

Atomerőművek felépítése, tervezése

Atomerőművek 1.

Prof. Dr. Aszódi Attila, Boros Ildikó, BME NTI

2020. február 13.

Tematika

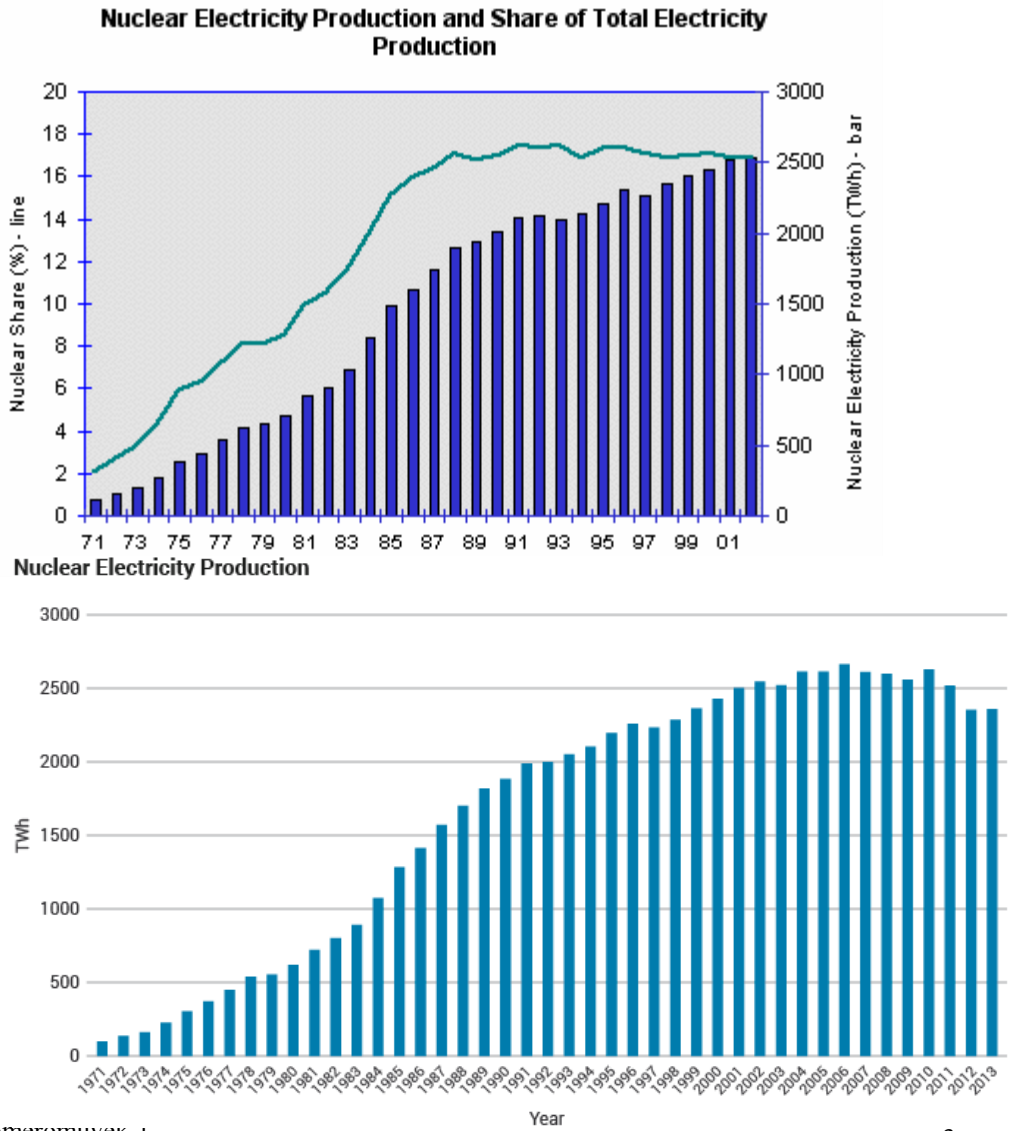
1	Atomerőművek típusai
2	Primerköri főberendezések
3	Szekunderköri főberendezések
4	Atomerőművek hűtése
5	Konténment
6	Vízüzem
7	Telephelyek kiválasztása, környezeti hatások
8	Üzemzavari hűtőrendszerek
9	Irányítástechnika
10	Üzemzavarok
11	Villamos berendezések
12	Külső hatások elleni védelem
13	Atomerőművek építése, engedélyezése
14	Üzemidőhosszabbítás

Az atomenergia jelenlegi szerepe

Forrás: WNA

- Az atomenergetika részesedése a villamosenergia-termelésben (2011, 2014)

világ	16% → 11%
EU	35% → 27%
Magyaro.	36% → 53%
- A világon 443 atomerőművi blokk üzemel, 2 tartósan leállítva, és 52 áll építés alatt.
- Az atomerőművi blokkok zöme 2015-2030-ra tölti ki tervezett élettartamát
 - Átlagéletkoruk 28-30 év

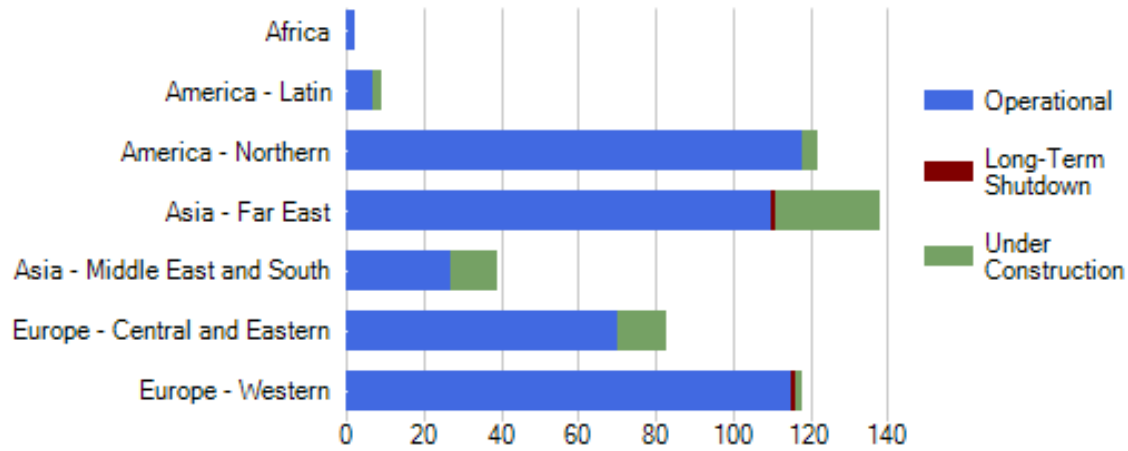


A világ atomerőművei

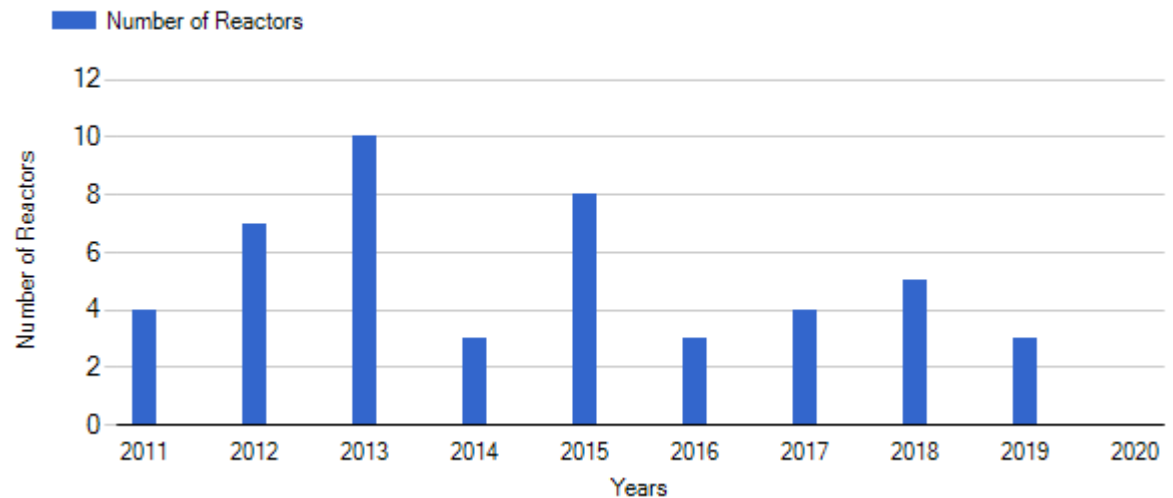
Source: <http://www.climatecentral.org>



Trendek a nukleáris iparban



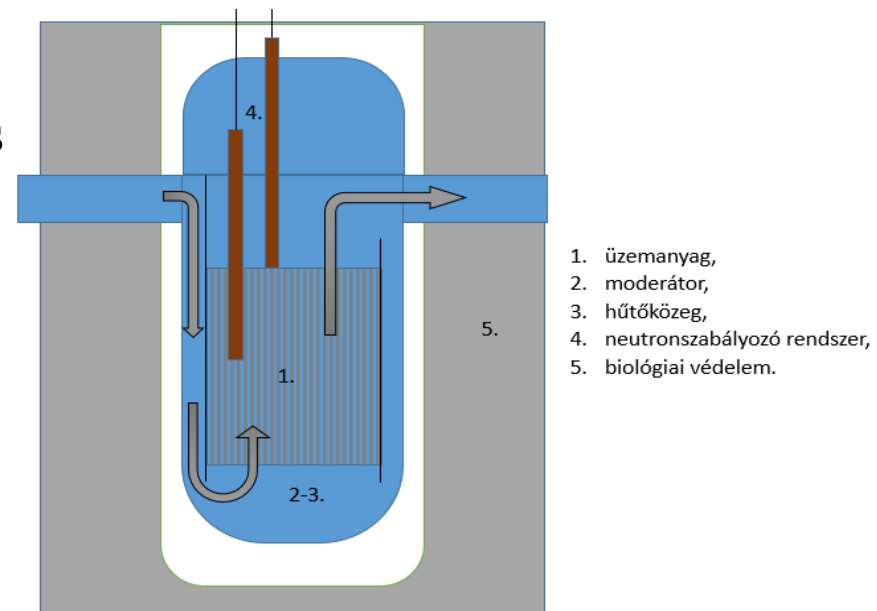
Trend of Construction Starts



Source: IAEA

Atomreaktorok felépítése

- Termikus atomreaktor fő „összetevői”
 - **Üzemanyag** (hasadóanyag): általában U vagy Pu (vagy MOX)
 - **Moderátor** – jó lassítóképességű és kis befogási hatáskeresztmetszetű anyag (H_2O , D_2O , C)
 - **Reaktivitás-szabályozás** – neutronelnyelő anyag (B, Cd)
 - **Hűtés** (H_2O , D_2O , CO_2 , He)
 - **Sugárvédelem** (beton, víz, bórsav, stb.)



Miért ilyen fontos a nukleáris biztonság?

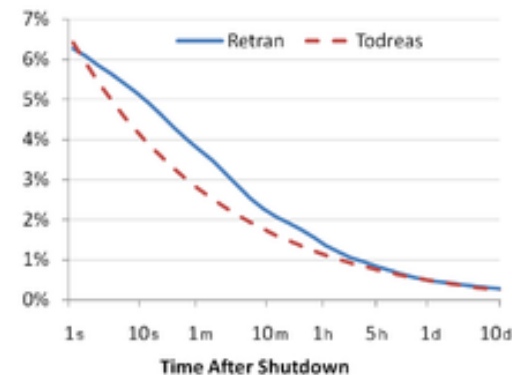
- Miért különleges egy atomerőmű a tervezés szempontjából?
 - Hasadóképes anyag kezelése (ellenőrizetlen láncreakció megakadályozása)
 - Nagy mennyiségű radioaktív anyag van felhalmozva (hasadási termékek, transzuránok)

TABLE 3.2. MAXIMUM ACTIVITY OF THE MAIN FISSION PRODUCTS.

	Core, 2 h after shutdown	Spent fuel	Primary system	Gaseous effluents
Rare gases	10^7 TBq	10^6 TBq	$3 \cdot 10^2$ TBq	$2 \cdot 10^2$ TBq
Iodine	$2 \cdot 10^7$ TBq	10^6 TBq	20 TBq	
Caesium	10^7 TBq	$2 \cdot 10^4$ TBq		

- Leállítás után remanens hőt is el kell szállítani

A biztonság szükséges feltétele a **radioaktív anyagok visszatartása**, a láncreakció kontrollja és az üzemanyag **megfelelő hűtése!**



Source: Wikipedia

Atomerőművek tervezése

– Remanens hő

Forrás: NAÜ

TABLE 3.3. RADIOACTIVE DECAY POWER

Time after shutdown	Percentage of the initial thermal power	Thermal power produced in MW
1 second	17%	500
1 minute	5%	150
1 hour	1.5%	45
1 day	0.5%	15
1 week	0.3%	9
1 month	0.15%	4.5
1 year	0.03%	1
10 years	0.003%	0.1
100 years	0.001%	0.03
1000 years	0.0002%	0.006

- Normál üzemi hűtőrendszerek
- Üzemzavari hűtőrendszerek
- Súlyos baleseti hűtőrendszerek



Biztonsági követelmények

- Alapkövetelmény: még súlyos baleset esetén is korlátozott lakossági sugárterhelés
- Ez teljesül, ha az **alapvető biztonsági funkciók** teljesülnek.
 - **A nukleáris lánreakció hatékony szabályozása**
 - Elfogadhatatlan reaktivitás-tranziensek megelőzése
 - Reaktor biztonságos leállított állapotban tartása
 - Reaktor szükség szerinti leállítása üzemzavari helyzetben
 - **A termelt energia megfelelő elszállítása**
 - Megfelelő hűtőközeg-mennyiség fenntartása üzemzavari, baleseti szituációkban
 - Remanens hő elszállítása
 - Hő elszállítása a végső hőnyelőhöz
 - Hűtéshez szükséges funkciók fenntartása
 - **A radioaktív anyagok kikerülésének megakadályozása**
 - Az üzemanyag burkolat / nyomáshatároló közeg integritásának megtartása
 - Radioaktív anyagok konténmentből való kibocsátásának limitálása baleseti helyzetben
 - Lakosság és személyzet sugárterhelésének limitálása baleseti és súlyos baleseti folyamatokban
- Atomtörvény (1996. évi CXVI. Törvény, módosítva 2011):

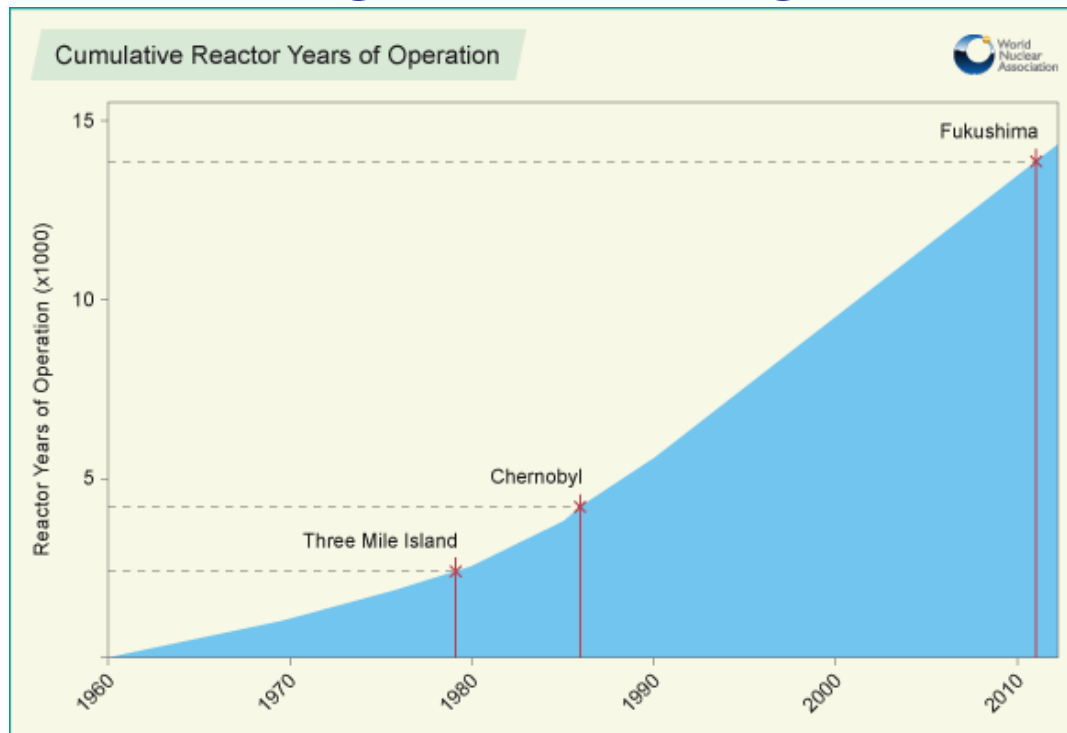
Alapelvek

4. § (1) Atomenergiát csak oly módon szabad alkalmazni, hogy az ne károsítsa a társadalmilag elfogadható - más gazdasági tevékenységek során is szükségszerűen vállalt - kockázati szinten felül az emberi életet, a jelenlegi és a jövő nemzedékek egészségét, életfeltételeit, a környezetet és az anyagi javakat.

