



N3a.6. sz. útmutató

Új atomerőművi üzemanyag tervezése

Verzió száma:

2.

(Új, műszakilag változatlan kiadás)

2018. december

Kiadta:

Fichtinger Gyula
az OAH főigazgatója
Budapest, 2018

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 alkalmazásával, így a nukleáris és radioaktív hulladék-tároló létesítmények és anyagok biztonságával, nukleáris veszélyhelyzet-kezeléssel, nukleáris védelemmel 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 szabályzati követelmények teljesítésének módját az atomenergia alkalmazóival egyeztetett módon, világos és egyértelmű ajánlásokat tartalmazó útmutatókban fejt ki, azokat az érintettekhez eljuttatja és a társadalom minden tagja számára hozzáférhetővé teszi. Az atomenergia alkalmazásához kapcsolódó nukleáris biztonsági, védelemmel és non-proliférációs 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.

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	7
1.1. Az útmutató tárgya és célja	7
1.2. Vonatkozó jogszabályok és előírások	7
2. MEGHATÁROZÁSOK ÉS RÖVIDÍTÉSEK	8
2.1. Meghatározások	8
3. AZ ÚTMUTATÓ AJÁNLÁSAI	9
3.1. A tervezés alapelvei	9
3.2. Bevezető teszt fűtőelem kötegek alkalmazása	10
3.3. Az eddig alkalmazottaktól eltérő fűtőelem-típus erőművi körülményeknek megfelelő biztonságos üzemeltetésével kapcsolatos tapasztalatok	11
3.4. A tervezési folyamat résztvevői	11
4. ELEMZÉSEK	12
5. TERVEZÉSI HATÁRÉRTÉKEK	15
5.1. Alapelvek	15
5.2. A fűtőelem pálcá tervezési korlátozásai és az ezekhez tartozó határértékek	15
6. A TERVEZÉS FELÜGYELETE	23
6.1. A tervezési dokumentáció felülvizsgálata	23
6.2. Üzemanyag tervezési dokumentációjának felülvizsgálata	24
6.2.1. A tervezés felülvizsgálati dokumentációjának tartalma	24
6.2.2. A gyártási folyamatot bemutató dokumentumok tartalma	31
6.2.3. A tervezési határértékek betarthatóságát garantáló üzemviteli követelmények	33
7. HIVATKOZÁSOK	34

1. BEVEZETÉS

1.1. Az útmutató tárgya és célja

Az útmutató ajánlásokat tartalmaz az NBSZ 3a. kötet 3a.4.1. alcímében rögzített előírások teljesítésére.

Az útmutató célja, hogy – ajánlásokat adva a fűtőelemkötegek tervezésével kapcsolatosan – 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 hátterét az Atv. és a Rendelet biztosítja.

2. MEGHATÁROZÁSOK ÉS RÖVIDÍTÉSEK

2.1. Meghatározások

Az útmutató az Atv. 2. §-ában, valamint a Rendelet 10. számú mellékletében ismertetett meghatározásokat alkalmazza.

3. AZ ÚTMUTATÓ AJÁNLÁSAI

3.1. A tervezés alapelvei

Az üzemanyag tervezésekor figyelembe veszik a jelen útmutatóban nem ismertetett, de az atomerőmű tervezésekor alkalmazott más szabályokat és biztonsági kritériumokat is.

A nukleáris létesítmények üzemeltetési dokumentumai előírásokat tartalmaznak a meghibásodott fűtőelemek azonosítására és kezelésére vonatkozóan. A tervezési alapadatokban az engedélyes figyelembe veszi a normál üzemeltetésre (az NBSZ-ben TA1 jelöléssel), várható üzemi eseményekre (TA2) és tervezési üzemzavarokra (TA3-4), valamint a tervezésen túli komplex üzemzavaraira (TAK1) vonatkozó biztonsági követelményeket.

A biztonsági követelmények teljesülését igazolja a friss üzemanyag tárolás, a reaktorban történő felhasználás, a pihentetés és az átmeneti tárolás időszakára, továbbá a friss és kiégett üzemanyag szállítására is, mivel az üzemanyag – életútjának különböző szakaszaiban – eltérő jellegű és intenzitású hatásoknak van kitéve. A szállításra vonatkozóan az [1] dokumentumban található követelmények teljesítendőek.

Az engedélyes az üzemanyag életútját úgy tervezi meg, hogy az minden lehetséges esetben elvezessen az újra feldolgozáshoz, vagy a biztonságos végső eltemetéshez.

Az üzemanyag tervezője igazolja a megtervezett üzemanyag és a már meglévő technológiai létesítmények és berendezések mechanikai és kémiai kompatibilitását. Szükség esetén adatokat szolgáltat az esetleges módosítások végrehajtásához.

A figyelembe veendő létesítmények és berendezések:

- a) szállító eszközök,
- b) friss üzemanyag tároló,
- c) erőművön belüli mozgató eszközök,
- d) átrakógép,
- e) pihentető medence,
- f) reaktor,
- g) átmeneti tároló, vagy végleges elhelyezésre szolgáló létesítmény,

Új atomerőművi üzemanyag tervezése

h) vizsgáló berendezések, pl.: sérült üzemanyag vizsgálatára, valamint a sérült üzemanyag javítására szolgáló berendezések.

A szabályozó és biztonságvédelmi szerkezetek ellenállnak a kopási folyamatoknak, valamint az üzemeltetés során fellépő mechanikai feszültségeknek, és az üzemeltetés során végig megőrzik a szükséges mértékű neutronelnyelő tulajdonságukat.

3.2. Bevezető teszt fűtőelem kötegek alkalmazása

Az eddig alkalmazottaktól eltérő fűtőelem-típus esetében a tervezési folyamat kétféle módon valósulhat meg. Kisebbségi módosítások a tervezési követelmények teljes körű igazolása után közvetlenül bevezethetők a töltet tervezés alapvető megváltoztatása nélkül. Új konstrukció, gyártó, vagy az üzemanyag nagyobb mértékű változtatása (összetétel, szerkezet, gyártási folyamat) esetében első lépésben ún. bevezető teszt fűtőelem kötegek (angolul: Lead Test Assemblies) alkalmazása szükséges.

A fejlesztés megkezdése előtt, amennyiben nem egyértelmű a bevezető teszt fűtőelemkötegek alkalmazásának szükségessége, az engedélyesnek hatósági állásfoglalást kell kérnie.

A bevezető teszt fűtőelemkötegek száma annyi, amennyivel egyértelműen le lehet fedni az aktív zónán belüli különböző terhelési viszonyokat. A bevezető teszt fűtőelemkötegek számának és pozíciójának megállapítása külön elemzést igényel.

A bevezető teszt fűtőelemkötegek legalább egy kampányt töltenek el az aktív zónában. A fűtőelemek megfelelőségét az üzemelés közbeni monitorozás során a keretparaméterek értékének a számított tartományon belül maradása igazolja. A fűtőelemkötegek vizsgálható paraméterei alapján azt is igazolja az engedélyes, hogy a gyártás, vagy tervezés során nem történt olyan hiba, amely a tervezett és a megvalósult fűtőelemköteg közötti eltérésre utalna.

Amennyiben bevezető teszt fűtőelemkötegek alkalmazására kerül sor, az előzetes tervezési folyamat során akkor is teljes körűen igazolják a tervezési követelményeket.

Nem szükséges bevezető teszt fűtőelemkötegek alkalmazása abban az esetben, ha ilyen tesztelési folyamatot – a reaktorból történő kivétel utáni vizsgálatokkal együtt – hasonló típusú erőműben, hasonló bevezető teszt fűtőelem kötegekkel már végrehajtottak, és a tervezés valamennyi információja rendelkezésre áll a tervezési követelmények teljesülésének igazolásához. A hasonlóság elfogadhatóságát az engedélyes külön

elemzéssel igazolja. A bevezető teszt fűtőelemkötegektől akkor is el lehet tekinteni, ha a bevezetni kívánt konstrukciót valahol már üzemszerűen alkalmazták és az engedélyes a tapasztalatokról szóló beszámolót nyújt be a hatóságnak.

