

ten nem informálnak tartja magát. Vegyük észre, hogy még a finnknél is akad tennivaló, hiszen 42%-uk nem érzi magát eléggé informálnak.

Van azonban a tájékoztatásnak egy másik, sajnos igen-csak gyenge oldala is. Ez a *média* magatartása, hozzáállása. Keserves saját tapasztalatom alapján állíthatom, nagyon nehéz, nemegyszer lehetetlen az atomenergia hasznosságát, vagy a radioaktív hulladékok biztonságos kezelését józanul taglaló írást elhelyezni. A tavalyi paksi üzemzavar sokszoros publicitást kapott az olyan elemzésekhez képest, amelyek például a légkörszennyezés szempontjából fontos alternatívaként tárgyalják az atom- vagy a vízenergiát. Belátom, az nem hír, ha valaki szereti szüleit, látogatja őket, gondoskodik róluk. Ellenben, ha kutyaóiban tartja apját, egyből ráugrik a sajtó valamennyi ága. Ebben a negatív magatartásban nyilvánvalóan szerepet játszik az, hogy a média vezetői úgy gondolják, az eladhatóságot, a nézettséget a szenzáció állandó hajszolása emeli meg. Vonakodásukat erősíti az a tény, hogy a szerkesztők java része bölcsész „származék”, többnyire annak is az intolleráns radikális része, akik fennen büszkélkednek természettudományos műveletlenségükkel.

A média mellett szólni kell még a társadalmat befolyásoló másik lényeges szereplőről, a közhatalmat megtestesítő *kormányról* és a *parlamentről*. Az idézett felmérés szerint a válaszadók döntő többsége, 85%-a vélte úgy – alig egy-két hónappal a paksi üzemzavar után (2003 júniusában) –, hogy a kormánynak feladatai vannak az elhárításában.

Egyébként is, a kormányt felelősnek tartják a nukleáris technika ellenőrzésében (83%) és – érdekes módon – a tájékoztatásban is (2003/2004: rendre, 63 és 68%). Különösen figyelemre méltó az, hogy a társadalmat leképező válaszadók az *ellenzék*et sem mentik föl a felelősség alól, ugyanis jelentékeny részük véli úgy, hogy az ellenzéknek *támogatnia* kell a kormányt a zavarelhárításban, illetve megfelelő módon figyelmeztetnie kell.

De ne csak a sötét oldalról, a gondokról szóljak. Nagyon lényeges, tisztességes törekvések tapasztalhatók a tájékoztatásban mind az atomerőmű, mind a nukleáris hulladék kezeléséért felelős társaság részéről. Ellenőrző társadalmi testületek kapnak folyamatosan információkat, látogatóközpontok, bemutatóparkok tárják ki a kapukat az érdeklődők számára. Ingyenes lapokban ismerkedhetnek a régió lakosai a legújabb eseményekkel, elképzelésekkel, tervekkel. Nem meglepő, hogy éppen a közvetlenül szomszédos térségek lakói a leginkább elfogadók, hiszen ők a legtájékozottabbak, és amellet nekik hoz munkalehetőségeket is a nukleáris technika.

A sztori végül is hepienddel zárul. Héraelész megsza-badítja az emberiség jötevőjét, a bölcs titánt a máját csipkedő saskeselyűtől, leszedi őt a Kaukázus sziklájáról. Az emberek immár bátran, szabadon használhatják a melegítő-világító, de egyúttal rettenetes pusztításra is képes tüzet. A tűz csiholóinak azóta is fontos kötelességük, hogy állandó magyarázattal szolgáljanak a többieknek, mit ad nekik a megszelídített tűz, és miként kell vele bánni.