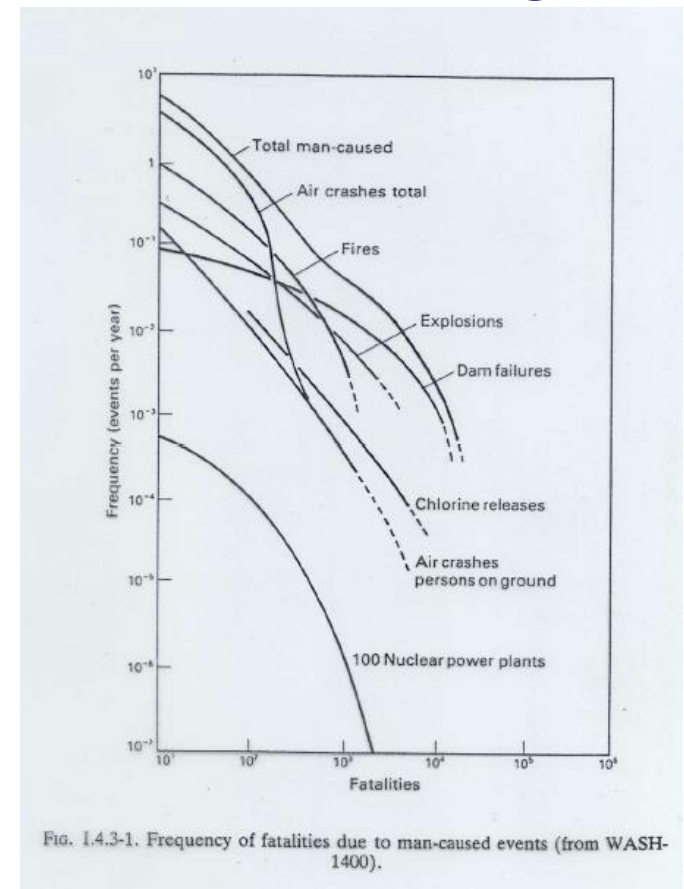
(2) Az atomenergia alkalmazása során a biztonságnek minden más szemponttal szemben elsőbbsége van.

Biztonsági követelmények

- Cél: a nukleáris biztonság folyamatos javítása
- De: meddig lehet, meddig ésszerű fokozni a biztonságot?



Forrás: WNA



Forrás: WASH-1400

Az 1975-ös amerikai jelentés (Rasmussen-report) az első átfogó valószínűségi biztonsági elemzés 10

Az atomerőművek biztonsága

Hogyan lehet biztonságos atomerőművet tervezni?

- Belső (inherens) biztonság feltételei teljesüljenek
 - Reaktivitástényezők, negatív visszacsatolás
- Külső biztonsági rendszerek
 - Passzív biztonsági berendezések
 - Aktív biztonsági berendezések (pl. biztonsági rudak, üzemzavari hűtőrendszer: ZÜHR stb.)
- Emberi tényező fontossága

Új atomerőművek biztonsága

- A tervezésben figyelembe vett állapotok

Tervezési alapba tartozó események (DBC)				Tervezési alap kiterjesztése (DEC)	
Normál üzem	Várható üzemi események	Kis valószínűségű tervezési üzemzavarok	Nagyon kis valószínűségű tervezési üzemzavarok	Tervezési alapon túli balesetek	Súlyos balesetek
TA1 (DBC1)	TA2 (DBC2)	TA3 (DBC3)	TA4 (DBC4)	TAK1 (DEC1)	TAK2 (DEC2)
Ide vezető események gyakorisága:					
$f=1 / y$	$f \geq 10^{-2} / y$	$10^{-2} / y \geq f \geq 10^{-4} / y$	$10^{-4} / y \geq f \geq 10^{-6} / y$		

Követelmények TAK állapotokra is:

- A reaktort TAK1 állapotra is tervezni kell
- TAK2 állapotra is követelmények (pl. konténment integritás megőrzése)

Atomerőművi üzemállapotok – üzemelő reaktorra

- Atomerőmű állapottai

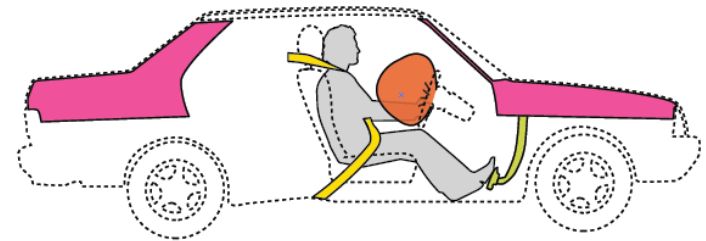
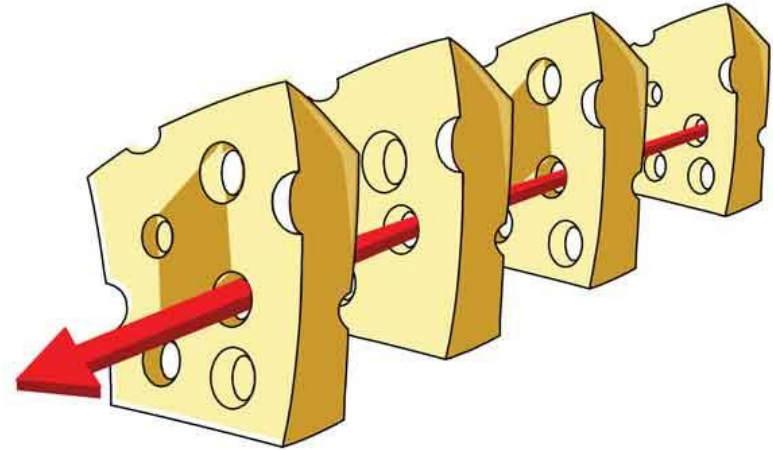
- a) normál üzemi állapot;
- b) a *tervezési alaphoz* tartozó üzemzavarok, ezen belül:
 - várható üzemi események
 - jelentős eséllyel megvalósul az atomerőmű üzemideje során. ($> 10^{-2}$ / reaktorév.)
 - tervezési üzemzavarok
 - olyan folyamat, amelynek csekély az esélye, hogy megvalósul az atomerőmű üzemideje során.
 - Várható gyakorisága 10^{-2} - 10^{-5} / reaktorév, de egyes tervezési üzemzavarok, pl. LB LOCA várható gyakorisága ennél is kisebb (belső kezdeti esemény szűrési kritérium 10^{-5} /év) .
- c) balesetek (a tervezési alapot meghaladó esemény, amely során a határértéket meghaladó mennyiségű radioaktív anyag kerülhet a környezetbe):
 - tervezésen túli üzemzavarok,
 - súlyos balesetek.
 - A reaktorzóna jelentős károsodásával együtt járó, a tervezési alapnál, valamint a tervezési alap kiterjesztésébe tartozó üzemzavaroknál súlyosabb külső hatásokkal járó baleseti állapot.

Tervezési alap			Tervezési alap kiterjesztése	
Normál üzemi állapot	Tervezési alapba tartozó események		Tervezési alapot meghaladó események	
Normál üzemi	Várható üzemi események	Tervezési üzemzavarok	Tervezésen túli üzemzavarok	Súlyos balesetek
TA1	TA2	TA4	TAK1	TAK2

Az atomerőművek biztonsága

MÉLYSÉGI VÉDELEM

- Hármás követelmény:
 - Rendellenesség megelőzése
 - monitorozás (rendellenességre utaló jelek figyelése)
 - következmények enyhítése
- A mélységi védelem elve:
 - Az összes biztonsági rendszert magába foglalja
 - A mérnöki gátakat a hármás követelmény megfelelő szintjéhez kapcsolja
 - Nagyobb hangsúlyt fektet a megelőzésre, a baleset bekövetkeztét próbálja megakadályozni.



1. Brakes → 2. Seatbelt → 3. Airbag → 4. Crumple zone



Biztonsági követelmények

- Elv: mélységi védelem (defence-in-depth)

Ötödik szint: A létesítményen kívülrre történő radioaktív kibocsátás következményeinek enyhítése

Negyedik szint: A súlyos balesetek kezelése, a következmények enyhítése, a súlyosság mérséklése

Harmadik szint: A hihető (mértezési) balesetek kezelése

Második szint: A rendellenes működés helyes kezelése és a hibák észlelése

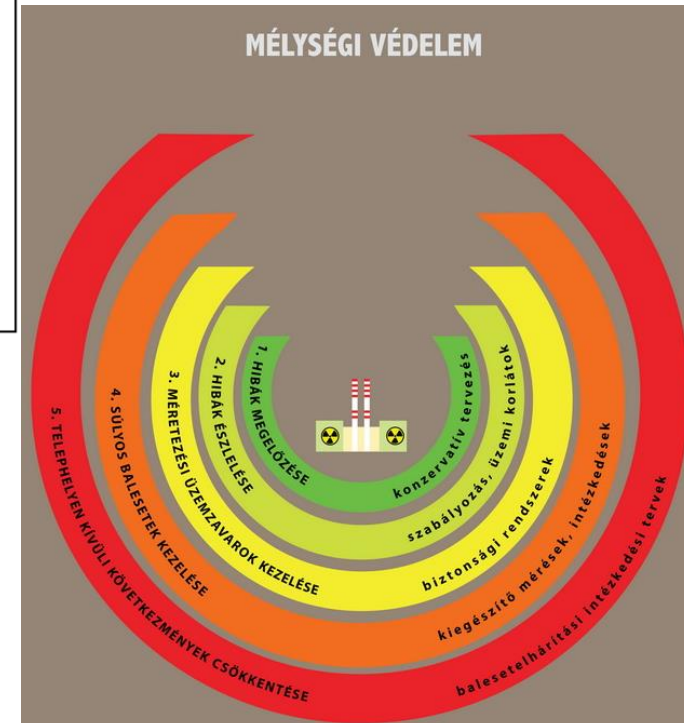
Első szint: A rendellenes működés és a hibák megelőzése
Konzervatív tervezés, magas színvonalú kivitelezés és üzemeltetés

Megfelelő szabályozás, üzemi korlátok és az azok átlépésének megelőzése

Az automatikus biztonsági rendszerek indulása és a szükséges emberi beavatkozások

Kiegészítő mérések és intézkedések

Balesetelhárítási intézkedési terv



Biztonsági követelmények

- **Mérnöki gátak**
 - Feladatuk a radioaktivitás és a környezet elválasztása
 - Tervezés: kritériumok a mérnöki gátak épségére

1. Üzemanyag-mátrix

- Keramikus üzemanyag-tabletta (LWR-eknél),
- normál üzemben sem teljes körű gát,
- nemesgázok, illékony hasadási termékek kijutnak a gázrésbe, furatba

2. Burkolat (pálca!)

- Burkolat általában Zr-ötvözet (Zircalloy, nálunk ZrNb),
- 3-5 m hosszú, kb. 1 cm átmérővel, gázrészek.
- Meghibásodás okai: anyaghiba, nagy gáznyomás tranziensek miatt, áramlás keltette rezgések, korrózió. Baleseti helyzetben: oxidáció.

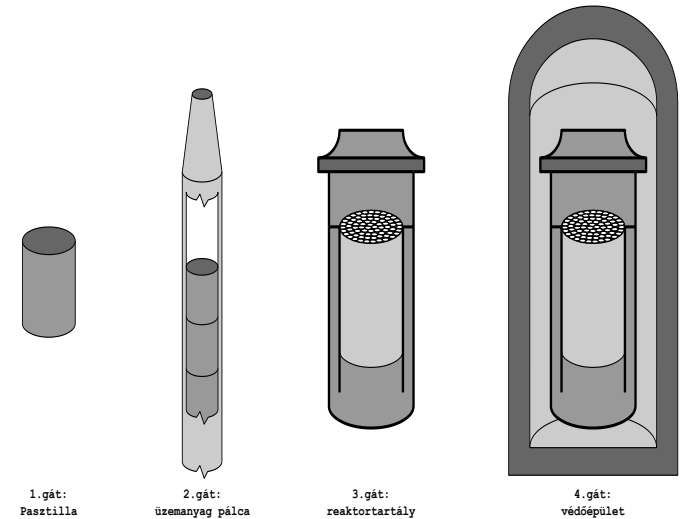
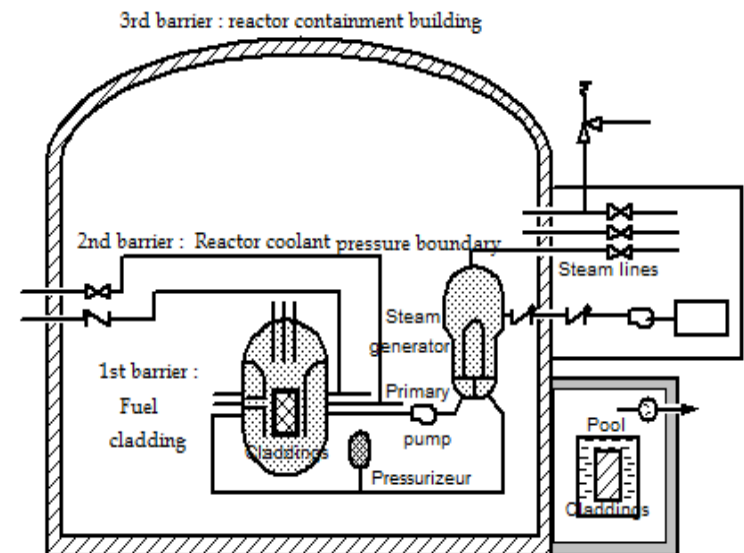


FIG. 3.3. Main PWR barriers.