3.3. Az eddig alkalmazottaktól eltérő fűtőelem-típus erőművi körülményeknek megfelelő biztonságos üzemeltetésével kapcsolatos tapasztalatok

Az eddig alkalmazottaktól eltérő fűtőelem-típus azonos vagy más típusú blokkokon való üzemeltetési tapasztalatait, az üzemeltetés utáni, valamint az üzemeltetést megelőző próbabados vizsgálatok eredményeit tartalmazó dokumentumokat az engedélyes az OAH rendelkezésre bocsátja.

3.4. A tervezési folyamat résztvevői

Az üzemanyag tervezési alapadatait új atomerőmű esetében a reaktor tervezőjével, üzemelő atomerőmű az eddig alkalmazottaktól eltérő fűtőelem-típus esetében a reaktor üzemeltetőjével egyeztetve állapítják meg.

Az engedélyes az üzemanyag tervezéshez rendelkezésre bocsát minden szükséges információt.

Az OAH bevonható a tervezési folyamat követésébe. Figyelembe véve, hogy az engedélyezési eljárás a tervezési követelmények teljesülésének ellenőrzése miatt elhúzódhat – például független szakértők, vagy intézmények ellenőrzésbe való bevonása következtében – az engedélyes már az engedélyek megkérése előtt bevonhatja a hatóságot a folyamatba. Az engedélyes az OAH rendelkezésére bocsátja a fűtőelemnek azokat az adatait, amelyek a tervezési követelmények teljesülésének független ellenőrzéséhez, az ehhez szükséges biztonsági elemzésekhez szükséges.

4. ELEMZÉSEK

A tervezés során a tervező az alábbi elemzéseket végzi el:

- a) A termohidraulikai folyamatokkal kapcsolatban (száraz tároló vagy szállító eszköz esetén nem):
- kritikus hőfluxus vizsgálatok,
 - a fűtőelemköteg hidraulikai ellenállásának meghatározása, reaktor forgalom és by-pass számítások, kazettára ható emelő erők számítása,
 - a hidrodinamikai stabilitás igazolása a forgalom egyenlőtlenlégek figyelembevételével,
 - termohidraulikai számítások a köteget érő „terhelések” meghatározása céljából, vagyis az időfüggő nyomás, hőmérséklet és forgalom eloszlásainak számítása a köteg szerkezeti elemei környezetében, amelyek a mechanikai és a termomechanikai számítások input határfeltételeit jelentik.

A kritikus hőfluxus korrelációk számot adnak a keverőrácsok hatásairól, az azoktól mért függőleges irányú távolságról.

Fal nélküli kötegek esetén a fenti termohidraulikai elemzések számot adnak a kötegek közötti, valamint a szélső kötegek és a reaktor belső elemek által képzett csatornák irányában történő keveredésről.

b) Termo-mechanikai folyamatokkal kapcsolatban:

- az üzemanyag viselkedés mechanikai és kémiai folyamatainak elemzése a zónában normális teljesítményszinteken és teljesítményváltozások figyelembevételével, a szállító és tároló eszközökben a maradványhőnek megfelelően,
- a fűtőelemköteg és pálca geometriai megfelelőségének igazolása, figyelembe véve a tranziensek során fellépő inhomogén hőmérsékletmezőt, folyadék nyomásából és a különféle egyéb dinamikus hatásokból eredő rugalmas, viszkózus és képlékeny alakváltozást (és az azokból eredő méretváltozásokat),
- a vibrációs terhelések elviselésének igazolása,
- a fűtőelemköteg szerkezetében és szerkezeti elemeiben ébredő feszültségek meghatározása, figyelemmel a tranziens során fellépő inhomogén hőmérsékletmezőre, inhomogén folyadéknyomás

Új atomerőművi üzemanyag tervezése

mezőre (száraz tárolás vagy szállítás esetén ez utóbbira nem) és a különféle egyéb dinamikus hatásokra,

- a fűtőelemköteg szerkezetre ható hőfeszültségek meghatározása.

c) Mechanikai folyamatokkal kapcsolatban:

- a fűtőelemköteg szilárdsági elemzése az összes üzemállapotot lefedve (beleértve a leesés kezdeti eseményt),
- a fűtőelem pálcá szilárdsági elemzése az összes üzemállapotot lefedve (beleértve a leesés kezdeti eseményt),
- a fűtőelemköteg szerkezeti elemeinek szilárdsági elemzése az összes üzemállapotot lefedve (beleértve a leesés kezdeti eseményt).

A tervezés során a tervező az elemzéseket normál üzemre és üzemzavarokra (TA1-4) végzi el. Az üzemzavari vizsgálatok legalább az alábbi, „burkoló” kezdeti eseményekre vonatkoznak:

- Földrengés,
- 200 %-os primerköri csőtörés (tároló és szállító eszközökre nem)
- Üzemzavari védelem működése (tároló és szállító eszközökre nem).

A termohidraulikai peremfeltételek, mint „terhelések” az a) pontban meghatározott számítások eredményeiből származnak. A földrengés hatásának vizsgálatai a biztonsági földrengés válasz-spektrumain alapulnak, és az egész erőmű földrengés elemzéseiből adódnak.

A mechanikai biztonság értékelése során a számításokból meghatározott, az anyag lokális igénybevételét jellemző értékeket (feszültség, megengedett alakváltozás stb.) összeveti az adott anyagra vonatkozó, megfelelő mérésekből meghatározott anyagjellemző értékekkel. A mérésekből meghatározott anyagjellemzőket a tervezési határértékeknek (ld. 5. fejezet) megfelelő biztonsági tényezőkkel veszi figyelembe.

Az elemzésekhez megfelelően dokumentált és validált kódokat használ, amely tartalmazza az anyagok tulajdonságait és a vizsgálatba bevont, releváns folyamatok leírását.

d) Elemzi az üzemanyag és a burkolat kölcsönhatását, a hasadási gázok viselkedését, a burkolat korrózióját és sérülési mechanizmusait. Az elemzésekhez az üzemanyag viselkedés modellezésére megfelelően dokumentált és validált kódokat használ. Az elemzések különböző üzemi és üzemzavari állapotokra és az elérhető legnagyobb kiégettségre terjednek ki.

Új atomerőművi üzemanyag tervezése

- e) Elemzi a fűtőelem burkolat és a hűtőközeg kölcsönhatását a korrózió, hidridizáció és a hűtőközegben keringő szilárd részecskék és korróziós termékek hatását figyelembe véve.
- f) Reaktorfizikai számításokkal elemzi az eddig alkalmazottaktól eltérő fűtőelem-típus felhasználhatóságát az aktív zónában. Igazolja a régi és új üzemanyag együttes alkalmazásának lehetőségét kevert zónákban.
- g) Kritikussági elemzéseket végez a tárolókra és szállítóeszközökre. Az üzemanyag elrendezését figyelembe véve bizonyítja, hogy elárasztási esetekben, legvalószínűbb víz/gőz hőmérséklettel és sűrűséggel számolva az effektív sokszorozási tényező nem haladja meg a 0,95 értéket. Minden, egyszeres hibát feltételező üzemzavarra igazolja, hogy az effektív sokszorozási tényező nem haladja meg a 0,98 értéket.

A kritikussági elemzéseket arra az esetre is elvégzi, amikor kiégett üzemanyag tárolására vagy szállítására szolgáló berendezésekben a tervezett legnagyobb sokszorozó képességű üzemanyag van elhelyezve. A fenti korlátozások erre az esetre is érvényesek. A szubkritikusság előírt mértéke 95 %-os konfidencia szinten 95 %-os valószínűséggel teljesül.

5. TERVEZÉSI HATÁRÉRTÉKEK

5.1. Alapelvek

Az üzemanyag tervezésében az engedélyes érvényesíti az erőmű biztonsági megalapozásánál követett determinisztikus és valószínűségi biztonsági elvek egymással szinkronban történő alkalmazását. Külön kritériumrendszert ír elő a normál üzemeltetésre, várható üzemi eseményekre és tervezési üzemzavarokra, továbbá a kritériumrendszer a tervezésen túli komplex üzemzavarokat, valamint az üzemzavari védelem nélküli kezdeti eseményeket is figyelembe veszi differenciált módon (lásd 4.2. pont).

