



rációs Toyota Mirai három hidrogéntankjának összesített térfogata 141 liter, vagyis teljesen feltöltve kb. 5,5 kg H₂ van benne. Ez elég csekély hányada a 100 kilogrammot is megközelítő teljes tanktömegnek, de még mindig jóval kevesebb holt súlyt jelent, mint egy tipikus elektromos autó akkumulátora. Normál használatban ennyi hidrogénnel mintegy 600 kilométert lehet vezetni, de optimális körülmények között jelentősen csökkenthető a fogyasztás: a rekordot 2021 augusztusában állították fel, amikor egy ilyen autó 1360 kilométert tett meg újratöltés nélkül.

Habár csúcspdöntési kísérletet Magyarországon még sokáig nem lehet majd tervezni, jó lenne, ha hazánkban is megkezdődne a fejlettebb országokban már terjedőben lévő technológiák átvétele és a nyilvános hidrogéninfrastruktúra kiépítése. Afelől nincs semmilyen kétség, hogy kezdetben ehhez jelentős állami szerepvállalásra lesz szükség. ●●●

HIVATKOZÁSOK

[1] <https://jogkodex.hu/doc/5579123>

[2] <https://www.lindegas.hu/hu/news/linde-hidrogen.html>

[3] <https://villanyautosok.hu/2022/02/09/forgalomba-all-az-also-hidrogenbusz-magyarorszagon/>

[4] <https://www.solarisbus.com/>

[5] <https://ralelektro.hu/>

[6] <https://evsafefcharge.com/what-you-need-to-know-about-ev-dc-fast-charger-costs/>

[7] <https://www.energy.ca.gov/news/2020-12/energy-commission-approves-plan-invest-115-million-hydrogen-fueling>

[8] https://afdc.energy.gov/fuels/hydrogen_locations.html#/find/nearest?fuel=HY

[9] <https://h2me.eu/about/how-an-hrs-works/>

[10] <https://webbook.nist.gov/>

A cikk megjelenését a Megújuló Energiák Nemzeti Laboratórium támogatta a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal RRF-2.3.1-21-2022-0009 azonosító számú projektjének keretében. A Megújuló Energiák Nemzeti Laboratóriumot létrehozó intézmények: Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Debreceni Egyetem, Energiatudományi Kutatóközpont, Miskolci Egyetem, Neumann János Egyetem, Pannon Egyetem, Pécsi Tudományegyetem, Széchenyi István Egyetem, Szegedi Tudományegyetem, Természettudományi Kutatóközpont.

Király Márton – Radnóti Katalin

■ Energiatudományi Kutatóközpont

■ ELTE TTK Fizikai Intézet

Az atomerőművek működéséről egyszerűen, típusaik és jövőjük

Első rész

Az 1960-as évektől az atomerőművek jelentős szerephez jutottak a villamosenergia-termelésben. Az atomerőművek által termelt villamos energia – amely a világban termelt villamos energia 12%-át adja – jelenleg egymilliárd emberhez jut el. A világ több mint harminc országában található atomerőművek, főleg a fejlett gazdaságú (OECD) országokban. A Nemzetközi Atomenergia Ügynökség (IAEA) 2022-es jelentése szerint világszerte 438 atomerőmű működött, 351 327 megawattos teljesítménnyel, 2447,5 terrawattóra elektromos energiát állítva elő.

Az atommaghasadás 1938-as felfedezése után a kor nagyhatalmai (Franciaország, Egyesült Királyság, Németország, Egyesült Államok, Szovjetunió) felismerték, hogy ez a fizikai folyamat lehetőséget adhat a katonai célú alkalmazásra. Ezzel párhuzamosan a tudósok azon dolgoztak, hogy a maghasadás során felszabaduló energiát békés célokra is fel lehessen használni. Ezeket a törekvéseket siker koronázta, és az 1960-as évektől több olyan atomerőmű-típust fejlesztettek ki, amely kereskedelmi forgalomba kerülhetett.

Az 1970-es években épített erőművek élettartamának közelgő vége, az energiaellátás biztonságának növekvő fontossága, valamint a globális klímaváltozás kockázata megújították a közgondolkodást, és újabb nukleáris beruházások indultak be. Ugyanakkor az atomenergia megítélése gyorsan változik. A Fukusimában történt baleset hírére a közvélemény és néhány ország ismét elfordult az atomenergia felhasználásának lehetőségétől [1]. A hazánkban előállított villamos energia mintegy 50%-a származik atomenergiából, melyről országunk az elkövetkező évtizedekben sem szándékozik

lemondani. A Pakson épített erőművek üzemideje a végéhez közeledik, meghosszabbításuk folyamatban van, kiváltásukhoz a meglévő kapacitások bővítésére van szükség [2] [3].

Jelenleg a legnagyobb kihívást a jövő lehetséges atomerőműveinek – az úgynevezett negyedik generációs elképzelések – megvalósítása, tenyésztő- és gyorsreaktorok tervezése és megépítése jelenti, melyek alapvetően átalakíthatják az atomenergiához fűződő viszonyunkat.

Kétrészes írásunk első részében az atomenergia előállításának fizikai alapjairól és felfedezésük főbb lépéseiről adunk áttekintést. A második részben a jelenleg működő és a tervezés alatt álló atomerőmű-típusokról adunk rövid ismertetést.

A jelenleg energetikai céllal működő atomerőművek esetében a maghasadás és a szabályozott láncreakció azok az alapvető magfizikai folyamatok, amelyek energiatermelés (valójában energiaátalakítás) céljára felhasználhatók.

