UNIVERSITAS BUDENSIS

Az atomerőművek technikai fejlődése, és generációik

ÓBUDAI EGYETEM
ALBA REGIA MŰSZAKI KAR
GARAI GÉZA SZABADEGYETEM
MÁSODIK ÉVFOLYAM
2015. OKTÓBER 7.

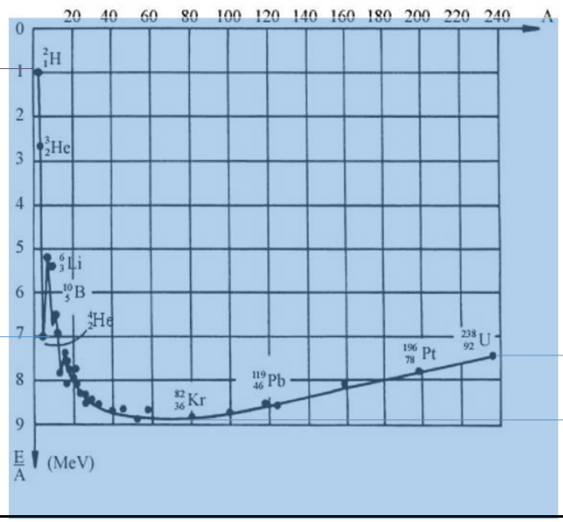
DR. HABIL. TÓTH MIHÁLY
PROF. EMERITUS

TOTH.MIHALY@AMK.UNI-OBUDA.HU

Hogyan lehet egyáltalán energiát nyerni atommag-reakciókból?

Könnyű atommagok fúziójával

Az egy nukleonra jutó kötési energia:



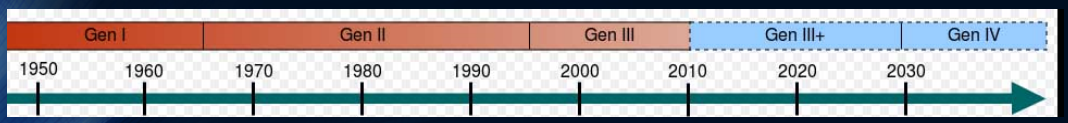
$_{1}H \rightarrow {}_{2}He$ fuzió energiája

$^{235}_{92}U \rightarrow$ → 2 közepes hasadási termék energia nyeresége

Nehéz atommagok fissziójával

Atomenergia felhasználás

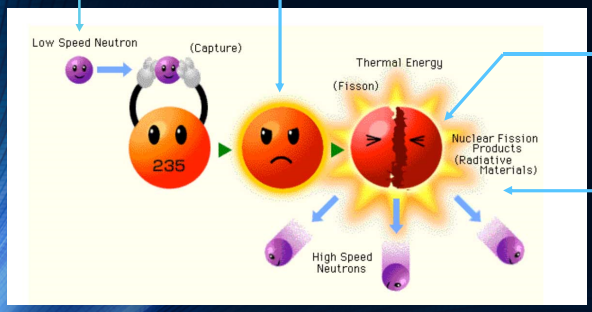
- Az ú.n. láncreakció alapján bombát mindkét módon lehet csinálni.
- Atommag fúzióval termelnek energiát a csillagok. A mi Napunk is.
- A magfúzió folyamatos fenntartásához igen nagy nyomás és több millió-fokos hőmérséklet kell, amely körülményeket a Földön eddig nem sikerült (folyamatosan) megvalósítani.
- Fúziós atomreaktor tehát (egyelőre?) még nincs.
- Szabályozott, folyamatos atomenergia termelést csak fissziós reaktorokkal sikerült megvalósítani. A továbbiakban ezekről lesz szó.



Mi történik egy maghasadáskor ?

Az egész folyamatot egy neutron indítja el, amit egy hasadásra hajlamos atommag befog

- Az atommag nem hajlandó akár-milyen energiájú neutront befogni.
- A ^{235}U csak lassú, ún. termikus neutronokat, amelyek hatására
- Instabillá válik és két, közepes rendszámú atomra hasad.
- Emellett gyors neutronokat és nagy hőenergiát produkál.

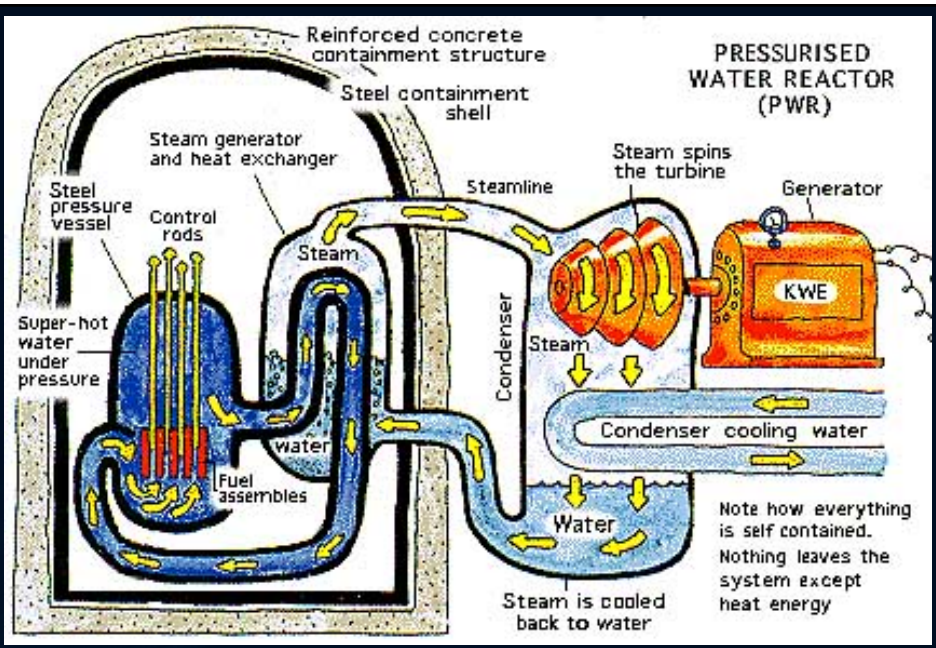


Az első generáció. Miért kezdték a hasznosítást az uránnal?

