

áltuk. Két csúcspot figyeltünk meg 4 MeV-nél és 5,3 MeV-nél. Az ^{23}O alapállapotát a neutron $s_{1/2}$ pályával azonosították korábban, ezért a kísérleti, alacsonyabb energiás csúcspot nagy biztonsággal a neutron $d_{3/2}$ pályához köthetjük. Az 5,3 MeV-es csúcs természetéről ugyan nem tudtunk egyértelműen nyilatkozni, de biztosan az $N = 20$ -as héjközön túl található, valamelyik neutronpályához ($f_{7/2}$, $p_{3/2}$) rendelhető. Ez azt jelenti, hogy kialakult egy nagy, körülbelül 4 MeV-es $N = 16$ -os héjköz, míg az $N = 20$ -as 1,3 MeV-esre csökkent, azaz a 20-as szám helyett a stabilitási sávtól távol a 16-ost találtuk mágikusnak. A kísérleti eredmények nem függenek az elméleti számolásoktól, azonban ha összehasonlítást végzünk velük, arra jutunk, hogy létezik olyan héjmodell, melynek jóslatai összevágának a megfigyeléseinkkel. A modell részletes leírása nélkül annyit érdemes megjegyezni róla, hogy olyan mechanizmust nyújt a mágikus számok megváltozására, amely képes mind az extrém neutrontöbbletes, mind pedig a stabilitási sávban elhelyezkedő atommagok tulajdonságainak megmagyarázására, és az izotóptérkép nehezebb tartományára is ad jóslatokat.

Összefoglalás és kitekintés

Az ismertetett kutatások önmagukban, a magszerkezet tanulmányozása szempontjából is érdekesek, hisz segítségükkel jobban megismerhetjük az atommagok felépítését. Azonban szorosan kapcsolódnak Goepert-Mayer kezdeti, az elemek keletkezését boncolga-

tó vizsgálataihoz is, ugyanis az úgynevezett asztrofizikai r-folyamatban (rapid = gyors), amelynek segítségével a nehéz elemek jönnek létre (az s-folyamat és p-folyamat mellett), sok neutrongazdag atommag vesz részt. A mágikus atommagok, mint stabilitási szigetek a környezetükben lévő más izotópokhoz képest, szabályozzák ezt a folyamatot, ezért elhelyezkedésük az izotóptérképen alapvető. Ugyan az r-folyamatban a lényeges szerepet az 50-es és a fölötti mágikusság lehetséges megváltozása játssza, az alacsonyabb tartományban kapott eredmények, ahogy azt láthattuk, olyan elméleti paradigmát nyújthatnak, ami igaz nehezebb atommagoknál is, így a kísérletezők fontos előrejelzéseket kaphatnak.

A RIKEN kutatóintézetben 2007 tavaszán először szolgáltatott ionnyalábot a Radioaktív Ionnyalábgyár (RIBF), amely új korszakot nyit az atommagfizika és alkalmazásai területén. Segítségével a nehéz atommagok tartományában is elérhetjük, vagy megközelíthetjük a neutronelhullatási-vonalat, amelyen túl már az atommagok alapállapota sem kötött, és ha nem is sétálhatunk végig, de legalább néhány lépést tehetünk az r-folyamat által, a neutrongazdag atommagok között vágott ösvényen.

Irodalom

1. Fényes T. in *Atommagfizika* (ed. Fényes T.) Kossuth Egyetemi Kiadó (2005) 227.
2. Macintosh R., Al-Khalili J., Jonson B., Pena T. in *Az atommag. Utazás az anyag szívébe*. Akadémiai Kiadó (2003) 70.
3. Dombrádi Zs.: A héjszerkezet átrendeződése egzotikus atommagokban. *Fizikai Szemle* 57 (2007) 221.

ATOMERŐMŰVEK ÜZEMIDŐ-HOSSZABBÍTÁSA

Trampus Péter
Trampus Mérnökiroda

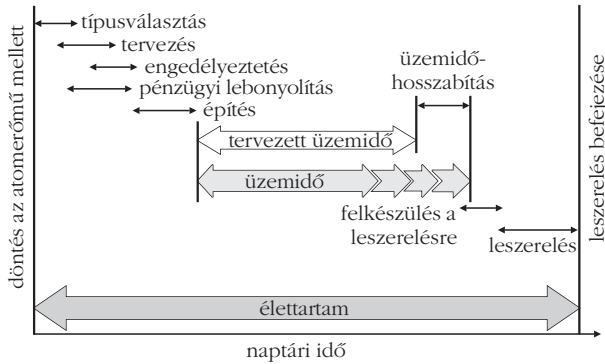
A polgári célú atomerőművek üzembe állításának csúcsidezőszaka a múlt század hetvenes és nyolcvanas éveinek a fordulóján volt, amikor 20–30 atomerőművet helyeztek üzembe évente. Ezt követően az atomerőmű-építkezések üteme jelentősen visszaesett és az elmúlt egymásfél évtizedben a hangsúly az új atomerőművek építéséről a jelenleg üzemelő atomerőművek minél hatékonyabb kihasználására került. Ez utóbbit élettartam-gazdálkodásnak nevezzük. Az élettartam-gazdálkodás elsősorban az üzemidő meghosszabbítását és a teljesítmény növelését jelenti. Gazdasági szempontból mindkét megoldás ígéretes, mivel rövid távon csökkenti az új erőművek építésének igényét.