A számszerűen meg nem adott korlátozásokat kísérleti mérésekkel alapozza meg, vagy legalább úgy, hogy az atomerőművi blokk biztonsági jelentése az adott korlátozásra egyértelmű hivatkozásokat tartalmaz.

5.2. A fűtőelem pálca tervezési korlátozásai és az ezekhez tartozó határértékek

Az útmutató 5.2. alfejezete a biztonsági elemzéseknek – amelyek nemcsak üzemzavarokra, hanem a normál üzemi folyamatokra is vonatkozhatnak – a fűtőelem pálccával kapcsolatos elfogadási kritériumai tekintetében ad meg ajánlásokat, vagyis részletezi, hogy az NBSZ 3a2.4.1100.-1400. pontjai általános követelményeit milyen konkrét, a fűtőelemekben és a hőhordozóban lezajló folyamatok korlátozásával lehet kielégíteni.

Normál üzemeltetéskor („TA1” üzemállapot) a tervezés figyelembe veszi az üzemanyag meghibásodási mechanizmusaira és a meghibásodás megelőzésére vonatkozó alábbi korlátozásokat és az ezekhez kapcsolódó határértékeket:

a) A burkolat összeroppanása

A burkolat mechanikai szilárdsága olyan, hogy elkerülhető a burkolat összeroppanása, illetve behorpadása, mely az alakváltozással együtt megjelenő repedések miatt a fűtőelem inhermetikussá válásához vezethet. A névleges teljesítményű és hőmérsékletű állapot mellett figyelembe kell venni a nyomáspróba alatti hűtőközeg jellemzőket is amennyiben ezt az üzemvitel nem zárja ki.

b) A fűtőelem tablettákból felszabaduló gázok

A fűtőelemek belsejében uralkodó nyomás nem haladhatja meg tartósan a hőhordozó normál üzemi nyomását. Amennyiben ez konstrukciós, vagy más okokból nem biztosítható, a tervezés külön bizonyítja, hogy a

Új atomerőművi üzemanyag tervezése

túlnyomás nem hat károsan a fűtőelemre. A kritérium teljesíthetősége érdekében a tervező normál üzemi korlátozást ad meg a pálca lineáris hő-teljesítménye kiegészítő-függő és a pálca-teljesítmény maximálisan megengedhető értékeire.

c) Deformációk

A tervezés minden kárt okozó technológiai és fizikai folyamat figyelembevételével normál üzemi felső korlátokat állapít meg a geometriai deformációkra (a burkolat átmérőjének növekedése, csökkenése, elhajlás, megnyúlás, elcsavarodás, a burkolat megengedett képlékeny alakváltozása). A korlátozások köre kiterjed mindazokra a konstrukcióból eredő szerkezeti egységekre (fűtőelem, köteg, megvezető cső, abszorbens rudak, stb.), amelyek nem megengedhető deformációja

- rövid-, vagy hosszútávon a fűtőelemek meghibásodását eredményezheti,
- az abszorbens rudak mozgását akadályozhatja,
- a fűtőelemek hűthetőségét veszélyeztetheti,
- a fűtőelem pálcák teljesítményének jelentős növekedését eredményezheti,
- a fűtőelem-kezelést akadályozhatja.

A köteg geometriai elrendezésének, komponenseinek függvényében célszerű megadni a deformációs adatokat.

A tervezés biztosítja azokat az eszközöket, melyek lehetővé teszik a kiégetlen és kiégett fűtőelemek fenti célú inspekcióját.

A termohidraulikai és a reaktorfizikai tervezés a fenti követelmények szem előtt tartásával figyelembe veszi a maximális megengedett deformációk kedvezőtlen hatásait (lásd még a 4.9. „A nukleáris üzemanyag és a reaktor aktív zónájának kezelése az atomerőműben” című útmutatóban).

d) Feszültségek, az anyagok kúszása és fáradása

A tervezés felső határértékeket állapít meg a fűtőelemek kritikus részeiben ébredő feszültségekre, kúszási és fáradási jellemzőikre. Korlátozni kell az üzemzavarok során fellépő, dinamikus terhelésből származó feszültségeket is. A megengedett feszültségeket a köteg azon komponenseire kell megadni, amelyek a köteg integritásának biztosításában a legfontosabb szerepet játsszák.

Új atomerőművi üzemanyag tervezése

Az anyagfáradásból eredő meghibásodásának elkerülésére határértékeket definiál a periodikus módon ismétlődő terhelésekre. Az erőmű manőverezési korlátozásai összhangban állnak a fűtőelem fáradási jellemzőivel.

e) Korrózió és hidridizáció

A tervezés figyelembe veszi a fűtőelem különböző részeinek oxidációját, a burkolat hidridizációját és a korróziós termékek lerakódásából eredő réteg vastagságát megfelelő határértékek alatt tartja. Ennek érdekében a hőhordozó megfelelő kémiai és fizikai jellemzőire korlátokat ír elő. A fűtőelem belső hidridizációját a belső nedvességtartalom korlátozásával tartja megfelelően alacsony szinten.

f) A fűtőelem tabletták tömörödése és duzzadása

A fűtőelem tabletták tömörödése és duzzadása egymással ellentétes irányú folyamatok. A kiégés elején a tömörödés, a későbbiekben a duzzadás a meghatározó. A tablettákat olyan technológiával kell gyártani, hogy a kezdeti tömörödés csak kismértékű lehessen, és ne keletkezzen akkora rés a tabletták és a burkolat között, ami a burkolat összeroppanását lehetővé teszi. A tabletták duzzadása a kiégéssel folyamatosan nő, majd egészen magas lokális kiégéseknél kialakul az ún. nagy-kiégésű szerkezet. A fűtőelemet úgy kell tervezni, hogy a megengedett kiégésig ezek a folyamatok ne vezessenek a burkolat épségének elvesztéséhez.

g) A pálcák szilárd rögzítése a távtartó rácsokban

A fűtőelem pálcákat a távtartó rácsok olyan erővel rögzítik, hogy a normál üzemeltetés során keletkező vibráció, az áramló hűtőközeg által keltett mechanikai terhelések nem képesek a pálcák és a távtartó rács egymáshoz viszonyított pozícióját megváltoztatni. Ha ugyanis ez hosszabb ideig megtörténhet, akkor az a burkolat dörzsöléses kopásához és így a pálcák gáztömörtelenné válásához vezet.

h) Rugó a fűtőelem belsejében

A tervezés alsó határértéket állapít meg a fűtőelem belsejében elhelyezkedő rugó erejére vonatkozóan abból a célból, hogy a tabletták elmozdulása megakadályozható legyen a friss üzemanyag szállítása és egyéb céllal történő mozgatása során. Ha a fűtőelemek felépítése olyan, hogy a tabletták elmozdulását nem csavarrugóval gátolják meg, akkor igazolják az adott megoldás alkalmasságát.

Új atomerőművi üzemanyag tervezése

i) A fűtőelem kötegek kezelése

A fűtőelemkötegek kezelése és szállítása során fellépő mechanikai feszültségekre vonatkozóan olyan határértékeket állapítanak meg, amelyek biztosítják, hogy ezeknek a műveleteknek ne legyen káros hatásuk az üzemelő kazettákra. A kritérium teljesíthetősége érdekében a tervező megadja a megengedhető maximális gyorsulást.

j) Szilárd pozíció átrakás során

A köteg lábrészének és a zónakosár alaplemezének kialakítása olyan, hogy a kazetta megtartja függőleges helyzetét oldalirányú megtámasztás nélkül is.

A fenti a-j követelmények bármelyikének nem teljesülése üzemállapottól függetlenül az NBSZ 3a.2.1.1600. pont b) alpontjában foglalt, a pálca burkolatával kapcsolatos gát-funkció elvesztését jelenti, vagyis ilyenkor a pálcát gáztömörtelennek kell tekinteni, hacsak validált fűtőelem-viselkedési kóddal nem igazolt a pálca gáztömörségének megtartása.

