



Országos Atomenergia Hivatal

N3a.33 sz. útmutató

Súlyos balesetek determinisztikus alapú biztonsági elemzései

Verzió száma:

2.

2021. május

Kiadta:

az OAH főigazgatója

Budapest, 2020

A kiadvány beszerezhető:
Országos Atomenergia Hivatal

Budapest

FŐIGAZGATÓI ELŐSZÓ

Az Országos Atomenergia Hivatal (a továbbiakban: OAH) az atomenergia békés célú alkalmazása területén működő, önálló feladat- és hatáskörrel rendelkező országos illetékességű központi államigazgatási szerv. Az OAH-t a Magyar Köztársaság Kormánya 1990-ben alapította.

Az OAH jogszabályban meghatározott közfeladata, hogy az atomenergia alkalmazásában érdekelt szervektől függetlenül ellássa és összehangolja az atomenergia békés célú, biztonságos és védett alkalmazásával, így a nukleáris és radioaktív hulladék-tároló létesítmények, nukleáris és más radioaktív anyagok biztonságával, nukleáris veszélyhelyzet-kezeléssel, nukleáris védettséggel kapcsolatos hatósági feladatokat, valamint az ezekkel összefüggő tájékoztatási tevékenységet, továbbá javaslatot tegyen az atomenergia alkalmazásával kapcsolatos jogszabályok megalkotására, módosítására és előzetesen véleményezze az atomenergia alkalmazásával összefüggő jogszabályokat.

Az atomenergia alkalmazása hatósági felügyeletének alapvető célkitűzése, hogy az atomenergia békés célú felhasználása semmilyen módon ne okozhasson kárt a személyekben és a környezetben, de a hatóság az indokoltnál nagyobb mértékben ne korlátozza a kockázatokkal járó létesítmények üzemeltetését, illetve tevékenységek folytatását. Az alapvető biztonsági célkitűzés minden létesítményre és tevékenységre, továbbá egy létesítmény vagy sugárforrás élettartamának minden szakaszára érvényes, beleértve létesítmény esetében a tervezést, a telephely-kiválasztást, a gyártást, a létesítést, az üzembe helyezést és az üzemeltetést, valamint a leszerelést, az üzemben kívül helyezést és a bezárást, radioaktív hulladék-tárolók esetén a lezárást követő időszakot, radioaktív anyagok esetén a szóban forgó tevékenységekhez kapcsolódó szállítást és a radioaktív hulladék kezelését.

Az OAH a jogszabályi követelmények teljesítésének módját az atomenergia alkalmazóival egyeztetett módon, világos és egyértelmű ajánlásokat tartalmazó útmutatókban fejti ki, azokat az érintettekhez eljuttatja és a társadalom minden tagja számára hozzáférhetővé teszi. Az atomenergia alkalmazásához kapcsolódó nukleáris biztonsági, védettségi és non-proliferációs követelmények teljesítésének módjára vonatkozó útmutatókat az OAH főigazgatója adja ki.

Az útmutatók alkalmazása előtt mindig győződjön meg arról, hogy a legújabb, érvényes kiadást használja-e! Az érvényes útmutatókat az OAH honlapjáról (www.oah.hu) töltheti le.

ELŐSZÓ

Az atomenergia békés célú, biztonságos alkalmazására vonatkozó legmagasabb szintű szabályozást az atomenergiáról szóló 1996. évi CXVI. törvény (a továbbiakban: Atv.) tartalmazza.

A nukleáris létesítmények nukleáris biztonsági követelményeiről és az ezzel összefüggő hatósági tevékenységről szóló rendelkezéseket a 118/2011. (VII. 11.) Korm. rendelet (a továbbiakban: Rendelet) és mellékletei, a Nukleáris Biztonsági Szabályzatok (a továbbiakban: NBSZ) határozzák meg.

A nukleáris biztonsági követelmények és rendelkezések betartása mindazok számára kötelező, akik az Atv. 9. § (2) bekezdése szerinti folyamatos hatósági felügyelet alatt állnak, valamint e törvényben előírt hatósági engedélyhez kötött tevékenységet folytatnak, ilyen tevékenységben közreműködnek, vagy ilyen tevékenység folytatásához engedély iránti kérelmet nyújtanak be. A nukleáris biztonsági követelmények és rendelkezések mellett a követelmények közé tartoznak az egyedi hatósági előírások, feltételek és kötelezettségek, amelyeket az OAH a nukleáris létesítmény nukleáris biztonsága érdekében határozatban állapíthat meg.

Az NBSZ-ben foglalt követelmények teljesítésére az OAH ajánlásokat fogalmazhat meg, amelyeket útmutatók formájában ad ki. Az útmutatókat az OAH a honlapján közzéteszi. Jelen útmutató az engedélyesek önkéntes alávetésével érvényesül, nem tartalmaz általánosan kötelező érvényű normákat. Az útmutató nem tekinthető hivatalos jogértelmezésnek. A jogértelmezés a jogalkalmazó mindenkori feladata és felelőssége, ezért a jelen útmutatóban leírtak kizárólag szakmai álláspontnak tekinthetők, nem használhatók fel jogértelmezésként peres vagy közigazgatási eljárás során.

A Rendelet 3. § (4) bekezdése alapján, ha a kérelmező a nukleáris biztonsággal összefüggő engedély iránti kérelmét az útmutatókban foglaltak szerint terjeszti elő, továbbá ha az engedélyes a nukleáris biztonsággal összefüggő tevékenységét az útmutatókban foglaltak szerint végzi, akkor az OAH a választott módszert a nukleáris biztonság követelményei teljesítésének igazolására alkalmasnak tekinti, és az alkalmazott módszer megfelelőségét nem vizsgálja.

Az útmutatókban foglaltaktól eltérő módszerek alkalmazása esetén az OAH az alkalmazott módszer helyességét, megfelelőségét és teljeskörűségét részleteiben vizsgálja, ami hosszabb ügyintézési idővel, külső szakértő igénybevételével és további költségekkel járhat.

Ha az engedélyes által választott módszer eltér az útmutató által ajánlottól, akkor az eltérés indokolása mellett igazolni kell, hogy a választott módszer legalább ugyanazt a biztonsági szintet biztosítja, mint az útmutatóban ajánlott.

Az útmutatók felülvizsgálata az OAH által meghatározott időszakonként vagy az engedélyesek javaslatára soron kívül történik.

A fenti szabályozást kiegészítik az engedélyesek, illetve más, a nukleáris energia alkalmazásában közreműködő szervezetek (tervezők, gyártók stb.) belső szabályozási dokumentumai, amelyeket az irányítási rendszerükkel összhangban készítenek.

TARTALOMJEGYZÉK

1. BEVEZETÉS	8
1.1. Az útmutató tárgya és célja	8
1.2. Vonatkozó jogszabályok és előírások	8
2. MEGHATÁROZÁSOK ÉS RÖVIDÍTÉSEK	13
2.1. Meghatározások	13
2.2. Rövidítések	14
3. AZ ÚTMUTATÓ AJÁNLÁSAI	16
3.1. Bevezetés	16
3.2. Reaktortartályon belüli és primerköri folyamatokra vonatkozó ajánlások	17
3.2.1. Termohidraulika	17
3.2.2. Felhevülés, oxidáció és hidrogénképződés	19
3.2.3. Zónaolvadás és áthelyeződés	20
3.2.4. Folyamatok a tartály aljában, tartályszerülés	21
3.3. Konténment folyamatokra vonatkozó ajánlások	23
3.3.1. Konténment termohidraulika	23
3.3.2. Hidrogén eloszlás és égés	24
3.3.3. Nagyenergiájú folyamatok (DCH és gőzrobbanás)	26
3.3.4. Zóna-beton kölcsönhatás és aknasérülés	28
3.4. Hasadási termékek terjedésére vonatkozó ajánlások	29
3.4.1. Kikerülés a fűtőelemből	30
3.4.2. Primerköri terjedés	30
3.4.3. Terjedés a konténmentben és a forrástag	33
3.5. Balesetkezelés számítására vonatkozó ajánlások	34
3.5.1. Primerköri nyomáscsökkentés	35
3.5.2. Hidrogénkezelés	36
3.5.3. Core catcher	37
3.5.4. Szűrt leeresztés	38
3.5.5. Hosszú távú konténment hűtés	39
3.6. Számítógépi kódokra vonatkozó ajánlások	40
3.6.1. A súlyos baleseti számítógépi kódok típusai	40
3.6.2. A kódok dokumentálása	41
3.6.3. Atomerőművi input dokumentálása	42
3.6.4. Verifikáció és validáció	42
3.7. Súlyos baleseti elemzések elvégzésére vonatkozó ajánlások	43
3.7.1. A súlyos baleseti folyamatok kiválasztása	43
3.7.2. A súlyos baleseti elemzések módszere	45

Súlyos balesetek determinisztikus alapú biztonsági elemzései

3.7.3. Bizonytalanság- és érzékenységvizsgálat	46
3.7.4. Elemzési jelentések készítése és dokumentálása	47
3.7.5. Minőségbiztosítás	48

1. BEVEZETÉS

1.1. Az útmutató tárgya és célja

Az útmutató ajánlásokat tartalmaz az NBSZ 3a. kötet 3a.2 fejezetében rögzített előírások teljesítésére.

Az útmutató célja, hogy – ajánlásokat adva a súlyos balesetek determinisztikus alapú elemzéseivel kapcsolatosan új atomerőművi blokkok tekintetében – egyértelművé tegye a hatósági elvárásokat, és ezzel elősegítse az érvényes előírásokban meghatározott nukleáris biztonsági kritériumok teljesülését, az alkalmazott műszaki megoldásoknak megfelelően, a nukleáris biztonság szempontjából.

1.2. Vonatkozó jogszabályok és előírások

A nukleáris biztonsági követelmények jogszabályi háttérét az Atv. és a Rendelet biztosítja.

3a.2.2.0300. „A tervezési alap kiterjesztésének két kategóriáját kell megkülönböztetni:

- a) komplex üzemzavar (TAK1), vagy*
- b) súlyos baleset (TAK2).”*

3a.2.2.6000. „A mélységben tagolt védelem elvével összhangban, a TAK üzemállapotokat eredményező eseményeket és eseménykombinációkat valószínűségi módszerekkel és mérnöki megfontolásokkal kiegészített determinisztikus elemzésekkel kell kiválasztani. Igazolni kell, hogy minden lehetséges eseményt és eseménykombinációt figyelembe vettek. A biztonság igazolására szolgáló elemzéshez a módszerek közül a vizsgált esetnek leginkább megfelelőt vagy azok leginkább megfelelő kombinációját kell alkalmazni.”

3a.2.2.6200. „A TAK2 üzemállapotok elemzését a hatások, igénybevételek, anyagjellemzők medián értékeire lehet elvégezni.”

3a.2.2.6300. „A tervezési alap kiterjesztésénél legalább az alábbiakat figyelembe kell venni, feltéve, hogy a tervezési alapnak nem képezi részét és az adott erőműtípusra értelmezhető:

- a) teljes feszültségvesztés,*
- b) a TA2-4 üzemállapot során szükséges reaktor leállítási funkciót ellátó rendszerek elvesztése,*
- c) gőzvezeték-törés a gőzfejlesztő hőátadó felületének járulékos sérülésével,*

Súlyos balesetek determinisztikus alapú biztonsági elemzései

- d) a konténment megkerülésével közvetlen környezeti kibocsátáshoz vezető események,
- e) teljes tápvízvesztés,
- f) hűtőközegvesztés valamelyik zóna-üzemzavari hűtőrendszer-típus teljes elvesztésével,
- g) szabályozatlan szintcsökkenés a részlegesen feltöltött hurok melletti természetes cirkulációs üzemállapot vagy átrakás során,
- h) az alapvető biztonsági funkciót ellátó rendszerek, rendszerelemek egy vagy több segédrendszerének teljes elvesztése,
- i) az aktív zóna hűtésének elvesztése a maradványhő elvezetése során,
- j) a pihentető medence hűtésének elvesztése,
- k) ellenőrizetlen bórhiágulás,
- l) egy gőzfejlesztő több hőátadó csövének egyidejű törése,
- m) egy feltételezett kezdeti esemény kezeléséhez hosszú távon szükséges biztonsági rendszerek elvesztése,
- n) konténment nyomáscsökkentő funkció elvesztése olyan üzemállapotokban, amikor arra szükség lenne,
- o) üzemanyag-olvadással járó egyéb események,
- p) katonai és polgári repülőgép becsapódása, valamint
- q) a többszörös meghibásodással járó események.”

3a.2.2.6500. Azonosítani kell minden TAK2 üzemállapotot.

3a.2.2.6600. „A TAK elemzéseknek azonosítaniuk kell minden olyan ésszerűen megvalósítható intézkedést, amelyekkel megelőzhetők a súlyos balesetek. Az azonosított intézkedések eredményességétől függetlenül fel kell készülni a súlyos balesetekre is. Az elemzések keretében azonosítani kell minden olyan ésszerűen megvalósítható megoldást is, amelyekkel enyhíthetők a súlyos balesetek következményei.”

3a.2.2.6700. „A TAK események elemzésénél:

- a) csak megalapozott módszereket és feltételezéseket lehet használni;
- b) biztosítani kell az elemzés megismételhetőségét olyan esetekben is, amikor az elemzés során mérnöki becslést vettek figyelembe, illetve figyelembe kell venni az elemzéssel kapcsolatos összes bizonytalanságot és azok hatását;

Súlyos balesetek determinisztikus alapú biztonsági elemzései

- c) azonosítani kell minden olyan megelőző vagy következmény-csökkentő intézkedést, amivel növelni lehet az erőmű ellenálló képességét a tervezési alapon figyelembe nem vett állapotokkal szemben;
- d) meg kell vizsgálni a TAK események telephelyen belüli és kívüli potenciális radiológiai hatásait, feltételezve, hogy a baleset-elhárítási intézkedések sikeresek;
- e) figyelembe kell venni az erőmű elhelyezkedését és felépítését, a rendszerek, rendszerelemek képességeit, a vizsgált eseményhez kapcsolódó állapotokat és a tervezett balesetelhárítási intézkedések hatékonyságát;
- f) igazolni kell, hogy a szakadékszél-effektus elkerüléséhez kellő tartalékok állnak rendelkezésre;
- g) be kell mutatni a valószínűségi biztonsági elemzések eredményeit és ezek megfelelő felhasználását;
- h) ahol releváns, figyelembe kell venni a súlyos baleset során lejátszódó jelenségeket;
- i) definiálni kell végső állapotokat, vagy ahol lehetséges biztonságos állapotokat, illetve az ezekhez kapcsolódó rendszerek és rendszerelemek szükséges működési idejét.”

