
Szatmáry Zoltán

A JÖVŐ ATOMERŐMŰVEI

A 20. század végén 436 erőművi reaktor működött, amelyek a világon termelt villamos teljesítmény 17 %-át adták. Az eddig felhalmozott üzemeltetési tapasztalat közel 10 ezer reaktorév. Ezen belül a könnyűvízzel moderált, kis dúsítású rendszerek 80 %-ot képviselnek. A 17 %-os részesedés elsősorban talán szerénynek tűnik, valójában ez már tekintélyes szám: az atomerőművek által 1999-ben termelt villamos energia megegyezik a világ 1960-as teljes villamos energia-termelésével. Azt is vegyük figyelembe, hogy ennek az új technológiának akkor kellett a villamos energia piacára behatolnia, amikor az 1970-es évek olajválságai miatt jelentősen lelassult az igény növekedésének üteme.

Az atomerőművek további terjedését gátolják a társadalmi elfogadtatás problémái, amelyek csak részben vezethetők vissza a TMI-2 reaktor 1978-as és a csernobili reaktor 1986-os balesetére. Ezekkel a problémákkal, valamint a nukleáris energetika iránti igények várható növekedésével egy másik dolgozatban foglalkozunk.¹ Ezért az alábbiakban az új atomerőművi elképzelések technikai részleteire szorítok.

Az atomerőművek új generációja több szempontból is különbözni fog a meglévő erőművektől. A gyártók három főbb irányban indultak el:

- Az evolúciós erőművek a meglévő típusok továbbfejlesztésének tekinthetők. A konstrukciós célok sok tekintetben a meglévők tagadását jelentik.

- A passzív erőművek a biztonságot a fizika alaptörvényeire (gravitációra, természetes áramlásra, tárolt hőre stb.) alapozzák, így az nem függ egyes biztonsági rendszerek megfelelő működésétől. Ezt inherens biztonságnak is nevezzük.

- Az innovatív reaktorok a biztonságot teljes egészében passzív eszközökkel érik el.² Az innovatív irányzat teljesen szakít az eddigi konstrukciókkal. Némelyik elképzelés imponá-

lóan szellemes. Ez egyben gyengéjük is, hiszen egyelőre valószínűtlen, hogy meg fognak valósulni. Ha nagy számban megindul újabb atomerőművek építése, azok nagy része az előbbi két csoportba fog tartozni.

Nem hisszük, hogy a fejlődés ténylegesen keresztül fog menni ezeken a fázisokon. Ez a csoportosítás az 1990-es évek elején született, és lassan elavul. Érdekes, hogy a fejlődés vissza fog térni az 1950-es évek olyan elképzeléseihez, amik ugyan már akkor is – udvarias, vállveregető módon – *érdekesnek* mondtak, de megvalósulásukat a távoli jövőben várták. A közelmúlt problémái azonban ezeket reális lehetőséggé tették. Az alábbiakban tehát nem a fenti skolasztikus osztályozást, hanem a mai kor problémáit vesszük alapul:

- az atomerőművek gazdasági versenyképessége,
- a környezetre gyakorolt hatásuk,
- az erőművek biztonsága,
- a radioaktív hulladékok mennyisége és minősége,
- hatósági engedélyeztetés,
- a nukleáris fekvérek felszámolása.

A felsorolt problémák természetesen szorosan összefüggnek. Például a hatósági engedélyeztetés döntő hatással van az atomerőművek gazdaságosságára. Mielőtt a részletekbe mennénk, megjegyezzük, hogy az atomenergia hasznosításának nem a felsoroltak a legfontosabb problémái. Hosszú távon sokkal fontosabb a zárt üzemanyagciklus megvalósítása, vagyis a gyors reaktorok és a kiégett üzemanyag reprocesszálásának³ kérdésköre. Bár folynak erőfeszítések ebben az irányban, a helyzet annyira összetett és a társadalmi környezet oly neuralgikus, hogy jobbnak látjuk egy ilyen áttekintés végére hagyni. Mindenesetre jól látszik, hogy a fejlődés ma nem a perspektívikusan fontos irányban halad. Ami ma történik, az csak a társadalmi környezet által provokált, kényszerű kitérőnek tekinthető.

dául a francia nyelvű irodalomban az innovatív reaktorokra a *révolutionnaire* kifejezést használják, amely rímelt az *évolutionnaire* kifejezésre.

³ Újrafeldolgozásának.

¹ Szatmáry Z.: *A nukleáris technika a 21. században*. Magyarország az ezredfordulón. Stratégiai kutatások az MTA-n. Műhelytanulmányok (megjelenés alatt).

