

## ATOMERŐMŰ GENERÁCIÓK FEJLŐDÉSÉNEK VONZATAI

### DEVELOPMENTAL CONSEQUENCES OF ATOMIC POWER PLANT GENERATIONS

ANTAL Zoltán; KÁTAI-URBÁN Lajos; VASS Gyula

(ORCID: 0000-0001-9373-3454); (ORCID: 0000-0002-9035-2450);

(ORCID: 0000-0002-1845-2027);

[antalzmax@gmail.com](mailto:antalzmax@gmail.com); [lajos.katai@uni-nke.hu](mailto:lajos.katai@uni-nke.hu); [gyula.vass@katved.gov.hu](mailto:gyula.vass@katved.gov.hu)

#### Absztrakt

Az első atomerőművek kifejlesztésétől napjainkig több évtized telt el. A nukleáris láncreakció biztonságos szabályozása és felhasználása mára már mindennapos feladattá egyszerűsödött, köszönhetően a több évtizedes, különböző típusú atomerőművek üzemeltetési tapasztalatainak. A cikkben bemutatásra kerülnek a leglényegesebb szempontok, amiben az egyes atomerőművek különböznek egymástól, az évtizedek alatt bekövetkezett technológiai változtatások, melyeket ma már generációkba sorolunk és szót ejtünk a jövő nukleáris energiahordozóiról is. Mindezek feltételeiről, összefüggéseiről és egymáshoz való viszonyukról végül levonhatjuk majd azt a konzekvenciát, hogy a nukleáris energiát felhasználó üzemek előtt még sok fejlődési szakasz áll, tekintve azt, hogy a technológia előrehaladása mindig újabb megvalósítható lehetőségeket kínál az emberiség tudósainak.

**Kulcsszavak:** atomerőmű, reaktor, nukleáris, fúzió

#### Abstract

Several decades have passed since the appearance of the first atomic power plants. Safe regulation and utilization of the nuclear chain-reaction has become by now an everyday task, due to the decades-long operational experience of different types of atomic power plants. The most important aspects of differences among the types of atomic power plants are to be presented in this thesis, along with the technological changes and developments of these past decades (hence the expression "generations of atomic power plants" has been used validly) and the nuclear energy sources of the future will be touched upon as well. Eventually a consequence may be drawn, based on the conditions and correlations of all the above, that there are a lot of developmental possibilities and new periods to come in the future for power plants using nuclear energy due to the fact that technological advancement will continuously provide options for humanity and its scientists to improve and realize the potentials hidden in this resource.

**Keywords:** nuclear power plant, reactor, nuclear, fusion

A kézirat benyújtásának dátuma (Date of the submission): 2018.05.10.

A kézirat elfogadásának dátuma (Date of the acceptance): 2018.06.11.

## BEVEZETÉS

Az elmúlt évtizedekben a villamos energia felhasználása olyan rohamos mértékben növekedett a technológia és számítástechnika fejlődésének köszönhetően, hogy a közeljövőben az igények kielégítéséhez tudatos tervezésen alapuló, megnövelt hatásfokú energiatermelőkre lesz szükség, amelyek alkalmazása nem jár együtt a környezeti károk növekedésével. Az emberek fajlagos energiaigénye napról napra nő, így a technológiai fejlődés és hatásfoknövelés elengedhetetlen szegmense a villamos energiatermelésnek. Az optimális cél tehát olyan korszerűen hatékony energiatermelő technológiák megalkotása, amelyek káros környezeti hatása és kockázati tényezője alacsony. A kezdeti nukleáris reaktor üzemeltetés veszélyes és kiforratlan technológiájához képest a jelenlegi energiatermelést tekintetbe véve ma az atomenergia felhasználása áll a legközelebb az optimális igények kielégítéséhez. [1] A jelenleg alkalmazott aktív és passzív biztonsági rendszerek már olyan fejlett megoldásokat tartalmaznak, amelyek alkalmazása mellett az atomerőművekről megállapítható, hogy üzemük során nincs káros hatásuk, és nem okozzák a környezet károsodását.

A világban termelt villamos energia 12%-át adják az atomerőművek. [2] A jelenleg üzemelő erőművek azonban működési élettartamuk végéhez közelednek. A cikkben a létező atomreaktorok típusainak és működésük jellemzésével kívánom bemutatni, hogy a II. világháború után miként fejlődött az atomenergia felhasználása, melynek eredményeként az újonnan épülő erőművek már felhasználják az elmúlt évtizedek tapasztalatait, továbbá miként tesznek eleget a jelenlegi biztonsági kritériumoknak. Az épülő 3 és 3+ generációs atomerőművek bemutatásával alátámasztom az azokat megelőző technológiák fejlesztett alkalmazásainak hasznosságát és előrevetítem a jövő generációi számára kifejlesztésre váró, egyenlőre még elméleti stádiumban lévő atomerőművek típusait.

## REAKTORTÍPUSOK

Minden erőműnek hasonló az elektromos energiatermelési alapelve, a különbség az atomerőművek esetében az, hogy a folyamathoz szükséges hőt nukleáris energia felhasználásával állítják elő. Manapság az atomerőművek fejlődésének szakaszait generációkba szokás sorolni, melyek között nincs egyértelmű határvonal, ugyanakkor egymásból kiinduló átmeneteket figyelhetünk meg bennük. [3] A generációkon belüli csoportosítás alapjául a nukleáris láncreakció szabályozására és a keletkező hő elvezetésére hivatott közeg különböző megoldásai szolgálnak, hiszen az atomreaktorokban három alapvető biztonsági feltételt kell teljesíteni annak érdekében, hogy káros hatás mentes energiatermelés valósulhasson meg: [3]

- a nukleáris láncreakció hatékony szabályozása;
- a termelt energia és hő megfelelő elszállítása;
- a radioaktív anyagok kikerülésének megakadályozása.

Az atomerőművek esetében a moderátor, a neutronelnyelő- és a hűtőközeg a nukleáris láncreakció és energiatermelés szempontjából a legfontosabb paraméterek. Amint az ismert, az atomreaktorban nukleáris láncreakció játszódik le, ahol a maghasadás során egy neutron befogadó izotóp több neutronot termel. A neutrontermelés energiatermeléssel jár együtt, azaz például 1 db Urán 235 izotóp elhasadásakor kb. 200 MeV szabadul fel. (1 MeV=1.6 10<sup>-13</sup> Joule) [4]

A földön egyetlen olyan természetesen előforduló izotóp van, amely neutron hatására könnyedén képes elhasadni és újabb neutronokat termelni, ez az <sup>235</sup>U -ös tömegszámú izotópja. Neutronbefogással további három olyan izotóp állítható elő, mely atomreaktorokban

felhasználható. Az  $^{238}\text{U}$ -ból plutónium 239 és 241-es izotópja, valamint a tórium 232-es izotópjából  $^{233}\text{U}$  izotóp. [5]