A maghasadás

Otto Hahn felfedezése nyomán Lise Meitner és unokaöccse, Otto Robert Firsch a cseppmodell, az úgynevezett félempirikus atommagmodell felhasználásával megmutatták, hogy a maghasadás folyamata ténylegesen végbemehet, sőt körülbelül 200 MeV energia szabadulhat fel. Ők vezették be a maghasadás fogalmát is [4]. A hasadványok minden esetben *radioaktív*ak voltak. Ennek oka az, hogy a hasadás során keletkező magokban a proton-neutron



arány nem nagyon változik meg. A periódusos rendszer elején található elemek atommagjaiban, az úgynevezett könnyű magok esetében, közel azonos a protonok és a neutronok száma, míg az egyre nagyobb rendszámú, az atommagjukban több protont tartalmazó atommagok esetében egyre nő a neutronok aránya. Az oxigén legstabilisabb izotópjában 8 proton és 8 neutron található, a 26-os rendszámú vas leggyakoribb izotópjának tömegszáma 56, a magban 30 neutron van, arányuk 53,5%, míg a 92-es rendszámú urán legstabilisabb 238-as tömegszámú izotópjában 146 neutron van, ami a nukleonok 61%-a. A könnyebb elemekben a neutronok aránya kevesebb, mint az uránban, ezért amikor az uránból könnyebb elemek keletkeznek maghasadással, a neutronok feleslegben lesznek. Ez a felesleg egyrészt kibocsátódik, másrészt radioaktív bomlások révén közeledik az egyensúlyi állapot felé. Ugyan a hasadás során szabadulnak fel neutronok, az urán esetében átlagosan 2,4 darab, de a hasadványokban még akkor is marad bőven neutronfelesleg. Ezért ezek a magok mind β -bomlással állítják helyre a megfelelő proton-neutron arányt, melyet γ -sugárzás követ.

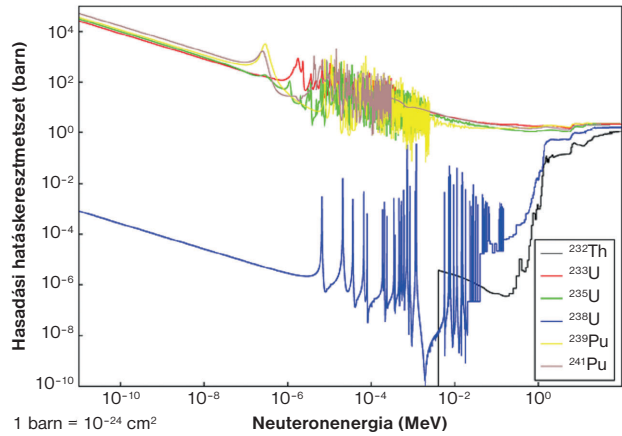
A nukleáris láncreakció

A neutronokkal működő láncreakció ötlete Szilárd Leótól (1898–1964) származik. Ő vetette fel elsőként 1933-ban, hogy ha találnának egy olyan izotópot, amelynek atommagjából egy neutron befogásának hatására egynél több neutron keletkezne, akkor ez a folyamat felhasználható lenne nukleáris láncreakció előidézésére. A láncreakció kifejezést Szilárd egyes kémiai folyamatokra alkalmazott szakkifejezésből kölcsönözte. 1934. március 12-én szabadalmat jelentett be a neutronokkal kiváltott láncreakcióra. A szabadalmi leírásban a neutronokat megduplázni képes elem lehetőségként Szilárd a berilliumot, a brómot és az uránt javasolta. A Brit Admirális a szabadalmat 440023 szám alatt megadta, és Szilárd kérésére titkosította. Ezután Szilárd több kiegészítést, illetve pontosítást nyújtott be a szabadalmához. Megemlítette, hogy az önfenntartó láncreakció csak egy kritikus tömeg felett lehetséges, ugyanis az adott térfogatban keletkező neutronok számának felül kell múlnia a felületen át kiszökő neutronok számát, ami csak egy minimális méret felett lehetséges. 1938 szeptemberében Szilárd az Egyesült Államokba költözött.

A dán Niels Bohr (1885–1962) Otto Frisch révén (aki nála dolgozott Koppenhágában) folyamatosan értesült Hahn és Meitner maghasadással kapcsolatos kísérleteiről és eredményeiről. Bohr 1939. január 16-án érkezett New Yorkba. Utazásának célja az volt, hogy részt vegyen egy elméleti fizikai konferencián Washingtonban, amelynek témája az alacsony hőmérsékletek fizikája volt. A konferenciát George Gamow (1904–1968) és Teller Ede (1908–2003) szervezte január 26. és 28. között. A washingtoni konferencia előzetes programját az elnöklő Gamow megváltoztatta, és Bohrnak adta meg a szót, ezzel a maghasadás került az érdeklődés középpontjába.

A konferencia befejezésének napján több laboratórium hozzálátott a maghasadás megerősítéséhez, és sikerült azt is kimutatniuk, hogy közben neutronok szabadulnak fel, melyeket Szilárd Leó korábban megjósolt. Egy hasadásban a keletkező neutronok száma 0 és 5 között változhat, átlagosan 2,4 szabadul föl.

Bohr és Wheeler megállapították, hogy a természetes uránban a kis mennyiségben (0,71%-ban) előforduló 235 tömegszámú izotóp sokkal nagyobb valószínűséggel hasad, mint a 238 tömegszámú (99,28%-ot kitevő) izotóp. A 238-as tömegszámú izotóp leginkább nagy energiájú neutronok hatására hasad, viszont a

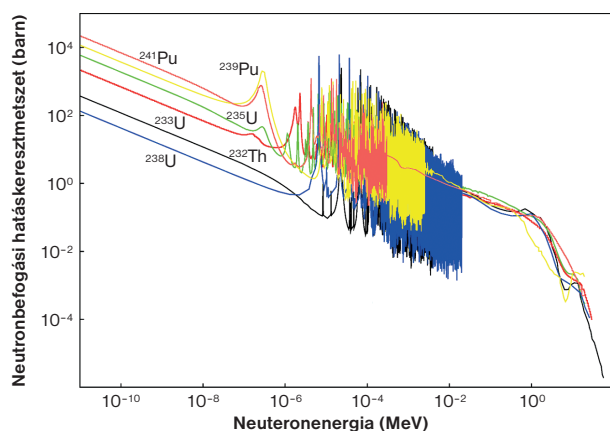


1. ábra. Egyes izotópok hasadási hatáskeresztmetszetének változása a neutron energiájának függvényében (<https://universe-review.ca/I14-03-crossection.png>)

235-ös tömegszámú kis energiájúak hatására is, ezért jó nukleáris üzemanyag (1. ábra).

