

Atomerőművek felépítése, tervezése

2. rész

Atomerőművek 2.

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

2020. február 20.

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

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 µSv/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 üzemi állapot	
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
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		

HARMADIK GENERÁCIÓS ERŐMŰVEK

Harmadik generációs atomerőművek

- Jelenleg piacra kerülő típusok, a második generációs erőművek továbbfejlesztett változatai.
- Fejlesztés a második generációs típusokhoz képest: evolúciós és innovatív reaktortípusok
- Továbbfejlesztés irányai:
 - Gazdasági versenyképesség javítása
 - Nagyobb biztonság
 - Non-proliferációs célok megvalósítása
 - Fenntarthatósági szempontok



Forrás: titan2.ru

Gazdasági versenyképesség kérdései

- A villamosenergia-termelés egységköltsége (LCOE – levelized cost of electricity) atomerőmű esetében

$$k = \frac{C_a + C_v}{E} = \frac{C_a}{E} + \frac{C_v}{E}$$

- Ahol k – a villamosenergia egységköltsége [Ft/kWh]
 C_a – az egy évben felmerülő állandó költségek [Ft/év]
 C_v – az egy évben felmerülő változó költségek [Ft/év]
 E – az egy évben megtermelt villamos energia mennyisége [kWh]

$$k = \frac{C_{I,H} + C_{I,\bar{O}} + C_{TMK} + C_e}{E} + k_{\bar{u}a} + k_{KNPA} \left[\frac{\text{Ft}}{\text{kWh}} \right]$$

- Ahol C_I a tőkeköltség (hitel + önerő tőkeköltsége)
 C_{TMK} a karbantartási költségek,
 C_e az egyéb állandó költségek (pl. személyzet!),
 $k_{\bar{u}a}$ az üzemanyag,
 k_{KNPA} a leszerelés költsége [Ft/kWh]

Harmadik generációs atomerőművek

- Gazdasági versenyképesség elérése

- Atomerőmű: villamosenergia-előállítás költsége **45-75%-a** az építés. Szénnél ugyanez 25-60%, földgáznál 15-40%.
- Nagy építési költség miatt igen tőkeigényes, hosszú távú megtérüléssel kell számolni
- Költségeket jelentősen csökkentheti a kapcsolt termelés (távhő, hidrogén-előállítás, tengervíz sótalanítás)

- Eszközök:

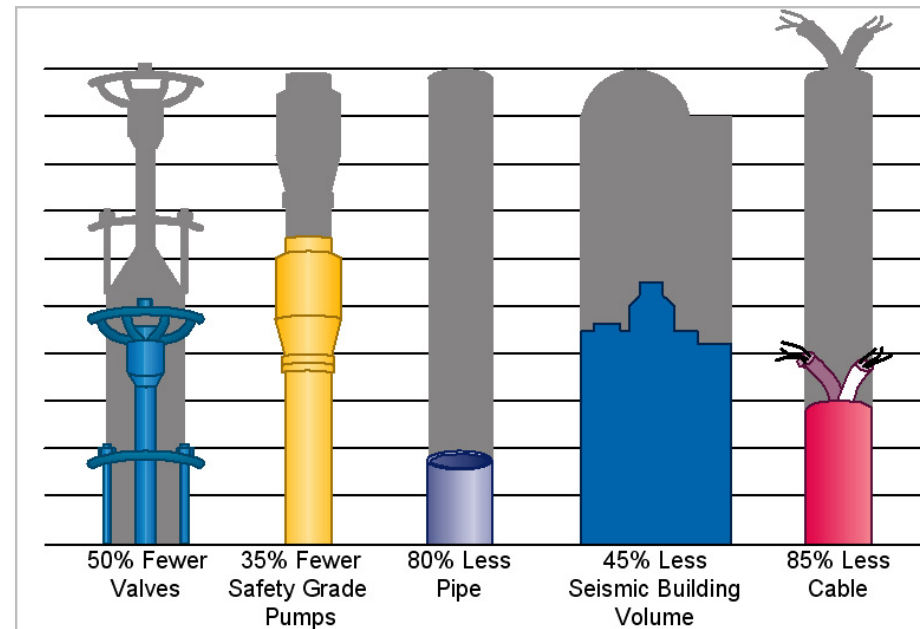
- Méret miatti megtakarítások
- Racionalizált építési módszerek, építési idő csökkentése
- Sztenderdizálás és sorozatgyártás
- Több blokkos telephelyek.



Harmadik generációs atomerőművek

- **Eszközök (folyt.):**

- Projektmenedzsment eszközök:
 - Hatékony beszerzés és szerződések, költség- és minőség-ellenőrzés,
 - Szoros együttműködés a szabályozó hatóságokkal, hatósági munka racionalizálása
- **Modularizáció** – előre gyártott elemek használata
- Passzív rendszerek fejlesztése (olcsóbbak!)
- Túlméretezés csökkentése fizikai folyamatok pontosabb leírásával, modellezhetőségével (termohidraulika, reaktorfizika), kódfejlesztés
- Komponensek számának csökkentése
- Hatásfok-növelés
- Biztonsági követelmények sztenderdizálása nemzetközi szinten.



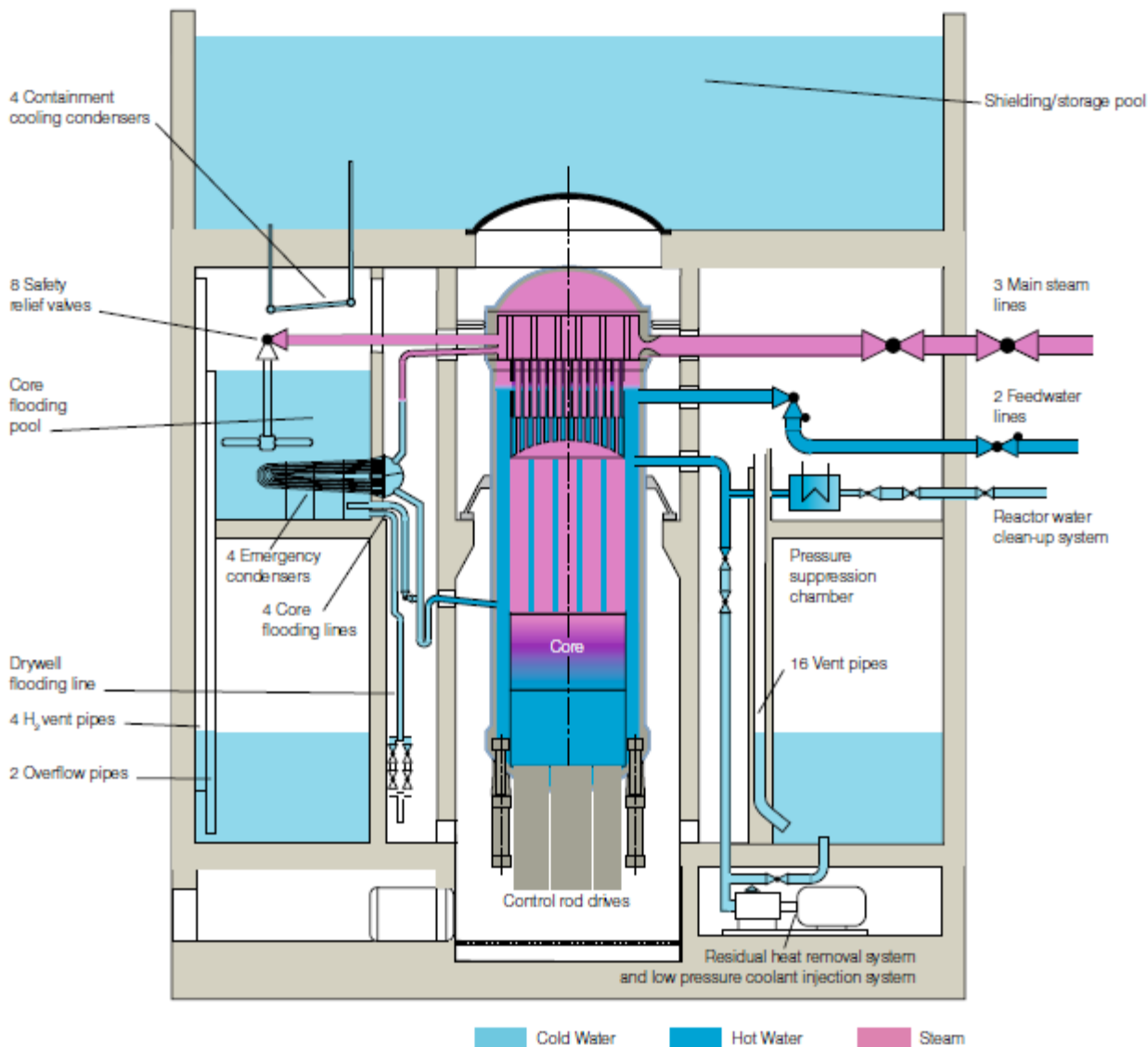
Harmadik generációs atomerőművek

- Nagyobb biztonság elérése
 - Cél:
 - balesetek valószínűségének és következményeinek csökkentése
 - Ki kell zárni a jelentős telephelyen kívüli kibocsátással járó scenáriókat (konténment!)
 - Eszközök: továbbfejlesztett aktív és passzív biztonsági rendszerek
- Nagyobb biztonság elérése: zónasérülési gyakoriság (**Core Damage Frequency – CDF**) csökkentése
 - Zónasérülési gyakoriság: annak a számított gyakorisága (adott üzemidőre vett valószínűsége), hogy a reaktorban az üzemanyag jelentősebb sérülésével ill. olvadásával járó üzemzavar következik be.
- NAÜ: 1999-es INSAG-12 kiadványa szerint:
 - a **jelenleg** üzemelő atomerőművekre cél: a súlyos zónasérülés valószínűsége **10^{-4} /év**. (A telephelyen kívüli jelentős kibocsátás balesetkezelési eljárásokkal további egy nagyságrenddel csökkenthető.)
 - **új atomerőművekre** a súlyos zónasérülés valószínűsége **10^{-5} /év** lehet
 - Új atomerőművekre: térben és időben korlátozott következmények

Harmadik generációs atomerőművek

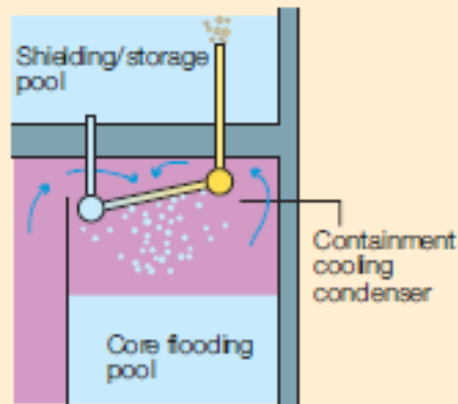
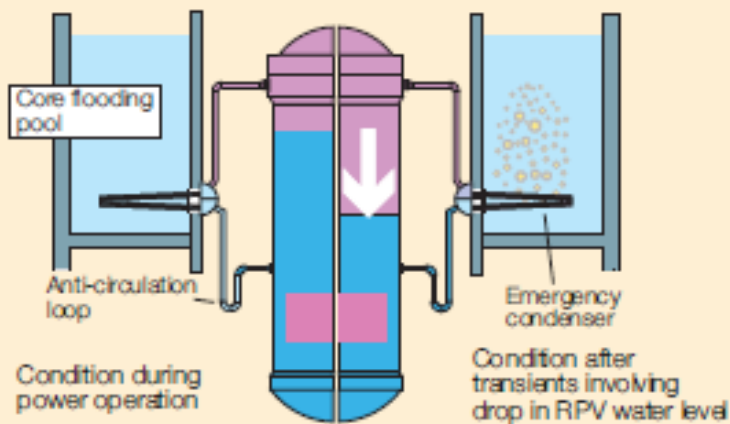
- Eszközök:
- műszaki eszközök
 - Nagyobb víztérfogatok (nyomáskiegyenlítők, gőzfejlesztők), kisebb teljesítménysűrűség, negatív reaktivitás-együtthatók alkalmazása -> nagyobb tartalékok, nagyobb időállandók
 - Megbízható, redundáns és diverz rendszerek, térbeli szeparációval
 - eszközök súlyos balesetek kezelésére is – pl. hidrogénkoncentráció kontroll
 - Konténmentek megerősítése
- passzív biztonsági rendszerek
 - Fizikai folyamatokon alapuló, külső beavatkozás és energiaforrás nélkül működő rendszerek
 - Gravitáció, természetes áramlás, kondenzáció, párolgás és sűrített (nagy nyomású) hajtógázok segítségével hőelvonás a primer körből ill. a konténmentből –ld. paksi atomerőmű hidroakkumulátorai
 - Hő elnyelése: pl. elgőzöltető vízmedence, vagy levegő hűtés

A Kerena passzív biztonsága

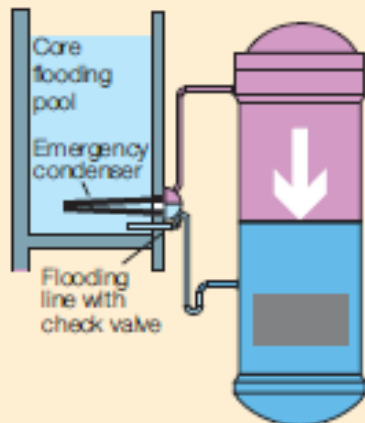


A Kerena passzív biztonsági rendszerei

Harmadik generációs atomerőművek



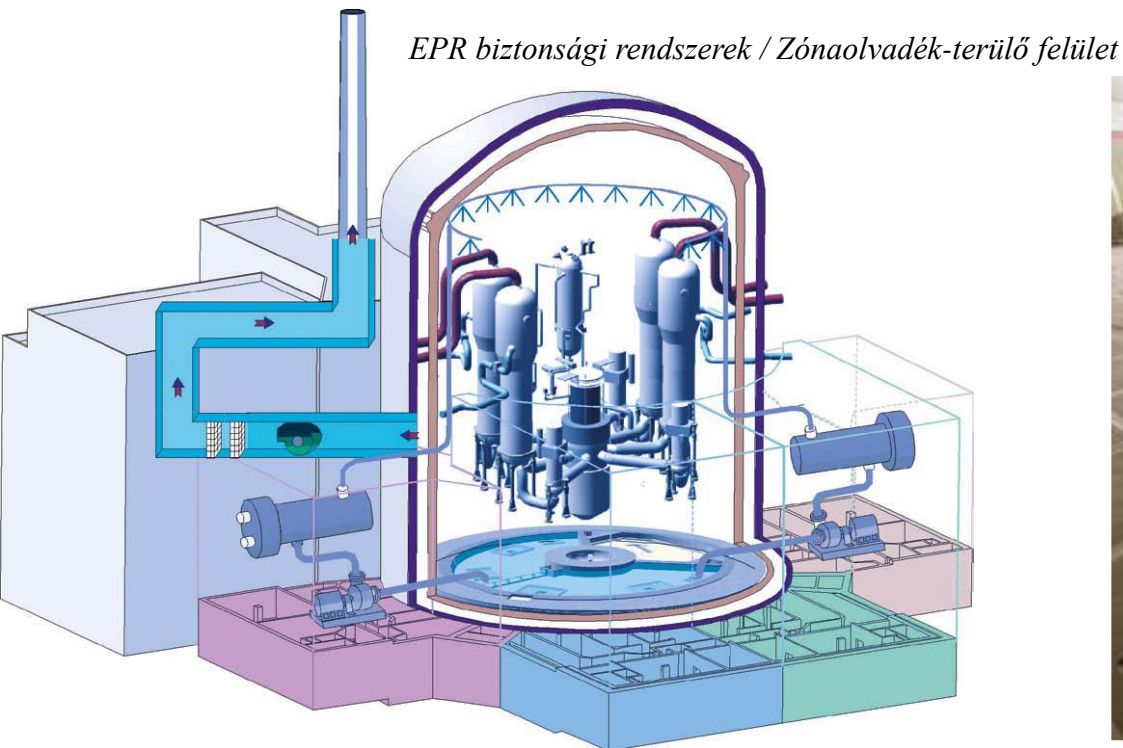
Source: Areva



- Kerena: továbbfejlesztett forralóvízes reaktor (Areva)
- $P_{el}=1250$ MW
- Passzív biztonsági rendszerek:
 - Üzemzavari kondenzátor
 - Konténment hűtés
 - Zóna elárasztás
 - Passzív nyomásjeladók

Harmadik generációs atomerőművek

- Nagyobb biztonság elérése: súlyos balesetek következményeinek csökkentése
 - Nagy nyomású olvadék-kilökődés kizárása primer kör nyomáscsökkentésével
 - Direkt konténment hevítés minimalizálása zónatörmelék összegyűjtésével
 - Hidrogén-robbanás megelőzése (hidrogén-égetők vagy rekombinátorok)
 - Gőzrobbanás megelőzése vagy arra méretezés
 - Zónaolvadék-beton reakciók csökkentése, zónaolvadék hűthetősége: terülő felületek vagy zónaolvadék-csapda kialakítása



Harmadik generációs atomerőművek

- Követelmények új atomerőművek építéséhez – sztenderdizálás
- EUR: European Utility Requirements
- Minősített blokkok:

BWR 90:	06/1999
EPR rev A:	12/1999
EP1000:	12/1999
ABWR:	12/2001
SWR 1000:	02/2002
AP1000:	06/2006
AES92:	06/2006
EPR rev B:	06/2009



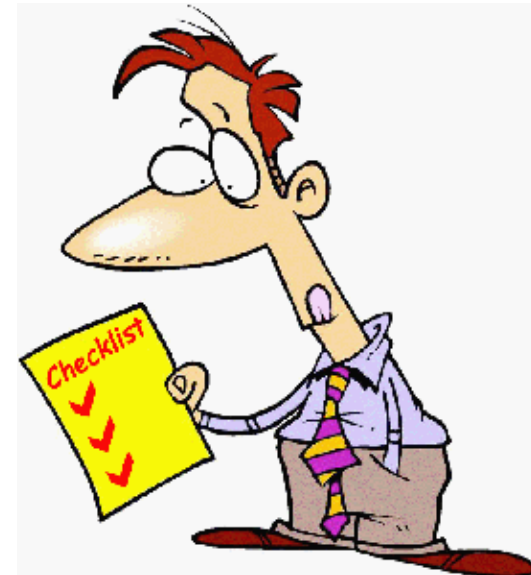
Harmadik generációs atomerőművek

- Követelmények új atomerőművek építéséhez – sztenderdizálás
 - EUR: European Utility Requirements
 - Fő berendezések **élettartama** min. 40 év, a nem cserélhető komponenseké **60 év**
 - Rendelkezésre állás átlagosan min. 90%
 - Éves tervezett leállás ideje <14 nap (csak átrakásnál)
 - Nem tervezett SCRAM gyakoriság <1/7000 óra
 - Legalább 50% MOX használható
 - Kampányhossz 12-24 hónap
 - 0.25 g vízszintes talajmenti gyorsulásnak megfelelő tervezési földrengés
 - Hidrogén-koncentráció <10% a konténmentben, ha a teljes üzemanyag-burkolat oxidálódik



Harmadik generációs atomerőművek

- Követelmények új atomerőművek építéséhez – sztenderdizálás
 - EUR: European Utility Requirements
 - **Zónasérülési gyakoriság $<10^{-5}$ /reaktorév**
 - Konténment: belső konténment a nyomás- és hőmérsékletcsúcsokra tervezve, külső konténment külső veszélyek és belső kibocsátás ellen
 - Súlyos balesetek gyakorisága **jelentős kibocsátással $<10^{-6}$ /reaktorév**, e felett csak korlátozott környezeti hatás lehet
 - Korlátozott környezeti hatás:
 - az első 24 órában nincs szükség veszélyhelyzeti beavatkozásra 800 m-es körzeten túl, és egyáltalán nem kell ott hosszú távú intézkedés
 - 3 km-en túl egyáltalán nem kell veszélyhelyzeti beavatkozás
 - Növény/állat fogyasztás korlátozása max. 1-2 évre igen kis területen



Jelen helyzet

- **Üzemelő 3. generációs blokkok:**
 - ABWR: 4 blokk Japánban (épp leállítva)
 - VVER-1200: Novovoronyezs (2016), Leningrád (2018)
 - APR-1400: Dél-Korea: Shin-Kori-3 és -4
 - EPR: Taishan-1 és -2
 - AP1000: Sanmen 1-2, Haiyang-1
- **Épülő 3. generációs reaktorok:**
 - ABWR
 - Tajvan: Lungmen-1, -2
 - Japán: Shimane-3
 - Litvánia (?)
 - EPR
 - Finnország: Olkiluoto-3
 - Franciaország: Flamanville-3
 - Hinkley Point C
 - APR-1400
 - Dél-Korea: Shin-Hanul 1&2
 - Egyesült Arab Emírátsok (4 blokk)
 - AP-1000
 - Kína: Haiyang-2
 - USA: Vogtle 3,4, Virgil C. Summer 3,4
 - VVER-1200:
 - Leningrád II (1-2)
 - Fehéroroszország: Osztrovec



Olkiluoto-3

Forrás: TVO

Atomerőművek 1.

EPR (European Pressurized Water Reactor)

- Framatome ANP (az AREVA és a Siemens tulajdona)
- A francia N4 és a német Konvoi típus alapján továbbfejlesztett 3. generációs, evolúciós reaktor
- Nyomottvizes reaktorral szerelt
- Termikus teljesítmény: 4200/4500 MW
- Elektromos teljesítmény:
~1600-1650 MW
- Hatásfok: 36-37%
(a paksi blokkoké kb. 33%)

Forrás: Areva



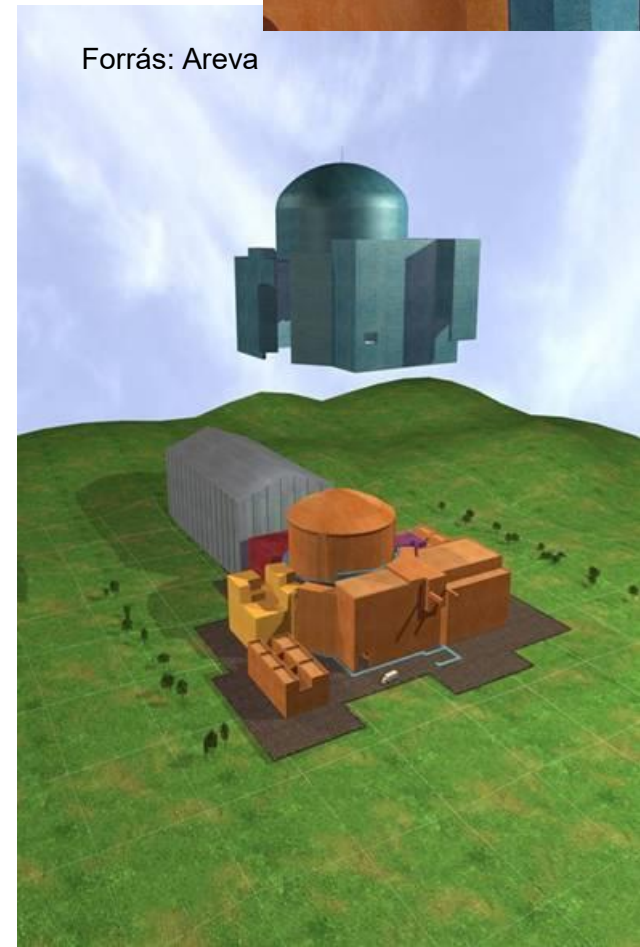
EPR

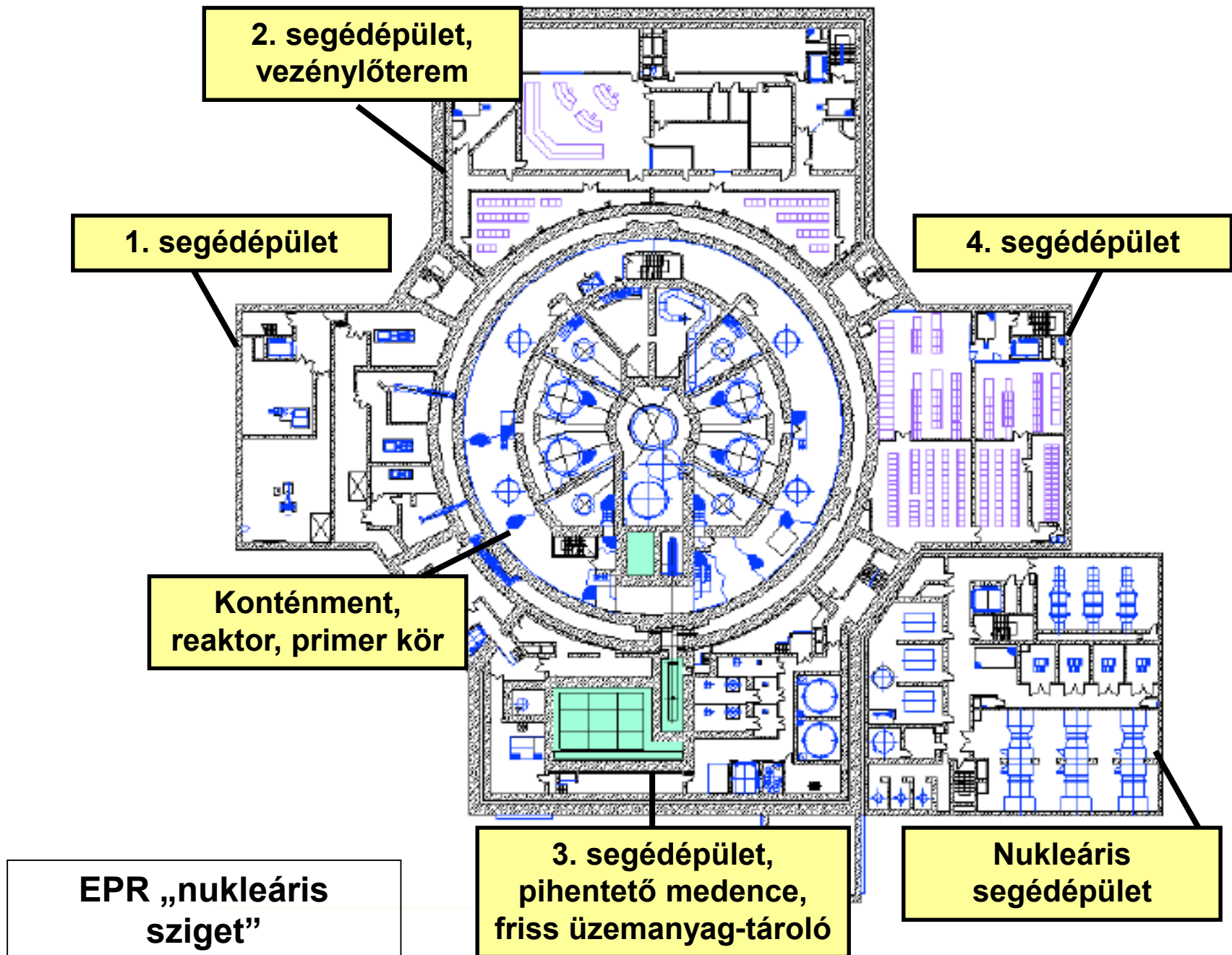
- Primer kör:
 - Üzemi nyomás: 154 bar
 - Be/kilépő hőmérséklet: 296/327 °C
 - 4 primer hurok
- Szekunder kör:
 - Szekunder körű nyomás: 78 bar
 - Frissgőz-hőmérséklet: 290 °C
 - 1 nagynyomású + 3 kisnyomású turbina ház
- Dupla falú hermetikus védőépület, nagy utasszállító repülőgép rázuhanására méretezve