Élettartam-gazdálkodás alatt – definíciószerűen – az atomerőmű tulajdonosának azokat a tudatos és összehangolt gazdasági és műszaki intézkedéseit értjük, amelyekkel az atomerőmű termelési célkitűzése – a nukleáris biztonság megkövetelt szintjének betartása mellett – teljesíthető; az atomerőmű rendszereinek és berendezéseinek üzemeltetése és karbantartása, illetve üzemideje optimalizálható. Mindezek eredmé-

nyeként az erőmű teljes üzemideje alatti nyereség maximálható [1]. Az atomerőművek élettartam-gazdálkodása a mérnöki tevékenység önálló, multi-diszciplináris területévé fejlődött, amit közgazdasági ismeretek alkalmazása tesz teljessé. A definícióból érzékelhető, hogy az élettartam-gazdálkodás fő hajtóereje a minél nagyobb nyereség elérése. Az eredményes élettartam-gazdálkodás megvalósításának alapvető feltétele az idejében elkezdett, célirányos műszaki-tudományos tevékenység.

Élettartam és üzemidő

Egy atomerőmű élettartama magában foglalja mindazokat az időszakokat, amelyek során az atomerőművel kapcsolatosan pénzügyi kötelezettségek jelentkezték vagy jelentkezni fognak (*1. ábra*). A tervezett üzemidő az atomerőmű minimális üzemideje, aminek meghatározásakor a tervező szabvány szerinti anyagtulajdonságok, feltételezett anyagfolytonossági hiá-



1. ábra. Az élettartam és az üzemidő összefüggése

nyok és a normál üzemtől eltérő, illetve üzemzavari állapotok terhei alapján határozza meg az üzemeltetés feltételeit és korlátait. Az atomerőmű tervezett üzemidejét általában a nem cserélhető berendezések egyikeként élettartam-kimerülése (az előírt biztonsági tartalék elfogyása) jelöli ki. Nyomottvízes atomerőművek esetében (amely a legelterjedtebb atomerőmű-típus, a Pakson üzemelő blokkok is ilyenek) ez a berendezés rendszerint a reaktortartály. Az atomerőművek tervezett üzemideje általában 30 vagy 40 év. Az atomerőművek tényleges üzemelési élettartamát, az üzemidőt, nem határozza meg előre sem a tervező, sem az erőmű tulajdonosa, sem pedig a nukleáris biztonsági hatóság (kivételek alól az Amerikai Egyesült Államok hatósági engedélyezési gyakorlata). Az üzemidőt a tervezett üzemidőnek az üzemelés időszakában történő felülvizsgálata alapján lehet megbecsülni, figyelembe véve a valódi terhelési adatokat és a berendezések tényleges állapotát.

A tényleges üzemidő, megfelelő élettartam-gazdálkodás mellett legalább olyan hosszú vagy hosszabb, mint a tervezett üzemidő. Mivel a teljes élettartamra vetített pénzügyi kötelezettségek ellenértékét, valamint a hasznot az atomerőmű kizárólag az üzemeltetési időszak alatt képes megtermelni, ezért az üzemidő-hosszabbítás gazdasági motiváltságát szükegtelen indokolni. A tényleges üzemidőt a berendezések tényleges élettartam-kimerülésén kívül alapvetően befolyásolhatja az erőmű rendelkezésre állása és biztonsága. A jó rendelkezésre állás a fajlagosan alacsony üzemelési és karbantartási költségek révén jelent előnyt. A biztonság gazdasági hatása abban nyilvánul meg, hogy a reaktorvédelmi működések és egyéb, nem tervezett leállások a termelésekiesésen túl a hatóság magatartását és a közvélemény kockázattűrő hajlandóságát is befolyásolhatják, ami az atomerőmű társadalmi támogatottságának a megingásához vagy elvesztéséhez vezethet.

Az üzemidő-hosszabbítás elterjedésének okai

Az atomerőművek üzemidő-hosszabbításának időszerűségét mutatja a világ atomerőműveinek a koreloszlása (2. ábra) [2]. Az ábra összesen 440 reaktor adatai alapján készült, és ezek közül 226 reaktor idősebb 20

évesnél, ami az összes reaktor 51%-a. Európában a 20 évnél idősebb reaktorok száma 156, az összes itt üzemelő reaktor 76%-a. A 156-ból 109 reaktor üzemel az Európai Unióban a 2004. májusi bővítését megelőzően is tagként szerepelt országokban, 47 reaktor az azóta csatlakozott országokban, illetve Ukrajnában. A koreloszlást elemezve nyilvánvaló az üzemidő-hosszabbítás igényének egyre hangsúlyosabb megjelenése.

