

Miért beszélünk a jövőről

A futurologia nehéz tudomány, hiszen senki sem rendelkezik a jövőbe látás képességével, így minden, jövőre vonatkozó elképzelés publikálása előre vetíti a biztos kudarc árnyékát. Mondhatnánk, hogy nem kell a jövővel foglalkozni, hiszen elég problémát vet fel a jelen is. Mégsem tehetjük ezt, hiszen minden szülő, nagyszülő természetes aggodalommal próbálja kifürkészni gyermeke, unokája jövőjét még akkor is, ha biztos benne, hogy ő annak már nem lesz részese. Gyermekeink, unokáink jövője az egész emberiség jövőjétől is függ, ezért foglalkozni kell olyan kérdésekkel, amelyek ezt jelentősen befolyásolják. Ilyen az energia kérdése is. Lesz-e elegendő energia, és ha lesz, nem fogja-e annak termelése a környezetet elviselhetetlen mértékben károsítani? Az energia jelentős és egyre növekvő hányadát villamos energia formájában állítják elő. A villamos energia termelése sokkal központosítottabb, mint a többi fajta energiáé (fűtés, járművek), így könnyebben áttekinthető. Ezért korlátozzuk vizsgálatainkat a villamos energiára, ám megjegyezzük, hogy a levont következtetések döntő része a teljes energiatermelésre is igaz.

A villamos energia termelésének jelen helyzete

Az elmúlt években az 1. táblázatban összefoglaltak szerint változott a világ villamosenergia-termelése [1]. Amint az a táblázat adataiból látszik, a villamos energia termelése ma is folyamatosan növekszik. Nem is várható a növekedés megállása, hiszen egyrészt az emberiség létszáma is növekszik (a jelenlegi becslések szerint 2050-re kb. 10 milliárdra), másrészt az a mintegy kétmilliárd ember, a jelenlegi népesség harmada, aki ma nem jut villamos energiához, nyilván igényli azt, és ezt az igényt ki kell(ene) elégíteni. A villamosenergia-termelés és az életszínvonal közötti arányosság általánosan nem vitatható, noha néhány kivétel található. A legtöbb nemzetközi tanulmány, például [2, 3] úgy ítéli meg, hogy 2050-re a várhatóan tízmilliárd főből álló emberiség mintegy 50%-kal több energiát igényel majd, mint a mai hatmilliárd.

A 2. táblázat a termelt villamos energia részarányának változását mutatja [1] alapján, felső részében öt földrészen, középső részén négy kiválasztott országban. A táblázat utolsó sorában pedig a növekedési ütemet látjuk a világon. A táblázat adatai sok érdekes tény tartalmaznak:

- a leggyorsabban növekvő földrész Ázsia, a leglassabban növekvő Európa,
- Európa és Észak-Amerika növekedése a világátlag alatt van, de csak Európáé lényeges mértékben,
- Afrika részaránya feltűnően csekély, és ez alig változik,
- Magyarország növekedése nem éri el a világátlagot, és – noha meghaladja az európai átlagot – nem éri el a vele azonos nagyságú európai társáét sem,

- Kínában a növekedés minden elképzelést felülmúló mértékű.

Némi merészséggel az alábbi következtetéseket is levonhatjuk:

- Ázsia részaránya a villamos energiából nemsokára eléri az ott élők létszámának megfelelő mértéket.
- Afrika részaránya a villamos energiából belátható időn belül nem éri el az ott élők létszámának megfelelő mértéket.
- Kína nemsokára meghatározó lesz a villamosenergia-termelésben.
- Európa jelentősége a villamos energia termelésében erősen csökkenni fog.
- Az Egyesült Államok – noha részaránya csökken – még hosszú ideig meghatározó marad a villamosenergia-termelés területén.

Megállapítható tehát, hogy a villamos energia termelésének növekedésével a közeljövőben világszerte számolni kell, továbbá egyes térségekben (elsősorban a Távol-Keleten) jelentős mértékű növekedéssel kell számolni. Jelenti-e ez a környezeti károk egyre fokozódó növekedését?

