

Dr. Homonnay Zoltán–Dr. Varga Kálmán<sup>1</sup>

# A NUKLEÁRIS ENERGIATERMELÉS SZEREPE ÉS PERSPEKTÍVÁI A VILÁGBAN ÉS MAGYARORSZÁGON

## Bevezetés

**A** világban egyre nyilvánvalóbbá váló energiaproblémák láttán erősödni látszik a nukleáris energiatermelést mint opciót elfogadók tábora. Elsősorban Kína és India rohamléptű gazdasági fejlődése és az ezzel járó energiaéhség meglehetősen borús képet fest már a közeljövőről is. Nem nagyon van más választásunk, mint a globális populáció növekedése miatti aggodalmaknak megfelelően keresni azokat a megoldásokat, amelyek képesek a növekvő embertömegek energia- (és egyéb) igényeit kielégíteni, és ezzel elkerülni az emberiség létszámának kényszerű csökkenését (talán ne feszegessük, hogy ez miképp mehetne végbe...) valamiféle globális válság eredményeként.

A stabil létfenntartáshoz, és különösen a civilizált léthez, három dologra van szükség: energiára, nyersanyagra és mindezek megszerzése, illetve előállítása során olyan környezet fenntartására, amelyben nem indulnak meg megfordíthatatlan vagy kezelhetetlen folyamatok.

A három közül az energia a legfontosabb, mivel energia segítségével anyagok átalakíthatók, így szinte tetszőleges nyersanyag kiváltható (például akár szenet is gyárthatnánk a légkörben lévő széndioxidból, ha ez nem hangzana túl bután, hiszen általában az ellenkezőjét tesszük). Ugyanezen az elven a környezet átalakítása is szinte korlátlanul megoldható, gondoljunk csak a különböző bányaterületek rekultivációjára.

Korábban (történelmi léptékben) az energiakérdés nem merült fel olyan súllyal, mint manapság, hiszen az energia, mondhatni „csomagolt formában”, automatikusan érkezett: a növények fotoszintézise által termelt (tehát napenergiát felhasználó) nagy energiájú vegyületek formájában. Ne gondoljunk bonyolultabb dologra, mint a tűzifára! Az ipar fejlődésével párhuzamosan az emberiség azután rákapott olyan csomagolt energiaforrásokra, amelyeknek a „feladója” az akár több tízmillió évvel ezelőtti földi élővilág: ilyen a kőszén, majd később a kőolaj és a földgáz. Amikor nyilvánvalóvá vált, hogy ezek mennyisége korántsem végtelen, a kutatók megtalál-

tak egy olyan forrást, amely afféle eredő energiaforrás: ez az atomenergia. De ez sem nevezhető afféle „Szent Grál”-nak. Mindazonáltal meg fogjuk mutatni, hogy középtávon nemigen létezik más lehetőségünk sem globális, sem hazai értelemben.

Az atomenergia elnevezés valójában félrevezető, hiszen a felszabadítható energia nem az atom, hanem az atommag átalakításával kapcsolatos. Az atom átalakítása tulajdonképpen kémiai reakciókat takar és atomonként vagy molekulánként tipikusan néhány elektronvoltnyi energiaváltozást jelenthet. Ehhez a kategóriához tartozik a fosszilis energiahordozók elégetése.

Az atommag átalakítása egy lényegesen különböző energiaskálán megy végbe. A fent említett néhány elektronvoltos energiaeffektushoz képest egyetlen urán-atommag hasítása körülbelül 200 millió elektronvoltnyi energia felszabadulásával jár. Az a tény, hogy a maghasítás egyáltalán energia-felszabadulással jár, annak megvannak a magfizikai okai, amit itt persze nem részletezünk, csak annyit említünk meg, hogy ez csak nehéz elemek esetén van így. A könnyű elemeknél éppen az ellenkezője, az atommagok egyesítése jár energia-felszabadulással. Ez utóbbi megy végbe folyamatosan a Napban (általában a csillagokban) és a hidrogénbombában is...

Az utóbbi példa azért különösen fontos, mert könnyen belátható, hogy a legtöbb lehetséges energiaforrásunk eredője maga a Nap. A Nap hője felmelegíti és elpárologtatja az óceánok és a tengerek vizét, amely csapadék formájában a szárazföldeken lehullik, folyókat alkot, amelyekre vízerőműveket telepíthetünk. Az összes meteorológiai folyamat (a szél és a tengeráramlatok, de a tengerek hullámozása is) a Naptól a Földre érkező hővel kapcsolatos.

Mivel a növények a fotoszintézis útján a napenergia segítségével (és a klorofill általa közreműködésével) építenek fel energiadús vegyületeket, a fa, általában a biomassza, a kőszén, a kőolaj és a földgáz nem más, mint konzervált napenergia, ami akkor szabadítható fel, amikor arra szükségünk van. Mivel a Napban az energia magátalakulások során (magfúzió) szabadul fel, megállapíthatjuk, hogy ezen energiatípus eredete nukleáris.

A geotermikus energia az, amely első pillantásra kilóg a sorból, de mai tudásunk szerint a Föld belsejének a hője is részben radioaktív átalakulásoknak köszönhető.

A fentiek fényében már sokkal nyilvánvalóbb a nukleáris energiatermelés különleges helyzete, és érzékelhetők korlátaink is: nem ismerünk a természetben olyan folyamatot, amely az atommagot alkotó részecskék (neutronok és protonok) még sokkal nagyobb energiaeffektussal járó átalakításával lenne kapcsolatos és valahol a világegyetemben folyamatosan hosszú időn keresztül zajlik és az emberiség számára hozzáférhető.

## A nukleáris energiatermelés előnyei és hátrányai

A nukleáris energiatermelés előnyeit számba véve a legfigyelemreméltóbb a nagy energiasűrűség, a rendkívül egyszerű energia-felszabadítás, és hogy nem termel üvegházhatást okozó gázokat, s így nem járul hozzá a globális felmelegedéshez. Az utóbbi vonásnemigénykülönösebb kommentárt.

Az egyszerű energia-felszabadítás nem jelent mást, minthogy a dúsított uránt tartalmazó fűtőelemeket csak elég nagy mennyiségben kell egymás mellé rakosgatni, hogy azután a kritikus méret (tömeg és geometria) elérésekor a láncreakció magától beinduljon. A neutronlassító közeg „csak” azért kell, hogy megnöveljük annak a valószínűségét, hogy ha egy neutron eltalál egy uránatom-magot, akkor az nagy valószínűséggel el is hasadjon. Így a reaktor mérete valamint a dúsítási igény csökkenthető (az urándúsítás igen drága része a nukleáris fűtőanyag-ciklusnak, de nem megkerülhető, mert csak a  $^{235}\text{U}$  izotóp alkalmas láncreakció megvalósítására, ami viszont a természetes uránnak csak 0,7 %-át alkotja). Amint a láncreakció beindul, csak a hő megfelelő elvezetéséről kell gondoskodni. Természetesen ez utóbbi kérdés is rendkívül fontos, különösen a már nagy kiegészi fokú és ezért erősen radioaktív és következésképpen sok remanens hőt termelő fűtőelemek esetén.

A fűtőelemek például Pakson 3 évig szolgálnak, így cseréjük is (legalábbis a teljes töltet cseréje) csak ilyen időközönként aktuális. Ez is lényeges előnyként említhető.

Az energiasűrűséget illetően abba érdemes belegondolni, hogy a paksi atomreaktorok „lelke” egy 3,8 m átmérőjű és 11,8 m magas acéltartály (a reaktortartály), ami-ben a nukleáris üzemanyagot tartalmazó aktív zóna egy 2,9 m átmérőjű és 2,5 m magas henger. Ilyen csekély térfogatban a maghasadás által annyi energiát lehet folyamatosan felszabadítani, hogy például 2005-ben a paksi 4 reaktor a hazai villamosenergia-termelés 39,5 %-át produkálta (13 800 000 kilowattórát)! Ráadásul a 4 tartályba berakott összesen 168 tonnányi nukleáris üzemanyag 3 évig elég. (Nem kell szemet lapátolni, olajat vagy gázt betáplálni stb., csak évente egyszer cserélik a fűtőelemek egy részét.) A nukleáris energiatermelésnek ez a vonása egyszerűen egyedülálló.

