

**PÉCSI TUDOMÁNYEGYETEM
TERMÉSZETTUDOMÁNYI KAR
KÖRNYEZETTUDOMÁNYI INTÉZET**

**A jövő (2010-2030) újabb generációs atomerőművei”
SZAKDOLGOZAT**

Készítette:
Agócs Ágnes
biológia-környezettan tanárszakos hallgató

Témavezető:
Dr. Német Béla
egyetemi docens
PTE TTK Fizikai Intézet, Környezetfizika és Lézerspektroszkópia Tanszék



PÉCS, 2010.

A JÖVŐ (2010-2030) ÚJABB GENERÁCIÓS ATOMERŐMŰVEI

1. Fejezet: Mi is az az atomenergia (ma) ?

- a. Bevezetés
- b. Atomerőművek működési elve
- c. Érvek és ellenérvek
- d. Első és második generáció bemutatása
- e. Felmerülő problémák
- f. Fejlesztési célok

2. Fejezet: Újabb generációs atomerőművek:

- a. G3 generáció célkitűzései
- b. Főbb G3 típusok bemutatása
- c. G4 generáció célkitűzései
- d. G4 generáció reaktortípusainak bemutatása

3. Fejezet: Fukushima és tanulsága:

- a. Az erőmű típusának jellemzése
- b. Építési adatok-védelmi rendszerek
- c. A baleset lefolyása
- d. Eddigi hatások
- e. Konklúzió

4. Fejezet: Szakmódszertan

1. Fejezet: Mi is az az atomenergia (ma) ?

Eben a fejezetben az atomerőművek működési alapját, az atomerőművek első két generációját és a felmerült fejlesztési célokat kívánom bemutatni.

Bevezetés:

A világ villamos energia igénye folyamatosan növekszik. Az energiaigények kielégítéséhez megújuló és nem megújuló energiaforrásokat vehetünk igénybe. A nem megújuló energiaforrások közé tartozó fosszilis energia több szempontból is problémás. Egyrészt a fosszilis energiahordozók égetése során nagy mennyiségű üvegházhatást okozó gáz kerül ki a levegőbe. Másrészt ezeknek a mennyisége folyamatosan csökken. Továbbá a fosszilis energiahordozók területei eloszlása és az energiaigények mértéke sem egyenletes. Ez az ellátásbiztonságot kockázatosná teszi. A megújuló energiaforrások nem mindegyik ország esetében használhatók ki. Általában az összes energiatermelésben csak kis százalékot jelentik. Magyarország esetében ez 2007-es adatok szerint 5,5 %.¹ A megújuló energiaforrások mind például a nap- és szélenergiák nem a fogyasztói igényeknek, hanem az időjárásnak megfelelően állnak rendelkezésre. A megújuló energiaforrások zömében nem használhatók alaperőművekként (kivételt jelent: biomassza és a víz), mivel a termelésben a napszakok és időjárási viszonyok miatt jelentős ingadozás várható. A megújuló energiaforrásoknak jelentős szerepe van és lesz. De nem az atomenergia helyett, hanem az atomenergia mellett. Jelenleg mintegy 440 blokk üzemel. Ezen blokkok összteljesítménye mintegy 380 ezer megawatt, ami az összes villamosenergia-termelésnek mintegy 17%-át alkotják.² Az atomenergia használata jobban elterjedt. Pl. Európa országaiban az atomenergia a villamosenergia-termelésben jelentős szerepet játszik. Az atomenergia Franciaországban az összes villamosenergia-termelés 77,07%-át teszi ki, Magyarország esetében ez mintegy 40%.

¹ Megvalósíthatósági tanulmány- MTA KFKI AEKI, 2009. március

² Paksi atomerőmű üzemidő hosszabbítása <http://www.atomeromu.hu/uzemido-hosszabbitas>

Atomerőművek működési elve:

Atomenergiának nevezzük a magreakciók eredményeként felszabaduló energiát. Ezt az energiát más néven nukleáris energiának is nevezzük.³ Az első atomreaktort 1942-ben, Chicagóban Szilárd Leo és Enrico Fermi építették meg.

A maghasadás, mint láncreakció az atomerőmű központi részében az atomreaktorban zajlik le.⁴ Az atomreaktor pedig egy olyan berendezés, amelyben a nagy mennyiségű hasadóanyag felhasználásával szabályozott láncreakció valósul meg.⁵

A maghasadási reakció felfedezése pedig Enrico Fermi, Joliot Curie, Hahn, Strassman nevéhez fűződik (1938-39). Kezdetben a maghasadást plutónium termelésre használták fel.⁶ A ma működő atomreaktorok döntő többségében U-235-ös uránizotópot használják fel a magreakciók során. Az U-235-ös izotóp a természetes urán mintegy 0,7 %-át teszi ki. A természetes urán 99,3 %-át U-238-as uránizotóp alkotja. Ez azonban csak ritkábban hasad. Gyakorlati jelentősége az U-235-ös izotópnak van. Egy U-235 elhasadásakor kb. 200 MeV azaz $3,2 \cdot 10^{-17}$ J energia szabadul fel.⁷ A jelenlegi felhasználás során a 235 U uránizotóp lassú, azaz termikus neutronok hatására két radioaktív atomra és neutronokra esik szét. A keletkező neutronok segítségével újabb magreakciók mennek végbe. A maghasadás folyamatossága a láncreakció segítségével valósul meg. A keletkező neutronok azonban túl gyorsak, ezért le kell lassítani őket. A lelassítás a moderátor feladata. A lassú vagy termikus neutronok nagyobb valószínűséggel hoznak létre újabb maghasadást ezzel is biztosítva a láncreakciót.

A maghasadás során több neutron keletkezik, hogy ezek közül mennyi a hatásos, azaz az újabb maghasadást létrehozó neutron, ezt az értéket pedig a sokszorozódási tényező adja meg. A sokszorozódási tényező jele: K. Ha a $K < 1$, akkor a reakció nem önfenntartó és leáll. Ha $K = 1$ akkor a rendszer/ folyamat úgy mond kritikus. Ez azt jelenti, hogy a rendszer önfenntartó, de nem indulnak be megfékezhetetlen folyamatok. Ha $K > 1$, akkor a rendszer superkritikus állapotú, megszalad, azaz a láncreakció fékezhetetlen és robbanás következik be (atombomba). Az atomreaktorok működésük során kritikus rendszerként működnek, azaz $K = 1$. A maghasadások önfenntartó láncreakciója az atomreaktorban zajlik.

Az atomreaktor részei:

1. Hasadóanyag, tüzelőanyag
2. Moderátor
3. Szabályozó rudak
4. Reflektor
5. Hűtőközeg
6. Védőberendezések

Ezeket a fontosabb részeket mutatja be az alábbi sematikus ábra, amely egy reaktor felépítését mutatja be:

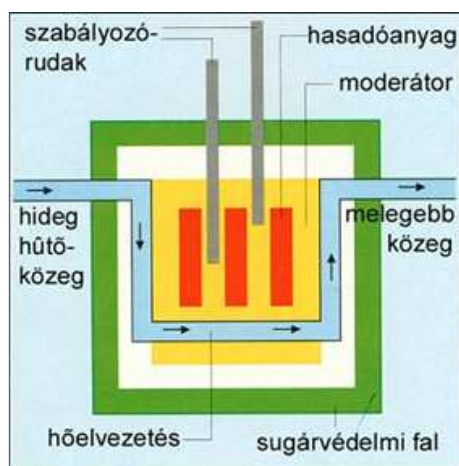
³ Az atomenergia felhasználása; <http://www.nyf.hu/others/html/kornyezettud/Kemia-I/Kornykemalapmenu/atomefelhasz.htm>

⁴ <http://hu.wikipedia.org/wiki/Reaktor>

⁵ Az atomerőművek típusai- <http://www.atomeromu.hu/az-atomeromuvek-tipusai>

⁶ Az atomenergia felhasználása; <http://www.nyf.hu/others/html/kornyezettud/Kemia-I/Kornykemalapmenu/atomefelhasz.htm>

⁷ <http://www.atomeromu.hu/atomreaktor/maghasadas>



1. ábra

A hasadóanyag adja a nukleáris termelés alapját, ez az energiaszolgáltató anyag. Ez lehet urán, plutónium, tórium is különböző vegyületek formájában.⁸ A jelenleg leggyakrabban használt hasadóanyag a 235-ös uránizotóp. Ennek az izotópnak a felezési ideje $7,04 \times 10^8$ év. A 235-ös uránizotóp bomlási sorának végső terméke a 206-os ólom izotóp. Az újabb generációs erőműveknél a tórium termelésbe való bevonása is megtörténhet. A 232-es tórium izotóp felezési ideje $1,405 \times 10^{10}$ év. Ennek a bomlási sornak a végső eleme a 208-as stabil ólomizotóp. A 235-ös uránizotóp mellett a későbbiekben a 238-as uránizotópot is kívánják hasznosítani. Ez az izotóp a leggyakoribb uránizotóp. Ennek a felezési ideje $4,468 \times 10^9$ év. A hasadási sor végső elem a stabil 206-os ólom izotóp.⁹

A tüzelőanyag, más néven a hasadóanyag pálcákba van töltve ezek a pálcák pedig kötegeket alkotnak. A kötegekben a pálcák között elegendő hely van ahhoz, hogy a hűtőközeg szabadon áramoljon. A fűtőelempálcákban a hasadóképes anyag koncentrációja a reaktor működése során folyamatosan csökken, emiatt csökken a hőteljesítmény is. Azaz a fűtőelem kimerül.¹⁰

A hasadások során keletkező neutronok energiáját a moderátor szabályozza, lassítja (termikus neutronok előállítás). Moderátor lehet anyaga szerint: nehézvíz (HWR), könnyűvíz (LWR), grafit, szerves anyag.¹¹ Vannak azonban olyan reaktorok is, amelyek moderátor nélküliek. Ezeket a reaktorokat gyors reaktoroknak is nevezik. A nagy neutronfluxus teszi lehetővé a transzmutációt. Ennek következtében például a tóriumból hasadóképes elem kapható. Ezért hívják ezt a típust tenyésztőreaktornak is.¹² A reakció önfenntartó működéséhez feltétlenül fontos a keletkező neutronok számának szabályozása is. Ezt a feladatot a szabályozó rudak látják el. A szabályozó rudak anyaga lehet: kadmium (Cd) és Bór (B) is. A hasadás során keletkező neutronok hasadási zónából való kijutását gátolja meg a reflektor felület. A hasadás során keletkező hőenergia elvezetésére szolgál a hűtőközeg. Hűtőközeggként nehézvíz, könnyűvíz, nátrium, hélium, szén-dioxid szolgálhat. Kétféle hűtőközeget különböztetünk meg: primer és szekunder. A primer veszi át a maghasadás során keletkező hőt és hőcserélő felületen keresztül adja át a hőt a szekunder hűtőközegnek. A szekunder hűtőközeg segítségével történik a hőenergia elektromos energiává alakítása, azaz az elektromos áram termelése. A két hűtőközeg

⁸ Az atomenergia felhasználása; <http://www.nyf.hu/others/html/kornyezettud/Kemia-I/Kornykemalaplmenu/atomefelhasz.htm>

⁹ Radioaktivitás <http://hu.wikipedia.org/wiki/Radioaktivit%C3%A1s>
¹⁰ <http://hu.wikipedia.org/wiki/Reaktor>

¹¹ Az atomenergia felhasználása; <http://www.nyf.hu/others/html/kornyezettud/Kemia-I/Kornykemalaplmenu/atomefelhasz.htm>

¹² <http://hu.wikipedia.org/wiki/Reaktor>

egymással nem érintkezik közvetlenül.¹³ A hűtőközeg a reaktorban termelődő hőt szállítja el. A termelődő hő segítségével a gőzfejlesztőben nagy nyomású-és hőmérsékletű gőzt állítanak elő, ez hajtja meg a turbinákat. A turbináról lejutó gőz lehűtéséhez, kondicionálásához szükség van hideg vízre, amit pl. Paks esetében a Duna biztosít. Az atomerőművek jó része a hűtés miatt vízigényes. A hűtést azonban nemcsak folyóvíz vagy bármilyen más vízforrás segítségével, hanem hűtőtornyokkal is meg lehet oldani. Az atomerőművekkel szemben ugyanis egy komoly támadási pont, hogy a hűtővíz miatt az élővíz hőmérséklete túlzott mértékben megnő. Paks esetében eddig erre nem került sor. Azonban a Duna egy újabb blokkot már nem tudna kiszolgálni. Egy erőmű környezeti terhelése sok tényezőtől függ. Mekkora az adott folyam vízhozama, milyen hőmérsékletű a víz. Télen még nem jelent komolyabb problémát. De ha alacsony vízhozam és magas hőmérséklet mellett már nehezebben tudja ellátni a hűtőközeg szerepét a folyó. Ezért az újabb blokk(ok)hoz Paks esetében már Heller-féle hűtőtornyot is terveznek. Azaz nyáron nem terhelné a folyó vizét. A Heller-Forgó rendszer pontosan ezt küszöböli ki. A hűtőtorny mérete az erőmű teljesítményétől függ. Egy torony több blokkot is kiszolgálhat. A hűtőtornyok alkalmazására már számos példa van, nemcsak atomerőművek esetén.

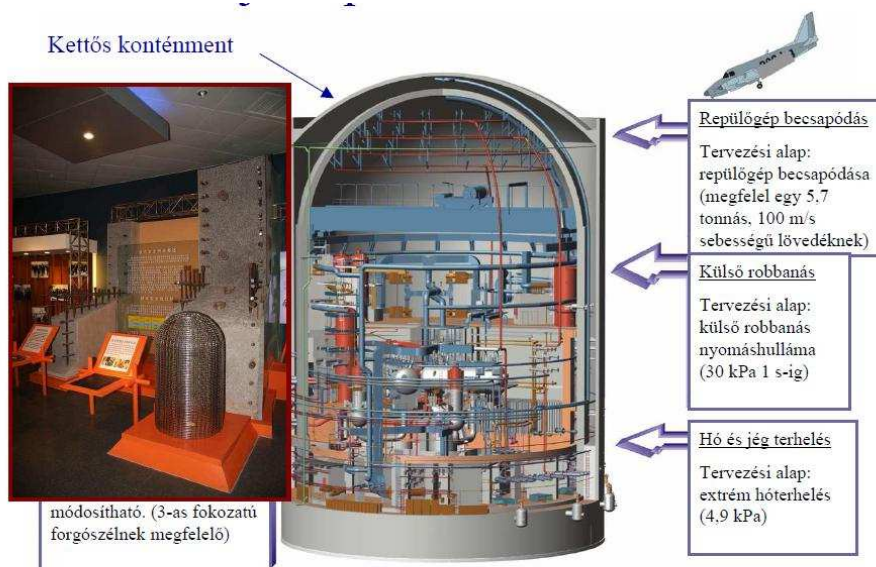
Az atomerőmű biztonságos működését a védelmi berendezések segítségével biztosítják. A védőberendezések feladata, hogy megakadályozzák, hogy sugárzóanyag kerüljön ki a környezetbe. A konténmentnek nagyon fontos szerepe van a sugárzás kijutásának megakadályozásban.

Az atomerőművek biztonságosságának növeléséhez ma már nemcsak a belső folyamatok biztonságosabbá tételét. Se belső problémák miatt ne juthasson ki sugárzóanyag a környezetbe, se külső okok miatt.

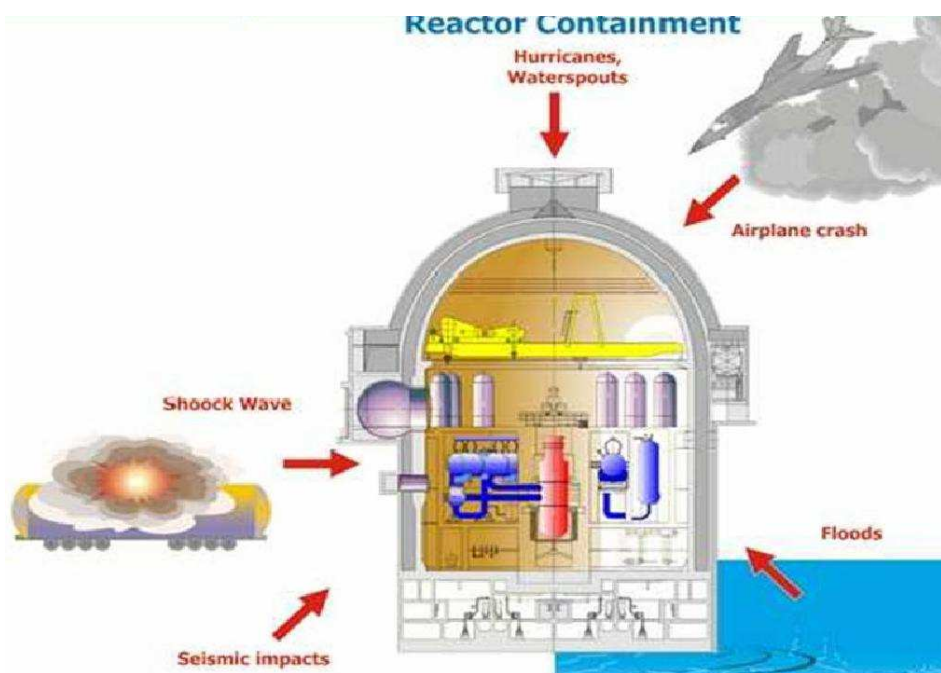
Belső okok: a zóna sérülése (baleset) miatt a konténment hiánya vagy sérülése esetén juthatna ki sugárzó anyag a környezetbe. Csernobilra gondolnak sokan egy esetleges balesetnél. A csernobili erőmű esetében azonban nem volt olyan védőépület, konténment, ami felfoghatta volna a robbanást. Azaz az atomerőművek biztonságosságát egy többlépcsős mérnöki gát nagyban megnöveli. Így az esetleges problémák lokalizálhatóak és a környezetbe nem, vagy alig juthat ki bármilyen szennyezés. A másik probléma, ha nem egy belső folyamat hatásának kijutását kell megakadályozni, hanem egy külső esemény hatását kell kivédeni. Azaz egy külső ok miatt ne következhesen be baleset.

Külső okok között természetes és mesterséges okok szerepelhetnek: földrengés, forgószél, és nem természetcsapásként maga az ember! Az erőműnek képesnek kell lennie a terrortámadás elleni védekezésre. Azaz az atomerőműveket egy esetleges külső támadással szemben is biztonságossá kell tenni. Ehhez egy olyan vastagságú védőépületet kell tervezni hozzá, amelyik kibírja egy utasszállító rázuhanását, egy rázuhanó bomba felrobbanása által kiváltott nyomást. Itt nemcsak a védőfal vastagsága játszik fontos szerepet, hanem az alakja is. Pontosán emiatt a védőépület nem szögletes, hanem kupolaszerű kialakítású. Ezáltal is növelve a védőépület teherbíróságát. Már a harmadik generációs erőműveknél megvalósítani kívánt cél. Az olkiloutoi erőmű esetében is. Az olkiloutoi erőmű védőépülete dupla falu, amely számítások szerint meg tudná védeni a reaktort egy a terroristák által rávezetett utasszállítógép becsapódásától. Emellett 3-mas erősségű forgószél ellen is véd.

¹³ Az atomenergia felhasználása; <http://www.nyf.hu/others/html/kornyeztud/Kemia-I/Kornykemalapmenu/atomefelhasz.htm>



2. ábra: A konténment teherbírása



3. ábra: konténmentre ható külső erők¹⁴

Atomreaktorokat különböző célokkal üzemeltnek: oktatási, kutatási, energiatermelési céllal.¹⁵

¹⁴ Dr. Csom Gyula, Dr. Fehér Sándor: Harmadik és negyedik generációs atomerőművek, <http://www.enpol2000.hu/files/Csom%20-%20Atomeromuvek.ppt>

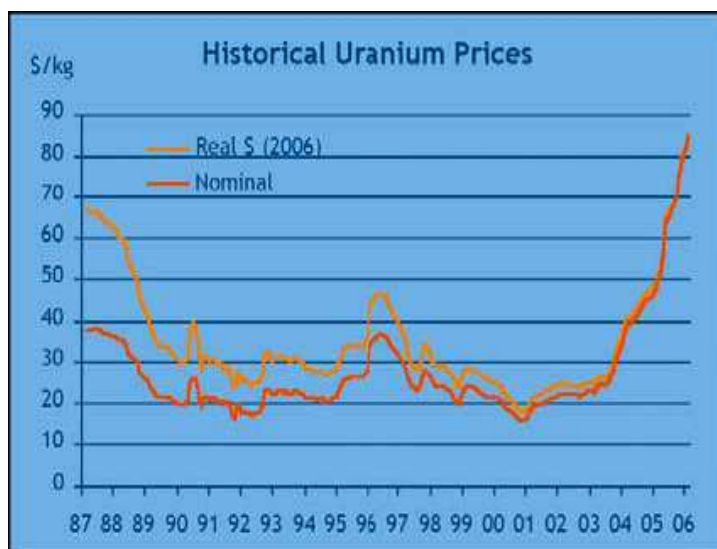
¹⁵ Az atomenergia felhasználása; <http://www.nyf.hu/others/html/kornyezettud/Kemia-I/Kornykemalapmenu/atomefelhasz.htm>

Érvek és ellenérvek az atomenergia mellett és ellen

Az atomenergia mellett és ellen számos érv szól. Amikor atomerőmű létesítésének kérdésében kell dönteni, akkor mindezeket figyelembe kell venni. Ezek között vannak a már korábban említett gazdasági, ellátás-biztonsági kérdések, földrajzi adottságok és környezetvédelmi kérdések is. Nézzük meg ezeket, a szempontokat az atomenergia mellett szóló érvek esetén. Sok érv esetén ezek a szempontok összemosódnak.

Az atomerő mellett szólnak a következő érvek:

- Az atomerőműveket hosszú élettartamra tervezik, 60 évre.
- Az atomerőmű olyan erőmű, amely nem bocsát ki üvegházhatást okozó gázokat. (környezetvédelmi szempontból ez egy rendkívül fontos szempont).
- Ellátásbiztonság szempontjából fontos: ezt politikailag stabilabb országokból be tudjuk szerezni; könnyen tárolható; jóval nagyobb készletek vannak ebből, mint amivel a fosszilis energiahordozók esetén számolhatunk.
- Szintén ellátás-biztonsági szempontból nem utolsó, hogy a fosszilis energiahordozókhöz képest az áremelkedés az áram-előállítási költségét csekélyebb mértékben emeli meg.
- A nukleáris erőműveknél az áramtermelési költségnek csak legfeljebb 5%-át teszik ki az uránfelhasználás költségei.¹⁶ Ezt az alábbi grafikon is bizonyítja:



4. ábra: az urán árának alakulása

- Az atomerőművekben az ipari balesetek bekövetkezésének valószínűsége sokkal kisebb, ez statisztikailag is bizonyított.
 - Az atomerőmű létesítése során szigorú mérőrendszert építenek ki.
 - Nem foglal el nagy terület az erőmű, nem vesz ki a termelés alól további területeket.
- Az atomenergia hátrányaiként felsorolt érvek egy része az erőmű létesítésével kapcsolatos nehézségekkel, több szerelési munkával, az emberek atomenergiával kapcsolatos félelméről, valamint környezetvédelmi kérdésekkel kapcsolatos.

Az atomenergia hátrányai:

- A beruházási költség nagyobb, mint más erőművek esetén.
- Az engedélyezési eljárás, a beruházás előkészítése hosszadalmasabb.
- Több szerelés, építési feladat van, nagyobb erőforrási igénye van: gépi és élőmunka.

¹⁶

Bank Klára: Atomenergia a világban <http://foldrajz.ttk.pte.hu/regionalis/letoltes/vilag.ppt>

- Az emberek egy jó része félinformációk miatt fél az atomenergiától/atomerómútól.
- A korábban előfordult meghibásodások, balesetek növelik az atomenergiával szemben való félelmet.
- Környezetvédelmi szempontból fontos kérdés az üzemeltetés során keletkező radioaktív hulladék megfelelő kezelése, és aktivitásának megfelelő elhelyezése

A hátrányok nagy része megfelelő tevékenységek segítségével megoldható, (a műszaki és szervezési intézkedések folyamatos alkalmazása a meghibásodások elkerülésére. Az emberek megfelelő tájékoztatásával, jól szervezett munkautemmel, megfelelő szoros programozással).¹⁷

- Nukleáris energiától való félelem:

Korábbi balesetek miatt kialakult a nukleáris energiától való félelem. A baleseti statisztikák azonban pontosan jelzik, hogy a nukleáris balesetek lehetőségének kockázata mennyire kicsi a közlekedés, a helytelen életvitel által adódó kockázathoz képest. Ezt néhány statisztikai adattal is szeretném alátámasztani.

Az egyik statisztika olyan adatokkal dolgozik, amely azt vizsgálja meg, hogy az egyes rizikófaktorok milyen mértékben rövidítik meg az ember életét (nap):

- A dohányzás férfiaknál 2250 nap, nőknél 800
- Rák 980 nap
- Agyvérzés 520 nap
- Veszélyes munka-baleset: 300
- Gépjárműbaleset: 207
- Átlagos munka baleset 74
- Reaktor baleset-atomenergia ellenes csoport szerint: 2 nap
- Reaktor baleset- Rasmussen: 0,02 nap¹⁸

Jól látható, hogy a reaktorbaleset, mint kockázati tényező igencsak eltölpül a többi hétköznapi veszélyforrás mellett.

Az atomeróművek akkor tekinthetők biztonságosnak, ha belőlük a környezetbe semmilyen sugárzóanyag nem kerül ki a környezetbe. Ezt mérnöki gátak segítségével próbálják megakadályozni. Ha a környezetbe sugárzóanyag kerül ki, akkor a sugárzás mértékétől függően óvintézkedéseket vezetnek be. Ezeknek célja, hogy megakadályozzák a sugárzóanyag szervezetbe való bejutását. Az élőlényekre a sugárzóanyag akkor jelent veszélyt, ha valamilyen formában a szervezetbe jut. A leggyakrabban belélegzéssel, evéssel vagy ivással juthat be a szervezetünkbe a sugárzóanyag. Ezért például a csapvíz fogyasztás korlátozásával vagy tiltásával, élelmiszerek ellenőrzésével, szájmazsk használatával a bejutást meg lehet akadályozni.