Az őszinte válasz az, hogy nem tudjuk, de megalapozottan reménykedhetünk abban, hogy ez elkerülhető, ha a villamos energia termelésének módja változik. A környezetbarát változások a fosszilis energiatermelés ma még jelentős (70% feletti) részarányának csökkenésétől várhatóak. E részarány növekvő termelés mellett akkor csökkenhet, ha a többi villamosenergia-termelési mód (atomenergia, megújuló energia felhasználása) jelentősen növekszik. A megújuló energiaforrások részarányának számottevő növekedésére nem lehet számítani, hiszen a hagyományos megújulók (víz, tűzifa) szinte teljes mértékben kiaknázottak, az újak részaránya pedig ma olyan kicsi (egy százalék alatt), hogy annak jelentős növekedése sem érné el a kívánt hatást. Megjegyzendő, hogy a tűzifa ugyan megújuló energiaforrás, de részt vesz a szén-dioxid-termelésben. Javulás rövid távon tehát az atomerőművek részarányának növekedésétől várható. A jelenlegi atomerőművek elfogadottsága azonban nem megfelelő. Többek között ezért merült fel új típusú, úgynevezett negyedik generációs atomerőművek kifejlesztésének szükségessége. Hosszabb távon sokat remélhetünk

Év	Termelt energia (terawattóra)	Termelt energia (%)
1990	11 340	100
1995	12 637	111
2000	14 595	129
2001	14 813	131
2002	15 290	135

2. táblázat

A termelt villamos energia részaránya (minden adat %-ban)

	Részarány 1990-ben	Részarány 2002-ben	Növekedés 1990–2002	Növekedés 2001–2002
Észak-Amerika	32,0	30,0	26,7	1,9
Ázsia	20,8	28,9	88,0	7,0
Afrika	2,7	3,0	47,6	3,1
Európa	38,2	29,7	4,9	1,0
Közép- és Dél-Amerika	4,4	5,2	58,9	3,3
Magyarország	0,24	0,22	26,7	-0,9
Portugália	0,24	0,28	59,6	-1,9
Egyesült Államok	26,8	25,1	26,4	2,7
Kína	5,2	10,3	166,8	11,8
Világ	100	100	34,8	3,2

a ma még nem ismert energiatermelési módoktól, például a magfűzítőtől, amelynek békés energiatermelésre történő felhasználhatósága ma még nem bizonyított.

Az atomerőművek generációi

A világ első, energiát termelő atomreaktora, azaz atomerőműve alig több mint ötven esztendővel ezelőtt kezdte meg működését. Az eltelt fél évszázad alatt, a többi műszaki alkotáshoz hasonlóan, az atomerőművek is jelentősen fejlődtek. Ötven év fejlődése hozott annyi változást, hogy érdemes az atomerőműveket is életkoruk szerint csoportosítani. A generációkra osztás bizonyos mértékig önkényes, ellenben növeli az áttekinthetőséget.

Első generációs atomerőművek

Ide tartoznak az első erőművek, amelyeket az ötvenes és hatvanas években, illetve a hetvenes évek elején helyeztek üzembe. Ezek jelentős része ma már nem üzemel, a maradék pedig élettartama végén jár. Az első generációs erőművek sem jelentettek kimagasló biztonsági kockázatot, de tekintettel arra, hogy ez a generáció még a jelenleginél kevésbé szigorú biztonsági előírások figyelembevételével, a biztonsági kultúra alacsonyabb szintjén épült, az üzemeltetés sok, részben jogos kritikának van kitéve. A ma is üzemelő első generációs erőművek több biztonság-növelő átalakításon estek át.

Második generációs atomerőművek

A második generációs erőművek alkotják a ma üzemelő erőművek döntő többségét. Itt már a tervezés során is szigorúbb biztonsági elveket alkalmaztak, például mindegyiket ellátták olyan nyomásálló burkolattal (*konténmenttel*), amely baleseti helyzetekben megakadályozza a radioaktív anyagok környezetbe jutását. A konténmentek hatékonyságát valós baleseti helyzetben bizonyította az Egyesült Államokban 1979 tavaszán bekövetkezett TMI baleset [4].

A második generációs erőművek az egyre szigorodó előírások folytán több biztonság-növelő átalakításon estek át. A második generációhoz tartoznak a Paksi Atomerőmű blokkjai.

A szakemberek döntő többsége a második generációs erőműveket biztonságosnak ítéli, a közvélemény azonban sok esetben nem osztja ezt a véleményt. Valószínűleg könnyebb lesz egy új generáció biztonságosságát elfogadtatni, mint a meglévő előítéleteket eloszlatni.

