

Az Atomenergia Szerkezete és Jövője: Az Atomerőműtől az Adatközpontok Szimbiózisáig

Tudományos-ismeretterjesztő tanulmány

Tájékoztatás és gondolatébresztés céljára



Dr. Regényi Tamás

2026.07.24

Tartalomjegyzék

I. Fejezet: Bevezetés és alapfogalmak – Oxidáció, korrózió és az ultra-tiszta víz kémiaja.....	3
II. Fejezet: A nukleáris láncreakció fizikája – Moderator vs. Elnyelő anyagok, fűtőelemek és szabályozórudak.	6
III. Fejezet: A nyomottvizes reaktorok architektúrája – Miért van szükség több, egymástól elzárt belső körre?	10
IV. Fejezet: A Primer kör termohidraulikája – Extrém nyomás, hőtágulás és a térfogatkompenzáció mechanizmusa.	12
V. Fejezet: Sugárzás a gépezetben – A neutronaktiváció fizikája, a Nitrogén-16 izotóp és a víz radioaktivitása.	15
VI. Fejezet: A Szekunder kör és a termodinamikai hatások – Miért kötelező a zárt rendszer és a nagynyomású gőz?.....	18
VII. Fejezet: A Turbina-Generátor gépegység gépészete – Hangsebesség feletti lapátok, siklócsapágyak és hidrogénhűtés.....	21
VIII. Fejezet: A Tercier kör és a környezeti korlátok – A Duna mint hűtőközeg, nyári aszályok és a klímaváltozás hatásai.	28
IX. Fejezet: Generációk találkozása: Paks I. és Paks II. Összehasonlítása – VVER-440 vs. VVER-1200, passzív biztonság és olvadékcsapda.	31
X. Fejezet: A jövő szimbiózisa: Atomerőművek és Adatközpontok kooperációja – Hűtési rendszerek integrációja, energiahatékonyság és az ideális lokáció	34
Összegzés és konklúzió.....	38
Irodalomjegyzék	39

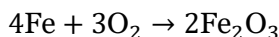
I. Fejezet: Bevezetés és alapfogalmak – Oxidáció, korrózió és az ultra-tiszta víz kémiája

Az atomenergetika nem csupán magfizika; az erőművek biztonságos és hatékony üzemeltetése mögött kiterjedt anyagtudományi és vegyészeti apparátus áll. Mielőtt belépünk a reaktorcsarnokba, meg kell értenünk a fémek és a víz alapvető interakcióit, amelyek meghatározzák a szerkezeti elemek élettartamát.

1.1. Oxidáció víz nélkül: A száraz gázkorrozio

A közhiedelemmel ellentétben a fémek oxidációjához nem feltétlenül szükséges folyékony víz jelenléte. Kémiai értelemben az oxidáció egy tágabb fogalom: elektronleadással járó folyamat, amely során a fém (redukálószer) elektronokat ad át az oxigénnek (oxidálószer).

Ha egy tiszta vasfelület (Fe) teljesen száraz, oxigéndús környezettel érintkezik, szobahőmérsékleten egy spontán, de öngátló folyamat indul be. A vas felületén egy mikroszkopikus vastagságú, kompakt vas-oxid (Fe_2O_3 vagy FeO) réteg keletkezik:



Ez a száraz oxidréteg rácsszerkezetét tekintve rendkívül stabil és tömör. Szigetelőként működik: elzárja a mélyebben fekvő vasatomokat a környező oxigénmolekuláktól. Szobahőmérsékleten ez a folyamat nanométeres vastagságnál megáll, így a fém szerkezeti integritása nem sérül.

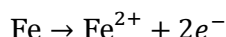
Magas hőmérsékleten (például fémek kovácsolásakor vagy az erőművi gőzvezetékek külső felületén) a diffúzió felgyorsul. Az oxigén képes áthatolni ezen a vékony rétegen, így vastag, rideg, szürkésfekete oxidréteg, úgynevezett reve keletkezik, amely mechanikai hatásra könnyen leválik.

1.2. A rozsdásodás, mint elektrokémiai folyamat

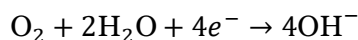
A klasszikus vörös rozsdá kialakulásához a száraz oxigén önmagában kevés; ehhez egy elektrolit (folyékony víz) jelenléte elengedhetetlen. A rozsdásodás nem egy egyszerű kémiai egyesülés, hanem egy összetett galvánfolyamat (elektrokémiai korrózió).

Amikor a fém felületén akár csak egy mikroszkopikus méretű vízcsepp is lecsapódik, a fém felületén lokális anódos és katódos területek (helyi galvánelemek) alakulnak ki a fém mikroszerkezeti egyenetlenségei miatt.

- **Anódos reakció (fémoldódás):** A vasatomok elektronokat veszítenek és ionként belépnek a vizes fázisba:



- **Katódos reakció (oxigénredukció):** A leadott elektronok a fémen keresztül oda vándorolnak, ahol a vízcsepp érintkezik a levegő oxigénjével:



A vízben a Fe^{2+} és az OH^{-} ionok találkoznak, és vas(II)-hidroxidot képeznek, amely a jelen lévő oxigén hatására tovább oxidálódik hidratált vas(III)-oxiddá, vagyis **rozsdává** ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$).

A rozsdá szerkezete – a száraz oxidréteggel ellentétben – porózus, laza és hidrogénkötésekkel teli. Nem tapad meg a fém felületén, hanem leválik, utat engedve az újabb és újabb rétegek pusztulásának. Ha a környezet relatív páratartalma 0%, ez a folyamat fizikai képtelenség.

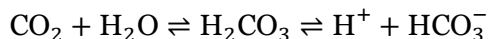
1.3. Az ionmentesített víz „ionéhsége” és agresszivitása

Az atomerőművekben alkalmazott ionmentesített (demineralizált) víz olyan folyadék, amelyből ioncserélő gyanták segítségével szinte az összes oldott só, kalciumot, magnéziumot, nátriumot és kloridot eltávolították. Bár azt gondolhatnánk, hogy ez a tiszta folyadék a legkevésbé bántja a fémeket, a valóságban **kémiailag rendkívül agresszív oldószerré válik**.

A természetben minden rendszer a kémiai egyensúlyra (maximális entrópiára) törekszik. Az ionmentesített víz elektromos vezetőképessége szinte nulla ($< 0,1 \mu\text{S}/\text{cm}$), ami elméletileg gátolná az elektrokémiai korróziót. Csakhogy ez a víz „ionéhes”. Mivel nincsenek benne oldott ásványi

anyagok, a környezetében lévő fémekből (például szénacél vagy réz csővezetékekből) megpróbálja kioldani az ionokat, hogy telítési egyensúlyt érjen el.

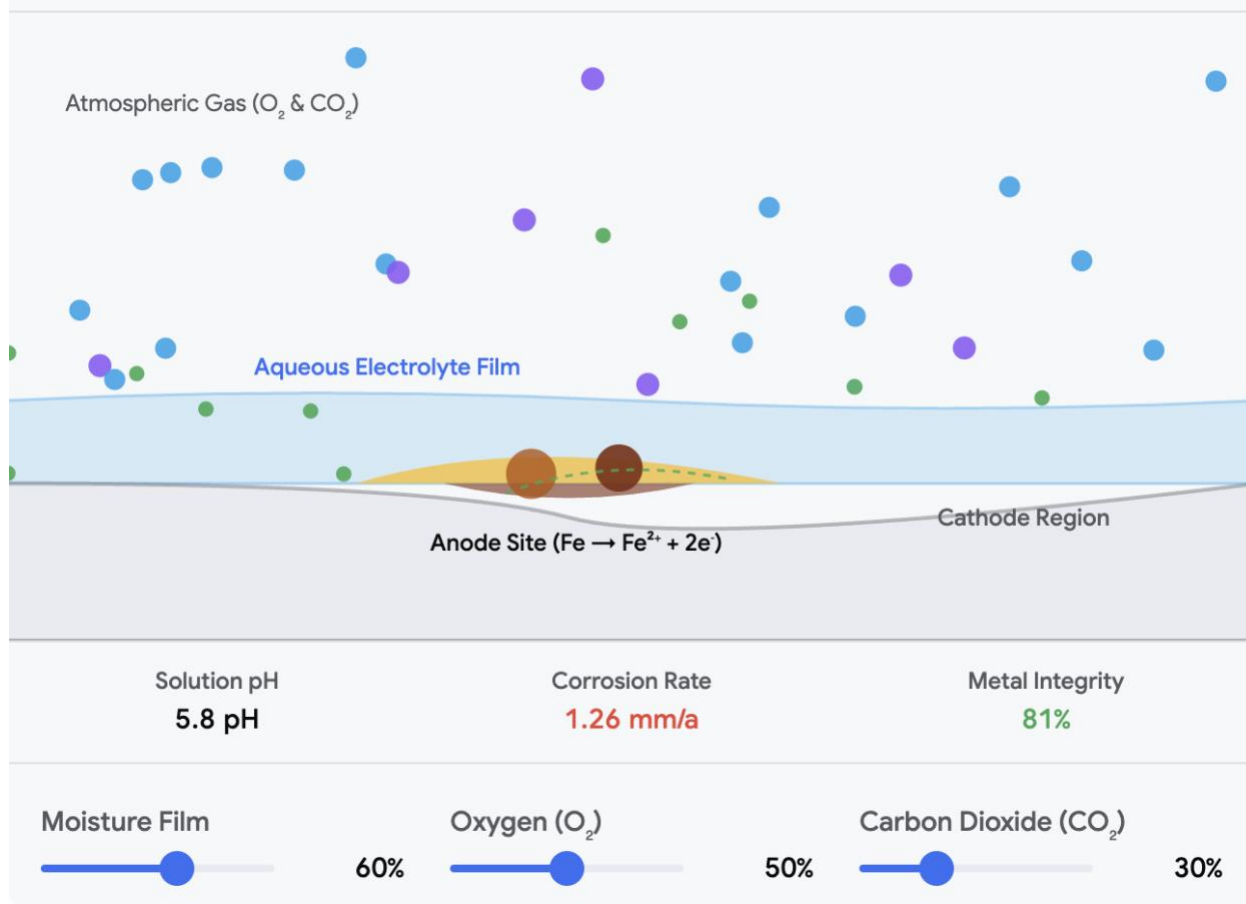
Ezt a hatást drasztikusan fokozza a **szén-dioxid (CO₂) elsavasító hatása**. Ha az ionmentesített víz minimálisan is érintkezik a levegővel, a szén-dioxid azonnal beleoldódik, mivel nincs benne semmilyen pufferelő só (például kalcium-karbonát), ami ezt megakadályozná. A folyamat során szénsav keletkezik:



A szabad H⁺ ionok megjelenése miatt a víz pH-értéke a semleges 7-es értékről villámgyorsan leesik **5,5–5,0 körüli savas tartományba**. Ez a savas környezet pedig drasztikusan felgyorsítja a fémek lyukkorrózióját (pitting korrózió), amely nem egyenletes rozsdaréteget képez, hanem tűhegynyi, mély krátereket mar a fémbe, ami hirtelen csőrepedésekhez vezet.

Víz típusa	Elektromos vezetőképesség	pH-stabilitás levegőn	Védőréteg-képzés (Passziváció)	Korróziós karakterisztika (nyitott rendszerben)
Csapvíz	Magas (300–800 µS/cm)	Stabil (pH 7,2–7,8)	Igen (Kalcium-karbonát / Vízkő réteg)	Egyenletes felületi korrózió, lassú diffúzió.
Ionmentesített víz	Extrém alacsony (<0,1 µS/cm)	Instabil (Savasodik, pH 5,0–5,5)	Nincs (Mindent felold és tisztán tart)	Agresszív, pontszerű lyukkorrózió (pitting).

Ezért az atomerőművek primer és szekunder köreiből az ionmentesített víz kémiaiáját szigorúan szabályozzák (például bórsavval, lúgosító hidrazinnal vagy ammóniával), és a rendszereket hermetikusan elzárják a légköri szén-dioxidtól és oxigéntől.



II. Fejezet: A nukleáris láncreakció fizikája

A fémek és a víz kémiai interakcióinak tisztázása után lépünk be a reaktormag belső világába. Az atomerőműben zajló folyamatok alapja a szabályozott nukleáris láncreakció. Ebben a fejezetben áttekintjük a maghasadás mechanizmusát, valamint a moderátorok és a szabályozórudak alapvető fizikai szerepét.