3a.2.2.7000. „A tervezési alap kiterjesztésénél a baleset-kezelési funkciókat és az azokat megvalósító rendszerek képességeit kell figyelembe venni annak érdekében, hogy a TAK2 üzemállapot következményei a 3a.2.4.0800. pontban a nagy vagy korai kibocsátásokra előírt kritériumoknak megfelelően csökkenthetők legyenek.”

3a.2.2.7100. „A TAK1 és TAK2 üzemállapot jellemzőiből kell származtatni a határfeltételeket és követelményeket, amelyekre a TAK üzemállapotot eredményező események kezelésre szolgáló rendszereket és rendszerelemeket tervezni kell.”

3a.2.2.7400. „A tervezés során súlyos balesetek kezelésére előirányzott funkciókat és az azokat megvalósító, súlyos baleseti nyomáscsökkentő és hidrogén eltávolító rendszereket olyan terjedelemben kell meghatározni, hogy az üzemanyag-olvadást okozó eseményeknél a nagynyomású folyamatok, valamint a korai konténment sérülések elkerülhetők legyenek.”

3a.2.2.7500. „A súlyos balesetek következményeit enyhítő funkciókat és szükség esetén azokat megvalósító rendszereket olyan terjedelemben kell meghatározni, hogy súlyos balesetknél az üzemanyag-olvadék konténmenten belül lehűtött állapotban megtartható legyen.”

Súlyos balesetek determinisztikus alapú biztonsági elemzései

3a.2.2.7700. „Meg kell tervezni a szükséges baleset-kezelési eszközöket, és ki kell dolgozni a baleset-kezelési útmutatókat a részletesen elemzett tervezési alapot meghaladó állapotok - beleértve az üzemanyag teljes megolvadásával járó súlyos baleseti folyamatokat - következményeinek hatékony csökkentésére úgy, hogy a környezet és a lakosság veszélyeztetése a baleset-kezelési eljárások és eszközök sikeres működése esetén előre meghatározott, kezelhető szint alatt maradjon.”

3a.2.3.0400. „Érzékenységi vizsgálatokat kell végezni a feltételezések, a felhasznált adatok és számítási módszerek bizonytalanságának értékelésére. Ahol az elemzés eredményei érzékenyeknek bizonyulnak a modell feltételezéseire, ott további elemzéseket kell végezni az előzőtől független módszerek és eljárások használatával.”

3a.2.3.0500. „A biztonság igazolására szolgáló elemzéseket oly módon és olyan mélységben kell dokumentálni, hogy azok az atomerőmű teljes élettartama során megismételhetők, független felülvizsgálatnak alávethetőek, és az átalakítások értékeléséhez szükséges terjedelemben módosíthatóak legyenek, továbbá az alkalmazott konzervativizmusok mértéke és az elemzés alapján rendelkezésre álló tartalékok mértéke felülvizsgálható és újraértékelhető legyen.”

3a.2.3.0600. „Az atomerőmű élettartama során minden, a nukleáris biztonság szempontjából fontos rendszert, rendszerelemet érintő, az engedélyezett állapottól eltérő helyzetet okozó beavatkozás, módosítás megfelelőségét determinisztikus biztonsági elemzéssel vagy determinisztikus és valószínűségi biztonsági elemzések kombinációjával kell igazolni.”

3a.2.3.0700. „A tervezési alapot, a tervezési alap kiterjesztését és ezek igazolását a tervezés lezárásakor, valamint az atomerőmű teljes élettartama során, rendszeres időközönként, továbbá lényeges új, hazai vagy nemzetközi biztonsági információk felmerülése esetén felül kell vizsgálni, és szükség esetén módosításokat kell végrehajtani a determinisztikus és valószínűségi számítások eredményei, illetve mérnöki megfontolások alapján. Az azonosított hiányosságokat és biztonságnövelő lehetőségeket értékelni kell, és időben meg kell tenni a szükséges intézkedéseket.”

3a.2.3.0800. „A felülvizsgálat során figyelembe kell venni:

- a) az atomerőművi blokkot vagy a működését érintő változásokat a tervezés vagy a megvalósulás fázisában, és működése során;
- b) bármely a biztonságot szignifikáns módon befolyásoló, érintő új műszaki és tudományos ismeretet az atomerőművi blokk viselkedéséről és a hibalehetőségekről;

Súlyos balesetek determinisztikus alapú biztonsági elemzései

- c) bármely olyan anyagi tulajdonság megváltozását öregedés vagy más hatás miatt, amelyet nem vettek figyelembe;
- d) a biztonsági szabványok nemzetközi fejlődését; valamint
- e) jelentős új, hazai vagy nemzetközi biztonsági információ felmerülését.”

3a.2.3.0900. „A tervezési alapba, valamint a tervezési alap kiterjesztésébe tartozó összes kezdeti eseményre determinisztikus biztonsági elemzésekkel kell igazolni a vonatkozó elfogadási kritériumok teljesülését.”

3a.2.3.1000. „A biztonság igazolásához legalább termohidraulikai-, áramlástan-, reaktorfizikai-, szilárdságtani-, statikai-, törésmechanikai-, dinamikai-, forrócsatorna-, sugárvédelmi- és terjedésszámításokat kell alkalmazni.”

3a.2.3.1600. „A TAK1 és TAK2 üzemállapotot eredményező eseményekre vonatkozó elemzésekben a legjobb becslés módszerét kell alkalmazni. Bármely rendszer vagy rendszerelem működésképtelenségét akkor kell feltételezni, ha annak sérülése a kezdeti esemény vagy az üzemzavari folyamat eredményeképpen valószínűsíthető.”

2. MEGHATÁROZÁSOK ÉS RÖVIDÍTÉSEK

2.1. Meghatározások

Az útmutató az Atv. 2. §-ában, valamint a Rendelet 10. számú mellékletében ismertetett meghatározásokon kívül az alábbi definíciókat tartalmazza.

Abláció:

A beton fizikai és vegyi lebomlása a zónatörmelékkel való kölcsönhatás során.

Agglomeráció:

Aeroszol részecskék összetapadása.

Aleatorikus bizonytalanság:

Véletlenszerűségből származó bizonytalanság: események és folyamatok véletlenszerűségéből, azaz sztochasztikus jellegéből adódó bizonytalanság.

Candling:

A megolvadt zónarészek gyertyaszerű lefolyása, mozgása.

Core catcher:

A reaktortartály sérülése után a konténmentbe jutott zónaolvadék visszatartására és lehűtésére alkalmas berendezés.

Deflagráció:

Turbulens lángterjedési mechanizmussal bekövetkező égés.

Depozíció:

Hasadási termékek lerakódása szilárd felületekre.

Detonáció:

Lökéshullám frontján végbemenő nagysebességű égési folyamat.

Diffúzióforézis:

Aeroszol részecskék diffúziós mozgása térbeli koncentráció-különbség hatására.

Direct Containment Heating:

Nagynyomású reaktor sérülésnél a részecskékre szétporladt zónatörmelék által okozott hőmérséklet- és nyomásnövekedési folyamat a konténmentben.

Episztemikus bizonytalanság:

Modellalkotásból származó bizonytalanság: események és folyamatok leírására szolgáló modell valóságosságának (tudásszint, modellezési pontosság) mértékét kifejező bizonytalanság.

Likvidusz:

A zónaolvadék folyékony fázisában a kristályosodás kezdetének hőmérséklete.

Nodalizáció:

Egy- vagy többdimenziós geometriai alakzat részekre való felosztása.

Nódus:

A nodalizáció egységnyi része.

Revaporization:

A berendezések falán megtapadt hasadványok újra-elgőzölgése.

Resuspension:

A berendezések falán megtapadt aeroszolok leválása és az atmoszférába való visszajutása.

Source term:

A baleseti folyamat során a konténmentből kijutó hasadási termékek mennyisége.

Szolidusz:

A zónaolvadék teljes megszilárdulásának megfelelő hőmérséklet.

Termoforézi:

Aeroszol részecskék mozgása térbeli hőmérséklet-különbség hatására.

2.2. Rövidítések

AICC	Adiabatic Isochoric Complete Combustion – adiabatikus izochor teljes égés
CFD	Computational Fluid Dynamics – numerikus áramlástan elemzés
DCH	Direct Containment Heating – közvetlen konténment felhevítés
EOC	End of Campaign – kampány vége

Súlyos balesetek determinisztikus alapú biztonsági elemzései

- LB LOCA Large Break Loss Of Coolant Accident – Nagy csőtöréses hűtőközeg vesztes
- PWR Pressurized Water Reactor – nyomottvizes reaktor
- SB LOCA Small Break Loss Of Coolant Accident – Kis csőtöréses hűtőközeg vesztes

3. AZ ÚTMUTATÓ AJÁNLÁSAI

3.1. Bevezetés

Az NBSZ 1. kötete előírja a súlyos baleseti (TAK2) folyamatok vizsgálatát már a létesítési engedély, valamint az üzemeltetési engedély benyújtása idején, utóbbi esetében a Végleges Biztonsági Jelentés részeként.

A súlyos baleseti elemzések témaköre a zónaolvadással járó - az NBSZ szóhasználatában TAK2 üzemállapot - esetére vonatkozó biztonsági elemzéseket foglalja magába. A súlyos baleseti elemzések módszertanilag a determinisztikus biztonsági elemzések kategóriájába tartoznak, eltérően a súlyos baleseti állapotokkal szintén foglalkozó valószínűségi biztonsági elemzésektől. A tervezési üzemzavarokkal és komplex üzemzavarokkal - az NBSZ szóhasználatában a TA1-TA4 és TAK1 üzemállapotokkal - az N3a.32. „Új atomerőműre vonatkozó determinisztikus biztonsági elemzések” című útmutató foglalkozik, de nem tér ki a TAK2 üzemállapotokra, azaz a súlyos balesetekre.

A súlyos balesetek valamilyen kezdeti eseménnyel, például hűtőközeg-vesztéssel vagy feszültségkieséssel indulnak, és a lefutásuk kezdetben megegyezik a tervezési üzemzavarok folyamataival. A kezdeti eseményt követő további meghibásodások az aktív zóna hűtésének elvesztéséhez, ennek következtében pedig a fűtőelemek sérüléséhez, megolvadásához vezetnek. A folyamat további eszkalálódása során az olvadék a reaktortartály aljába kerül, a tartály alja felhevül és megsérülhet. Ezután az olvadék a konténmentbe kerül, ahol a konténment szerkezetével, illetve az alkalmazott balesetkezelési rendszerekkel kölcsönhatásba kerülve további fizikai-kémiai folyamatok játszódnak le.

Jelen útmutató az említett folyamatok számításával, azaz a súlyos balesetekkel, vagy más néven TAK2 üzemállapotokra vonatkozó determinisztikus elemzésekkel foglalkozik az új atomerőművek tekintetében.

A súlyos baleseti elemzések célja a különböző, a tervezési alap kiterjesztésével kapcsolatban figyelembe vett súlyos balesetek során létrejövő folyamatok vizsgálata. Ezen vizsgálatok során meghatározhatóak a létrejövő termohidraulikai (nyomás és hőmérséklet) terhelések, valamint a radioaktív anyagok terjedése a primerkörben és a konténmentben. A súlyos baleseti elemzések ily módon bemenő adatokat szolgáltatnak az atomerőművi berendezések szilárdsági ellenőrzéséhez, a radioaktív anyagok környezeti terjedésének elemzéséhez. A súlyos baleseti elemzések felhasználásának további területe a 2. szintű valószínűségi biztonsági elemzések, amelyek – egyebek mellett - szintén támaszkodnak súlyos baleseti

folyamatok számítására. A súlyos baleseti elemzések alapján történhet továbbá a balesetkezelési eszközök tervezése és a balesetkezelési útmutatók kidolgozása.

3.2. Reaktortartályon belüli és primerkörüli folyamatokra vonatkozó ajánlások

A súlyos baleseti progresszió előrehaladása a kezdeti eseményt, például a hűtőközeg-vesztést vagy feszültségkiesést követően különböző fázisokban megy végbe. Az aktív zóna hűtésének elvesztése után a fűtőelemek termohidraulikai folyamatok során kiszáradnak, majd felhevülnek és megolvadnak. Az olvadt zónaelemek a reaktortartály aljába kerülnek, ahol a tartály alja felhevül és megsérül. Jelen fejezet a kezdeti eseménytől a reaktortartály sérüléséig tartó folyamatokra vonatkozó ajánlásokat tartalmazza.

3.2.1. Termohidraulika

A súlyos baleseti számítások általában olyan számítógépi kódokkal történnek, amelyek a tömeg-, momentum- és hőátadási folyamatokat egydimenziós közelítésben írják le. A fizikai folyamatok leírásánál a legjobb becslésű modellek használatára célszerű törekedni, amely az alábbi elemeket és megfontolásokat tartalmazza:

- a) a teljes primerkör modellje, a szerkezeti elemek modellezését beleértve, mivel ezek hőkapacitása a folyamatok lefutását befolyásolja,
- b) a szekunderkör egyszerűsített modellje, amely a primerkörből történő hőelvitel, illetve hűtőközeg vesztes számításához elegendő pontosságot biztosít,
- c) a reaktorzóna modellezése a zónában jelen lévő fűtőelemek, illetve szabályozó rudak tényleges számával. A radiális és az axiális teljesítményeloszlás megfelelő modellezéséhez a zónát több radiális és axiális nódussal modellezik. A zónában elhelyezkedő anyagok – urán, cirkónium, rozsdamentes acél tömegének megadása a különböző zónakomponenseken belül a hőátadási és a későbbi oxidációs folyamatok számításához szükséges,
- d) a súlyos baleseti folyamat kifejlődése a tervezési üzemzavarokhoz képest hosszabb időtávon történik, emiatt a zóna reaktorkinetikai modellezésére már nincs szükség, a zóna hőfejlődését a remanens hő figyelembe vételével javasolt modellezni,

Súlyos balesetek determinisztikus alapú biztonsági elemzései

e) a védelmi és biztonsági rendszereket a vizsgált baleseti folyamatnál a feltételezett rendelkezésre állásuknak megfelelően modellezzik.

