

Folyékony fém hűtésű reaktorok, sólvadékos reaktor

Korszerű nukleáris energiatermelés

Dr. Yamaji Bogdán
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Nukleáris Technikai Intézet

LMR-ek reaktorok a világban

- Üzemelő

Típus	Blokkok száma	Össz MW(e)
BWR	72	71 102
FBR	3	1400
GCR	14	7720
LWGR	15	10 219
PHWR	49	24 598
PWR	301	285 246
Összesen:	454	400 285
Típus	Blokkok száma	Össz MW(e)
BWR	4	5253
FBR	1	470
HTGR	1	200
PHWR	4	2520
PWR	44	46 570
Összesen:	54	55 013

- Épülő

PRIS database. Last update on 2018-12-01 (<http://www.iaea.org/PRIS/home.aspx>)

Statisztika

- Üzemelő blokkok
 - BELOYARSK-3: BN-600 600 MWe (gross) 1980/04/08
 - CEFR: BN-20 25MWe (gross) 2011/07/21
 - BELOYARSK-4: BN-800 864 MWe (gross) 2016/10/31
- Építés alatt
 - PFBR: Prototype FBR 500 MWe (gross) 2004/10/23
- Leállítva
 - PHENIX: PH-250 142 MWe (gr) 1973/12/13 2010/02/01
 - SUPER-PHENIX: Na-1200 1242 MWe (gr) 1986/01/14 1998/12/31

Statisztika



Prototype Fast Breeder Reactor (PFBR)
Kalpakkam, India, építés kezdete:2004 okt.
üzem tervezett kezdete: 2015. március



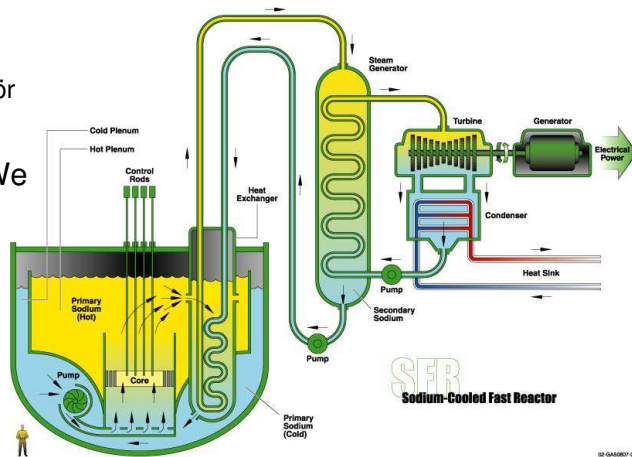
BN-800: építés kezdete: 2006. július

China Experimental Fast Reactor (CEFR), hálózatra csatlakozás:2011. július 21.



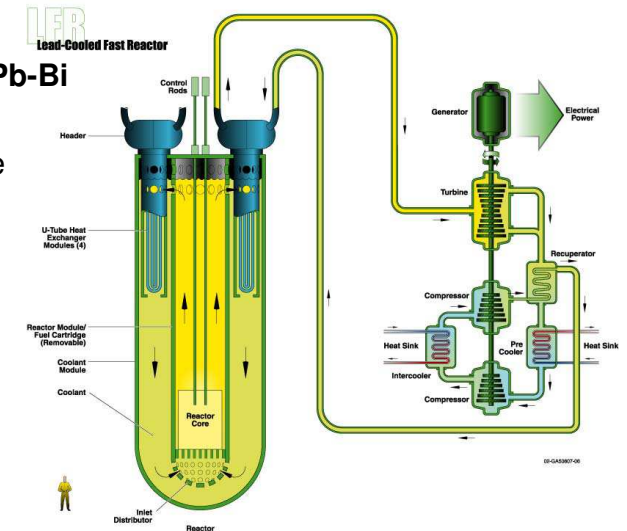
Gen IV koncepció jellemzők - SFR

- **Hűtőközeg: Na**
 - közbelső hűtőkör
- Tki: ~550 °C
- P: 150–1500 MWe
- fémurán vagy MOX ŰA
- **Előnyök:**
 - hulladék mennyiségének minimalizálása
 - Jó uránhasznosítás



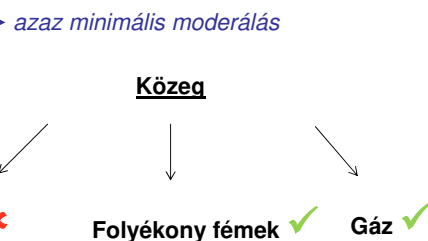
Gen IV koncepció jellemzők - LFR

- **Közeg: Pb vagy Pb-Bi**
- Tki: ~550–800 °C
- P: 500–1200 MWe
- fém urán vagy MOX ŰA
- Kampányhossz: 15 – 30 év
- **Előnyök:**
 - Proliferációálló
 - Passzív biztonság



Miért folyékony fém?

- Generation IV célok
 - transzmütáció, aktinida égetés
 - ŰA ciklus zárása
 - Magas hőmérséklet, folyamathő hasznosítás
 - távfűtés
 - tengervíz sótlanítás
 - Olajfinomítás
 - H termelés
 - stb
- Kell: **gyorsneutron-spektrum** és **magas kilépő hőmérséklet**



Hűtőközeg jellemzők

	víz (123 bar; 280 °C)	nátrium (1 bar; 427°C)	ólom (1 bar; 427 °C)	ólom-bizmut eutektikum (LBE) (1 bar; 427 °C)
ρ [kg/m ³]	760	847	10480	10150
c_p [J/(kg·K)]	5143	1300	150	150
λ [W/(m·K)]	0.59	70	16	13
μ [Pa·s]	$0,954 \cdot 10^{-4}$	$2,65 \cdot 10^{-4}$	$17,7 \cdot 10^{-4}$	$13,4 \cdot 10^{-4}$
olvadáspont [°C]	0	98	328	125
forráspont [°C]	327	883	1750	1670

sűrűség → **nagy hidrosztatikus nyomás**

víz, Na: 10 m ≈ 1 bar
ólom, LBE: 1 m ≈ 1 bar

folyékony fémek → **magas vezetőképesség**

Elektromágneses berendezések, műszerek

(Na magas nyomáson közel **átlátszó**)