Mindazonáltal az óriási energiasűrűség nem jelenti azt, hogy egy atomreaktor teljesítménye tetszőlegesen gyorsan változtatható nullától a lehetséges maximális teljesítményig, ugyanis ezt a láncreakció tulajdonságai korlátozzák. Ezzel függött össze például a csernobili baleset.

Nem lehet és nem is célunk a nukleáris energiatermelésnek az előnyeit túlhangsúlyozni, csak a hátrányok őszinte feltárása esetén lehet elvárni, hogy józan ítéletet hozzunk minden nukleáris energetikai beruházás tervezése, megvalósítás ügyében.

Az atomerőművek működtetésének két legjelentősebb hátrányos vonása a baleseti kockázat és a termelt radioaktív hulladékok végleges elhelyezésének, „semlegesítésének” a problémája.

## A baleseti kockázat

Egy jól működő atomerőmű üzem közben olyan csekély mennyiségű szennyezőanyagot (értelemszerűen radioaktív anyagot) juttat a környezetünkbe, hogy az teljes biztonsággal figyelmen kívül hagyható mint egészségügyi kockázat. Ezt felelőséggel ki lehet jelenteni. Ugyanakkor kétségtelen, hogy a reaktorban felhalmozódó radioaktív anyagok esetleges kijutása a bioszférába igen jelentős kárt okozna mind emberéletben, mind az élő környezetben. Ilyen eseményre szerencsére nem sok példa van. Az 1. táblázat felsorolja a jelentősebb eseteket, elhelyezve őket a nemzetközileg elfogadott, úgynevezett INES skálán.

Még a skálán magasan elhelyezkedő balesetek is csak nagyon ritkán jártak olyan súlyos sugárdózisokkal emberek számára, amelyek halállal végződtek volna (bár a katonai belesetek esetén az információk hitelessége nehezen ellenőrizhető). Csernobil ilyen szempontból teljesen egyedül és szerencsére egyedüli. Főleg Csernobil példája mutatja, hogy az ilyen balesetek valószínűségének a csökkentése kell, hogy elsődleges cél legyen az atomerőművek tervezésekor.

Kiderült azonban, hogy a baleset közvetlen következményeként rövid időn belül (néhány hét alatt) elhunyt áldozatok száma még Csernobil esetén is 40 alatt van (egy repülőgépkatasztrófának többnyire jóval több áldozata van). Akkor tehát mitől kell tartanunk?

### 1. táblázat. Balesetek és üzemzavarok a nukleáris iparban a nemzetközi INES skálán

Szint, megnevezés	Példák
7. Nagyon súlyos baleset	Csernobil, Szovjetunió, 1986
6. Súlyos baleset	–
5. Telephelyen kívüli kockázattal járó baleset	Windscale, Nagy Britannia, 1957, Three Mile Island, USA, 1979 (Kysthim, Oroszország, 1957*)
4. Elsősorban létesítményen belüli hatású baleset	Saint Laurent, Franciaország, 1980 Tokai Mura, Japán, 1999
3. Súlyos üzemzavar	Vandellos, Spanyol-ország, 1989 , Paks, 2003
2. Üzemzavar	–
1. Rendellenesség	–

\* Besorolása bizonytalan.

Ehhez tudnunk kell, hogy a radioaktív sugárzás egészségkárosító hatása alapvetően kétféle. Ha valaki rövid idő alatt nagy dózist kap (körülbelül 2 Sv – ejtsd: szívert – fölöttit), akkor klinikailag jól észlelhető tüneteket tapasztalhat magán. 8 Sv fölötti orvosi segítség nélkül nagyon valószínű a halál bekövetkezése. Hogy mekkorák ezek a dózisek, ahhoz összehasonlításként megadjuk, hogy a természetes háttérsugárzástól évente

körülbelül 2 mSv (milliszívert), azaz 0,002 Sv dózist kapunk. A rövid idő alatt elszenvedett nagy dózis tehát végső soron sugárbetegséget okoz, ami többnyire anyagcsere-zavarokra jellemző tünetekkel jár, és a tünetek annál súlyosabbak, minél nagyobb a dózis.

A másik típusú egészségkárosító hatás alapvetően más: maga a hatás mindig halálos kimenetelű (főleg a rák kialakulását jelenti), tehát súlyosságról beszélni értelmetlen volna, viszont, hogy milyen valószínűséggel következik be ez a halálos betegség, az függ a dózis nagyságától. Ez a hatás mindig jelen van, még akkor is, ha valaki hosszú idő alatt kis dózist szenved el (akár a természetes háttérsugárzástól!). Ezek azok az esetek, amelyek Csernobil esetén néhány évtized alatt a jelenlegi reális becslések szerint sok tízezerre rúghatnak (elsősorban gyermekkori pajzsmirigyrák, amely eseteknek szerencsére több mint 90 százalékát az eddigi tapasztalatok szerint gyógyítani tudják). Ez Csernobil szomorú mérlege.

De mi is történt Csernobilban, hogy a kockázat – a „lehetséges” – valódi történésé vált? A visszatekintés nagyon fontos, hiszen ez az esemény blokkolta, és még ma is blokkolja a nukleáris energetikai fejlesztéseket.

A sors kegyetlen iróniája, hogy a baleset idején ott dolgozó mérnökök és operátorok egy, a reaktor biztonságosabb működését célzó kísérletet kívántak végrehajtani, ráadásul olyan kísérletet, amelyhez hasonlót korábban már kétszer is sikeresen levezényeltek. Mint korábban már említettük, egy atomreaktor hűtésének biztosíthatósága kulcsfontosságú, mivel a régóta szolgáló fűtőelemek a felhalmozódó radioaktivitás miatt olyan sok hőt termelnek az energiatermelő láncreakció leállítását után is, hogy az a reaktor túlhevüléséhez, a reaktortartály sérüléséhez és radioaktív anyagok kiszabadulásához is vezethetne. Felmerül a kérdés, hogy mi történik akkor, ha egy reaktor vészleállása olyan ok miatt következik be, ami miatt a reaktort hűtő vízkeringető szivattyúk nem kapnak áramot, és a vész-hűtőrendszer bekapcsolása időbe telik. Ekkor elképzelhető, hogy az óriási teljesítményű elektromos generátorok saját tehetetlenségük folytán fellépő után-forgása még elég elektromos áramot produkál a szivattyúk üzemeltetéséhez. Ezt szerették volna bizonyítani a csernobili kísérlettel.

A kísérletet végrehajtó személyzet az automatikus biztonsági rendszerek kikapcsolása végett lecsökkentette a reaktor teljesítményét, majd azt tervezték, hogy rövid időn belül visszaemelve a teljesítményt a reaktort lekapcsolják, ezzel a vészleállást szimulálva. Még mielőtt azonban ezt megtehették volna, felsőbb utasításra (Moszkvából) elhalasztották a kísérlet tényleges megkezdését (a „vészleállást”) és több órán keresztül alacsony teljesítményen üzemeltették a reaktort. Amikor a leállításra engedélyt kaptak, akkor követtek el egy végzetes hibát. Ilyen esetekben (reaktorteljesítmény csökkentésekor) a láncreakció során ugyanis a reaktorban egy különleges izotóp halmozódhat fel ( $^{135}\text{Xe}$ ), ami blokkolja a láncreakciót, mivel nagyon erősen nyeli a neutronokat. Az ilyen „xenon-mérgezett” reaktort nem szabad megpróbálni a szabályzórudak túlzott kihúzásával újraindítani, mivel a xenon egy idő

után gyorsuló ütemben kezd fogyni és ezzel párhuzamosan a láncreakció hihetetlen módon felgyorsul. Sajnos a csernobili üzemeltetők ennek a súlyát nem érezték át, vagy nem gondoltak arra, hogy az a 8-9 órás várakozás (ez alatt halmozódott fel a xenon) ennyire kritikus lehet. A szabályzórudak teljes kihúzásával próbálták a reaktorteljesítményt feltornászni, de amikor a teljesítménynövekedés beindult, akkor körülbelül 3 másodperc alatt mindjárt ezerszeresére ugrott, történetesen a reaktor névleges maximális teljesítményének a százszorosára (100 000 MW). A reaktor szerencsétlen tervezése (úgynevezett RBMK reaktor) is hozzájárult ahhoz, hogy az operátor kétségbeesett kézi vészleállítási próbálkozása sem vezetett eredményre, a szabályzórudak nem tudtak időben beérni az uránrudak közé (és átvenni a Xe iménti neutronelnyelő szerepét...), a reaktor nem tudta kordában tartani a felszabaduló energiát, több robbanás következett be. A következmények jól ismertek.