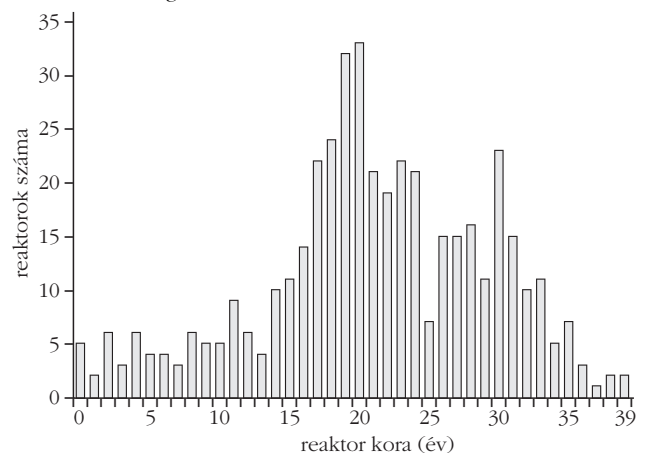
Az üzemelő atomerőművek tervezés során figyelembe vett élettartamon túli üzemeltetésének lehetősége elsősorban az atomerőművek tervezésének konzervativizmusából következik. A konzervativizmus lebontásához jelentősen hozzájárult a tudomány elmúlt évtizedekben bekövetkezett fejlődése. A következőkben az üzemidő-hosszabbítás elterjedésének okait foglaljuk össze.

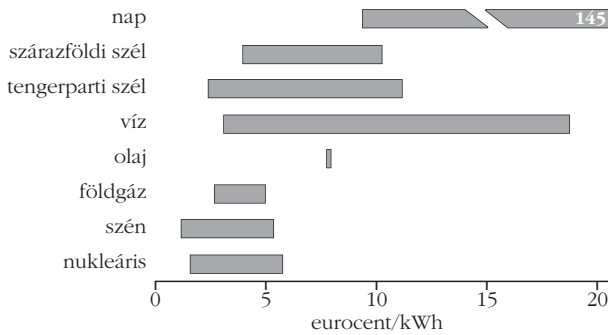
Fenntartható energiaszolgáltatás

Az energia a gazdaság hajtóereje, valamint az emberi élet minőségének egyik meghatározója. A villamos energia iránti igény folyamatosan nő, aminek oka a Föld lakosságának és a fejlődő országok életszínvonalának a növekedése. Az energiaszolgáltatás világméretű rendszerének úgy kell kielégítenie a növekvő igényt, hogy közben egyre több a bizonyíték arra nézve, hogy a fosszilis tüzelőanyagok elégetése hozzájárul a Föld felszínének az üvegházhatású gázok kibocsátása következtében megindult fokozatos felmelegedéséhez. Az energiaszolgáltatás fenntarthatóságának biztosításához figyelembe kell venni a primer energiaforrások rendelkezésre állását is. A „hagyományos” (kimerülő) primer energiaforrások (szén, kőolaj, földgáz, urán) tartalékai nem korlátlanok, de becsült mennyiségük nem kritikus. A megújuló primer energiaforrások (szél, napfény, geotermikus energia) mennyisége korlátlanul is mondható, kihasználásuk azonban – alacsony teljesítménysűrűségük következtében – belátható időn belül kérdéses [3].

A fenntartható energiaszolgáltatás lehetőségei között tehát helyet kell kapnia az atomenergiának, mint annak a jelenleg is alkalmazott primer energiaforrásnak, amely-

2. ábra. A világ reaktorainak koreloszlása (2004. december) [2]





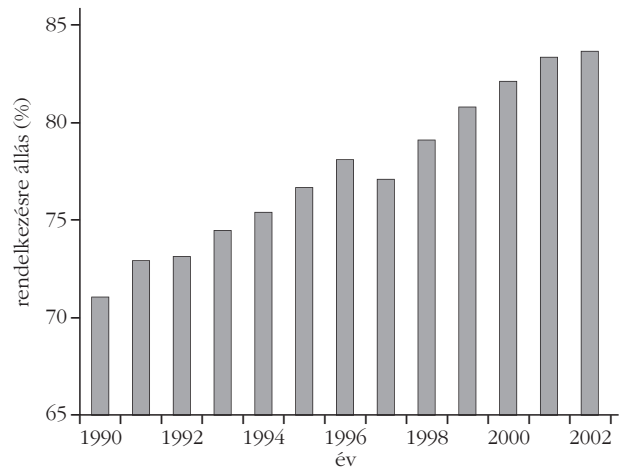
3. ábra. Különböző új erőművek fajlagos létesítési költségei [5]

nek felhasználása *nem jár üvegházhatású gázok kibocsátásával*. Ez jelentős motiváló szerepet játszik az üzemidő-hosszabbítás térnyerésében is. Meg kell jegyezni, hogy az atomerőműveknek a jövőben nemcsak a villamosenergia-termelésben lesz szerepük, hanem a hidrogén-előállítási folyamat egyik potenciális primer energiaforrásként is szóba jönnek [4].