TA1 üzemállapotban és TA2 üzemállapothoz vezető események során a tervezés figyelembe veszi az üzemanyag meghibásodási mechanizmusaira és a meghibásodás megelőzésére vonatkozó alábbi korlátozásokat és az ezekhez kapcsolódó határértékeket:

a) Burkolat-tabletta („PCMI”) mechanikai kölcsönhatás

A sugárirányban átlagolt fajlagos entalpia-növekedés nem haladhatja meg a fűtőelem-tervezés során kísérletekkel meghatározott értéket, aminél nagyobb entalpia-növekedésnél a fűtőelemet meghibásodottnak tekintik. A fűtőelem meghibásodásának veszélye ebben az esetben a hirtelen teljesítményugrás miatt létrejövő tablettaburkolat mechanikai kölcsönhatás útján jöhet létre. Fenti értéket úgy képezik, hogy az átmenet során az üzemanyagban fellépő legnagyobb hőmérsékletű állapothoz tartozó fajlagos entalpiából kivonják a kiindulási állapotra jellemző értéket. Szükség esetén a kiegészítés hatását is figyelembe veszik, és a korlátozást ennek függvényében adják meg.

b) Tabletta – burkolat kölcsönhatás feszültség alatti korrózióval

A fűtőelemet úgy tervezik meg, hogy a jelentős mechanikai feszültséget okozó tablettaburkolat kölcsönhatás ne hozzon létre olyan feszültségeket, amelyek a burkolat épségét veszélyeztetik, miközben a tervezéskor számolnak a feszültséggorrhózió lehetséges hatásával is. Az üzemeltetési korlátozásokban is figyelembe veszik ezt a követelményt, mivel az intenzív tablettaburkolat kölcsönhatás elsősorban gyors

Új atomerőművi üzemanyag tervezése

teljesítménynövelés során léphet fel. A fenti célból korlátozzák a burkolatban ébredő érintő irányú feszültség maximálisan megengedett értékét.

c) A fűtőelem burkolat hőmérséklete

A burkolat megfelelő hűtése biztosított, ha 95 %-os konfidencia szinten 95 %-os valószínűséggel bizonyítható, hogy filmforrás, vagy abba való átmenetet jelentő forrási állapot (forráskrízis) nem lép fel.

d) A fűtőelem tablettá részleges megolvadása

A fűtőelem tabletták hőmérséklete részlegesen sem, tehát a tablettá középvezonájában sem haladhatja meg a kiégés- és összetétel-függő olvadáspontot.

e) A burkolat nem hasadhat fel a magas hőmérsékleten bekövetkező felfúvódás és képlékeny alakváltozás következtében. A tervező megadja a folyamatra vonatkozó kísérletek eredményeivel összhangban a burkolatban ébredő feszültségek és/vagy deformációk hőmérsékletfüggő határértékeit, amelyek betartása esetén a felhasadás nem következhet be.

f) Egyéb meghibásodást okozó mechanizmusok

A tranziensek következményeinek ellenőrzése során megvizsgálják, hogy a fűtőelemek más okok következtében (pl. mechanikai ütések, törés révén) nem válnak-e gáztömörtelenné. Ha a köteg rögzítése megfelelő, nem jöhet létre a hőhordozó áramlása következtében "felúszás".

A fenti a-f követelmények bármelyikének nem teljesülése üzemállapottól függetlenül az NBSZ 3a.2.1.1600. pont b) alpontjában foglalt, a pálca burkolatával kapcsolatos gát-funkció elvesztését jelenheti, vagyis ilyenkor a pálcat gáztömörtelenné kell tekinteni, hacsak validált fűtőelem-viselkedési kóddal nem igazolt a pálca gáztömörtéségének megtartása.

TA3 állapotokhoz vezető események során a határértékekre és korlátozásokra legalább a következőket veszik figyelembe:

a) TA3 eseményt követően a reaktornak leállítás után újraindíthatónak kell lennie, a köteg geometriája ezért nem változhat lényegesen. Ezzel, valamint a sugárzási következmények csökkentése érdekében a tervező korlátozza a forráskrízist szenvedő, valamint a tablettá-burkolat kölcsönhatás miatt ebben az esetben meghibásodottnak tekintendő fűtőelem pálcák számát.

Új atomerőművi üzemanyag tervezése

- b) Ugyancsak korlátozandó a burkolat hőmérséklete, mert a magasabb hőmérsékleten történő, megnövekedett oxidáció kedvezőtlenül hat a burkolat mechanikai tulajdonságaira az üzemzavar alatt. Ez utóbbi követelmény teljesülése feltétele az NBSZ 3a2.4.1100. és NBSZ 3a2.4.1200. követelmények teljesülésének, amelyek az abszorbensek mozgathatóságának és a húthetőség megtartásának alapvető biztonsági funkcióit írják elő.

TA2, TA3, TA4, állapotokhoz vezető, valamint TA2 típusú, üzemzavari védelem nélküli („ATWS”) események esetén a sugárzási következmények csökkentése érdekében a tervező korlátozza az ilyen üzemzavarok következményeképpen gáztömörtelenné váló fűtőelem pálcák számát. A gáztömörtelenség elkerülésének szükséges feltételeit az 5.2. alfejezet fenti és további részei tételesen tartalmazzák.

TA2, TA3, TA4, TAK1 állapotokhoz vezető, valamint üzemzavari védelem nélküli („ATWS”) események esetén a tervezés figyelembe veszi az üzemanyag meghibásodási mechanizmusaira és a meghibásodás megelőzésére vonatkozó alábbi korlátozásokat és az ezekhez kapcsolódó határértékeket:

- a) A burkolat felfúvódása magas hőmérsékleten a belső nyomás növekedése következtében nem okozhatja a hűtőcsatornák olyan elzáródását, ami a húthetőséget veszélyezteti. A vonatkozó elemzésnek a hőhordozó nyomáscsökkenését is figyelembe kell vennie.
- b) Annak érdekében, hogy a burkolat elridegedésének következtében ne sérüljön meg, a megfelelő kísérletek eredményeivel összhangban a tervezés korlátozza a burkolat maximális hőmérsékletét.
- c) Annak érdekében, hogy a burkolat elridegedésének következtében ne sérüljön meg, a megfelelő kísérletek eredményeivel összhangban a tervezés korlátozza a burkolat oxidációjának maximális mértékét, amit a teljes burkolatvastagság hányadában kell kifejezni. A hányadot úgy értelmezik, amely oxiddá alakulna át, ha az összes lokálisan elnyelődött oxigén ZrO_2 keletkezésére vezető reakcióban használná el. A teljes oxidáció meghatározásánál mind a külső, mind pedig a lehetséges belső oxidációt, valamint az üzemzavart megelőző normál üzemi járulékot is figyelembe veszik. A fenti okból a tervező szintén korlátozza a burkolatban a normál üzemeltetés során elnyelt hidrogén maximális értékét is.

A burkolat elridegedésével kapcsolatos fenti b) és c) követelmények figyelembe veszik nemcsak a reaktorban zajló folyamatokat (pl. az

Új atomerőművi üzemanyag tervezése

elridegedett fűtőelem hirtelen hűtését, hanem a szállítási és tárolási folyamatok közben fellépő lehetséges mechanikai terheléseket is.

