

sérlet mintegy 400 eseményt tudott másodpercenként rögzíteni, ez azóta 1000-re nőtt. Az adatok kezelésére a CERN létrehozta a Nemzetközi LHC gridhálózatot, amelynek központi egysége (T0 központja) ugyan a CERN-ben van, de annak egy része a Wigner FK-ba költözött. A CMS elsődleges adattároló (T1) helyei a Chicago melletti Fermilabban, Barcelonában, Oxfordban, Lyonban, Karlsruheban, Bolognában és Tajpejben vannak, a T2 adatelemző központok pedig gyakorlatilag minden résztvevő országban. A Wigner FK T2 központjában pillanatnyilag 600 processzor és 250 TB-nyi tároló működik, hatékonysága évek óta az első helyeken található a CMS 55 T2 központja között.

Az LHC tehát áprilisban újra elindult, 2016-os működési terve, amelyet eddig bámulatossággal sikerült tartania, a 15. ábrán látható. Májustól novemberig proton+proton ütközéseket tanulmányoz, utána karácsonyig proton+ólom ütközéseket fog. Általában havonta egyszer egy-egy hétre leáll az adatgyűjtés, és a rendszert fejlesztik. Ezek a fejlesztési időszakok rendkívül fontosak, nemcsak a gyorsítós mérnököknek, hanem a kísérletező fizikusoknak is, olyankor ugyanis gyakran kiderülnek működési rendellenességek és azokat a fejlesztéssel párhuzamosan kijavítják, és utánuk a komplexum megbízhatóbban és hatékonyabban működik.

AZ ATOMERŐMŰVEK MŰKÖDÉSÉRŐL EGYSZERŰEN, TÍPUSAIK ÉS JÖVŐJÜK – 2. RÉSZ

Király Márton – MTA Energetikai Kutatóközpont
Radnóti Katalin – ELTE TTK Fizikai Intézet

Írásunk első részében vázlatosan ismertettük az atomerőművek működésének fizikai alapjait. Ebben a részben a termikus reaktorok különböző típusairól adunk áttekintést.

Az atomerőművek „generációi”

Az atomerőművekben is – több erőműhöz hasonlóan – úgy állítják elő az elektromos energiát, hogy a felfűtött termikus energiát gőzfejlesztésre fordítják, a gőz megforgatja a turbinákat, majd ezt a mechanikai energiát egy generátor segítségével, az elektromágneses indukciót alkalmazva elektromos energiává alakítják.



Király Márton a BME-n végzett vegyészmérnökként. Munkahelye az MTA Energetikai Kutatóközpont, Fűtőelem és Reaktoranyagok Laboratórium. Kutatási területe a fűtőelem-pálca-burkolatok mechanikai vizsgálata, amelyből a BME Nukleáris Technikai Intézetében készíti PhD dolgozatát. Publikációi az előbbi területen kívül kiterjednek a nukleáris energia történetére és a témával kapcsolatos ismeretterjesztésre.



Radnóti Katalin az ELTE-n végzett kémiafizika szakos tanárként. A budapesti Kölcsey Ferenc Gimnáziumban nyolc éven keresztül tanított. Jelenleg az ELTE Fizikai Intézetében főiskolai tanár. Kutatási területe a fizika és a természettudományok tanításának módszertana. Publikációs tevékenysége is e témához kapcsolódik, tanári segédletek, tanulmányok, könyvek, könyvfejezetek. A *Nukleon*, a Magyar Nukleáris Társaság internetes folyóirata főszerkesztője.

ják. Az elektromosenergia-termelés alapelve sok erőmű esetében azonos, az erőművek közötti különbség csupán annyi, hogy a folyamathoz szükséges hőt hogyan állítjuk elő.¹

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 milliószer nagyobb energiaváltozást jelent egy szokványos kémiai reakcióban felszabaduló energiához képest.

Különböző szempontok, elsősorban korok, biztonságos és gazdaságos 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 [12].

