

Nedves és száraz tárolásos fűtőelem-viselkedési modellek és elemzési módszerek fejlesztése

Mohácsi Barnabás¹, Ványi András Szabolcs¹

¹ HUN-REN Energiatudományi Kutatóközpont

1121 Budapest, Konkoly-Thege M. út 29-33.

A kiégett atomerőművi fűtőelemek végleges elhelyezésére hivatott létesítmények megépülésének csúszása miatt a kazetták az eredetileg pár évtizedre tervezett átmeneti nedves és száraz tárolási fázisokban várhatóan jelentősen hosszabb időt fognak tölteni. Emiatt nemzetközi szinten az utóbbi évtizedben megnövekedett hangsúlyt kaptak a kiégett fűtőelemkazetták tárolásával kapcsolatos biztonsági elemzések és a kapcsolódó numerikus modellezési kutatások. A kor igényeinek és a legfrissebb kutatási eredményeknek megfelelően a HUN-REN Energiatudományi Kutatóközpontban is felülvizsgáltuk, módosítottuk és kiegészítettük a releváns fűtőelem-viselkedési modelljeinket. Jelen cikkben bemutatjuk a Kutatóközpontban használt számítási rendszert, és egy nemzetközi fűtőelem-viselkedési benchmark egyik feladatán keresztül demonstráljuk a modelljeink működését.

Bevezetés

Az atomerőművi fűtőelemek jellemzően 3-5 kampányt töltenek a reaktorokban, ezt követően mint kiégett fűtőelem szükséges őket tovább kezelni. Egyes országokban van lehetőség a kazettákban maradt hasadóképes izotópok kinyerésére (reprocessálásra), azonban az atomenergiát használó országok többségében a tervek szerint az átmeneti nedves és/vagy száraz tárolást követően a kazetták végleges mélygeológiai tárolókba kerülnek. A kiégett fűtőelemek kezdetben jelentős maradványhőt termelnek, ezért a kazettákat először a reaktorok mellett kialakított pihentető medencébe helyezik át, ahol aktív hűtés mellett 3-5 évet töltenek. A legtöbb ország esetében a remanenshő csökkenésével a pihentetőmedencéből a kazetták – szárítást követően – száraz tároló egységekbe kerülnek. Ezek kialakítása jellemzően konténeres vagy kamrás, bennük a kazettákat inert atmoszférában, passzív módon hűtik. A reaktor melletti pihentető medencés nedves tárolást egyes országokban (pl.: Svédország, Finnország) további átmeneti nedves tárolás követi a végleges elhelyezésig. Magyarországon a Paksi Atomerőműben használt fűtőelemeket 3-5 évig a reaktorok melletti pihentetőmedencékben hűtik, majd szárítást követően a Kiégett Kazetták Átmeneti Tárolójába (KKÁT) szállítják őket, ahol passzívan hűtött, moduláris, nitrogén atmoszférás, kamrás száraz tárolóba kerülnek a következő évtizedekre.

Az eredeti tervekkel ellentétben jelenleg még sehol sem működik végleges kiégett fűtőelem-tároló. A létesítmények megépítésének és átadásának a késése szükségszerűen megnyújtja az eredetileg pár évtizedre tervezett átmeneti tárolás hosszát. Ez utóbbi tényállás vezetett oda, hogy az elmúlt évtizedben több országban elkezdtek felülvizsgálni és kiegészíteni az átmeneti tárolás engedélyezéséhez, illetve általános elemzésekhez használt kódokat, modelleket és módszertanokat [1–7]. A korszerű numerikus elemzések olyan fűtőelem-viselkedési számításokra épülnek, amelyek figyelembe veszik a pálca előtörténetét is. A szimulációkhoz szükséges továbbá a reaktorfizikai számításokból származó remanenshő idősor, valamint a termohidraulikai számításokból kinyerhető külső hőmérsékleti peremfeltétel. Az

elmúlt évek fejlesztései elsősorban az átmeneti tárolás során érvényes fűtőelem-viselkedési modelleket érintették. A HUN-REN Energiatudományi Kutatóközpontban (EK) felülvizsgáltuk, kibővítettük és kiegészítettük a meglévő számítási rendszerünket. A cikkben áttekintjük a korábban alkalmazott saját fejlesztésű modelleket, bemutatjuk az új, kiegészített számítási rendszer elemeit, illetve a fűtőelem-viselkedési számítási modul gyakorlati alkalmazását egy nemzetközi benchmark feladaton keresztül.

