

Az utóbbi években egyre gyakrabban hallhatunk-olvashatunk arról, hogy „jó-jó, az atomerőművek segítenek a klímaváltozás korlátozásában, de – sajnos – kár ilyeneket építeni, hiszen alig van már a Földön műrevaló urán”. Példaként megemlítjük a *Népszabadság* 2010. január 8-án megjelent számát, amelyben két cikk is foglalkozik a kérdéssel (*Megatonnákból megawattok* és *Uránkeresők*). Egy külön dolgozatot lehetne írni a jelenség okairól, de ez nem illik ebbe a folyóiratba. Ide illik viszont a kérdés szakmai tárgyalása. Az említett cikkek lényege, hogy az atomenergia alkalmazásának újabban tapasztalható felélénkülése idején fennakadások lehetnek az atomerőművek fűtőelemekkel való ellátásában. Jelenleg az Egyesült Államokban a szovjet atomfegyverek egy részében található urán atomerőművi üzemanyaggá konvertálják, és amerikai reaktorokban elégetik. Erre utal a *Megatonnákból megawattok* cím. Ez az uránmennyiség is elfogy néhány éven belül. A szerző tehát levonja azt a következtetést, hogy nemcsak az eredeti uránlelőhelyek (vagyis a bányák) merülnek ki, hanem a másodlagos uránforrások is. Az idézett gondolatok sok tekintetben tévesek, és a végkövetkeztetés teljesen téves. Valójában a Földön annyi urán található, hogy az addig elegendő, ameddig szükség van rá, és itt évszázadokról, esetleg évezredekéről van szó. Az persze előfordulhat, hogy átmenetileg felszökik az uránár, amint ez néhány éve bekövetkezett, de ez az alábbiak érvényét nem befolyásolja. Sok függ azonban attól, milyen technológiát alkalmazunk. Ezért az uránkészletek áttekintése után az alkalmazott, illetve alkalmazható technológiákat tekintjük át.

Uránkészletek

Az 1980-as évek elején kereken ötmillió tonnára becsülték a Földön ismert és az akkori uránáron gazdaságosan kitermelhető uránkészleteket. Lényegesen korszerűbb és részletesebb adatokat találunk *Vajda György* 2004-ben megjelent könyvében,¹ ezért az alábbiakban erre támaszkodunk. Az urán *primordiális* radioaktív anyag, amely egy, a Naprendszer kialakulása előtt lezajlott szupernóva-robbanásban keletkezett, a Föld anyagában ezért szóródott szét egyenletesen. Átlagos koncentrációja 3–4 ppm.² Jelentős mennyiség található a tengervízben, ahol a koncentráció 3,3 ppb.² Bizonyos geokémiai folyamatok következtében vannak

helyek a Földön, ahol az urán feldúsult. Például a konvenció uránszurokban az U_3O_8 koncentrációja a 60%-ot is elérte. Ilyen gazdag telepek azonban ritkák, már a 0,1–0,3% koncentrációjú helyeket is műrevalónak tekintik. A hazai uránbányában a 0,1%-nál soványabb ércet is kitermelték – ráadásul 1000 m mélységből. Sok helyen az uránt egyéb bányák (arany, réz, olajpala, foszfát stb.) melléktermékeként is kitermelik.

A kitermelhető urán mennyiségét a kitermelés fajlagos költsége szerint szokás megadni. A bevett árkategóriák 25, 40, 80, 130 és 260 USD/kg urán. Az uránkészletekre vonatkozó adatok sokáig katonai titoknak minősültek, ami lassan megszűnik, de nem teljesen. Már csak emiatt is bizonytalanok az adatok. A 40 USD/kg költséggel kitermelhető urán mennyisége 1 Mt-ra³ becsülhető, ami zömmel Kanadában, Kínában és Dél-Afrikában található. A 40 és 130 USD/kg közötti költséggel feltárható ismert uránvagyon 3–4,5 Mt. Ehhez járul a még fel nem tárt, de közvetett indikációval valószínűsíthető urán, becsült mennyisége 4–6 Mt. Végül beszélhetünk még a 130 USD/kg-nál olcsóbban kitermelhető 10–12 Mt-ra becsült reménybeli uránvagyonról. Az utóbbit illetően megjegyezzük, hogy eddig a szárazföldek felszínének mindössze 8–10%-át kutatták meg uránra. Vannak még további, nem konvencionális készletek is. A legfontosabb a foszfátokban 50–200 ppm koncentrációban található urán, amelyet a műtrágyagyártás melléktermékeként 40–90 USD/kg költséggel lehetne kitermelni. Össztömege körülbelül 22 Mt. Végül megemlítjük a tengervizet: a benne található mintegy 4000 Mt urán 340 USD/kg költséggel lenne kitermelhető.

Fizikusok körében ismert, de a rend kedvéért megemlítjük, hogy az urán mindkét izotópjá felhasználható energiatermelésre.⁴ A 0,71%-ot kitevő ^{235}U tetszőleges energiájú neutronokra hasad. A túlnyomó részt kitevő ^{238}U csak 0,8 MeV-nél nagyobb energiájú neutronokra hasad, viszont neutronok hatására a jól hasadó ^{239}Pu -má alakul át. A reaktorban ez további neutronok hatására nehezebb plutóniumizotóppokká alakul át. A nehéz elemek között a páros rendszámú és páratlan tömegszámú izotópokat (^{235}U , ^{239}Pu stb.) hasadó izotópoknak, a páros rendszámú és páros tömegszámú izotópokat (például ^{238}U) pedig fertilis izotópoknak szoktuk nevezni. A természetben található még egy fontos fertilis izotóp, a ^{232}Th , amely ^{233}U -ná alakítható át. Jóllehet a tórium energetikai hasznosítása a gyakorlatban még nem indult meg, megemlítjük, hogy a tórium átlagos koncentrációja a Földön 12 ppm, vagy az uránénak mintegy háromszorosa. Általában a ritka földfémekkel keveredve található. Legfontosabb érce a monacithomok. Az ismert tóriumkészletek tömege 4 Mt-ra becsülhető

¹ Vajda György: *Energiellátás ma és holnap*. MTA Társadalomkutató Központ, Budapest, 2004.