A baleseti folyamatot több fázisra lehet osztani. Az első fázis a hűtőközegvesztés és zóna hűtőközegének leürülése, ami önmagában még nem vezet súlyos balesethez. Ekkor a hűtőközeg kikerül a primerkörből és ha nem kerül sor üzemzavari vízbetáplálásra, akkor a vízszint csökken, a zóna teteje már nem vízzel borított, bekövetkezik a zóna hűtőközegének leürülése.

Ha a kezdeti esemény a primerköri hűtőközeg elvesztése, akkor kezdetben aláhűtött víz áramlik ki nagy sebességgel. A csőtörés méretétől, helyétől függően változik a kiáramló közegáram, a kiáramlás időtartama, a primerköri nyomás. Nagycsőtörés (LB LOCA) esetén hatalmas a kiáramló mennyiség, aminek hatására kb. 1 perc alatt atmoszférikushoz közelire csökken a primerköri nyomás. A csőtörés helyétől függően, kezdetben a kiáramlás lehet egy-, vagy kétfázisú áramlás. Kiscsőtöréseknél (SB LOCA) a közegáram nagyságrendekkel kisebb, a nyomás kisebb mértékben csökken, hosszabb ideig áll fenn a túlnyomásos állapot és a kiáramlás egy idő után egyfázisú, gőz kiáramlásra vált át.

Szekunderköri hőelvonás elvesztése esetén a primerköri biztonsági szelepen kiáramló gőz eredményezi a primerköri hűtőközegvesztést.

A természetes cirkuláció nagyon fontos fizikai folyamat a nyomottvízes reaktorok esetén, főleg nagynyomású folyamatoknál. Három lehetséges természetes cirkulációs áramlás alakulhat ki egy súlyos baleseti folyamatnál:

- a) reaktortartályon belül kialakuló cirkuláció,
- b) cirkuláció a primerkörben a gőzfejlesztő csöveken keresztül,
- c) melegági ellenáramú cirkuláció.

A reaktortartályon belüli cirkulációnál a radiális teljesítményeloszlás következtében a zóna középső részén termelődő túlhevített gőz forróbb, és könnyebb, mint a zóna szélén elhelyezkedő közeg. A sűrűségkülönbség hatására természetes cirkuláció alakul ki. A nehezebb gáz lefelé áramlik, a zóna közepén emelkedő gáz a felső keverőtér szerkezetein leül, és ismét lesüllyed.

A primerköri cirkuláció a legfontosabb primerköri folyamat. Amíg a gőzfejlesztők víztartaléka rendelkezésre áll, addig ez a folyamat biztosítja a remanens hő elvitelét. Nagynyomású folyamatnál a zónából a melegágba történik az áramlás, majd a térfogatkompenzátor szelepein keresztül a konténmentbe jutnak a forró gázok, ennek során a melegág, illetve a térfogatkompenzátor kiegyenlítő vezeték felhevül, és megsérülhet.

A melegági ellenáramú cirkuláció és vízvisszafolyás a PWR reaktoroknál fontos jelenség. A VVER-440 primerkörének speciális geometriája és az ebben kialakuló vízzár miatt ez a hatás elhanyagolható, így ennél a reaktortípusnál elegendő csak egyirányú áramlással számolni.

3.2.2. Felhevülés, oxidáció és hidrogénképződés

Miután a zóna már nem vízzel borított, a fűtőelemeket a zónán átáramló gőz hűti. A relatíve rossz hőátadási tényező miatt ez a hűtés nem elegendő, elkezdődik a fűtőelemek hőmérsékletének emelkedése. A remanens hőfejlődés növeli a fűtőelem-kazetták, a tartályon belüli szerkezetek hőmérsékletét. 900 K körüli hőmérsékleten a cirkónium már reakcióba lép a vízgőzzel és elkezdődik a Zr (cirkónium) burkolat oxidációja, ami hő és hidrogénfejlődéssel jár. Ebben a fázisban már keletkezik hidrogén, de mennyisége még nem haladja meg a néhány kg-ot. Ennek megfelelően a hőmérsékletnövekedést főleg a remanens hő okozza.

Az oxidáció szakaszában, kb. 1300 K-től, a remanens hővel közel azonos (a gőzmennyiségtől, burkolathőmérséklettől függően) a Zr - vízgőz reakcióból keletkező hő mennyisége. Ezzel egy időben a magas burkolathőmérséklet és a lecsökkent primerköri nyomás a burkolat felpuffadását (ballooning) eredményezi, megsérül a burkolat. A burkolatsérülés függ a primerkör nyomásától, mivel magasabb nyomás esetén a felhasadás később következik be. Ezután a remanens hőfejlődés és a Zr - vízgőz reakcióból keletkező hő együttesen gyorsan emeli a fűtőelem és a burkolat hőmérsékletét.

A $Zr + 2H_2O \rightarrow ZrO_2 + 2H_2$ egy intenzív exotermikus reakció, amelynek során 6300 kJ/gZr hő keletkezik. Az oxidációs sebességet a növekvő oxidrétegben történő diffúzió és a Zr felületen rendelkezésre álló gőz határozza meg, vagyis a reakció általában diffúzió-vezérelt. A reakciósebesség a kísérleti tapasztalatok alapján az Arrhenius összefüggés szerint függ a hőmérséklettől és fordítottan arányos az oxidréteg vastagságával. A számítások során empirikus korrelációkat használnak a cirkónium oxidáció és hidrogénképződés figyelembe vételére.

A reaktortartályon belül nem csak Zr-vízgőz, hanem acél-vízgőz reakció is létrejöhét. Az acél-vízgőz reakció bonyolultabb, mint a Zr-vízgőz reakció, mert a különböző kémiai összetevők (Cr, Ni, Fe ...) mennyisége, kristályszerkezete határozza meg az oxidáció mértékét. A kísérletek azt mutatták, hogy a folyamat parabolikus összefüggéssel jól leírható. Ez a reakció 1400 K alatt elhanyagolható mértékű a Zr-vízgőz reakcióhoz képest, de az acél olvadási hőmérséklete körül az acél oxidációs sebessége már meghaladja a Zr

oxidációt. Az acél oxidációjának számítását szintén empirikus modellekkel veszik figyelembe.

3.2.3. Zónaolvadás és áthelyeződés

A súlyos baleseti folyamat kezdeti fázisában a fémek oxidációja következhet be. Az olvadás kezdetekor a következő meghatározó elemeket veszik figyelembe a komplex kémiai reakciókban: B, Cr, Fe, O, Nb, Ni, U, Zr.

A zónaolvadás során három hőmérséklet régiót lehet meghatározni, az első 1470 és 1720 K között helyezkedik el. Ez a tartomány az alacsony hőmérsékletű olvadékok tartománya. Ebben a tartományban a szabályozórúddal kölcsönhatásba kerülő anyagok eutektikumai olvadhatnak meg, és a lefolyás következtében lokálisan elzárhatják a gőz útját. A vas olvadáspontja 1720 K, azonban olvadáspont alatt a különböző eutektikumok már olvadt, folyékony állapotba kerülnek. A Fe-Zr és a Ni-Zr már 1220 K, a Fe-Fe₂B és Ni, Ni₂B már 1420 K fölött folyékony állapotú eutektikumot képezhet. Ebben a tartományban lokális zóna-degradáció történik.

A következő hőmérséklet-tartomány felső határa 2270 K. Ebben a tartományban már jelentős mértékű a zóna sérülése, a szabályozórúd, és a nem-oxidált Zr olvadt állapotba kerül. A fém Zr 2125 K hőmérsékleten olvad meg. Abban az esetben, ha a fűtőelem-burkolat külső oldala jelentős mértékben oxidálódott, akkor ez megakadályozza a burkolat belső oldalán lévő olvadt Zr áthelyeződését, mert a ZrO₂ réteg szilárd állapotú marad ebben a tartományban. Mintegy 2170 K hőmérséklettől kezdve a fém Zr és a szilárd UO₂ fűtőelem tablettá, valamint a szilárd ZrO₂ héj között fellépő kémiai oldódás (chemical dissolution) következtében az UO₂ és ZrO₂ folyékonyvá válik (liquefaction), körülbelül 1000 K-nél az olvadási hőmérsékletük elérése előtt (a ZrO₂ olvadási hőmérséklete 2970 K, az UO₂ olvadási hőmérséklete pedig 3120 K). Az olvadt (Zr, U, O) keverék és az olvadt Zr gyertyaszerűen lefelé folyik (candling). A melegebb zónarészben olvadó anyag lefelé halad, ahol a hidegebb felülettel érintkezve az olvadt anyag időlegesen megszilárdulhat. A Zr fém és Zr-U oxid a zóna alsó részein megszilárdulva csökkenti, vagy teljesen elzárja a gőz útját (blockage). Ez az elzáródás csökkenti az átáramló gőz mennyiségét, és a hőátadási tényezőt. Az elolvadt, majd megszilárdult anyag a benne lévő maradványhő, valamint a fém-vízgőz reakcióhő hatására újra megolvad, és ismét elindul lefelé. Az olvadási, szilárdulási folyamat többször megismétlődik a zónaolvadási fázis során.

A harmadik tartományban az eddig szilárd UO₂, ZrO₂ és az (U, Zr) O₂ eutektikum is eléri olvadási hőmérsékletét. A teljes zóna degradálódik,

Súlyos balesetek determinisztikus alapú biztonsági elemzései

megolvad és ennek következtében teljesen megváltozik az eredeti zónageometria.

A folyékony állapotú keverék gravitáció vezérelte mozgása és megszilárdulása a hűtés hatására komplex fizikai és kémiai folyamatot képez. A leolvadó zónarészekben található anyag mennyisége, állapota és eközben a mozgó vagy megszilárduló rétegnek a gőzzel történő kölcsönhatása határozza meg az áthelyeződés sebességét. A zóna nódusokra való felosztását a termohidraulikával foglalkozó részben már említettük, a teljesítmény eloszlás modellezésével kapcsolatban. Az olvadási folyamat modellezése során az egyes zónarészek mozgásának a leírása az egyes nódusok állapotának a követésével történik, tehát a nodalizáció meghatározza a zónaolvadás modellezésének részletességét. Ebből következik, hogy a nodalizáció kiválasztásánál az a meghatározó szempont, hogy a zóna súlyos baleseti állapotát milyen részletességgel kívánjuk megjeleníteni.

A zónatörmelék (szilárd és folyékony állapotú) lefelé haladását időlegesen az alsó zónatartó lemez állítja meg. A zónatartó rács, amely jelentős fémtömeggel rendelkezik, a leolvadás kezdetén vízben van, később az alsó felülete gőzzel hűtött. A forró zónatörmelék egy idő után felmelegíti a tartórácsot, aminek hatására a tartórács szilárdságának csökkenése, majd sérülése következik be, a zónatörmelék ezután lezuhan a reaktortartály alján lévő vízbe. A tartórács sérülésének tárgyalása hasonló a tartályfenék sérülésének a folyamatához, amelyet a következő részben mutatunk be.

3.2.4. *Folyamatok a tartály aljában, tartálysérülés*

A zónatörmelék és víz kölcsönhatása hirtelen elgőzölgést okozhat, ami megnöveli a gőzarámot a zónán keresztül, és ezáltal oxidálja a zónában lévő fémeket jelentős hidrogénfejlődés mellett. A gőzfejlődés egy nyomáscsúcsot is okoz a reaktortartályban, de ez általában nem veszélyezteti a reaktortartály épségét.

A zónatörmelék, a vízzel történő kölcsönhatás során megszilárdul és lehül. A törmelék remanens hője először elgőzölgétteti a tartály alján lévő vizet, majd elkezdi felmelegedni. A törmelék szélén kialakul egy szilárd kéreg, belsejében pedig egy olvadt medence. A törmelékben lévő anyagok, fém, és fém-oxidok sűrűsége eltérő, ezért sűrűségük szerint rendeződhetnek a megolvadó komponensek. A tartály falával érintkező törmelék szilárd kérget képez, mert a fal hűti az olvadékot.

Egyes esetekben, amikor jelentősebb mértékű fém található az olvadékban, a zónatörmelék rétegződik. A fémréteg olvadáspontja alacsonyabb, sűrűsége

Súlyos balesetek determinisztikus alapú biztonsági elemzései

kisebb, mint az oxidrétegé, ezért a legáltalánosabban elterjedt modell szerint az oxidréteg tetején úszik. Ekkor a fémréteg a jelentősebb hővezető képessége miatt szinte fókuszálja az olvadékban tárolt hőt a tartály falára így a tartály sérülése a fémréteg és a reaktortartály találkozásánál jön létre. A tartály fala beleolvad a fémrétegbe, folyamatosan vékonyodik, majd a tartályfal egy ponton sérül és felhasad. A sérülés tehát az olvadék felső szintjén, a fémréteg magasságában alakul ki.

Ha nem alakul ki a fém és az oxidok rétegződése, hanem az olvadék egy homogén medencét képez, akkor is kialakul egy természetes cirkulációs áramlás az olvadékban, aminek következtében függőleges irányban hőmérséklet-gradiens keletkezik. A tartály sérülése ebben az esetben az olvadékmedence magasabb hőmérsékletű felső része közelében következik be.

A reaktortartály aljára egyrészt a hőterhelés hat, ami csökkenti a szilárdságát, másrészt a falban kialakuló feszültséget a tartályban lévő nyomás és a törmelék súlya határozza meg. A hőterhelés helye és mértéke a törmelék összetételétől, mennyiségétől függ. A tartály falára ható lokális terhelések határozzák meg a reaktortartály sérülésének helyét.

A tartályfal felhevülésének és megolvadásának vizsgálatához a súlyos baleseti kódokkal végzett számításoknál a tartályfalat radiális és axiális irányban nódusokra osztják, és a nódusok hőmérsékletét az oxid- és fémrétegek hőátadásának figyelembevételével számolják. Az egyes nódusokban elhelyezkedő fémrétegek sérülésének meghatározására két egyszerűsített, empirikus módszert használnak:

- a) a sérülés meghatározása a fémréteg hőmérséklete alapján;
- b) a fém kúszási sérülésének empirikus meghatározása a Larson-Miller paraméter alapján, amely a hőmérsékleten kívül a hőterhelés időtartamát is tartalmazza.