A reaktorfizikában a *hatáskeresztmetszet* (σ) segítségével fejezik ki annak a valószínűségét, hogy az egyes atommagok különböző magreakciókban (neutron vagy proton befogása, hasadás, rugalmas vagy rugalmatlan szóródás stb.) vegyenek részt. Ha az atommagot a klasszikus mechanika fogalmai szerint képzelnénk el, akkor a hatáskeresztmetszetet tekinthetnénk az atommag keresztmetszetének, az atommagot körülvevő magerótérnek. A valóságban azonban az atommag valós méretének semmi köze ehhez az értékhez (!), mivel bonyolult kvantummechanikai effektusok is fellépnek, amelyek eldöntik, hogy valóban bekövetkezik-e az adott reakció. Mindezeket figyelembe véve adódik ki a σ hatáskeresztmetszet, melyet ténylegesen számítással és empirikusan határoznak meg. Ez felület dimenziójú mennyiség, mely például a neutronfluxus (egy adott felületen időegységenként áthaladó neutronok száma) leárnyékolásának feleltethető meg. Mivel az atommagok sugara 10^{-12} cm (10^{-14} m) nagyságrendű, a hatáskeresztmetszet egysége, a barn, 10^{-24} cm². A szokásos felületegységek helyett az SI rendszer a magfizikában és a reaktorfizikában – kivételesen – megengedi ezt a már régóta használatos egységet. A hatáskeresztmetszetek additívak, a különböző típusú magreakciók együttes hatáskeresztmetszete a rész-hatáskeresztmetszetek összege. Például, a neutronabszorpció hatáskereszt-

2. ábra. Egyes izotópok neutronbefogási hatáskeresztmetszetének változása a neutron energiájának függvényében. A középső tartományban látszanak a rezonanciák (http://www.nuclear-power.net/wp-content/uploads/2014/11/capture_cross_section.jpg)





metszetet a befogási és a hasadási hatáskeresztmetszet összege. Az egyes hatáskeresztmetszetek függnek továbbá a résztvevő partnerek (például mozgási) energiájától is.

A hatáskeresztmetszet-energia függvények esetében megfigyelhető keskeny csúcsokat rezonanciáknak nevezünk, amelyeken belül a hatáskeresztmetszet nagyon szűk energiatartományon belül nagyon nagy értékre ugrik fel. Ennek az az oka, hogy az ilyen energiájú neutronok az összetett mag valamelyik energiaállapotát gerjesztik, ezért könnyen elnyelődnek [5]. Az atommag esetében mind a protonok, mind pedig a neutronok csak meghatározott energiaszinteken lehetnek, hasonlóan az elektronburok elektronjaihoz. Az elektronok estén ennek eredménye az atomok vonalas színképe, jelen esetben pedig a neutronbefogási rezonanciák. Nézzünk meg néhány ilyen függvényt (**2. ábra**)!

Földünkön egyetlen olyan természetesen előforduló izotóp található, amely lassú neutron hatására könnyen képes elhasadni és új neutronokat termelni, ez a *235-ös tömegszámú uránizotóp*. Emellett három olyan izotóp állítható elő neutronbefogással az atomreaktorokban, melyek hasonló céllal felhasználhatók, a *plutónium 239-es és 241-es izotópja* az urán 238-as (túlsúlyban lévő) izotópjából, valamint az *urán 233-as tömegszámú izotópja*, amely a tórium 232-es izotópjából keletkezik. Ezekről a későbbiekben lesz szó.

Az első önfenntartó nukleáris láncreakciót megvalósító reaktort 1942 végére építették meg Chicagóban, természetes uránt (0,71% ^{235}U) és grafitot (mint neutronlassító közeget, melyről később lesz szó) használva. Az atomreaktorokban a láncreakció szabályozott formában megy végbe, ezért használható fel energia-termelésre.

Az atomreaktorokban a láncreakciót állandó szinten kell fenntartani, és szabályozni kell a stabil működéshez, valamint azt is meg kell oldani, hogy szükség esetén a láncreakció azonnal leállítható legyen. Egy hasadás során több neutron keletkezik, a láncreakció fenntartásához viszont csak 1-re van szükség, így a felesleget valahogy le kell kötni. Mivel a maghasadáshoz neutron szükséges, a felesleges neutronok elnyelésével lehet csökkenteni a hasadások számát, és így szabályozni a láncreakciót. A fogyó és keletkező neutronok arányát jellemző számot sokszorozási tényezőnek nevezzük. Minden reaktorban vannak neutronelnyelő anyagok, ezeket részben úgynevezett szabályozórudak formájában juttatják be az aktív zónába, a szabályozás pedig úgy történik, hogy a rudak helyzetének módosításával változtatják a zónában a neutronelnyelő anyagok mennyiségét. Amikor egy szabályozórudat a reaktorba betolnak, akkor a sokszorozási tényezőt csökkentik, amikor pedig a reaktorból kihúzzák, akkor a sokszorozási tényezőt növelik. Ilyen módon lehet szabályozni a reaktor teljesítményét, illetve beindítani vagy leállítani a reaktort. A maghasadás rendkívül gyors folyamat, 10^{-8} s alatt végbemegy, a láncreakció pontos szabályozását a késő neutronok teszik lehetővé, melyek nem közvetlenül a maghasadásból, hanem később, egyes hasadási termékek (hasadványok) bomlása során keletkeznek.