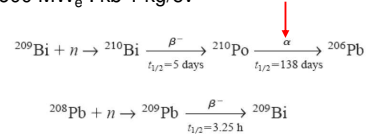
ólom és LBE **nem átlátszó** → nem lehet belenézni a zónába

Ólom és LBE összehasonlítás

LBE

- Lényegesen alacsonyabb olvadáspont, közel azonos forráspont
- Probléma: a bizmutból nagy mennyiségben keletkezik radioaktív polónium

600 MW_e : kb 1 kg/év



Azonos teljesítmény esetén LBE esetén mintegy tízezerszer több Po keletkezik, mint Pb esetén

- Bi: Kevés, nehezen elérhető, drága!
- Energetikai reaktorok esetén az LBE alkalmazása nem javasolt

	ólom (1 bar; 427 °C)	ólom-bizmut eutektikum (LBE) (1 bar; 427 °C)
ρ [kg/m ³]	10 480	10 150
c_p [J/(kg·K)]	150	150
λ [W/(m·K)]	16	13
μ [Pa·s]	$17,7 \cdot 10^{-4}$	$13,4 \cdot 10^{-4}$
olvadáspont [°C]	328	125
forráspont [°C]	1750	1670

Ólom és nátrium

Sűrűség: Pb kb 10-szer nagyobb sűrűségű, mint Na

LFR esetén **masszív konstrukcióra van szükség** pl. a földrengésállóság miatt (-), az ólom **igen jó árnyékoló** gamma sugárzás ellen (+)

Pb mintegy 6-szor nagyobb viszkozitása, mint a Na

LFR hűtőközeg sebesség korlátja 3 m/s az erős erózió miatt (-)

SFR esetén ez a korlát 10 m/s (+)

Olvadáspont: Pb lényegesen magasabb hőmérsékleten szilárdul

LFR esetén ez biztonsági és karbantartási hátrányt jelent (-)

Forráspont: Pb forráspontja lényegesen magasabb, mint Na

LFR esetén **forrás** krízis **nagyon kis valószínűségű** (+), kis kockázatot jelent a pozitív üregegyűthető*

SFR esetén az alacsony forráspont jelentős biztonsági hátrányt jelent, mert az **alacsony forráspont** a kilépő hőmérséklettel van kapcsolatban (-)

SFR nagy biztonsági hátránya a **nagy pozitív üregegyűthető** (akár 8-10\$ össz) (-)

*: ezzel együtt gázbuborék kerülhet a zónába a fedőgázból történő beszippantással vagy GF csőtöréskor!

	nátrium (1 bar; 427°C)	ólom (1 bar; 427 °C)
ρ [kg/m ³]	847	10 480
c_p [J/(kg·K)]	1300	150
λ [W/(m·K)]	70	16
μ [Pa·s]	$2,65 \cdot 10^{-4}$	$17,7 \cdot 10^{-4}$
olvadáspont [°C]	98	328
forráspont [°C]	883	1750

Ólom és nátrium

Hővezetés

Pb hővezetése **négyszer rosszabb**, ez jelentősebb hőmérséklet-inhomogenitásokat jelent, alacsonyabb teljesítmény-sűrűség engedhető meg

Reakciók, kompatibilitás más anyagokkal

LFR esetén nem kell exoterm reakciókkal számolni (+)

SFR intenzív exoterm reakció (égés, robbanás) vízzel és levegővel (-)

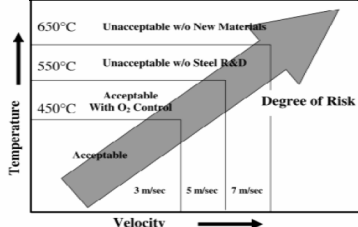
Korrózió

LFR karbantartási problémát jelent, hogy **Pb korrodálja a rozsdamentes acélt** (-). A meleg pontokról elszállítja a szennyeződést és a hidegebb pontokon alakul ki lerakódás. Fe, Cr, Ni eltérően oldódik Pb-ban, ez megváltoztatja a rozsdamentes acél tulajdonságait.

Ez a hőmérsékletre is korlátot jelent: korrózió mértéke több mm/év 500°C felett

SFR Na nem korrozív (+)

	nátrium (1 bar; 427°C)	ólom (1 bar; 427 °C)
ρ [kg/m ³]	847	10 480
c_p [J/(kg·K)]	1300	150
λ [W/(m·K)]	70	16
μ [Pa·s]	$2,65 \cdot 10^{-4}$	$17,7 \cdot 10^{-4}$
olvadáspont [°C]	98	328
forráspont [°C]	883	1750



Ólom és nátrium

Pb üregegyűthetője kisebb

Pb moderációs hatása alacsonyabb. Forrás esetén kevésbé keményedik a spektrum.

Nagyobb szórási hatáskeresztmetszet. Üreg keletkezése nagyobb neutron kiszökést eredményez. Ez nem érvényes lokálisan, a zóna közepén kialakuló ürege.

Pb abszorpciós hatáskeresztmetszete kisebb. Adott P/D esetén üreg miatti reaktivitás változás kisebb, tehát nagyobb P/D megengedhető. Erre az alacsonyabb hőkapacitás miatt is szükség van.

	nátrium (1 bar; 427°C)	ólom (1 bar; 427 °C)
ρ [kg/m ³]	847	10 480
c_p [J/(kg·K)]	1300	150
λ [W/(m·K)]	70	16
μ [Pa·s]	$2,65 \cdot 10^{-4}$	$17,7 \cdot 10^{-4}$
olvadáspont [°C]	98	328
forráspont [°C]	883	1750

Ólom és nátrium

További biztonsági kérdések:

Pb-víz kontaktus gőzrobbanáshoz vezethet.

Zónaolvadék reakcióba lép a Na-mal, Na gőz robbanást okozhat.