² ppm = parts per million, az urán koncentrációja $3-4 \cdot 10^{-6}$. ppb = parts per billion vagyis 10^{-9} .

³ 1 Mt = 1 millió tonna.

⁴ A természetes uránban található egy harmadik, az ^{234}U izotóp is. Energetikai jelentősége nincs, ezért figyelmen kívül hagyjuk.



1. ábra. A Ranger külszíni uránbánya Ausztráliában.

zömmel Amerikában, Európában és Indiában. Tekintve, hogy a tóriumot még nem kutatták meg olyan mértékben sem, mint az uránt, a reménybeli készletek ennek sokszorosát tehetik ki.

A hasadóanyag-készletek nagyságának megítéléséhez két döntő szempontot kell figyelembe vennünk: (1) milyen technológiát alkalmazunk és (2) mennyi uránt fogyasztott el a nukleáris korszak elmúlt 60 éve. A technológia dönti el, milyen mértékben hasznosítjuk az ^{238}U -ban és a ^{232}Th -ban rejlő energiát. Ha ugyanis ezt a technikailag lehetséges mértékben tesszük, akkor a jelenlegi technológiához képest százszor több energiát nyerünk ki a Földön található uránból. Mit teszünk ugyanis jelenleg? Az uránt kis mértékben, 3–4%-ra dúsítjuk, és a reaktorban moderátort (H_2O , D_2O , grafit stb.) alkalmazunk. A reaktorból kirakott *kiegített fűtőelemeket* újrafeldolgozás nélkül eltemetjük.

Az urándúsítás

A Föld uránkészleteinek tényleges mennyiségét csak úgy tudjuk felmérni, hogy meggondoljuk, mit jelent – természetesen csak témánk szempontjából – az urán dúsítása. A gyakorlatban minden ezzel kezdődik: a reaktorokba bevitt friss üzemanyag dúsított urán, vagyis a kibányászott természetes urán csak dúsítás után juthat a fűtőelemgyárba. A dúsításra több módszer is ismeretes. Történelmileg legelőször a diffúziós eljárást alkalmazták: az uránt UF_6 gázzá alakítják, majd szivacsos szerkezetű keramikus anyagokon diffundáltatják át. Mivel az ^{235}U -t tartalmazó molekula kisebb tömegénél fogva gyorsabban diffundál, a túloldalon ebben az izotópban dúsabb gázt kapunk. Mintegy *tízezer fokozat* után elérhetjük a kívánt dúsítást. Az eredmény lehet akár teljesen dúsított urán is, amelyben az ^{235}U izotóp részaránya megközelíti a 100%-ot. Ez a művelet rendkívül költséges, óriási berendezéseket igényel. Nem cso-

da, hogy csak olyan országok építettek ilyen dúsítóművet, amelyek elsősorban katonai célra használták azt: Egyesült Államok, Franciaország és Szovjetunió. Mikor még Kína és a Szovjetunió baráti viszonyban voltak egymással, Kína kapott egy ilyen berendezést, amit nyilván továbbfejlesztett, és maga is atomhatalommá vált. Miután ezek a hatalmak legyártották az általuk szükségesnek tartott nukleáris fegyvereket, a dúsítóberendezéseket átállították polgári célokra. A legtöbb fűtőelemgyár diffúziós dúsítóművekre alapozza termékeit. Így válik érthetővé, hogy kevés országban találunk fűtőelemgyárakat.

Vannak más technikák is. Az egyik a lézeres módszer: az UF_6 molekula ionizációs energiája függ az atommag tömegétől. Ezt az izotópeffektust kihasználva el lehet érni, hogy egy jól beállított lézergyár csak az egyik fajta molekulát ionizálja, miközben a másik semleges marad. Ezután a két izotóp elektromágneses úton szétválasztható egymástól. A közelmúltban több közép-hatalom megpróbálkozott ezzel, de nemzetközi nyomásra elálltak ettől. A másik technika a centrifugálásos eljárás: egy ultracentrifugában az ^{238}U -t tartalmazó molekula a centrifuga külső szélén, a másik a közepén dúsul fel. Több ezer centrifuga sorba kapcsolásával a kívánt dúsítás elérhető. Ezzel már a németek is megpróbálkoztak a II. világháború alatt, de napjainkban is folyhatnak ilyen próbálkozások. Bár mindegyik technika mögé konkrét országneveket tehetnénk, a súlyos politikai összefüggések miatt ettől eltekintünk.

Akármelyik módszert alkalmazzuk is, néhány általános összefüggést felállíthatunk. A dúsítóműnek két terméke van: a kívánt dúsított urán és a maradék szegényített urán. A két termék tömegének összege megegyezik az eredetileg bevitt természetes urán tömegével. Ennek alapján egyszerűen megbecsülhetjük a két termék mennyiségét. Egységnyi tömegű természetes uránból indulunk ki: 1 tonnában van 7,1 kg ^{235}U és 992,9 kg ^{238}U . Az elérendő dúsítást e -vel jelöljük.⁵ Ha a kapott dúsított urán tömege m , akkor benne a két izotóp tömege: em ^{235}U és $(1-e)m$ ^{238}U . Ugyanez a maradék szegényített uránban: $7,1-em$, illetve $992,2-(1-e)m$. Végeredményben a szegényített urán dúsítása⁶

$$e_{sz} = \frac{7,1 - em}{992,9 - (1 - e)m}$$

⁵ Az angol enrichment = dúsítás szóból.