- d) Az üzemanyag burkolata nem olvadhat meg akkor sem, ha a köteg különböző anyagai közötti kémiai kölcsönhatás és ezáltal az olvadáspont csökkenése jön létre.
- e) A fűtőelemkötegek megőrzik integritásukat, a szerkezeti elemek egymáshoz és a reaktor további belső elemeihez szilárdan rögzítettek, a szerkezeti elemek deformációja nem akadályozhatja a hűtőközeg áramlását olyan mértékben, ami veszélyezteti a zóna hűthetőségét. Az üzemzavari folyamatok elemzéseit figyelembe veszik a fellépő deformációk kedvezőtlen hatásait.
- f) Az üzemanyag mátrix megolvadásának és/vagy fragmentációjának, ezáltal a burkolat meghibásodásának és a tabletták anyagának a hűtőközegben való szétszóródásának elkerülése érdekében, a megfelelő kísérletek eredményeivel összhangban a tervező korlátozza a tabletták hőtartalmának növekedésére jellemző fajlagos entalpia-változásnak a sugárirányban képzett átlagát. Ezt az értéket a felszabaduló energiától függetlennek tekintik, és úgy képezik, hogy az átmenet során az üzemanyagban fellépő legnagyobb hőmérsékletű állapothoz tartozó fajlagos entalpiából kivonják a kiindulási állapotra jellemző értéket. Szükség esetén a kiégés hatását is figyelembe veszik, és a korlátozást ennek függvényében adják meg. Ennek a követelménynek a nem teljesülése üzemállapottól függetlenül az NBSZ 3a.2.1.1600. pont a) és b) alpontjában foglalt, az üzemanyag-mátrixal és a pálcák burkolatával kapcsolatos gát-funkció elvesztését jelenti, és ilyenkor a pálcát gáz-tömörtelennek kell tekinteni.
- g) A szabályozó és biztonságvédelmi szerkezetek, abszorbensek még részlegesen sem olvadhatnak meg. Az üzemanyag és a reaktor szerkezeti elemei nem változhatnak, nem deformálódhatnak oly mértékben, korróziójuk nem érheti el azt a szintet, hogy ezáltal a szabályozó és biztonságvédelmi szerkezeteknek a hasadási láncreakció leállítására irányuló mozgása lehetetlenné váljon. A besugárzás hatására az abszorpciók képessége nem csökkenhet olyan mértékben, ami a reaktor biztonságos leállítását már nem tenné lehetővé.
- h) A fűtőelem tabletták megolvadása
A fűtőelem tabletták hőmérséklete sehol sem haladhatja meg a kiégés- és összetétel-függő olvadáspontot.

Új atomerőművi üzemanyag tervezése

A fenti a-h követelmények nem teljesülése üzemállapottól függetlenül az NBSZ 3a.2.1.1600. pont a) és b) alpontjában foglalt, az üzemanyag-mátrixal és a pálca burkolatával kapcsolatos gát-funkciók elvesztését jelenti, tehát ilyenkor a pálcát gáz-tömörtelennek kell tekinteni.

A fenti a-h követelmények teljesülése feltétele az NBSZ 3a2.4.1100. és NBSZ 3a2.4.1200. követelmények teljesülésének, amelyek az abszorbensek mozgathatóságának és a hűthetőség megtartásának alapvető biztonsági funkcióit írják elő. Azt, hogy a hűtőközegbe véletlenül kerülő idegen testek nem okozhatnak ilyen sérüléseket, a fűtőelem tervezése szűrő-rács alkalmazásával biztosítja.

- i) A konténment hidrogén-koncentrációjának korlátozása érdekében a tervező korlátozza a fűtőelem burkolat és a hűtőközeg közötti kémiai reakció eredményeképpen keletkező hidrogén mennyiségét. Ezt annak hányadában kell kifejezni, ami akkor adódna, ha az összes fűtőelem burkolata teljes egészében reakcióba lépne a hűtőközeggel.

6. A TERVEZÉS FELÜGYELETE

6.1. A tervezési dokumentáció felülvizsgálata

Új reaktor első töltetének, új típusú, vagy jelentős mértékben módosított üzemanyagnak, illetve szabályozó és biztonságvédelmi szerkezetnek, vagy új tervező, vagy gyártó termékének engedélyezésekor a tervezési dokumentáció felülvizsgálata szükséges. Ekkor az eddig alkalmazottaktól eltérő fűtőelem-típusról beszélünk. Szűkített terjedelmű felülvizsgálat szükséges akkor, amikor az új cseretöltetet alkotó üzemanyagban valamilyen kisebb fejlesztést hajtottak végre. Ekkor eltérő fűtőelemkötegről beszélünk.

Az üzemanyag módosításának mértékét a strukturális, összetételi jellemzők és a végtelen sokszorozási tényező változása határozzák meg.

A tervezési dokumentáció felülvizsgálatát elemzésekre, kísérletek eredményeire és a rendelkezésre álló összes üzemviteli tapasztalatra alapozzák. Ennek érdekében az üzemanyag típus egész üzeme alatt folytatják az üzemviteli tapasztalatok gyűjtését.

Az engedélyes köteles a felülvizsgálatba a tervezéstől független szakértőket is bevonni. Független szakértő erre a feladatra minősített személy, vagy szervezet lehet. Az NBSZ 3a.2.3.0200. pont szerint el kell végezni a tervek biztonsági szempontból meghatározó jellemzőit tartalmazó elemzések független ellenőrzését eltérő számítási módszerekkel is.

Az engedélyezési folyamat során jóváhagyott tervezési dokumentációkat, a felülvizsgálat eredményeit és az üzemviteli tapasztalatokat az üzemanyag teljes élettartama alatt szabályozott módon őrzik meg az ellenőrizhetőség és a következő tervezési folyamatban való felhasználhatóság érdekében.

A felülvizsgálati dokumentációt, amelyet a tervezési dokumentáció és a felülvizsgálat eredménye képez, legkésőbb az üzemanyag engedélyezésekor az engedélyes jóváhagyásra benyújtja a hatóságnak.

Előfordul, hogy az üzemanyag módosulása nélkül is megváltozik a tervezési dokumentáció (gyártástechnológiai korszerűsítések, újabb ellenőrzési módszer alkalmazása stb.). Ezekben az esetekben is igazolják, hogy a módosítás biztonsági hatása a korábbiakhoz képest kedvezőbb, illetve a biztonság nem romlott az eredeti állapothoz képest. Ilyenkor a hatósági engedélyezés elmaradhat, de a tervezési dokumentációt ki kell egészíteni a módosítás információival.

6.2. Üzemanyag tervezési dokumentációjának felülvizsgálata

Üzemanyag tervezési dokumentációjának felülvizsgálata során legalább a következő feltételek teljesülnek:

- a) az üzemanyag és a szabályozó és biztonságvédelmi szerkezetek tulajdonságai és viselkedésük oly mértékben ismert, hogy a biztonsági elemzések elvégezhetők,
- b) a zóna kialakítása az egyes kötegek dúsításai, kiegészi és sokszorozási tulajdonságai olyanok, hogy az Üzemeltetési Feltételek és Korlátok követelményei kielégíthetők,
- c) a reaktor teljesítmény-változással járó folyamatai szabályozhatók,
- d) teljesülnek az útmutató 5.2. alfejezete alapján előírt követelmények,
- e) az üzemanyag és a szabályozó és biztonságvédelmi szerkezetek felépítése lehetővé teszi periodikus felülvizsgálatukat és ellenőrzésüket.

Az alábbi, 6.2.1. alcím a felülvizsgálati dokumentáció tartalmát, a 6.2.2. alcím a gyártási folyamatot bemutató dokumentumot, míg a 6.2.3. alcím a tervezési határértékek betarthatóságát garantáló üzemviteli követelményeket ismerteti.

6.2.1. A tervezés felülvizsgálati dokumentációjának tartalma

A dokumentáció tartalmazza a fűtőelemkötegek hideg – szobahőmérsékleti –, kiégetlen állapotban érvényes geometriai és összetétel adatait, valamint az anyagi jellemzőket, a műszaki rajzokat olyan részletességgel, hogy a biztonsági elemzések a tervezőtől függetlenül is elvégezhetők legyenek (lásd NBSZ 3a.2.3.0200.). Az anyagi jellemzők alatt az egyes komponensek anyagainak fajhőjét, hővezetési tényezőjét, rugalmassági, kúszási paramétereit, folyáshatárát és szakítószilárdságát értjük a hőmérséklet, illetve a tablettá esetén a kiegész függvényében is. Amennyiben egyes jellemzők a neutron fluenciától is függenek (például a burkolat kúszási jellemzői), ezt is megadják. Amennyiben a rugalmassági jellemzők anizotropak, az adatok ezt is figyelembe veszik.