A radioaktív jód pajzsmirigybe való beépülése ellen pedig egyszeri jódtabletta bevitelével védekeznek. A jódtabletta csak szükség esetén adható. Ezáltal a pajzsmirigy telítődik jóddal, így a radioaktív jód nem tud beépülni.

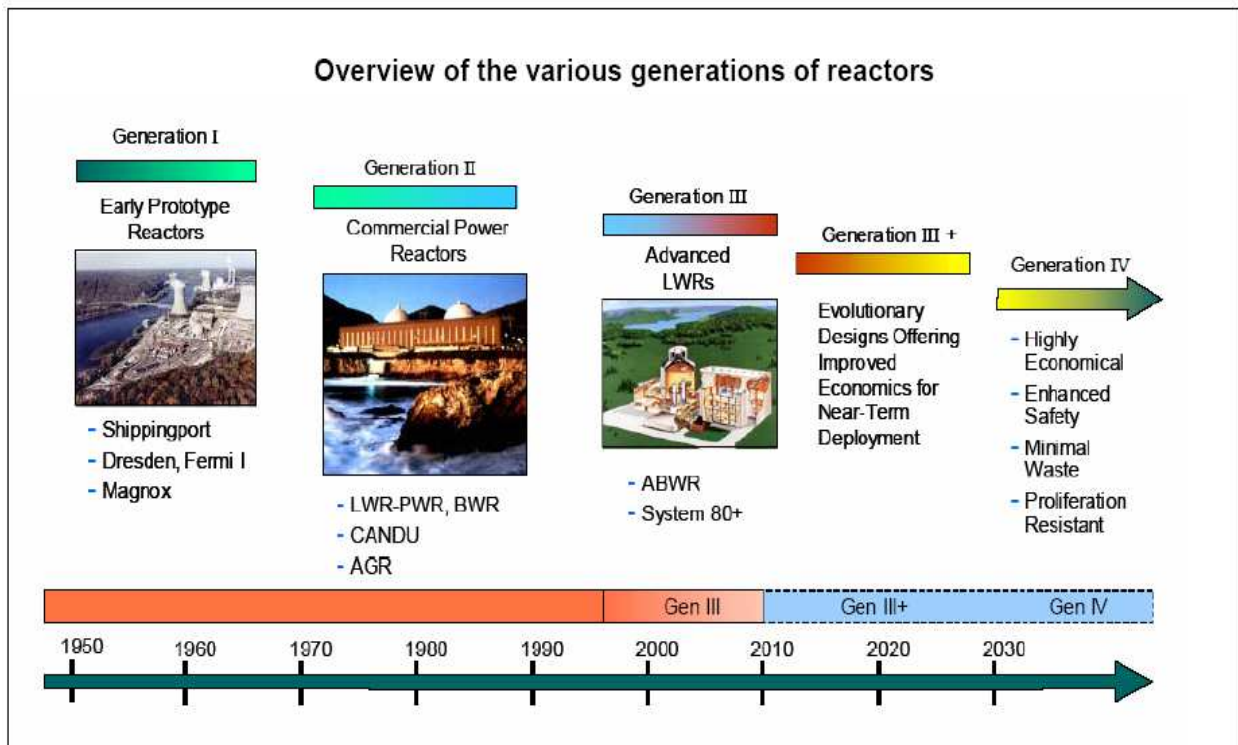
A folyamatos fejlesztések és a szigorodó előírások miatt annak az esélye, hogy nukleáris baleset történjen egyre inkább csökkenni fog. Az atomeróművek újabb generációi egyre tökéletesebbek és egyre nagyobb fokú biztonság megvalósítására törekednek.

¹⁷ Megvalósíthatósági hatástanulmány-MTA KFKIAEKI, 2009. március

¹⁸ Féljünk okosan: <http://www.atomeromu.hu/feljunk-okosan>

Az atomerőművek nemzedékei:

Az atomerőműveket négy generációba oszthatók.



5. ábra: Az atomerőművek generációi¹⁹

Az első generációba tartozó erőműveket az 50-es, 60-as években építették. Ezek ma már nem üzemelnek. Az Egyesült Államokban, Szovjetunióban, Angliában és Franciaországban is építettek ilyen erőműveket. Az Egyesült Államokban például Shippingport, Dresden, Fermi 1 voltak első generációs erőművek. Szovjetunióban a Novovoronyezs-1, Obnyinszk voltak ilyen reaktorok.²⁰

A második generációba tartozik a ma működő atomerőművek többsége. Ezeket zömében a 70-es és 80-s években építették. Ide tartozik a Paksi Atomerőmű is.

A harmadik generációba tartoznak a ma és a közeljövőben építendő erőművek

A negyedik generációs erőművek polgári célra történő felhasználása legkorábban 2030-ban kezdődhet meg.²¹

Az első generációs atomerőműveket még természetes uránnal működtették. Az Obnyinszki erőmű 1954-ben kapcsolódott a hálózatba és egészen 2002-ig működött. Ez volt a későbbi RBMK atyja. Az angliai Wylfa-ban és Oldbury-ban működnek (?) első generációs blokkok. A második generációs erőműveket a hetvenes és nyolcvanas években építették. A második generációs erőművek az első generációs erőművek továbbfejlesztéséből származnak. Az első generációs erőművek közül a biztonságosabb típusokat fejlesztették tovább (kivételek: RBMK).²²

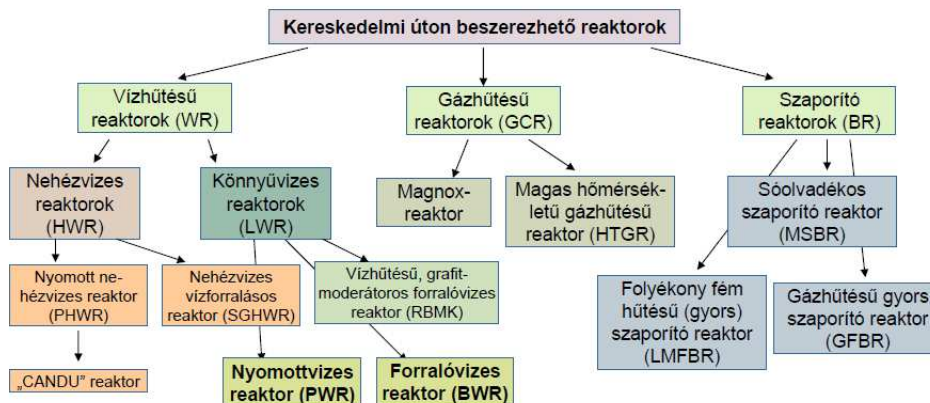
¹⁹ Végh János: A korszerű, kereskedelmileg is elérhető, szóba jöhető típusok 2010.01.18-
www.atomeromu.hu/download/.../Lehetséges%20reakortípusok.pdf

²⁰ Atomerőművek, 2010.01.18
<http://www.zmne.hu/tanszekek/vegyl/personal/Atomeromuvek.pdf>

²¹ Végh János: A korszerű, kereskedelmileg is elérhető, szóba jöhető típusok 2010.01.18
www.atomeromu.hu/download/.../Lehetséges%20reakortípusok.pdf

²² Aszódi Attila: 1. 2. 3. 4. generációs atomerőművek
http://www.reak.bme.hu/fileadmin/user_upload/felhasznalok/aszodi/letoltes_eloadasok/Aszodi_ETESenior_Bp_20090212_.pdf

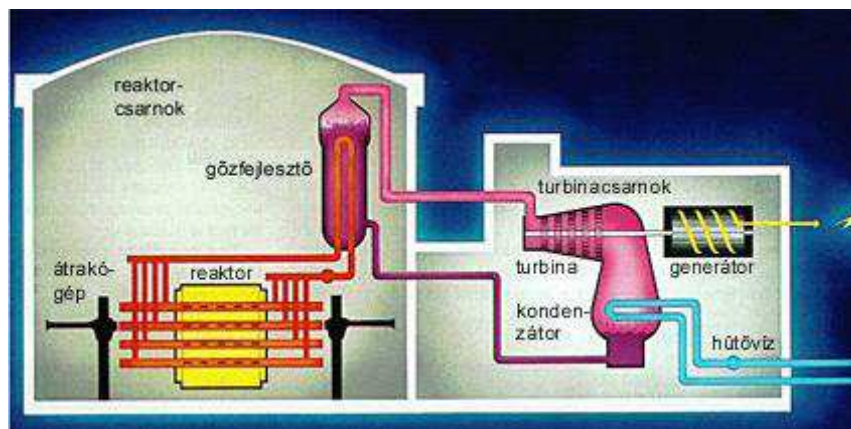
A jelenleg üzemelő *első és második generációs* reaktortípusok (elvi – technológiai) jellegű csoportosítás



6. ábra: Az első és második generáció típusai²³

Főbb típusok áttekintése:

A vízű reaktoroknak két típusa van. A HWR és a LWR. A HWR jelentése: Heavy Water Reaktor, azaz nehézvízes reaktor. Itt a hűtővíz és a moderátor is nehézvíz, azaz D_2O . Ennek a típusnak a hátránya, hogy a D_2O előállítása drága. Előnye viszont, hogy üzemanyaga alig dúsított (1-2%-os) vagy természetes urán is lehet.

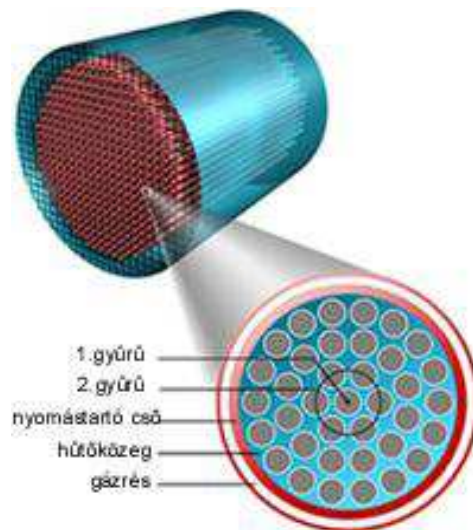


7. ábra: HWR reaktor sematikus rajza

A HWR-nek két főbb ismert típusa van: A CANDU és a PHWR. A CANDU rendszer esetén a moderátor és a hűtőközeg térben elválasztottan helyezkedik el. Ugyanis egy nagyobb tartályban van a moderátor. Ezen belül helyezkednek el a vízszintes fűtőelemkötegeket körülvevő csövek. Ezekben a csövekben áramlik a hűtővíz. Ezt az elrendezést nyomottcsöves reaktornak is nevezik, mivel itt a nyomást a csövek veszik fel. Azaz nem kell az egész reaktortartályt nyomás alá helyezni. Ennek az elrendezésnek ez az előnye is egyben.

²³

Atomeróművek, 2010.01.18 <http://www.zmne.hu/tanszerek/vegji/personal/Atomeromuvek.pdf>



8. ábra: nyomottcsöves reaktor

A moderátor felmelegedése sokkal kisebb mértékű, mint a hűtőközeg felmelegedése. A gőzfejlesztőbe a meleg, nagy nyomású hűtőközeg kerül, amely elforrálja a szekunder oldali könnyűvizet. Ennek a típusnak másik nagy előnye, hogy az üzemanyag cseréjéhez nem kell leállítani a reaktort.

A HWR másik, jelenleg elterjedőben levő típusa a PHWR. A nyomotttartályos, azaz Pressurized Heavy Water Reactor esetén a nyomást a reaktortartály viseli el. Ennél a típusnál a moderátor és a hűtőközeg térben nincs elválasztva, mint a CANDU rendszerénél, mert itt a moderátor és a hűtőközeg ugyanaz a nehézvíz.²⁴

LWR: A vízhűtéses reaktorok másik típusa a HWR mellett az LWR: Light Water Reactor, azaz könnyűvízes reaktorok. Itt a hűtőközeg könnyűvíz, azaz H₂O. A könnyűvízes reaktoroknak is több ismert típusa van. Ide tartozik a PWR, azaz nyomottvízes reaktor; a BWR, azaz forralóvízes reaktor és az RBMK, azaz grafit moderátoros, forralóvízes reaktor.

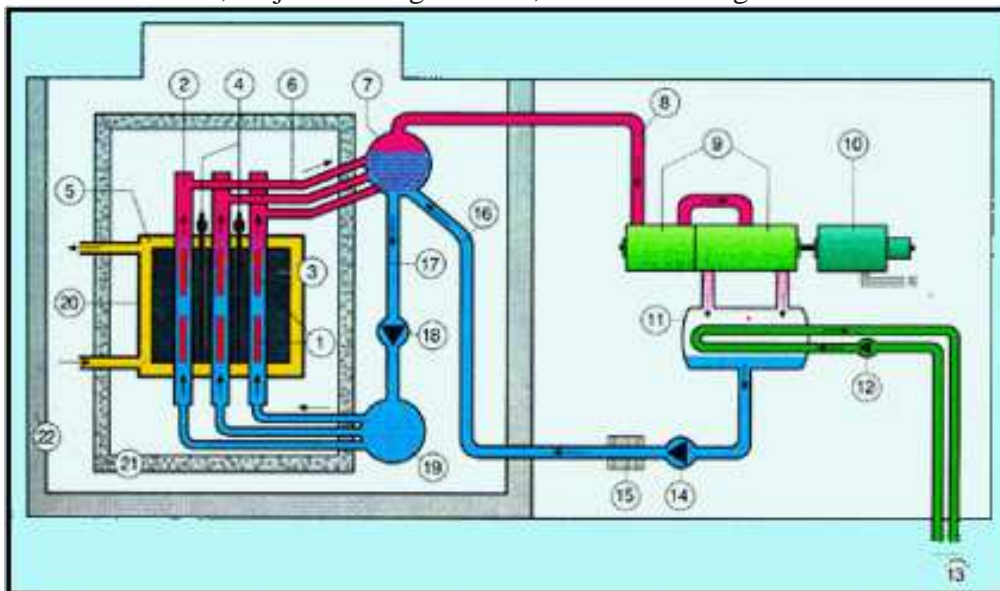
A PWR azaz Pressurized Water Reactor típusnál mind a moderátor, mind a hűtőközeg könnyűvíz (H₂O). ez a reaktortípus arról kapta a nevét, hogy magas a primerkörüi nyomás: 130-150 bar. Ennek köszönhetően a víz még 300-330° C-in sem forr el. A primer és szekunder körű hűtővíz egymással nem érintkezik közvetlenül. A primerkörüi víz a hőt a szekunderkörüi víznek a gőzfejlesztőben adja át. A szekunderkörüi víz nyomása jóval kisebb, mint a primerkörüi, itt a nyomás 40-60 bar. Ezért a gőzfejlesztőben a víz felforr. A keletkező gőz a nagy, majd a kisnyomású turbinára kerül a cseppeleválasztás után. A turbináról a kilépő gőz először a kondenzátorba kerül, majd előmelegítés után a gőzfejlesztőbe. Mivel a szekunder és a primerkörüi hűtővíz egymással nem érintkezik közvetlenül, ezért a primerkörből nem kerülhet át a szekunderkörbe radioaktív anyagok. Ez pedig a radioaktív anyagok kijutásának újabb gátja.

²⁴

Az atomerőművek típusai- <http://www.atomeromu.hu/az-atomeromuvek-tipusai/A-nehezvizes-reaktorok>

A BWR:jelentése forralóvízes reaktor, Boiling Water Reactor. Az előző típusal (PWR) ellentétben itt a hűtővíz elforrása megengedett. A reaktortartályban a víz egy része elforr. Az előző típushoz képest pont emiatt a reaktortartályban a nyomás alacsonyabb, 60-70 bar. Az aktívzónából kilépő víz-gőz keveréket szétválasztják. A gőz a turbinákra kerül. Onnan pedig a kondenzátorba, majd az előmelegítés után vissza a reaktorba. Ennek a rendszernek az előnye, hogy sokkal egyszerűbb kivitelezésű, emiatt olcsóbb is. Ez a típus adja az atomerőművi össztermelés 22, 5%-át.²⁶

Az LWR harmadik típusa az RBMK. Az RBMK esetében a moderátor grafit. Az előző típushoz hasonlóan itt is megengedett a hűtővíz elforrása, tehát tulajdonképpen ez is egy forralóvízes reaktor. A hűtőközege tehát elgőzölgő könnyűvíz, moderátora grafit. A típus jellemzője továbbá, hogy nyomottcsöves (a CANDU rendszerhez hasonlóan). Maga az aktív zóna 25*25 cm-es grafitömbökből áll. Ezek között helyezkednek el a függőleges helyzetű nyomás alatt levő csövek, amelyek a fűtőelemeket és a közöttük áramló hűtőközeget foglalják magukba. Az aktív zónából kilépő víz-gőz keverék a szeparálás (víz leválasztása) után a turbinára kerül. Ezután a gőz a kondenzátorba kerül, majd előmelegítés után, mint hűtőközeg a reaktorba visszakerül.



11. ábra: RBMK reaktor rajza, részei:

1 Urán-üzemanyag	9 Gőzturbina	16 Tápvíz
2 Nyomócső	10 Generátor	17 Víz visszafolyás
3 Grafit moderátor	11 Kondenzátor	18 Keringtető szivattyú
4 Szabályzórud	12 Hűtővíz szivattyú	19 Vízelosztó tartály
5 Védőgáz	13 Hőelvezetés	20 Acélköpeny
6 Víz/gőz	14 Tápvízszivattyú	21 Betonárnýékolás
7 Cseppleválasztó	15 Előmelegítő	22 Reaktorépület
8 Gőz a turbinához		

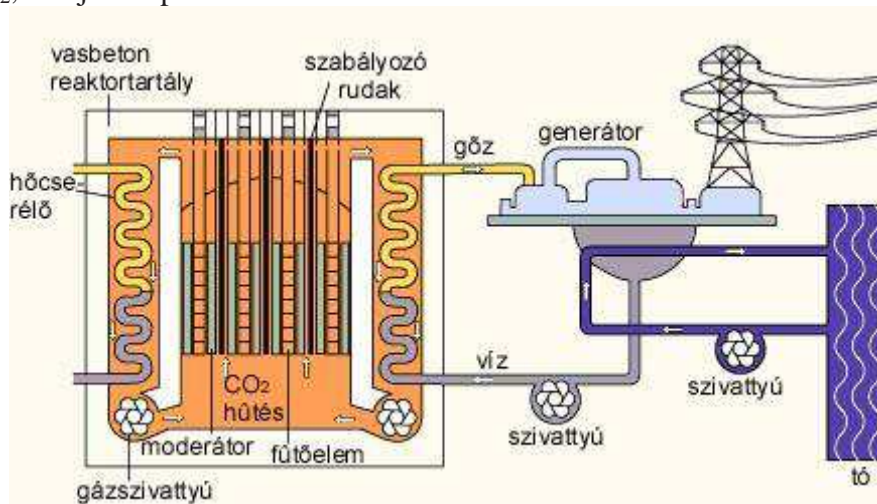
RBMK reaktorok azonban csak a Szovjetunió néhány utódállamában működnek. Ebbe a típusba tartozott a világ első atomerőműve is, az Obnyinszki. Ennek a típusnak számtalan előnye és hátránya van, ma már nem gyártják. Előnyei közé tartozik, hogy hatalmas teljesítmény érhető el vele, mert a csatornák veszik fel a nyomást, ezekből a csatornákból pedig sok egymásmellé tehető. Emiatt azonban reaktortartályra nincs szükség. A CANDU rendszerekhez hasonlóan az üzemanyag cseréje működés közben is cserélhető, azaz nem igényli az erőmű leállítását. Hátrány

²⁶

Az atomerőművek típusai- <http://www.atomeromu.hu/az-atomeromuvek-tipusai/A-forralovizes-reaktor>

azonban az, hogy az aktívzóna nagy mérete miatt nehézkes a szabályozása. Emellett a hátrányok közé sorolható az is, hogy mivel a hűtőközeg több neutronot nyel el, mint a grafit ezért a hűtőközeg elgőzölgése esetén a neutronszám megnő. Szélsőséges körülmények között ez reaktivitásbeli növekedést okoz, azaz az üregegyűthető pozitív. Ezt a hátrányt az RBMK reaktorok egy részében sikerült kiküszöbölni azzal, hogy az üregegyűthető gyakorlatilag nulla. Korábban az USA-ban is működött néhány grafit moderátoros atomerőmű, de ezeket Csernobili erőmű balesete után mindenütt bezárták.²⁷

A hűtőközeg azonban nemcsak víz lehet, hanem gáz is. Ezeket a reaktorokat gázhűtéses reaktoroknak nevezzük. A GCR azaz Gas Cooled Reactor esetén a hűtést valamilyen gáz segítségével történik. Ennek egyik típusa a GGR, azaz a Grafit Gas Reactor. A hűtőközeg leginkább CO₂, az újabb típusok esetében hélium.



12. ábra: GCR rajza

A GCR reaktorok egyik típusa a magnox reaktor, amely a nevét arról kapta, hogy az üzemanyagot egy speciális magnézium-ötvezzel látták el. Ennek a reaktortípusnak az üzemanyaga a természetes urán. A magnox mellett az AGR is GCR reaktortípus, itt is a moderátor grafit, a hűtőközeg CO₂ gáz, viszont az üzemanyag enyhén dúsított urán és az üzemanyag burkolata nem magnox. Ma már ezeket a reaktorokat nem gyártják. A magnox reaktorok részesedése az összes atomerőművi termelésnek mintegy 1,1%-a. Az AGR-nek, ami magnox továbbfejlesztett változata 2,5 %. Ugyancsak ebbe a típusba tartozik a HTGR reaktor is. A HTGR reaktor, más néven magas hőmérsékletű He-hűtésű reaktor. Itt a moderátor szintén grafit, de a hűtőközeg hélium.²⁸

A harmadik generációs erőművek a második generációs erőművek szisztematikus továbbfejlesztésének eredményei. Ezért is nevezik a harmadik generációs erőműveket evolúciós erőműveknek is.²⁹

Fejlesztési célok

A korábbi balesetek (TMI, Csernobil) a kutatókat és tervezőket továbbfejlesztésre ösztönözték. Az újabb műszaki fejlesztések célja az is, hogy a társadalom bizalmát is visszanyerjék.³⁰ Emellett még számos célt tűztek ki a fejlesztések során.

A jelenlegi erőművekkel szemben az alábbi problémák/ fejlesztési célok merültek fel:

²⁷ Az atomerőművek típusai- <http://www.atomeromu.hu/az-atomeromuvek-tipusai/Az-RBMK-egyedi-reaktor>

²⁸ Az atomerőművek típusai- <http://www.atomeromu.hu/az-atomeromuvek-tipusai/A-gazhutesu-reaktorok>

²⁹ Czifrus Szabolcs: Atomenergia a 21. században www.reak.bme.hu

³⁰ Szőnyi Zoltán: A nukleáris energiatermelés helyzete és jövője, http://www.freeweb.hu/mag-tarsasag/pdfs/a_nuklearisenergiatermeles_helyzete_es_jovoje.pdf

- Alacsony hatásfok-hatásfok növelése
- Alacsony kiegészi szint-kiegési szint növelése
- Keletkező hő hasznosítása
- Keletkező hulladékok mennyiségének csökkentése
- Környezeti hatás minimalizálása
- Atomfegyverek előállításának lehetőségének megakadályozása
- Biztonságosság növelése
- Hosszabb rendelkezésre állás

2. Fejezet: Újabb generációs atomerőművek:

Ebben a fejezetben az újabb generációk fejlesztési általános céljairól; a harmadik és negyedik generációs erőművek fejlesztési céljairól valamint az egyes generációk fontosabb típusairól olvashatunk

Újabb generációs atomerőművek fejlesztési céljai:

Ezen fejlesztések célja, hogy minél gazdaságosabbá és biztonságosabbá tegyék az atomerőművi energiatermelést. Ezen célok a harmadik és negyedik generációs erőművek használatával érhetőek el. A harmadik generációs erőművek már jelenleg is működnek és az elkövetkezendő évtizedekben is jelentős szerepük lesz. A negyedik generációs erőművek megjelenése azonban a szakemberek szerint 2030-40 táján állhatnak szolgálatba. Az általam vizsgált szempontok közül számos már a harmadik generációs erőművek segítségével megvalósítható, de zömüket csak a negyedik generációs atomerőművek segítségével tudják majd megoldani.

Harmadik generáció fejlesztési céljai és a harmadik generációs erőművek bemutatása

A harmadik generációs erőművek segítségével megvalósítható célok:

- Szabványosított terv ezáltal gyorsabb, olcsóbb kivitelezés
- A robosztusabb, egyszerűbb kialakítások révén kevésbé sebezhetőbb rendszer
- Passzív védelem és belső biztonság növelése és teljesebbé tétele
- Hosszabb élettartam és magasabb rendelkezésre állás
- A zónaolvadásos balesetek kockázatának csökkentése
- A környezeti hatás minimalizálása
- Hatékonyabb üzemanyag kihasználás a magasabb kiegészi szint elérésének segítségével
- Az üzemanyag élettartamának növelése a kiegészi abszorbensek (kiegési mérgek) alkalmazásának segítségével
- Ezeknek a fejlesztések segítségével a korábbihoz képest sokkal olcsóbbá és biztonságosabbá válik a villamos energia termelés.

A harmadik generációs erőművek a második generációs típusok továbbfejlesztésének eredménye. Zömük az LWR típusok közül kerül ki, de lesznek CANDU és gázhűtéses reaktorok is.³¹

Harmadik generáció bemutatása

A harmadik generációs erőművek zöme az LWR-ek, azaz a könnyűvízes reaktortípusok közé tartozik, de vannak CANDU és magas hőmérsékletű gázhűtéses reaktorok is.