Korábbi AEKI-s modellek és számítások

A paksi KKÁT-t 1997-ben adták át, az Atomenergia Kutatóintézetben (AEKI, az EK elődje) pedig már a 2000-es évek elején rendelkezésre állt egy gyengén csatolt kódrendszer, amellyel a kiégett kazetták fűtőelem-viselkedését tudták számítani konténeres és kamrás elhelyezés esetén is [8]. A normál üzemi előtörténeteket is magukba foglaló fűtőelem-viselkedési számításokat a TRANSURANUS kóddal végezték el, amelyeket helyben egy tárolási körülményekre specifikus burkolat-kúszásmodellel egészítettek ki. A szimulációkhoz szükséges remanenshő inputot valós teljesítménytörténetek felhasználásával a SCALE reaktorfizikai kódrendszer ORIGIN moduljával határozták meg, a tárolási körülmények pontos szimulálásához szükséges külső burkolathőmérsékleti peremfeltételek pedig a specifikusan tárolási körülményekre kifejlesztett COBRA-SFS termohidraulikai szubcsatorna kóddal végzett számításokból származtak.

Jelenlegi AEKI-s kódrendszer, közelmúltbeli fejlesztések

Az előző fejezetben bemutatott kódrendszer elemei az elmúlt két évtizedben egymástól függetlenül jelentős fejlesztéseken mentek keresztül.

Termohidraulikai oldalról a tárolási körülmények közötti peremfeltételek meghatározásához a korábbi tapasztalatokra építve továbbra is a nemzetközi sztenderdnek számító

COBRA-SFS kódot, immáron annak legújabb, 16.0.0 verzióját alkalmazzuk. Normál üzemi körülmények között a fűtőelem-viselkedési kódok alkalmasak a fűtőelem-pálca körüli kényszerített áramlás modellezésére, így alapesetben további termohidraulikai számításokra nincs szükség.

A normál üzemi előtörténetek (teljesítmény, gyorsneutron-fluxus), illetve a kiégett fűtőelemek maradványhőjének számítását a Kutatóközpontban kifejlesztett és alkalmazott nagy pontosságú KARATE és SCALE reaktorfizikai kódrendszerekkel végezzük. A VVER-440-es alkalmazásokra széles körben validált KARATE kódrendszer segítségével tetszőleges paksi fűtőelem-pálca valós előtörténete meghatározható, míg a SCALE ORIGIN moduljával a kapcsolódó izotópleltár és a normál üzemem túli hőfejlődések, aktivitások, dózisteljesítmények számíthatók ki. A szintén a Kutatóközpontban fejlesztett általános célú KIKO3DMG kód és a SCALE ORIGIN moduljának segítségével a fenti mennyiségek tetszőleges reaktortípus, fűtőelem és kampánymenet esetére kiszámíthatók.

Az átmeneti tárolás fűtőelem-viselkedési modellezését jelenleg a nemzetközi szinten is széles körben használt TRANSURANUS kóddal végezzük. A Kutatóközpontban a kóddal kapcsolatosan sok éves fejlesztői és felhasználói tapasztalat halmozódott fel, elsősorban normál üzemi biztonsági elemzések terén. Az általunk jelenleg használt kódverzió (V1M1J23) tartalmaz beépített modelleket Zircaloy-4, E110 és M5 burkolatanyagokra, ráadásul a forráskód birtokában további tetszőleges korreláció beépítésére van lehetőségünk. A TRANSURANUS rendelkezik restart funkcióval, amelynek segítségével automatikusan, felhasználói közbelépés nélkül szimulálható egy pálca normál üzemi és az azt követő tárolási körülmények közötti viselkedése. Az elmúlt két évtized kutatási eredményeit felhasználva számos ponton jelentős módosításokat végeztünk a kódban, hogy az átmeneti tárolás körülményeit az elérhető legnagyobb pontossággal tudja szimulálni. A kiegészített, módosított modelleket az alábbi alfejezetben tárgyaljuk röviden, problémakörönként.