Ha a reaktorban a *szabályozott láncreakció* állandó teljesítményen megy végbe, akkor a reaktor *kritikus* állapotban van. Itt emelnénk ki a szaknyelv és a köznyelv közötti jelentős különbséget. A köznyelvben a „kritikus” szó valami veszélyes helyzetet jelöl: „a beteg állapota kritikusra fordult”, vagy „a földrengés után kritikus helyzet alakult ki”. Ugyanakkor a szakmai nyelv által használt „kritikus állapotnak” semmi köze a veszélyhez: amikor a reaktor „kritikus” állapotban van, akkor az szép nyugodtan, egyenletes teljesítménnyel üzemel. A reaktor folyamatos ener-

giatermelés közben végig kritikus állapotban van. Normál üzemállapotban is lehet időlegesen a sokszorozási tényező nagyobb, mint 1. Arra kell azonban ügyelni, hogy a **késő neutronok nélkül** (csak az azonnali, prompt neutronokkal) sose legyen 1-nél nagyobb a sokszorozási tényező, azaz a reaktor sose legyen „prompt-kritikus”. Ha a sokszorozási tényező 1 alá kerül, akkor csökken a teljesítmény, végül leáll a láncreakció, ha pedig a késő neutronok nélkül is 1 fölé emelkedik, a reaktor teljesítménye ug-rásszerűen megnő, ezt nevezik megszaladásnak.

A Hirosimára 1945-ben ledobott atombomba szinte tiszta 235-ös tömegszámú uránizotópot tartalmazott, míg a Nagaszakira ledobott bomba elkészítésénél a plutónium 239-es izotópját használták. Az atombombában a *láncreakciót a hasadás során keletkező prompt gyors neutronok tartják fenn*. A láncreakciónak ez a formája nem szabályozható, vagyis robbanáshoz vezet!

A reaktorokban a teljesítmény szabályozása a szabályozórudak mellett úgy is történhet, hogy a hűtővízbe kevernek olyan anyagot, amely neutronelnyelésre képes. Például a bór 10-es tömegszámú izotópja kiváló neutronelnyelő, de vannak mások is, mint például a kadmium, vagy a legújabbban alkalmazott gadolínium, diszprózium és erbium. Vízhűtéses reaktorokban (Pakson is) gyakran bizonyos mennyiségű bórt oldott állapotban, bórsav formájában is bevisznek a hűtővízbe. Ennek a koncentrációját változtatva ellensúlyozni lehet a sokszorozási tényező változásait, és így lehetséges a reaktort folyamatosan kritikus állapotban tartani a hasadóanyag fogyása mellett is. Stacioner kritikus állapotban az egy hasadásból származó neutronok átlagosan/pontosan egy új hasadást hoznak létre, a sokszorozási tényező értéke 1, az időegység alatti hasadások száma és ezzel a termelt energia mennyisége is állandó.

A láncreakció fenntartása azt jelenti, hogy minden hasadásra jusson még egy hasadás. Egy hasadás során keletkező neutronok közül egynek újabb hasadást kell kiváltania, vagyis nem nyelődhet el a szerkezeti anyagokban, a szabályozórudakban, a hűtőközegben, a neutronlassító közegekben, vagy magában az üzemanyagban. Az urán 235-ös tömegszámú, neutronok hatására hasadó izotópja csak 0,71%-a a természetes uránnak, a többit a 238-as tömegszámú uránizotóp teszi ki, mely gyakorlatilag nem hasad neutronok hatására. A természetes uránércben azért nem jön létre láncreakció, mert a kis mennyiségű ^{235}U -izotóp néhány spontán hasadása során keletkező gyors neutronok a nagy tömegben lévő ^{238}U -ban kis hasadási hatáskeresztmetszete miatt kevés hasadást okoznak, az ^{238}U hasadás nélkül befogja a neutronokat, ami megállítja a folyamatot. Ezek miatt nem könnyű hasadási láncreakciót létrehozni, keményen meg kell küzdeni, hogy a sokszorozási tényező elérje az egyet.

A hasadási láncreakció elérésére és fenntartására két lehetőség kínálkozik a reaktorokban:

1. A hasadás során keletkező gyors neutronokat lelassítják, ezáltal több százszorosára nő a hasadási reakció esélye (hatáskeresztmetszete). Ehhez neutronlassító anyagokat, úgynevezett moderátorokat alkalmaznak. Ezek atommagjaival ütközve a neutron lelassul, a környezet hőmérsékletére jellemző energiája lesz ($0,025 \text{ eV} = 4 \cdot 10^{-21} \text{ J}$), más néven termalizálódik. Az ilyen elven működő reaktorokat **termikus reaktornak** nevezik. A moderátor azonban nemcsak lassítja a neutronokat, de sajnos el is nyel belőlük valamennyit, így a neutronelnyeléstől függően a kezdeti 0,71%-ról 2–5%-ra kell dúsítani a 235-ös izotópot az uránban, hogy a láncreakció fenntartható legyen. Az ^{238}U -izotóp **2. ábrán** látható neutronelnyelési rezonanciáinak kiküszöbölésére inhomogén



reaktort kell építeni, vagyis a moderátort és az üzemanyagot nem összekeverve, hanem váltakozva kell elhelyezni, hogy az üzemanyagból kilépő neutron a moderátorban megfelelően lelassuljon, majd mire újra üzemanyaggal találkozik, termalizálódjon, és nagy valószínűséggel elkerüljük a rezonancia-befogást. Ezekről cikkünk második részében lesz szó.

2. A másik lehetőség az, hogy nem lassítják le a neutronokat, hanem az előbbihez képest sokkal nagyobb mértékben dúsítják az uránt a ^{235}U izotópban és nagyobb mennyiséget halmoznak föl a reaktorban, hogy kompenzálják a kis hatáskeresztmetszetet. A ^{238}U neutronelnyelése ebben az esetben kifejezetten kívánatos is, mivel abból plutónium keletkezik, vagyis a reaktor működése közben új hasadóanyagot termel. Ezt a folyamatot nevezik tenyésztésnek, és a moderálatlan neutronokkal működő reaktorokat **gyorsreaktor-nak** hívják. Ezekről cikkünk második részében lesz szó.

A cikk következő részében a termikus reaktorok főbb típusait ismertetjük.

Az atomerőművekben is – több erőműhöz hasonlóan – úgy állítják elő az elektromos energiát, hogy a felszabaduló termikus energiát gőzfejlesztésre fordítják, a gőz megforgatja a turbinákat, majd ezt a mechanikai energiát egy generátor segítségével, az elektromágneses indukciót alkalmazva, elektromos energiává alakítják. *Az elektromos energiatermelés alapelve sok erőmű esetében azonos, az erőművek közötti különbség csupán annyi, hogy a folyamathoz szükséges hőt hogyan állítjuk elő.* (A fotovoltaikus erőmű, a vízerőmű és a szél erőmű esetében „kimarad” a hővé alakulás, a villamos energiát közvetlenül állítjuk elő mechanikai energiából (víz- és szél erőmű), illetve fényenergiából (fotovoltaikus).)