A két módszer közül az utóbbi (Larson-Miller) javasolható a tartálysérülés meghatározására.

A számítások elvégzésénél feltételezik, hogy ha a tartályfal sérülése egy adott nódusnál bekövetkezik, akkor az olvadt zónatörmelék a nódus teljes keresztmetszeti felületén kifolyik a reaktortartályból a nódus alsó éle által meghatározott magasságig. A folytatódó felhevülés további nódusok sérülését és újabb olvadéktömegek távozását vonja maga után. Ennek következtében az olvadék evakuálása a tartályból elhúzódó folyamat lehet, amelyet a tartályfal felhevülésének és sérülésének időbeli lefolyása határoz meg.

3.3. Konténment folyamatokra vonatkozó ajánlások

A konténmentben a baleseti helyzetben végbemenő folyamatok lefolyását nagymértékben meghatározzák a primerköri folyamatok. Ezért használnak sok esetben integrált kódokat a jelenségek leírásához, mivel ezek egyidejűleg alkalmasak a primerköri és konténment folyamatok számítására. Ugyanakkor, a következő alfejezetekben tárgyalt egyes fizikai folyamatok számításához speciális kódokra lehet szükség.

3.3.1. Konténment termohidraulika

A baleseti folyamat során a primerköri hűtőközeg-vesztéskor gőz és víz jut a konténmentbe, és ott nyomás- és hőmérséklet-emelkedést okoz. A hűtőközeg kifolyás történhet egyrészt a primerköri csőtörés helyén, másrészt tranziensek, vagy operátori beavatkozás esetén a térfogat-kompenzátor lefúvató vezetékén keresztül.

A folyamatok vizsgálatánál alkalmazott modellek a konténment belső térfogatát különböző számú térrészre (nódusra) bontják, az egyes térrészekben a közegparamétereket egy átlagos értékkel jellemzik (pontmodell). A térrészekben kialakuló közegparaméterek értékét a közeg tömegére, valamint entalpiájára vonatkozó mérlegegyenletek megoldásával határozzák meg. A konkrét térfelosztás a konténment kiterjedésétől, valamint az egyes térrészekben fellépő jellegzetes jelenségektől függ. Azokat a tereket, amelyek jól elhatárolhatóak, falakkal elválasztottak, különálló térrésszel modellezik, ugyanígy a nyomáscsökkentő és lokalizáló rendszereket, a bennük fellépő, a többi térrésztől eltérő közegparaméterek miatt. Egyes nagyobb tereket, mint például a PWR reaktorok kupolaterét, a számításoknál gyakran több virtuális térrészre bontják, ezáltal a termohidraulikai paraméterek eloszlásának részletesebb modellezése érhető el.

Az egyes térrészek közötti átáramlások megfelelő modellezéséhez az átáramlási felület keresztmetszetének pontos ismerete szükséges. A falakon és egyéb hővezető szerkezeteken történő hőátadást szintén figyelembe veszik a számításnál, ehhez az említett szerkezetek felületének, vastagságának és anyagának ismerete szükséges. A hőátadás ezeknek a szerkezeteknek a felületén történhet kényszeráramlási mechanizmussal, valamint a helyiségek közötti nyomások kiegyenlítődése, de esetleges hőmérséklet-különbségek fennmaradása után, természetes cirkulációval.

A konténment hűtőrendszereket (például sprinkler befecskendezés, felületi hőcserélők), amennyiben az adott súlyos baleseti folyamat során működnek, szintén modellezik a számításnál.

Súlyos balesetek determinisztikus alapú biztonsági elemzései

A sprinkler rendszerek modellezésénél a cseppek mérete és az esési magasság határozza meg a hőátadás mértékét. A cseppek sebessége egy kezdeti szabadesési időszak után a légellenállás által meghatározott lebegési (levitációs) sebesség, amely az esési magasság függvényében meghatározza az atmoszférában eltöltött tartózkodási időt. A cseppek száma, a cseppekre vonatkozó hőátadási összefüggések és a tartózkodási idő függvényében határozható meg az atmoszférából kivont hőteljesítmény.

A konténment felületi hőcserélőket elsősorban arra tervezik, hogy a súlyos balesetek hosszú távú fázisában biztosítsák a konténment hűtését. Ha azonban ilyen berendezés van a konténmentben, akkor az a teljes folyamat alatt működik, így a termohidraulikai folyamatok tárgyalásánál a működését figyelembe kell venni. A felületi hőcserélőn történő hőátadás számítása lényegében megegyezik a konténment szerkezeteken történő hőátadásra alkalmazott módszerrel.

3.3.2. Hidrogén eloszlás és égés

A baleseti folyamat felhevüléssel és cirkónium oxidációval járó fázisában elkezdődik a hidrogénképződés, és ettől kezdve nem csak gőz és víz, hanem hidrogén is kikerül a primerkörből a konténmentbe. A hidrogén jelenléte miatt a konténment légterében potenciálisan gyulladásveszélyes gázkeverék alakul ki.

A hidrogén-levegő-gőz keverék akkor tekinthető gyúlékonynak, ha az alábbi, az egyes komponensek térfogati koncentrációjára vonatkozó feltételek teljesülnek:

$H_2 > 4.1 \%$, $H_2O < 55 \%$, $O_2 > 5 \%$

A minimális koncentráció a hidrogén esetében 4.1 % és az oxigén esetében 5 %. A gőznek inertáló szerepe van a keverék gyúlékonysága szempontjából: 55 % gőzkoncentráció fölött a keverék nem gyúlékony.

A keverék gyúlékonyságát nem elegendő globálisan (az egész konténmentre) értelmezni, hanem ez egy lokális paraméter, vagyis a konténmentben lehetnek lokálisan gyulladásveszélyes területek, amelyekben helyi égés kialakulhat, miközben a globális koncentrációk esetleg nincsenek a gyúlékonysági tartományban.

Ezért a konténment nódusokban kialakuló nyomás és hőmérséklet mellett a gázkoncentráció számítására is szükség van, mivel ennek alapján dönthető el a keverék lokális gyúlékonysága. A hidrogén koncentráció számításához azonban a kifejezetten termohidraulikai számításoknál sokkal részletesebb nodalizáció szükséges. Ennek az az oka, hogy míg a nyomásértékek a

Súlyos balesetek determinisztikus alapú biztonsági elemzései

konténment különböző részei között gyorsan kiegyenlítődnek, a helyi eloszlást mutató hőmérsékletek pedig általában nem kritikus paraméterek, addig a helyi hidrogén koncentrációk a lokális gyúlékony koncentrációk esetleges fellépése miatt részletesebb vizsgálatot igényelnek.

Ha egy gyúlékony gázkeverékben gyújtóforrás is rendelkezésre áll, akkor az égési folyamat elindul. A kialakuló égési mechanizmust az adott geometriai feltételek és a keverék összetétele határozza meg. A lángterjedés kezdetben mindig lamináris égési mechanizmussal indul. A terjedési útvonal mentén az égési folyamat és az expanzió együttesen turbulenciát okoz, amely megnöveli az égési sebességet. A lángsebesség a lassú deflagrációk (lamináris, illetve turbulens égések) esetében tapasztalt 10 m/s nagyságrendű sebességektől a detonációk esetében 2000 m/s-ig terjedhet. A detonációkat egy átmeneti DDT (deflagration-to-detonation transition) tartomány előzi meg, amelyben a turbulens láng eléri a lokális hangsebességet és detonációvá gyorsul. A detonációk és gyorsított lángok fellépése csak jelentősebb hidrogén koncentrációk esetében várható.

A detonációk kialakulásának mennyiségi megfogalmazására alkalmas a 7λ kritériumnak nevezett empirikus korreláció, amely a detonációkra jellemző λ cellaméretet hasonlítja össze a helyiség jellemző L geometriai méretével. Eszerint a detonációk fellépése akkor várható, ha a helyiség mérete egy bizonyos kritikus méretnél nagyobb:

$$L > 7\lambda$$

A detonációs hullámok halpikkelyszerű mintázatot mutatnak, amelynek elemeit detonációs cellának nevezik. A detonációs cella λ mérete a keverék átlag összetételétől és hőmérsékletétől függ. A detonációk súlyosan veszélyeztetnék a konténment integritását, ezért a kialakulásukat tervezési megoldásokkal, vagy balesetkezelési eszközökkel zárják ki. Ezt az NBSZ a következőképpen írja elő:

3a.2.2.7200. „Legalább az alábbi eseményeket tervezési megoldásokkal vagy preventív baleset-kezelési képességek kialakításával gyakorlatilag ki kell zárni, azaz bizonyítani kell, hogy bekövetkezésük fizikailag lehetetlen, vagy a bekövetkezési gyakorisága nagy biztonsággal kisebb, mint 10^{-7} / év:

c) minden olyan rövid- és hosszútávon jelentkező terhelés, ami veszélyeztetheti a konténment integritását, így különösképpen nehéz teher leejtése, gőz- és hidrogénrobbanás, üzemanyag-olvadék kölcsönhatása beton teherhordó szerkezetekkel és konténment túlnyomódás.”

A detonációkon kívül kizárandó mechanizmus a gyorsított lángok tartománya. A gyorsított lángok tartománya azzal jellemezhető, hogy elég

Súlyos balesetek determinisztikus alapú biztonsági elemzései

nagy, 600-700 m/s lángsebességek alakulhatnak ki, amelyek azonban nem érik el a hangsebességet, ebből következően a detonációs égésnél kisebb nyomásterhelést okoznak. A gyorsított lángok fellépésének lehetőségét leggyakrabban a termodinamikai σ - kritérium alapján vizsgálják. A σ paraméter egy expanziós arányszám $\sigma = \rho_u / \rho_b$, ahol ρ_u a kezdeti keverék sűrűsége és ρ_b az égéstermékek sűrűsége. A gyorsított lángok fellépése akkor zárható ki, ha a σ paraméter értéke nem halad meg egy bizonyos σ_{kr} értéket, amely a reakciónál kialakuló hőmérséklet-különbség függvénye.

A fenti két mechanizmuson kívül felléphetnek turbulens égések, ezek esetében is megvizsgálandó a kialakuló nyomás. A számításra alkalmas legegyszerűbb módszer az AICC (Adiabatic Isochoric Complete Combustion) módszere, amely a nevéből következően az adott térrészt állandó térfogatúnak (zártnak) feltételezve az ott található teljes hidrogénmennyiség elégésénél kialakuló nyomást határozza meg. Ez a módszer azonban igen konzervatív, főleg a zárt térrész feltételezése miatt, így a számítások gyakran vezetnek elfogadhatatlanul magas nyomásértékekre.

Pontosabb megközelítést adnak az égési nyomás számítására a pontmodelles kódok, amelyek a turbulens lángterjedési sebesség meghatározásán alapulnak. Egy adott, falakkal határolt konténment térrészben kialakuló turbulens lángsebesség meghatározásához a térrészt jellemzően nagyobb számú altérrészre kell felosztani, és az alterekben kell meghatározni a gázkoncentrációkat. Ezen kiindulási adatok alapján határozható meg a térrész egy adott pontjából (például egy ott elhelyezkedő hidrogén rekombinátorból, vagy más gyújtóforrásból) kiinduló égési front sebessége. Az elmondottakból következik, hogy a hidrogéneloszlás számításához alkalmazott nodalizációs térrészek száma akár sokkal nagyobb lehet, mint a kizárólag termohidraulikai elemzéshez használt nódusok száma.

A hidrogén turbulens égése viszonylag gyors folyamat, azonban a folyamat lefutásának időtartama a térrészek méretétől függően 10-20 s nagyságrendű. Ez az idő elegendő ahhoz, hogy a különböző üzemzavari rendszerek, például hasadótárcsák vagy víztartályos lokalizációs rendszerek működésbe lépjenek, így ennek következtében jelentősen mérséklődhet a kialakuló égési nyomás nagysága. Ezért javasolható, hogy ezeknek az üzemzavari rendszereknek a működését a hidrogénégés számítások és elemzések során vegyék figyelembe.

3.3.3. Nagyenergiájú folyamatok (DCH és gőzrobbanás)

A nagynyomású reaktortartály-töréskor, a primerkörben lévő gőzzel együtt a megolvadt zóna, zónatörmelék gőz nagy sebességgel áramlik ki a törésen. A

Súlyos balesetek determinisztikus alapú biztonsági elemzései

nagy sebességű gőz magával ragadja a zónatörmelék kisméretű részecskéit, amelyek így cseppek formájában hagyják el a tartályt. A forró, 1700-2500 K hőmérsékletű részecskék relatíve nagy felületén kémiai reakciók játszódhatnak le. Ezek a gőz és a fém (Zr, Cr, Ni, Fe) közötti reakciók, amelyek hőt és hidrogént termelnek, illetve az oxidok esetén létrejöhethet a keletkezett hidrogén rekombinálása (égése), amely szintén hőt termel. A forró részek a reaktorakna és a konténment kialakításától függően a nagy sebesség következtében a konténment különböző részeibe eljuthatnak. Ezek a részecskék a remanens hő egy részét hordozzák, így közvetlenül melegítik a konténmentet. Ezt nevezik közvetlen konténment felhevítésnek (DCH-Direct Containment Heating). A kiáramlás a nagy sebesség és a folyamatosan tárguló sérülés következtében rövid ideig, mindössze pár másodpercig tart, és ez hirtelen nyomásnövekedést okoz a konténmentben.

Egyes konténmentek, például a VVER-440/213 konténment kiképzése olyan, hogy a reaktorakna és a többi helyiség között a közvetlen átáramlási felület kicsi, ezért a forró részecskék, a kiáramló gőz kikerülése a reaktoraknából csak lassan következhet be, és ekkor főleg a gáznemű közeg kikerülése várható. A folyamat során a részecskék a reaktoraknában maradnak, felhevítik a reaktorakna atmoszféráját, valamint a tartályból kiáramló gőz is emeli a reaktoraknában a nyomást, tehát elsősorban a reaktorakna integritása kerül veszélybe. Más kialakítású, nagyobb átáramlási felületű reaktoraknával rendelkező konténmentek esetében a DCH folyamat során a forró részecskék és gázok a konténment felső részeibe eljutnak, és növelik az ott kialakuló nyomást.