Törmeléket magával viszi az Pb hűtőközeg -> elzáródás

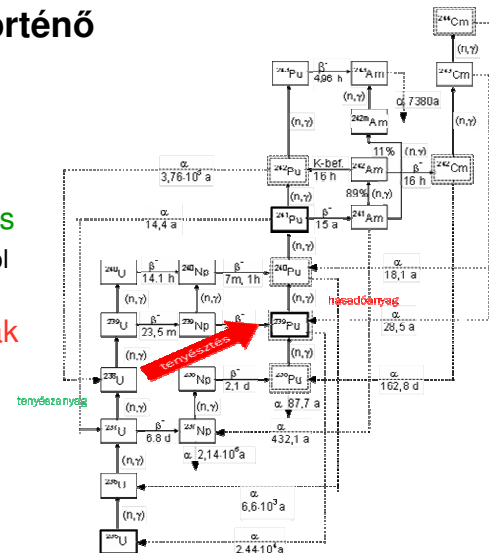
Mindkét hűtőközeg esetén kell számolni az újra kritikussá válással súlyos baleset esetén. Az LFR esetén ez kisebb jelentőségű, mert az aktinidák jól oldódnak az Pb-ban.

	nátrium (1 bar; 427°C)	ólom (1 bar; 427°C)
ρ [kg/m ³]	847	10 480
c_p [J/(kg·K)]	1300	150
λ [W/(m·K)]	70	16
μ [Pa·s]	$2,65 \cdot 10^{-4}$	$17,7 \cdot 10^{-4}$
olvadáspont [°C]	98	328
forráspont [°C]	883	1750

Gyorsreaktorok jelentősége

Az üzemanyagban történő magátalakulások

- Hasadások
- Neutronbefogások
 - Konverzió/tenyésztés
 - ²³⁸U tenyésztésanyagból ²³⁹Pu hasadóanyag
 - Másodlagos aktinidák felépülése
 - Np, Am, Cm



felhasználva: Dr. Szieberth Máté: Mitől gyors egy gyorsreaktor?
- Az üzemanyagciklus zárása és a gyorsreaktorok,
Magyar Tudomány Ünnepe, 2017. nov. 20.

Gyorsreaktorok jelentősége

Konverziós tényező, tenyésztési tényező, tenyésztési nyereség

$$CR = \frac{\text{termelt hasadóképes anyag}}{\text{elfogyasztott hasadóképes anyag}} = \frac{FP}{FD}$$

$$BR = \frac{\text{termelt hasadóképes anyag}}{\text{elfogyasztott hasadóképes anyag}} = \frac{FP}{FD} > 1$$

$$G = BR - 1$$

$$G = \frac{FEOC - FBOC}{FD} = \frac{FG}{FD}$$

CR: konverziós arány; BR: tenyésztési arány; F: hasadóképes anyag; P: termelés;
D: fogyaszt; G: tenyésztési haszon; BOC: kampány eleje; EOC: kampány vége

CR: conversion ratio; BR: breeding ratio; F: fissile material; P: produced;
D: destroyed; G: breeding Gain; BOC: beginning of cycle; EOC: end of cycle

felhasználva: Dr. Szieberth Máté: Mitől gyors egy gyorsreaktor?
- Az üzemanyagciklus zárása és a gyorsreaktorok,
Magyar Tudomány Ünnepe, 2017. nov. 20.

Gyorsreaktorok jelentősége

Hasadási neutronhozam

$$\eta = \frac{\nu\sigma_f}{\sigma_f + \sigma_c} = \frac{\nu}{1 + \sigma_c/\sigma_f} = \frac{\nu}{1 + \alpha}$$

η : elnyelt neutronként felszabaduló neutronok száma (hasadási neutronhozam)

ν : hasadásonként felszabaduló neutronok száma

σ_c/σ_f : befogás/hasadás aránya (α)

ν értéke néhány izotópra és neutronenergiára

Hasadó izotóp	Hasadást kiváltó neutronok energiája		
	E=0,025 eV	E=1 MeV	E=2 MeV
²³³ U	2,48	2,55	2,68
²³⁵ U	2,43	2,50	2,65
²³⁹ Pu	2,87	3,03	3,18

felhasználva: Dr. Szieberth Máté: Mitől gyors egy gyorsreaktor?
- Az üzemanyagciklus zárása és a gyorsreaktorok,
Magyar Tudomány Ünnepe, 2017. nov. 20.

Gyorsreaktorok jelentősége

Hasadási neutronhozam

- 1 neutron hasadóanyagban történő befogása szükséges a láncreakció folytatásához.
- L neutron vész el parazita befogás vagy a reaktorból történő kiszökés miatt.
- Következésképpen: $\eta - (1 + L)$ neutron fogódik be fertilis anyagban.
- A szaporítás feltétele: $\eta - (1 + L) > 1$, azaz: $\eta > 2 + L$
- A szaporítási tényező: $BR = \eta - (1 + L)$
- Kiszökő neutronok hasznosítása: tenyészköpeny

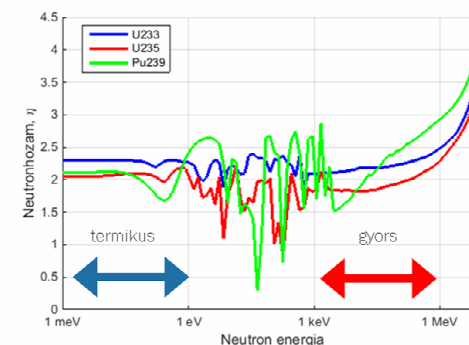


felhasználva: Dr. Szieberth Máté: Mitől gyors egy gyorsreaktor?
- Az üzemanyagciklus zárása és a gyorsreaktorok,
Magyar Tudomány Ünnepe, 2017. nov. 20.

Gyorsreaktorok jelentősége

Üzemanyag-tenyésztés

- U-Pu ciklusban gyorsneutron-spektrumban hatékony

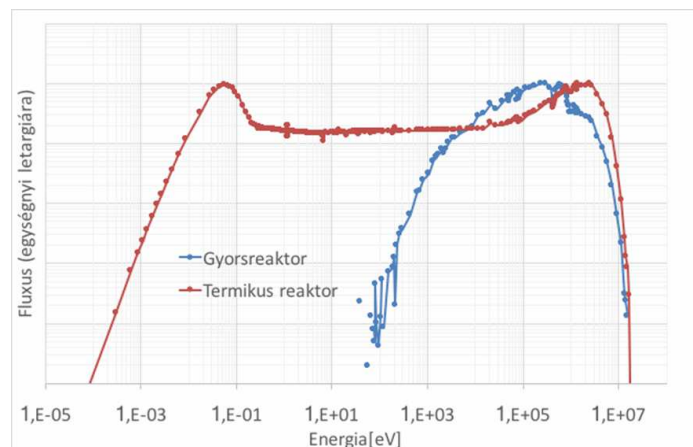


Neutronhozam (η): egy elnyelt neutron által keltett neutronok átlagos száma
Tenyésztés feltétele: $\eta > 2$

felhasználva: Dr. Szieberth Máté: Mitől gyors egy gyorsreaktor?
- Az üzemanyagciklus zárása és a gyorsreaktorok,
Magyar Tudomány Ünnepe, 2017. nov. 20.

