

## 10. Előadás: Urántermelés, felhasználás fizikája.

1. Uránérc bányászat
  2. Uránérc fizikai kémiai feldolgozása, izotóp dúsítás, fűtőelem legyártása.
  3. Uránbánya rekultiváció
  4. Elektromos energiatermelés atomerőműben.
- 

### 1. Az uránérc bányászata

(<http://www.npp.hu/uran/1.htm>)

Az urán különböző koncentrációban ugyan, de **a világ minden pontján megtalálható**. A **talajban az átlagos koncentráció 3-5 gramm/tonna**, és a tengerek és óceánok vizének minden köbméterében is található kb. 5 mg urán. A Földön vannak olyan helyek, ahol a koncentráció ennél az átlagos értéknél sokkal magasabb. Az **uránérc kitermelése** a földkéregből általában akkor kifizetődő, ha az uránkoncentráció a **0.5-5 g/kg** értéket eléri.

Az uránércet **kétféleképpen is lehet bányászni: mélyműveléssel** (leásnak a földbe és kiépítenek egy „barlangrendszer”), vagy ha az uránban gazdag kőzet közel van a felszínhez, **külszíni fejtéssel** (ilyenkor az érctelephez úgy jutnak el, hogy egyszerűen 'elhordják' a talajt az érctelep fölül) .

**Magyarországon a Mecsekben, Kővágószőlősen bányásztak uránércet**, amelyből helyben el is készítették a sárga pogácsát. Ezt szállították ki az akkori Szovjetunióba, ahol a további lépések lezajlottak, egészen a fűtőelem legyártásáig. Az **uránérc földtani kutatása 1956-ban, ezt követően az ipari bányászati tevékenység 1957-ben kezdődött Kővágószőlősen**. Ezt a bányát 1997-ben bezárták: a bányászat nagyon nehéz földtani körülmények mellett, nagy mélységben és magas hőmérsékleten folyt, ráadásul több pénzbe került, mintha egy másik országtól vettünk volna uránércet.

---

### 2. Uránérc fizikai kémiai feldolgozása, izotóp dúsítás.

A bányászott urántartalmú **kőzet feldolgozása:** (<http://www.mecsekoko.hu/uranbanyaszat.html>)

- **a kőzetet speciális malmokban porrá őrlik**, majd
- **kénsavban feloldják**, hogy kinyerhessék belőle az uránt.
- ezt az oldatot ezután **leszűrik**, majd
- az oldatból **urán-oxid ( $U_3O_8$ ) formájában csapattják ki az uránt**.
- ez az  $U_3O_8$  **sárgás színű por**, amit **pogácsákká sajtolnak** (ezt hívják a szakzsargonban **sárga pornak** vagy **sárga pogácsának** (yellow cake)).

Kővágószőlősen az **Ércdúsító Üzemben (ÉDÜ)** vegyi feldolgozó részlegének megépítése előtt, a kitermelt ércet vasúton, a Szovjetunióba szállították. **A vegyi dúsító részleg 1962-ben készült el**. Az ÉDÜ-ben az érc feldolgozásának lépései a következők voltak:

- a kitermelt nyersérc törése, osztályozása (szétválasztásra került a **meddő**, a **perkolációs dombokra kerülő gyenge minőségű**, valamint a **vegyi feldolgozásra alkalmas érc**),
- vegyi feldolgozás és a végtermék csomagolás. A vegyi feldolgozás során savas technológiát alkalmaztak az urán kioldására a homok szem nagyságúra tört ércből. A kioldásra kénsavat használtak. A vegyi folyamat során a koncentrált kénsavon kívül mangán-dioxidot (Mn-érc), nátrium-kloridot, koncentrált sósavat használtak fel.

Az Ércdúsító Üzem 35 éves működése során ezen anyagok éves mennyiségeiből számolva, **1 tonna késztermék előállításához** 102,8 t kénsavat, 5,3 t sósavat (30 %-os), 33 t mangánércet, 25 t meszet, 11,6 t mészkövet, 4,4 t ipari sót és jelentős mennyiségű bányavizet használtak fel. A folyamat során a feltárt urán mennyiségének 7,3 %-a veszteségként jelentkezett, melynek bizonyos része a talajt, illetve a talajvizet szennyezte.

Az Ércdúsító Üzem területén az alaptevékenységet jelentő uránérc vegyi feldolgozása mellett számos, az alaptevékenységhez szorosan kapcsolódó, illetve egyéb tevékenység is folyt. Technológiai és kémiai laboratóriumok, gépészeti, karbantartási tevékenység; érc és a vegyi folyamathoz szükséges egyéb anyagok szállításához, rakodásához kapcsolódó tevékenység; más ipari tevékenység: öntöde, galvanizáló, energetika és kialakításra került egy hulladéklerakó is.

**A kémiai ércdúsítást követően történik az atomreaktor fűtőanyagának előállítása**, amely során a következő folyamatokat kell levégezni: **Konverzió, Izotópdúsítás, Fűtőelemgyártás.**

### **Konverzió**

A dúsításhoz az uránt gáz halmazállapotú vegyületté kell alakítani: ez az [uránium-hexafluorid](#) ( $\text{UF}_6$ ). "Beceneve" hex, ami németül boszorkányt jelent. Technológiai szempontból nehezen kezelhető anyag, mégis célszerű ezt használni: a ma alkalmazott dúsítási eljárások során olyan gázra van szükség, amelynek molekulatömege csak a molekulában lévő uránatom tömegétől függ. Ezért esett a választás a fluorra: annak csak egyféle izotópja létezik a természetben, így a hex csupán kétféle molekula keveréke: az egyik moláris tömege 349 g/mol ( $^{235}\text{U}+6\cdot^{19}\text{F}$ , tömege:  $235+6\cdot 19=349$ ), míg a másiké 352 g/mol,  $^{238}\text{U}+6\cdot^{19}\text{F}$ , tömege:  $238+6\cdot 19=352$ ).

### **Izotópdúsítás**

A természetes urán túlnyomórészt  $^{238}\text{U}$ -ból áll, és csak 0.71%-a a termikus neutronokkal "hasítható"  $^{235}\text{U}$ . Ezzel az izotóppösszetétellel csak nehézvíz- vagy grafitmoderátor alkalmazásával valósítható meg az önfenntartó láncreakció: a könnyűvízben lévő hidrogén túl sok neutronot nyel el. A megoldás az izotópdúsítás: meg kell növelni a 235-ös uránatomok részarányát a 238-as "rovására". A legelterjedtebb, könnyűvíz moderátoros atomerőművek **üzemanyaga enyhén dúsított (2-4 %  $^{235}\text{U}$ ) uránt tartalmaz**

Az izotópdúsításra több módszert is kifejlesztettek, a két legelterjedtebb a **gázdifúziós** és a **gázcentrifugás** eljárás. Közös jellemzőjük, hogy **uránium-hexafluoridot** használnak fel, és az uránizotópok közötti tömegkülönbséget használják ki. Mivel ezekkel a módszerekkel kis hatékonysággal választhatóak szét az izotópok (a relative kicsi, 0.86%-os tömegkülönbség miatt), ezért **kaszkád rendszerben** több egységet kapcsolnak egymás után.

### **Fűtőelemgyártás**

A szükséges mértékben feldúsított uránt tartalmazó urán-hexafluoridot sorozatos oxidációs lépések útján [urán-dioxid](#)dá alakítják, amit egy szinterezésnek hívott porkohászati eljárással pasztillákká préselnek. **Ezeket a pasztillákat üzemanyagpálcákba töltik**, a pálcákat pedig **kazettákba** szerelik.

### 3. Uránbánya rekultiváció

Az uránbányászat nem ér véget az érctelepek kimerülésével. A környezetet vissza kell állítani a bányászat előtti viszonyoknak megfelelően: ezt hívják **rekultivációnak**. A felső képen egy működő felszíni bánya látható, az alsón ugyanaz a terület, a bánya végleges bezárása után.

#### **Bányabezárás, Rekultiváció lépései**

- fejtési bányatérsegek felhagyása
- külszínre nyíló aknák felhagyása
- külszínre nyíló aknák végleges lefedése
- É-i és K-i tárók felhagyása
- olajjal, savval, lúggal szennyezett talajok felszedése, ártalmatlanítása
- olajjal, zsírral szennyezett gépi berendezések kiszerezése
- a föld alatti bányatérsegek egyenletes vízfeltöltődését biztosító, de a radongáz kiáramlását mérséklő gátrendszer kiépítése.