EPR duplafalú konténment

EPR védőépület

Forrás: Areva

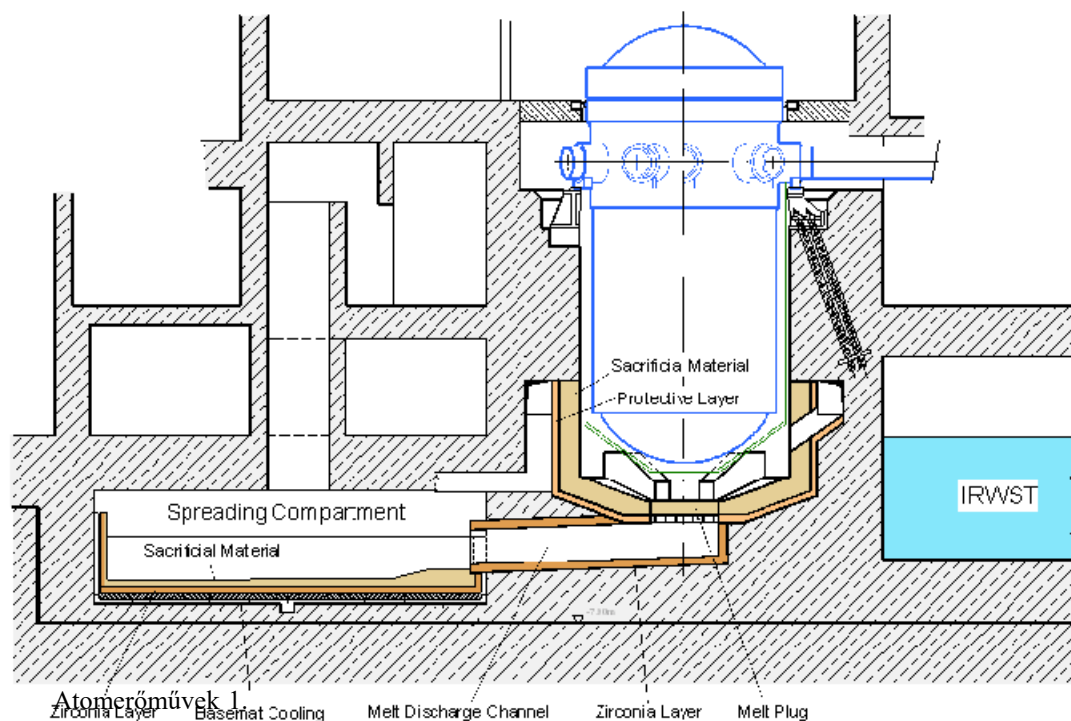




EPR - Biztonsági rendszerek

- Biztonsági filozófia: megakadályozni a telephelyen kívüli következményeket
 - Javítani a balesetek megelőzését szolgáló rendszereket. Módszerek: egyszerűsítés, fizikai szeparáció, emberi hibák lehetőségének csökkentése.
 - Súlyos balesetek esetén csökkenteni a következmények súlyosságát. Módszerek: konténment hűtése, zónaolvadék felfogása és hűtése, talapzat hűtése alulról
- Zónasérülés valószínűsége 10^{-6} / év, de a zónasérülés sem jelent automatikusan nagy kibocsátást
- 6 m vastag beton talapzat
- A konténment dupla falú, a külső héj a 2. és 3. segédépületeket is védi

A zónaolvadék-elvezető rendszer



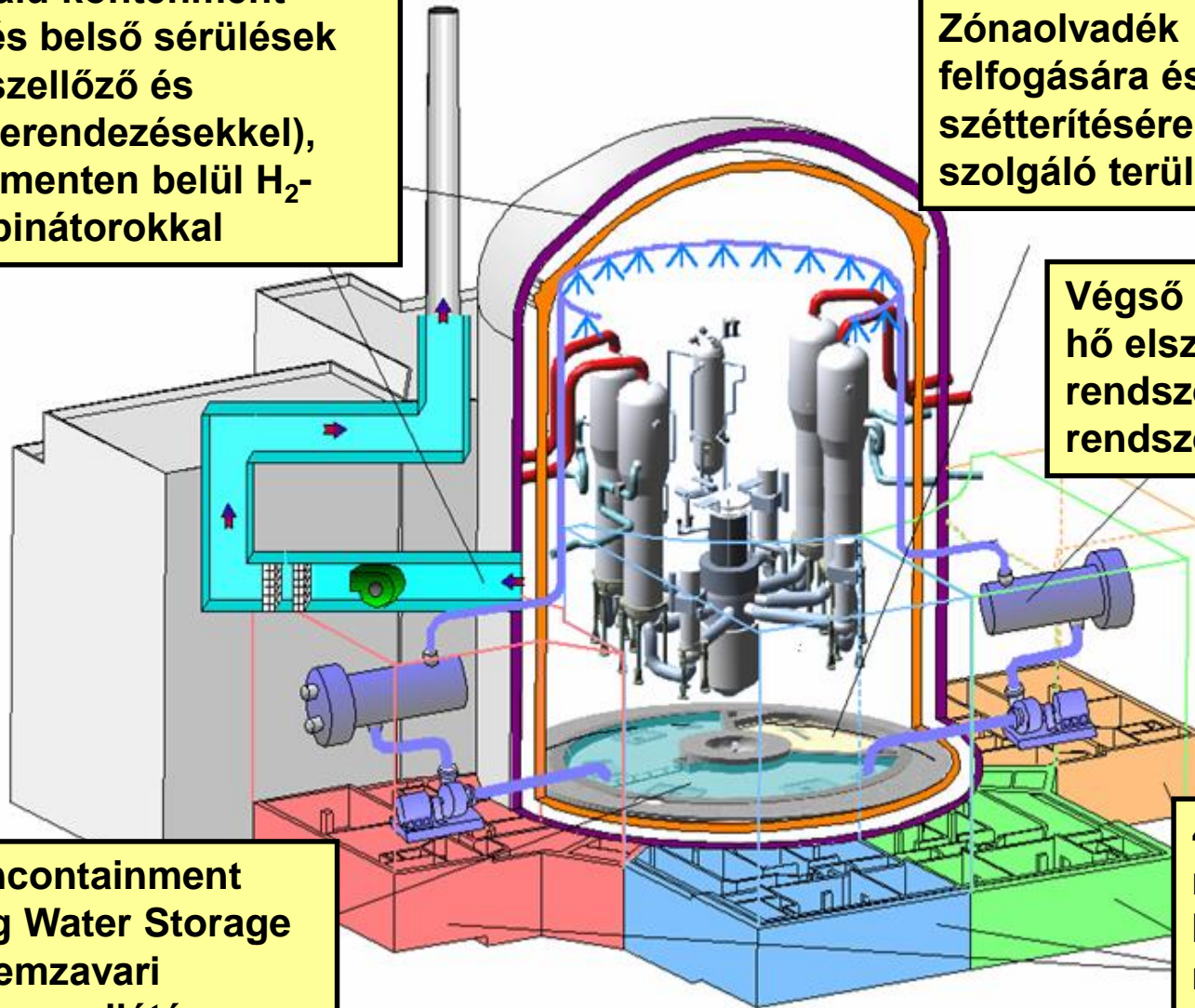
Duplafalú konténment
külső és belső sérülések
ellen (szellőző és
szűrőberendezésekkel),
konténmenten belül H₂-
rekombinátorokkal

Zónaolvadék
felfogására és
szétterítésére
szolgáló terület

Végso konténment
hő elszállító
rendszer (spray
rendszer)

IRWST (Incontainment
Refuelling Water Storage
Tank): üzemzavari
hűtőrendszer ellátása,
zónaolvadás esetén
olvadék hűtése

4-szeres
redundancia a fő
biztonsági
rendszereknél,
fizikai szeparáció
(pl. repülőgép-
rázuhanás vagy tűz
esetére)

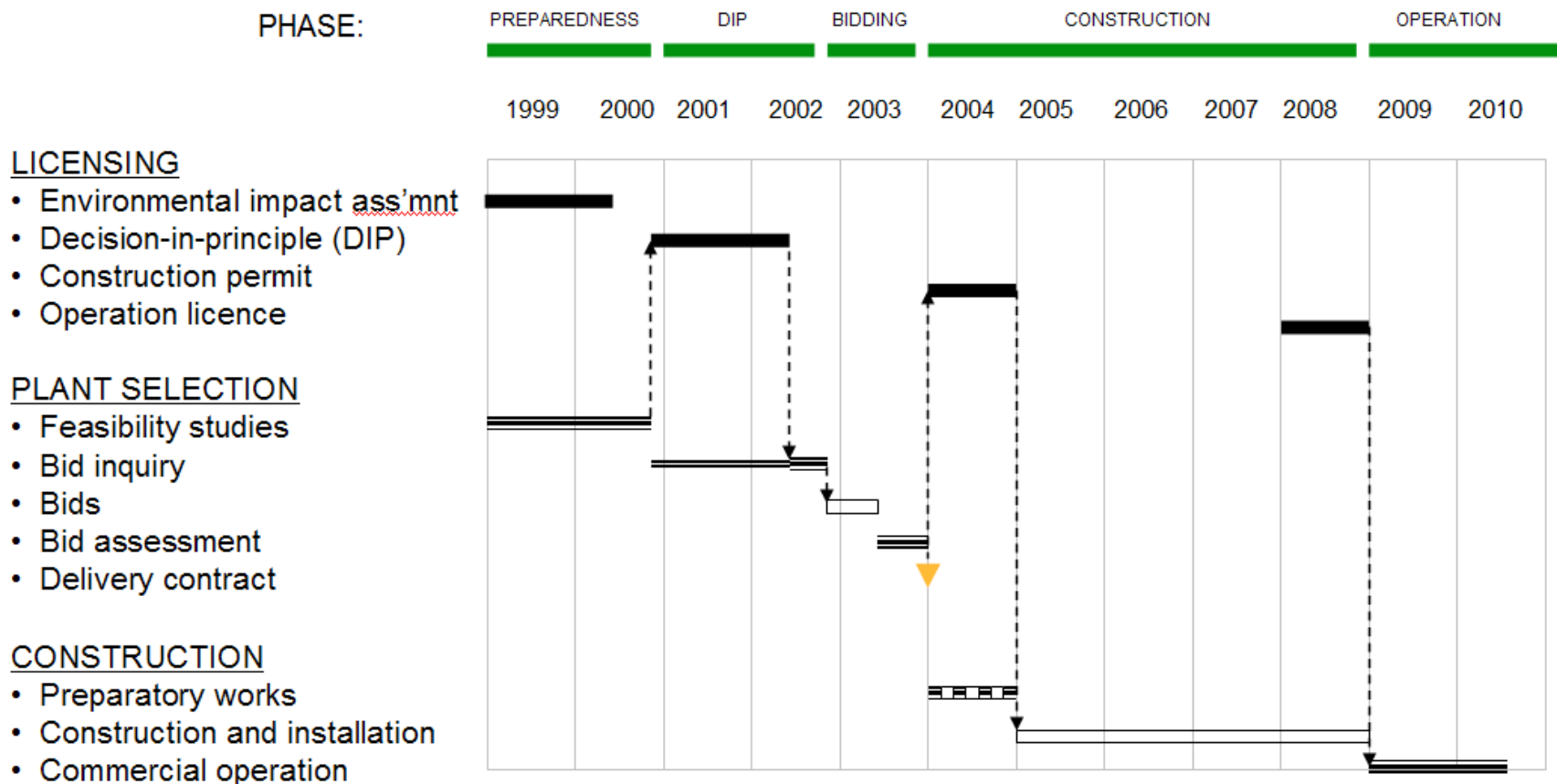


Olkiluoto-3, az első EPR

- 2002 május: a finn parlament 107:92 arányban jóváhagyja az 5. blokk létesítését (korábban ugyanilyen arányban bukott el a terv)
- 2002. szept.: nemzetközi tender
- 2003. október: TVO kiválasztja a telephelyet (Olkiluoto)
- 2003. december - döntés: az AREVA-Siemens konzorcium építheti a finn EPR-t (1600 MW, 37% hatásfok, 60 év tervezett üzemidő)
- 2004 február: megkezdődtek a földmunkák
- A telephelyi előkészületek befejeződtek, 2005. áprilisában megkezdődött a beton alaplemez készítése



Olkiluoto-3 projekt mérföldkövei



Komoly projektirányítási problémák, valamint az irányítástechnikai rendszer tervezési hiányosságai miatt a blokk üzemelése 2021-ben várható...

A Taishan-1 (Kína) 9 év építési idő után már hálózatra kapcsolva.



2020. 03. 25.

Atomerőművek 1.



Flamanville, a második EPR

- 2004 októberében az EDF bejelentette, hogy demonstrációs EPR blokkot kíván építeni Franciaországban
- A telephely: Flamanville, Normandia
- 2007. december 12-én megkezdődött az építés
- A mostani tervek szerint 2022-ben kezdi meg az üzemelést
- (2009. január 29.: bejelentik egy második francia EPR építésének tervét. Penly, 2012-től – Fukushima után elhalasztva)



Hinkley Point C

- Két EPR blokk épül a tervek szerint
- A telephely (Somerset):
 - Hinkley Point A – Magnox (leszerelve)
 - Hinkley Point B – AGR
- Építés kezdete 2018. december
- A tulajdonos 66%-ban az EDF, a maradék a kínai CGN-é (később nagyobb hányad)
- A becsült költség >20 milliárd GBP

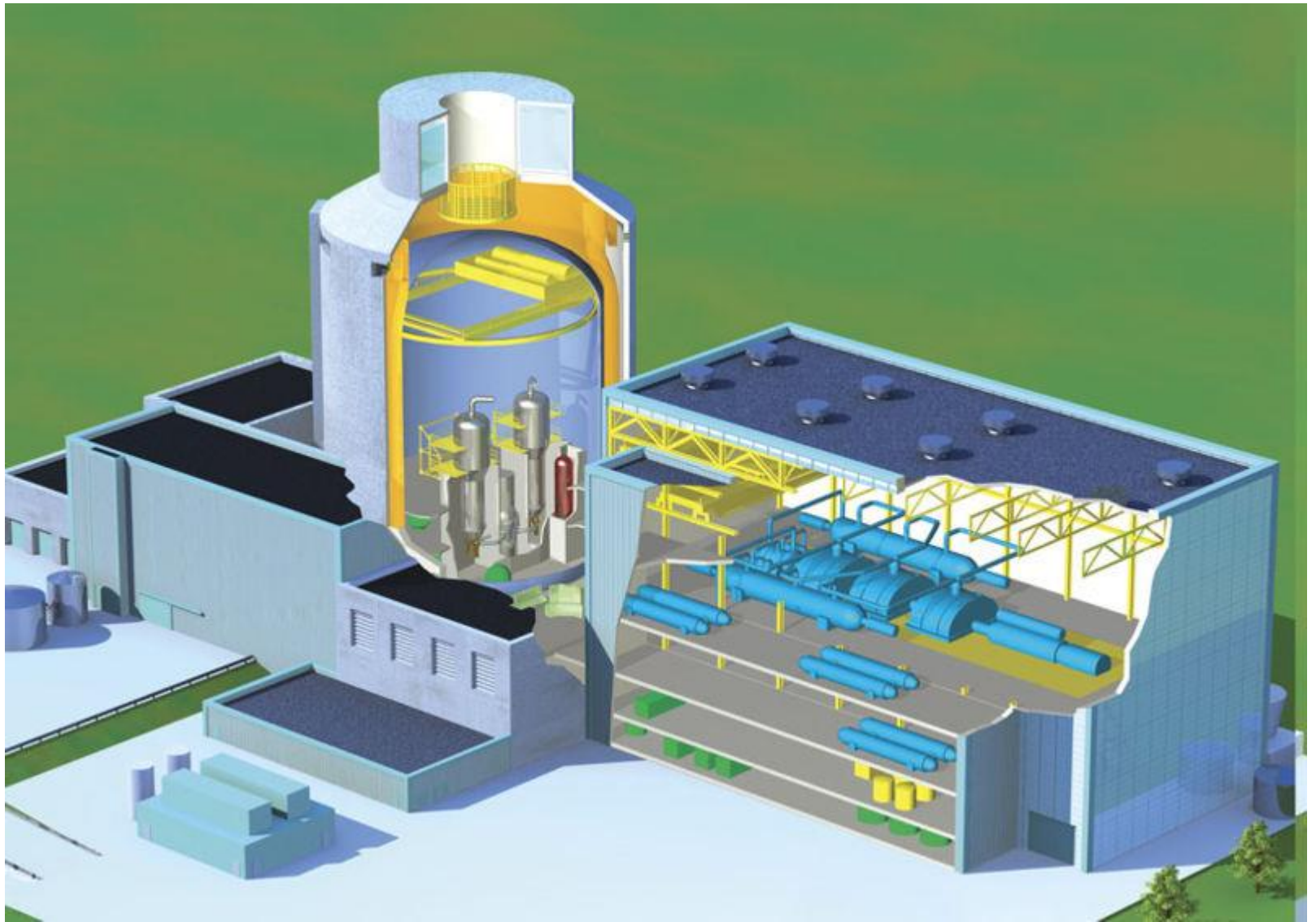


AP1000

- AP1000 – Advanced Passive Plant, Westinghouse
- Nyomottvizes reaktorról (PWR), kéthurkos, 1117 MWe
- Passzív biztonsági rendszerek
 - egyszerűbb rendszerek (kevesebb komponens), mint a mai PWR bizt. rendszereknél
- NRC 2005-ben hagyta jóvá a típustervet
- PSA szerint
 $CDF=5,09 \times 10^{-7}$ / reaktorév
- **Moduláris** szerkezet (szállítás vasúton vagy hajóval)
- Építési idő: 36 hónap
- 18 hónapos kampány
- 60 év tervezett üzemidő



AP1000



AP1000

- **Passzív biztonsági rendszerek**: üzemzavart követően 72 órán át nincs szükség operátori beavatkozásra
- Passzív Zónahűtő Rendszer (PXS) – LOCA, remanens hő eltávolítás, automatikus nyomáscsökkentés, hűtőközeg befecskendezés
- Passzív Konténment Hűtő Rendszer (PCS)
- Vezénylőterem vészhelyzeti használhatósági rendszere (VES) - 11 ember 72 órára!
- Konténment izoláció – 60%-kal kevesebb átvezetés

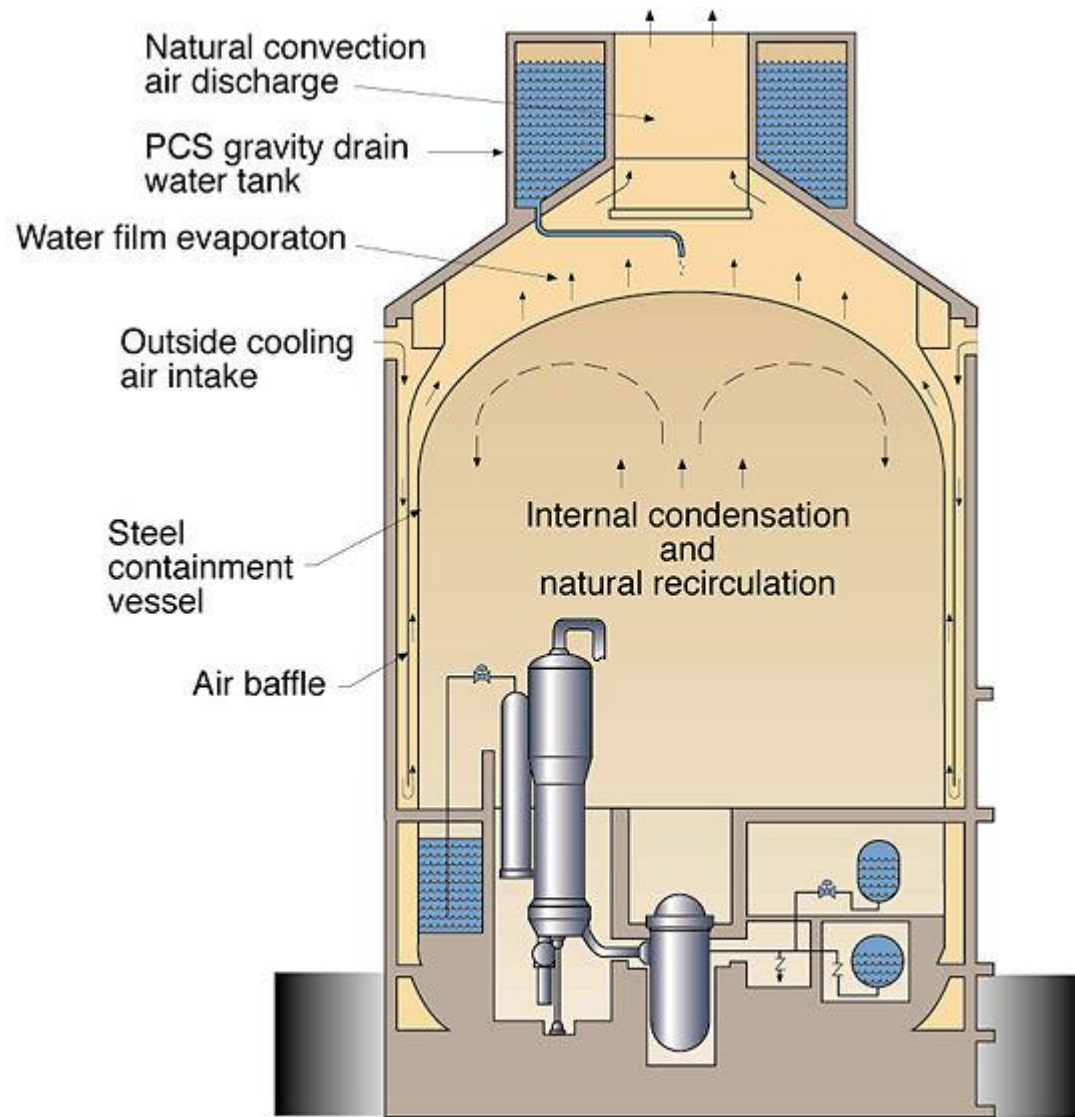
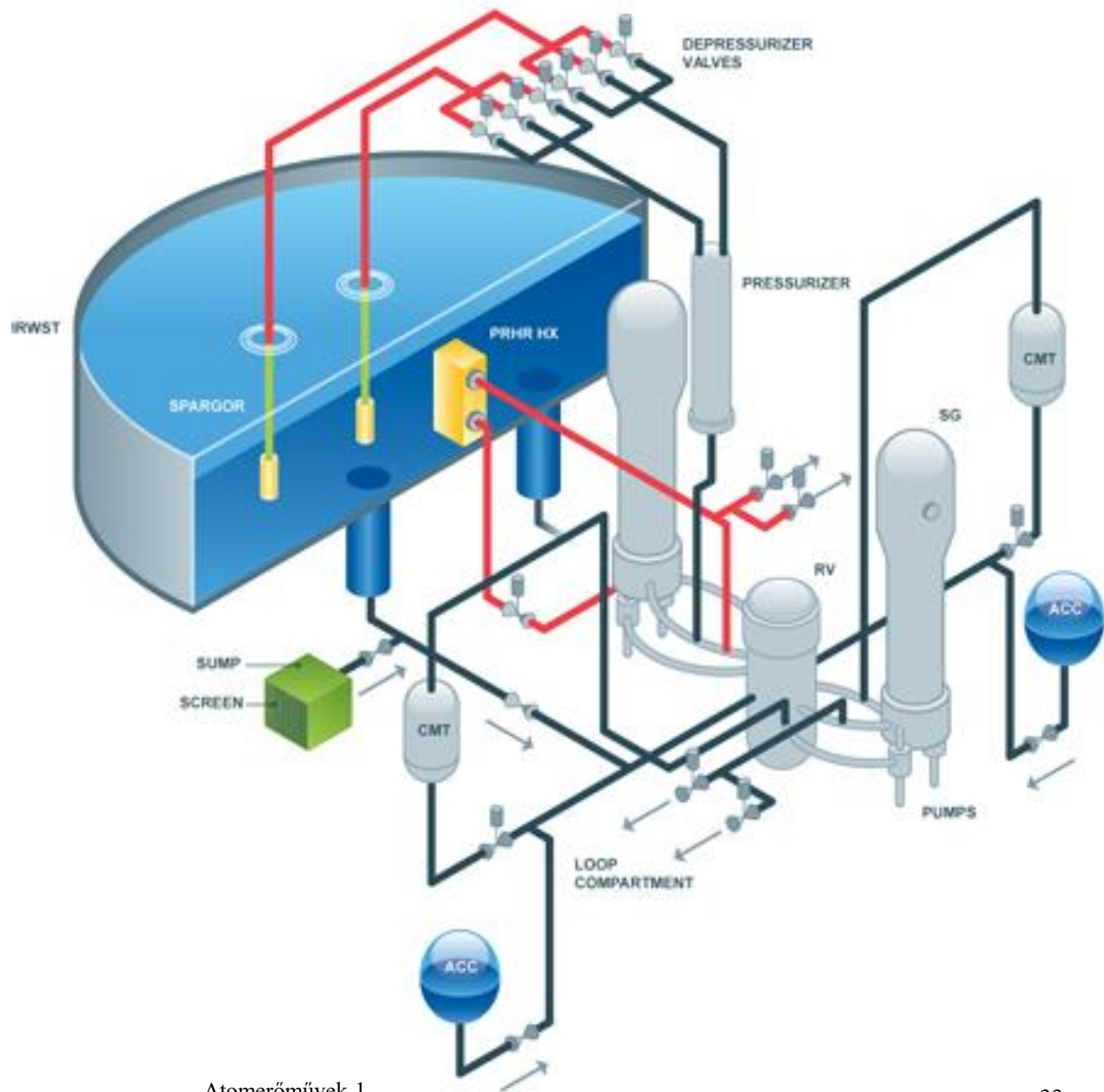


