági óvintézkedések bevezetését indokolhatja	Súlyos baleset (TAK2)
5.	Jelentős radioaktívanyag-kibocsátás radiológiai következményeinek csökkentése	Telephelyi és telephelyen kívüli baleset-elhárítási intézkedések; beavatkozási szintek	A telephelyen kívüli radiológiai hatás lakossági óvintézkedéseket indokol	Nagyon súlyos baleset

A tervezés során egymástól független védelmi szintek biztosítják, hogy a lehetséges meghibásodások, a normál üzemtől való eltérések észlelhetők, ellensúlyozhatók és kezelhetők legyenek. A tervezett automatikus és kézi beavatkozási lehetőségek a mélységben tagolt védelem fontos elemei, ezért úgy kell őket megtervezni, hogy minden olyan esetben, amikor a bekövetkezett esemény kezeléséhez egy magasabb biztonsági védelmi szint megfelelő folyamatára van szükség, az időben felismerhető és végrehajtható legyen. A biztonsági funkciók védelmi szintjének kezelésében nagyon fontos szempont, hogy az egyes védelmi szintek és biztonsági funkciók meghibásodása nem vonhatja maga után más magasabb védelmi szint biztonsági funkciójának összeomlását.

A mélységben tagolt védelem alkalmazásának érdekében négy fizikai gátat különböztetünk meg, melyek védelmét biztosítani kell, ezek a következők: [3] [4] [6]

- az üzemanyagmátrix;
- a fűtőelem burkolata;
- a reaktor primer körének határa;
- a konténment rendszer (hermetikus tér). [8]

A mélységben tagolt védelem első két szintjén a biztonsági tervezés mind a négy fizikai gát esetében megvalósul. A védelem 3. szintjének alkalmazása esetén a harmadik biztonsági gát sérüléséről beszélünk, ahol a primer kör határának sérülése vagy komoly veszélyeztetettsége lépett fel, és a másik három gát védelme a legfőbb feladat. A tervezet erre az esetre a szubkritikuság és a hőelvonás fenntartása, szélsőséges esetben kifejezetten az üzemanyag-olvasás megakadályozása. A 4. védelmi szintre az első három gát sérülése esetén van szükség, amikor az utolsó fizikai gát, a konténment védelmének kell megva-

lósulnia. A nyomás, a hőmérséklet kontrollálása, a robbanásveszélyes gázok kezelése és a hőelvonás fenntartása a feladat.

A mélységben tagolt védelem és a fizikai gátak vonatkozásában a tervezésnek ki kell terjednie a „szakadékszél-effektus” [5] elkerülésére. Ez azt jelenti, hogy már a tervezésben szerepelnie kell annak, hogy a külső és belső veszélyeztető tényezők nem okozzák a fizikai gátak és a mélységben tagolt védelem egyidejű összeomlását. Ehhez a tervezés során elemezni és azonosítani kell minden olyan paramétert és annak következményét, amely szakadékszél-effektushoz vezethet, továbbá annak elkerülésére ki kell térni. Olyan tartalékok képzése szükséges, melyek a küszöbértékek átlépése után is fennmaradnak, és ehhez a védelmi rendszerek egymástól való függetlensége szolgáltatja az alapot.

Atomreaktor és aktív zóna

Az atomreaktor belső elemeinek és a közvetlen kapcsolatban lévő szerkezeti elemeknek valamint az aktív zóna szerkezetének tervezésekor figyelembe kell venni az összes lehetséges őket érő hatást. A tervezés során kalkulálni kell minden olyan tényezővel, amely az atomreaktor működésére a leszerelésig hatással lehet. A sugárzási, kémiai, fizikai hatásokkal, mechanikai terhelésekkel és a hőmérséklet okozta deformációkkal. Minden hatás ellenére a biztonságos üzemképességet fenn kell tartani akkor is, ha a reaktor élettartami idején belül változásokra kerül sor. [6] [9]

Az aktív zónán belüli alátámasztásoknak és rögzítéseknek alkalmasnak kell lenniük arra, hogy megakadályozzák a zónaszerkezet egészének és a szerkezeten belüli elemeknek a nem tervezett elmozdulásait, károsodáshoz vezető rezgéseit. A tervezés során ügyelni kell arra, hogy a reaktor és annak minden külső és belső eleme csak egyféleképpen és megfelelő sorrendben legyen összeszerelhető, minden más esetben a rendszerelemek visszahelyezése, összeszerelése ne legyen megvalósítható, elkerülve így a legalapvetőbb hibafaktorokat. A reaktor és az aktív zóna tervezésénél figyelembe kell venni az egész létesítmény földrajzi, meteorológiai, égövi és emberi vonatkozásait, valamint elhelyezkedését, mivel minden környezeti és emberi tényező potenciális veszélyforrásként bekerül a biztonsági kockázatokkal való tervezésbe, [7] és befolyásolja a kiépítendő rendszerek és rendszer-elemek paramétereit. Az atomerőmű területén belüli és kívüli objektumok minden tulajdonsága azonosításra szorul, és hatáselemzést szükséges készíteni annak érdekében, hogy a jövőbeli objektumváltozásokhoz alapot szolgáltatson minden kockázati szempontból.