² Az újlatin nyelvek irodalma kihasználja az evolúció-revolúció szópárból adódó szójátékot. Így pél-

Gazdaságosság és biztonság

Az atomerőművek gazdaságosságának legnagyobb problémája a magas beruházási költség, amiből következik, hogy nagyon érzékeny a beruházás átfutási idejére. Egyes országokban bonyolult az engedélyezési eljárás, és emiatt jelentősen megnőnek a kamatterhek. Így az atomerőművek mindenütt hátrányban vannak a kombinált gázturbinás erőművekkel szemben, és ez így is marad, anélkül, hogy a mai áron rendelkezésre áll, továbbá nem sikerül az atomerőművek kétségtelen előnyeit érvényre juttatni: a költségekben kis hányad az üzemanyag ára, a nagy egységjelzőművek révén csökkenthető a fajlagos beruházási költségek, végül növelhető az egyes komponensek élettartama.

Mindennek feltétele a szabványosítás, a szerkezet egyszerűsítése, a blokkok teljesítményének növelése, a minőségbiztosítás, a felügyeleti feladatok csökkentése és automatizálása, az üzemanyag kiégetésének a növelése.⁴

Az élettartam növelése révén a már alkalmasnak bizonyult helyszínek jobb kihasználása válik lehetővé. Ennek feltétele olyan moduláris konstrukciók alkalmazása, amelyekben a részberendezések cserélhetőek. A dologhoz tartozik, hogy a korábbi erőművi generáció 30 éves névleges élettartamát 50–60 évre növelik.⁵

A gazdaságosság és a biztonság egymástól elválaszthatatlan és egymásnak ellentmondó követelmények. Az atomerőművek első generációjának a biztonságát az ún. méretezési baleset alapján ítélték meg: elképzelték egy meglehetősen súlyos balesetet, és az erőművekbe ennek kivédésére szolgáló biztonsági berendezéseket építettek. A legelterjedtebb típus, a nyomottvízes erőmű esetében ez a hűtőközeg elvesztésével járó baleset (LOCA⁶). A biztonságot olyan számítógépi programok segítségével elemezték, illetve bizonyították, amelyek a folyamatot konzervatív módon írták le.⁷ Így meglehetősen bonyolult erőművek keletkeztek, amelyekben a

biztonsági berendezések a költségeknek körülbelül a felét (vagy még többet) képviseltek.

A 70-es években jelent meg a biztonság valószínűségi szemlélete: a korábbi, determinisztikusnak tekinthető megközelítés helyett annak a valószínűségét kezdték vizsgálni, hogy az atomerőműben súlyos baleset következzen be. Mivel a baleset legsúlyosabb következménye a környezetnek radioaktív anyaggal való elszennyezése, aminek feltétele az aktív zóna⁸ megolvadása, az utóbbit tekintették súlyos balesetnek. Ilyen következménye lehet például a fent említett méretezési balesetnek is. A valószínűségi megközelítés szerint a konstruktőrnek végig kell vizsgálnia az összes olyan elképzelt eseményláncot, amelyek súlyos balesetre vezethetnek, továbbá egyenként ki kell számítani valószínűségüket. Ezek összege globálisan jellemzi az erőmű biztonságát. Ezen túlmenően az analízis fényt derít az erőmű biztonság szempontjából gyenge pontjaira. Így születtek ki egyenlített biztonságú berendezések, továbbá így lehetett a már működő atomerőművek biztonságát utólag megnövelni. Ezt az eljárást nevezzük valószínűségi biztonsági elemzésnek (PSA⁹), ennek részeként az egyes baleseti eseményláncokat nem konzervatív, hanem realisztikus számítógépi programokkal elemzik.¹⁰

A valószínűségi elemzés, mint módszer, a mai napig a biztonság megítélésének az alapja. Több szintjét szoktuk megkülönböztetni: az első az erőművön belüli események, a második a kibocsátások analízise és így tovább. Az Egyesült Államok a következő célokat tűzte ki:

- Annak a valószínűsége, hogy valaki egy atomerőmű következtében idő előtt meghal, legyen kisebb, mint az összes többi halálok valószínűségének 1‰-e.

⁸ Aktív zóna: a reaktornak az a része, ahol a maghasadások láncreakciója végbemegy.

⁹ Probabilistic Safety Analysis.

¹⁰ Az angolszász irodalomban az ilyeneket *best estimate* programoknak nevezik, amivel magyar szövegekben is lehet találkozni. Tekintve, hogy ez a kifejezés az angolban is számarág, jó lenne a magyarban valami mást, például a fenti kifejezést meghonosítani. Az *estimate* ugyanis egy becslés eredményét jelenti, ami lehet torzított vagy torzítatlan, hatékony, konzisztens stb., de *legjobb* nem. A matematikusok mindig tiltakoztak a kifejezés ellen. Egyébként is, amiről itt szó van, az angolul *estimator*. Érthetően, miért használnak ehelyett mást az amerikaiak.