⁶ Függetlenül attól, hogy a természetes urán 0,71%-os ^{235}U -tartalmánál dúsabb vagy szegényebb, a ^{235}U részarányát dúsításnak nevezzük.

Ez nyilván nem lehet negatív, tehát $m \leq 7,1/e$. Példaként tekintjük a paksi atomerőművet, amelyben az átlagos dúsítás 3,82%, vagyis $e = 0,0382$, azaz $m \leq 185,7$ kg. A maradék szegényített urán dúsítása általában nem zérus, hanem 0,1–0,2%, tehát a kinyerhető dúsított urán tömege kisebb. Például 0,2%-nál $m = 134,2$ kg, amint képletünkben egyszerűen kiszámíthatjuk. Témánk szempontjából fontos, hogy a maradék szegényített urán tömege 814 és 865 kg közé

esik. A kapott számokat könnyen meg is fordíthatjuk: ha 1 tonna dúsított uránt akarunk kapni, akkor – a maradék szegényített urán dúsításától függően – 5,39 és 7,45 tonna közötti tömegű természetes uránból kell kiindulnunk, vagyis a maradék urán tömege 4,39 és 6,45 tonna közé esik. Ezek a számok átvihetők a többi hasonló atomerőműre is, tehát általában kijelenthetjük, hogy a jelenlegi, kis dúsítású uránnal működő reaktorok üzemanyagának előállításakor a reaktorba bevitt urántömegnek mintegy ötszöröse keletkezik a dúsítóművekben maradék szegényített urán formájában.

A nukleáris fegyverekben vagy magasan (90%-ra vagy többre) dúsított uránt, illetve plutóniumot alkalmaznak. Az utóbbira később még visszatérünk. A fentiek mintájára megbecsüljük, hogy egy bomba gyártásához mennyi természetes uránra van szükség. Mivel most $e = 0,9$, egy tonna természetes uránból $7,1/0,9 = 7,9$ kg dúsított uránt lehet kapni. Egy bomba tömege ennek durván a kétszerese, tehát minden bomba legyártása 2 tonna természetes uránt igényel, és majdnem ugyanennyi szegényített urán marad vissza a dúsítóműben.

Az atomerőművek generációi

A ma működő atomerőművi reaktorok túlnyomó többségét a 2. generációhoz soroljuk. Az 1. generációt a prototípus és kísérleti reaktorok alkották, amelyek zömét már bezárták, miután megalapozták a sorozatban gyártott, *kereskedelmi reaktorok* technológiáját. Az előbbieket még gazdaságtalanok voltak, de az utóbbiak már versenyképesek az egyéb (szén-, olaj- stb. tüzelésű) erőművekkel. A 2. generációs erőművek túlnyomó többsége vízzel hűtött reaktorokkal működik. Legfontosabb biztonsági jellemzőjük, hogy bennük – kis valószínűséggel ugyan, de – előfordulhat súlyos baleset, ami az aktív zóna megolvadásához vezet. Ez a kis valószínűség kisebb, mint $10^{-5}/\text{év}$. Néhány reaktorban (például a szlovákiai Bohunicében, vagy a bulgáriai Kozlodujban) ez a szám nagyobb, de ezek kivételek, és már úgysem működnek sokáig. Az újabb épülő reaktorok a 3. generációhoz tartoznak,

izotóp	friss	1 év	2 év	3 év	4 év
^{235}U	$8,5763 \cdot 10^{-4}$	$6,3930 \cdot 10^{-4}$	$4,7595 \cdot 10^{-4}$	$3,3865 \cdot 10^{-4}$	$2,3654 \cdot 10^{-4}$
^{238}U	$2,1299 \cdot 10^{-2}$	$2,1147 \cdot 10^{-2}$	$2,0984 \cdot 10^{-2}$	$2,0792 \cdot 10^{-2}$	$2,0590 \cdot 10^{-2}$
^{236}U	0	$4,2550 \cdot 10^{-5}$	$7,3090 \cdot 10^{-5}$	$9,6649 \cdot 10^{-5}$	$1,1170 \cdot 10^{-4}$
^{239}Pu	0	$8,8890 \cdot 10^{-5}$	$1,3343 \cdot 10^{-4}$	$1,5874 \cdot 10^{-4}$	$1,7106 \cdot 10^{-4}$
^{240}Pu	0	$1,1209 \cdot 10^{-5}$	$2,7281 \cdot 10^{-5}$	$4,3932 \cdot 10^{-5}$	$5,7628 \cdot 10^{-5}$
^{241}Pu	0	$4,5403 \cdot 10^{-6}$	$1,6103 \cdot 10^{-5}$	$2,9409 \cdot 10^{-5}$	$4,0282 \cdot 10^{-5}$
^{242}Pu	0	$3,2233 \cdot 10^{-7}$	$2,4516 \cdot 10^{-6}$	$7,3480 \cdot 10^{-6}$	$1,4133 \cdot 10^{-5}$

* Az izotópok magzsűrűségeit 10^{24} atom/cm³ egységekben adjuk meg.

amelyek ugyan hasonlóak a 2. generációsokhoz, de bennük gyakorlatilag kizárt a súlyos baleset. Végül a kutatás-fejlesztés fázisában vannak a 4. generációs reaktorok, amelyek teljesen új alapelveken nyugsznak. Némi szójátékkal a 3. generációt evolúciónak, a 4. generációt revolúciónak nevezhetjük. (Az eredeti francia szójáték jobban hangzik: évolutionnaire-révolutionnaire.) Vannak, akik a 4. generációt innovációs reaktoroknak nevezik. Szoktuk ezt a négy generációt a szakemberek tekintetében is emlegetni: az 1. generációt a nagyok (*Fermi, Wigner, Teller* és társaik) alkották, a 2. generáció tőlük tanulta a szakmát, de zömmel már nyugdíjban van (mint a jelen sorok írója is), a 3. generáció a derékhad az erőművekben, tervező- és kutatóintézetekben, biztonsági felügyeletknél, végül a 4. generáció doktori dolgozatát írja, vagy még egyetemi vizsgálóra készül.