Gyorsreaktorok jelentősége

Neutronspektrum



felhasználva: Dr. Szieberth Máté: Mitől gyors egy gyorsreaktor?
- Az üzemanyagciklus zárása és a gyorsreaktorok,
Magyar Tudomány Ünnepe, 2017. nov. 20.

SFR – történelem

SZU/Oroszország:
mintegy 140 reaktorév tapasztalat

Japan

BR-510 (1959-2002, Obninsk)

BOR-60 (1969, Dimitrograd)

BN-350 (1972-1999, Aktau)

BN-600 (1980, Zarechny)

Monju (1985, Tsuruga)

Franciaország:
mintegy 40 reaktorév tapasztalat.

Phénix (1973-2009, Marcoule)

Superphénix (1985-1997, Creys-Malville)

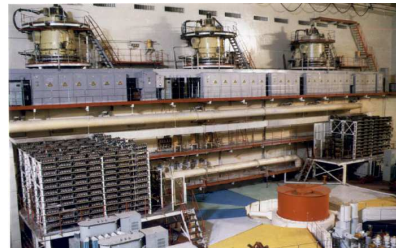
BN-600

Belojarszk-3

Üzembe helyezve **1980-ban, jelenleg is üzemel**

Kereskedelmi üzem 1982 óta, **villamos energia és távhő** (Zarecsnij)

Átlagos telj. kihasználási tényező 74 %



BN-600

3 körös konstrukció

Medence típusú reaktor: primer szivattyúk (FKSZ-ek) és a primer hőcserélők a reaktortartályban

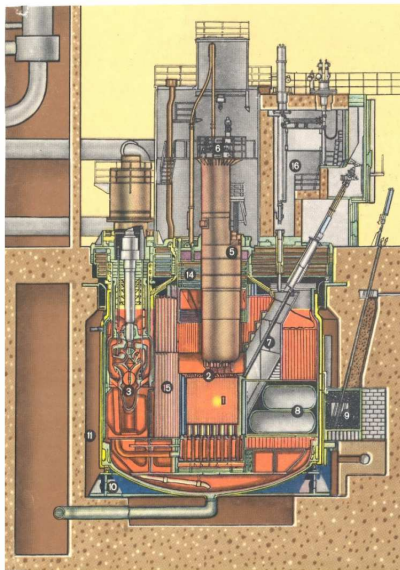
Egyciklusú gőzfejlesztő, mely 8 szegmensből áll. Mindegyik szegmens külön-külön izolálható Na és víz oldalon is

3 zónakialakítás (üzemelés közbeni átalakítások)

Átrakás:

- **kétszer egy évben (kampányhossz: 160 nap)**
- **Zóna hőmérséklet: 220-250°C**
- **Primer FKSZ-ek csökkentett fordulatszámmal üzemelnek (280 rpm)**

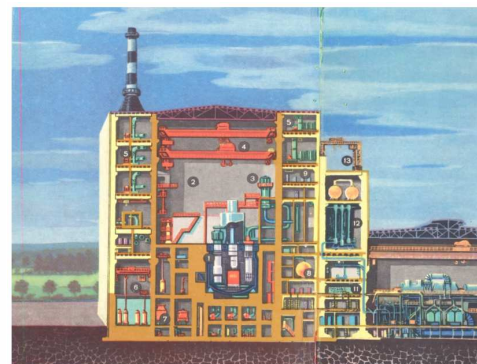
Fő jellemzők	
Hőteljesítmény	1470 MW _{th}
Nettó villamos teljesítmény	600 MW _e
Na forgalom	25 000 t/h
Zóna belépő/kilépő hőmérséklet	377°C / 500°C
GF belépő/kilépő hőmérséklet a gőzoldalon	241°C / 507°C
gőznyomás	137 bar
ÜA	UO ₂
Maximális lineáris teljesítménysűrűség	47 kW/m
Maximális burkolat hőmérséklet	700°C



1-2-core, fuel assembly, 3-primary pump, 4-intermediate heat exchanger (IHx), 5-central column, 6-control rod drive mechanism, 7-loading-unloading elevators, 8-neutron channel, 9-neutronic measurement chambers, 10-reactor supports, 11-reactor vault, 14-routing plug, 15 neutronic protection, 16-refueling cell

FIG. 1. BN-600 reactor block.

BN-600

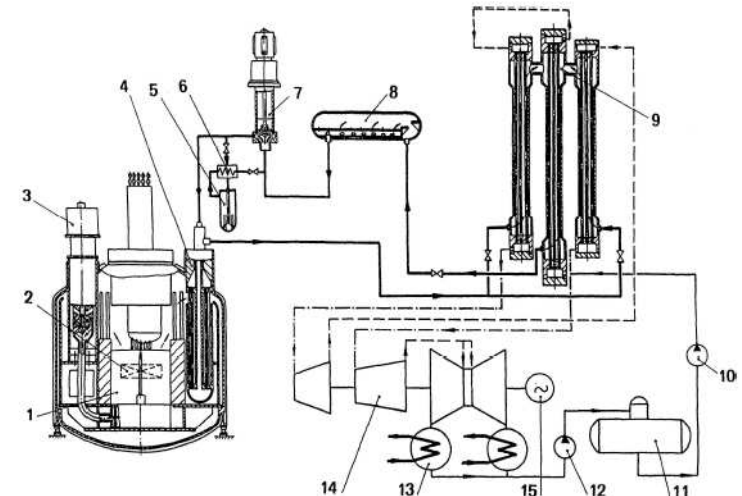


1-reactor, 2-reactor hall, 3-secondary pump, 4-crane, 5-ventilation system, 6-water pool, 7-irradiated fuel transfer cask, 8-sodium storage tank, 9-electric heating control system, 10-turbine hall, 11-control and protective system, 12-steam generator (SG), 13-crane (for SG)

FIG. 3a. Nuclear island and turbine building layout-elevation.