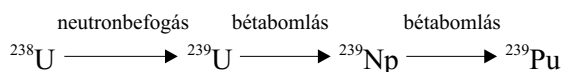
A baleset elemzésével számos tanulmány foglalkozott már (lásd például <http://www.atomeromu.hu/tortenelem/balesetek3.htm>), itt csak azt a tanulságot emelnénk ki, hogy mennyire fontos a speciális nukleáris szakértelem magas szintje. A xenonmérgezés ugyanis meglehetősen bonyolult és speciális jelenség, megértéséhez alapos előtanulmányok szükségesek.

E baleset konkrét elemzésétől függetlenül úgy célszerű tekinteni, hogy hasonló esetek valamilyen valószínűséggel mindig bekövetkezhetnek, és ezt a valószínűséget kell minél kisebbre leszorítani. Az esetlegesen bekövetkezett reaktorbaleset következményeinek megelőzésére alkalmazott legáltalánosabb módszer a jelenlegi gyakorlatban az, hogy az atomreaktorok köré egy olyan, többnyire gömbhéjszerkezetű fém és vasbeton építményt emelnek, ami igen komoly reaktorsérülés esetén is megakadályozza a sugárzó anyag kijutását a bioszférába. Ez az úgynevezett „containment” ma már elterjedt, és a reaktorbiztonság egyik fő kritériuma. Pakson – a reaktor nagy mérete miatt – nem épült containment, ezt azonban olyan, úgynevezett hermetikus épületek láncolata helyettesíti, amelyek kibírnák azt a nyomást, ami a primer körben áramló közel 300 °C-os és 125 atm nyomású víz hirtelen kiszabadulásakor állna elő. A baleseti kockázat csökkentésének egy lényeges eszköze új típusú reaktorok fejlesztése.

## **A hulladékelhelyezés problémája**

Maghasadáskor a reaktorban nagy mennyiségű radioaktív izotóp keletkezik, mert a hasadáskor keletkező atommagok instabilak, és több, egymást követő, úgynevezett bétabomlással stabilizálódnak, miközben sugárzást bocsátanak ki. Egy másik módja a radioaktív izotópok keletkezésének az a folyamat, amikor az uránatom-magok a neutronokat csak befogják, majd nem hasadnak el, hanem vagy alfasugárzást vagy ugyancsak béta-sugárzást bocsátanak ki. Eközben új izotópok keletkeznek, és ezek

legfontosabb jellemzője az alfa-bomlás lehetősége (a hasadványmagok sosem szenvednek alfa-bomlást). Így keletkezik például a nukleáris fegyverek kedvelt alapanyaga, a plutónium is.



Az alfasugárzó izotópok fontos tulajdonsága, hogy nagyon hosszú (akár 10 milliárd éves) felezési idővel is bomolhatnak. A baj a néhány ezer vagy néhány tízezer éves felezési idővel van, mivel ezek az izotópok már elég gyorsan bomlanak ahhoz, hogy sugárzásuk veszélyes intenzitást érjen el, ugyanakkor ellenük tízezer vagy százezer évig kell védekezni, azaz a bioszférától való elszeparálásukat biztosítani egy „atomtemetőben”. Ráadásul az alfasugárzó izotópok, amennyiben a szervezetbe bejutnak (például a táplálékláncokon keresztül), a legrombolóbb hatásúak az élőszövetre.

Itt érdemes megjegyezni, hogy a természetes urán és a tórium a tízmilliárd éves felezési idők miatt olyan lassan bomlik, hogy a szervezetbe bekerülve csak olyan mennyiségben okozna kimutatható sugárkárosodást, amikor már a kémiai mérgezés régen igen súlyos problémákat eredményezne. Tehát például a harctéren szétszóródó, páncéltörő gránátok hegyét alkotó úgynevezett szegényített urán ( ${}^{238}\text{U}$ ) által okozott rákos megbetegedésekről szóló újsághírek a teljesen alaptalan ok-okozati összefüggések felvetésének kategóriájába tartoznak. (Ezzel persze nem az urán katonai alkalmazását kívánjuk propagálni...)

A hulladék-elhelyezés problémáját elsősorban ezek az úgynevezett transzuránok (a periódusos rendszerben az uránon túli elemek) jelentik. A hasadványok között ugyanis nagyon kevés, és kis mennyiségben keletkező kivételtől eltekintve a néhány évtizedes felezési idők okozzák a fő gondot ( ${}^{137}\text{Cs}$ ,  ${}^{90}\text{Sr}$ ), így néhány száz évre való biztonságos eltemetés ezt a kérdést már rendezni tudja.

A transzuránok miatt kell elsősorban olyan tároló helyet kialakítani és ahhoz megfelelő geológiai formációt találni, amely több tízezer vagy akár még több évig is biztonságos.

Sajnos a nukleáris hulladékkal az a baj, hogy a radioaktivitást nem lehet gyorsítani, lassítani, esetleg semlegesíteni, mégis, a transzuránok megsemmisítésének megoldása valami ilyesmi. Ugyanis azon az elven, ahogy a  ${}^{235}\text{U}$  magok neutronok hatására elhasíthatók, ugyanezt megtehetjük más nehézelemekkel is, így az összes transzuránnal is. A keletkező hasadványmagok már „csak” béta-sugárzók, töredéknyi felezési idővel. Tehát nem kell mást tennünk, mint a transzuránokat visszajuttatni a reaktorba és hagyni, hogy a láncreakcióban keletkező neutronok lassan „elhasogassák” őket. Ezt a vázolt eljárást nevezik transzmutációnak. Hátránya, hogy feltételezi a transzuránok kémiai elválasztását a kiegészített fűtőelemekben lévő hasadványoktól. Ez persze nem veszélytelen eljárás az óriási radioaktivitás miatt. Ennek el-

lenére ezek a technológiák léteznek, még ha el is kell ismerni, hogy kidolgozásukat bizony nem a civil alkalmazások motiválták, hanem az atombombához szükséges plutónium kinyerése.

A transzmutáció tehát a nagy aktivitású hulladékok egyik legnagyobb problémáját képes orvosolni. Ipari méretekben ezt még nem alkalmazzák, aminek egyszerű oka van: nagy aktivitású hulladékból rendkívül kis mennyiség keletkezik, ha összehasonlítjuk például a kőszén elégetése után visszamaradó salak mennyiségével. Érdekes összevetni, hogy az Európai Unióban 1 év alatt mintegy 240 m<sup>3</sup> nagy aktivitású hulladék keletkezik. Az összes radioaktív hulladék mennyisége 40 000 m<sup>3</sup>, míg az összes ipari hulladék mennyisége 2 milliárd (!) m<sup>3</sup>, amiből sokmillió tonna a toxikus hulladék.

Egy paksi reaktorban 42 tonna nukleáris fűtőanyag van urántartalmú kerámiapasztillák formájában, és ebből körülbelül 3 év múltán lesz nagy aktivitású hulladék (kiégett fűtőelem). Az ilyen sebességgel keletkező nagy aktivitású hulladékot még jól lehet kezelni, és az 50 éves tárolási kényszer miatt az eltemetés kérdése jócskán kitolódik időben. Nem véletlen, hogy hazánkban sem épült még hulladéktároló nagy aktivitású nukleáris hulladék végleges eltemetésére annak ellenére, hogy a múltbéli szovjet/ orosz hulladék visszaszállítására többé nem számíthatunk biztonssággal. (Jelenleg 2047-re tervezik egy esetleges nagy aktivitású végleges tároló kiépítését a Nyugat-Mecsekben.)<sup>2</sup>

Az úgynevezett kis és közepes aktivitású hulladék mennyisége ennél jóval nagyobb, de ezekben nincsenek transzuránok, így a végleges elhelyezés kérdése sokkal egyszerűbb. Ilyen „atomtemető” van hazánkban Püspökszilágyiban és épül Bátaapátiban.

## A reaktorok generációi, új fejlesztések

A biztonság növelésének egyik legcélszerűbb eszköze a folyamatos fejlesztés. Ez megvalósult a nukleáris energiatermelésben is, de paradox módon az új fejlesztések gyakorlatba való átültetése folyamatos késében van a nagy mértékű társadalmi ellenérzés miatt.