A DCH folyamat számítására rendelkezésre állnak számítási modellek. A nagynyomású tartálysérülés potenciális veszélyessége miatt javasolható a folyamat elemzésének elvégzése a súlyos baleseti vizsgálatok során.

A gőzrobbanás egy másik, potenciálisan veszélyes, nagyenergiájú folyamat, amely olvadt fémeknek vagy fénoxidoknak a vízzel való találkozása esetén történhet meg. Ahhoz azonban, hogy nagy energiájú gőzrobbanás jöjjön létre, az olvadáknak először szét kell esnie kis cseppekre, amelyek nagy felületet biztosítanak a hőátadáshoz. A forró felületen intenzív hőátadásra csak akkor kerül sor, ha a felületen képződött gőzpárna összeomlik, és a folyadék rányomódik a felületre. A folyamat sebessége egy lökeshullám sebességével összevethető, és emiatt néhány milliszekundum alatt végbemegy.

A tartályon belüli gőzrobbanás a szakértők többségének véleménye szerint kevésbé okoz problémát főleg azért, mivel a reaktortartály jelentős nyomásterhelést bír ki. A tartályon kívüli gőzrobbanás jelenti a nagyobb

Súlyos balesetek determinisztikus alapú biztonsági elemzése

kockázatot. A tartályon kívüli gőzrobbanás csak abban az esetben jöhet létre, ha az olvadék a reaktoraknában elhelyezkedő vízzel kölcsönhatásba kerül, de ezen kívül még számos más tényező együttállása szükséges ahhoz, hogy nagyenergiájú folyamat jöjjön létre. A gőzrobbanás létrejöttét elősegítheti az olvadék túlhevítettsége, ekkor ugyanis a hőelvitel nem vezet azonnal kéregképződéshez az olvadt anyag felületén, így könnyen további cseppekre eshet szét, növelve ezzel a hőtadó felületet, és a folyamat intenzitását. A tartályon kívüli kölcsönhatáskor a reaktoraknában uralkodó alacsony nyomás elősegíti az intenzív gőzképződést.

A gőzrobbanás során kialakuló terhelés számítása rendkívül összetett, ezért általában közelítőleg, az olvadékban tárolt energia és a víz elforrásához tartozó energia mérlege alapján határozzák meg a várható nyomásnövekedést.

Törekedni kell arra, hogy a nagynyomású tartályszerülés, valamint a gőzrobbanás kialakulása speciális tervezési megoldásokkal, vagy balesetkezelési eljárásokkal gyakorlatilag kizárható legyen.

3.3.4. Zóna-beton kölcsönhatás és aknasérülés

A reaktortartályból kikerülő forró olvadék a reaktorakna beton falával és padlójával kölcsönhatásba kerül. A betonból, a felmelegedés hatására először a szabad víz párolog el (373-500 K), majd a szerkezetileg kötött kristályvíz (633-753 K). A kristályvíz elpárolgásakor a beton porladni kezd. A kémiaileg kötött széndioxid (CO_2) 873-1253 K közötti hőmérsékleten szabadul fel a betonból. Amikor a beton hőmérséklete eléri az 1350-1670 K-t, akkor kezdődik a beton beolvadása a zónaolvadékba. A betonból keletkező gázok (H_2O , CO , CO_2) mennyisége és a beton olvadáspontja a beton összetételétől függ. A beton-fajtákat két fő csoportra osztják a szilikátos (bazalt) és mészkő alapúra. A szilikátos betonok összetételében a kvarc (SiO_2) dominál, míg a mészkő-alapú betonoknál a kalcium-karbonát (CaCO_3) a fő összetevő.

A reaktoraknába jutó zónatörmelék fémeket, fénoxidokat, illetve ezeknek az anyagoknak az eutektikumait tartalmazza. Az olvadék hőmérsékletét egyrészt a folytatódó remanens hőfejlődés, másrészt a fémek oxidálódásánál létrejövő exotermikus reakciók növelik a beton beolvadása során. Először a még nem oxidált fém Zr oxidálódik, ezután az acélt alkotó (Fe, Ni, Cr) elemek oxidálódása következik. Az acél tömege ennek ellenére nem csökken, mert a beton eróziójával együtt betonvas kerül be az olvadékba. A beton összetételétől és a beton-olvadék rétegződésétől függően a beton axiális és radiális irányú bomlási sebessége különböző lehet.

Súlyos balesetek determinisztikus alapú biztonsági elemzései

Ha a reaktortartály sérülése után a forró zónatörmelék száraz betonra esik, akkor azonnal elkezdődik a zóna-beton kölcsönhatás. A törmelékkel érintkezésbe kerülő beton eróziója mind függőleges, mind vízszintes irányban elindul, ez a reaktorakna oldalfalainak és alapjának erózióját jelenti. A folyamat egy lassú indulás után először felgyorsul, majd a beolvadó anyagtömeg hatására valamelyest csökken a sebessége. A kísérletek szerint ebben az esetben a beton bomlása megállíthatatlan. A folyamat előbb-utóbb az alaplemez átégéséhez, vagyis a konténment sérüléséhez és ebből következően a kikerülés megnövekedéséhez vezet.

Ha a forró olvadék a kijutásánál a reaktoraknában már jelen lévő vízbe esik bele, akkor az olvadék szélén kéreg alakul ki, amely megakadályozza a hatékony hőátadást. Ugyanez a helyzet áll elő akkor is, amikor a reaktoraknába jutott olvadékot felülről árasztják el vízzel lehűtés céljából. A beton reaktoraknában a zóna-beton törmelék hűthetőségét a kísérletek nem támasztják alá egyértelműen; bizonyos feltételek között az olvadék hűthetőnek bizonyult, de csak különleges paraméterek mellett.

Amennyiben a reaktoraknában kábelátvezetések, vagy ajtó van, mint például a VVER-440-es reaktornál, akkor a kiömlő olvadék a mennyiségétől függően vagy közvetlenül károsítja a szerkezetet, vagy sugárzásos hőátadással melegíti. Ebben az esetben megsérülhet az ajtó tömítése, vagy maga az ajtó is. Mindkét esetben megnövekszik a konténment szivárgása. A reaktoraknában elhelyezkedő speciális szerkezetek felhevülése és esetleges sérülése szintén vizsgálandó a súlyos baleseti elemzés során, mivel előfordulhat, hogy a konténment sérülése ezeken a helyeken már jóval az alaplemez sérülése előtt megtörténik.

A zóna-beton kölcsönhatás komplex hőtechnikai és fizikai-kémiai folyamat. A folyamat leírására olyan számítógépes modellek alkalmazása javasolt, amelyek a zónatörmelék és a beton alkotórészeiből képződött eutektikumok likvidusz és szolidusz görbéinek, az ezeknek megfelelő halmazállapot változások figyelembe vételére alkalmasak. A számítással követhető a reaktorakna oldalfalának és alaplemezének a leolvadása (ablációja).

3.4. Hasadási termékek terjedésére vonatkozó ajánlások

A zónában lévő fűtőelemekben a nukleáris fission hatására hasadási termékek keletkeznek. A súlyos baleseti folyamat során a hasadási termékek kijutnak a fűtőelemekből először a primerkörbe, majd a konténmentbe és innen végül a környezetbe. A hasadási termékek terjedését nagymértékben befolyásolják az előző fejezetekben ismertetett termohidraulikai folyamatok.

3.4.1. Kikerülés a fűtőelemből

A fűtőelemekben keletkező anyagok mennyisége a kezdeti UO_2 töltet mennyiségétől, dúsításától és a fűtőelemeknek a működő reaktorban való tartózkodási idejétől, teljesítményétől függ. A zónában található izotópok mennyiségének, a zónaleltárnak a meghatározásához egyensúlyi zónát, a feltételezett baleset időpontjára - konzervatív feltételezéssel - közvetlenül a kampány végén történő leállás utáni állapotnak (EOC- End of Campaign) megfelelő zónaleltárt használnak.

A hasadási termékek közül először a burkolat és a tableta közötti résből kerülnek ki a hasadási termékek a primerkörbe. A résbe normál üzem közben kerülnek a hasadási termékek, amelyek a fűtőelem burkolat sérülésekor kerülnek ki. A résben lévő aktivitás nagyságrendekkel kisebb, mint a fűtőelemből súlyos baleset során kikerülő aktivitás. Tervezési üzemzavarok során megengedett a résaktivitás konténmentbe jutása.

Súlyos baleset esetén magasabb lesz a fűtőelem hőmérséklete, emiatt nagyságrendileg megnő a kikerülő elemek száma és mennyisége. A kikerülés hőmérsékletfüggő: a számítógépes modellek általában a kísérleti tapasztalatoknak megfelelően, exponenciális összefüggést használnak a fűtőelemből történő kikerülésre. A kikerülés formája lehet gőz, vagy aeroszol. Az aeroszokok 10^{-7} cm - 10^{-3} cm közötti átmérőjű folyékony vagy szilárd részecskék.

Először a nemesgázok (Xe, Kr) és az illékony hasadási termékek, mint a halogének (I, B) és az alkáli fémek (Cs, Rb) jutnak ki a fűtőelemből a primerkörbe. Majd a kevésbé illékonyak, a tellúrral rokon elemek (Te, Sb, Se) és a molibdénhez hasonlóan (Ru, Rh, Pd, Mo, Tc) viselkedő elemek, valamint az alkáli földfémek csoportja (Ba, Sr) kerülnek ki a zónából. Legmagasabb hőmérsékleten, legkésőbb a nem illékony hasadási termékek (La, Ce, Pr, Nd, Pm, Eu, Y és Zr, Nb, U, Pu) jutnak ki a fűtőelemből.

A zónaolvadási folyamat során a tartálysérülésig nagyságrendileg a nemesgázok szinte teljes mennyisége, az illékony elemek esetén mintegy 85-90 %, a félig illékonyak esetén 50-70 % kijut a primerkörbe, a nem illékonyak a zónatörmelékben maradnak.

3.4.2. Primerköri terjedés

A zónaleltár táblázatok általában igen nagyszámú, több 100 izotópot tartalmaznak, amelyeknek az egyenkénti kezelése egyrészt rendkívül időigényes, másrészt fölösleges lenne; ezért a terjedésszámítási modellek a

Súlyos balesetek determinisztikus alapú biztonsági elemzése

hasadási-termékeket terjedési tulajdonságaik, mindenekeelőtt az illékonyáguk alapján csoportosítják (1. táblázat).

Csoport	Elemek
Nemesgázok	Kr, Xe
Halogének	I, Br
Alkáli fémek	Cs, Rb
Oxigén család	Te, Sb, Ag
Alkáli földfémek	Sr, Ba
Átmeneti fémek	Zr, Nb
Nemesfémek	Pd, Ru, Rh, Mo, Tc, In
Szerkezeti anyagok	Fe, Ni, Cr, Cd, In, Ag, Sn, Mn
Ritka földfémek	La, Ce, Pr, Nd, Pm, Sm, Eu, Gd
Aktinidák	Np, Pu, Am, Cm

1. táblázat - A hasadási termékek csoportosítása

A különböző számítógépi modellek nagyon hasonló csoportokat alkalmaznak a hasadási termékek terjedésének számítására. A tapasztalatok szerint 10-12 db, a kémiai és terjedési tulajdonságok alapján meghatározott csoport alkalmazása elegendő az anyagok terjedésének megfelelő leírására.

A hasadási termékek először a zóna környezetébe kerülnek, az aeroszolok már itt lerakódhatnak. A magas hőmérsékletek miatt azonban a zóna környezetében minimális a lerakódás, mivel a gőzök kondenzációja, ha egyáltalán van, jelentéktelen. Miután a gőzök kikerülnek a zónaövezetből, elkezdődik a gáztérben a kondenzációjuk, amelynek során, aeroszolok képződnek belőlük. A reaktortartályból a hasadási termékek és szerkezeti anyagok három különböző alakban, gázok, gőzök és aeroszolok formájában lépnek ki a primerköri vezetékbe.

A primerkörben a gőzök és aeroszolok viselkedését fizikai és kémiai folyamatok határozzák meg. A terjedést a következő fontosabb fizikai folyamatok befolyásolják:

- Gőzök kondenzációja és elpárolgása az aeroszolok és szerkezetek (csővezeték) felületéről,
- Aeroszolok összetapadása (agglomeráció), a befolyásoló részfolyamatok:

Súlyos balesetek determinisztikus alapú biztonsági elemzése

- Brown mozgás,
 - Kihullás (különböző méretű aeroszolok különböző sebességgel hullanak ki),
 - Turbulencia (az áramlás magával ragadja a részecskéket).
- a) Aeroszol lerakódás a csővezetékek felületén (depozíció), a befolyásoló részfolyamatok a következők:
- Brown mozgás,
 - Kihullás (gravitáció, tehetetlenség),
 - Áramlás hatására történő ütközés,
 - Diffúzióforézis,
 - Termoforézis (hőmérsékletkülönbség hatására).

Az aeroszolok nem csak lerakódhatnak, hanem a felületről leválhatnak és visszakerülhetnek az áramló közegbe (resuspension). Ennek két lehetséges formája van:

Leválás (resuspension):

- Mechanikai leválás,
- Újra-elgőzölgés (revaporization).

A kikerült hasadási termékek nem csak egymással, hanem a szerkezettel is kémiai kölcsönhatásba lépnek, például az acél felületeken a CsOH és a Te kémiai kötést létesít. Speciális megkötő, leválasztó hatása van a vízben keresztül történő áthaladásnak. Ilyen folyamat zajlik például gőzfejlesztő csövek törésénél, amennyiben a törés helye vízzel borított. A vízoszlop magasságától függően az aeroszolok nagy része (90% - 99%) a vízben marad.

A hasadási termékek primerköri terjedésének elemzésére olyan számítógépi modellek javasolhatóak, amelyek alkalmasak a fent felsorolt folyamatok kezelésére. A primerköri terjedés számításánál alkalmazott nodalizáció megegyezhet a termohidraulikai számítások nodalizációjával. Az aeroszolok, gázok és gőzök a primerköri közeggel együtt mozognak, és ennek során az adott nódusban mennek végbe az aeroszol-fizikai folyamatok.