A dokumentáció tartalmazza a fűtőelem „tervezési követelményeit”, ami a normál üzemtől a tervezési üzemzavarok kiterjesztéséig bezárólag kimerítő módon megadja, részletesen ismerteti azokat a fizikai és kémiai folyamatokat, amelyek a fűtőelemek meghibásodásához vezethetnek. Az ismertett folyamatok tartalmazzák legalább az 5.2. alfejezetben felsoroltakat. Az üzemanyag-pálca tekintetében a meghibásodások típusai a

Új atomerőművi üzemanyag tervezése

dokumentumban az 5.2. alfejezet tartalmával összhangban csoportosítva vannak az alapvető biztonsági célok, vagyis az alábbiak szerint:

- a) Olyan meghibásodások, melyek ugyan a pálcá gáztömörtelenségéhez vezetnek, de nem veszélyeztetik az abszorbensek mozgathatóságát vagy a pálcák hűthetőségét. Ezek elkerülését csak TA1 és TA2 folyamatok esetén követeljük meg. (A hűthetőség elvesztéséről akkor beszélünk, ha hűtőcsatornák átömlési keresztmetszete olyan mértékben leszűkül, hogy a pálcából a maradványhő elvezetésének hiánya a tablettá hőmérsékletének folyamatos növekedéséhez, a cirkónium jelentős mértékű oxidálódásán és hidrogénfelvételén keresztül a pálcák ridegtöréséhez, vagy az üzemanyag mátrix megolvadásához, a burkolat felnyílásához és a fragmentumoknak a hűtőközegbe való kiszóródásához vezethet.)
- b) Olyan meghibásodások, melyek már nemcsak gáztömörtelenséghez vezetnek, de veszélyeztetik a hűthetőséget és az abszorbensek mozgathatóságát is. Ezek elkerülésének teljesülését megköveteljük a TAK1 üzemállapotig bezárólag az összes folyamatra.

A harmadik általános biztonsági cél a sugárzási következmények alacsony szinten való tartása. Az 5.2. alfejezet korlátozásai ezért kiterjednek a gáztömörtelenné váló pálcák számára is, amit szintén meg kell adni az ott megadott esetekre.

A dokumentum minden egyes folyamatra

- a) megadja azokat a számszerűsített elégséges feltételeket, amelyek betartása biztosítja az adott típusú meghibásodás elkerülését,
- b) részletesen bemutatja azokat a kísérleteket, ahonnan ezek az értékek származtatva lettek. A kísérleteknek le kell fedniük a pálcá és a tablettá azon kiegészítő tartományát, amire a fűtőelem hatásági engedélyt kéri.
- c) Megadja a kísérleti eredmények feldolgozásának statisztikai módszerét, a kapott eredmények statisztikai jellemzőit, ugyanis a reaktorbiztonság megköveteli olyan tartalékok („margin”, „mérnöki tényező”, „biztonsági tényező”, stb.) alkalmazását, amelyek megalapozott valószínűségi jellemzőkkel („konfidencia szint”, „valószínűségi tartomány”) rendelkeznek. Példának tekinthető a kritikus hőfluxus esetén alkalmazott szokásos eljárás.
- d) Megadja és indokolja azokat a biztonsági tényezőket, amivel a számítási eredményeket a bizonytalanságok kompenzálása érdekében szorozni kell akkor, amikor a kritérium teljesülését ellenőrizzük, és részletezi, hogy

Új atomerőművi üzemanyag tervezése

az alkalmazandó biztonsági tényezők milyen jellegű bizonytalanságokról adnak számot.

- e) Megadja azoknak a normál üzemi folyamatoknak és üzemzavaroknak a körét, ahol az adott korlátozás teljesülése veszélybe kerülhet.
- f) Megadja azokat a modelleket, számítógépes program-típusokat, melyeket az adott kritérium teljesülésének ellenőrzése céljából alkalmazni kell.

A dokumentáció tartalmazza a „tervezési követelmények teljesülésének” igazolását, aminek alapvető célja annak bizonyítása, hogy az adott típusú erőmű esetén az adott típusú fűtőelemekből kialakíthatók olyan kezdeti, átmeneti és egyensúlyi zónák, melyekre a „tervezési követelményekben” szereplő fűtőelem elfogadási kritériumok kielégülnek. Ennek első lépéseként meg kell tervezni a fenti zónákat, átrakásokat, kampányokat, és meg kell határozni a reaktorfizikai keretparamétereket, melyek a biztonsági elemzések eredményeit alapvetően befolyásoló paraméterek burkoló értékei, és melyek betartásával a zóna tervezése (és monitorozása) során még a normál üzemben korlátozhatók a később esetleg bekövetkező üzemzavarok következményei. Ezek lehetnek reaktivitás tényezők, reaktivitás értékek, teljesítmény egyenlőtlenségi tényezők. A keretparaméterek értékei figyelembe veszik a számítási bizonytalanságokat és az egyes zónák különbözőségét is. A zónatervezéssel, monitorozással és a keretparaméterekkel kapcsolatban a 4.9. „A nukleáris üzemanyag és a reaktor aktív zónájának kezelése az atomerőműben” című útmutatóban található ajánlások. A zónatervezési számítások során figyelembe kell venni a szabályozó elemek abszorbeáló képességének a besugárzás hatására történő csökkenését is.

A tervezési követelmények teljesülésének ellenőrzése alapvetően a normál üzemi folyamatok és az üzemzavarok biztonsági elemzési módszerei szerint folyik, amihez reaktorfizikai, termohidraulikai és fűtőelem-viselkedési kódok szükségesek. A tervezési követelmények egy része hőmérséklet jellegű, ezen követelmények ellenőrzéséhez a forrócsatorna termohidraulikai számítása szükséges. A követelmények másik csoportja feszültségekkel, deformációkkal, korróziós folyamatokkal, a hasadási gázok keletkezésével és migrációjával kapcsolatos, az ilyen jellegű követelmények ellenőrzéséhez fűtőelem-viselkedési kódok szükségesek. Az utóbbi számítások eredményeit fel kell használni a fenti termohidraulikai számítások során is, nevezetesen a burkolat és a tabletták közötti rés és a tabletták kiégés- és hőmérsékletfüggő hővezetési adatai innen származnak. Az üzemanyag pálcák gáztömörtelemé válásának feltételei, az ilyen pálcák száma szintén fűtőelem-viselkedési

Új atomerőművi üzemanyag tervezése

kódokkal határozható meg. A fentiek miatt a fűtőelem tervezésében a fűtőelem-viselkedési kódok alapvető jelentőségűek, ezen kódok validációját az adott fűtőelemre a validációhoz felhasznált kísérletek ismertetésével együtt kell benyújtani a hatóságnak.

A fűtőelemre vonatkozó tervezési követelmények teljesülését nem szükséges részletes elemzéssel bizonyítani a Biztonsági Jelentés összes üzemzavarára, normál üzemi folyamatára, ha a dokumentáció tartalmaz egy olyan tanulmányt, ami követelményenként, vagy követelmény-csoportonként áttekinti az összes tranzienszt és állapotot, és az adott követelmény szem előtt tartásával, az eddigi tapasztalatok felhasználásával megalapozza, melyek azok az üzemzavarok, normál üzemi folyamatok, amelyek burkolják az összes többi. Az, hogy az 5.2. alfejezetben egy-egy kritériumnak teljesülnie kell az üzemzavarok több osztályára („üzemállapotra”), nem jelenti mindig azt, hogy csak a legkedvezőtlenebb üzemállapot-osztály esetén kellene elvégezni az elemzést (és kellene előírni a kritériumot). Erre példa a feszültség alatti korrózióval kapcsolatos kritérium, ami normál üzemben és várható üzemi események esetén azonos, és mindkét esetre elemzést kell végezni.

Az 5.2. alfejezet követelményei szerint a fűtőelemkötegeket és annak részeit úgy kell megtervezni és összeszerelni, hogy azok megtartsák szerkezeti integritásukat, és az alakváltozások ne okozhassák a húthetőség vagy az abszorbensek mozgathatóságának elvesztését miközben a kötegek elviselik az üzemeltetés, a külső események és a tervezési üzemzavarok terheléseit. A tervezés figyelembe veszi azokat a lehetséges deformációkat, amelyek a korrózió, a kúszási folyamatok, a kifáradás, a nyomás és a hőmérséklet, azok változásának következtében, valamint olyan dinamikus mechanikai terhelések következtében fellépnek, mint a földrengés és az áramló hűtőközeg által okozott vibráció.

A fentiek bizonyítása érdekében kísérleteket és szilárdsági számításokat végeznek. A kísérletek egyrészt az üzemi körülményekkel azonos terheléseket (nyomás, forgalom, hőmérséklet) biztosító hosszúidejű próbapados méréseket, másrészt az ejtési próbákat jelentik. Az ejtési próbák vonatkoznak egyrészt az üzemzavari védelem működésére, másrészt a tároló konténerekre. Az utóbbi esetben – tekintettel a szállító jármű használatára – a fűtőelem-imitátorokat tartalmazó konténereket 9 m magasságból vízszintes felületre, valamint 1 m-es magasságból tüskére kell ejteni [1].