MINDENTUDÁS AZ ISKOLÁBAN

AZ ATOMMAGTÓL A KONNEKTORIG

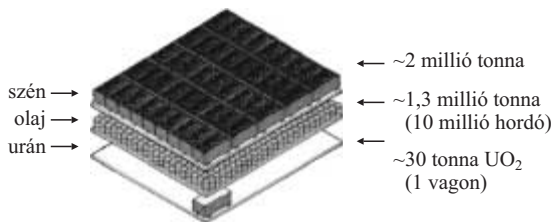
Az 1980-as években bukkant fel Németországban egy matrica: „*Pokolba az erőművekkel, nálunk az áram a konnektorból jön!*” Az ironikus szöveggel a matrica készítője az erőművek ellen tiltakozókat szeretne volna gondolkodásra készíteni. Gyakran előfordul, hogy szinte magától értetődőnek veszünk olyan dolgokat, amelyek mögött a modern tudomány eredményei és hatalmas műszaki-technikai háttér áll. Ezek közé tartozik a villamos energia. Az idézett matrica egyik üzenete éppen az, hogy a villamos energia nem energiaforrás, hanem energiabor-dozó. Ahhoz, hogy „áram jöjjön a konnektorból”, az energiát valamilyen primer energiaforrásból elő kell állítani, villamos energiává kell alakítani, ezután viszonylag egyszerű eszközökkel és kis veszteséggel továbbítani kell a felhasználás helyére.

Itt álljunk meg egy pillanatra! Elő kell állítani? De hiszen az iskolában tanultuk az energiamegmaradás tételét, és azt hogy örökmozgók – energiaforrás nélkül működő gépek – nem léteznek! És mi is az a fogalom, hogy „energiaforrás”? Van valami, ami csak úgy, magától energiát ad? A fizika arra tanít minket, hogy az energiát csak a

különböző „formái” között lehet oda-vissza alakítgatni (mechanikai, potenciális, kémiai, belső energia, hő formájában közölt energia stb.). Amikor tehát energiaforrásként használunk egy anyagot, akkor abból a benne már valamilyen formában tárolt energiát ravasz trükkökkel más, általunk használható formára – például hővé, vagy villamos energiává – alakítjuk.

Fosszilis energia

Napjaink legfontosabb energiaforrásai közé tartozik a kőszén, a kőolaj és a földgáz, amelyeket közös néven fosszilis energiaforrásoknak hívunk. Ezek az anyagok sok millió évvel ezelőtt élt élőlényekből keletkeztek, amelyek a Nap energiáját használták fel testük felépítésére, miközben szén-dioxidból és vízből magasabb energiatartalmú szerves vegyületeket állítottak elő. Amikor tehát a szenet, földgázt, kőolajat (vagy annak származékait) elégetjük, tulajdonképpen azt az energiát nyerjük vissza, amelyet a Nap sugárzott le a Földre sok millió évvel ezelőtt.



1. ábra. Ugyanannyi energia megtermeléséhez szükséges szén, olaj és urán

A Föld a jelenlegi fosszilis tüzelőanyag-készletét százmillió évekig gyűjtögette. Ennek nagybani kitermelése és felhasználása a XIX. században kezdődött el. Ötszáz év múlva azonban már nem lesz ipari méretekben használható fosszilis tüzelőanyag, még a legoptimistább becslések szerint sem. Amit tehát a Föld százmillió évekig gyűjtögetett, azt a civilizáció milliószer gyorsabban, néhány száz év alatt elhasználja. Egy másik veszélyre is gondolnunk kell. A fosszilis tüzelőanyagok elégetésével nemcsak az energiát nyerjük vissza, hanem a millió évek alatt az atmoszférából kivont széndioxidot is szükségszerűen visszaeresztjük – ugyancsak milliószer gyorsabban – az atmoszférába. Ez jelentősen módosítja a légkör összetételét, és üvegházhatást okoz. A néhány száz év olyan rövid idő a Föld történetében, hogy ilyen gyors változáshoz a Föld érzékeny egyensúlyokon alapuló rendszerei nem tudnak alkalmazkodni, és ez klímakatasztrófához vezethet.