Az atomerőművek gazdaságossága

Az atomerőművek létesítési költsége magas a későbbi üzemeltetéshez viszonyítva, ezért a megfelelően üzemelő atomerőművek hosszú távú üzemeltetése folyamatos garanciát jelent a nyereségességre. Az új atomerőművek gazdaságossága azonban több tényezőtől függ, például a megújuló energiaforrások rendelkezésre állásától, az energiaigény növekedésének a sebességétől, a villamosenergia-piac szerkezetétől, a befektetési környezettől. A 3. ábra új erőművek fajlagos létesítési költségét mutatja be nyolc különböző tüzelőanyag-bázison [5]. Az ábra nem veszi figyelembe az externális költségeket (az emberi egészséggel, a környezet károsításával, a társadalom életkörülményeiben, szociális viszonyaiban bekövetkező károkkal kapcsolatos költségeket). Jó tudni azonban, hogy a teljes technológiai láncra vetítve, a szénbázisú villamosenergia-termelés becsült externális költsége 1,5–14,0 eurocent/kWh, az olaj bázisúé 0,4–7,0 eurocent/kWh, a földgázé 0,4–4,5 eurocent/kWh, míg az atomerőműben megtermelt villamos energia esetében az externális költség 0,007–1,0 eurocent/kWh értéket vesz fel [6]. Előrejelzések szerint néhány éven belül a széndioxidkibocsátás-kereskedelem is jelentős hatással lehet a villamos energia árára, ami a kibocsátásért felelős erőművek termelési árainak emelkedése miatt növelni fogja az atomerőművek versenyképességét [7].

A villamosenergia-piac elmúlt évtizedekben bekövetkezett liberalizálása, valamint az iparág privatizációja olyan környezetet hozott létre, amelyben versenyhelyzet alakult ki az egyes erőművek, illetve energia-átalakító technológiák között. Ez a verseny rákényszerítette az atomerőművek tulajdonosait és üzemeltetőit termelési és gazdasági mutatóik folyamatos javítására. A 4. ábra a világ atomerőművei rendelkezésre állásának alakulását mutatja az elmúlt másfél évtized folyamán [5]. Ugyanez a javuló tendencia el-



4. ábra. Az atomerőművek rendelkezésre állásának növekedése [5]

mondható az atomerőművek biztonsági mutatóiról is.

Az atomerőművek létesítésének és üzemeltetésének gazdaságossági szempontjait elemezve elmondható, hogy az üzemelő atomerőművek jelenlegi és közeljövőben várható gazdaságosságát több – esetenként egymással ellentétes hatású – tényező határozza meg. Általánosságban azonban megállapítható az *üzemelő atomerőművek jelenlegi és jövőbeni felértékelődése*.

A jövő atomerőművei belépésének várható időpontja

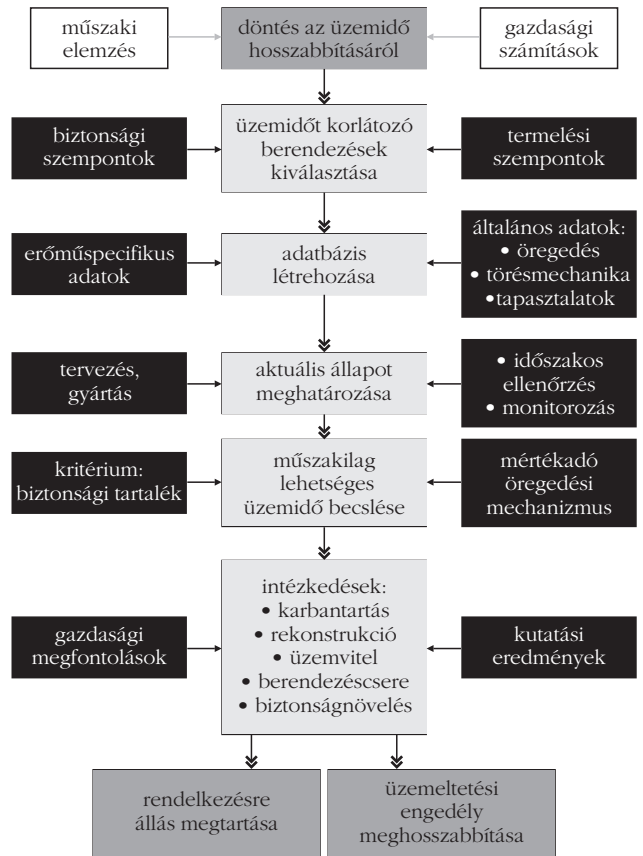
A ma üzemelő atomerőművek legfőbb technológiai sajátosságai már az 1960-as évekre kialakultak. A bekövetkezett fejlődés – a technológia alapelveinek gyakorlatilag változatlanul hagyása mellett – elsősorban a technikai újítások bevezetésében és az üzemelés során összegyűlt tapasztalatok felhasználásában merült ki. A nukleáris technológia forradalmi fejlődését azoktól az átfogó nemzetközi programoktól várhatjuk, amelyek célja a „jövő atomerőműveinek”, azaz az atomerőművek negyedik generációjának kifejlesztése [8]. A jövő atomerőművei létrehozását célzó átfogó programok végrehajtása során követelményként jelennek meg mindazok a szempontok, amelyek ma hozzájárulnak az atomerőművek ellentmondásos megítéléséhez. Ilyenek például a villamos energia árának versenyképessége, az alacsony pénzügyi kockázat, a biztonság igazolása a közvélemény előtt, a radioaktív hulladék mennyiségének csökkentése, valamint a fűtőelemciklus érzéketlensége katonai célú felhasználásra. Igazi áttörésre e projektek eredményeképpen azonban csak évtizedek múlva lehet számítani.