⁴ Az üzemanyag egységnyi tömegéből kinyert energia növelése.

⁵ Az Egyesült Államokban már hat atomerőmű élettartamának 60 évre való növelését engedélyezték. Továbbiaké várható a következő években.

⁶ LOCA = Loss of Coolant Accident.

⁷ Ha a folyamat tényleges lefolyásától eltértek, akkor a balesetet súlyosabbnak mutatták, vagyis a biztonság irányában voltak torzítva.

• Annak a valószínűségét, hogy valaki rákban hal meg, az atomerőmű az összes többi rákkeltő okból eredő valószínűségnek legfeljebb 1%-ével növelheti meg.

E célok elérése érdekében a következő műszaki feltételeket szabták:

• Az aktív zóna megolvadásának valószínűsége létesítményenként és évenként ne haladja meg a 10^{-4} értéket.

• A nagy valószínűsége, hogy a környezetbe nagymennyiségű radioaktív szennyezés kerül, létesítményenként és évenként ne haladja meg a 10^{-6} értéket.

A 3. pontban szereplő valószínűséget 10^{-6} -ra csökkentik a fejlett reaktorokban. Az Egyesült Államokban már három új típus kapott elvi engedélyt: ABWR¹¹ (General Electric–Toshiba–Hitachi), S80+ (Asea Brown Boveri – Combustion Engineering) és AP600 (Westinghouse). Az első két ABWR-típusú atomerőművi reaktort 1998-ban helyezték üzembe Japánban egyenként 1350 MW villamos teljesítménnyel.

1991 végén öt európai ország (Belgium, Franciaország, Nagy-Britannia, Németország és Spanyolország) új koncepciót kezdett kidolgozni. Később csatlakozott hozzájuk Finnország, Hollandia, Olaszország és Svédország. Egy négykötetes dokumentumot (EUR¹²) tettek le az asztalra. Ennek 3. kötetében szerepel az EPR reaktor koncepciója. Egyesíti magában a német Konvoi és a francia N4 elképzeléseit, valamint további reaktorokét, amelyekre vonatkozóan már 1500 reaktorév tapasztalat gyűlt össze. A koncepció legfontosabb elemei a következők:

• Az épülő nyomott vagy forralóvízes reaktorok egységtelejesítménye 600 MW és 1500 MW közé esik. A koncepció nyitott a passzív biztonsági elemek előtt.

• A reaktor üzemanyaga kevert UO_2 és PuO_2 (MOX). Ezzel csökken az átrakások száma, és megnő a terhelési tényező.¹³

• Az aktív zóna olvadásának a valószínűsége nem haladhatja meg a 10^{-5} értéket évenként és létesítményenként. Radioaktív anyag jelentős kibocsátásával járó baleset hasonló valószínű-

sége legfeljebb 10^{-4} . Az amerikaiától eltérően az európai koncepció nem a kibocsátások okozta lakossági dóziszból, hanem a kibocsátott radioaktivitás értékéből indul ki.

• A dokumentum szabványos elemekből képzelet az atomerőművet, amelyek az európai országok minden olyan telephelyén alkalmazhatók, ahol bizonyos, pontosan meghatározott feltételek kielégülnek. Ezzel egyszerűsödik az építés és az engedélyezés.

• A koncepció rögzíti az egyes komponensek biztonsági tartalékait. Közülük kiemeljük az élettartamot: cserélhető komponensekre 40 év, a nem cserélhetőkre (például a reaktortartályra) pedig 60 év.

• Báziserőművek esetében a villamos energia ára legalább 15 %-kal kisebb, mint a szénerőművek és a kombinált ciklusú erőművek esetében. Kisebbségi tényezők esetében a kWh ára versenyképes marad az egyéb fajta erőművekkel (évi 4500–5500 óra kihasználásig). Ez az ár négy fő összetevőt tartalmaz: beruházás, üzemvitel, üzemanyag és leszerelés.

Harmadik generációs erőművek

A fentiekben említett reaktorokat fejlett vagy harmadik generációs atomerőműveknek nevezzük. Tekintve, hogy a második generációs erőművekhez képest nem tartalmaznak új elemet, a cikk elején idézett osztályozás szerint evolúciós erőműnek minősülnek. A biztonsági rendszerek többsége aktív, vagyis működéséhez szükség van villamos energiára. Mint már volt róla szó, az EPR koncepció alkalmas passzív, vagyis villamos energia nélkül működő komponensek befogadására. Ennek ellenére az EPR is az evolúciós kategóriába sorolható (legalábbis egyelőre). Az alábbi táblázatban összegeztük azoknak a jellemzőknek a számszerű értékét, amelyekről már volt szó. Az utolsó oszlopba felvettük egy olyan berendezés adatait, amelyről csak később lesz szó. Amikor ezek a rendszerek megvalósulnak, elsősorban fokozott biztonságukkal és jelentősen javított gazdasági mutatóikkal fognak kitűnni. Közülük is kiemelendő a rövid építési idő, valamint az élettartam. Mindkettő döntően befolyásolja a létesítéshez szükséges tőke terheit.