Az atomreaktor tervezésnél biztosítani kell, hogy az atomerőmű leállítható, a maradványhő eltávolítható, a radioaktív anyagok környezetbe történő kikerülése megakadályozható, és az atomerőművi üzemállapot monitorozható legyen. Ennek fényében a reaktor rendszereinek, rendszerlemeinek sérülése és meghibásodása során a leállításhoz, a szubkritikus állapot fenntartásának és a hűtésnek megoldhatónak kell lennie. [9]

A biztonsági és monitorozási funkciókat ellátó mérőműszereknek több szinten biztosítaniuk kell az üzemeltetés ellenőrizhetőségét és az aktuálisan végbemenő folyamatok pontos meghatározását. Az aktív zóna tervezésekor figyelembe kell venni, hogy a hőmérséklet-változások, rezgések, hűtőközeg-elvesztés, bórhigulás vagy az aktív zóna geometriai változásai sem okozhatnak szabályozhatatlan radioaktivitás-növekedést. [8]

Az aktív zóna és minden ahhoz tartozó komponensének és segédelemének önszabályozó működése valósuljon meg TA1–2 üzemállapotokban, valamint a TA3–4 és TAK1 üzemállapotokban biztosított legyen a biztonságos leállított állapotban tarthatóság. Az atomreaktor működését olyan egymástól független működésű rendszerekkel kell megtervezni és működtetni, amelyek önmagukban is képesek az atomreaktor leállítására. Fontos szempont, hogy a reaktor szabályozása és főként a leállítása olyan gyors reagálású automatikus rendszerekkel legyen ellátva, amelyek az üzemi személyzettől függetlenül, megszakíthatatlan folyamatként elvégzik az előre beállított és meghatározott feltételek alapján a reaktor leállítását. A reaktor védelmében a normál üzemállapottól eltérő esetekben (TA1–4 és TAK) el kell indulnia az üzemállapot specifikus szabályozási vagy leállítási folyamatainak, ennek legalább két egymástól független fizikai jellemző bármelyikének határérték-túllépése esetén be kell következnie. Az atomreaktor szabályozó rendszerek és rendszerelmek megfelelő tervezése szavatolja, hogy a különböző üzemállapotokban a nukleáris üzemanyag és hűtőközeg hőmérsékletére, valamint más fizikai paraméterekre vonatkozó biztonsági határértékek túllépése ne következhesen be. [8]

A nukleáris biztonsági követelmények teljesülésének minden esetben meg kell valósulnia. Ez vonatkozik a fűtőelemkötegekre mint legelső védelmi gátak funkcióját betöltő egységekre. A fűtőelemköteg életútjának minden egyes része tervezett, előkészített és kontrollált legyen a gyártástól a szállításon és reaktorba helyezésem át a kiegészített állapotú köteg átmeneti tárolásáig, sőt az azon túlmenő újrafeldolgozási vagy végleges elhelyezési pontjáig. Az átmeneti tárolásnak az atomerőmű-tervezés első pillanatától kezdve jelen kell lennie mind működési, mind pedig szállítási szempontból, a biztonsági kritériumok teljesülésével. A kiegészített fűtőelemek újrafelhasználási lehetőségei jelenleg is kutatás-fejlesztés alatt állnak, míg a végleges elhelyezések még nem megoldottak. [3]