Az előzőek tükrében belátható, hogy az atomerőművek alkalmazása továbbra sem nélkülözhető a villamosenergia-termelésben. Figyelembe véve azt, hogy a negyedik generációs atomerőművekre még néhány évtizedet várni kell, az atomerőművek élettartam-gazdálkodása – és különösképpen üzemidő-hosszabbítása – a fejlődés törvényszerű fokozatának tekinthető. *Az atomerőművek üzemidő-hosszabbítása hidat képez a huszadik század és a huszonegyedik század nukleáris technológiája között.*

Az üzemidő-hosszabbítás folyamata

Az élettartam-gazdálkodásnak a bevezetésben idézett definíciója lehetőséget nyújt egymástól eltérő gyakorlati megvalósításokra. Az egyes országok által járt utak milyenségét több tényező együttesen határozza meg, mint például a műszaki vagy biztonsági szempontok, az adott ország energiapolitikája, de nem kisebb súllyal esik latba a lakossági elfogadás szempontja. Egy adott országon belül eltérő viszonya lehet az üzemidő-hosszabbításhoz a folyamat szereplőinek, nevezetesen az atomerőmű tulajdonosának és üzemeltetőjének, az atomerőmű vagy főberendezési szállítójának, a hatóságnak, illetve a műszaki-tudományos háttér intézményeinek. Az eredményes üzemidő-hosszabbítás alapvető feltétele azonban bármely országban az atomerőmű(vek) kifogástalan üzemeltetése és karbantartása, a nemzetközi tapasztalatok figyelembe vétele, a biztonság és költséghatékonyság folyamatos növelése, valamint a felkészültség nagyleptékű rekonstrukciók végrehajtására és az öregedési mechanizmusok kutatási eredményeinek az alkalmazására [9]. Az atomerőművek üzemidő-hosszabbítása fő folyamatának egy lehetséges változatát mutatja be az 5. ábra.

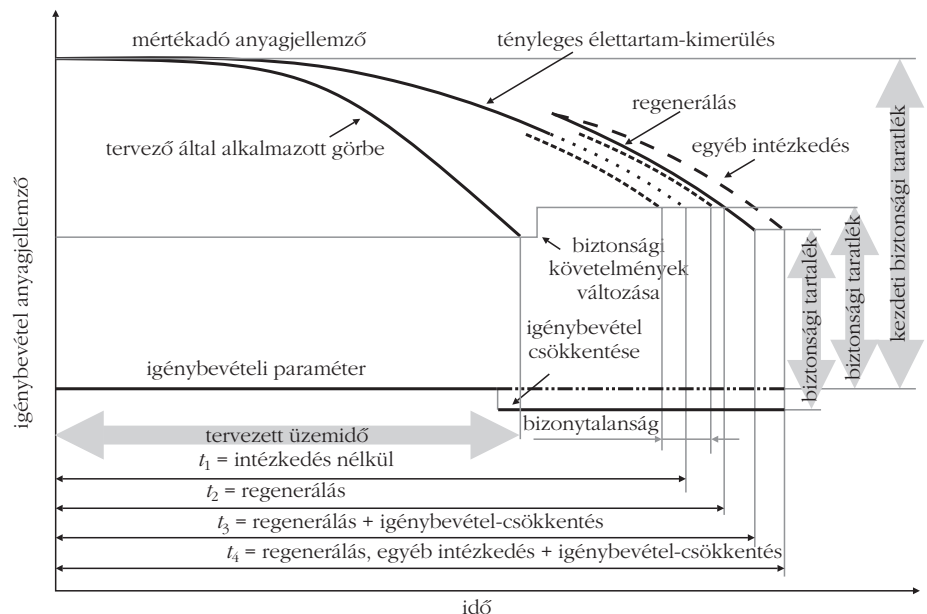
A folyamat az üzemidő-hosszabbításról hozott döntéssel kezdődik. A döntést előzetes műszaki elemzéseknek és részletes gazdasági számításoknak kell megalapozniuk. Ezek az elemzések jelölik ki az erőmű optimálisan megcélozható üzemidejét. A döntést követi az üzemidő szempontjából kritikus (az üzemidőt korlátozó) berendezések, rendszerek kiválasztása. A kiválasztás legfontosabb szempontja a biztonság. Tapasztalatok alapján e berendezések a fővízkör nyomáshatároló berendezései közül kerülnek ki (reaktortartály, gőzfejlesztő). Kiemelt figyelmet kell szentelni a reaktor leállításához és leállított állapotban tartásához, illetve az esetleges súlyos üzemzavar következményeinek megakadályozásához, a radioaktív kibocsátás elkerüléséhez vagy mérsékléséhez szükséges berendezések szerkezeti és funkcionális integritása biztosításának is (pl. a villamos kábeleknél, a motoros működtetésű szelepeknek, a konténment szerkezetének és egyéb berendezéseknek). A kiválasztott berendezések esetében részletes adatbázist hoznak létre és meghatározzák a berendezések tényleges állapotát. Mindezek alapján elvégezhető a berendezések műszakilag lehetséges üzemidejének becslése, majd a szükséges intézkedések megfogalmazása és bevezetése. Az 5. ábra azt is bemutatja, hogy az üzemidő-hosszabbítás egyes lépéseire milyen információk szükségesek.