A reakció állandó szinten tartását és stabil működését szabályozni kell valamint annak leállítását is meg kell tudni valósítani. A maghasadás során keletkező többlet neutron elnyelésével csökkenteni lehet a maghasadások számát, vagyis a neutronelnyelő anyag mennyiségének módosításával szabályozni a láncreakciót. Neutron elnyelő hatása van a bór 10-es tömegszámú izotópjának, a kadmiumnak, a gadolíniumnak, diszpróziumnak vagy az erbiumnak. A szaknyelv ezt a szabályzott keretek között fenntartott láncreakciót kritikus állapotnak nevezi. A maghasadási reakció elérésére és fenntartására azonban nem elegendő a neutronelnyelő közeg alkalmazása. Az Urán 238-as izotópja (továbbiakban  $^{238}\text{U}$ ) a természetben előforduló urán 99.3%-át teszi ki és csak 0.7%- a Urán 235 (továbbiakban  $^{235}\text{U}$ ). Az  $^{238}\text{U}$  hasadás nélkül befogja és megállítja az előző maghasadás során keletkező nagy energiájú neutronokat, így a benne lévő hasadóképes  $^{235}\text{U}$  izotóp reakció esélye kicsi. A hasadási láncreakció fenntartására éppen ezért két megoldást alkalmaznak. [6]

Az első, hogy a keletkező gyors neutronokat lelassítják, amihez neutronlassító anyagokat használnak fel, ezek a moderátorok. Ezen anyagok atommagjával ütközve a neutron lelassul, úgynevezett termikus neutron keletkezik, ami nagyobb valószínűséggel hoz létre újabb maghasadást. Ilyen moderátor anyagok például a könnyű- és nehézvíz vagy a grafit. A könnyűvíz esetén a maghasadás létrejöttének érdekében az  $^{235}\text{U}$ -öt 0.71%-ról 2-5%-ra dúsítják, hogy így növeljék a termikus neutronok által létrehozott maghasadás lehetőségét, mivel a hidrogén kis mértékben elnyeli a termikus neutronokat. Nehézvíz és grafit moderátor esetében a láncreakció természetes uránnal is megvalósulhat. [6] [7]

A második lehetőség a neutron lassítás helyett az  $^{235}\text{U}$  nagy mértékű dúsítása és egy reaktoron belül nagyobb mennyiség felhalmozása. Ebben az esetben viszont az  $^{238}\text{U}$  neutronelnyelése során új hasadó anyag, nevezetesen plutónium keletkezik. Ezt a folyamatot tenyésztésnek hívják, az ilyen típusú reaktorokat pedig gyorsreaktoroknak.

Az első nukleáris energiatermelést célzó reaktorok feltalálásától napjainkig ezen elvek alapján fejlődtek az atomerőművek. [6] [7]

## **Termikus reaktorok**

A termikus reaktorokban a már említett önfenntartó maghasadást lassú, azaz termikus neutronok tartják fenn a moderátorok segítségével. A maghasadások során a nagy mennyiségű keletkező hőt el kell vezetni. Grafit moderátor esetében a hűtéslevezetés történhet szén-dioxid vagy héliumgáz felhasználásával. Könnyű- és nehézvíz esetében a hűtőközeg lehet maga a moderátor vagy kialakítható külön hűtővízrendszer is. [8]

### **Folyadék moderátorú reaktorok**

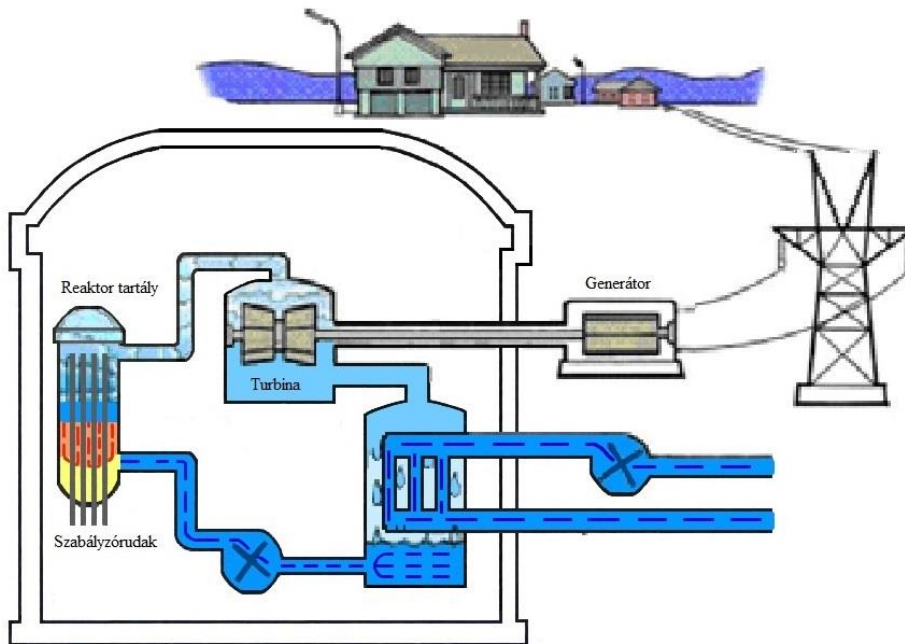
A könnyűvízzel moderált reaktorok esetében, ahol a moderátor és a hűtőközeg is víz, a maghasadásos hőtermelés következménye, hogy a reaktorban túlhevülés esetén a víz forrni kezd, ami által csökken a moderátor a reaktorban és így a neutronlassító képessége is csökken. A keletkező gyors neutronok maghasadás nélkül befogódnak az uránban.

Kétféle könnyűvízes reaktortípus került kifejlesztésre, a nyomott vizes és a forralóvizes reaktorok, melyek között az alapvető különbség a primer és szekunderkör valamint az őket körülvevő konténment kialakításában van. A konténment bevezetéséről később, a 2. generációs erőműveknél ejtünk még szót.