A primerkörben a hasadási termékek visszatartása jelentős lehet a nemesgázok kivételével, amelyek lényegében teljesen távoznak innen. A tartálysérülésig nagyságrendileg a primerkörbe kijutott mennyiségre vonatkoztatott visszatartás az illékony hasadványok esetében 10 % (I) – 25 % (Cs), a félig illékonyak esetén a visszatartás mintegy 50 – 80 %.

3.4.3. *Terjedés a konténmentben és a forrástag*

A hasadási termékek a primerkörből kerülnek a konténmentbe. Az aeroszolviselkedést a konténmentben hasonló folyamatok (agglomeráció, depozíció) határozzák meg, mint a primerkörben. A különböző folyamatok által képviselt anyagáramok mennyiségi sorrendje azonban megváltozik, így a gravitációs kihullás sokkal nagyobb jelentőségű a konténmentben, mint a primerkörben.

A gravitációs kihullást befolyásolja a konténment légterében végbemenő, a termohidraulikai folyamatok által meghatározott kondenzáció. Az aeroszolk felületére irányuló kondenzáció következtében ugyanis megnövekszik az aeroszol részecskék tömege, ez a folyamat pedig gyorsítja a gravitációs kihullást.

Az aeroszolk egy része a turbulencia, valamint különböző diffúziós mechanizmusok következtében a konténment térrészeket körülvevő falakra rakódik (depozíció). Mivel a falakon a kondenzáció miatt vízfilm található, a továbbiakban az aeroszolk vízfilmbe kerülve, azzal együtt mozognak.

Amennyiben működik a sprinkler rendszer, úgy a sprinkler cseppek jelentős szerepet játszanak a hasadási termékek transzportjában. A sprinkler cseppek ugyanis együttesen nagy felülettel rendelkeznek, amelyen elnyelik az aeroszolkat, a gázállapotú jódokkal pedig kémiai kölcsönhatásba lépnek, amelynek során megkötik a jódot.

A lokalizációs rendszereken, például a VVER-440 atomerőmű buborékoltató tálcáin, az átbuborékolás során a közeggel érkező aeroszolk elnyelődnek a vízben.

A hasadási termékek konténmentbeli terjedésének elemzésére olyan számítási modellek javasolhatóak, amelyek alkalmasak az ismertett terjedési mechanizmusok figyelembevételére. A hasadási termékek transzportjának számításánál alkalmazott nodalizáció megegyezhet a termohidraulikai számítások nodalizációjával. Az aeroszolk, gázok és gőzök a közeggel együtt mozognak, és ennek során az adott térrészben mennek végbe az aeroszol-fizikai folyamatok. A hasadási termékek nyilvántartása a bevett gyakorlat szerint kiterjed az egyes hasadási-termék csoportok szerinti bontásban a konténment térrészekén belül az atmoszférában lebegő, a különböző falakra kirakódott, valamint a térrészek padlóján levő vízben (zsompan) jelen lévő hasadványok mennyiségére.

A súlyos baleseti folyamat előrehaladása során az atmoszférában található aeroszolk mennyisége a különféle depozíciós folyamatok hatására

Súlyos balesetek determinisztikus alapú biztonsági elemzése

jelentősen csökken, ennek megfelelően növekszik a falakon lerakódott, illetve a zsompvízben található anyagok aránya.

A konténmentből a közeg a következő módon kerülhet ki:

- a) normál szivárgáson keresztül (hermetikus burkolat, az átvezetések, zsilipajtók, valamint a technológiai és kábelátvezetések szivárgása),
- b) konténment törésén keresztül,
- c) konténment szivárgásnövekedéssel,
- d) konténment izolálás (szellőző rendszer csappantyúk) nyitva maradása esetén.

Az említett szivárgási módok közül a normál szivárgás mindig fennáll, a többi útvonal a balesettel összefüggő járulékos hibák, vagy sérülések következtében alakul ki. A kikerülő hasadási termékek mennyiségét meghatározza a szivárgási felület keresztmetszete, valamint a hasadási termékek koncentrációja és a konténment nyomása.

A konténment visszatartó képessége a konténmentből kijutott hasadási termékeknek a primerkörből kijutott anyagokhoz viszonyított aránya. Amennyiben normál szivárgásról beszélhetünk, vagyis nem következik be konténment sérülés, akkor a konténment visszatartó képessége a nemesgázok esetében nagyságrendileg 95 %, az illékony hasadványok esetében 99 %.

A forrástagot (source term) úgy határozzák meg, mint a baleseti folyamat során a konténmentből kijutó hasadási termékek mennyiségét. A forrástag megadható a különböző hasadási termékeknek a zónaleltárban meglévő arányaként, vagy ezeknek a hasadási termékeknek az aktivitásaként; ezek a mennyiségek egymással egyértelmű kapcsolatban állnak. A forrástagot a konténment határán értelmezzük.

A forrástag meghatározása a hasadási termékek terjedésének számítására alkalmas számítógépi modellekkel történik a hasadási termékek koncentrációja, a nyomás és a konténment szivárgás keresztmetszeti felülete alapján.

3.5. Balesetkezelés számítására vonatkozó ajánlások

A balesetkezelési intézkedések fő céljaik szerint lehetnek megelőző, vagy következmény-csökkentő intézkedések. Négy fő biztonsági célt szoktak megfogalmazni a balesetkezeléssel kapcsolatban:

- a) Zónasérülés elkerülése,

Súlyos balesetek determinisztikus alapú biztonsági elemzései

- b) Reaktortartály sérülés elkerülése,
- c) Konténment épségének megőrzése,
- d) Radioaktív kibocsátások mértékének csökkentése.

A fenti biztonsági célok közül a „Zónasérülés elkerülése” tekinthető megelőzésnek, a többi biztonsági cél már a következmény-csökkentés keretébe tartozik. A zónasérülés elkerüléséhez a zóna hűtőrendszereit kell működtetni, ehhez pedig sok esetben a primerköri nyomást kell csökkenteni. A „Reaktortartály sérülés elkerülése” a zónahűtés sikertelensége esetén a reaktortartály külső hűtésével biztosítható kisebb teljesítményű reaktoroknál. A további biztonsági célok, a „Konténment épségének megőrzése”, valamint ezzel együtt a „Radioaktív kibocsátások mértékének csökkentése” különböző módszerekkel érhető el. A zónaolvadék-beton reakció elkerülhető a core-catcher segítségével. A konténment épségét veszélyeztető hidrogén égések megelőzését szolgálja a hidrogénkezelés. A konténment lassú túlnyomódásának megelőzésére a szűrt leeresztést vagy a hosszú távú konténment hűtést alkalmazzák. A konténment hosszú távú épségének a megóvása egyúttal a „Radioaktív kibocsátások korlátozása” biztonsági cél eléréséhez is létfontosságú.

A továbbiakban sorra vesszük az említett biztonsági célok eléréséhez alkalmazott intézkedések megítéléséhez szükséges számítások jellemzőit.

3.5.1. *Primerköri nyomáscsökkentés*

Ha az üzemzavar során a túl magas primerköri nyomás miatt a zóna üzemzavari hűtőrendszer nem tud hűtővizet betáplálni a reaktortartályba, akkor ez a zónahűtés megghiúsulásához és súlyos balesethez vezethet. A primerköri nyomáscsökkentés az üzemzavar kezdeti szakaszában a zónaolvadás megelőzését szolgálja azáltal, hogy lehetővé teszi a kisnyomású zóna üzemzavari rendszerek betáplálási nyomásának elérését. A primerköri nyomáscsökkentés végrehajtásának fő eszközei a térfogatkompenzátor lefúvató, valamint biztonsági szelepei. Ha a nyomáscsökkentést megfelelő mértékben és még időben sikerül végrehajtani, akkor a zónahűtés funkció helyreállítható és a súlyos baleset megelőzhető.

Ha a zónaolvadást nem sikerül megelőzni, akkor a nagy primerköri nyomáson bekövetkező tartálysérülést kell mindenáron elkerülni, mivel ez konténment sérüléshez és kiugróan nagy radioaktív kikerüléshez vezet. Ebben az esetben a primerköri nyomáscsökkentésnek következmény-csökkentő funkciója van.

Súlyos balesetek determinisztikus alapú biztonsági elemzése

Ennek a balesetkezelési funkciónak a megvalósítását az NBSZ a következőképpen írja elő:

3a.2.2.7400. „A tervezés során súlyos balesetek kezelésére előírányzott funkciókat és az azokat megvalósító, súlyos baleseti nyomáscsökkentő és hidrogén eltávolító rendszereket olyan terjedelemben kell meghatározni, hogy az üzemanyag-olvadást okozó eseményeknél a nagynyomású folyamatok, valamint a korai konténment sérülések elkerülhetők legyenek.”

A primerkörü nyomáscsökkentés számításához a 3.2.1. Termohidraulika c. részben javasolt nodalizációval rendelkező számítási modellek alkalmazhatóak, kiegészítve a lefúvatási útvonalon található szelepek megfelelő paramétereivel.

3.5.2. Hidrogénkezelés

A hidrogénégés közismerten potenciális veszélyeztető hatása miatt az előző fejezetben említett NBSZ pont (3a.2.2.7400) követelménye külön előírást tartalmaz a hidrogén-eltávolító rendszerek létesítésére vonatkozóan.

A konténmentbe kerülő hidrogén kezelésére különböző megoldásokat alkalmaztak az elmúlt évtizedekben: ilyenek a konténment atmoszféra inertálása, a szándékos gyújtás, illetve a hidrogén rekombinátorok alkalmazása. A konténment atmoszféra inertálását kizárólag a viszonylag kis térfogatú BWR konténmenteknél alkalmazzák, ezért ezzel a módszerrel itt nem foglalkozunk. A hidrogén szándékos gyújtása a módszer potenciális veszélyessége miatt kevésbé elterjedt. A hidrogén eloszlással és égéssel foglalkozó fejezetben tárgyaltak a szándékos gyújtás esetén érvényesek.

A rekombinátorok alkalmazása a hidrogén kezelésére a PWR atomerőművek esetében a leginkább elterjedt módszer. A rekombinátorok passzív, katalitikus berendezések, amelyek a hidrogén lassú, a katalizátor felületén történő égését eredményezik. A katalitikus égés során felszabadul a hidrogén exotermikus égéshője, ami egy természetes cirkulációs áramlást hoz létre a rekombinátoron keresztül. A különböző típusú rekombinátorok esetében rendelkezésre áll a berendezésre jellemző, kísérleti úton meghatározott fenomenologikus jelleggörbe, amely megadja a hidrogén eltávolítási sebességet a belépésnél érvényes közeg paraméterek, például a hidrogén koncentráció, nyomás, hőmérséklet függvényében. A rekombinátor eltávolítási sebesség és a baleseti folyamat során képződött hidrogén mennyiség összevetéséből lehet meghatározni a rekombinátorok szükséges számát a konténmentben.

Súlyos balesetek determinisztikus alapú biztonsági elemzései

A súlyos baleseti folyamat során a konténmentben kialakuló hidrogén koncentráció számításánál a hidrogén rekombinátorok működésének figyelembevételénél a típusra jellemző, fenomenologikus jelleggörbét használják. A gázeloszlások számításánál a konténment részletesebb nodalizációjára van szükség, mint a termohidraulikai számítások esetében. A rekombinátorok leírásánál még ennél is finomabb, az egyes rekombinátorok térbeli méreteihez hasonló nodalizációs felbontásra van szükség. Ugyanis a rekombinátor eltávolítási sebességét a belépésnél fellépő közegparaméterek határozzák meg, pontmodelles kódok esetében azonban ez a térrész átlag paramétereivel adható meg. Amennyiben a modellezésnél használt térrész lényegesen nagyobb a rekombinátor méreténél, akkor a számításnál alkalmazott közegparaméterek nagyon eltérhetnek a rekombinátorba jutó tényleges közegparaméterektől, ami a hidrogén eltávolítás számításának hibájához vezet. A megfelelő pontosságú elemzés eléréséhez vagy nagyon részletes nodalizációjú pontmodelles kódok alkalmazása, vagy pedig a részletes térfelosztást természetes módon alkalmazó CFD kódok felhasználása javasolható.

A hidrogén eloszlás számításán túlmenően szükség lehet a hidrogénégési számításokra. A cirkónium oxidáció ugyanis nagyon intenzív folyamat, amelynek során a rekombinátorok működése ellenére rövidebb-hosszabb ideig kialakulhat gyúlékony koncentrációjú közeg. A számítást a 3.3.2 fejezetben ismertetett módon, AICC módszerrel, vagy pontmodelles kódok segítségével célszerű elvégezni a keletkező égési nyomás nagyságának meghatározására.

3.5.3. Core catcher

A korábban idézett NBSZ előírás megköveteli a zónaolvadék visszatartását lehűtött állapotban a konténmentben:

3a.2.2.7500. „A súlyos balesetek következményeit enyhítő funkciókat és szükség esetén azokat megvalósító rendszereket olyan terjedelemben kell meghatározni, hogy súlyos balesetknél az üzemanyag-olvadék konténmenten belül lehűtött állapotban megtartható legyen.”

Core-catchernek nevezik azokat a balesetkezelési rendszereket, amelyeknek a célja a tartályszerülés következtében a konténmentbe evakuálódott zónaolvadék stabilizálása és visszatartása.

Az olvadt zóna hűtését megnehezíti, hogy a külső felületén a képződő szilárd kéreg miatt a hőátadási tényező elég rossz, miközben az olvadék belsejében a remanens hőfejlődés folytatódik. A core-catchereknél az olvadék lehűtésére alkalmazott egyik módszer az olvadék nagy felületen történő

Súlyos balesetek determinisztikus alapú biztonsági elemzései

szétterítése, és ennek a felületnek a vízzel való hűtése. Egy másik, a VVER típusnál alkalmazott megoldás szerint az olvadék egy olyan tartályba kerül, amelyben speciális, nagy hőkapacitással rendelkező „áldozati” anyagot helyeznek el. Az olvadék hőmérséklete az áldozati anyag megolvadása következtében jelentősen csökken, a tartály falának hűtését pedig természetes cirkulációs vízhűtéssel biztosítják.