5. ábra. Üzemidő-hosszabbítás általános folyamata

A teljes folyamatért az atomerőmű tulajdonosa, illetve üzemeltetője a felelős. A nukleáris biztonsági hatóság feladata a megfelelő szabályok megalkotása a tervezési élettartamon túli üzemeltetés engedélyezéséhez, a biztonság igazolásának értékelése és – ezek alapján – a döntéshozatal a használati engedély kiadásáról a tervezett üzemidőn túli üzemeltetés időszakára.

6. ábra. Az üzemidő-hosszabbítás összefüggései



Az üzemidő-hosszabbítás eszközei

A 6. ábra a kritikus berendezés üzemidejének alakulásával kapcsolatos összefüggéseket mutatja be. A vízszintes koordinátán a naptári idő (élettartam, üzemidő), a függőleges koordinátán az adott berendezés állapotát leíró paraméterek (mértékadó anyagjellemző, igénybevétel) található. Látható, hogy a kezdeti biztonsági tartalék az üzemidő előrehaladásával folyamatosan csökken, aminek oka a berendezés szerkezeti anyagának öregedése (pl. reaktortartály esetében a sugárkárosodás okozta elridegedés és szívósságvesztés). A biztonsági tartalék csökkenésének oka lehet az igénybevételi paraméter növekedése is (pl. a reaktor teljesítményének növelése). Az aktuális biztonsági tartalék nagysága is változhat az üzemelés folyamán (általában a biztonsági követelmények szigorodása eredményeként).

Az igénybevétel, az élettartam-kimerülési folyamat kinetikája és a biztonsági tartalék ismeretében kaphatjuk meg a tervezett és a tényleges üzemidőt. Az ábra példaként négy üzemidő-változatot tüntet fel ($t_1 - t_4$). Az ábrából kiolvashatók az üzemidő-hosszabbítás elvi és gyakorlati lehetőségei, amelyek alapvetően az 5. ábrán bemutatott folyamat „műszakilag lehetséges üzemidő becslése” és „intézkedések” lépéseinek tartalommal való kitöltését jelentik. Ezek a következők:

A berendezések igénybevételének csökkentése

Ugyanaz a biztonsági tartalék hosszabb üzemidőt eredményez, ha a berendezés üzemi terhelésből adódó igénybevételét csökkentjük. A mechanikai igénybevétel (feszültség) csökkenthető a berendezés megfelelő részének átalakításával. Az ismétlődő igénybevétel csökkenthető megfelelő üzemmenet tartásával, ami elsősorban a terhelésváltoztatások, a leállások és újraindítások – általánosságban a kisciklusú fáradáshoz hozzájáruló igénybevételi ciklusok – számának csökkentésében nyilvánul meg. A korróziós igénybevétel mérsékelhető célszerűen megválasztott vízkémiai rendszer alkalmazásával. Az igénybevétel csökkentésére a reaktortartály sugárkárosodásnak kitett hengeres része esetében a legkritikusabb igénybevétel, a nyomás alatti hőszokk (*Pressurized Thermal Shock, PTS*) tranziens-paramétereinek enyhítése kínál lehetőséget. A tartályfal belső felületén kialakuló hőszokk értéke az üzemzavari hűtőközeg hőmérsékletének megnövelése útján akár 25%-kal is csökkenthető.