Az egész kötegre vonatkozó szilárdsági elemzéseket normál üzemre és üzemzavarokra kell elvégezni. Hasonlóan a fűtőelem pálcák követelmények igazolásakor alkalmazott módszerhez, itt sem szükséges a Biztonsági Jelentés összes eseményét, folyamatát részletesen végigszámolni, hanem először

Új atomerőművi üzemanyag tervezése

meg kell határozni a „burkoló” kezdeti eseményeket. Ezek legalább az alábbiak, de a teljesség a burkoló jelleg tekintetében bizonyítandó:

- a) Földrengés
- b) 200 %-os primerköri csőtörés
- c) Üzemzavari védelem működése

A belső eredetű kezdeti eseményekre termohidraulikai számításokkal meg kell határozni a terheléseket, vagyis az időfüggő nyomás, hőmérséklet és forgalom eloszlásait a köteg szerkezeti elemei környezetében, melyek a mechanikai (termomechanikai) számítás input határfeltételeit jelentik. A földrengés hatásának vizsgálatához meg kell határozni a biztonsági földrengés válasz-spektrumait, vagyis a függőleges és vízszintes gyorsulásokat a frekvencia függvényében a reaktor tartály felső és alsó pozícióiban. A válasz-spektrumok az egész erőmű földrengés elemzéseiből adódnak, és ezeket az OAH hagyja jóvá. Az üzemzavarok esetén a normál üzemi és az üzemzavari terhelések együttes, egyidejű hatásával kell számolni. A számításokból – amelyeket verifikált végeelem kóddal kell elvégezni – kiadódnak az időfüggő feszültségek és deformációk. A számításokból adódó feszültség értékeket, illetve az azokból származtatott értékeket össze kell vetni az adott összetételű fémre vonatkozó, szakítóvizsgálatból származó hőmérséklet-függő szakítószilárdsággal és folyáshatárral (0,2 %-os fajlagos nyúlás), miközben megalapozott, a választott szabványnak (lásd [2,3]) megfelelő biztonsági tényezőket kell alkalmazni. A biztonsági tényezők különbözők a normál üzemre és az üzemzavarra. A szakítószilárdság és a folyáshatár tekintetében a feszültség tenzorból a választott szabvány szerint kell képezni a limitekkel összevetendő egyenértékű („redukált”) feszültségeket. Síklapból álló szerkezeti elem esetén például a membrán és a hajlító-feszültség összege lehet az összehasonlítandó mennyiség, más esetekben a fősíkon ébredő, azokra merőleges és nyíró-feszültségekből kell kiindulni.

A szilárdsági számítások másik célja az olyan maximális deformációk meghatározása, melyek az hűtőcsatornák átömlési keresztmetszeteit csökkentik, és így kedvezőtlen hatásúak a hűthetőség vonatkozásában. Csőtöréses üzemzavar esetén ez a jelenég figyelembe veendő.

A szilárdsági számítást úgy dokumentálják, hogy abból a számítás összes kiinduló adata, a figyelembe vett anyag- és környezeti paraméterek, terhek és terheléskombinációk egyértelműen meghatározottak legyenek. A dokumentáció a számítás menetét olyan részletességgel tartalmazza, hogy abból a számítás reprodukálható legyen, és egyértelműen kiderüljön, hogy a

Új atomerőművi üzemanyag tervezése

komponenst érő hatásokból származó feszültségek a megengedett értékek alatt maradnak a választott szabvány szerint.

A fűtőelem üzemeltetés utáni vizsgálatai a felülvizsgálat lényeges részét képezik, mivel

- a) a tervező ezzel is igazolhatja a normál üzemi követelmények teljesülését, és információ adódik a mégis meghibásodott fűtőelemek számáról, a meghibásodások jellegéről,
- b) a mérési eredmények igazolhatják a fűtőelem-viselkedési modellek feltételezéseit.

Az alábbi vizsgálatok végrehajtása ajánlott:

1. A külső szemrevételezés eredményei alapján megállapítják, hogy léteznek-e mechanikai sérülések és/vagy deformációk, képet kapnak a korróziós viszonyokról, a lerakódások kialakulásáról, idegen tárgyak, hasonló jelenségek előfordulásáról a kazetták és szerkezeti elemei környezetében.
2. A szerkezeti elemek elszíneződése alapján következtetéseket vonnak le az oxidréteg folytonosságáról, vastagságáról.
3. Szemrevételezéssel ellenőrzik a hegesztési varratok állapotát, azok egyenletességét. Ellenőrzik nincsenek-e repedések, szakadások, mély korróziós nyomok.
4. Ellenőrzik nincsenek-e kidörzsölődéstől („fretting”) kopások, melyek a távtartó ráccsal való mechanikai kölcsönhatásból származhattak, illetve idegen tárgytól származó sérülések. (Az utóbbiak alakjuk alapján megkülönböztethetők.)
5. Meghatározzák a pálcák megnyúlását, a burkolat átmérőjének növekedését, csökkenését, a pálcák kihajlását, a köteg elcsavarodását.
6. Metallográfiai vizsgálatokkal ellenőrzik a távtartó rácsok cellái és a hegesztési varratok anyagának állapotát, megvizsgálják vannak-e mikro-repedések a hegesztési varratok környezetében, ellenőrzik a távtartó rácsok korróziójának mértékét.
7. Ellenőrzik a tabletták anyagának tömörségét, repedéseit, fragmentáltságát. Ellenőrzik a porozitás mértékét, a pórusok méretét a középponttól mért távolság függvényében, vizsgálják a szemcseméretet a kiegész függvényében, meghatározzák a rim-réteg kiterjedését.
8. Gamma scanning módszerrel meghatározzák néhány hosszú felezési idejű hasadási termék axiális és tablettán belüli radiális eloszlását, a

Új atomerőművi üzemanyag tervezése

relatív eloszlásokat összevetik a számított eloszlásokkal, ami alapján az esetleges migrációra következtetnek.

9. A nuklidok és a kiégés eloszlását az üzemanyag metszet sugara mentén a fűtőelem pálcá haránt irányú csiszolatainak röntgenszínképes elektronikus szonda módszerével is meghatározzák. Az elektronikus szonda módszer elektronikus nyalábbal az anyagba 1-2 μm mélységben tud behatolni, és nagyrészt azt rögzíti, ha valamilyen elemet talál az üzemanyagmátrixban (szilárd oldatban), nem pedig a pórusban.
10. Az oxidréteg vastagságát örvényáramos módszerrel is mérik.
11. Meghatározzák a hidridizáció mértékét, a hidrid zárványok irányultságát.
12. Kiválasztják a meghibásodott pálcákat ultrahangos vagy vákuumkamrás módszerrel, és a fent felsorolt eljárásokkal ezeket is vizsgálják, valamint lehetőség szerint megpróbálják azonosítani a meghibásodás okát, mechanizmusát.

A köteg egészének mechanikai tervezése, megfelelőségének igazolása egymást kiegészítő számítások és próbabados mérések kombinációjával történik. A vibrációs terhelések hatását legalább egyéves időtartam alatt zajló melegjáratási próbabadon ellenőrzik. A próbabad egy elektromos fűtésű egykörös termohidraulikai hurok, ahol

- a) a víz hőmérséklete a köteg bemenetén és kimenetén,
- b) a víz nyomása a próbabad körében,
- c) a kötegen áthaladó forgalom,
- d) a vízüzemi paraméterek (pH érték, K, Cl, B stb. koncentrációk),
- e) nyomáskülönbség a kötegen

közel azonosak az erőmű normál üzemi megfelelő paramétereivel. Ezeket rendszeresen, napos nagyságrendű időközökben mérésekkel ellenőrzik. Ezen kívül végrehajtják a hidraulikai ellenállás mérését, összevetik a kezdeti értékkel.

