

Forrástagbecslés lehetősége kutatóreaktorok esetén – nukleáris biztonsági megfontolások

Petőfi Gábor

Országos Atomenergia Hivatal
1036 Budapest, Fényes Adolf utca 4.

Kutatóreaktorokat világszerte alkalmaznak különféle sajátos célokból, ennek megfelelően az egyes létesítmények kialakítása és üzemeltetése jelentősen különböző. A kutatóreaktorok nukleáris biztonsági értékelésekor az atomerőművekével azonos filozófiát, de részleteiben helyenként jelentősen eltérő módszertant követnek. Kutatóreaktorok esetén is az alapvető eszközként alkalmazott biztonsági elemzéseket használják fel a balesetelhárítási felkészülés megalapozásához, amelynek egyik markáns eleme a lehetséges jelentős kibocsátásra vezető baleseti folyamatok értékelése, amelyben balesetelhárítási szempontból alapvető jellemző a kibocsátást leíró forrástag. Az értékeléshez alkalmazott módszerek kutatóreaktoroknál sok szempontból eltérnek az atomerőműveknél figyelembe vettektől. A szerző a rendelkezésre álló irodalom alapján a kutatóreaktorok sokszínűségét is figyelembe véve szisztematikusan összegyűjtötte és értékelt a különféle szempontokat azzal a végcéljal, hogy ennek alapján a hazai kutatóreaktorok sajátosságait a forrástagbecslésben érintett szervezetek, létesítmények figyelembe vehessék.

Bevezetés

Kutatóreaktorokat világszerte alkalmaznak egyedi és különböző célokból. A felhasználás szempontjából a következőket említhetjük meg, mint általános területeket: kutatás, oktatás, radioizotóp gyártás, radiográfia, anyagvizsgálatok, neutronforrás, aktivációs analízis. Ezen területeken belül természetesen további specializáció is lehetséges. A különböző célok mentén, annak megfelelően a kutatóreaktorok kialakítása, üzemeltetése is jelentősen különbözik. Ezen túl, de részben ebből fakadóan igyekeznek tervezésük és üzemeltetésük során érvényre juttatni a megfelelő rugalmasság fenntartását annak érdekében, hogy esetenként több célra is felhasználható legyen az adott létesítmény. Ez a tény alapvetően befolyásolja a kutatóreaktoroknál alkalmazott nukleáris biztonsági filozófiát, és egyben szükségessé teszi a teljesítmény reaktoroktól részben eltérő megközelítés alkalmazását.

Nukleáris létesítményeknél a biztonság igazolásának egyik legfőbb eszköze mind a tervezés, mind az üzemeltetés során a biztonsági elemzés [1, 3]. Ezen elemzéseknek a kutatóreaktorok esetén is az a célja, hogy az üzemeltető megfelelően megértse, áttekinthesse a biztonságos üzemeltetés alapjait, korlátait, és igazolja a biztonsági hatóság részére annak megfelelő színvonalát. Ennek részeként az üzemeltetőnek azt is be kell mutatnia, hogy a reaktor tervezése és üzemeltetése hogyan biztosítja a tervezési, valamint a tervezésen túli üzemzavarok és a súlyos

balesetek megelőzését, illetve a bekövetkező balesetek következményeinek csökkentését.

Itt említhetjük meg először a kutatóreaktorok egyik specialitását a teljesítmény-reaktorokhoz képest. A biztonsági elemzések során nem csak a reaktor, hanem a hozzá kapcsolódó kísérleti berendezések biztonságát és a berendezésnek a reaktor biztonságára gyakorolt hatását is be kell mutatni természetesen ezek balesetkezelési, balesetelhárítási implikációjával együtt.

Ahogy az a teljesítmény-reaktorok esetén történik, a kutatóreaktorok biztonsági elemzésének is első lépése a feltételezett kezdeti események körének kijelölése, meghatározása. A későbbiekben ezen események bekövetkezése esetére kell megmutatni, hogy a nukleáris biztonsági követelmények teljesülnek, az adott esemény bekövetkezése nem okoz a korlátoknál nagyobb biztonsági kockázatot [1, 3]. Az elemzendő események köre alapvetően kereteket határoz meg az elemzések terjedelmére, és behatárolja az alkalmazható elemzési eszközöket. A biztonsági elemzéseken belül a baleseti elemzések egyik feladata az, hogy a tervezési alapon túli üzemzavarok esetén – amelyek során a vonatkozó hatósági korlátokat meghaladó következmények léphetnek fel – meghatározzák az adott baleset során kikerülő radioaktív anyag mennyiségét, valamint elemezzék az ehhez kapcsolódó radiológiai következményeket. Ezen adatok mentén lehet megadni az adott létesítmény balesetelhárítási készültségének tervezési alapját.