Az atomreaktorok pontos tervezést igénylő egységei a fővízköri rendszerelmek. [3] [6] A tervezés során figyelembe kell venni minden üzemállapotot, minden lehetséges hatást, amely az élettartamára vonatkozóan érheti, beleszámolva azt is, hogy bizonyos hatások milyen következményekkel járnak a reaktor kezdeti fázisaiban, és miként módosulnak ezek a reaktoröregedés során. A statikus és dinamikus terhelések és nyomás alatt lévő rendszerelmek tervezése során minden esetben ki kell zárni a katasztrófális meghibásodás esélyét, ezért minden fővízköri elem sérülésével, elzárhatóságával, szabályozásával, felaktiválódás csökkentésével és mindezek folyamatos monitorozásával kapcsolatos biztonsági kritériumokat ki kell elégíteni. A primer és szekunder vízkör egymással szembeni gátjai a gőzfejlesztők. [3] Ezek tervezésénél és kialakításánál valósuljon meg, hogy

a két vízkör egymásnak minden körülmények között gátat jelentsen, továbbá úgy legyenek megtervezve a hőcserélő csövek csőkötegei, hogy ledugózás vagy eltömődés esetén se okozhassanak üzemzavart. A primer körre külön túlnyomásvédelmet kell tervezni, melyben a térfogatkompenzátor a hőmérséklet-változásokból adódó hatások során védelmet nyújt a túlnyomással vagy az esetleges hirtelen nyomáscsökkenésekkel szemben. A gőzfejlesztők tervezése és kivitelezése a normál üzemállapottól eltérő TA1–4 és TAK üzemállapotokban is biztosítsa a megfelelő hűtést.

Az atomerőművek blokkjainak folyamatos villamosenergia-ellátásra van szükségük, amit akkor is biztosítani kell, ha a villamos betáplálás bármely okból elveszik. A tervezés során külön figyelmet szükséges fordítani arra, hogy a biztonsági rendszerek és rendszerlemek villamos betáplálása folyamatosan biztosított legyen. [7]

Az atomerőművek villamos rendszereinek tervezési specifikációjában jelenjenek meg a rendszerek és rendszerlemek villamos terhelésére vonatkozó paraméterek úgy, hogy a biztonsági rendszerek üzemeltetéséhez szükséges villamosenergia-források mennyiségét, minőségét és teljesítményét fenn lehessen tartani, figyelembe véve a lehetséges közös eredetű és egymásra épülő hibákat. Minden üzemállapotban álljon rendelkezésre a szünetmentes betáplálás. Ennek tervezése a villamos hálózatok visszacsatolása más blokkokról, az azonnali működés-helyettesítő akkumulátorok, illetve az üzemzavar elhárítása érdekében automatikusan induló vagy külső betáplálásos aggregátorok alkalmazásában merül ki. A biztonságra való törekvés révén a tervezés kiterjed a villamos betáplálás minden lehetséges formájára, még a gőzturbinák kifutásának idejére is, amikor már az üzemzavar miatt a turbinákra nem érkezik gőz, azonban a természetes forgás-lassulás útján a generátor további villamos energiát termel, amely a villamos hálózatokba továbbítódik.

A konténment (hermetikus tér) tervezése és kialakítása olyan fizikai gátat kell hogy létrehozzon, amely megakadályozza a radioaktív anyagok kijutását, árnyékoló funkciót lát el, és megvédi a reaktort és környezetét a külső behatásoktól is. A konténmentnek minden üzemállapot során el kell látnia a védelmi funkcióját és az észszerűen legalacsonyabb szinten kell tartania minden kibocsátást, valamint a lehetőségekhez mérten tovább minimalizálnia azt.

A konténment kialakítása során legyen figyelembe véve, hogy minden olyan biztonsági funkció elvesztése esetén, amelyek a hűtés és leállítás folyamatait hivatott végrehajtani, alkalmasnak kell lennie a kibocsátás minimalizálására és stabilitásának köszönhetően időt is tudjon biztosítani a lakosságvédelmi intézkedések végrehajtására. A konténment tervezéséhez tartozzon hozzá a súlyos balesetek során kiáramló radioaktív gőzök csökkentésére szolgáló rendszerek kialakítása is. [7]

A rendszer tervezésekor különálló aktív és passzív rendszerek kiépítését kell megvalósítani, ahol a passzív rendszer működtetéséhez nincs szükség villamos betáplálásra. Az aktív és passzív rendszerek betervezése közösen adják azt a biztonságot, mely megkövetelhető egy atomerőmű üzemeltetése során.

Az atomerőművek konténmentsérüléssel kapcsolatos eseményeinek elemzése párhuzamot mutat a veszélyes anyagokkal kapcsolatos súlyos balesetek elleni védekezés jogi szabályozásának keretében végzett veszélyeztetettségelemzésben bemutatott következmények értékelésével. [10] [11]

Összefoglalás

Jelen cikkben az atomerőművek tervezésének és létesítésének alapvető szabályozóit vizsgáltam, nagy figyelmet fordítva a vonatkozó jogszabályok által is kiemelten kezelt kritériumokra.