#### **Meddőhányók rekultivációja**

##### **I. számú meddőhányó**

A Mecseki Ércbányászati Vállalat 1956-ban az I. üzemi akna mélyítésével egyidőben a jelenlegi I. sz. meddőhányó területén helyezte el az olyan alacsony urántartalmú érceket, melyek kiszállítása a Szovjetunióba rendkívül költséges lett volna. Ugyanitt helyezték el az I. sz. bányauzem vágathajtásából és a fejtésekből kikerülő meddőkőzetet. Az I. sz. bányauzem bezárásáig (1972) 10.6 millió m<sup>3</sup> meddőkőzetet helyeztek el 11 hektár területen.

##### **III. sz. meddőhányó**

A beinduló III-as üzem részben a Tótvár térségben működő aknán dolgozott, melynek meddőhányója az aknától Ny-ra elterülő területen volt, majd 1959-ben elkezdődött az É-i táró hajtása, amely a III-as üzem későbbi területeinek főfeltárását jelentette. Ebből következően a III-as üzemtől D-re eső terület elhelyezkedéséből adódóan alkalmas volt egy meddőhányó kialakítására. 1993-ig, a meddőhányó rekultivációjának megkezdéséig itt került elhelyezésre az É-i táró, valamint az I-es üzem K-i bányamezejének előkészítő vágatai valamint a fejtések anyaga.

##### **IV-es légaknai meddőhányó**

A meddőhányó anyaga a 70-es években mélyült légakna során kikerült kőzetből áll. Az akna nem, vagy csak kis mértékben harántolt uránérc tartalmú kőzeteket, így a felszíni forma kialakítása után felhordott 30 cm-es termőtalaj elegendőnek bizonyult a kívánt értékek és az újrahasznosítási cél - gyepp - elérésére.

##### **IV üzemi meddőhányó**

Az 1964-1968-as évek közötti időszakban a IV. üzemi szállítóakna mélyítése során kikerült 40 ezer m<sup>3</sup> kőzetanyag került elhelyezésre a mintegy 1.5 hektáros területen. A meddőanyag leművelése során a radioaktív kőzet, radiometrikus mérését követően a III. sz. meddőhányóra került elhelyezésre. Az inaktív meddőkőzetet az üzemudvarok feltöltésére használták fel.

##### **V. üzemi meddőhányó**

A meddőhányóra az V. üzemi szállítóakna mélyítése során kitermelt meddőkőzet került 1,7 hektárnyi területen, mintegy 54 ezer m<sup>3</sup> mennyiségben. Az aknát 1975-1979 között mélyítették, ércet nem harántolt, így a teljes anyaga felhasználható volt az üzemudvarok szennyezett talajának elhordását követő feltöltésére.

##### **V.-ös légaknai meddőhányó**

Az V.-ös légaknai meddőhányó és üzemudvar mintegy 0,87 ha-os területére az 1980-1983 között mélyített V.-ös légakna kőzetanyaga került elhelyezésre. A terület és tájrendezés során a meddőhányó anyagának nagy része az akna tömedékelésére ill az üzemudvar feltöltésére került

felhasználásra. A visszamaradó meddő és a meddővel takart üzemudvar 1 m földtakarást kapott, majd fűvesítésre és fásításra került

### **Perkolációs üzemelési állapot jellemzése**

A **perkolációs uránkinyerési eljárás** során az ércötretet fóliával szigetelt medencékben helyezték el. A fóliaszigetelés izolálta a környezetet az urántartalmú technológiai oldatoktól, azonban teljes védelmet nem nyújtott és kisebb mennyiségű oldat a medencékből a talajrétegekbe jutott. A perkolációs meddő lényegesebb jellemzői a rekultiváció szempontjából:

- mintegy 60 g/t koncentrációban tartalmaz uránt, - fajlagos g-aktivitása (Ra-ekv.-ben ) 1,5-2,0 Bq/g, - szulfidtartalma alacsony és csak tizedszázalékokat tesz ki,
- a pórusvizek kisebb mennyiségben technológiai eredetű vegyületeket (nátrium-szulfátot, nátrium-hidrokarbonátot stb.) tartalmaznak, melyek fajlagos mennyisége 1,0 kg/t körül van, urántartalma 10-20 mg/dm<sup>3</sup>, rádium-226 tartalma 1-2 Bq/dm<sup>3</sup>

### A perkolációs meddők végleges elhelyezése, a terület helyreállítása

A koncepció gyakorlati megvalósítása legegyszerűbben úgy biztosítható, ha a perkolációs meddő teljes mennyisége a III. sz. meddőhányóra, vagy annak közvetlen közelébe kerül. Ez a terület az I. sz. Bányászati üregrendszerének depressziós hatása alatt áll, így a meddőhányóról elszivárgó víz nagy része ezen üregrendszerbe (és nem a tortyogói vízbázis vízáradó rétegeibe) kerül, ahonnan a szivattyúval történő kiemelés és uránmentesítés után juthat csak ki a környezetbe.

### **Zagytározók rekultivációja**

A magyarországi uránérc-bányászat és ércfeldolgozás üzemelésének időszakában az ércfeldolgozási meddőzagy elhelyezésére **2 db zagytározó létesült**, melyek együttes területe mintegy **160 ha**.

Az **I. sz. zagytározó** ún. síkvidéki tároló, azaz körkörös gáttal létesült, míg a **II. sz. zagytározó** ún. völgyvidéki jellegű, három oldalról gáttal körülvett, negyedik oldalról a Görcsönyi-hátság É-i lejtőjének támaszkodik. A zagytározók üzemelése az ércfeldolgozás befejezésével egy időben, 1998-ban befejeződött, ekkor a II. sz. zagytározó már szabad vizet nem tartalmazott, míg az I. sz. zagytározó felületén mintegy 800-1 000 Em<sup>3</sup> víz volt található.

A zagytározók aljzatszigetelés nélkül épültek, így a kijuttatott technológiai oldatok, illetve a rájuk hullott csapadék továbbszivárgott az alattuk elhelyezkedő természetes víztározó képződményekbe. A leírtaknak megfelelően a zagyterek rekultivációja során az egyik fő kritérium volt a beszivárgás csökkentése, azaz a további szennyeződéskiáramlás mérséklése. A tájrendezési tevékenységgel párhuzamosan el kell végezni a zagytározókból már elszivárgott oldatok által okozott talaj- és rétegvíz szennyezés kármentesítését is.

A talaj- és rétegvíz szennyezés megszüntetése érdekében egy **hidraulikus védelmi rendszer kialakítása történt**, melynek hatásterülete lefedi a teljes szennyezett területet, megakadályozza a talajvízbe jutott oldatok horizontális és vertikális irányú továbbterjedését és a környező ivóvízbázisok vízkészletének elszennyeződését. A rendszer építése során összesen 29 db, 15-35 m mélységű termelő kút, 3168 m hosszúságú, 4-6 m mélyen elhelyezett **drénrendszer** kivitelezése történt a hozzájuk tartozó nyomóvezeték ágakkal, medencékkel és gépészeti-villamos berendezésekkel együtt. A kitermelt, magas oldott anyag tartalmú felszín alatti vizek kémiai módszerekkel történő kezelését követően a tisztított víz az egy pontú kibocsátás műtárgyain keresztül, ellenőrzött körülmények között jut a Pécsi-vízbe.

A tájrendezés kivitelezése során a megfelelő morfológia kialakítását követően a zagyterek teljes **felületén több rétegű** (agyag, homok, lösz) **takaróréteg építésére került sor**, melynek **minimális vastagsága 1,5 m**. A takaróréteg betölti a radonmigrációs gát szerepét

(megakadályozza a radongáz kiáramlását), megakadályozza a zagyhomok kiporzását, valamint a beszivárgást minimalizálva megakadályozza a zagy anyagában levő szennyezett anyagok kioldódását. A zagyterek lefedett felületére olyan növénytakaró telepítése történik, ami megakadályozza a felületi eróziót, de nem bontja meg a takaróréteg szerkezetét.

### **Vízkezelés**

A Vízkészítő Üzem három fő egységből áll:

1. Bányavíz kezelő, ahol a magas urántartalmú bányavizek és a meddőhányók alól szivárgó magas urántartalmú vizeket uránmentesítjük.
2. Zagyteri vízkészítő, ahol zagyterelőzők környezetének talaj- és rétegvizeibe kikerült, magas sótartalmú szennyeződés és a magas sótartalmú zagyterelőzői szivárgó vizek kezelése történik.
3. Egységes vízkormányozó rendszer, amelyben az előbb említésre került vízfajtákon felül a bányatársulástól az É-i és K-i tárón kifolyó - kezelést egyenlőre nem igénylő, (de a bányatársulások feltételét követően valószínűsíthetően a víz oldott urántartalma olyannyira megemelkedik, hogy urán mentesíteni kell) - bányavíznek az egységes és ellenőrzött rendszerben történő kezelését értjük. A rendszer biztosítja, hogy a környezetre és a vízbázisra veszélyt jelentő összetételű víz csak a veszélyt jelentő komponenseknek a jogszabályokban előírt koncentráció értékek alatt kerülhet ki a Pécsi vízbe, mint felszíni befogadóba.