A baleseti elemzések egyik legfőbb feladata tehát meghatározni a kikerülő radioaktív anyag mennyiségét. A kikerülő radioaktív anyag mennyiségének meghatározása nukleáris létesítményekben az ún. forrástag megadásával történik. A forrástag tartalmazza a kikerülő radioaktív izotópok (hasadványok, aktivációs termékek, transzurán elemek) aktivitásban mért mennyiségét, összetételét, fizikai és kémiai formáját, a kibocsátás módját (pöff, szakaszos, folyamatos), valamint a kibocsátás útvonalát, helyét, időpontját és időtartamát.

A forrástag alapján történik ezután a környezeti következmények értékelése, amelybe beletartozik a kibocsátott radioaktív anyag lehetséges környezeti terjedésének, az üzemeltető személyzetet és a lakosságot potenciálisan érő sugárterhelés meghatározása.

A forrástag meghatározására irányuló biztonsági elemzések a következő lépésekből állnak: kezdeti események kiválasztása, zónasérülési mechanizmusok és ezek fejlődésének vizsgálata, a radioaktív leltár kibocsátásának folyamata, a következmények meghatározása az épületeken belül, az épületeken kívül és a telephelyen kívül.

Az elemzések során mind determinisztikus, mind valószínűségi alapú eszközöket alkalmaznak.

Kezdeti események értékelése [2]

A reaktorok biztonsági értékelésének szerves része a reaktor viselkedésének vizsgálata feltételezett kezdeti események esetén. A kezdeti események vezethetnek a tervezés során figyelembe vett üzemi tranzienzsekre, üzemzavarokra vagy a tervezési alapon túli baleseti helyzetre. A kezdeti események a helytelen működésből, berendezés és emberi hibából vagy külső eseményekből származhatnak. Az események közül minden olyat figyelembe kell venni, amelyek bekövetkezése hihető (feltételezhető) és a reaktor biztonságára hatással vannak. Természetesen baleset-elhárítási vonatkozásban a kezdeti események köre ennél szűkebb, csak a tervezési üzemzavarokra és a tervezésen túli üzemzavari eseményekre terjed ki. Ezen események közül jelen vizsgálat szempontjából is azok a lényegesek, amelyek környezeti radioaktív kibocsátáshoz vezethetnek.

Kutatóreaktorok esetén elfogadott módszer az ún. burkoló forrástaghoz vezető hipotetikus esemény alkalmazása, amely a lehető legsúlyosabb következménnyel jár az adott kutatóreaktor esetén. Ugyanakkor az is lehetséges, hogy az adott reaktor esetén több esemény részletes vizsgálatát is elvégzik és egyenként (vagy eseménycsoportonként) forrástagot rendelnek az adott eseményekhez.

Több módszer lehetséges a bekövetkező balesetekkel kapcsolatos következmények meghatározására is: kézi, egyszerűsített összefüggéseket használó számítások a hasadványok mennyiségének meghatározására, konzervatív kibocsátási részarányok feltételezése, telephely-specifikus környezeti terjedési értékek alkalmazása. Ezek sok esetben megfelelő eredménnyel szolgálnak. Természetesen a pontosabb számítások realizistikusabb, általában jóval kisebb konzervatívizmust tartalmazó dózisértékeket biztosítanak. Nyilvánvalóan az adott eredmények függvé-

nyében és az elemzések célját szem előtt tartva szükséges a pontosabb módszer mellett dönteni.