Az atomreaktoroknak négy generációjáról szokás beszélni. Az első generációs reaktorok tervezett üzemideje már lejárt, így már szinte az összes ilyen reaktort leállították. Ezek biztonságára még rányomta bélyegét a hidegháború és az évtizedekkel ezelőtti érthetően primitívebb technológiai szint.

A második generációs reaktorok már jóval szigorúbb biztonsági kritériumoknak tesznek eleget, ilyeneket építettek a hatvanas évektől a nyolcvanas évekig. Ide tartoznak a paksi reaktorok is.



A harmadik generációs reaktorok a második generációsak továbbfejlesztett változatai, elsősorban mennyiségi mutatókban jobbak a megelőző típusoknál. Bevezetésüket a csernobili baleset okozta sokk gátolta leginkább. Mindeközben folytak kutatások, amelyek minőségileg új reaktortípusok kifejlesztését célozták és így számos reaktorfajtát terveztek, amelyek minőségi változást jelentenek abban az értelemben, hogy az energiatermelés bizonyos szegmensei teljesen újszerűek. Ezeket célszerű példákon illusztrálni.

- A nátriumhűtéses gyorsreaktor (ez tehát nem lassított neutronokkal üzemel, és az elsődleges hűtőközege nem víz, hanem folyékony nátrium) energiatermelés mellett alkalmas nagy aktivitású transzuránok, köztük a plutónium „elégítésére”. Segítségével a leszerelt nukleáris fegyverekben lévő plutóniumtól lehetne „megszabadulni”, ráadásul úgy, hogy közben energiát termelünk.
- A magas hőmérsékletű gázhűtéses termikus reaktor (grafittal lassított neutronokkal üzemel, de az első hűtőkör nem víz, hanem például hélium gáz) a magas hőmérséklet miatt sokkal jobb hatásfokú elektromosenergia-termelést tesz lehetővé. A magas hőmérsékleten előálló hő kémiai reakciókban is felhasználható (például szén elgázosítása).
- A szuperkritikus vízzel hűtött reaktorban (221 atm és 374°C fölötti víz) ugyancsak az energiaátalakítás jó hatásfoka a fő vonzerő.
- Az ólom-bizmut hűtésű gyorsreaktor a szovjet atom-tengeralattjárók reaktorain szerzett tapasztalatokra épül. Viszonylag kicsi a teljesítménye, elszigetelt energiahálózatok kiszolgálására ideális, szintén alkalmas transzmutációs célra.
- A gázhűtéses gyorsreaktor a már említett termikus megfelelőjéhez hasonlóan a nagy kilépési hőmérséklet miatt vonzó. Energiaátalakítási hatásfoka akár 48% is lehet (a jelenlegi 30% körüli értékekhez képest!).
- Az olvadékhűtéses reaktorban urán vagy plutónium-fluorid olvadéka a hűtőközeg és az üzemanyag egyben. Alkalmas a transzuránok átalakítására.

A felsorolt reaktortípusok jelenleg különböző fejlesztési stádiumban vannak, üzembeállításuk 10-15 év múlva reális.

A ma használt és az imént felsorolt tervezett reaktortípusok közös jellemzője, hogy bennük annyi nukleáris fűtőanyagot (többnyire uránt) helyeznek el, hogy szabályzórudak nélkül a láncreakció azonnal elindulna. Ezért mindig fennáll a veszélye az úgynevezett megszaladásnak, amikor is a láncreakció túlságosan felgyorsul. (Ennek szélsőséges esete volt Csernobil.) Ennek teljes kiküszöbölésére is léteznek megoldási javaslatok.

Egy közönséges reaktorban az ott lévő urán mennyisége biztosítja, hogy a láncreakcióban kellő számú neutron keletkezhesen, hogy az önfenntartóvá válhasson („kritikus tömeg”). De elképzelhető, hogy nem rakunk be a reaktorba annyi uránt, amennyi a kritikussághoz kell, hanem a kritikussá váláshoz egy független neutron-

forrást használunk. Ilyen eszköz lehet például az úgynevezett spallációs reakció. Ez nem jelent mást, minthogy egy nehéz atommagot, például wolfrámot, de akár transzuránokat, nagy energiájú protonokkal (azért protonokkal, mert azok elektromosan töltött részecskék és könnyű őket jól felgyorsítani) egyszerre több darabra lövünk szét. A gyorsított protonok energiája a hasadási neutronok energiájának többszázszorosa kell, hogy legyen. Ekkor, mivel a közönséges maghasadáshoz képest kettő helyett sok kisebb atommag keletkezik, az ezekben hirtelen előálló még nagyobb neutronfelesleg jóval több, 2-3 helyett akár 30-40 neutron felszabadulásával jár. Ezek a neutronok mintegy pótolják a kritikussághoz hiányzó uránmennyiséget. Egy ilyen reaktorban tehát nincs szükség szabályzórudakra, a protonnyaláb intenzitásával szabályozható a láncreakció. A protonnyaláb kikapcsolásakor a reaktor azonnal leáll. Csernobili típusú baleset nem lehetséges.

Persze ehhez a reaktorhoz kell egy protongyorsító, ami se nem egyszerű, se nem olcsó és még energiát is fogyaszt. Az ötletadó Carlo Rubbia Nobel-díjas fizikus szerint azonban az egész rendszer megvalósítható, energiatermelésre alkalmas (bár nyilván a jelenlegi reaktoroknál drágábban).

## Fúziós energia

A Carlo Rubbia-féle spallációs reaktor példája mutatja, hogy ha növelni akarjuk a biztonságot, akkor az a befektetendő tudásmennyiség növekedését vonja maga után. A protongyorsítóval kombinált energiatermelő rendszer megépítése és üzemeltetése sokkal magasabb szintű szakértelmet kíván, mint egy hagyományos atomreaktoré.

Itt érdemes föltétlen megemlíteni, hogy a neutronokkal kiváltott, láncreakcióban megvalósítható maghasadás önmagában nem jelenti azt, hogy ennek felhasználásával biztonságosan üzemeltethető atomreaktor építhetünk. Érdekes módon a maghasadás folyamán felszabaduló, mintegy mindössze fél százaléknyi úgynevezett késő neutron teszi lehetővé, hogy a láncreakció olyan időskálán menjen végbe, hogy az ettől szabályozható lesz. A késő neutronok nélkül ma valószínűleg csak atombombák léteznének. Nyugodtan nevezhetjük őket a Természet ajándékának.

Ahogy korábban említettük, a másik (és tömegegységre vonatkoztatva a maghasadáshoz képest sokszorosan több energiát felszabadító) nukleáris energiaforrás a magfúzió. A kérdés legegyszerűbb megfogalmazása: hogyan hozzuk le a Napot a Földre, kicsiben. Azaz, hogyan lehetne földi körülmények között a napban zajló reakciókat megvalósítani és azt energiatermelésre felhasználni? A tény, hogy a hidrogénbomba alig fiatalabb találmány az atombombánál (Teller Edének köszönhetően), miközben atomreaktorok régen léteznek, de fúziós reaktor még mindig nem, azt mutatja, hogy ebben az esetben a Természet nem olyan kegyes hozzánk, mint a késő neutronokkal. A fúziós reaktor megvalósítása körülbelül 50 éves kutatási periódusra

tekint vissza, és ma sem kecsegtetnek az ezen a területen dolgozók 30 évnél rövidebb időn belüli megvalósulással.

A reaktorban megvalósítandó magreakció (magfúzió) egyszerű: egy deutérium- és egy tríciummag héliummá alakul, miközben egy neutron felszabadul. Hogy miért éppen ezt a reakciót valósítják meg a sok lehetséges közül, annak megvannak az itt nem részletezhető magfizikai okai. A technológiai nehézségeket szemléltetendő a következőket érdemes megemlíteni. A fúziós reakciót plazma állapotú közegben lehet megvalósítani, amihez az ionizált trícium-deutérium gázkeveréket a „begyújtáshoz” körülbelül százmillió fokos hőmérsékletre kell hevíteni (a Nap belsejében 20 millió fok van). Utána ezt a fúziós plazmát fenn kell tartani, ami nem egyszerű, mert ha hozzáér a berendezés falához, akkor azonnal lehül. Ennek megakadályozására a plazmát – kihasználva, hogy elektromosan töltött részecskék alkotják – erős mágneses terekkel tartják össze egy speciális, többnyire úgynevezett TOKAMAK típusú berendezésben. Az erős mágneses teret csak szupravezető mágnesekkel lehet előállítani, amelyek viszont csak az abszolút nulla fok fölött alig néhány fokkal működnek. A 100 millió fokos és a közel abszolút nulla fokos tér távolsága a berendezésben mindössze néhányszor tíz centiméter!

