

Barina Balázs¹

Atomerőművek fejlődése a generációváltások tükrében

Development of Nuclear Power Plants in the Light of Generational Change

A villamos energia előállítása világszinten igen változatosan, különböző típusú erőművek által történik, hazánkban a nukleáris energiatermelés a legmeghatározóbb. Az atomreaktorok fejlődése az elmúlt közel nyolc évtizedben szinte töretlen volt, és napjainkban is folytatódik. Felhasználásuk messze túlmutat a lakossági energiaellátás biztosításán, de ez az egyik legmeghatározóbb feladatuk. Az első generációs atomerőművek megjelenése óta nagy ívű technológiai és biztonságtechnikai fejlesztések történtek, amelyek meghatározzák napjainkban az üzembiztonságot és a termelésfolytonosságot. A jelenleg is fejlesztés alatt álló negyedik generációs nukleáris erőművek megjelenése további élettartam-növekedést és jelentős biztonsági fejlődést hozhat.

Kulcsszavak: atomerőművek, nukleáris reaktorok, generációváltás, biztonság

Electricity generation is diverse worldwide, in Hungary, nuclear energy production is the most significant. The development of nuclear reactors has been almost unbroken over the past eight decades and continues to this day. Their use goes far beyond securing energy supply, but this is one of their most defining tasks. Since the advent of the first generation of nuclear power plants, a large-scale technological and safety development have taken place, which determine the operational safety of today. The development of fourth generation nuclear power plants could lead to further lifetime growth and significant safety improvements.

Keywords: nuclear power plants, nuclear reactors, generational changes, security

¹ Tűzoltó szerparancsnok, Nemzeti Közszolgálati Egyetem, e-mail: bbjkajak@gmail.com

1. Bevezetés

Modern társadalmunk működése napjainkban elképzelhetetlen a kényelmi szolgáltatásaink, elektronikai eszközeink, közösségi platformjaink használatához nélkülözhetetlen elektromos áram nélkül. Az elektromosenergia-termelés rendkívül változatosan történhet, naperőművek, biogázerőművek, szélerőművek, geotermikus erőművek (megújuló alapú erőművek), szénerőművek, gázturbinás erőművek (földgáz és kőolaj), (fosszilis alapú erőművek), vízerőművek és nukleáris erőművek segítségével. A föld országaiiban termelt villamos energiát 2017-ben a World Nuclear Association (Nukleáris Világszövetség)² adatai alapján mintegy 25 721 TWh³-át a következő megoszlásban állították elő:

- 38,3%-át szénerőművekben;
- 22,9%-át gázturbinás erőművekben;
- 16,3%-át vízerőművekben;
- 10,2%-át atomerőművekben;
- 6,6%-át megújuló energiaforrásokból;
- 3,3%-át kőolajjal;
- 2,3%-át egyéb villamosenergia-termelési módok felhasználásával.

Hazánk villamosenergia-termelése elsődlegesen nukleáris energiára épül, ezt követi a földgáz, a szén és végül a megújuló energiaforrások felhasználása. A Nemzetközi Energiaügynökség (IEA) vizsgálatai alapján az elektromos áram iránti igény az OECD-tagországokban éves szinten 1%-kal, míg a tagsággal nem rendelkező országokban 2,3%-kal, világszinten pedig 2,1%-kal fog nőni éves szinten 2040-ig.⁴

A Magyar Villamosenergia-ipari Átviteli Rendszerirányító Zártkörűen Működő Részvénytársaság (MAVIR) adatai szerint a 2015-ös évben rekord magasságba emelkedett a villamos energia importálása és a paksi atomerőmű által termelt energia aránya a hazai össztermelésben. 2018-ban a bruttó áramfelhasználás 31,59%-a külföldi termelésből, 34,64%-a pedig atomenergiából származott, a paksi erőmű állította elő a hazai elektromosenergia-termelés 50,64%-át.⁵

A növekvő energiaszükséglet kielégítésére, valamint az előregedő fosszilis villamos erőművek kieső termelésének kiváltására hazánk a működő paksi négy darab, egységenként 500 MW kapacitású reaktorblokkon felül két további blokk kivitelezését tervezi, összesen 2400 MW-os⁶ teljesítménnyel. A jelenlegi tervzet szerint 2022-ben kezdődő jelentős energetikai beruházás nemcsak a kivitelezőket, hanem a katasztrófavédelemért felelős szakértőket is színvonalas munkára ösztönzi tűzmegeelőzési és beavatkozási területen is.

² World Nuclear Association: *Nuclear Power in the World Today* (2022. március).

³ Terawattóra.

⁴ International Energy Agency: *World Energy Outlook*. Flagship report (2019. november).

⁵ A teljes bruttó villamosenergia-felhasználás megoszlása 2018: www.mavir.hu/web/mavir/adatpublikacio

⁶ Schunk János – Mittler István (szerk.): *Új atomerőművi blokkok létesítése Pakson*. MVM Paks II. Atomerőmű Fejlesztő Zrt., 2015.