Liquid Metal Cooled Reactors: Experience in Design and Operation, IAEA-TECDOC-1569

BN-600



1-reactor, 2-reactor core, 3-reactor coolant pump, 4-intermediate heat exchanger, 5-filter-trap, 6-recuperator, 7-secondary coolant pump, 8-sodium expansion tank, 9-steam generator, 10-feedwater pump, 11-deaerator, 12-condensate pump, 13-condenser, 14-turbine plant, 15-turbogenerator

BN-600

Üzemeltetés közben tapasztalt problémák:

- **huszonhét esetben Na szivárgás**
ebből öt az aktív (primer) Na hurkon
tizennégy Na égéssel járt
- **Legsúlyosabb üzemzavar valószínűsíthetően INES 1 (telephelyen belüli hatás)**
Na szivárgás egy 48 mm átmérőjű kisegítő vezetéken 1993-ban
Oka: egy T-csatlakozás ciklus terhelés miatti fáradásából adódó repedések. A T-csatlakozásban alacsony és magas hőmérsékletű Na keveredett
1993 óta nem volt Na-szivárgás, 1991 óta nem volt olyan eset, ahol GF-ben víz és Na reakcióba lépett volna
- **Burkolat indermetikuság miatti esetek, az üzemanyag duzzadásával járó esetek**
Feszültség korrózió miatt
Duzzadásálló, hidegen megmunkált ausztenites acéllal javították
- **SZBV rúd vezetőcsövek rugalmasságvesztése**
A vezetőcsövek élettartamát reaktorfizikai módosításokkal érték el

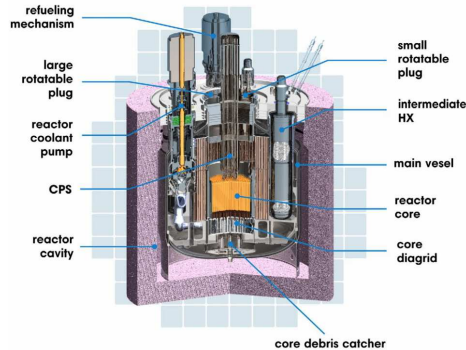
BN-800



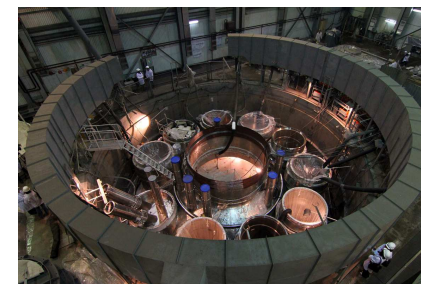
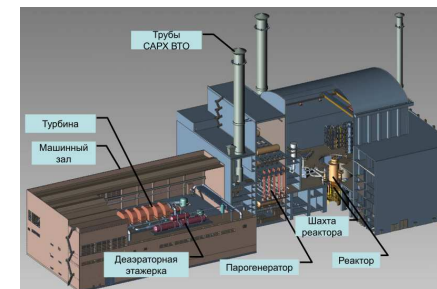
Építés kezdete: 2006. július 18.
Első kritikusság: 2014. június 27.
Hálózatra csatlakozás: 2015. december 10.
Termelés kezdete: 2016. október 31.
864 MWe – 2100 MWth

BN-800

- zárt üzemanyagciklus
- katonai, és egyéb eredetű plutónium hasznosítása
- passzív biztonsági rendszerek
- passzív remanenshő-elvonás
- zónaolvadék-csapda
- nátriumszivárgással szembeni nagyobb ellenállóság



BN-800

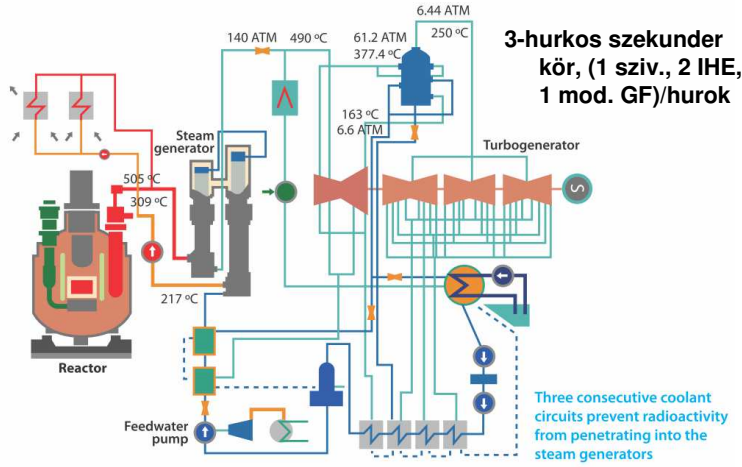


BN-800

PLANT MAJOR SPECIFICATIONS

Thermal capacity, MWt	2100
Electric capacity, MWe	880
Primary sodium temperature (inlet/outlet), °C	354/547
Live steam temperature, °C	490
Live steam pressure, MPa	13.7
Plutonium consumption, t/year	1.7
Service life, year	40