Figure 3. AP600 Passive Containment Cooling System

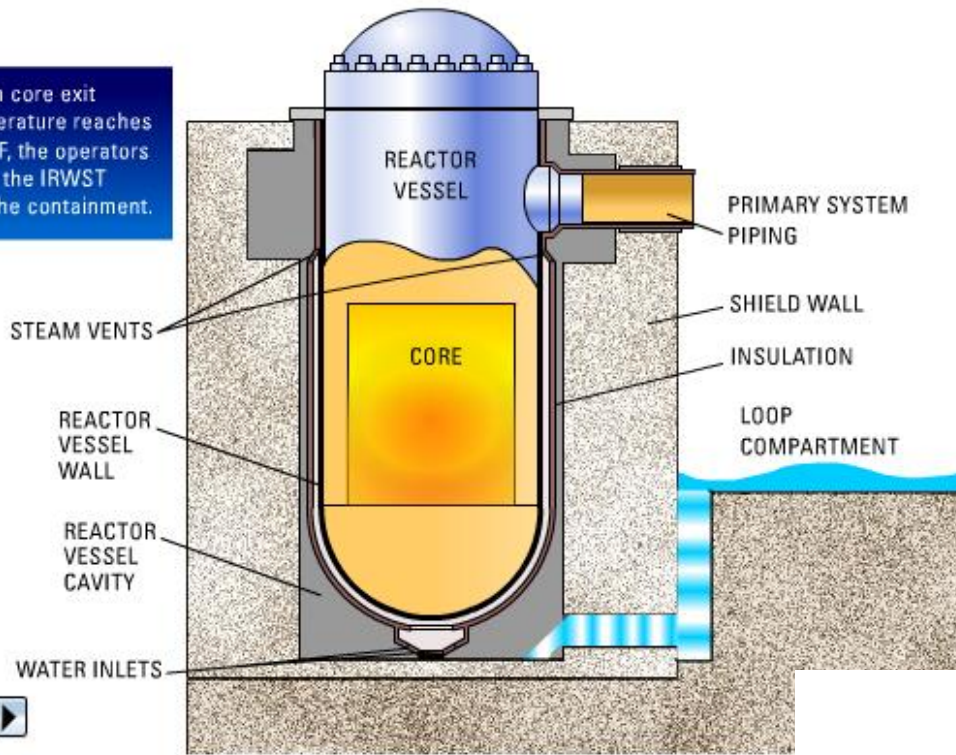
AP1000

- Passzív biztonsági rendszerek

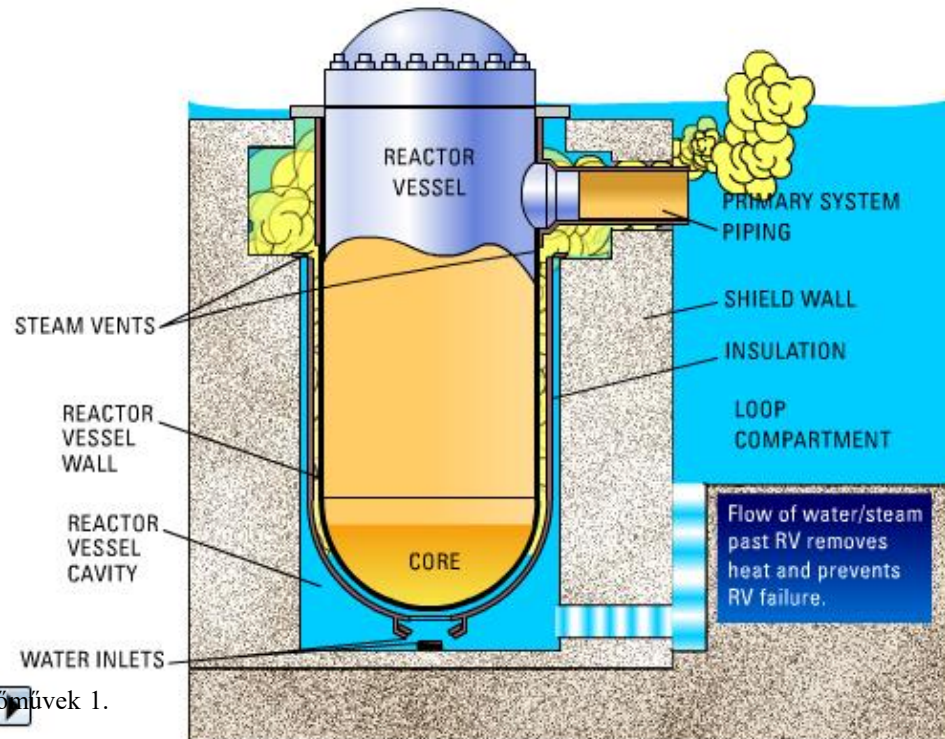


AP1000 reaktortartály külső elárasztás

When core exit temperature reaches 1200°F, the operators drain the IRWST into the containment.

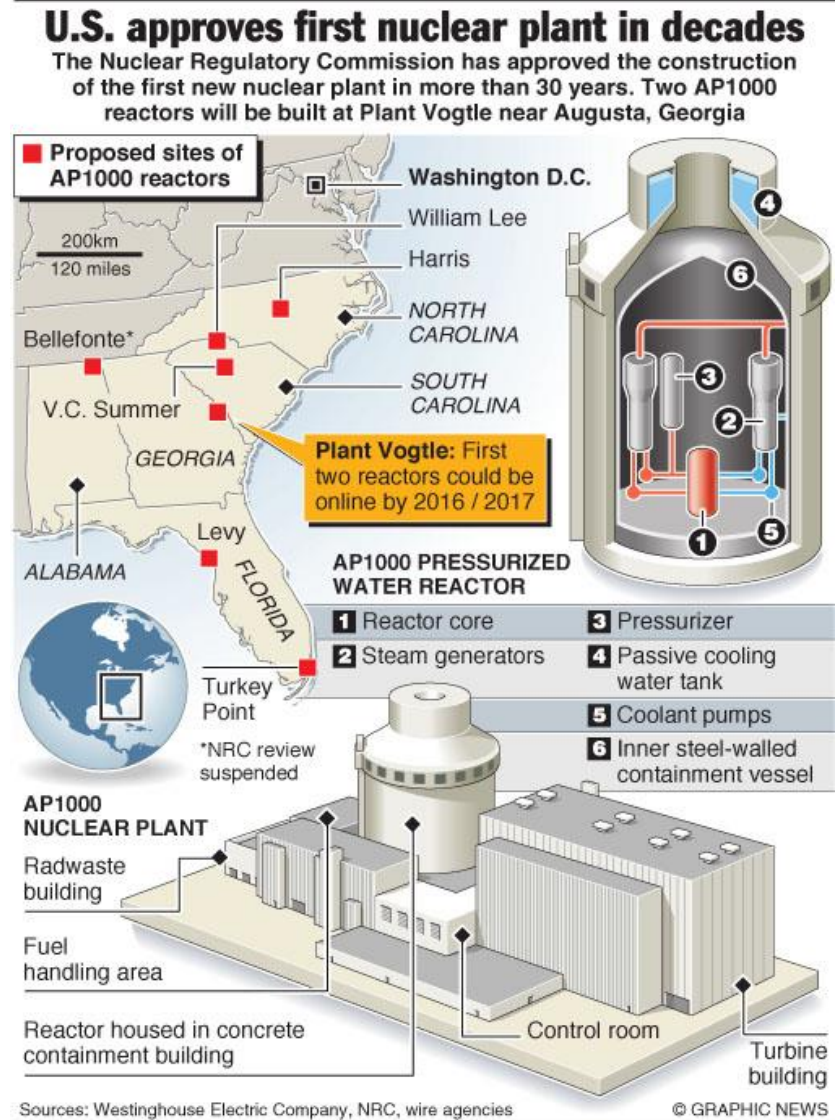


- Súlyos baleset kezelési koncepció: megelőzni a reaktortartály meghibásodást zónaolvadás esetén



AP1000 - Vogtle

- USA: 1978-ban adtak ki utoljára építési engedélyt új atomerőműre
- Az új engedélyezési rendszerben (típus- és telephely-engedélyek, valamint kombinált építési engedélyek - COL) még nem adtak ki COL engedélyt
- 2012. február 9: az NRC vezető bizottsága 4-1 arányban megszavazta a Southern Company kérelmét, két új AP-1000 reaktor építésére a Vogtle telephelyen (jelenleg két PWR üzemel)
- A tervek szerint 2021-2022-ben indulhatnak az új blokkok
- További 2 blokk épül(t volna) az USA-ban (Virgil C Summer telephely), 4 pedig Kínában
- **2018 júniusában és augusztusában hálózatra kapcsolták a Sanmen 1. és 2. blokkját, augusztusban a Haiyang 1-et is!**

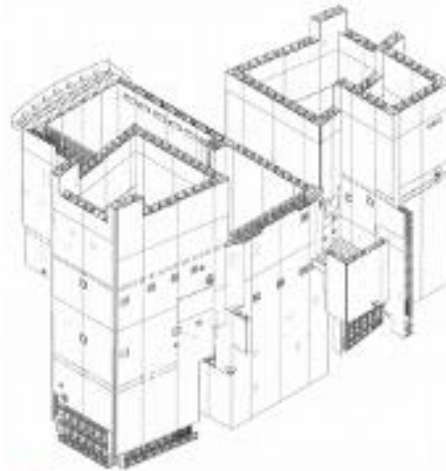


AP1000 - Vogtle

- A CA01 modul

Unit 2 Module CA-01

- Module CA-01 is the steam generator and refueling canal module placed in the containment vessel
- On hook date is Q3 2014



Provided by Westinghouse

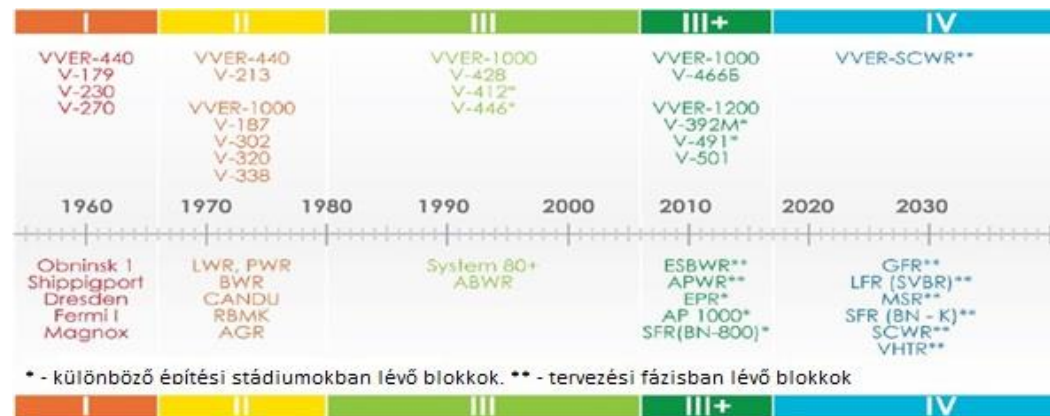
16

VVER-1200

- VVER-1000 (AES-91 és AES-92) alapján
 - AES-91: Tianwan
 - AES-92: Kudankulam
- III+ generációs reaktor
- névleges bruttó teljesítménye 1150-1200 MW
- éves csúcskihasználási tényezője > 90%
- A nem cserélhető főberendezések tervezett élettartama 60 év
- 18 vagy 24 hónapos kampány is elérhető
- 0,25 g maximális talajfelszíni gyorsulásra méretezve
- zónasérülési gyakoriság $6 \times 10^{-7}/\text{év}$, a korai nagy radioaktív kibocsátás számított valószínűsége $< 10^{-7}/\text{év}$.



A Kudankulam atomerőmű



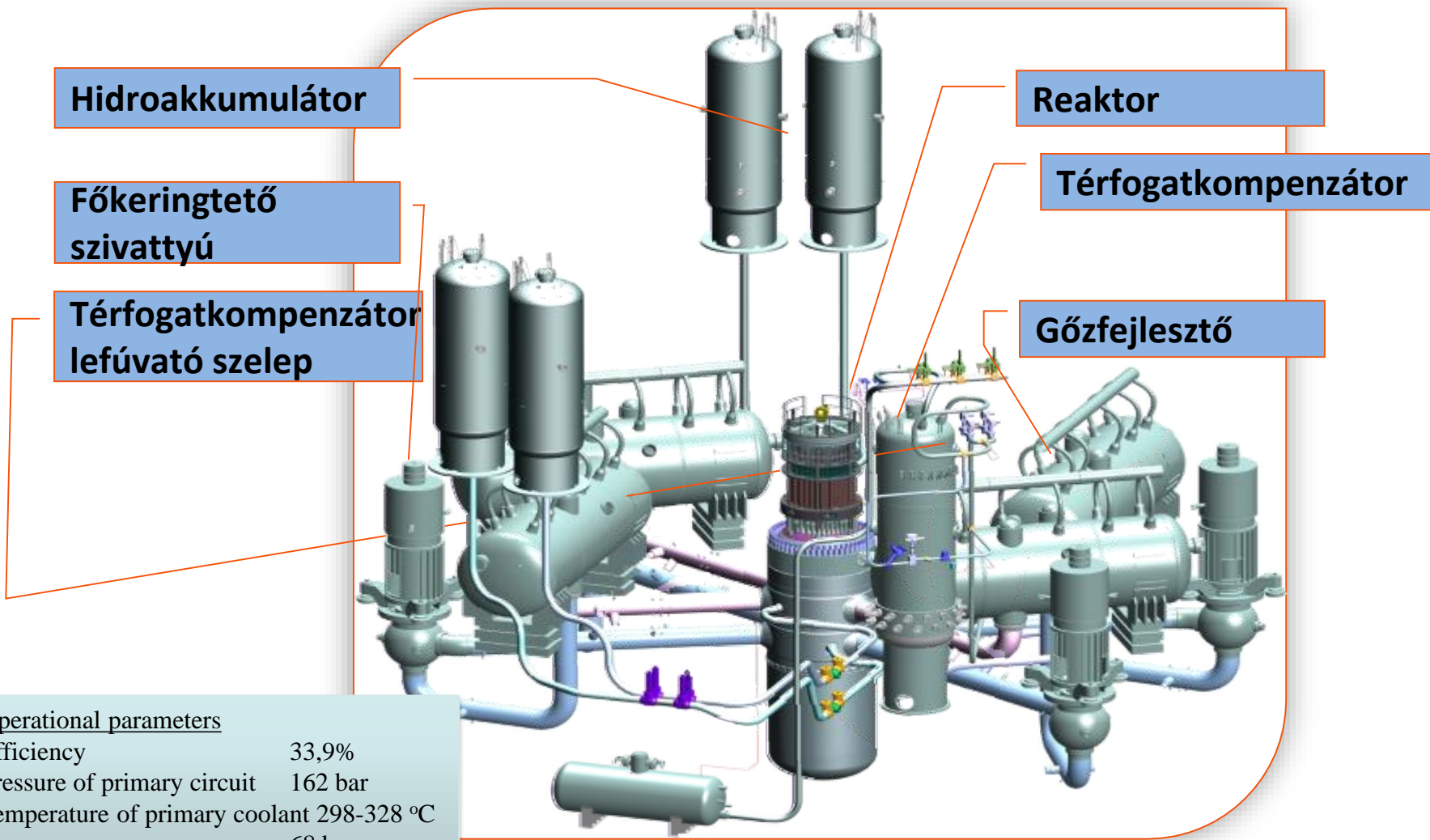
Reaktor generációk

VVER-1200

- Két altípus:
 - V491 – Atomenergoprojekt moszkvai iroda
 - V392M – szentpétervári iroda
- Fő paraméterek azonosak, biztonsági rendszerekben vannak különbségek
- Építések
 - V392M épül a Novovoronyezs-II erőműben (1 blokk üzemel, 1 épül)
 - V491 épül: Leningrád-II (1 blokk beüzemelés alatt, 1 épül), Belarusz (2 blokk);
ilyet rendelt Finnország és Magyarország

Blokki paraméterek			
Paraméter	VVER-1000 (V466B)	VVER- 1200/V392M	VVER- 1200/V491
Névleges hőteljesítmény [MW]	3000	3212	3200
Névleges bruttó elektromos teljesítmény [MW]	1000	1195,4	1198,8
Effektív üzemidő [óra/év]	>7884	>7884	8065
Üzemidő [év]	60	60	60
Primer köri paraméterek			
Fűtőelemek száma [db]	163	163	163
Hurkok száma [db]	4	4	4
Primer hűtőközeg tömegárama [m ³ /h]	84800	85600	85600±2900
Primer hűtőközeg be/kilépő hőm. [°C]	291/321	298,6/329,7	298,6/329,7
Primer köri nyomás [bar]	157	162	162
Szekunder köri paraméterek			
Frekvencia [Hz]	50	50	50
Felépítés (turbinaházak száma)	2KNY+1NN Y +2KNY	2KNY+1NNY +2KNY	2KNY+1NNY +2KNY
Névleges frissgőznyomás [bar]	62,7	70	68
Névleges tápvíz hőmérséklet [°C]	220	220	225±5
Generátor névleges feszültség [kV]	24	-	24

Nukleáris sziget



Operational parameters

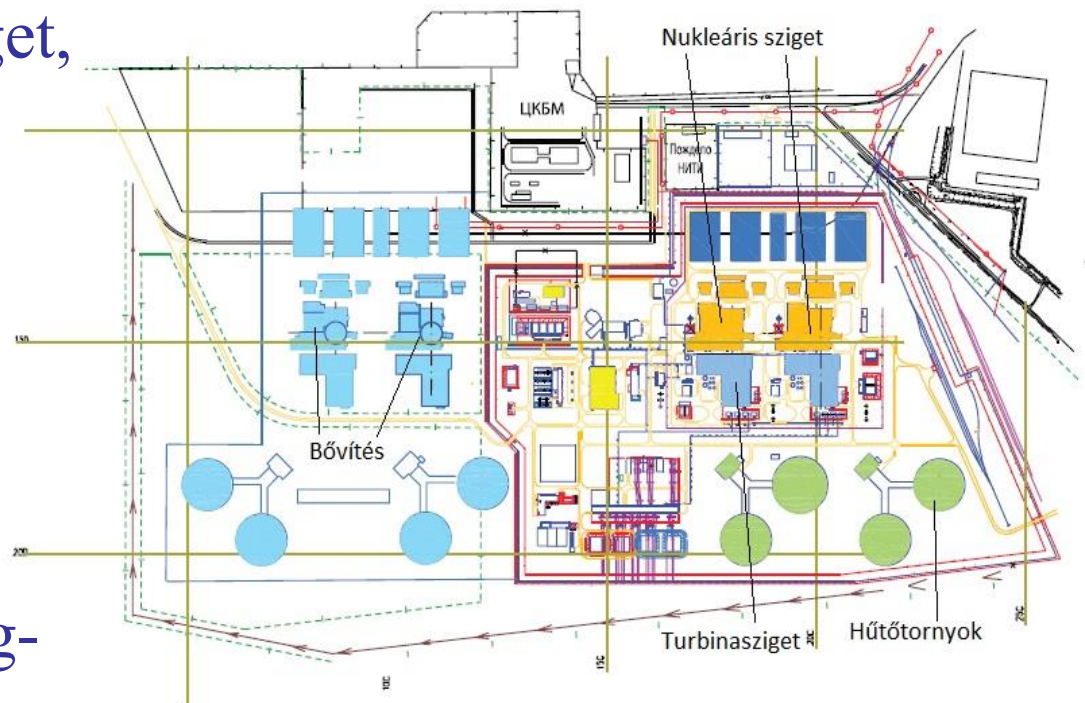
Efficiency	33,9%
Pressure of primary circuit	162 bar
Temperature of primary coolant	298-328 °C
Steam pressure	68 bar
Steam temperature	283 °C
Initial enrichment	4,79%
Burnable poison	Gd ₂ O ₃

VVER-1200

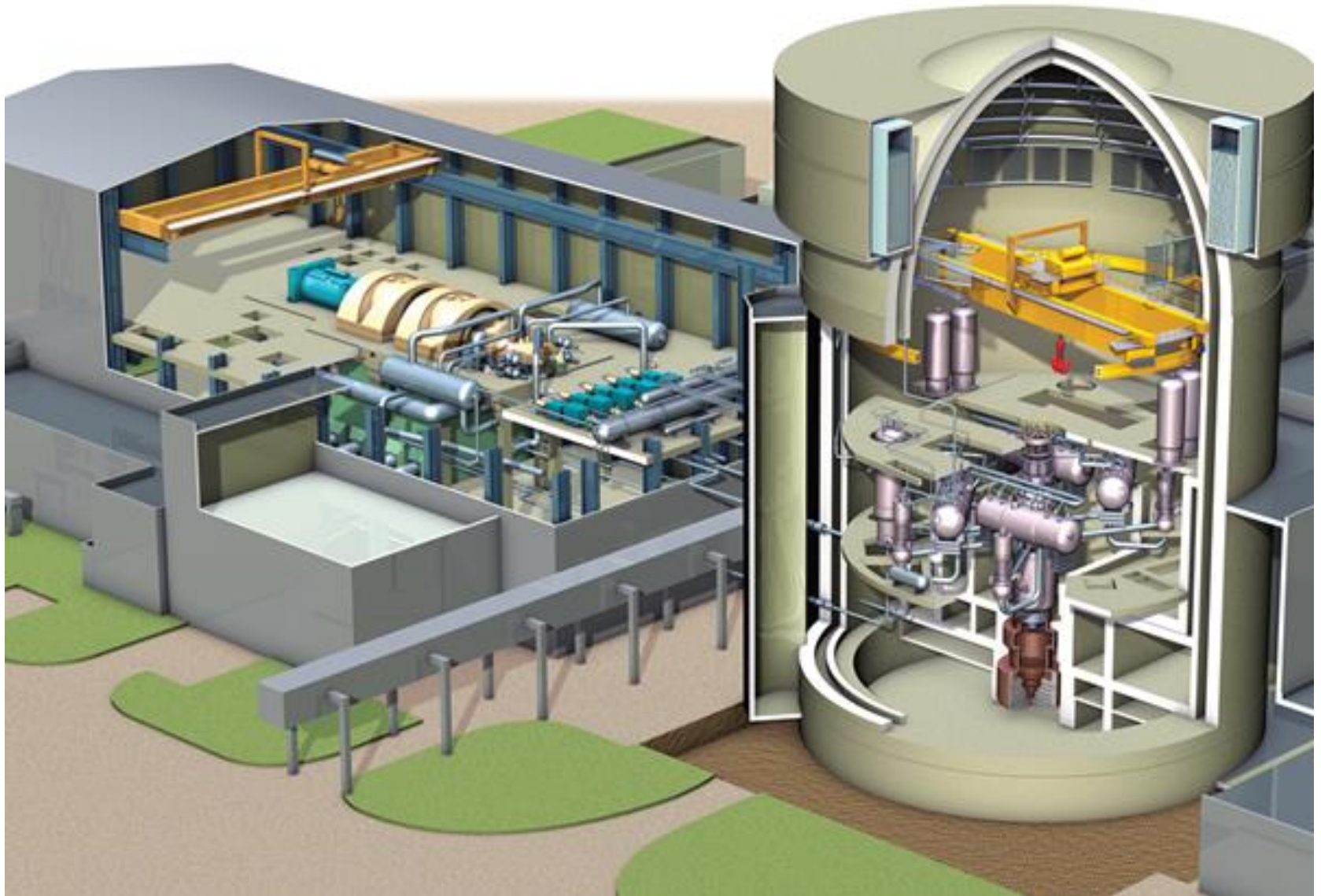


VVER-1200 layout

- VVER-1000 alapján
- V491: nukleáris sziget, turbina sziget, konvencionális zóna
- Nukleáris sziget: reaktorépület (konténment), biztonsági, irányító épületek, üzemanyag-kezelő épület