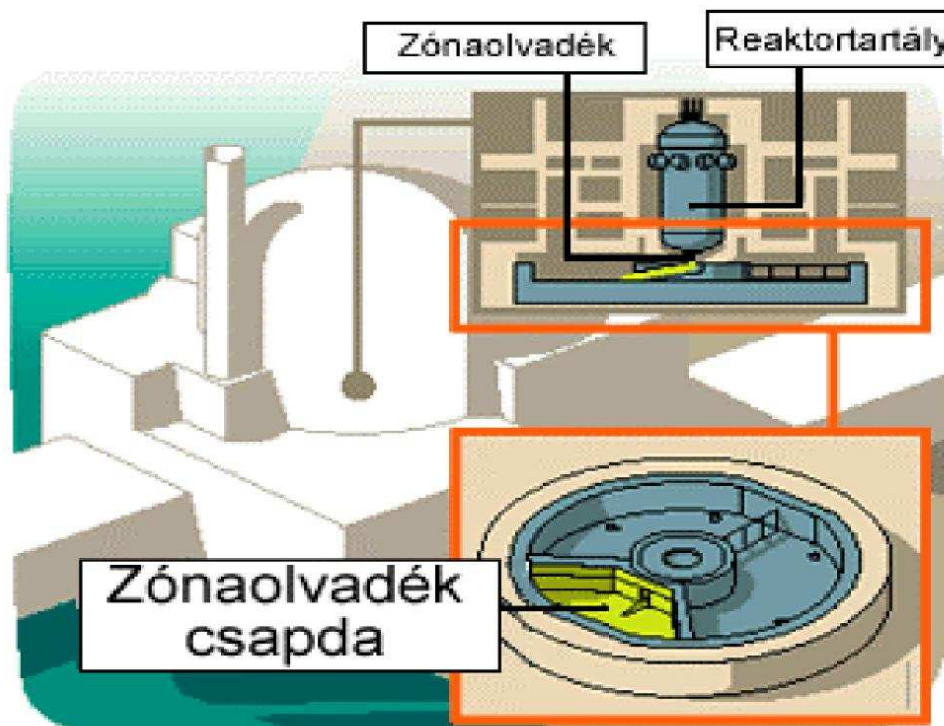
LWR típusú reaktorok:

³¹ Csom Gyula: 4. Atomerőművek, <http://www.atomforum.hu/pdf/04%20atomeromuvek.pdf>

EPR: European Pressurized Reactor

Az európai nyomottvizes harmadik generációs reaktorok kifejlesztésében főként a franciák (korábbi Framatome, ma Areva NP és az Electricité De France (EDF)) és a németek (Siemens AG) nevéhez fűződik. Négy EPR típusú blokk építése már megkezdődött Európában, kettő a finnországi Olkiluotoban és kettő a franciaországi Flamanville-ben. Továbbá kettő blokk építése Kínában is megkezdődött egy 2009-ben, egy 2010-ben. Ez a típus az európai követelményeknek is megfelel, 1990-ben megkapta a jóváhagyást. Mint harmadik generációs erőmű második generációs technológia továbbfejlesztésének eredménye. Az EPR a egy francia (N4) és egy német (KONVOI) másodikgenerációs technológia alapjaira épül. Az EPR 1650 MWe előállítására képes, a hőteljesítménye pedig 4500 MWt. Az ERP-ek üzemanyaga lehet 5% dúsítású uránium-oxid, 50%-ban MOX.³² Az EPR számos biztonsági újítással rendelkezik:

- Négy egymástól független vészüzemzavari hűtőkör, amelyek képesek a leállítás után a megfelelő hűtést biztosítani, ezek mindegyike négy külön biztonsági épületben van
- Négy egymástól független ellenőrző rendszer a víz-és más ellátó rendszereket
- Szivárgásmentességet biztosító konténment a reaktor körül-belső a primerkört magába foglaló feszített beton konténment
- Magolvasás esetén a keletkező többlethő elvezetését, a nyomás szabályozását az önálló áramellátással rendelkező két csővezetékes hűtőrendszer segítségével oldják meg.
- Magolvasáskor a nyomást egy rendszer 20 bar alá csökkenti
- A keletkező hidrogént pedig 40 katalitikus rekombinációs berendezés segítségével kötik meg. Így a hidrogén mennyisége a 10%-ot nem tudja elérni
- Zónaolvadék csapda a reaktortartály alatt: ennek a különlegessége, hogy a magolvasáskor keletkező fémtartalmú zónaolvadékot összegyűjtő árok falának egy része leolvad és ezzel is hűti a fémet. Az olvadék pedig a védőépület aljában összegyűlve hűl le.³³



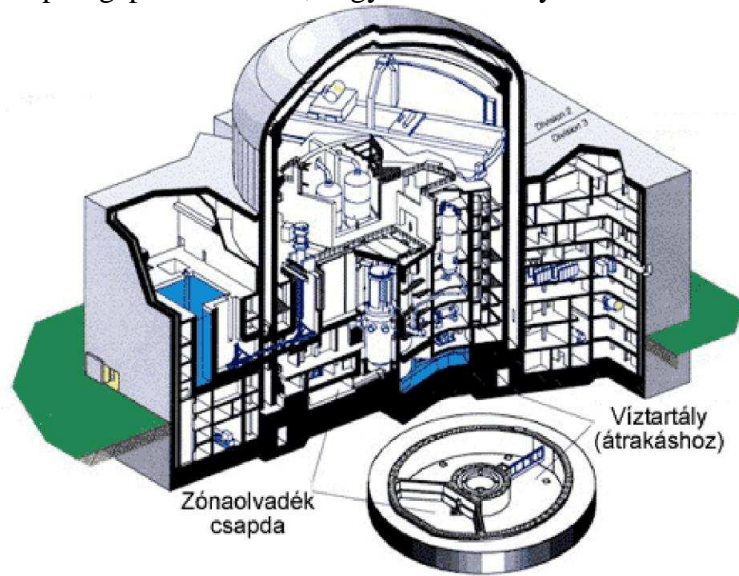
13. ábra: zónaolvadék csapda³⁴

³² http://en.wikipedia.org/wiki/European_Pressurized_Reactor

³³ Dr. Menzel György: Modern k9nyűvizes reaktorok
http://www.omikk.bme.hu/collections/mgi_fulltext/energia/2002/03/0306.pdf

³⁴ Dr. Aszódi Attila: A neutronfeldvezéstől a negyedik generációs atomerőművekig
http://www.reak.bme.hu/oldweb/aszodi/eloadasok_cikkek/Aszodi_FizAnket_2005marc12.pdf

- Kettősfalu konténment, amelynek teljes vastagsága 2,6 m. Ez képes kibírni egy utasszállító repülőgép rázuhanását, vagy a belső túlnyomást.³⁵



14. ábra: Kettősfalu konténment³⁶

Épülő EPR típusú blokkok:

Olkiluoto-3: az első EPR típusú blokk a finnországi Olkiluotoban épül fel.



15. ábra: Az épülő új EPR blokk, Olkiluoto

Az első EPR blokk építését még 2005-ben kezdték el építeni és 2009-re volt várható a hálózatra kapcsolódás, de ez számos (pénzügyi okok miatt is) ok miatt megcsúszott, várhatóan 2013-ban áll üzembe.

A második EPR blokk a Flamanvill-3.

³⁵

http://en.wikipedia.org/wiki/European_Pressurized_Reactor

³⁶

Dr. Aszódi Attila: A neutronfelfedezéstől a negyedik generációs atomerőművekig
http://www.reak.bme.hu/oldweb/aszodi/eloadasok_cikkek/Aszodi_FizAnket_2005marc12.pdf



16. ábra: Flamaville-3: épülő EPR reaktor

Franciaország első harmadikgenerációs erőművének építése 2007-ben indult meg. A projektet már 2005. február 18-án benyújtották. A helyszíni előkészítő munkák 2006 nyarán indultak meg. A tényleges építkezés 2007 decemberében kezdődött el, 54 hónappal számoltak a tervezők. Késések azonban itt is adódtak, így várhatóan 2014-ben kapcsolódik az új egység a hálózatra. Az új blokk 1630 MWe előállítására lesz képes. Az elsődleges becslések szerint 3,3 milliárd euróval számoltak, de a 2010-es EDF beszámoló szerint várhatóan 5 milliárd euróba kerül az új egység. A harmadik és negyedik EPR blokk Kínában fog megépülni, erről 2007-ben készült szerződés Franciaország és Kína között. A taishani EPR blokkok közül az első építése hivatalosan 2009. november 18-án, a második építése pedig 2010. április 15-én kezdődött el. Várhatóan 46 hónap alatt készül el mindegyik egység rövidebb határidővel, és kevesebb költséggel épül meg, mint Franciaországban vagy Finnországban.³⁷

SWR-1000

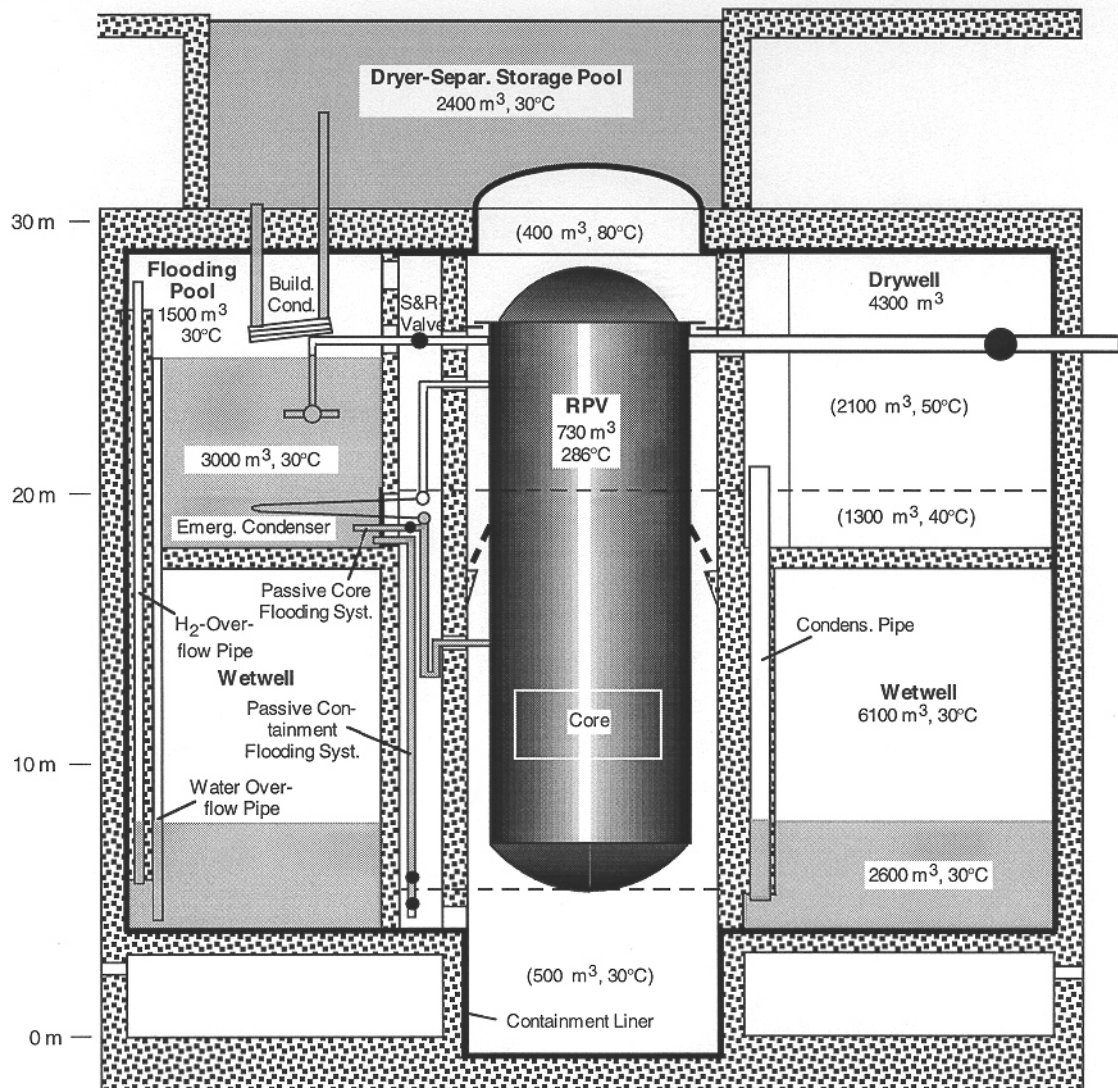
A német szolgáltatókkal és biztonsági hatóságokkal együttműködve fejleszti ezt a típust a francia Framatom ANP.³⁸ Az SWR a forralóvízes (BWR) reaktorok közé tartozik. A reaktor 1013 MWe teljesítményű, hőteljesítménye 2778 MWt. Ennek a reaktortípusnak a fejlesztésénél is a cél az volt, hogy a termelés minél gazdaságosabbá és biztonságosabbá váljon. A passzív biztonsági elemek alkalmazása költségcsökkentést is jelent, hiszen ezek olyan megoldások, amelyek a fizika törvényein alapulnak és nem szükséges hozzájuk külső energiaforrás. A reaktor túlmelegedése esetén a biztonsági épület hűtésével a keletkező gőz parciális nyomását csökkentik. A biztonsági épület hűtését az épületkondenzátor segítségével hajtják végre. Ennek a kifejlesztése egy németországi kutatóintézet, a Paul Scherer Intézet nevéhez kapcsolódik. Ugyancsak egy német kutatóintézet, a Jülichi intézet fejlesztette ki azokat a passzív, szükség kondenzátorokat, amelyek üzemzavar esetén a keletkező többlethőt a nagynyomású tartályból elvezetik és helyettesíti is a nagynyomású betápláló rendszert. Ha hűtőközeg veszteség történne a reaktorban, akkor pedig egy szintén passzív rendszer avatkozna be. Ez egy olyan elárasztó csővezeték rendszer, amelyben a visszacsapó szelepek a nyomás megadott érték alá csökkenése esetén kinyitnak. Ha zónaolvadás feltételezhető, akkor egy készenléti medencéből vízzel árasztják el a nagynyomású reaktortartály körüli teret, a belső védőépületet nitrogéngázzal töltik meg és a keletkező hidrogéngázt cirkontartalmú oxidáló anyaggal kötik meg. SWR építésére várhatóan Finnországban kerül sor.³⁹

³⁷ http://en.wikipedia.org/wiki/European_Pressurized_Reactor

³⁸ Dr. Csom Gyula: 4. Atomerőművek, <http://www.atomforum.hu/pdf/04%20atomeromuvek.pdf>

³⁹ Dr. Menzel György: Modern k9nnyűvízes reaktorok

http://www.omikk.bme.hu/collections/mgi_fulltext/energia/2002/03/0306.pdf

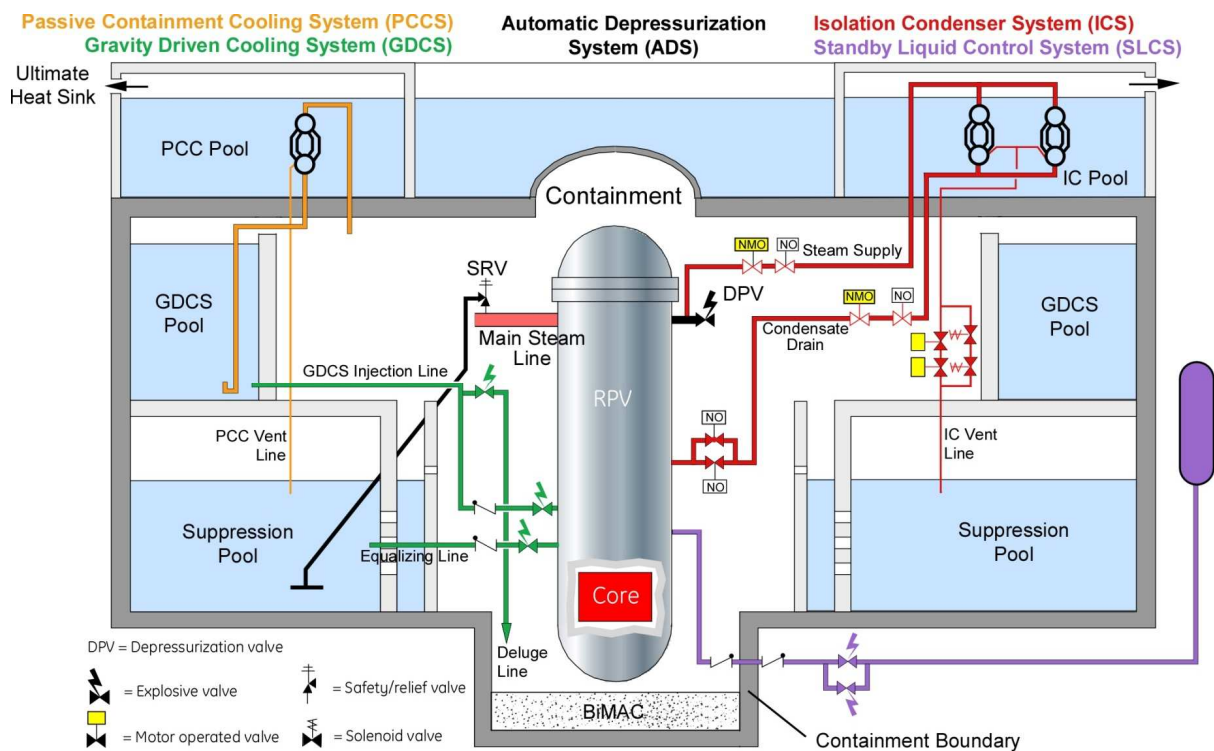


17. ábra: SWR blokk sematikus rajza⁴⁰

ESBWR: Az ESBWR, azaz gazdaságilag egyszerűsített forralóvízes reaktor, más néven Economic Simplified Boiling Water Reactor. Ez a harmadik generációs erőműtípus sem előzményektől mentes. A korábbi BWR-ek továbbfejlesztett változata. Egy négyfázisú fejlesztési program eredménye. Ennél a típusnál nemcsak a BWR-eket, hanem SBWR-t és az ABWR-t is alapul vették a fejlesztés során. Az ESBWR tervezése során kitűzött célok megfelelnek a harmadik generációs erőművek fejlesztési céljának. Hiszen az erőmű tervezett élettartama 60 év. A passzív biztonsági rendszereknek köszönhetően a zónaolvadás valószínűsége 10^{-6} /üzemév. Annak a valószínűsége pedig, hogy a radioaktív szennyezés a telephelyen kívülre jut kevesebb, mint 5×10^{-8} /üzemév. Így ebben is eleget tesz a harmadik generációs erőművek fejlesztési elvárásainak. Az üzemanyagciklus 12-24 hónap. A rendelkezésre állás foka is magas 92%. Az ESBWR a villamos energiát 33%-os hatásokkal tudja előállítani. Az egyszerűsített kivitelezés miatt mind az építési költségek mind az építési idő is jelentősen csökken. Gazdasági és biztonságossági szempontból is megfelelő típus. Számos passzív és aktívbiztonsági rendszer révén a várható kockázat jóval kisebb.

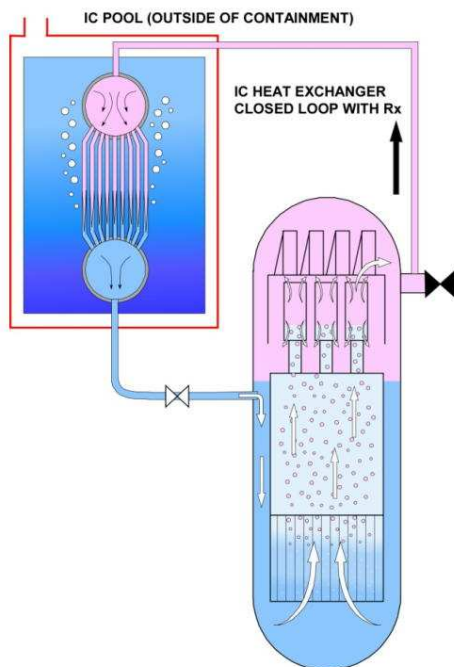
⁴⁰

<http://th.web.psi.ch/ex-projects/main-frames/IPSS.htm>



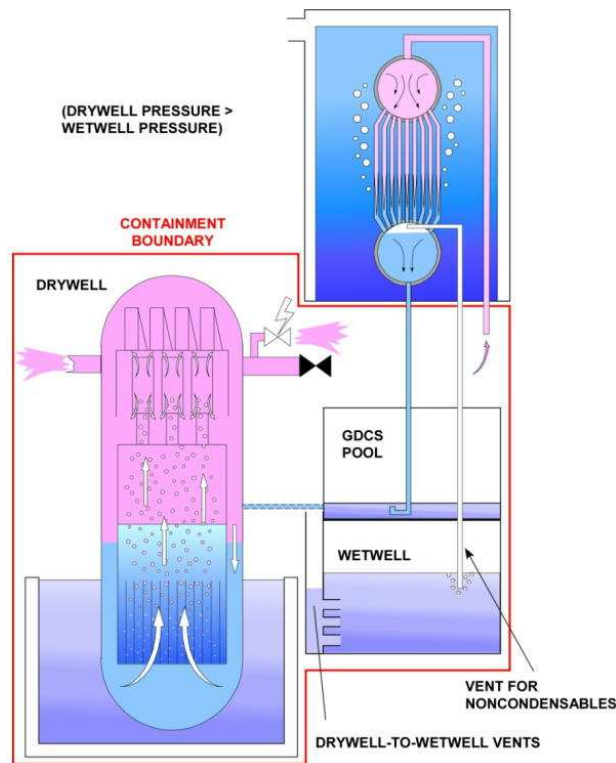
18. ábra: ESBWR aktív és passzív biztonsági rendszerei

A védelmi rendszerek közül az egyik az IC, azaz elszigetelt kondenzátor. Ennek feladata, hogy meggátolja a reaktortartályban a nyomás megnövekedését és eltávolítsa a remanens hőt. Az IC négy független hűtőhurokkal rendelkezik. A remanens hő egy hőcserélőn keresztül jut az IC medencéhez. A hő a víz elpárolgatása révén elvezetődik. Az elpárolgatott víz pedig az atmoszférába jut.



19. ábra: IC rendszer

Egy másik biztonsági rendszer a PCC, szintén elvezeti a remanens hőt a reaktortartályból. A PCC-hez négy egymástól független, alacsony nyomású hűtőkör, hőcserélővel. Az elvezetett hő a hőcserélőn keresztül a medence vizének átadja a hőt. Az elpárolgatott víz itt is az atmoszférába jut. A PCC-hez kapcsolódik még 3 gravitációs medence is.



20. ábra: PCC

Ez a rendszer is automatikus működtetésű. A konténmentet kétszeres nyomás kibírására tervezték. Mindezek mellett még számos biztonságnövelő megoldást alkalmaztak. A védelmi berendezéseknek köszönhetően magas inherens biztonsággal rendelkeznek. A védelmi rendszere automatikusan működik 72 órán keresztül. ESBWR épül Amerikában, de európai változata is van ezt European SWR-nek nevezik.⁴¹

Az LWR típusú reaktorok között BWR, azaz forralóvízes és PWR, azaz nyomottvízes reaktortípusok is vannak. Amerikában fejlesztés alatt álló BWR típus az ABWR (Advanced Boiling Water Reactor), továbbfejlesztett forralóvízes reaktor. Ennek a típusnak a tulajdonságait az ESBWR fejlesztése során is felhasználták. Amerikai harmadik generációs PWR reaktortípusok: AP-600 és ennek továbbfejlesztett változata az AP-1000, System 80+, IRIS.

A második generációs PWR-ek közé tartozó VVER-1000/230 és VVER-1000/213 típus továbbfejlesztésének eredményeképpen számos építésre érett VVER technológia létezik:

- VVER-1000/320
- VVER-1000/392. Novovoronyezsi atomerőműbe tervezik beépíteni.
- VVER-1000/412
- VVER-1000/428. Kínában a Tianwan erőmű ezzel a típusú reaktoralal épül.
- VVER-1000/466. A bulgáriai Belene atomerőművet tervezik ezzel a típusú blokkal.
- VVER-640/213, VVER-640/407

További típusok állnak még fejlesztés alatt: az 1500 MWe teljesítményű VVER-1200/491 típusú reaktorok.