A szerkezeti anyag öregedési folyamatainak lassítása

Az öregedési folyamatok lassításának lehetőségei közül legkézenfekvőbb a reaktor teljesítményének csökkentése (számottevő eredmény érdekében 10–20% csökkentéssel kell számolni), de ennek megvalósítására vonatkozó hivatkozást nem találtunk. Ide sorolandók azok a tervezési módosítások, amelyek célja az igénybevételnek jobban ellenálló anyagminőség vagy az igénybevétellel szembeni ellenállás szempontjából ked-

vezőbb gyártástechnológia alkalmazása. Az eróziós-korróziós anyagelhordásnak kitett, ötvözetlen acélból készült csőszakaszok, csőívek ellenállóbb acélra történő cseréje lassítja azok elhasználódását. A korróziós károsodási folyamat lassítása céljából cserélik a turbina-kondenzátorok hűtőadó csöveit ellenállóbb anyagminőségűre. A VVER-440 reaktor (Pakson ez a reaktortípus üzemel) belső berendezései közül a közbenső rúd-megfogó fej gyártása során megfelelő metallurgiai kezelés (átolvasztás) bevezetése, valamint a forgácsolással történő alakítás helyett a képlékeny alakítás bevezetése lassította a megfogó fej anyaga szívósságvesztésének folyamatát és csökkentette a fej törésének valószínűségét. A reaktortartályfal sugárterhelése kisebb gyorsneutron-fluxust biztosító speciális zónaelrendezéssel csökkenthető. A tartályfal védelme tovább fokozható árnyékoló fűtőelemkötegeknek az aktív zóna szélső pozícióiba történő helyezésével.

Az öregedési folyamatok felújításokkal vagy teljes berendezéscserékkel is mérsékelhetők. A berendezéscserére a legszemléletesebb példa a gőzfejlesztők cseréje, amit általában a hűtőadó csövek előrehaladott feszültségkorróziós károsodása miatt hajtanak végre. A reaktortartály cseréje nem reális lehetőség, de a sugárkárosodás hatása a jelenleg ismert egyetlen módszerrel, a tartály károsodott tartományának regeneráló hőkezelése útján mérsékelhető (az anyagtulajdonságok és a szívós-rideg állapotra jellemző átmeneti hőmérséklet az eredetihez közeli értékre visszaállítható).

Műszakilag lehetséges üzemidő, a becslés megbízhatóságának növelése

A műszakilag lehetséges üzemidő becsléséhez ismerni kell a berendezések üzemeltetést megelőző és üzemeltetés közbeni állapotát. A berendezések állapotának ellenőrzése történhet folyamatos monitorozással, vagy üzemeltetés közbeni időszakos vizsgálattal. A folyamatos monitorozás során az élettartamot korlátozó berendezések kritikus helyeinek hőmérséklet-, illetve nyomásváltozásait mérik és használják fel az ismétlődő igénybevétel okozta halmozódó károsodás folyamatának követésére. Folyamatos állapotellenőrzésként nyúlásmérő bélyeges feszültség/alakváltozás-mérés, rezgésmérés, akusztikus emisszió mérése is szóba jöhet. Az időszakos ellenőrzés a berendezéseknek, illetve elsősorban azok hegesztési varratainak meghatározott időközönként elvégzett roncsolásmentes vizsgálata.

Az élettartambecslés megbízhatóságára hatással van az alkalmazott számítási modell megbízhatósága, valamint az alkalmazott mérési és számítási eljárások pontossága. Az első tényező a tudományos megismerés elmélyítését igényli, elsősorban a károsodási mechanizmusok terén, míg a második a mérések és számítások bizonytalanságának csökkentése útján járul hozzá az élettartambecslés megbízhatóságának a növeléséhez. Megbízhatóbb modellek kialakításához elengedhetetlen a kutatási eredmények folyamatos figyelemmel kísérése és felhasználása. A mérési és számítási módszerek tökéletesítése terén megemlíthetők a roncsolás-

mentes vizsgálatok megbízhatóságának növelését eredményező tevékenységek (vizsgálatminősítés), valamint a repedést tartalmazó berendezések további üzemeltethetőségének értékelésére szolgáló törésmechanikai számítási eljárások tökéletesítése.

Biztonságnövelő intézkedések

A biztonságnövelő intézkedések elmaradása csökkenti az üzemidőt. Az atomerőmű üzemeltetése időszakában végrehajtott biztonságnövelő intézkedések célja – az üzemi tapasztalatok, az új szempontok alapján elvégzett biztonsági elemzések és a műszaki–tudományos ismeretek bővülése alapján – a biztonság adott korban megkövetelt szintjének biztosítása. Ennek illusztrálására a 6. ábrán a biztonsági tartalékot nem változtatlanként ábrázoltuk az erőmű üzemideje alatt. Az ábra szignifikáns változást mutat, de folyamatos növekedés vagy több diszkrét változás is lehetséges.