Harmadik generációs atomerőművek

Ebbe a generációba tartoznak a fejlett (*advanced*) erőművek. Jelenleg ilyen épül Finnországban (APR 1600 – 1600 MW elektromos teljesítményű fejlett, nyomottvízes reaktor). A rajzasztalonon többféle ilyen erőmű készült, ám szinte semmi sem valósult meg belőlük.

Ezek az erőművek tökéletesebbek a második generáció erőműveinél, mind gazdaságossági (hatásfok), mind biztonsági (fejlett biztonsági kultúra alapján terveztek) tekintetben, de lényegileg (típusok, üzemanyagciklusuk) nem különböznek azoktól.

E generációt jelenleg olyan kevés erőmű képviseli, hogy az Egyesült Államok Energiaügyi Minisztériuma nem tekinti megvalósult generációnak. A harmadik generáció hiánya tulajdonképpen a második generáció dicsérete, hiszen leváltására nem volt szükség.

Negyedik generációs atomerőművek

Ezek a jövő erőművei. Jelenleg még a tervezés szintjén sem léteznek, de létrehozásuk érdekében komoly nemzetközi projekt indult, melyet az Egyesült Államok Energiaügyi Minisztériuma (*Department of Energy*, DOE) kezdeményezett. A projekt célja az atomenergia elfogadtatása. A DOE megítélése szerint erre a harmadik generációs erőművek nem alkalmasak, mert bár műszaki kifogás nem merül fel ellenük, nem jelentenek áttörést azokon a területeken (pl. üzemanyagciklus), ahol áttörés nélkül a további fejlődés nem garantálható. Érdemes megjegyezni, hogy az egész program bevallott célja az is, hogy értelmes, színvonalas kutatómunkával lássa el a kutatókat, és hosszú távon is vonzza a tehetséges fiatalokat a nukleáris szakmába. A tehetséges kutatók megtartása és utánpótlásának biztosítása a ma működő (zömmel második generációs) atomerőművek biztonságának is feltétele. Továbbá a fejlett országok nyilvánvalóan szeretnék elkerülni, hogy a nukleáris szakmát csakis a fejlődő országokban műveljék, ami a jelenlegi tendenciákból következne, hiszen a csekély számú épülő atomerőmű döntő többsége fejlődő országokban épül, és a kutatás súlypontja is oda kezd áthelyeződni.

Milyen lesz a negyedik generáció

Az új típusú atomerőművekkel szemben alapvető követelmény a környezetbarát tulajdonság és a fenntartható fejlődéshez való hozzájárulás. Ez reális cél, hiszen már a

második generáció erőművei is alapvetően környezetbarát jellegűek voltak.

A negyedik generációs atomerőművek létrehozására nemzetközi projekt alakult, GENERATION-IV International Forum (GIF) néven, 2000 januárjában. A programban szinte kezdettől fogva részt vesznek a nukleáris fejlesztésekben jelentős szerepet játszó országok (Argentína, Brazília, Dél-afrikai Köztársaság, Egyesült Államok, Egyesült Királyság, Franciaország, Japán, Kanada, Koreai Köztársaság és Svájc). 2003-ban a projekt két irányban is kibővült: az Európai Unió (az EURATOM) a nemzetközi projekt tagjává vált, továbbá az OECD Nukleáris Energiaügynökség (*Nuclear Energy Agency*, NEA) látja el a nemzetközi program titkársági teendőit. Az EU valamennyi tagországát képviseli, de Franciaországot és az Egyesült Királyságot csak azokban az ügyekben, amelyekben e két tagország közvetlenül nem játszik szerepet a projektben.

A GIF projektben a tanulmányozásra kiválasztott perspektivikus reaktortípusok a következők:

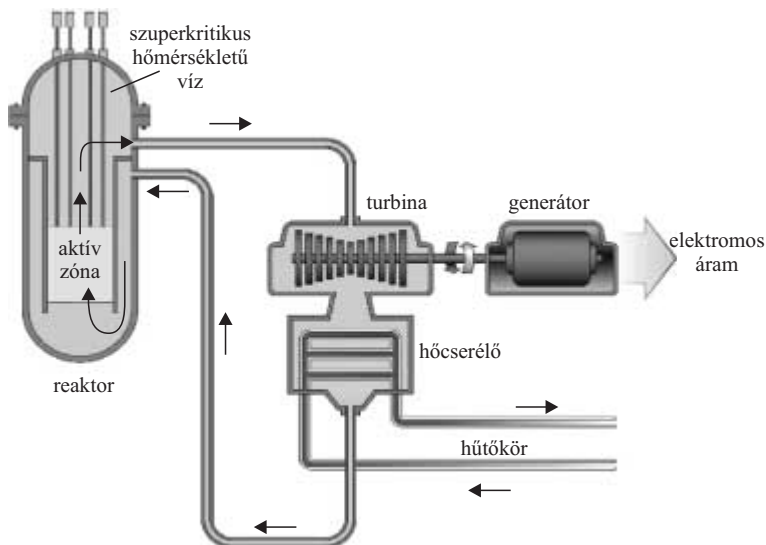
- magas hőmérsékletű gázhűtéses termikus reaktor,
- szuperkritikus hőmérsékleten működő vízű hűtéses termikus reaktor,
- nátriumhűtésű gyorsreaktor,
- gázhűtésű gyorsreaktor,
- ólom–bizmut hűtésű gyorsreaktor,
- olvadátsós reaktor (*molten salt reactor*).

Mint ismeretes, a jelenleg működő reaktorok néhány kivételtől eltekintve termikus reaktorok. Ezek továbbfejlesztése a fent említett első két típus.

A *magas hőmérsékletű gázhűtéses reaktorok* ötlete nem új keletű. Ez nem is meglepő, hiszen a magasabb hőmérséklet jobb termikus hatásfokot jelent. Ilyen reaktorok, prototípus szinten, már működtek Németországban és az Egyesült Királyságban. Sajnos ezek fejlesztése abbamaradt. A negyedik generációs magas hőmérsékletű reaktorokat nagyon magas hőmérsékletű (*very high temperature*) reaktoroknak is nevezik, ezzel is jelezve, hogy a cél a vízbontás hőmérsékletének meghaladása. Ilyen módon ezek a reaktorok a hidrogénenergetika céljait is szolgálnák. Hidrogénenergetikán azokat a módszereket értjük, amelyek során primer energiaforrások kiaknázásával hidrogént állítanak elő, a hidrogént tárolják, szállítják, s végül a benne lévő kémiai energiát felhasználják. Az energiatermelési, -szállítási, -felhasználási módok gyökeres megváltoztatását ígéri a hidrogénenergetika [5].

A *szuperkritikus hőmérsékleten működő vízű hűtéses termikus reaktor* a jelenleg legelterjedtebben tanulmányozott reaktortípus, a nyomottvízes továbbfejlesztése (1. ábra). Erre vonatkozóan intézetünkben is folynak számítások nemzetközi együttműködés keretében.

A következő három típus *gyorsreaktor*. A gyorsreaktorok fejlesztését az Egyesült Államokban annak idején *Jimmy Carter*, az egyetlen nukleáris diplomával rendelkező amerikai elnök szigorú tilalma akadályozta. Világméretben azonban nem sikerült teljesen leállítani,



1. ábra. A szuperkritikus hőmérsékletű reaktor elvi működési sémája

mert prototípusok működtek (Szovjetunió, később Kazahsztán), sőt részben működnek (Franciaország, India) néhány országban. A gyorsreaktorok biztonsága valóban több figyelmet érdemel, mint a termikusoké. Továbbfejlesztésük azonban elengedhetetlen, ha zárni akarjuk az üzemanyagciklust, hiszen az újrafeldolgozás kizárólag termikus reaktorokkal nem oldható meg. Az, hogy három gyorsreaktor is szerepel a hat között, egyrészt e reaktortípus fontosságát jelzi, másrészt viszont azt, hogy ezen a területen ma még nincs elegendő tapasztalat ahhoz, hogy a legjobb megoldást ki lehessen választani.

Az utolsó típus sem előzmények nélküli. Az Egyesült Államokban már működött egy *sóolvadákos reaktor*. Fejlesztése azonban az újrafeldolgozási igények csökkenése folytán abbamaradt. E reaktortípus fejlesztésén egy ideje dolgoznak már Oroszországban is. Az olvadátsós reaktorok – ha a kívánalmaknak megfelelőre sikerül fejleszteni azokat – jelentős szerepet játszhatnak a kiégett üzemanyag legkellemetlenebb alkotóelemeinek (a plutónium és a többi transzurán elem) békés megsemmisítésében. Magyarországon a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Nukleáris Technikai Intézetében folynak kutatások a sóolvadákos reaktorok reaktorfizikai és termohidraulikai viselkedésével, valamint transzmutációra való használhatóságával kapcsolatban.