⁴¹ Hamerszki Csaba: ESBWR <http://energetika.13s.hu/pub/csabinak/ESBWR.ppt>

Megnevezés	Szállító	Méret (MW)	Típus	Működési tapasztalatok
ABWR	General Electronic	1350	BWR	Japánban üzemel, Taiwanban konstrukció alatt áll
SWR	Framatome	1013	BWR	
ESBWR	General Electronic	1390	BWR	Az Egyesült Államokban fogják elsősorban telepíteni, 2010 előtt nem valószínű
IRIS	Nemzetközi projekt, Westinghouse vezetésével	335	PWR	A következő évtizedben fogják várhatóan építeni (2012-2015), jóváhagyása várhatóan 2010-ben lesz
System 80+	Westinghouse	1300	PWR	Koreában tervezik az építését
APWR	Mitsubishi	1500	PWR	Tsuruga-ban tervezik az első két blokkot
APR-1400	Koreai Next Generation Program	1450	PWR	Shin-Kori 3 és 4-es blokkja, várhatóan 2012-ben kezd meg a működését
SWR 1000	Areva NP	1000-1290	BWR	
BWR 90+	Westinghouse	1500	BWR	
VBER 300	OKBM	295	BWR	Az első blokkok várhatóan Kazahsztánban fognak felépülni

21. ábra: harmadik generációs erőművek⁴²

A HWR típusú reaktorok:

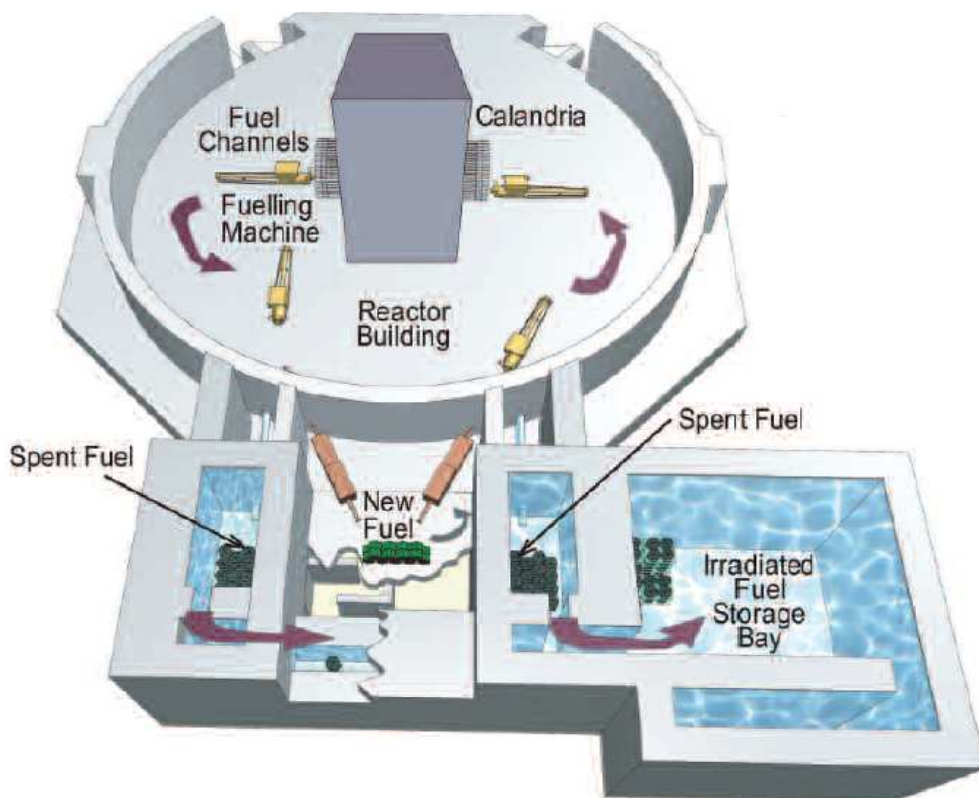
A CANDU-k közül: A CANDU típusú G3 és G3+ erőművek a CANDU6 tovább fejlesztett változatai. A CANDU 3 és CANDU 9 G3, míg az ACR-700 és ACR-1000 G3+ típusúak. Az ACR jelentése Advanced CANDU Reactor. Az ACR-700 730 MWe, míg az ACR-1000 1200MWe előállítására képes. Az ACR-1000 megfelel a kanadai és az IAEA előírásainak is. Jellemző rá a magas fokú inherens biztonság, a magas fokú többszintű mélységi védelem. Két egymástól független leállítórendszerrel rendelkezik. A passzív inherens hőelvitel is növeli a reaktor biztonságosságát. Nagyfokú automatizáltság jellemző az erőműre. A zónakárosodással szemben is jól védett ez a típus. A konténment pedig robusztus kialakítású és véd a becsapódó repülőgépek ellen is. A rendszer nagy előnye, hogy lehetőség van az üzemanyag üzem közbeni cseréjére is.⁴³

A CANDU-3 a kisebb villamos energia hálózatokhoz illeszthető, kifejlesztése már befejeződött. A CANDU-3 450 MWe teljesítményű. Üzemanyaga természetes vagy enyhén dúsított urán (0, 9-1, 2%). A nagyobb villamos energia rendszerekhez a CANDU-9 illeszthető jobban. A CANDU-9 monoblokkos erőmű 925-1300 MWe teljesítményű. Üzemanyagként természetes vagy enyhén dúsított urán, de akár a kiegészített PWR üzemanyagból kinyert urán, plutónium és másodlagos aktinidák kezelésére is. Biztonságosság szempontjából az ACR-700 nagy előnye, hogy a korábbi CANDU típusokhoz képest negatív void tényezővel rendelkezik, amely növeli a reaktor inherens biztonságosságát. Az ACR-700 730 MWe teljesítményre képes, nehézvíz moderátorú és könnyűvíz hűtőközegű reaktortípus. Elődjéhez képest a fajlagos beruházási költségek is alacsonyabbak.⁴⁴

⁴² Dr. Csom Gyula, Dr. Fehér Sándor: Harmadik és negyedik generációs atomerőművek, <http://www.enpol2000.hu/files/Csom%20-%20Atomeromuvek.ppt>

⁴³ Dr. Csom Gyula, Dr. Fehér Sándor: Harmadik és negyedik generációs atomerőművek, <http://www.enpol2000.hu/files/Csom%20-%20Atomeromuvek.ppt>

⁴⁴ Dr. Csom Gyula: 4. Atomerőművek, <http://www.atomforum.hu/pdf/04%20Atomeromuvek.pdf>



22. ábra: Üzem közbeni fűtőelemcsere⁴⁵

Az ACR-100 típus esetén a súlyos balesetvalószínűsége $3,4 \times 10^{-7}$. Az esetleges baleset esetén automatikus hidrogén megkötő és gyújtó berendezések lépnek működésbe, a befecskendező rendszer segítségével nyomáscsökkentés a cél. Az ACR-1000 biztonságosságát növeli, hogy két leállítórendszere van, mag vészhűtés és vészüzemzavari tápvízrendszer, valamint a nagyteherbírási konténment. A kettős leállítórendszer egyik eleme a biztonságvédelmi rudak, a másik a bejuttatott neutron abszorber anyagok. A harmadik generációs CANDU reaktorok elődjeikhez képest sokkal biztonságosabbak.

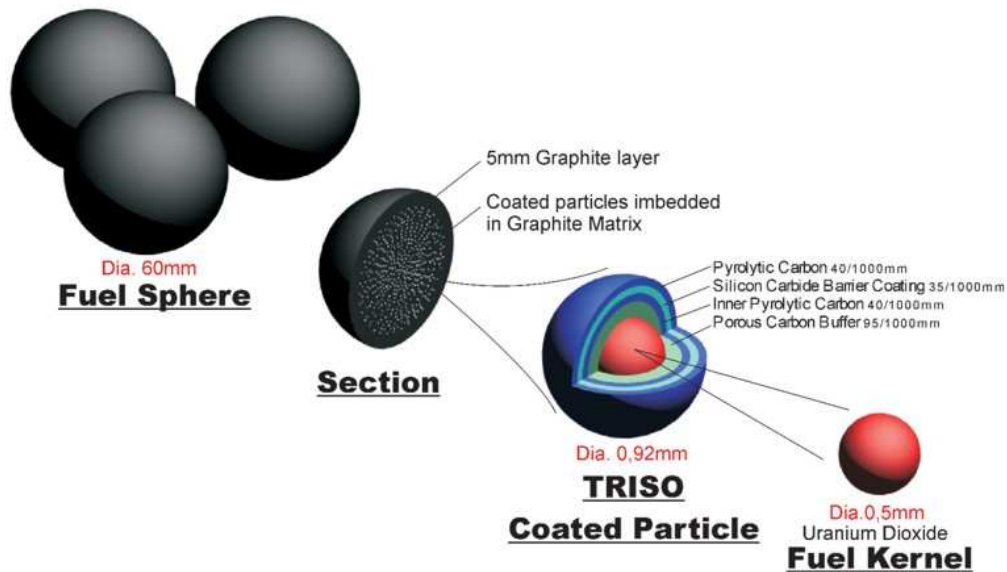
Magas hőmérsékletű gázhűtéses reaktorok:

Ezen típusok nagy előnye az LWR és HWR típusú erőművekkel szemben, hogy a gázhűtés miatt magasabb termodinamikai hatásfok érhető el velük. A hélium hűtés segítségével ugyanis a kilépő hőmérséklet akár a 950°C is elérheti. A hélium nagy előnye, hogy nem lép reakcióba az urán-karbiddal. Az urán-karbid üzemanyag alkalmazása sokkal előnyösebb, mint az urán-dioxid, mert jobb a hővezető képessége. A fűtőelemek un TRISO részecskékből áll, amelyeknek van urán-oxikarbid magja. Ezt a magot karbon és szilícium-karbid rétegek veszik körbe. A magban az U235 magas dúsítású, 8%. Ezeket a részecskéket különböző formájú grafitblokkokba vagy golyóba vagy hexagonális hasábokba préselhetik.

PBMR, azaz Pebble Bed Modulara Reactor, Dél-Afrikai golyóágyas reaktor. Ez a reaktortípus hélium hűtéses és grafit moderátort használ. A közvetlen ciklusú gázturbina alkalmazásával magas termodinamikai hatásfok érhető el, 42%. A kereskedelmi változatát 165 MWe teljesítményre tervezik. A demonstrációs modul teljesítménye 125 MWe.

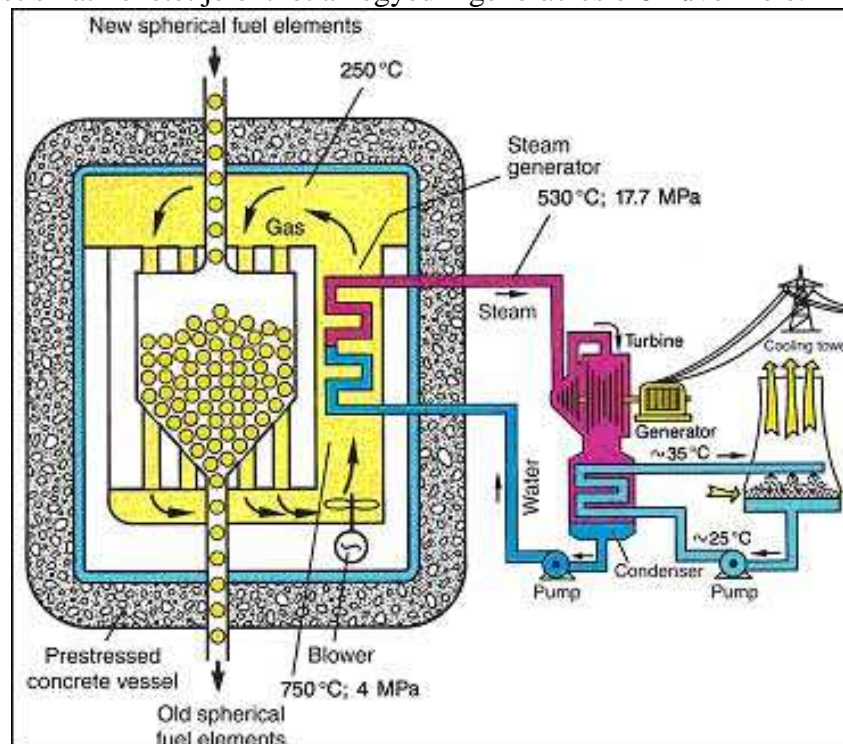
⁴⁵ Almási László: ACR-1000 http://energetika.13s.hu/pub/korszerunuklearis_msc/.../ACR-1000.ppt

FUEL ELEMENT DESIGN FOR PBMR



23. ábra⁴⁶

Ez a típus közvetlen átmenetet jelenthet a negyedik generációs erőművek felé.



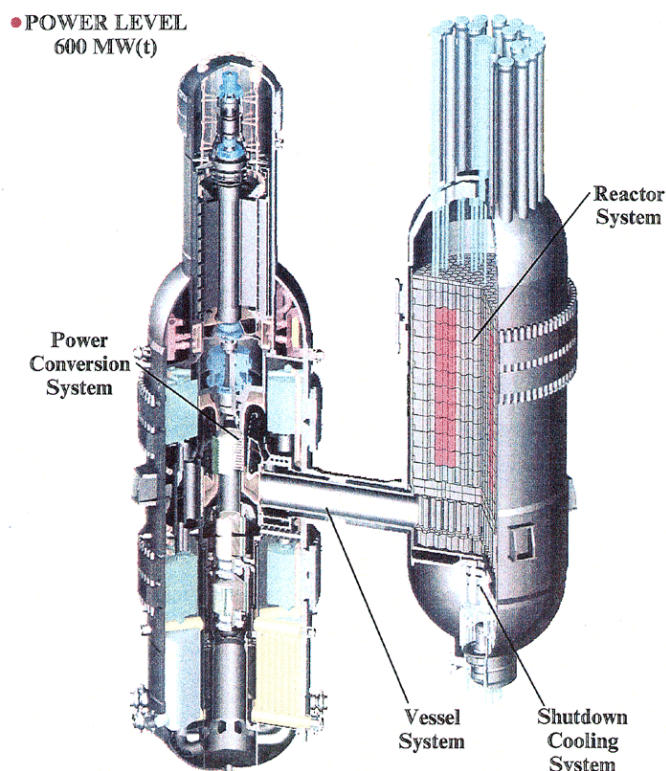
24. ábra: PBMR sematikus rajza⁴⁷

GT-MHR: Gas Turbin- Modulara Helium Reactor. Ezt a típust az USA-ban fejlesztik. Szintén magas termodinamikai hatásfokra képes, 48%. Ennek oka, hogy a felmelegített hélium közvetlenül hajtja meg turbinákat. Az aktív zóna hexagonális oszlop alakú fűtőelemblokkokból áll, ezek között csatornában áramlik a hélium hűtőközeg. Az aktív zónát alul, felül és oldalt grafit reflektorok veszik körbe.⁴⁸

⁴⁶ <http://www.pbmr.co.za/contenthtml/files/Image/HowFuelLarge.jpg>

⁴⁷ <http://nfrcoalition.blogspot.com/>

⁴⁸ Dr. Csom: atomerőművek IV. <http://www.atomforum.hu/pdf/04%20atomeromuvek.pdf>



25. ábra: GT-MHR reaktor rajza⁴⁹

BREST!

A BREST, azaz ólomhűtéses gyorsreaktor szuperkritikus gőzfejlesztővel, ez szintén átmenetet képez a negyedik generációs erőművek felé. Ennek a típusnak nagy előnye, hogy nem képes katonai tisztaságú plutónium előállítására. Hűtőközege ólom, ólom-bizmut. Az ólomhűtésű reaktorokkal kapcsolatban az oroszoknak közel 40 évnyi tapasztalata van, hiszen ezt a hűtéstípust alkalmazzák tengeralattjárók reaktoraiban. A gyorsreaktorok alkalmazásában is szintén hasonló mértékű tapasztalattal rendelkeznek. Ezen tapasztalatokat felhasználva fejlesztették ki a BREST típusú reaktorokat. Az ólomhűtés alkalmazását az is indokolja, hogy a Pb-208-as ólomizotóp „átlátszó” a neutronokra. Ez az izotóp a természetes ólom 54%-át alkotja. A reaktor nagyfokú inherens biztonsággal rendelkezik. A kilépő hűtőközeg hőmérséklete 540°C, 300 MWe teljesítményre képes. Egy pilot blokk építése kezdődött meg Belojarszkban.⁵⁰

A negyedik generáció célkitűzései és a fontosabb típusok bemutatása

Negyedik generáció célkitűzései

Már sok fejlesztési cél megvalósítható a harmadik generációs erőművekkel, de a legtöbb kérdésre, problémára azonban a negyedik generációs erőművek jelentenek majd megoldást. Ezek nem korábbi típusok továbbfejlesztésének eredményei, hanem újabb technológia eljárásokon alapulnak. Ezek megjelenése 2030-40 körül várhatóak. Az USA-ban azonban már 2000-ben elindult egy fejlesztési program, amelynek köszönhetően negyedik generációs erőművek akár 2025-30 körül üzembe állhatnak.⁵¹ Mivel ezek az erőművek új technológiákon alapulnak ezért nevezik őket innovatív reaktoroknak is.

⁴⁹ <http://www.world-nuclear.org/sym/2003/fig-htm/labf1-h.htm>

⁵⁰ Dr. Csom Gyula: Atomerőművek IV, <http://www.atomforum.hu/pdf/04%20atomeromuvek.pdf>

⁵¹ Dr. Csom Gyula, Dr. Fehér Sándor: Harmadik és negyedik generációs atomerőművek, <http://www.enpol2000.hu/files/Csom%20-%20Atomeromuvek.ppt>

A negyedik generációs erőművek által megvalósítható célok: ezek a célok új illetve megváltozott alaphelyzethez, követelményekhez, termelési célokhoz igazodnak. Ezeket a célokat csoportokba foglalhatjuk az alábbiak szerint:

- Fenntarthatóság: azt célozza meg, hogy az üzemanyagkészletet minél hatékonyabban lehessen hasznosítani. Ezen fejlesztési cél egyik fontos elem az üzemanyagciklus zárása is.
- Gazdasági versenyképesség: célja, hogy a költségek a fejlesztések ellenére alacsonyak maradjanak és az árstabilitás megtartása révén, hosszú távon is előretervezhető legyen gazdaságilag. Mindezek mellett fontos, hogy az atomerőmű ne csak villamos energia előállítására legyen alkalmas. De idetartozó cél az erőmű élettartamának növelése, a blokkok méretének szabványosítása is.
- Biztonság és megbízhatóság: Cél a biztonságosság biztosítása az üzemanyagciklus minden egyes lépésénél. A mélységi védelem fejlesztése, valamint a belső, azaz inherens biztonság növelése is ehhez a célhoz tartozik. De ugyancsak ehhez a ponthoz tartozik a passzívvédelem növelése is.
- Radioaktív hulladék-kezelés: Cél a nagyaktivitású radioaktív-hulladék kezelésének és elhelyezésének megoldása. Ehhez tartozó fejlesztés a P&T technológia is.
- Proliferáció állóság: Olyan műszaki, technológiai és jogi eszközrendszer kifejlesztése, ami a katonai célra való felhasználást megakadályozza.
- Nemzetköziség és globalitás:⁵²

Míg a harmadik generációs atomerőműveket evolúciós erőműveknek nevezzük, addig a negyedik generációs erőműveket innovatív erőműveknek nevezzük. A számos fejlesztési cél közül sok már a harmadik generációs erőműveknél megjelenik, de számos probléma fennmaradása újabb kutatásokat, újabb technológia kipróbálását kívánta meg. Ennek érdekében számos program, kutatás indult el. A negyedik generációs erőművek kifejlesztésére számtalan program, szervezet jött létre: Amerikában, 2000-ben a DOE kezdeményezésre 9 alapító országgal megalakult a GIF. A GIF jelentése: Generation IV. International Forum. Az alapító okiratot az alapító tagok 2001-ben írták alá. A cél az volt, hogy olyan innovatív rendszert fejlesszenek ki, amely lehetővé teszi az atomenergia felhasználás növekedését. Ezeket az újabb típusú erőműveket azért is nevezik innovatív erőműveknek, mivel teljesen új vagy módosított alapelveket, biztonsági követelményt, termelési célt tűztek ki maguk elé, ehhez alapjaiban újfajta megoldásokat alkalmazva, beleértve az üzemanyagciklus fejlesztését és korszerűsítését is. A GIF négyféle üzemanyagciklust definiált:

- Nyitott ciklus
- Plutónium részleges recirkuláció
- Teljes plutónium recirkuláció
- Transzurán elemek teljes recirkulációja

A negyedik generációs erőművek kifejlesztésre indult kutatások eredményeképpen ma hat típust választottak ki. Ez a hat típus pedig a következő:

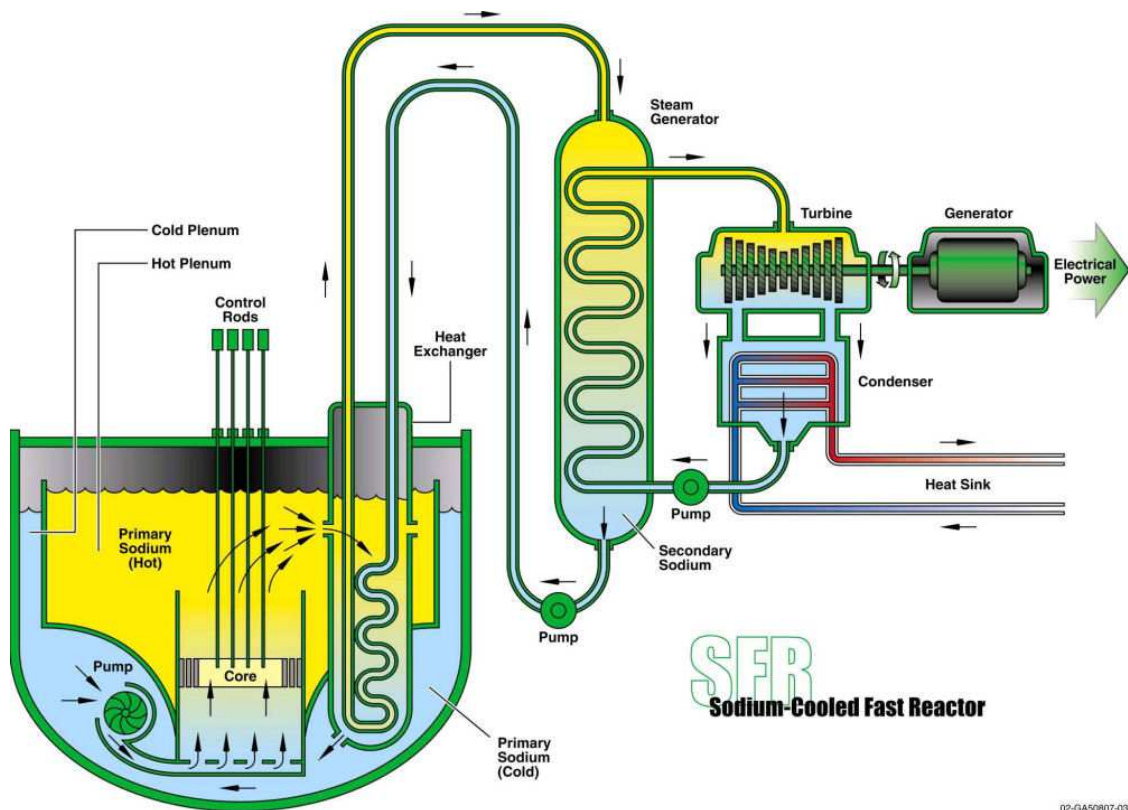
1. Na-hűtésű gyorsreaktor (SFR)
2. Nagyon magas hőmérsékletű gázhűtéses termikus reaktor (VHTR)
3. Szuperkritikus nyomású vízzel hűtött reaktor (SCWR)
4. Ólom/bizmut hűtéses gyorsreaktor (LFR)
5. Gázhűtéses gyorsreaktor (GFR)
6. Sólolvadékos reaktor (MSR)

⁵² Dr. Csom Gyula, Dr. Fehér Sándor: Harmadik és negyedik generációs atomerőművek, <http://www.enpol2000.hu/files/Csom%20-%20Atomeromuvek.ppt>

A negyedik generációs erőművek főbb típusainak bemutatása

1. SFR.

A Na-hűtésű gyorsreaktor, azaz Sodium-cooled Fast Reaktor, olyan reaktort, ahol a hűtést folyékony nátrium segítségével oldják meg. Ez azért is szükséges mivel a gyorsreaktorokban nem kell moderátor. Ez a típusú reaktor alkalmas arra, hogy a termikus reaktorok üzemanyagában jelenlevő hosszú felezési idejű aktinidákat hasznosítsa, illetve kezelje. Ezáltal lehetőség nyílik az üzemanyagciklus zárására is. Ugyancsak lehetőség nyílik a fertilis urán hasadóanyagká alakítása. Ez a reaktortípus gyors spektrumú neutronokat használ és ezért nincs szükség moderátorra. A hűtőközeg folyékony nátrium. A hűtőközeg hőmérséklete 530-550°C, ezáltal jó hatásfokkal lehet villamos energiát előállítani. Az üzemanyag lehet MOX illetve uránium-plutónium-cirkónium fémötvezet üzemanyag. Ez a típus az urán teljes mennyiségét tudná hasznosítani. Azaz nagy előnye lenne, hogy a nagy mennyiségben jelen levő U238-at is tudná hasznosítani, valamint a kiegészített fűtőanyagban levő aktinidákat is kezelné, felhasználná. Ezáltal megvalósulhat az üzemanyagciklus zárása, valamint az uránkészlet hatékonyabb hasznosítása is. Szintén nagy előnye, hogy gazdaságossági, biztonságossági, a fizikai védelmi és a proliferációállóság szempontjából is jónak minősül.

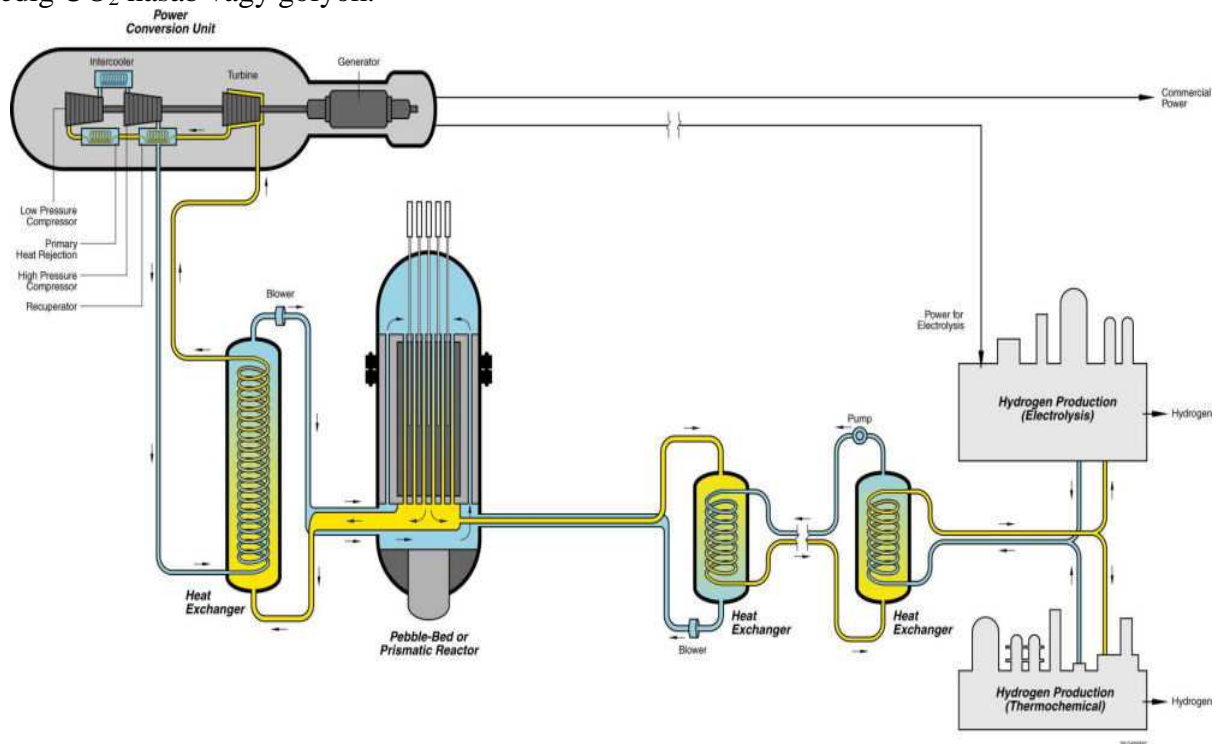


A primerköri nyomás alacsony, atmoszférikus nyomás. A primerkör és a gőzkör közé biztonsági okok miatt egy szintén foyékonyfém közbenső kört iktattak be. Ennek célja, hogy megakadályozzák a nátrium levegővel vagy vízzel való reakcióját. A primerkört a reaktorttal egy medencében helyezkedik el. A primerköri Na23 ezért felaktiválódik Na24-é. A szekunderköri nátrium azonban már nem radioaktív. Mivel a technológia ismert ezért a tökéletesített nátrium-hűtésű gyorsreaktorok már 2015-2020 körül megjelenhetnek.