### **Zagyteri szennyezett vizek kezelése**

A zagyterelőzők rekultivációjához szorosan kapcsolódik a zagyterek környezetéből a szervesanyagokkal nagymértékben elszennyeződött talajvíz kiemelése és megfelelő mértékű tisztítása. Ugyancsak e tevékenységhez tartozik a zagyteren található a szivárgó rendszeren keresztül távozó víz kezelése is.

A hidraulikai védelem rendeltetése, hogy a zagyterelőzők körül tervszerű vízszintsüllyesztéssel olyan depressziót alakítson ki, amely megakadályozza a már kikerült szennyező anyagok további szétterjedését, illetve képes arra, hogy a terjedési folyamatokat visszafordítsa.

A tervezésekor figyelembe vették a következő korlátokat, hatósági előírásokat alapján:

A Vízkészítő Üzem maximálisan 1 millió m<sup>3</sup>/év-es kapacitása (ebbe beletartoznak a szivárgó vizek is), Pécsi-víz terhelhetősége (kisvíz idején csak csökkentett vízmennyiséget lehet kibocsátani)

### **A tartyogói vízbázis vízkészletének védelme.**

A rendszer földrajzilag és hidrogeológiai értelemben is négy részre osztható:

1. ÉNY-i ág: az I. zagyterelőzőtől nyugatra, a Zóki-csatorna és az Édü-csatorna találkozásától nyugatra elterjedő háromszög alakú terület,
2. DNY-i ág: az I. és II. zagyterelőző találkozási pontjától nyugatra a Pécsi-vízig terjedő terület,
3. K-i ág: az I. zagyterelőzőtől keletre eső terület,
4. D-i ág: a két zagyterelőző közötti terület.

A rendszer vonalas (drénszivárgók) és pontszerű (kutak) létesítményekből áll, amelynek feladata a szennyezett talaj- és rétegvizek kitermelése és a Vízkészítő Üzembe juttatása. A Vízkészítő Üzembe juttatott víz kezelése kémiai kezelést jelent, melynek során a részleges sótalanítást mérszék felhasználásával végezzük. Természetesen ez a feladat a felhasznált kémiai anyagok megfelelő előkészítésére, oldására is kiterjed. A tisztított víz az egységes vízkormányozó rendszeren keresztül kerül a Pécsi vízbe kibocsátásra. A sótalanítás során kicsapott szervesanyag csapadékot részleges víztelenítés után a III. meddőhányón kialakított hulladéklerakóban deponáljuk.

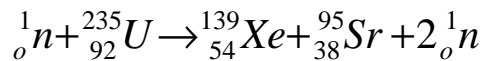
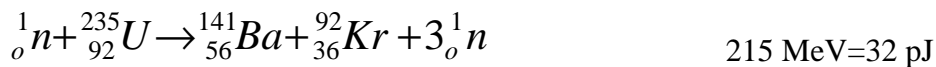
#### 4. Elektromos energiatermelés atomerőműben.

<http://www.npp.hu/uran/uran.htm>

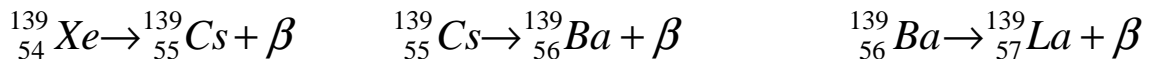
##### Hőtermelés a reaktorban

A reaktorban hasadóképes nehézelemet tartalmazó üzemanyag kötegeket helyezünk el. Az ezekben lévő atommagok megfelelő energiájú neutronokkal eltalálva gerjesztett állapotba kerülnek, majd két középnehéz atommagra hasadnak. A hasadás pillanatában a felszabaduló magerők mellett 2-3 szabad neutron is keletkezik, amelyek energiájuk csökkenése mellett újabb hasításra képesek. **Ez a láncreakció elve.** A folyamat önfenntartóvá és szabályozhatóvá tehető.

**Láncreakció** azáltal jön létre, hogy az atom ütközik lassú neutronnal, a hasadás folyamán 2, vagy 3 lassú neutron is létrejön:



A maghasadást **erős** radioaktivitás ( $\beta$ -bomlás) kíséri:



A maghasadáskor felszabaduló energia döntő részben a **hasadási termékek mozgási energiájaként jelenik meg**. A hasadványok nagyon rövid távon lefékeződnek és a környező közeget átadott energiájukkal melegítik. Ehhez járul még a hasadási termékek radioaktív bomlásából származó hő. Feladatunk a láncreakció biztonságos felügyelete és a hő elvonásával a reaktor aktív zónájának folyamatos hűtése. Az innen elvont hőt használjuk gőz előállítására.

**A természetes urán 99.3 %-a 238-as, 0.7 %-a pedig 235-ös izotóp.** Az U-238-as csak igen ritkán hasad, és csak akkor, ha a neutron nagy sebességgel ütközik a magnak. Az U-235-ös hasadása gyakorlati szempontból sokkal jelentősebb: ezt a magreakciót használja ki a ma működő atomreaktorok döntő többsége.

Ha egy lassú (kis energiájú, más néven **termikus**) neutron **ütközik az U-235 magjának**, a mag befogja azt, és egy új gerjesztett mag, U-236 jön létre. Az esetek kb. 85 %-ában igen rövid idő alatt ( $10^{-14}$  s alatt) **bekövetkezik a maghasadás. 1 db U-235 elhasadásakor kb. 200 MeV =  $3.2 \cdot 10^{-11}$  J energia szabadul fel.** (MeV, ejtsd mega-elektronvolt, egymillió elektronvolt.  $1 \text{ eV} = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ )

**Magyarország éves elektromosenergia-fogyasztása kb. 40000 GWh. Ennyi energia felszabadulásához 19 t tiszta U235 elhasadása kell.** Ugyanennyi energiát kapunk  $47 \cdot 10^6$  t (tehát kb. 2.5 milliószor annyi) **feketekőszén eltüzelésekor!** Látható tehát, milyen hatalmas energia rejlik az atommagokban. **Az energia sűrűség arány  $10^7$ .**

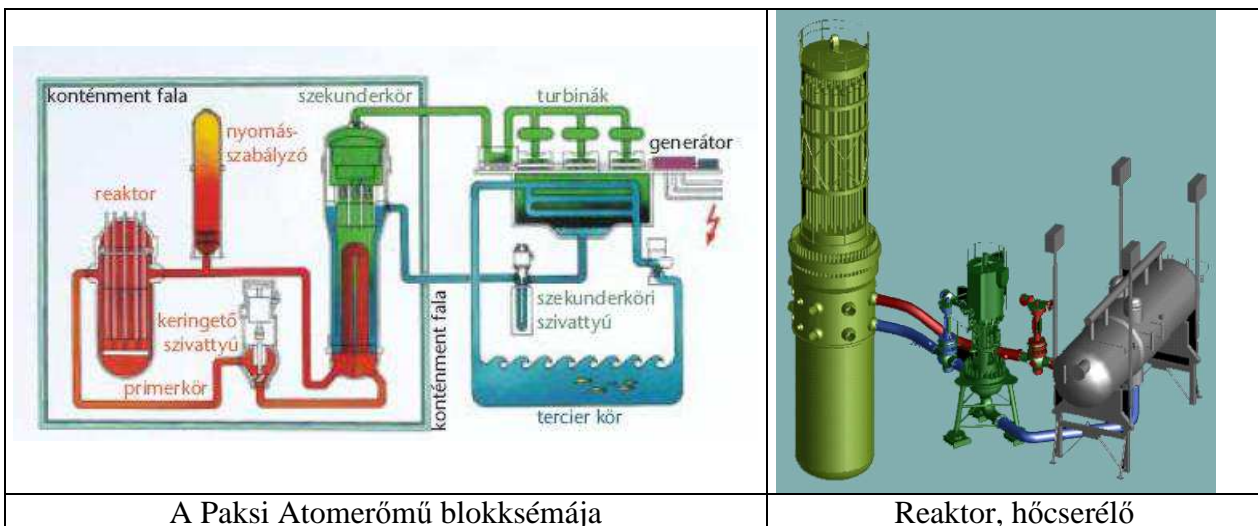


## Paksi Atomerőmű Zrt.

### Történet:

A **Paksi Atomerőmű Vállalat 1976-ban alakult meg, és 1992 óta részvénytársaságként működik.** Magyarország közepén, Paks városától 5 km-re lévő telephelyén 4 db VVER-440/213 típusú atomerőművi blokk üzemel, több mint 1860 MW beépített teljesítménnyel.