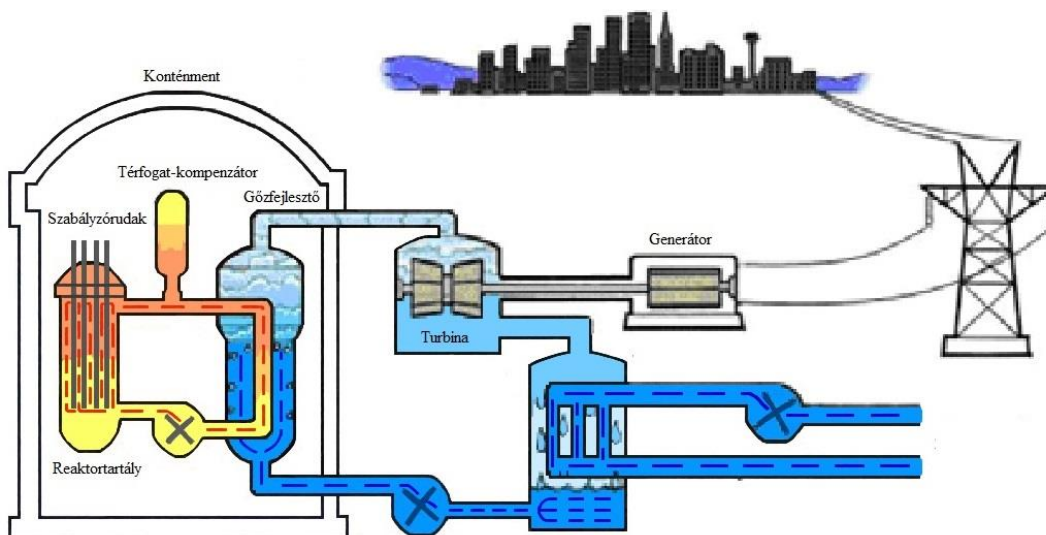
A nyomottvizes atomreaktor moderátora és hűtőközege könnyűvíz, üzemanyaga pedig alacsony dúsítású urán. Jellemzője, hogy a primerkörben, azaz az aktív zónában felszabaduló hőt egy hőcserélőn át adja át a szekunder körnek, ahonnan elforrással a turbinák meghajtásához használatos gőz keletkezik. A primer és szekunder vízkör megkülönböztetése azért fontos, mert egymástól fizikailag elhatárolt, eltérő nyomású hűtővízkörrel van szó, így a

konténment a primerkörü részeket veszi csak körbe, mivel az a szekunderkörü vízzel nincs közvetlen kapcsolatban. A primerkörü vizet itt magas nyomáson tartják, hogy az magas hőmérsékleten se forrjon el, azonban a gőzfejlesztők csövei által visszahűl és egy körfolyamat révén visszajut a reaktorba. A radioaktív anyagok így a primerkörben maradnak.

A forralóvízes reaktorok egykörösök, azaz a reaktor aktív zónáján áthaladva a víz elforr és azt leválasztva telített gőz kerül a turbinákra. Ebben az esetben a szekunder kör, vagyis a turbinák is a konténmenten belülre kerülnek, hiszen a turbinákra is az enyhén radioaktív hűtőközeg kerül.

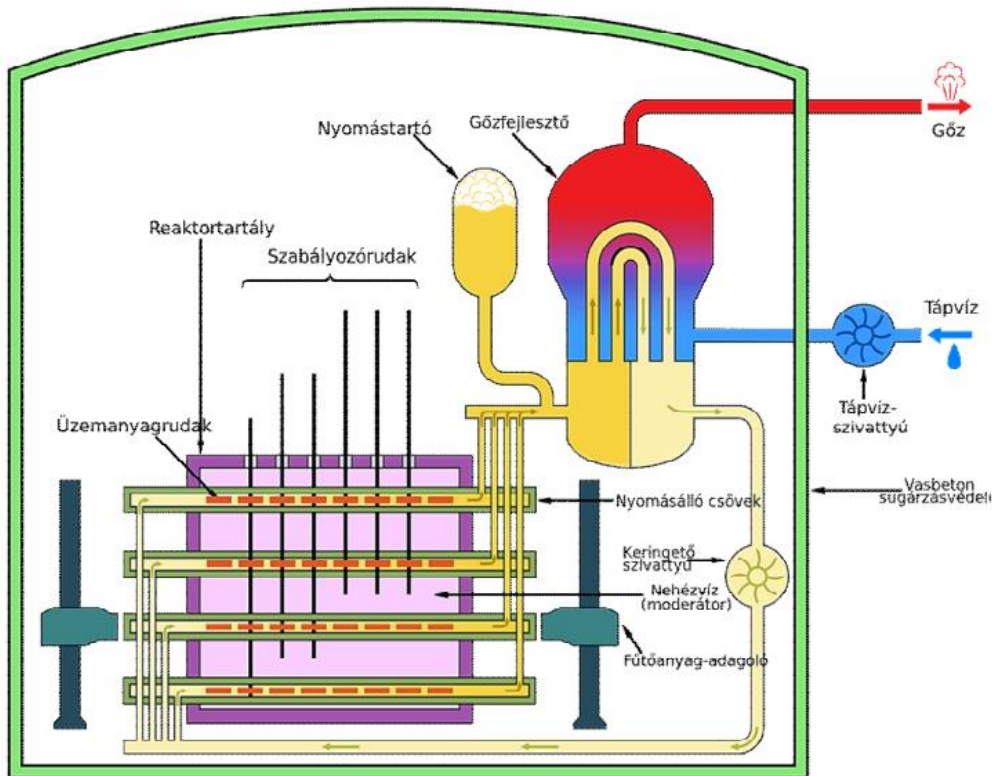


**1. ábra** Forralóvízes reaktor  
Forrás: <http://watt-logic.com/2017/12/06/abwr/>



**2. ábra** Nyomott vizes reaktor  
Forrás: <http://watt-logic.com/2017/12/06/abwr/>

A nehézvízzel moderált reaktorok esetében a hűtőközeg könnyűvíz, a moderátora pedig nehézvíz. Az üzemanyaga lehet természetes vagy enyhén dúsított urán, mivel a nehézvíz nem nyeli el a neutronokat. Ezeknél a reaktoroknál nincs szükség a friss üzemanyag feltöltéshez a leállásra, mert az üzemanyag nyomásálló csövekben van, nem tartályokban és ezek egyesével, folyamatos működés mellett is felfnyithatók. [5] [6] [8]

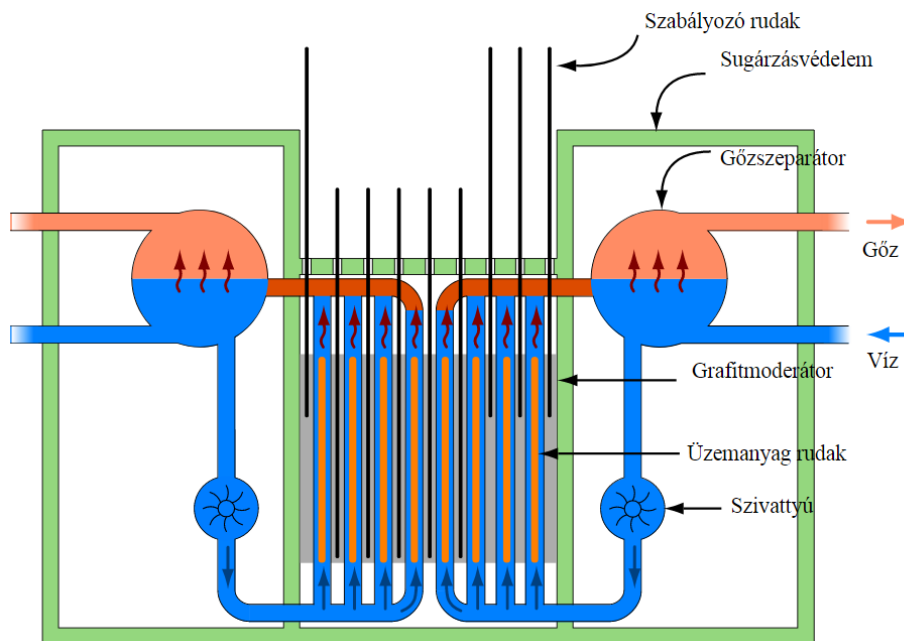


3. ábra Nehézvíz reaktor

Forrás: RADNÓTI K., KIRÁLY M.: Az atomenergiáról egyszerűen: az atomerőművek működése, típusaik és jövőjük. *Nukleon*, VIII 177 (2015). 1-13.oldal