A folyamatok számítására olyan számítógépes modelleket alkalmaznak, amelyek a zónatörmelék fém és fénoxid alkotórészeiből képződött eutektikumok likvidusz és szolidusz görbéinek, illetve a megfelelő halmazállapot változások figyelembevételére alkalmasak. Az áldozati anyagok kezdeti geometriai konfigurációja meghatározza a megolvadásuk sebességét, a megolvadó anyag összetétele és hőmérséklete pedig befolyásolja a kialakuló eutektikumok halmazállapotát. A külső felületen a természetes cirkulációs hűtés figyelembe vétele az 5.3 részben ismertetett módszerrel történhet.

A számítások elvégzéséhez olyan komplex számítási modell alkalmazása javasolható, amely egyidejűleg képes a zónaolvadékból keletkező eutektikumok összetételének és hőmérsékleti eloszlásának, a core-catcher természetes cirkulációs vízhűtésének, valamint az említett folyamatoknak a konténment atmoszférával és zompvízzel való kölcsönhatásának a leírására.

3.5.4. Szűrt leeresztés

A szűrt leeresztés a PWR konténmentek esetében számos országban alkalmazott balesetkezelési technológia, amelynek célja a konténment lassú túlnyomódásának, ezáltal a konténment sérülésének a megakadályozása, mivel a sérülés egyébként ellenőrizetlen radioaktív kikerülésekhez vezetne.

A szűrt leeresztés megvalósításához egy megfelelő kialakítású és teljesítményű szűrőre van szükség, amelyen keresztül a konténment atmoszféra közege a környezetbe távozik. A szűrő kialakítása szempontjából figyelembe kell venni, hogy a nemesgázok kivételével a radioaktív gázokat, például a gáz halmazállapotú jódot, valamint az aeroszol alakú hasadási termékeket le kell választania. Az aeroszolak esetében legalább 99.9 % leválasztási hatásfokot, a jód esetében pedig legalább 99 %-os hatásfokot tartanak megfelelőnek.

A szűrőnek alkalmasnak kell lennie a konténment atmoszférába kijutott, viszonylag nagy tömegű hasadási termék eltávolítására. A szűrőn lekondenzálódó radioaktív csapadék elvezetéséről gondoskodni kell, csak úgy, mint a berendezés hűtéséről. A szűrő hőterhelését az átáramló közeg

által szállított hőmennyiségen kívül befolyásolja a megkötött hasadási termékek által fejlesztett radioaktív bomláshő.

A szűrt leeresztés számításokhoz a 3.4.3. fejezetben tárgyalt, a hasadási termékeknek a konténmentben történő terjedését számító modellek alkalmazása javasolható. A környezeti forrástag a szűrt leeresztés alkalmazása esetében két részből tevődik össze: egyrészt a konténment normál szivárgásán keresztül távozó hasadványok, másrészt a szűrt leeresztésen keresztül kijutott, le nem választott hasadványok hozzájárulásából.

3.5.5. *Hosszú távú konténment hűtés*

A hosszú távú konténment hűtés a konténment épségének biztosítására, ezáltal a radioaktív kibocsátások csökkentésére alkalmazott stratégia. A korábban tárgyalt, a reaktortartály épségének biztosítására alkalmazott intézkedések, így például a core catcher vízhűtést alkalmaz a remanens hő elvitelére, ennek következtében gőz keletkezik, amely kezelés nélkül hosszú távon a konténment nyomás és a radioaktív kikerülés megnövekedéséhez, végül pedig a konténment sérüléséhez vezetne.

A jelenlegi ismert rendszerek alapvetően két kategóriára oszthatók: a passzív és az aktív működésen alapuló rendszerekre.

Az aktív rendszerek jellemző példája a sprinkler rendszer. Amennyiben egy konkrét baleseti szekvencia során működik a tervezési üzemzavari sprinkler rendszer, akkor ez hatékonyan biztosítja a konténment hűtését. Egy másik lehetőség olyan speciális, súlyos baleseti sprinkler alkalmazása, amely a tervezési üzemzavarnál alkalmazott rendszerektől eltérő, dedikált erőforrások felhasználásával működik. Mindkét esetben a konténment atmoszférának a sprinkler cseppek segítségével történő hűtését a 3.3.1. Konténment termohidraulika c. részben ismertetett számítási modellekkel lehet elvégezni.

A hosszú távú hűtésre alkalmaznak ezen kívül nagy felületű hűtőket. A hőátadás a hűtők felületén, a konténment atmoszféra természetes cirkulációja mellett megy végbe. A felületi hűtők hőátadásának számítása szintén a 3.3.1. Konténment termohidraulika c. részben ismertetett számítási modellekkel végezhető el. A szekunder oldali hőelvitel történhet aktív vagy passzív megoldással, mindkét esetben a megfelelő hőcserélő modell alkalmazásával.

3.6. Számítógépi kódokra vonatkozó ajánlások

3.6.1. A súlyos baleseti számítógépi kódok típusai

A súlyos baleseti folyamatok elemzéséhez összetett folyamatokat kell modellezni. Ez történhet az egyes fizikai folyamatok vagy folyamat-csoportok részletes, mechanisztikus modellezésével, vagy a teljes folyamatnak a kezdeti eseménytől kezdve a zóna sérülésén, leolvadásán át a hasadási termékek konténmenten kívülre jutásáig történő számításával. Ennek megfelelően a súlyos baleseti kódok alapvetően két különböző típusba sorolhatók.

Egyes fizikai jelenségeket leíró részletes kódok

A részletes modellekkel rendelkező, különálló kódok alkalmazására akkor van szükség, ha egy-egy részfolyamat pontosabb ismerete, megértése szükséges a megelőző vagy következmény-csökkentő balesetkezelési eljárások meghatározásához. További alkalmazási területek az integrált kódok ellenőrzése, a valószínűségi biztonsági analízis egyes kérdéseinek megválaszolása és a kísérletek előkészítése, illetve ellenőrző számítása. Ezek a kódok nagyon részletes, finom térfelosztást tesznek lehetővé, és a folyamatokat részletes, mechanisztikus modellekkel szimulálják. Ezért a számítási idő lényegesen hosszabb, mint az integrált kódoknál, és ez nagyon függ a felhasználó által megadott térfelosztás finomságától. A részletes kódok felhasználása az alábbi területeken jöhet számításba:

- a) súlyos balesetek részletes termohidraulikai elemzése a reaktorban és a primerkörben,
- b) konténmentben lezajló súlyos baleseti folyamatok részletes számítása,
- c) hasadási termékek terjedésére vonatkozó számítások vezetékekben történő leválás részletes elemzésére,
- d) hidrogén eloszlás részletes elemzése a hidrogén-eltávolító rendszerek működésének figyelembe vételével,
- e) core catcher súlyos baleseti működésének ellenőrzése részletes számításokkal.

Integrált kódok

Az olyan számítógépes kódokat, amelyek a súlyos baleseti folyamat teljes progressziójának számítására alkalmasak, integrált súlyos baleseti kódoknak hívjuk. A jelenleg alkalmazott integrált súlyos baleseti kódok moduláris felépítésűek. A modulok a kód rendszerén belül kapcsolódnak egymáshoz egy vezérlő rutinon keresztül, ami összehangolja azok működését. Az egyes modulok az összetett fizikai, kémiai folyamatok jól körülhatároló részeit írják

Súlyos balesetek determinisztikus alapú biztonsági elemzései

le. A súlyos baleseti kódok hatalmas tudásanyagot tartalmaznak és fejlesztésük rendkívül drága. Ezért csak viszonylag kevés számú, világszerte általánosan használt, integrált súlyos baleseti kód létezik. Az integrált kódok alkalmazása javasolt azokban az esetekben, amikor az elemzés kiterjed a baleseti folyamat minden aspektusára, a reaktoron belüli, a primerköri és a konténmenten belüli termohidraulika számítására, valamint a hasadási termékek terjedésére a source term meghatározást beleértve. Az integrált kódok alkalmazása az alábbi területeken célszerű:

- a) a tervezési alap kiterjesztésének ellenőrzésére lefolytatott elemzések, amelyeket az NBSZ ír elő (ld. részletesebben a 3.7.1. alfejezetben),
- b) a 2. szintű valószínűségi biztonsági elemzések során nagyszámú súlyos baleseti folyamat teljes vizsgálatára van szükség, a számításokat ebben az esetben szintén integrált számítógépi kóddal célszerű elvégezni.

3.6.2. A kódok dokumentálása

A különféle számítógépi kódok használatához a fejlesztők kódleírást készítenek, amely tartalmazza a kódban használt modellezési megfontolások és a modellek leírását, a kód felépítésének ismertetését, valamint az input és az output leírását.

A kód modelljeinek leírása bemutatja a fizikai folyamatokat leíró elméleti modelleket, valamint az alkalmazott modellek egyes paramétereit. A súlyos baleseti folyamatok modellezésénél gyakran empirikus összefüggéseket használnak, ebben az esetben célszerű azokra a kísérletekre, mérési eredményekre való hivatkozások pontos rögzítése, amelyeket a modellépítés során felhasználtak. A kódleírás tartalmazza a fizikai folyamatokat leíró modellek paramétereit. A különféle fizikai részfolyamatok modellezésére vonatkozó részletes ajánlásokat az egyes jelenségek ismertetésénél tárgyaljuk az útmutató korábbi fejezeteiben.

A kódleírás kiterjed a kód felépítésének ismertetésére. Ez magában foglalja a kódot felépítő számítástechnikai elemek (modulok, szubrutinok stb.) leírását, beleértve az ezek közötti adatátadás ismertetését. A kódleírás ezen kívül ismerteti az adatátadás általános rendszerét, valamint azt, hogy az egyes számítási adatok mely modulokban keletkeznek, és hol használják fel azokat.

A kódleírás fontos részét képezi a kód inputjának és outputjának leírása. A kód input leírása azoknak a paramétereknek a pontos meghatározását tartalmazza, amelyek az elemzési feladat modellezését teszik lehetővé. Az input paraméterek megadásánál fontos, hogy az adott paraméter mértékegységét rögzítsék. A kód outputja tartalmazza azokat a

mennyiségeket, amelyek a súlyos baleseti folyamatok lefolyásának megítéléséhez szükségesek. Az output paraméterek pontos specifikálása, mértékegységük rögzítése szintén fontos feltétel. A kód outputjának szervezése általában lehetővé teszi, hogy a felhasználó opcionálisan választhassa ki az adott folyamat elemzéséhez szükséges output paramétereket a rendelkezésre álló, teljes output paraméter-listából.

Az input és az output leírásán ebben az alfejezetben az egyes paraméterek fizikai jelentésének meghatározását értjük. A konkrét atomerőművi berendezésekre vonatkozó input-értékekre vonatkozó információk kezelésével a következő fejezetrészben foglalkozunk.

A kódok fejlesztése során az egyes kibocsátott kódverziókat egy meghatározott verziószámmal látják el. Az újabb kódverziókról nem bocsátanak ki minden esetben egy teljes kód-dokumentációt, csak a változtatások által érintett részeket, paramétereket és működést dokumentálják.

3.6.3. *Atomerőművi input dokumentálása*

Ez az alfejezet az elemzett atomerőmű adatainak a számítógépi kódok inputjában való megjelenítésével foglalkozik. Az elemzett atomerőmű adatait mindig két részre kell bontani: az általános adatokra és az adott baleseti folyamattal kapcsolatos adatokra. Az általános adatok esetében, - tervezési üzemzavar elemzéseknél bevezetett terminológiát és módszert alkalmazva, - célszerű megszerkeszteni a kódnak az adott atomerőmű típusra vonatkozó kézikönyvét. A konkrét elemzésekről elemzési jelentések készülnek, ezek tartalmazzák az egyes baleseti folyamatokra vonatkozó speciális adatokat.

A kódok kézikönyvei tartalmazzák a reaktorzóna, a reaktortartály, a primerkör, a konténment részletes adataiból származtatott kondenzált mennyiségeket, amelyek a tényleges elemzési számítások alapjait képezik. Mivel a számítások nodalizált geometriában történnek, ezért a kézikönyvek ennek megfelelően szerepeltetik a számításokhoz szükséges paramétereket, például egy adott térrész térfogatát, felületét, egyéb fizikai tulajdonságait. A kézikönyvek tartalmazzák a balesetkezelési rendszerek paramétereire vonatkozó információkat.

3.6.4. *Verifikáció és validáció*

A verifikáció annak az ellenőrzése és igazolása, hogy az egyes modellek rendeltetés szerint működnek, és az adatszervezési modulok valóban azt a feladatot hajtják végre, amelyet a kódleírás tartalmaz. A kód verifikációját a kódot fejlesztő intézmény végzi a fejlesztés során. A verifikációnak különböző

fázisai vannak: így az egyes programrészeket először egyenként ellenőrzik, végül pedig a kód teljes, integrális ellenőrzésére kerül sor.

A különböző számítások, elemzések esetében azonban további kérdés, hogy a beépített modellek milyen mértékben képesek a tényleges fizikai folyamatok leképezésére. Az ellenőrzés kísérleti adatokkal, mérési eredményekkel való összehasonlítással valósítható meg, az erre irányuló tevékenységet pedig összefoglaló néven validációnak nevezik.

Mivel a súlyos baleseti kódok számos, különböző folyamatot modelleznek, ezért a validáció többféle folyamatra terjed ki, ezek vizsgálatára rendszerint különböző kísérleti berendezéseken kerül sor. A kódok a különböző kísérletekben végbemenő folyamatokkal kapcsolatos számításait, a mérési adatokkal való összehasonlítást, az esetleges eltéréseket részletes jelentésekben dokumentálják. A különböző kísérleteket, az ott vizsgált folyamatokat és az elvégzett validációs számításokat reprezentálja a kódok validációs mátrixa, illetve a validációs jelentés. Kódok leírása általában tartalmazza a kód validációs mátrixát. A kód leírás alapján meghatározható, hogy milyen tartományban, milyen folyamatokra alkalmazható az adott súlyos baleseti kód és értékelhető a kód minősége.

A súlyos baleseti folyamatok kísérleti vizsgálatai igen költséges berendezéseket igényelnek, ezért a kísérleteket általában nemzetközi együttműködésben végzik. A kísérletek tervezésénél elsősorban az alapjelenségek vizsgálatán van a hangsúly, vagyis a súlyos baleseti kódok esetében általános, nem pedig egy-egy adott reaktor típusra végzett validációról beszélhetünk.