- Az urán volt a földkéregből kibányászható *egyetlen* olyan anyag, amelynek volt némi hasadó-anyag tartalma.
- 0,015% ^{235}U és ráadásul csakis termikus (=lassú) neutronok hatására hasad. Az ^{238}U nem hasadó anyag, bár hajlandó neutront befogni.
- Ezért kell a természetes uránt dúsítani úgy, hogy az ^{235}U tartalma legalább 3-5% legyen a több, mint 99% ^{238}U mellett. (A Hirosimára ledobott atombomba hasadóanyag tartalma majdnem 100%-ban ^{235}U volt. A Nagaszakira ledobott bombáé viszont plutónium.)
- Az első generációs reaktorok kísérleti és demonstrációs eszközök voltak. Üzemel még néhány nálunk is. (Pl. BMGE, KFKI)

Hőenergia-transzfer egy klasszikus (nyomott vizes) atomreaktor esetében.

Vegyük észre, hogy mindegyik hűtőkör önmagában zárt. Csak hőenergia hagyhatja el az atomreaktor rendszerét. Nukleáris anyag nem.



A hatásfokokról

- Az atomerőművek lényegében hőerőművek, amelyek hőforrása egy nehéz atommag hasításából származó hőenergia.
- Legalább háromféle hatásfokkal kell számolni:
  - Az első - a fűtőelemből kinyerhető energia aránya a teljes tömegéhez képest. Nevezzük ezt (itt önkényesen) nukleáris hatásfoknak.
  - A második - a hasadási teljes neutron mennyiség vesztesége miatt csökkent hatásfok. Nevezzük ezt a hűtőközeg hőveszteségei (és az energia-transzferek) miatt is csökkent transzfer hatásfoknak.
  - A harmadik – a hasznosítható, azaz mechanikai, majd villamos energiává alakítható ún. termikus hatásfok.
    (Többször az előzőt is ebbe számítják bele.)

A technikai fejlesztés legfontosabb hajtórugói

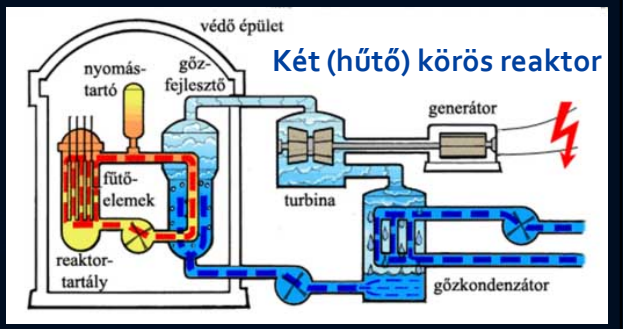
- Az atomerőmű mechanikai ill. villamosenergia termelő hatásfoka az előzőekben felsorolt három hatásfok szorzata.
- Az atomerőművek konstrukciójánál is egyik legfontosabb cél az erőmű összhatásfokának a növelése.
- Ha az üzemanyag ^{235}U, akkor annak a nukleáris hatásfokát nem lehet növelni, de vagy vele együtt, vagy külön, másféle üzemanyagot lehet használni.
- Mind a többszörös hőtranszfer, mind a gyors hasadási neutronok lassítása veszteségekkel jár és ezen lehet javítani.
- A legnagyobb nyereséget azzal lehet elérni, hogy a hőközvetítő anyag üzemi hőmérsékletét annyira megemelik, amennyire csak lehet.
  (Akár 8-900 fokra.)

A nukleáris hatásfok és a 2. generáció

- A fissziós reaktorok legismertebb üzemanyaga a dúsított természetes urán.
- Csakis a 235-ös urán izotóp hajlandó egy lassú (ún. termikus) neutron hatására maghasadást produkálni + gyors neutronokat.
- A természetes urán érc ^{235}U tartalmát tehát növelni, az uránt *dúsítani kell* ahhoz, hogy az üzemanyagnak legalább egy kis része hasítható anyag legyen. (A dúsítás maga is veszteségekkel jár.)
- A hasadási (gyors) neutronok lassítása a moderálás. Célszerűbb lenne olyan üzemanyagot használni, ami gyors neutronokkal is hasítható. (Van ilyen. Ld. később.)
- A jelenleg legelterjedtebb ún. nyomott vizes (PWR) reaktorok urán üzemanyagának 2-5%-a 235-ös atomsúlyú urán. (A reaktor konstrukciójától is függ, hogy mennyi a szükséges ^{235}U minimális aránya és a moderátort is befolyásolja.)
- Pl. a neutron veszteségek miatt is a nukleáris hatásfok alig több 1-2%-nál.

A nyomott vizes reaktorok (PWR) 3. gen.

- A termikus hatásfok növelése miatt minél nagyobb hőmérsékletet elbíró hűtő-közegre van szükség, de ez mindegyik generációra igaz megállapítás.
- Hasadóanyag: dúsított természetes urán
- Hűtőközeg: nyomás alá helyezett víz. A primer kör vizének nyomása Pakson 12,3 MPa, hőmérséklete 300-330 fok.
- Moderátor: a klasszikus megoldás grafit (mint pl. Csernobilban)
  Pakson: víz
  A (könnyű) víz is lassítja a neutronokat, de többnyire nem eléggé.
  (Megnövelt ^{235}U tartalom.)



A ^{234}Pl (plutónium) és az ^{233}U üzemanyagok

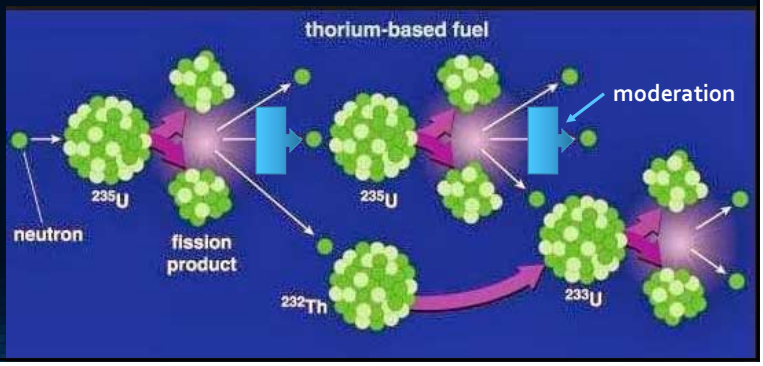
- Meglepő, de alig néhány olyan kémiai elem van a periódusos rendszerben, amely hasadó anyagnak alkalmas.
- Köztük is a leginkább figyelemre méltó a 94-es rendszámú ^{234}Plutónium (transzurán), amely mesterséges, a természetben ma már nem előforduló elem.
- A plutónium ráadásul gyors neutronok hatására is hasad s ezért nincs szükség moderátorra (és annak a veszteségeire). Ez is javítja a hatásfokot.
- Egy másik természetes anyag, amely nem sok nukleáris átmenettel 233-as uránium izotóppá alakítható át a tórium.
  A ^{233}U pedig hajlandó gyors neutronok hatására hasadni.
- A tórium felezési ideje több milliárd év s ezért is többször annyi van belőle a Földön, mint természetes uránból.