### Szilárd moderátorú reaktorok

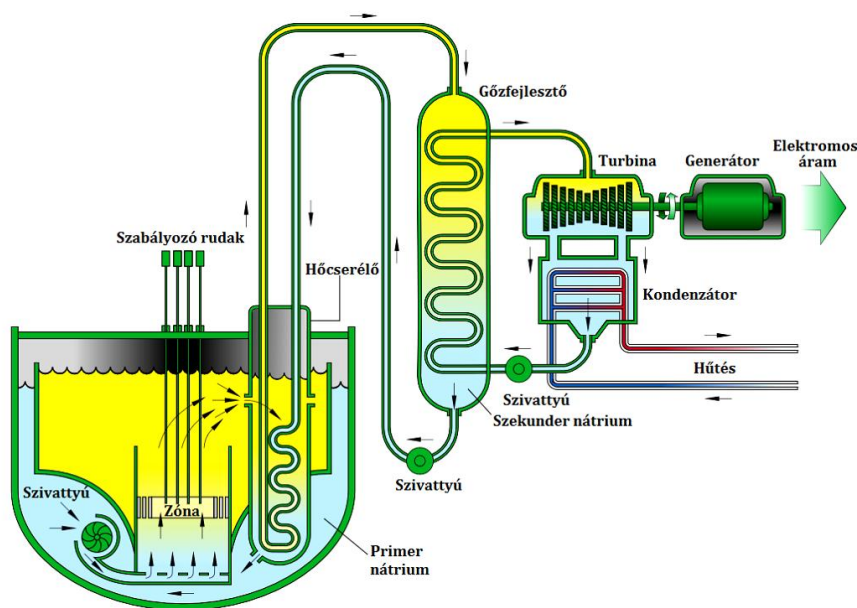
A grafit moderátoros erőművek esetében a hűtőközeg lehet gáz (szén-dioxid, hélium) vagy lehet könnyűvíz. A reaktor előnye, hogy természetes uránnal is működtethető, de a gazdaságosság szempontjából enyhén dúsított uránt használnak. Ugyanakkor a könnyűvíz hűtésű reaktornál túlhevülés esetén a neutronelnyelő hűtővíz elforrhat, ami a grafit moderátor megmaradásával a láncreakció és a hőtermelés folytatódását eredményezi és a reaktor megszaladásához vezethet, mint a csernobili atomerőmű baleset esetében. [5] [6] [8]



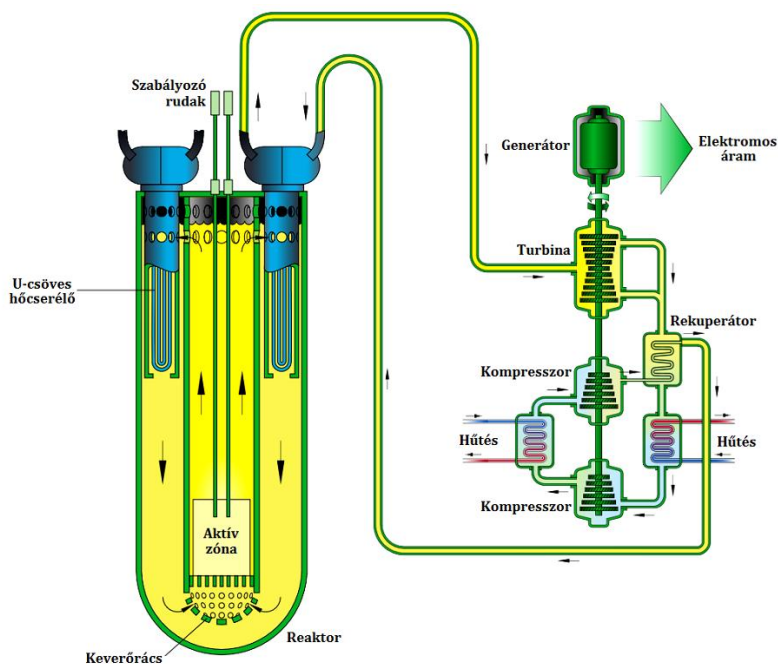
4. ábra Grafit moderátoros reaktor  
 Forrás: <http://www.bnra.bg/en/useful/reactor-types/rbmk.gif>

### Gyors reaktorok

A gyorsreaktorokban nincs moderátor, itt az aktív zónában a neutronok nem lassulnak le. Nagy dúsítású uránnal vagy plutóniummal működnek, ami származhat már kiegészített nukleáris üzemanyagokból vagy leszerelt atomtöltetektől. A gyorsreaktorok feladata a villamos energia termelésén felül újabb hasadó anyagok termelése. Ebből következik, hogy a gyors reaktorok egyben tenyésztő reaktorok is. A reaktorok intenzív hűtését úgy kell megoldani, hogy a hűtőközeg ne lassítsa le a neutronokat, ezért erre a célra folyékony fémet alkalmaznak, nátriumot vagy ólmot. [5] [6] [7] [8]



5. ábra Nátriumhűtésű gyorsreaktor  
 Forrás: RADNÓTI K., KIRÁLY M.: Az atomenergiáról egyszerűen: az atomerőművek működése, típusaik és jövőjük. *Nukleon*, VIII 177 (2015). 1-13.oldal



6. ábra Ólomhűtésű gyorsreaktor

Forrás: RADNÓTI K., KIRÁLY M.: Az atomenergiáról egyszerűen: az atomerőművek működése, típusaik és jövőjük. *Nukleon*, VIII 177 (2015). 1-13. oldal

## Tenyésztőreaktorok

A tenyésztő reaktorok lényege, hogy a termelődő hasadó anyagok aránya az elhasznált hasadó anyagénál nagyobb legyen. Erre azért is szükség van, mert az  $^{235}\text{U}$  nem megújuló energiahordozó, és bár jelentős készlettel rendelkezünk, 50-100 év múlva elfogyhat. Az uránon és a belőle neutronbefogadással keletkeztethető-előállítható plutóniumon felül még a tórium neutronbefogadással átalakuló izotópjá, a  $^{232}\text{Th}$  alkalmas a maghasadás láncreakciójának fenntartására. A tenyésztőreaktorok javarészt még fejlesztés alatt állnak és jelenleg még nem vesznek részt aktívan a villamos energia termelésében, de az atomerőművek üzemanyaga, mint nem megújuló, véges energiaforrás szempontjából kis számuk ellenére egyre nagyobb jelentőséget kapnak. [5] [6] [7] [8]

## ATOMERŐMŰ GENERÁCIÓK

### 1. generáció

A II. világháború után minden olyan nukleáris kezdeményezést, amely az atomenergia békés felhasználását tűzte ki célul az első generációnak tekinthető. A tudósok az ötvenes évek előtt is a békés atomenergia-termelés beindításának alapjait kívánták lefektetni, de a háború és az atombomba felhasználása elodázta a nukleáris energia kiaknázásának lehetőségeit.