Biztonsági követelmények

- Mérnöki gátak

- 3. Primer nyomáshatároló rendszer

- Primer nyomáshatároló: RPV, főkeringtető vezeték, GF, FKSZ, TK, víztisztító rendszer, egyéb kapcsolódó rendszerek
- Aktivitás kijutása: szervezett szivárgás rendszere, primer kör sérülése (kezdeti eseményként vagy más esemény következtében).
- Meghibásodási folyamatok:
 - Cső szivárgás
 - Csővezeték törés
 - FKSZ tömítés meghibásodás
 - GF csőtörés
 - Szelep meghibásodás
 - Reaktortartály meghibásodás

- 4. Konténment

- Eltérő típusok
- Tervezési nyomás és szivárgásérték

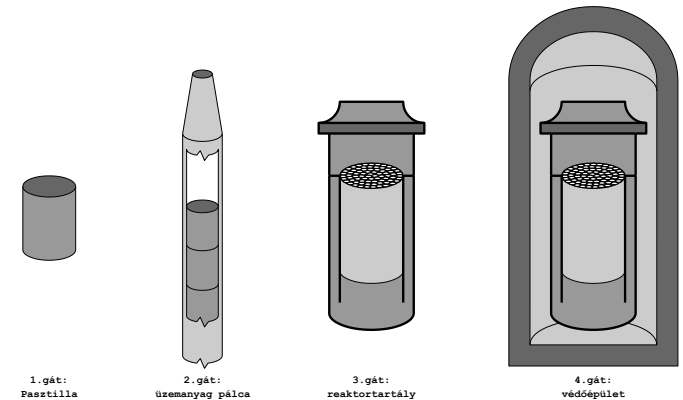
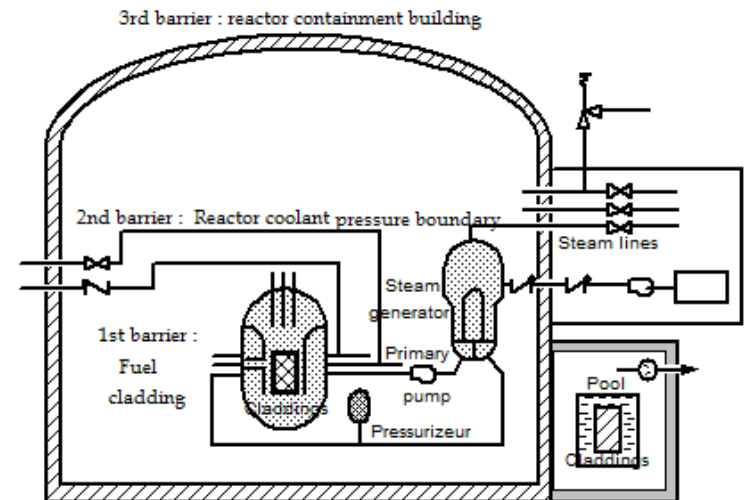


FIG. 3.3. Main PWR barriers.



Biztonsági követelmények – új blokkokra

- Elv: mélységi védelem (defence-in-depth)
- Szabályozás: Nukleáris Biztonsági Szabályzatok (NBSZ)

A	B	C	D	E
Mélységi védelem szintje	Célkitűzés	Alkalmazandó eszközök	Radiológiai következmények	Vonatkozó üzemállapot
1.	Normál üzemi állapottól való eltérések és hibák megelőzése	Konzervatív tervezés, magas színvonalú létesítés és üzemeltetés; fő üzemi paraméterek előírt határok között tartása	Nincs a hatósági korlátokat meghaladó telephelyen kívüli radiológiai hatás	Normál üzem (TA1)
2.	Normál üzemi állapottól való eltérések és hibák kezelése	Szabályozó és biztonságvédelmi rendszerek; egyéb felügyeleti módszerek	*	Várható üzemi események (TA2)

* Normál éves lakossági dóziskorlát: 1 mSv/év

* Ebből származtatott dózismegszorítás egyes létesítményekre (pl. PA: 90 μ Sv/év)

Biztonsági követelmények – új blokkokra

- Elv: mélységi védelem (defence-in-depth)

* TA3 lakosság dózisa max. 1 mSv/esemény

* TA4 / TAK1 lakosság dózisa max. 5 mSv / esemény

** TAK2

a) az atomreaktortól vett 800 m távolságon túl nincs szükség sürgős óvintézkedésekre;

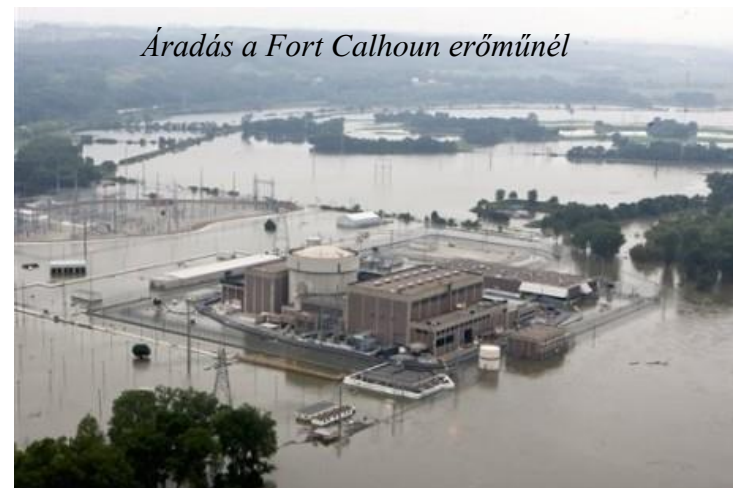
b) az atomreaktortól vett 3 km távolságon túl nincs szükség semmilyen átmeneti intézkedésre, azaz nincs szükség a lakosság ideiglenes áttelepítésére;

c) az atomreaktortól vett 800 m távolságon túl nincs szükség semmilyen késői védőintézkedésre, azaz nincs szükség a lakosság végleges áttelepítésére; d) ne legyen szükség hosszú távú élelmiszerfogyasztási korlátozásra.

Mélységi védelem szintje	Célkitűzés	Alkalmazandó eszközök	Radiológiai következmények	Vonatkozó üzemállapot	
3.	3.a.	Biztonsági rendszerek, üzemzavar-elhárítási utasítások	Nincs vagy csak minimális telephelyen kívüli radiológiai hatás *	Tervezési üzemzavar (TA3-4)	
	3.b.	Üzemzavarok kezelése a radioaktív kibocsátás korlátozása és az üzemanyag olvadás megelőzése érdekében		Hozzáadott biztonsági eszközök komplex üzemzavarok elhárítására, üzemzavar-elhárítási utasítások, telephelyi baleset-elhárítási intézkedések	Komplex üzemzavar (Feltételezett többszörös meghibásodás) (TAK1)
		4.		A nagy vagy korai kibocsátás gyakorlati kizárása, az üzemanyag olvadással járó balesetek	Kiegészítő biztonsági eszközök az üzemanyag olvadás korlátozásához, baleset-kezelési
5.	Jelentős radioaktív anyag kibocsátás radiológiai következményeinek csökkentése	kezelése a telephelyen kívüli kibocsátások korlátozása érdekében	útmutatók, telephelyi baleset-elhárítási intézkedések	indokolhatja **	Nagyon súlyos baleset
		Telephelyi és telephelyen kívüli baleset-elhárítási intézkedések; beavatkozási szintek	A telephelyen kívüli radiológiai hatás lakossági óvintézkedéseket indokol		

Biztonsági követelmények

- Tervezési alapelvek (nagyon fontos, tipikusan DBA kezelésére)
 - **Redundancia,**
 - **diverzitás,**
 - **Közös eredetű meghibásodásokat** ki kell zárni
 - függetlenség,
 - térbeli szeparálás
 - **Egyszeres meghibásodás kritériuma** (a rendszer el kell hogy lássa funkcióját egy rész meghibásodásakor is)
 - **„fail-safe” design**
- Ezek (is) határozzák meg az atomerőművi rendszerek, rendszerelemek kialakítását.
- Eastland-hatás



Biztonsági követelmények

- Meg kell határozni a feltételezett (posztulált) kezdeti események körét (postulated initiating event - PIE)
 - Külső és belső események, amelyek üzemzavari tranzienshez vagy tervezési balesethez vezetnek
- Feltételezett kezdeti események (PIE), determinisztikus és / vagy valószínűségi elemzések
- Belső események
 - Meghibásodások (pl. csőtörés)
 - Tűz, robbanás
 - Belső elárasztás
 - Repülő tárgyak, vízsugár vagy gőz hatása
- Külső események
 - Földrengés, áradás (cunami)
 - Extrém meteorológiai események (szél, csapadék, hó, hideg / meleg, tornádó, stb.)
 - Emberi eredetű események



Antinukleáris reklám / Greenpeace

Biztonsági követelmények

- A feltételezett kezdeti események közül
 - hihetők kiválasztása (szűrés),
 - burkoló esetek kiválasztása
 - kombinációk figyelembevétele
- A kezdeti események alapján tervezési balesetek meghatározása, erre kell tervezni a rendszereket és rendszerelemeket
 - Pl. gyors változások esetén biztonsági rendszerek automatikus indítása
 - Súlyos baleseti folyamatok azonosítása
- Elfogadási kritériumok (hőtechnikai korlátok, stb.)

Új reaktorok biztonsága

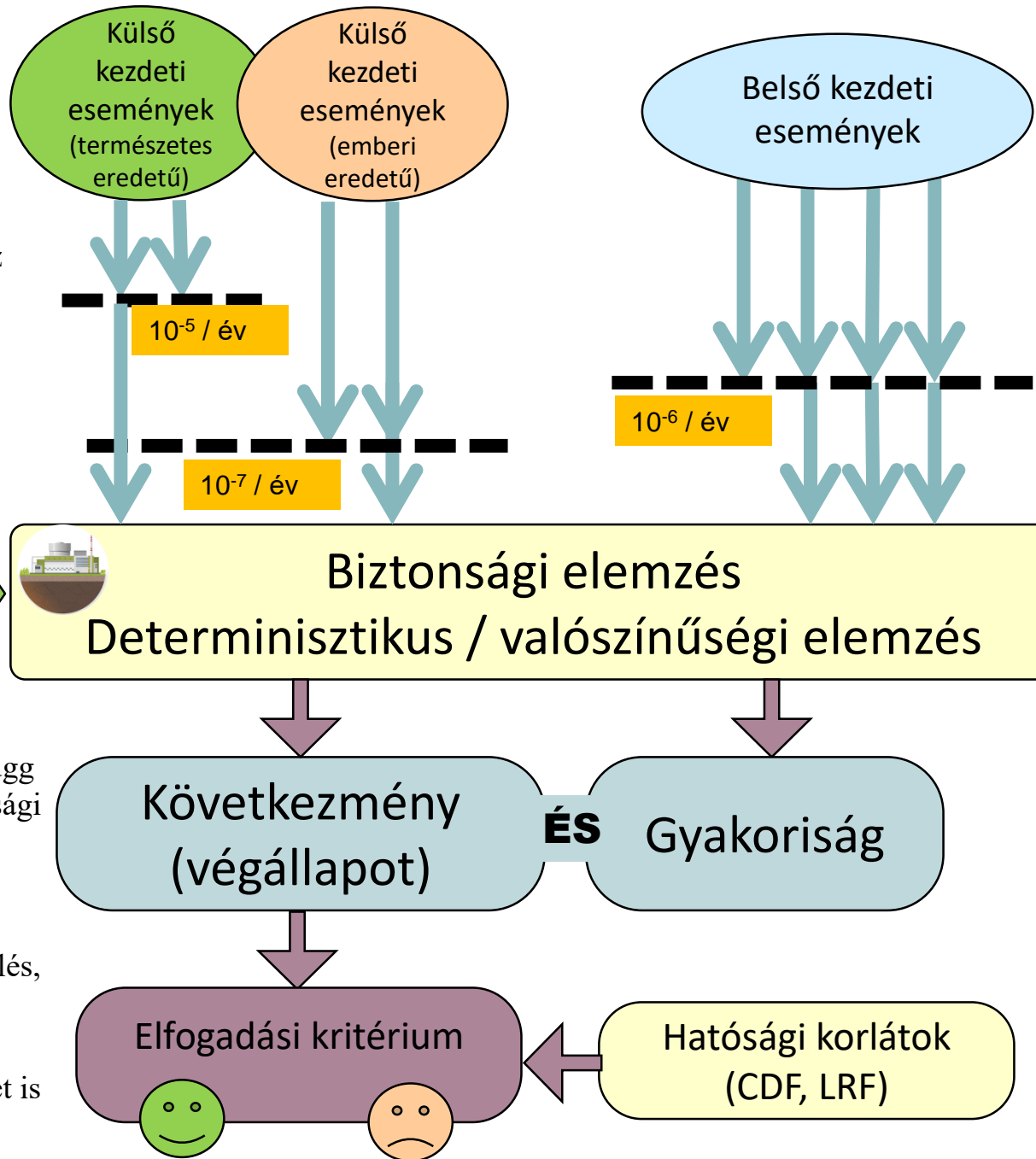
- Posztulált kezdeti események: olyan események, amik veszélyeztethetik az atomerőmű biztonságát

Szűrés

(a biztonsági jelentőség nélküli vagy a hatósági limit alatti gyakoriságú eseményeket ki lehet zárni az elemzésből)

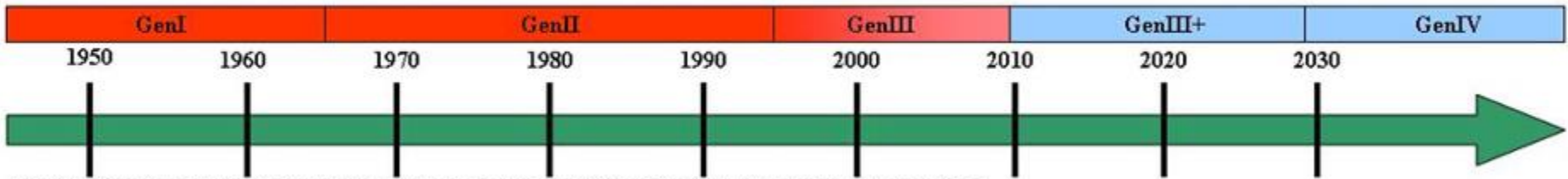
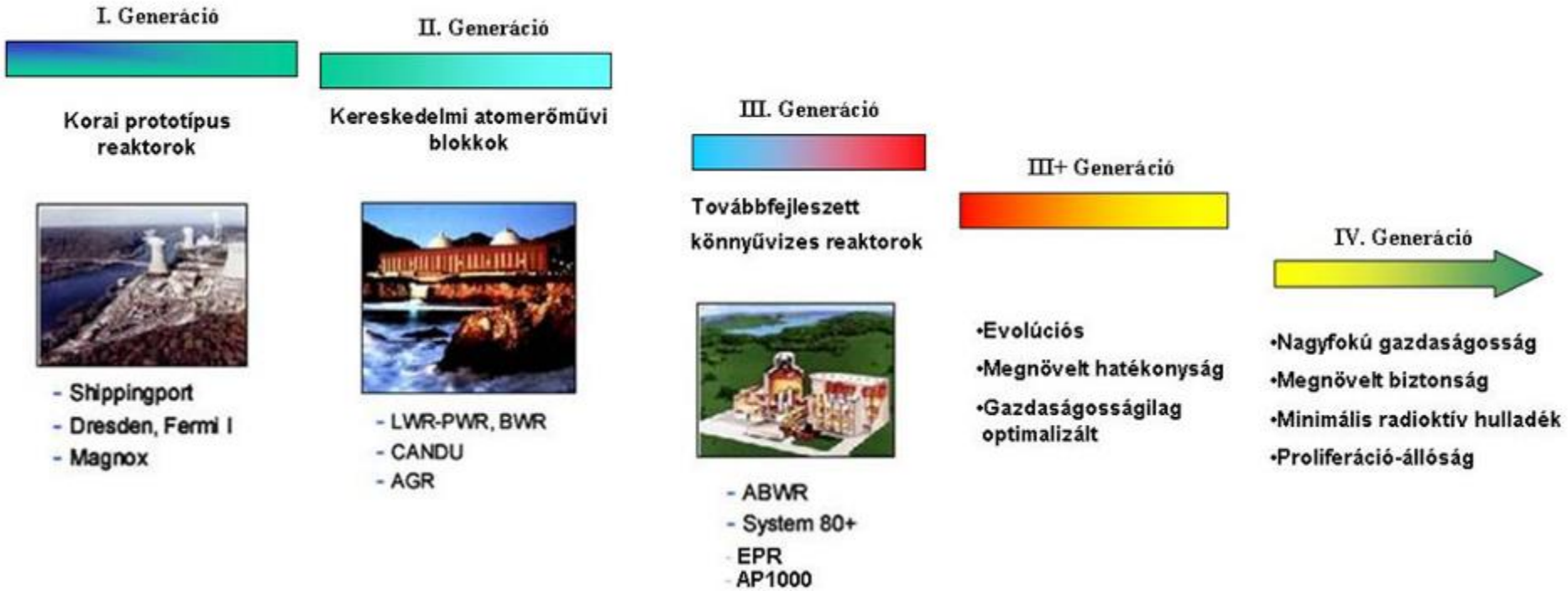
Bemenő adatok: kezdeti feltételek, operátori beavatkozások, biztonsági rendszerek, stb.