2. A nukleárisenergia-termelés

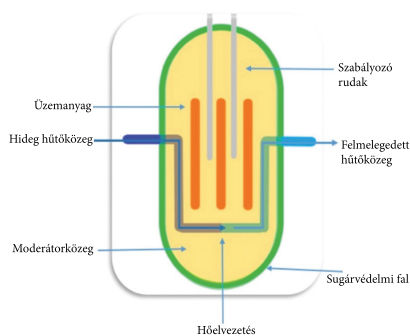
Az atomerőművek bármily bonyolultnak tűnhetnek, felépítésük nagyban hasonlít egy hőerőművéhez, a legnagyobb különbség, hogy az atomerőművek a hőenergiát nem egy meghatározott energiahordozó elégetésével, hanem a nukleáris reaktorban zajló láncreakcióval állítják elő. Az így felszabaduló hőenergiát hűtőközzel továbbítják, majd gőz termelésére használják, a gőz ezt követően a turbina forgólapátjaira jutva meghajtja azokat, ebből a mozgási energiából termel villamos energiát a generátor. A gőz a kondenzátorokba kerül, ahol lecsapódik, újra folyékony halmazállapotúvá alakul. Az így lehűlt vizet előmelegítés után újra visszajuttatják a gőzfejlesztőkbe.

A nukleáris reaktorokat közel 70 éve állították az energiatermelés szolgálatába. Az első kísérleti nukleáris erőmű az USA-ban Arco városa mellett épült 1952-ben. Az első lakossági energiatermelésre használt atomerőművet az oroszországi Obnyinszkban 1954-ben állították üzembe. Az első generációs atomerőművektől hosszú, több évtizedes út vezetett a napjainkban kivitelezés alatt álló 3+ generációs erőművekig, valamint a fejlesztés alatt álló negyedik generációs atomerőművekig.⁷

2.1. Atomreaktorok elvi felépítése

Az *Encyclopedia Britannica* szerint az első atomreaktor 1942-ben alkották meg, ez volt a CP-1 (Chicago Pile No. 1), amelynek igen alacsony kimeneti teljesítménye volt. Az elmúlt 79 év fejlesztéseinek köszönhetően a reaktorok teljesítménye és üzemeltetési biztonsága nagymértékben megnőtt. A termikus atomreaktor fő alkotóelemei Aszódi BME NTI 2020 alapján a következők:⁸

- üzemanyag, vagy más néven hasadóanyag;
- moderátoranyag, vagy moderátorközeg (hűtőközeg);
- reaktivitásszabályozás;
- sugárvédelem (többszintű).



1. ábra: Termikus reaktorok általános felépítése

Forrás: a szerző szerkesztése

⁷ World Nuclear Association: *Outline History of Nuclear Energy* (2020. november).

⁸ World Nuclear Association: *Nuclear Power Reactors* (2021).

A felsorolásban leírt alkotóelemekkel minden üzemelő reaktornak rendelkeznie kell, csak így szavatolható a megfelelően szabályozott és biztonságos működés. Azonban az alkotóelemek kialakítása, elrendezése, elhelyezése már nagy fokú eltérést mutat a különböző reaktortípusoknál, amelyekre a következőkben mutatok példákat.

2.2. Nukleáris reaktorok osztályozása⁹

Az atomreaktorok megfelelő tipizálására – osztályozására nagyon sok különböző szempontrendszer létezik, ezek közül mutatok be a cikk e fejezetében néhányat.

A nukleáris reaktorokat megkülönböztethetjük a felhasználás módja szerint:

- kísérleti reaktorok;
- kutatóreaktorok;
- oktatóreaktorok;
- kritikus rendszerek vagy zéró teljesítményű reaktorok;
- hasadóanyag-termelő reaktorok;
- energiatermelő reaktorok.

A kutatásaim szempontjából kiemelt fontosságúak az energiatermelő reaktorok, ezért ez a típus képezi további elemzéseim tárgyát. Az energiatermelő erőművi reaktorok nagy változatosságot mutatnak, az elmúlt évtizedekben több típusuk is használatba állt.

2.2.1. Energiatermelő erőművi reaktorok

Az olyan atomreaktort, amelyben ipari méretekben használják fel a hasadási energiát elektromos áram előállítására, erőművi reaktornak nevezzük. Megkülönböztethetjük őket a felhasznált moderátoranyag, moderátorközeg alapján.

Folyadékmoderátoros reaktorok:

- Könnyűvízes (*light water*) reaktorok:
 - Könnyűvízes reaktoroknak nevezzük azon energiatermelő reaktorokat, amelyeknél a hűtőközeg és a moderátoranyag egyaránt „normál” (sótalan) víz. A könnyűvízes reaktoroknak két típusát különböztetjük meg a nyomott vizes (PWR) és a forraló vizes (BWR) egységeket.¹⁰
- Nehézvízes reaktor:
 - Nehézvízes reaktoroknak nevezzük azon energiatermelő reaktorokat, amelyeknél a hűtőközeg és a moderátoranyag egyaránt nehézvíz (a hidrogén deutérium nevű izotópját tartalmazó víz). A nehézvízes reaktoroknak három típusát különböztetjük meg, a nyomott nehézvízes reaktorokat (PHWR), a CANDU (kanadai deutérium-uránium nyomott nehézvízes reaktorokat) és a CANDU-B könnyűvíz-hűtésű nehézvízes reaktorokat.¹¹

⁹ World Nuclear Association: *Nuclear Power Reactors* (2021).