A ^{232}tórium aktinoida, és az ^{235}U hasadása

bár az a ^{238}U előtt van az elemek periodikus rendszerében

- Többen az atomerőművek jövőbeli üzemanyag-forrásának tekintik,
- bár erősen karcinogén anyag (?)
- Sóolvadékos (gyors) reaktorokban alkalmazzák. (Ld. később)
- A dúsított ^{238}U üzemanyagú reaktorokba mintegy „ráadás" üzemanyagként betáplálható, de
- kiváló alapanyag ^{233}U termelésére is.

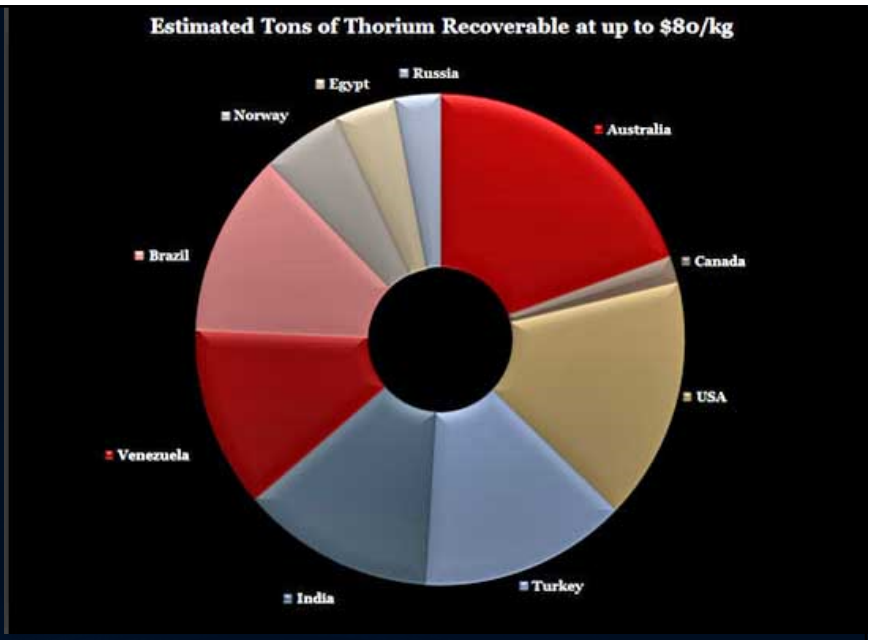
Azt a hatásfok-növelő elvet alkalmazzák, hogy a kiégett urán üzemanyag minden, még nukleárisan hasznosítható termékét is visszatáplálják a reaktorba.



Közbevetett megjegyzések

1) A lassú (termikus) neutront befogó ^{235}U atommag instabillá válik és 10^{-8} sec alatt hasad.
2) A radioaktív hasadási termékek mellett gyors neutronokat produkál, amelyeket lényegében ütköztetésekkel le kell lassítani ú.n. termikus neutronokká. Az ^{235}U csakis termikus neutronokat hajlandó befogni. Ezért szükséges a moderálás, amely a neutronszám csökkenésével jár.
3) A moderálás elkerülhető, ha olyan üzemanyagot használunk, amely gyors neutronok hatására is képes a fisszióra. VAN ilyen. Ezek az ú.n. gyors reaktorok.
4) Az ^{238}U atommag is – kis mértékben – képes neutron befogásra és mintegy 4,5 milliárd év a felezési ideje, de belőle is készíthető hasadó üzemanyag. (Reprocesszálás, drága eljárás.)
5) Fontos: A periódusos rendszer elemeiből más elemek létrehozása csakis neutron-bombázással létrehozott magreakciókkal lehetséges a mai tudásunk szerint.
6) A „természetes" elemekből – a periódusos rendszerben – 92 van és ezeken kívül vagy 15 mesterségesen előállítható elem. (Aktiniodák) Az ismert izotópok száma ezzel szemben mintegy 3500.

A Föld azonos költséggel kitermelhető természetes tórium lelőhelyeinek a megoszlása.



$$^{232}_{90}\mathrm{Th} + \mathrm{n} \rightarrow {}^{233}_{90}\mathrm{Th} + \gamma \xrightarrow{\beta^-} {}^{233}_{91}\mathrm{Pa} \xrightarrow{\beta^-} {}^{233}_{92}\mathrm{U}$$

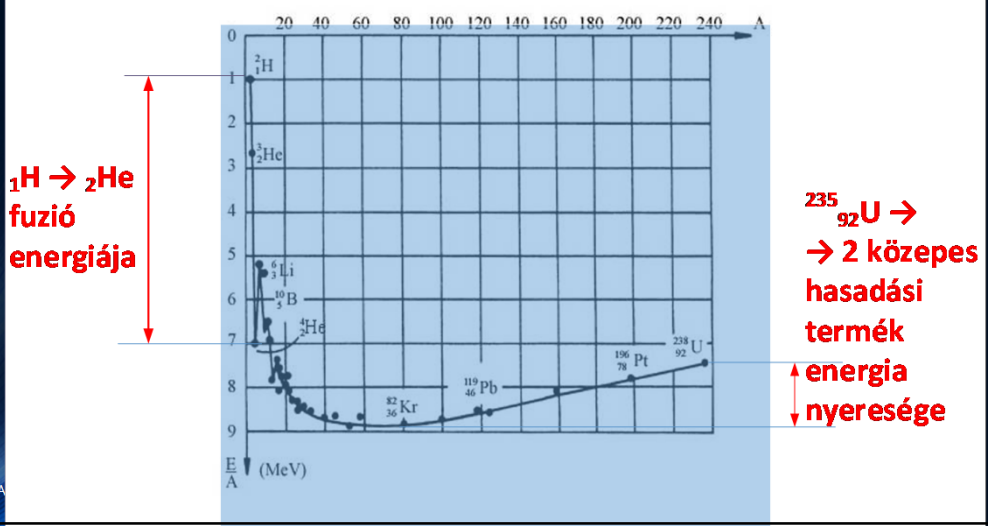
Emlékeztető néhány a reaktorok elvi működése szempontjából fontos dologra