A **paksi atomerőműben 4 darab VVER-440/213 típusú reaktor működik.** Ezek a reaktorok a nyomottvizes reaktorok (PWR) csoportjába tartoznak. A név a "víz-vizes energetikai reaktor" orosz megfelelőjének rövidítéséből adódik, a "440" szám pedig arra utal, hogy egy ilyen atomerőművi blokk eredeti névleges villamos teljesítménye 440 MW volt. Ma ez a szám a különböző fejlesztéseknek köszönhetően az összes blokkon 460 MW-ra és a 4. blokkon 1999 óta 470 MW-ra nőtt. **A paksi atomerőmű elektromos összteljesítménye így 1850 MW.** A **reaktorok hőteljesítménye egyenként 1375 MW,** ebből kiszámolható a hatásfok: kb. 34%.



Az aktív zóna a függőleges elhelyezésű, hengeres **reaktortartályban** található, melynek teljes **magassága 13.75 m, külső átmérője 3.84 m.** A tartály acélból készült, falvastagsága az aktív zóna magasságában 14 cm, belülről pedig 9 mm vastag rozsdamentes acél bevonattal van ellátva a korrózióvédelem céljából. A tartályon különböző magasságban helyezkedik el a hűtőközeg be- és kivezetésére szolgáló hat belépő és hat kiömlő csomópont.

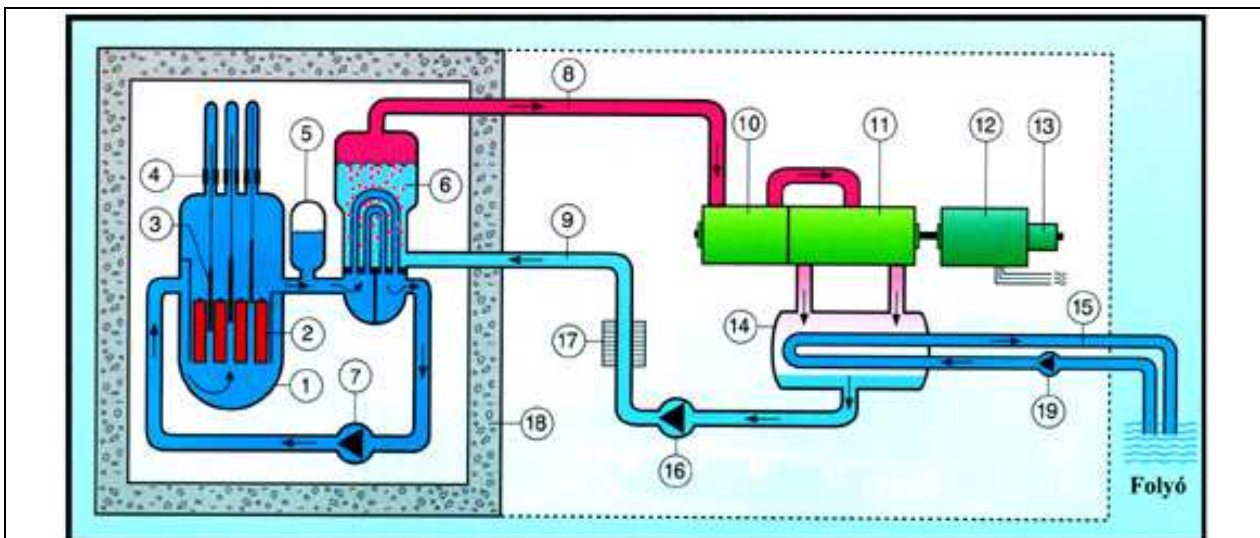
Az atomreaktor teljes élettartamát a reaktortartály élettartama határozza meg, ezt a hatalmas berendezést ugyanis nagyon költséges lenne kicserélni. A tartály anyagának kristályszerkezete azonban az állandó neutronsugárzás hatására rongálódik, emiatt az atomerőművek méretezési (tervezett) üzemideje 30-40 év.

A Paksi Atomerőműben újabban eme élettartam meghosszabbítása érdekében a zóna szélére kiégett, ún. negyedéves kazettákat tesznek. Az ilyen kazettákban már kevés a hasadóképes U-235, emiatt azokból jóval kevesebb neutron lép ki, így kisebb neutronsugárzás éri a reaktortartályt. Ebben az ún. alacsony kiszökésű zónában tehát már négy évet töltenek az üzemanyagkazetták. Érdeemes megjegyezni, hogy a neutronsugárzás hatására bekövetkező kedvezőtlen anyagszerkezeti változásokat - az ún. ridegdedést - vissza lehet fordítani abban az esetben, ha a tartály anyagát magas hőmérsékletre hevítik fel. Ekkor a kristályhibák "megjavulnak", olyan új anyagszerkezet jön létre, mintha a tartály újonnan készült volna. Ilyen eljárást a világ több reaktorán alkalmaztak már, így hosszabbítva meg azok élettartamát.

## Üzemanyag és elhelyezése:

A reaktor üzemanyaga urán-dioxid ( $UO_2$ ), amit kb. 9 mm magas, 7.6 mm átmérőjű hengeres pasztillákká préselnek. A VVER típusú reaktoroknál a pasztilla középvezetékében egy 1.6 mm átmérőjű belső furat található. Ez egyrészt azért célszerű, mert így az üzemanyagból kilépő hasadványgázok elég nagy térfogatot tölthetnek meg (így nem lesz túl nagy a fűtőelem-pálcában a nyomás), másrészt így alacsonyabb maximális hőmérséklet lép fel az üzemanyagban. A fűtőanyagból egy reaktorban 42 tonnányi mennyiséget helyeznek el évente 3.6%-ra dúsítva, urán-dioxid pasztillákká préselve, üzemanyagpálcákba töltve, kazettákba szerelve.

Az uránpasztillákat egy cirkónium-nióbium ötvözetből készült, 2.5 m hosszú, 9 mm külső átmérőjű csőbe (a burkolatba) helyezik, amit feltöltenek hélium-gázzal, és ezután hermetikusan lezárnak. A burkolat megakadályozza a hasadványok kikerülését a hűtővízbe. Az **üzemanyagtabletta** és a burkolat együtt jelentik a **fűtőelem-pálcát**. A burkolat és az uránpasztilla között egy vékony gázrész található annak érdekében, hogy üzem közben legyen elegendő hely a pasztilla hőtágulására.



Nyomottvízes atomreaktor (PWR) bloksémája

A **primer kör** részei: 1 Reaktortartály, 2 Fűtőelemek, 3 Szabályozórúd, 4 Szabályozórúd hajtás, 5 Nyomástartó edény, 6 Gőzfejlesztő, 7 Primer körű keringtető szivattyú, 18 Betonvédelem

A **szekunder kör** részei: 8 Frissgőz, 9 Tápvíz, 10 Nagynyomású turbina, 11 Kisnyomású turbina, 14 Kondenzátor, 16 Tápvíz szivattyú, 17 Tápvíz előmelegítő). Itt található az elektromos energia előállító rész a generátor és a gerjesztőgép (12, 13)

A primer és a szekunder kör vize nem keveredik egymással! A gőzfejlesztőben is csöveken keresztül adódik át a primer oldal hője. Így elérhető, hogy a hűtőközegbe került radioaktív anyagok a primer körben maradjanak, és ne kerülhessenek a turbinába és a kondenzátorba.

A **harmadik körben** történik a kondenzátorban eladott hőnek az elszállítása a hűtővíz körrel (15 Hűtővíz, 19 Hűtővíz szivattyú).

**Az aktív zónát a 312 db üzemanyagkazetta, a 37 db abszorbensrúd és a moderátor szerepét is betöltő hűtővíz alkotja.** Az atomerőművet indulása után egy évvel leállítják, és kiszedik a már kiégett, eredetileg 1.6% dúsítású kazettákat, és helyükre az eredetileg 2.4% dúsítású kazettákat rakják. A 3.6% kezdeti dúsításúakat is átrakják (a 2.4%-osak helyére), és



helyettük friss (3.6%-os) üzemanyagot raknak a zónába. Ezután az erőművet évente leállítják, és kiveszik a leginkább kiégett üzemanyagkazettákat. A többi üzemanyagkazettát a fentiek szerint átrakják, és friss üzemanyagot is betesznek. A kezdeti töltetet kivéve tehát minden kazetta három évet tölt a reaktorban.