Első generációs atomerőművek közé tartoznak az első erőművek, amelyeket az ötvenes és hatvanas években, illetve a hetvenes évek elején helyeztek üzembe. Ezek 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

¹ A fotovoltaikus erőmű, a vízerőmű és a szélenergiás erőmű esetében „kimarad” a hővé alakulás, a villamos energiát közvetlenül állítjuk elő (mechanikai energiából (víz- és szélenergiából), illetve fényenergiából (fotovoltaikus)).

tervezésük során is szigorúbb biztonsági elveket alkalmaztak, például szinte mindegyiket ellátták olyan nyomásálló burkolattal (konténment), amely baleseti helyzetekben megakadályozza a radioaktív anyagok környezetbe jutását. 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 (üzemanyag-hasznosítás és átalakítási hatásfok), mind a biztonság (fejlett biztonságtechnika, passzív biztonsági rendszerek) tekintetében. Azonban lényegileg (működési elv, felépítés, üzemanyagciklus) nem különböznek elődeiktől, ugyanazon 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, India, Kína, Oroszország) épülnek ilyen új típusú atomerőművek. A Paksra tervezett új blokkok is ebbe a kategóriába fognak tartozni.

A 2000-ben a *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 nem csak termikus, hanem gyorsreaktorok is találhatók. Az alkalmazandó magas hőmérsékletű hűtőközegek nagyobb termodinamikai hatásfok elérésére és *kapcsolt energiatermelésre is alkalmassá teszik ezeket a reaktorokat*. A kapcsolt műveletek alatt általában hidrogéntermelést és széndioxid-semleges (a levegőből kivont CO₂-ot használó) üzemanyagok (metanol, dimetil-éter, metán) gyártását értjük. Ez azért is fontos, mert a megtermelt nagy mennyiségű villamos energia gazdaságosan nem tárolható, 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 [13].

A neutronok lassítása

Amint azt az első rész végén leírtuk, az atomreaktorban egy maghasadás során 2-3 neutron keletkezik, több neutronot kelt, mint amennyit elhasznál, láncreakció mehet végbe, vagyis az egész folyamat önfenntartó lehet. 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 moderátorok segítségével le kell lassítani. A termikus atomreaktorokban a *láncreakciót termikus neutronok tartják fenn*. Mode-

rátorként (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 (H₂O), nehézvíz (D₂O) és grafit (C).

A tömegét tekintve a könnyűvíz a leghatékonyabb moderátor, de hátránya, hogy a hidrogén kis mértékben elnyeli a termikus neutronokat. Ez éppen elég ahhoz, hogy könnyűvíz-moderátorral és természetes uránnal önfenntartó láncreakció ne jöjjön létre. Ezért a könnyűvízzel moderált reaktorokban kissé (néhány százalékban) az urán hasadó, 235-ös tömegszámú izotópjában dúsított uránt kell alkalmazni. A többi moderátor esetében a láncreakció természetes uránnal is megvalósul. A maghasadás során nagy mennyiségű hő keletkezik, amelyet az aktív zónából el kell vezetni. A termikus reaktorok hűtőközege többféle lehet. Szilárd moderátor (grafit) esetében lehet gáz (szén-dioxid vagy hélium) vagy víz, folyékony moderátor (H₂O, D₂O) 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% ²³⁵U) urán-dioxid (UO₂), amelyet általában valamilyen cirkóniumötvözetből készült burkolatcsövekben helyeznek el a reaktorban. Ezeket a rudakat fűtőlempálcáknak nevezik, e pálcákat kazettákba rendezik. Indítás előtt a minimális kritikus tömegnél (az önfenntartó láncreakcióhoz minimális 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 évente új üzemanyagra cserélik.