¹⁰ Pór Gábor: *Atomenergetikai alapismeretek. Atomerőművek generációi*. Budapest, Edutus Főiskola, 2012.

¹¹ Pór (2012): i. m.

2.2.2. Szilárd moderátoros reaktorok

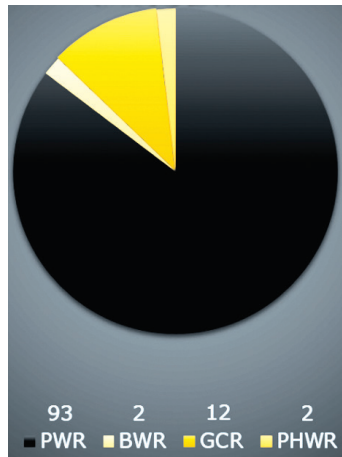
Grafitmoderátoros reaktoroknak nevezzük azon energiatermelő reaktorokat, amelyeknél a moderátoranyag grafit. E típuson belül a hűtőközeg lehet gáz vagy könnyűvíz.¹²

Moderátor nélküli reaktoroknak nevezzük azon reaktorokat, amelyekben nem található moderátoranyag vagy közeg, így az aktív zónában a neutronok nem lassulnak le.¹³

Az alábbiakban bővebben kitérek az egyes reaktortípusok sajátosságaira, működési módjaik bemutatására.

2.2.3. Folyadékmoderátoros reaktorok

A könnyűvízes reaktorok két típusát különböztetjük meg, a nyomott vizes (PWR) és a forraló vizes (BWR) egységeket. A világon 2020. december 31-én 441 működőképes reaktorból 365 könnyűvízes volt, ezen belül 303 PWR- és 2 BWR-egység. Európai uniós viszonylatban 93 db PWR-, 2 db BWR-reaktorblokk üzemel jelenleg.¹⁴ A két reaktortípus között az alapvető különbség a primer és szekunder kör, valamint a hermetikus tér, vagy konténment kialakításában van.



2. ábra: Nukleárisreaktor-típusok az EU-ban

Forrás: a szerző szerkesztése World Nuclear Association: Nuclear Power Reactors (2021) alapján

A nyomottvizes (PWR) nukleáris reaktor moderátora és hűtőközege egyaránt könnyűvíz, üzemanyaga alacsony dúsítású urán. Fő jellemzője a vastag falú (10–20 cm

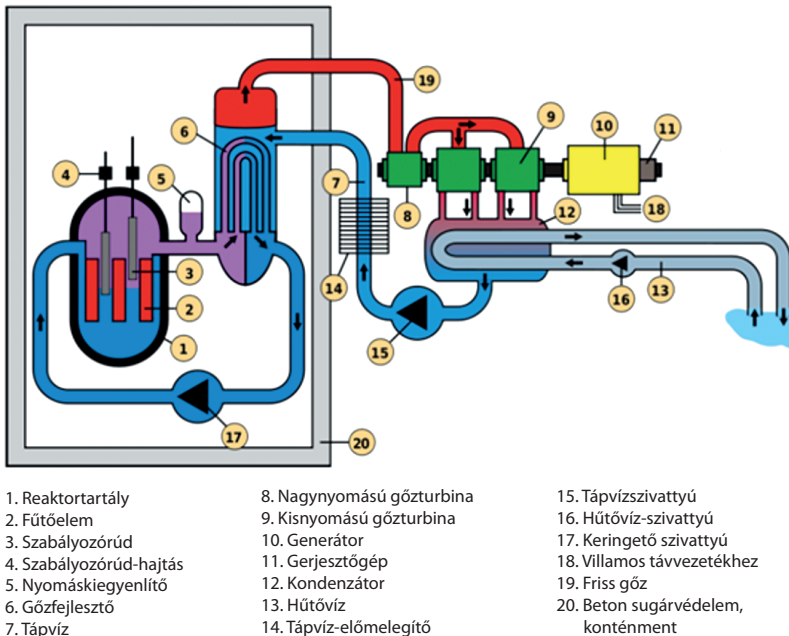
¹² Pór (2012): i. m.

¹³ Pór (2012): i. m.

¹⁴ International Atomic Energy Agency: Nuclear Power Reactors in the World 2020. Vienna, IAEA, (2020).

falvastagságú) reaktortartály és a kétkörös kialakítás. Teljesen elválik egymástól a primer és a szekunder kör.

A reaktor aktív zónájában felszabaduló hőenergiát nagy méretű hőcserélőkön adja tovább a szekunder körnek, ahol a turbinák működtetéséhez használatos gőzt állítják elő. A primer és szekunder vízkör teljes elkülönítése létfontosságú, mivel egymástól fizikailag elhatárolt, eltérő nyomású hűtővízkörökről beszélünk. A hermetikus tér csak meghatározott fővízköri nagy berendezéseket foglal magában. A primerköri vizet itt megfelelően magas nyomáson tartják, hogy az 300 °C hőmérsékleten se tudjon felforni. A gőzfejlesztőkön áthaladó primerköri víz visszahűl, és így áramlik vissza a reaktorba.¹⁵