3-hurkos primerkör, (1FKSZ, 2 IHE)/hurok BN-800 NPP: heat flow chart

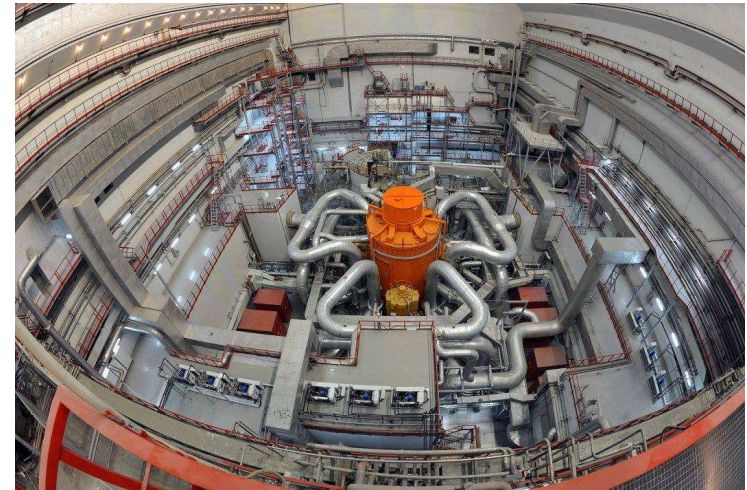


BN-800

PLANT MAJOR SPECIFICATIONS

Thermal capacity, MWt	2100
Electric capacity, MWe	880
Primary sodium temperature (inlet/outlet), °C	354/547
Live steam temperature, °C	490
Live steam pressure, MPa	13.7
Plutonium consumption, t/year	1.7
Service life, year	40

3-hurkos primerkör, (1FKSZ, 2 IHE)/hurok



BN-800

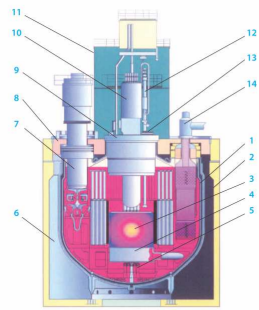
BN-800 NPP: principal specification & performance

Id	Parameter	Value
1	Power limit	
1.1	Design service life	40 years
1.2	Rated net power	3100 MWt
1.3	Rated electric power	864 MW
1.4	Power unit net efficiency	39.35%
1.5	Electric energy produced annually	5522 MWh
1.6	Effective hours of running at rated load	7000 h/year
1.7	Electric power percentage consumed by auxiliaries	7.4%
1.8	Annual heat energy production (except for auxiliaries)	83 MWh
2	Reactor Core	
2.1	Full load operation between refueling periods	140 days
2.2	Refueling duration	14...17 days
2.3	Fuel: (core/breeding blanket)	PuO ₂ /UO ₂ / depleted UO ₂
2.4	Maximum amount of fuel assemblies and control rods unloaded during refueling	229 pcs
2.5	Average fuel burnup	66 MW·day/kg
2.6	Average core power density	430 kW/l
3	Primary coolant (liquid sodium) circuit	
3.1	Number of primary coolant circuit loops	3 pcs
3.2	Reactor coolant temperature (core inlet/outlet)	354/547 °C
3.3	Reactor coolant flow (in three loops)	31920 t/h
3.4	Reactor coolant inventory	910 t
3.5	Pressure in the reactor gas plenum (operation)	0.054 MPa
3.6	Primary sodium radioactivity	18*10 ¹⁰ Bq/h
4	Secondary coolant (liquid sodium) circuit	
4.1	Number of secondary coolant circuit loops	3 pcs
4.2	Secondary coolant temperature (inlet/outlet of the intermediate heat exchanger)	309/505 °C
4.3	Coolant flow per secondary circuit loop	11500 t/h
4.4	Pressure in buffer vessel gas plenum	0.55 MPa
4.5	Secondary sodium radioactivity	3.2*10 ¹⁰ Bq/h
5	Tertiary coolant (steam, water) circuit	
5.1	Number of secondary loops	3 pcs
5.2	Steam generator type	modular sectional
5.3	Number of sections in steam generator	10
5.4	Evaporative capacity per steam generator	792 t/h
5.5	Superheated steam pressure	14.0 MPa
5.6	Superheated steam temperature	490 °C
5.7	Feedwater temperature	211 °C
5.8	Turbine type (K-800-130/3000)	1
5.9	Turbine arrangement	HPC+LPC
5.10	Superheated steam flow	3170 t/h
5.11	Superheated steam temperature	485.0 °C
5.12	Steam temperature after superheating	250.0 °C
5.13	Outlet in condensing operation mode	88.0 MPa
5.14	Alternator voltage	24 kV
5.15	Stator & rotor winding coolant	water

feltöltés előtt:

Ag gázzal töltik fel a Na hurkokat, majd megkezdik a felmelegítését: forró gázzal és villamos fűtéssel 250°C-ig.

covers.

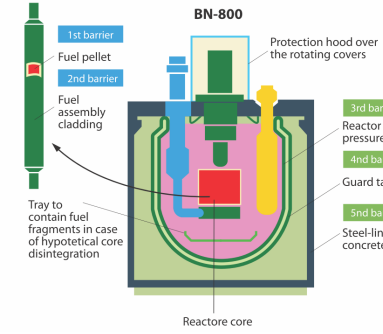


1. Reactor pressure vessel
2. Guard tank
3. Reactor core
4. Pressure chamber
5. Corium catcher
6. Reactor cavity
7. Reactor coolant pump
8. Fixed upper shield
9. Large rotating cover
10. Central rotating cover
11. Protective hood
12. Reloading device
13. Small rotating cover
14. Intermediate heat exchanger
15. Stator & rotor winding coolant