Olyan anyagot kellett találni a reaktor falának, ami kibírja a hatalmas sugárzási és hőterhelést (ez a wolfrám). Meg kellett oldani a trícium folyamatos termelését (ami a deutériummal ellentétben természetben nem megtalálható radioaktív izotóp); erre egy a lítiummal való magreakciót találtak alkalmasnak.

Évtizedekig tartott, amíg a fúziós reakciót kezdetben milliomod-, majd ezred-, tizedmásodpercig tudták csak fenntartani. Ezeken túllépve mára elmondható, hogy a folyamatos fúzió megvalósítható. Franciaországban fog hamarosan felépülni az a kísérleti berendezés, amely az első demonstrációs fúziós reaktor közvetlen előfutára lesz (ITER Project).

A plazma tulajdonságaiból adódik, hogy a sugárzásos hőveszteség miatt nem lehet akármilyen kis fúziós reaktort építeni. A legkisebb teljesítményű reaktor is körülbelül háromszor akkora teljesítményű lesz, mint a paksi reaktorok.

A fúziós reaktor megvalósítása tehát igen nehéz, de megéri a ráfordítást, mivel igen jelentős előnyökkel rendelkezik a hagyományos, maghasadáson alapuló energiatermeléssel szemben. Az üzemanyag nem radioaktív és gyakorlatilag korlátlan mennyiségben rendelkezésre áll (a vízben lévő deutérium, azaz nehézhidrogén). Maga a magreakció nem termel radioaktív izotópokat, csak a ciklusból óhatatlanul megszökő tríciummal kell számolni, ami viszont a legkevésbé veszélyes ismert radioizotóp és a felezési ideje is kellően rövid (12,3 év). A reaktor falát érő neutronsugárzás miatt keletkeznek ugyan további radioizotópok nemkívánatos szennyezőként, de ezek mennyisége is messze eltér a mai reaktorokból kikerülőkhöz képest.

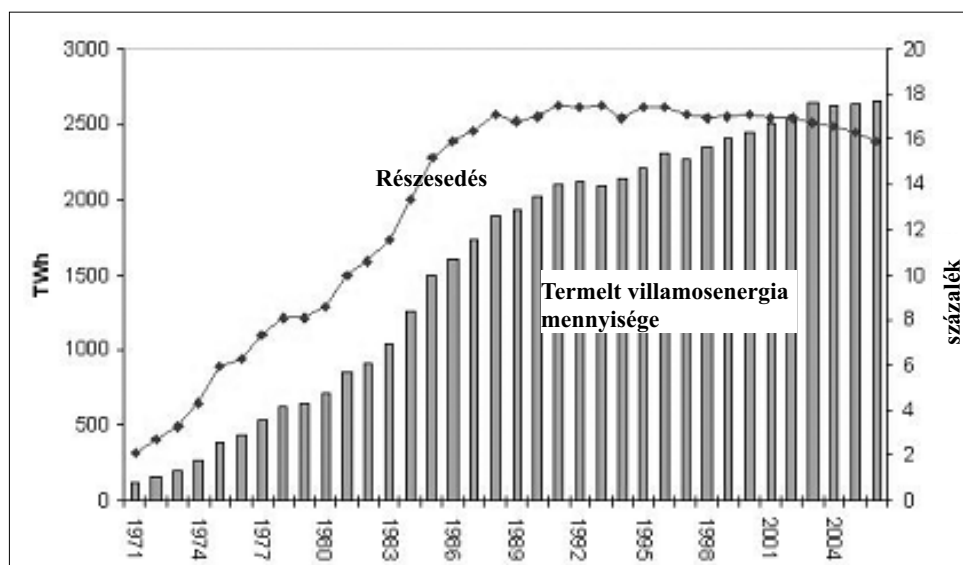
## Nukleáris energia és az úgynevezett alternatív energiaforrások

Az ismert és megtapasztalt veszélyek miatt érthető módon – és helyesen – indultak meg törekvések a nukleáris energiatermelés kiváltására. Már korábban láttuk, hogy mindezen energiaforrások eredete végső soron ugyancsak nukleáris. Most csak arra utalunk vissza, hogy ha a mennyiségi szempontokat is figyelembe vesszük, akkor ezeket az alternatív energiaforrásokat sokkal célszerűbb kiegészítő energiaforrásoknak hívni. Ugyanis másodlagos források lévén soha nem versenyezhetnek akár a hagyományos maghasadásos és különösen nem a reménybeli fúziós reaktorok teljesítményével.

Néhány esetben mindenféle műszaki ismertek nélkül is rá lehet világítani ennek az igazságtartalmára. Például a ma oly népszerű szélenergiaforrásról szólva eszünkbe kell, hogy jusson: szélmalmok már a középkorban is léteztek. Ha olyan olcsón és jó hatásfokkal tudnánk ezekkel energiát termelni, akkor miért nyúltunk más eszközökhöz? Természetesen nem célunk a helyzet bagatellizálása, a szélenergiaforrásoknak is megvan a helyük, bizonyos helyeken adott lokális meteorológiai és földrajzi környezetben ez lehet a célszerű megoldás.

A realitások azonban árnyaltabb képet mutatnak. Az 1. ábra bemutatja a világ villamosenergia-termelését és abban a nukleáris részarányt.

**1. ábra. A világ nukleáris villamosenergia-termelése és a villamosenergia-termelésben való nukleáris részesedés. (TWh = terawattóra, azaz milliárd kilowattóra)**



Forrás: <http://www.uic.com.au/nip07.htm>.

Az látható, hogy még az utóbbi években is nőtt az abszolút termelés, bár a részesedés valamelyest visszaesett. Sajnos a visszaesés kompenzációja elsősorban a fosszilis tüzelőanyagok égetéséből származik, amit nem lehet sokáig büntetlenül csinálni. Ha lehet, még beszédesebb a 2. táblázat, amely országokra lebontva mutatja nemcsak a működő, de az épülő, tervezés alatt és tervbe vett reaktorokat is.

**2. táblázat. Működő, épülő, tervezés alatt lévő és tervbe vett atomreaktorok a világban az illető országban jelenleg érvényes százalékos villamosenergiatermelés-részesedés sorrendjében. (MWe = elektromos teljesítmény megawattban.)**

	Nukleáris villamosenergiatermelés 2006		Működő reaktorok 2007. aug.		Épülő reaktorok 2007. aug.		Tervezés alatt lévő reaktorok 2007. aug.		Tervebe vett reaktorok 2007. aug.	
	Milliárd kWh	%-os részesedés	db	MWe	db	MWe	db	MWe	db	MWe
Franciaország	428,7	78	59	63 473	1	1 630	0	0	1	1 600
Litvánia	8,0	69	1	1 185	0	0	0	0	2	3 200
Szlovákia	16,6	57	5	2 064	2	840	0	0	0	0
Belgium	44,3	54	7	5 728	0	0	0	0	0	0
Svédország	65,1	48	10	9 086	0	0	0	0	0	0
Ukrajna	84,8	48	15	13 168	0	0	2	1 900	20	27 000
Bulgária	18,1	44	2	1 906	0	0	2	1 900	0	0
Örményország	2,4	42	1	376	0	0	0	0	1	1 000
Szlovénia	5,3	40	1	696	0	0	0	0	1	1 000
Dél-Korea	141,2	39	20	17 533	3	3 000	5	6 600	0	0
Magyarország	12,5	38	4	1 826	0	0	0	0	2	2 000
Svájc	26,4	37	5	3 220	0	0	0	0	1	1 000
Németország	158,7	32	17	20 339	0	0	0	0	0	0
Csehország	24,5	31	6	3 472	0	0	0	0	2	1 900
Japán	291,5	30	55	47 577	2	2 285	11	14 945	1	1 100
Finnország	22,0	28	4	2 696	1	1 600	0	0	1	1 000
Tajvan	38,3	20	6	4 884	2	2 600	0	0	0	0
Spanyolország	57,4	20	8	7 442	0	0	0	0	0	0
USA	787,2	19	104	99 049	0	0	7	10 180	25	32 000
Nagy-Britannia	69,2	18	19	11 035	0	0	0	0	0	0
Kanada*	92,4	16	18	12 595	2	1 540	4	4 000	2	2 200
Oroszország	144,3	16	31	21 743	7	4 920	7	7 800	18	21 600
Argentína	7,2	6,9	2	935	1	692	1	740	1	740
Mexikó	10,4	4,9	2	1 310	0	0	0	0	2	2 000
Kína	51,8	1,9	11	8 587	5	4 540	26	27 640	88	72 000
Pakisztán	2,6	2,7	2	400	1	300	2	600	2	2 000
Románia	5,2	9,0	2	1 310	0	0	2	1 310	1	655
India	15,6	2,6	17	3 779	6	2 976	4	2 800	15	11 100