Aztán az USA 1951-ben üzembe helyezte az első, nátrium-kálium hűtésű kísérleti szaporító gyorsreaktort, mely ugyan már villamos áramot is termelt, de ez inkább csak a reaktorcsarnok világítására volt elegendő. Fontosabb tulajdonsága volt, hogy a Urán 238-ból állított elő Plutónium 239-et, az atombomba úgynevezett alapanyagát. [5]

Az első hálózatra kapcsolt atomerőművet 1954-ben állították üzembe Obnyinszkben, Moszkvától 110 kilométerre. Ez egy grafit moderátoros, vízű hűtésű, egy reaktorblokkos erőmű volt. [5]

Anglia 1953-ban állította üzembe az első, hivatalosan is kereskedelmi célú atomerőművét Windscale-ben, melyet maga II. Erzsébet királynő nyitott meg, azonban 1957-ben leégett. Ebben az évben állították üzembe Magnox atomerőművet, mely szintén plutónium termelésére alkalmas széndioxid hűtésű, grafit moderátoros erőmű volt.[7]

Az USA 1957-ben állította üzembe a Shippingport könnyűvízes atomerőművet, mely még katonai célokra plutóniumot termelt, viszont 60 MW teljesítményével villamos energiát táplált be a hálózatba. [5] [7] [9]

## 2. generáció

A napjainkban használt reaktorok többsége ilyen, de tervezett élettartamuk, mint már említésre került, hamarosan lejár. Az első generációs, kezdetleges hibákból sok tanulságot levontak, ennek eredményeként a 70-es évektől épített, vagyis második generációs erőművek biztonságnövelő átalakítások alkalmazásával kerültek megépítésre. Az egyik legfontosabb újítás a nyomásálló burkolat alkalmazása volt, mely a baleseti helyzetekben megakadályozza a radioaktív anyagok kijutását a szabadba. Ez az úgynevezett konténment. Ezek a reaktorok már általános célú nukleáris erőművek lettek, amelyek feladata kizárólagosan a villamos energiatermelés. A jelenleg üzemelő paksi atomerőmű négy blokkja is a második generációs reaktorok közé tartozik, ugyanakkor az évek során több teljesítmény és biztonságnövelő fejlesztésen estek át, ahogyan a technológia fejlődése azt lehetővé tette. [5] [7] [9]

## 3. generáció

A jelenleg és az elkövetkezendőkben épülő atomerőműveket szokás a harmadik generációba sorolni, ezek más néven az evolúciós erőművek. Ezek lényege, hogy a második generációs erőművek működtetése során szerzett tapasztalatokat felhasználva kibővített és továbbfejlesztett technológiai megoldásokkal valamint a jelenlegi reaktortípusok gazdasági és biztonsági optimalizálása továbbá az ezekből gyűjtött tapasztalatok felhasználása által építik meg az új erőműveket. A működtetésben megnövelt határfokon, magasabb üzemanyag hasznosítással és fejlett dúsítási eljárásokkal együtt valósítanak meg az eddiginél jóval hatékonyabb és hosszabb, akár 60 éves üzemidőt. [5] [7] [9]

Az Aktív és passzív biztonsági rendszerek kialakítása jelentős fejlődésen ment át, köszönhetően a technológia és számítástechnika fejlődésének, valamint a sajnálatos balesetekből levont mértékadó tapasztalatoknak köszönhetően. [10]

A harmadik generációs atomerőművek fejlesztésének eredményeként jöttek létre a következő reaktortípusok: [6] [7] [8] [9] [10]

- EPR (European Pressurized Reactor) – egy olyan nyomottvízes határfoknövelt reaktor, melynek a konténmentje acéllal erősített duplafalú betonbunker. A zónaolvadás esetére a reaktor alatt egy zónaolvadék felfogó rendszer kialakítására került sor. Az újításokhoz hozzátartoznak a legkorszerűbb jelző és mérőműszerek beépítése is. A hűtőrendszere négy független rendszerből áll, amelyek a reaktor leállítása után is működőképesek maradnak 1-3 évig.
- AES 2006 (VVER 1200) – Újfajta, orosz fejlesztésű, továbbfejlesztett vízhűtéses, vízmoderátoros nyomottvízes reaktor. Erről a típusról részletesebben szó esik még a cikkben, mivel a Paks II beruházás során a meglévő atomerőmű mellé ilyen reaktorokkal szerelt erőmű kivitelezése a cél.
- AP-1000 Westinghouse – Az amerikaiak által tervezett harmadik generációs atomerőmű, ahol a biztonsági rendszerek többleti felhalmozása lehetővé teszi a



balesetek esetére, hogy a reaktor emberi beavatkozás nélkül is biztosítsa 72 órán keresztül a reaktor hűtését és az aktivitás környezetbe kerülésétkerülésének megakadályozását. Ebben a továbbfejlesztett nyomottvizes reaktorban a pihentető medence a VVER új típusához hasonlóan a konténmenten belülrre került.

#### 4. generáció

A negyedik generációs atomerőműveket innovációs erőműveknek is szokás nevezni, hiszen olyan új megoldásokat és fejlesztéseket vetít előre, melyek az eddigi atomerőművek működését alapvetően más mechanizmusra tervezik. Ilyen például a fúziós erőművek megvalósításának lehetősége valamint minden olyan elméleti nukleáris reaktor dizájn, amely tervei, kutatásai, fejlesztései még folyamatban vannak. A negyedik generációs erőművek feltétele, hogy megfeleljenek a megnövelt biztonsági követelményeknek úgy, hogy a nukleáris hulladék minimalizálása és újrahasznosítása mellett az üzemanyag cellák érzékenységeinek kezelése is megvalósuljon. [5] [6] [11]

A negyedik generációs erőművek fejlesztése a következő típusok irányába indult el: [9]

Termikus reaktorok fajtái:

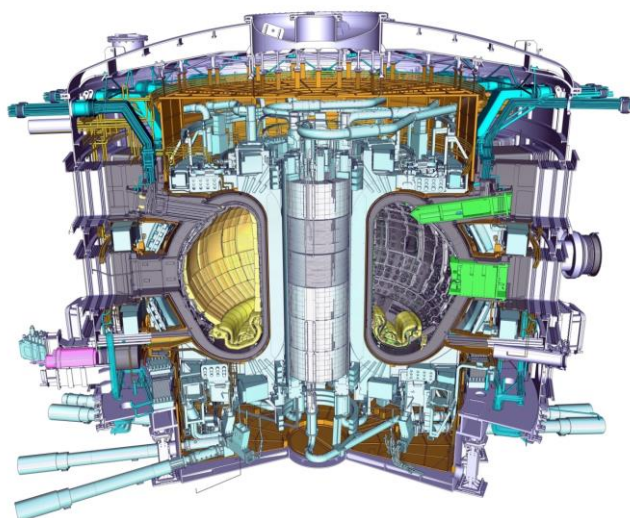
- Nagyon nagy hőmérsékletű reaktor (VHTR – Very High Temperature Reactor);
- Szuperkritikus vízhűtéses reaktor (SCWR – Supercritical Watercooled Reactor);
- Olvadéksó reaktor (MSR – Molten Salt Reactor).