Ahhoz, hogy a reaktor üzemét ne kelljen korlátozni a szigorúbbá vált biztonsági követelmények miatt, biztonság-növelő intézkedéseket kell végrehajtani.

Irodalom

1. *Glossary of Nuclear Power Plant Ageing*. OECD/NEA, Paris, 1999.
2. *Nuclear Power Reactors in the World*. Reference Data Series No. 2. International Atomic Energy Agency, Vienna, 2005.
3. Vajda Gy.: *Energiapolitika*. Magyar Tudományos Akadémia, Budapest, 2001.
4. IAEA-TECDOC-1085: *Hydrogen as an Energy Carrier and Its production by Nuclear Power*. International Atomic Energy Agency, Vienna, 1999.
5. *Nuclear Technology Review 2006*. International Atomic Energy Agency, Vienna, 2006.
6. Fazekas A.I.: *Villamosenergia-termelési technológiák jellemzői*. MAFE, Budapest, 2005.
7. Civin V.: A ki nem bocsátott széndioxid, mint áru. *A Magyar Villamos Művek Közleményei 1* (2004) 32–42.
8. Szatmáry Z.: A jövő atomerőművei. *Műszaki Tudomány 11* (2001) 1292–1299.
9. Davies, M. et al: Harmonising national life management approaches. *Nucl. Eng. Intern.* 4 (2003) 12–14.

RADIOAKTÍV HULLADÉKOK FÖLD ALATTI ELHELYEZÉSÉNEK »VIZES« KÉRDÉSEIRŐL

Nagy Zoltán, Buday Gábor
Radioaktív Hulladékokat Kezelő Kft.

A radioaktív hulladékok föld alatti elhelyezése

Egy föld alatti radioaktív hulladék-tároló a radioaktív hulladékokat az emberi és biológiai környezettől elszigetelő természetes és mesterséges gátak rendszeréből épül fel. A természetes gát a tárolót befogadó kőzetből és annak geológiai környezetéből áll. A geológiai környezet főbb elemei a talaj- és rétegvizek (együttesen a felszín alatti vizek), valamint a kőzetalkotó ásványok és a felszín alatti vizek kémiai tulajdonságai által meghatározott geokémiai környezet. A mesterséges gátak rendszerének alkotóelemei a kondicionált hulladékforma, a hulladéksomag, a hulladéksomagot kívülről körülvevő, azt védő csomagolás, a hulladéksomagok közötti réseket kitöltő anyag, valamint a föld alatti tárolótérség fala és az ott elhelyezett hulladéksomagok közti „üres” térrészt kitöltő tömedékanyag.

E természetes és mesterséges gátaknak együtt kell biztosítaniuk, hogy a tárolóban elhelyezett radioaktív hulladéknak az emberi környezetre gyakorolt radiológiai hatása – megfelelően hosszú időn keresztül – a hatóságok által előírt határ alatt maradjon.

Egy föld alatti (geológiai) tárolóban a természeti környezetnek (a természetes gátak) nemcsak azt kell biztosítani, hogy a mesterséges gátak megfelelően „működhessenek”, hanem ezen kívül fel kell tartóztatnia azokat a radionuklidokat, amelyek a mesterséges gátak rendszerén keresztül a bioszféra felé tartanak.

A föld alatti vizek jelentősége

A természeti környezeten belül a föld alatti vizek szerepe azért jelentős, mivel egy föld alatti radioaktív hulladék-tároló rendszerint a talajvízszint alatt helyezkedik el teljes egészében, és a föld alatti vizek által történő szállítódás az a legvalószínűbb természetes mechanizmus, amely segítségével a radionuklidok elérhetik az emberi környezetet. Ezért egy radioaktív hulladék-tároló létesítésével, üzemeltetésével és bezárásával kapcsolatban különösen nagy súlyt kell fektetni a hidrogeológiai környezet megismerésére, megértésére és megfigyelésére.

A hidrológiai körforgás keretében a vizek folyamatosan alakulnak át egyik állapotukból a másikba. A víz eső, ónos eső vagy hó formájában hullik le a földre. A csapadék egy része a tavakba, folyókba és óceánokba hullik, illetve folyik. Ezeket nevezzük felszíni vizeknek. A csapadék másik része beszivárog a talajba.

A talajba beszivárgott víz egy része onnan elpárolog, egy másik részét a növényzet szívja fel és párologtatja el. A párologtatás eredményeként a levegőbe visszakeringező vízből felhők képződnek, amiből eső formájában a víz visszahullik a földre, ezzel zárva a hidrológiai ciklust.

A talajban az elpárolgás és a növényzet által történő elpárologtatás után visszamaradó vizeket nevezzük felszín alatti vizeknek. A felszín alatti vízszint felszíntől mért távolsága területenként változó. Ahhoz, hogy a