Üzemanyagciklus, reprocessálás

A 4. generációra később még visszatérünk. Előbb megvizsgáljuk a ma működő, illetve épülő reaktorokat az urán hasznosítása szempontjából. A reaktorba bevitt friss fűtőelemek három-négy évet töltenek a reaktorban. Ezalatt az ^{235}U egy része elfogy: kisebb részben neutronbefogással ^{236}U -ná alakul át, nagyobb részben elhasad, és energiát termel. Az ^{238}U részben szintén hasad és energiát termel, nagyobb részben neutronbefogással ^{239}Pu -má alakul át. A plutóniumizotópok neutronbefogással egyre nehezebb izotóppokká alakulnak át, de hasadás révén energiát is termelnek. Az 1. táblázatban a paksi atomerőműre vonatkozó számításaink eredményét közöljük. A friss üzemanyag dúsítása 3,82%, a jelenlegi üzemvitel szerint négy évet tölt a reaktorban. A táblázatban évente megadjuk az egyes izotópok magzsűrűségeit.

Látjuk, hogy az ^{235}U mennyisége a negyedik év végére a kezdeti mennyiség 27,6%-ra csökkent. Az elfogyott 72,4%-ból 13,0% neutronbefogással ^{236}U -ná alakult át, a többi (59,4%) elhasadt. Témánk szempontjából fontos, hogy az ^{238}U mennyisége alig változott meg, vagyis a reaktorból kirakott, úgynevezett kiégett fűtőelemekben gyakorlatilag az eredeti urán-

mennyiség még megtalálható: az ^{238}U eredetileg bevitt atomjaiból mindössze 3,3% fogyott el. Ebből 0,1% hasadás, a többi neutronbefogás révén alakult át más atomokká. Az utóbbi rész (vagyis 3,2%) átalakult plutóniummá. Az urán energetikai hasznosítása szempontjából döntő jellemző a konverziós tényező:

$$C = \frac{\text{termelt Pu tömege}}{\text{elfogyott U tömege}}$$

Az 1. táblázat alapján ezt is könnyen kiszámíthatjuk, ha az elfogyott ^{235}U tömegével osztjuk a plutónium-izotópok össztömegét: $C = 0,4648$.⁷ A friss üzemanyagban még $C = 0,6$. A négy éves üzem alatt az ^{238}U magzsűrűsége $6,88 \cdot 10^{-4}$ -nel csökken neutronbefogás révén, viszont a plutóniumizotópok együttes magzsűrűsége mindössze $2,83 \cdot 10^{-4}$, tehát 41,1%, ami azt jelenti, hogy a keletkezett plutóniumatomok 59%-a még a kirakás előtt mindjárt el is hasadt.

A paksi atomerőmű jellegzetesnek tekinthető, tehát a fenti számokat a ma működő reaktorok mindegyikére érvényesnek vesszük. Tegyük fel, hogy a reaktorokból kirakott üzemanyagot újra feldolgozzuk (reprocesszáljuk), vagyis kivonjuk belőle a plutóniumot, azt természetes uránnal keverjük, majd az így gyártott fűtőelemeket visszavisszük a reaktorokba. Ha a Földön található urán teljes, a mai urán- és energiaárak mellett gazdaságosan kitermelhető mennyiségét M -mel jelöljük, akkor a reprocesszálás révén felhasználható M' mennyiségére felírhatjuk az $M' = M + M' C$ összefüggést,⁸ amiből

$$M' = \frac{M}{1 - C}$$

A fenti értékkel számolva ez azt jelenti, hogy a közvetlenül kibányászott hasadóanyagnak 1,87-szeresét tudjuk energiatermelésre használni. Ez nem sok, de megéri a fáradságot, hiszen majdnem egy kettes faktort nyerünk a hasznosítható urántömegben. Ezt a technológiát ma már alkalmazzák: ez a MOX⁹ fűtőelem, amely UO_2 és PuO_2 olyan arányú keverékéből áll, amely reaktorfizikai szempontból megfelel a 3,8% dúsítású uránnak. Ebben Franciaország jár az élen.

Kérdés azonban, nincs-e ennél jobb lehetőség. Persze, hogy van! Ha a víz helyett más moderátort használunk, a konverziós tényező jelentősen megnő. A hidrogén abszorpciós hatáskeresztmetszete termikus neutronokra 331 mbarn, tehát elég nagy. Ezzel szemben a ^{12}C izotópé 4 mbarn, sőt a deutériumé 1 mbarn. Emiatt a grafittal és nehézzvízzel moderált reaktorokban a kezdeti konverziós tényező 0,8, illetve 0,9. A teljes üzemanyagciklusra ezek a számok kisebbek, de még így is nyerhetünk egy hármast-négyest faktort a felhasználható hasadóanyag tekintetében. Csak mellékesen jegyezzük meg, hogy ez a nagy kon-

verziós tényező az oka annak, hogy a nukleáris fegyverekben található plutóniumot mindegyik atomhatalom grafitos reaktorokban gyártotta le.