3.7. Súlyos baleseti elemzések elvégzésére vonatkozó ajánlások

3.7.1. A súlyos baleseti folyamatok kiválasztása

Súlyos baleseti folyamatok valamilyen kezdeti üzemzavar, valamint ehhez csatlakozóan a biztonsági rendszerek működésének többszörös hibája esetén léphetnek föl. Az összes ilyen kombináció követése elképesztően nagyszámú folyamat elemzését jelentené, ami egyfelől ráfordítás szempontjából lehetetlen, másfelől nem célszerű feladat.

Ezért a vizsgálandó baleseti folyamatok kiválasztásánál valamilyen szűrési módszerre van szükség. Az egyik ilyen módszer szerint a tervezési üzemzavaroknál vizsgált tipikus kezdeti eseményekből kiinduló, majd pedig a biztonsági rendszerek további meghibásodásával járó folyamatokat vizsgálják, amelyek legrövidebb időn belül legsúlyosabb következményekhez vezetnek. Ezzel a módszerrel meghatározhatók a legnagyobb, burkoló

Súlyos balesetek determinisztikus alapú biztonsági elemzései

értékek a következmények, például a forrástag szempontjából. Azonban az ilyen, határérték következményekkel járó folyamatok valószínűsége rendkívül alacsony, amit az elemzés értékelésénél figyelembe kell venni.

A valószínűségi alapon történő folyamat-kiválasztásra vonatkozóan az NBSZ a következőképpen rendelkezik:

3a.2.2.6000. „A mélységben tagolt védelem elvével összhangban, a TAK üzemállapotokat eredményező eseményeket és eseménykombinációkat valószínűségi módszerekkel és mérnöki megfontolásokkal kiegészített determinisztikus elemzésekkel kell kiválasztani. Igazolni kell, hogy minden lehetséges eseményt és eseménykombinációt figyelembe vettek. A biztonság igazolására szolgáló elemzéshez a módszerek közül a vizsgált esetnek leginkább megfelelőt vagy azok leginkább megfelelő kombinációját kell alkalmazni.”

Ezen kívül az NBSZ a következő tételes felsorolást tartalmazza a folyamatok kiválasztására vonatkozóan:

3a.2.2.6300. „A tervezési alap kiterjesztésénél legalább az alábbiakat figyelembe kell venni, feltéve, hogy a tervezési alapnak nem képezi részét és az adott erőműtípusra értelmezhető:

- a) teljes feszültségvesztés,*
- b) a TA2-4 üzemállapot során szükséges reaktor leállítási funkciót ellátó rendszerek elvesztése,*
- c) gőzvezeték-törés a gőzfejlesztő hőátadó felületének járulékos sérülésével,*
- d) a konténment megkerülésével közvetlen környezeti kibocsátáshoz vezető események,*
- e) teljes tápvízvesztés,*
- f) hűtőközegvesztés valamelyik zóna-üzemzavari hűtőrendszer-típus teljes elvesztésével,*
- g) szabályozatlan szintcsökkenés a részlegesen feltöltött hurok melletti természetes cirkulációs üzemállapot vagy átrakás során,*
- h) az alapvető biztonsági funkciót ellátó rendszerek, rendszerelemek egy vagy több segédrendszerének teljes elvesztése,*
- i) az aktív zóna hűtésének elvesztése a maradványhő elvezetése során,*
- j) a pihentető medence hűtésének elvesztése,*
- k) ellenőrizetlen bórhiágulás,*
- l) egy gőzfejlesztő több hőátadó csövének egyidejű törése,*

Súlyos balesetek determinisztikus alapú biztonsági elemzései

- m) egy feltételezett kezdeti esemény kezeléséhez hosszú távon szükséges biztonsági rendszerek elvesztése,*
- n) konténment nyomáscsökkentő funkció elvesztése olyan üzemi állapotokban, amikor arra szükség lenne,*
- o) üzemanyag-olvadással járó egyéb események,*
- p) katonai és polgári repülőgép becsapódása, valamint*
- q) a többszörös meghibásodással járó események.”*

A valószínűségi biztonsági elemzések felhasználása lehetőséget teremt a súlyos baleseti folyamatok gyakoriság alapján történő kiválasztására. Ebben az esetben elkerülhető az a helyzet, hogy az elemzések valamely nagyon konzervatív, ugyanakkor teljesen valószínűtlen folyamat eredményeit szolgáltatassák.

Végül lehetőség van a két módszer, vagyis a determinisztikus és a valószínűségi módszer kombinálására. Például a balesetkezelési rendszerek tervezésénél gyakran járnak el úgy, hogy a tervezés alapjául vett baleseti folyamatot valószínűségi (gyakorisági) alapon választják ki, de a balesetkezelési rendszerek működésére vonatkozóan determinisztikus feltételezéseket is tesznek.

3.7.2. A súlyos baleseti elemzések módszere

A súlyos baleseti elemzéseket a legjobb becslés módszerével kell végezni, amint ezt az alábbi NBSZ követelmény előírja:

3a.2.3.1600. „A TAK1 és TAK2 üzemi állapotot eredményező eseményekre vonatkozó elemzésekben a legjobb becslés módszerét kell alkalmazni. Bármely rendszer vagy rendszerelem működésképtelenségét akkor kell feltételezni, ha annak sérülése a kezdeti esemény vagy az üzemzavari folyamat eredményeképpen valószínűsíthető.”

Az alkalmazott súlyos baleseti számítási kódok legjobb becslés jellegűek, tehát a fizikai és egyéb folyamatok bennük szereplő modelljei a lehető leginkább valóságűek. A súlyos baleseti elemzésekben ezen túlmenően a kezdeti és peremfeltételekben a legjobb becslésnek megfelelő értékeket használják, eltérően a tervezési üzemzavaroknál alkalmazott módszertől, ahol ezeket az értékeket gyakran bizonyos reális konzervativizmussal választják meg. Például a zóna üzemzavari hűtőrendszer egyes szivattyúinak forgalmi adatai kismértékben eltérhetnek az egyes blokkokon, még inkább több blokk esetén, a számításoknál a legjobb becslésnek megfelelő értéket használják, nem pedig a burkoló értéket. Hasonlóan, a több blokk esetében

Súlyos balesetek determinisztikus alapú biztonsági elemzései

a blokkok szivárgása általában eltér egymástól, valamint a mért értékek éves ingadozást mutatnak; a számításoknál a legjobb becslésű szivárgást, nem pedig a megengedett (burkoló) értéket veszik figyelembe.

Az egyes berendezések működését, illetve működésképtelenségét az adott scenárióra érvényes feltételezéssel veszik figyelembe, - eltérően a tervezési üzemzavaroknál alkalmazott egyszeres meghibásodás feltételezésétől, - a scenárió valószínűségét pedig gyakran a valószínűségi biztonsági elemzések által szolgáltatott adatok tartalmazzák.

3.7.3. Bizonytalanság- és érzékenységvizsgálat

A súlyos baleseti elemzések során alapvetően kétféle bizonytalanságot különböztetnek meg.

Aleatorikus bizonytalanságról akkor lehet beszélni, amikor olyan eseményeket vagy fizikai folyamatokat modelleznek, amelyek véletlenszerű vagy más néven sztochasztikus módon mennek végbe. Ilyen jellegű bizonytalanság az input adatok, például a zóna üzemzavari hűtőrendszer forgalmi adatainak bizonytalansága, vagy a blokk szivárgásának a bizonytalansága.

Az episztemikus bizonytalanság a determinisztikus számítási modellben való bizalom mértékét jellemzi, és az elemző véleményét tükrözi arra vonatkozóan, hogy a modell milyen hűen reprezentálja a tényleges rendszert. Másképpen az aktuális tudásszint bizonytalanságának nevezhető.

A súlyos baleseti folyamat elemzésével kapcsolatos bizonytalanságok figyelembe vételére vonatkozóan az NBSZ követelmény a következőket tartalmazza:

3a.2.2.6700. „A TAK események elemzésénél:

b) biztosítani kell az elemzés megismételhetőségét olyan esetekben is, amikor az elemzés során mérnöki becslést vettek figyelembe, illetve figyelembe kell venni az elemzéssel kapcsolatos összes bizonytalanságot és azok hatását;”

Az aleatorikus bizonytalanságokat különböző statisztikai módszerekkel, például Monte-Carlo módszeren alapuló számításokkal lehet kezelni. Ezeknek a bizonytalansági számításoknak az elvégzése, – bár a súlyos baleseti folyamatok elemzésére szolgáló számítógépi kódok felhasználásával, - azonban általában a valószínűségi biztonsági elemzések keretében történik.

Az episztemikus bizonytalanságok értékelése nem történhet statisztikai alapon. A modellezésből származó bizonytalanságokat vagy alternatív számítási modellek bevonásával, vagy érzékenység-vizsgálatokkal lehet

Súlyos balesetek determinisztikus alapú biztonsági elemzései

értékelni. Ezzel kapcsolatban az NBSZ alábbi követelménye tartalmaz előírást:

3a.2.3.0400. „Érzékenységi vizsgálatokat kell végezni a feltételezések, a felhasznált adatok és számítási módszerek bizonytalanságának értékelésére. Ahol az elemzés eredményei érzékenyeknek bizonyulnak a modell feltételezéseire, ott további elemzéseket kell végezni az előzőtől független módszerek és eljárások használatával.”

Az érzékenységi vizsgálatok lehetőséget adnak a felhasznált adatok bizonytalanságának értékelésére. Amennyiben az elemzés során azt tapasztalják, hogy egy adott modell feltételezései erősen befolyásolják a számítási eredményeket, akkor merülhet föl alternatív modellek alkalmazása. Ezeknek a módszereknek az alkalmazásával a modellezésből eredő bizonytalanságokat részben vagy teljesen ki lehet szűrni, vagy legalábbis a hatásukat minimalizálni. Ugyanez az érzékenységi vizsgálat nyújt lehetőséget a szakadékszél-hatások kiszűrésére, amelyek esetében a bemenő paraméterek kis változásának hatására az erőmű állapota hirtelen, nagymértékben negatív irányban változik.

3.7.4. Elemzési jelentések készítése és dokumentálása

A súlyos baleseti számításokról elemzési jelentések készülnek. Az elemzési jelentésekben jelennek meg az adott baleseti folyamatra vonatkozó, az adott baleseti scenáriót meghatározó specifikus adatok.

Az általános erőművi inputot, amelyet a 3.6.3. fejezet szerint a kódok kézikönyve tartalmaz, az elemzési jelentésekben nem szükséges megismételni. Amennyiben valamely folyamat vizsgálatánál a részletesebb elemzés érdekében az általánostól eltérő nodalizációt alkalmaznak, úgy ezt a különbséget tartalmazhatja az elemzési jelentés.

Az elemzési jelentések dokumentálására vonatkozóan az NBSZ a következőképpen rendelkezik:

3a.2.3.0500. „A biztonság igazolására szolgáló elemzéseket oly módon és olyan mélységben kell dokumentálni, hogy azok az atomerőmű teljes élettartama során megismételhetők, független felülvizsgálatnak alávethetőek, és az átalakítások értékeléséhez szükséges terjedelemben módosíthatóak legyenek, továbbá az alkalmazott konzervativizmusok mértéke és az elemzés alapján rendelkezésre álló tartalékok mértéke felülvizsgálható és újraértékelhető legyen.”

A jelentésben a baleseti folyamat tárgyalása a fizikai folyamat során lényeges szerepet játszó paraméterek változásának elemzésével történik. Mivel folyamatonként más és más változók játszhatnak lényeges szerepet, a

Súlyos balesetek determinisztikus alapú biztonsági elemzései

tárgyalt, elemzett fizikai paraméterek kiválasztása különböző lehet. A folyamat irányának, lefolyásának megítéléséhez szükséges változók grafikus megjelenítése, a jellemző időpontokban (például zóna-leürülés, zónaolvadás, tartálysérülés) a paraméterek felvett értékeinek táblázatos megadása alapján vonhatók le az elemzés következtetései. A dokumentációs jelentés legfontosabb elemei a következők:

- a) a súlyos baleseti folyamat részletes leírása, a balesethez vezető meghibásodások ismertetése, a működő, vagy éppen meghibásodott biztonsági berendezések száma,
- b) az alkalmazott üzemzavar-elhárítási intézkedések, valamint a balesetkezelési intézkedések és rendszerek feltételezett működésének leírása,
- c) az alkalmazott input ismertetése – amennyiben nem tér el a kód kézikönyvében dokumentált inputtól, akkor elég erre hivatkozni (ld. 3.6.3. fejezet), ellenkező esetben a különbségek dokumentálása,
- d) a baleseti folyamat legfontosabb időpontjainak táblázatos megadása,
- e) a folyamatot jellemző paramétereinek grafikus megjelenítése,
- f) a súlyos baleseti folyamat szöveges ismertetése a bekövetkező folyamatok és sérülések megjelölésével,
- g) az elemzett súlyos baleseti folyamat főbb fázisainak, a jellemző sérüléseknek a rövid összefoglalása.

3.7.5. Minőségbiztosítás

Az erőművi adatok forrását az egyes kódoknak az adott erőműre vonatkozó kézikönyve tartalmazza. Minőségügyi és verifikációs kérdés a források helyes azonosítása, továbbá az adatok pontos átvétele. A kézikönyvet az elemzéseket végző intézmény készíti el, és verifikálja a saját minőségügyi rendszerében.

Az elemzési jelentéseket ehhez hasonlóan az elemzéseket végző intézmény készíti el, és verifikálja a saját minőségügyi rendszerében. A kódok minőségbiztosítását a kódfejlesztők végzik el és dokumentálják. A kód alkalmazói és a Hatóság számára ezek rendelkezésre állnak.

A súlyos baleseti elemzéseket végző intézmény minőségbiztosítási tevékenységének dokumentumai a Hatóság számára teljes mértékben hozzáférhetőek. Ide tartoznak az intézmény minőségbiztosítási rendszerének dokumentumai, valamint az adott elemzést tartalmazó jelentés, dokumentáció papír alapú és elektronikus változata, valamint a

Súlyos balesetek determinisztikus alapú biztonsági elemzései

jelentés szerzői és jóváhagyói nevének feltüntetése a jelentési dokumentumban.