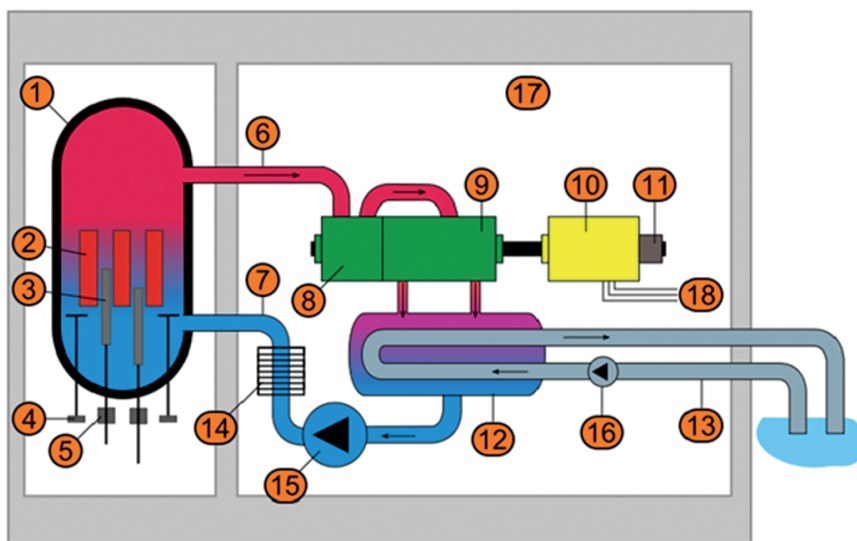
3. ábra: PWR nyomottvízes reaktor átnézeti ábra

Forrás: <https://pt.slideshare.net/jozsefkiraly5074/atomreaktorok/6>

A forralóvízes (BWR) nukleáris reaktorok egykörös kialakításúak, a reaktor aktív zónáján áthaladó víz nagy mennyiségű hőenergiát vesz fel. Az aktív zónában lévő víz egy része felforr, a keletkezett gőzt leválasztva telített gőzt juttatnak a turbinákra. Ez esetben a turbinákat is a hermetikus térben helyezik el, hiszen rajtuk keresztül enyhén radioaktív közeg áramlik.¹⁶

¹⁵ Radnóti Katalin – Király Márton: Az atomenergiáról egyszerűen: az atomerőművek működése, típusaik és jövőjük. *Nukleon*, 8. (2015), 177. 1–13.

¹⁶ Radnóti–Király (2015): i. m. 177. 1–13.



- | | | |
|-------------------------|---------------------------|----------------------------|
| 1. Reaktortartály | 7. Tápvíz | 13. Hűtővíz |
| 2. Fűtőelem | 8. Nagynyomású gőzturbina | 14. Tápvíz-előmelegítő |
| 3. Szabályozórúd | 9. Kisnyomású gőzturbina | 15. Tápvízszivattyú |
| 4. Szabályozórúd-hajtás | 10. Generátor | 16. Hűtővízszivattyú |
| 5. Nyomáskiegyenlítő | 11. Gerjesztőgép | 17. Keringető szivattyú |
| 6. Gőzfejlesztő | 12. Kondenzátor | 18. Villamos távvezetékhez |

4. ábra: BWR forralóvízes reaktor átnézeti ábra

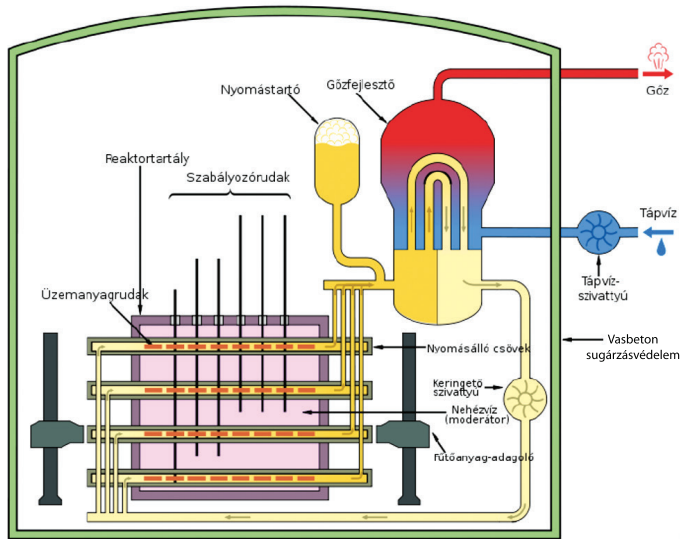
Forrás: Antal Zoltán – Kátai-Urbán Lajos – Vass Gyula: Atomerőmű generációk fejlődésének vonzatai. *Hadmérnök*, 13. (2018), 3. 150–163.

2.2.4. Nehésvizes – nyomottvízes

Nehésvizes (D₂O) reaktor – CANDU (*Canada Deuterium Uranium*)

A reaktortartályon több száz cső halad keresztül, ezekben a csövekben helyezték el az üzemanyagrudakat, amelyek így szeparáltan is elérhetők, nagymértékben megkönnyítve a szelektív friss üzemanyagcserét és az átrakást, mivel az üzemanyagot könnyen át lehet helyezni az elhasználódás mértékétől függően. Mivel a moderátorközeg a keresztirányú csövekben van nagy nyomás alatt, ezért a reaktortartály nincs kitéve több száz báros nyomásnak. Az alacsony nyomásértékek és hőmérséklet miatt sokkal egyszerűbben és differenciáltabban lehet szenzorokkal nyomon követni a reaktorban zajló folyamatokat. Természetes uránnal is működik, ami nagymértékű üzemanyagkiadás-csökkenést eredményez, de a nagy mennyiségű nehésvíz-felhasználás itt is jelentős anyagi ráfordítást igényel.¹⁷

¹⁷ Radnóti-Király (2015): i. m. 177. 1–13.