Egy atomerőmű esetén az *atomreaktorban lejátszódó maghasadás az elsődleges energiaátalakulás, a termikus energia a magenergiából származik.* Az atomenergia helyett célszerűbb a nukleáris energia kifejezés használata, hiszen a folyamatban nem az atom elektronszerkezetének átrendezéséről van szó, mint a kémiai reakciók esetében, hanem az atommagban történnek a változások. Ez milliószor nagyobb energiaváltozást jelent egy szokványos kémiai reakcióban felszabaduló energiához képest.

Különböző szempontok, elsősorban koruk, biztonságosságuk és gazdaságosságos üzemeltetési lehetőségeik alapján az atomerőműveket a kétezres évektől kezdődően úgynevezett *generációkba* sorolják. Ezek között nincsenek egyértelmű határvonalak, csak átmeneteket jelentenek az atomerőművek építésének egyes korszakai között [1].

Az *első generációs* atomerőművek közé tartoznak az első erőművek, amelyeket az ötvenes és hatvanas években, illetve a hetvenes évek elején helyeztek üzembe. Ezek még a jelenleginél kevésbé szigorú biztonsági előírások figyelembevételével épültek, részben kutatási céllal, és ma már jórészt nem üzemelnek.

A *második generációs* atomerőművek alkotják a ma üzemelő atomerőművek döntő többségét. Ezek a hetvenes és a kétezres évek között épültek, és már a tervezésük során is szigorúbb biztonsági elveket alkalmaztak, például szinte mindegyiket ellátták olyan nyomásálló burkolattal, amely baleseti helyzetekben megakadályozza a radioaktív anyagok környezetbe jutását (konténment). A jelenleg üzemelő második generációs erőművek az egyre szigorodó előírások folytán több biztonságnövelő átalakításon estek át. A második generációhoz tartoznak a paksi atomerőmű blokkjai is.

A *harmadik generációs* atomerőművek jelentik a jelenleg és az elkövetkező évtizedekben épülő erőműveket. Ezek tökéletesebbek a második generáció erőműveinél, mind a gazdaságosság (üzem-

anyag-hasznosítás és átalakítási hatások), mind a biztonság (fejlesztett biztonságtechnika, passzív biztonsági rendszerek) tekintetében. Azonban lényegileg (működési elv, felépítés, üzemanyagciklus) nem különböznek elődeiktől, ugyanazokat a tervezési és üzemeltetési alapelveket követik. Ezeket hosszabb üzemidőre (60 év) tervezik, jobb üzemanyag-hasznosítást céloznak meg, szabványosítottak a tervek és hosszabbak az üzemanyagok átrakása közötti idők (18–24 hónapos ciklusidő). Bár ezekből még nem sok üzemel, de már több országban (Franciaország, Finnország, Oroszország, Kína, India) épülnek ilyen új típusú atomerőművek. A Paksra tervezett új blokkok is ebbe a kategóriába fognak tartozni.

A 2000-ben *negyedik generációs* atomerőművek közé sorolt elképzelések a nukleáris technológiák újragondolását jelentik a hatékonyabb és biztonságosabb üzemeltetés jegyében, bár jelenleg még csak papíron vagy kísérleti erőművek formájában léteznek. Ezek között az elképzelések között nemcsak termikus, hanem gyorsreaktorok is találhatóak. Az alkalmazandó magas hőmérsékletű hűtőközegek nagyobb termodinamikai hatások elérésére és *kapcsolt energiatermelésre is alkalmasá teszik ezeket a reaktorokat.* Kapcsolt műveletek alatt általában hidrogéntermelést és szén-dioxid-mentes (a levegőből kivont CO_2 -ot használó) üzemanyagok (metanol, dimetil-éter, metán) gyártását értjük. Ez azért is fontos, mert a megtermelt nagy mennyiségű villamos energia nem tárolható gazdaságosan, azonban az üzemanyagokat el tudjuk raktározni, és más módon (motor, üzemanyagcella) is fel tudjuk ezeket használni, és így ezek az erőművek a közlekedés energiaigényeit is ki tudnák szolgálni [2].

A neutronok lassítása

Amint azt előbb leírtuk, az atomreaktorban egy maghasadás során 2–3 neutron keletkezik, a hasadás több neutront kelt, mint amennyit elhasznál, láncreakció mehet végbe, vagyis az egész folyamat önfenntartó lehet. Mivel a keletkező neutronok gyorsak (néhány MeV energiájúak), a hasadás fenntartásához viszont (természetes vagy kis dúsítású urán esetén) lassú (termikus) neutronokra van szükség, ezért a maghasadás során keletkező neutronokat le kell lassítani moderátorok segítségével. A termikus atomreaktorokban *a láncreakciót termikus neutronok tartják fenn.* Moderátorként (lassítóként) kis tömegszámú izotópokat tartalmazó anyagok jöhetnek szóba. Egy ütközésben ugyanis annál több energiát veszíthet a neutron, minél kisebb tömegű atommaggal ütközik. A gyakorlatban háromféle moderátoranyagot használnak: könnyűvíz (H_2O), nehézvíz (D_2O) és grafit (C).

A tömeget tekintve a leghatékonyabb moderátor a könnyűvíz, de hátránya, hogy a hidrogén kis mértékben elnyeli a termikus neutronokat. Ez éppen elégséges ahhoz, hogy könnyűvíz moderátorral és természetes uránnal ne jöjjön létre önfenntartó láncreakció. Ezért a könnyűvízzel moderált reaktorokban kissé (néhány %-ban) az urán hasadó, ^{235}U tömegszámú izotópjában dúsított uránt kell alkalmazni. A többi moderátor esetében a láncreakció természetes uránnal is megvalósul. A maghasadás során nagy mennyiségű hő keletkezik, amelyet el kell vezetni az aktív zónából. A termikus reaktorok hűtőközege többféle lehet. Szilárd moderátor (grafit) esetében lehet gáz (szén-dioxid vagy hélium) vagy víz, folyékony moderátor (H_2O , D_2O) esetében a hűtőközeg lehet vagy maga a moderátor, vagy egy külön hűtővízrendszer.