2.1. A maghasadás és a neutronok generációi

Az atomreaktorban az energiatermelést a nehéz atommagok – elsősorban az urán-235 (^{235}U) izotóp – hasadása biztosítja. Amikor egy szabad neutron ütközik egy ^{235}U maggal, a mag elnyeli

azt, instabillá válik ($^{236}\text{U}^*$), majd a másodperc törtrésze alatt két kisebb atommagra (hasadási termékekre, pl. kriptonra és báriumra) szakad szét.

A hasadás során három kulcsfontosságú dolog történik:

- **Energia szabadul fel:** A keletkező termékek tömege kissé kisebb, mint a kiindulási anyagoké. Ez a tömeghiány (Δm) alakul át energiává Einstein híres képlete ($E = \Delta m \cdot c^2$) alapján. Ez az energia döntően a hasadási termékek mozgási energiájaként (hőként) jelenik meg.
- **Új neutronok keletkeznek:** Minden egyes hasadás során átlagosan 2–3 új szabad neutron repül ki.
- **A láncreakció lehetősége:** Ha ezek az új neutronok további uránmagokat tudnak hasítani, a folyamat önfenntartóvá válik.

A láncreakció állapotát a **multiplikációs tényező** (k) határozza meg, amely a keletkező neutronok számának és az előző generációban elnyelődött/elvesztett neutronok számának az aránya:

- $k < 1$ **(Alkritikus állapot):** A reakció elhal, a reaktor leáll.
- $k = 1$ **(Kritikus állapot):** Stabil, stacionárius láncreakció. A teljesítmény állandó. Ez az atomerőművek normál üzemi állapota.
- $k > 1$ **(Szuperkritikus állapot):** A neutronok száma és a teljesítmény exponenciálisan növekszik.

2.2. A moderátor szerepe: Miért kell lassítani a neutronokat?

A maghasadásból kirepülő új neutronok rendkívül nagy sebességgel és energiával rendelkeznek; ezeket **gyors neutronoknak** nevezzük (energiájuk jellemzően 2 MeV körüli, sebességük kb. 20 000 km/s).

A fizika törvényei szerint a gyors neutronok nagyon kis valószínűséggel képesek újabb ^{235}U magot hasítani, mert egyszerűen „túl gyorsan átszáguldanak” a mag mellett anélkül, hogy kölcsönhatásba lépnének vele. Annak az esélye (az úgynevezett hatáskeresztmetszet), hogy a neutron hasadást váltson ki, akkor a legnagyobb, ha a neutron lelassul a környező atomok

termikus mozgásának sebességére. Az ilyen lelassított részecskéket **termikus (vagy lassú) neutronoknak** nevezzük (energiájuk 0,025 eV körüli, sebességük kb. 2,2 km/s).

A neutronok lelassítására szolgáló közeget **moderátornak** nevezzük. A jó moderátor:

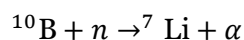
- Kicsi atomtömegű elemekből áll, hogy a neutron az ütközéskor a lehető legtöbb mozgási energiát adja át neki (mint amikor egy biliárdgolyó egy másik, azonos méretű golyónak ütközik).
- Nem nyeli el a neutronokat, csak lassítja őket.

A Paksi Atomerőműben (és a világ nyomottvizes reaktoraiban) a moderátor maga a **könnyűvíz** (H₂O), pontosabban annak hidrogénatomjai. A víz óriási előnye, hogy egyszerre működik moderátorként és a hőt elszállító hűtőközegként is.

2.3. A szabályozórudak működési elve: A neutronfalók

Míg a moderátor célja a neutronok megtartása és lassítása, addig a reaktor teljesítményének szabályozásához olyan anyagokra van szükség, amelyek képesek **kivonni a neutronokat** a rendszerből. Ezekből az anyagokból készülnek a szabályozórudak.

A szabályozórudak anyaga olyan elemeket tartalmaz (például bórt, kadmiumot vagy indiumot), amelyeknek rendkívül nagy a neutronelnyelő (abszorpciós) hatáskeresztmetszetük. Amikor egy neutron eltalál egy bór-10 (¹⁰B) atommagot, a bór elnyeli a neutront, és egy alfa-részecskére (héliummagra) valamint lítiumra bomlik anélkül, hogy újabb neutronokat bocsátana ki:



A szabályozórudak függőleges mozgásával közvetlenül a multiplikációs tényezőt (k) módosítják:

- **Rudak betolása (lefelé):** Az elnyelő anyag mélyebbre kerül a reaktormagban, több neutront nyel el. A szabad neutronok száma csökken ($k < 1$), a láncreakció lelassul, a reaktor teljesítménye visszaesik.
- **Rudak kihúzása (felfelé):** Kevesebb elnyelő anyag van a magban, több neutron marad szabadon, amelyek termikalizálódva újabb hasadásokat váltanak ki ($k > 1$). A teljesítmény

növekszik, amíg el nem éri a kívánt szintet, ekkor a rudak fixálásával a rendszert újra kritikus állapotba ($k = 1$) hozzák.

2.4. Fűtőelemek vs. Szabályozórudak: A reaktormag topológiája

A reaktormagban a fűtőanyag és a szabályozórendszer szigorú, mérnöki precízen megtervezett geometriai elrendezésben (rácsban) helyezkedik el. A két komponenst nem szabad összekeverni:

- **Fűtőelem-kazetták:** Ezek a reaktor fix elemei. Paks VVER-440-es reaktoraiban 349 darab hatszögletű fűtőelem-kazetta található. Minden kazetta 126 darab vékony cirkóniumötvözet csövet (fűtőelemet) tartalmaz, amelyek belsejében szilárd, magas olvadáspontú **urán-dioxid (UO₂)** kerámiatabletták sorakoznak. Ezek nem mozognak; a bennük lévő urán koncentrációja (dúsítottsága) határozza meg a reaktor alapvető energiapotenciálját.
- **Szabályozó- és biztonsági rudak:** Ezek a kazetták között, vagy speciálisan kialakított csatornában mozognak függőlegesen. Paks esetében a szabályozó kazetták alsó része fűtőanyagot, felső része pedig bór-acél elnyelő anyagot tartalmaz. Ha a rudat teljesen betolják, az elnyelő rész kerül a mag közepébe, teljesen lefojtva a reakciót.

Jellemző	Fűtőelem (Üzemanyag)	Szabályozórúd
Alapvető funkció	Neutronok termelése és hőfejlesztés.	Neutronok elnyelése és a reakció fékezése.
Fő kémiai összetevő	Urán-dioxid (UO ₂)	Bór-karbid (B ₄ C), Bór-acél, Kadmium
Szerkezeti mobilitás	Fix , a kampány során (évekig) mozdulatlan.	Dinamikus , folyamatosan mozog fel-le a vezérlés szerint.
Geometriai forma	Hatszögletű kötegekbe rendezett vékony csőrendszer.	Kereszt vagy rúd alakú elemek, amelyek precízen illeszkednek a csatornába.

A láncreakció ezen finom egyensúlya (a fűtőanyag, a moderátorként szolgáló víz és az elnyelő rudak játéka) biztosítja, hogy az atomerőmű ellenőrzött módon, robbanásveszély nélkül termeljen gigantikus mennyiségű hőenergiát.

III. Fejezet: A nyomottvizes reaktorok architektúrája

A reaktormagban keletkező hatalmas hőmennyiséget ki kell nyerni és elektromos energiává kell alakítani, miközben a radioaktív izotópokat hermetikusan el kell zárni a környezettől. Erre a célra szolgál a nyomottvizes atomerőművek (PWR / VVER) többlépcsős, zárt és független hűtőköri architektúrája.

3.1. A mélységi tagozódás elve és a fizikai gátak

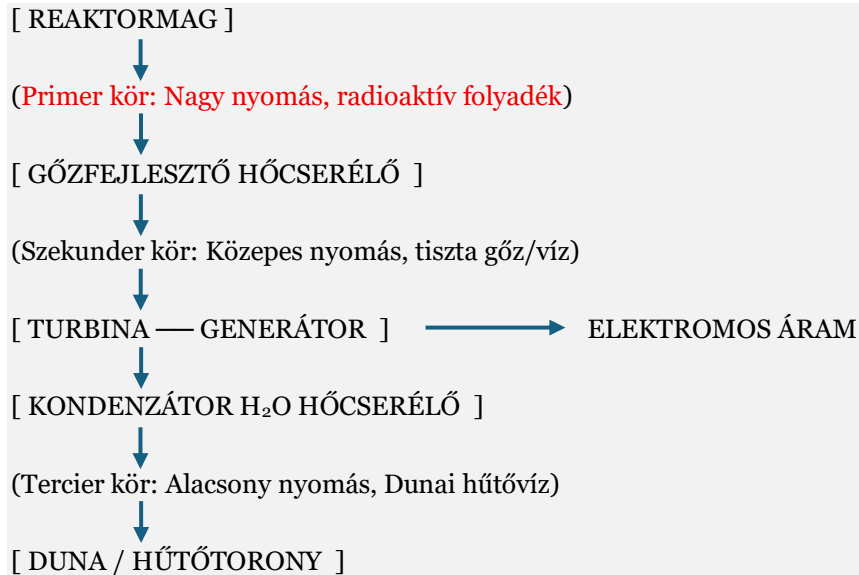
A nukleáris biztonság alapfilozófiája a **mélységi tagozódás** (defence-in-depth). Ez azt jelenti, hogy a környezet és a radioaktív fűtőanyag közé több, egymás mögé épített fizikai gátat helyeznek el. Ha az egyik gát meghibásodik, a következőnek még mindig tökéletesen meg kell tartania a szennyeződést.

A nyomottvizes reaktoroknál ez a védelmi lánc négy fő fizikai gátból áll:

1. **Az üzemanyag-tabletta (UO₂ kerámia rács):** Maga az urán-dioxid egy rendkívül stabil, magas olvadáspontú (~ 2800 °C) kerámia, amely szilárdan magában tartja a hasadási termékek (pl. cézium, stroncium) több mint 99%-át.
2. **A fűtőelem burkolata (Cirkónium cső):** A kerámiatablettákat befogadó fémcső, amely teljesen hermetikusan van lezárva. Megakadályozza, hogy a gáz-halmazállapotú hasadási termékek (pl. xenon, kripton, jód) kijussanak.
3. **A Primer kör nyomástartó fala:** Maga a reaktortartály, a fővízkörök csővezetékei és a gőzfejlesztők csőrendszere. Ez a vastag acélfal a reaktorban keringő radioaktív vizet zárja magába.
4. **A Védőépület (Konténment vagy Hermetikus zóna):** Egy vastag vasbeton és acélfalú struktúra, amely magát a primer kört veszi körül. Ha a primer kör csővezetéke teljesen elszakadna, ez az épület nem engedi ki a magas nyomású radioaktív gőzt a légkörbe.

3.2. A három hűtőkör topológiája és funkciói

A biztonsági gátak elvét követve az erőmű hűtőrendszere három, egymástól fizikailag teljesen elválasztott körre tagozódik. A körök kizárólag hőcserélőkön keresztül érintkeznek egymással, a vizük mechanikusan soha nem keveredhet.



1. A Primer kör (Elsődleges kör)

- **Feladata:** Közvetlenül hűti a reaktormagot, elszállítja a hasadás során keletkező hőt, és moderálja a neutronokat.
- **Jellemzői:** Teljesen a hermetikus zónán (konténmenten) belül helyezkedik el. A benne keringő víz radioaktívvá válik, ezért szigorúan elzárt. A vizet óriási nyomás alatt tartják, hogy a magas hőmérséklet ellenére se forrhasson fel, végig folyékony fázisban maradjon.

2. A Szekunder kör (Másodlagos kör)

- **Feladata:** Átveszi a hőt a primer körtől a gőzfejlesztőben, gőzt termel, meghajtja a turbinákat, és ezzel mechanikai munkát végez.
- **Jellemzői:** Ez a kör nem radioaktív (tiszta). Részben benyúlik a hermetikus zónába (a gőzfejlesztő oldala), de a gőzvezetékek már kilépnek onnan a turbinacsarnokba. Ez a kör kétfázisú: a víz a gőzfejlesztőben elforr, gőzzé válik, elvégzi a munkát a turbinán, majd a kondenzátorban újra folyékony vízzé csapódik le.