ATOMENERGIA-TERMELÉSE FÚZIÓS MAGREAKCIÓVAL

A fajlagos kötési energia a rendszám függvényében

Könnyű atommagok fúziójával

Az egy nukleonra jutó kötési energia:



Nehéz atommagok fissziójával

Fúziós reakció

- Ilyen energia-termelő magreakció megy végbe a csillagokban s így a mi Napunkban is igen sok millió fokos hőmérsékleten. Valószínű, hogy a Világegyetemben nincs is ennél jobb nukleáris energia-termelő mód.
- A hidrogént héliummá „égeti el" de ennek semmi köze nincs a kémiai égéshez.
- A folyamatosan fenntartható reakcióhoz szükséges nyomást a Nap tömegének a hatalmas gravitációs nyomása tartja fenn, amit a Földön nem tudunk biztosítani és olyan anyagunk sincs, amely valamiféle tartályba zárhatná ezt az atomi fúziós reakció hőmérsékletét.
- Mágneses térrel próbálják vagy 50-60 éve megvalósítani, de legfeljebb egy-egy „villanásra" sikerül.
- Mostanában épül Franciaországban EU összefogással egy olyan kísérleti eszköz, amelytől folyamatos energia-termelést remélnek, de ezt is „csak" villanások sorozatára tervezik.

Fissziós vs. fúziós reaktorok

- Az atommag-hasításon alapuló, szabályozott atomerőművek első generációjától kezdődő fejlesztések során szerzett tapasztalatok szültek egyre újabb megoldandó problémákat.
- Ezek vezettek az első generációtól oda, hogy ma már a negyedik generációs (nagymértékben még csak tervezett) reaktorokról beszélhetünk.
- Ha egyszer majd megszületik az önfenntartó reakciót biztosító és energiatermelésre alkalmas fúziós reaktor, akkor annak a megvalósítási tapasztalatai alapján is több generációs fejlesztésre lehet számítani.
- Ma még ne számítson senki sem arra, hogy a fúziós reaktorokkal az emberiség energia igényeinek kielégítése egyszer s mindenkorra megoldhatók lesznek, t.i. ilyen reaktorokból még egyetlen egy sem létezik ma.

Atommag-hasító (fissziós) reaktorok generációi
(Megj: nem élesek a határok a generációk között.)

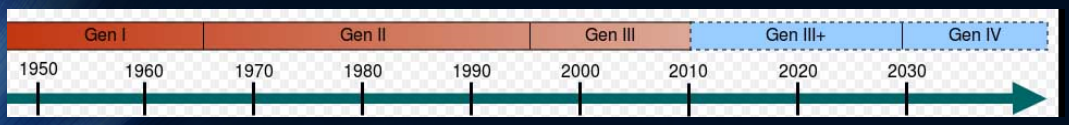
LÉNYEGÉBEN A KORAI FISSZIÓS REAKTOROKKAL SZERZETT NEGATÍV TAPASZTALATOK MEGOLDÁSÁRÓL/KISZŰRÉSÉRŐL VAN SZÓ ÚJ TECHNOLÓGIÁKKAL, VALAMINT MERÉSZ, ÚJ INNOVÁCIÓS ÖTLETEKRŐL.

Az atomreaktorok generációi

- A fissziós reaktorok szerkezetét leginkább meghatározza:
  - Az üzemanyag és annak a hasznosítása
  - A hűtőközeg és az energia-transzferek száma
  - A hasítást előidéző neutronok energiája és a moderálás
  Ezek anyaga, minősége, az adott alkalmazása és természetesen a költségek határozzák meg, hogy egy adott reaktor melyik generációba sorolható.
- Manapság már a 4. generációról is beszélünk.
- A 4. generációs reaktorok többségét még csak fejlesztik, bár már vannak működő példányaik is, sőt már kereskedelmi célra is gyártottak (eddig egyetlen) orosz tenyésztő reaktort is.

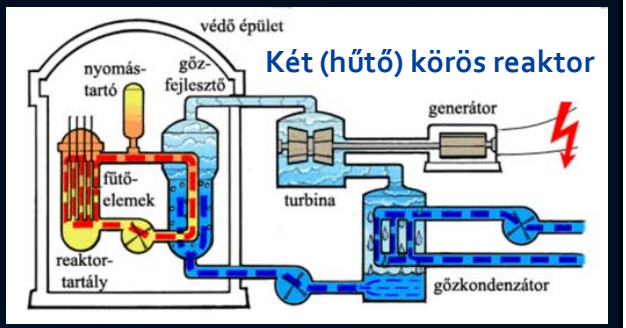
Az első generáció

- Az első generáció az 50-es – 60-as évek kísérleti célú reaktoraié,
- amelyeknél pl. a biztonsági berendezések nem voltak különösebben fejlettek,
- és ebbe beleértendő pl. a „kiégett” üzemanyag eltávolítása és újjal való pótlása is.
- Ma már gyakorlatilag nincsenek is első generációs, még üzemelő reaktorok, bár itt-ott még fellelhető egy-egy ilyen eszköz. (Pl. Magyarországon a Műegyetemé és a KFKI kutató reaktora, amely több, mint 50 éves.)
- Forrás: http://uni-obuda.hu/users/racz.ervin/NE_n_7_Eloadas.pdf