- A kezdeti esemény következménye függ a reaktor kezdeti állapotától, a biztonsági rendszerek elérhetőségétől, operátori beavatkozásoktól, stb.
- Több esemenylánc is lehetséges, különböző végállapottal (pl. zónasérülés, kibocsátás)
- A biztonsági elemzés meghatározza a végállapotokat, és azok valószínűségét is



ATOMERŐMŰVEK TÍPUSAI

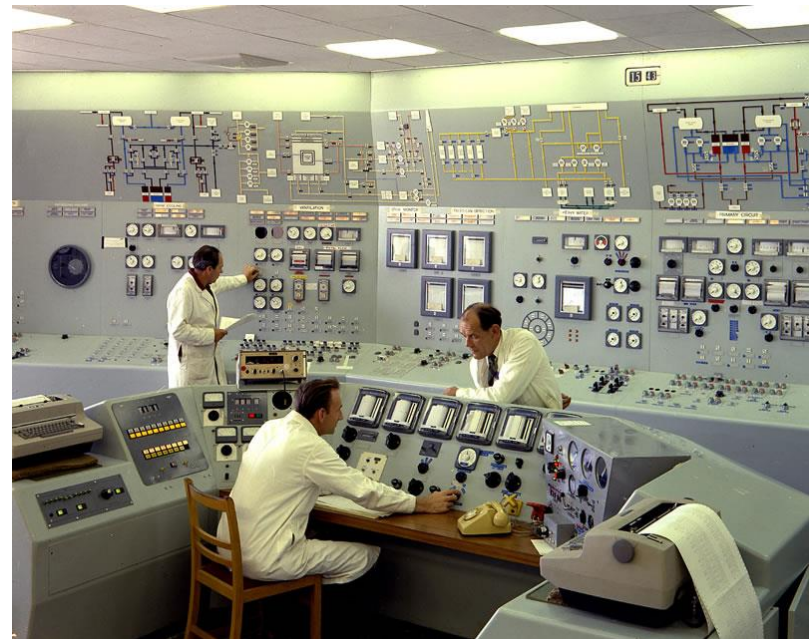
Atomerőmű-generációk



US DOE, Gen IV International Forum: A Technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy Systems; 2002

Első generációs atomerőművek

- Az 50-es, 60-as évek prototípus atomerőművi reaktorai
- Viszonylag kis egységteljesítmény (<250 MW)
- Kis darabszámú szériák, inkább prototípus (kivétel: Magnox)
- Biztonsági hiányosságok
- Többnyire természetes urán üzemanyag
- „Egzotikus” reaktortípusok is (FBR – pl. Fermi I., GCR – pl. Magnox, HWGCR – pl. Monts D'Arree, SGHWR – Winfrith)



Winfrith SGHWR vezénylő (1967-90, 100 MWe)

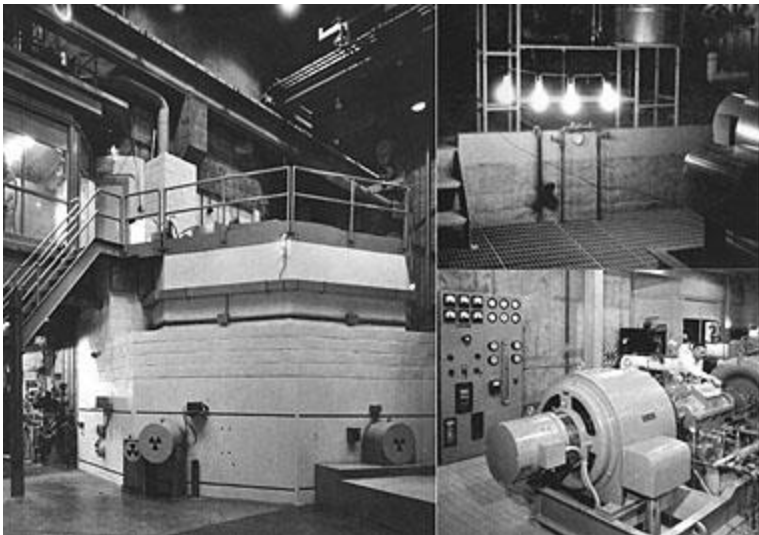


Winfrith SGHWR leszerelése

HWGCR – heavy water gas cooled reactor
SGHWR – steam generating HWR

EBR (Experimental Breeder Reactor)

- 1951-ben helyezték üzembe, a világ első reaktora, amivel áramot termeltek, de nem *atomerőmű*!
- Gyorsreaktor, üa.: 94%-os dúsítottságú urán, hűtőközeg folyékony Na-K.

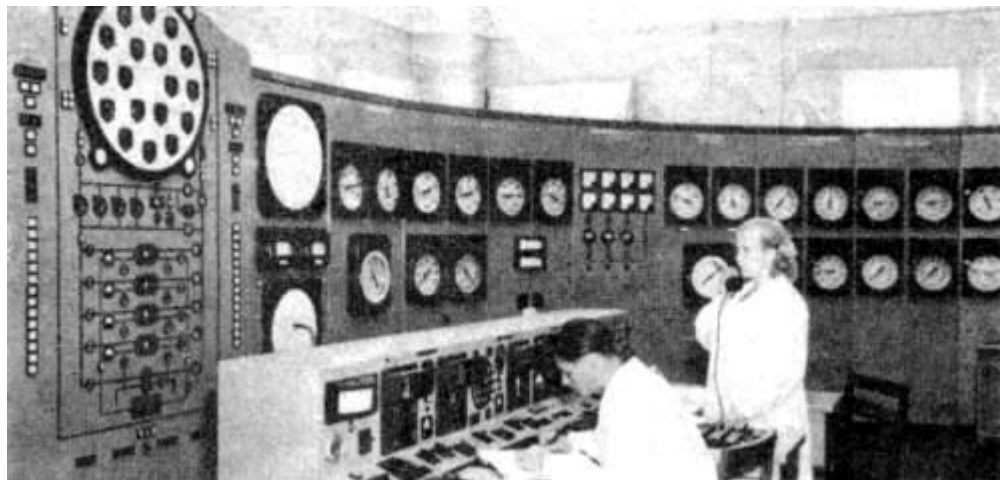


Forrás: INL

- $P_{th}=1400$ kW, $P_e=200$ kW. A National Reactor Testing Station egy épületének világítását látták el vele.

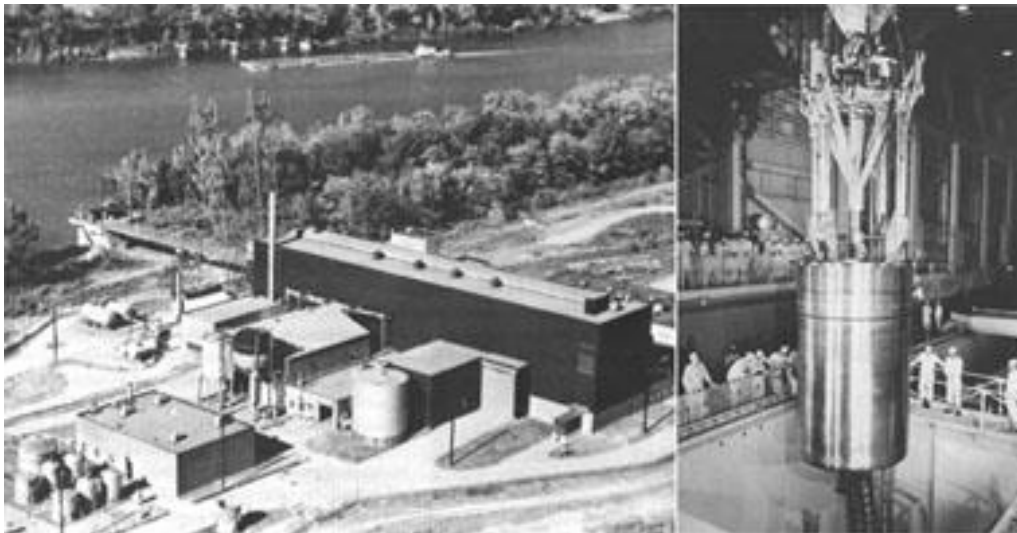
Első generációs atomerőművek

- 1954. július 27: Az Obnyinszki Atomerőmű hálózatra kapcsolódik.
- Későbbi RBMK-k „atyja”, grafitmoderálású, csöves, forralóvízes típus.
- Nettó 5 MW elektromos telj.
- 2002-ben állították le!



A Shippingport Atomerőmű

- 1957. december 2-án indult, 1982-ig üzemelt
- Nyomottvizes, amit eredetileg a haditengerészet részére fejlesztettek ki
- $P_{th}=230$ MW, $P_e=60$ MW
- Az USA első reaktora, amelyet teljesen leszereltek.
- Leszerelési idő: 5 év
- Befejezve: 1990 április
- Költség: 98,3 M USD
- Az első két zóna U-238 tenyésztő köpennyel
- A harmadik zóna LWBR (könnyűvizes tenyésztőreaktor) tóriumos tenyészanyaggal



Forrás: Pennsylvania State Archives

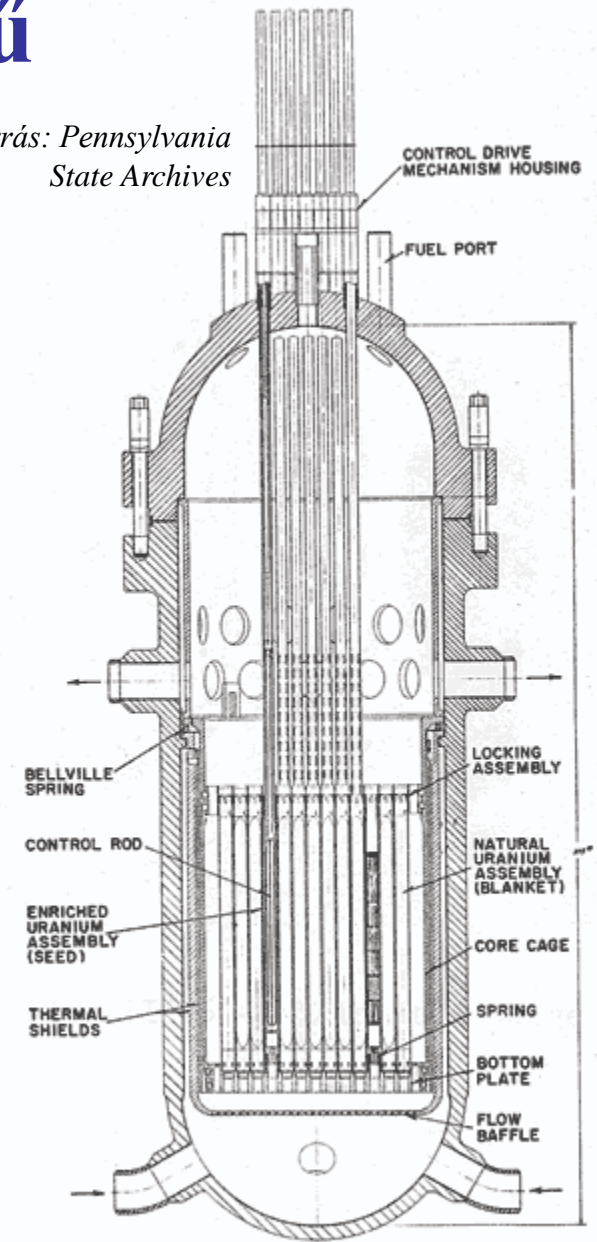


Fig. III-3 -- Longitudinal section of reactor vessel

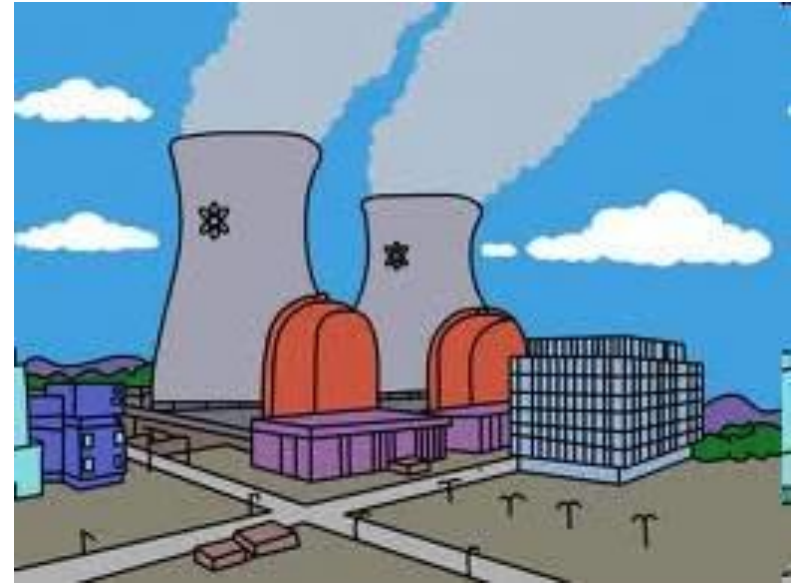
Első generációs atomerőművek

- Magnox: szén-dioxid gáz hűtésű, grafitmoderátoros reaktorok (GCR), természetes urán üzemanyaggal
- Az első Magnox-ot (Calder Hall) 1956-ban indították, és 2003-ban állt le
- 200-500 MWe teljesítmény
- Wylfa-1: ~~ez az egyetlen első generációs blokk üzemel a világon (Nagy-Britannia, Magnox, 550 MWe)~~
 - építés kezdete: 1963;
 - első kritikusság: 1969;
 - hálózatra kapcsolódás: 1971
 - ~~ma is üzemel, cumulative load factor 70,6%~~



Második generációs atomerőművek

- A jelenleg üzemelő blokkok nagy része
- Kereskedelmi forgalomban kapható, nagy darabszámú szériák
- Főleg könnyűvizes blokk típusok ill. nehézvizes reaktorok
- Első generációs reaktorokból továbbfejlesztve
- Csak a biztonságos, gazdaságos típusokat tartották meg
- Bizonyos sztenderdizálás már megfigyelhető, de a blokkok még számos egyedi paraméterrel rendelkeznek