Természetesen a legjobb lenne egy olyan technológia, amelynél a konverziós tényező 1-nél nagyobb, hiszen ezzel a teljes uránmennyiség hasadóvá tehető, és így a vizes reaktorokhoz képest 50–100-szor jobb uránhasznosítást érhetünk el. Ilyen tulajdonságú a gyors reaktor. Benne nincs moderátor, az üzemanyag dúsítása nagy, és ezért a láncreakciót nem termikus, hanem gyors neutronok tartják fenn. Az általuk kiváltott hasadásban jelentősen több másodlagos neutron keletkezik, ami végső soron lehetővé teszi, hogy $C > 1$ legyen. Egy ilyen reaktorban a természetes uránhoz 12–15% plutóniumot kevernek, és a reaktor aktív zónáját tiszta természetes uránnal veszik körül. Ezáltal eléri, hogy az aktív zónából kiszökő neutronok is plutóniumot termeljenek. Mivel nem lehet moderátor, a szokásos hűtőközegek (H_2O , D_2O) nem jönnek szóba, valami nagy tömegszámú, alacsony olvadáspontú anyagot kellett találni. Ilyen a nátrium és (újabb) az ólom. Nem mehetünk a részletekbe, de az Olvasó elképzelheti, milyen nehéz technológiáról van szó. Három országban működnek nátriumhűtésű gyors reaktorok: Franciaország, Japán és Oroszország.

E rész befejezéséül megnézzük, mennyi uránt igényel egy plutóniumbomba nyersanyaga. Az atombomba speciális összetételű plutóniumot igényel: a ^{239}Pu -hoz képest csak elhanyagolható mennyiségben tartalmazhat nagyobb tömegszámú plutóniumizotópokat, mert az utóbbiak spontán hasadása annyi neutronot termel, hogy a bomba a kelletténél hamarabb robban fel, ami rontja a bomba hatóerejét. Ez a fegyvertisztaságú plutónium. Előállításához a reaktor kiégése 700 MWnap/tonna körüli érték.¹⁰ 700 MWnap energia termelése 700 g urán hasadásával egyenértékű.¹¹ Mivel itt még nem jelentős a keletkezett plutónium hasadása, számolhatunk a grafitos reaktorok kezdeti konverziós tényezőjével, tehát $0,8 \times 700 \text{ g} = 0,56 \text{ kg}$ plutónium keletkezik. Egy bomba tömege körülbelül 15 kg, tehát egy bomba legyártásához igényelt természetes urán tömege $15/0,56 = 27$ tonna. Mikor a kirakott fűtőelemeket reprocesszálják, ezt az uránmennyiséget visszanyerik. Fentebb láttuk, hogy egy uránbomba 2 tonna természetes uránt igényel. Mivel a dúsítás maradéka szegényített urán, az már csak gyors reaktorban hasznosítható tovább. Ugyanakkor a reprocesszálás uránmaradéka gyakorlatilag természetes urán, ami még felhasználható grafitos reaktorban – természetesen további plutónium gyártására. Emiatt a létező bombák gyártásához ténylegesen felhasznált urán mennyisége nehezen becsülhető.

⁷ Az 1. táblázatban található magzsűrűségeket súlyozni kell az izotópok tömegszámával.

⁸ Itt elhanyagoljuk, hogy az urán-plutónium keverék-fűtőelemek konverziós tényezője egy kicsit más.

⁹ MOX = mixed oxide.

¹⁰ A hasadóanyag egységnyi tömegéből kinyert energiát kiégésnek nevezzük.

¹¹ Figyelembe véve, hogy a hasadásban 200 MeV energia keletkezik, könnyen levezethetjük, hogy 1 MWnap energia termeléséhez jó közelítéssel 1 g hasadóanyag elhasadása szükséges – függetlenül attól, hogy melyik hasadó izotópról van szó.

4. generációs atomerőművek

típus	hőmérséklet	alkalmazás
1 He-hűtésű gyors reaktor	850 °C	villamos áram és hidrogén fejlesztése
2 ólomhűtésű gyors reaktor	550–800 °C	villamos áram és hidrogén fejlesztése
3 sóolvadék reaktor	700–800 °C	villamos áram és hidrogén fejlesztése
4 nátriumhűtésű gyors reaktor	550 °C	villamos áram fejlesztése
5 kritikus pont feletti vízzel hűtött reaktor	510–550 °C	villamos áram fejlesztése
6 nagyon magas hőmérsékletű, gázhűtésű reaktor	1000 °C	villamos áram és hidrogén fejlesztése

rendelkezésünkre. Következtetés: várjunk, amíg kellően át nem gondoltuk a tennivalókat. Felszólította az államokat, hogy hasonlóan járjanak el. A németek, britek és mások „szót fogadtak”, de a már említett franciák, Japán és oroszok mentek tovább a maguk útján. Tény azonban, hogy egyik sem alkalmazza nagy léptékben a gyors reaktorokat.

Moratórium a gyors reaktorokra és a reprocesszálásra

Carter amerikai elnök 1977-ben moratóriumot rendelt el a gyors reaktorokra és a polgári célú reprocesszálásra. Ennek hosszú távon nagy hatása volt. Carter maga reaktormérnök volt, katonai korában tengeraltatójárok reaktoroperátorként szolgált, tehát jól értette, mit csinál. Korábban az Egyesült Államokban nagy léptékű fejlesztés folyt ezeken a területeken. 1951-ben például ott sikerült először villamos energiát előállítani egy gyors reaktorban (EBR-1). Cartert az atomfegyverek terjedésének veszélye aggasztotta. Mivel a gyors reaktorok üzemanyaga nagy dúsítású urán, illetve urán-plutónium keverék, fennáll a veszélye annak, hogy terroristák vagy ilyen szándékú államok törekedni fognak az üzemanyag megszerzésére. Ugyanilyen okból tekintette veszélyes helynek a reprocesszáló üzemeket is. Kijelentette: mivel ez a két technológia csak az urán-hasznosítás javítása érdekében szükséges, nem sürget az idő ezek kifejlesztésére, hiszen urán bőségesen áll a

Az 1990-es években megváltozott az Egyesült Államok álláspontja. Mikor látták, hogy kezdenek lemaradni Európa és Japán mögött – amit az atomenergia területén nem tartanak a maguk számára megengedhetőnek – meghirdették a Generation IV programot a 4. generációs atomerőművek fejlesztésére. A programhoz csatlakozott néhány fejlett ország: Argentína, Brazília, Franciaország, Japán, Dél-Korea, Dél-Afrika, Kanada, Nagy-Britannia és Svájc, valamint maga az Európai Unió is.¹² A célkitűzések között hat reaktortípus kifejlesztése szerepel.