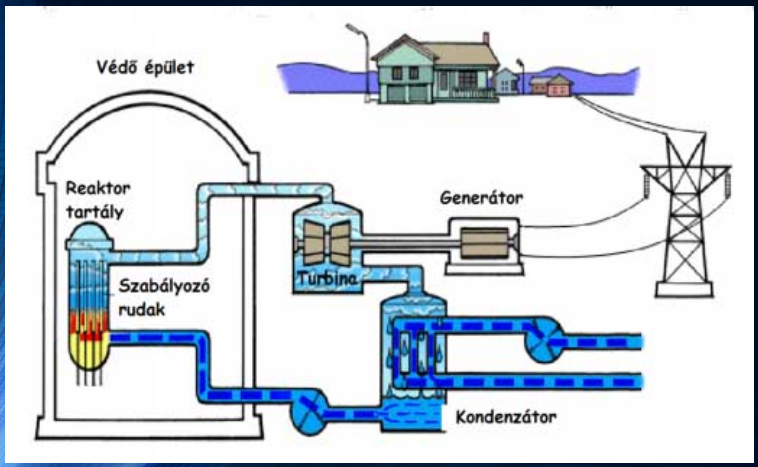


A nyomott vizes reaktorok (PWR) – 2-3. gen.

- A termikus hatásfok növelése miatt minél nagyobb hőmérsékletet elbíró hűtőközegre van szükség, de ez mindegyik generációra igaz megállapítás.
  Az üzemi hőmérséklet sokkal alacsonyabb kell, hogy legyen, mint a hűtőközeg forráspontja.
- Hasadóanyag: dúsított természetes urán, aminek csak az 235-ös urán-tartalma hasznosul az energia-termelésben.
- Hűtőközeg: nyomás alá helyezett víz. A primer kör vizének nyomása Pakson 12,3 MPa, hőmérséklete 300-330 fok.
- Moderátor: a klasszikus megoldás: Grafit (mint pl. Csernobilban)
  Pakson: - Csernobiltól eltérően - víz
  A (könnyű) víz is lassítja a neutronokat, de többnyire nem eléggé.



Vízforraló reaktorok (BWR) 3. generáció



Figyeljük meg!
Nincs szekunder vízkör.
A szennyezési balesetek-nek nagyobb az esélye, mint a nyomott vizes reaktoroknál, viszont jobb a hő hasznosítása.
Gondot okoz az aktív zónában a buborék-képződés.
Utódja lehet az SCWR.

RBMK (csernobili) tip. reaktorok – 2. gen.

- Az RBMK típusú reaktorokban a moderátor (főképp) grafit, a hűtőközeg közönséges víz (ez egy kissé részt vesz a moderálásban, de nagyobbrészt a neutronok elnyelésében, ez számos gond forrása).
- Ezek a reaktorok is egykörösek, a hűtőközeg egy része magában a reaktorban gőzzé alakul (RBMK = reaktor bolsoj mozsnoszty kipjascsij = nagyteljesítményű forralóvizes reaktor). Az RBMK típusú reaktorokat 1986 óta gyakran csernobili típusnak is nevezik.
- A grafit moderátoros reaktorokkal az az egyik fő gond, hogy ha a hűtőközeget elvesztik is, a grafit moderátor miatt a maghasadásos energiatermelés folytatódik és beolvadáshoz vezethet.
- Csernobilban ráadásul a grafit meg is gyulladt és nagy mennyiségű radioaktív anyagot juttatott a füstjével a légkörbe.
- A csernobili kísérlet alapvető gondja volt a működtető energia hiánya.

A működtetéshez szükséges külső energia

- Egy atomenergia erőmű üzemszerű működtetéséhez (külső) energiára van szükség. (Pl. a hűtőközeg keringető szivattyúihoz, és sokminden máshoz is, beleértve a vész-leállítást is.
- A „külső energia" olyan energiát jelent, amit nem az adott (esetleg bajba került) atomerőmű saját maga állít elő és rendelkezésre áll, ha baj van is.
- A csernobili szerencsétlen kísérlet egyik célja éppen az volt, hogy a működtető rendszerek tehetetlenségéből kinyerhető energia elegendő-e a katasztrófa helyzet elhárításához. Nos, nem volt elegendő.
- Fukusimában a természeti katasztrófa lehetetlenné tette pl. a még mindig sugárzó és hőt termelő (kiégett) fűtőelemek hűtését. Ilyesmire nem voltak felkészülve. (Ki a csoda számolhatott volna egy cunamival?)

A 3. generációs atomreaktorokról

- A 3. generáció a „klasszikus" uránium üzemanyagú reaktorok, igen fejlett biztonsági berendezésekkel ellátott változatait jelenti. Domináns francia fejlesztések
- Előnyeik:
  - Százával működnek ilyenek és rengeteg üzemeltetési tapasztalat van.
- Hátrányaik:
  - Nagyon rossz a nukleáris üzemanyag-kihasználásuk mert a Föld korlátozott uránium készletét igen pazarlóan, és rossz hatásfokkal használják fel. Emiatt az üzemeltetésük is egyre drágul majd amivel nem igen számolnak.
  - Ma már tudjuk, hogy a még meglévő ^{235}U készletekre nagy szükség lehet azért, hogy a jövő fissziós reaktorai számára ma még nem is létező üzemanyagot termeljenek. (Tenyésztő reaktorok.)
  - Igen komoly gond a 100-tól akár 100 ezer évig életveszélyesen sugárzó hasadási és egyéb radioaktív anyagainak biztonságos eltárolása.

A 4. generációs atomreaktorokról

Ezek is mind fissziós reaktorok, de

a „klasszikus", 3. generációs, fissziós reaktorok legfejlettebb, változataihoz képest merőben új innovációs ötleteket alkalmaznak.

Szinte kivétel nélkül mindegyik igen magas termikus hatásfokot biztosító sóolvadékos, vagy olvadt fém hűtőközeget alkalmaz, de a többségük még csak tervezési/építési fázisban van.