Atomenergia

A Föld anyaga négy és félmilliárd évvel ezelőtt szupernóva-robbanásban keletkezett. Ebben a hatalmas energiákat felszabadító csillagkatasztrófában olyan atommagok is létrejöttek, amelyekben a protonok és a neutronok magas energiaszintekre szorultak. Ezek között vannak olyanok is, amelyeket a magerők még éppen össze tudtak tartani, ezért évmilliárdok alatt sem bomlottak el. A Földön természetes állapotban található legnehezebb elem, az *urán* atommagjában van a legtöbb proton és a legtöbb neutron, ezért ott szorult a legtöbb részecske magas energiaszintre. Az atomreaktorokban ezeket a nagy atommagokat hasítjuk szét kisebb részekre. A maghasadás után létrejött kisebb atommagokban a protonok és a neutronok alacsonyabb energiájú állapotba kerülnek, és így az uránatommagba szorult csillagenergia egy részét visszanyerjük. Amikor tehát az uránt használjuk energiaforrásként, tulajdonképpen a Föld anyagát létrehozó szupernóva-robbanás energiamorzsait hasznosítjuk.

Maghasadás és sűrű energia

Az atomreaktorban az energiatermelés alapfolyamata a maghasadás. Ennek során két kisebb atommag és néhány szabad neutron is keletkezik, valamint sok energia szabadul fel.

Egyetlen ilyen folyamat sokmilliószor annyi energiát ad, mint egyetlen szénatom „elégetése”. Ez azt jelenti,

hogy ugyanannyi energia megtermeléséhez *sokmilliószor kevesebb uránra* van szükség, mint szénre. Azaz néhány gramm uránból elő tudjuk állítani azt az energiát, amelyhez egyébként több tonna szén (kőolaj, földgáz) elégetésére lenne szükség (1. ábra). Ezen túlmenően, az urán hasadásakor nem keletkezik üvegházhatást okozó szén-dioxid sem.

A kis üzemanyag-szükséglet miatt az atomenergia *olcsó*, hiszen ugyanannyi energia megtermeléséhez sokkal kisebb mennyiségű anyagot kell bányászni, feldolgozni, szállítani, mint a fosszilis erőművekben. Könnyen lehet sok évre szóló üzemanyag-*tartalékot* is felhalmozni és tárolni, hiszen nem foglal nagy helyet. Ez az energiaellátás hosszú idejű (és a mindennapi piaci áringadozásoktól és politikai viharoktól független) *biztonságát* teremti meg egy országnak.

Az urán azonban magától nem hasad szét, ehhez külső hatásra van szükség. E célra leginkább a neutronok felelnek meg. A neutron elektromosan semleges, ezért könnyen az atommag közelébe tud férkőzni, nem taszítja el az atommag nagy pozitív elektromos töltése. Az atommag közelében „ácsorgó” neutron a mag véletlenszerűen befoghatja, és az erős magerők a maghoz köthetnek. Minél tovább tartózkodik egy neutron a mag közelében, annál nagyobb a valószínűsége annak, hogy ez a befogódás megtörténik. Ezért a „lassú” neutronok *sokkal jobbak* ilyen célra, mint a nagy energiájú, gyors neutronok.

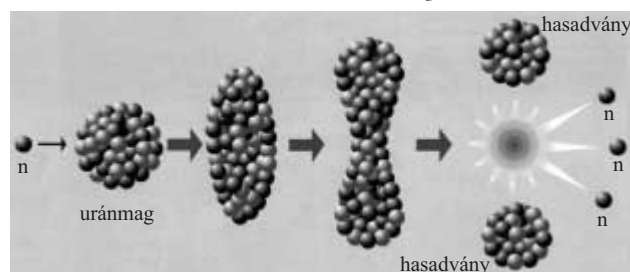
A neutron kötési energiája miatt a neutron befogása után létrejött atommag magasabb energiájú, „gerjesztett” állapotban keletkezik. Az ^{235}U atommagnál (amely a természetben található uránnak mindössze 0,71%-a) ez a többletenergia éppen elegendő arra, hogy a maghasadás folyamatát elindítsa (2. ábra). A természetes urán legnagyobb részét kitevő ^{238}U nem tud elhasadni a neutron befogása után, ezért egyes erőművek üzemanyagában a ^{235}U arányát 3–5%-ra felnövelik, az üzemanyagot „dústítják”.

Láncreakció

A maghasadást neutron indítja el, és a folyamatban átlagosan kettőnél valamivel több neutron is keletkezik (2. ábra). Ha minden maghasadás után pontosan két neutron okoz újabb maghasadást, akkor egyetlen neutronból az első „generációban” két maghasadás, a másodikban négy, a harmadikban nyolc stb. jönne létre.