A fűtőelemeket kötegekbe foglalják. A VVER-440-nél a **fűtőelemkötegek (kazetták)** hatszöges keresztmetszetűek, és egyenként 126 fűtőelemet tartalmaznak. (A nyomottvízes reaktorok közül csak a VVER-ek kazettája hatszöges, a többi négyzet keresztmetszetű.). **A kazettákban lévő  $UO_2$  üzemanyag dúsítása 3.6 % lehet, de egy kazettában rendszerint csak azonos dúsítású fűtőelemek vannak. A kazetták 14.4 cm laptávolságúak. Az aktív zónában összesen 349 kazetta fér el, ebből az üzemanyagkötegek száma 312.**

## Reaktor szabályozása

Fontos fogalom a **kritikus tömeg**. Például **golyó alakú, moderátor nélküli fém U-235 kritikus tömege 49 kg**. Az U-235 hasadásakor átlagosan 2.4 neutron szabadul fel, azonban nem mind okoz újabb hasadást. A neutronviszonyokat az ún. **sokszorozási tényezővel ( $k$ )** jellemezhetjük. Ha a sokszorozási tényező értéke 1, **kritikus** reaktorról beszélünk. Ekkor tehát a neutronok száma a rendszerben állandó, azaz pl. másodpercenként ugyanannyi hasadást okoznak.  $k < 1$  esetén a rendszer **szubkritikus**, a neutronok száma folyamatosan csökken. Ha pedig  $k > 1$ , a neutronok száma egyre nő, a reaktor **szuperkritikus**.

A neutronok számát a reaktorban nyilvánvalóan szabályoznunk kell, hiszen ettől függ a létrejövő maghasadások száma, és így a felszabaduló energia is. A **láncreakció szabályozásához** olyan anyagok kellenek, amelyek előszeretettel elnyelik (abszorbeálják) a neutronokat. **A leginkább használatos neutronabszorbensek a kadmium (Cd) és a bór (B)**, mivel ezek sokkal nagyobb valószínűséggel nyelik el a neutronokat, mint maga az urán.

A szabályozás legfőbb eszközei az ún. **szabályozó rudak**, amelyek minden reaktorban megtalálhatók. Ezek olyan, neutronelnyelő anyagból készült rudak, amelyeket a hasadóanyagba lehet engedni, ill. kihúzni, így szabályozva a maghasadást létrehozó neutronok számát. Ha például csökkenteni akarjuk a reaktorban felszabaduló energiát (azaz a teljesítményt), elég beljebb tolni a szabályozó rudakat, hiszen ez elnyeli az épp hasítani készülő neutronok egy részét, így csökken a hasításra rendelkezésre álló neutronok száma. Ha növelni akarjuk a teljesítményt, több neutronra van szükségünk a hasításhoz, vagyis kijebbn kell húzni a neutronelnyelő rudakat. A szabályozórudak főleg a rövid időn belüli beavatkozáshoz és a leálláshoz szükségesek. **Hosszú távú szabályozáshoz a hűtőközegben oldott bórsavat használnak.**

A kilépő neutronok döntő többsége szinte felfoghatatlanul rövid idő alatt elhagyja az uránmagot, kb. 0.75%-ukat azonban csak másodpercek múlva adják le a hasadványmagok. Ezek az ún. késő neutronok, amelyeknek igen nagy szerepe van a reaktor szabályozhatóságában.

A VVER-440 típusban a láncreakció szabályozásához **a fűtőelemkötegekkel azonos méretű abszorbens (bóracélból készült) kazettákat** használnak, amelyek felülről lógnak be a zónába. **A reaktorban összesen 37 ilyen szabályozó és biztonságvédelmi kazetta van**, amelyek közül üzem közben **30 állandóan kihúzott állapotban**, az aktív zóna fölött helyezkedik el. Ezek az ún. **biztonságvédelmi (BV)** rudak, amelyekkel a reaktor bármikor biztonságosan leállítható. A maradék 7 abszorbens kazettával az üzem közbeni teljesítmény-szabályozást végzik, de természetesen ezek is ellátnak biztonságvédelmi funkciót. A szabályozó kazetták aljához egy-egy fűtőelemkazettát kapcsolnak, így a kihúzott abszorbensek helyén is üzemanyag található.

A fűtőelem néhány (3-4) év alatt "kiég": hasadóanyag-tartalma lecsökken, és felszaporodnak benne a különböző magreakciók során keletkező hasadási termékek és transzurán magok. Ezért meghatározott időnként "át kell rakni" a zónát: ilyenkor veszik ki a kiégett, és teszik be a friss üzemanyagot.

### **Gőzfejlesztés, elektromos energia előállítás**

Az aktív zónában felszabaduló hő elszállítása a reaktor körül lévő, 6 darab hűtőkör feladata. (Ezek térbeli elrendezése látható az ábrán. A méretek szemléltetéséhez középre egy méretarányos embert rajzoltunk.) A hűtőkörök között eltérés csak abban van, hogy az egyik körhöz kapcsolódik a nyomás szabályozhatóságát elősegítő ún. térfogatkompenzátor.

A névleges állapotban **297 °C-ra felmelegedett víz, 123 bar nyomáson** az ún. melegágon lép ki a reaktorból, és jut el a gőzfejlesztőbe. A gőzfejlesztő (2.3 m átmérőjű, 12 m hosszú), fekvő henger alakú hőcserélő, amelyben a víz hőjének egy részét átadja a szekunder kör vizének, miközben **a primer körű víz 267 °C-ra hűl le**. A radioaktív primer körű víz a gőzfejlesztőben **5536 db 16 mm átmérőjű fűtőcsövön áramlik át**, így forralva fel a gőzfejlesztőben lévő inaktív szekunder körű vizet. A lehűlt hűtőközeg a hidegágon jut vissza a reaktorba. A víz cirkulációját a főkeringető szivattyú (FKSZ) biztosítja. Minden hűtőkör külön-külön lezárható az ún. főelzáró tolózár (FET) segítségével, melyből minden körben két darab található.

A VVER típusú reaktorok nyomottvízes rendszerűek, azaz a primer körben nagy nyomás fenntartásával biztosítjuk azt, hogy a hűtőközeg ne forrjon el. (A víz forráspontja 1 bar, azaz légköri nyomáson 100 °C, **a primer körben uralkodó 123 bar nyomáson viszont már 330 °C körüli.**) A nyomás állandó értéken tartására szolgál a térfogatkompenzátor vagy nyomáskiegyenlítő. Minden blokkhoz 1 db térfogatkompenzátor tartozik, amely az egyik hurok melegágához csatlakozik. A térfogatkompenzátor egy álló elrendezésű tartály, melynek alját az egyik hűtőkör melegágával, tetejét -szelepeken keresztül- az egyik hidegággal kötik össze. A tartályban 325 °C-os, telített állapotú víz, és felette gőzpárna található.

Ha például a primer körben elkezd nőni a nyomás, adott érték elérése után automatikusan nyitnak a befecskendező szelepek, amik a hidegágból vizet juttatnak a térfogatkompenzátorba. A 267 °C-os "hideg" víz hatására a gőz egy része lekondenzálódik, nyomása tehát csökken. Ha a nyomás ennek ellenére is tovább nő, nyitnak az ún. biztonsági lefúvató szelepek, amiken keresztül a gőz egy része egy tartályba juthat. (A túl nagy nyomás a berendezéseket veszélyeztetné.). Ha a primer körben a víz nyomása csökken, a térfogatkompenzátorban lévő villamos fűtőpatronok automatikusan bekapcsolódnak. A fűtés a térfogatkompenzátor vizében intenzív forrást, gőzképződést okoz, ez pedig a nyomás növekedéséhez vezet.

A szekunder körben történik a reaktorban megtermelt hő átalakítása mozgási, majd villamos energiává. **A gőzfejlesztőben lévő 223 °C-os, 46 bar nyomású tápvíz** a csövekben keringő 297 °C-os primer körű víz **258 °C-ra melegíti, és ezen a hőmérsékleten felforralja**. A keletkező gőz nedvességet is magával ragad, így a cseppeket el kell távolítani a gőzből, a turbinalapátok ugyanis tönkremennének a vízcseppektől. Erre szolgálnak a kilépő gőz útjába helyezett cseppeválasztó zsaluk. Ezek olyan terelőlemezek, amelyekén áthaladva a vízcseppek lecsapódnak, így a kilépő gőz nedvességtartalma már alacsonyabb, mint 0.25%.

**A gőzfejlesztőből kilépő, mintegy 450 t/h tömegáramú gőz** a turbinára kerül, ahol mozgási energiáját kihasználva meghajtja a turbina lapátjait. Egy adott blokkban lévő 6 gőzfejlesztőből 3 együtt táplál egy turbinát. A turbinában egy tengelyen helyezkedik el egy nagynyomású és két

kisnyomású ház, valamint a generátor fogórésze. A turbina nagynyomású háza 6 fokozatú, azaz a gőz expanziója és munkavégzése 6 fokozatban történik. **A nagynyomású turbinaházban a gőz hőmérséklete kb. 140 °C-ra csökken, nedvességtartalma pedig 12%-ra nő.** Emiatt a kisnyomású házba való belépés előtt az ún. **cseppleválasztó és gőztúlhevítő berendezésbe** kerül, ahol a turbinára káros vízcseppeket eltávolítják belőle és a telítési hőmérséklet fölé melegítik. A két kisnyomású ház 5-5 fokozatú.