Tárolásos fűtőelem-viselkedési jelenségek és modellek

A fűtőelem-palcát normál üzemi körülmények között magas hőmérséklet és nagy neutronfluxus jellemzi. Átmeneti tárolási körülmények között az üzemanyag hőmérséklete jelentősen alacsonyabb, míg a neutronfluxus elhanyagolható. Ennek megfelelően a két állapotban más és más jelenség lesz domináns, ugyanakkor bizonyos hagyományosan normál üzemi állapotokra illesztett korrelációk tárolási körülmények között nem lesznek érvényesek. Az alábbiakban pontokba szedjük a legfontosabb különbségeket, illetve az alkalmazott megoldásokat.

- A hagyományos normál üzemi korróziós mechanizmusok (burkolatoxidáció, hidrogénfelvétel) nedves és száraz tárolási körülmények között gyakorlatilag elhanyagolhatók. A szimulációkban a normál üzemi modelleket a tárolási szakaszban kikapcsoltuk.
- A normál üzemi kúszásmodellek domináns részét a besugárzásos komponens adja, míg tárolási körülmények között kizárólag termikus kúszás történik. Ennek pontosabb számítására a TRANSURANUS kódba implementáltunk egy új, az E110 ötvözetre vonatkozó ún. Rogozyanov-féle

kúszásmodell [9]. Ez a korreláció egyfelől figyelembe veszi a normál üzemi kúszáselőzményt, másfelől validált besugárzott, majd kizárólag termikus kúszásos esetekre is. A Zircaloy-4 burkolatú fűtőelemek száraztárolásos kúszásának modellezésére a kódba implementáltuk Herranz és Fera kifejezetten tárolási körülményekre fejlesztett modelljét [10, 11].

- Normál üzemi körülmények között a palcában maghasadás révén hasadási gázok keletkeznek, amelyek egyrészt hozzájárulnak az üzemanyag-tabletta duzzadásához, másrészt a pálca gázterébe kiszökve növelik annak belső nyomását. Tárolási körülmények között a hasadási gázok termelődése megszűnik, azonban hosszú távon alfa-bomlások révén nem elhanyagolható mennyiségű héliumgáz fejlődik, amely szintén hozzájárul a tabletta további duzzadásához, illetve a pálca belső nyomásának növekedéséhez. Az előbbi jelenség modellezésére az új kódverzióba implementáltunk egy hélium okozta duzzadási modellt [12], amelyet a számítás tárolási szakaszában aktiválunk a normál üzemi modell helyébe. A keletkező héliumgáz mennyiségének számítására már vannak a TRANSURANUS-ban beépített modellek, de külső reaktorfizikai kiégésszámításokból rendelkezhetünk pontosabb, valamennyi gáz anyagmennyiségét magába foglaló eredményekkel is. A bomlási gázok gázteréhez adódó járulékát [12] alapján, konzervatív módon számoljuk: amíg az üzemanyag-tabletta hőmérséklete meghaladja a 377 °C hőmérsékletet, valamennyi addig képződött bomlási gáz anyagmennyiségét hozzáadjuk a pálca gázteréhez. A tablettából kibocsátásra kerülő hasadási gázok mennyisége a tárolás során elhanyagolható [12].
- A száraz tárolás egyik legfontosabb, a burkolat épségét veszélyeztető mechanizmusa a hidrid-reorientáció. A normál üzem során a cirkóniumötvözetek által felvett hidrogén nagyrészt tangenciális irányultságú hidridek formájában van jelen, ami nem rontja jelentősen az anyag mechanikai tulajdonságait. Azonban a nedves tárolási időszakot követő vákuumszáritási eljárás során a megemelkedett hőmérséklet hatására ezen hidridek egy része visszaoldódik a fémrácsba. A későbbi lassú hűlés során a burkolatban ébredő, belső gáznyomás által dominált kerületi feszültség hatására a kiváló hidridek radiális orientációt vehetnek fel. A radiális hidridek elősegíthetik a burkolat átrepedését, ridegebbé tehetik a burkolatot, növelik a ridegképlekeny átmeneti hőmérsékletet, és ezáltal megnövelik a késleltetett hidrides repedés (Delayed Hydride Cracking, DHC) kockázatát. A folyamat értékelésére a Desquines és munkatársai [13], valamint Fera és munkatársai [14] által kidolgozott empirikus küszöbmodellt alkalmaztuk. A módszertant a TRANSURANUS eredményeire épülő, utófeldolgozó modulként implementáltuk. A segédprogram a kód által számított lokális hőmérséklet és teljes hidrogéntartalom alapján meghatározza a visszaoldódó hidrogén mennyiségét (Terminal Solid Solubility for Dissolution, TSSD), majd az aktuális feszültséget összeveti a radiális kiválás megindulásához tartozó, illetve a teljes radiális reorientációt okozó kerületi feszültségküszöbökkel. A kiértékelés eredményeként megkapható a száraz tárolás során keletkező radiális hidridek aránya, lehetővé téve a burkolat degradációjának konzervatív becslését. A becslés konzervativizmusát egyfelől az adja, hogy a szerzők az algoritmusba a feszültségküszöbök