Valamennyi típusnál szemben alapvető követelmények:

- a gazdaságosság,
- a természeti erőforrások fenntartása,
- a keletkező hulladékok minimalizálása,
- a biztonság és megbízhatóság,
- hadi célra való használhatatlanság.

A gazdaságosság és a természeti erőforrások fenntarthatósága összefügg. A negyedik generációs atomerőművek fejlesztése során már nem a ma általános nyílt üzemanyagciklust veszik alapul, hanem zárt ciklusban gondolkodnak. Ez két alapvető előnnyel jár: egyrészt az uránkincs jobb kihasználására vezet, másrészt megkönnyíti a kiégett fűtőelemek kezelését. A zárt ciklus azt jelenti, hogy a kiégett fűtőelemeket nem tárolják közép és

hosszú távon (rövid távon technológiai okokból szükséges), hanem visszatáplálják az energiatermelő folyamatba. A gazdaságosság csak akkor követeli meg a zárt ciklust, ha az urán ára lényegesen emelkedik, ez azonban hosszú távon mindenképpen várható. A zárt ciklusban a keletkező hulladékok mennyisége csökken, és a katonai felhasználás kizárása is könnyebb. A biztonság és a megbízhatóság már a jelenleg működő atomerőművek esetében is jó, továbbfejlesztése azonban kívánatos, és mai tudásunk szerint lehetséges is.

Felmerül még egy lényeges kérdés: milyen legyen a reaktorok, erőművi blokkok mérete. A blokkméretet eleinte a műszaki lehetőségek határozták meg. Tekintettel arra, hogy a gazdaságosság a blokkmérettel arányosan nő, az idők során egyre nagyobb blokkokat építettek. Így, mint láttuk, a harmadik generációban már 1600 MW villamos teljesítményt is sikerült elérni. Azonban a villamosenergia-hálózat biztonsága szempontjából nem szerencsés túlságosan nagy blokkokat üzemeltetni, mert ilyen esetekben egy-egy blokk kiesése (ami még nagy üzembiztonság esetében sem zárható ki) túlságosan nagy zavart okoz. A kis és a fejletlen országok igénye tehát a relatíve kis teljesítményű (150–300 MW) blokkok üzemeltetése. Ez az igény markánsan megfogalmazódott az EU negyedik generációs atomerőművekkel kapcsolatos álláspontjának kialakításakor. Tehát a negyedik generáció valószínűleg igen különböző blokkméretű (150–2000 MW) erőművekből fog állni.

A GIF-től a negyedik generáció megvalósításáig

A GIF projekt egyelőre a különböző típusokkal kapcsolatos kutatásokra irányul. Később a projekt elmehet egymásik (nem biztos, hogy mind a hat) típus megvalósításáig. Lehet azonban, hogy a reaktorok kifejlesztése már más (nemzeti vagy regionális) keretek között történik.

Az EU eleinte csak négy reaktortípus iránt érdeklődött, ma már mind a hat irányt perspektivikusnak tartja. Érdeklődésének homlokerében a nagyon magas hőmérsékletű reaktorok kutatása áll. Az az EU munkacsoport, amely a negyedik generációs atomerőműveknek a következő (hetedik) keretprogramba való beépítésén dolgozik, és amelynek magam is tagja voltam, javasolta egy program indítását az aktinidák kezelésére, és a nukleáris hidrogéntermelés tanulmányozására is. (Az üzemanyagban az el nem hasadt uránmagok neutronbefogással a legkülönbözőbb aktinidákká alakulnak, ezek között vannak hosszú felezési idejűek is, kezelésük így különös figyelmet érdemel.) Mindkét cél csakis a negyedik generációs erőművekkel érhető el. Az EU nukleáris szakemberei azon vannak, hogy az Unió jelenlegi előnyét kihasználva (itt a villamos energia 35%-át termelik atomerőművek!) legalább ezen a területen ne kerüljön hátrányba nagy versenytársaival szemben (Egyesült Államok, Kína, Japán).

Mi a helyzet Magyarországon? Tekintettel arra, hogy a közeljövőben senki sem tervezi Magyarországon atomerőmű építését, ha épül új erőmű valaha, akkor az felte-

hetően negyedik generációs lesz. Az ezzel kapcsolatos döntés ma még nem aktuális. Az azonban a magyar nukleáris szakemberek felelőssége, hogy ha egykor ez a kedvező döntés megszületik, akkor Magyarország fel legyen készítve az új technológia fogadására. Ezért elemi érdekünk bekapcsolódni a negyedik generációval kapcsolatos kutatásokba. Részvételünk jelenlegi szintje (egy-két részterületen csekély mértékű kutatás) biztosan nem elegendő.