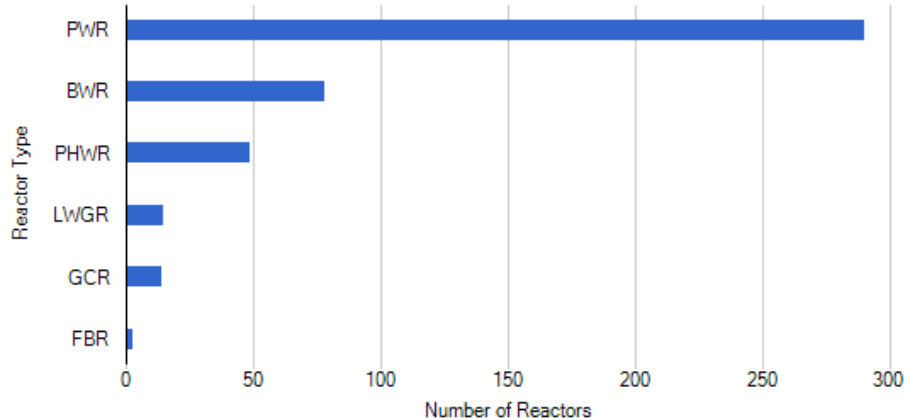


Második generációs atomerőművek

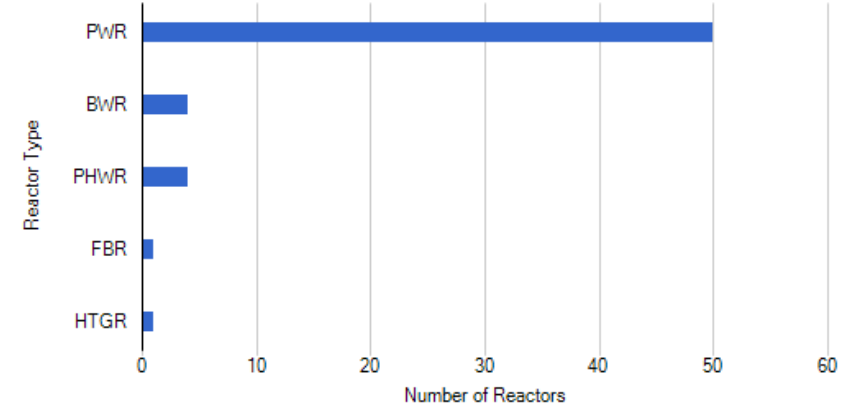
- Üzemelő atomerőművek típusok szerint

Reactor Type ▲	Reactor Type Descriptive Name	Number of Reactors	Total Net Electrical Capacity [MW]
BWR	Boiling Light-Water-Cooled and Moderated Reactor	78	75320
FBR	Fast Breeder Reactor	3	1369
GCR	Gas-Cooled, Graphite-Moderated Reactor	14	7720
LWGR	Light-Water-Cooled, Graphite-Moderated Reactor	15	10219
PHWR	Pressurized Heavy-Water-Moderated and Cooled Reactor	49	24620
PWR	Pressurized Light-Water-Moderated and Cooled Reactor	290	272990
Total		449	392238

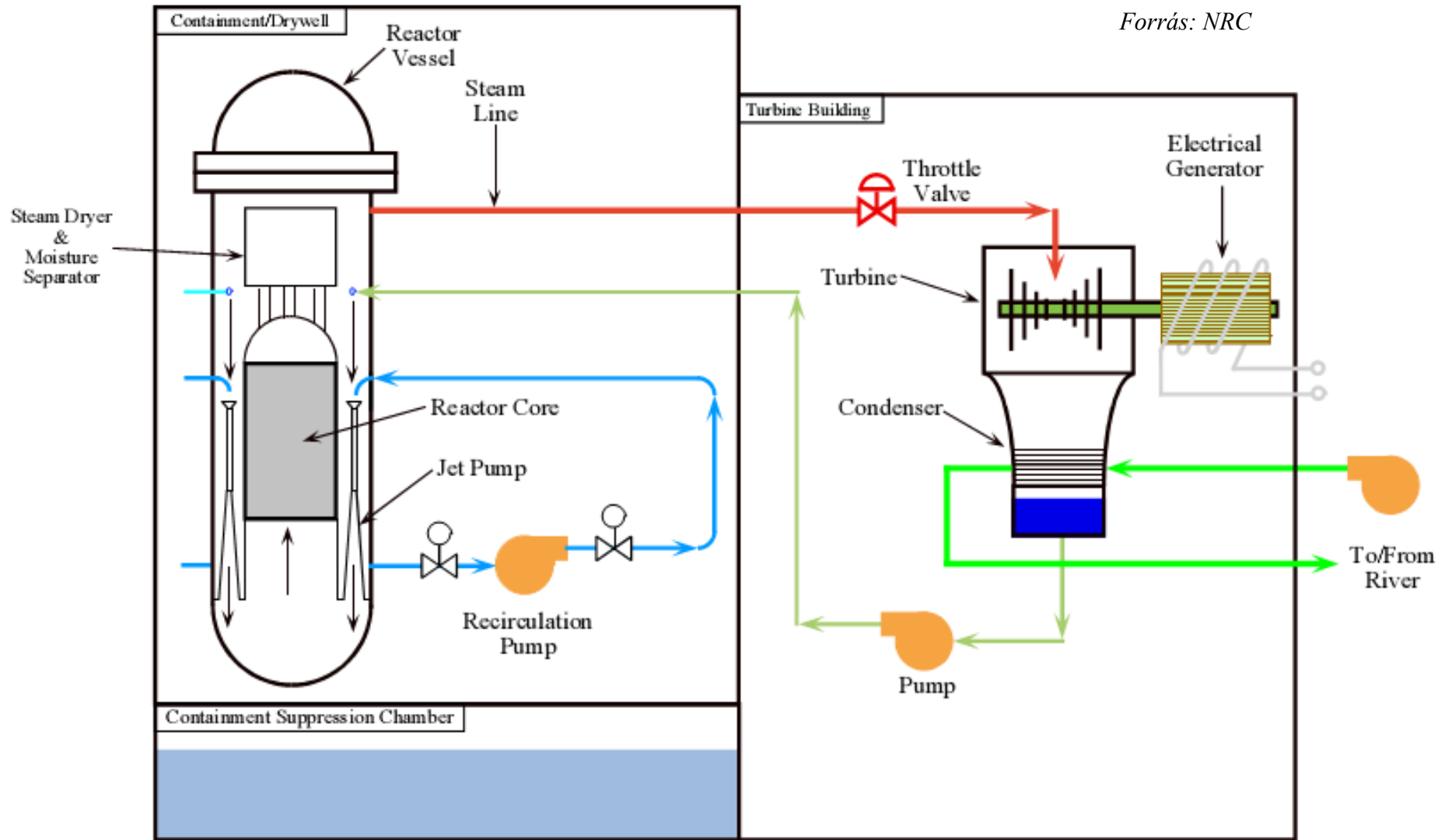
Total Number of Reactors: 449



Total Number of Reactors: 60



BWR felépítése

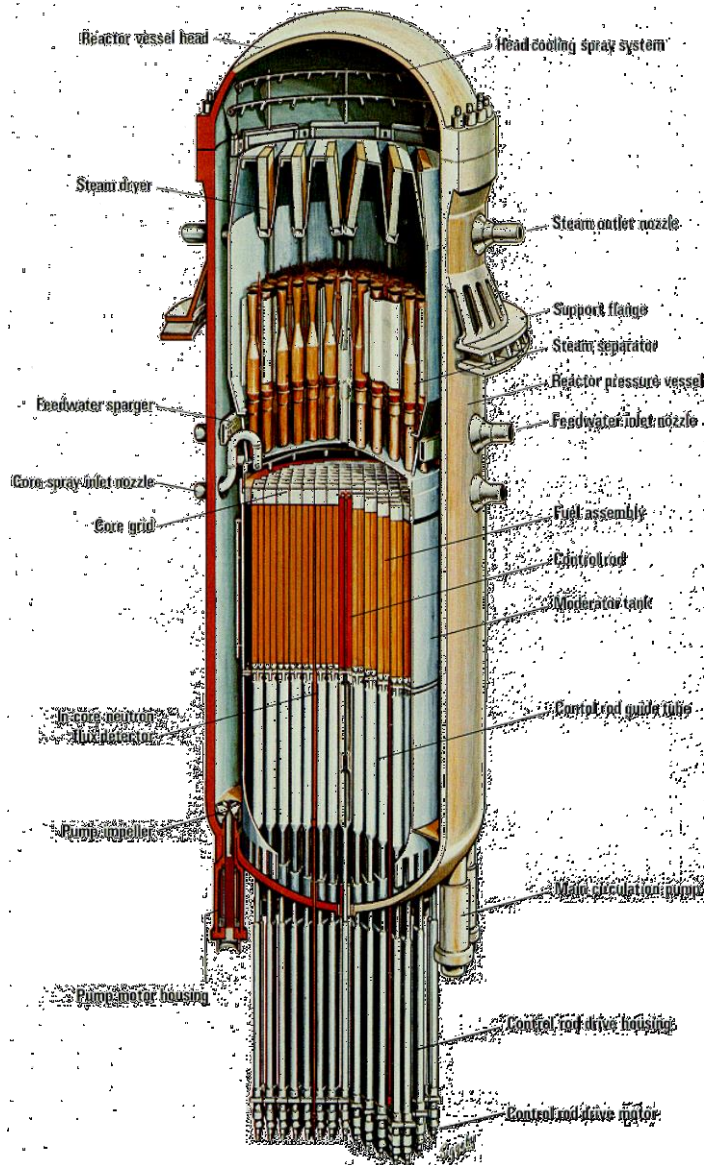


Recirkulációs hurok – teljesítményszabályozás eszköze is

A forralóvízes reaktor

- Egykörös atomerőművi kapcsolás
 - a turbinára jutó gőz az aktív zónában termelődik
 - a korszerű energetikai BWR-ekben nincs a PWR-eknél megszokott elkülönülő primer és szekunder kör, a primer körben alacsonyabb a nyomás
(~6,9-7,2 MPa), a víz forráspontja ~285°C
 - erőmű hatásfok: 32-34%
 - a reaktor úgy van megtervezve, hogy a zóna felső részében a kétfázisú hűtőközeg tömegének 12-15%-a gőz
 - alacsonyabb moderáltság,
 - alacsonyabb hasadási sűrűség,
 - alacsonyabb teljesítmény-sűrűség mint a zóna alsó részében.

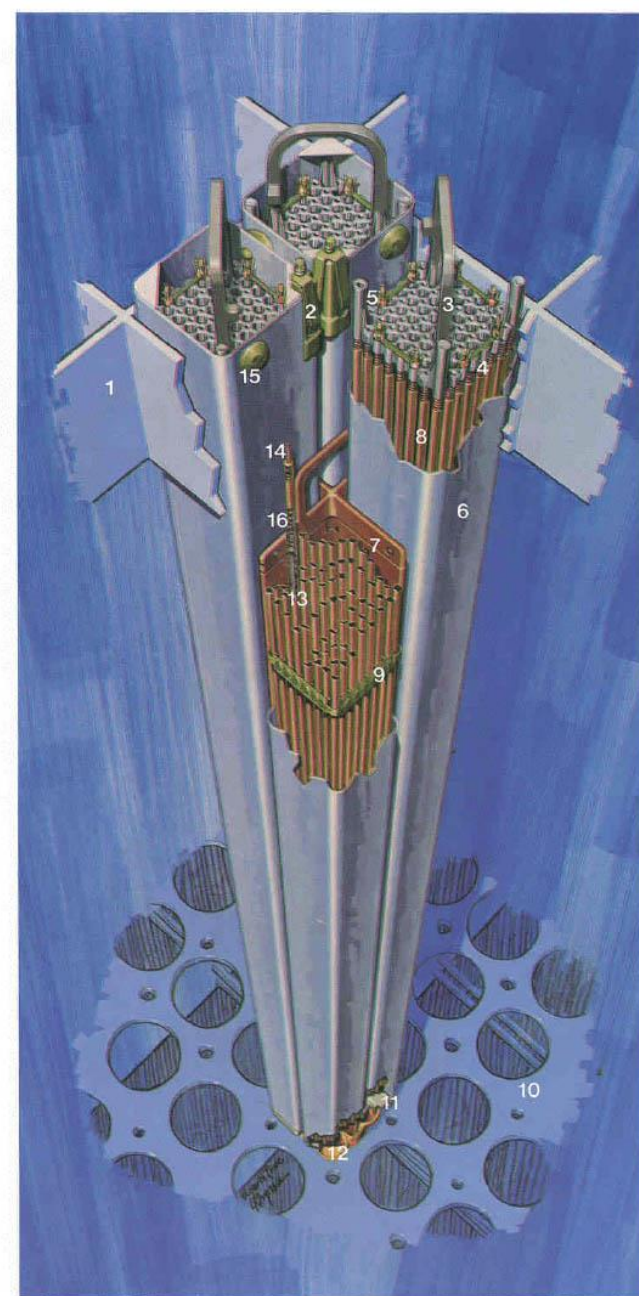
BWR zóna / üzemanyag



BWR/6 FUEL ASSEMBLIES & CONTROL ROD MODULE

- 1.TOP FUEL GUIDE
- 2.CHANNEL FASTENER
- 3.UPPER TIE PLATE
- 4.EXPANSION SPRING
- 5.LOCKING TAB
- 6.CHANNEL
- 7.CONTROL ROD
- 8.FUEL ROD
- 9.SPACER
- 10.CORE PLATE ASSEMBLY
- 11.LOWER TIE PLATE
- 12.FUEL SUPPORT PIECE
- 13.FUEL PELLETS
- 14.END PLUG
- 15.CHANNEL SPACER
- 16.PLENUM SPRING

GENERAL  ELECTRIC

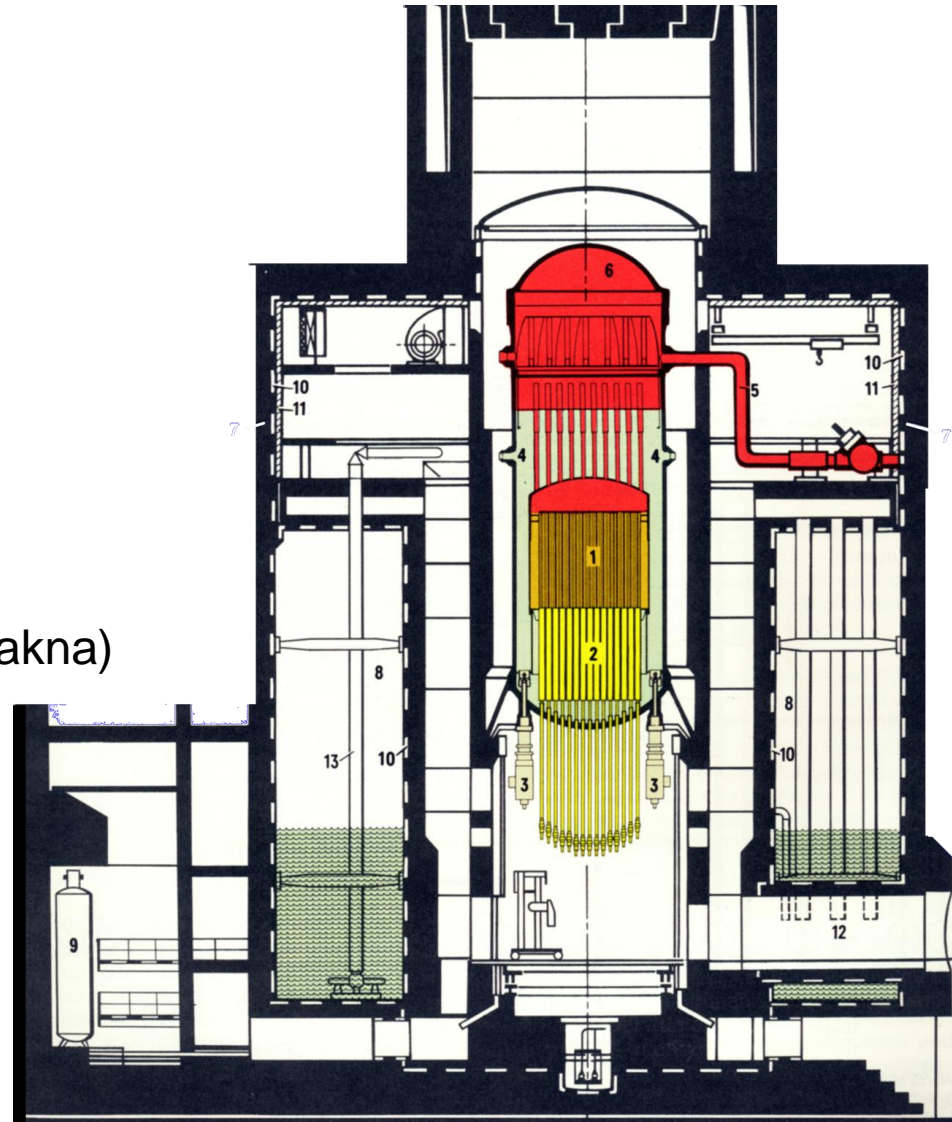


GEZ-4383

BWR 6 Fuel Assembly

Konténment keresztmetszet

- 1 Aktív zóna
- 2 Szabályozórudak
- 3 Recirkulációs szivattyú
- 4 Tápvízcsonkok
- 5 Frissgőz-vezeték
- 6 Reaktortartály
- 7 Konténment
- 8 Kondenzációs kamra (nedvesakna)
- 9 Bórsav-tartály
- 10 Hermetikus acélbevonat
- 11 Nehézbeton
- 12 Zsilip
- 13 Lefúvató / kondenzációs cső