¹¹ Advanced Boiling Water Reactor.

¹² European Utility Requirements.

¹³ A vízzel moderált nagy reaktorok esetében ez 0,8 körül van (jó esetben).

	EPR	S80+	ABWR	AP600	SBWR ^(d)	GT-MHR
Vill. telj. (MW)	1450	1345	1356	600	600	~300
Terhelési tényező	0,87	0,9	0,86	0,9	0,9	0,8
Üzemanyag	MOX ^(a)	MOX ^(a)	UO ₂	UO ₂	UO ₂	PuO ₂
Kampányhossz ^(b) (hó)	12–24	18–24	18–24	18–24	18–24	20
A zónaolvadás valószínűsége (/év)	< 10 ⁻⁵	< 10 ⁻⁶	< 10 ⁻⁶	< 5×10 ⁻⁷	< 10 ⁻⁶	Lásd ^(c)
Élettartam (év)	60	60	60	60	60	nincs adat
Építési idő (év)	5	4	4	3	3	nincs adat

^(a) Kevert UO₂ és PuO₂; ^(b) A reaktor két átrakása között eltelt idő;

^(c) A reaktor olvadása kizárható; ^(d) Az ABWR egyszerűsített változata.

Negyedik generációs erőművek

A negyedik generációs vagy innovatív erőművek a fentiekől alapjában eltérő megoldásokat alkalmaznak. A legfontosabb cél az aktív zóna megolvadásának gyakorlatilag lehetetlenné tétele, amit a passzív biztonsági rendszerek általános alkalmazásával érnek el. Mint már említettük, ezek vagy egyáltalán nem, vagy csak alig igényelnek külső energiaforrást. A másik cél az atomfegyverek terjedéséből eredő kockázatnak a minimumra való csökkentése. Ez ugyanis feltétele annak, hogy az atomenergiát olyan országok is alkalmazhassák, amelyek – katonai megfontolásokból – ma ki vannak zárva. Az Egyesült Államok hatóságai szerint a harmadik generációs erőművek nem zárják ki maradéktalanul a hasadóanyag illetéktelenek által való megszerzését. Ebből kiindulva kezdeményezték a közelmúltban a NERI¹⁴ együttműködést, amelyben számos, ún. *kiszóbbállam*¹⁵ is részt vehet: Argentína, Brazília, Dél-Afrika, Franciaország, Japán, Kanada, Korea, Nagy-Britannia, USA. E kilenc ország húsz éven át olyan atomerőmű kifejlesztésén fog együttműködni, amely nagyon gazdaságos, kizárja az atomfegyver terjedését, fokozottan biztonságos, és minimális mennyiségű hulladékot termel. Mire ez valósággá válik, a villamos energia iránti igény világszinten – a várakozások szerint – fokozódni fog, de a fejlesztés eredménye ezt ki tudja majd elégíteni.

A negyedik generációs erőművek némelyike közelebb áll a megvalósuláshoz, mint gondolnánk. Az alábbiakban főleg ilyen példákat fogunk látni.

¹⁴ Nuclear Energy Research Initiative.

¹⁵ Olyan állam, amely vagy már dolgozik atomfegyver kifejlesztésén, vagy képes lenne erre

A magas hőmérsékletű reaktor

A magas hőmérsékletű reaktor (HTR) eredetileg az atomerőműveknek azt a hiányosságát akarta megszüntetni, hogy kicsi a termodinamikai hatásfokuk. Ez nemcsak energetikailag kedvezőtlen, de alkalmatlanná is teszi a reaktort ipari folyamathő előállítására. A probléma gyökere a víz hűtőközeg; a szükséges nagy nyomások miatt nehéz 300–330 °C fölé menni. Ezért próbálkoztak héliummal, amelynek a magas hőmérsékleten kívül egyéb előnyei is vannak: nem aktiválódik, nemesgáz lévén nem okoz korróziót és nem mérgező, közvetlenül működtethető vele egy turbina. A magas hőmérséklet miatt speciális üzemanyagra van szükség: 0,8 mm átmérőjű, többrétegű grafitnal bevont UO₂ szemcsékből áll, ezekből különböző alakú fűtőelemeket lehet préselni. A szemcsék 1600 °C-ig megőrzik tömörségüket. A koncepciót először a németek valósították meg gömb alakú, körülbelül egy teniszlabdával azonos méretű fűtőelemek segítségével. A kísérleti berendezést prototípus (AVR) követte, majd megépült egy 300 MW villamos teljesítményű erőmű is (THTR300), ezt azonban politikai nyomásra bezárták, és már akkor sem lehetne üzembe helyezni, ha akarnánk. Rúd alakú fűtőelemekkel máshol is épültek ilyen rendszerek: Dragon (Nagy-Britannia), Peach-Bottom és Fort St-Vrain (USA). A tapasztalatok beváltották a típushoz fűzött reményeket. A termodinamikai hatásfok értéke 0,48 körül volt.