	Nukleáris villamosenergia-termelés 2006		Működő reaktorok 2007. aug.		Épülő reaktorok 2007. aug.		Tervezés alatt lévő reaktorok 2007. aug.		Tervebe vett reaktorok 2007. aug.	
Hollandia	3,3	3,5	1	485	0	0	0	0	0	0
Dél-Afrika	10,1	4,4	2	1 842	0	0	1	165	24	4 000
Brazília	13,0	3,3	2	1 901	0	0	1	1 245	4	4 000
Egyiptom	0	0	0	0	0	0	0	0	1	600
Indonézia	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2 000
Irán	0	0	0	0	1	915	2	1 900	3	2 850
Izrael	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1 200
Kazahsztán	0	0	0	0	0	0	0	0	1	300
Észak-Korea	0	0	0	0	0	0	1	950	0	0
Törökország	0	0	0	0	0	0	3	4 500	0	0
Vietnám	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2 000
<b>Világ</b>	<b>2658,0</b>	<b>16</b>	<b>439</b>	<b>372 002</b>	<b>34</b>	<b>27 838</b>	<b>81</b>	<b>89 175</b>	<b>223</b>	<b>200 445</b>

Forrás: <http://www.world-nuclear.org/info/reactors.html> (World Nuclear Association)

Az épülő és a tervezett reaktor-kapacitásokat áttekintve megállapítható, hogy nem úgy áll tehát a dolog, hogy az egyes államok különösképpen visszafognák magukat e téren (lásd különösen Kína, India, Oroszország, Ukrajna, USA), inkább meghajlanak az energiaéhség szorításában a leghatékonyabb és üvegházhatást garantáltan nem okozó módszert vetik be dacára a rizikónak, nukleáris hulladéknak és a társadalmi el-lenállásnak.

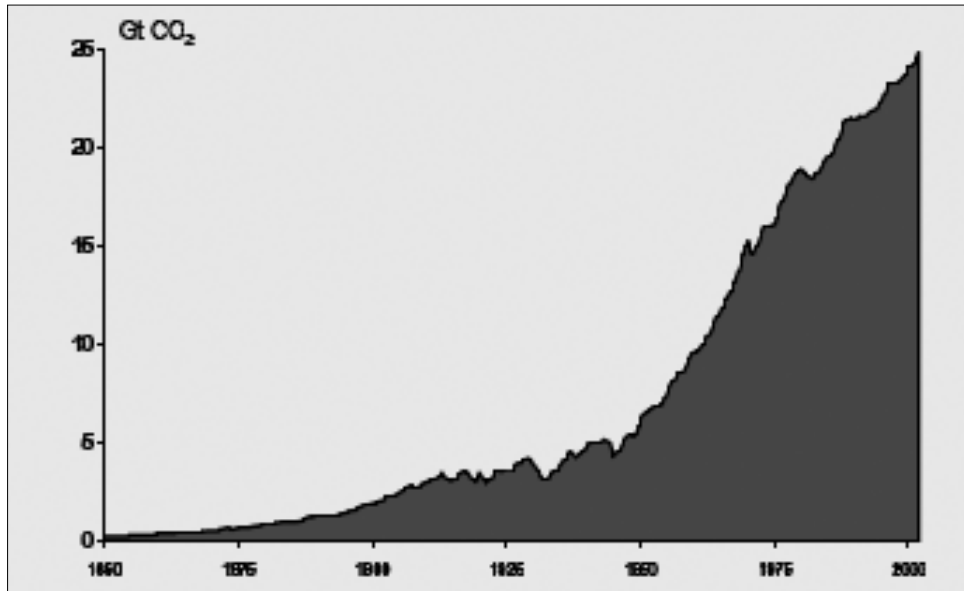
Ezzel el is érkeztünk egy rendkívül fontos problémához, amiben a nukleáris energiatermelés kétségtelenül pozitív: egyáltalán nem termel üvegházhatást okozó gázokat. Az üvegházhatás létezik, a Földünk klímája melegszik, ezt már nagyon kevesen vonják kétségbe. Azt is elismerik, hogy az ember tevékenysége hozzájárul a melegedéshez, csak a mértéke lehet már vita tárgya. Ha rátekintünk a 2. és 3. ábrára, akkor viszont érthetővé válik, hogy józan szakértők már a vészharangot kongatják. A széndioxid-kibocsátás és a hőmérséklet-emelkedés közötti párhuzam egyértelmű.

A klímaváltozás (hőmérséklet-emelkedés) problémájával a Stern-jelentés<sup>3</sup> foglalkozott részletesen, és ennek már politikai hatásait is érezni lehet elsősorban a kiotói megállapodások<sup>4</sup> komolyabban vétele, a széndioxid kibocsátási kvóták adásvételével kapcsolatos legfelsőbb szintű bilaterális és multilaterális tárgyalások megélénkülése formájában.

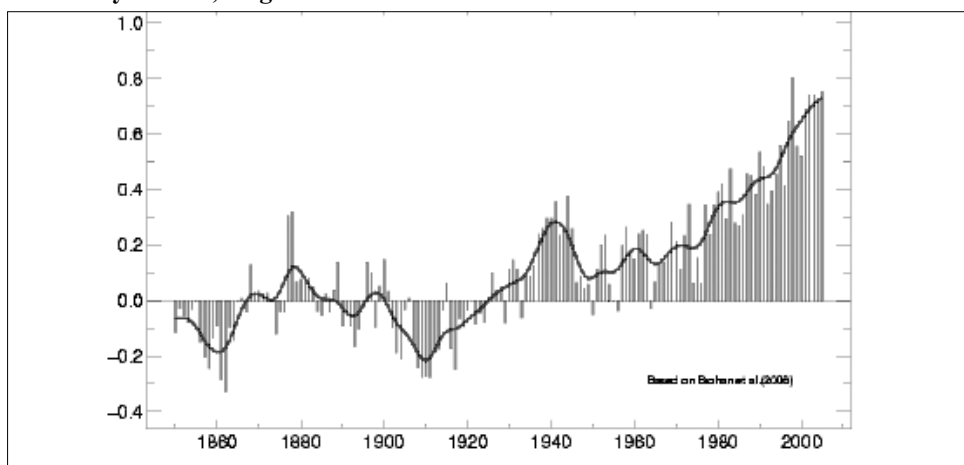
A jelentés megállapítja, hogy a globális széndioxid-kibocsátást hosszú távon 5 Gt/év-en kell stabilizálni, mert ezt a mennyiséget képesek a Földön a természetes széndioxid-fogyasztó folyamatok feldolgozni. Ez egy hihetetlenül komoly elhatározást igényel, mivel ez a szint a jelenlegi kibocsátásnak mindössze 20%-a. 2050-re el kellene érni a jelenlegi szint 75%-át. Minél később kezdjük el redukálni az emissziót, annál nehezebben elviselhetőek lesznek a később kényszerűen meghozandó intézke-

dések. Az világos – a jelentés szerint -, hogy az időben meghozott ellenintézkedések jóval kevesebbe kerülnének, mint a felmelegedés okozta hatások elhárítása.