3. A Tercier kör (Harmadlagos kör vagy Hűtőkör)

- **Feladata:** A turbinából kilépő, munkáját elvégzett „fáradt” gőz kondenzálása (visszahűtése vízzel) a szekunder körben.
- **Jellemzői:** Teljesen nyitott vagy félnyitott rendszer. Paks I. esetében ez a Duna folyó, ahonnan a hűtővizet szivattyúzzák, átvezetik a kondenzátorokon, majd minimális felmelegedés után visszavezetik a folyóba. Ez a kör hordozza a legnagyobb tömegáramot, és teljesen mentes a radioaktivitástól.

Jellemző szempont	Primer kör	Szekunder kör	Tercier kör
Radioaktivitás	Igen (Magas)	Nincs (Tiszta)	Nincs (Környezeti)
Halmazállapot	Végig folyékony	Kétfázisú (Víz ↔ Gőz)	Végig folyékony
Vízminőség	Bórozott, ionmentes ultra-tiszta víz	Ammóniával lúgosított ultra-tiszta víz	Nyers felszíni víz (Duna)
Rendszertípus	Hermetikusan zárt	Zárt körfolyamat	Nyitott / Félnyitott

3.3. Miért nem elég egyetlen kör?

A Csernobilban használt RBMK típusú reaktorok (forróvízes, grafitmoderátoros reaktorok) egykörűek voltak: a reaktormagot hűtő víz közvetlenül gőzzé vált, és egyenesen a turbinákra ment. Bár ez építészeti egyszerűbb és jobb hatásfokú, biztonságilag rendkívül sebezhető. Ha a turbinacsarnokban csőtörés történik, a radioaktív gőz azonnal kijut a környezetbe, és a teljes gépterem megközelíthetetlené válik a sugárzás miatt.

A nyomottvízes reaktorok többkörös architektúrája garantálja, hogy a sugárzó anyagok az erőmű belső magjában maradjanak. A karbantartó személyzet a turbinacsarnokban, a generátorok és a szivattyúk mellett normál üzemben teljesen biztonságosan, dozimetriai védőruha nélkül dolgozhat, mivel a szekunder kör tiszta gőze nem hordoz magában nukleáris kockázatot.

IV. Fejezet: A Primer kör termohidraulikája

A primer kör feladata, hogy a reaktormagban keletkező gigantikus hőmennyiséget folyamatosan és üzembiztosan elszállítsa a gőzfejlesztők felé. Ehhez extrém hidraulikai paraméterekre és a folyadékok fizikai tulajdonságainak precíz egyensúlyára van szükség.

4.1. A nyomás és a forráspont összefüggése: Miért nem forrhat fel a víz?

A klasszikus fizika törvényei szerint a víz forráspontja közvetlenül függ a környezeti nyomástól. Normál légköri nyomáson (1 bar) a víz 100 °C-on forr fel. Ha növeljük a nyomást, a vízmolekuláknak nagyobb energiára (magasabb hőmérsékletre) van szükségük ahhoz, hogy legyőzzék a külső nyomást és gáz fázisba lépjenek.

Paks VVER-440 típusú reaktoraiban a primer körű víz átlagos üzemi hőmérséklete megközelíti a 285 °C-ot. Annak érdekében, hogy a víz ezen a rendkívül magas hőmérsékleten is teljesen folyékony halmazállapotú maradjon, a rendszert állandó, 123 bar nyomás alatt tartják (ez a normál légköri nyomás 123-szorosa).

Nézzük meg a víz gőznyomási görbéjének idevágó pontjait:

- 1 bar nyomáson a forráspont: 100 °C
- 16 bar nyomáson a forráspont: 200 °C
- 85 bar nyomáson a forráspont: 300 °C
- 123 bar nyomáson a telítési (forrási) hőmérséklet: kb. 326 °C

Mivel a reaktorból kilépő legmelegebb víz is „csak” 297 °C-os, a 326 °C-os elméleti forráspontig van egy kb. 29 °C-os biztonsági tartalék (alulhűtöttségi margin). Ha a primer körű víz felforrna és gőzbuborékok keletkeznének a magban, az katasztrofális lenne: a gőz hővezetése töredéke a folyékony vízének, így az uránrudak azonnal túlhevülnének és megolvadnának.

4.2. Hőtágulás és a Térfogatkompenzátor működése

A folyadékok, így az ultra-tiszta víz sűrűsége és térfogata is drasztikusan változik a hőmérséklet hatására. Szobahőmérsékleten (20 °C) a víz sűrűsége kb. 1000 kg/m³, míg a reaktor üzemi hőmérsékletén (285 °C) már csak kb. 740 kg/m³. Ez azt jelenti, hogy az erőmű felfűtése során a primer körű víz **több mint 25%-ot tágul**.

Mivel a víz gyakorlatilag összenyomhatatlan folyadék, egy teljesen zárt acélcsőrendszerben a hőtágulás vagy a minimális hőmérséklet-ingadozás is azonnali, pusztító nyomáscsúcsokat (vagy

drasztikus nyomásesést) okozna, ami szétvetné vagy összeroppantaná a berendezéseket. Ezt a problémát hivatott kezelni a **térfogatkompenzátor** (pressurizer).

A térfogatkompenzátor egy hatalmas, függőlegesen elhelyezett, 55 m³-es vastag falú acéltartály, amely közvetlenül rá van kötve a primer kör meleg ágára. A tartály működési elve a kétfázisú egyensúlyon alapul:

- **A tartály alsó része** folyékony primer körű vízzel van teli.
- **A tartály felső részében** nagynyomású gőzpárna található.

A gázok (a gőz) a folyadékokkal ellentétben kiválóan összenyomhatók. A térfogatkompenzátor úgy működik, mint a primer kör „tüdeje” vagy egy óriási lengéscsillapító:

- **Ha a reaktor melegszik**, a víz tágul, és benyomul a térfogatkompenzátor aljába. A megemelkedő vízszint összenyomja a felső gőzpárnát, ami rugalmasan elnyeli a tágulást, megakadályozva a hidraulikus kosárhatást és a csőtörést.
- **Ha a nyomás mégis túl magasra nőne**, a tartály tetejébe épített hidegvizes permetező rendszer (spré) bekapcsol. A hideg vízcseppek lecsapják a gőzt, csökkentve a gőzpárna nyomását. Végző esetben a mechanikus biztonsági szelepek nyitnak ki.
- **Ha a reaktor hűl** és a víz összehúzódik, a tartály aljában lévő beépített elektromos fűtőpatronok (több MW teljesítménnyel) azonnal forralni kezdik a vizet, új gőzt termelve, ami fenntartja a szükséges 123 bar-os rendszernyomást.

4.3. Anyagvastagság és mechanikai védelem

A 123 bar-os belső nyomás és a közel 300 °C-os hőmérséklet állandó, gigantikus mechanikai feszültséget jelent a szerkezetekre. A fő berendezés maga a **reaktortartály**, amelynek ezt a terhelést évtizedeken át hiba nélkül kell viselnie.

A VVER-440 reaktortartály egy hengeres test, amelyet különleges, króm-molibdén-vanádium ötvözetű nagy szilárdságú acélból kovácsolnak.

- **Falvastagság:** A tartály hengeres oldalának falvastagsága a kritikus, reaktormag melletti zónában eléri a **140 millimétert** (14 cm), a felső zárófedélnél pedig még ennél is vastagabb.
- **Belső plating:** Mivel a szerkezeti ötvöztött acél hajlamos lenne a korrózióra (főleg a vízbe kevert bórsav miatt), a tartály teljes belső felületét egy több milliméter vastag, ausztenites rozsdamentes acél réteggel (úgynevezett antikorróziós rávonattal) hegesztik le belülről.

Primer köri komponens	Jellemző belső átmérő	Falvastagság	Anyagminőség
Reaktortartály (Zóna)	3540 mm	140 mm	Ötvöztött szénacél + rozsdamentes belső bevonat
Fővízvezeték (Csövek)	500 mm	32 mm	Tiszta ausztenites rozsdamentes acél
Gőzfejlesztő köpeny	3210 mm	75 mm	Szénacél

A primer kör csővezetékei (a fővízvezetékek) belső átmérője pontosan 500 mm, falvastagságuk 32 mm, és teljes egészében tömör rozsdamentes acélból készülnek. Ez a brutális anyagmennyiség és a térfogatkompenzáció rugalmassága biztosítja, hogy a primer kör termohidraulikailag stabil maradjon, és a nagynyomású forró hűtőközeg soha ne szabadulhasson ki a zárt rendszerből.

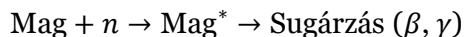
V. Fejezet: Sugárzás a gépezetben

Bár a fizikai gátek (a cirkónium fűtőelem-burkolatok) megakadályozzák, hogy az urán-dioxid tabletták közvetlenül érintkezzenek a primer köri hűtőközeggel, a reaktorban keringő víz mégis rendkívül intenzíven radioaktívvá válik. Ez a jelenség nem fizikai szivárgás, hanem nukleáris kölcsönhatások eredménye.

5.1. A neutronaktiváció fizikája

Amikor a primer köri víz átáramlik a reaktormagon, másodpercenként több milliárd szabad neutron bombázza. A neutronok semleges töltésük miatt könnyedén áthatolnak a fémburkolatokon, és ütköznek a vízmolekulákkal.

A **neutronaktiváció** (vagy nukleáris felaktiválás) során a vízben lévő stabil atommagok elnyelnek egy-egy szabad neutron. Ezzel a mag tömegszáma eggyel nő, és az elem egy instabil, sugárzó izotópjává (radionukliddá) alakul át. A folyamat általános sémája:

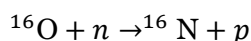


A primer körben ez a folyamat három fő forrásból hoz létre radioaktivitást: a víz saját atomjaiból, a hozzáadott vegyszerekből és a berendezések mikroszkopikus kopásából.

5.2. A Nitrogén-16 izotóp és a rövid távú kockázatok

A működő reaktor primer körü vízenek legintenzívebb, legveszélyesebb sugárzását a víz oxigénatomjaiból keletkező **Nitrogén-16** (^{16}N) izotóp okozza.

A folyamat során a vízben lévő stabil Oxigén-16 mag elnyel egy gyors neutron, miközben kilök magából egy protont ((n, p) reakció):



A keletkező Nitrogén-16 egy rendkívül instabil izotóp. Bomlása során elképesztően nagy energiájú (6-7 MeV) **gamma-sugárzást** bocsát ki, amely szinte minden anyagon áthatol. Üzem közben ez a sugárzás teszi életveszélyessé a primer kör környezetét (a hermetikus zónát).

A ^{16}N izotópnak azonban van egy hatalmas előnye: a felezési ideje mindössze **7,13 másodperc**. Ez azt jelenti, hogy miután a reaktort leállítják és a láncreakció megszűnik, a víz saját, oxigénből eredő sugárzása **pár perc alatt szinte teljesen lenullázódik**.

5.3. Aktivált korróziós termékek és a hosszú távú radioaktivitás

Míg a Nitrogén-16 percek alatt eltűnik, a primer körben jelen vannak olyan izotópok is, amelyek hónapokig vagy évekig sugároznak. Ezek az úgynevezett **aktivált korróziós termékek**.

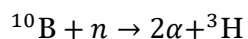
A nagy sebességgel áramló, forró víz mikroszkopikus mennyiségben koptatja a csővezetékek, szivattyúk és szelepek belső fémfelületét. A vízbe így fémionok és mikroszemcsék (vas, kobalt,

nikkel, króm) kerülnek. Amikor ezek a részecskék a vízzel együtt elhaladnak a reaktormag mellett, a neutronok felaktiválják őket:

- **Kobalt-60 (^{60}Co):** A szerkezeti acélok minimális kobalttartalmából keletkezik. Felezési ideje **5,27 év**, és kemény gamma-sugárzó. Ez az izotóp felelős azért, hogy a primer kör berendezései (pl. a fővízköri szivattyúk) a reaktor leállítása után, a karbantartások alatt is sugároznak.
- **Vas-59 (^{59}Fe):** Felezési ideje 44 nap.
- **Mangán-54 (^{54}Mn):** Felezési ideje 312 nap.