5. ábra: CANDU reaktor átnézeti ábra

Forrás: Antal – Kátai-Urbán – Vass (2018): i. m. 154.

2.2.5. Szilárd moderátorú reaktorok

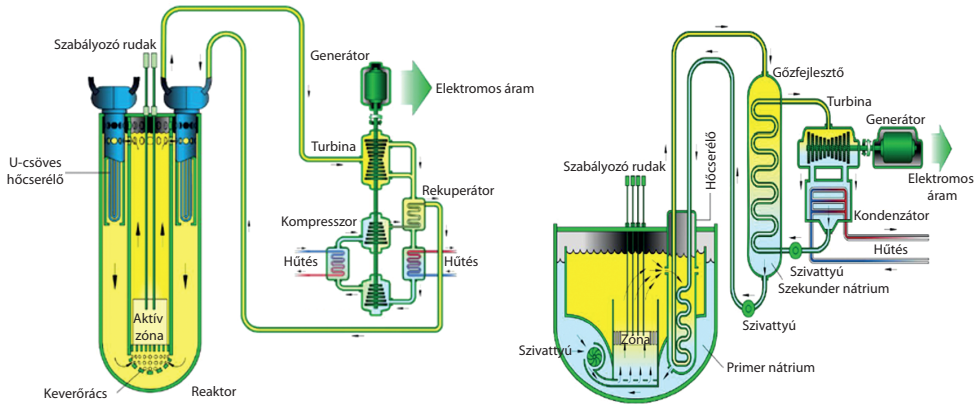
A szilárd moderátoros erőművek esetében a hűtőközeg lehet gáz (szén-dioxid, hélium), vagy lehet könnyűvíz. E reaktortípus (forralócsöves) nagy előnye, hogy természetes uránnal is üzemeltethető, de a gazdasági szempontok miatt általában enyhén dúsított uránt használnak üzemanyagként. Nagy hátránya a könnyűvíz moderátorú reaktorokkal szemben, hogy túlhevülés esetén a neutronelnyelő hűtővíz elforrhat, ami a grafitmoderátor használata miatt a láncreakció és a hőtermelés fennmaradását eredményezi. Ezek a folyamatok a reaktor megszaladásához vezethetnek, mint az 1986-os csernobili atomerőművi baleset esetében is.¹⁸

2.2.6. Gyorsreaktorok

Moderátor nélküli reaktorok esetében, mivel nem található moderátoranyag vagy -közeg, az aktív zónában a neutronok nem lassulnak le. Magas dúsítású plutóniummal vagy uránnal működnek; a fűtőanyag származhat már kiegészített nukleáris üzemanyagokból vagy leszerelt atomtöltetektől is. A gyorsreaktorok többféle feladat ellátására alkalmasak, a villamos energia termelésén túl újabb hasadóanyagok előállítására is felhasználhatók. Ez alapján kijelenthető, hogy a gyorsreaktorok egyben tenyésztőreaktorok is. A reaktorok rendkívül intenzív hűtését úgy szükséges megoldani, hogy a hűtőközeg ne lassítsa le a neutronokat. A megfelelő hűtés elérésére folyékony fémeket alkalmaznak, nátriumot vagy ólmot.¹⁹

¹⁸ Antal – Kátai-Urbán – Vass (2018): i. m. 150–163.

¹⁹ Antal – Kátai-Urbán – Vass (2018): i. m. 150–163.

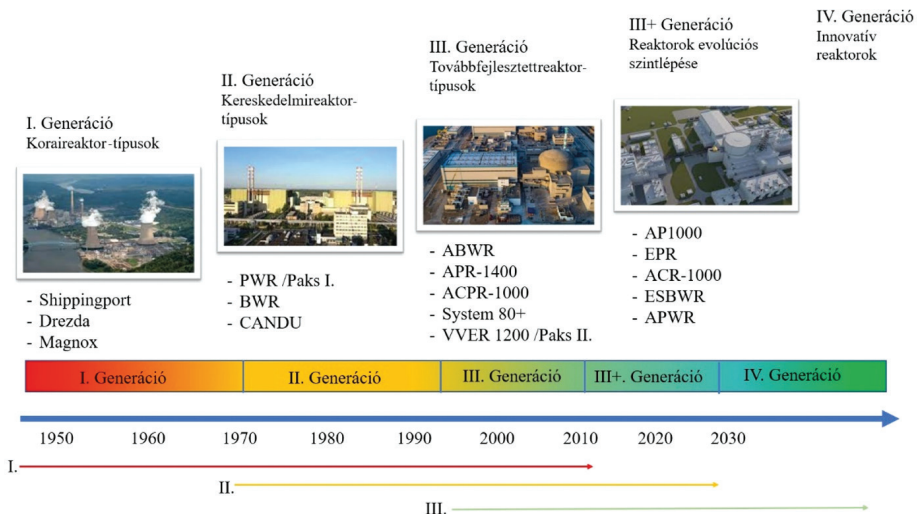


6. ábra: Gyorsreaktor átnézeti ábra

Forrás: Antal – Kátai-Urbán – Vass (2018): i. m. 155–156.