**A már munkát végzett gőz a kondenzátorba kerül,** ahol csaknem 13 000 csőben a **Dunából kivett hűtővíz áramlik.** A hűtőcsöveken a gőz kb. 25 °C-os hőmérsékleten lekondenzálódik. Minden turbinaegységhez két kondenzátor tartozik, amelyekben 0.035 bar nyomást (vákuumot) tartanak fenn. (A turbinán a munkagőzt a gőzfejlesztő és a kondenzátor közti nyomáskülönbség hajtja át.)

A cseppfolyósodott munkaközeget különböző tisztító és előmelegítő berendezéseken keresztül a tápszivattyúk visszajuttatják a gőzfejlesztőbe. Az előmelegítésre az erőmű jobb hatásfoka miatt van szükség. **Az előmelegítést a turbináról vett gőzzel végzik,** melynek során a kondenzátorból kilépő 25 °C hőmérsékletű víz 9 hőcserélőben végezetül 223 °C hőmérsékletűre melegszik fel. A tápvíz ezen a hőmérsékleten lép be a gőzfejlesztőbe, ahol újra átveheti a primer körű víz hőjét.

### **Kiégett tüzelőanyag kezelés**

Az **elhasználódás (kiégés) után** a nukleáris fűtőanyag-kötegeket **áthelyezik a reaktor melletti pihentető medencébe,** ahol víz alatt tárolják azokat. Öt év tárolási idő elteltével a kiégett kötegeket az eddigi gyakorlat szerint biztonságos konténerekbe rakták, majd a Szovjetunióba, később Oroszországba szállították újrafeldolgozás céljából. Az erőmű területén az elhasznált fűtőanyag átmeneti, maximum 50 éves tárolását biztosító új létesítmény műszaki próbái 1996. decemberében sikeresen befejeződtek. Ezt követően megindult az átmeneti tároló feltöltése, ami 1999-ben is folytatódott. 1995 végén az Országos Atomenergia Bizottság kezdeményezésére kormányprogram indult a végleges elhelyezés megoldására. 2040-re kell Magyarországon mélyiségi tárolóhelyet találni.

**A Paksi Atomerőműben termelik meg a Magyarországon előállított villamos energia közel 40 százalékát.** A paksi blokkok a teljesítmény-kihasználási mutató alapján a világ élvonalába tartoznak, és évek óta az első huszonöt blokk között szerepelnek.

A paksi atomerőmű elsőként elégítette ki a volt keleti tömb atomerőművei közül a legkorszerűbb előírásrendszereket. A paksi reaktorblokkok a nukleáris biztonság szempontjából továbbra is megfelelnek a szigorú nemzetközi elvárásoknak, de az idő haladtával - mint bárhol máshol a világon - tervszerűen, folyamatosan végre kell hajtani az újonnan kidolgozott biztonságnövelő intézkedéseket. Ez a paksi atomerőműben folyó egyik legnagyobb projekt.

### **Az atomerőművek típusai. További atomreaktorok**

Az atomerőművek felépítése hasonlít a hagyományos hőerőművekéhez, hiszen mindkettő esetében a kazánban (ill. reaktorban) felszabaduló hőt valamilyen hűtőközeggel szállítatjuk el, és azt gőz termelésére használjuk fel. Ez a gőz azután a turbina forgólapátjaira kerülve meghajtja azokat, és ebből a mozgási energiából termel villamos energiát a generátor. A gőz a kondenzátorba kerül, ahol lecsapódik, újra folyékony halmazállapotúvá alakul. Az így lehűlt víz előmelegítés után újra a visszajut a kazánba, illetve nyomottvízes atomerőmű esetén a gőzfejlesztőbe.

A világon sokféle atomerőmű típust alkalmaznak az energiatermelésben. A különböző atomerőmű típusokat rendszerint a bennük alkalmazott atomreaktor fő jellemzői alapján szokás csoportosítani. A ma leginkább elterjedt **energetikai reaktor típusok**:

- **Könnyűvízes reaktorok**: ezekben mind a moderátor, mind a hűtőközeg könnyűvíz ( $H_2O$ ). Ebbe a típusba tartoznak a [nyomottvízes](#) (PWR: Pressurized Water Reactor) és a [forralóvízes](#) (BWR: Boiling Water Reactor) reaktorok.
- **Nehézvízes reaktorok** (pl. [CANDU](#)): a moderátor, és a hűtőközeg is nehézvíz ( $D_2O$ ).
- **Grafitmoderátoros reaktorok**: ezen belül a [gázhűtésű](#) reaktorok (GCR: Gas Cooled Reactor), és a könnyűvíz hűtésű reaktorok ([RBMK](#)).
- **Egzotikus reaktorok** (gyors tenyésztőreaktorok és egyéb kísérleti berendezések).

**Atomjégtörők és anyahajók**: Az újabb jégtörők általában két KLT-40 típusú nyomottvízes reaktorral rendelkeznek. Ezeknek a reaktoroknak az aktív zónája nagyon kicsi: átmérője 1m, magassága 1.5 m. Az üzemanyaguk 30-40%-ra dúsított urán, amelyet 3-4 évente kell újra cserélni. A hajózási útvonalon jellemző 2-2.5 m vastagságú jégen 18 km/h sebességgel tudnak haladni, jégmentes vízen 40 km/h-val.

Atommeghajtású tengeralattjáró: az Egyesült Államokon (kb. 75 db) kívül Oroszország (50), Franciaország (10), Nagy-Britannia (15) és Kína (5) épített atommeghajtású tengeralattjárót. Az atomtengeralattjárókon is legtöbbször nyomottvízes reaktorokat alkalmaznak (~50 MW). A szekunder körben a gőz megforgatja a turbinát, az viszont egy áttétellel (fordulatszám csökkenéssel) kapcsolódik a hajócsavarhoz, tehát a gőz közvetlenül a hajócsavart forgatja. Ezenkívül elektromos energiát is termelnek a generátoron. (Létezik olyan rendszer is, ahol csak villamos energiát állítanak elő, a hajócsavart pedig villanymotor hajtja meg.) A termelt energiával oldják meg a légkondicionálást, és az édesvíz desztillálását tengervízből, emiatt a tengeralattjáró akár hónapokig a víz alatt tud maradni felszínre emelkedés nélkül.

### **RBMK típusú reaktorok**

Az RBMK egyedi reaktor: moderátora grafit (ebben az AGR-ekre hasonlít), hűtőközege elgőzölgő könnyűvíz (ebben a BWR-ekre), ráadásul nyomottcsöves (ebben a CANDU-ra). RBMK volt a világ legelső atomerőművi reaktora (1954, Obnyinszk) is. Ehhez a típushoz tartozott az 1986. április 26-án szerencsétlenül járt [csernobili](#) blokk is.

Az 1970-es évek elején a Szovjet Műszaki Energetikai Kutatóintézetben fejlesztették ki a nagyteljesítményű vízforraló csatornarendszerű reaktortípust ([RBMK](#)). Az első két nagy elektromos teljesítményű reaktort még az 1970-es években megépítették Leningrádban. További RBMK reaktorok épültek Oroszország erősen iparosodó, energiaigényes nyugati részein, például Kurszkban, továbbá Litvániában (Ignalina) és Ukrajnában (Csernobil) is.

Az RBMK reaktorokkal már a csernobili baleset előtt is felmerültek kisebb problémák. Az Ignalina Atomerőműnél figyeltek meg egy jelenséget: amikor a szabályozórudakat betolták a reaktorba, a [reaktivitás](#) várt csökkenése helyett annak átmeneti növekedését tapasztalták. Ugyanez a jelenség mutatkozott a negyedik csernobili reaktor próbaüzeménél is, de nem tartották elég fontosnak ahhoz, hogy fölhívják rá az operátorok figyelmét vagy leírják a reaktor kezelési utasításában.

RBMK reaktorok csak a volt Szovjetunió néhány utódállamában működnek. A típus részesedése a világ atomerőművi összkapacitásából 4 %. A típusnak műszaki és gazdasági szempontból sok előnye, a biztonság szempontjából azonban jelentős hátránya van.

Az RBMK előnyei közé sorolható az elérhető hatalmas teljesítmény: mivel a nyomást a csatornák veszik fel, nincs szükség reaktortartályra, a csatornákból pedig elvileg akármennyit egymás mellé lehet tenni, így a kivehető teljesítménynek elméletileg nincs felső korlátja. (A csernobili reaktorok például 1000 MW elektromos teljesítményűek voltak, de terveztek 2000 MW-os reaktort is.) Az RBMK másik nagy előnye, hogy szemben a könnyűvízes reaktorokkal (de hasonlóan a CANDU-hoz) a kiegészített üzemanyag átrakása, cseréje üzem közben is megoldható, azaz nem kell miatta leállni.