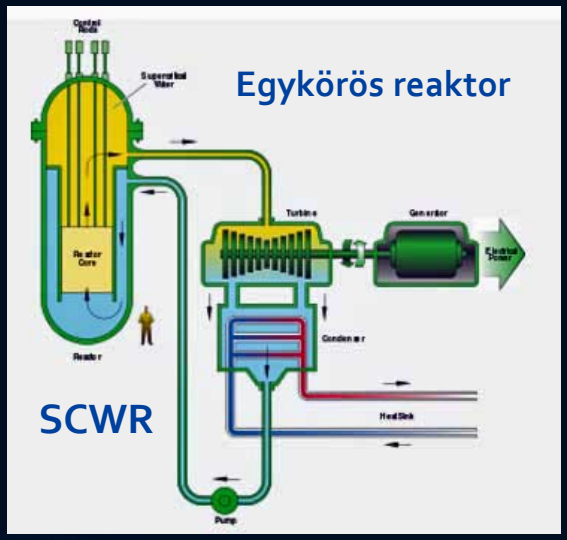
Vannak, amelyeknek nem is célja az energiatermelés, hanem inkább nukleáris reaktor-üzemanyag termelése.

Léteznek már évek óta működő változataik is, és még csak a tervező asztalon lévők is.

Nem lehet mindegyik ilyen ígéretes innovációt itt bemutatni, de néhányat igen. Ez következik.

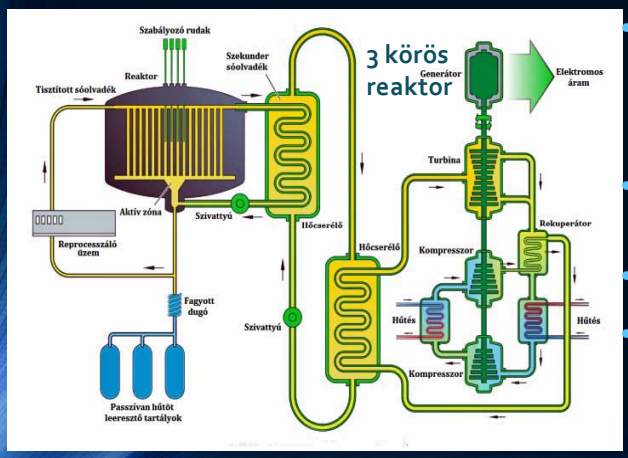
Szuperkritikus vízzel (SCW) hűtött reaktor (4.gen.)

- Nincs különbség a víz folyékony és gőz állapota között ha az 22 MPa nyomáson 374 C fokos. Ekkor nevezzük szuperkritikusnak (SCW).
- Az SCW hűtőközeg és moderátor is.
- Jobb a hővezetése, mint az egyszerű vízé.
- Egykörös (mint a vízforraló R.) de jobb a hőátadási hatásfoka. Akár 45% is lehet.
- A vízforraló reaktorral szemben nincs buborék-képződés és emiatti gondok.



Sóolvadékos gyors reaktor (MSR) – 4. gen.

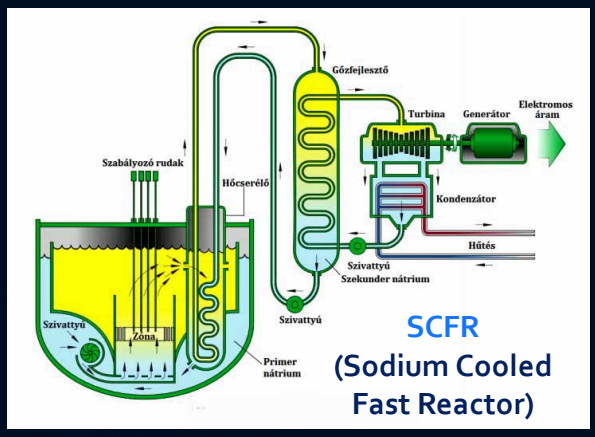
Az ún. gyors reaktorok olyan üzemanyaggal működnek, amelyek gyors neutronokkal is hasíthatók. (Pl. plutónium)



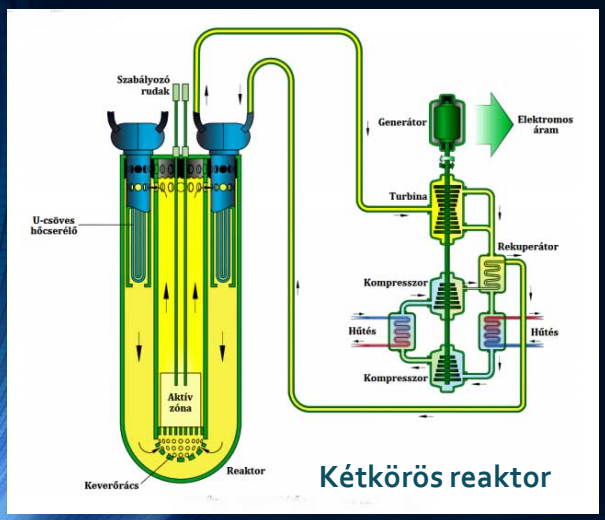
- A primer köri sóolvadék tartalmazza magát a hasadó-anyagot is, amely litium7 – berillium – urán fluoridok keveréke.
- Az üzemanyag üzem közben cserélhető.
- Az üzemi hőmérséklet 600-900 fok.
- Célszerű mellé egy üzemanyag-reprocesszáló kémiai üzemet telepíteni

Nátrium hűtésű gyors reaktor – 4. gen.

- Az üzemanyag erősen dúsított urán, vagy plutónium.
- Három körös hűtés. Az első és a második körben folyékony nátrium, a 3. körben víz.
- A folyékony nátrium atmoszferikus nyomáson, 550 fokon kering a primer körben.
- Jó hővezetés, gyenge neutron-lassítás és majdnem olyan folyékony, mint a víz.
- Hátrány a Na – víz vagy Na – levegő - igen heves - kémiai reakció. (Ezért a 3 kör.)



Olvadt ólommal hűtött gyors reaktor – 4.gen.



Kétkörös reaktor

- Az üzemi hőmérséklet valamivel 500 fok alatt és atmoszférikus nyomáson.
- Az ólom – bizmut eutektikum olvadás-pontja csak 124 fok, de bizmut ritka.
- Nincs heves kémiai reakciója a vízzel vagy a levegővel, de a gőzei mérgezők
- Az oroszok 1970 körül ilyen reaktorokat tengeralattjárókban is használtak,
- de abbahagyták, mert az ólom kémiailag mérgező. (A gőze is!)
- Ennek ellenére az ólom-hűtést ma is fejlesztik több államban is.