Történeti összefoglalás

A nukleáris technika sajnálatos módon a hadiipar szolgálatában fejlődött ki, és ott ért el kimagasló sikereket a második világháború alatt és közvetlenül utána. A genfi konferenciák (1955 és 1958) után megkezdődött a nukleáris energia békés felhasználása, a nukleáris ipar pacifikálása. Eleinte ez is nagyon sikeres volt. Sorra épültek az egyre jobb atomerőművek, és ennek nyomán ma is több mint 400 erőművi blokk termeli a világ villamos energiájának mintegy 16%-át. A hetvenes évek második felétől a fejlődés lelassult, majd stagnálás következett.

Az atomenergiának sok ellensége támadt világszerte. Sajnos két súlyos baleset (TMI 1979 és Csernobil 1986) is hozzájárult az ellenfelek – amúgy nem mindig megalapozott – érveihez. Az atomerőművek ugyan elterjedtek a világ minden részén, de csak harminc ország energiatermelésében vesznek részt. Az atomenergia fejlesztésében élenjáró országok – mint Norvégia és Dánia – végül is nem építettek atomerőművet, főként az Északi-tengerben talált olajkincs miatt. Az atomenergiát jelentős mértékben használó országok közül ketten (Németország, Svédország) valamennyi atomerőműük leállítását mellett döntöttek, bár hosszú határidőt szabva nem veszélyeztették rövid távú energiatermelésüket. Egyedül Franciaországnak sikerült az elérhető legnagyobb mértékben kihasználni az atomenergia nyújtotta lehetőségeket, és így villamos energiájának 75%-át atomerőművekben termelni. Európa keleti térségében sem volt jobb a helyzet, Lengyelország még az első atomerőmű építésének befejezése előtt leállította nukleáris energiaprogramját. Igaz viszont, hogy itt található az atomenergiát legnagyobb mértékben (80%) hasznosító Litvánia, bár elavult erőművi blokkjainak a közeljövőben történő leállítása miatt ez az arány jelentősen csökken, legalábbis a tervezett új atomerőművi blokkok megépítéséig.

A világ energiatermelése azonban elérte azt a szintet, amikor a környezeti károk már nem elhanyagolhatóak. A savas esők problémája a fosszilis energiatermelés csökkentését kívánatosá teszi. A környezetre kevésbé káros fosszilis források (gáz, kőolaj) belátható időn belül kimerülhetnek. A szén-dioxid-kibocsátás okozta globális felmelegedés még nem igazolható egyértelműen, de egyre inkább valószínűsíthető. Az energiatermelésnek tehát a jelenleginél környezetbarátabbá kell válnia, ezt többé-kevésbé mindenki belátta. Ezért született a kiotói megállapodás a szén-dioxid-kibocsátás csökkentéséről, amelynek betartása sajnos egyelőre nem várható. Amint láttuk, a környezetbarát irányba történő változásra pillanatnyilag

csak az atomenergia részarányának növelése ad módot. Ennek fő gátja jelenleg az atomenergia nem kellő társadalmi elfogadottsága. Ezen az új atomerőmű-típusok megjelenése segíthet. Ehhez mindenki számára érthetően demonstrálni kell, hogy a negyedik generációs erőművek környezetbarát tulajdonsága nem kétséges, segítenek a fenntartható fejlődés megőrzésében, biztonságosak, megbízhatóak és hadi célokra használhatatlanok.

Irodalom

1. US Department of Energy, International Energy Annual 2002, Released March–June 2004 (<http://eia.doe.gov/>)
2. *Global Energy Perspectives* – World Energy Council (WEC), 1998
3. *World Energy Assessment* – Joint Publication of UN and WEC, 2000
4. VIDOVSKY I.: *Az atomenergia előnyei és kockázatai* – Fizikai Szemle 53/8 (2003) 272–277
5. J.M. OGDEN: *Prospects for building a hydrogen energy infrastructure* – Annual Review of Energy and the Environment 24 (1999) 227–279

A NUKLEÁRIS HULLADÉKKEZELÉS ÚJABB IRÁNYAI

Veres Árpád

MTA KK Izotópkutató Intézet

Történeti visszatekintés

Enrico Fermi 1934-ben elsőként idézett elő atommagátalakítást neutronokkal. Már 1940-ben ráérezett arra, hogy a mesterségesen létrehozott, de további felhasználásra már alkalmatlan radioaktív anyagok – a nukleáris hulladékok – komoly technikai és társadalmi problémákat okozhatnak. Ez a jóslata napjainkra beigazolódott.