A maghasadások útján történő energiatermelés miatt egyrészt fogy a hasadóanyag, másrészt halmozódnak a hasadási és neutronaktivációs termékek. Mindkét folyamat csökkenti a sokszorozási tényezőt.² Ezeket a folyamatokat együtt *kiegésznek* nevezzük.³ A paksi atomerőműben a kiegészési szint 28 MWnap/kg U, vagyis 2,42 TJ 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, a szabályozó rudakat kezdik kifelé húzni. Amikor már így sem tudják kritikusan tartani a reaktort, akkor le kell állítani és új üzemanyagra kell cserélni a legrégebbi, kiegészített kazettákat. A hasadási termékek azonban leállítást után is tovább bomlanak, hőt termelnek (remanens hő) és ezért az

² Van egy ellenkező irányú hatás is, a plutónium, mint hasadóanyag termelődése, de ez általában nem képes az előbbi két hatást ellensúlyozni.

³ Ennek a kémiai égési folyamathoz természetesen semmi köze sincs.

aktív zónát továbbra is hűteni kell, keringetni kell a primer körű hűtőközeget. A reaktor üzemét úgy tervezik, hogy két átrakás között meghatározott idő (körülbelül egy év) teljen el. Átrakáskor a töltetnek körülbelül 1/3-át cserélik ki friss üzemanyagra, a többit pedig úgy rendezik át, hogy az új töltetből az elkövetkező 1 év alatt maximális energiát lehessen kivenni. Egy-egy fűtőelemrúd tehát átlagosan 3 évet tölt a reaktorban.

A termikus reaktorok típusai

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

Folyadékmoderátoros reaktorok

A legtöbb atomreaktorban moderátorként *könnyűvizet* használnak, 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 – forni kezd, buborékok képződnek benne. Ezáltal a reaktor moderátort veszít, a neutronok pedig nem lassulnak le eléggé, hanem az uránban maghasadás nélkül befogódnak, ezért ilyenkor a láncreakció magától leáll. Ez a folyamat lehetetlenné teszi a reaktor megszaladását, ezt inherens biztonságának nevezik.

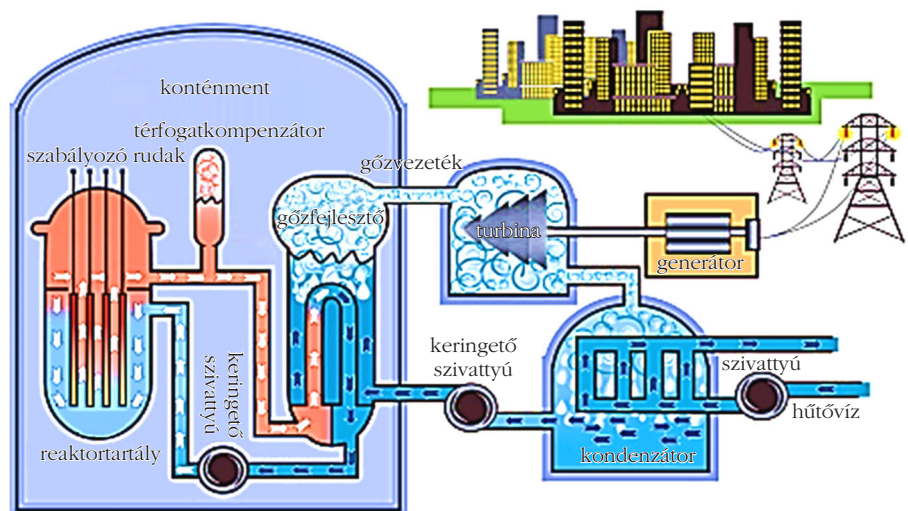
A *nyomottvizes* (PWR = Pressurized Water Reactor) atomreaktorok moderátora és hűtőközege könnyűvíz, üzemanyaguk alacsony, 3-4,2% dúsítású urán. Kétkörűek (primer és szekunder kör), azaz a reaktorban felszabadított hőt a primer körű hűtőközeg egy hőcserélőben adja át a térben elválasztott szekunder körű víznek, ahol az elforr és a turbínák meghajtásához használt gőz keletkezik. A világon ez a legelterjedtebb reaktortípus, amelyet az Egyesült Államokban és a volt Szovjetunióban, később pedig Franciaországban és Németországban is kifejlesztettek. Több ország, köztük Japán az amerikai típusok alapján gyárt (illetve gyártott) atomerőműveket. A Szovjetunióban kifejlesztett típusok egyike a Pakson működő négy reaktor, típusjele VVER-440/213 (Vodo-Vodjanoj Energeticseskij Reaktor, vízzel moderált, vízűtésű energetikai reaktor). Működé-