BN-800

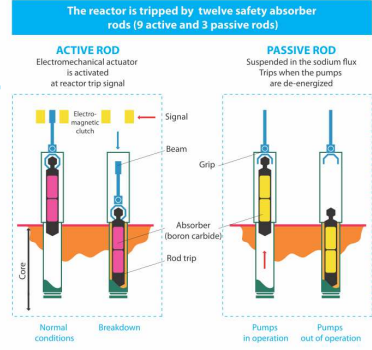
Öt mérnöki gát

Protection barriers

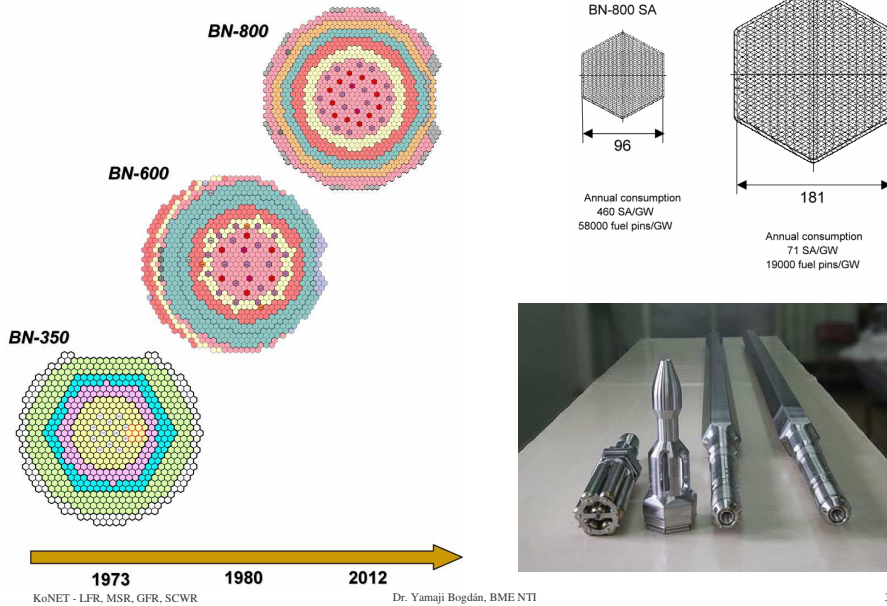


Passzív BV rudak: hűtőközegáramlás csökkenése (FKSZ elvesztése) esetén

Reactor trip



BN-800



Phenix

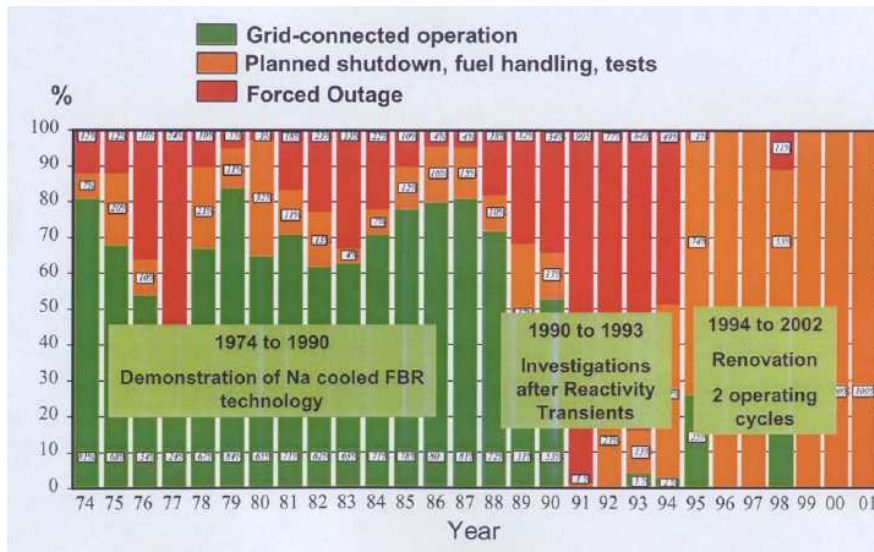
Üzembe helyezve 1973-ban
 Kereskedelmi üzem 1982-től
 Leállítva 2009 márciusában
 A hálózatról lekapcsolt reaktoron 2009 nyarán kísérleteket végeztek
 Átlagos telj. kihasználási tényező: 51 %
 4,5 zónányi üzemanyagot reprocesszáltak



Demonstrációs célok:

- Vizsgálat és javítások lehetősége
- Tenyésztés lehetősége
- ŰA ciklus zárásának lehetősége
- Transzmutációs és üzemanyag-kísérletek

Phenix



Phenix

háromkörös

Medence kialakítás, primer FKSZ-ek és a primer hőcserélő a reaktortartályban

Reaktortartály méretek:

- Magasság: 12 m
- Belső átmérő: 11,8 m

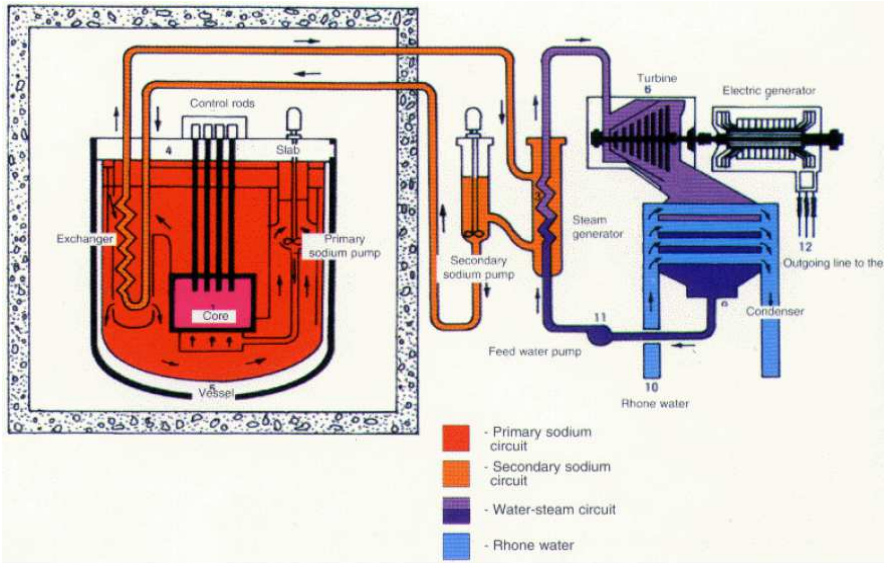
Zóna méretek:

- Aktív magasság: 850 mm
- Belső átmérő: 960 mm

Szivárgásvizsgálat H érzékelő rendszerrel
 Maximális Na üregegyüttható **+2,9\$ (össz)**