3. Atomerőművi generációk

A II. világháborút követő minden olyan nukleáris erőművi fejlesztést, amely az atomenergia békés felhasználását célozta, első generációsnak tekinthetünk. A fejlesztésben érdekelt szaktekintélyek, a nukleáris energia felhasználásának úttörői az ötvenes évek előtt is az atomenergia-termelés felépítését kívánták elérni, de a második nagy háború és az atomhasadás által létrehozott hatalmas energia hadászati célú felhasználása egy évtizeddel eltolta a nukleáris energia lakossági energiatermelési célú alkalmazásának lehetőségét.



7. ábra: Atomerőművi generációk

Forrás: a szerző szerkesztése Stephen M. Goldberg – Robert Rosner: Nuclear Reactors: Generation to Generation. Cambridge, MA, American Academy of Arts and Sciences, 2011. alapján

3.1. Első generációs atomerőművek

A világháborút követően az Amerikai Egyesült Államokban 1951-ben üzembe állították a világon az első, nátrium-kálium hűtésű kísérleti szaporító gyorsreaktort. Ez a reaktor energiatermelésre csak korlátozott mértékben volt alkalmas, villamos teljesítménye csupán a reaktorcsarnok megvilágítását tette lehetővé. Ekkor még a villamos teljesítménynél jóval fontosabb volt a reaktor működése során létrehozott Plutónium 239, amely az atombomba robbanótöltetének fontos eleme.²⁰

Az első villamos hálózatra kapcsolt atomerőművet 1954-ben állították üzembe az oroszországi Obnyinszkban, amely grafitmoderátoros, vízhűtésű, egy reaktorblokkos erőmű volt.

Nagy-Britannia az első hivatalosan is kereskedelmi célú atomerőművét 1953-ban állította üzembe Windscale-ben. Az erőművet II. Erzsébet királynő nyitotta meg, azonban négy évvel az üzemkezdetet követően az erőműben súlyos tüzeset történt. 1957-ben állították üzembe a Magnox atomerőművet, amely plutónium termelésére alkalmas széndioxid-hűtésű, grafitmoderátoros erőmű volt.²¹

Az Amerikai Egyesült Államokban ugyancsak 1957-ben állították üzembe a Shippingport könnyűvízes atomerőművet, amely hadászati célokra plutóniumot termelt, viszont már 60 MW villamos teljesítményre is képes volt.²²

3.2. Második generációs atomerőművek

A napjainkban működő nukleáris reaktorok többsége második generációs atomerőművekben üzemel. A Nukleáris Világszövetség (*World Nuclear Association*) adatai szerint 2021-ben 234 db az 1970-es évektől 1990-ig épült úgynevezett második generációs atomerőművi blokk üzemel. E reaktorok átlag kora jelentősen meghaladja a 30 évet, lassan tervezett élettartamuk végéhez közelítenek, sok közülük üzemidő-hosszabbításban részesült, vagy üzemidő-növelés előtt áll.

A második generációs erőművek tervezésekor nagy mennyiségű tapasztalat állt rendelkezésre. Ne felejtjük el, hogy az első generációs erőművek az 1950-es évek legelején álltak működésbe. Érdekességgként megjegyezném, hogy az utolsó első generációs atomerőmű 2015-ben fejezte be működését. A prototípusok kezdetleges hibáiból, konstrukciós gyengeségeikből, üzemeltetési nehézségeikből nyert információk segítségével, biztonságnövelő átalakítások alkalmazásával építették meg a második generációba sorolt atomerőműveket. Véleményem szerint az egyik legmeghatározóbb újítása a nyomásálló rendszerek alkalmazása volt, amely súlyos baleset esetén képes megakadályozni a radioaktív anyagok szabadba jutását. Ez az úgynevezett hermetikus tér, vagy konténment alkalmazása. A hazánkban üzemelő paksi atomerőmű mind a négy blokkja második generációs, fontos megjegyezni, hogy a 2000-es évektől

²⁰ Goldberg–Rosner (2011): i. m.

²¹ Goldberg–Rosner (2011): i. m.

²² Goldberg–Rosner (2011): i. m.

kezdve sorozatos teljesítmény- és biztonságnövelő fejlesztésen estek át, ahogy azt a védelmi rendszerek és a technológia fejlődése lehetővé tette.²³