VVER-1200 layout



V491 biztonsági rendszerek

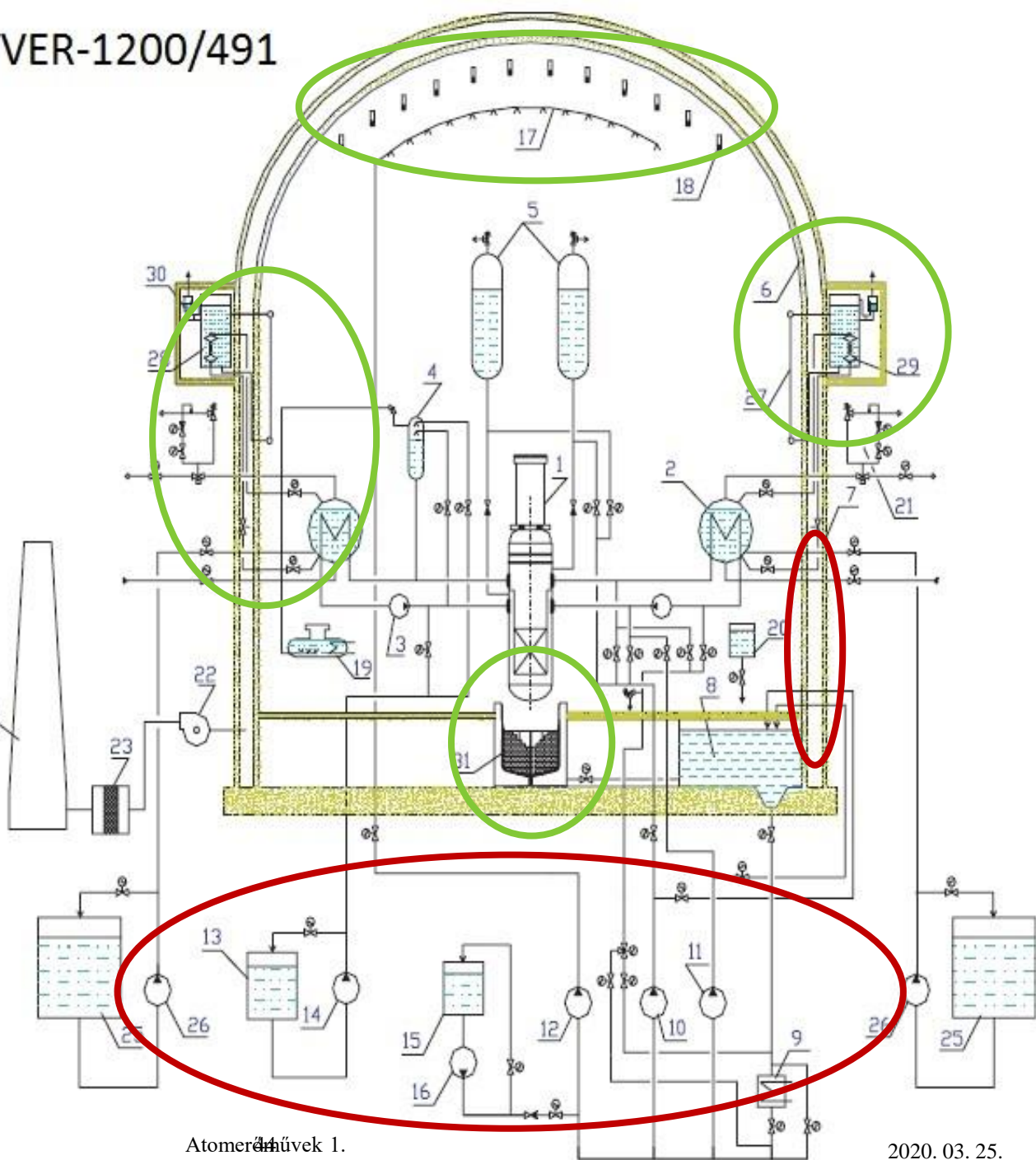
- EUR terminológia, biztonsági filozófia átvétele (TA1-4, TAK1-2 üzemállapotok)
- Külső események elleni védelem
 - pl. 4,1 kPa hónyomás ☺, 0,25 g maximális PGA
- Passzív biztonsági rendszerek
- Aktív rendszerek: 4x100%, fizikai szeparáció



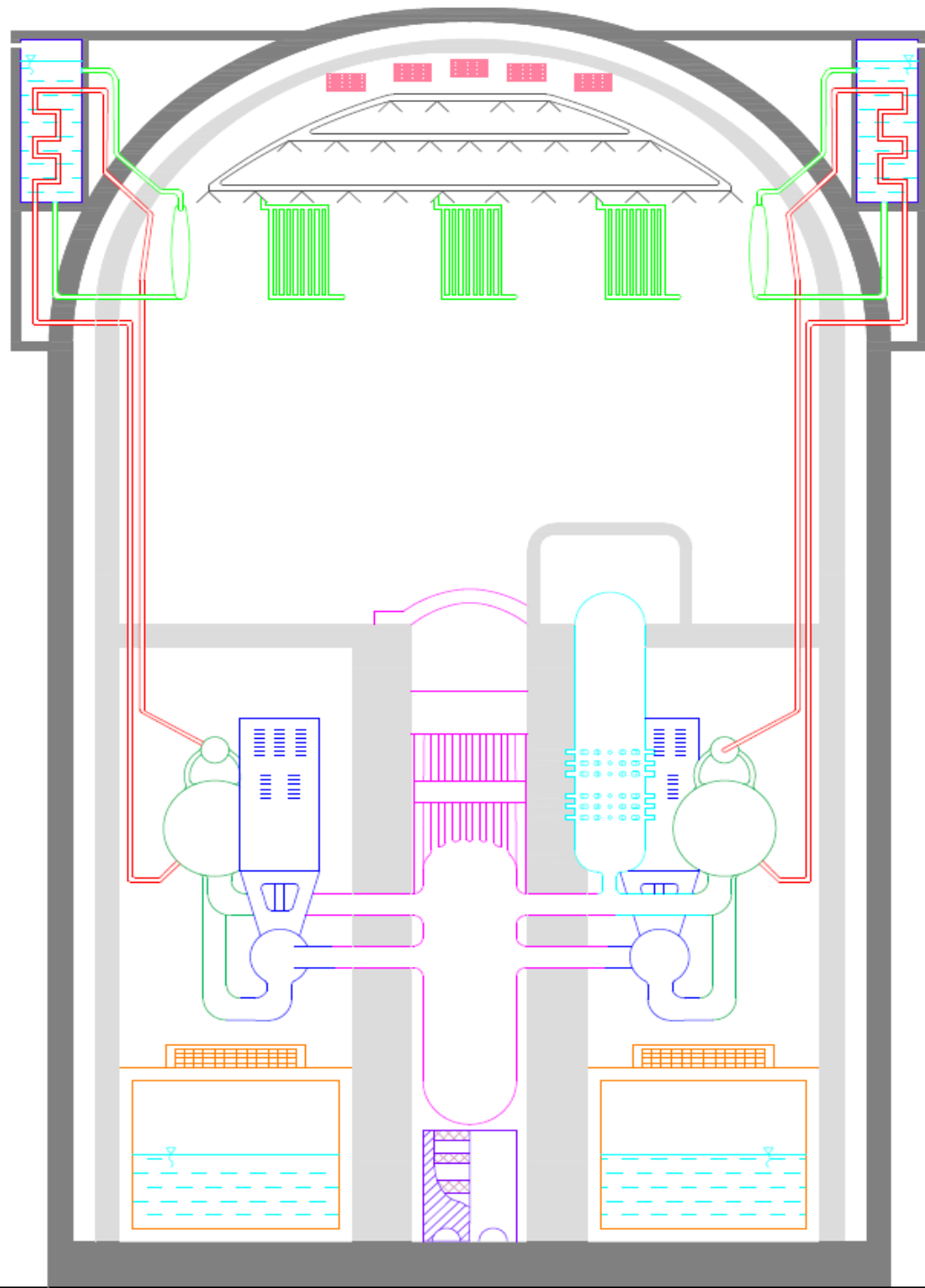
A biztonsági rendszerek négy elkülönülő ága

biztonsági rendszerek

1. Reaktor
2. Gőzfejlesztő
3. FKSZ
4. Térfogatkompenzátor
5. Hidroakkumulátorok
6. Belső konténment fal
7. Külső konténment fal
8. Alacsony koncentrációjú bórsav tartály (ZÜHR és zsomp közös táptartály)
9. Hőcserélők
10. Kisnyomású befecskendező szivattyú
11. Nagynyomású befecskendező szivattyú
12. Sprinkler szivattyúja
13. Magas konc. bórsav tartály (vérszűrő rendszer)
14. Üzemzavari bórsav szivattyú
15. Vegyi reagensek táptartálya
16. Vegyi reagensek szivattyúja
17. Sprinkler befecskendezés
18. Passzív hidrogén rekombinátor
19. Térfogatkompenzátor, lefúvató tartály
20. Üzemzavari vegyszertartály
21. Főgáz lefúvató rendszer
22. Köpenytéri ventilátor
23. Szűrő
24. Szellőztető kémény
25. Ioncserélt víz táptartálya
26. Üzemzavari tápszivattyú
27. Passzív remanens hőelvonó rendszer kondenzátora
28. Passzív RHR hőcserélője
29. RHR GF hőcserélője
30. Vízdugó
31. Zónaolvadék csapda

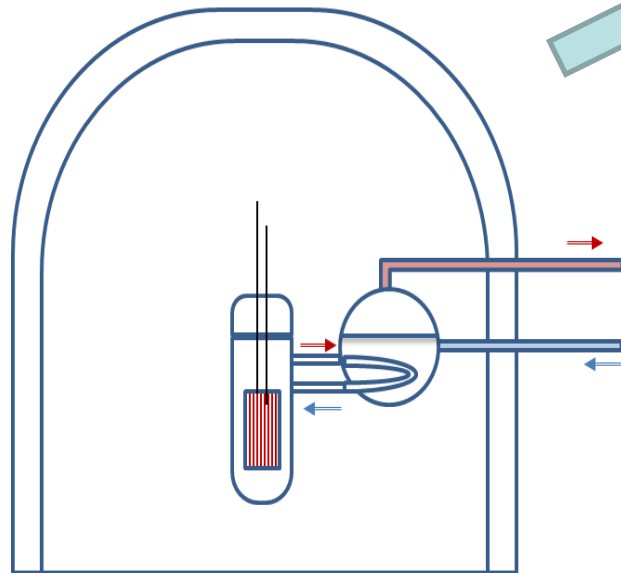


V491 biztonsági rendszerek

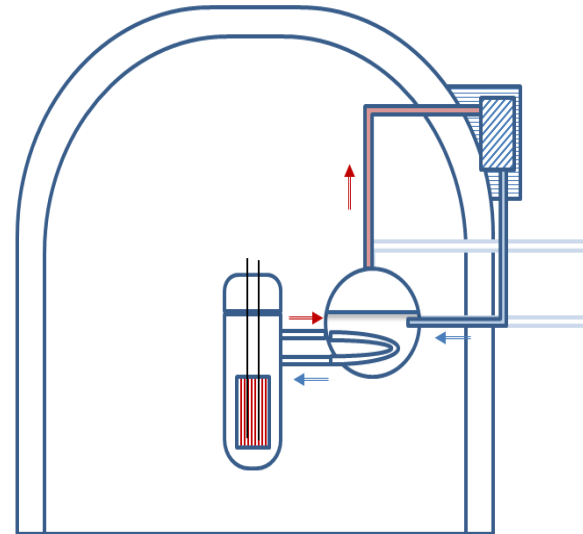


V491

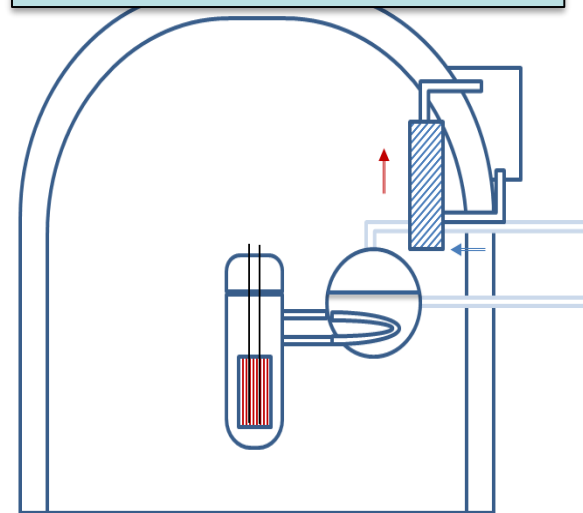
biztonsági rendszerek



Normál hűtés
gőzfejlesztőn
keresztül



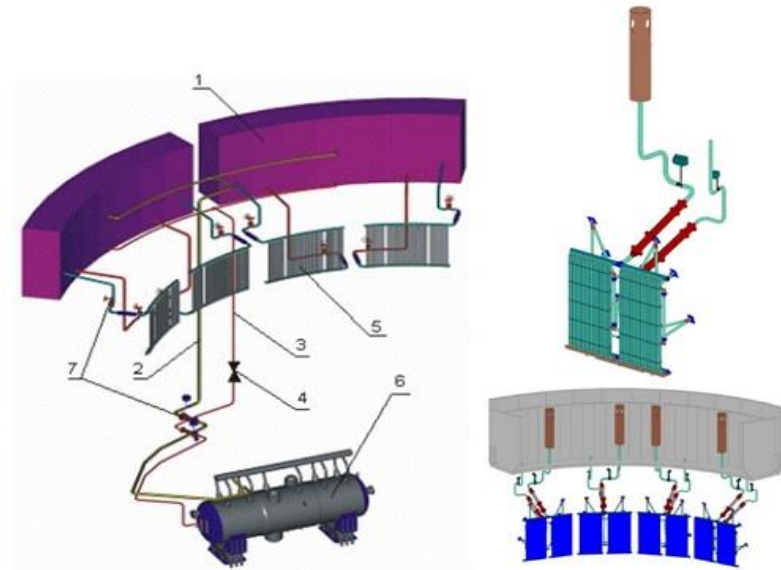
Passzív gőzfejlesztő hűtés
(pl. végső hőnyelő
elvéstése esetén)



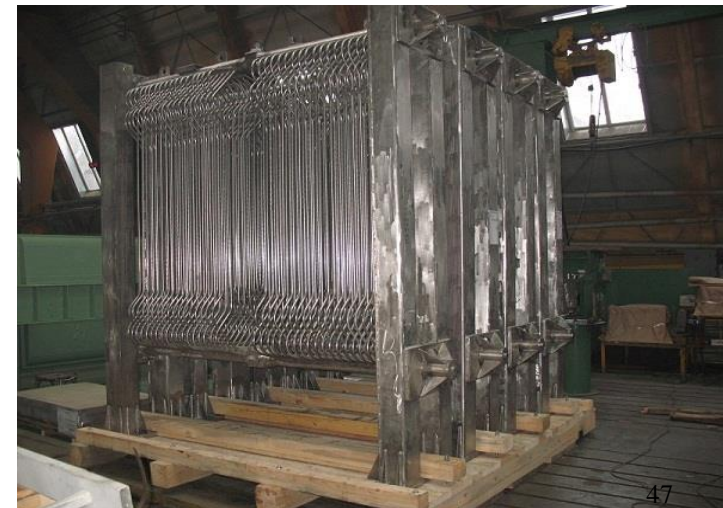
Passzív konténment hűtés (pl.
teljes feszültségvesztés + primer
kör sérülése esetén)

V491 biztonsági rendszerek

- Aktív védelmi rendszerek (ZÜHR, sprinkler, vészbórozó rendszer, remanenshő-elvonó, üzembiztos tápvízrendszer, stb.)
- Lokalizációs rendszerek
 - pl. konténment: előfeszített vasbetonból, félgömb kupolával, vasbeton alaplemezzel.
 - A belső konténment belső felülete szénacél lemezekkel burkolt a nagyobb biztonság érdekében.
 - A szivárgási limit 24 órára vetítve 0,2 %.
 - P_d : 5 bar T_d : 150 °C
- Passzív rendszerek (BDBA)
 - Hidroakkumulátor (59 bar)
 - Passzív konténment hűtés
 - Passzív GF hűtés
 - Kísérleti és numerikus megalapozás
 - Passzív H-rekombinátorok (1000 kg H₂)



A passzív konténment és GF hűtés rendszere



A SPOT-PG köztes hőcserélője

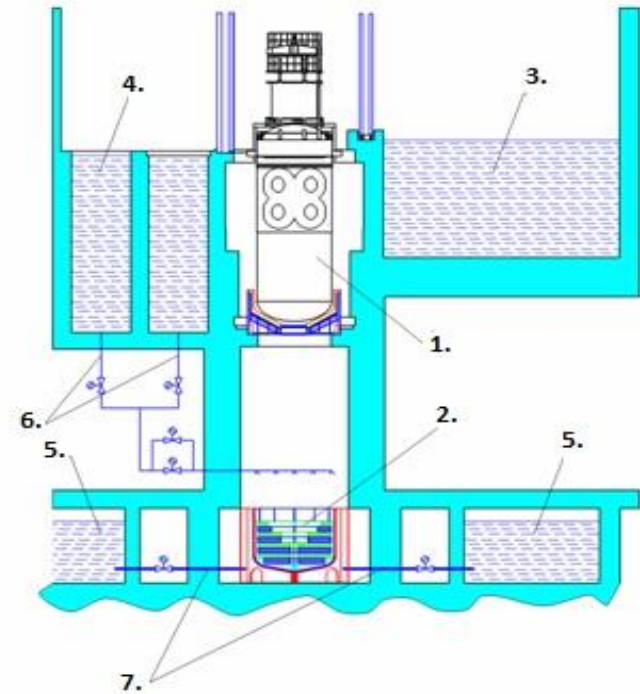
V491 biztonsági rendszerek



A passzív konténment hűtés hőcserélője

V491 biztonsági rendszerek

- Zónaolvadék-csapda
- Teljes zóna befogadása, kórium lokalizáció
- Tianwan, Kudankulam erőművekben már telepítve
- 150 t tömeg, 6 m magasság
- $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Fe}_2\text{O}_3$ keverék olvadó töltet (200 t)
- Dupla falú csapda
- Külső hűtés az üzemzavari tartályokból és befecskendezés a karbantartó medencéből (passzív)
- Kísérleti és numerikus megalapozás



Zónaolvadékcsapda

1. Reaktor 2. Zónaolvadék csapda 3. Pihentető medence 4. Karbantartó medence 5. Üzemzavari táptartály 6. Elárasztó vezetékek – olvadék felszínére befecskendezés 7. Csapda hőcserélő tápcsövei 8. Gőzelszívás

V491 biztonsági rendszerek

- Zónaolvadék-csapda



A zónaolvadék csapda elhelyezése a Leningrád-2 telephely 1. blokkján



A 491-es projekt zónaolvadék csapdájának
olvadó töltete

Épülő VVER-1200 blokkok

- Oroszországban:

Novovoronezh II-1	VVER-1200V-392M	1200 (1114)	Const 6/08	Start up Dec 2015, grid conn 6/2016, comm 1/2017
Leningrad II-1	VVER-1200V-491	1170 (1085)	Const 10/08	Grid conn 6/2017, comm 1/2018
Novovoronezh II-2	VVER-1200V-392M	1200 (1114)	Const 7/09	Grid conn 10/2018, comm 1/2019
Leningrad II-2	VVER-1200V-491	1170 (1085)	Const 4/10	Grid conn 11/2019, comm 2/2020
Baltic 1 (Kaliningrad)	VVER-1200V-491	1194 (1109)	Const 4/12, suspended 6/13	??
Leningrad II-3	VVER 1200V-491	1170	Planned, 2018	2023
Leningrad II-4	VVER 1200V-491	1170	Planned, 2019	2024

...+ 20 darab tervezett VVER-TOI
Forrás: WNA

Épülő / üzemelő VVER-1200 blokkok

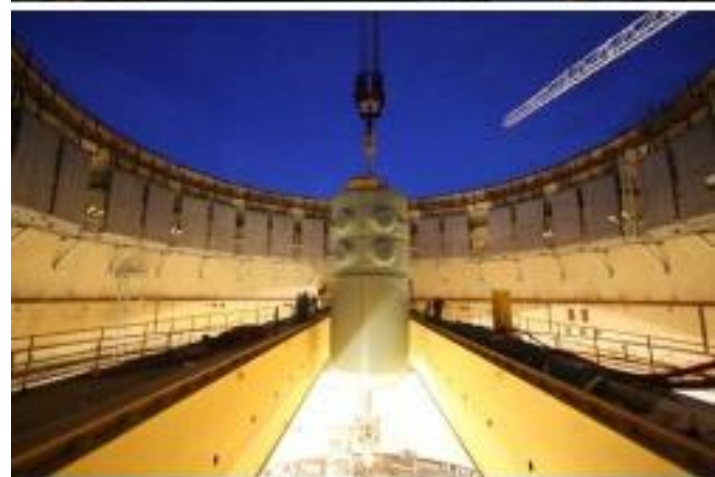
- Novovoronyezs-II – V392M
 - Fővállalkozó a JSC AtomEnergoProekt
 - 1. blokk építés kezdete: 2009. július
 - Tervezett első indítás: 2015. december
 - 2. blokk építés egy évvel később
 - Tervezett költség: 5 milliárd USD
 - Fő beszállítók: OMZ Izhora (reaktortartály), ZiO Podolsk (GF)
 - 2015 május: egy-egy év csúszás várható, ezzel az 1. blokk első indítása 2016-ban várható, kereskedelmi üzeme 2017-ben
 - 2017, 2019: kereskedelmi üzem kezdete



Épülő / üzemelő VVER-120

- Leningrád-II – V491

- Fővállalkozója a St Petersburg AtomEnergoproekt, a 2008-as szerződés összege 5,8 milliárd USD
- Telephely-engedély 2007-ben, építési engedély 2008-ban kiadva
- Az építkezés 2008-ban kezdődött, 2013-as első indítást tervezve
- Csúszás az építkezésben (szakemberhiány?)
- 1. blokk kereskedelmi üzembe lépés 2018-ban
- 2. blokk két évvel később



Épülő VVER-1200 blokkok

- **Belarusz Atomerőmű, Osztrovec – V491**
- 2008: Atomsztrójekszport, Westinghouse-Toshiba, Areva érdeklődik
- 2009-ben a kormány az oroszokat választotta, 2011-ben államközi szerződés 2 blokkról
- 10 milliárd dolláros orosz hitel a költségek 90%-ának fedezésére
- 1. blokk építése 2013-ban kezdődött, 2. blokké 2014-ben
- 1. blokk kereskedelmi üzemét 2020-ra tervezik (késés munkaerőhiány miatt?)
- A számított LCOE 5.81 cent/kWh

	Reactor	MWe gross	Construction start	Operation start	Commercial operation
Ostrovets 1	VVER-1200/491	1194 (1109 net)	Nov 2013	Jan 2020	2020
Ostrovets 2	VVER-1200/491	1194 (1109 net)	May 2014	mid-2020	late 2020
Total (2)		2388			

Épülő VVER-1200 blokkok

- Belarusz Atomerőmű, Osztrovec – V491



Tervezett VVER-1200 blokkok

- Hanhikivi – V491
 - 2007-ben alakult a Fennovoima Oy, eredetileg az E.On vezetésével
 - 2010: parlamenti elvi jóváhagyás
 - Telephely: Pyhäjoki
 - Eredetileg nagyobb (EPR?) blokkot terveztek, de az E.On kiszállt -> 1000-1300 MW
 - 2013: Szerződés a Rusatom Overseas-zel egy VVER-1200 építéséről, és 34%-os orosz részesedésről
 - Új tulajdonosok keresése – Fortum
 - Fővállalkozó a Titan2, Arabelle turbina (AAEM)
 - Tervezett költség 6-7 milliárd euró, LCOE: 5 cent/kWh



Hanhikivi
1

VVER-1200/V-491

1200

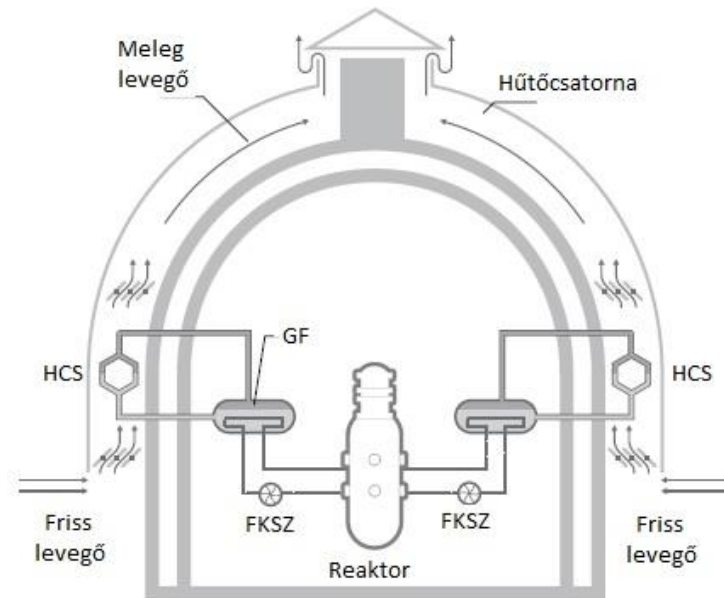
1250

2021

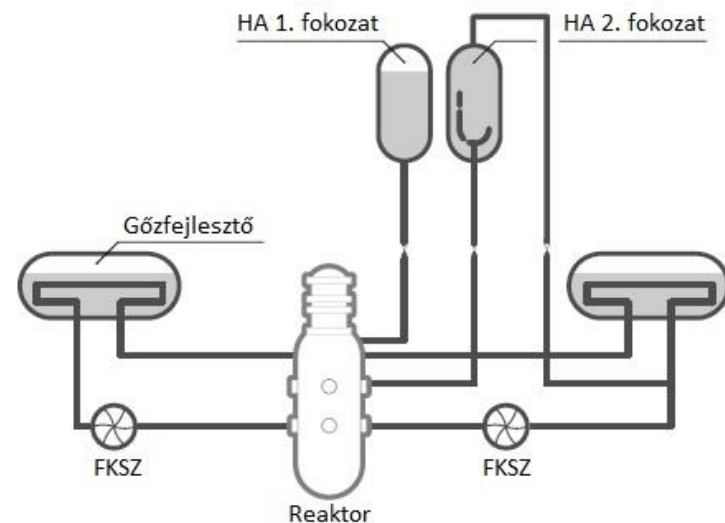
2028

V392M biztonsági rendszerek

- Passzív rendszerek (eltérés V491-től):
 - Két fokozatú hidroakkumulátor (második fokozat 15 bar-nál)
 - Passzív GF hűtés
 - Passzív filtrációs rendszer