5.4. Tritiumképződés a bórsavból

A Paksi Atomerőműben a láncreakció finomszabályozására a primer köri vízben **bórsavat** (H_3BO_3) oldanak fel. A bór kiváló neutronelnyelő, azonban a neutronokkal való kölcsönhatása során egy nemkívánatos melléktermék, **trícium** (^3H vagy **T**) keletkezik:



A trícium a hidrogén radioaktív, béta-sugárzó izotópja, felezési ideje **12,3 év**. Mivel kémiaiilag pontosan úgy viselkedik, mint a sima hidrogén, beépül magukba a vízmolekulákba (HTO – tríciumos víz). Ezt a vizet hagyományos szűréssel lehetetlen elválasztani a sima víztől, így a trícium hosszú távon felhalmozódik a primer körben.

Izotóp	Forrás	Sugárzás típusa	Felezési idő	Karbantartási relevanciája
Nitrogén-16 (^{16}N)	Víz oxigénatomjai	Gamma (γ), kemény	7,13 másodperc	Üzem közben halálos, leállítás után azonnal eltűnik.
Kobalt-60 (^{60}Co)	Acélcsövek kopása	Gamma (γ) és Béta (β)	5,27 év	A leállási karbantartások fő sugárterhelési forrása.
Trícium (^3H)	Bórsav szabályozó	Béta (β), lágy	12,3 év	Beépül a vízmolekulákba, hosszú távú hulladékkezelési probléma.

5.5. A primer köri víz folyamatos tisztítása

Annak érdekében, hogy a hosszú felezési idejű korróziós termékek és a fűtőelemekből esetleg átdiffundáló minimális gázok (xenon, kripton) ne dúsuljanak fel kritikus szintre, a primer köri vizet folyamatosan tisztítani kell.

Ezt a feladatot a **primer köri víztisztító rendszer** (Paksnál a SVO-1, SVO-2 rendszerek) végzi. A főáramkörből folyamatosan leágaztatnak egy kisebb vízmennyiséget, amelyet lehűtenek, lecsökkentik a nyomását, majd átengedik speciális, nagy nyomású mechanikus szűrőkön és **ioncserélő gyantákon**.

Az ioncserélők kémiaiilag megkötik a vízben oldott radioaktív fémionokat (pl. a Kobalt-60-at), és helyettük nem sugárzó ionokat engednek vissza. A megtisztított, de továbbra is tríciumos vizet ezután visszapumpálják a primer körbe. A kiszűrt radioaktív anyagok a gyantában dúsulnak fel, amely így idővel közepes aktivitású szilárd radioaktív hulladékká válik.

VI. Fejezet: A Szekunder kör és a termodinamikai hatások

A szekunder (másodlagos) kör az atomerőmű energetikai motorja. Feladata, hogy a primer kör által szállított nukleáris hőt tiszta, nagynyomású gőzzé alakítsa, majd azt a turbinákra vezetve mechanikai munkává transzformálja. Ez a folyamat a klasszikus termodinamika törvényein alapul.

6.1. A Gőzfejlesztő: A körök közötti interfész

A primer és a szekunder kör közötti egyetlen fizikai kapcsolódási pont a **gőzfejlesztő** (steam generator). Ez egy hatalmas, fekvő vagy álló elrendezésű hengeres hőcserélő. A Paksi Atomerőmű egy-egy reaktorblokkjához 6 darab gőzfejlesztő tartozik.

A gőzfejlesztő belsejében több ezer (kb. 5500 darab) vékony falú, U-alakú rozsdamentes acélső található.

- **A csöveken belül** áramlik a primer kör forró ($297\text{ }^{\circ}\text{C}$ -os), radioaktív vize **123 bar** nyomáson.
- **A csöveken kívül** (a gőzfejlesztő köpenyoldalán) található a szekunder kör tápvize, jóval alacsonyabb, kb. **46 bar** nyomáson.

Mivel a szekunder oldalon a nyomás jóval alacsonyabb, a víz telítési hőmérséklete itt mindössze **256 °C**. Amikor a $223\text{ }^{\circ}\text{C}$ -os szekunder tápvíz hozzáér a primer körű csövek forró felületéhez,

intenzív forrásba kezd, és intenzíven **telített gőzzé** alakul. A keletkező gőz a gőzfejlesztő tetején lévő cseppleválasztókon (szeparátorokon) keresztül száraz gőzként lép ki, majd a fő gőzvezetéseken át a turbinacsarnokba áramlik.

6.2. A Carnot-ciklus és a termodinamikai hatások korlátai

Az atomerőművek hatásfokát a termodinamika második főtétele és a **Carnot-ciklus** elméleti maximuma korlátozza. Az elméleti maximális hatásfok ($\eta_{\max}$) a meleg forrás (a gőz) hőmérsékletétől (T_{meleg}) és a hideg forrás (a hűtővíz) hőmérsékletétől (T_{hideg}) függ, Kelvinben kifejezve:

$$\eta_{\max} = 1 - \frac{T_{\text{hideg}}}{T_{\text{meleg}}}$$

A Paksi Atomerőmű (VVER-440) esetében a frissgőz hőmérséklete kb. 256 °C (529 K), a kondenzátor hűtővizének (Duna) átlagos hőmérséklete pedig kb. 15 °C (288 K). Az elméleti Carnot-hatások:

$$\eta_{\max} = 1 - \frac{288}{529} \approx 45,5\%$$

A valóságban a mechanikai, hidraulikai és generátor-veszteségek miatt a valós nettó villamos hatásfok ennél alacsonyabb, **kb. 33–34%**. Ez azt jelenti, hogy a reaktormagban termelt hőenergia nagyjából egyharmadából lesz elektromos áram, a maradék kétharmad veszteségként a tercier körön keresztül távozik.

Mivel a fémek szerkezeti korlátjai és a primer köri nyomás nem növelhető a végtelenségig, az atomerőművek gőzhőmérséklete (256–300 °C) elmarad a modern fosszilis (szén- vagy gáz-) erőművekéitől (500–600 °C), ezért az atomerőművek alapszintű termodinamikai hatásfoka némileg alacsonyabb azokénál.

6.3. Miért kötelező a szekunder kör zárt rendszere?

Bár a szekunder kör gőze teljesen mentes a radioaktivitástól, a rendszert szigorúan zárt körfolyamatként kell üzemeltetni. A fáradt gőz szabadba engedése (nyitott ciklus) a következő okok miatt lehetetlen:

1. Anyagminőség és vízkémia

A gőzfejlesztő csövei és a turbinalapátok élettartama szempontjából kritikus a szekunder kör vízminősége. Itt kizárólag **ultratiszta, demineralizált (ionmentesített)** vizet szabad használni, amelynek elektromos vezetőképessége $< 0,1 \mu\text{S/cm}$. Ha nyitott lenne a rendszer, naponta több tízmillió liter friss ionmentes vizet kellene előállítani, ami gazdaságilag és logisztikailag is fenntarthatatlan lenne. A zárt körben a vizet ammóniával (NH_3) és hidrazinnal (H_2N_4) lúgosítják (pH 9,2–9,5), hogy megakadályozzák az I. fejezetben részletezett lyukkorrozíót.

2. Energiamegtakarítás

A turbinából kilépő fáradt gőz lecsapódása után kapott kondenzvíz még mindig kb. 30-35 °C-os. Ezt a vizet a tápvízszivattyúk visszanyomják a gőzfejlesztőbe. Útközben a gőz leágasztásaival működő előmelegítőkön vezetik át, így már kb. 223 °C-os tápvízként lép be a gőzfejlesztőbe. Ha folyamatosan 15 °C-os hideg friss vizet kellene a rendszerbe táplálni, a hatásfok drasztikusan összeomlana, mivel a reaktor energiájának nagy része a víz pusztá felmelegítésére menne el a gőzképzés helyett.

3. Biztonsági gát funkció

A szekunder kör zárt fala biztosítja a III. fejezetben említett harmadik védelmi gátat. Ha a gőzfejlesztő egyik primer körű vékony csöve kilyukadna (gőzfejlesztő csőtörés üzemzavar), a radioaktív primer víz a nyomáskülönbség miatt átlépne a szekunder körbe. Mivel a szekunder kör zárt, a radioaktivitás az erőmű falain belül marad, és a biztonsági szelepek automatikus lezárásával elszigetelhető. Nyitott rendszer esetén a radioaktív gőz ellenőrizetlenül távozna a légkörbe.

Szekunder körű komponens	Jellemző nyomás	Jellemző hőmérséklet	Halmazállapot
Frissgőz vezeték	44 bar	256 °C	Telített gőz (száraz)
Turbina kilépés	0,04 bar	30-35 °C	Nedves gőz (Vákuum)
Kondenzátum tartály	1 bar alatt	30 °C	Folyékony víz
Tápvíz belépés	50-60 bar	223 °C	Alul hűtött folyadék

A szekunder kör zárt termodinamikai ciklusa (Gőzfejlesztő → Turbina → Kondenzátor → Tápvízrendszer → Gőzfejlesztő) biztosítja a stabil, gazdaságos és tiszta energiakonverziót.

VII. Fejezet: A Turbina-Generátor gépegység gépészete

A szekunder körben megtermelt nagynyomású, nagy entalpiájú gőz energiáját egy komplex forgógép-együttes transzformálja először mechanikai, majd villamos energiává. Ez a fejezet a turbinalapátok aerodinamikáját, a hidrodinamikus siklócsapágyak tribológiáját és a generátortekercsek hűtési rendszereit mutatja be szakmai mélységben.

7.1. A turbinalapátok gépészete és áramlástan

A Paksi Atomerőműben reaktorblokkonként két darab **K-220-44 típusú turbina-generátor** gépcsoport működik. A gőzfejlesztőkből kilépő frissgőz közvetlenül gőzturbinákra zúdul. Egy-egy gőzturbina egy nagynyomású (NN) és két kétáramú kisnyomású (KN) házból, valamint a hozzájuk tartozó forgórészekből (rotorokból) áll.

A gőz útja:

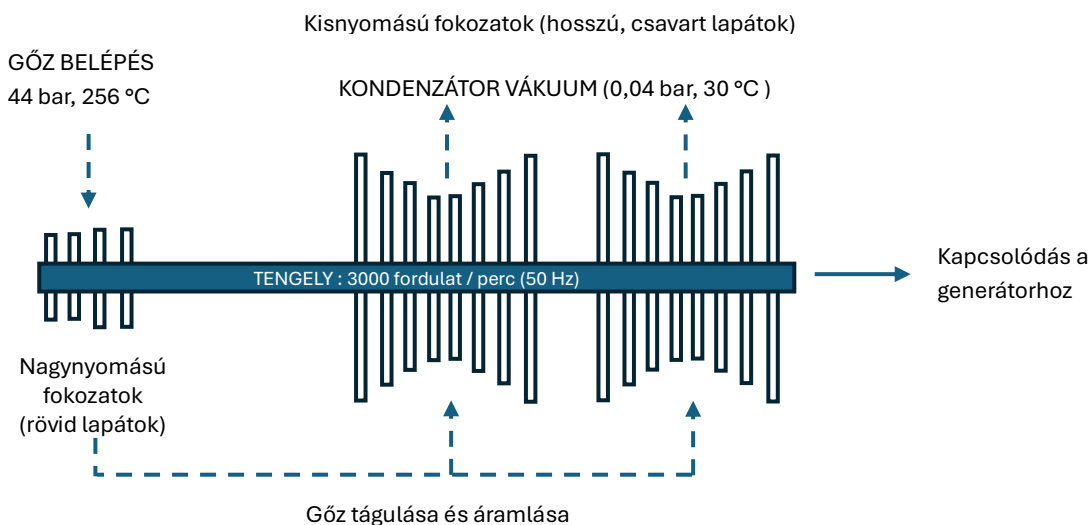
- **Nagynyomású turbina (NN ház):** A gőz először a nagynyomású házba lép be, ahol leadja energiája egy részét. Eközben a nyomása leesik, a gőz pedig lehűl és részben lecsapódik (vízcseppek jelennek meg benne).
- **Nedvességleválasztás és túlhevítés:** A vizes gőz tönkretenné a következő fokozat lapátjait (eróziót okozna). Ezért a gőz kilép az NN házból, és átmegy a páraleválasztó-túlhevítő berendezésen. Itt kivonják belőle a vizet, és újra felmelegítik.
- **Kisnyomású turbinák (KN házak):** A megszáritott és újra felmelegített gőz belép a két kisnyomású házba, ahol az utolsó csepp energiáját is leadja.
- **Kondenzátor:** A KN turbinákból kilépő, ekkorra már rendkívül alacsony nyomású és hőmérsékletű gőz az alattuk elhelyezkedő kondenzátorba zuhan. Itt a Duna vize (a harmadik, hűtő kör) teljesen lecsapja (visszafolyósítja) a gőzt vízzé. Ezt a vizet a tápszivattyúk visszanyomják a gőzfejlesztőbe, és a körfolyamat kezdődik előlről.