számításakor beépítettek egy 20 MPa-os biztonsági tartálékot a mérési bizonytalanság miatt, így a modell a valós fizikai határértéknél hamarabb, már alacsonyabb terhelésnél is jelzi a radiális hidridek megjelenését. Másfelől a modell a tárolás során fellépő maximális kerületi feszültséget rendeli hozzá a teljes visszaoldott hidrogénmennyiség kicsepódásához. Ezzel azt a legkedvezőtlenebb esetet feltételezi, mintha a maximális feszültség a teljes hűlési fázis alatt, az összes oldott hidrogén kiválásáig folyamatosan jelen lenne, így jelentősen felülbecsüli a radiális orientációt felvevő hidridek tényleges arányát.

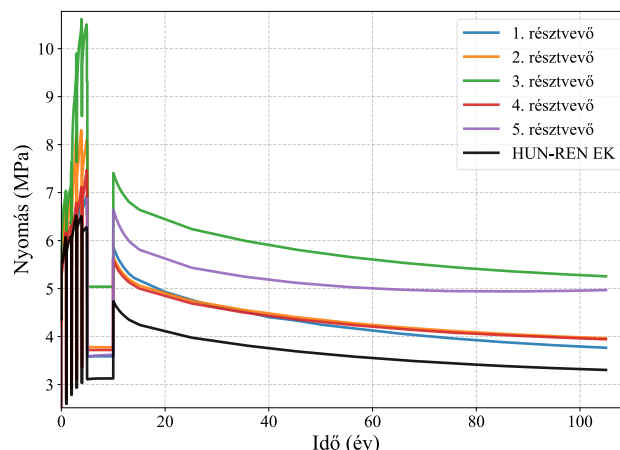
GRS benchmark

A fűtőelem-viselkedési kódok tárolási körülményekre történő kiterjesztésének és összehasonlításának céljából a 2019-es Safety of Extended Dry Storage workshop keretei között a német GRS egy nemzetközi benchmark kitűzését javasolta [15]. Az összeállított specifikáció egy egyszerűsített, de realiztikus 18×18-as PWR fűtőelemköteg Zircaloy-4, illetve M5 burkolatú pálcáinak teljes életciklusát írja le (5 reaktorkampányt magába foglaló üzemidőt, 5 év pihentetőmedencés nedves tárolást, szárítást, majd 95 év konténeres száraz tárolást; összesen négy pálcát: egy központi, egy sarki pálcát a két-féle burkolattal). A feladathoz hőmérsékleti peremfeltételként a reaktoros szakaszra hűtőközeg belépő hőmérsékletet, tömegáramot, illetve nyomást, míg a tárolási szakaszra COBRA-SFS számításokból származó burkolathőmérsékletet adtak meg. Adott volt továbbá a pálcákhoz tartozó normál üzemi teljesítmény, illetve a kapcsolódó axiális profil, valamint a tárolási szakaszhoz releváns, reaktorfizikai számításokból származó remanenshő idősor. A résztvevőknek (CIEMAT, CNAT, PSI, ÚJV, GRS, Framatome, TÜV NORD) összesen 17 pálcaparamétert kellett kiszámítaniuk (tablettas és burkolathőmérsékletek, sugarak, nyúlások, feszültségek, gáztér-paraméterek, hidrogénhez kapcsolódó mennyiségek). Nem minden résztvevő számított ki minden paramétert, emiatt az alább közölt ábrák nem mindegyike teljes. A benchmark eredményeit 2022-ben publikálták [13]. A HUN-REN EK-ban a feladatot utólagosan 2026 tavaszán végeztük el. Bár a benchmarkban meghirdetett valamennyi pálcát szimulációját sikeresen elvégeztük, jelen cikkben csak a résztvevők által legszélesebb körben számolt, Zircaloy-4 burkolatú központi fűtőelempálcára kapott eredményeinket mutatjuk be.