A termikus reaktorok üzemanyaga ma a reaktorok többségében enyhén (2–5%-ban) dúsított vagy természetes izotóp-összetételű ($0,71\% \text{ } ^{235}\text{U}$) urán-dioxid (UO_2), amelyet általában valamilyen cirkónium-ötvözetből készült burkolatcsövekben helyeznek el



HOGYAN LESZ ENERGIÁNK?

a reaktorban. Ezeket a rudakat fűtőelem-pálcáknak nevezik, és úgynevezett kazettákba rendezik. Indítás előtt a minimális kritikus tömegnél (az önfenntartó láncreakcióhoz minimálisan szükséges uránmennyiségnél) lényegesen több hasadóanyagot tesznek a reaktorba. Pakson 42 tonna, átlagosan 4,2%-ban dúsított urán-dioxid van egyszerre jelen egy reaktorban, ennek harmadát cserélik új üzemanyagra 15 hónaponként.

A maghasadások útján történő energiatermelés miatt egyrészt fogy a hasadóanyag, másrészt halmozódnak a hasadási és neutronaktivációs termékek. Mindkét folyamat csökkenti a sokszorozási tényezőt. (Van egy ellenkező irányú hatás is, a plutónium mint hasadóanyag termelődése, de ez általában nem képes az előbbi két hatást ellensúlyozni.) Ezeket a folyamatokat együtt *kiégésnek* nevezzük. (Természetesen ennek a kémiai égési folyamathoz semmi köze sincs.) A paksi atomerőműben a kiegészi szint 56 MWnap/kg U, vagyis 4,84 EJ energia szabadul fel 1 kg uránból a reaktorban töltött ideje alatt. Ennek ellensúlyozására az *abszorbens (neutronelnyelő) anyagok mennyiségét folyamatosan csökkentik*, éppen olyan mértékben, ahogyan a kritikus állapot fenntartása megköveteli. Az üzemidő első szakaszában az oldott bórsav koncentrációját csökkentik, majd amikor az már szinte nullára csökkent, elkezdik a szabályozórudakat kifelé húzni. Amikor már így sem tudják kritikusan tartani a reaktort, akkor le kell állítani, és új üzemanyagra kell cserélni a legrégebbi, kiégett kazettákat. A hasadási termékek azonban leállítás után is tovább bomlanak, hőt termelnek (remanens hő) és ezért továbbra is hűteni kell az aktív zónát, keringetni kell a primer köri hűtőközeget. A reaktor üzemét úgy tervezik, hogy két átrakás között meghatározott idő (ez most 15 hónap) teljen el. Átrakáskor a töltet körülbelül 1/3-át cserélik ki friss üzemanyagra, a többit pedig úgy rendezik át, hogy az új töltetből az elkövetkező időszak alatt maximális energiát lehessen kivenni. Egy-egy fűtőelemrúd tehát átlagosan 3 átrakásnyi időt tölt a reaktorban.

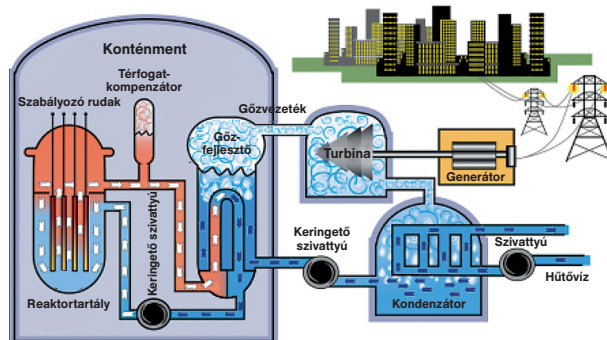
A termikus reaktorok típusai

A termikus atomreaktorok között megkülönböztetjük a nyomottvizes (PWR), a forralóvizes (BWR), a nehézvizes (CANDU), valamint a grafitmoderátoros vízhűtésű (RBMK) és gázűtésű (AGR) reaktortípusokat. Ezek az atomerőmű-konstrukciók a legelterjedtebbek, és ezek adják a ma működő atomreaktorok nagy részét is.

Folyadékmoderátorú reaktorok

A legtöbb atomreaktorban a *könnyűvizet* használják moderátorként, ezeket gyűjtőnéven könnyűvizes reaktornak (LWR = Light Water Reactor) nevezik. A vízzel moderált reaktoroknak igen nagy előnyük, hogy túlhevülés esetén a víz – ami hűtőközeg és egyben moderátor is – forrni kezd, buborékok képződnek benne. Ezáltal a reaktor moderátort veszít, a neutronok pedig nem lassulnak le eléggé, hanem a 238-as uránizotópban maghasadás nélkül befogódnak, ezért ilyenkor a láncreakció magától leáll. Ez a folyamat lehetetlenné teszi a reaktor megszaladását, ezt inhereus biztonságnak nevezik.

A *nyomottvizes* (PWR = Pressurized Water Reactor) atomreaktorok moderátora és hűtőközege könnyűvíz, üzemanyaguk alacsony (4–5%) dúsítású urán. Kétkörösek (primer és szekunder kör), azaz a reaktorban felszabadított hőt a primer köri hűtőközeg egy hőcserélőben adja át a térben elválasztott szekunder köri víznek, ahol az elforr és a turbinák meghajtásához használható gőz keletkezik. Ez a világon a legelterjedtebb reaktortípus, amelyet az Egyesült Államokban és a volt Szovjetunióban, ké-