A részletesebb elemzés kimutatta, hogy ennek a reaktortípusnak a biztonsága kielégíti a negyedik generációs reaktoroktól elvárt követelményeket. A *megszaladással*¹⁶ szemben inhe-
¹⁶ A láncreakció szabályozhatatlanná válása. Ilyen baleset okozta a csemobili katasztrófát.

rens biztonsággal rendelkeznek. A hűtőközeg (hélium) teljes elszökése esetén sem olvad meg az aktív zóna. Ez a tulajdonság a reaktor alakjára vezethető vissza: az átmérőjéhez képest nagy magassága miatt a felület és térfogat aránya sokkal kedvezőbb, mint a többi reaktor esetében, így a hűtés nélkül maradt aktív zóna természetes hűtése önmagában elegendő az olvadás elkerüléséhez. Ez a reaktortípus újabban ismét az érdeklődés homlokterébe került. Négy ország: USA (General Atomics), Oroszország (Minatom), Japán (Fuji Electric) és Franciaország (Framatome) együttműködésében olyan reaktort fejlesztenek ki a meglévő konstrukcióból, amely alkalmas lesz a remélhetőleg rövidesen leszerezendő atomfegyverek plutóniumának elégetésére. Ez a GT-MHR¹⁷. A fegyverekben lévő plutónium energetikai hasznosítása önmagában haszon, de nem ez a dolog fő jelentősége: a világ biztonsága szempontjából ez a legjobb mód az atomfegyverek felszámolására. A teljesség kedvéért megjegyezzük: ebben a reaktorban maga a plutónium nem tűnik el teljesen, viszont megváltozik az izotóp-összetétele: az atomfegyver gyártására alkalmas ²³⁹Pu átalakul fegyvergyártásra alkalmatlan izotópokká. E sorok írója több evolúciós erőműről lemondana, ha ez az egy koncepció megvalósulhatna.

A magas hőmérsékletű reaktorban az urán és plutónium helyett lehet tóriumot is használni, amivel ennek az anyagnak az energiatartalmát is hasznosítani lehet. E reaktortípusnak további alkalmazási lehetőségei is lehetnének (például a vegyiparban). A nukleáris technika körül zajló viták ellentmondásos epizódja, hogy Németországban éppen ezt a típust számolták fel. Nemcsak az a probléma, hogy a német szakértelemnek kimagasló eredménye veszett el, hanem az is, hogy az általános nukleáris biztonság és a környezetvédelem szempontjaira hivatkozva éppen a legbiztonságosabb és a leginkább környezetbarát reaktort iktatták ki. Az antinukleáris mozgalmak jobban tennék, ha abbahagynák a vaktában való csapkodást, és azt az érdeket szolgálnák, amelyet a zászlójukra tűznek. Ellenkező esetben ugyanis azt hihetné az ember, hogy valamilyen rejtett lobbyérdek zsoldjában harcolnak az atomerőművek ellen.

¹⁷ Gas Turbine-Modular Helium Reactor.

A sóolvadék reaktor

Az Egyesült Államokban a 60-as években működött egy reaktor¹⁸, amelyben az urán olvadó só formájában volt jelen. Kedvező reaktorfizikai tulajdonságai miatt kísérleteztek vele. Mivel ezek az előnyei akkor nem keltek különösebb érdeklődést, a koncepciót félretették. Újabban ez is előkerült egy nagyon fontos alkalmazás reményében: felhasználható a nagy aktivitású nukleáris hulladékoknak gyorsan bomló izotópokká való átalakítására. Nem a jelen cikk feladata annak az elemzése, hogy lehetséges-e és helyes-e a nukleáris hulladékokat százezer, esetleg millió évekre biztonságosan elhelyezni valamilyen stabil geológiai képződményben. Az viszont tény, hogy az atomerőművek ellenfelei ezt határozottan ellenzik. Nos, a sóolvadék reaktor a problémát elegánsan megoldja. Van egy másik megoldás is, amellyel a következők részben foglalkozunk.

Egy szokványos reaktor fűtőeleme feloldható a BeF₂ só olvadékában. Az így keletkező olvadékokat alkalmas szivattyúkkal keringetik az aktív zóna és egy kémiai berendezés között. E két egység szerepe a következő:

- Az aktív zóna – mint rendesen – az a térrész, amelyben a láncreakció végbemeget. Itt keletkezik egyrészt hő, amely felhasználható villamos energia termelésére, továbbá az itt uralkodó intenzív neutronsugárzás hatására a hosszú felezési idejű izotópok vagy elhasadnak és hasadási termékek keletkeznek, vagy neutronbefogással rövidebb felezési idejű izotóppá alakulnak át.