Tíz generáció után 2^{10} ~1000-szeresre nőne a neutronok száma – és ezzel a felszabaduló energia mennyisé-

2. ábra. Neutronnal kiváltott maghasadás



ge is. Húsz generáció után pedig már milliószorosa lenne a folyamat által felszabadított energia. Könnyen belátható, hogy ilyen módon igen rövid idő alatt el lehet érni a makroszkopikus mennyiségű energia felszabadításához szükséges számú maghasadást. A neutronok ilyen módon történő sokszorozódását *neutronos láncreakciónak* nevezzük. Ennek ötletét *Szilárd Leó* szabadalmaztatta 1934-ben.

A moderátor mint a láncreakció katalizátora

A nagy energiáfelszabadulással járó maghasadásban a keletkező neutronok is nagy energiát kapnak. A maghasadást azonban – mint láttuk – nagy valószínűséggel csak a lassú neutronok tudják létrehozni. A keletkezett neutronokat le kell tehát lassítani, és erre a könnyű atommagokkal való ütköztetés ad lehetőséget. Ilyen célra olyan anyagok megfelelők, amelyek nem nyelik el a neutronokat, de atommagjainak a neutronok nagy energiát tudnak átadni ütközéskor. Az ilyen anyagokat *moderátornak* hívják. A víz a legolcsóbb ilyen anyag, amely nagy protontartalma miatt jó neutronlassító. Sajnos a víz protonjai nemcsak lassítják a neutronokat, hanem el is nyelnek belőlük (deutérium keletkezik), ezért normál (könnyű) víz moderátorral működő atomerőműveknél (ilyen a Paksi Atomerőmű is) az üzemanyagot dúsítani kell. Sokkal jobb (de sokkal drágább) moderátor a nehézvíz, és a nagy tisztaságú grafit. Grafittal vagy nehézvízzel moderált erőművekben már dúsításra sincs szükség, természetes összetételű urán is használható.

Grafittal lassították a neutronokat a történelem első atommáglyájánál Chicagóban 1942-ben, de ilyenek még napjainkban is működnek néhány helyen (ilyen volt pl. a csernobili atomerőmű reaktora is). Nehézvízzel lassítják a neutronokat közelünkben, a romániai Cernavodában működő CANDU (CANadian Deuterium Uran) típusú reaktorok.

Fontos megérteni, hogy a moderátor jelenléte *segíti* a láncreakciót, ahogyan egy katalizátor is segít egy kémiai reakción. Emiatt a moderátornak fontos biztonsági szerepe is van. Ha reaktorunk teljesítménye nő, növekszik a hőmérséklet, a moderátor hőmérséklete is nő, a hőmozgás miatt

egyre gyorsabban mozgó moderátor-atommagokkal ütköző neutronok nem tudnak annyira lefékeződni. A gyorsabb neutronok viszont rövidebb ideig tartózkodnak az atommagok közelében, ezért kisebb valószínűséggel hoznak létre maghasadást. Ez negatív „visszacsatolást” jelent: *a hőmérséklet növekedése fékezi a láncreakciót*. Ha pedig a moderátor olyan, hogy még el is tud forni (pl. víz vagy nehézvíz), akkor a forráspont fölött megszűnik a neutronok lefékezése, és a láncreakció magától leáll, hiszen gyors neutronokkal nem működik. Ez a vízzel (vagy nehézvízzel) moderált atomreaktorokat különösen biztonságossá teszi. A grafit moderátorú reaktoroknál ez a hatás nem érvényesül (hiszen ott a grafit nem „forr el”, hanem magas hőmérsékletelig ott marad); ezek kevésbé biztonságosak.