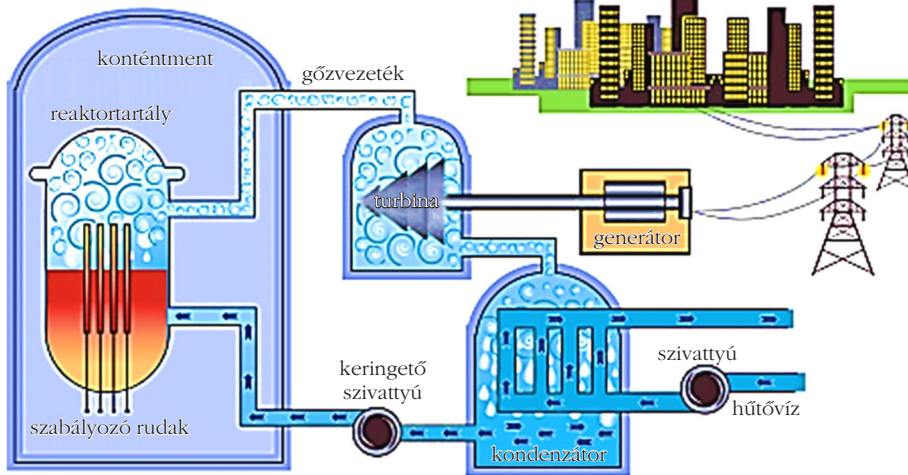
si alapelveit tekintve ebbe a típusba tartoznak a tervezés alatt álló új paksi blokkok is [3, 4, 14].

Példaként nézzük végig, milyen energiaátalakulások történnek egy nyomott vizes típusú atomerőműben, amilyen Pakson is található (5. ábra)! Az üzemanyag ebben az esetben a ^{235}U , amely két kisebb rendszámú atommagra hasad, miközben 2-3 neutron keletkezik. Egy hasadás során 32 pJ energia szabadul fel, amely 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, amelynek részecskéi ütközni fognak a nagy mozgási energiával rendelkező hasadványokkal és neutronokkal. Sok-sok ütközés zajlik le, míg ezek lelassulnak, amelynek során sok részecske gyorsabban fog mozogni, tehát a tabletták hőmérséklete növekszik. A felmelegedett tabletták cirkóniummal (burkolattal) és a tablettákat tartalmazó pálca vízzel van körülvéve (primer kör), ezek hőmérséklete szintén növekszik.

A primer körű 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 körű víz a gőzfejlesztő csöveiben futva átadja hőjét a szekunder körű víznek, visszahűl, majd egy szivattyúval keringetve visszajut a reaktorba. A szekunder körben levő víz nyomása (4,3 MPa) sokkal alacsonyabb, mint a primer körben lévő, emiatt a gőzfejlesztőben a felmelegedett víz el tud forni. Innen kerül (cseppelválasztás után) a gőz a nagynyomású, majd onnan a kisnyomású turbínára. A turbina megforgatja a generátort, az pedig villamos áramot termel. A turbínából kilépő gőz a kondenzátorban (a Duna vizét melegítve) lecsapódik, onnan egy szivattyú az előmelegítőbe, majd újra a gőzfejlesztőbe nyomja. Mind a primer, mind a szekunder körű víz zárt rendszerben mozog, nem keveredik egymással és nem érintkezik a kör-