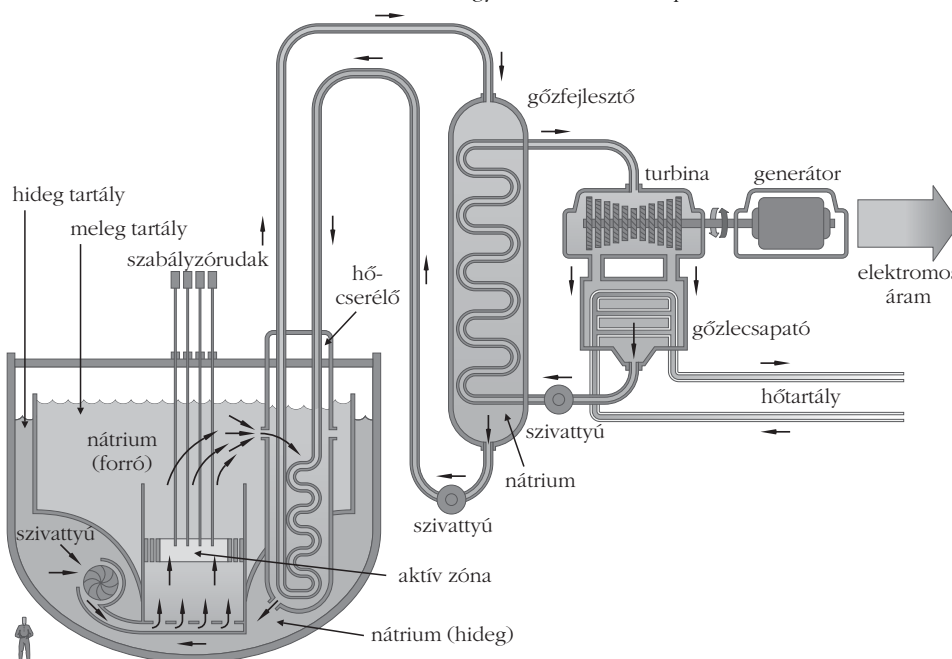
A 2. táblázatból látható, hogy közülük három típus is gyors reaktor, tehát az amerikai álláspont már több mint egy évtizede eltér a korábbi moratóriumtól. Hosszú távon fel fogják adni a polgári reprocesszálással szemben mutatott ellenséges felfogásukat is. Nem tartozik témánkhoz, ezért csak mellesleg hívjuk fel a figyelmet a hidrogén fejlesztésére. A végső cél hidrogént égető járművek bevezetése és ezzel a közlekedési eszközök CO₂-kibocsátásának csökkentése. A sóolvadék reaktorra a későbbiekben még visszatérünk. Egyelőre csak kutatás-fejlesztési munka folyik a program keretében, komoly pénztőke még nem áll a program mögött – legalábbis az Egyesült Államokban nem. Számítani lehet azonban arra, hogy a 2010-es évtized végén már épülnek kísérleti, esetleg prototípus rendszerek.

Kiegészítő fűtőelemek

A kiegészítő fűtőelemeket gyakran nagy aktivitású radioaktív hulladéknak tekintik, és eszerint bánnak velük: reprocesszálás nélkül, véglegesen eltemetik valamilyen mély geológiai képződménybe. Fentebb láttuk, hogy az így elteme-

¹² Ezen keresztül tehát hazánk is részt vesz a programban.

2. ábra. A nátriumhűtésű gyors reaktor elvi felépítése.



tett fűtőelemekben még értékes anyagok találhatóak: a keletkezett plutónium, amely jó hasadóanyag, továbbá az eredetileg bevitt urán túlnyomó része, amely további plutóniummá konvertálható. Ebből következik, hogy azok az országok (több ilyen van), amelyek a kiégett fűtőelemek végleges eltemetésére rendezkednek be, óriási mennyiségű energiát hagynak veszendőbe menni. Ezért a legtöbb országban (házánk is közéjük tartozik) átmeneti tárolókat létesítenek (általában 50 évre), amivel időt kívánnak nyerni: remélhetőleg addigra általánossá válnak a gyors reaktorok és a reprocessálás, illetve egyéb technológiák fejlődnek ki, de – főleg – megváltozik a társadalmi környezet, vagyis az emberek nagy része megérti, hogy nem mondhatunk le az atomenergiáról.

A kiégett fűtőelemekben található energia kinyerésére jelenleg egyetlen kipróbált technológia létezik: a reprocessálás, majd a kinyert urán és plutónium további fűtőelemek gyártására való felhasználása. Természetesen ennek is megvannak a maga biztonsági problémái,¹³ de a gyakorlatban kipróbált, járható út. Léteznek azonban egyéb lehetőségek is, amelyeket transzmutáció néven szoktunk emlegetni. Közülük kettőt említünk meg: a sóolvadék reaktort és a gyorsítóval hajtott reaktort.