- A kémiai berendezés a sóolvadékból kivonja a maradék uránt, a hasadási termékeket és a feldolgozott fűtőelemek burkolatában levő cirkóniumot. Fontos, hogy a plutóniumot és a többi transzurán elemet a berendezés az olvadékban hagyja. A kivont uránt és cirkóniumot reaktorban újra fel lehet használni. A kivont hasadási termékeket vitrifikálás¹⁹ után biztonságba kell helyezni.

Végeredményben tehát az újrahasonosítható anyagok visszakerülnek az üzemanyagciklusba, a transzurán elemek megsemmisülnek, a radioaktív hulladékok pedig olyan anyaggá

¹⁸ Ez volt a Molten Salt Reactor.

¹⁹ A vitrifikálás helyett természetesen más technika is alkalmazható.

alakulnak át, amelyek aktivitása egy-két emberöltő alatt a kiindulásul szolgáló urán aktivitásának a szintjére csökken. Ezzel megvalósul a *szennyező fizet*elve, hiszen az a generáció tünneti el a hulladékokat, amely a termelt villamos energia hasznát élvezte (vagy bármilyen más módon hasznosította az uránt). Ebben az irányban határozott lépések történtek az elmúlt évtizedben. Az oroszok kísérletileg igazolták az egész folyamat megvalósíthatóságát. Jelenleg szerveződik egy nemzetközi együttműködés a műszaki részletek kidolgozására. Az oroszok mellett igen aktívak az EU egyes országai (különösen Franciaország), de jelentős eredményeket értek el a csehek is. Ennek az az oka, hogy mind az EU, mind az OECD „a szennyező fizet” már idézett elvét vallja.

Írható e helyen célunk a világtendenciák tárgyalása, ezen a ponton elkerülhetetlen a hazai helyzetre is kitérni. Nyitva áll a kapu ahhoz, hogy a most szerveződő együttműködésbe mi is bekapcsolódjunk. A magyar felső szervek mindeddig elzárkóztak a hazai kutatók ezirányú törekvései elől. Nagy hiba lenne, ha ez így folyna tovább. A VVER-típusú atomerőművek területén²⁰ az 1970–80-as években intenzív K+F tevékenység folyt nálunk, ami azóta busásan megtértült, jöllehet ezt az erőműtípust nem mi fejlesztettük ki. A Széchenyi-terv például alkalmas keret lehet arra, hogy ezen a területen nálunk is meginduljanak legalább a követő kutatások. Ellenkező esetben komoly többletköltségekkel kell számolni egy-két évtized múlva. (Persze nem nekünk, hanem fiainknak.)

Gyorsítóval hajtott reaktorok

Már 1952-ben jelent meg dolgozat az ún. nukleáris triádról, vagyis a három alapvető nukleáris technika együttes hasznosításáról: hasadási reaktor, részecskegyorsító és fúziós reaktor. Jöllehet az utóbbi még nem valósult meg, az alapul szolgáló magreakciót, a fúziót könnyen elő lehet idézni földi körülmények között is. Ötlet volt bőven, de megvalósításukat mindenki a távoli jövőben képzelte el.

A triád mindegyik tagja neutronokat termel. Neutronokban a legszegényebb a maghasadás, de előnye, hogy sikerült ipari léptékben

megvalósítani. Utána következik a fúzió, amely tömegegységre vonatkoztatva 20-szor több neutronot termel, mint a hasadás²¹. Sokáig a hasadás és a fúzió kombinációja tűnt a legközelebbinek, amely szerint egy hasadó köpeny belsejében levő fúziós berendezés tartósan több energiát képes termelni, mint amennyi üzemből tartásához szükséges. A legtöbb neutron gyorsítóval lehet előállítani, ha néhány 100 MeV energiára gyorsított protonokkal nehézfém (például ólom) targetben spallációs reakciót váltunk ki. Miután az 1980-as évek elején ez technikailag könnyen megvalósíthatóvá vált, felmerült, hogy ha az atomerőművek elhasznált fűtőelemeit (vagyis a nagy aktivitású hulladékot) ilyen eredetű neutronokkal besugározzuk, akkor ezek „megfiatalodnak”, vagyis újra felhasználhatóvá válnak. Sokáig ezt az ötletet sem vették komolyan. Az 1980-as évek második felében Los Alamosban (USA) készítették egy megvalósíthatósági tanulmányt, és ettől kezdve a dolog egyre reményteljesebbnek tűnt, különösen azután, hogy a Nobel-díjas Carlo Rubbia, az MTA tiszteleti tagja éppen nálunk tartott székfoglaló előadásában egy gyorsítóval hajtott szubkritikus reaktor koncepcióját vázolta fel. Számos reaktorfizikai tévedése miatt ez a koncepció nehezen tud utat törni magának, pedig – mint az alábbiakból kitűnik – üdvös lenne.