Determinisztikus és valószínűségi elemzések [3,4,5]

A determinisztikus elemzések alapja a konzervatívizmus, amely érvényesül az események kiválasztásánál, az elemzések elvégzésénél, a paraméterek meghatározásánál és az elfogadási kritériumok meghatározásánál. Komplex számítások nélkül ezzel a módszerrel elsősorban burkoló forrástag határozható meg. Ilyen elemzéseket alkalmaznak a telephely kiválasztásakor és a tervezéskor, és a létesítmény balesetelhárítási készségét ilyen elemzésre lehet alapozni. Ezen eszközrendszer korlátja, hogy a rendszerek egymástól való függése és a közös okú meghibásodás kezelése nem megoldható.

A biztonsági elemzések pontossága, információtartalma a valószínűségi alapú elemző eszközök használatával javítható. Az ilyen elemzések a legtöbb baleseti folyamat esetén a determinisztikus elemzésnél kevésbé konzervatív eredményre vezetnek, viszont az egyes események kockázata (bekövetkezési gyakorisága) más tervezési megfontolásokat is implikálhat, akár eredményezheti több kezdeti esemény vagy kiindulási állapot figyelembevételének igényét is. A valószínűségi megközelítés szerint – ellentétben a determinisztikus elemzésekkel, ahol mérnöki megfontolások alapján egyes események kizárhatók az elemzések köréből – minden baleset megtörténhet, bár ezek bekövetkezési valószínűsége változó. A valószínűségi elemzés a következő fő jellemzőkkel bír:

- Eseménysorokat határoz meg, amelyek egy széles esemény listából erednek.
- A rendszerek működésének, az operátor szerepének, a rendszerek kölcsönhatásának jobb megértéséhez vezet.
- Lehetővé teszi, hogy a reaktor üzemeltetésének a környezetre, az üzemeltetőkre és a lakosságra vonatkozó kockázatát meghatározzák.

Tervezési és üzemeltetési megfontolások [2]

A legtöbb kutatóreaktor esetén igaz, hogy üzemeltetésük a lakosságra minimális kockázatot jelent, ugyanakkor az üzemeltető személyzetre nézve, a korábbiakban már említett rugalmasság megtartásának, egyediség meglétének igénye miatt jelentősebb kockázatot képvisel. A lehetséges kibocsátás mértéke a különböző szcenárióktól, eseménysoroktól függ, ugyanakkor ezek tipikus kibocsátási sémákhoz rendelhetők, amelyek az alábbi tényezők alapján határozhatóak meg.

A reaktor típusa

A hűtőközeg elvesztésével járó és nem tervezett reaktivitás bevitellel járó üzemzavarok gyakorlatilag minden kutatóreaktor típusnál előfordulhatnak, azonban a reaktor típusának függvényében a többi feltételezhető kezdeti

esemény típusonként különböző lehet. Például medence típusú reaktorok esetén a zónakonfiguráció átalakításának lehetősége általában biztosított, így a fűtőelemek vagy egyéb, a zónához kapcsolódó berendezések mozgásából származó balesetek valószínűsége nagyobb. Nátrium hűtésű reaktorok esetén pedig a tűzveszély és a heves víznátrium reakció veszélye magasabb.

Méret és teljesítmény

Az 1-2 MW alatti teljesítményű reaktorok esetén a zónaolvadás lehetősége gyakorlatilag kizárható, mert a zóna nem tud annyira felhevülni, hogy a hőmérséklete elérje az üzemanyag és a zóna szerkezeti elemeinek olvadási pontját. Kis és közepes (néhány MW) teljesítményű kutatóreaktorokban valószínűtlen, hogy a hűtőközeg forgalom csökkenése a fűtőelem sérüléshez vezessen, amennyiben a reaktor leállítása sikeres, és ha a zóna környezetében legalább a levegő természetes cirkulációja fennmarad. Ugyanakkor ezen reaktorok esetén sem lehet kizárni a megszaladás (nem tervezett reaktivitás bevitel) veszélyét. Vannak viszont kifejezetten nagy, de rövid idejű reaktivitás bevitelre tervezett, úgynevezett impulzus üzemű reaktorok, amelyeknél akár néhány GW teljesítmény rövid idejű fellépte a normál üzemi működést jelenti.

