

# A maghasadás

A maghasadást 1939-ben fedezte fel Hahn, Strassman és Meitner. Azt találták, hogy neutronsugárzás hatására az uránatom magja két közepes méretű magra esik szét. Később azt gyanították, hogy elméletileg minden atommag elhasadhat, de a gyakorlatban csak néhány urán- és plutóniumizotóp esetében jön létre könnyen a hasadás (neutronok segítségével). Ezek az izotópok ráadásul energetikailag kedvezőbb állapotba jutnak a hasadás során, tehát több energia szabadul fel, mint amennyi a hasításhoz szükséges.

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 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 (10-14s alatt) bekövetkezik a maghasadás, 15 %-ában pedig a mag gamma-sugárzással szabadul meg felesleges energiájától. A hasadványok igen sokfélék lehetnek: ma 35 elem mintegy 200 izotópját ismerjük, ami az urán hasadási terméke lehet.

1 db U-235 elhasadásakor kb.  $200 \text{ MeV} = 3,2 \cdot 10^{-17} \text{ MJ}$  energia szabadul fel. (MeV, ejtsd mega-elektronvolt, egymillió elektronvolt.  $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ )

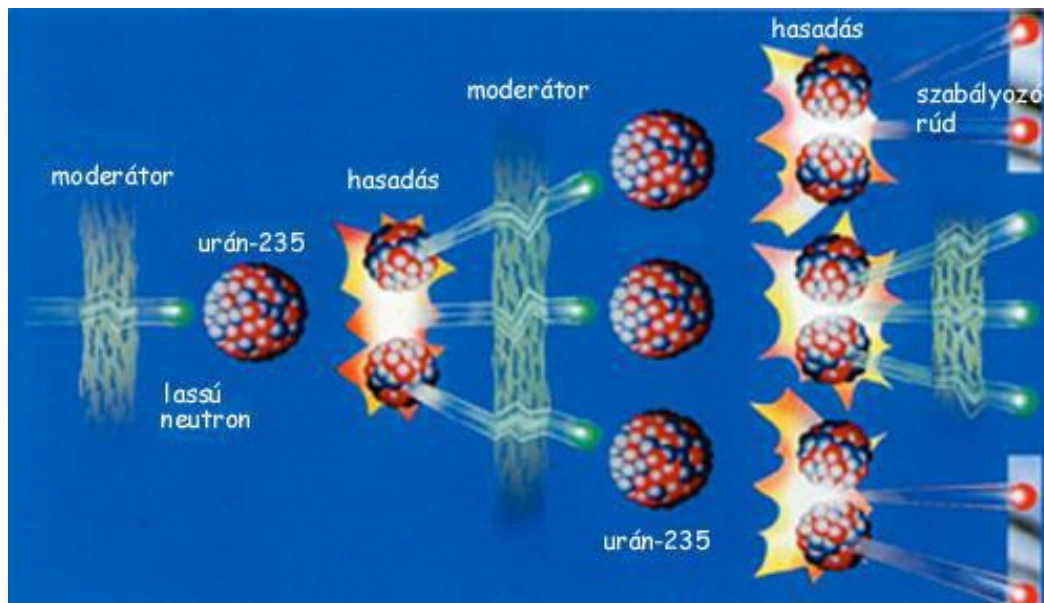
Ennél talán többet mond, ha megvizsgáljuk, hogy adott energiamennyiséghez mennyi urán elhasadása szükséges. Magyarország éves villamosenergia-fogyasztása kb. 44-45 ezer GWh. Ennyi energia felszabadulásához 19 t tiszta U-235 elhasadása kell. Ugyanennyi energiát kapunk 47 millió tonna (tehát kb. 2,5 milliószor annyi) feketekőszén eltüzelésekor! Látható tehát, milyen hatalmas energia rejlik az atommagokban.

# A nukleáris láncreakció

A maghasadás során a két hasadvány magon kívül néhány (U-235 esetén átlagosan 2,4) nagy energiájú, szabad neutron is keletkezik. A kiszabaduló neutronok száma attól függ, milyen hasadási termékek jönnek létre.