1942. december 2-án a világon először értek el atommáglyában önfenntartó láncreakciót az USA chicagói egyetemén. Az első békés célú mesterséges radioizotóp-alkalmazás (^{131}I , ^{32}P) pedig 1946. augusztus 2-án történt (Oak Ridge, NL).

Hazánkba nyolc évvel később, 1954. szeptember 15-én érkezett először mesterséges radioaktivitású szállítmány: 100 mCi (3,7 GBq) ^{60}Co sugárforrás és három ^{32}P radioizotóp-készítmény (63 MBq, Na_2HPO_4 ; 15 MBq, H_3PO_4 ; 74 MBq, K_2HPO_4) formájában (1. ábra).

A hazai radioizotóp-alkalmazások 50 éves alakulását jól szemléltetik a forgalmazás adatai. A 2. ábrán feltüntettük az import-, export- és a hazai szállítmányok számát. Ez a forgalom magában foglalja az orvosi diagnosztika, a biológia, a mezőgazdaság, az iparfejlesztés és a tudományos kutatás legkülönbözőbb területein alkalmazott radioizotópokat. Az izotópok alkalmazásaival azonban megjelentek a sugárzó hulladékok kezelésének problémái is.

A kis és közepes aktivitású radioaktív hulladékok elhelyezésére 1960-ban létesült az első felszíni „ideiglenes radioaktív hulladék-tároló” Solymár határában. Az 1970-es években foglalkoztak e hulladékok hosszabb távú tárolására alkalmas geológiai hely feltárásának kérdéseivel. A kutatások eredményeként Püspökszilágyon 1976-ban helyeztek üzembe egy felszíni betonmedencés tárolót, amelybe a solymári hulladékot is áthelyezték.

Az elhelyezés mellett nem kevésbé fontos feladat a radioaktív hulladék mennyiségének csökkentése. Erre vonatkozóan többféle technológiát is kidolgoztak (elektrodialízis, bepárlás, ioncserélés [1–3]).

A III. Nukleáris Technikai Szimpóziumon (Budapest, 2004. december 2–3.) elhangzott előadás alapján.

A kis és közepes aktivitású, főleg rövid felezési idejű radioaktív hulladékok hosszú távon jóval kisebb veszélyeket jelentenek környezetünkre, mint az atomerőművek kiégett fűtőelem kötegeiben felhalmozódott, nagy aktivitású nukleáris hulladék, amely több, hosszú felezési idejű radionuklidot is tartalmaz.

1954. június 27-én lépett üzembe az első olyan atomerőmű (Obnyinszk, SzU), amely már a hálózatra is termelt villamos energiát. Ennek villamos teljesítménye mindössze 5 MW volt. Ötven év alatt a világ villamosenergia-termelésében az atomenergia részesedése már megközelítően 17%-ra emelkedett. Egy 1998-as becslés szerint, ha az atomerőművi energiatermelés a jelenlegi szinten marad, akkor 2015-re a nukleáris hulladék mennyisége eléri a 250 ezer tonnát, és ez a hulladék több mint 2000 tonna plutóniumot is tartalmaz. A nagy mennyiségű, hosszú életű és nagy aktivitású nukleáris hulladékok keletkezésének mértékére a 1. táblázatban mutatunk be néhány adatot.

1. ábra. Az első, mesterséges radioaktivitású szállítmány kézírásos nyilvántartási adatai.

Készítés		Feladás	
(jel., m., év.)	teljes aktivitás	(jel., m., év.)	teljes aktivitás
CO^{60} 100 mc	1954 12.28		
Na_2HPO_4			
P^{32} 1,7 mc	12.15		
H_3PO_4			
P^{32} 0,4 mc	12.15		
K_2HPO_4			
P^{32} 2,9 mc	12.15		
		CO^{60} 100 mc	1954 12.28
		Na_2HPO_4	
		P^{32} 1,7 mc	12.15
		K_2HPO_4	
		P^{32} 2,9 mc	12.15