A reaktorok alkalmazása

A kutatóreaktorok esetén az üzemvitel általában gyakori leállításokkal, teljesítményváltoztatásokkal jár. A teljesítménytörténet alapvetően befolyásolja az adott pillanatban a reaktorban felhalmozódó hasadványtermék mennyiségét, amely a radioaktivitása révén hat a zónában tárolt energia mennyiségére. A reaktorhoz kapcsolódó kísérleti (anyagvizsgálati, hideg neutron csatorna) vagy izotóptermeléshez, besugárzáshoz kapcsolódó berendezések további kockázatokat jelentenek. Egyrészt hatnak a reaktorra a reaktor berendezéseiben bekövetkező események esetén, másrésztől maguk is balesetet szenvedhetnek: törés, szivárgás, tűz, stb., amelyek a reaktorra nézve kezdeti esemény kiváltói lehetnek.

Üzemanyag karakterisztika

A kutatóreaktorok üzemanyaga alapvetően különbözik a teljesítmény reaktorokétól. Más hőtechnikai követelményeknek kell megfelelniük, az egységnyi tömegben felszabaduló több energia miatt általában magasabb az elvárás. Ennek megfelelően egyrészt az üzemanyag elhasználódása, öregedése, például az üzemanyag sugárzás miatti anyagszerkezet változása, ridegedése is további tényezőt jelent, amit az elemzések nem hagyhatnak figyelmen kívül. Másrészt ezen követelményből fakadóan a kutatóreaktorokban alkalmazott üzemanyag dúsítása magasabb a teljesítmény reaktorokénál, és ennek megfelelően a teljesítmény sűrűség is jelentősebb. Ezt a reaktornak úgy kell tudnia megfelelően szabályozni, hogy a lokális hőmérsékletek távol maradjanak az olvadásponttól. Fémes üzemanyagok esetén ezen túl a fázisátalakulás hőmérsékletének eltolódására is lehet számítani. Keramikus üzemanyagoknál viszont a magas hőmérsékleti gradiens kerülendő az alacsonyabb hővezetési képesség miatt. A

kibocsátás szempontjából rendkívül fontos az üzemanyagburkolat kialakítása is. A sugárzás hatására feszültségek, belső üregek keletkezhetnek a burkolatban az olvadásponttól távol is. A burkolat sérülése pedig jelentős kibocsátáshoz vezethet. A forráskrisis lehetőségével a kutatóreaktorok esetén is számolni kell.

Egyedi tervezési megfontolások

Nyilvánvalóan fontos paraméter a kibocsátás szempontjából a hermetikus burkoló épület, az úgynevezett konténment léte, amely a kutatóreaktorok esetén nem általános gyakorlat. További egyedi tervezési jellemzők a reaktor inherens biztonsága, az üzemzavarok kezelésére kialakított biztonsági rendszerek léte, a reaktor termohidraulikai tervezése, amely meghatározza például, hogy a természetes cirkuláció vagy a léghűtés elegendő-e a bomláshő elvitelére. Az adott reaktor műszerezése biztosítja, hogy mennyire megbízhatóan és gyorsan detektálható egy normál üzemi állapottól eltérő esemény, valamint a diagnosztikai rendszer mérései automatikusan kiváltják-e a megfelelő biztonsági működését.

Karbantartás és időszakos vizsgálatok

A karbantartási tevékenység és az időszakos vizsgálatok a biztonsági funkciók és a biztonsági rendszerek rendelkezésre állásának biztosításával csökkentik a kibocsátás esélyét. A kibocsátás mértéke mind a passzív, mind az aktív tervezett biztonsági tulajdonságoktól függ, amelyeket olyan paraméterek befolyásolnak, mint pl. a szivárgás mértéke, a szellőző rendszerek működése, a jódkötésének lehetősége a kikerülési útvonalakon. A karbantartás minősége a biztonsági rendszerek üzembiztonságán keresztül alapvetően hat ezen tényezőkre.