2. VHTR

A GIF által javasolt hat típus közül a VHTR, azaz nagyon magas hőmérsékletű gázhűtéses reaktor, Very-High-Temperature Reactor System. Itt a hűtőközeg közeg hőmérséklete nagyon magas, mintegy 1000°C. emiatt nemcsak a villamos energia előállítás termodinamikai hatásfoka

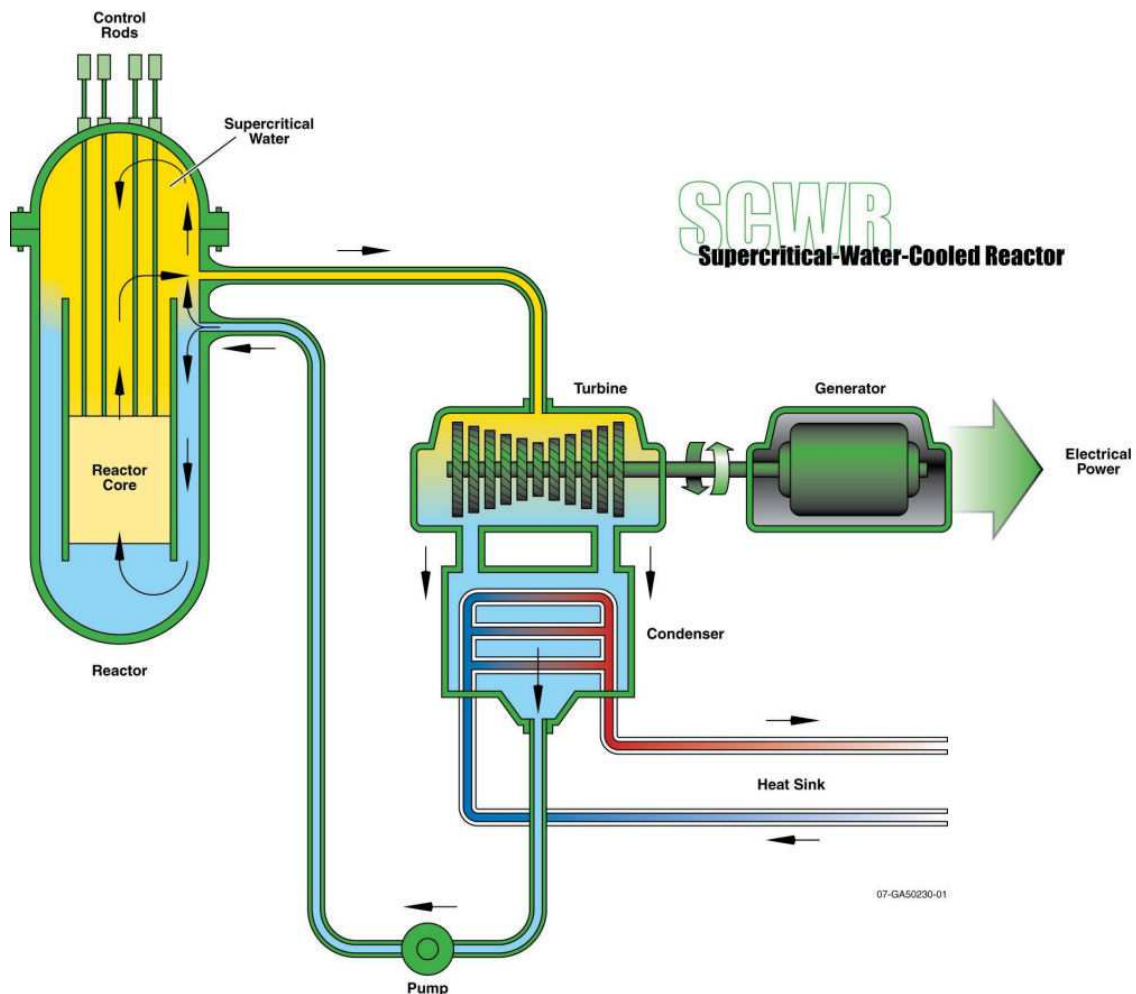
lesz magas, hanem más feladatok elvégzésére is alkalmas lesz a reaktor. A villamos energia mellett, magas hőmérsékletű ipari folyamathő előállítására lesz képes. Termokémiai hidrogéntermelésre, acél- és alumíniumgyártásra is használhatják, mint ipari folyamathőt. A villamos energia előállítás hatásfoka az 50%-ot is elérheti, ami a jelenlegi szinthez képest jelentős mértékű javulás. A magas kilépő hűtőközeg hőmérséklet hélium segítségével érhető el. Egy 600 MW hő teljesítményű, hidrogéntermelésre berendezkedett VHTR reaktorral nagy mennyiségű He állítható elő, akár napi 2 millió m³. A magas hőmérsékletű hűtőközeg magas nyomás alatt van. Mivel ez nem gyors reaktor ezért itt moderátor szükséges, amit a grafit lát el. Az üzemanyaga pedig UO₂ hasáb vagy golyók.



Ez a típusú reaktor termodinamikai szempontból kedvező, hiszen ipari folyamathő előállítására alkalmas. Valamint proliferációállóság, gazdaságosság, biztonságosság, fizikai védelem szempontjából jónak minősítették ezt a típust. Azonban ennél a típusnál a fenntarthatóság biztosítása kevésbé valósul meg. Itt ugyanis a nyitott üzemanyagciklus alkalmazható. Ez a típus várhatóan 2020 környékén rendszerbe állhat.

3. SCWR

Az SCWR, azaz superkritikus nyomású vízzel hűtött reaktor, Supercritical-Water-Cooled Reactor. Ennek a reaktoroknak két típusa lehetséges attól függően, hogy nyitott vagy zárt üzemanyagciklus részét alkotják. A nyílt üzemanyagciklusra épülő SCWR termikus spektrumú neutronokat használ, míg a zárt üzemanyagciklusra építő forma esetében gyors spektrumú neutronokat alkalmaznának. Ez utóbbi a fenntarthatóság szempontjából előnyösebb, hiszen lehetőség nyílik az aktinidák kezelésére, feldolgozására is. Akár a gyors spektrumú akár a termikus neutronokat használó típust vizsgáljuk, mindkettőre igaz, hogy elgőzölgő hűtőközeggel hűtött.



Az SCWR típusú reaktorok nagy előnye abban rejlik, hogy a víz kritikus pontja felett van, azaz hőmérséklete magasabb, mint $324\text{ }^{\circ}\text{C}$ nyomása nagyobb, mint $22,1\text{ MPa}$. A magas hőmérséklet miatt az elektromos energia előállításának hatásfoka is magas 44% . Azáltal, hogy a hűtőközeg halmazállapota a reaktorban nem változik, a felépítése is egyszerűbbé válik. Kiküszöbölhető a gőzszáritók, gőzszeparátorok, gőzfejlesztők megléte, ami egy jóval egyszerűbb felépítésű erőművet eredményez. A hagyományos reaktorokban használt turbinák továbbfejlesztése sem szükséges ezekhez a reaktorokhoz. A hűtőközeg sajtságai miatt nem szükséges olyan nagyméretű csővezeték, elzáró szerkezet, valamint nem igényel olyan nagy szivattyúteljesítményt sem. A piaci igényekhez is rugalmasan tud alkalmazkodni, 400 MWe és 1600 MWe között életképes. Az egyszerűbb felépítés miatt pedig alacsonyabb a beruházási költség. Egy 1700 MW_e teljesítményre tervezett termikus neutronokat használó SCWR esteében az egy KW_e -ra jutó beruházási költség 900 USD .

Mivel a kutatások és fejlesztések ennél az erőműtípusnál is előrehaladott állapotban vannak, ezért gyorsan kifejleszthetők és akár $2020\text{-}25$ -ben jó esetben már rendszerbe is állhatnak. Ez a típus villamos energiatermelésre tervezett, de a gyors spektrumú neutronokat használó típusa alkalmas lesz az aktinidák kezelésére. Ennek a típusnak tehát nagy előnye, hogy magas termodinamikai hatásfokkal tud majd villamos energiát előállítani, lesz olyan változata is, amely a fenntarthatóság szempontjából előnyös zárt üzemanyagciklushoz kapcsolódik. A proliferációállósága és a fizikai védelem tekintetében is jónak minősített. Gazdasági versenyképesség szempontjából pedig kifejezetten előnyös, hiszen egyszerűbb felépítésű, ezáltal a beruházási költségek is alacsonyabbak. Már most nagy érdeklődéssel vannak a típus iránt. Legnagyobb mérvű fejlesztése Japánban zajlik. Európai változata pedig a HPLWR, azaz High Performance Light Water Reactor.

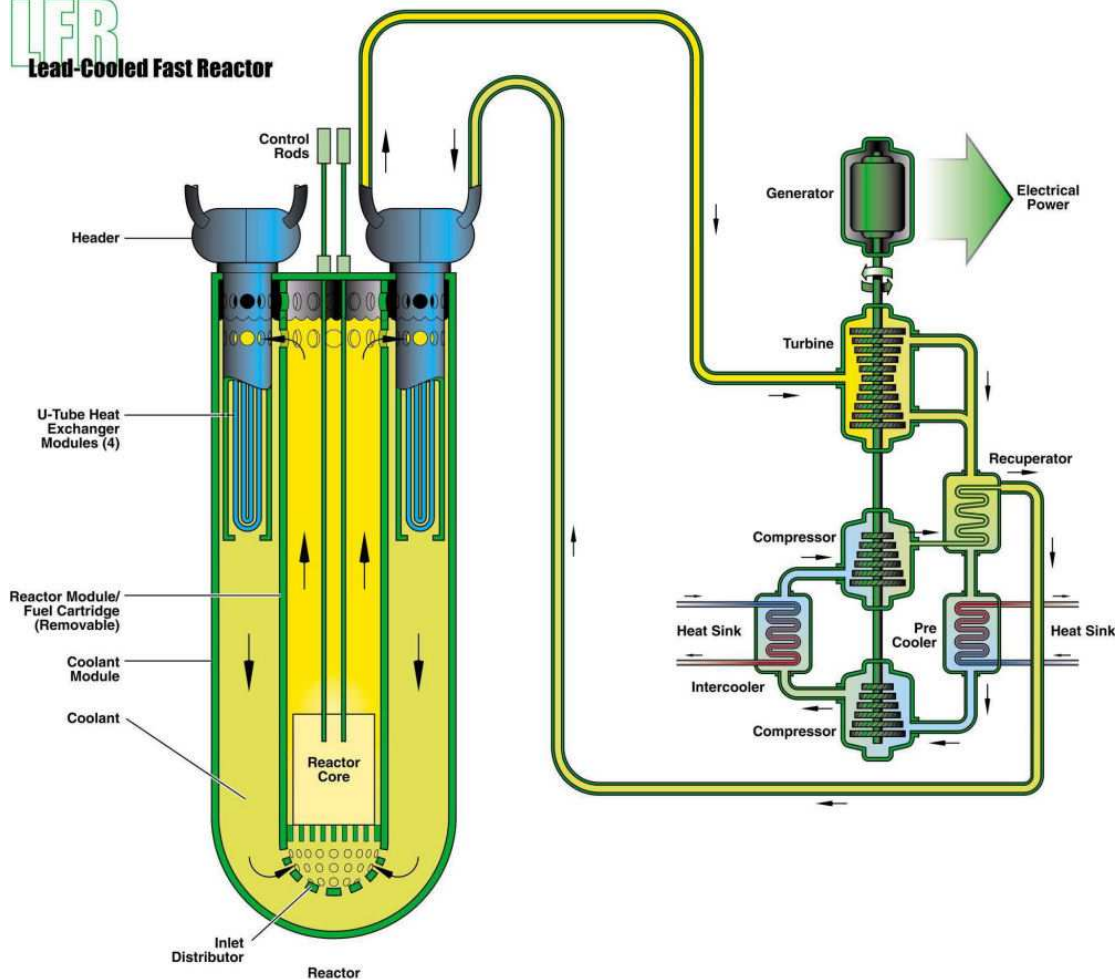
4. LFR

Szintén zárt üzemanyagciklusba kapcsolódik az LFR, azaz a Lead Fast Reactor, ólom/bizmut hűtésű gyorsreaktor. Gyorsreaktor révén gyors spektrumú neutronokat használnak. Itt a hűtőközeg ólom vagy ólom-bizmut eutektikum. Mivel ezek nem reagálnak a vízzel így sokkal egyszerűbb és biztonságosabb erőmű létesíthető. Míg a SFR esetében a nátrium vízzel való reakciójának veszélye miatt egy közbenső kör beiktatására volt szükség, addig az ólom hűtésű esetben nem kell közbenső kört beiktatni. Az LFR esetében magasabb kilépési hőmérséklet érhető el (minimum 550°C), emiatt jobb hatásfokkal alkalmazható, valamint az ipari folyamathő biztosítása is jobb ennél a típusnál. Ennek a típusnak már részben vannak gyakorlati tapasztalatai is az orosz BREST reaktor ugyanis ólom/bizmut hűtésű volt. Az üzemanyag tekintetében is vannak már gyakorlati tapasztalatok az Integral Fast Reactor gyártási és recirkulációs fejlesztéseiből. Az LFR üzemanyag pedig fém vagy nitrid alapú sterilis anyagot és transzurán elemeket tartalmaz. A nátriummal szemben az ólom vagy az ólom/bizmut hűtés sokkal jobb neutronfizikai tulajdonságokkal bír. Ezért jobb a hasadóanyag újratermelésére valamint a kampányideje is jóval hosszabb lehet. Az LFR típuson belül többféle változatot tudunk megkülönböztetni.

Reaktorparaméter	Referencia adat			
	Pb-Bi telep (rövid táv)	Pb-Bi modul (rövid táv)	Pb, nagy (rövid táv)	Pb telep (hosszú táv)
Hűtőközeg	Pb-Bi	Pb-Bi	Pb	Pb
Kilépő hőmérséklet, °C	~550	~550	~550	750-800
Nyomás	atmoszférikus	atmoszférikus	atmoszférikus	atmoszférikus
Reak.teljesítmény, MWhó	125-400	~1000	3600	400
Üzemanyag	fémötvözet vagy nitrid	fémötvözet	nitrid	Nitrid
Burkolat	ferrites	ferrites	ferrites	keramikus vagy tűzálló ötvözet
Átlagos kiegészi szint, MWnap/t nehéz fém	~100	100-150	100-150	100
Konverziós tényező	1,0	>1,0	1,0-1,02	1,0
Rács	Nyitott	Nyitott	Kevert	Nyitott
Primer köri áramlás	Természetes	Kényszerített	Kényszerített	Természetes

Teljesítőképesség szerint csoportosítva három kategóriába sorolhatjuk őket. Az első az 50-150 MW_e –os telep, itt a kiegészi szint magas, hosszú a kiegészi kampányhossz. A következő kategóriába a 300-400 MW_e –os teljesítményű moduláris rendszer tartozik. A legnagyobb teljesítményű az 1200 MW_e –os monolit erőmű.

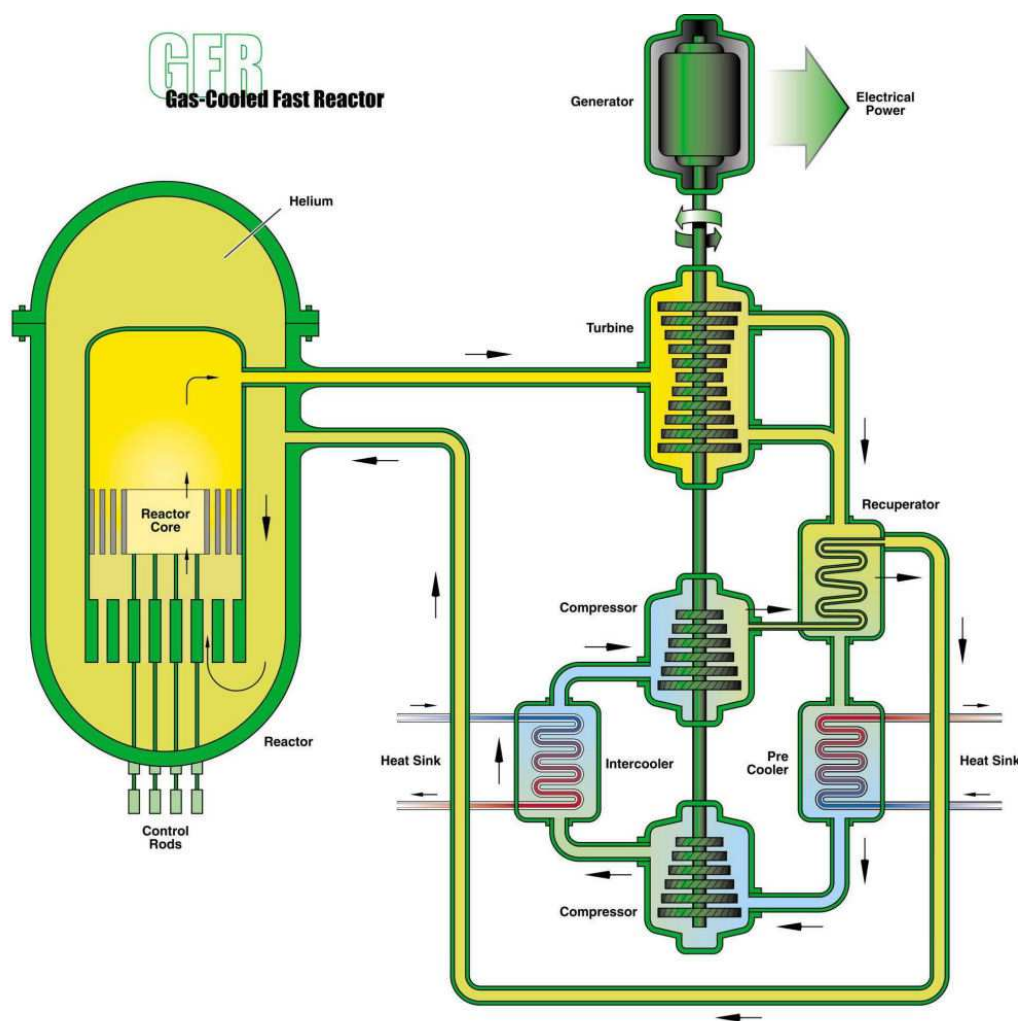
LFR Lead-Cooled Fast Reactor



Az LFR típusról általában elmondható, hogy biztonsági és gazdasági szempontból is kiválóan minősíthető, nemcsak egyféle termék előállítására alkalmas. A villamos energia mellett alkalmas tengervíz sótalanításra, hidrogén előállításra is. Fizikai védelemben is jónak minősül, hiszen hosszú a kiegészi ciklus. A proliferációállóság és a fenntarthatóság szempontjából is kiválóan minősül, egyenlőre azonban Európában a típus fejlesztését zsákutcának tartják. Pedig a különböző koncepciók kiválóan alkalmazkodhatnak az egyes országok igényeihez, ugyanis a kis vagy fejlődő országokban, vagy elszigetelt hálózatok esetében a kis teljesítményű telepek kiválóan illeszthetők. Míg a „legrövidebb” távra tervezett koncepció esetében az elsődleges cél a villamos energiatermelés. A hosszabb távú ólomhűtéses típusok inherens, biztonságos reaktor kifejlesztésére törekszenek. Mivel itt a kilépő hőmérséklet jóval magasabb ($750\text{--}800^{\circ}\text{C}$), ezért ez ipari folyamathő előállítására, hidrogén termelésére is alkalmas lesz.

5. GFR

A GFR, azaz Gas-Cooled Fast Reactor szintén olyan erőműtípus, amely nemcsak villamos energia előállítását teszi lehetővé. A magas kilépő hűtőközeg hőmérséklet (850°C) ipari folyamathő előállítására is alkalmassá teszi az erőművet. Így a villamos energia mellett akár hidrogéntermelésbe is bekapcsolható az atomerőmű. A GFR termodinamikai hatásfoka 48%, ami a korábbi típusokhoz képest jóval magasabb. Ennek a magas hatásfoknak az az egyikmagyarázata, hogy a gázhűtés miatt a magas hőmérsékletű hűtőközeget közvetlenül gázturbinára kapcsolják. A hűtőközeg hélium gáz. A típus előnyei közé tartozik, hogy szintén a zárt üzemanyagciklus megvalósítását teszi lehetővé. A rendszerhez többféle üzemanyag is használható. A GFR gyorsneutron-spektrumú így nem kell moderátort alkalmazni. A rendszer önfenntartó működésű és a gyorsneutron spektrum miatt jó hasadóanyag-újratermelő tulajdonságokkal bír.



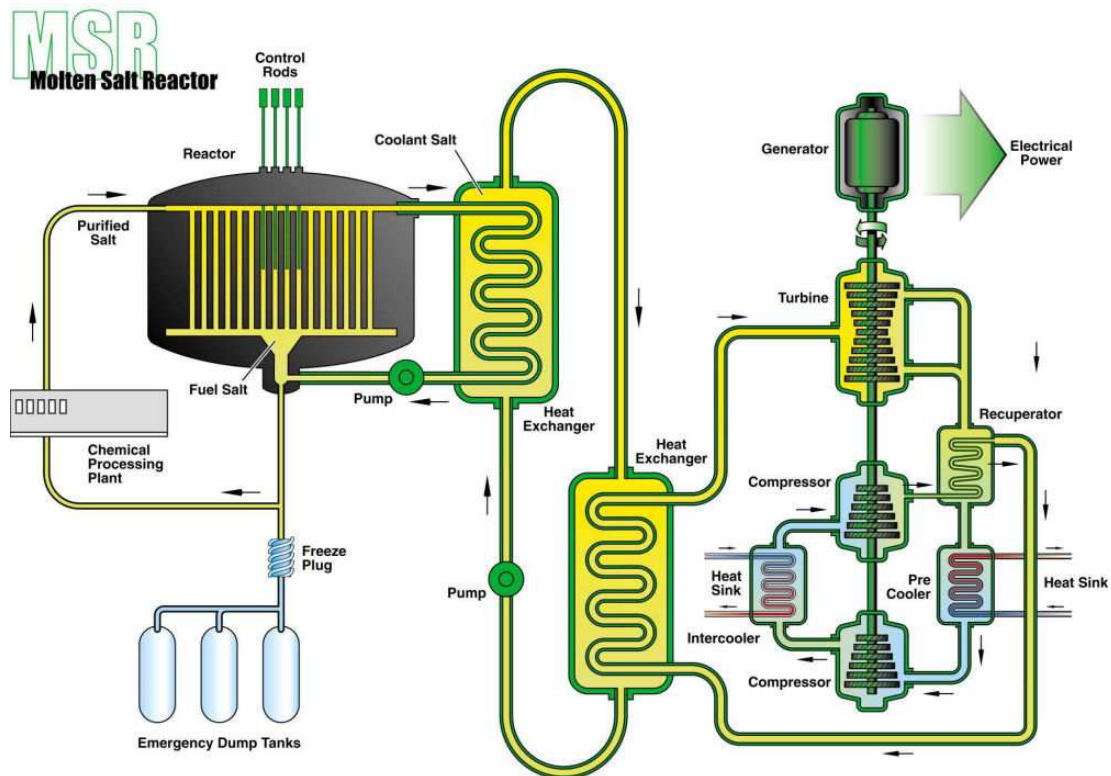
A GFR-ek a negyedik generációs erőművek által kitűzött célok közül mindnek megfelel. Hiszen magas hatásfokkal állítja elő a villamos energiát, valamint alkalmas hidrogén előállítására, ezáltal a gazdaságosság szempontjából kiváló. A fenntarthatóság szempontjából is megfelelő hiszen a zárt üzemanyagciklushoz kapcsolódik. Megbízható és biztonságos. A proliferációállóság is megfelel, hiszen alkalmas a plutónium recirkulációjára. A GFR-nek számos technológiai előzménye van, hiszen termikus, magas hőmérsékletű gázhűtéses reaktorok már most is működnek. Valamint létezik gyorsneutron-spektrumú, gázhűtéses erőmű tervezet. Ennek a típusnak az üzembeállása legkorábban 2020-25 környékén lehetséges.⁵³

6. MSR

Az MSR azaz Molten Salt Reactor, más néven sóolvadékos reaktorok. Ezek többféle célra is alkalmasak, és ettől függ a sóolvadék összetétele is. A sóolvadéknak több funkciója is van. Egyrészt a hűtőközeg szerepét tölti be, másrészt viszont ebben az olvadt sókeverékben van feloldva az urán- és/vagy plutónium-fluorid. Azaz hűtőközeg és üzemanyag is egyben. Az olvadt sókeverék összetételét aszerint is változtathatják, hogy az elsődleges cél a villamos energia termelés vagy a hidrogéntermelés. Ha az erőmű elsődleges célja a villamos energia előállítása, akkor olyan fluoridsókat használnak, amelyek az aktinidák jobb oldódását teszik lehetővé, például NaF/ZrF₄. Az erőmű azonban alkalmas hidrogén termelésre is ekkor azonban másfajta sóösszetétel szükséges. Ebben az esetben a Li-és Be-fluoridok alkalmazása előnyösebb. Hidrogéntermelésre a magas hőmérséklet miatt képes ez a típus. Hiszen a kilépő hőmérséklet 850°C is lehet (ha a cél a hidrogén termelés). A magas hőfok az eutektikumok segítségével érhető el, a belépési hőmérséklet az eutektikumok olvadási pontja, míg a felső határt a szerkezeti

⁵³

anyagok kémiai tűrőképessége adja meg. Ezzel a típussal is magas termodinamikai hatásfok érhető el, akár 44-50%. A rendszernek számos előnye van és a kutatásokat már az 1940-50-es években elkezdték.⁵⁴Többféle üzemanyagciklus-opció is létezik. Az MSR termikus és epitermikus neutronspektrummal is működtethető. Termikus neutronspektrum esetén moderátor alkalmazása szükséges. Ilyen típusú MSR-nél a tervezett moderátor grafit. A sóolvadék pedig a grafitcsatornákon áramlik keresztül. A primerköri olvadt só a hőt egy közbenső körnek adja át, ami szintén olvadt só. Majd a közbenső kör a hőt a gőzfejlesztőben adja le. Magas nyomású és hőmérsékletű vízgőzt vagy gázt termelve.