5. ábra. Egy nyomottvizes atomerőmű szerkezete. Forrás: <http://www.nap.edu/openbook/18294/xhtml/images/p-54.jpg>





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

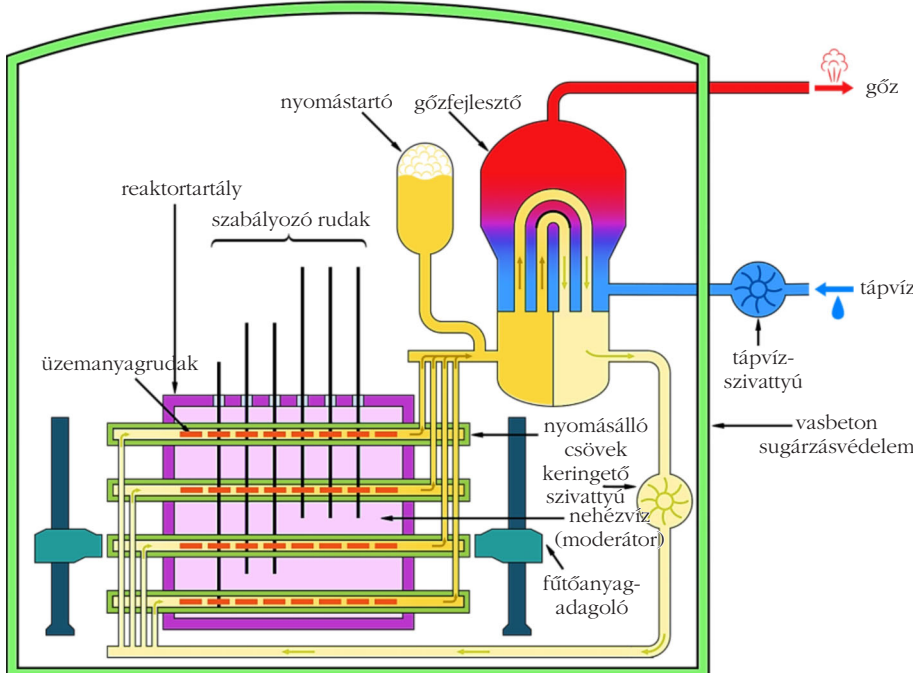
nyezettel. Így elérhető, hogy a hűtőközegbe kerülő radioaktív anyagok a primer körben maradjanak, és ne kerülhessenek a turbinába és a kondenzátorba, vagy adott esetben a környezetbe.