Gyors reaktorok fajtái:

- Gázhűtéses gyors reaktor (GFR – Gas-cooled Fast Reactor);
- Nátriumhűtéses gyors reaktor (SFR – Sodium-cooled Fast Reactor);
- Ólomhűtéses gyors reaktor (LFR – Lead-cooled Fast Reactor).

### FÚZIÓS REAKTOROK

Deutérium és trícium hevítésével és azok tórusz formájú reaktorában mágneses térrel körpályára kényszerített ionjainak reakciója, amely révén plazmaállapot valósul meg valamint a neutronon felül hélium keletkezik. A reaktor falát vízzel hűtik és a hűtésből keletkező víz hajtja meg a turbinákat. [3] [8] [12] [13]



7. ábra Nemzetközi Kísérleti Termonukleáris Reaktor – Tokamak

Forrás: <https://cpb-us-e1.wpmucdn.com/sites.psu.edu/dist/8/38131/files/2016/04/ITER.jpg>

## A PAKSI ATOMERŐMŰ

A Paksi Atomerőmű 1976-ban alakult, és 4 darab VVER 440/213 típusú nyomottvízes reaktort tartalmaz, melyek beépített teljesítménye 1850 MW. A négy blokk a világ élvonalába tartozik, mivel évek óta az első 25 legbiztonságosabb blokkja között szerepelnek. Ez az erőmű adja az ország energiatermelésének több mint 50 %-át. [14]

A reaktorok üzemanyaga urán-dioxid ( $\text{UO}_2$ ), amelyből egy reaktorban 42 tonnányi mennyiséget helyeznek el. Az urándioxidból 9 mm magas, 7,6 mm átmérőjű hengeres pasztillákat préselnek, melyeket egy cirkónium-nióbium ötvözetből készült, 2,5 m hosszú, 9 mm külső átmérőjű csőbe helyeznek, amelyet feltöltenek héliumgázzal, és ezután hermetikusan lezárnak. A burkolat megakadályozza a hasadványok kikerülését a hűtővízbe. Az üzemanyag tabletták és a burkolat együtt jelentik a fűtőelem pálcát. Mivel a több tízezer fűtőelem pálcák egyenkénti mozgatása, cseréje gyakorlatilag megoldhatatlan lenne, a fűtőelemeket kötegekbe, úgynevezett kazettákba foglalják. A fűtőelem kazetták hatszög keresztmetszetűek, és egyenként 126 fűtőelemet tartalmaznak. A nyomottvízes reaktorok közül csak a VVER-ek kazettája hatszögös, a többi négyzet keresztmetszetű. A kazettákban lévő  $\text{UO}_2$  üzemanyag dúsítása 3,5-4,8 % között van, 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.[4]

A VVER-440 típusban a láncreakció szabályozásához a fűtőelem kötegekkel azonos méretű abszorbens (bóracélból készült) kazettákat használnak, amelyek felülről lógnak be az aktív zónába. A reaktorban összesen 37 ilyen szabályozó és biztonságvédelmi rúd van, amelyek közül üzem közben 30 állandóan kihúzott állapotban, és az aktív zóna fölött helyezkedik el. Ezek a biztonságvédelmi rudak, amelyekkel a reaktor 10-12 másodperc alatt bármikor biztonságosan leállítható. A maradék 7 elnyelő kazettával az üzem közbeni teljesítmény-szabályozást végzik, de természetesen ezek is ellátnak biztonságvédelmi funkciót. A szabályozó kazetták aljához egy-egy fűtőelem kazettát kapcsolnak, így a kihúzott abszorbensek helyén is üzemanyag található.

A már elhasználódott üzemanyag kazettákat áthelyezik a reaktor melletti pihentető medencébe, ahol három évig víz alatt tárolják őket. Ekkor már nem folyik bennük nukleáris láncreakció, csupán a radioaktív bomlások eredményeznek kismértékű hőfejlődést. A vízben elnyelődik a radioaktív sugárzás, s egyben hűti a kazettákat is. Így a környezetet nem veszélyezteti a sugárzás. Három év alatt lecsökken a kazetták sugárzása és hőtermelése olyan mértékben, hogy szállíthatóvá válik. Innen a Kiegészítő Kazetták Átmeneti Tárolójába kerül, a Paksi Atomerőmű telephelyének szomszédságában létesített tárolóba. Itt minimálisan 50 évig tárolhatók a kazetták, mindaddig, amíg a lehetőségek szerint egy végleges nagyaktivitású tároló kialakításra nem kerül.

A VVER típusú reaktorok nyomottvízes rendszerűek, azaz a primer körben nagy nyomás fenntartásával biztosítják azt, hogy a hűtőközeg ne forrjon fel (a víz forráspontja 1 bar nyomáson  $100^\circ\text{C}$ , a primer körben uralkodó 123 bar nyomáson viszont már  $297^\circ\text{C}$ ). A nyomás állandó értéken tartására szolgál a térfogatkompenzátor vagy nyomáskiegyenlítő és négy darab hidroakkumulátor blokkonként. Minden blokkhoz 1 db térfogatkompenzátor tartozik, amely az egyik hurok meleg ágához csatlakozik. A térfogatkompenzátor egy álló elrendezésű tartály, melynek alját az egyik hűtőkör meleg ágával, tetejét (szelepeken keresztül) az egyik hidegággal kötik össze. A tartályban  $325^\circ\text{C}$ -os, telített állapotú víz, és felette nitrogénpárna található.

A szekunder körben történik a reaktorban megtermelt hő átalakítása mozgási, majd villamos energiává. A gőzfejlesztőben lévő  $222^\circ\text{C}$ -os, 46 bar nyomású tápvizet a csövekben keringő  $297^\circ\text{C}$ -os primer körű víz  $260^\circ\text{C}$ -ra melegíti, és felforralja. A keletkező gőzből a vízcseppeket el kell távolítani, ugyanis a turbinalapátokat károsítják a vízcseppek. Erre szolgálnak a kilépő gőz útjába helyezett cseppelválasztók. Ezek olyan terelőlemezek,

amelyeken áthaladva a vízcseppek lecsapódnak, így a kilépő gőz nedvességtartalma már alacsonyabb, mint 0,25 %.