02-GA50807-02

Az eutektikum alkalmazása révén a primerkörben nem szükséges nagy nyomás alkalmazása, ezért a csövekben és a reaktortartály falában ébredő feszültség is kisebb lesz. Emellett ennek a típusnak az is nagy előnye, hogy lehetőség van az üzemanyag működés közbeni cseréjére, feldolgozására, a hasadóanyag leválasztására (on-line), ezért a rendelkezésre állás is magasabb. Az inherens biztonsága is magas a passzív hűtés és az alacsony illó hasadóanyag koncentráció miatt. A negyedik generáció célkitűzéseit jól teljesíti, hiszen zárt üzemanyagciklushoz kapcsolódik, magas termodinamikai hatásfok érhető el vele, kiválóan alkalmas a radioaktív hulladékok kiégetésére. A proliferációállóság és a fizikai védelem szempontjából is jók minősül. Ennek a típusnak a kifejlesztése várhatóan 2030-ra fejeződik be.⁵⁵

Az újabb generációs erőművek által kitűzött fejlesztési célok:

- Az elektromos energiatermelés hatásfokának javítása (elektromos energia/urán; elektromos energia/kitermelt közet)

Az elektromos energia előállítás szempontjából fontos, hogy minél jobb hatásfokú legyen. Ezért is fontos cél, hogy az elektromos energia/ kitermelt közet minél hatékonyabb legyen. Ennek egyik lehetséges módszere a korábbi nyitott üzemanyagciklus helyett a zárt üzemanyagciklus alkalmazása.⁵⁶

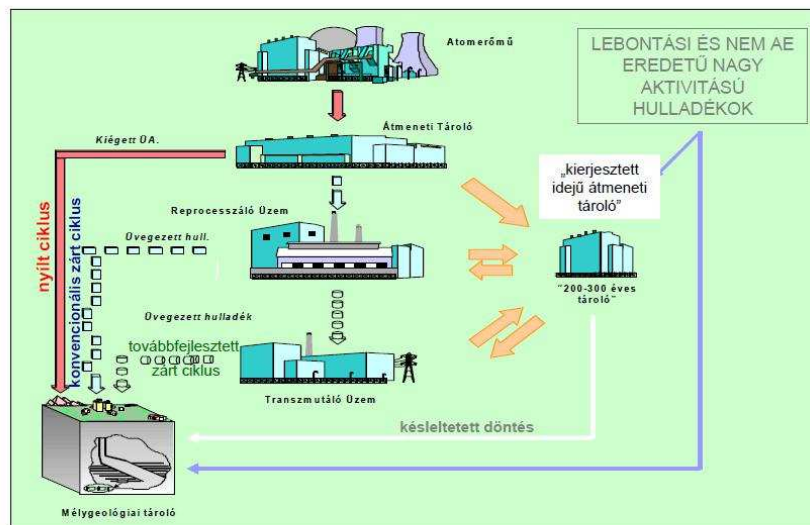
⁵⁴ Dr. Csom Gyula, Fehér Sándor, Szieberth Máté: IV. generációs reaktorok és transzmutáció www.energetika.13s.hu/pub/reakorteknika/IV_gen_SZM.ppt

⁵⁵ Trubacs Zoltán: IV. generációs reaktorok

⁵⁶ Atomerőművek.pdf <http://www.zmne.hu/tanszekek/vegvi/personal/Atomeromuvek.pdf>

Az üzemanyagciklusok között két fő típust tudunk megkülönböztetni: a nyitott és a zárt üzemanyagciklust. A nyitott üzemanyagciklusnál a kiegészített fűtőelemeket átmeneti tárolóban helyezik el, majd pedig végleges (geológiai tárolókba). Azaz a kiegészített fűtőelemek teljes mértékben hulladéknak számítanak és csak egyszer használták őket erőművi termelésre⁵⁷. Ezzel szemben a zárt üzemanyagciklus során a kiegészített üzemanyag az átmeneti tárolóból a reprocesszáló üzembe kerül, ahol az el nem bomlott izotópokat kinyerik és újbóli dúsítás után ismételt fűtőelemeket gyártanak belőle. Így ez újból visszakerül a reaktorba. A zárt üzemanyagciklusnak is két formája van a konvencionális, ahol a reprocesszáló üzemből a hulladék a végleges tárolókba kerül. A továbbfejlesztett típus esetén a reprocesszáló üzemből a visszamaradó nukleáris hulladék a transzmutáló üzembe kerül ahol a hosszú felezési idejű izotópokat rövidebb felezési idejű izotópokká alakítják át.⁵⁸

BACK END



26. ábra: Nyílt és zárt üzemanyagciklusok

A jelenlegi erőművi termelés során uránizotópok közül az elektromos energiatermelésre leggyakrabban a 235-ös izotópot használják. A negyedik generációs erőműveknél az U235 mellett az U238 és a Th233 termelésbe történő bevonását is tervezik. Ezzel az úgynevezett zárt üzemanyagciklus teljesebbé tehető. A kibányászott uránércet különböző eljárások segítségével feltárják, majd dúsítják, és fűtőelem pálcákba töltik. A gazdasági versenyképesség szempontjából fontos cél, hogy minél hatékonyabb legyen az atomerőművek esteében az üzemanyag-felhasználás. Ezt elősegíti már a harmadik generációs erőművek estén tervezett magasabb kiegészési szint. A magasabb kiegészési szint ugyanis hatékonyabb üzemanyag felhasználást eredményez, valamint a kiegészített fűtőelemek mennyisége is csökken ezáltal. Emellett cél a kiegészítő adszorbensek (mérgek) alkalmazása is, amelyek a fűtőelemek élettartamát megnövelik. Azaz az újabb technológiák segítségével a fűtőelemek élettartama nő, valamint magasabb kiegészési szint érhető el. Ezáltal az elektromos energia előállítása sokkal gazdaságosabbá válik. A CANDU 3 harmadik generációs atomerőmű üzemanyaga pedig természetes vagy szegényített urán. Mindemellett a gazdaságosság mértékét a nagymennyiségű termelt hő hasznosításával is növelhetjük.

⁵⁷ Dr. Fehér Sándor: Radioaktív hulladékok transzmutációja- <http://www.matud.iif.hu/07jan/09.html>
⁵⁸ Atomerőművek.pdf <http://www.zmne.hu/tanszekek/vegyl/personal/Atomeromuvek.pdf>

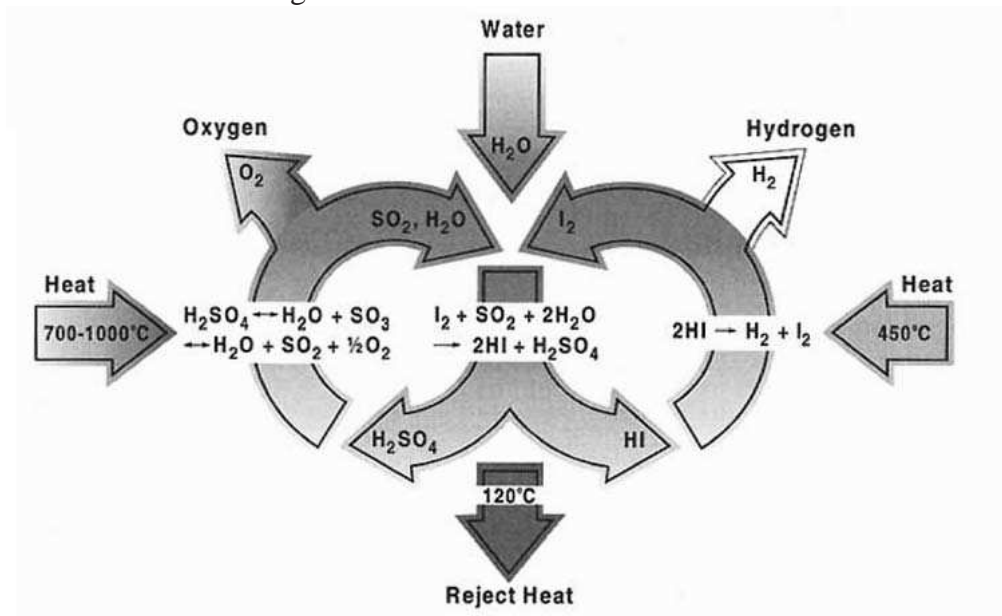
A nagymennyiségű hő hasznosítása

A reaktorban a láncreakció során keletkező hőt a hűtőközeg veszi fel és a hűtőkörön keresztül elvezetik és a turbinák meghajtására használják fel. A jelenlegi második generációs erőművek hatásfoka kb. 35 %. Ezzel szemben az újabb generációs erőművek esetében a cél a magasabb hatásfok elérése. Már a harmadik generációs erőművek estén is cél a termodinamikailag magasabb hatásfok elérése. A GT_MHR típus esetén a hélium hűtőközeg közvetlenül hajtja meg a turbinákat így ezzel a megoldással a termodinamikai hatásfok 48%. Emellett a keletkező hőt nemcsak villamos energia előállítására használják fel, hanem más folyamatokba is bevonják. Egyik lehetőség a magasabb hűtőközeg-hőmérséklet esetén a hidrogéntermelésbe való bevonása. Azaz a reaktor ipari folyamathó előállítására is alkalmassá válik. Mint például a magas hőmérsékletű gázhűtéses reaktor (VHTR). Itt a hűtőközeg a hélium, ennek segítségével a kilépő közegek hőmérséklete 950° C. A hélium ugyanis nem lép reakcióba az UO₂-nél sokkal hatékonyabb UC (urán-karbid) üzemanyaggal.⁵⁹

A negyedik generációs erőművek esetében nemcsak villamos energia előállítása, hanem a tengervíz sótalanítása és a hidrogéntermelésben való részvétel is cél.⁶⁰

Az atomerőművek hidrogéntermelésre való használat számos előnnyel jár. A jelenlegi előállítási módszer során földgázból nyerik a hidrogént és CO₂ keletkezik, mint melléktermék. A hidrogén előállítása vízbontásával is megvalósulhat, de ehhez magasabb hőmérsékletű hőforrás szükséges. Ennek a reakciónak a lejátszódásához magas hőmérséklet, mintegy 700-1000° C szükséges. Ezt magas hőmérsékletű atomreaktorok segítségével is biztosíthatjuk. Ennek a módszernek tehát környezetvédelmi szempontból is nagy előnye van, hiszen nem szabadul fel széndioxid az eljárás során. A hőt az atomerőmű termeli meg. Nem igényel más energiaforrást. Az erőmű által termelt hő tehát részben villamosenergia-termelésre részben pedig hidrogén előállítására szolgál. A folyamatban a H₂SO₄ és az I₂, mint katalizátor vesznek részt. Azaz ezek segítik a reakció végbemenetelét. A módszer jelentős előnye, hogy az elektrolízis során az elektromos energia 80%-os hatásfokkal használódik fel. Mivel egy atomerőműben a jelenlegi körülmények között 34%-os a villamosenergia-termelés hatásfoka, ezért ez tulajdonképpen

Az elektrolízises eljárás hatásfoka kb. 27% (0,80×0,34). A termokémiai folyamatok során pedig 50 %-os hatásfokkal lehet hidrogént előállítani.

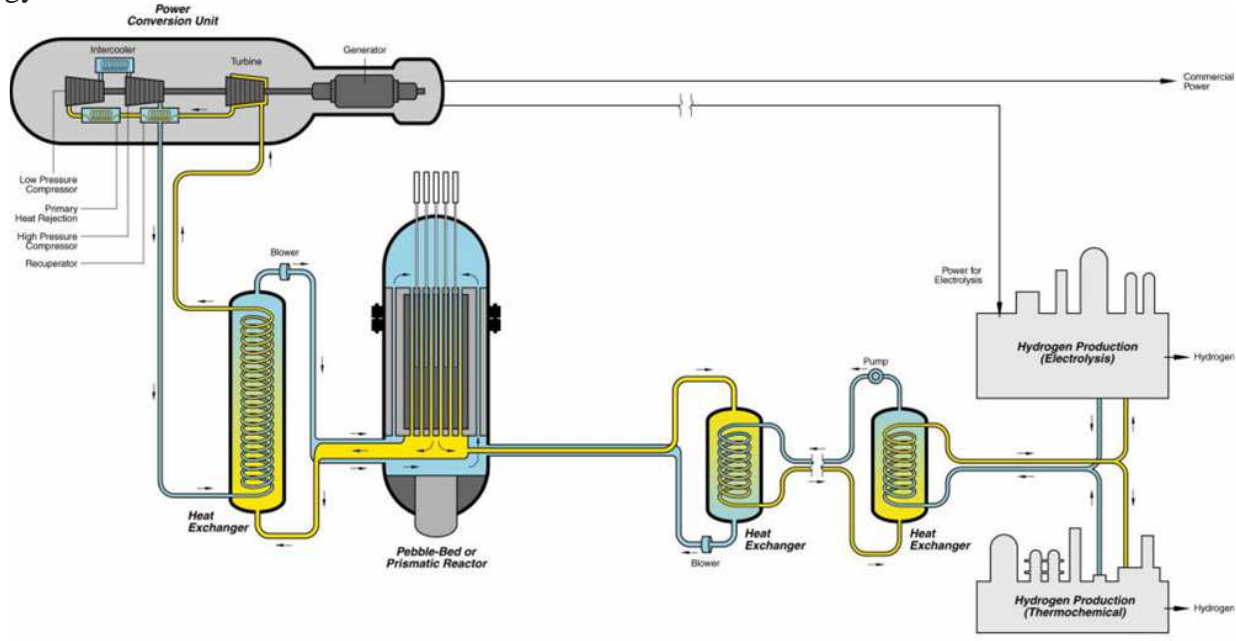


27. ábra: Hidrogén termokémiai előállításának folyamata

⁵⁹ Dr. Csom Gyula: Atomerőművek IV <http://www.atomforum.hu/pdf/04%20atomeromuvek.pdf>

⁶⁰ Dr. Aszódi Attila: A neutronfelfedezéstől a negyedik generációs atomerőművekig http://www.reak.bme.hu/oldweb/aszodi/eoadasok_cikkek/Aszodi_FizAnket_2005marc12.pdf

Így a kombinált ciklusú erőművek hatásfoka akár **60%-os is lehet.**



28. ábra: atomerőmű (VHTR) és hidrogéntermelés kombinálása⁶¹

A termokémia eljárás biztonsági szempontból fontos feltétele azonban az, hogy a magas hőmérsékletű atomerőmű és a hidrogéntermelő üzem egymástól elszigetelt legyen. Ez a módszer a hidrogén olcsóbb előállítását teszi lehetővé a General Atomics elemzése szerint.⁶²

A hidrogéntermelés mellett a másik fő folyamat a tengervíz sótalanítása is. A napi ivóvíz szükséglet biztosításához már sok helyen a sós vizet sótlanítják. Ez többféle eljárás révén valósulhat meg. Például a többlépcsős hőbontással (MSF= Multi Stage Flash), ahol hasznosíthatják az atomerőművek által termelt hőenergiát.⁶³

De nemcsak a hidrogén termelésének, vagy a tengervíz sótalanításának folyamatába kapcsolódhatnak be az atomerőművek, hanem az alábbi folyamatokba is:

- Nehézolaj kéntelenítése
- Szintetikus szénhidrogén- alapú üzemanyagok előállítása⁶⁴

Ne lehessen a kiégett fűtőelemeket fegyverek előállításra használni.

Az atomerőművek biztonsági kérdései között szerepel az a cél, hogy a polgári célú erőművekben ne lehessen katonai tisztaságú plutóniumot termelni. Azaz ne lehessen hadászati célokra használni. Több ország szerint ugyanis a második és harmadik generációs erőművek nem zárják ezt ki teljes mértékben. Ezáltal olyan országok is használhatnák, amelyek ma még ki vannak zárva emiatt az atomerőművi termelésből.⁶⁵

Itt fizikai és műszaki megoldások mellett jogi, őrzési és szervezési lépések is kidolgozásra várnak.⁶⁶

⁶¹ Dr. Csom Gyula, Fehér Sándor: Atomerőművek

⁶² Dr. Csom Gyula: Atomerőművek IV <http://www.atomforum.hu/pdf/04%20atomeromuvek.pdf>

⁶³ Nukleáris sótalanítás- <http://www.world-nuclear.org/info/inf71.html>

⁶⁴ A magyar nukleáris kutatás-fejlesztési program jövőképe

<http://szanto.web.kfki.hu/faetp/dl/VisionReport.pdf>

⁶⁵ Dr. Csom Gyula: Atomerőművek IV <http://www.atomforum.hu/pdf/04%20atomeromuvek.pdf>

⁶⁶ Dr. Csom Gyula, Fehér Sándor: Atomerőművek

Kiégett fűtőelemek újrahasznosítása atomerőműi felhasználásra

Ha a kiégett fűtőelemek összetételét megvizsgáljuk, akkor jól látható, hogy ezek teljes mértékben nem tekinthetők hulladéknak, hiszen sok bennük a még el nem bomlott hasadóanyag. A hasadóképes uránnak mintegy 3%-a bomlik csak el, azaz a kiégett fűtőelemben sok marad meg elhasználatlanul. A kiégett üzemanyag összetételét ha vizsgáljuk (16.ábra), akkor a legnagyobb mennyiségben, mintegy 95%-a urán. Ennek közel 1% a ^{235}U , ez az arány magasabb, mint a természetes urán esetén. Azaz a kiégett fűtőelemekből kinyert ^{235}U , mint enyhén dúsított urán újból üzemanyagként szerepelhet. A kiégett fűtőelem 1%-át teszi ki a plutónium, ami a zárt üzemanyagciklusban üzemanyagként alkalmazható. Tehát a reprocessálás után gyakorlatilag az urán és a plutónium újból üzemanyagként hasznosítható. Azaz ezt követően hulladékként fennmaradó részből a problémát a mintegy 0, 1%-ot kitevő hosszú felezési idejű aktinidák jelentik⁶⁷. Erre pedig hosszú távon a transzmutálás jelenti a megoldást.



29. ábra: Kiégett üzemanyag összetétele (Bmenti)

Azaz szétválasztás után a hasadóképes anyagból ismételt üzemanyagként szerepelhet az atomerőművekben. Ezt a folyamatot nevezzük reprocessálásnak.

Már a harmadik generációs erőművek közé sorolt CANDU 3 esetén megvalósulhat az, hogy az üzemanyag természetes vagy kissé dúsított urán. A CANDU 9 esetében, mely a CANDU 3 továbbfejlesztett változata, a PWR-ekben keletkező kiégett üzemanyag reprocessálása (újrafeldolgozása) során visszanyert urán.

Kiégett fűtőelemek kevésbé radioaktív elemekké történő feldolgozása

A reprocessálás után visszamaradó hulladék esteében a problémát a hosszú felezési idejű aktinidák jelentik. De erre megoldást jelent a P&T technológia. Ennek segítségével a hulladék térfogata, a felezési idő és az aktivitás is csökkenthető. A P&T technológia= Particionálás (kémiai szétválasztás) és Transzmutálás. A transzmutálás jelentése a „neutron-besugárással kiváltott magátalakítás -„kiégetés””.⁶⁸

⁶⁷ Dr. Fehér Sándor: Radioaktív hulladékok transzmutációja <http://www.matud.iif.hu/07jan/09.html>

⁶⁸ Czifrus Szabolcs: Atomenergia a 21. században- www.reak.bme.hu

A transzmutálás, mint megoldás nem új keletű, hiszem már a '40-es években megjelent. Sőt már '76-ban a Nemzetközi Atomenergia Ügynökség kutatási programot is indított. A P&T technológia iránti kutatásokat az OMEGA program is segítette és a japánoknak ebben nagyon fontos szerepe van. A kutatásban résztvevő országok köre is folyamatosan bővül. A technológia azért is kapott fontos szerepet, mert ezáltal a keletkező radioaktív hulladékok mennyisége és az aktivitás mértéke is jelentősen csökkenthető. Eddigi gyakorlat során a kiégett üzemanyag az átmeneti tárolóba került, majd onnan a mélységi-geológiai tárolókba. A transzmutálás segítségével a végleges tárolókba jutó hulladék tárolása sokkal gazdaságosabb és biztonságosabb lesz. A transzmutálás célja hogy a hosszú felezési idejű izotópokat stabilabb, rövidebb felezési idejű izotópokká alakítsák át. Ehhez azonban olyan rendszerek szükségesek, amelyek képesek ezeknek a másodlagos aktinidáknak a recirkulációjára és hasítására (kiégetésére). A transzmutálás a zárt üzemanyagciklus része, mert ennek keretében sor kerül a kiégett üzemanyagból kinyert urán és plutónium recirkulációja mellett ezeknek a másodlagos aktinidáknak a recirkulációjára is. Azaz csökken a radioaktivitása. Ennek megvalósításához olyan technológiára, erőművekre van szükség, amelyek alkalmasak a transzmutálásra. Ezek speciális reaktorok vagy gyorsítóval meghajtott, önfenntartó láncreakcióra nem képes szubkritikus rendszerek. A hasadási termékek és a másodlagos aktinidák transzmutálásához eltérő tulajdonságú besugárzás szükséges. A hasadási termékek transzmutálásához a nagy neutron-sűrűségű (nagy fluxusú) és kisebb átlagenergiájú (termikus spektrumú) neutronokkal üzemelő reaktorok szükségesek. A másodlagos aktinidák esetében pedig a keményebb spektrumú gyorsítóval hajtott szubkritikus rendszerek szükségesek. A P&T (particionálás és transzmutálás) technológiája nagyon kutatott téma. Az elméleti eredmények mellett számos kísérleti eredmény is bizonyítja, hogy műszakilag is kivitelezhető. A particionálás során szelektíven elválasztják a másodlagos aktinidákat és a hasadási termékeket. A transzmutálás rendszerszintű megvalósítására többféle elképzelés van. Az egyik szerint a termikus reaktorok és a gyors reaktorok azonos arányban szerepelnének. A másodlagos aktinidák transzmutálása a gyors reaktorokban történne meg. A gyors reaktorok pedig a termikus reaktorok valamint a saját működésükből származó plutóniummal és másodlagos aktinidákkal üzemelnének. Egy másik elképzelés szerint pedig a transzmutálás egy arra külön kifejlesztett rendszerben történne. Egy-egy ilyen transzmutáló üzem 6-10 termikus reaktort tudna kiszolgálni. E szerint a megoldás szerint a termikus reaktorok lennének többségben. Ezek üzemanyaga jórészt a plutónium újrafelhasználásával üzemelne. A termikus reaktorokban keletkező másodlagos aktinidákat pedig ezen speciális üzemek többszöri visszaforgatással transzmutálnák. Így az eredeti radiotoxicitás akár század részére is lecsökkenthető lenne a nyitott üzemanyag ciklushoz képest.⁶⁹

Radioaktív hulladékok elhelyezése.

A radioaktív hulladékok elhelyezése számtalan kérdést vet fel. A radioaktív hulladék kezelése és végleges elhelyezése nagyon fontos kulcskérdés az atomenergiában. A radioaktív hulladékot ugyanis úgy kell elhelyezni, hogy az se a környezetre, se az emberre ne jelenthessen veszélyt. A radioaktív hulladék végleges elhelyezése során nemcsak egy emberöltőnyi időre kell tervezni a tárolót. Azaz hosszútávra és biztonságosan kell megoldani a hulladék elhelyezés kérdéskörét. Ehhez számos tényezőt kell figyelembe venni. A hulladék aktivitásának mértéke, hőterhelése. Találni kell olyan tárolót, amely kellő mértékű védelmet nyújt. Azaz nem jut ki belőle sugárzás. A természeti erők vagy akár az emberek ne tudjanak olyan jellegű kárt okozni, amelynek következtében szennyezés jut ki a környezetbe.

⁶⁹ Fehér Sándor: Radioaktív hulladékok transzmutációja
<http://www.matud.iif.hu/07jan/09.html>

Ha a radioaktív hulladékokat vizsgáljuk meg, akkor számtalan kérdés merül fel. Hol keletkezik, milyen aktivitású, milyen halmazállapotú, milyen kezelést igényel, hogyan tárolható. Radioaktív hulladék nemcsak az erőműben keletkezik, hanem már az üzemanyag előállításakor is. Ennek azonban kicsi az aktivitása, viszont nagy mennyiségben keletkezik. Az atomerőműben mind az üzemelés, mind az erőmű leszerelése során keletkezik hulladék. Ez a hulladék különböző halmazállapotú, koncentrációjú, térfogatú.

A keletkező hulladékot számos szempont alapján lehet kategorizálni. Egyrészt lehet az aktivitáskoncentráció alapján. Eszerint megkülönböztetünk kis, közepes és nagy aktivitású hulladékot. A kis aktivitású hulladék aktivitása $5 \cdot 10^5$ kBq/kg. A közepes aktivitású hulladéknál ez az érték $5 \cdot 10^5$ kBq/kg és $5 \cdot 10^8$ kBq/kg közé esik. Míg a nagy aktivitású hulladékoknál ez az érték nagyobb, mint $5 \cdot 10^8$ kBq/kg. A másik vizsgált tulajdonság a radioaktív hulladék felezési ideje. Azaz mennyi idő alatt bomlik el az adott izotóp eredeti mennyiségének fele. Eszerint pedig három kategóriát tudunk elkülöníteni: rövid, közepes és hosszú élettartamú hulladékok. A rövid élettartamú hulladékok esetén a felezési idő kevesebb, mint 30 nap. A közepes élettartamú hulladékok esetében ez az érték 30 nap és 30 év közé esik. Míg a hosszú élettartamú hulladékok felezési ideje 30 évnél nagyobb. A radioaktív hulladékokat jellemzőik függvényében kell megfelelő tárolóhelyen elhelyezni. A NAÜ (Nemzetközi Atomenergia Ügynökség) is készített egy ilyen táblázatot. Az alábbi táblázat a NAÜ javaslata.