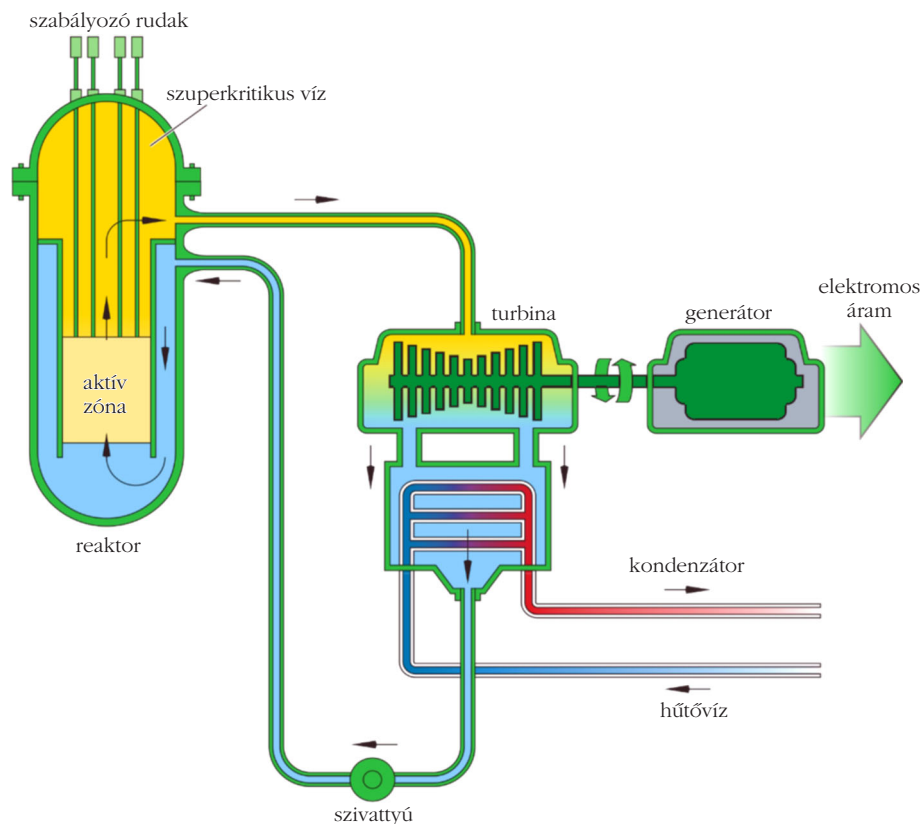
A forralóvízes (BWR = Boiling Water Reactor) atomreaktorok egykörösek, az aktív zónán való áthaladás közben a hűtőközeg (könnyűvíz) 10-20%-a elforr, azt leválasztják, majd a telített gőzt közvetlenül a turbinába vezetik. Hátrányuk, hogy a turbinára is az enyhén radioaktív hűtőközeg kerül, és a szennyezések miatt az is enyhén radioaktívvá válik. Érdekes a szabályozó rudak mozgása. Míg a többi reaktortípus esetében ezek a zónában lefelé esve állítják meg a láncreakciót, addig ennél a típusnál a reaktor leállításához a rudakat lentől felfelé kell nyomni (6. ábra). Ilyen reaktorok

ban, hanem egyesével felnyitható, nyomásálló csövekben helyezkedik. Ezek a csövek egy nagy tartályon, úgynevezett kalandrián haladnak keresztül, amely 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 (7. ábra).

A legújabb vízű hűtésű reaktortípus a szuperkritikus vízű hűtésű reaktor (SCWR), ami a negyedik generációs elképzelések közé tartozik, amelyek a jövő új atomreaktor-fajtáit jelentik. Ezek a reaktorok még csak a tervezőasztalon léteznek, de az elkövetkező évtizedekben fontos szerep juthat nekik a nukleáris energiatermelésben. E típus kritikus pontja a 374 °C, 22 MPa felett tartott könnyűvíz, amely egyben moderátor és hűtőközeg. A könnyűvíz magas hőmérséklete és jobb hővezetése miatt nagyobb átalakítási hatásfok érhető el, a jelenlegi 35% helyett akár 45%. A forralóvízes típushoz hasonlóan ez is egykörös, vagyis a hűtővíz egyből a turbinára kerül (8. ábra). A szuperkritikus víz sűrűsége kisebb a folyékony vízénél, így kevésbé moderál, viszont nő a reaktor egységtemperaturája, továbbá a radioaktív hulladékok jobb hasznosítását és a tenyésztést teszi lehetővé. Mivel a cirkónium ilyen környezetben korrodálódna, ezért rozsdamentes acél üzemanyag-

7. ábra. A nehézvízes CANDU típusú reaktor vázlatja. Forrás: <http://www.mvmpaks2.hu/hu/Atomenergia/AtomeromuTipusok/PublishingImages/4.%C3%A1bra.png>





8. ábra. A szuperkritikus vízű reaktor vázlatja. Forrás: http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/59/Supercritical-Water-Cooled_Reactor.svg

burkolatra van szükség, amelynek neutronelnyelése miatt nagyobb dúsítású üzemanyagot kell alkalmazni. A terveknek magyar vonatkozása is van, a fűtőelemek csomkjainak áramlási jellemzőit a BME Nukleáris Technika Intézetében modellezték [16].