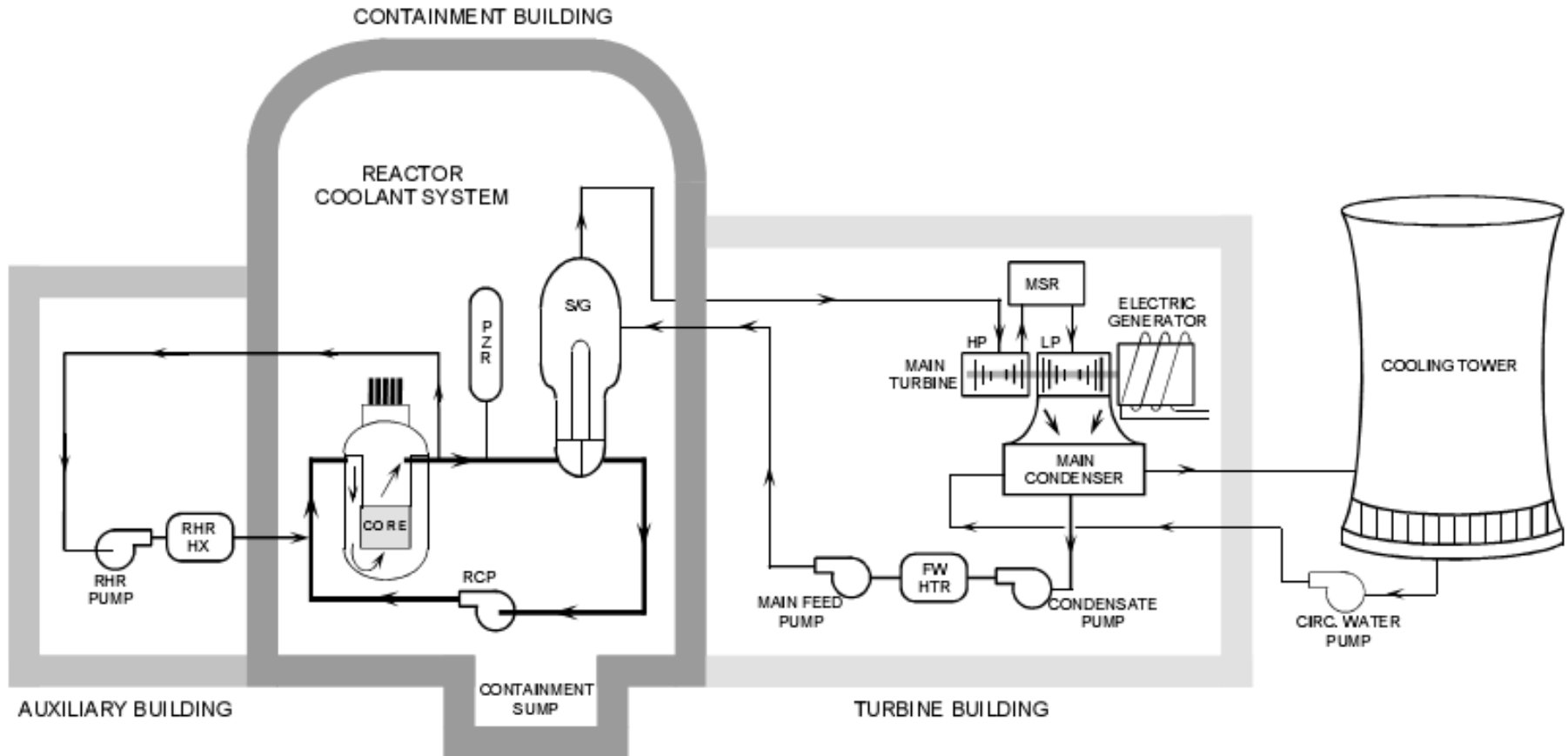


BWR – konstrukciós sajátosságok

- Enyhén radioaktív gőz jut a turbinához -> beton árnyékolás
- Zárt köpenyű fűtőelem-kazetták (tömegáram szabályozása az instabilitások elkerülésére)
- Szabályozórudak bevezetése alulról
 - Értékességük a gőztérben kicsi lenne
 - A tartály felső részében van a cseppeleválasztó és a gőzsűrítő, ezért nem lehetséges a szabályozók átvezetése
- Nagy térfogatú reaktortartály (akár 6-700 m³)
- Üzemzavari nyomáscsökkentés a konténmentben a kondenzációs kamra segítségével



PWR felépítése

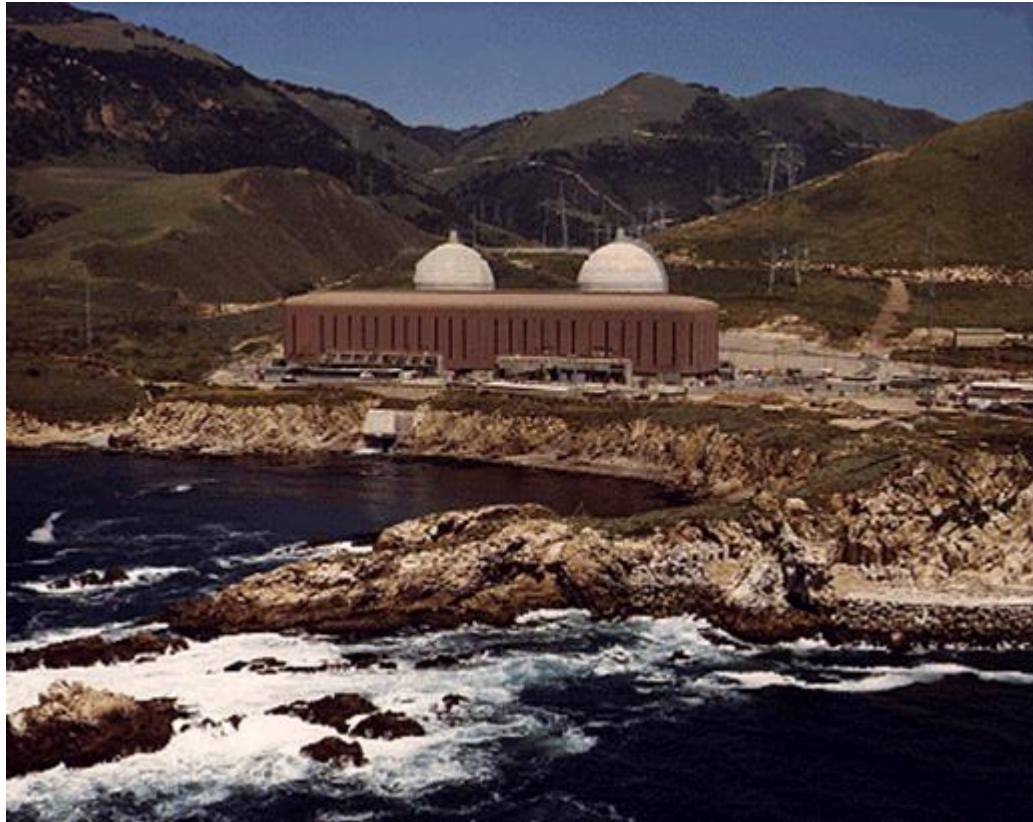


Nyomottvizes reaktornál: kétkörös, a primerköri nyomás kb. 160 bar, ezért nincs gőzképződés. A szekunder kör hagyományos víz-gőz kör, kb. 65 bar nyomással

Forrás: NRC

Nyomottvizes atomreaktor (PWR)

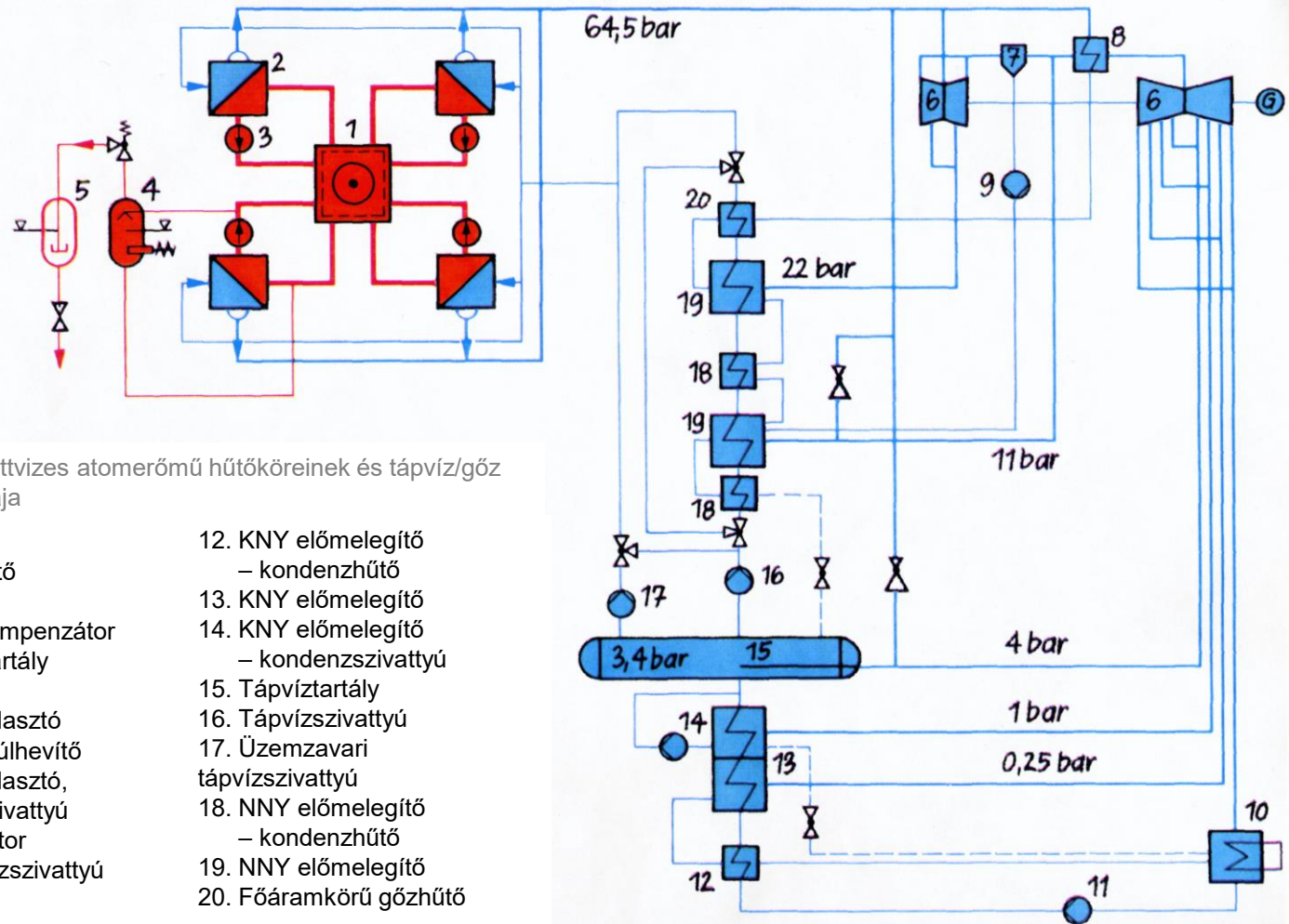
PWR-ek a „környéken”: Paks, Mohi, Temelin, Krsko, Dukovany, Kozloduy, Loviisa, Bohunice



Diablo Canyon (USA)

Atomerőművek 1.

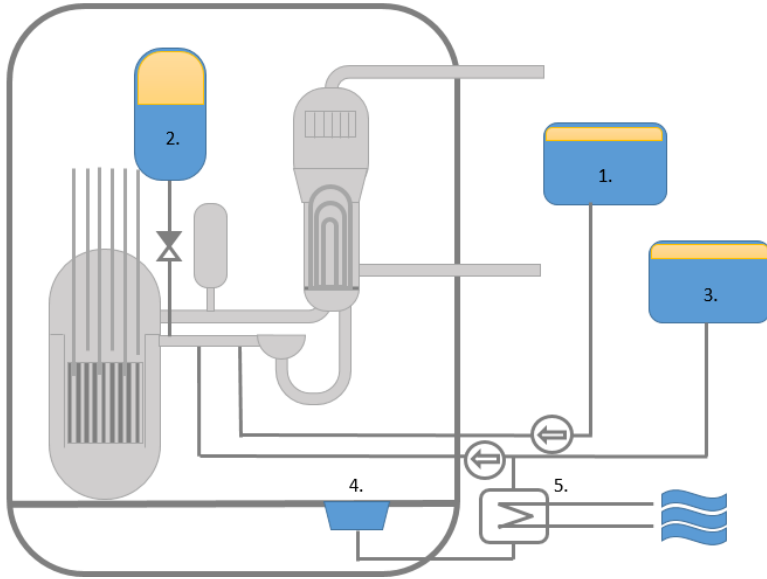
PWR hűtőrendszer sémája



Német nyomottvizes atomerőmű hűtőkörének és tápvíz/gőz körének sémája

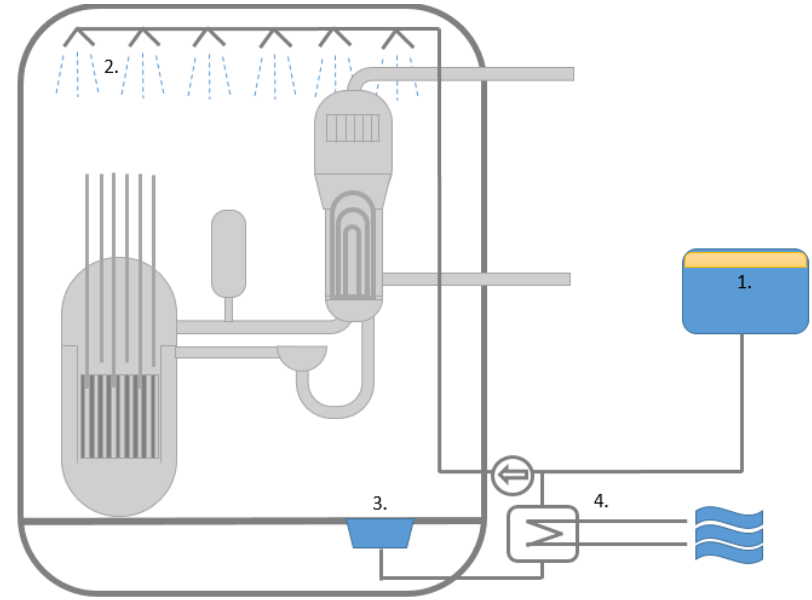
- | | |
|---|---|
| 1. Reaktor | 12. KNY előmelegítő
– kondenzhűtő |
| 2. Gőzfejlesztő | 13. KNY előmelegítő |
| 3. FKSZ | 14. KNY előmelegítő
– kondenzszivattyú |
| 4. Térfogatkompenzátor | 15. Tápvízartály |
| 5. Lefúvató tartály | 16. Tápvízszivattyú |
| 6. Turbina | 17. Üzemzavari
tápvízszivattyú |
| 7. Cseppleválasztó | 18. NNY előmelegítő
– kondenzhűtő |
| 8. Közbülső túlhevítő | 19. NNY előmelegítő |
| 9. Cseppleválasztó,
kondenzszivattyú | 20. Főáramkörű gőzhűtő |
| 10. Kondenzátor | |
| 11. Főkondenzszivattyú | |