Hulladékkategória	Jellemzők	Elhelyezés
1. Mentességi	Az aktivitásszintek nem haladják meg a mentességi szinteket	Nincs sugárvédelmi korlátozás
2. Kis és közepes aktivitású	Az aktivitásszint meghaladja a mentességi szintet, de a hőtermelés 2 kW/m^3 -nél kisebb	
2.1. Rövid életű kis és közepes aktivitású	A hosszú életű alfa-sugárzók koncentrációja korlátozott. Egyedi hulladécsomagra 4000 Bq/g , és a teljes telephelyre átlagolva 400 Bq/g csomagonként	Felszíni vagy geológiai tároló
2.2. Hosszú életű kis és közepes aktivitású	A hosszú életű radionuklidok koncentrációja meghaladja a rövid életű hulladékokra vonatkozó korlátot	Geológiai tároló
3. Nagy aktivitású	A hőtermelés 2 kW/m^3 -nél nagyobb, illetve a hosszú életű radionuklidok koncentrációja meghaladja a rövid életű hulladékokra vonatkozó korlátot	Geológiai tároló

30. ábra: NAÜ által javasolt hulladék kategorizálási rendszer

Fontos azonban azt is tudni, hogy nemcsak a fűtőelemek tartoznak a radioaktív-hulladékok közé. Valamint nemcsak atomerőművekben keletkezik radioaktív hulladék, hanem iparban, gyógyszerészetben, kutatások során is.

A különböző típusú reaktorokban eltérő mennyiségű és tulajdonságú kiegészítő fűtőelem keletkezik. Néhány jelenleg üzemelő atomerőmű típusnál 1000 MW esetén az alábbi jellemzőket kapjuk. A PWR, VVER típusú erőmű esetén éves szinten mintegy 27 tonna fűtőelemet használnak el, azaz ennyi kiegészítő fűtőelemet emelnek át évente a pihentető medencékbe, majd onnan az átmeneti tárolókba kerülnek.



31. ábra: Átmeneti tároló⁷⁰

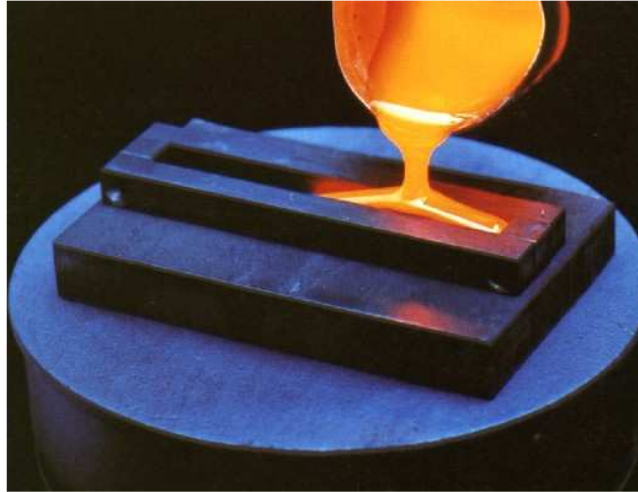
A BWR-ek és HWR-ek esetében ugyanakkora erőműben jóval nagyobb mennyiségű fűtőelemet használnak el, de a kiégett fűtőelemek aktivitáskoncentrációja jóval kisebb. Ennek az oka az, hogy a kiegészi szint alacsonyabb. A HWR típusú erőműben mintegy 120 tonna, a BWR típusú atomerőműben pedig 40 tonna kiégett fűtőelem keletkezik. Ha a nyílt üzemanyag ciklusra gondolunk ott a közvetlen tárolás miatta kiégett fűtőelemek előbb a pihentetőmedencébe, onnan az átmeneti tárolóba, majd mélységi tárolókba kerülnek elhelyezésre. Itt a kiégett üzemanyag teljes mértékben hulladéknak számít, a további energetikai hasznosításról lemondanak. A zárt üzemanyagciklus esetében viszont a kiégett üzemanyag újrafeldolgozása révén kinyerik az energetikailag hasznosítható (plutónium, urán) hasadóanyagot és visszavezetik a rendszerbe. Reprocessálás nagyaktivitású hulladékot eredményez. A reprocessálás és a transzmutálás együttes alkalmazása azonban nagyban segítené a keletkező radioaktív hulladékok elhelyezésével kapcsolatos problémán. A radioaktív hulladékok közül a kezelés és végleges elhelyezés szempontjából a legnehezebb feladatot a nagyaktivitású-hosszú élettartamú hulladékok jelentik, pedig arányaiban ezeknek a térfogata kisebb, mint a más kategóriákba tartozóké.

Egy atomerőműben természetesen nemcsak szilárd halmazállapotú radioaktív hulladék keletkezik. A szilárd mellett, ugyanis folyékony halmazállapotú hulladék is keletkezik. Ezzel kapcsolatban a Paksi atomerőmű minden évi beszámolójában nyilatkozik. Átlagosan azonban a kis és közepes aktivitású hulladékok mennyisége éves szinten: a szilárd halmazállapotú hulladékok esetén 120 m^3 , míg a folyékony esetében ez a mennyiség 250 m^3 . Nagy aktivitású hulladék mennyisége 5 m^3 . **(2010)**

De egy atomerőműben nemcsak üzemeléskor keletkezik radioaktív hulladék, hanem annak leállítása után, leszerelése során is. Ha egy 1000 MW-os erőművet említünk példaként itt az erőmű leszerelése során mintegy $2500\text{-}4000 \text{ m}^3$ radioaktív hulladékkal lehet számolni. Ez Paks esetében mintegy 2000 m^3 lesz a számítások szerint. Ennek jó része azonban kis és közepes aktivitású hulladék és csak kis része nagyaktivitású. A keletkező hulladékot azonban az elhelyezés előtt még kezelésnek kell alávetni. Ennek célja a hulladék térfogatának csökkentése, valamint szállításra, tárolásra alkalmassá tétele. Ennek a kezelésnek két fázisa van az egyik a feldolgozási fázis, a másik a kondicionálási fázis. A feldolgozási fázis célja, hogy a hulladékot gazdaságosabban és biztonságosabban lehessen tárolni. Ezt térfogatcsökkentéssel, az összetétel megváltoztatásával, valamint a radioizotópok kivonásával érhetik el. A kezelés módja pedig a

⁷⁰ Hegyháti József: Radioaktív hulladékok kezelése és végleges elhelyezése
<http://www.matud.iif.hu/07jan/07.html>

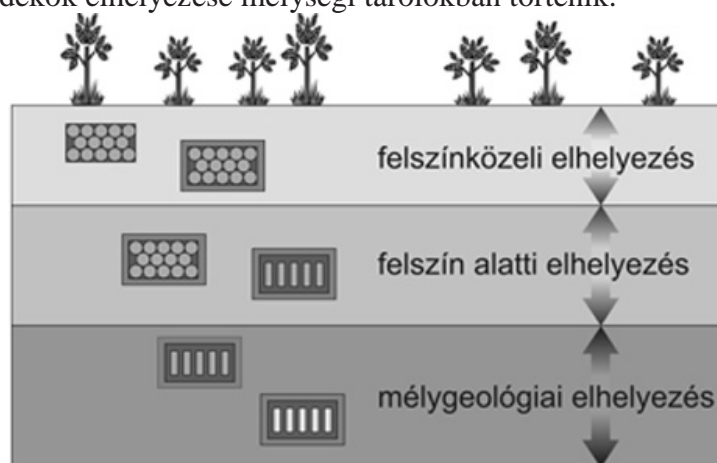
hulladék eredeti tulajdonágainak függvényében történik. A kondicionálás célja a radioaktív hulladékok a szállításra, tárolásra és a végleges elhelyezésre való alkalmassá tétele. A folyékony halmazállapotú hulladékokat szilárd fázisba hozzák, konténerbe zárják. A kondicionálás során a hulladékot leggyakrabban üvegbe, cementbe, bitumenbe, polimerekbe ágyazzák. A kilúgozódás, kioldás ellen leginkább az üvegbe ágyazás véd. A nagyaktivitású hulladékokat is ezért ágyazzák leginkább üvegbe.



32. ábra: radioaktív hulladék beágyazása⁷¹

A beágyazott radioaktív hulladékot azután konténerbe zárják. A konténernek ellen kell tudni állni a közeg korróziós hatásának. Ezért leginkább acél, réz jöhet szóba.

A radioaktív hulladék kezelése és elhelyezése során figyelembe kell venni annak jellemzőit: aktivitáskoncentráció, hőteljesítmény. Úgy kell elhelyezni, hogy a bioszférára ne jelenthessen veszélyt. Ehhez pedig a megfelelő tulajdonságú tárolóhely megtalálása és kialakítása valamint ennek folyamatos ellenőrzése szükséges. Az atomerőmű működése során keletkező kiégett üzemanyag, illetve annak feldolgozása során keletkező nagyaktivitású hulladék tartalmazza az üzemelés során keletkező hasadási termékek jó részét (99%), köztük a hosszú felezési idejű valamint a transzurán izotópokat. Emiatt gondoskodni kell ezen hulladékok bioszférától való elszigeteléséről. A hulladékok biztonságos elhelyezéséről többszázezer évre gondoskodni kell. A hulladékok elhelyezést felszíni/ felszín közeli illetve mélygeológiai tárolók segítségével oldhatjuk meg. A 17-es ábra a NAÜ javaslatait tartalmazza arra vonatkozóan, hogy milyen jellemzőkkel rendelkező radioaktív hulladékot milyen jellegű tárolókban helyezzenek el. Például a nagyaktivitású hulladék elhelyezése mélygépi tárolókban történik.

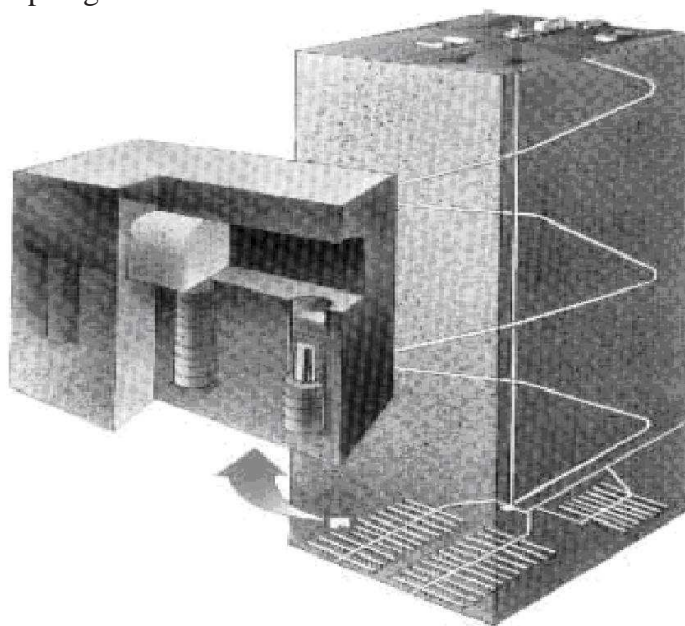


33. ábra: Radioaktív hulladékok elhelyezése tulajdonságaik függvényében⁷²

⁷¹ <http://sdt.sulinet.hu/>

A felszín közeli (felszíni) tárolókban csak rövid élettartamú izotópokat tartalmazó kis és közepes aktivitású hulladékokat lehet elhelyezni. Az ilyen jellegű tárolóhelyeket a földfelszínen vagy maximum néhány tíz méter mélységben alakítják ki. Folyamatos ellenőrzést, felügyeletet és karbantartást igényelnek addig, amíg le nem bomlanak a radioizotópok az előírt mértékig.⁷³

Felszíni vagy felszín közeli elhelyezésre csak azon rövid felezési idejű hulladékok alkalmasak, amelyekben a hosszú felezési idejű izotópok koncentrációja nem haladja meg a 400-4000 kBq értéket. A többi mélységi tárolókban kell elhelyezni. A jelenlegi megoldások mellett nem is a kis és közepes aktivitású hulladék elhelyezése jelent problémát az országok számára, hanem a nagy aktivitású hulladékok tárolójának megépítése. Kis és közepes aktivitású hulladék befogadására alkalmas felszíni tárolók közül a legmodernebb Franciaországban, Spanyolországban működik. Felszín alatti tárolók közül érdemes megemlíteni a két finnországi (Loviisa és Olkiluoto) és a svédországi (Fosmark) tárolót. A svédországi tároló érdekessége, hogy a Balti-tenger alatt alakították ki 60 méter mélyen kristályos kőzetben. Ide helyezik el a rövid élettartamú kis és közepes aktivitású atomerőműből, illetve kutatásból, iparból, gyógyászatból származó radioaktív hulladékot. Ez a tároló már 1988 óta üzemel. Függőleges és vízszintes vájatokat alakítottak ki. A közepes aktivitású hulladékokat a függőleges aknában helyezik el a silón belül. Ebből a silóból a tárolón belül egyet alakítottak ki. A silón belül pedig függőleges aknákat fúrtak. A kőzet és a siló közötti teret a vízzel szembeni szigetelés végett bentonitos agyaggal töltötték ki. Míg a függőleges aknákat pedig betonnal.⁷⁴



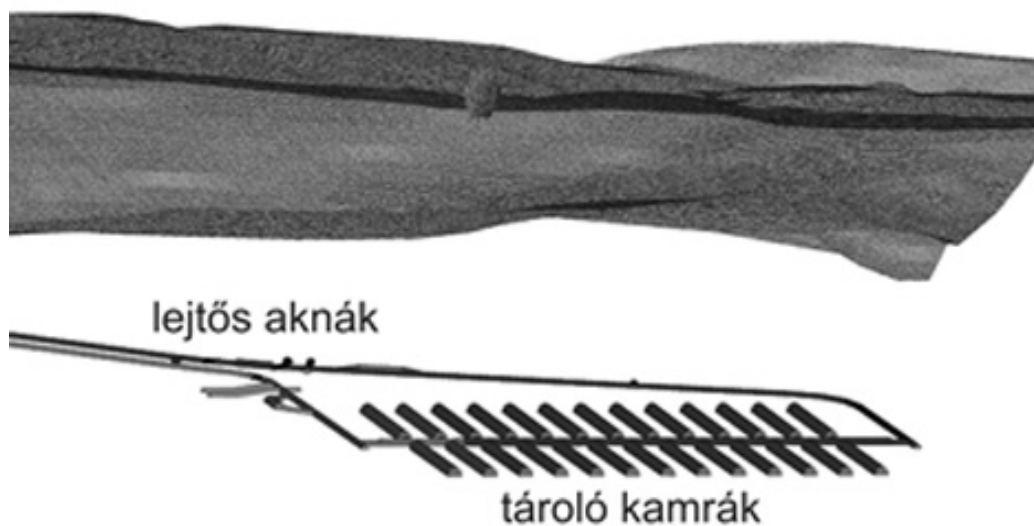
34. ábra: Fosmark: kis és közepes aktivitású hulladékok végleges tárolója

Ennek a tárolónak a jelenlegi kapacitása 60 000 m³, de még a második fázisban tovább bővíthető 30 000 m³-rel. Sőt a harmadik fázisban ide kívánják elhelyezni az erőmű leszerelésekor keletkező kis és közepes aktivitású hulladékot is, ennek érdekében további 100 000 m³ tárolóhelyet alakítanak ki.

⁷² Hegyháti József: Radioaktív hulladékok kezelése és végleges elhelyezése
<http://www.matud.iif.hu/07jan/07.html>

⁷³ Hegyháti József: Radioaktív hulladékok kezelése és végleges elhelyezése
<http://www.matud.iif.hu/07jan/07.html>

⁷⁴ Ormai Péter: Radioaktív hulladékok elhelyezése
<http://www.kfki.hu/fszemle/archivum/fsz0610/ormai0610.html>



35. ábra: kis és közepes aktivitású hulladék elhelyezése-felszín közeli tároló



36. ábra: tárolók belső elrendezése⁷⁵

Magyarországon a kis és közepes aktivitású hulladék elhelyezésre Bábaapátiban indítottak kutatásokat. A befogadó kőzet itt gránit. Két lejtősakna kialakítására került sor 300 méter mélységig.

⁷⁵ Hegyháti József: Radioaktív hulladékok kezelése és végleges elhelyezése
<http://www.matud.iif.hu/07jan/07.html>



37. ábra: kis és közepes aktivitású hulladékok tervezett mélységi tárolója Bábaapátiban⁷⁶

A mélységi tárolók ahová a nagy aktivitású hulladékok kerülnek, jóval nagyobb mélységben kerülnek kialakításra. Hiszen ezeknél, a hulladékoknál a hosszabb távú, teljes mértékű izoláció szükséges. A mélygeológia tárolók kialakításához olyan formációk kellenek, amelyek hosszú időn át stabil körülmények biztosíthatóak. A cél az, hogy a bioszférától ezeket a hulladékokat teljesen el lehessen szigetelni. A mélygeológia tárolók kialakítása meglehetősen hosszú folyamat. Hosszú kutatási, tervezési és fejlesztési munkát igényel egy-egy ilyen tároló létesítése.

Azon a területen, ahol a tárolót ki szeretnék alakítani, mélységi laboratóriumot hoznak létre, ahol vizsgálják a befogadó kőzet tulajdonságait, terjedelmét, vizsgálják és finomítják a hulladék elhelyezési módszereket. Vizsgálják a talajvízmozgást, különböző izotópterjedési modelleket futtatnak le annak érdekében, hogy minél biztonságosabbá tehesék a tárolást. Megismerjék az adott befogadó kőzet tulajdonságait, kiterjedését, stabilitást. Megtalálják a legmegfelelőbb hulladék elhelyezési és kezelési módszert. Ennek ellenére komoly problémát jelenthet az, hogy igen hosszú időre kell tervezni ezeket a létesítményeket, többszázezer évre. A geológiai folyamatokat pedig nehéz előre kiszámítani, megbecsülni, hiszen csak rövid időtartamról van csak információnk.

A természeti erők jelentette veszély mellett az emberi társadalom szándékolt, vagy véletlen beavatkozása is komoly problémát okozhat. Egy-egy jól megépített, robosztus tároló is megsérülhet ilyen hosszú idő alatt. Ezeknek a tárolóknak a monitorozást pedig nem többszázezer évre tervezik hanem, mintegy 500-1000 évre. De már ez is meglehetősen hosszú idő. Sokan bizonytalanok abban, hogy előre meg lehet-e becsülni a geológiai folyamatokat. Ezt a bizonytalanságot talán nagyban csökkentik a természeti analógiák, hiszen nemhogy többszázezer évre, de több millió évre visszamenőleg is meg lehet vizsgálni. Ezen adatok pedig segítenek megérteni, megjósolni a várható folyamatokat. A földtani gátak mellet a műszaki gátak is segítik megakadályozni a radioaktív izotópok kijutását a bioszférába.⁷⁷

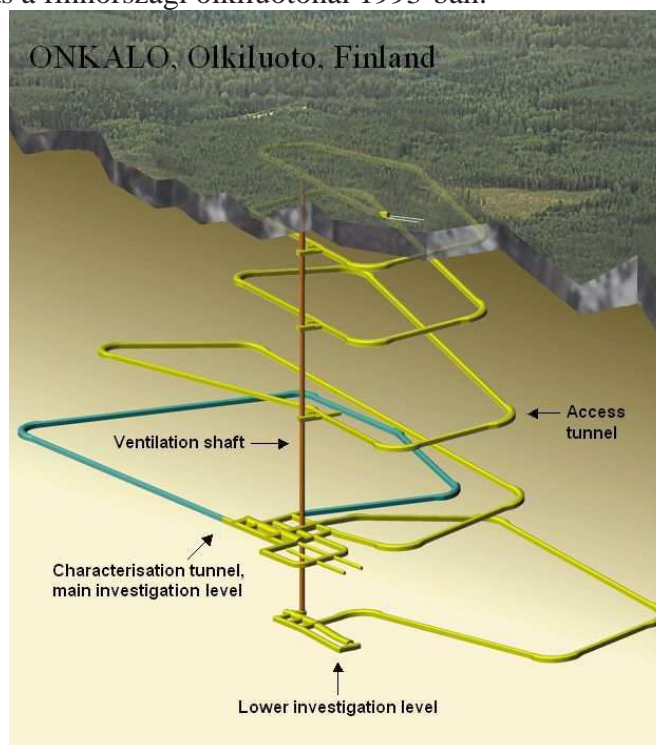
⁷⁶ Radioaktív hulladékok biztonsága http://www.reak.bme.hu/fileadmin/user_upload/felhasznalok/zagyvai/rad_hull_bizt-2010.pdf

⁷⁷ Dr. Csom Gyula: Atomerőművek IV <http://www.atomforum.hu/pdf/04%20atomeromuvek.pdf>

A radioaktív hulladékok átmeneti és/vagy végleges elhelyezése során szennyezés környezetbe való kijutását a mélységi védelem mellett a többszörös mérnöki gátak (Multiple Engineered Barriers) biztosítják. Általánosságban az alábbi mérnöki gátakról beszélhetünk:

- EB1: a hulladék kondicionálása
- EB2: acélhordó
- EB3: betonfalú épület+ a hordók közti rések betonnal történő kiöntése
- EB4: „Backfill” visszatöltés+ geopolimerek és bentonit alkalmazása
- EB5: megfelelő biztonságot nyújtó befogadó kőzet+ földborítás és rekultiváció⁷⁸

Az eddigi kutatások szerint a szóba jöhető geológiai formációk a következők: só, gránit, agyag, bazalt, vulkáni tufa. Egy geológiai tároló esetén, ha a talajvíz mozgása csekély, ha megfelelő a talajvíz kémiaja, a talajvíz transzportja lassú valamint jó a befogadó kőzet szorpció tulajdonságai jók akkor az adott geológiai formáció megfelelő egy tároló kialakításához. Jól látható, hogy a megfelelő hely kiválasztása, a terület kutatása, modellezések lefuttatása, valamint a lakossági hozzájárulás, az engedélyezések és az építés igen hosszú időt vesznek igénybe. A világ számos országában zajlanak kutatások már régóta ilyen létesítmények kialakítására. Svédországban például Aspönél 460 méter mélységben kristályos kőzetben kezdtek el kutatást 1990-ben, ugyancsak Svédországban Stripában 400 méteres mélységben, kristályos kőzetben kezdtek el kutatni 1979-ben. A németországi Gorleben mellett sóformációban és 900 méter mélyen indítottak kutatásokat 1999-ben. Ehhez képest viszonylag kisebb mélységben 70-100 méter mélyen gránitban indult kutatás a finnországi Olkiluotónál 1993-ban.



38. ábra: Mélygeológiai tároló terve⁷⁹

Belgiumban agyag formációban, a svájci Grimsel Mt. Terriben kristályos agyagban, az USA-beli Yuccaban pedig tufában indultak meg a kutatások. A gaboni Oklóban levő természetes reaktor

⁷⁸ Radioaktív hulladékok biztonsága
http://www.reak.bme.hu/fileadmin/user_upload/felhasznalok/zagyvai/rad_hull_bizt-2010.pdf

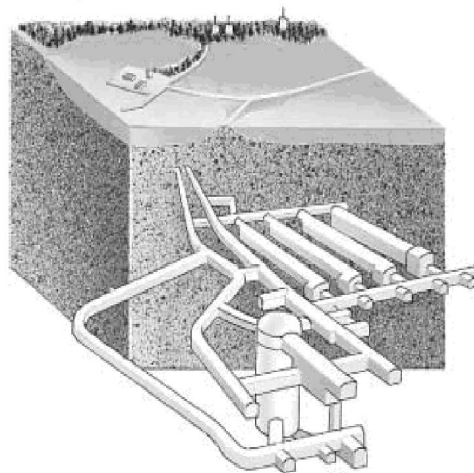
⁷⁹ Radioaktív hulladékok biztonsága
http://www.reak.bme.hu/fileadmin/user_upload/felhasznalok/zagyvai/rad_hull_bizt-2010.pdf

vagy a kanadai Cigar Lake-i uránérc telep, mint természetes analógia megjelenik a mélygeológiai tárolóknál.⁸⁰



39. ábra: természetes reaktor maradványai⁸¹

Magyarországon pedig a bodai aleuronit formációkban indítottak kutatásokat 1999-ig. 2003-tól kutatóvágatot alakítottak ki a volt uránbánya alatt.



40. ábra: nagy aktivitású hulladék tárolója-svéd modell⁸²

Nagyaktivitású hulladék befogadására alkalmas tárló jelenleg még nem működik. De számos helyen már az építésre vonatkozó döntések közelében vannak. Az európai unió számos országban azonban még évekre vannak a megvalósítástól. Az alábbi táblázat néhány uniós ország nagyaktivitású hulladéktárolójának tervezett időpontját tartalmazza.

<i>Ország</i>	<i>A tároló építésének kezdete</i>	<i>Az üzembe helyezés becsült időpontja</i>
Svédország	2015	2020
Finnország	2015	2020
Franciaország	2015	2025
Belgium	2040	2080

⁸⁰ Csom Gyula: Atomerőművek IV <http://www.atomforum.hu/pdf/04%20atomeromuvek.pdf>

⁸¹ <http://muveszet-tudomany.hu/magyar/tudomany/iter1.htm>

⁸² Ormai Péter: Radioaktív hulladékok elhelyezése
<http://www.kfki.hu/fszemle/archivum/fsz0610/ormai0610.html>

Németország	2025	2030
Csehország	2030-2050	2065
Magyarország	2020-2046	2047

A költségeket nagyjából 1000 tonna uránt tartalmazó kiegészített fűtőelem esetén mintegy 0,5-1 milliárd euróra becsülik. Néhány ország által számított értéket tartalmazza az alábbi táblázat.