A benchmark leírását követve a számításainkat a normál üzem szimulálásával kezdtük, majd az öt egyéves kampány után egy restart segítségével álltunk át a tárolási fázisra. A normál üzemi reaktoros szakasz során a TRANSURANUS beépített best-estimate modelljeit használtuk. A tárolási szakasz szimulációjánál a korróziós és hidrogénfelvételi modelleket kikapcsoltuk, valamint aktiváltuk a releváns, előző szakaszban bemutatott új, tárolási körülményekre specifikus modelleket. Az alábbiakban a legfontosabb paraméterek időbeli lefolyását mutatjuk be, összevetve azokat a benchmark jelentésében szereplő más résztvevők eredményeivel, anonimizált módon. A közölt lokális termomechanikai paraméterek (hőmérsékletek, feszültségek, alakváltozások) a pálcák legmelegebb, 22-es számú axiális nódusára vonatkoznak, míg a gázokkal összefüggő eredmények a teljes pálcára értendők.

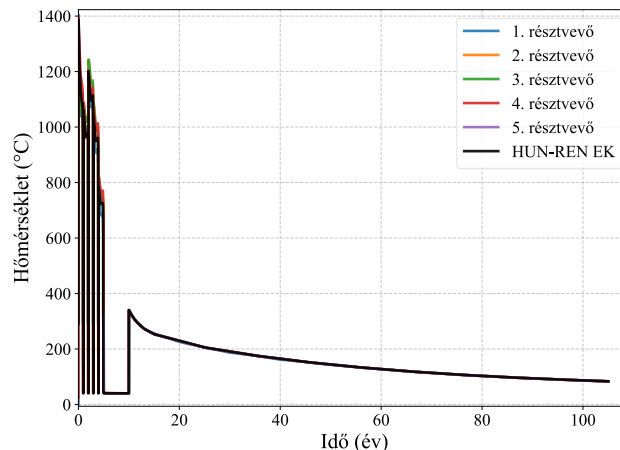
A fűtőelempálcák belső gáznyomása a reaktoros szakasz végére kialakult értékről a szárítási fázis kezdetén ($t = 10$ év) a

megemelkedő hőmérséklet hatására körülbelül 5 MPa-ra ugrik, majd a száraz tárolás 95 éve alatt a lassan csökkenő hőmérséklettel összhangban fokozatosan 3–4 MPa közé mérseklődik (1. ábra).



1. ábra: A pálcák belső nyomása

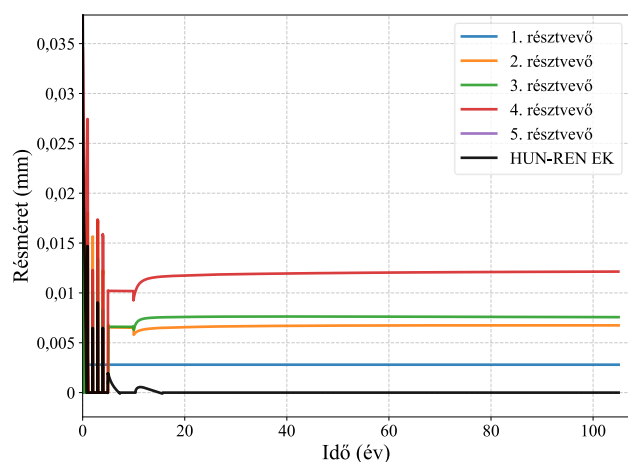
Az általunk számított görbe jellege egyezést mutat a résztvevők többségének a számításaival, azonban a nyomás értéke közel 1 MPa-al alacsonyabb, mint a többi résztvevő intézeté. Az alacsonyabb nyomás elsősorban a többi résztvevőhöz képest számított kisebb hasadásigáz-kibocsátás eredménye. Fontos továbbá kiemelni, hogy a szárítás során az üzemanyag-tabletta a bomlási gázokat se bocsátja ki még a konzervatív 377 °C-os kibocsátási határhőmérséklet alkalmazása mellett sem, ugyanis a tablettát a szárítás alatt is legfeljebb 340 °C-os hőmérsékletet ért el (2. ábra).