PWR biztonsági rendszerek



PWR üzemzavari zónahűtő rendszerei

- 1.: nagynyomású befecskendezés,
- 2.: hidroakkumulátor,
- 3.: kisnyomású befecskendezés,
- 4.: konténment zsomp,
- 5.: hőcserélő



PWR üzemzavari konténment hűtő rendszerei

- 1.: táptartály,
- 2.: spray rendszer,
- 3.: zsomp,
- 4.: hőcserélő

CANDU

- CANada Deuterium Uranium Reactor
- Fejlesztés: 50-es, 60-as években (AECL - Atomic Energy of Canada Limited, Hydro-Electric Power Commission of Ontario, Canadian General Electric)
- Jelentős kanadai uránkészletek hasznosítására fejlesztették



Moderátor anyagok

Moderátor paraméterek	H ₂ O	D ₂ O	Grafit
Moderációs úthossz [cm]	5.74	10.93	19.7
Neutronabszorpciós hatáskeresztmetszet [barn]	0.66	0.0026	0.0045

- Deutérium moderátor: üzemelés természetes uránnal is lehetséges
- Különböző típusok:
 - Nehésvíz vagy könnyűvíz hűtőközeg
 - Nyomott csöves vagy nyomott tartályos
- CANDU: nehésvíz moderátoros, nehésvíz hűtésű, nyomott csöves reaktor

Nehézvizes atomreaktor (CANDU)

CANDU-t üzemeltető országok:

Románia (Cernavoda), Kanada, Argentína, India, Korea,
Pakisztán



Kalandriacsövek

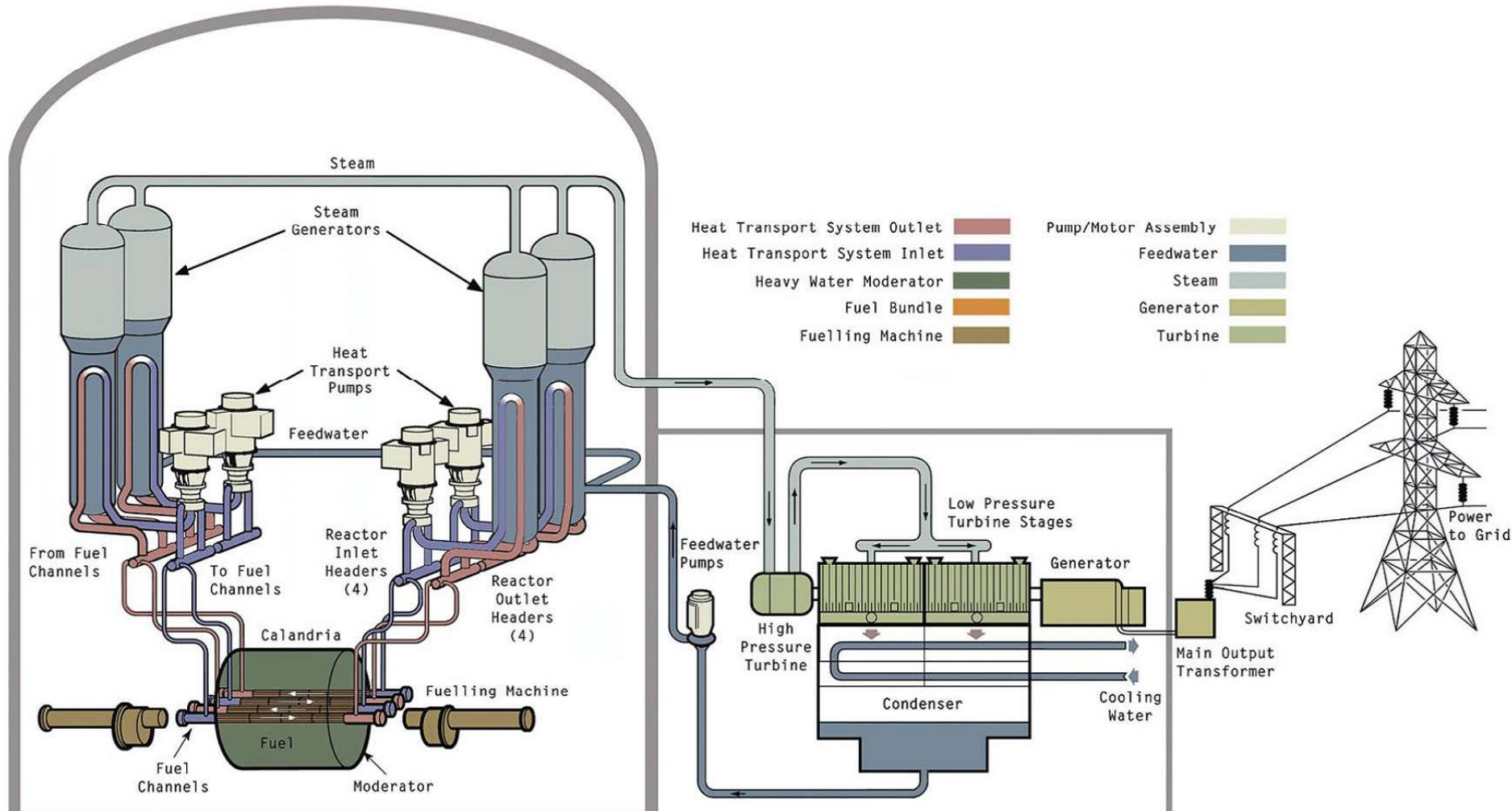
CANDU reaktorok Európában

Unit	Country	Start of operation	Nominal power	Load factor
Cernavoda 1	Romania	December 1996	706 MWe	88,61%
Cernavoda 2	Romania	October 2007	706 MWe	94,89%



CANDU

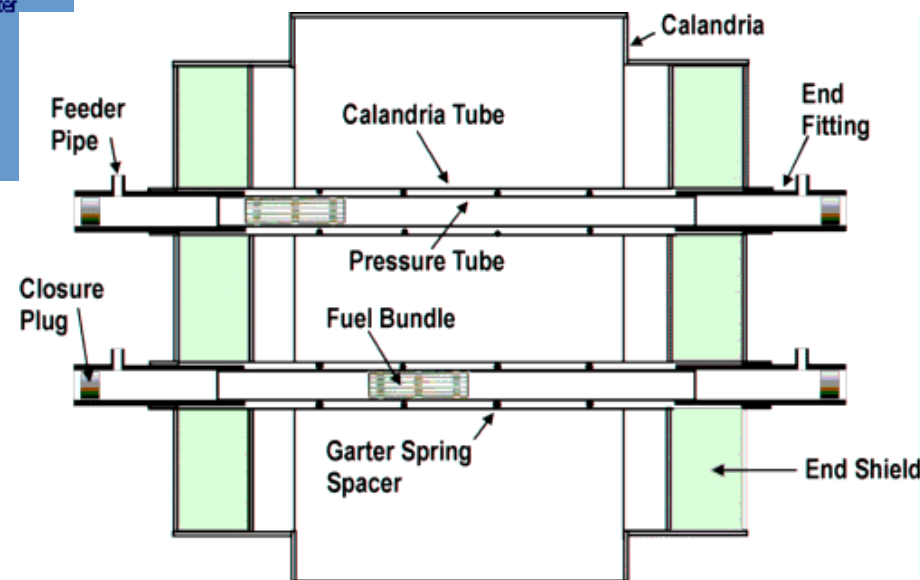
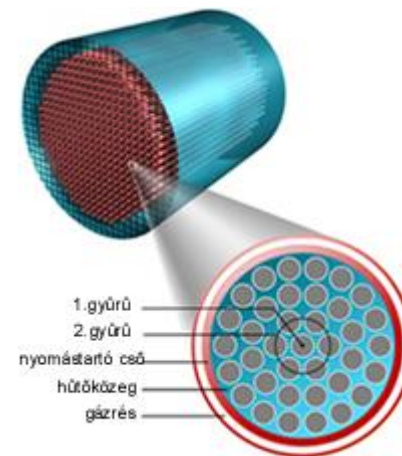
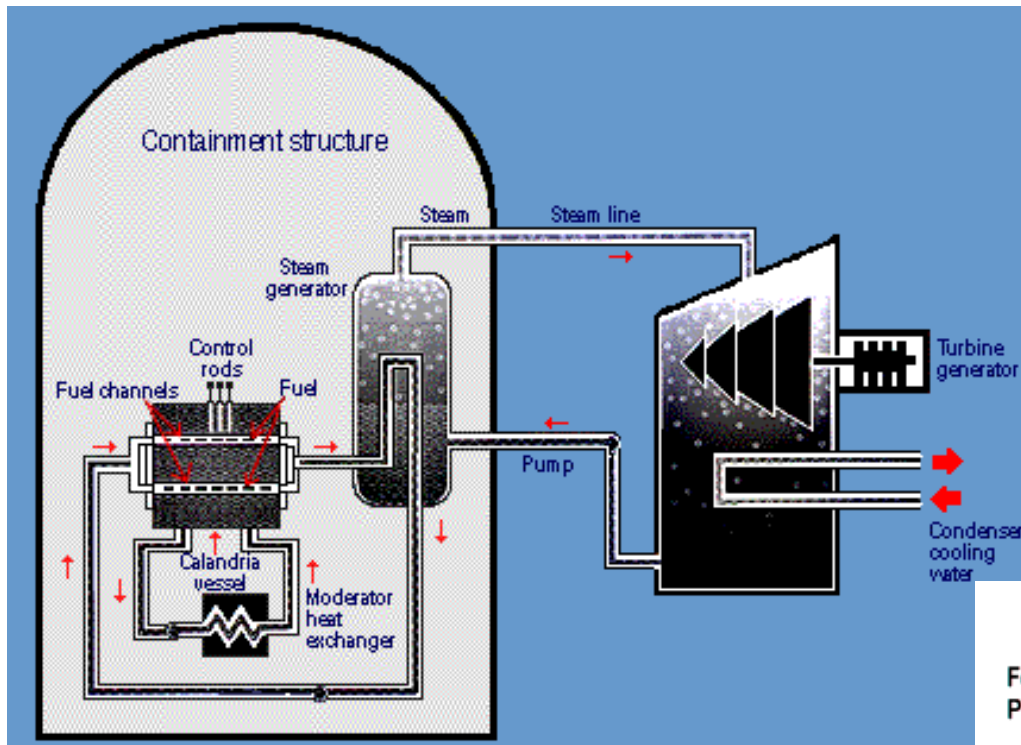
- Jelenleg összesen 34 CANDU blokk üzemel
- Legnépszerűbb sorozat: CANDU-6
 - 700 MW névleges teljesítmény
 - 11 blokk üzemel világszerte (1983-2007)



CANDU

- Nyomott csöves (nyomott reaktortartály nélkül)
- D₂O moderátor és hűtőközeg
- Szeparált hűtő és moderátor rendszer
 - Hűtés: ~ 100 bar, 300°C
 - Moderátor: ~1 bar, <80°C
- Üzem közbeni átrakás lehetséges!
- Természetes urán használata -> kis reaktivitás-tartalék a zónában > nem kell bóros szabályozás

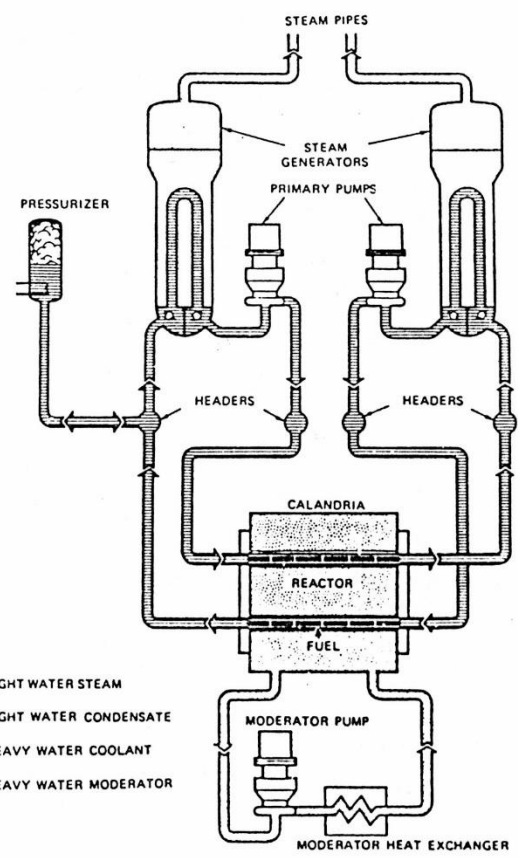
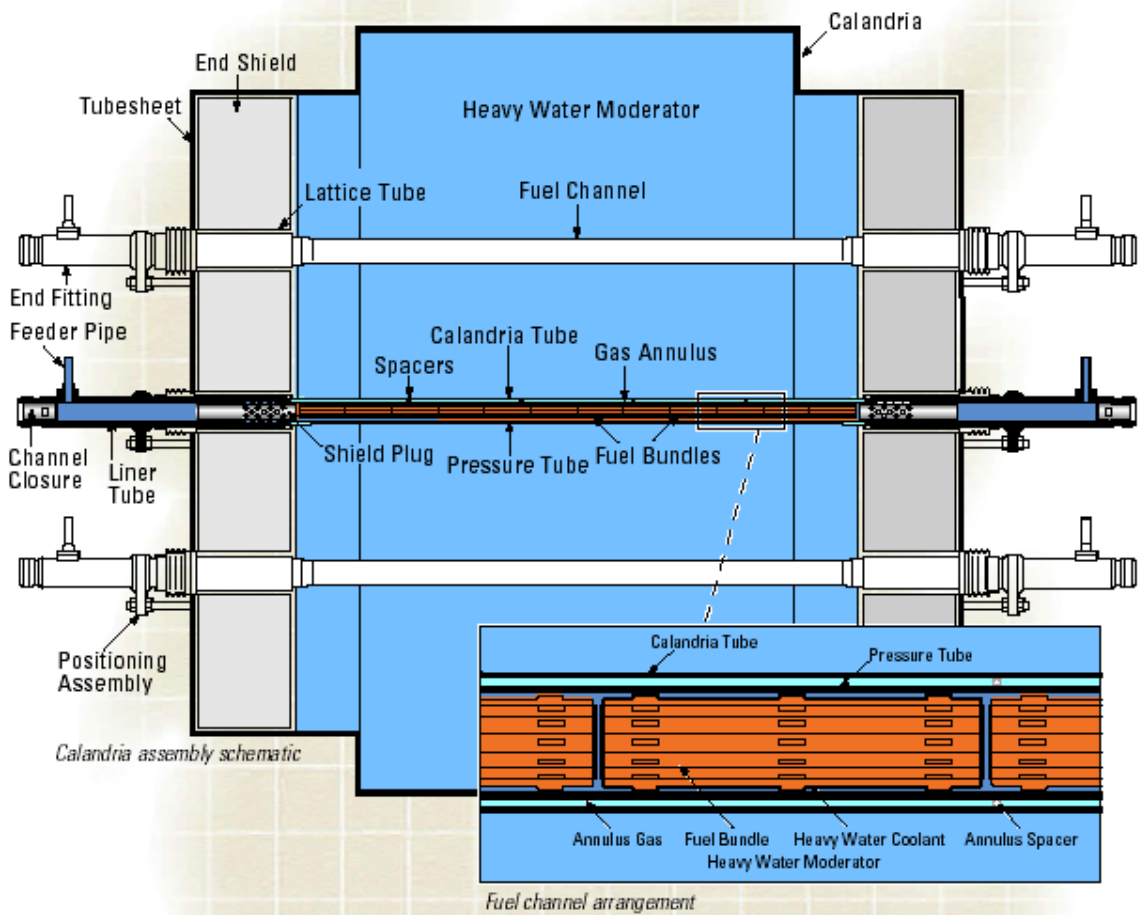
Nehézzvizes atomreaktor (CANDU)