**2. ábra. A világ fosszilizüzelőanyag-égetéséből és a cementgyártásból származó éves széndioxid-kibocsátása 1850-től napjainkig (gigatonnában). (Forrás: Climate Analysis Indicator Tool, Washington DC, World Resources Institute, 2006)**



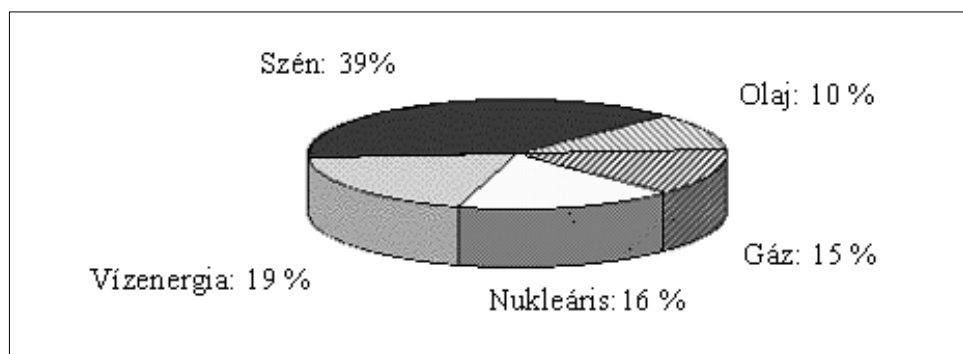
**3. ábra. A globális átlagos felszínközeli hőmérséklet eltérése az 1861 és 1900 közötti átlagtól. Forrás: Hadley Center for Climate Prediction and Research and CRU, University of East, Anglia.**



Ha megnézzük a világon termelt villamosenergia forrásait (4. ábra), akkor látható, hogy óriási mennyiség származik kőolaj, földgáz és kőszén elégetéséből. Ilyen óriási mennyiség pótlása (64%) meglehetősen rövid időn belül elképzelhetetlennek tűnik a nukleáris energiatermelésnek nemhogy nem csökkenő volumene, de erősen emelkedő részesedése nélkül.

#### 4. ábra. A világ villamosenergia-termelésének források szerinti megoszlása

Forrás: <http://www.uic.com.au/nip07.htm>.



A mérvadó szakemberek által már korábban soha kétségbe nem vont tendenciák határára felgyorsultak az energetikai útkeresések. A Bécsben 2007 júniusában rendezett „2nd IAEA Technical Meeting on First Generation of Fusion Power Plants: Design & Technology” (A Nemzetközi Atomenergia Ügynökség által szervezett 2. Munkaértekezlet a Fúziós Erőművekről: Tervezés és Technológia) tanácskozáson, amely fúziós energiatermeléssel kapcsolatos kutatások és fejlesztések áttekintését célozta, kiderült, hogy a fenyegető környezeti és energiaválság hatására az európai elképzelések egy „Fast Track” azaz gyorsított menetrendet tételeznek fel, amely a most kezdődő ITER-projekt és a tényleges kereskedelmi fúziós erőművek között mindössze egyetlen lépést képzel el, egy demonstrációs energetikai reaktor felépítését. Még ez a gyorsított ütem is mostantól számolva minimum 37 évet tervez az első tényleges fúziós reaktor elindulásáig. (Ebből 8 év az ITER Projekt elkészülte, 19 év az ITER működtetése és 10 év a demonstrációs reaktor működtetése.) Látván, hogy már ez is túl késő, előadás hangzottel egy ultragyors ütemtervről is.

Figyelemreméltó, hogy a konferencián résztvevő Songtau Wu (Kína) olyan tervekről számolt be, amelyek szerint 2020 és 2030 között Kínában már egy kombinált fúziós-maghasadási kísérleti reaktort üzemeltetnének<sup>5</sup>, és 2050-ben pedig valódi fúziós erőművek épülnének. Ez egyrészt megfelel a legoptimálisabb európai elképzeléseknek, és túl is megy azon, azáltal, hogy a hagyományos és a fúziós atomreaktort kombinálja (elveszítve persze ez által a fúziós reaktor „tisztaságát”).



## Társadalmi és politikai megfontolások

Az eddigiek fényében és a Stern-jelentés által megkongatott vészharang azt erősíti, hogy szó sem lehet a nukleáris energiatermelés leállításáról, sőt, ha még sikerülne is időben beindítani a tiszta energiát szolgáltató fúziós erőműveket, akkor is és addig is felkell tételezni a jelenlegi atomreaktorok folyamatos üzemét és újabbak építését.

Ennek elkerülése csak akkor lenne lehetséges, ha az energiaéhség valahogy csökkenthető lenne. Erre azonban elsősorban Kína és India ijesztően gyors gazdasági fejlődése és a populáció növekedése miatt vajmi kevés esély van. Nem is nagyon vehető e két ország lakóinak szemére, hogy végre ők is szeretnék egy kicsit jobban élni, hiszen az mélységesen igazságtalan lenne, ha ők azért lennének kénytelenek lemondani egy magasabb életszínvonalról, mert más országok a saját magas életszínvonaluk megteremtésével és fenntartásával párhuzamosan végletesen elszennyezték a légkört széndioxiddal.

Maradna tehát az, hogy a fejlett országok valamiféle önmegtartóztatást tanúsítsanak. Ennek esélyeire hadd hozzak két személyes példát (HZ).

Egy amerikai ismerősöm érdekes dolgot mesélt az utóbbi években divatos városi terepjáró autómotromokról. Elmondása szerint Amerikában az autók fogyasztására régóta létezik a fogyasztók fejében egy bűvös szám: az autó legyen képes megtenni 25 mérföldet 1 gallon benzinnel (kb. 9,5 l/100 km). A kívánatos az lenne, hogy a fogyasztást csökkentsék, ami meg is történik, legalábbis a motorokat illetően. Tehát a motorok a fejlesztések során egyre takarékosabbá váltak. Mi erre az amerikai válasz? Egyre nagyobb autókat építenek. Tehát eszük ágában sincs az energiafogyasztást mérsékelni!

A másik történet hasonlóan elgondolkodtató. 2005 nyarán volt szerencsém egy hetet eltölteni egy floridai üdülőfaluban. Az apartman csodálatos volt, és kezembe került a helyi házirend. Elképedve olvastam, hogy ha a törülközőt vagy a ruháimat az erkélyen kitergetve szárítom, akkor 100 dollárnyi büntetésnek nézek elébe. A mosókonyhában ott a szárítógép, azt kell használni! Hogy is van ez? Nem szabad a Nap és a szél energiáját (alternatív energiaforrásként) közvetlenül hasznosítani ruhaszárításra? Inkább kapcsoljam be a szárítógépet, amit olyan elektromos áram hajt, aminek kb. 20%-át atomerőművekben állítják elő az USA-ban?

Mindkét eset azt bizonyítja, hogy nem reális arra számítani, hogy az emberek józan megfontolásból önmérsékletet tanúsítsanak. Hiszen éppen a leggazdagabb államok – amelyek részéről egy általuk alig érezhető lemondás is lényegesen hozzájárulhatna a globális problémák enyhítéséhez – nem teszik meg a megfelelő lépéseket. (Lásd Bush elnök korábbi nyilatkozatát a Kiotói Egyezményrel kapcsolatban, miszerint számára fontosabb az amerikai adófizetők életszínvonala, mint a globális felmelegedés problémája – csak tartalmilag idéztük.) Tehát gátlástalanul fogyasztunk. Energiát, anyagot, mindent, amihez csak hozzáférünk. A helyzet politikai

megoldást követel, de kérdés, hogy lesznek-e elég bátor politikusok, akik érdemi lépéseket mernek tenni.

Az elmondottakból az is következik, hogy kockázatosabb a nukleáris energetikai fejlesztések ellen dolgozni, hiszen nem látszik reális megoldás *nagy mennyiségű* energia gyors előteremtésére üvegházhatású gázok kibocsátása nélkül. És egy másik aspektus: lehet, hogy az antinukleáris mozgalmak egyszer majd sikeresen leállítatnak minden atomerőművet (tekintsünk most el attól, hogy közben minden biztonnyal tönkremennénk), ugyanakkor: komolyan gondolhatja azt valaki, hogy a katonai komplexumok valaha is lemondanak a nukleáris arzenál fenntartásáról? Ez igen valószínűtlen és naiv feltételezés. A nukleáris robbanófejek száma ugyan a világban ma csökken (higgyük azt), de a nukleáris hatalmak száma a szemünk előtt növekszik! És ki akar egyszer majd olyan világban élni, ahol csak a katonák értenek a nukleáris technológiákhoz?