2. ábra: Az üzemanyag-tabletta központi hőmérséklete

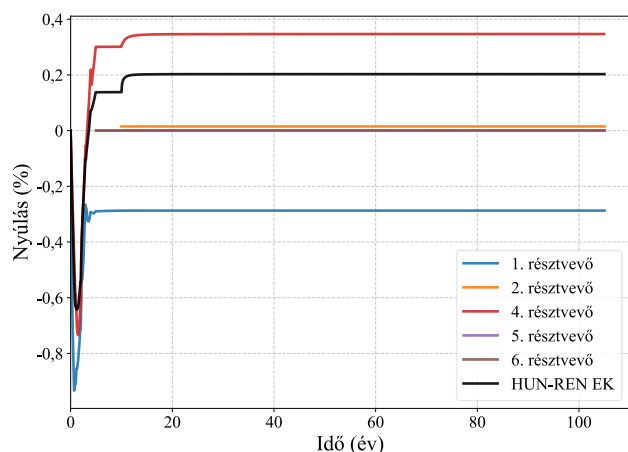
Az előzetes várakozásoknak megfelelően az üzemanyag-tabletta és a burkolat közötti rés a reaktoros kampányok alatt bezárul, a szárítást követően rövid időre kinyílik, majd rövidesen visszazárul, ahogy a burkolat hőmérséklete csökken, illetve a tablettát duzzad (3. ábra). A benchmark többi résztvevőjénél a tárolási szakaszban a rés nyitva marad, ennek legvalószínűbb magyarázata, hogy nem alkalmaztak tablettaduzzadási modellt a tárolás során.

Az előzetes várakozásoknak megfelelően a burkolat a reaktoros kampányok elején befelé kúszik, majd a tablettát-burkolat mechanikai kontaktusát követően a kúszás iránya megfordul. A tárolási szakaszban részben a tablettát további, kis mértékű duzzadása, részben pedig a külsőnél nagyobb



3. ábra: Az üzemanyag-tabletta és a burkolat közötti résméret

belső nyomás hatására a burkolat ismét kifelé kúszik. Az idővel csökkenő ütemű duzzadás, illetve az egyre alacsonyabb pálcakörnyezeti hőmérséklet miatt a kúszás sebessége is csökken (4. ábra).

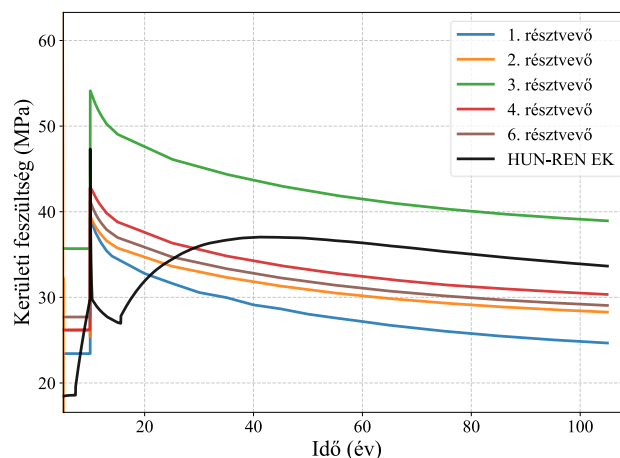


4. ábra: A burkolat kúszásból származó nyúlása

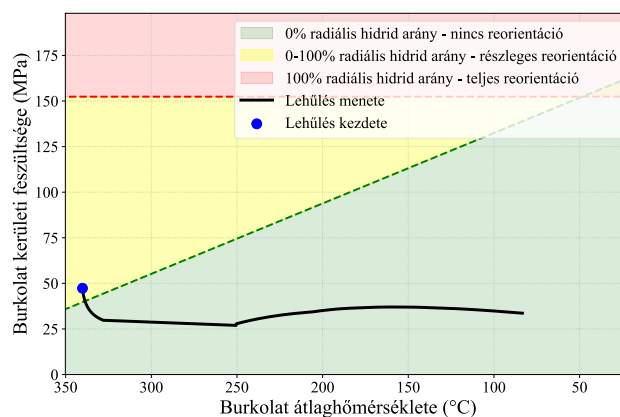
A burkolatban ébredő kerületi feszültség (5. ábra) a szárítási szakasz hőmérséklet-emelkedésekor lokális maximumot ér el (értéke körülbelül 50 MPa), majd az évtizedek előrehaladásával lassan relaxálódik. Fontos kiemelni, hogy az alkalmazott tárolás alatti tabletta-duzzadási modell miatt eleinte a többi résztvevővel ellentétben a mi számításaink szerint emelkedik a feszültség.