Az 1960-as években az Egyesült Államokban vizsgálták a *sóolvadék reaktort*. Ez azon alapult, hogy a LiF és BeF₂ sók olvadt keverékében oldódik a cirkónium,¹⁴ az UO₂ és a PuO₂. A kísérleti berendezés 1965-ben vált kritikusná, és másfél évig működött 7,4 MW hőteljesítményen, 650 °C-on. Az olvadékot keringették a reaktor és egy hőcserélő között, amelyben a hűtőközeg szintén LiF-BeF₂ sóolvadék volt. További hasonló berendezéseket is terveztek, de ezek végül nem épültek meg. A sóolvadék reaktor modernizált változatának rendeltetése az elhasznált nukleáris üzemanyag transzmutációja: benne a plutóniumot és a többi transzurán elemet teljesen elégetik, az uránt, cirkóniumot és a hasadási termékeket kivonják. Egy ilyen rendszer megvalósítása érdekében határozott lépések történtek. Az oroszok kísérletileg igazolták az egész folyamat megvalósíthatóságát. Mellettük különösen aktívak az EU egyes országai (különösen Franciaország), de jelentős eredményeket értek el a csehek is. Végeredményben az újrahasonosítható anyagok visszakerülnek az üzemanyagciklusba, a transzurán elemek megsemmisülnek, a radioaktív hulladékok pedig olyan anyaggá alakulnak át, hogy aktivitásuk egy-két emberöltő alatt a kiindulásul szolgáló urán aktivitásának szintjére csökken. Ezzel megvalósul a „szennyező fizet” elve, hiszen az a nemzedék tünteti el a hulladékokat, amely a termelt villamos energia hasznát élvezte (vagy bármi más módon hasznosította az uránt).

A kiégett fűtőelemek kezelésének szerényebb célja is lehet: nem kívánjuk a bennük rejlő energiát teljesen hasznosítani, de mindenképpen rövidebb felezési

idejűvé akarjuk őket átalakítani, amivel csökkenteni tudjuk a nagy aktivitású hulladék tárolási idejét. Ehhez elég belőlük egy szubkritikus reaktort összerakni, majd azt nagy neutronhozamú neutronforrással meghajtani. Ilyenek lehetnek a gyors reaktorok, de ebben a tekintetben a legígéretesebbek a *gyorsítóval hajtott reaktorok*. Az utóbbiakról ejtünk néhány szót, mivel a legtöbb neutron gyorsítóval lehet előállítani, ha néhányszor 100 MeV energiára gyorsított protonokkal nehézfém targetben (például ólomban) spallációs reakciót váltunk ki. Miután az 1980-as évek elején ez technikailag könnyen megvalósíthatóvá vált, felmerült, hogy ha a nagyaktivitású hulladékot ilyen eredetű neutronokkal besugározzuk, akkor ezek „megfiatalodnak”, vagyis újra felhasználhatóvá válnak. Sokáig – a többihez hasonlóan – ezt az ötletet sem vették komolyan. Az 1980-as évek második felében Los Alamosban készült egy megvalósíthatósági tanulmány, és ettől kezdve a dolog egyre életrevalóbbnak tűnt. A Los Alamosban kidolgozott elképzelés szerint a reaktor sokszorozási tényezője 0,95, tehát a neutronsokszorozás 20-szoros.¹⁵ Az így elérhető térfogati teljesítménysűrűségek körülbelül akkorák, mint egy atomerőműben. Ezek a feltételek alkalmasak arra, hogy a hosszú felezési idejű transzuránokat és a hasadási termékeket rövidebb felezési idejű izotópokká alakítsák át. A berendezés eközben termelhet 100 MW nagyságrendű teljesítményt is, miközben alkalmas tíz darab, egyenként 1000 MW teljesítményű atomerőmű nagyaktivitású hulladékainak a kezelésére. Természetesen az egész koncepció nem választható el az elhasznált üzemanyag reprocessálásától, ugyanis e nélkül a sokszorozási tényező kedvezőtlenül kis értékre csökkenne.

Becslés az eddig elhasznált uránra

A címben feltett kérdés megválaszolása érdekében megpróbáljuk felmérni, mennyi urán fogyhatott el a nukleáris korszak eddig eltelt 60 évében. Erre a nem kis bátorságot igénylő feladatra azért merünk vállalkozni, mert az uránkészletekre adott becslések is bizonytalanok. Alábbi becsléseink sem lesznek bizonytalanabbak. Természetesen igyekszünk az elfogyott urán tömegét felülbecsülni, nehogy az a vád érjen, hogy a valóságosnál rózsásabbra festjük a helyzetet. 2004-ben 442 erőművi reaktor működött összesen 357 GW teljesítménnyel. Biztosan felfelé tévedünk, ha abból indulunk ki, hogy az elmúlt 40 év alatt végig ekkora atomerőmű park működött.

Ismét a paksi atomerőmű példájából indulunk ki. Egy reaktor töltete 40 tonna UO₂. Mivel a reaktor villamos teljesítménye eredetileg 440 MW, újabban 500 MW, 1000 MW villamos teljesítményre (felfelé kerekítve) 100 tonna uránnal számolhatunk. Így a világon működő atomerőműpark teljes töltete 35700 tonna.

¹³ A jelenlegi technológia szerint a plutónium 5–6-nál többszöri visszatáplálása a reaktor instabilitásához vezethet. A részletek kifejtése egy újabb cikket igényelne.

¹⁴ A cirkónium a fűtőelemek burkolatának anyaga.

¹⁵ Ha egy szubkritikus reaktor sokszorozási tényezője k , akkor a reaktor a belőtt forrásneutronokat $1/(1-k)$ -szorosára sokszorozza.



3. ábra. Szovjet ellenőr vizsgál egy robbanófejétől megfosztott Tomahawk rakétát.

Egy kiszemelt fűtőelem eredetileg 3 évet töltött a reaktorban, de két évtizede a legtöbb helyen ezt 4 évre növelték. Így az elmúlt 40 évben elhasznált dúsított urán mennyisége $35\,700 \times 40/4 = 357\,000$ tonna. A dúsítás tárgyalásakor láttuk, hogy ennek mintegy 6-szorosa fogyott el a dúsításakor, vagyis a teljes elfogyott uránmennyiség 2,1 Mt-ra becsülhető. A dúsítóművekből származó maradéka 1,8 Mt szegényített urán.