A sóolvadékkal vagy folyékony fémmel hűtött reaktorok

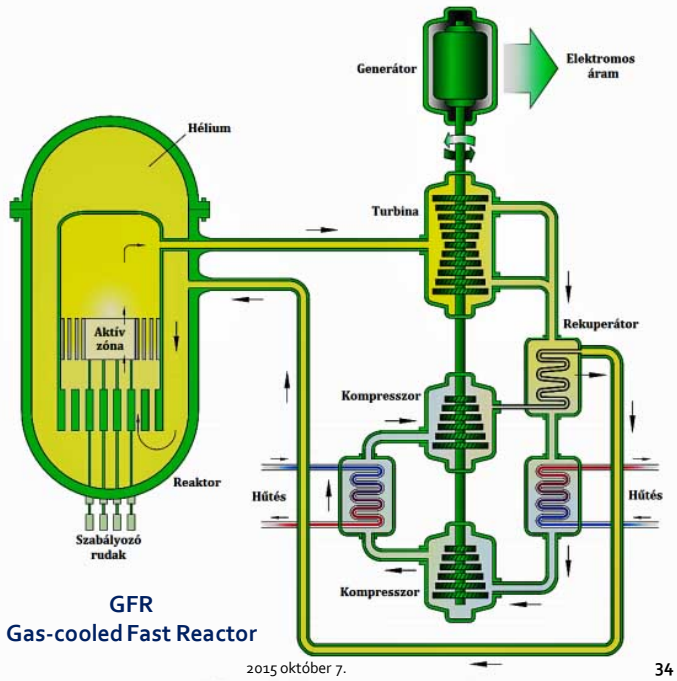
- Az üzemi hőmérséklet és így a termikus hatásfok igen jó lehet, de
- mind a meleg sóolvadék, mind a nátrium és a folyékony ólom is erősen korrodeálhatja a hűtőközeget szállító csöveket és mozgató szivattyúkat. (Különösen pl. az ólom esetén.)
- A szivattyúk is különleges konstrukciójúak.
- Valójában minden reaktor **indítási és leállítási folyamatai** elég sok gondot okoznak, de e 4. generációs hűtőközegű reaktoroké különösen problémás lehet és eddig kevés a tapasztalatunk.
- Ebben a diszkusszióban ezeket nem is tárgyaljuk.

Gázhűtésű, 4. generációs reaktorok

A HŰTŐKÖZEG VAGY SZÉNDIOXID, VAGY – GYAKRABBAN – HÉLIUM EGYKÖRÖS RENDSZER ÉS A HŰTŐGÁZT KÖZVETLENÜL VEZETIK EGY, VAGY TÖBB GÁZTURBINÁRA

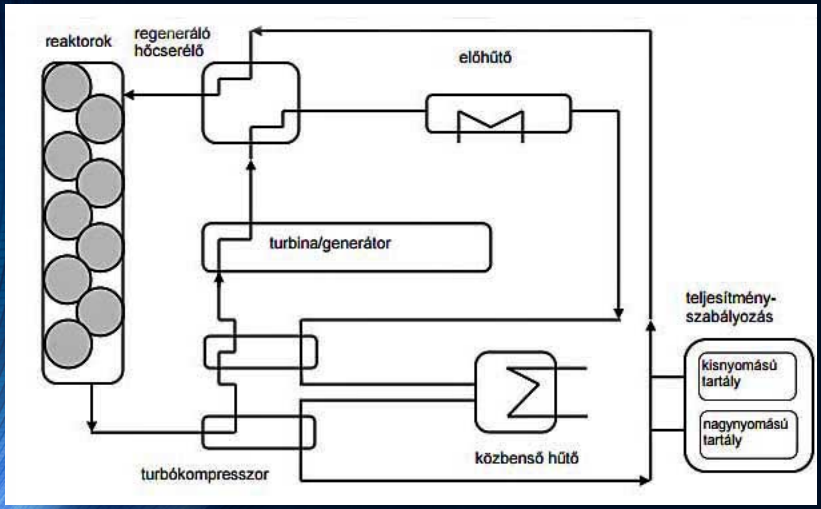
A hélium hűtésről

- Egykörös.
- A gázturbinán azonos nyomáson visszahűl. (Speciális turbina.)
- Nemesgáz: Nem mérgező, nem korrodál.
- 850 fokos üzemi hőmérséklet is elérhető vele.
- Az aktív zóna a moderátor zóna.
- Kicsi a fajhője. Nagy nyomás és nagy térfogat-áram kell.
- A Föld hélium készlete csak kb. 30 évre lenne elegendő.



GFR
Gas-cooled Fast Reactor

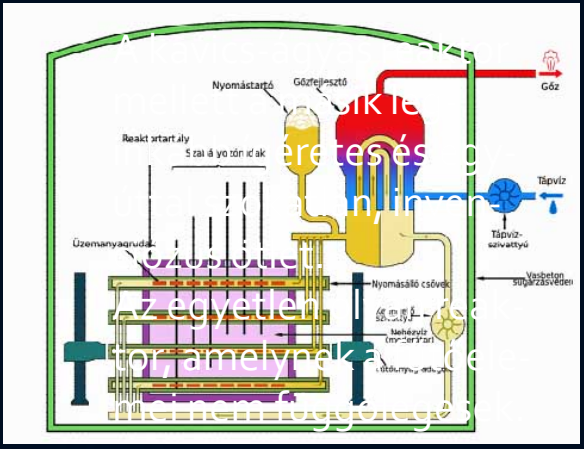
Kavicságyas gázhűtésű reaktor – 4.gen.