Radioaktivitás az atomreaktorokban

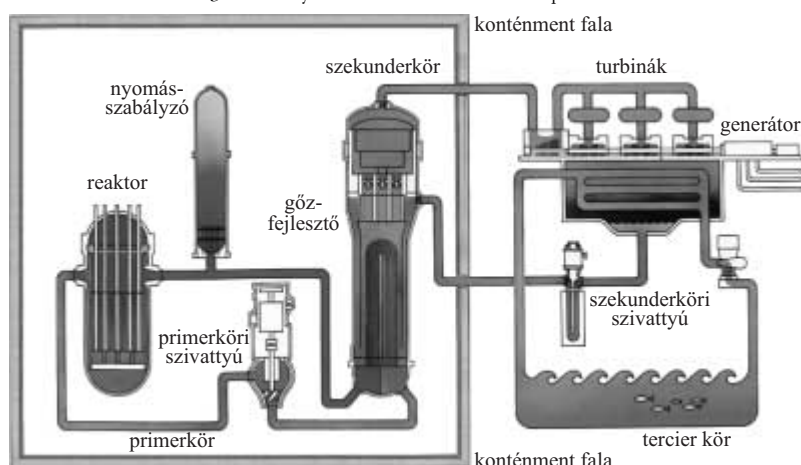
A maghasadás során keletkezett kisebb atommag-töredékek (hasadványok és hasadási termékek) erősen radioaktívak, ezért az atomreaktor belsejében üzem közben radioaktivitás halmozódik fel. Az atomreaktorok legnagyobb veszélye az, hogy ezek a radioaktív anyagok kiszabadulnak, a környezetbe kerülnek, és ott az élővilágot károsítják. Ennek elkerülésére az atomerőművekbe többszörös védelmet építenek.

Az üzemanyagot olyan pasztillákba sajtolják, amelyek a keletkezett hasadási termékek legnagyobb részét megkötik, nem engedik szétterjedni. Következő védelemként a pasztillákat magas olvadáspontú, légmentesen lehegesztett csövekbe zárják. Ami a pasztillákból mégis kijön, azt ezek a burkolatok fogva tartják. Az üzemanyagpálcákat a zárt primerkörben keringő hűtőközeg (pl. víz) hűti, amely még mindig nem érintkezik a környezettel, ezért a pálcák esetlegesen megsérült burkolatán átszivárgó radioaktivitás a primerkörből már nem juthat tovább.

Ha a primerkör vastag acél csővezetéke is megsérülne és a primerköri víz kiömlene, a radioaktivitást az egész rendszer körül fogó vastag, hermetikusan lezárt, betonból és acélból készült építmény tartja vissza. Az újabb atomerőművekben ezt a – *konténmentnek* nevezett – burkolatot úgy méretezik, hogy még egy vadászpülőgép becsapódásának is ellent tudjon állni.

A vízzel moderált atomerőművek legnagyobb balesete 1979-ben Harrisburg (USA) mellett következett be (TMI-2). Nem véletlen, hogy ennél a balesetnél sem került ki a környezetbe a lakosságra veszélyes mennyiségű radioaktivitás, pedig – operátori hibák miatt – az aktív zóna összeolvadt, és a reaktor végérvényesen károsodott. A csernobili balesetet külön kell kezelnünk, hiszen egyrészt nem vízzel moderált atomerőműben következett be (tehát a fentebb említett okok miatt a biztonsági szintje alacsonyabb), másrészt pedig az aktív zóna körül nem volt konténment, ami megvédte volna a környezetet. Az ilyen reaktorok veszélyeire a *Teller Ede* által veze-

3. ábra. Nyomottvízes atomerőmű felépítése



tett amerikai reaktorbiztonsági bizottság már az 1950-es évek közepén felhívta a figyelmet, és ezért nyugaton fokozatosan leállították a grafitral moderált, vízzel hűtött reaktorokat. Ma már csak a volt Szovjetunió területén működik még néhány, de ezek leállítását is tervbe vették.

Atomenergiától a villamos energiáig

A láncreakcióban felszabaduló energia legnagyobb része a keletkezett hasadványok mozgási energiájának formájában jelenik meg. Ezek még az üzemanyagban lefékeződnek, és az üzemanyagot melegítik. Az üzemanyagpalcákat a primerkörben keringő hűtőközeg hűti, és viszi tovább hő formájában az ott felszabadult energiát (3. ábra).