Kezdeti események és baleseti szcenáriók kiválasztása [2]

A kutatóreaktorokban előforduló kezdeti események a reaktor zónára vagy más berendezésre gyakorolt hatásuk vagy az ezen események kivédése ellen tervezett intézkedések sikeressége alapján csoportosíthatók. A kezdeti események csoportosításának célja, hogy az adott csoportból a burkoló eseményt ki lehessen választani további részletes elemzésre. Az alábbiakban a [2] szerinti kategorizálást ismertetjük:

- a.) Nagy reaktivitásbevitel
- b.) Hűtőközegforgalom elvesztése
- c.) Hűtőközeg elvesztése
- d.) Hibás fűtőelemkezelés vagy a fűtőelem, valamely zónában elhelyezkedő kísérleti eszköz vagy a zóna egyik alkatrészének meghibásodása
- e.) Belső események
- f.) Külső események
- g.) Kísérleti berendezésekkel kapcsolatos események

Fontos, hogy nem mindegyik esemény fordulhat elő minden típusú reaktorban, és egyes esetek egyes

reaktortípus csoportok esetén nem fordulhatnak elő (pl. b.) kategóriájú esemény nem következhet be erős negatív visszacsatolással rendelkező reaktoroknál). Ezen kívül ebben a csoportosításban az emberi hibákból származó események nem jelennek meg külön, hanem azok egy külön csoportba értendők. A karbantartási vagy javítási hibák pedig a fenti események kiváltói lehetnek, tehát lényegileg burkolja a csoportosítás ezt a típusú hibát is.

Az események kiválasztása alapvetően determinisztikus alapon történhet [3], de a teljesen átfogó vizsgálathoz első szintű valószínűségi elemzés (PSA Level 1) szükséges. Minden lehetséges, a kezdeti eseményből induló baleseti eseménysor felvázolása alapján kijelölhetők azok, amelyek kibocsátáshoz vezetnek és ezek valószínűsége értékelhető. Ha meghatározzák az ehhez kapcsolódó eseményfákat, akkor a gyakoriság szerint az eseménysorok sorba állíthatók [4,5]. Meg lehet határozni ezek után azt a gyakoriságot, amely alatt nem érdemes foglalkozni az eseménnyel, és csak a teljes kockázathoz jelentősen hozzájáruló eseménysorok esetén kell elvégezni a részletes elemzéseket.

Jellemző, hogy a forrástagbecslésre kijelölt események gyakorisága a tervezési üzemzavarok gyakorisága alatt van, általában a zónasérüléssel járó események gyakoriságával összemérhető gyakorisággal rendelkeznek. Ezt a gyakoriságot a különböző meghibásodások kombinációi állítják elő, de itt is szükséges a levágási gyakoriság kijelölése. Régebben elfogadottan használták azt a konzervatív feltételezést, hogy a nemes gázok 100%-a, a jóid 50%-a és a hasadványok 1%-a kikerül. Ezek a kockázat felfogása és a balesetelhárítási felkészülés szempontjából extrém értékek és emiatt nem hasznosak a baleseti felkészülés szempontjából. Az elfogadási kockázat értékét minden országban egyedileg határozzák meg igazodva a nemzetközi normákhoz, ajánlásokhoz. Jelenleg teljesítmény reaktorok esetén a 10^{-6} - 10^{-7} /év érték az elfogadható a zónasérülési gyakoriságra. Ugyanezen szűrési kritérium alapján jellemzően egy-két esemény maradhat fenn a rostán a kutatóreaktorok esetén.

A forrástagbecslésre kijelölendő események körét a reaktor típusa, ezen belül üzemanyaga, teljesítménye, alkalmazása is befolyásolja. Például nehézvízes reaktoroknál trícium kibocsátással, U-AL üzemanyagot használó reaktoroknál a reaktivitás-balesetekkel kell mindenképpen számolni, ha elegendően magas a reaktivitás a zónában. Nyomás alatti üzemanyag besugárzó csatornák esetén az üzemanyag-hűtőközeg kölcsönhatás veendő figyelembe; Triga típusú reaktoroknál a besugárzott üzemanyag kezelésénél fellépő burkolatsérülést kell forrástag elemzésnél figyelembe venni.