Passzív remanenshőelvonó rendszer, NVAES-2

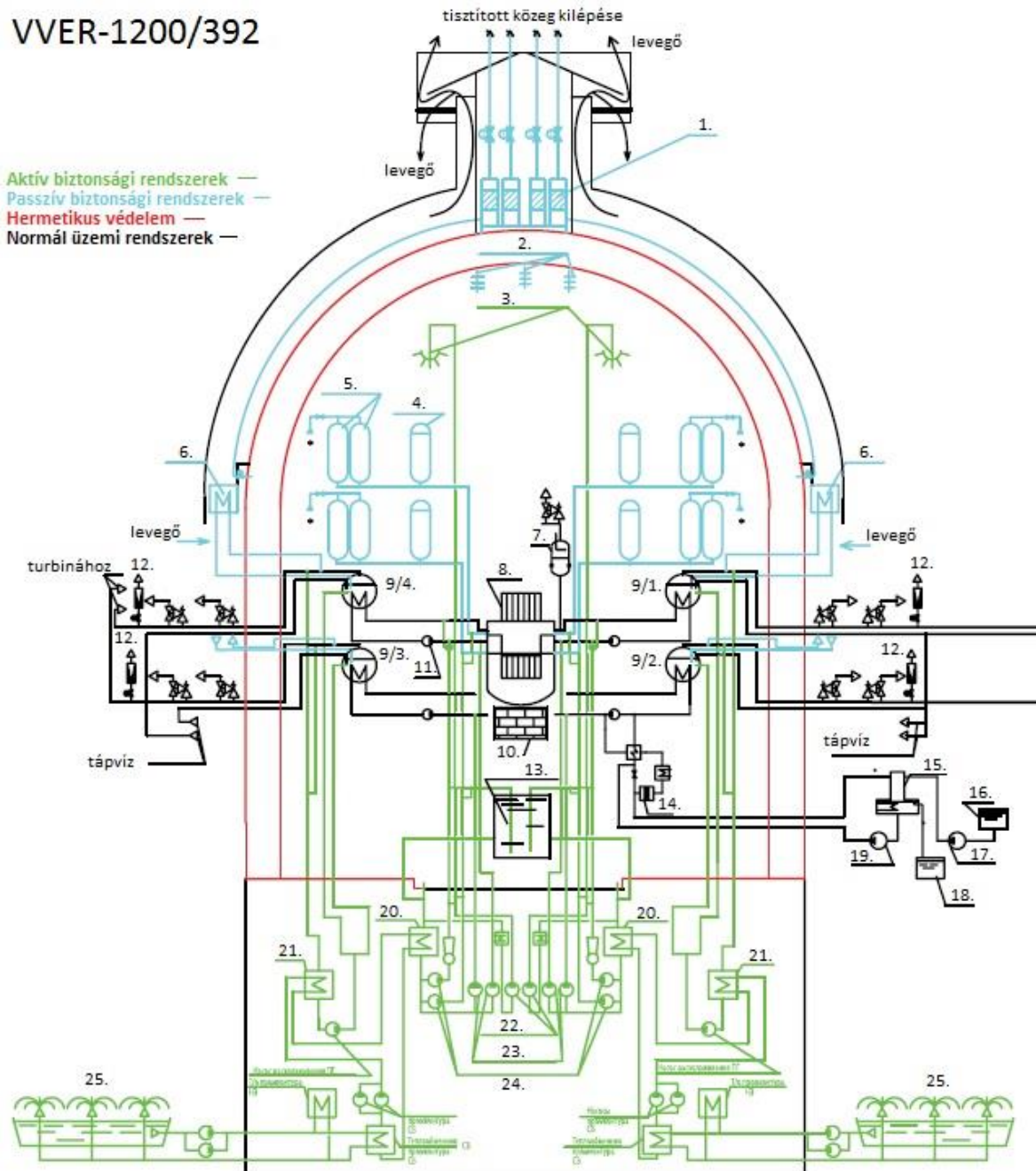


A hidroakkumulátorok kapcsolódása a primer körre⁵⁷

V392M

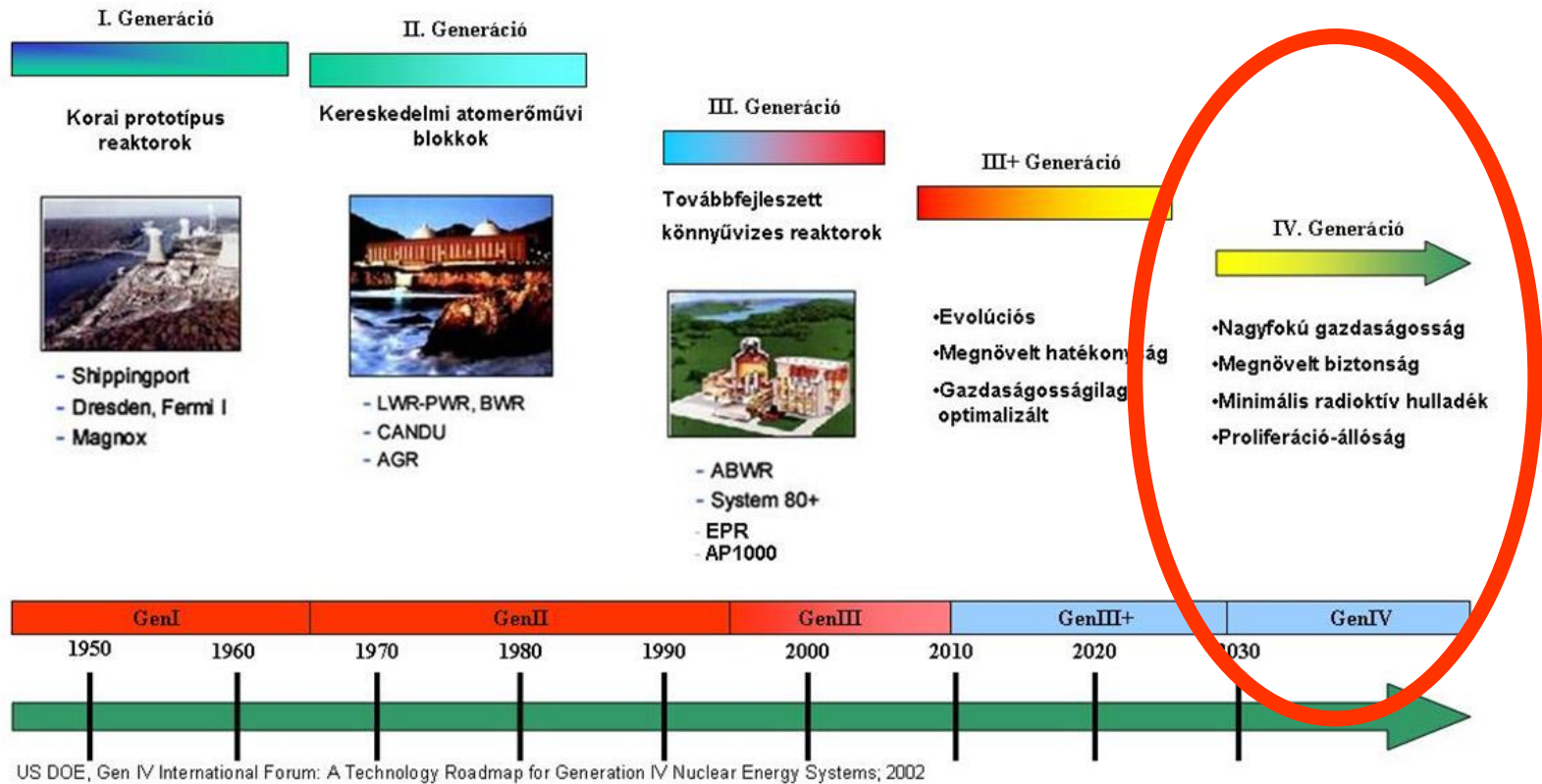
biztonsági rendszerek

VVER-1200/392



1. Légszűrők
2. Katalitikus H₂ rekombinátorok
3. Sprinkler rendszer
4. Primer hidroakkumulátor
5. Szekunder hidroakkumulátor
6. SPOT PG
7. Térfogatkompenzátor
8. Reaktor
- 9/x. X. gőzfejlesztő
10. Zónaolvadék csapda
11. Főkeringtető szivattyú
12. BRU-A (lefúvatószelep atmoszférikus térbe)
13. Zsomp/ZÜHR tartály
14. Primer körű víztisztító
15. Gáztalanító pótvíz tartály
16. Szerves adalékok tartálya
17. Szivattyú
18. Szennyezett kondenzátum tartálya
19. Szivattyú
20. ZÜHR
21. Gőzfejlesztők vészhelyzeti hűtője
22. Biológiai védelem hűtése
23. Vészhelyzeti bórsav szivattyúk
24. Vészhelyzeti reaktorhűtés
25. Hűtőmedencék

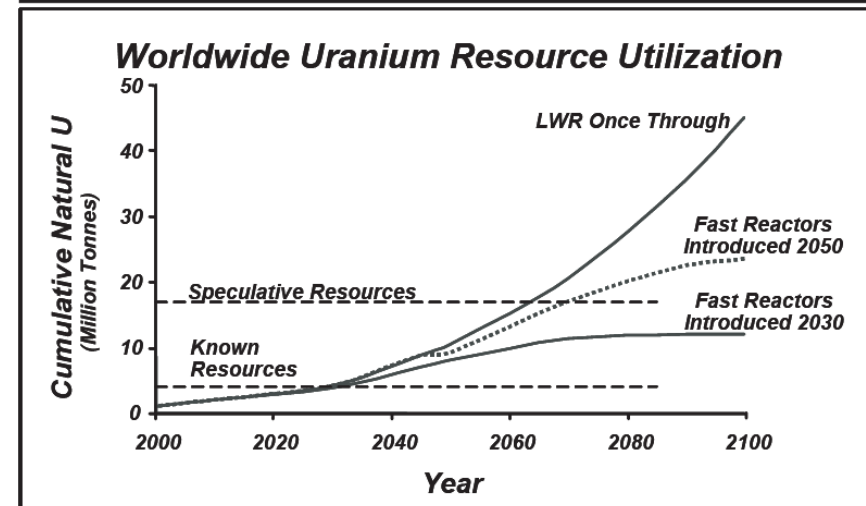
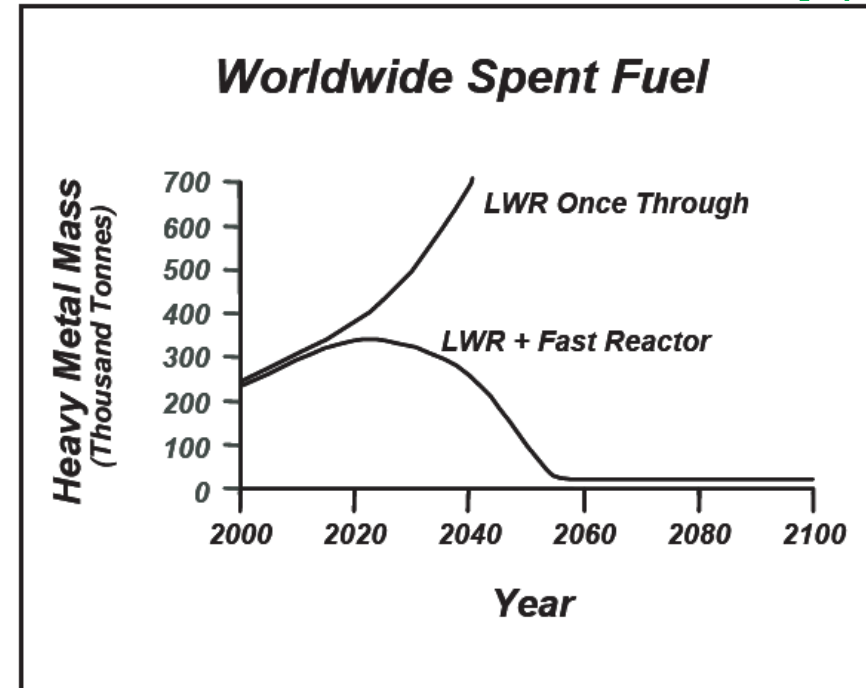
IV. Generációs reaktorok



- IV.: 2030-tól várható típusok. A biztonság és gazdaságosság terén minden eddigi tapasztalat alapján készített konstrukciók. Céljuk fenntartható energiaforrás biztosítása (villamosenergia- és hőtermelés, tengervíz sótelenítés), illetve a hidrogéntermelésben való részvétel.

Üzemanyagciklusok és fenntarthatóság

- Előrejelzések a mostani áramtermelés mellett – nyílt üzemanyagciklus:
 - Legtöbb hulladék, bár még így is kevesebb, mint más energiaforrásoké.
 - A hulladék mennyisége is limitálja ezt az opciót: néhány évtizeden belül több végleges tároló építése szükséges.
 - Ez a források legkedvezőtlenebb kihasználása, a század végére a becsült forrásokat is kihasználjuk.

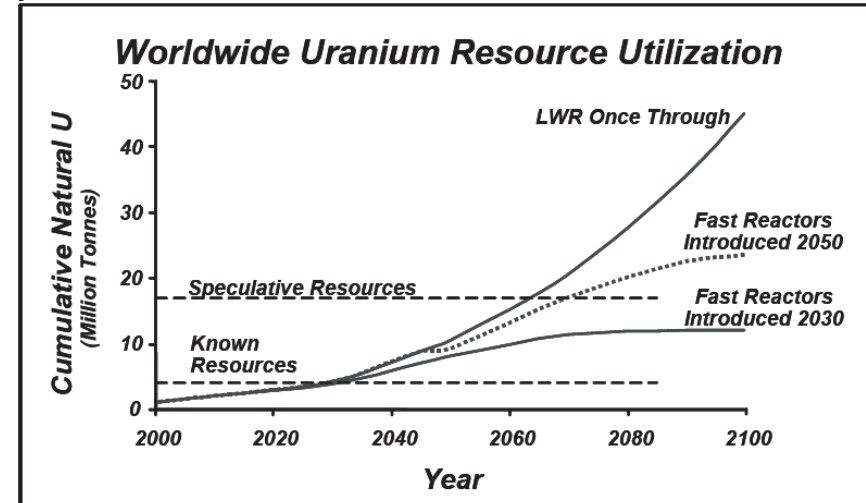
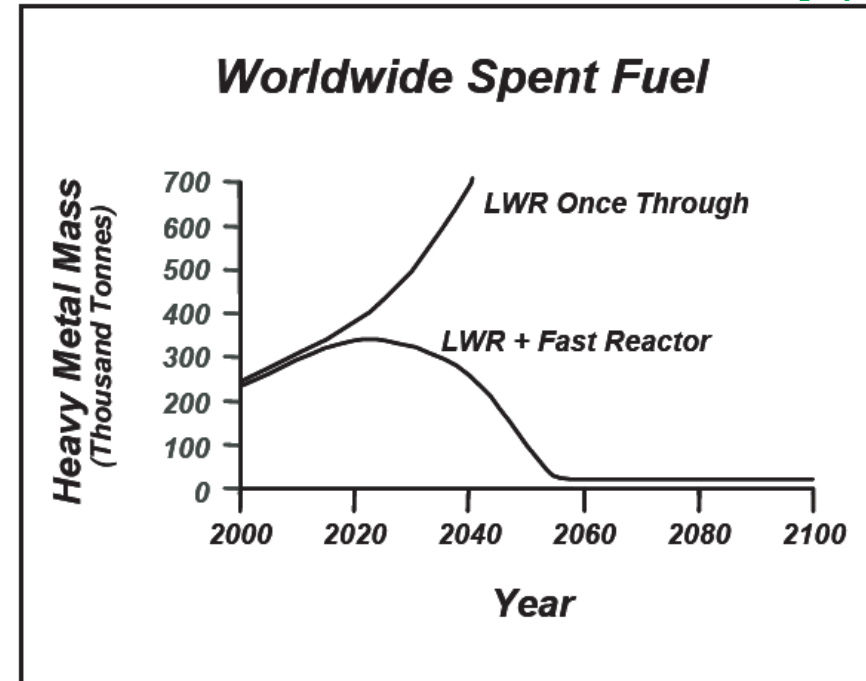


Gyorsreaktorok hatása az üzemanyag-hasznosításra

Forrás: GenIV

Üzemanyagciklusok és fenntarthatóság

- Előrejelzések a mostani áramtermelés mellett – Zárt üzemanyagciklus:
 - Jelentős mértékben csökken a hulladék mennyisége.
 - Transzmutáló berendezések használatával a hulladék mennyisége egy nagyságrenddel csökkenthető.
 - A hulladékfrakciókat elkülönítetten lehet kezelni.
 - Nagy kihívás a költségek csökkentése.
 - Fokozottabb veszély a proliferáció.

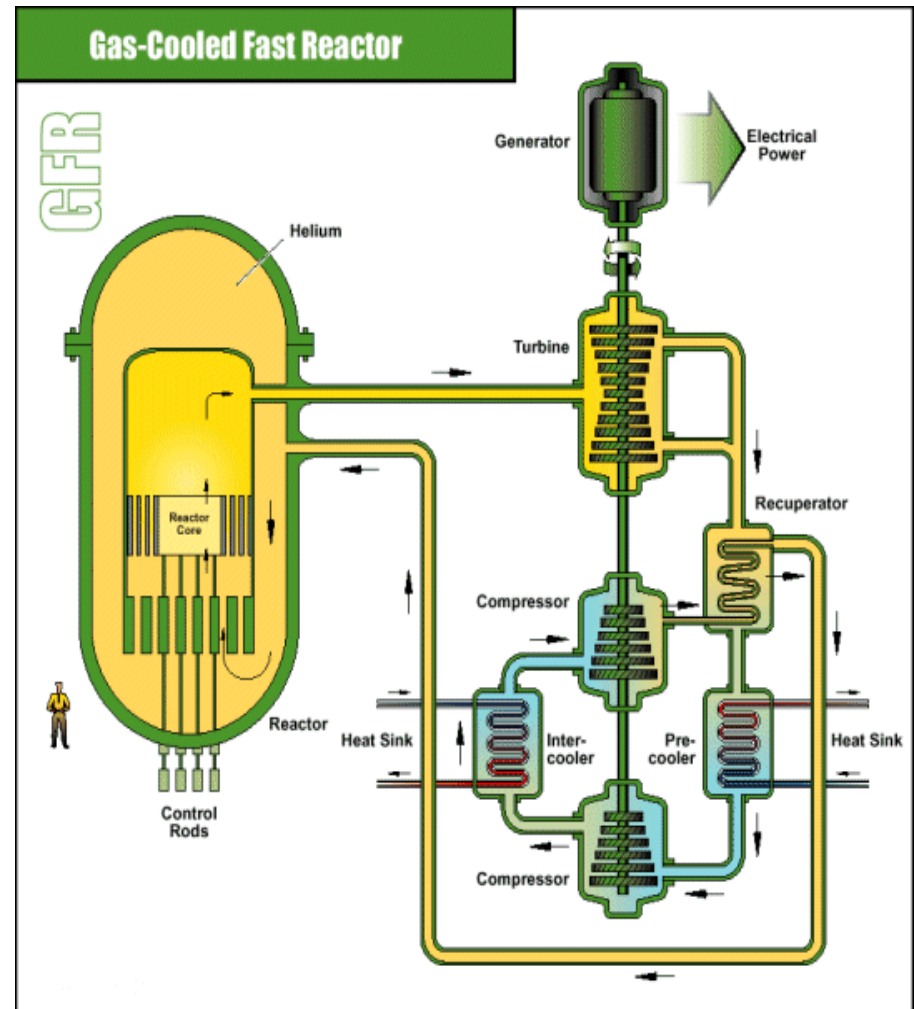


Gyorsreaktorok hatása az üzemanyag-hasznosításra

Forrás: GenIV

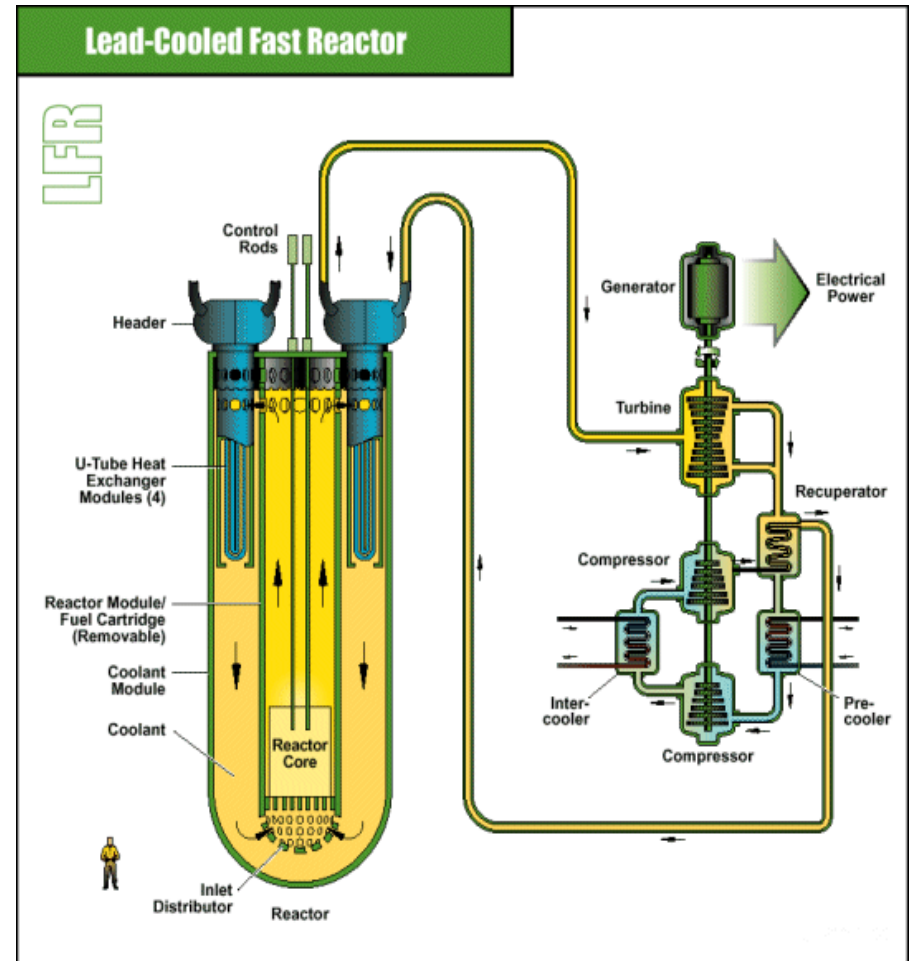
1. Gázhűtésű gyorsreaktorok

- Gas-Cooled Fast Reactor -- **GFR**
- Hűtőközeg: He gáz
- Üzemanyag: UPuC/SiC, **zárt üzemanyagciklus!**
- Termikus teljesítmény: 600 MW
- Hűtőközeg hőmérséklet: 490-850 °C
- Magas hőmérséklet: jó hatásfokkal elektromos áram, vagy hidrogéngáz termelése, hatásfok: 48%



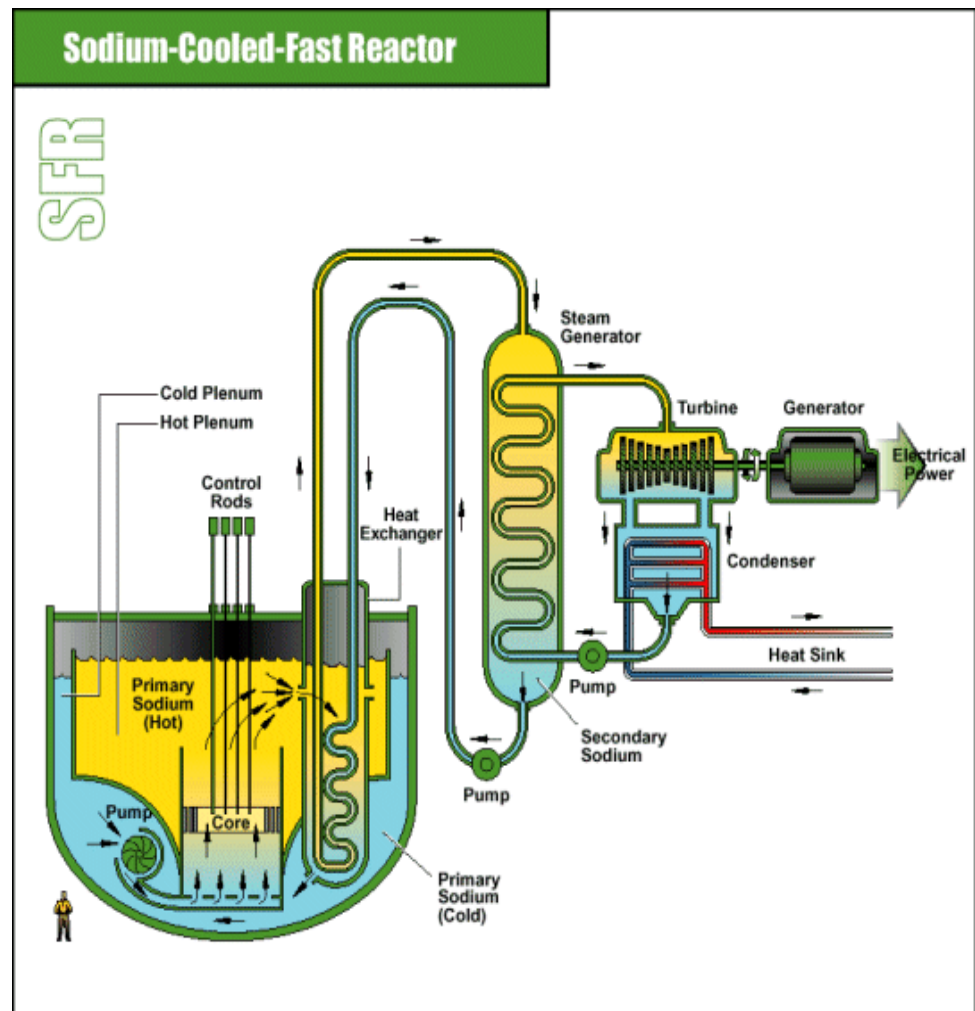
2. Ólomhűtésű gyorsreaktorok

- Lead-Cooled Fast Reactor -- LFR
- Hűtőközeg: Pb-Bi, vagy Pb
- Üzemanyag: U/Pu fém, vagy nitrid, **zárt üzemanyagciklus!**
- Termikus teljesítmény: 125 - 3600 MW
- Hűtők hőmérséklete: 550-800 °C
- Elektromos áram és hidrogéntermelés moduláris (15-20 éves kampány!) és nagy erőművi formában egyaránt.