3.3. Harmadik generációs atomerőművek

A napjainkban épülő atomerőműveket a szakirodalom a harmadik vagy a 3+ generációba sorolja: ezek az úgynevezett evolúciós erőművek, lásd az 1. táblázatban. A fejlesztés kezdete az 1990-es évekre tehető, az amerikai, japán és nyugat-európai könnyűvízes reaktorflotta üzemeltetői tapasztalataira alapozva. A második generációs erőművekhez képest kibővített és továbbfejlesztett biztonsági-technológiai megoldásokkal, valamint a gazdasági tényezők optimalizálásával fejlesztették tovább az erőműveket. A működtetésben a megnövelt hatásfok, a magasabb üzemanyag-hasznosítás és bizonyos fejlett dúsítási eljárásokkal együtt valósították meg a jelenleginél jóval hosszabb, akár 60 éves üzemidőt.²⁴ Az aktív és passzív biztonsági rendszerek jelentős fejlődésen mentek keresztül, köszönhetően az általános technológia és informatikai fejlődésének, valamint a sajnálatos módon bekövetkezett nukleáris balesetekből levont mértékadó következtetéseknek.²⁵ Ezekre példák azok a passzív biztonsági funkciók, amelyek nem igényelnek külső energiát, aktív vezérlést vagy kezelői beavatkozást, hanem a gravitációra vagy a természetes hővezetésre támaszkodva csökkentik az üzemzavarok és balesetek következményeit.²⁶

1. táblázat: Harmadik generációs reaktortípusok

Forrás: Wood (2007): i. m.

| EPR (European Pressurized Reactor) | AES 2006 (VVER 1200) | AP-1000 Westinghouse |
|--|--|--|
| Az EPR nyomottvízes hatásfoknövelt reaktor, amelynek a hermetikus tere acélerősítéses – duplafalú kialakítású betonból készül. Zónaolvasadás esetére a reaktor alatt olvadékfogó rendszert alakítottak ki. A hűtést négy egymástól teljesen független rendszer alkotja, amelyek a reaktor üzemképtelensége esetén is működőképesek maradnak 1-3 évig. Az elérhető legkorszerűbb jelző- és mérőműszereket építették be. | Az AES 2006 továbbfejlesztett vízhűtéses, víz-moderátoros nyomottvízes reaktor. A meglévő Paks I atomerőmű mellé a Paks II beruházás keretében VVER 1200-as blokkokat építenek be. | Az AP-1000 továbbfejlesztett amerikai nyomottvízes reaktortípus. A fejlesztések sora balesetek bekövetkeztekor is lehetővé teszi, emberi beavatkozás nélkül is, hogy a reaktor hűtése 72 órán keresztül fennmaradjon, és megakadályozza az aktivitás környezetbe kerülését. Érdekessége, hogy a pihentető medence a VVER új típusához hasonlóan a hermetikus téren belülré került. |

²³ Goldberg–Rosner (2011): i. m.

²⁴ Janet Wood: *Nuclear Power*. London, Institution of Engineering and Technology UK, 2007.

²⁵ Dobor József – Kossa György – Pátzay György: Atomerőművi balesetek és üzemzavarok tanulságai 1. *Hadmérnök*, 12. (2017a), 1. 58–71.

²⁶ Dobor József – Kossa György – Pátzay György: Atomerőművi balesetek és üzemzavarok tanulságai 2. *Hadmérnök*, 12. (2017b), 4. 84–98.

3.4. Negyedik generációs atomerőművek

A negyedik generációba tartozó atomerőműveket innovációs erőműveknek nevezi a szakirodalom, mert olyan megoldásokat, fejlesztéseket vetítenek előre, amelyek teljesen új perspektívába helyezik az atomerőművek üzemeltetését. A negyedik generációs erőművi besorolás előfeltétele, hogy megfeleljenek mindazon szigorú biztonsági és üzemeltetési követelményeknek, mint a nukleáris hulladék minimalizálása és újrafelhasználása, az üzemanyagcellák érzékenységének jelentős csökkentése, valamint a proliferációállóság a katonai célra való felhasználhatatlanság (az atomfegyverek gyártásához szükséges minőségű hasadóanyag keletkezésének kizárása).²⁷ A negyedik generációs atomerőművek lehetséges típusai a 2. táblázatban szerepelnek.

2. táblázat: Negyedik generációs atomerőművek fejlesztése megvalósulásának esetei

Forrás: Keresztúri András – Pataki István – Tóta Ádám: Negyedik generációs reaktorok. *Fizikai Szemle*, 64. (2014), 4. 112–119.

| Termikus reaktorok | Gyorsreaktorok |
|--|--|
| Nagyon magas hőmérsékletű reaktor (VHTR – <i>Very High Temperature Reactor</i>) | Gázhűtéses gyorsreaktor (GFR – <i>Gas-cooled Fast Reactor</i>) |
| Szuperkritikus vízhűtéses reaktor (SCWR – <i>Supercritical Watercooled Reactor</i>) | Nátriumhűtéses gyorsreaktor (SFR – <i>Sodium-cooled Fast Reactor</i>) |
| Olvadéksó-reaktor (MSR – <i>Molten Salt Reactor</i>) | Ólomhűtéses gyorsreaktor (LFR – <i>Lead-cooled Fast Reactor</i>) |