3. ábra. Egy nyomottvizes atomerőmű szerkezete

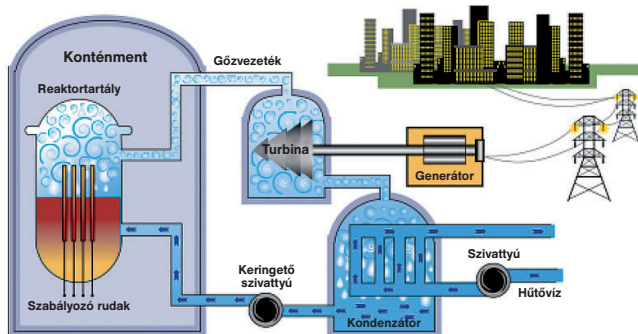
(<http://www.nap.edu/openbook/18294/xhtml/images/p-54.jpg>)

sőbb pedig Franciaországban és Németországban is kifejlesztettek. Több ország, köztük Japán, az amerikai típusok alapján gyárt (ill. gyártott) atomerőműveket. A Szovjetunióban kifejlesztett típusok egyike a Pakson működő négy reaktor, típusjele VVER-440/213 (Vodo-Vodjanoj Energeticseszkijsz Reaktor, vízzel moderált, vízhűtésű energetikai reaktor). Működési alapelvet tekintve ebbe a típusba tartoznak a tervezés alatt álló új paksi blokkok is [3] [4] [5].

Példaként nézzük végig, milyen energiaátalakulások történnek egy nyomottvizes atomerőműben, amilyen Pakson is található (3. ábra)! Az üzemanyag ebben az esetben a ^{235}U , mely elhasad két kisebb rendszámú atommagra, miközben 2–3 neutron keletkezik. Egy hasadás során 32 pJ energia szabadul fel, mely milliószorosa a kémiai reakciók során felszabaduló energiáknak. De mit kell ezen az energia-felszabaduláson érteni? Hogyan jelenik ez meg? Legfőképp a hasadványok mozgási energiájaként. A fűtőanyag kicsiny (rendszerint urán-dioxid) üzemanyag-tablettákban van jelen; részecskéi ütközni fognak a nagy mozgási energiával rendelkező hasadványokkal és neutronokkal. Sok-sok ütközés zajlik le, míg ezek lelassulnak, viszont sok részecske gyorsabban fog mozogni, tehát növekszik a tabletták hőmérséklete. A felmelegedett tabletták cirkóniummal (burkolattal) és a pálcák kívülről vízzel van körülvéve (primer kör), melynek szintén növekszik a hőmérséklete.

A primer körben a vizet nagyon nagy nyomáson tartják (12,3 MPa), emiatt az még a magas üzemi hőmérsékleten (300–330 °C) sem forr fel. A primer kör nagy nyomásáról kapta ez a típus a nevét. A primer köri víz a gőzfejlesztő csöveiben futva átadja hőjét a szekunder kör vízének, visszahűl, majd egy szivattyú által keringetve visszajut a reaktorba. A szekunder körben levő víz nyomása (4,3 MPa) sokkal alacsonyabb, mint a primer körben lévőé, emiatt a gőzfejlesztőben a felmelegedett víz el tud forrni. Innen kerül (cseppelválasztás után) a gőz a nagy nyomású, majd onnan a kisnyomású turbinára. A turbina összeköttetésben van a generátorral, és villamos áramot termel. A turbinából kilépő gőz a kondenzátorban (a Duna vizét melegítve) lecsapódik, majd egy szivattyú az előmelegítőbe, aztán újra a gőzfejlesztőbe nyomja. Mind a primer, mind a szekunder köri víz zárt rendszerben mozog, nem keveredik egymással és nem érintkezik a környezettel. Így elérhető, hogy a hűtőközegbe került radioaktív anyagok a primer körben maradjanak, és ne kerülhessenek a turbinába és a kondenzátorba, vagy adott esetben a környezetbe.

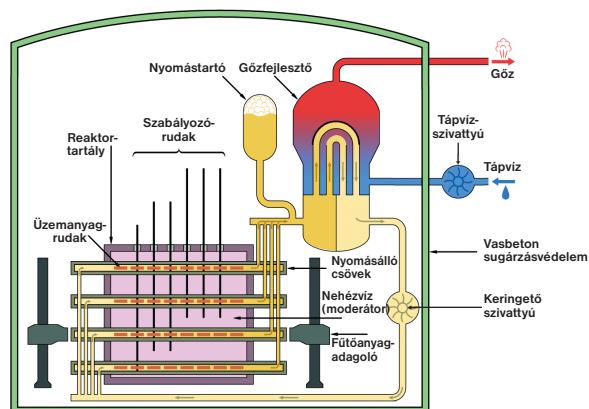
A *forralóvizes* (BWR = Boiling Water Reactor) atomreaktorok egykörösek, az aktív zónában való áthaladás közben a hűtőközeg (könnyűvíz) 10–20%-a elforr, azt leválasztják, majd a telített gőzt közvetlenül a turbinába vezetik. Hátrányuk, hogy a turbinára is enyhén radioaktív hűtőközeg kerül, és a szennyezések miatt az is enyhén radioaktívvá válik. Érdekes a szabályozórudak mozgá-



4. ábra. Egy forralóvízes atomerőmű szerkezete
(<http://www.nap.edu/openbook/18294/xhtml/images/p-54.jpg>)

sa. Míg a többi reaktortípus esetében ezek a zónában lefelé esve állítják meg a láncreakciót, addig ennél a típusnál a rudakat lentől kell felfelé benyomni a reaktor leállításához (4. ábra). Ilyen reaktorok működnek/működtek – többek között – az Egyesült Államokban, Japánban, Németországban és Svédországban.