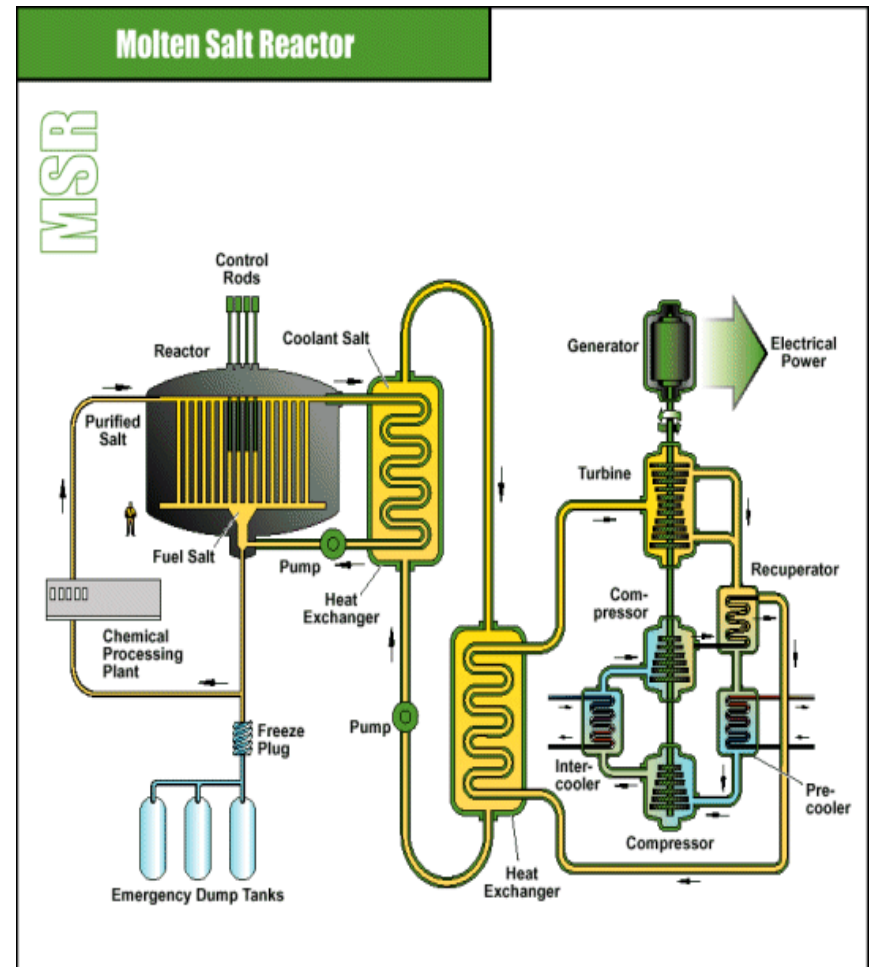
3. Nátrium hűtésű gyorsreaktorok

- Sodium-Cooled Fast Reactor -- **SFR**
- Üzemanyag: U/Pu fém vagy oxid tartalmú só, **zárt üzemanyagciklus!**
- Termikus teljesítmény: 1000 - 5000 MW
- Hűtőközeg-hőmérséklet: 530-550 °C
- Nyomás alacsony: 1 bar körüli
- Jó konverziós tényező, akár 1,3!



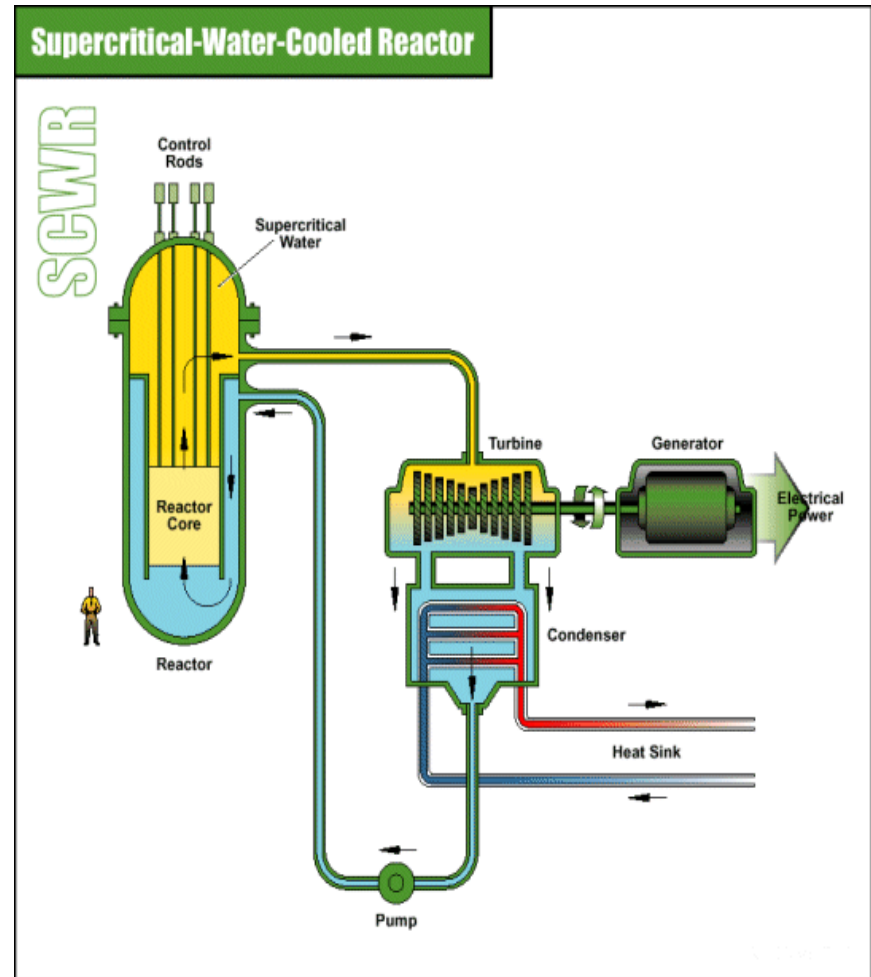
4. Olvadt sós reaktorok

- Molten Salt Reactor -- **MSR**
- Hűtőközeg és üzemanyag: U/Pu-fluorid tartalmú sóolvadék, Th fertillis anyaggal, **zárt üzemanyagciklus!**
- Elektromos teljesítmény: 1000 MW
- Hűtőközeg hőmérséklet: 565-850 °C
- Elektromos áram és hidrogéntermelés egyaránt.
- Jó konverziós tényező.
- Alkalmas aktinidák átalakítására, transzmutációra.



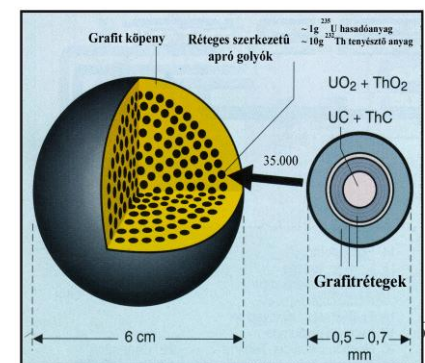
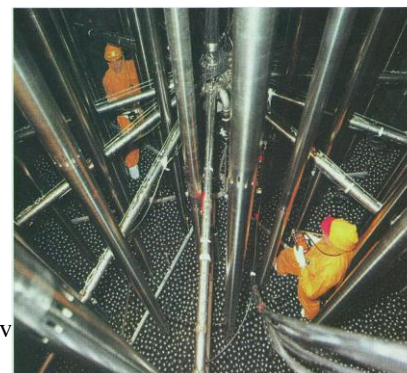
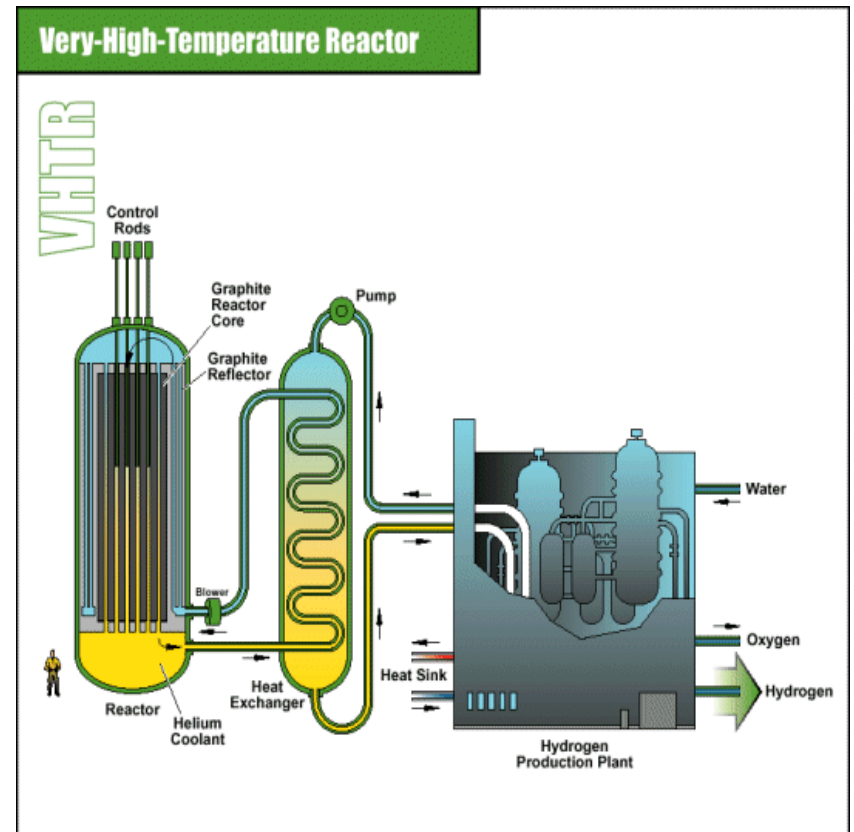
5. Szuperkritikus vízhűtésű reaktorok

- Supercritical-Water-Cooled Reactor -- **SCWR**
- Hűtőközeg: könnyűvíz.
- Üzemanyag: Hasonló a PWR üzemanyaghoz.
- Hőmérséklet és nyomás a kritikus pont felett: $>374\text{ }^{\circ}\text{C}$, $>22\text{ MPa}$, nincsen forráskrízis; gőzleválasztók, gőzsárítók, gőzfejlesztők feleslegesek.
- Termikus és gyors reaktor is.
- Jó hatásfok: 44%
- Konverziós tényező akár 1,3!



6. Nagyon magas hőmérsékletű reaktor

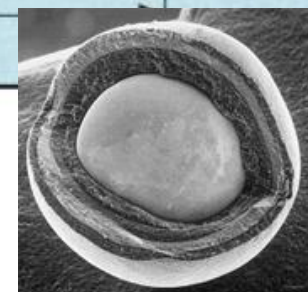
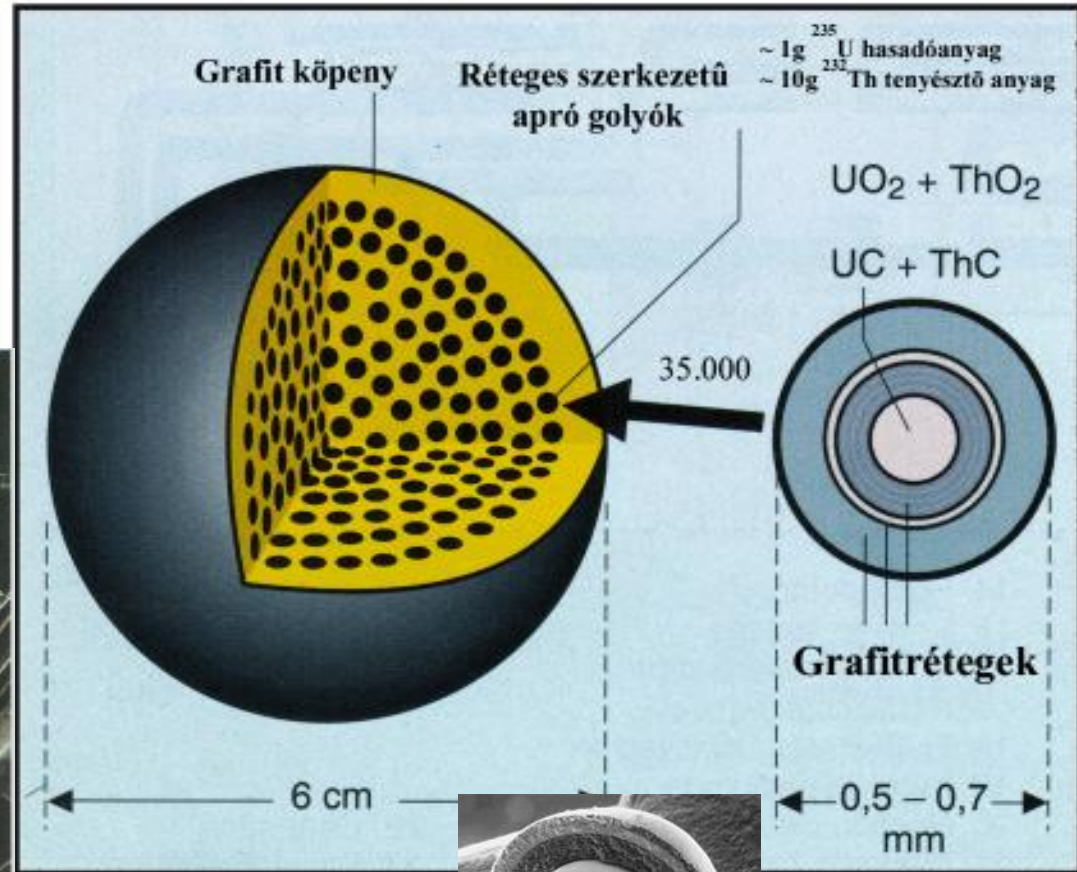
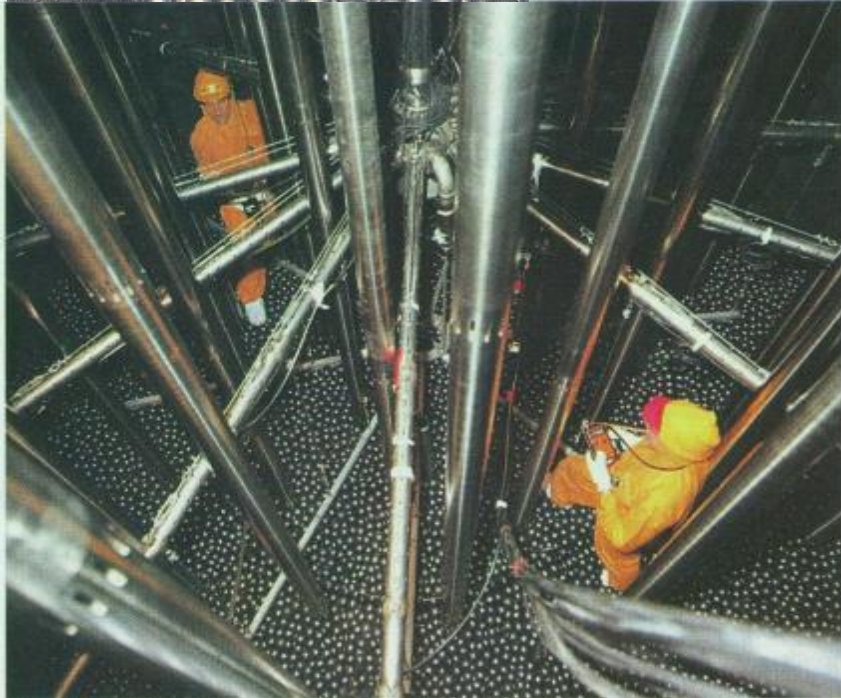
- Very-High-Temperature Reactor – VHTR
- A HTGR továbbfejlesztése.
- Gázhűtésű reaktor akár közel 1000 °C-os hőmérsékletű hűtőközeggel.
- Elektromos áram és hidrogéntermelés.
- Hatásfok 50% felett.



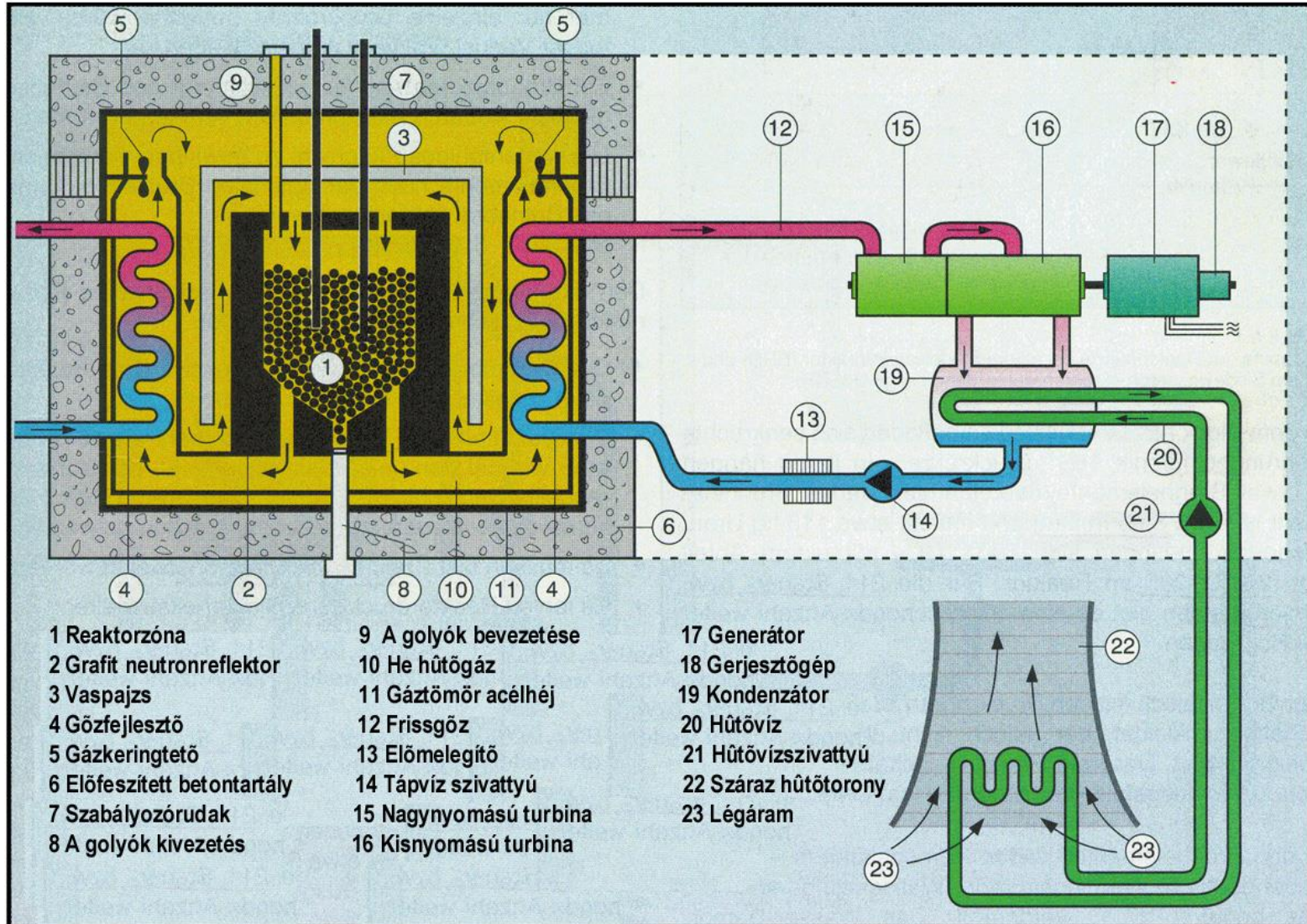
Előd: magas hőmérsékletű tóriumos reaktor (THTR)

Atomerőműv

Magas hőmérsékletű tóriumos reaktor (THTR)



Magas hőmérsékletű tóriumos reaktor (THTR)



Magas hőmérsékletű tóriumos reaktor (THTR)

Termikus teljesítmény	759.5 MW
Elektromos teljesítmény	307.5 MW
Hatásfok	40,49 %
Hasadóanyag	U-235
Az U-235 hasadóanyag tömege	344 kg
Tenyésztőanyag	Th-232
Tenyésztőanyag tömege	6 400 kg
A nehézfém hasadó anyag tartalma	5.4 %
Abszorbens anyaga	B ₄ C
Üzemanyagot tartalmazó golyók száma	360.000
Grafit (moderátor) golyók száma	280.000

Abszorbens golyók száma	35.000
Primer kör:	
Hűtőközeg	He
Kilépő hőmérséklet	750 °C
Nyomás	39.2 bar
Szekunder kör:	
Munkaközeg	H ₂ O
Tápvíz hőmérséklet	180 °C
Frissgőz hőmérséklet	530 °C
Frissgőz nyomás	177.5 bar



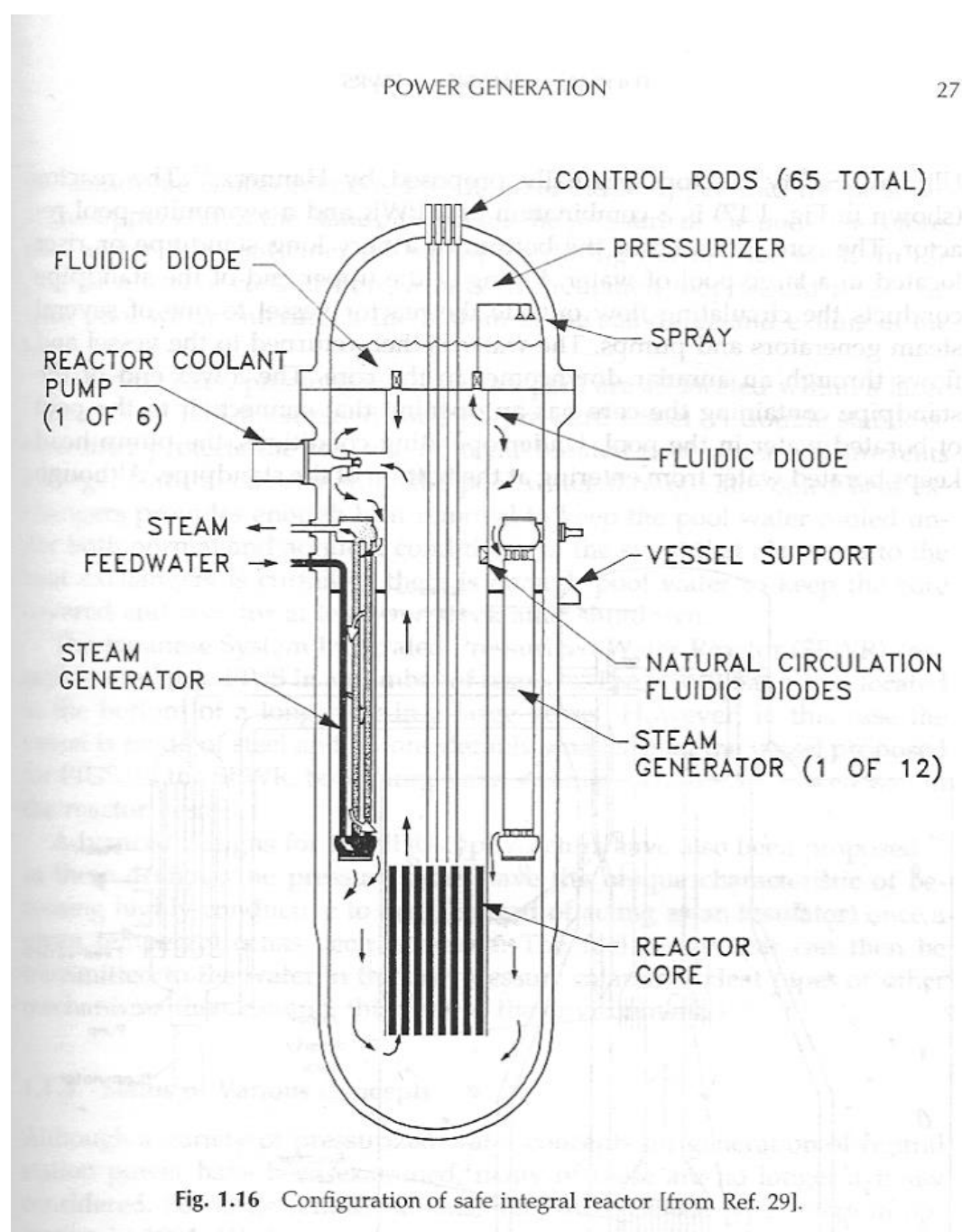
Hamm (Németország)