A vizsgálatok alapvető célja a vibrációnak leginkább kitett csatlakozások korróziós és mechanikai szilárdságának ellenőrzése. Ebből a szempontból a legfontosabbak a távtartó rácsok és a fűtőelem-burkolat, melyek kopását ellenőrizni kell a távtartó ráccsal kapcsolódó helyeken.

- a) Vizsgálják a köteg elemeinek geometriai méreteinek esetleges változását is, például a távtartó rácsok abroncsai közötti távolságot.
- b) Ellenőrzik a pálcák hermetikusságát is, pl. vákuumkamrás módszerrel.

Új atomerőművi üzemanyag tervezése

- c) A pálcákat kihúzzák a távtartó rácsból, és mérik az ehhez szükséges erőt, illetve ennek változását.
- d) Vizsgálják, hogy előfordulnak-e a pálca felületén vagy a távtartó rácsok elemein kidörzsölődések.
- e) Vizsgálják a rácsok korróziós állapotát, a szerkezeti elemek felületén az összefüggő oxidréteg szilárdságát.

Ugyanilyen, vagy hasonló próbapadon mérik a köteg hidraulikai ellenállását is. Olyan különböző forgalmak mellett mérik a nyomásesést, amelyek Reynolds-számai lefedik az üzemeltetés tartományát, meghatározzák az ellenállási tényezőre vonatkozó korrelációt.

Az üzemzavari védelemnek a köteg mozgó elemeire, valamint a felütközési szerkezetre gyakorolt mechanikai hatását szintén próbapados méréssel ellenőrzik. Ehhez az abszorbenst tartalmazó szerkezeti elem leejtését 100-as nagyságrendben végzik el. Vizsgálják a mozgó elem és a vezető-cső integritását, az ejtési idő megfelelőségét. A felütközéskor létrejövő feszültségeket szilárdsági számítással is ellenőrzik.

A fűtőelemekre vonatkozó dokumentáció tartalmazza az aktivitás-terjedési számítások során felhasználandó kampány-végi zónaleltárakat négy változatban. Egyrészt szükség van az izotóponkénti összes aktivitásra független attól, hogy az izotópok a mátrixban, vagy a résben helyezkednek el, másrészt szükség van a rés-leltárra is. Másrészt a súlyos baleseti számítások (TAK2) medián értékekkel végzett számításához best-estimate zónaleltárra, míg a TA3, TA4 esetek számításaihoz olyan konzervatív zóna leltárra van szükség, ami a számítási bizonytalanságokat és a különböző átrakások és teljesítmény-menetek kampányvégi hatását is figyelembe veszi. A rés-leltár számítása során az üzemzavar következtében létrejövő fragmentáció többletjárulékát is figyelembe kell venni. A rés-leltár számítása során alkalmazott metodikát dokumentálni kell. Tekintettel az inhermetikus fűtőelemekre, azok kezelésére szükség van a pálca konzervatív (nagy kiégés és teljesítmény) leltárára is. A tervezésnek meg kell határoznia, hogy különböző feltételek mellett az egyes izotópok mekkora hányada jut ki a pálcán kívülre, ismertetni kell az erre vonatkozó metodikát.

A tervezési követelmények teljesülésének igazolásához használt összes számítógépes programnak részletes validációs jelentéssel kell rendelkeznie.

6.2.2. A gyártási folyamatot bemutató dokumentumok tartalma

1. A gyártó minőségbiztosítási programja és kézikönyve.

Új atomerőművi üzemanyag tervezése

2. A felhasznált anyagok specifikációja, a felhasználási területre való alkalmasság igazolásával.
3. A gyártás során használt alapanyagok és hegesztőanyagok leírása.
4. Az urán-dioxid por és a tabletták gyártási eljárásának, a szériák azonosítási módjának, a gyártás során alkalmazott fizikai és kémiai vizsgálatoknak és egyéb ellenőrzési eljárásoknak a leírása.
5. Az üzemanyag szerkezeti elemeinek (fűtőelem burkolata, távtartó rács, stb.) gyártási eljárása, a szériák azonosítási módja, anyagi jellemzőkkel szemben támasztott követelmények, ellenőrzési eljárások, az egyes alkatrészek kódszáma, rajzokra és felülvizsgálati tervekre vonatkozó utalások.
6. A szabályozó és biztonságvédelmi szerkezetek anyagaira és az üzemanyag egyéb részeire vonatkozó leírások tartalmazzák az alap- és hegesztőanyagok fajtáját, kódszámát, az alapanyag gyártási eljárását, az alapanyagok azt a formáját, amely a szóban forgó alkatrész gyártásának kiindulópontja, az adott alkatrész gyártási eljárását, beleértve az alakítást, hőkezelést, stb., az anyagi jellemzőket, tesztelési, ellenőrzési eljárásokat.
7. Az alvállalkozó által a gyártónak szállított alapanyag minősítését tartalmazó dokumentum.
8. Az üzemanyagot és a szabályozó és biztonságvédelmi szerkezeteket, illetve a részelemeket ábrázoló rajzok, amelyek legalább a következő információkat tartalmazzák:
 - az elemzésekhez szükséges méretek és formák, valamint a megengedett tűrések,
 - az üzemanyagra vonatkozó adatok, az alkatrész és anyaglistával együtt
 - a csatlakozások típusa, helye és méretei,
 - a hegesztett kötésekre, a hegesztési eljárásra, a hegesztés minőségére vonatkozó előírások.
9. A dokumentáció tartalmazza a minőségellenőrzési programot, vagy egy tételes leírást az egyes minőségellenőrzési lépésekről, illetve az ezek felülvizsgálatára szolgáló helyszíni és egyéb ellenőrzések módjáról.
10. A dokumentáció tartalmazza az üzemanyag és a szabályozó és biztonságvédelmi szerkezetek gyártásának leírását, valamint a gyártás különböző fázisaiban alkalmazott minőségellenőrzési lépéseket.

Új atomerőművi üzemanyag tervezése

6.2.3. A tervezési határértékek betarthatóságát garantáló üzemviteli követelmények

A szállító garantált határértékeket ad meg a gáztömörtelenné vált fűtőelemek számára és meghibásodási módjára vonatkozóan az alábbiak szerint arra az esetre, ha az üzemanyagra vonatkozó normál üzemi korlátokat betartják.

- a) A burkolat gáz-tömörtelenségével járó, mikro-repedésekre vonatkozó üzemviteli határérték összességében, valamint abban az esetben, amikor a tabletta és a hőhordozó közvetlen érintkezése is létrejön.
- b) A burkolat gáz-tömörtelenségével járó, bármilyen meghibásodására vonatkozó üzemviteli határérték összességében, valamint abban az esetben, amikor a tabletta és a hőhordozó közvetlen érintkezése is létrejön.

Az erőmű tervezése biztosítja, hogy a fenti limitek ellenőrzése a jó aktivitásokon keresztül lehetséges legyen. Ennek érdekében a tervező a víztisztítók állapotának függvényében megadja a fenti meghibásodások jelzésének feltételeit a primerköri hűtőközeg jó aktivitásaiban kifejezve is.

A szállító megadja azokat a normál üzemi korlátozásokat, amelyek betartását megkövetelik, annak érdekében, hogy a meghibásodások a fenti határértékek alatt maradjanak:

- a) A fűtőelem pálca és tabletta megengedett maximális kiégései
- b) A pálca megengedett maximális lineáris hőteljesítménye
- c) A pálca megengedett maximális teljesítménye
- d) Manőverezhetőségi jellemzők: a lineáris hőteljesítmény megváltozásának és a változása számának megengedett kombinációi
- e) A hőhordozó megengedett maximális gőztartalma és nyomása
- f) A primerköri hőhordozó előírt vízkémiai határértékei: pH érték, és koncentrációk
- g) A fűtőelem víz alatti tárolásának megengedett időhossza
- h) A megengedett maximális gyorsulás átrakás és szállítás alatt

7. HIVATKOZÁSOK

[1] IAEA Safety Standards Series No. TS-R-1(ST-1, Revised): Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material 1996 Edition (As Amended 2003). Elérhető az IAEA honlapján.

[2] Az atomenergetikai létesítmények berendezéseinek és csővezetékeinek szilárdsági számítási normái, PNAE G-7-002-86, Moszkva, Energoizdat, 1989

[3] ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section III, 2001.