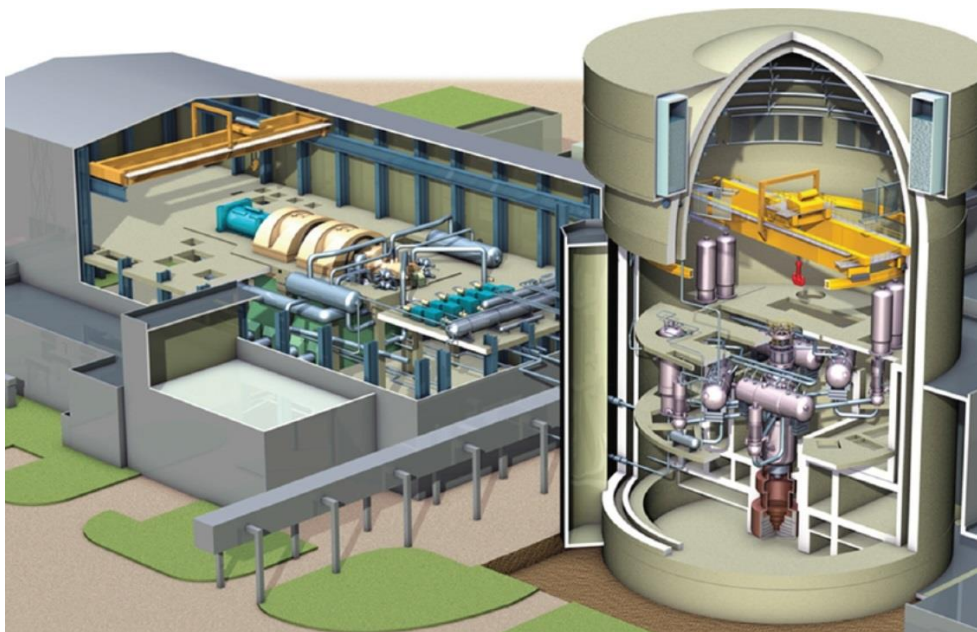
A gőzfejlesztőből kilépő, mintegy 450 t/h tömegáramú gőz a turbinára kerül, és meghajtja a turbina lapátjait. Egy adott blokkban lévő 6 gőzfejlesztőből 3 együtt táplál egy turbinát. A Paksi Atomerőműben 8 darab turbina és 8 darab 230 MW-os generátor van. A turbinában egy tengelyen helyezkedik el egy nagynyomású és két kisnyomású ház, valamint a generátor fogórésze. A turbina nagynyomású háza 7 fokozatú, azaz a gőz expanziója és munkavégzése 6 fokozatban történik. A nagynyomású turbinaházban a gőz hőmérséklete kb. 135°C-ra csökken, nedvességtartalma pedig 12 %-ra nő. Emiatt a kisnyomású házba való belépés előtt a cseppleválasztó és gőztúlhevítő berendezésbe kerül, ahol a turbinára káros vízcseppeket eltávolítják, és a telítési hőmérséklet fölé melegítik. A két kisnyomású ház 5-5 fokozatú.

A már munkát végzett gőz a kondenzátorba kerül, ahol 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 8 hőcserélőben végezetül 222°C hőmérsékletűre melegszik fel. A tápvíz ezen a hőmérsékleten lép be a gőzfejlesztőbe, ahol újra felmelegíti a primer körű víz hőenergiája. [3] [4] [6] [7] [15] [16]

### **A 3+ generációba tartozó VVER-1200 (AES-2006) reaktor**

A VVER-1200-as reaktor orosz fejlesztésű, továbbfejlesztett vízhűtéses, vízmoderátoros nyomottvízes reaktor, melynek aktív és passzív biztonsági rendszerei a mai legmodernebb technológiákat alkalmazzák. Konténmentje két különálló részből áll, egy külső és egy belső burokból, melyek sajátos védelmi funkciókkal rendelkeznek. A külső burkolat 80 cm vastag és elbírja egy utasszállító becsapódását is, továbbá a konténment ellenáll a földrengésnek és nagynyomású lökéshullámoknak. A belső burkot belülről egy vastag acéllemez fedi, amit egy csőrácsháló is erősít. A megerősített belső burk ellenáll a nagy nyomásnak és a magas hőmérsékletnek. A konténmenten belül a sérült reaktorból származó gőz kondenzálására külön befecskendező rendszer lett kiépítve, valamint a pihentető medence is a konténmenten belül található, ami a hűtővízrendszer szükségszerű betáplálásban is részt vesz. A kiegészítő fűtőelemek átmeneti tárolójához tartozó 2000 m<sup>3</sup>-es hűtővíz jelentős része alacsony- és magasnyomású rendszereken keresztül használható fel pótvízként. A magas nyomású rendszerek kis szivárgás esetén, az alacsony nyomású szivattyúk nagy elfolyásos csőtöréskor lépnek működésbe. A sérült reaktorból származó gőz kondenzálására külön befecskendező rendszer hivatott a Konténmenten belüli nyomás és hőmérsékletcsökkentésre. Ehhez a tartalék hűtővízrendszereket nitrogénnel helyezik nyomás alá, hogy megfelelő legyen a passzív befecskendezés a reaktorba. Az EPR-hez hasonlóan rendelkezik zónaolvadék csapdával ahol egy speciális anyaggal leállítják a láncreakciót és külön hűtőrendszer gondoskodik az olvadéktároló hűtéséről. Az aktív és passzív biztonsági rendszerek a primerkörű csővezeték törése esetén is 72 órás hűtést biztosítanak a reaktornak. A hidrogénrobbanás megakadályozására a konténmenten belül hidrogén rekombinátorokat is alkalmaznak, amivel a belső, konténmentre belülről ható nagy nyomást lehet csökkenteni. A hidrogénrekombinátorok megakadályozzák a gőz és olvadt cirkónium reakciójaként felszabaduló hidrogénrobbanást úgy, hogy felgyorsítják a hidrogén-oxigén egyesülést, melynek eredményeként robbanóképes hidrogén elegy helyett víz keletkezik. A reaktorban a hűtővíz 160 bar nyomáson 328°C-os, amelyek a cirkónium fűtőanyag pálcákban lévő urán-dioxid pasztillákat hűtik és moderálják, maga a reaktor tartály pedig speciális

lengéscsillapítókra ültetett, 20 cm vastag falú, és négy gőzfejlesztőre van kivezetve. A reaktortartályban 163 kazettában darabonként 312 fűtőelem pálcza található és 121 szabályozó rúd. A 3+ generációba tartozó VVER reaktornál a tervezett reaktorhűtés aktív és passzív rendszerek segítségével egyaránt megtörténhet, ahol a passzív rendszer üzemeltetése nem igényel villamos betáplálást vagy emberi beavatkozást. [17]



8. ábra VVER-1200-as reaktor vázlatja

Forrás: <http://static.ezermester.hu/Ezermester-online/2016/03/atoeromu%20paks2/1418055380.jpg>