*CANDU erőmű felépítése
CANDU üzemanyag
Aktív zóna*

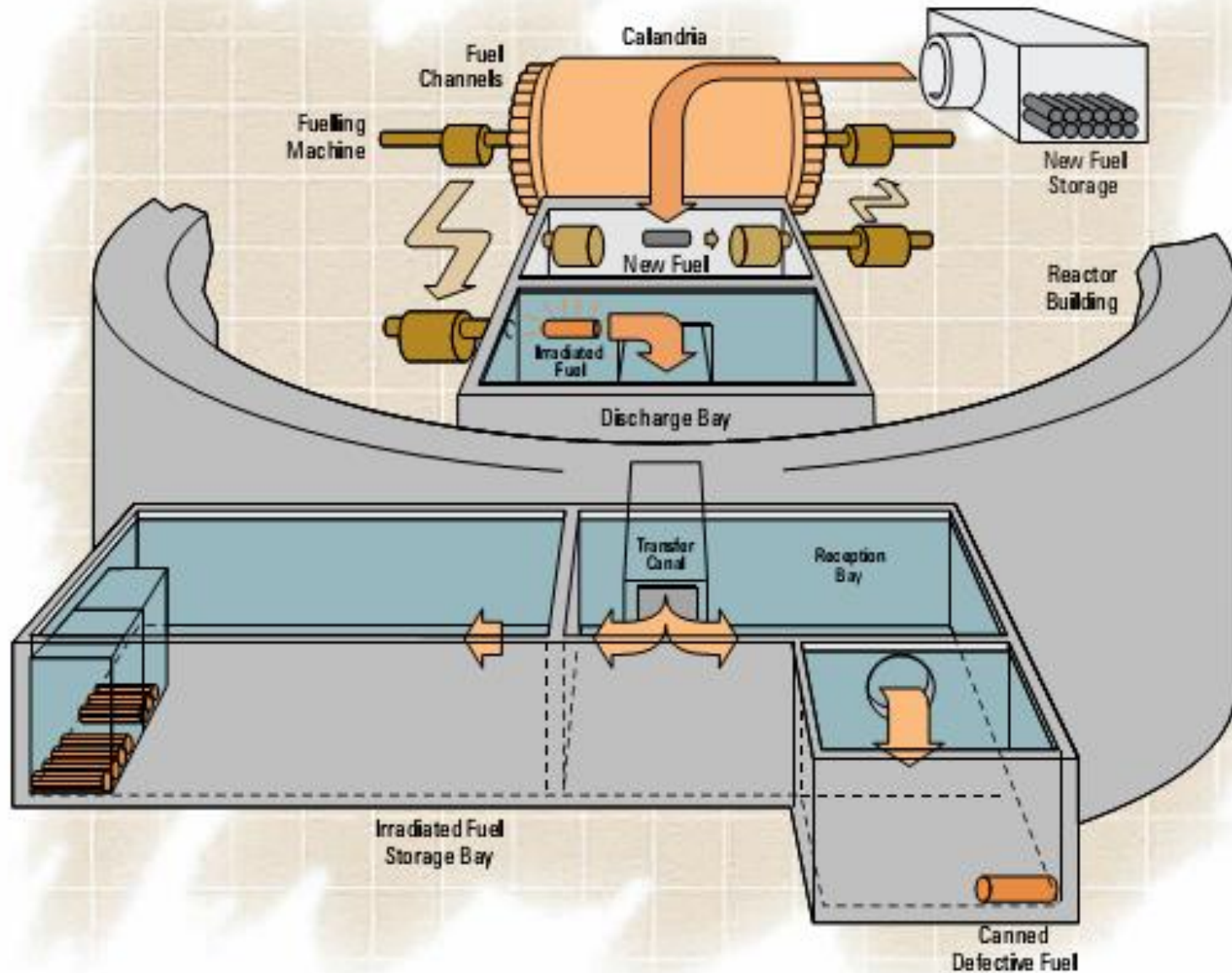
Forrás: AECL

CANDU



*CANDU aktív zóna
CANDU hűtőrendszer
Forrás: AECL*

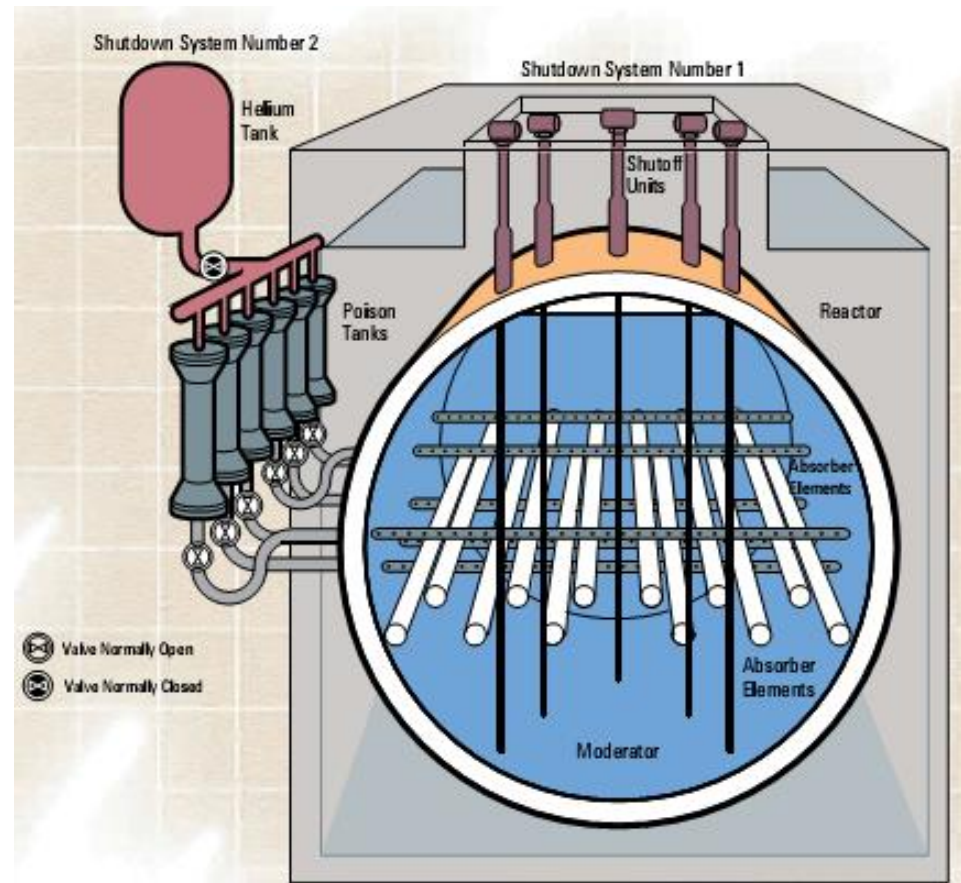
CANDU üzemanyag kezelés



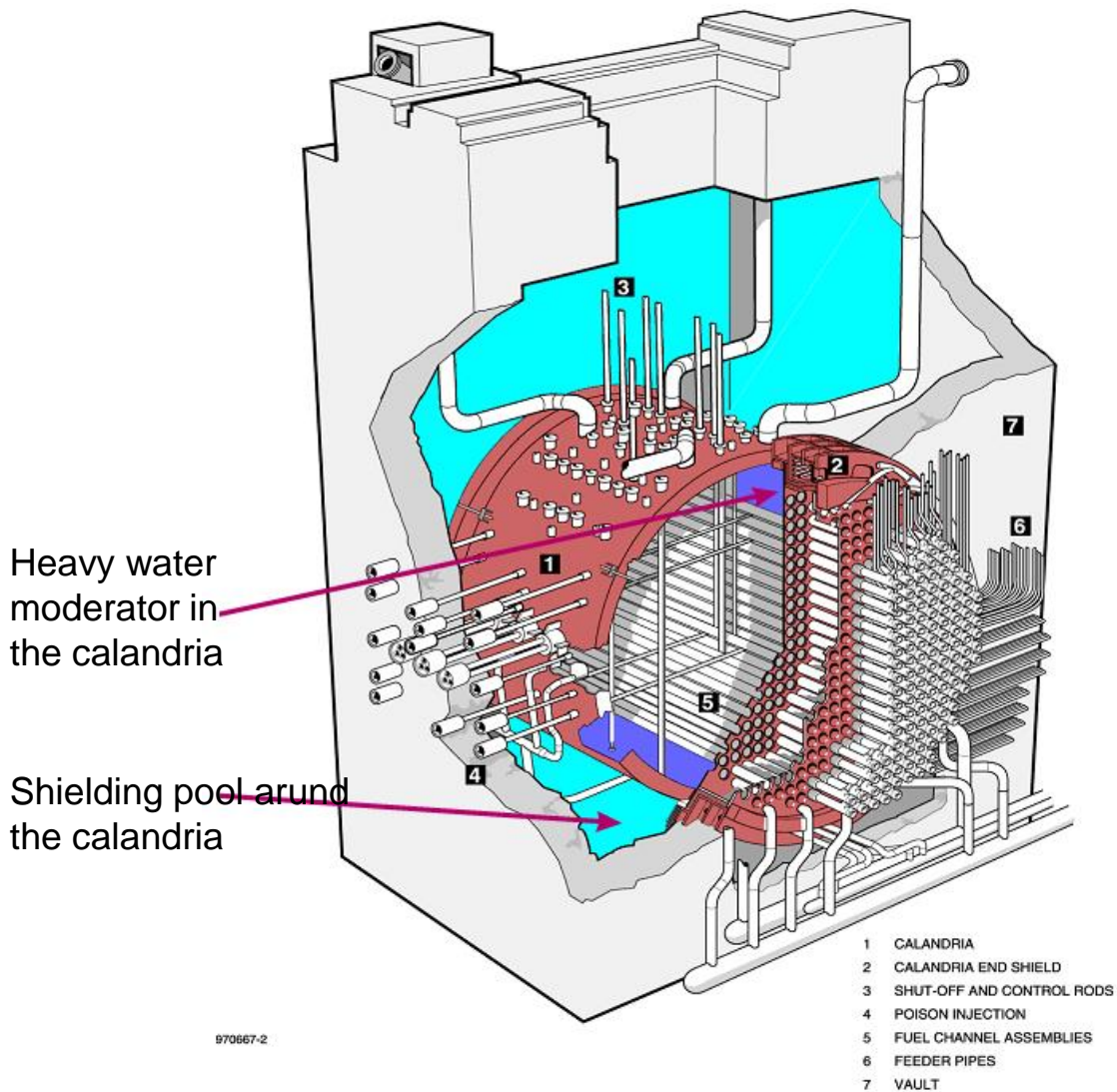
CANDU

- üregtényezője pozitív
 - emiatt bonyolultabb szabályozás
 - több redundáns neutronsabályozó és vészleállító rendszer

CANDU leállító rendszerek
Forrás: AECL

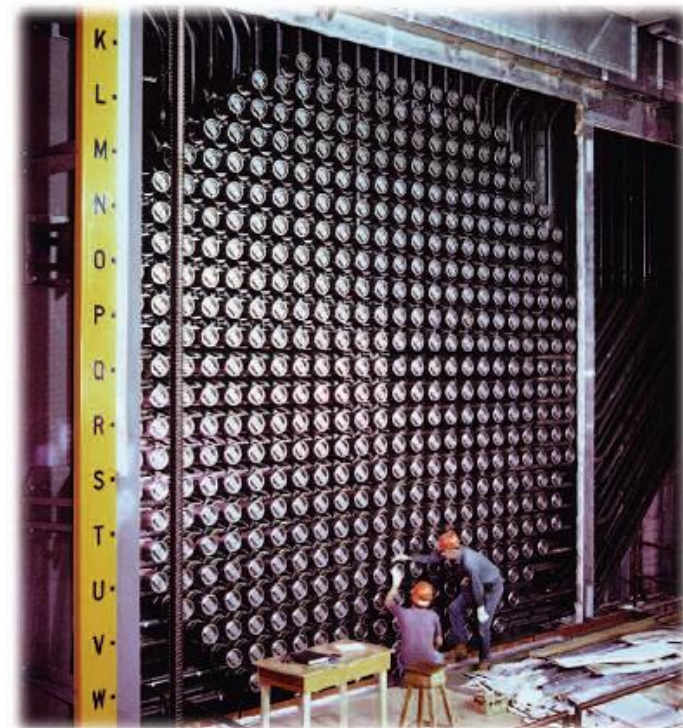


CANDU zóna



970667-2

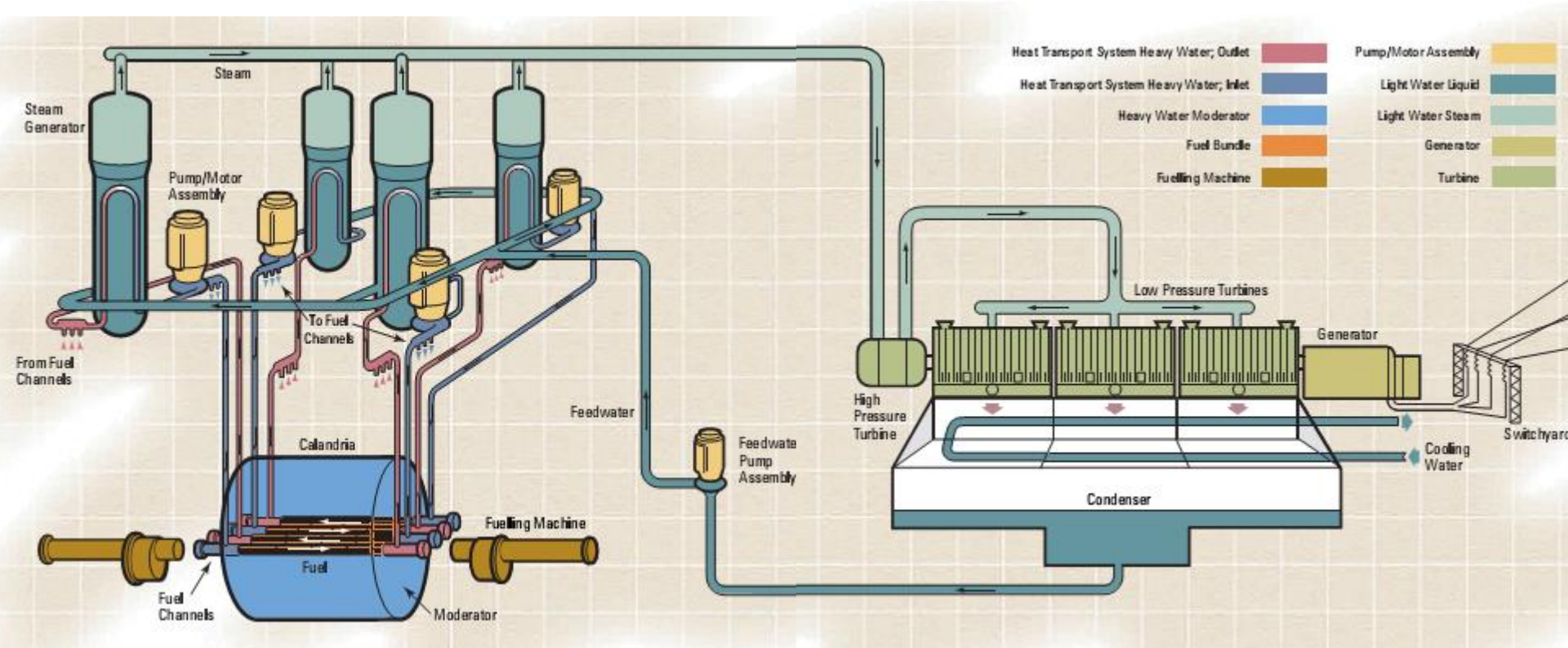
CANDU 6 Reactor Assembly



Reactor face (during construction)

Forrás: AECL

CANDU



CANDU hűtőrendszer
 Forrás: AECL