A turbinaházakat egyazon közös, merev tengely köti össze egymással és a villamos generátorral. Ez a hatalmas acéltengely valójában több darabból van mereven, nehéz karimás csavarokkal (kuplungokkal) egymáshoz rögzítve, így mechanikailag egyetlen, együtt forgó egységet alkot az elejétől a generátor végéig.

Mindegyik turbinaház több fokozatból áll. A turbina egy fokozata egy fixen rögzített állólapát-koszorúból (terelőlapátok) és egy a tengellyel együtt forgó futólapát-koszorúból áll. A terelőlapátok feladata a gőz felgyorsítása és a megfelelő belépési szög beállítása, míg a futólapátok a gőz mozgási energiáját alakítják át a tengelyt forgató nyomatékká.

Ahogy a gőz áthalad a fokozatokon, a nyomása és hőmérséklete drasztikusan csökken, miközben a fajlagos térfogata exponenciálisan növekszik. Emiatt a lapátok geometriájának is változnia kell:

- **Nagynyomású rész:** A belépő gőz sűrűsége nagy, a térfogatárama viszonylag kicsi. Itt a lapátok rövidek (pár centiméteresek) és robusztusak.
- **Kisnyomású rész:** A gőz szinte teljesen kitágult. A hatalmas térfogat elvezetéséhez óriási átömlési keresztmetszet kell. Az utolsó fokozat futólapátjainak hossza eléri a **840–1050 mm-t**.



Source: https://3d.energyencyclopedia.com/pwr_npp

A gőzáram megosztása:

- Amikor a gőz belép az NN házba, még sűrű, kis helyen elfér.
- Mire elhagyja az NN házat és munkát végez, a térfogata a többszörösére duzzad. Ha ezt a hatalmas mennyiségű, szétterjedt gőzt egyetlen kisnyomású házba akarnánk bezsúfolni, ahhoz fizikailag megvalósíthatatlanul óriási átmérőjű házra és kezelhetetlenül hosszú lapátokra lenne szükség (amelyeket a centrifugális erő széttépne).
- Az NN házból kilépő gőzt szétosztják két darab, párhuzamosan működő kisnyomású ház között, ráadásul mindkét kisnyomású ház kétáramú (középen lép be a gőz, és kétfelé, jobbra-balra áramlik ki a szélei felé). Ezáltal a gőz tömege eloszlik, a tengelyre ható hosszirányú erők kiegyenlítik egymást, és a lapátok mérete is a gyártható, biztonságos határokon belül marad.

Turbinalapát méretek:

Egy-egy turbinaházon belül sem azonos lapátok mérete, mert a gőznyomás nem azonos.

- **Fokozatos nyomáscsökkenés:** A gőz nem egyszerre veszíti el a nyomását, hanem fokozatról fokozatra utazva tágul ki. Ahogy halad előre a gőz a házon belül, a nyomása lépcsőzetesen csökken.
- **Növekvő lapátméretek:** Mivel a nyomás csökkenésével a gőz térfogata folyamatosan nő, ugyanannak a gőzmennyiségnek egyre nagyobb és nagyobb keresztmetszetre van szüksége az áramláshoz. Emiatt a turbina tengelyén a gőz belépési pontjától a kilépési pont felé haladva a lapátok mérete fokozatosan, lépcsőzetesen növekszik.
- Az NN házban viszonylag kicsi, de vastag, erős lapátok kezdenek, majd a ház végére kicsit megnőnek. A gőz átmegy a KN házakba, ahol a belépésnél ismét közepes lapátok fogadják, majd a KN házak legvégén (a kondenzátor előtti utolsó fokozatban) már a legnagyobb, legszélesebb lapátok találhatók, mert ott a legnagyobb a gőz térfogata és a legkisebb a nyomása.

Az 50Hz-es hálózati frekvencia fenntartása érdekében gőzturbina generátornak állandóan 3000 fordulat/perces (rpm) üzemi fordulatszámon kell forognia. Ennél a fordulatszámnál a leghosszabb lapátok hegyének kerületi sebessége meghaladja a **410 m/s-ot (kb. 1480 km/h)**, ami jelentősen átlépi a hangsebességet. Emiatt a lapáttónál fellépő centrifugális erő eléri a több száz kilonewton (kN), ami olyan mechanikai feszültséget jelent, mintha a lapát végére egy nehéz tehergépjárművet akasztanának.

A lapátok anyaga nagymértékben ötvözött, korrózióálló króm-nikkel-titán acél vagy titánötvözet. Keresztmetszetük áramvonalas szárnyszelvény profilt követ, és hosszirányban csavart (térgörbe) geometriájúak. Ez biztosítja, hogy a gőz belépési szöge a lapát teljes hossza mentén (a különböző kerületi sebességek ellenére) aerodinamikailag optimális maradjon.

A lapátok rögzítése a tengelytárcsákba mart, nagy pontosságú „**karácsonyfa**” **profilú** hornyokba történik. Ez a cikkcakkos kialakítás biztosítja a legnagyobb érintkezési felületet, így a centrifugális erő nem képes kitépni a lapátot a fészkéből.

7.2. A stabil fordulatszám szabályzás elve és a védelem

Az állandó 3000 / perces fordulatszám fenttartása az alábbi módom működik:

- **A gőzmennyiség precíz adagolása:** ha a fordulatszám csökken, több gőzt engednek a turbinára, ha nő, akkor kevesebbet.
- **Szelepes szabályozás:** A turbina előtt gyorsműködésű szabályozószelepek találhatók. Ezek változtatják a belépő gőz tömegáramát.
- **Elektronikus és hidraulikus kormányzás:** Egy digitális szabályozórendszer (EHSR) folyamatosan méri a fordulatot. Ha minimális eltérést észlel, hidraulikus munkahengereken keresztül azonnal mozdít a szelepeken.
- **Hálózati szinkronizáció (A "szuperfék"):** Amikor a generátort rákapcsolják az országos villamosenergia-hálózatra, a hálózat hatalmas tehetetlensége mágnesesen hozzákötí a generátort az 50 Hz-es frekvenciához. Ha a turbina gyorsulni akarna, a hálózat mágneses ellenállása automatikusan visszafogja (fékezi), miközben a generátor több áramot termel. Ha lassulna, a generátor kevesebb áramot ad le, így könnyebbé válik a hajtása.

Ha a villamos hálózat hirtelen leszakad a generátorról, a hajtó gőz másodpercek alatt széttépné a fellazuló turbinát, ha a védelmek nem avatkoznának be azonnal. A hirtelen teherledobás és a túlpörgés ellen megfelelő védelemre van szükség, amely az atomerőművek legkritikusabb biztonsági rendszerei közé tartozik.

Túlpörgés elleni védelem: elektronikus és mechanikus szabályzás

- Amikor a generátor egy hálózati zárlat vagy védelmi működés miatt hirtelen lekapcsolódik az országos hálózatról, megszűnik a gépcsoportot fékező elektromágneses ellenállás. Mivel a

reaktor felől másodpercenként több száz kilogramm magas nyomású gőz áramlik be változatlanul, a turbina elképesztő sebességgel gyorsulni kezd.

- **A másodperc törtrésze alatt:** Az EHSR (elektronikus-hidraulikus szabályozó) érzékeli a hálózati teljesítmény nullázódását és a fordulát megugrását.
- **A szelepek lezárása:** A rendszer azonnal parancsot ad a turbina előtti szabályozó- és gyorslezáró szelepeknek a teljes zárásra. Ez a folyamat mindössze 0,15–0,3 másodperc alatt végbemegy.
- **Gőzelterelés (Bypass):** A reaktor nem állítható le azonnal, és a gőztermelés sem szüntethető meg egy pillanat alatt. Az így feleslegessé vált gőzt a blokki redukciós állomás szelei automatikusan elterelik, és közvetlenül a turbina alatti kondenzátorba (vagy végső esetben a légkörbe) fújják ki.

Ha az elektronikus szabályozás valamilyen hiba miatt csődöt mondana, egy teljesen független, szintizta mechanikus, centrifugális elven működő vészleállító rendszer lép életbe:

- **A mechanikus kilökődő csap:** A turbina tengelyébe, magába a forgórészbe egy vagy két keresztirányú furatba egy-egy nehéz fémcsapot építenek, amelyet egy kalibrált, erős spirálrugó tart bent a tengely síkjában. Normál 3000-es fordulatszámra a rugó ereje erősebb, mint a forgásból eredő centrifugális erő. Ha azonban a turbina fordulatszáma eléri a kritikus kb. 3300 fordulat/percet (+10-11%), a centrifugális erő legyőzi a rugót.
- **A fizikai lökés:** A fémcsap ekkor látványosan kilökődik a tengely síkjából.
- **A hidraulika leürítése:** A forgó tengelyből kiálló csap egyetlen fordulat alatt fizikailag megüt egy rögzített mechanikus emeltyűt (kioldó kilincset). Ez a kar elmozdulva azonnal megnyit egy szelepet, ami leüríti a nagynyomású hidraulikaolaj-rendszert.
- **Rugós vésszárás:** Mivel a gőzbeömlő gyorslezáró szelepeket a hidraulikus olajnyomás tartja nyitva a rugók ellenében, az olajnyomás megszűnésével a hatalmas, beépített mechanikus rugók atombiztosan és azonnal rárántják a szelepeket a gőz útjára, teljesen elvágva a turbinát a hajtóerőtől.

PWR (Pressurized Water Reactor) NPP (Nuclear Power Plant) működése: animáció

ANIMÁCIÓ INDÍTÁSA

Source: https://3d.energyencyclopedia.com/pwr_npp

7.3. Hidrodinamikus siklócsapágyak tribológiája

A turbina és a generátor közös tengelyvonala egy közel 60 méter hosszú, több mint 200 tonna össztömegű forgórész-rendszer. Egy ekkora tömegű, szuperszonikus sebességű rendszer alátámasztására a gördülőcsapágyak (golyós- vagy görgőcsapágyak) a pontszerű terhelés és a fémfáradás miatt alkalmatlanok. A megoldást a **hidrodinamikus siklócsapágyak** jelentik.

A siklócsapágyban a tengelycsap egy puha fémötvözzel (ón- vagy ólomalapú babbítfémmel) kibélelt hengeres csapágycsészében forog. A működés alapja a folyadéksúrlódás:

1. **Álló helyzetben:** A nehéz tengely közvetlenül ráfekszik a csapágýfémre (fémes érintkezés).
2. **Indításkor:** Nagynyomású olajszivattyúk kenőolajat (turbinaolajat) préselnek a tengely alá, hogy hidrosztatikusan megemeljék azt.
3. **Üzemi fordulatszám (3000 rpm):** A forgó tengely a felületi tapadás és a viszkozitás miatt beszívja a kenőolajat a tengely és a csapágýcsésze közötti szűkülő részbe. Ez a hidrodinamikusan ékhatás olyan nagy nyomást hoz létre az olajfilmben, ami teljesen megemeli a tengelyt.

Üzemi körülmények között a tengely **lebeg az olajfilmen**, fém a fémmel nem érintkezik. A folyadéksúrlódási együttható rendkívül kicsi, így a mechanikai veszteség minimális. Az olaj folyamatos áramoltatása kettős célú: fenntartja a hordozó filmet, és elszállítja a nyírási feszültségből adódó súrlódási hőt.