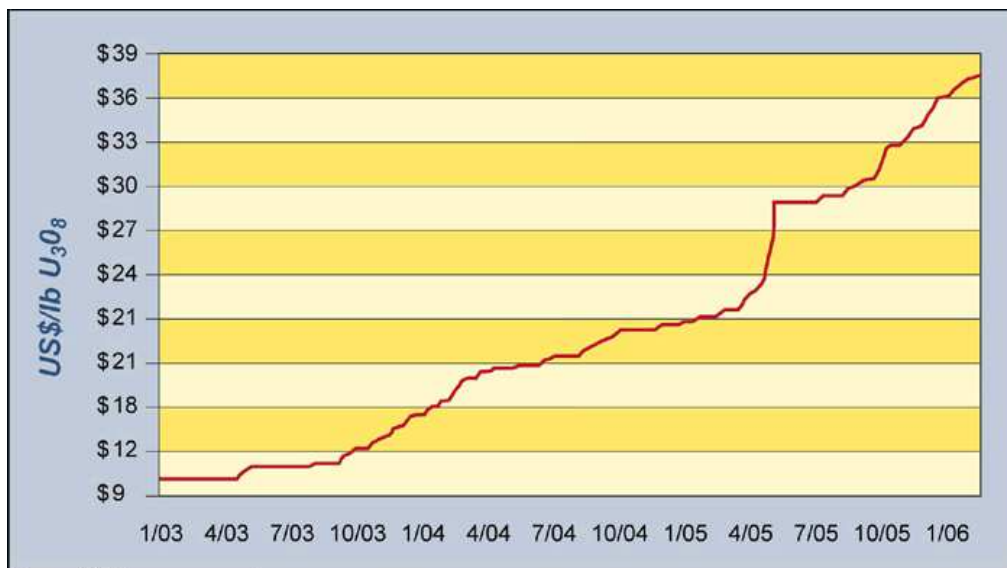
Az RBMK hátrányai közül ki kell emelni a zóna nagy mérete és a sok csatorna miatt szükséges nagyon nehézkes szabályozást: Csernobilban például reaktoronként 200 szabályozórúd volt (Pakson sokkal kevesebb, csak 37 szükséges). A csernobili balesetben azonban még ennél is nagyobb szerepet játszott a típus egy másik sajátossága: bizonyos állapotokban pozitívvá vált az ún. üregegyűtthető. Ez azt jelenti, hogy szélsőséges körülmények között a hűtővíz elforrása reaktivitásbevitelt, azaz pozitív visszacsatolást jelent. Ennek oka, hogy az RBMK típusnál a könnyűvíz hűtőközeg sokkal több neutronot nyel el, mint a grafit moderátor. Forráskor a víz (azaz a neutronelnyelő közeg) sűrűsége nagyon lecsökken, így elgőzölgéskor megnő a neutronok száma. (Pakson az üregegyűtthető mindig negatív, aminek az az oka, hogy a VVER-ekben a víz a moderátor szerepét is betölti, ezért az esetleges elforrásakor a neutronok a moderátor hiányát is megérik: nem lassulnak le, így nem hasíthatnak újabb magokat. Emiatt a láncreakció is leáll.) Az RBMK reaktorok egy részében ma már elérték, hogy az üregegyűtthető gyakorlatilag nulla legyen, ezzel kiküszöbölve ezt a biztonság szempontjából hátrányos tényezőt.

### **Csernobili atomerőmű 1986**

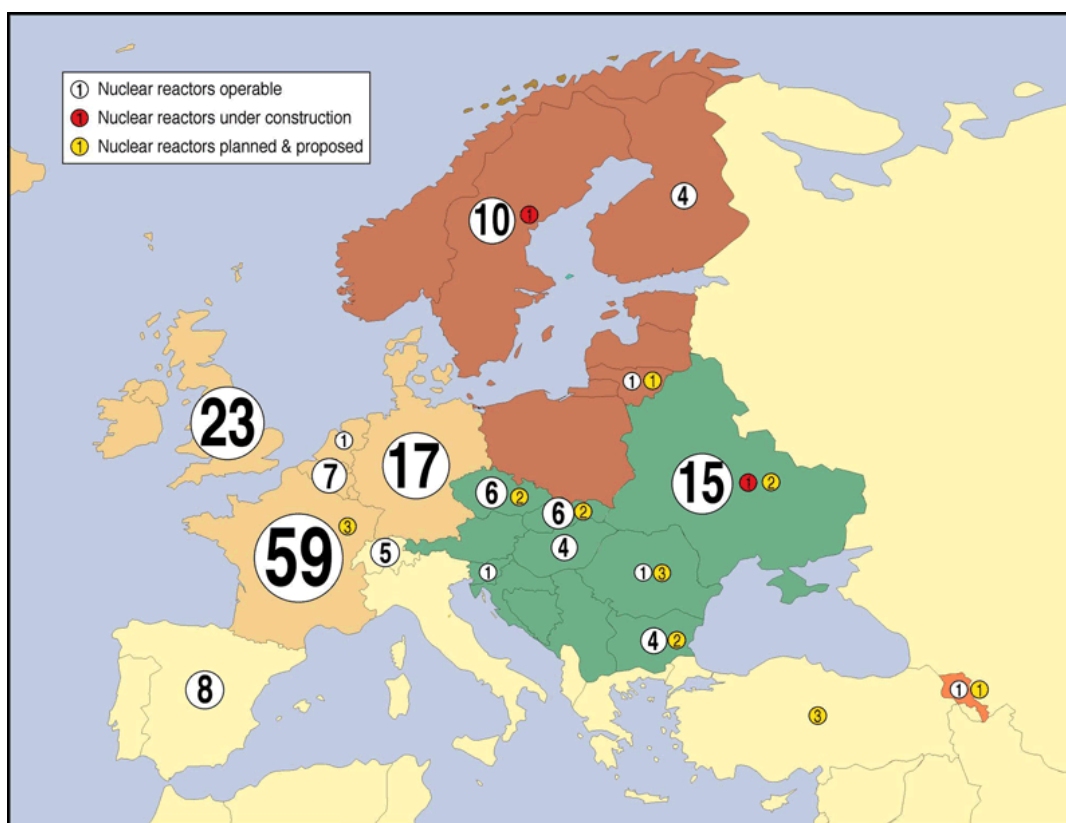
A csernobili atomerőmű mérnökét, Anatolij Diatlovot az a probléma foglalkoztatta, amennyiben hirtelen kiesik a hálózati villamos-energia szolgáltatás, a zóna hűtőközegét keringető szivattyúk leállnak. Ilyen esetekben az automatika leállítja a reaktort, de a maradványhő elvezetéséről a továbbiakban is gondoskodni kell. A főkeringető szivattyúk üzemeltetéséhez szükséges villamos áramot ilyenkor Diesel-motorok segítségével állítják elő. A Diesel-motorok felpörgéséhez azonban néhány perc időre van szükség. Diatlov a problémára a következő megoldást találta: A hálózati áramellátás kiesése után ugyan leáll a reaktor, így a turbinák gőzellátása hamarosan megszűnik, ellenben a turbina forgórészek tehetetlenségük folytán még egy pár percig forgásban maradnak. A lassuló turbinával meghajtva a generátorokkal áramot lehet előállítani. Ahogy a turbina kipörög, természetesen az áram gyengül. Ezt a problémát a villamos áramkörök bonyolult átkapcsolásaival lehet áthidalni. A módszer gyakorlati kipróbálására üzem közben nincs lehetőség. Várni kellett, amíg a téli villamosenergia-igény csökkenésével az egyik reaktort le lehetett állítani a tavaszi fűtőelemcsere és a karbantartási munkálatok idejére. Diatlov engedélyt kapott Fomintól, az atomerőmű főmérnökétől, hogy a villamosmérnöki kísérletet a négyes számú reaktoron 1986. tavaszán elvégezhessék.

### **Újgenerációs reaktorok**

Az atomerőművek biztonságára vonatkozó előírások folyamatosan szigorodnak, és a jövőben várhatóan még tovább fognak szigorodni. Ezeknek az előírásoknak a betartása azonban **a termelt villamos energia árát is befolyásolja**, a biztonságnövelő intézkedések ugyanis igen sokba kerülnek. A cél tehát olyan reaktorok kifejlesztése, amelyek biztonsága még a mai reaktorokét is jóval meghaladja, és közben az ár tekintetében is versenyképesek maradnak. Mindkét feltételnek megfelelnek az ún. újgenerációs reaktorok, amelyek többségének még csak a terve létezik.