Legfontosabb eseménysor típusok

Nagy reaktivitás bevitel

Az üzemanyagban gyors, nagy hőfelszabadulás következik be ilyenkor, ami a fűtőelemek sérülését eredményezheti. A burkoló eseményt a következőkből lehet kiválasztani: kritikusági kísérlet, reaktorindítás, üzemanyagmozgatás, műveletek a zónában vagy a zóna közelében, nagy neutron elnyelők mozgatása. Ezek az események általában szere-

pelnek a kutatóreaktorok biztonsági elemzéseiben. Az ilyen típusú események súlyos esetben az üzemanyag részleges vagy nagyobb mértékű sérüléséhez, olvadáshoz vezethetnek, amennyiben a reaktor leállítása és a védelmi rendszerek indítása nem történik meg megfelelően. A megolvadó üzemanyag mennyiségét kísérleti alapon és egyszerű számításokkal is vizsgálják. Ugyanakkor főként nagyteljesítményű kutatóreaktorok esetén a részletes kódok használata indokolt lehet a forrástag meghatározására. Ezen események termohidraulikai elemzése nagyon érzékeny a bemeneti paraméterekre.

A hűtőközeg tömegáramának csökkenésével járó üzemzavarok

A hűtőközeget keringető szivattyú vagy valamelyik szelep hibájából, illetőleg az áramlás blokkolódásából kifolyólag lecsökkenő tömegáram az üzemanyag hűtésének leromlása következtében vezethet kibocsátáshoz. Az ilyen eseménysorok jelentősen függenek a zóna és az áramlási viszonyok kialakításától. Ugyanakkor a legtöbb kutatóreaktor biztonsági elemzése feltételezi ilyen eseménytípus bekövetkezését, azaz beletartozik a tervezési üzemzavarok körébe, a reaktorok biztonsági rendszereit rendszerint ilyen eseményre is méretezik. A következmény nyilvánvalóan részleges vagy kiterjedt üzemanyagolvadás lehet. Azonban figyelembe kell venni, hogy a kényszerített áramlás teljes megszűnése ellenére a megfelelő természetes cirkuláció kialakulása a reaktor számára elegendő hűtést biztosíthat.

Hűtőközegvesztéssel járó balesetek

A kutatóreaktorok esetén a hűtőközegvesztéssel járó üzemzavarok egy bizonyos teljesítmény (~MW) felett vezethetnek a zóna sérüléséhez. Az e teljesítmény feletti reaktorok ennek megfelelő biztonsági rendszerrel kell rendelkezniük, ugyanakkor ezen eseménytípus elemzése minden egyes kutatóreaktor esetén elvárás. Az elemzés célja az üzemanyag sérülés lehetőségének kizárása. Azonban figyelembe kell venni, hogy ha sérülés nem is következhet be, a közvetlen sugárzás veszélye az árnyékolás részleges elvesztésével (pl. medence típusú reaktor esetén) súlyos lehet főként az üzemeltető személyzet számára. Magasabb teljesítményű reaktoroknál ilyen üzemzavar esetén számolni kell a lokális vagy kiterjedtebb forrás lehetőségével és minimálisan a burkolat sérülésével, amely már kibocsátást eredményez, tehát a vonatkozó forrástagot elemezni kell.

Üzemanyagkezelési balesetek

Ebbe a körbe tartoznak az üzemanyag leejtésével, ütközésével vagy a zónára történő leejtéssel kapcsolatos balesetek. Ekkor a közvetlen üzemanyagburkolat sérüléséből származó kibocsátással lehet számolni.

Balesetek kísérleti berendezésekkel

A kísérleti berendezések alkalmazása nem csak a kibocsátás kockázatát, hanem a zónasérülés valószínűségét is jelentősen megemeli. Emiatt ezen reaktorokat egyedi biztonsági tulajdonságokkal kell felruházni. Ezek figyelembe vétele nem általánosítható a forrástag meghatározása szempontjából.

Irodalomjegyzék

- [1] *International Atomic Energy Agency, Safety Assessment of Research Reactors and Preparation of the Safety Analysis Report, Safety Series No. 35-G2, IAEA, Vienna (1994)*
- [2] *International Atomic Energy Agency, Safety Requirements of Research Reactors DS272, IAEA, Vienna (2002)*
- [3] *International Atomic Energy Agency, Safety Assessment of Research Reactors and Preparation of the Safety Analysis Report, Safety Series No. 35-G1, IAEA, Vienna (1994)*
- [4] *International Atomic Energy Agency, Probabilistic Safety Assessment for Research Reactors, IAEA-TECDOC-400, IAEA, Vienna (1987)*
- [5] *International Atomic Energy Agency, Application of Probabilistic Safety Assessment to Research Reactors, IAEA-TECDOC-517 (1989)*