SMR – KIS MODULÁRIS REAKTOROK

SMR – kis, moduláris reaktorok

- Az 50-es évek óta az atomerőművek teljesítménye 5 MW-ról 1600 MW-ra nőtt
- Továbbra is sok kis teljesítményű (<200 MW) reaktor, de főleg egyéb alkalmazásokra
- Költségcsökkentés sztenderdizálással, moduláris építéssel
- Biztonság növelése: pl. földfelszín alá telepítéssel
- Távoli régiók (Alaszka, Szibéria) áram- és hőellátásához, sóatlanító üzemekhez
- 10-100 MW elektromos teljesítményű blokkok
- Jellemzők: magas dúsítású urán üzemanyag (4-20 %), kis méretű aktív zóna, ritka üzemanyagcsere (2-15 év), passzív rendszerek

Integrált reaktor konceptiója



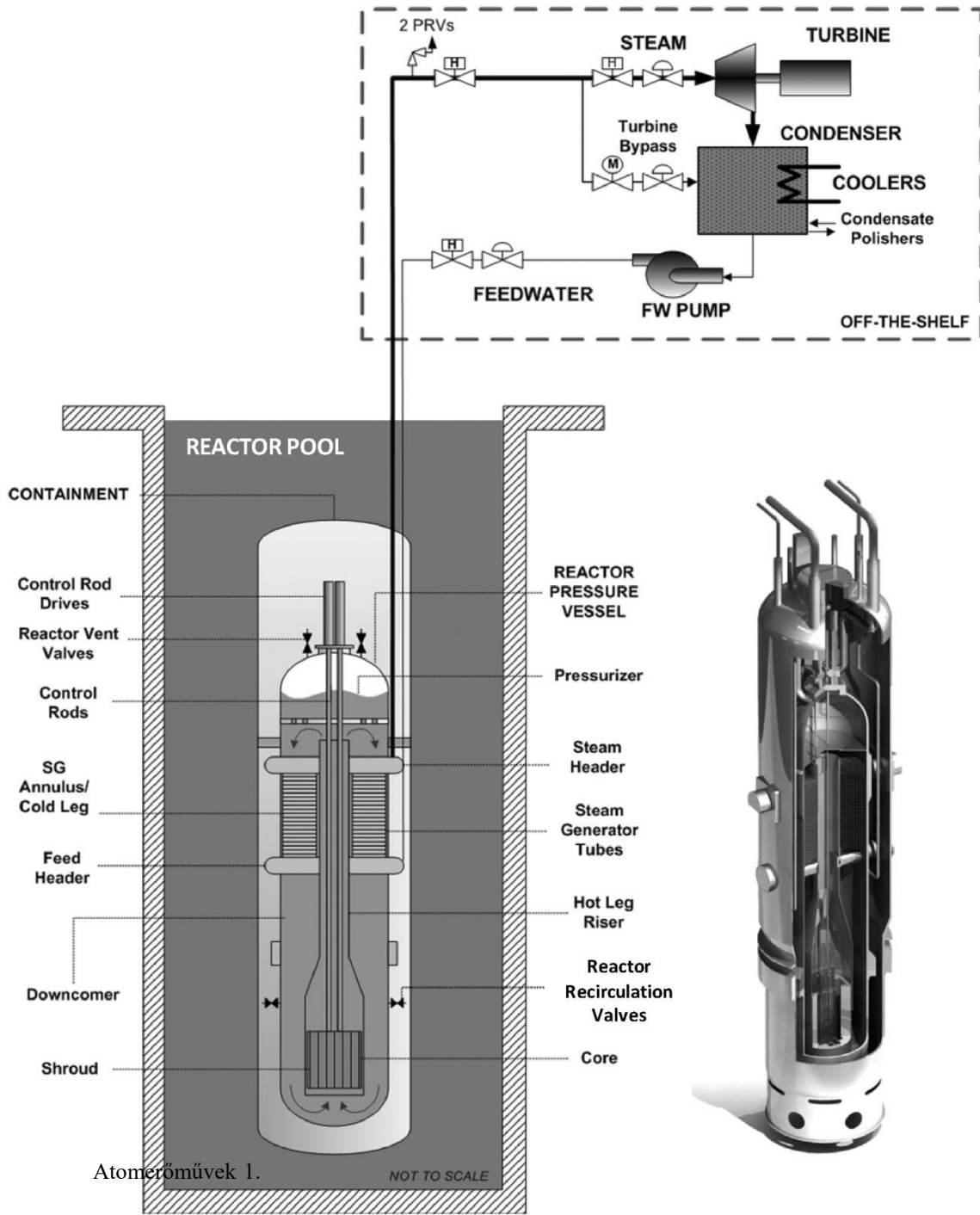
NuScale

- A NuScale a legelőrehaladottabb SMR projekt az USA-ban
- Típusengedély-kérelem beadva 2016 végén (már Kanadában is)
- Egy reaktor teljesítménye 160 MWth / 50 Mwe
- Egy kiépítésen max. 12 reaktor
- Normál üzemben is természetes cirkuláció a primer körben

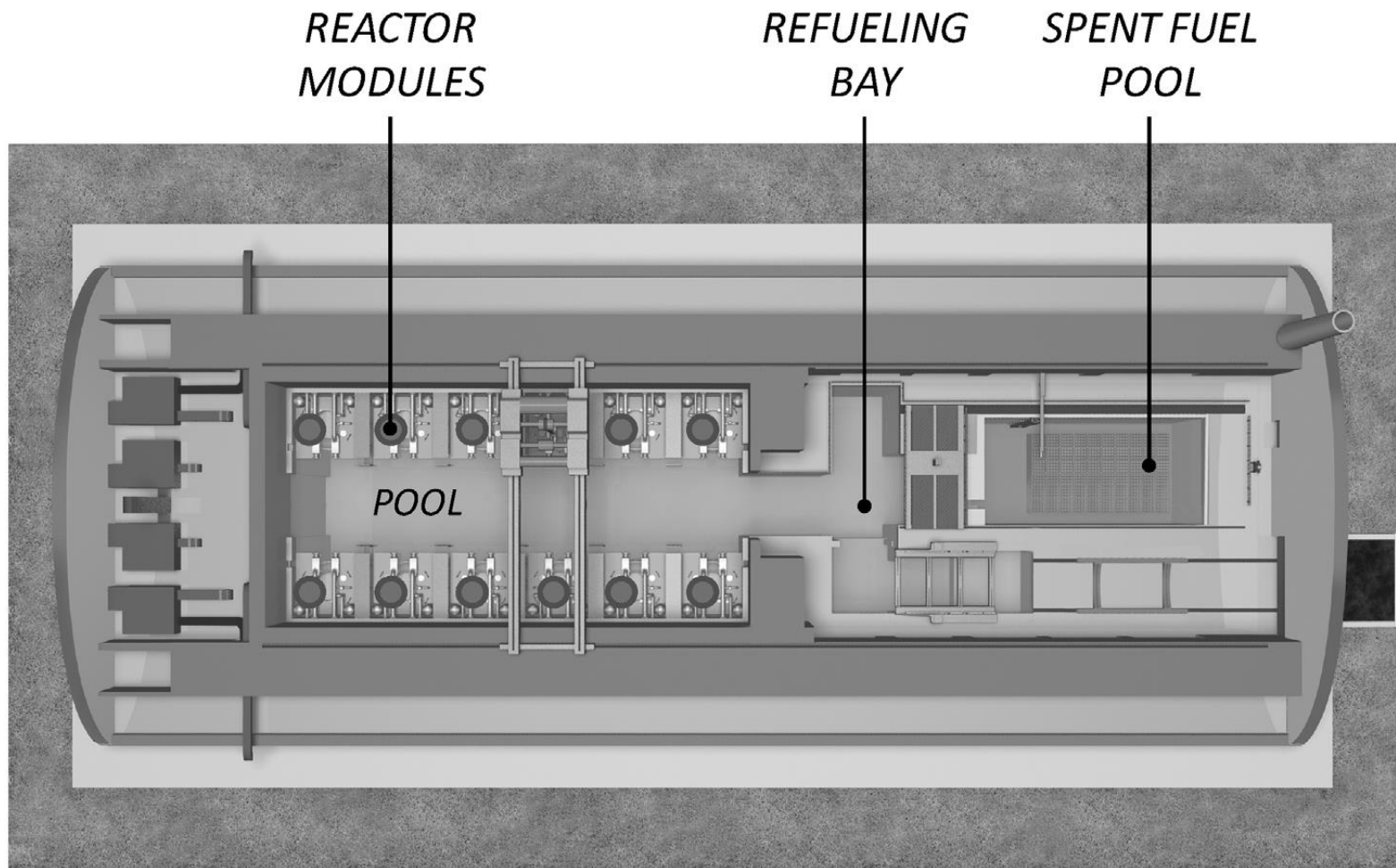


NuScale

- Minden reaktornak saját turbógenerátor-gépcsoport
- Kisebb turbinák -> egyszerűbb szállítás, karbantartás
- Helikális GF hőátadó csövek
- Konténment tartály
- Integrált térfogatkompenzátor

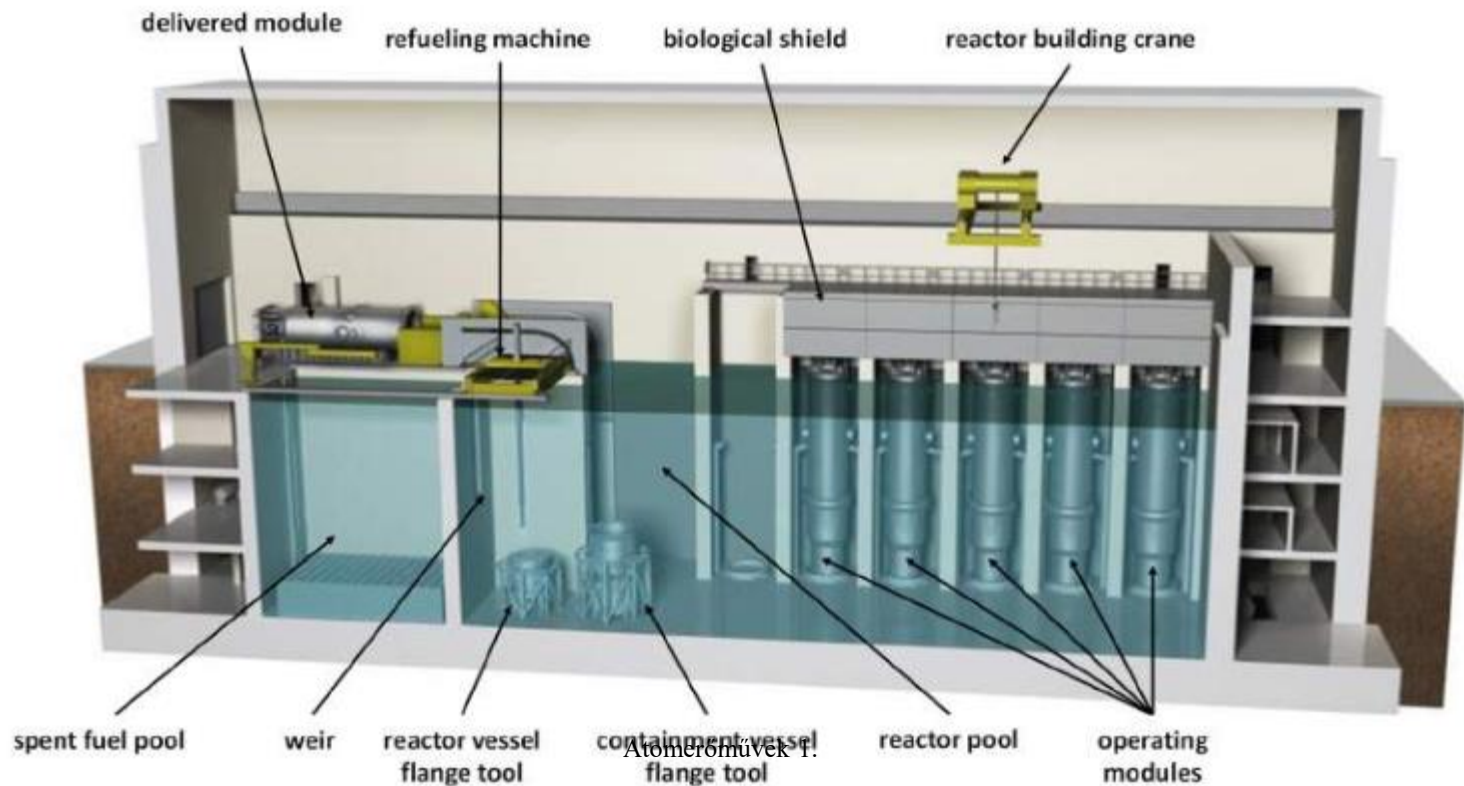


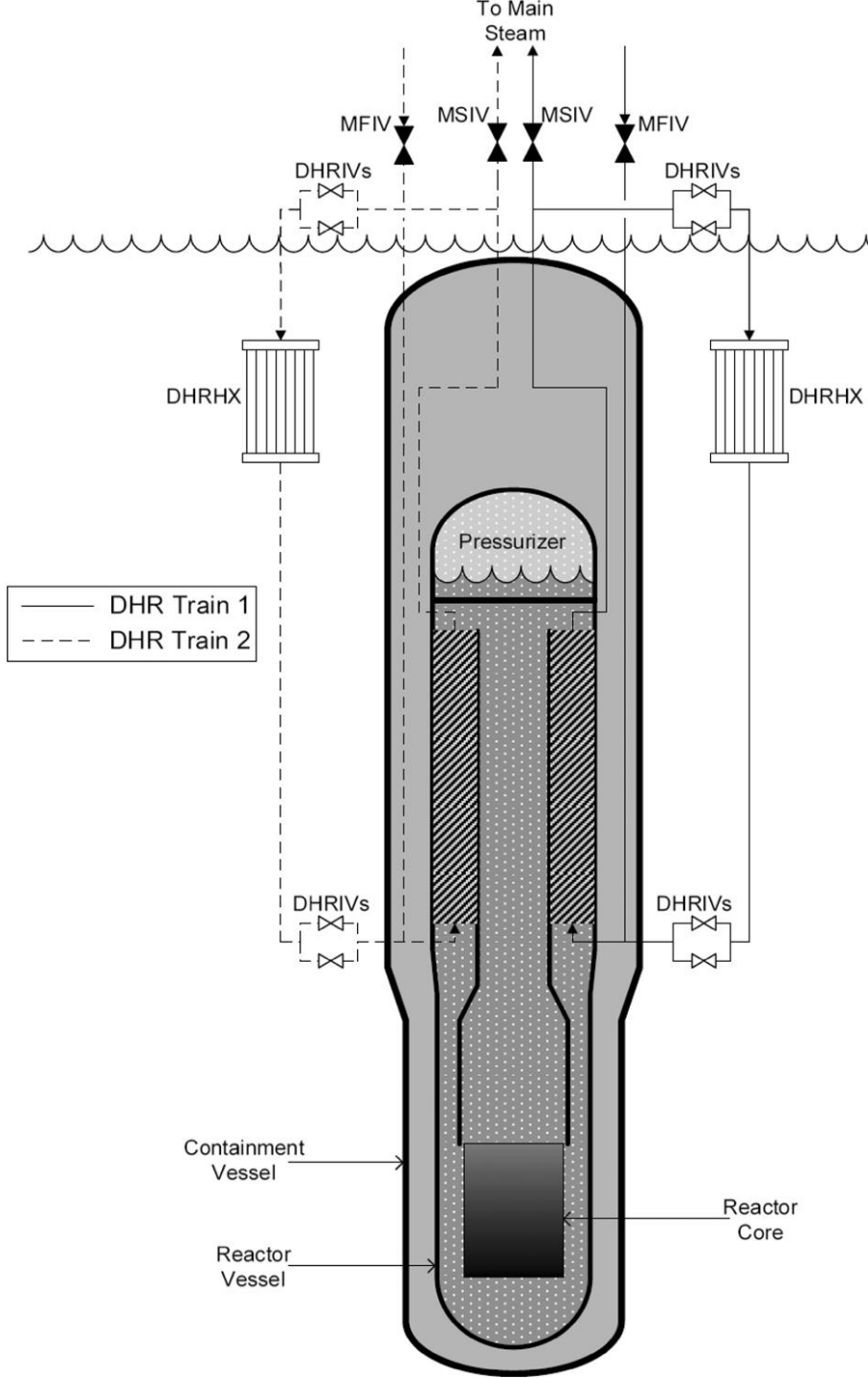
NuScale



NuScale

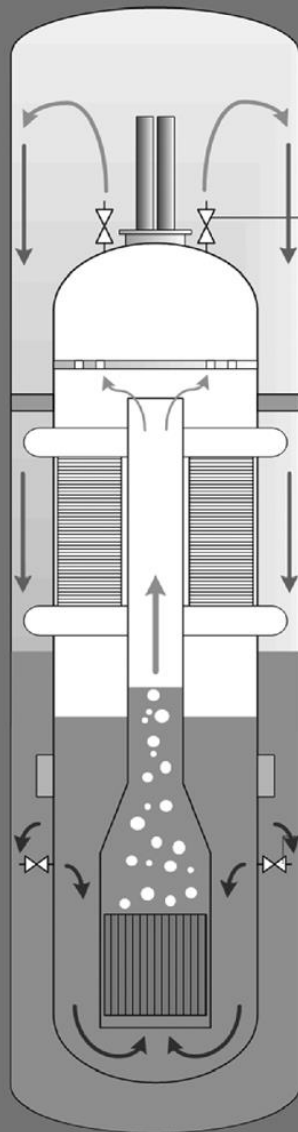
- A reaktorok közös vízmedencében helyezkednek el (talajsztint alatt)
- 0,5 g PGA-ra (peak ground acceleration) méretezve
- Biztonság: csak passzív eszközökkel (végső hőelnyelő a medence vize)





- Passzív remanenshő-
elvonó rendszer
- Hőelvonás a
szekunder oldalon
keresztül
- Pl. SBO esetére

Reactor Pool



Reactor
Vent Valves
(Outlet)

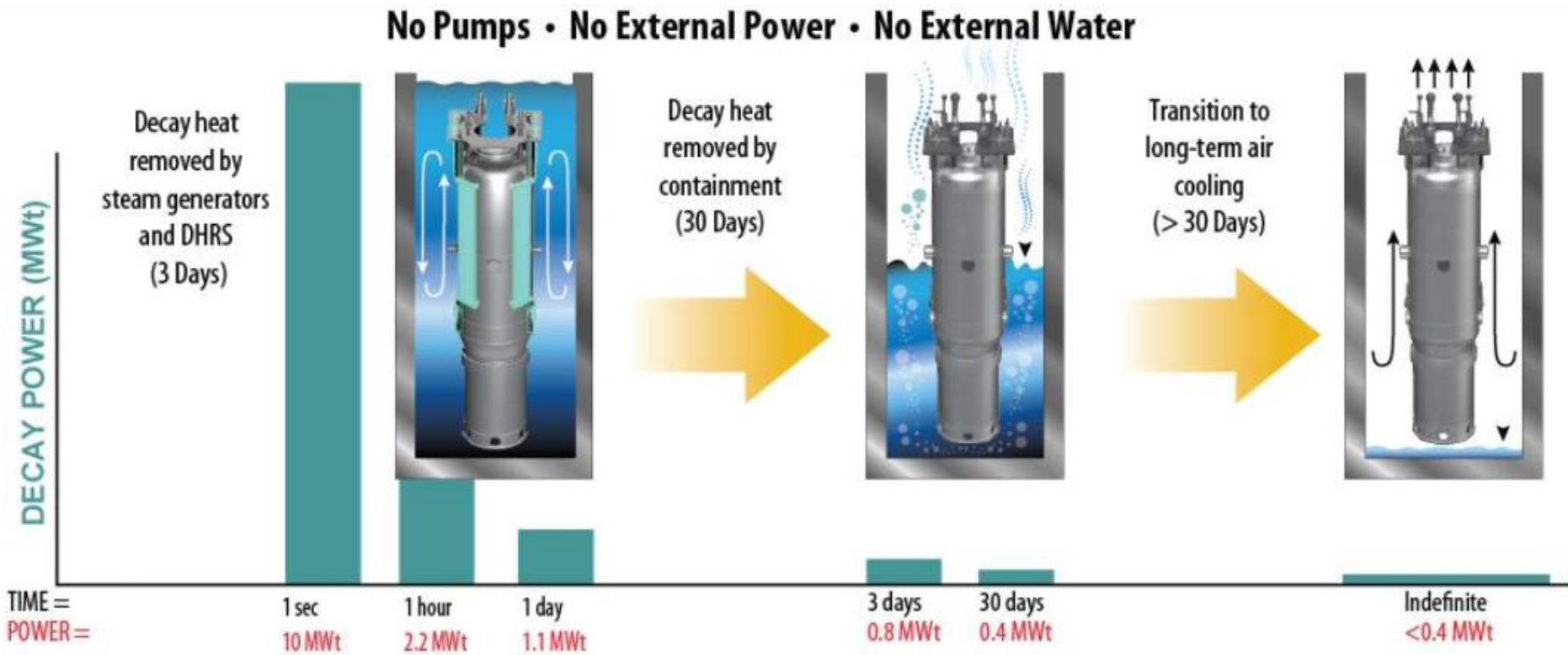
Reactor
Recirculation
Valves

NOT TO SCALE

- Passzív
üzemzavari
zónahűtés és
passzív
konténment hűtés

NuScale

- Hosszú távú remanens hőelvonás



Nuscale

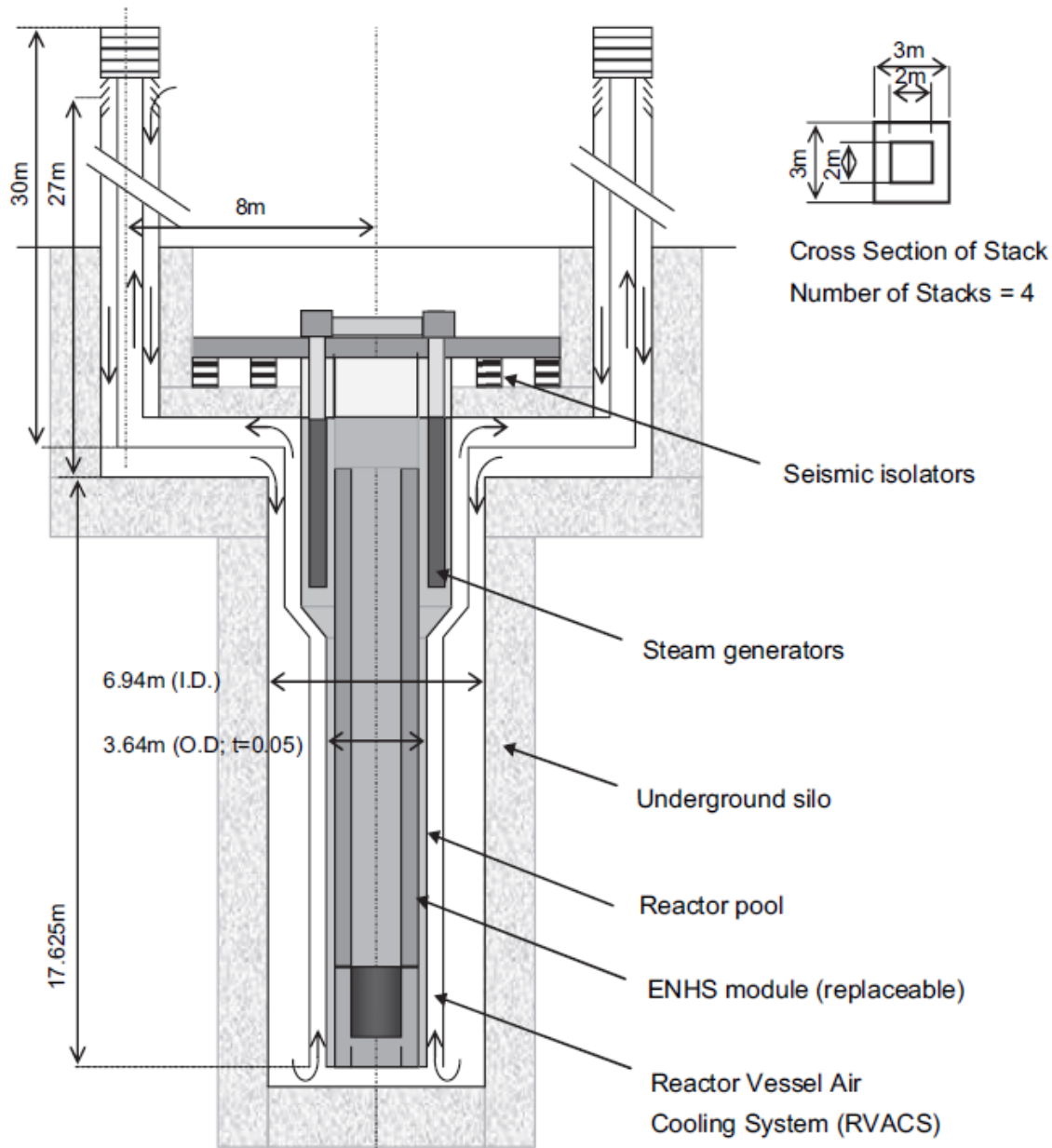
- „Folyamatos” átrakás
- Széles tartományban manőverezhető (egyres reaktorok teljesen le is kapcsolhatóak a rendszerből, ill. méret miatt kevésbé érzékeny bizonyos teljesítményfüggő hatásokra)
- Terheléskövető mód lépései:
 - Másodperces-órás tartományban akár 100% turbina bypass;
 - Perces-órás tartományban teljesítményváltozás (100% - 20% - 100%)
 - Napos tartományban egyes reaktorok leállítása
- Akár teljes mennyiségű hőkiadás (200 MWt hőteljesítmény gőz)

Kis teljesítményű, moduláris reaktorok (SMR)

Az ENHS-projekt

- Encapsulated Nuclear Heat Source
- USA-fejlesztésű, 50 MWe teljesítményű reaktor folyékony Pb-, vagy Pb-Bi hűtéssel
- 13% dúsítás (U-Zr, vagy U-Pu-Zr ötvözet)
- üzemanyag-átrakás 15 évente
- hűtőközeg be/kilépő hőmérséklete: 400/550 °C
- a primer körben nincs szivattyú ill. szelep
- szilárd hűtőközeggel szállítanak, a helyszínen olvasztanak fel
- az üzemelés után addig tárolnák a telephelyen, amíg a hűtőközeg újra meg nem szilárdul, ami egyúttal a kiégett fűtőelemek szállításánál konténerként szolgálna

Kis teljesítményű, moduláris reaktorok (SMR)

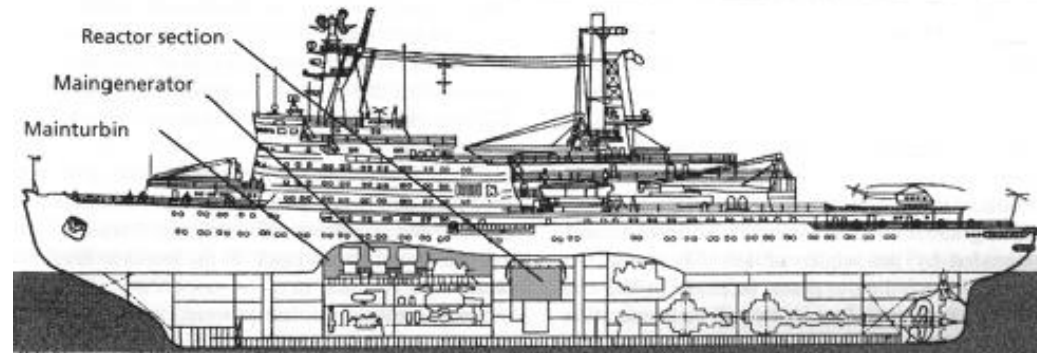


Atomeromuvek 1.