A szárítás során a burkolat átlaghőmérsékletének maximuma 340 °C. A termodinamikai TSSD összefüggések alapján ezen a hőmérsékleten a pálcában lévő 209 wppm teljes hidrogéntartalomról megközelítőleg 95 wppm oldódik vissza a cirkónium mátrixban (a többi tangenciális hidrid formájában marad). A lehűlési fázis során a burkolatban ébredő maximális tangenciális feszültség 47 MPa. A Desquines/Feria-féle modell alapján, a 20 MPa-os konzervatív biztonsági sávot is figyelembe véve, a radiális kiválást megindító alsó feszültségküszöb 40 MPa, míg a teljes reorientációhoz tartozó felső küszöb 152 MPa. Mivel a fellépő feszültség átlépi az alsó küszöbértéket, a kód részleges reorientációt jelez: a visszaoldódott 95 wppm hidrogén 7%-a fog a hűlés során a kedvezőtlenebb, radiális irányultságban kiválni. A 6. ábra értelmezésénél fontos megjegyezni, hogy a vízszintes tengely fordított irányítású: a folyamat a bal oldali, kék

ponttal jelölt szárítási csúcshőmérsékletről (lehűlés kezdete) indul, majd a száraz tárolás évtizedei alatti lassú lehűlés során a folyamatot leíró trajektória (fekete folytonos vonal) az ábrán balról jobbra, a csökkenő hőmérsékletek irányába halad.



5. ábra: A burkolatban ébredő kerületi feszültség a tárolás időtartama alatt



6. ábra: A hidrid-reorientáció számított feszültség-hőmérséklet görbéje a száraz tárolás során

A kód konzervatív becslése (7%-os radiális arány) abból adódik, hogy a sárga zónában fellépő 47 MPa-os maximális feszültséget a teljes kiválási folyamatra kiterjeszti. Az ábráról azonban egyértelműen leolvasható, hogy ez a valóságban jelentős felülbecslés. A lehűlés miatt a görbe hamar átlép a zöld zónába (a 40 MPa-os küszöb alá), ahol a további kicsapódás már mind tangenciális hidrid formájában történik. A sárga zónában kivált hidridek orientációja ugyan a továbbiakban már nem változik meg, de a radiális hidridek tényleges aránya a valóságban a becsült 7% alatt marad. Mivel a radiális hidridek még a modell konzervatív felülbecslésével számolva is csak kis mennyiségben (kb. 6,6 wppm) lennének jelen, ez nem tekinthető veszélyesnek a burkolat épségére nézve. A jelenség akkor válik kritikussá, ha a radiálisan orientált hidridek folytonos hálózatot alkotnak, amely egyenes, falvastagságot átérő repedésterjedési útvonalat biztosít a burkolatban. A szabadon elérhető szakirodalomban bemutatott kísérletek [13] rávilágítottak, hogy ha a hidrogén jelentős része (esetünkben több mint 50%-a) nem oldódik vissza a maximális hőmérsékleten, a visszamaradó tangenciális hidridek egyfajta „tégla fal” (brick-wall) struktúrát hoznak létre. Ez a mikroszerkezet eltéríti a repedésterjedést

útvonalát, fizikailag gátolja a radiális hidridek hosszirányú növekedését, és jelentősen növeli a repedésterjedéshez szükséges energiaigényt. Mivel az összes hidrogén több mint 95%-a továbbra is biztonságos kerületi orientációban marad, a kialakuló elszigetelt, rövid radiális hidridek nem képesek a burkolat szerkezeti integritását érdemben rontani, így várhatóan nem fog DHC fellépni.

Kitekintés

A cikkben bemutatott munkát a jövőben három főbb irányban tervezzük folytatni. Elsőként a TRANSURANUS kód HUN-REN EK-ban használt és fejlesztett verzióját tervezzük kiegészíteni a Westinghouse által gyártott és alkalmazott Opt. ZIRLO burkolatra vonatkozó releváns korrelációkkal. Második fejlesztési irányként a cikkben azonosított, elsődleges fontosságú modelleket implementáljuk a Kutatóközpontban fejlesztett és használt FUROM fűtőelem-viselkedési kódba. Végül a jövőben tovább tervezzük

bővíteni a kódok által modellezett jelenségek körét az általunk másodlagos fontosságúnak ítélt folyamatokkal (pl.: hidrogén axiális diffúziója a burkolatban, tárolásra kiterjesztett fáradási számítások).