## ATOMERŐMŰ GENERÁCIÓK FEJLŐDÉSÉNEK VONZATAI

Mindazt, amit ma generációknak hívunk az atomerőművek életében, igazán elválasztani egymástól nem tudjuk. A második generációs típusok nem egyszerre léptek a piacra, nem egy ország vagy egy tudós feltalálásából származnak. A II. világháborúban az atomenergia felhasználása egyértelműen ~~determinálta~~ ~~előrevetítette~~ a jövő fegyvere titulus mellett, hogy elképesztő kiaknázatlan területről van szó. Ahogy a tudomány fejlődött az évtizedek alatt, úgy lett egyre biztonságosabb a nukleáris energia felhasználása és az új lehetőségek kutatása. Minden egyes újítás és fejlesztés további lehetőségekkel kecsegtetett, melyeket sorra igyekeztek megvalósítani és a társadalom szolgálatába állítani. Éles generációs elhatárolásra talán a negyedik generációs erőművek megvalósításának esetében kerülhet sor vagy a jelenleg már működő, de még kísérleti stádiumban lévő nukleáris energiatermelési lehetőségek esetében, mint például a hidrogénfúzió. [18] A világban több tudós kutatócsoport épít úgynevezett tokamak berendezést, melynek a lényege, hogy a mágneses összetartású mágneses tekercekkel toroidális kialakítású berendezésekben megvalósítják a plazmaállapotot, aminek az energiája felhasználásra kerül. [8] [13] [19] Az bizonyos, hogy minden egyes fejlesztés és kutatás hatással van az azt követőre és egymásra épülő rendszerként formálják már ma a holnap nukleáris energiafelhasználását.

## FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] *World Nuclear Industry Handbook*, Zagreb, Progressive Media International, 2016.
- [2] *The World Nuclear Industry – Status Report 2017*. Paris: Mycle Schneider Consulting Project, 2017.

- [3] BOGNÁR B., KÁTAI-URBÁN L., KOSSA Gy., KOZMA S., SZAKÁL B., VASS G.: *Iparbiztonságtan I. - Kézikönyv az iparbiztonsági üzemeltetői és hatósági feladatok ellátásához*. Budapest: Nemzeti Közszolgálati Egyetem, Nemzeti Közszolgálati és Tankönyv Kiadó Zrt., 2013.
- [4] *Atomerőmű Tűzoltóság, ATOMIX Kft. Tűzoltási és Kárelhárítási Szakágazat, Szakmai Ismeretek Oktatási anyag, ATOMIX at-me-6.2.2.-11-v2: Atomerőműves rendszerek*, 2012. 08. 01.
- [5] RADNÓTI K., KIRÁLY M.: Az atomenergiáról egyszerűen: az atomerőművek működése, típusaik és jövőjük. *Nukleon*, VIII 177 (2015). 1-13.oldal.
- [6] PÓR G.: *Atomenergetikai alapismeretek – Atomerőművek generációi*. Budapest: Edutus Főiskola, 2012.  
[www.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/tamop412A/2010-0017\\_61\\_atomenergetikai\\_alapismeretek/ch01s03.html](http://www.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/tamop412A/2010-0017_61_atomenergetikai_alapismeretek/ch01s03.html) (A letöltés dátuma: 2017. 10. 27.)
- [7] CSOM GY.: *Atomerőművek*. Magyar Atomfórum Egyesület, Budapest 2004.
- [8] HANUSOVSKY L.: *Atomreaktorok előadás*  
[http://atomfizika.elte.hu/magreszfiz/hanusovszkylivia\\_atomreaktorok.pdf](http://atomfizika.elte.hu/magreszfiz/hanusovszkylivia_atomreaktorok.pdf) (A letöltés dátuma: 2017.10.27.) 1999. évi LXXVI. törvény a szerzői jogról
- [9] RÁCZ E.: *Nukleáris Erőművek előadás sorozat, 6. előadás: Atomreaktorok generációi*  
[http://uni-obuda.hu/users/racz.ervin/NE\\_n\\_1\\_Eloadas.pdf](http://uni-obuda.hu/users/racz.ervin/NE_n_1_Eloadas.pdf) (A letöltés dátuma: 2017.10.27.)
- [10] NÉMET B.: *Nukleáris energetika előadás sorozat, 7. előadás: Harmadik generációs atomerőművek, a paksi atomerőmű bővítése (Paks-II)*, Pécs 2015.  
[http://www.physics.ttk.pte.hu/pages/munkatarsak/nemetb/Nucl-En-7\\_PaksII.pdf](http://www.physics.ttk.pte.hu/pages/munkatarsak/nemetb/Nucl-En-7_PaksII.pdf) (A letöltés dátuma: 2017.10.30.)
- [11] *Nuclear Safety & Security - IAEA Safety Standards*  
<http://www-ns.iaea.org/standards/> (A letöltés dátuma: 2017.10.27.)
- [12] CACUCI, D. G.: *Handbook of Nuclear Engineering*. Springer Science+Business Media LLC, New York 2010.
- [13] *Iter.org: What is a Tokamak?*  
<https://www.iter.org/mach/Tokamak> (A letöltés dátuma: 2017.10.26.)
- [14] *Atomenergia info: Hazai és nemzetközi energetikai helyzetkép - Fokozódó hazai kiszolgáltatottság*  
<http://atomenergiainfo.hu/magyar-atomenergetika/hazai-es-nemzetkozi-energetikai-helyzetkep> (A letöltés dátuma: 2017.04.01.)
- [15] *MVM Paksi Atomerőmű Zrt, Atomerőmű Tűzoltóság, ATOMIX Kft. Tűzoltási és Kárelhárítási Szakágazat, Szakmai Ismeretek Oktatási anyag, ATOMIX at-me-6.2.2.-11-v2: Atomerőműves rendszerek*, Paks 2012. 08. 01.
- [16] *MVM PA Zrt. MSSZ 18. verzió*  
Az MVM Paksi Atomerőmű Zrt. *Munkahelyi Sugárvédelmi Szabályzata*, MSSZ\_V18, érvényes: 2017.10.02-től

- [17] *The VVER today: Evolution, Design, Safety – State Atomic Energy Corporation ROSATOM*  
<http://www.rosatom.ru/upload/iblock/0be/0be1220af25741375138ecd1afb18743.pdf> (A letöltés dátuma: 2018.03.03.)
- [18] *Safety of Nuclear Power Reactors World Nuclear Association – Energy For Sustainable Development, 2003.*  
<http://www.world-nuclear.org/information-library/safety-and-security/safety-of-plants/safety-of-nuclear-power-reactors.aspx> (A letöltés dátuma: 2017.10.30.)
- [19] RÉFY D.: „Mai fúziós kísérleti berendezések”. Plazma magfúziós erőmű cikk (A letöltés dátuma: 2018.03.26.)  
<http://magfuzio.hu/tanulmanyok/mai-fuzios-kiserleti-berendezesek/>