Lényegesen nehezebb számba venni a nukleáris fegyverek gyártásához felhasznált mennyiséget. Tudjuk, hogy a két szuperhatalom tizenkét-tizenkét ezer nukleáris robbanófejjel rendelkezik. A további atomhatalmak (Kína, Franciaország, Nagy-Britannia stb.) fegyvereit is figyelembe véve 25–30 ezer robbanófejjel kell számolnunk. A harcászati atomfegyverek száma ezt messze harminc-negyvenezer fölé viszi. Mindegyikben 15 kg körüli hasadóanyag (urán vagy plutónium) van. Ha az egészet uránnak vesszük, akkor használhatjuk fenti becslésünket: bombánként 2 tonna uránnal a 30 ezer robbanófejre vonatkozóan 50 ezer tonnát kapunk. Plutóniumbombák esetében ez több lehet, ezért jobb, ha 100 ezer tonnával számolunk. Vannak még a harcászati fegyverek, továbbá az atomhatalmak tárolnak bizonyos mennyiségű nagy dúsítású uránt, illetve fegyvertisztaságú plutóniumot, hogy szükség esetén gyorsan legyárthassanak újabb robbanófejeket. Nyilvánvaló, hogy ennek tömege katonai titok. Aligha lehet azonban több, mint a már meglévő robbanófejekben található mennyiség. Itt jegyezzük meg, hogy a *Népszabadság* idézett cikkének megfogalmazásával szemben nem a szovjet atomfegyverekből kivett uránt égettek el amerikai reaktorokban. Arról van szó, hogy az amerikai–oroszfegyverzetkorlátozási tárgyalásokon kiderült, hogy az oroszok lényegesen több tartalék uránt halmoztak fel, mint az amerikaiak. Az egyensúly helyreállításához kellett a többletet elégetni. Az amerikaiak építettek egy külön üzemet, amelyben ezt az uránt reaktor-fűtőelemekké konvertálják, majd reaktorokban elégetik. Témánkra visszatérve levonhatjuk azt a következtetést, hogy az atomfegyverekhez aligha használhattak fel 200 ezer tonna uránnál többet. Ha ezt hozzávesszük az atomerőművek 2,1 Mt-jához, 2,3 Mt alatt maradunk. Ezt azt jelenti, hogy még a jelenlegi, az

uránnal pazarló technológia mellett is korai az uránkészletek kimerüléséről beszélni. Fent ugyanis azt láttuk, hogy a készlet legalább 10 Mt.

Még nem szóltunk a kutatóreaktorokról, amelyek nem energiatermelésre, hanem különböző (magfizikai, kémiai, szilárdtest-fizikai, anyagvizsgálati stb.) kutatások céljaira termelik a neutronokat. Számuk kezdetben nagy volt (500 felett), de az utóbbi évtizedekben egy részüket leszerelték. Erősen dúsított uránnal működnek. Mivel töltetük kicsi, uránfogyasztásuk számottevően nem módosítja a fenti becslést.

Mit tehetünk a jövőben?

A jövőben több úton járhatunk. Mindenekelőtt nyitva áll a járt út, vagyis tovább pazarolhatjuk az uránt az eddigi technológiával. Még így is el tudjuk látni az atomerőműveket üzemanyaggal addig, amikor a kőolajkészletek már gyakorlatilag kimerülnek. Ez a 21. század nagy részét jelenti. Nem lenne azonban szerencsés ezt az utat járni.

A jelenlegi atomerőművi technológia mellett a nukleáris üzemanyagnak csak elenyésző részét aknázzuk ki energiatermelésre. Az eddig elhasznált 2,3 millió tonna uránból – bármily hihetetlen – mindössze 12–14 ezer tonna urán hasadt el, vagyis a Földön talált urán még gyakorlatilag teljes egészében megvan. Milyen formában? Több millió tonna eredeti, még kibányászandó állapotban, 0,36 millió tonna kiégett üzemanyag formájában, a többi szegényített uránként, mint az urándúsítók maradéka. Az utóbbi túlnyomó többsége három országban található: USA, Oroszország és Franciaország. A franciák becslése szerint a náluk levő mennyiség 2000 évig lenne képes fedezni Európa teljes uránszükségletét. Fontos szempont, hogy ezt a részt már nem kell bányászni, nem kell szállítani, hiszen fűtőelemgyártásra kész állapotban tárolják. Természetesen ehhez át kell térni a gyors reaktorok technológiájára, ami már folyik, de a közeli jövőben várhatóan fel fog élénkülni. Eddig csak az uránról beszéltünk. Tudjuk, hogy a Földön háromszor annyi tórium található, mint urán, és szintén kitűnő nukleáris üzemanyag.

Ezen túlmenően – a reprocessálás mellett – nagyon üdvös lenne a kiégett fűtőelemek transzmutációja, mert ez egyszerűsíti a nukleáris hulladékok problémáját. Bár nem ilyen léptékben járul hozzá az energiatermeléshez, de nagyon itt lenne az ideje a felhalmozott nukleáris fegyverek részleges leszerelésének is, amivel a szuperhatalmak évtizedek óta hitegetik az emberiséget. A fegyverekben található hasadóanyagot reaktorokban minél hamarabb el kellene égetni. Tévedés azt állítani, hogy ez az urán „másodlagos” hasznosítása: mind a transzmutáció, mind a fegyverek hasadóanyagának konverziója olyan művelet, amely mindannyiunk érdekét szolgálja.

Összefoglalva: urán és tórium elegendő mennyiségben van a Földön, ezek ezeréves időtávon rendelkezésre álló energiahordozók. Az emberiség nyilván addig fog rájuk támaszkodni, ameddig szükségesnek ítéli, vagyis amíg nem talál másik, kedvezőbb energiahordozót.