7.4. A generátor elektromos veszteségei és a hidrogénhűtés

A turbina által leadott mechanikai munkát a szinkrongenerátor alakítja át villamos energiává. Paks I. generátorait (típusuk: Ganz gyártmányúak) a 2000-es években végrehajtott korszerűsítések során 220 MW névleges villamos teljesítményről 250 MW-ra növelték a reaktorok hőteljesítménye növelésével, dúsabb üzemanyag és módosított vezérlést alkalmazásával, az így rendelkezésre álló nagyobb gőzmennyiséghez a turbinák és generátorok modernizációjával:

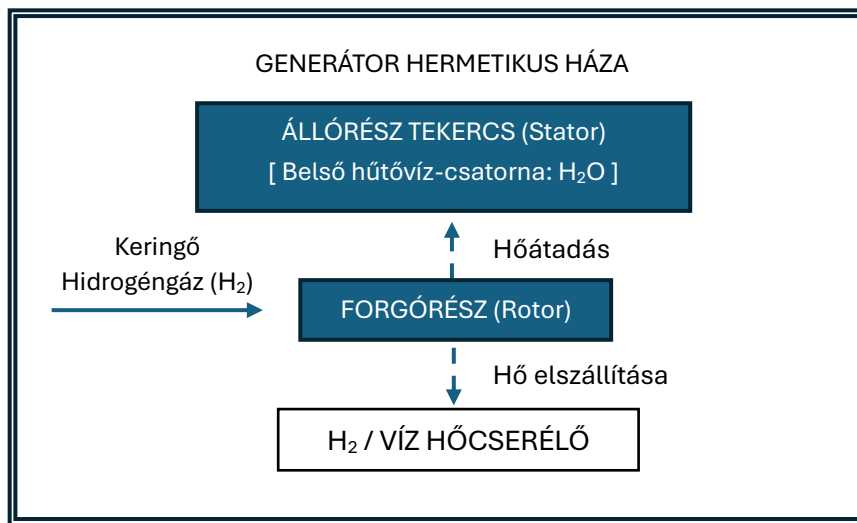
- hatékonyabb, modernebb turbina lapátozás,
- fokozott generátor hűtés,
- modernebb álló- és forgórész-szigetelés.

Bár a generátor hatásfoka kiemelkedően magas (~98,5%), a fennmaradó 1,5%-os veszteség egy ekkora gépnél **3-4 megawatt (MW) tiszta hőenergiát** jelent. Ez a hő döntően a tekercsek villamos ellenállásából (Ohm-i veszteség vagy Joule-hő), valamint a vasmag átmágnesezési és örvényáramú veszteségeiből származik. Ha ezt a hőt nem vezetnék el azonnal, a tekercsek szigetelőanyaga percek alatt megolvadna, katasztrofális zárlatot okozva.

A sima atmoszférikus levegővel való hűtés a kis sűrűség és a gyenge hővezetési tényező miatt elégtelen lenne. Ezért a paksi generátorok belső, hermetikusan lezárt házában nagynyomású (kb. 3-4 bar) tiszta hidrogéngázt (H₂) keringetnek.

Miért pont hidrogén?

- **Kiemelkedő hővezetési tényező:** A hidrogén hővezetése kb. 7-szer jobb, mint a levegőé, így sokkal gyorsabban veszi át a hőt a forró rézfelületekről.
- **Rendkívül kis sűrűség:** A hidrogén sűrűsége a levegőének mindössze 1/14-e. Emiatt a 3000-es fordulattal pörgő óriási forgórész alig ütközik gázellenállásba. Ez drasztikusan lecsökkenti az úgynevezett ventilációs és gázsúrlódási veszteségeket, ami önmagában közel 1%-kal javítja a teljes generátor hatásfokát.



A hidrogénes hűtőkör egy zárt belső gázkör. A gáz átáramlik a forgórész hornyaiban elhelyezett tekercsek között, felveszi a hőt, majd a generátorházon belül beépített gáz/víz hőcserélőkön (hidrogénhűtőkön) halad át, ahol leadja a hőt a belső tiszta vízkörnek.

A még intenzívebb hűtést igénylő állórész-tekerceknél (ahol a legnagyobb áramok folynak) a gázhűtés mellett **közvetlen belső vízhűtést** is alkalmaznak: a tekercsek üreges rézvezetőkben állnak, és ezek belsejében nagytisztaságú, alacsony vezetőképességű (desztillált) víz áramlik át közvetlenül, fizikai kapcsolatban a feszültség alatt álló részekkel.

Generátor komponens	Fő veszteségforrás	Alkalmazott hűtőközeg	Hűtési mód
Forgórész (Rotor)	Gerjesztőáram Joule-hője	Nagynyomású hidrogéngáz (H_2)	Kényszerített gázáramlás a hornyokban
Állórész (Stator)	Főáramú Ohm-i veszteség	Ultra-tiszta deionizált víz (H_2O)	Közvetlen áramlás az üreges rézvezetőkben
Vasmag	Örvényáramok, hiszterézis	Hidrogéngáz (H_2)	Felületi gázmosás radiális csatornákon át

A generátorban alkalmazott hidrogénes technológia szigorú biztonsági rendszert igényel (gáztömítések a tengelyátvezetéseknél), mivel a hidrogén levegővel keveredve robbanásveszélyes durranógázt alkotna. Ezért a rendszerben a hidrogén tisztaságát folyamatosan 98% felett tartják, így az oxigén hiánya miatt a robbanás fizikailag kizárt.

VIII. Fejezet: A Tercier kör és a környezeti korlátok

Míg az erőmű első két köre teljesen zárt, belső rendszer, a harmadik hűtőkör (tercier kör) közvetlen kapcsolatban áll a környezettel. Feladata, hogy a szekunder kör munkáját elvégzett gőzét visszahűtse, és a termodinamikai veszteségűt (a reaktor által termelt energia kétharmadát) leadja a természetnek

8.1. A kondenzátor mint hőcserélő és a vákuum szerepe

A szekunder körből érkező fáradt gőz a turbina kisnyomású fokozatai után közvetlenül a turbina alatt elhelyezkedő hatalmas **főkondenzátorokba** lép be. A kondenzátor egy gigantikus felületi hőcserélő, amelyben több tízezer vékony sárgaréz vagy titáncső fut keresztül.

- **A csöveken kívül:** A turbinából kilépő fáradt gőz áramlik.
- **A csöveken belül:** A Dunából folyamatosan szivattyúzott hideg hűtővíz kering.

Amikor a gőz hozzáér a Duna-víz által hűtött csövek falához, azonnal leadja a párolgáshőjét és folyékony vízzé csapódik le.

Ez a fázisváltozás (gőzből folyadék) térfogat-összeomlással jár: 1 m^3 gőz mindössze 1 liter vízzé zsugorodik össze. Ez a drasztikus térfogatcsökkenés a kondenzátorban egy rendkívül erős, tartós vákuumot (kb. 0,04 bar abszolút nyomást) hoz létre. Ez a vákuum szívja át a gőzt a turbina utolsó lapátjain. Minél hidegebb a hűtővíz, annál erősebb a vákuum, és annál nagyobb a turbina hatásfoka.

8.2. A Duna mint hűtőközeg és a tömegáram-igény

A Paksi Atomerőmű (Paks I.) úgynevezett **frissvizes (átfolyós) hűtési rendszert** alkalmaz. Ez azt jelenti, hogy a hűtővizet közvetlenül a Duna folyóból nyerik ki egy erre a célra épített hidegvíz-csatornán keresztül.

A hűtővíz-igény elképesztően nagy. A négy működő blokk kondenzátorainak ellátásához másodpercenként körülbelül **100–120 köbméter (100 000 – 120 000 liter) Duna-vízre** van szükség. Ez a hatalmas víztömeg a kondenzátorokon való áthaladás során nem fogy el és nem szennyeződik, csupán átveszi a hőt: a folyamat végén nagyjából **7–8 °C-kal melegebben** áramlik vissza a melegvíz-csatornán keresztül a folyóba.

8.3. A klímaváltozás hatásai: Nyári aszályok és hőségriasztások

Az átfolyós hűtési rendszer legnagyobb gyengesége, hogy teljesen kiszolgáltatott a környezeti tényezőknek és az időjárási anomáliáknak. A globális felmelegedés és a szélsőséges nyári időjárás az utóbbi években egyre komolyabb korlátok közé szorítja az erőmű működését.

A nyári időszakokban két kritikus tényező jelentkezik egyszerre:

1. **Alacsony vízállás (aszály):** A Duna vízhozama drasztikusan lecsökkenhet, ami megnehezíti a szükséges másodpercenkénti $100\text{--}120 \text{ m}^3$ víz biztonságos kiszivattyúzását.

2. **Magas kiindulási vízhőmérséklet:** A Duna vize a tartós hóhullámok idején eleve elérheti a 25–26 °C-ot.

A környezetvédelmi és műszaki korlátok

Ha a Duna vize alapból 25 °C-os, és a kondenzátorban menetrendszerűen felmelegszik 8 °C-ot, akkor 33 °C-os vízként térne vissza a folyóba. Ezt azonban szigorú környezetvédelmi jogszabályok tiltják.

A folyó élővilágának (halak, planktonok) védelme érdekében egy miniszteri rendelet kimondja, hogy az erőmű alatti mérőszelvénynél a Duna vízhőmérséklete **nem haladhatja meg a 30,0 °C-ot**. Ha a folyó természetes módon is megközelíti ezt az értéket, az erőműnek tilos tovább melegítenie a vizet.

Duna-víz hőmérséklete	Kondenzátor vákuum	Erőművi hatások	Szükséges operatív lépés
10-15 °C (Átlagos)	Kiváló (~0,04 bar)	Maximális (~33–34%)	Normál üzem, maximális teljesítmény.
20-22 °C (Nyári eleji)	Megfelelő (~0,06 bar)	Kismértékben csökken	Fokozott monitoring, teljes kapacitás.
> 25 °C (Extrém hőség)	Romlik (~0,09 bar)	Drasztikusan visszaesik	Teljesítmény-korlátozás (leterhelés) a 30 °C-os limit miatt.

Amikor a Duna eléri a kritikus hőmérsékletet, a Paksi Atomerőmű irányítói kénytelenek **visszafogni a reaktorok teljesítményét** (leterhelés). Minden egyes megawatt csökkentéssel kevesebb gőzt engednek a kondenzátorokba, így csökken a Dunába visszaengedett melegvíz mennyisége és hőfoka is. Az elmúlt évek aszályos nyarain előfordult, hogy a blokkokat 10–20%-kal is le kellett terhelni, ami komoly kapacitáskiesést jelentett a magyar villamosenergia-hálózatban.

8.4. A probléma megoldása a jövőben: Segéd-hűtőtornyok

Mivel a klímamodellek szerint a nyári aszályok és hóhullámok gyakorisága nőni fog, a tiszta átfolyós hűtés hosszú távon kockázatosává válik. A készülő **Paks II.** (VVER-1200) esetében a mérnökök szakítottak a kizárólagos Duna-hűtéssel.

Az új erőműhöz úgynevezett **kiegészítő (csúcshűtő) berendezéseket**, azaz ventilátoros hűtőtornyokat is építenek.

- **Működésük:** Amikor a Duna vízállása ideális és a víz hideg, Paks II. is a folyó vizét használja majd a legjobb hatásfok érdekében.
- **Vészforgatókönyv:** Ha a nyári kánikulában a Duna eléri a kritikus szintet, a hűtővíz egy részét áterelik a hűtőtornyokba. Itt a meleg vizet a levegővel érintkeztetik (részleges elpárologtatással és permetezéssel hűtik vissza), így zártabbá válik a terciér kör.

Ez a hibrid megoldás garantálja, hogy a Paks II. a legforróbb augusztusi napokon is képes lesz 100%-os teljesítménnyel, leterhelés nélkül üzemelni, miközben egyetlen tizedfokkal sem melegíti túl a Duna vizét.

IX. Fejezet: Generációk találkozása: Paks I. és Paks II. összehasonlítása

A Paksi Atomerőmű telephelyén jelenleg a nukleáris ipar két különböző korszaka és technológiai színvonala találkozik. Miközben a Paks I. négy darab VVER-440-es blokkja a stabil, kiforrott második generációs technológiát képviseli, addig a szomszédságában épülő Paks II. két darab VVER-1200-as egysége már a legmodernebb, felerősített biztonsági architektúrájú, úgynevezett 3+ generációs színvonalat hozza el. Ebben a fejezetben mérnöki szempontból hasonlítjuk össze a két technológiát.

9.1. Technológiai evolúció: VVER-440 vs. VVER-1200

A VVER (Vodo-Vodyanoy Energeticheskij Reaktor) mozaikszó nyomottvizes, könnyűvizes energetikai reaktort jelent. Az orosz tervezésű reaktorcsalád évtizedes evolúción ment keresztül, amelynek során a fizikai méretek, a teljesítménysűrűség és a termodinamikai paraméterek is jelentősen növekedtek.