Szilárd moderátoros reaktorok

Grafitmoderátort használó atomreaktorokat – elsősorban az atomfegyverekhez szükséges plutónium termelésére, majd később villamos energia előállítására – az Egyesült Államok, Franciaország, Nagy-Britannia és a Szovjetunió is kifejlesztett. A hűtőközeg szén-dioxid (CO_2), hélium vagy könnyűvíz lehet, bár kezdetben lég-hűtést is alkalmaztak. A gáz-hűtés alkalmazása egyre jobban visszaszorul, Angliában 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.

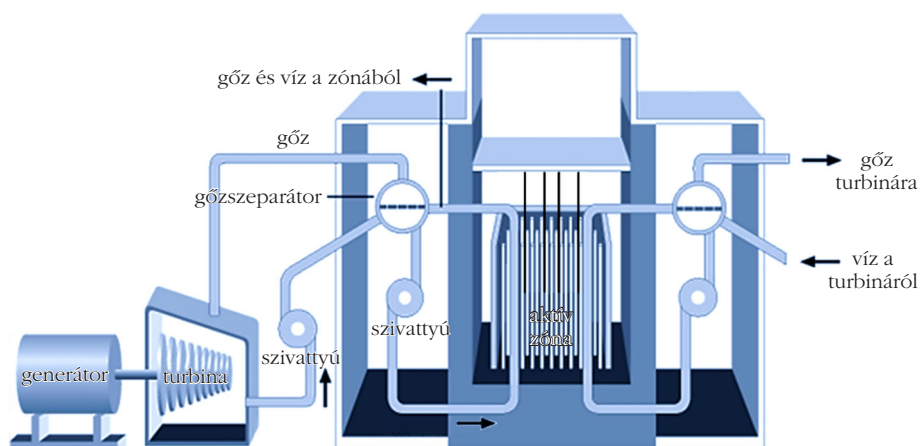
A grafitos reaktorok szovjet változata az *RBMK* (Reaktor Bolsoj Mozsnoosztj Kipjascsj, nagyteljesítményű vízforraló csatornarendszerű reaktor) típus (9. ábra). Ezek a reaktorok „másfél” körök, működésüket tekintve a forralóvizes típushoz hasonlítanak, a hűtőközeg könnyűvíz. Az RBMK-1000-es egy hatalmas szerkezet, amely 1700 darab függőleges grafitoszlopból áll, ezek összesen 2500 tonna grafitot tartalmaznak. A grafitoszlopokban fűtőelem-csatornák vannak, ezekben helyezkednek el a hengeres üzemanyag-kazetták.

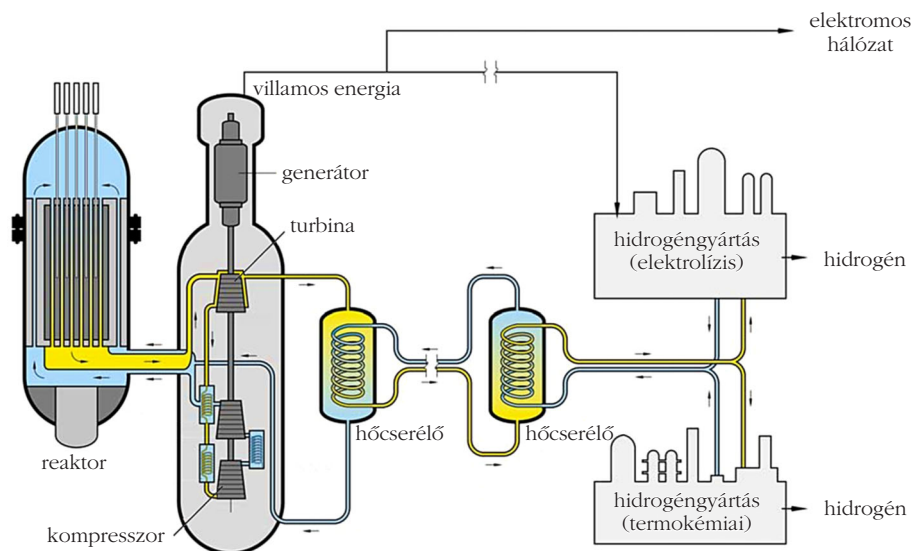
A reaktorban összesen 180 tonna urán-dioxid van, amelynek ^{235}U tartalma 1,8%. A hűtővíz számára csatorna vezet végig minden grafitoszlopon. A víz 6,5 MPa nyomás alatt van, ennek hatására forráspontja $280\text{ }^\circ\text{C}$ -ra emelkedik. Mintegy harmada a reaktorban elforr, a gőz egy gőzdobban 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 e típusnak nincs meg a láncreakció megszaladása esetén az önleállító képessége, ezért ez a típus inherensen nem biztonságos.