Tudomásul kell venni, hogy az emberiség a technológiai fejlődéssel egyfajta egyirányú utcába kényszeríti saját magát, ahonnan csak az előremenekülés lehetséges. A megalkotott és bebetonozódó technológiákról nem lehet csak úgy lemondani, mert az gazdasági összeomláshoz vezetne. És sajnos minél magasabbra törünk, onnan annál nagyobbat lehet zuhanni. A magas életszínvonal maga egy óriási potenciális kockázat, és ebben benne van a nukleáris energiatermeléssel járó kockázat is. E kockázat csökkentésének a legjobb módja, ha az embereknek természettudományokat és műszaki ismereteket oktattunk. Meggyőződésem, hogy ez a lehető „legzöldebb” politika. Ugyanis minél inkább kiszolgáltatjuk magunkat az általunk teremtett technikai infrastruktúrának (utak, járművek, számítógépek stb.), az emberek annál nagyobb hányadának kell tisztában lennie bizonyos természettudományos és műszaki ismeretekkel. Máskülönben populista politikusok által félrevezetett tömegek fognak sorozatosan rossz döntéseket kikényszeríteni az adott politikai döntéshozóktól. Különösen fontos a nukleáris tudományokban felhalmozott tudás megőrzése és bővítése. Nincs annál veszélyesebb, mintha dilettánsok kényszerülnek üzemeltetni nukleáris létesítményeket.

## Magyarország helyzete

Ha hazánk helyzetét tekintjük, akkor abból a jól ismert tényből célszerű kiindulni, miszerint a hazai villamosenergia-termelésben a nukleáris részarány körülbelül 39%.

Lehetséges volna erről pusztán a biztonsági aggályok miatt lemondani? Magyarországnak lényegében nincsenek energiahordozói. Tehát energiát valamilyen formában vásárolnunk kell, ha tetszik, ha nem. A gáz és a kőolaj csak egyre drágább lesz, és abból sokat kell szállítani és folyamatosan (lásd az európai félelmeket az orosz gázcsap elzárásától!). Esetleg szélenergia? Sajnos azzal az a baj, hogy nálunk

földrajzi fekvésünk miatt, nem fűj eléggé a szél. Napenergia? Sajnos nem süt eléggé a nap, és ha már süt, talán inkább érdemesebb növényeket termesztünk, mivel van elég csapadék is. Ez a módszer elsősorban sivatagi országoknak ajánlható (és hány sivatagi országban vannak tömegével naperőművek?). Igazán komolyan Magyarországon a geotermikus energiával mint alternatív/kiegészítő energiaforrással lenne érdemes foglalkozni abból az egyszerű megfontolásból, hogy az egész földgolyót figyelembe véve Magyarország alatt fekszik az egyik legvékonyabb a földkéreg, tehát nem kell túl mélyre fúrni egy kis hőenergia érdekében. Sajnos azonban a geotermikus erőművek építésének egyelőre igen komoly technológiai akadályai vannak (főleg a berendezések várható erős korróziója), ezért ez az alternatíva még középtávon sem reális.

Marad tehát az energiahordozó-import. Ha pedig már importálni kell, miért ne importáljuk azt, amivel a legolcsóbban lehet energiát termelni? Tehát uránt. Uránból a gázhoz, szénhez, kőolajhoz hasonlítva jelentéktelen mennyiségeket kell szállítani és nem folyamatosan. Tárolása hosszabb időszakban, olcsón megoldható!

Ráadásul a paksi áram a lehető legolcsóbb: például 2005-ben 8,32 Ft/kWh áron termelték, míg az utána következő legolcsóbb hazai forrás a Visontai Hőerőmű: 10,3 Ft/kWh, a földgáz alapú erőművek pedig még ennél is drágábban termeltek: 12-16 Ft/kWh (Forrás: Energia Hivatal 2005). Megjegyzendő, hogy van olyan új atomerőmű K-Európában, amely 6 Ft/kWh körüli költséget is produkált már.

Ha figyelembe vesszük, hogy Magyarországon 2030-ig mintegy 8000 MW új erőműi kapacitást kell megteremteni (ez négy darab mai „Paks”), akkor nehéz más következtetést levonni, minthogy Magyarország elemi érdeke középtávon a nukleáris energetikai szektor bővítése, azaz új atomreaktorok építése.

## Összefoglalás

A nukleáris energiatermelés jelenét és lehetséges jövőbeli szerepét áttekintve megállapítottuk, hogy a környezeti problémákat, elsősorban az üvegházhatást okozó gázok kibocsátását figyelembe véve a nukleáris energiatermelés összes veszélye kisebb, mint az arról való lemondás következményei. A nukleáris energiatermelés reálisan nem váltható ki „alternatív” energiaforrásokkal (nap, szél, geotermikus). Nem lehet arra számítani, hogy nyugodt gazdasági fejlődés mellett az energiaéhség számottevően csökkenne a világban, sőt annak az ellenkezője prognosztizálható. A világban középtávon kényszerű szükség van a nukleáris energiatermelésre, mint a leghatékonyabb energiatermelő eljárásra.

A nukleáris energiatermelés okozta veszélyek és kockázati tényezők ugyanakkor nem kerülhetők meg. Ezek leküzdésének, illetve csökkentésének a kulcsa a nukleáris tudományokban felgyűlt tudás megőrzése és bővítése, olyan szakembergárda fo-

lyamatos képzése és fenntartása, amely megnyugtató módon képes a nukleáris létesítmények üzemeltetésére. Ezzel párhuzamosan szükség van az egész lakosság tájékoztatására, illetve az iskolai tantervekben a megfelelő szintű természettudományos és műszaki oktatás biztosítására azért, hogy lehetőség szerint mindenki tudatában legyen az életszínvonal megőrzéséhez szükséges műszaki-technológiai tudás jelentőségének.

Magyarország helyzetére különösen igaz, hogy nukleáris energia nélkül gazdaságilag nagyon előnytelen helyzetbe kerülnénk. Számottevő mennyiségű energiahordozó-kincs nélkül a legkönnyebben importálható és legolcsóbb energiahordozóra érdemes építenünk. A megfelelő nukleáris szakembergárda fenntartására meg kell tenni a szükséges erőfeszítéseket. Ezzel és a megfelelő technológiákkal az üzemi kockázat minimálisra szorítható. Ebben a kérdésben a Paksi Atomerőmű működésének több évtizedes jó tapasztalata (még a 2003-as súlyos üzemzavar ellenére is) jogos optimizmusra adhat okot. A nukleáris hulladék elhelyezésére megvannak a módszerek, és van megfelelő geológiai helyszín.

Mindazonáltal a társadalmi elfogadottság jelentősen befolyásolja az energetikai beruházások sorsát, ezért óriási felelősség hárul a politikai döntéshozókra, hogy megfelelő tájékozottság birtokában, az egyes energiatermelési opciók előnyeit és hátrányait reálisan mérlegelve és a társadalmat lehetőség szerint érvekkkel meggyőzve hozzák meg a számunkra optimális döntést.

## Jegyzetek

- <sup>1</sup> Dr. Homonnay Zoltán, egyetemi tanár, ELTE; Dr. Varga Kálmán, egyetemi tanár, Pannon Egyetem.
- <sup>2</sup> Jelenleg is folynak a kutatások az úgynevezett Bodai Aleurolit Formáció (agyagkőfeleség) mint jövőbeni nagyon ígéretes nagy aktivitású hulladéktároló helyszínére vonatkozóan. Bővebben: <http://www.rhk.hu/tevekeny/projekt2.htm>
- <sup>3</sup> Egy körülbelül 700 oldalas átfogó tanulmány, ami a Brit Kormány megbízásából készült és 2006 októberében látott napvilágot Nicholas Stern közgazdász neve alatt.
- <sup>4</sup> A Kiotói Egyezmény 1997-ben született meg, célja az volt, hogy a fejlett ipari országok csökkentsék az atmoszférába bocsátott üvegházhatást okozó anyagok mennyiségét. A jegyzőkönyvet ratifikáló országoknak 2012-ig együttesen 5, 2%-kal kell(ene) csökkentenie a légkörbe bocsátott gázok mennyiségét az 1990-es állapothoz képest. Csak 2005-ben lépett hatályba, amikor az aláírók által képviselt széndioxid-kibocsátás elérte a globális érték 55 %-át. Az egyezményt a legnagyobb kibocsátó, az USA máig nem ratifikálta (Kína sem).
- <sup>5</sup> Ez egy olyan reaktor, ami egy fúziós térben termel neutronokat, amely neutronok az azt körülvevő szubkritikus hagyományos reaktor urántöltetében váltanak ki maghasadásos láncreakciót. Itt tehát a Carlo Rubbia-féle hibrid rendszer spallációs neutronforrását egy komplett fúziós reaktortér helyettesíti.