Ezzel a hővel a gőzfejlesztőben vizet forralunk, és ez a „szekunderköri” gőz forgatja meg a gőzturbinákat, ahol az energia egy része mechanikai mozgássá – a turbina forgásává – alakul. A turbinák generátorokat hajtanak, amelyek a mozgási energiát tovább alakítják villamos energiává. A villamos energiává nem alakítható „hulladék” hőt a terciér hűtőkör viszi el és adja le a környezetnek (ennek egy részét esetleg hő formájában tovább lehet hasznosítani, pl. lakótelepek fűtésére).

Kockázatok

Minden emberi tevékenység – így a villamosenergia-termelés is – kockázattal jár. Évente sok százan halnak meg a világon szénbányákban bekövetkező balesetek miatt. A kőolajat szállító tankhajók baleseteinél a tengerbe ömlő hatalmas mennyiségű olaj helyrehozhatatlan környezeti károkat okoz. Senki sem mérte még fel, hogy évente hány áldozatot szednek a gázrobbanások. Az évente millió tonnaszámra az atmoszférába bocsátott szén-dioxid a Föld légkörének egyensúlyát fenyegeti.

Az atomenergia – felelősséggel és szakértelemmel üzemeltetve – megbízható, biztonságos, olcsó és környezetbarát energiaforrás. Az atomenergián alapuló villamosenergia-termelés kockázata jelenleg kisebb, mint a fent említett kockázatok. Üzemzavarok, balesetek természetesen minden tevékenység közben előfordulhatnak, ezeket az atomenergia-termelésből sem lehet teljesen kizárni. Hatásaikat azonban gondos tervezéssel és megfelelő biztonsági kultúrával alacsony szintre lehet szorítani. Az autóközlekedésnek, a repülésnek is vannak kockázatai, az emberiség mégsem mond le ezekről a hasznos tevékenységekről, hanem megpróbálja őket biztonságosabbá tenni. Miért éppen az atomenergiával kellene másképpen cselekedni?

Sükösd Csaba

BME Nukleáris Technika Tanszék

HÍREK – ESEMÉNYEK

AKTINIDÁK ÉS HASADÁSI TERMÉKEK PARTICIONÁLÁSA ÉS TRANSZMUTÁCIÓJA KONFERENCIA

Las Vegas, Nevada, USA, 2004. november 9–11.

Az utóbbi másfél évtizedben rendkívül megnőtt az érdeklődés a használt nukleáris fűtőanyagok újbóli hasznosítása iránt, hogy így csökkentse az atomenergia környezeti terhelését. Ezért kétévenként az OECD/NEA szervezésében információs találkozót tartanak, ahol képet adnak a világban folyó ilyen irányú kutatásokról. Az információk kiterjednek az elválasztási technológiákra, az ezekhez kapcsolható fűtőelemgyártásra, transzmutációs eszközökre: kritikus, és gyorsítóval hajtott szubkritikus reaktorokra.

A találkozó fő témái

Nemzeti és nemzetközi P&T (partíciós és transzmutációs) programok áttekintése

Japánban 15 éve fut az OMEGA-program, amelynek lényege egy kétrétegű üzemanyagciklus megvalósítása.

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

Ennek első rétegében a fűtőelemciklus a friss üzemanyag könnyűvízes reaktorokban való „égetéséből”, valamint vizes reprocesszállással előállított MOX üzemanyag (mixed oxide: urán- és plutónium-oxidot is tartalmazó fűtőelem) szintén vizes reaktorokban való égetéséből áll. A második rétegben száraz reprocesszállással a maradék transzuránokat nitrid fűtőelemekbe pakolják, és ezeket ADS-ben (accelerator driven system = gyorsítóval hajtott rendszerek) kívánják újrafelhasználni.

Koreában egyenlőre nincs sem dúsítás, sem elválasztás, de távlati tervek vannak elektrokémiai elválasztásra, valamint a HYPER nevű, ólom–bizmut hűtésű szubkritikus rendszerre.

Oroszországban több helyen is foglalkoznak szubkritikus rendszerek tulajdonságait akarják vizsgálni kísérleti be rendezések építésével. Ezenkívül kidolgozták egy sóoldékos mozgó üzemanyagú reaktor koncepciót.

Az Egyesült Államokban a Nemzeti Energiapolitikai Program keretében egyre nagyobb szerepe lesz a nukleá-