ÚSZÓ REAKTOROK (JÉGTÖRŐK, ÚSZÓ ATOMERŐMŰVEK)

Atomjégtörők

- Jelenleg 6 atomjégtörőből álló flotta
- Az első atomjégtörő a szovjet Lenin volt (1959-1989)
- Három, egyenként 90 MW termikus teljesítményű PWR hajtotta, 5% dúsítású urán-oxid üzemanyaggal



Lenin (SZU) (1957-1989)

Arktika (SZU) (1975-)

Egzotikus reaktorok - jégtörők

- Az újabb atomjégtörőknek fejlesztették a KLT-40 típusú atomreaktort. (35 MW elektromos teljesítményű PWR U-Al ötvözetből készült üzemanyaggal. Zónája 0.95 m magas, 1.2 m átmérőjű.)



A Yamal (RU, 1993-) turistákat szállít a sarkkörre

Egzotikus reaktorok - úszó erőművek

Történelem:

- Az USA 1950 és 1979 között több kis méretű, kompakt, hordozható atomerőművet gyártott katonai célokra
- Az úszó atomerőművek távoli katonai létesítmények áramellátását szolgálták (Grönland, sarkvidéki területek)
- A program a magas költségek miatt zárult le.



*Az MH-1A Sturgis katonai úszó erőmű
(az utolsóként épített katonai úszó erőmű,
45 MW PWR)*

Egzotikus reaktorok - úszó erőművek

- Az Akademiik Lomonoszov 2019 végén megkezdte a termelést
- Oroszország távol-keleti régióinak áramellátásához
- Orosz-kínai együttműködés



Adatok:

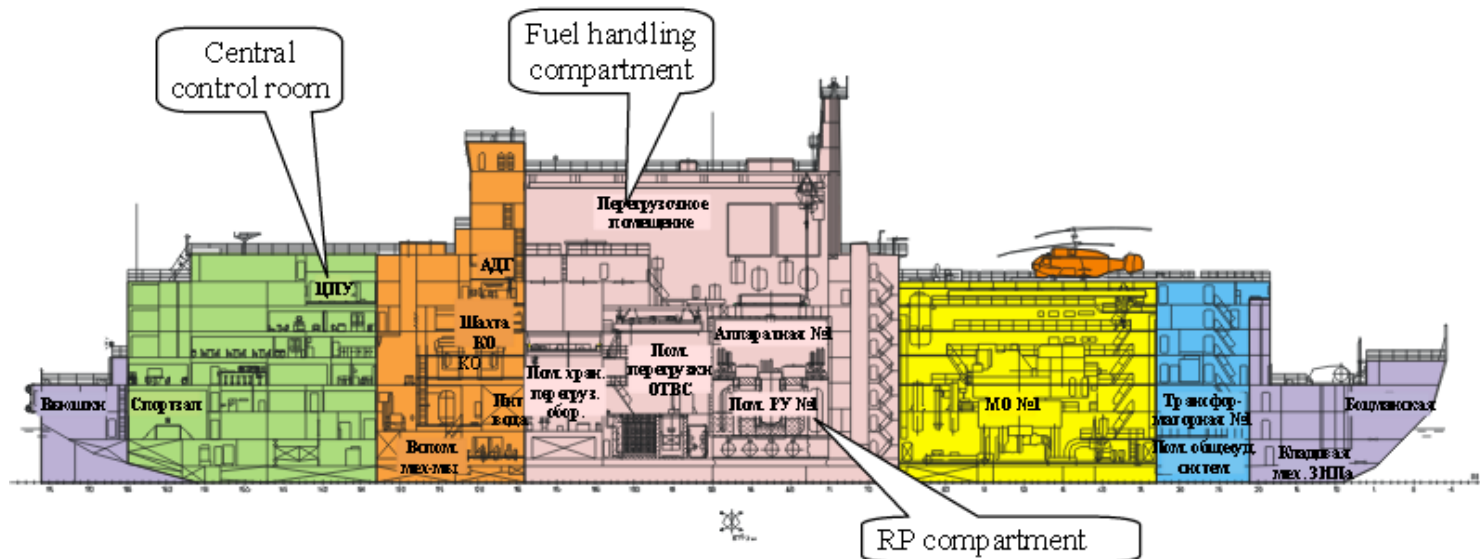
- 2*35 MW el. teljesítmény (KLT-40S típusú nyomottvizes reaktorral)
- 40 év üzemidő, 3 évente átrakás
- üzemeltető személyzet: 60 fő
- Villamos energia termelés mellett távhő-szolgáltatásra és tengervíz sótalanításra is használható



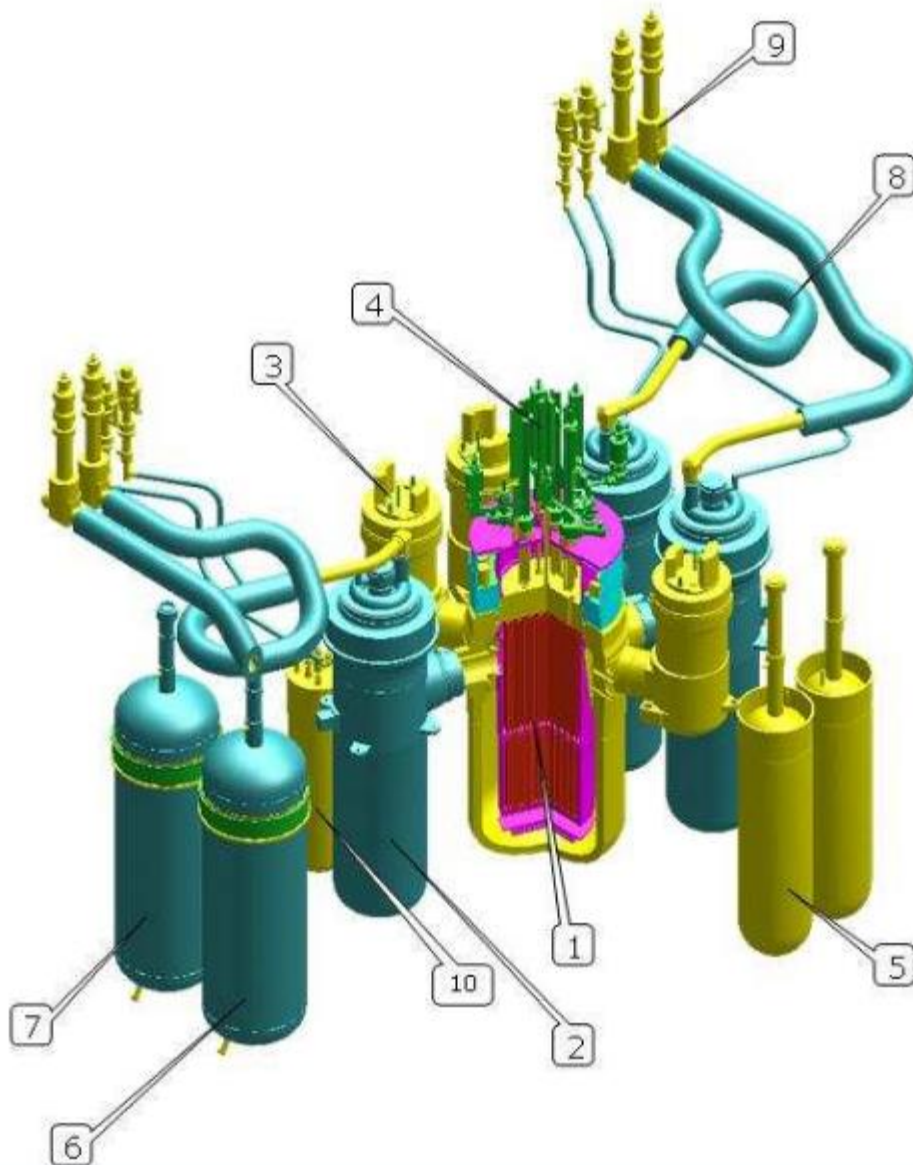
Az úszó erőmű terve

Úszó atomerőmű (KLT-40S)

- 2 db KLT-40S reaktor (a jégtörőkön használt KLT-40 alapján fejlesztve)
- Kis méretű, kompakt primerkör
- 4 hurok
- „Once-through” gőzfejlesztő
- Térfogatkompenzátor külső gázrendszerrel
- Passzív biztonsági rendszerek



Úszó atomerőmű (KLT-40S)



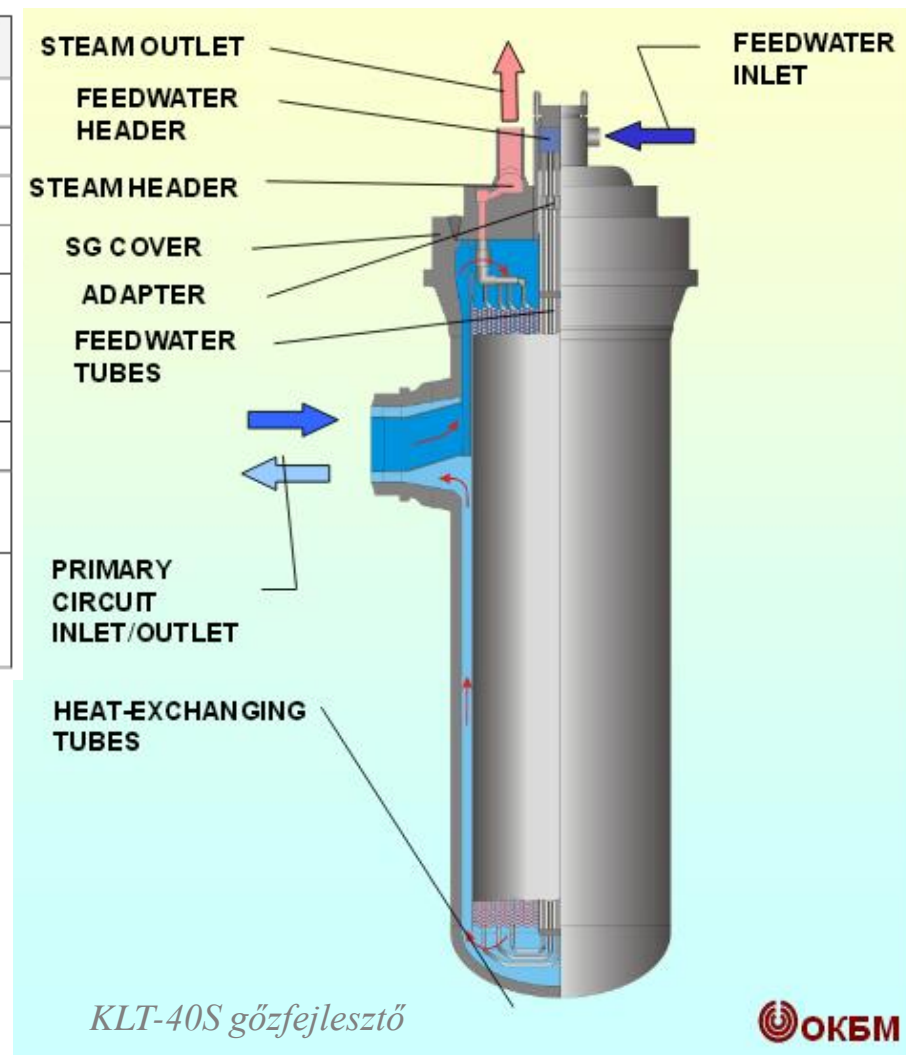
- 1- Reactor
- 2- SG
- 3- MCP
- 4- Control rod drive mechanisms
- 5- ECCS accumulator
- 6- Pressurizer (1st vessel)
- 7- Pressurizer (2nd vessel)
- 8- Steam lines
- 9- Localizing valves
- 10- HX of purification and cooldown system

Úszó atomerőmű (KLT-40S)

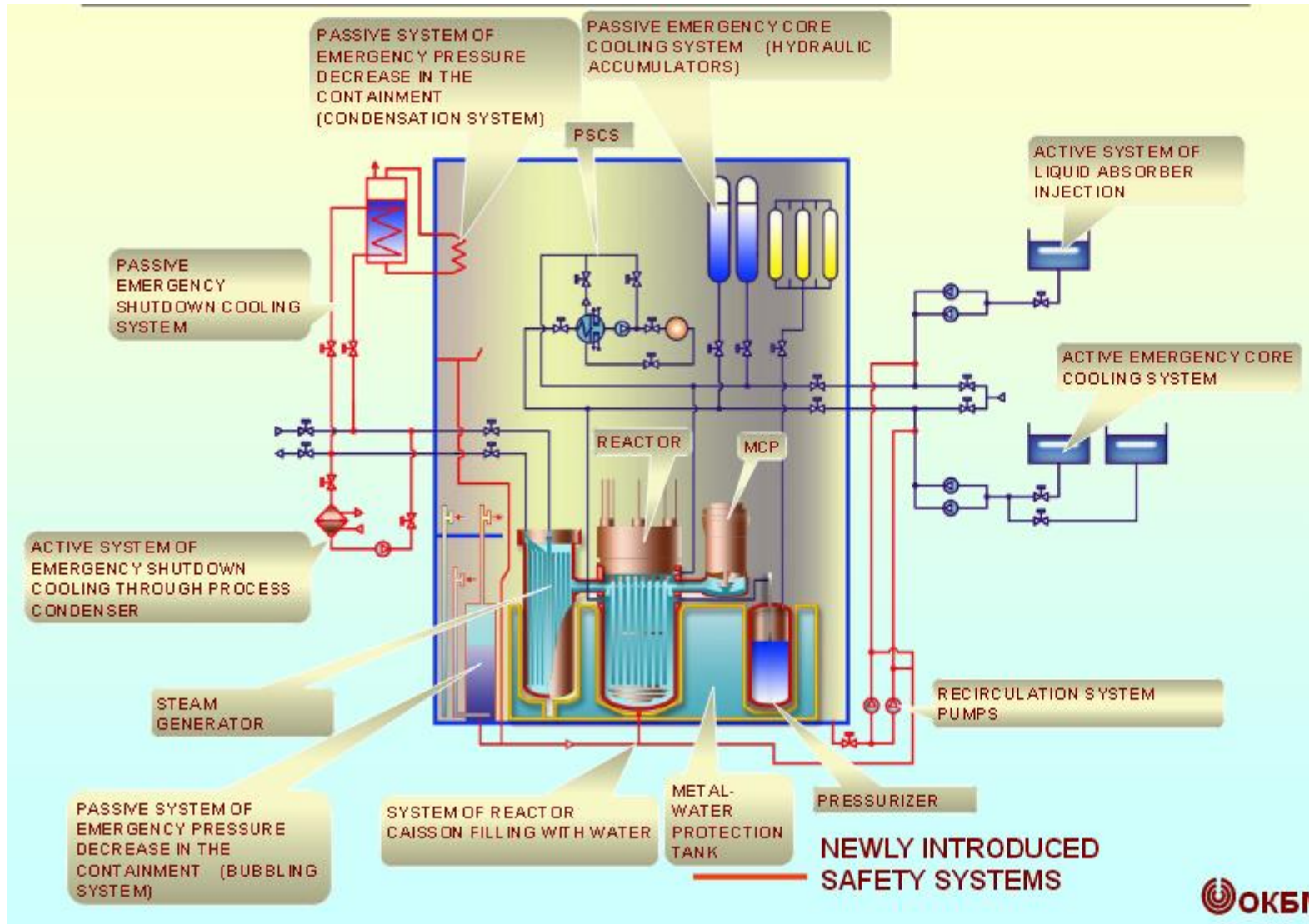
Parameter	Value
1 Thermal power, MW	150
2 Number of FAs	121
3 FA across flats size, mm	98.5
4 Triangular lattice pitch, mm	100
5 Core diameter, mm	1220
6 Core height, mm	1200
7 FE dimensions across cladding, $\varnothing \times \delta$, mm	6.8 \times 0.5
8 FE cladding material	Zirconium alloy
9 Absorber element layout in FA	Central absorber element
10 Number of control rods in the core	8 compensating rods + 3 emergency protection rods

PSA Level 1 results

Scope of PSA	Core damage frequency (1/reactor*year)
PSA Level 1 for internal initiating events for full power	$< 10^{-7}$
PSA Level 1 for low power and shutdown modes	$\sim 3 \cdot 10^{-9}$



Úszó atomerőmű (KLT-40S)



A KLT-40S biztonsági berendezései

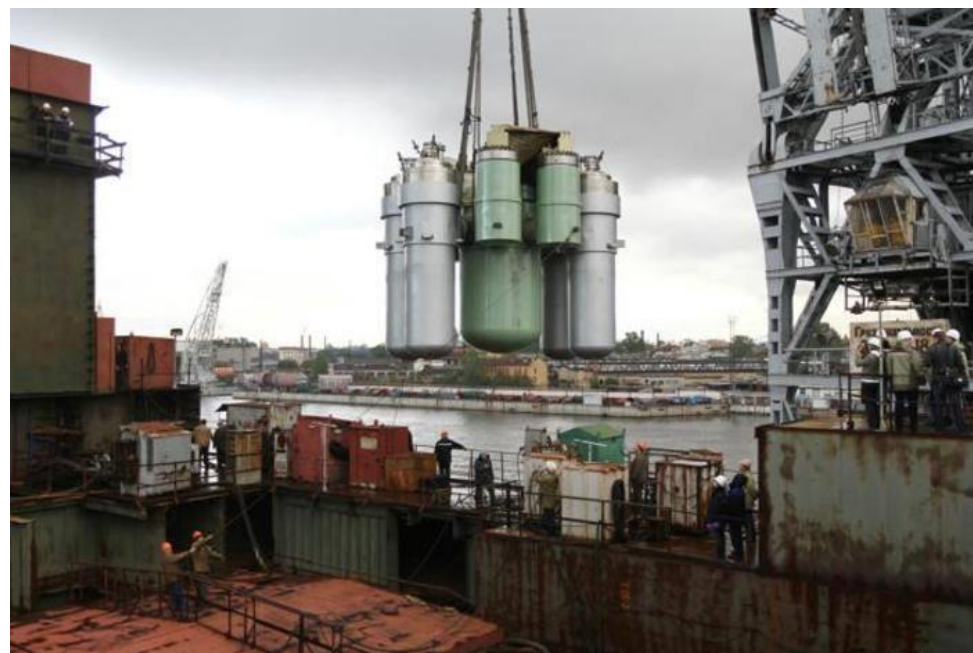
Akademik Lomonoszov – az első úszó atomerőmű

- Névadója Mihail Vasziljevics Lomonoszov (1711 –1765) orosz fizikus, kémikus, prózaíró, költő
- Az első kereskedelmi úszó atomerőmű (két KLT-40S reaktorral)
- Az építés 2007-ben kezdődött a szeverodinszki Szevmas hajógyárban, de 2009-ben a szentpétervári Balti Hajógyárba tették át
- Tervezett indulás: 2018
- Célállomás: Csukcs Autonóm Tartomány, Pevek

Plans for Floating Nuclear Power Plants



* Initial choice, later changed to Saint Petersburg

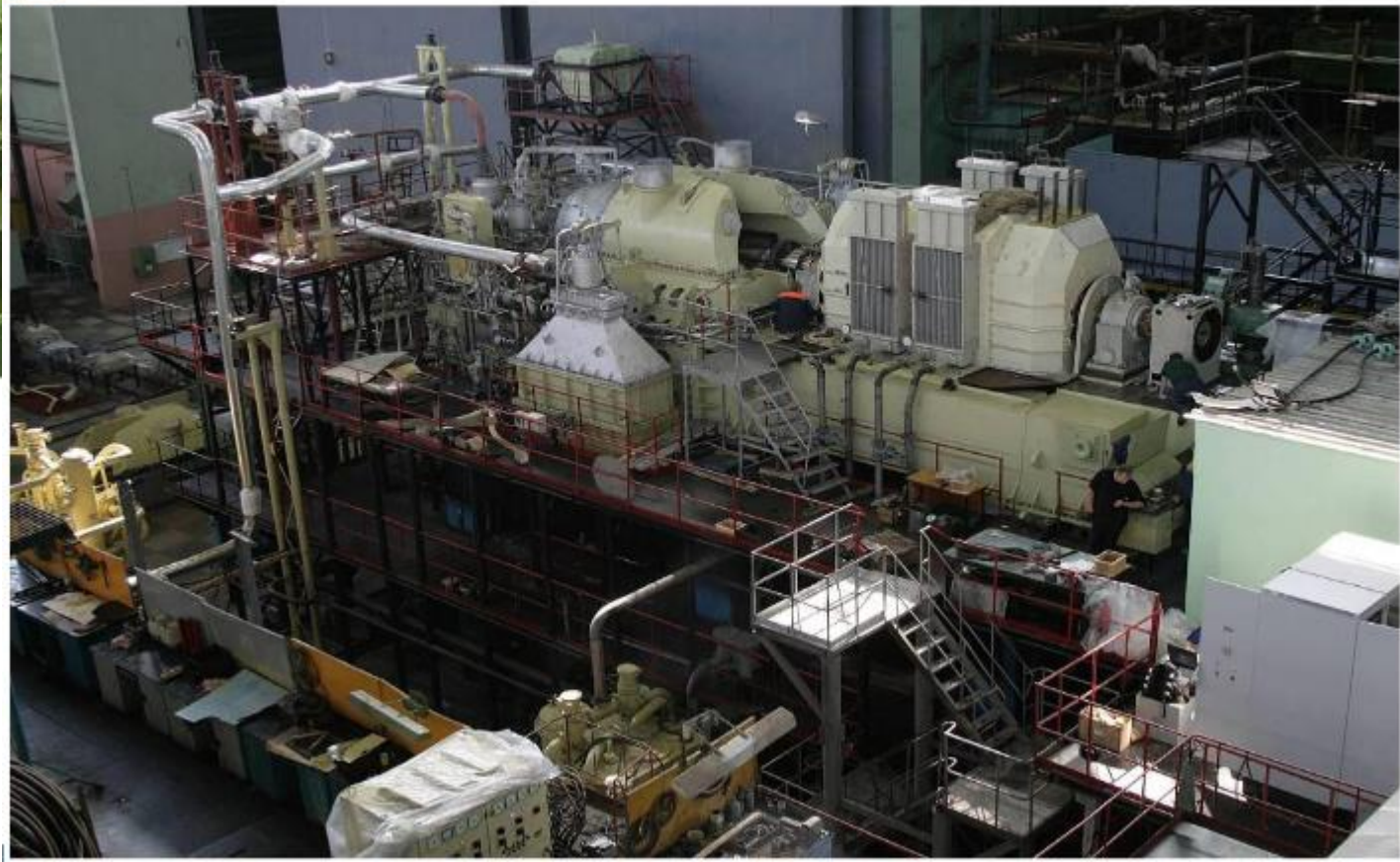


Atomerőművek 1.

STEAM GENERATOR UNIT



STEAM POWER UNIT AT ENGINEERING PLANT







2020. 03. 25.

Atomerőművek 1.

ACP100S – a kínai úszó atomerőmű

- 100 MW-os integrált nyomottvizes reaktortípus
- A demonstrációs reaktor építése 2017-ben kezdődik, 2019-re lesz kész a tervek szerint