A Paks I.-nél alkalmazott **VVER-440/V-213** modell egy robusztus, túlméretezett konstrukció. A viszonylag alacsony specifikus teljesítménysűrűség miatt a reaktormag nagy termikus tehetetlenséggel rendelkezik, ami üzemzavari helyzetben sok időt biztosít az operátoroknak a beavatkozásra.

Ezzel szemben a Paks II. alapját képező **VVER-1200/V-491** (AES-2006 projekt) egy koncentráltabb, sokkal nagyobb hatásfokú és integráltabb rendszer. A fűtőelemek elrendezése, a magasabb üzemi nyomás és hőmérséklet, valamint a gőzfejlesztők optimalizált geometriája lehetővé teszi, hogy feleannyi reaktorblokk is több villamos energiát termeljen, mint a teljes Paks I.

Műszaki paraméter	Paks I. (VVER-440)	Paks II. (VVER-1200)	Fejlődési / Innovációs mutató
Reaktorok száma	4 darab	2 darab	Kompaktizált telephely-kihasználás
Termikus teljesítmény	1485 MW (blokkonként)	3200 MW (blokkonként)	+115%-os hőteljesítmény-növekedés
Villamos teljesítmény	~500 MW (blokkonként)	1200 MW (blokkonként)	+140%-os nettó áramtermelés
Nettó villamos hatásfok	~33,7%	~36,8%	Kevesebb üzemanyag → több áram
Primer köri nyomás	123 bar	162 bar	Magasabb forráspont, jobb hőátadás
Reaktorból kilépő hőfok	297 °C	328,5 °C	Magasabb entalpiájú frissgőz
Tervezett élettartam	30 év (üzemidő-hosszabbítással 50-60 év)	60 év (garantált alap-élettartam)	Hosszú távú beruházás-megtérülés

9.2. Aktív vs. Passzív biztonsági rendszerek

A legjelentősebb generációs különbség nem a teljesítményben, hanem a biztonsági filozófiában rejlik. A fukushimai atomerőmű-baleset után a nukleáris ipar alapszabályává vált, hogy az erőműnek külső áramellátás és emberi beavatkozás nélkül, pusztán a fizika törvényeire támaszkodva is képesnek kell lennie önmagát hűteni.

- **Paks I. (Aktív rendszerek):** A biztonsági funkciókat (üzemzavari zónahűtés, dízelgenerátorok, nagynyomású szivattyúk) elektromos energiával meghajtott aktív gépek végzik. Bár a rendszerek háromszoros (3x100%-os) redundanciával vannak biztosítva, működésükhöz áramra és szelepek mechanikus nyitására van szükség.

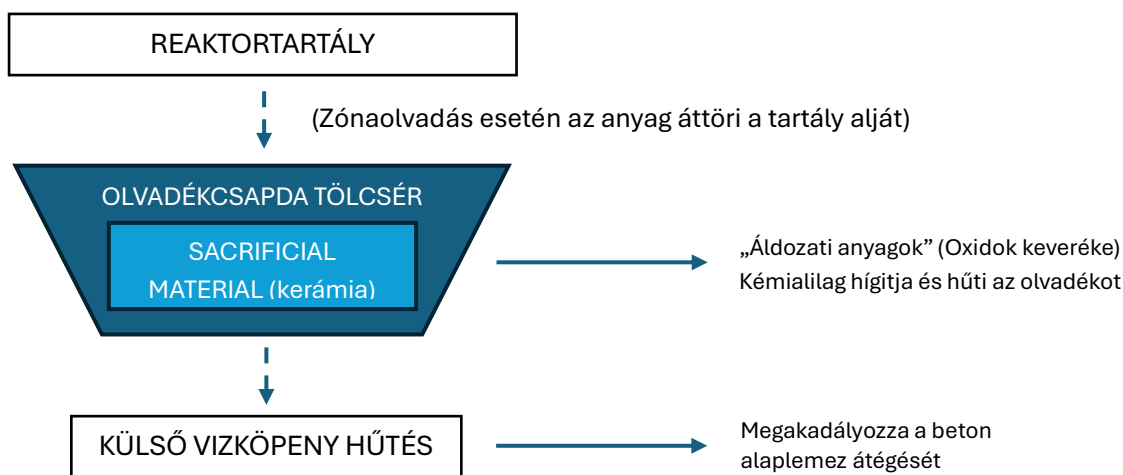
- **Paks II. (Passzív rendszerek):** A 3+ generációs VVER-1200 reaktort felruházták olyan passzív rendszerekkel, amelyek áram, szivattyúk vagy operátori parancs nélkül, **a gravitáció, a természetes konvekció** (hőmérséklet-különbség miatti áramlás) és az **öntágulás** elvén működnek.

A legfontosabb passzív védelmi vonalak a VVER-1200-ban:

1. **Passzív hűtőrendszer (SPOT):** A konténment épületen kívül elhelyezett hatalmas víztartályok és hőcserélők rendszere. Ha a teljes erőmű áramtalanodna (Blackout), a gőzfejlesztőkből a forró gőz magától felemelkedik ezekbe a külső hőcserélőkbe, a levegő vagy a külső víz lehűti, majd a nehezebb hideg víz a gravitáció révén magától visszafolyik a reaktorhoz. Ez a körfolyamat napokig képes hűteni a leállított reaktort emberi beavatkozás nélkül.
2. **Hidroakkumulátoros zónahűtés:** Hatalmas, bórral dúsított víztartályok, amelyeket nagynyomású nitrogéngáz tart nyomás alatt. Ha a primer körben egy csőtörés miatt leesik a nyomás, a gáznyomás magától benyomja a tartályok vizét a reaktormagba, megakadályozva a fűtőelemek szárazra kerülését.

9.3. Az Olvadécsapda (Core Catcher) mechanizmusa

A VVER-1200 technológia egyik leglátványosabb biztonsági innovációja a reaktortartály alatt elhelyezett **olvadécsapda**. Ez egy hatalmas, tölcsér alakú, több mint 150 tonnás acéledény, amely egy esetleges, elméleti zónaolvadásos (szever) baleset következményeinek lokalizálására szolgál.



Ha egy katasztrofális üzemzavar során minden hűtőrendszer csődöt mondana, és az urán-dioxid fűtőanyag a burkolatokkal együtt megolvadna (corium keletkezne), a folyékony, több mint 2000 °C-os fém- és kerámiaolvadék átégetné a reaktortartály alját.

Paks I. esetében a tartály alatt nincs ilyen céledény; ott a beton alaplemez elárasztásával és külső védelmi tervekkel kellene az olvadékokat megfogni.

Paks II.-nél viszont a tartályból kicsorduló izzó olvadék egyenesen az olvadékcsapdába zuhan.

Hogyan működik a csapda?

- **Áldozati anyagok:** A csapda belseje speciális cserélhető kerámia és fénoxid vegyületekkel (vas- és alumínium-oxidokkal) van feltöltve. A becsapódó nukleáris olvadék kémiai reakcióba lép ezekkel az anyagokkal. Az áldozati anyagok felolvadása hőt von el a zónaolvadéktól (hűti azt), csökkenti a sűrűségét, és megakadályozza, hogy az urán kritikus tömegbe rendeződve újra láncreakciót indítson.
- **Külső hűtőköpeny:** Az olvadékcsapda fala kívülről folyamatosan vízzel van elárasztva, így az edény külső fala stabil marad.

Az olvadékcsapda garantálja, hogy a folyékony nukleáris zóna még a legrosszabb forgatókönyv esetén sem képes átégetni a reaktorépület beton alaplemezét, és nem juthat ki a földbe vagy a talajvízbe.

X. Fejezet: A jövő szimbiózisa: Atomerőművek és Adatközpontok kooperációja

A 2020-as és 2030-as évek energiapolitikájának és technológiai fejlődésének két legnagyobb hajtóereje a dekarbonizált, zsinóráramot biztosító atomenergia és a mesterséges intelligencia (MI), valamint a felhőalapú szolgáltatások mögött álló **óriás adatközpontok (Hyperscale Datacenters)**. Az adatközpontok villamosenergia- és hűtési igénye globálisan exponenciálisan növekszik. Ez a fejezet azt elemzi, hogy egy nagykapacitású nukleáris létesítmény (mint a Paksi

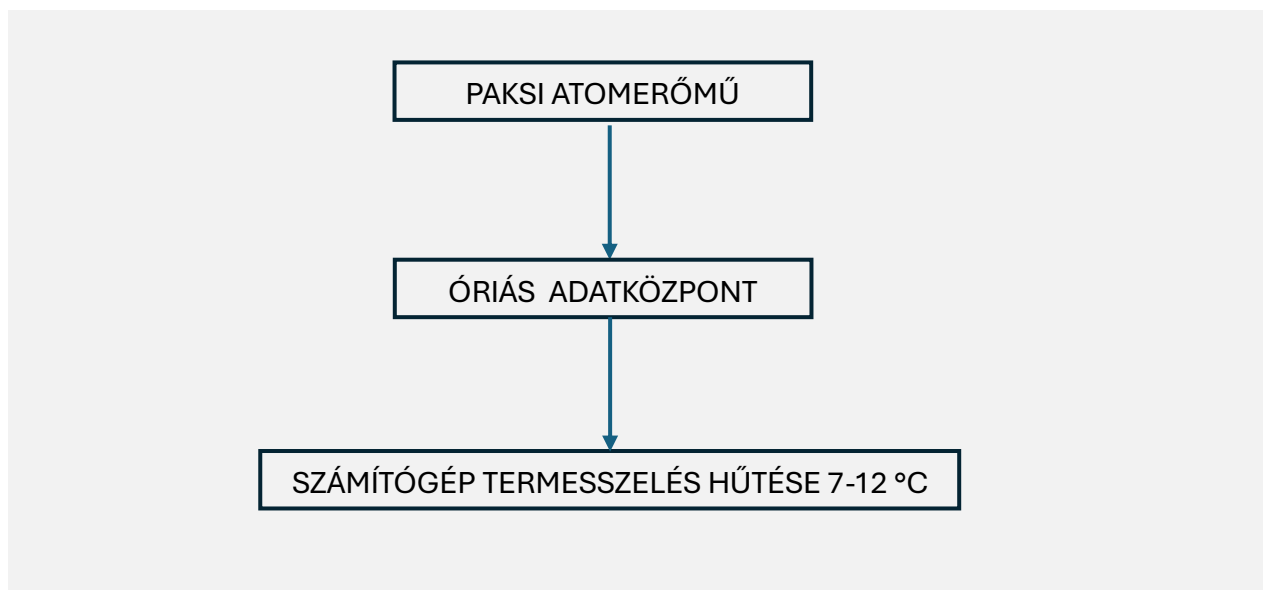
Atomerőmű) és egy modern adatközpont hogyan képes strukturális, energetikai és termodinamikai szimbiózisban működni.

10.1. Az adatközpontok és az atomerőművek hűtési rendszereinek fizikája

Ahhoz, hogy az adatközpont és az atomerőmű közötti fizikai kapcsolatot megtervezzük, tisztáznunk kell az alapvető termodinamikai irányokat. A kiinduló elgondolás – miszerint az adatközpont melegíti elő a Duna-vizet az atomerőmű számára – energetikai szempontból sajnos **rontaná a rendszer hatásfokát**.

Amint azt a VIII. fejezetben bemutattuk, a gőzturbina hatásfoka és a főkondenzátor működése a minél nagyobb **vákuumtól** függ. A vákuumot pedig kizárólag a lehető leghidegebb hűtővíz képes fenntartani. Ha a kondenzátorba belépő Duna-vizet az adatközpont hulladékhőjével előmelegítenénk, a kondenzátorban megemelkedne a nyomás (csökkenne a vákuum), a gőz nem tudna olyan hatékonyan tágulni a turbinalapátokon, és az atomerőmű villamos teljesítménye drasztikusan visszaesne.

A szimbiózis iránya ezért **pontosan fordított**: az atomerőmű szekunder vagy terciér köréből nyert energia képes radikálisan optimalizálni az adatközpont működését és hűtési infrastruktúráját.