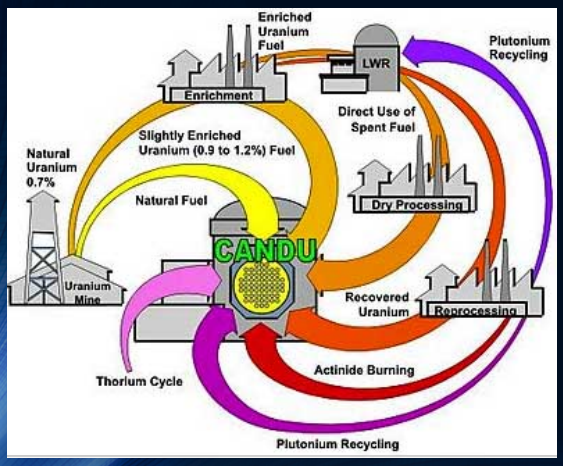
- Német kutatók rendkívül ígéretes fejlesztése.
- Zárt, a hasadási termékeket sem kiengedő, teniszlabda méretű, kerámia tokokban van a hasadóanyag.
- Nagy kár, hogy a nukleáris energia ellenes kampányok hatására abbahagyták a fejlesztést.
- Ennél a megoldásnál a hélium (vagy CO_2) hűtőgáz nem tartalmaz hasadó anyagot.

Deuterium hűtőközegű reaktor: a CANDU
(Canadian Deuterium-Uranium Reactor)

- Kétkörös, nyomott nehézvizes reaktor.
- Természetes urán, nehézvíz moderátor.
- Kanadai fejlesztésű (1950-60), de azóta több is van szerte a világon. (10 db.)
- Üzem közben újíthatók az üzemanyag kötegek és áthelyezni sem kell azokat.
- Az aktinoidák hasadó anyagait is elégeti.
- MOX üzemanyag: U & Pl keverék.



A CANDU üzemanyag-ellátása a mellé épített reprocesszáló üzem segítségével. (4. generáció)



- Az első, az 50-60-as évek megoldása tulajdonképpen első generációs volt.
- Az még nem dúsított uránnal dolgozott. A mai változatok kissé dúsított uránnal.
- Ezt fejlesztették mára negyedik generációs fissziós reaktorrá.
- A használt üzemanyag kötegekből is visszatáplál minden melléktermék hasadó anyagot. (urán,plutónium, actinoidák)
- Ráadásul tórium-származék hasadó anyag additív betáplálásra is van mód.

Láncreakció nélküli fissziós reaktor. (4.gen.)

Ez **külső gyorsítóval hajtott reaktor** lesz, ha majd lesz.

- A fissziós reaktorok mind saját maguk állítanak elő annyi neutront, hogy azok veszteségei után is maradjon hasadóanyag-atomonként 1 db.
- Ez a reaktor un. kritikus állapota, amit üzem közben fenn kell tartani.
- Újabban felmerült az az ötlet, hogy a nehéz atommag hasítására kívülről, egy külső neutron-generáló gyorsítóból táplálják be a reaktor magba, a kritikus állapotot fenntartó neutronokat.
- Neutronok előállíthatók:
  - Radioaktív elemek sugárzásából (a céltárgy D_2O vagy Be, a „bombázó": α vagy γ
  - Gyorsítós neutronforrás 1: Deuterium bombázása Triciummal (3,2 MeV n)
    2: Deuterium bombázása Deuteriummal (17,6 MeV n)
  - Folyamatos reaktor üzemet biztosító gyors neutron forrás lehet nagy energiájú (100Mev) protonokkal bombázott ólom céltárgy is. (A fluxus is elegendően nagy.) Nb: Spalláció.

„Kiégett" fissziós üzemanyagok felújítása

- A hagyományos urán üzemanyagú reaktorok a teljes urán tartalomból kinyerhető energiának még 1%-át sem hasznosítják és
- az utódainkra hagyják az akár sok évezredig sugárzó hulladékot.
- Az ilyen „üzemanyag hulladékot" megfelelő energiájú és intenzitású neutron-nyalábbal besugározva
  - egyrészt a fissziós reaktorba akár többször is visszatáplálható, újra felhasználható üzemanyagot kapunk,
  - másrészt olyan, már nem újra hasznosítható radioaktív végtermékeket, amelyek akár „csak" egy emberöltő alatt is megfelelően lebomlanak.
- Ilyen célokra ma a gyors reaktorok és a külső neutron forrással meghajtott reaktorok igen alkalmasnak látszanak.
- „Egy ilyen berendezés alkalmas lehetne tíz darab, egyenként 1000 MW teljesítményű atomerőmű nagy aktivitású hulladékainak a kezelésére." [Szatmáry]

Összefoglalásul: A fejlesztési irányok

- Ma is igen fontos a biztonságosság növelése, de hangsúlyos pl. a nukleáris hatásfok & ü.a. is
- Az üzemanyagból egyáltalán felszabadítható atomenergia növelése:
  Az U 235-ös hasadó anyag mellett más hasadó anyagok és termékek visszatáplálásával
- A reaktor belső neutron-veszteségeinek a csökkentése
  Pl. a moderátor legyen azonos a hűtőközeggel.
- Tekintettel a Föld urán-készleteinek a korlátozottságára egyre fontosabbak a hasadó anyagok mesterséges előállítására alkalmas tenyésztő reaktorok.
  Tóriumból egyébként is 3× annyi van a földkéregben, mint Uránból. (Monazit homok.)
- Az atomhasítással termelt hő veszteségeinek csökkentésére minél kevesebb hő-átadó kört alkalmaznak. Gyakori az egykörös megoldás, de az növeli a biztonsági kockázatot.
- A hő-hatásfok növelése céljából a lehető legmagasabb üzemi hőmérsékletet lehetővé tevő megoldások. (pl. sóolvadék, olvadt fém) Így is 50% alatt van. (Gyors reaktorok.)
- Ez gondot okoz az indításnál és a leállításnál. !!!
- A legmagasabb üzemi hőmérséklet gáz hűtéssel érhető el. (800-900 fok.)

Néhány kiemelten jó (magyar nyelvű) forrásmunka

- www.matud.iif.hu/01nov/szatmary.html
  Szatmáry Zoltán:
  A jövő atomerőművei
- http://nuklearis.hu/sites/default/files/nukleon/8_1_177_Radnoti_0.pdf
  ***Radnóti Katalin1 , Király Márton2* ELTE-TTK, 2015**
  Az atomenergiáról egyszerűen:
  az atomerőművek működése, típusaik és jövőjük
- http://fizikaiszemle.hu/archivum/fsz9802/kulatemu.html
  Rósa Géza:
  Áttekintés a különböző atomerőmű típusokról
  Paksi Atomerőmű Rt. Fizikai Szemle 1998/2.