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





Ugyanakkor ez jelentős akadályt jelent a felhasználható anyagok tekintetében, a pálcaburkolatokkal szemben a TRISO üzemanyag-borítása képes elviselni ilyen magas hőmérsékletet is. Régebben Németországban épültek ehhez hasonló reaktorok és a Dél-Afrikai Köztársaság érdeklődött iránta, jelenleg Oroszország és Kína fejleszti.



Jelen írásunkban a termikus reaktorok működését és legfontosabb típusait ismertettük. A következő, befejező részben a tenyésztőreaktorok működését és legfontosabb típusait mutatjuk be.

10. ábra. A nagyon magas hőmérsékletű reaktor felépítése. Forrás: http://www.tuumaenergia.ee/fileadmin/user_upload/pics/VHTR_large.png

A negyedik generációs tervek között szerepel a *nagyon magas hőmérsékletű reaktor* (VHTR = Very High Temperature Reactor) is, egy grafitmoderátoros héliumhűtésű reaktor. Üzemanyaga állhat hagyományos kazettákból (10. ábra), vagy úgynevezett TRISO gömbökből, amelyek urán- és tórium-dioxid vagy -karbid golyókat tartalmaznak, pirolitikus szénrel és szilíciumkarbiddal több rétegben körülvéve. Ezt az elképzelést több golyós reaktor is alkalmazta már, azokban a gömbök a reaktor aktív zónáján lassan áthaladva „kiégnek” és távozva feldolgozhatók. A nagyon magas hőmérséklet 1000 °C-ot jelent, amely ideális a termokémiai hidrogéngyártáshoz, ami a reaktor egyik fő célkitűzése [17].

Irodalom

- Vidovszky István: A jövő atomerőművei. *Fizikai Szemle* 55/4 (2005) 118–122, <http://www.fizikaiszemle.hu/archivum/fsz0504/VidovszkyI.pdf>
- <http://www.world-nuclear.org/info/inf02.html>
- Csom Gyula: *Atomerőművek üzemtana, II/1–2*. Műegyetemi kiadó, Budapest, 2005.
- Papp Sándor: Milyen erőművet építsünk? Atomerőmű létesítési ajánlatok. *Fizikai Szemle* 42/4 (1992) 144, <http://fizikaiszemle.hu/archivum/fsz9204/papp9204.html>
- Kiss Attila, Vágó Tamás, Aszódi Attila: Az SCWR-FQT tesztszakasz be- és kilépő részének CFD analízise. *Nukleon VII* (2014) 169, http://nuklearis.hu/sites/default/files/nukleon/7_3_169_KissA.pdf
- A IV. generációs atomerőművek fóruma (GIF): https://www.gen-4.org/gif/jcms/c_59461/generation-iv-systems

Ez is a Kanári-szigetek!

Nézzed meg!
Töltsd le!
Mutasd meg másoknak!
Tanítsd meg diákjaidnak!

VAN ÚJ A FÖLD FELETT

Keress a fizikaiszemle.hu mellékletek menüpontjában!