A gyorsítóval hajtott rendszerek lényege, hogy bennük a reaktor szubkritikus. Ellenkező esetben ugyanis a reaktor külső neutronforrás, vagyis a gyorsító nélkül is működhetne. Nézzük először a Los Alamos-ban kidolgozott elképzelést!²² A gyorsító targetárama körülbelül 10 mA, a termelt neutronok száma néhányszor 10^{16} n/s. A reaktor sokszorozási tényezője 0,95, tehát a reaktor neutronsokszorozása 20-szoros. A kialakuló gyorsneutron-fluxus ($E_n > 0,8$ MeV) néhányszor 10^{13} n/(cm²s), vagyis meglehetősen nagy. Az így adódó térfogati teljesítménysűrűségek körülbelül akkorák, mint egy atomerőműben. (Más nem is lenne elképzelhető.) Ezek a feltételek alkalmasak arra, hogy a hosszú felezési idejű transzuránokat és a hasadási

²¹ Ezen alapul a *neutronbomba*.

²² A koncepció az eredetihez képest gyakran változott, többen is továbbfejlesztették. A közölt néhány szám így legfeljebb tájékoztatásul szolgálhat.

²⁰ Ilyen a paksi atomerőmű is.

termékeket rövidebb felezési idejű izotópokká alakítsák át. A berendezés eközben termelhet 100 MW nagyságrendű teljesítményt is. A Los Alamos-i tanulmány szerint egy ilyen berendezés alkalmas tíz darab, egyenként 1000 MW teljesítményű atomerőmű nagy aktivitású hulladékaiknak a kezelésére. Természetesen az egész koncepció nem választható el az elhasznált üzemanyag reprocessálásától, ugyanis enélkül a sokszorozási tényező kedvezőlenül alacsony értékre csökkenne.

Rubbia elsősorban tórium üzemanyaggal képzelte el berendezését, amelyet energiatermelésre és nem hulladékátalakításra szánt. A reaktor szubkritikus volta miatt megtakaríthatónak vélte a szabályozórudakat, és egy sor hasonló műszaki egyszerűsítést vetett fel. Ilyen rendszert még senki nem látott működésben, nem lehet azonban kétséges, hogy megvalósítható. Rubbiával mindössze annyiban lehet vitatkozni, hogy a műszaki optimum nem feltétlenül ott lesz, ahol ő reméli. Óriási jelentősége lenne azonban, ha Nobel-díjas tekintélye elegendő lenne egy prototípus létrehozására, hiszen ezzel mindjárt ki lehetne próbálni a nagy aktivitású hulladékok átalakítására vonatkozó Los Alamos-i elképzelést is. A tórium jelentősége speciális: mivel rendszáma kettővel kisebb, mint az uráné, a hulladékok sokkal kevesebb transzuránt tartalmaznának, mint a jelenlegi reaktorok hulladékaik.

További atomerőművek

Van még egy atomerőmű-típus, amelyből több tucat működik a világban, mégis különleges biztonsági jellemzői folytán perspektivikusnak minősül. Ez a nehézzvízzel moderált és hűtött, természetes uránnal működő kanadai reaktor, a CANDU. Biztonságos, és gazdasági szempontból is megfelel a negyedik generáció követelményeinek.

Számos elképzelés látott még napvilágot. Közülük kiemeljük a svéd PIUS koncepcióját, amely minden ismert üzemzavarral szemben inherens biztonsággal rendelkezik. A legsúlyosabb üzemzavar esetén is csak egy hét múlva igényel – esetleg – külső beavatkozást. A reaktornak csak egy inaktív makettje létezik, de nincs szó prototípus építéséről.

Gyors reaktorok

Külön említést igényelnek a gyors reaktorok, mert ezek az atomenergia hosszú távú alkalmazásának kulcsai. Mind a második, mind a harmadik generációs atomerőművek termikus reaktorokkal működnek; ezekben kevesebb hasadóanyag termelődik, mint amennyi elfogy. Úgy mondjuk, hogy konverziós tényezőjük 1-nél kisebb.²³ A hasadóanyag szaporítása csak olyan reaktorokban lehetséges, amelyekben nincs moderátor, vagyis a neutronok nem lassulnak le. Ezért nevezzük ezeket gyors reaktoroknak.