Abszorpciós hűtés az erőmű hulladékhőjével

Az adatközpontok szerverei hatalmas mennyiségű hőt termelnek, amelyet folyamatosan el kell szállítani, hogy a chipek ne lépjék túl a kritikus 70-80 °C-os üzemi hőmérsékletet. Ehhez hagyományosan kompresszoros hűtőgépeket (chilereket) használnak, amelyek maguk is elképesztő mennyiségű áramot fogyasztanak (ez az adatközpontok PUE – Power Usage Effectiveness mutatójának romlásáért felelős legfőbb tényező).

Az atomerőmű főkondenzátorából kilépő, kb. 33 °C-os meleg hűtővíz (vagy a szekunder körből minimális gőzelvétellel nyert alacsony potenciálú hő) felhasználható úgynevezett **abszorpciós hűtőgépek** meghajtására.

- Az abszorpciós hűtés egy olyan termodinamikai folyamat, amely nem mechanikai munkát (áramot), hanem közvetlenül **hőenergiát használ fel hideg energia előállítására** (hasonlóan a gázüzemű hűtőszekrényekhez).
- Az atomerőmű „ingyen” hulladékhőjével meghajtott abszorpciós chillerek képesek előállítani az adatközpont szerverterméinek hűtéséhez szükséges 7–12 °C-os hűtővizet.
- **Az eredmény:** Az adatközpont hűtésének villamosenergia-igénye szinte nullára csökken, ami radikálisan javítja a globális energiahatékonyságot.

10.2. Van-e értelme Paks mellé egy óriási számítógépközpontot létesíteni?

A válasz határozottan **IGEN, sőt, ez a modern energetikai tervezés egyik leglogikusabb lépése**. A közvetlenül az atomerőmű mellé telepített (Co-located) hyperscale adatközpont koncepciója számos előnyt hordoz magában:

1. A hálózati veszteségek eliminálása (Mögöttes betáplálás)

Ha az adatközpontot Budapest mellett építik fel, a Paksról származó áramot fel kell transzformálni az országos nagyfeszültségű (400 kV-os) alaphálózatra, el kell szállítani több száz kilométerre, majd ott transzformátorállomásokon keresztül újra le kell transzformálni. Ez a szállítási folyamat a vezetékek ellenállása miatt átlagosan 4–7%-os hálózati veszteséggel (Joule-hővel) jár.

Ha az adatközpont közvetlenül a paksi kerítésen belül, vagy a szomszédos ipari parkban épül fel, az **áramot közvetlenül a generátorok gyűjtősinjéről**, nagyfeszültségű távvezeték-hálózat igénybevétele nélkül kaphatja meg. Egy 500 MW-os adatközpont esetén ez évente több milliárd forintnyi megspórolt hálózati veszteséget jelent.

2. Zsinóráram és 99.999%-os rendelkezésre állás

Az adatközpontok számára a legnagyobb kockázat az áramkimaradás. Az időjárásfüggő megújulók (nap- és szélenergia) ingadozása miatt az adatközpontoknak hatalmas akkumulátortelepeket és dízelgenerátor-parkokat kell fenntartaniuk. Az atomerőmű a nap 24 órájában, az év több mint 90%-ában stabilan, fix teljesítménnyel termel (zsinóráram). Paks I. ráadásul a 2 darab turbina/reaktor elrendezés miatt belső tartalékkal is rendelkezik. Ez a szintű stabilitás tökéletesen egybevág a kritikus adatbázisokat futtató szerverparkok igényeivel.

3. Szuper-szimbiózis a Paks I. és Paks II. átmeneti időszakában

Amint azt a IX. fejezetben bemutatottuk, a 2030-as években Paks I. és Paks II. egy ideig párhuzamosan fog működni, így a telephelyen ideiglenesen akár **4400 MW** villamos kapacitás is rendelkezésre állhat. Amikor a Paks I. blokkjait a 2040-es, 2050-es években végleg leállítják, a felszabaduló hálózati csatlakozási pontok, a meglévő vízkivételi művek, a kiépített nehézipari infrastruktúra és a szigorúan őrzött védelmi zóna (fegyveres biztonsági őrség, nukleáris védettségű kerítés) ideális, kész „barnamezős” lokációt biztosítanak egy konténeres vagy csarnokrendszerű gigantikus adatközpont-komplexum számára.

10.3. Összegző táblázat: Az atomerőmű és adatközpont szimbiózisának előnyei

Szempon	Hagyományos (Távoli) elhelyezés	Paksi Co-located (Szimbiotikus) elhelyezés	Mérnöki / Gazdasági haszon
Villamos hálózati veszteség	4–7% a szállítás és transzformáció miatt	~0% (Közvetlen gyűjtősínes csatlakozás)	Évente több gigawattóra megspórolt tiszta energia.
Adatközpont hűtési áramigénye	Magas (A teljes adatközponti áramfogyasztás 30-40%-a)	Minimális (Atomerőművi hulladékhővel hajtott abszorpciós hűtés)	Drasztikusan lecsökkenő PUE mutató (< 1.1).
Ellátásbiztonság	Kitett a hálózati üzemzavaroknak és megújuló-ingadozásnak	Maximális (Közvetlen nukleáris zsinóráram forrás)	Nincs szükség gigantikus akkumulátor- és dízelparkokra.
Fizikai és kibervédelem	Standard ipari biztonsági szint	Nukleáris szintű védelem (Légtérzár, fegyveres őrség, fizikai izoláció)	Kiemelt kormányzati és katonai adatok biztonságos tárolása.
Környezeti terhelés	Különálló területek és új vízkivételi művek építése szükséges	Közös infrastruktúra-használat (A Duna-víz kombinált hasznosítása)	Kisebb ökológiai lábnyom, integrált hatásvizsgálat.

Összegzés és konklúzió

A 21. század közepének technológiai kihívásaira a választ az integrált energetikai rendszerek jelentik. Az atomerőmű és az adatközpont szimbiózisa nem csupán egy elméleti mérnöki elképzelés, hanem a jövő digitális infrastruktúrájának alapköve.

Az atomerőmű biztosítja a stabil, karbonmentes alapterhelést és a működéshez szükséges gigantikus energiamennyiséget, miközben az adatközpont hasznosítja az erőmű környezetbe távozó veszteséghőjét abszorpciós hűtési ciklusokon keresztül. Ez a zárt láncú, körforgásos szemlélet biztosítja, hogy Magyarország a Paks II. megépülésével ne csak az áramtermelésben, hanem a jövő legfontosabb nyersanyagának, az adatoknak a feldolgozásában és tárolásában is globálisan versenyképes, fenntartható pozíciót foglaljon el.

Irodalomjegyzék

I. Szakirodalom és Tankönyvek (Nyomtatott és Elektronikus)

- **Aszódi, A. & Boros, I.** (2018). *Bevezetés az atomenergetikába: Nyomottvizes reaktorok üzemtana és termohidraulikája*. Budapest: Műszaki Könyvkiadó.
- **Csom, Gy.** (2002). *Atomerőművek üzemtana I-II. kötet*. Budapest: Műegyetemi Kiadó.
- **Glasstone, S. & Sesonske, A.** (2012). *Nuclear Reactor Engineering: Reactor Systems Engineering* (4th ed.). New York: Springer Science & Business Media.
- **Horváth, L. G.** (2021). *Fémek elektrokémiai korróziója és védelme energetikai rendszerekben*. Veszprém: Pannon Egyetemi Kiadó.
- **Lamarsh, J. R. & Baratta, A. J.** (2017). *Introduction to Nuclear Engineering* (4th ed.). Boston: Pearson.
- **Szatmáry, Z. & Aszódi, A.** (2009). *Csernobil: Tények, okok, következmények*. Budapest: Typotex Kiadó.
- **Todreas, N. E. & Kazimi, M. S.** (2011). *Nuclear Systems I: Thermal Hydraulic Fundamentals* (2nd ed.). Boca Raton: CRC Press.

II. Hivatalos Jelentések, Szabályzatok és Intézményi Források

- **IAEA (International Atomic Energy Agency).** (2019). *Passive Safety Systems and Advanced Features in Nuclear Power Plants*. (IAEA-TECDOC-1874). Vienna: International Atomic Energy Agency.
- **MVM Paksi Atomerőmű Zrt.** (2024). *Biztonsági Jelentés és Környezetvédelmi Monitoring Adatok*. Paks: MVM.
- **OAH (Országos Atomenergia Hivatal).** (2025). *Magyarország Nemzeti Jelentése a Nukleáris Biztonságról*. Budapest: OAH.
- **Paks II. Atomerőmű Zrt.** (2023). *Műszaki Tervezési és Biztonsági Alapdokumentáció: VVER-1200 (3+ Generáció)*. Paks: Paks II. Zrt.
- **WENRA (Western European Nuclear Regulators Association).** (2021). *Safety Reference Levels for Power Reactors*. Brussels: WENRA.

III. Online és Időszaki Tudományos Források

- **MVM Paksi Atomerőmű Zrt. Hivatalos Honlap.** *Hogyan működik az atomerőmű? – Technológiai leírások és körfolyamatok*. Elérhetőség: mvm.hu.
- **Országos Atomenergia Hivatal (OAH).** *Nukleáris biztonsági engedélyezési eljárások és határozatok*. Elérhetőség: haea.hu.
- **Radioaktív Hulladékokat Kezelő Kft. (RHK).** *A kis és közepes aktivitású hulladékok végleges elhelyezése Bábaapátiban*. Elérhetőség: rhk.hu.

- **U.S. Department of Energy (DOE).** (2024). *Co-locating Hyperscale Datacenters with Nuclear Power Plants: Infrastructure and Thermal Efficiency Options*. DOE Technical Reports.

IV. Szövegekőzi Referencia Hivatkozások Jegyzéke (Fejezetenkénti Rendben)

- **I. Fejezethez (Korrózió és vízkémia):**

- Horváth (2021) alapján a száraz gázkorrózió kinetikája és a passzivációs oxidréteg stabilitása.
- MVM Paksi Atomerőmű Zrt. (2024) specifikus adatai az ionmentesített víz elektromos vezetőképességének és pH-értékének szabályozásáról.

- **II. Fejezethez (Láncreakció):**

- Lamarsh & Baratta (2017) alapján a négytényezős szorzat, a multiplikációs tényező (k) és a termikus neutronok hatáskeresztmetszetének egyenletei.
- Csom (2002) a bór-10 és a kadmium neutronabszorpciós mechanizmusáról.

- **III. és IV. Fejezethez (Architektúra és termohidraulika):**

- Todreas & Kazimi (2011) a nyomottvízes reaktorok (PWR/VVER) többkörös elszigetelésének elvéről és a kétfázisú áramlási korlátokról.
- Aszódi & Boros (2018) a VVER-440 típusú térfogatkompenzátor gőzpárna-dinamikájáról és a 123 bar-os rendszernyomás fenntartásáról.

- **V. Fejezethez (Sugárzás és izotópok):**

- Szatmáry & Aszódi (2009) a neutronaktivációs reakciókról, különös tekintettel az $^{16}\text{O}(n,p)^{16}\text{N}$ átalakulásra.
- RHK (2025) a primer körű ioncserélő gyanták és a Bábaapátiba szállított közepes aktivitású hulladékok kezelési protokolljáról.

- **VI. és VII. Fejezethez (Szekunder kör és gépészet):**

- Glasstone & Sesonske (2012) a Carnot-ciklus atomerőművi korlátairól és a nedves gőz cseppleválasztásának fontosságáról.
- MVM Paksi Atomerőmű Zrt. (2024) gépészeti leírásai a Ganz-generátorok 3-4 bar nyomású hidrogénhűtéséről és a hidrodinamikus csapágyazásról.

- **VIII. és IX. Fejezethez (Tercier kör és Paks II.):**

- Paks II. Atomerőmű Zrt. (2023) a VVER-1200 reaktortípus SPOT (passzív hőelvonó) és olvadékcsapda (core catcher) rendszereinek műszaki specifikációiról.
- OAH (2025) a Duna 30,0 °C-os környezetvédelmi korlátjára vonatkozó hatósági előírásokról és a leterhelési szabályzatokról.

- **X. Fejezethez (Adatközpont szimbiózis):**

- U.S. Department of Energy (DOE) (2024) kutatási jelentése az atomerőművek mögötti (co-located) adatközponti architektúrákról és az abszorpciós hűtőberendezések integrálhatóságáról.