UX U<sub>3</sub>O<sub>8</sub> PRICES



NUCLEAR REACTOR DISTRIBUTION

Az újgenerációs reaktorok **két fő fejlődési iránya van**: az **evolúciós** és a **revolúciós** rendszerek. Az **evolúciós rendszerek** a már meglévő, bevált reaktorok továbbfejlesztett változatai. Az alacsonyabb költségek egyrészt annak köszönhetőek, hogy már létező, ismert berendezéseket kell fejleszteni, másrészt pedig a bonyolult működésű eszközök egyszerűsítésének eredménye.

A **revolúciós rendszerek** ún. passzív biztonsági rendszereket alkalmaznak. A passzív berendezések alatt azt értjük, hogy a működtetésükhöz nincs szükség sem külső energiaforrásra, sem emberi beavatkozásra.



**A világ atomreaktorai 2001–2002-ben és a szükséges uránmennyiség 2002. augusztus**

	Elektromos energia termelése 2001		Működő reaktor 2002. június		Épülő reaktor 2002. jún		Tervezett reaktor 2002. jún		Szükséges urán 2001
	milliárd kWh	%	No.	MWe	No.	MWe	No.	MWe	tonna U
Argentína	6,5	8.2	2	935	0	0	1	692	133
Örményország	2,0	34.8	1	376	0	0	0	0	68
Belgium	44,1	58.0	7	5728	0	0	0	0	1109
Brazília	14,3	4.3	2	1855	0	0	0	0	296
Bulgária	18,2	41.6	6	3538	0	0	0	0	618
Kanada	72,3	12.9	14	9998	6	3598	0	0	1343
Kína:									
- Kína NNC	16,7	1.1	5	3702	6	4835	0	0	572
- Taipower	35,0	21.6	6	4884	2	2600	0	0	966
Cseh Közt.	14,7	19.8	5	2560	1	912	0	0	519
Finnország	21,9	30.6	4	2656	0	0	0	0	553
Franciaország	401,3	77.1	59	63203	0	0	0	0	10159
Németország	162,3	30.5	19	21141	0	0	0	0	3712
Magyarország	14,1	39.1	4	1755	0	0	0	0	425
India	17,3	3.7	14	2548	6	3526	3	1400	312
Irán	0	0	0	0	1	950	0	0	0
Japán	321,9	34.3	54	44301	3	3696	12	15858	7393
Korea (Észak)	0	0	0	0	0	0	2	1900	0
Korea (Dél)	112,1	39.3	17	13920	3	2850	8	9200	2466
Litvánia	11,4	77.6	2	2370	0	0	0	0	359
Mexikó	8,1	3.7	2	1310	0	0	0	0	232
Hollandia	3,7	4.2	1	452	0	0	0	0	115
Pakisztán	2,0	2.9	2	425	0	0	0	0	56
Románia	5,1	10.5	1	655	0	0	1	620	90
Oroszország	125,4	15.4	30	20793	3	2625	3	2950	3411
Szlovák Közt.	17,1	53.4	6	2472	2	840	0	0	528
Szlovénia	5,0	39.0	1	679	0	0	0	0	131
Dél-Afrika	13,3	6.7	2	1842	0	0	0	0	363
Spanyolország	61,1	28.8	9	7345	0	0	0	0	1613
Svédország	69,2	43.9	11	9460	0	0	0	0	1533
Svájc	25,3	36.0	5	3170	0	0	0	0	599
Ukrajna	71,7	46.0	13	11195	0	0	2	1900	1893
Egyesült Királys	82,3	22.6	31	12282	0	0	0	0	2588
USA	768,8	20.4	104	98406	0	0	0	0	20801
<b>Világ</b>	<b>2544</b>	<b>16.2</b>	<b>439</b>	<b>355956</b>	<b>33</b>	<b>26,432</b>	<b>32</b>	<b>34 520</b>	<b>64 956</b>
	<b>milliárd kWh</b>	<b>%</b>	<b>No.</b>	<b>MWe</b>	<b>No.</b>	<b>MWe</b>	<b>No.</b>	<b>MWe</b>	<b>tonna U</b>

\* A BP, atomerőműveknél, azt a termikus ekvivalenciát számolja, amely egyenértékű villamosenergiát állít elő termikus erőműben.

NAGY ÁRPÁD: Természet Világa, 133. évf. 11. sz. 2002. november

### Hivatkozások:

KF-I-10.1	Teleptani alapismeretek <a href="http://fold1.ftt.uni-miskolc.hu/~foldshe/telep00.htm#toc">http://fold1.ftt.uni-miskolc.hu/~foldshe/telep00.htm#toc</a>
KF-I-10.2	Energiavagyon és kiaknázhatóság <a href="http://www.matud.iif.hu/01nov/nagy.html">http://www.matud.iif.hu/01nov/nagy.html</a>
KF-I-10.3	MECSEK-ÖKO Zrt. <a href="http://www.mecsekoko.hu/uranbanyaszat.html">http://www.mecsekoko.hu/uranbanyaszat.html</a>
KF-I-10.4	Nagy Béla: Energiavagyon és kiaknázhatóság; Magyar Tudomány 2001/11 <a href="http://www.matud.iif.hu/01nov/nagy.html">http://www.matud.iif.hu/01nov/nagy.html</a>
KF-I-10.5	Atomerőművek a villamos energia termelésben; Aszódi A; Magy. Tud., 2007/01 <a href="http://www.matud.iif.hu/07jan/04.html">http://www.matud.iif.hu/07jan/04.html</a>
KF-I-10.6	Magyar Atomforum Egyesület honlapja, <a href="http://www.atomforum.hu/intro/default.htm">http://www.atomforum.hu/intro/default.htm</a>

### Kérdések:

- K-I-10.1. Mennyi a talajban az urán átlagos koncentrációja?
- K-I-10.2. Milyen uránkoncentráció esetében tartják az uránérc kitermelését kifizetődőnek?
- K-I-10.3. Milyen bányászati formát szoktak alkalmazni az uránérc kitermelésénél?
- K-I-10.4. Mennyi meddig folyt ipari bányászati tevékenység uránérc kitermelésre Magyarországon?
- K-I-10.5. Mik a kibányászott urántartalmú kőzet feldolgozásának főbb lépései?
- K-I-10.6. Milyen három főbb frakciót különböztetünk meg a kitermelt urán nyersérc esetében?
- K-I-10.7. Milyen főbb folyamatokat különböztetünk meg a kémiai ércdúsítást követően az atomreaktor fűtőanyagának előállításában?
- K-I-10.8. Mit nevezünk rekultivációnak, milyen főbb lépéseit sorolhatjuk fel?
- K-I-10.9. Mi történt a perkolációs lerakók rekultivációja során?
- K-I-10.10. Mi történt a zagytarozók rekultivációja során?
- K-I-10.11. Milyen területeken történik vízkezelés?
- K-I-10.12. Ismertesse a láncreakció elvét!
- K-I-10.13. Milyen összetételű a természetes urán a 238-as, és a 235-ös izotópot illetően?
- K-I-10.14. Mennyi egy U-235-ös atom hasadásakor felszabaduló energia?
- K-I-10.15. Mennyi az energia sűrűség aránya a nukleáris és a fosszilis forrásokat illetően?
- K-I-10.16. Mit jelent a VVER-440 típusszám?
- K-I-10.17. Milyen alakú és milyen méretekkel rendelkezik egy reaktortartály Pakson?
- K-I-10.18. Milyen nyomás és kezdeti hőmérséklet adattal bír a reaktorköri nyomott víz?
- K-I-10.19. Mik a főbb egységei az atomerőmű egy teljes reaktor blokkjának?
- K-I-10.20. Mekkora a gőzfejlesztőből kilépő gőz tömegárama?
- K-I-10.21. Mi hűti le a munkagőzt a kondenzátorban?
- K-I-10.22. Hol tárolják kezdetben az elhasznált (kiégett) nukleáris fűtőanyag-kötegeket?
- K-I-10.23. Mennyi a reaktorok hőteljesítménye?
- K-I-10.24. Milyen az üzemanyag pasztilla koncentrációja urán-dioxidra nézve?
- K-I-10.25. Mik a leginkább használatos neutronabszorbensek?
- K-I-10.26. Mit használnak hosszú távú szabályozáshoz a hűtőfolyadékban?
- K-I-10.27. Mik azok az ún. biztonságvédelmi (BV) rudak?
- K-I-10.28. Mi történik elhasználat (kiegész) után a nukleáris fűtőanyag-kötegekkel?
- K-I-10.29. Milyen energetikai reaktor típusokat különböztetünk meg?
- K-I-10.30. Milyen típusú reaktor működött Csernobilban, mi volt annak a veszélye?
- K-I-10.31. Biztonsági szempontból hányadik helyen helyezkednek el a Paksi Atomerőmű reaktorai a világ „ranglistán”?

Pécs, 2012. február 20.

Dr. Német Béla