Néhány ország kivételével a legtöbb országban az elhasznált fűtőelemeket²⁴ abban az alakban tekintik nagy aktivitású hulladéknak és szándékoznak eltemetni, ahogy a reaktorból kikerülnek. Példátlan pazarlás ez, mivel a „hulladékból” mintegy százszor annyi energiát lehetne még kinyerni, mint amennyit a reaktorban hasznosítottak. Mint fentebb kifejtettük, nem is tartjuk ezt az utat tartósnak járhatósnak. Vannak országok (például Franciaország), ahol az elhasznált fűtőelemeket reprocessálják, és a kivont plutóniumot később visszatáplálják a reaktorba. Így keletkeznek a kevert UO_2/PuO_2 -ből készülő MOX²⁵ fűtőelemek. A plutóniumot akár 5-6-szor is vissza lehet táplálni. Többször már nem tanácsos, mert a plutónium izotópösszetétele annyira „elromlik”, hogy az már biztonsági problémákat vethet fel. Egyelőre ez is spekuláció, mert ilyen tapasztalat még nincs. Mindenesetre így az uránban rejlő energiának néhány százalékát hasznosítani lehet, ami jelentős előrelépés, hiszen mai, reprocessálás nélküli gyakorlat mindössze néhány tized százalékot hasznosít.

Az urán teljes energiataralmát csak gyors reaktorok révén lehet hasznosítani. Itt két probléma merül fel. Egyrészt a gyors reaktor nagyon nehéz technológia, ugyanis ma csak a cseppfolyós nátrium ismert alkalmas hűtőközegként. A kémiaiából tudjuk, hogy, a nátrium nagyon tűzveszélyes. Másrészt a gyors reaktorok üzemanyaga

²³ Egy nehézzvízzel moderált, ²³⁵U-nal működő reaktorban a tórium konverziója 1-nél némileg nagyobb tényezővel történik, de ezt figyelmen kívül hagyjuk, mivel ez kísérletileg meg nem erősített állítás.

²⁴ A reaktorban használt, burkolattal ellátott uránrudakat *fűtőelemeknek* nevezzük.

²⁵ Mixed Oxide.

alkalmassá tehető nukleáris fegyverek gyártására. Mint már volt szó róla, az USA kormányai számára ez súlyos gondot jelent. Carter elnök óta betiltották a gyors reaktorokat és a reprocesszálást, sőt nyomást is gyakorolnak a többi országra, hogy kövessék őket ebben. A franciákon, japánokon és oroszokon kívül mindenki el is fogadta ezt. Jelenleg mindenestre lényegében stagnálnak tekinthetjük a gyors reaktorok fejlesztését.

Mi várható? A jelenlegi helyzet azért alakulhatott ki, mert az atomenergia költségeiben jelenleg kis hányadot képvisel az üzemanyag. Ez nem lesz mindig így. Az 1973-as és 1978-as olajválságok idején az urán ára ugyanúgy megemelkedett, mint az olajé, pedig uránválság nem volt. Amikor az olajlelőhelyek kimerülése érezhető lesz, az atomerőművek is érzékenyebbek lesznek az üzemanyagköltségekre. Ám van egy további szempont is. Ha a nagy aktivitású hulladékok hosszú távú elhelyezésének problémái tovább súlyosbodnak, egyre inkább előtérbe kerülnek a fent említett megoldások. Az ott tárgyalt megoldások komoly versenytársa a gyors reaktor.

Az atomerőművek hulladécai

A fentiekben két innovatív rendszert is ismertettünk a radioaktív hulladékok transzmutációjára.

Nagy reményeket fűzünk ezek megvalósulásához. Ha dolgukat komolyan vennék, a környezetvédőknek is segíteniük kellene ebben, ugyanis így tisztán megvalósulna az, amiért mintegy két évtizede harcolnak. Természetesen ezzel olyan berendezések létrejöttét támogatnák, amelyek negyedik generációs mivoltuk folytán megoldanák a jelenlegi atomerőművek egyéb problémáit is. Abban is reménykedünk, hogy nem a „minél rosszabb, annál jobb” logikáját fogják követni, és nem hagyják unokáikra a hulladékokat.

A néhány közölt számból is nyilvánvaló, hogy a reménybeli transzmutációs berendezések a mai jogi környezetben nem lehetnek működőképesek. Egy transzmutációs berendezés több ország erőműveinek a kiszolgálására alkalmas, vagyis csak regionális együttműködésben valósulhat meg. A legtöbb ország törvényhozása azonban tételesen tiltja, hogy más országok hulladécai az országhatárt átlépjék, illetve ha nem is tiltja, a dolog gyakorlatilag lehetetlen – legalábbis egyelőre. Először a társadalmi környezetnek kell kijózanodnia, és csak ezt követheti a megfelelő jogi szabályozás. A technikusok ebben legfeljebb felvilágosító szerepet vállalhatnak. E cikknek is ez a célja.