4. Összegzés

A II. világháborút követően az atomenergia békés célú felhasználása ugrásszerű fejlődést hozott a lakosság villamosenergia-ellátásában. Az első kísérleti atomreaktorok megjelenésétől számítva alig egy évtizeddel később, az ötvenes években energiatermelési célú nukleáris reaktorokat fejlesztettek ki az USA-ban és a Szovjetunióban, ezek voltak az első generációs erőművek vagy kísérleti atomerőművek. A fejlődés iránya egyértelműen a hatékony és egyre biztonságosabb működés irányába mutatott, amihez más technológiákhoz hasonlóan túl kellett lépni a kezdeti konstrukciós és üzemeltetési, valamint biztonsági nehézségeken. A második generációs erőművek már egyértelműen magasabb fokú biztonságot és egyszerűbb üzemeltetést képviselnek. A napjainkban működő nukleáris reaktorok többsége még a második generációs atomerőművekben üzemel, a Nukleáris Világszövetség adatai szerint összesen 234. A szerteágazó nemzetközi fejlesztő és kutatómunkának köszönhetően rengeteg reaktortípus üzemel a 21. században, amelyeket igyekeztem munkám előző fejezeteiben bemutatni. A fejlesztések során nagyszámú, lényegi kialakításukban is eltérő reaktortípust hoztak létre, amelyek csupán alapfelépítésükben egyeznek, azaz tartalmazzák

²⁷ Keresztúri András – Pataki István – Tóta Ádám: Negyedik generációs reaktorok. *Fizikai Szemle*, 64. (2014), 4. 112–119.

az 1. ábrán felsorolt alkotóelemeket. E kialakításbeli különbségek nagymértékben meghatározzák az üzemeltetési és a súlyosbaleset-kezelési feladatok tervezési és végrehajtási sajátosságait. A világon 2020. december 31-én 441 működőképes reaktorból 365 könnyűvízes volt, ezen belül 303 PWR- és 2 BWR-egység. A kétezres éveket követően épült erőműveket a harmadik vagy a 3+ generációba sorolja a nemzetközi szakirodalom, ezek az úgynevezett evolúciós erőművek. A működésüket a megnövelt hatások, a magasabb üzemanyag-hasznosítás és a jelenleginél jóval hosszabb, akár 60 éves üzemidő jellemzi. Aktív és passzív biztonsági rendszereik jelentős fejlődésen mentek keresztül, köszönhetően a technológia és informatika fejlődésének, valamint a sajnálatos módon bekövetkezett nukleáris balesetektől levont mértékadó következtetéseknek. A negyedik generációs atomerőműveket innovációs erőműveknek nevezzük, mert olyan megoldásokat, fejlesztéseket vetítenek előre, amelyek teljesen új perspektívába helyezik az atomerőművek üzemeltetését.

Felhasznált irodalom

- Antal Zoltán – Kátai-Urbán Lajos – Vass Gyula: Atomerőmű generációk fejlődésének vonzatai. *Hadmérnök*, 13. (2018), 3. 150–163. Online: www.hadmernok.hu/183_11_antal.pdf
- Dobor József – Kossa György – Pátzay György: Atomerőművi balesetek és üzemzavarok tanulságai 1. *Hadmérnök*, 12. (2017a), 1. 58–71. Online: www.hadmernok.hu/171_06_dobor.pdf
- Dobor József – Kossa György – Pátzay György: Atomerőművi balesetek és üzemzavarok tanulságai 2. *Hadmérnök*, 12. (2017b), 4. 84–98. Online: www.hadmernok.hu/174_09_dobor.pdf
- Goldberg, Stephen M. – Robert Rosner: *Nuclear Reactors: Generation to Generation*. Cambridge, MA, American Academy of Arts and Sciences, 2011. Online: www.amacad.org/sites/default/files/academy/pdfs/nuclearReactors.pdf
- International Atomic Energy Agency: *Nuclear Power Reactors in the World 2020*. Vienna, IAEA, 2020. Online: www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/RDS-2-40_web.pdf
- International Energy Agency: *World Energy Outlook*. Flagship report (2019. november). Online: www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2019
- Keresztúri András – Pataki István – Tóta Ádám: Negyedik generációs reaktorok. *Fizikai Szemle*, 64. (2014), 4. 112–119. Online: http://fizikaiszemle.hu/archivum/fsz1404/Kereszturi_A_Pataki_I_Tota_A.pdf
- Országos Atomenergia Hivatal: *Nem tervezett leállás történt a finnországi Olkiluoto 2 erőműben* (2020. december 10.). Online: www.haea.gov.hu/web/v3/OAHportal.nsf/web?OpenAgent&article=news&uid=ACA98846A26A97B-1C125863A0063B568
- Pór Gábor: *Atomenergetikai alapismeretek – Atomerőművek generációi*. Budapest, Edutus Főiskola, 2012.

- Radnóti Katalin – Király Márton: Az atomenergiáról egyszerűen: az atomerőművek működése, típusaik és jövőjük. *Nukleon*, 8. (2015), 177. 1–13. Online: https://nuklearis.hu/sites/default/files/nukleon/8_1_177_Radnoti_0.pdf
- Schuk János – Mittler István (szerk.): *Új atomerőművi blokkok létesítése Pakson*. MVM Paks II. Atomerőmű Fejlesztő Zrt., 2015. Online: <https://bit.ly/3Padc1X>
- Wood, Janet: *Nuclear Power*. London, The Institution of Engineering and Technology UK, 2007.
- World Nuclear Association: *Outline History of Nuclear Energy* (2020. november). Online: www.world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/outline-history-of-nuclear-energy.aspx
- World Nuclear Association: *Nuclear Power Reactors 2021*. Online: <http://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/nuclear-power-reactors.aspx>
- World Nuclear Association: *Nuclear Power in the World Today* (2021. március). Online: www.world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/nuclear-power-in-the-world-today.aspx