A jogszabályi környezet és a vonatkozó Nukleáris Biztonsági Szabályzatok lefektetik az új atomerőművek tervezésének és létesítésének, a meglévő atomerőművek átépítésének és üzemeltetésének alapvető biztonsági célkitűzéseit, és a kiépítendő vagy átalakítandó nukleáris biztonság szempontjából fontos rendszerek és rendszerelemek tervezését.

Az atomerőművek tervezésének és üzemeltetésének távlati, globális biztonsági célkitűzése, hogy a potenciális balesetek kockázata ne növekedjen, sőt csökkenjen a beépített nukleáris kapacitás bővülése ellenére is. E célkitűzés elérésének módja az, hogy a már üzemelő atomerőművek biztonságát megfelelő intézkedésekkel növeljék, az újabb rendszerek létesítése és kiépítése esetén pedig szigorúbb kockázati kritériumokat is kielégítő műszaki megoldásokat alkalmazzanak.

Irodalomjegyzék

- [1] Manga László – Kátai-Urbán Lajos: Nukleáris balesetkből levonható tanulságok – a tudomány állása. I. rész, *Bolyai Szemle*, 25. évf. 4. szám, 2016, 120–136.
- [2] *Az MVM Paksi Atomerőmű Zrt. Munkahelyi Sügárvédelmi Szabályzata*, MSSZ_V16, érvényes: 2016. 05. 01-től.
- [3] Atomerőmű Tűzoltóság, ATOMIX Kft. Tűzoltási és Kárelhárítási Szakágazat, Szakmai ismeretek oktatási anyag, ATOMIX at-me-6.2.2.-11-v2: *Atomerőműves rendszerek*, 2012. 08. 01.
- [4] Országos Atomenergia Hivatal honlapja, a Nukleáris létesítmények biztonsági felügyelete alá tartozó Nukleáris Biztonsági Szabályzatok, [www.haea.gov.hu/web/v3/OAHPortal.nsf/6D1BF609318EDEC4C1257BE800681A3B/\\$File/NBSZ_3a.pdf](http://www.haea.gov.hu/web/v3/OAHPortal.nsf/6D1BF609318EDEC4C1257BE800681A3B/$File/NBSZ_3a.pdf) (a letöltés ideje: 2017. 03. 01.)
- [5] Az atomenergiáról szóló 1996. évi CXVI. törvény
- [6] A nukleáris létesítmények nukleáris biztonsági követelményeiről és az ezzel összefüggő hatósági tevékenységről szóló 118/2011. (VII. 11.) Korm. rendelet
- [7] Az atomenergia alkalmazásával kapcsolatos sajátos tűzvédelmi követelményekről és a hatóságok tevékenysége során azok érvényesítésének módjáról szóló 5/2015. (II. 27.) BM rendelet
- [8] Atomerőmű Tűzoltóság, ATOMIX Kft. Tűzoltási és Kárelhárítási Szakágazat, Szakmai ismeretek oktatási anyag, ATOMIX at-me-6.2.2.-1-v2: *Üzemzavar-elhárítási oktatási anyag*, 2013. 07. 01.
- [9] MVM Paksi Atomerőmű Zrt.: *Atomerőmű Nukleáris Fogalomtár*, www.atomeromu.hu/hu/Documents/Nuklearis_fogalomtar.pdf (a letöltés ideje: 2017. 03. 01.)
- [10] Kátai-Urbán Lajos – Sibalinné Fekete Katalin – Vass Gyula: Hungarian Regulation on the Protection of Major Accidents Hazards, *Journal*

of Environmental Protection, safety, Education and Management, Vol. 4. No. 8, 2016, 83–86.

- [11] Sibalinné Fekete Katalin: Cultural Aspects of the Safety of Dangerous Establishments. In: Dobor

József (szerk.): *Előadásgyűjtemény: Veszélyes üzemek biztonsága* (Nemzetközi Iparbiztonsági Tudományos Konferencia), Nemzeti Közszolgálati Egyetem, Budapest, 2013, 158–162.

Analysis of Nuclear Power Stations' Pre-Construction Criteria and the Basic Regulators

ZOLTÁN ANTAL – GYULA VASS – LAJOS KÁTAI-URBÁN

Considering nuclear safety it is essential that the operation of nuclear power plants should work in a professionally proper and competent way. In the present article I examine those fundamental designs and construction aspects of nuclear power plants which are also in the focus of legal regulations. Nuclear power plants are considered to be especially important and dangerous, so already in the planning phase, besides the controllers for dangerous plants, they must comply with additional specific criteria. The well laid out funds are intended to guarantee the future of nuclear security.

Keywords: nuclear power, nuclear safety, dangerous plant, electricity