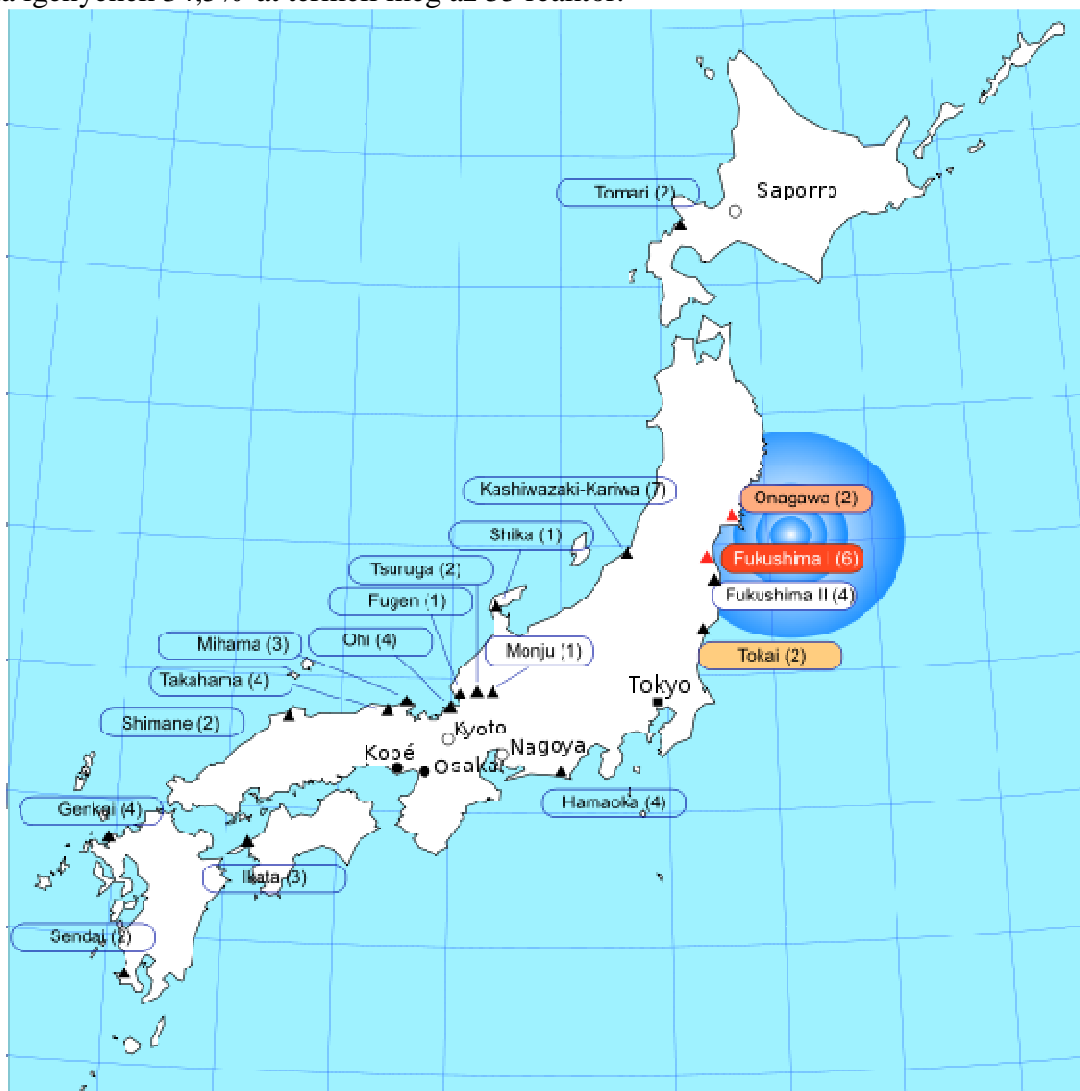
<i>Ország</i>	<i>Kiegészített fűtőelem mennyiség [tU]</i>	<i>Költség [milliárd euró]</i>
Finnország	5500	3
Svédország	9100	3,5
UK	16400	15
Spanyolország	6800	3

83

3. Fejezet: A fukushimai erőmű és tanulsága

a. Az erőmű típusának bemutatása

Japánban már az 1970-es évek óta működnek atomerőművek. A szigetország teljes villamos energia igényének 34,5%-át termeli meg az 55 reaktor.



83

Dr. Ormai Péter, Dr. Hegyháti József: Merre tart az Európai Unió a nukleáris hulladékok kezelése területén
<http://mnt.kfki.hu/Nukleon/index.php?action=archivum>

Ezek közül 11 található a most földrengés által leginkább sújtott területen. Okuma városában működő Fukushima I a világ 25 legnagyobb atomerőműve közé tartozik.

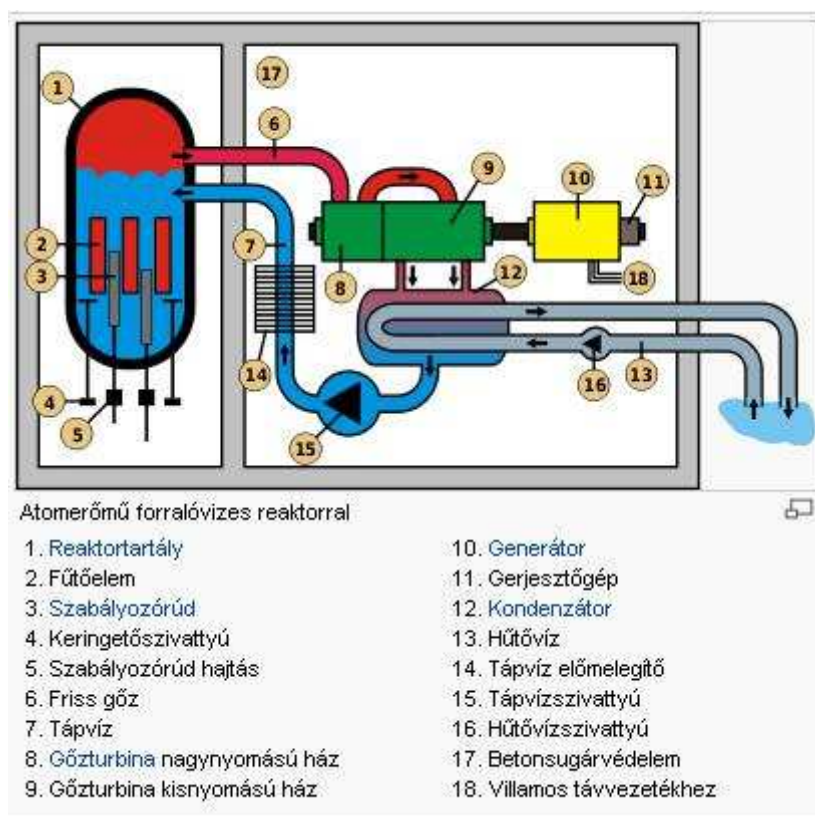


41. ábra: Fukushima I.

Építését 1971-ben kezdték el. Építtetését és működtetését egyaránt a TEPCO cég végezte. A Fukushima I. összesen hat blokkból áll és 4,7 GW energiát állít elő. A fukushimai reaktorok BWR, azaz forralóvízes reaktorok. A könnyűvíz a hűtőközeg és a moderátor szerepét is betölti. Az aktívzónában több száz fűtőelem van, ezek között a víz alulról felfele áramlik, így mint moderátor is működik.

Az erőmű szabályozása két módon lehetséges. Egyrészt az erőmű indításakor, a névleges teljesítmény 70%-ának eléréséig a biztonságvédelmi rudak segítségével, ezek segítségével történik a leállítás is. A 70%elérése után a szabályozást a víz sebességének változtatásával érik el. Ha a vizet nagyobb sebességgel áramoltatják át az aktívzónán, akkor kevesebb gőzbuborékot tartalmaz, így több a hasított magok száma. Ha vizet kisebb sebességgel áramoltatják át, akkor több gőzbuborékot fogtartalmazni, azaz a hasadások száma csökken.

Az erőmű forralóvízes típusú, azaz engedik a hűtőközeget elforni. A keletkező gőz a turbinákra kerül. Mivel a gőz közvetlenül az aktív zónából kerül a gőzfejlesztőbe, ezért radioaktív magokat tartalmaz, emiatt a turbinákat jól le kell szigetelni. Előnye azonban az, hogy sokkal egyszerűbb felépítésű az erőmű és a hatásfoka is magasabb.



42. ábra: BWR blokk rajza

A Fukushima II. építését 1976 márciusában kezdte meg a TEPCO és 1982-ben helyezték üzembe. A Fukushima II. Naraha városában, 11, 5 km-re helyezkedik el a Fukushima I-tól. Mindkét erőmű (Fukushima I és II) reaktorai leálltak a földrengés után. A Fukushima I-nél azonban a hűtőrendszer sérült. Az Onagawa erőműnél is lépett fel probléma, de a sugárzás hamar visszaállt normál értékre így ott visszavonták a rendkívüli állapotot.⁸⁴

b. Védelmi rendszerek-tervezése/ esteleges hibák:

Az atomerőművek biztonságosnak akkor tekinthetők, ha belőlük radioaktív-sugárzás nem kerül ki a környezetbe. Ezt számos mérnöki gát segítségével igyekeznek megvalósítani. Ezen mérnöki gátak közé tartozik a hermetikusan záró védőépület is. Az atomerőműveket a mélységi védelem alapján az üzemzavarok széles körére tervezik. A tengerpartra épített erőműveknél természetesen számolnak a cunami lehetőségével is. Japán állandó földrengés veszélyben él, így az épületeket is ennek megfelelően tervezik. A japán atomerőművek nem egy nagy erejű földrengést vészeltek már át sikeresen. A problémát az extrém méretű cunami (szökőár hullám okozta). A japán társadalom a földrengésekre nagyon magas szinten fel van készítve. A lakóépületektől az erőművek védőépületén át, az oktatásban is komoly hangsúlyt fektetnek a földrengés következményeinek kezelésére. A telephely kiválasztása során, valamint a tervezéskor az összes lehetséges külső hatást fel kell mérni, kockázati elemzést végezni arról, hogy milyen és mekkora külső hatás érheti az adott erőművet. Az építés során ezeket figyelembe véve építik meg az erőműveket. Geológusok, hidrológusok, meteorológusok véleményét is kikérik a mérnökök arról, hogy a környezet részéről milyen jellegű és milyen extrém mértékű hatások érhetik a telephelyet a környezet részéről. Japán számolt is a földrengéssel és a cunamival, de akkora méretű pusztítással nem számolhatott. Az erőmű a 9-es magnitúdójú rengéseket is jól viselte. A rengés hatására megtörtént az automatikus vészleállítás. A blokkok nem a rengés, hanem az extrém méretű cunami következtében sérültek meg ilyen súlyosan. Japán történetének talán

84

Atomerőművek Japánban http://www.jovo_technikaja.abbcenter.com/?id=109298&cim=1

legsúlyosabb cunamija 1856-ban volt. Egy északi telephely, Higashidori tervezése során ennek az értéknek megfelelően történt a kialakítás. Az akkor cunami által bekövetkezett vízszintváltozás: +5,12 maximálisan és -3,23 minimálisan. A telephelyet úgy tervezték, hogy a vízkivételi mű működésének határai minimálisan -5m és maximálisan +10m e-n legyenek. Ha Fukushimai erőművet is így tervezték volna (nincs adat erről), akkor is elérte volna a vízszintje a kritikus értéket.⁸⁵ Az erőművek nemcsak a mostani, hanem a korábbi földrengéseket is sikeresen átvészelték. Az azonban biztos, hogy ennek az eseménynek további tervezések során jelentős hatása lesz. Számos fejlesztés és szigorítás lehet a következménye.

c. Baleset lefolyása:

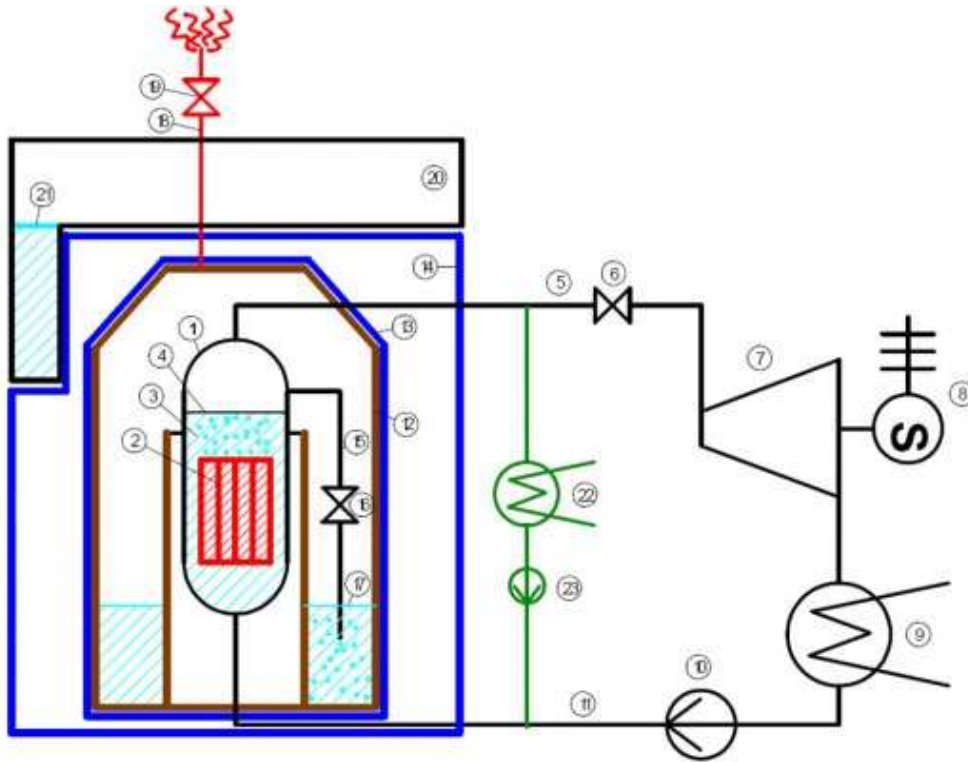
2011-március-11-én 9-es erősségű földrengés rázta meg Japánt. A Fukushima I erőműben tehát a földrengés hatására megindult az erőmű 1-es,2-es,3-as reaktorának vészleállítása, amely minden probléma nélkül zajlott. A másik három karbantartás miatt nem üzemelt. A földrengés hatására az áramellátás összeomlott így az atomerőmű biztonsági hűtővíz ellátása megszűnt. A 80-as években hozott döntés értelmében ilyenkor gondoskodni kell a hermetikus védőépület ellenőrzött lefúvatásáról, a hűtés pótlásáról és az üzemzavari áramellátásról. Ebben az esetben a vészüzemzavari dízelgenerátorok segítségével biztosítható a hűtés. Az üzemzavari dízelgenerátorok el is indultak és megkezdődött a blokkok hűtése. A problémát az 55 perccel később érkező cunami okozta, amely tönkretette a dízelgenerátorok hűtőkörét, így azok leálltak és a reaktorok hűtés nélkül maradtak. A telephely áramellátása megszűnt, így az üzemzavari hűtőrendszerek nem működtek. A reaktorok vészleállítása után a láncreakció nem szűnik meg, emiatt folyamatosan szükség van a hő elvezetésére. Mivel a hűtőrendszer nem működött így nem volt frissvíz utánpótlás. Az aktívzónában levő hűtőközeg hőmérséklete folyamatosan nőtt, elkezdett párologni. Emiatt a fűtőelemek felső része egy idő után szárazra került és felizzott. A cirkónium burkolat hőmérséklete elérte az 1300°C értéket. Ezen a hőmérsékleten beindul a cirkónium vízgőz reakció, amelynek következtében hidrogén keletkezik. A keletkező hidrogén következtében viszont túlnyomás alakult ki a hermetikus védőépületben. Ezt a túlnyomást úgy próbálták csökkenteni, hogy ellenőrzött lefúvatásokat végeztek.⁸⁶

A balesetek sorozata:

A problémát kiváltó földrengés március 11-én rázta meg Japánt. A rengés epicentruma a Japán partok közelében volt, Fukushima városától 125 km-re, a tenger alatt és így cunamit (szökőár) váltott ki. Ez a cunami Japán történetének egyik legnagyobbja volt. A 10 méter magas cunami tönkretette a vészüzemzavari hűtőkört. Így a hűtőközeg túlmelegedett és elkezdett elpárologni, a fűtőelemek teteje szárazra került, emiatt kémiai reakcióban hidrogén keletkezett, ezt a hidrogént akarták ellenőrzött lefúvatás során kiengedni, hogy a túlnyomást megszüntessék.

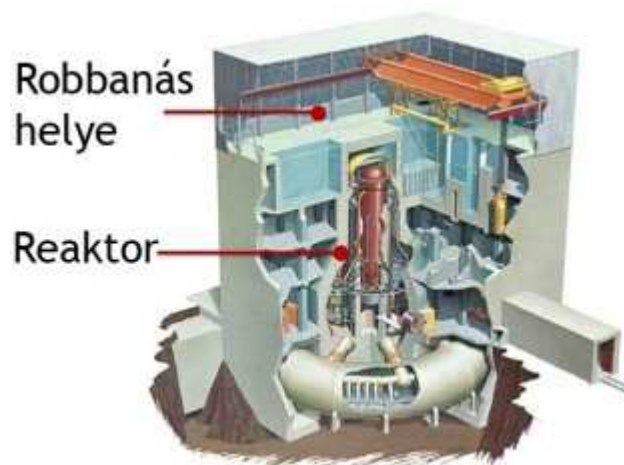
⁸⁵ Dr. Aszódi Attila: Fukushima-legfrissebb helyzetértékelés <http://www.vgo.hu/vallalatok/energia/fukushima-legfrissebb-helyzetertekeles-343586>

⁸⁶ Dr. Aszódi Attila: A Japán atomerőmű-katasztrófa I. rész <http://szigma.hu/hir/szeged/2011/03/a-japanatomeromu-katasztrofa.html>



43. ábra: BWR reaktor sematikus rajza⁸⁷

(1) reaktortartály; (2) üzemanyag-kazetták; (3) reaktor hűtővíz; (4) vízszint a reaktorban; (5) frissgőzvezeték; (6) főgőzszelep; (7) turbina; (8) generátor; (9) kondenzátor; (10) tápszivattyú; (11) tápvízvezeték; (12) hermetikus védőépület acél fala; (13) hermetikus védőépület első beton fala; (14) hermetikus védőépület külső beton fala; (15) reaktortartály üzemzavari lefúvató vezeték; (16) reaktortartály üzemzavari lefúvató szelep. (17) vizes akna; (18) konténment lefúvató vezeték; (19) konténment lefúvató szelep; (20) reaktorcsarnok; (21) pihentető medence.



44. ábra: a hidrogén robbanás helye (1-es anyag)⁸⁸

⁸⁷ Dr. Aszódi Attila: <http://szegedma.hu/hir/szeged/2011/03/a-japan-atomeromu-katasztrofa-2-resz-video-fotok.html>

⁸⁸ Dr. Aszódi Attila: A japán atomerőmű-katasztrófa I. rész <http://szegma.hu/hir/szeged/2011/03/a-japanatomeromu-katasztrofa.html>

Március 12. Az egyes reaktorban a túlmelegedés miatt keletkező vízgőzt ellenőrzött lefűvátás eredményeként kiengedték. Továbbá döntést hoztak a kettes reaktor ellenőrzött lefűvátásáról is. Délután robbanás történt az egyes reaktornál.

Március 14. A kettes reaktor öt szivattyúból négy tönkrement egy pedig egy hiba miatt csak másnap reggelre lett üzemképes. Robbanás történt a hármas reaktornál ugyanezen a napon.

Március 15. Tűz ütött ki a négyes reaktor pihentető medencéjénél. Robbanás történt a kettes reaktornál is. Nagy valószínűséggel a négyes reaktornál is történt robbanás. A lefűvátott hidrogén az oxigénnel egyesülve vegyi robbanást okozott.



45. ábra: füst tör elő a sérült hármas blokkból

Március 16. Tűz volt ismételten a négyes reaktornál. Valamint a műholdképekről is látható fehér füst a hármas reaktorból kerülhetett ki. A megemelkedett sugárzás miatt (10mSv/h értéket elérte) a munkásokat visszahívták az erőműből, dél körül a sugárzás szintje magas volt emiatt az erőmű teljes területét elhagyták a munkások. Este ismét magas szintű volt a sugárzás.

Március 17. Helikopterről kezdték meg a hármas reaktor hűtését

Március 18. A hármas reaktor hűtést helikopterről és tűzoltófecskendőkkel felváltva hűtötték. A kettes reaktor hűtőrendszerét elkezdtek rákötni a villamos energia hálózatra.

Március 19. Mindhárom problémás reaktorban a fűtőelemek felét víz borítja. Az 5-ös és 6-os reaktoroknál dízelgenerátorok biztosítják a hűtést. A kettes és hármas reaktorból fehér füst távozott. A hármas reaktor pihentető medencéjébe tengervizet juttattak. A négyes reaktor pihentető medencéjének állapota sem volt stabil. Az ötös és hatos blokk védőépületének tetejét megbontották, hogy elkerüljék az esetleges hidrogénrobbanást. Életkortól függő dózisban mindenkinek egyszeri jódtabletta bevitelét javasolták a 20 km-es körzetből menekülőeknek.

Március 20. Az ötös és a hatos blokkpihentető medencéjének hőmérsékletét a vészüzemzavari dízelgenerátorokkal sikerült 36°C alá csökkenteni. A hármas reaktorban megnövekedett nyomást sikerült lecsökkenteni anélkül, hogy radioaktív gőzt engedtek volna a szabadba.

Március 21. Az ötös blokk hűtését a vészüzemzavari dízelgenerátorokról részlegesen átkapcsolták külső áramellátásra. Sikerült kiépíteni a négyes reaktorhoz is az áramellátást. A nap folyamán a kettes reaktorból fehér füst szállt fel. A hármas reaktorból pedig szürke füst távozását észlelték. Mindhárom reaktorban a vízszint a fűtőelemek felső szélé alatt volt 1,35-2,03 méterrel.

Március 22. Az erőmű csapadékvíz kifolyójánál a tengervízből radioaktív izotópokat mutattak ki. A hármas reaktor vezénylőtermének megvilágítását sikerült helyreállítani.

Március 23. Minden reaktorhoz sikerült kiépíteni a külső áramellátást. A kettes blokk pihentető medencéjének vizét a forráspontról sikerült 41°C-ra csökkenteni. Az egyes és hármas reaktoroknál a felszíni hőmérsékletmérő műszerek már működnek. A hármas blokkból felszálló fehér füst miatt mind a négy sérült blokknál szüneteltetni kellett a munkálatokat. A kettes blokknál a magas sugárzás miatt nem tudták kicserélni a sérült alkatrészeket. Az egyes blokk

reaktortartályának hőmérséklete 400°C-ról 350°C-ra lecsökkent. A hármas blokkban a reaktortartály hőmérséklete 305°C. Ezen értékek jelentős javulást mutatnak, de még így is magasabbak, mint a tervezett legmagasabb hőmérséklet, ami 302°C. Az ivóvíz fogyasztását csecsemők számára nem javasolják.

Március 25. Az erőmű 30 km-es körzetének kiürítést javasolják. A tokiói ivóvíz radioaktív jód tartalma a csecsemők számára megengedett dózis felére csökkent. Az egyes és hármas reaktorba édesvíz pumpálást kezdték meg, hogy megakadályozzák a hűtőrendszerben a só kikristályosodását és a só korróziós hatását. Az egyes és kettes reaktor turbinaépületében is megjelent az erősen radioaktív víz.⁸⁹

Összességében tehát a Fukushima I reaktoraiban az alábbi balesetek történtek:

1. reaktor: A földrengés következtében a reaktor leállt. Hűtési hiba alakult ki, emiatt a fűtőelemek részben megolvadtak. Radioaktív gőz szabadult ki. A reaktor épülete a hidrogénrobbanás miatt megrongálódott. A hűtés pótlására tengervizet szivattyúztak a reaktorba.
2. reaktor: A földrengés miatt itt is bekövetkezett az automatikus leállítás. Ennél a reaktornál is fellépett hűtési hiba. A hűtés hiánya miatt itt is szárazra kerültek a fűtőelemek. Ebbe a reaktorba is tengervizet juttattak. Itt is volt gőzkiszabadulás. Ennél a reaktornál is volt robbanás. A hármas reaktornál történt robbanás miatt félt, hogy a reaktortartály is sérült. A fűtőelemek esetleges egybeolvadásának veszélye is fennáll. A magas sugárzási szint miatt a munkálatok akadályozottak.
3. reaktor: A földrengés következtében az automatikus leállítás megtörtént. A hűtési hiba miatt a reaktormagban a fűtőelemek részleges összeolvadásának veszélye fennáll. Ennél a reaktornál is komoly robbanás volt. A reaktortartály komoly sérülésének valószínűsége kicsi. Hűtés céljából tengervizet juttattak a reaktorba. A reaktorból kitörő füstcsóva nagy valószínűséggel a pihentető medencétől érkezett.
4. reaktor: A földrengés kipattanásakor nem működött, mert karbantartási munkálatok miatt leállították. Nagy valószínűséggel ennél a reaktornál is hidrogén robbanás következett be, emiatt tűz is ütött ki a kiégett fűtőelemek tároló medencéjénél. Valamint itt a hőmérséklet is rendellenesen megemelkedett. Később ismét tűz ütött ki a reaktorépületben. Félt, hogy a csökken a vízszint, és újra elindul a láncreakció
5. és 6. reaktorok: A földrengés idején nem működtek karbantartás miatt. A kiégett fűtőelemeket tároló medence vizének hőmérséklete megemelkedett.

A Fukushima II-nél az 1, 2 és 4-es reaktorok működése automatikusan leállt. Hűtési probléma itt is fellépett ugyan, de sikerült a hidegleállítás. A hármas reaktornál is megtörtént az automatikus leállítás a földrengéskor, majd a hidegleállítás is sikeresen megtörtént.⁹⁰

d. Tanulság- jövőbeni fejlesztések:

A fukushimai eseményeknek számos következménye van és lesz. Nemcsak gazdasági, de politikai hatása is várható. Fukushima tényét felhasználva az atomenergia ellenesség mértéke növekedhet. Mindezek mellett Fukushima az atomenergiában számos újítást és szigorítást is eredményezhet. Hiszen felül kell vizsgálni az atomerőművek biztonságosságát, a védőberendezések teherbírását. Szimulációk segítségével felülvizsgálható a védelmi rendszerek teherbírása. Esetlegesen szükséges megerősíteni és kiegészíteni ezeket. Olyan biztonsági

89

Fukusimai atomerőmű-baleset

http://hu.wikipedia.org/wiki/Fukusimai_atomer%C5%91m%C5%B1-baleset

⁹⁰ Japán atomerőmű: a helyzet „nagyon súlyos de nem romlik

http://kulfold.ma.hu/tart/cikk/b/0/90864/1/kulfold/Japan_atomeromu_a_helyzet_nagyon_sulyos_de_nem_romlik

megoldások kialakítása szükséges, amelyek hasonló vagy ennél extrémebb esetekben is biztosítják az erőmű hűtésének zavartalanságát. Olyan védőfalak, gátak kialakítása, amelyek egy ekkora cunami hullámainak hatását is tompítani tudják. Olyan, akár távolról is irányítható rendszerek, amelyeken keresztül vizet lehet juttatni a blokkokba. Többszörös és egymástól független üzemzavari hűtőrendszer.

4. Fejezet: Szakmódszertan