A láncreakció alap gondolata az, hogy egy folyamat egyik reakciótermékét használjuk fel a folyamat fenntartásához: az U-235 magok hasadása során keletkező neutronok végzik a további U-235 magok elhasítását. Amíg csak kevés hasadás történik, külső neutronforrással lehet segíteni a reaktor elindulását, de ha van elég neutron és U-235 mag, akkor erre sincs szükség, és a folyamat önfenntartóvá válik.

Ha a hasadásból keletkező 2-3 neutron csak egy új hasadást hoz létre (mert a többi elnyelődik, vagy kiszökik a reaktorból), a láncreakciót állandó intenzitásúnak hívjuk. Ha az egy hasadásból kilépő neutronok több uránmagot is elhasítanak, akkor adott idő alatt egyre több hasadás történik, és a láncreakció divergens lesz.



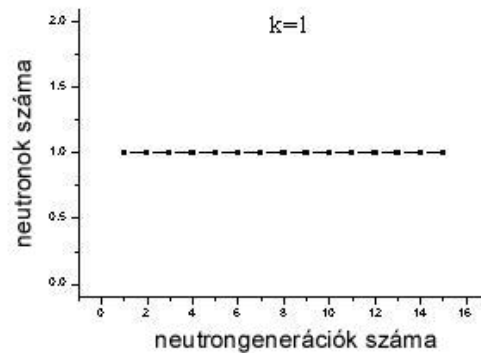
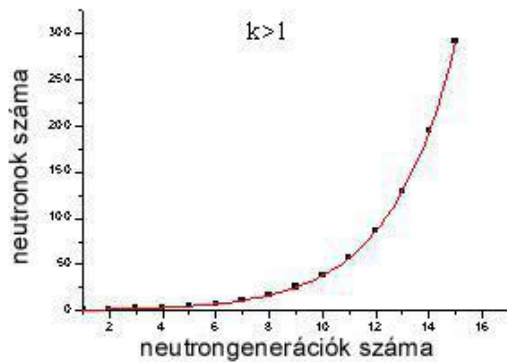
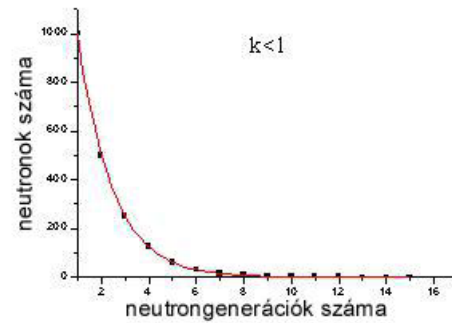
Az U-235 hasadásakor a magból nagyenergiájú neutronok lépnek ki, amelyek csak igen kis valószínűséggel hoznak létre újabb maghasadást. Ahhoz, hogy gyors neutronokkal valósítsunk meg láncreakciót, nagyon nagy dúsítású uránra van szükség, ez pedig igen drága megoldás. Járhatóbb út olyan anyagok alkalmazása, amelyek a gyors neutronokat annyira lelassítják, hogy azok nagy valószínűséggel hozzanak létre újabb hasadást. Ezek az anyagok a moderátorok. Moderátor használatával akár természetes uránnal (0,7% U-235-tartalom) is létrejöhet láncreakció.

A moderátorként használt anyagokkal szemben két fő követelményt támasztunk: legyen minél kisebb rendszámú, és minél kevésbé legyen hajlamos a neutronok elnyelésére. Ezen igényeknek a gyakorlatban csak négy anyag felel meg: a hidrogén (H<sub>2</sub>O, könnyűvíz formában), a nehézhidrogén (D<sub>2</sub>O, nehézvíz formában), a szén (C, grafit formában) és a berillium (Be). Ezek közül a víz a legelterjedtebb moderátor. A nehézvíz tulajdonságai ugyan valamivel kedvezőbbek, de sajnos roppant drága anyag

Kis mennyiségű hasadóanyag esetén a hasadások során keletkező neutronoknak igen nagy hányada kilép az anyagból anélkül, hogy hasadást okozna (kiszökik). Növelve a hasadóanyag mennyiségét, egyre csökken a fajlagos felület (a hasadóanyag felületének és térfogatának aránya), amin keresztül kiszökhetnek a neutronok. Egy adott méretet elérve a hasadást okozó neutronok aránya eléri az önfenntartó láncreakcióhoz szükséges értéket, ekkor érjük el az ún. kritikus tömeget. Amennyiben a hasadóanyag és a moderátor együtt van jelen, akkor a kritikus tömeg függ a két anyag arányától és geometriai eloszlásától is. Például golyó alakú, moderátor nélküli fém U-235 kritikus tömege 49 kg. A Paksi Atomerőműben alkalmazott üzemanyag-kazettákból tiszta vízben legalább 7 darab kell az önfenntartó láncreakcióhoz, aminek a hasadóanyag-tartalma kb. 33 kg.