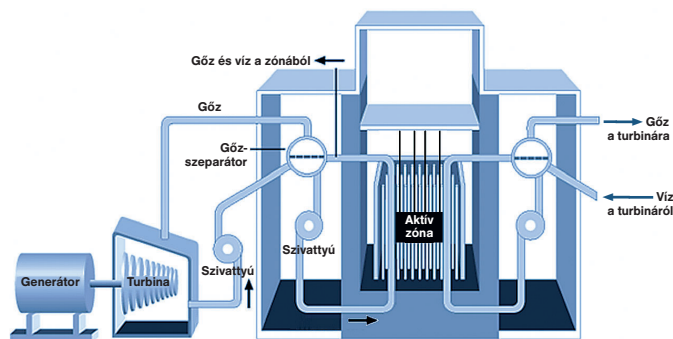
A nehézvízzel moderált atomreaktorok típusát Kanada fejlesztette ki. Ezeknek a reaktoroknak a hűtőközege könnyűvíz, moderátora pedig nehézvíz. Az erőmű üzemanyaga lehet természetes vagy enyhén dúsított (2%) urán, mivel a nehézvíz nagyon kis mértékben nyeli csak el a neutronokat. Ezeket a reaktorokat folyamatosan lehet működtetni, mivel a reaktort leállítás nélkül lehet friss üzemanyaggal feltölteni [6]. Ezt azért lehet megtenni, mert az üzemanyag nem egy tartályban, hanem nyomásálló csövekben helyezkedik el, melyek egyesével felnyithatók. Ezek a csövek egy nagy tartályon, úgynevezett kalandrián haladnak keresztül, mely tele van nehézvízzel. Ezzel szemben a könnyűvízes reaktorokat átrakáskor le kell állítani, hogy megszüntethessék a túlnyomást és leemelhessék a reaktor fedelét, ezáltal évente 3–4 hét üzemidő mindenképpen kiesik. A típus eddig egyetlen megvalósítását a kanadai CANDU- (CANadian Deuterium Uranium) reaktorok jelentik. Ilyen reaktortípusok működnek Kanadában, Romániában, Indiában és Pakisztánban (5. ábra).



5. ábra. A nehézvízes CANDU-típusú reaktor vázlatja
(https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/5a/CANDU_Reactor_Schematic.svg)

Szilárd moderátorú reaktorok

Grafitmoderátort használó atomreaktorokat az Egyesült Államok, Franciaország, Nagy-Britannia és a Szovjetunió is kifejlesztett, elsősorban az atomfegyverekhez szükséges plutónium termelésére, majd villamos energia előállítására. A hűtőközege szén-dioxid (CO₂), hélium vagy könnyűvíz lehet, bár kezdetben léghűtést is alkalmaztak. A gázhűtés alkalmazása egyre jobban visszaszorul,



6. ábra. Az RBMK-típusú reaktor felépítése (<http://www.globalsecurity.org/wmd/world/russia/images/rbmk-design.gif>)

az Egyesült Királyságban még üzemelnek ilyen erőművek (AGR = Advanced Gas-cooled Reactor), de új reaktorok építését nem tervezik. A grafitos reaktorok előnye, hogy természetes uránnal is működtethetők, a gazdaságos üzemvitelhez szükséges műszaki paraméterek azonban csak enyhén (1,5–2%) dúsított uránnal biztosíthatók.

A grafitos reaktorok szovjet változata az RBMK- (Reaktor Bolsoj Mozsoszty Kipjascsiy, nagy teljesítményű vízforraló csatornarendszerű reaktor) típus (6. ábra). Ezek a reaktorok „másfél” körök, működésüket tekintve a forralóvízes típushoz hasonlítanak, a hűtőközege könnyűvíz. Az RBMK-1000-es egy hatalmas szerkezet, amely 1700 darab függőleges grafitoszlopból lett összerakva, ezek összesen 2500 tonna grafitot tartalmaznak. A grafitoszlopokban fűtőelem-csatornák vannak, ezekben helyezkednek el a hengeres üzemanyag-kazetták.

A reaktorban összesen 180 tonna urán-dioxid van, amelynek ²³⁵U-tartalma 1,8%. A hűtővíz számára csatorna vezet végig minden grafitoszlopon. A víz 6,5 MPa nyomás alatt van, ennek hatására forráspontja 280 °C-ra emelkedik. Mintegy harmada a reaktorban elforr, a gőz egy gőzdobban elválik a folyadéktól és két hatalmas gőzturbinát hajt meg, amelyek 1000 MW elektromos teljesítményt generálnak.

Az RBMK-típusú reaktorokat 1986 óta csernobili típusnak is nevezik, mivel egy ilyen típusú blokk szenvedett súlyos balesetet. RBMK-reaktorok csak Oroszországban, Ukrajnában és Litvániában működtek. Hátrányuk, hogy túlhevülés esetén a neutronelnyelő hűtővíz elforrhat, a grafitmoderátor viszont visszamarad, így a láncreakció tovább folyhat, ami a reaktor megszaladásához vezethet. Mivel ennek a típusnak a láncreakció megszaladása esetén nincs meg az önleállító képessége, ezért ez a típus nem inherensen biztonságos.

Jelen írásunkban a termikus reaktorok működését és legfontosabb típusait ismertettük. A következő részben néhány negyedik generációs elképzelést és a tenyésztőreaktorok működését és legfontosabb típusait mutatjuk be.

IRODALOM

- Az internetes hivatkozások letöltésének dátuma: 2023. 03. 26.
- [1] Aszodi Attila, Boros Ildikó: Az atomenergia jövője Fukushima után. Nukleon. (2012) 105. http://nuklearis.hu/sites/default/files/nukleon/Nukleon_5_2_105_Aszodi.pdf
 - [2] Hózer Zoltán, Pázmándi Tamás: Új blokkok a paksi atomerőműben. Nukleon. (2014) 152. http://nuklearis.hu/sites/default/files/nukleon/Nukleon_7_1_152_Hozer.pdf
 - [3] Hózer Zoltán: Az új paksi reaktorok üzemanyaga. Fizikai Szemle (2015) 417–420. <http://fizikaiszemle.hu/archivum/fsz1512/HozerZ.pdf>
 - [4] Meitner, L., Frisch, O. R.: Disintegration of Uranium by Neutrons: A New Type of Nuclear Reaction. Nature (1939) 143, 239–240. http://www.atomicarchive.com/Docs/Begin/Nature_Meitner.shtml
 - [5] Csom Gyula: Atomerőművek üzemtana, II/1–2. Műegyetemi Kiadó, 2005.
 - [6] Papp Sándor: Milyen erőművet építsünk? Atomerőmű-létesítési ajánlatok. Fizikai Szemle (1992) 144. <http://fizikaiszemle.hu/archivum/fsz9204/papp9204.html>