Összefoglalás

Röviden ismertettük a kiégett fűtőelemek átmeneti tárolásához kapcsolódó fűtőelem-viselkedési elemzések felértékelődésének hátterét. Áttekintettük az AEKI-ben korábban kifejlesztett kódrendszer elemeit, majd bemutattuk a legújabb modellekkel kiegészített, az EK-ban jelenleg is használatos számítási rendszer elemeit. Egy nemzetközi fűtőelemes benchmark feladat szimulálásán keresztül demonstráltuk az újonnan kiegészített fűtőelem-viselkedési modul működését, végül pedig kitekintést adtunk a jövőben tervezett további fejlesztési irányokra.

Irodalomjegyzék

- [1] F. Feria et al.: Spanish R&D in dry storage of spent fuel: Outcomes and outlook, Nuclear Engineering and Design, Volume 416, 2024.
- [2] C. Cozzo, P. Konarski, G. Khvostov, B. Mervin, H. Ferroukhi: Implementation of dry storage models in Falcon: cladding creep, annealing of cladding irradiation damage, and fuel helium-swelling, Progress in Nuclear Energy, Volume 187, 2025.
- [3] F. Rotea, E. Goldberg, M. E. Cazado, A. Soba: Enhancing a fuel performance tool for advanced modeling of spent fuel behavior under storage conditions, Nuclear Engineering and Design, Volume 452, 2026.
- [4] M. Kolesnik, T. Aliev, V. Likhanskii: Modeling of hydrogen behavior in spent fuel claddings during dry storage, Journal of Nuclear Materials, Volume 508, 2018.
- [5] P. A. C. Raynaud, R. E. Einziger: Cladding stress during extended storage of high burnup spent nuclear fuel, Journal of Nuclear Materials, Volume 464, 2015.
- [6] G. Spykman: Dry storage of spent nuclear fuel and high active waste in Germany – Current situation and technical aspects on inventories integrity for a prolonged storage time, Nuclear Engineering and Technology, Volume 50, Issue 2, 2018.
- [7] P. Konarski, C. Cozzo, G. Khvostov, H. Ferroukhi: Spent nuclear fuel in dry storage conditions – current trends in fuel performance modelling, Journal of Nuclear Materials, Volume 555, 2021.
- [8] C. Győri, Z. Hózer: TRANSURANUS simulation of WWER cladding creep under dry storage conditions, IAEA-CN-102, International Conference on Storage of Spent Fuel from Power Reactors, Book of Extended Synopses, 2003.
- [9] A. Ya. Rogozyanov, G. P. Kobylansky, A. A. Nuzhdov: Behavior and Mechanisms of Irradiation – Thermal Creep of Cladding Tubes Made of Zirconium Alloys, Journal of ASTM International, Volume 5, Number 2, 2008.
- [10] L. E. Herranz, F. Feria: Extension of the FRAPCON-3.3 creep model to dry storage conditions, Progress in Nuclear Energy, Volume 52, 2010.
- [11] F. Feria, L. E. Herranz: Creep assessment of Zry-4 clad high burnup fuel under dry storage, Progress in Nuclear Energy, Volume 53, 2011.
- [12] P. A. Raynaud, R. E. Einziger: Cladding stress during extended storage of high burnup spent nuclear fuel, Journal of Nuclear Materials, Volume 464, 2015.
- [13] J. Desquines, D. Drouan, M. Billone, et al.: Influence of temperature and hydrogen content on stress-induced radial hydride precipitation in Zircaloy-4 cladding. Journal of Nuclear materials, Volume 453, 2014.
- [14] F. Feria, C. Aguado, L.E. Herranz: Extension of FRAPCON-xt to hydride radial reorientation in dry storage. Annals of Nuclear Energy, Volume 145, 2020.
- [15] F. Boldt, M. Stuke, M. Péridis: Benchmark on Thermomechanical Fuel Rod Behaviour – Phase I Report. GRS-671, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit gGmbH, 2022.