Mint említettük, U-235 hasadásakor átlagosan 2,4 neutron szabadul fel, azonban nem mind okoz újabb hasadást. A neutronviszonyokat az ún. sokszorozási tényezővel ( $k$ ) jellemezhetjük: ez a neutronok számának aránya egy adott, és az azt megelőző neutrongenerációban. (A neutrongeneráció a hasadásból kilépő neutron megszületése, és az általa kiváltott hasadásból keletkező neutronok megszületése között eltelt idő. Tipikus értéke tiszta U-235-re kb. 1 nanosekundum, azaz egymilliárdod másodperc).

Ha a sokszorozási tényező értéke 1, **kritikus** reaktorról beszélünk. Ekkor tehát a neutronok száma a rendszerben állandó, azaz pl. másodpercenként ugyanannyi hasadást okoznak. Ha kritikus reaktorban a sokszorozási tényezőt 1 alá csökkentjük, a rendszer **szubkritikus** válik, a neutronok száma csökken. Ha pedig  $k > 1$ , a neutronok száma egyre nő, a reaktor **szuperkritikus**.



A sokszorozási tényező helyett gyakran a **reaktivitást** használjuk:  $p = (k-1)/k$ .

Az előzőeket ezzel kifejezve: a szubkritikus reaktort  $p < 0$ , a szuperkritikus  $p > 0$ , a kritikus pedig  $p = 0$  jelenti.

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 neutron-abszorbensek 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 kijebb kell húzni a neutronelnyelő rudakat. A szabályozó rudak 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 teljesítmény változtatása a hőmérsékletek (üzemanyag, hűtőközeg stb.) változását eredményezi. A hőmérsékletváltozások pedig különböző magfizikai folyamatokon keresztül megváltoztatják a reaktivitást, ez pedig befolyásolja a hasítani kész neutronok számát, és ezáltal a teljesítményt is. Például a teljesítmény növelésekor megemelkedik az üzemanyag hőmérséklete. Az U-238 azonban magasabb hőmérsékleten jobban elnyeli a neutronokat. Így a hasításra képes neutronok száma, és ezáltal a reaktivitás is csökken. Ez pedig a teljesítmény csökkenését okozza. Végző soron tehát a teljesítmény változása a reaktivitás változását idézte elő, az pedig visszahatott a teljesítményre. Ha a reaktivitás változása olyan, hogy a kiváltó okkal ellentétes irányú folyamatokat indít el, **negatív visszacsatolásról** beszélünk. Példáknál negatív visszacsatolás történt: a teljesítmény növekedése reaktivitás-csökkenést eredményezett.

A reaktor biztonsága szempontjából nyilvánvaló az a törekvés, hogy a visszacsatolások minden esetben negatívak legyenek. Ekkor ugyanis a teljesítmény növekedése mindig reaktivitás-csökkenést eredményez, ez pedig beavatkozás nélkül előbb-utóbb szubkritikus állapotba viszi a reaktort, azaz megállítja a teljesítménynövekedést. Ilyenkor azt mondjuk, hogy a reaktor belső, ún. inherens biztonsággal rendelkezik. Ilyen belső, inherens biztonsággal rendelkeznek - eleve a bennük lejátszódó fizikai folyamatok révén - pl. a nyomottvizes atomreaktorok és a paksi atomerőmű reaktorai is.

Az inherens biztonság szempontjából ellenpéldaként kell megemlítenünk a csernobili, RBMK típusú reaktorokat, ugyanis ezeknél előfordulhat olyan üzemi állapot, amikor pozitív visszacsatolások érvényesülnek. Többek között ez is közrejátszott a csernobili atomerőmű 1986-os balesetében.