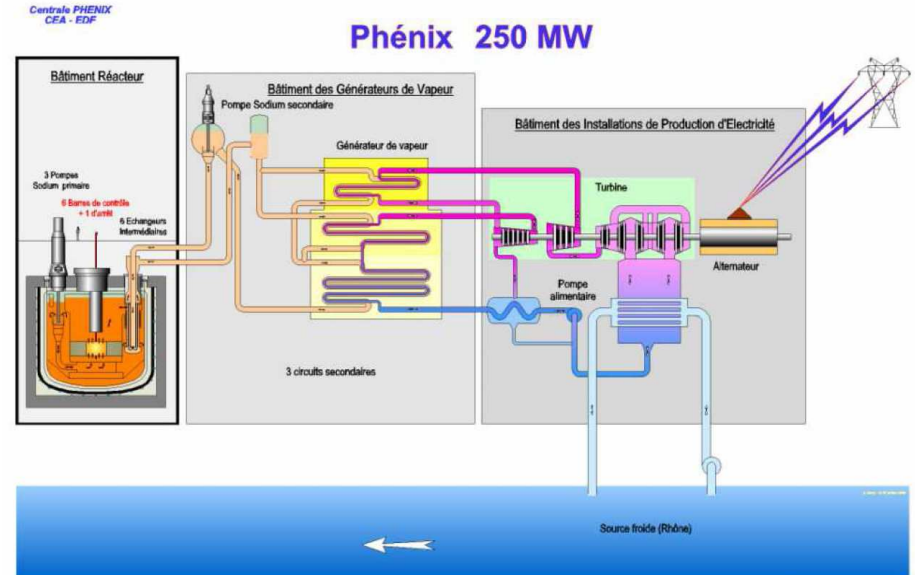
Fő jellemzők	
Hőteljesítmény	563 MW _{th}
Nettó villamos teljesítmény	250 MW _e
Na mennyiség a zónában	800 t
Zóna kilépő hőmérséklet	560°C
Zóna forgalom	3 t/s
GF belépő/kilépő hőmérséklet a gőzoldalon	246°C / 512°C
Gőznyomás	168 bar
ŰA	PuO ₂ -UO ₂
Átlagos lineáris teljesítmény-sűrűség	27 kW/m

Phenix

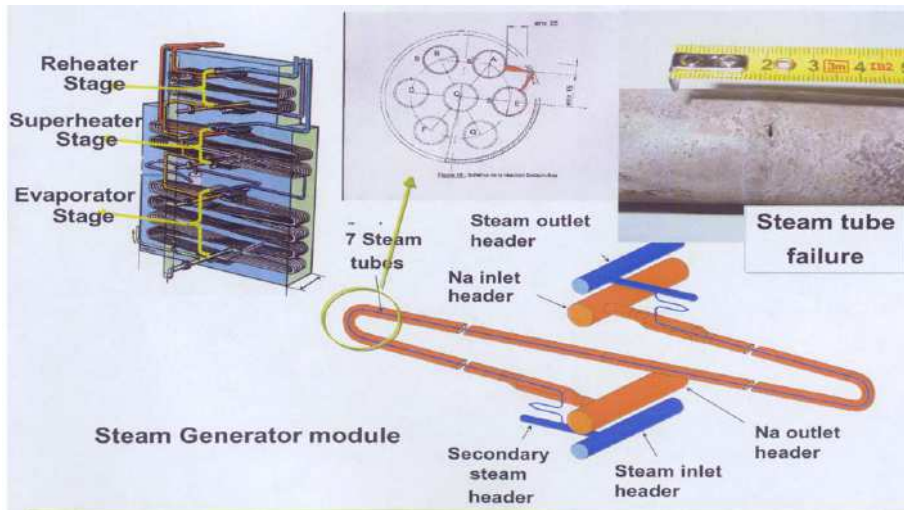


Phenix

Phénix 250 MW

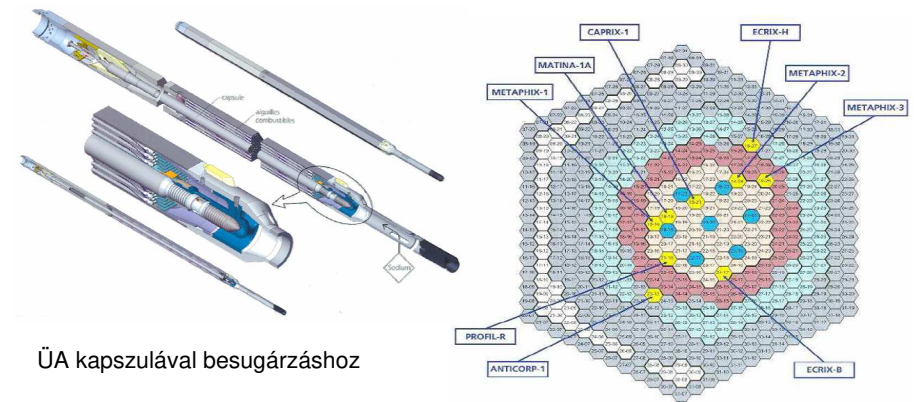


Phenix



Phenix

• Transzmutációs és üzemanyag-kísérletek



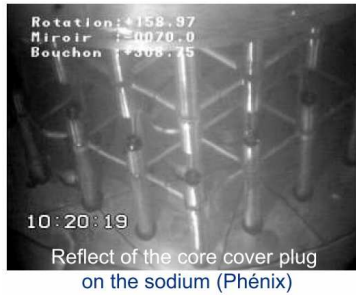
Phenix

Nagy komponensek üzemeltetési tapasztalata

primer szivattyúk megbízhatók
IHX szivárgások
GF: öt esetben Na-víz reakció

Anyagviselkedési tapasztalatok

egyes acélötvözetek nem tűrték jól a Na kontaktust



Superphenix



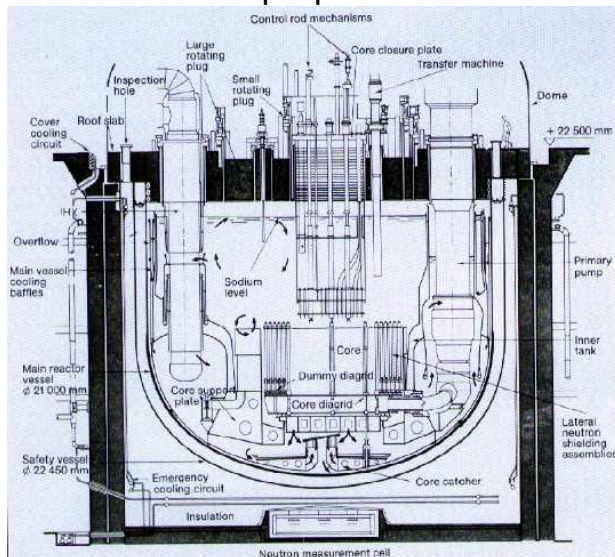
Építés kezdete 1976

Kereskedelmi üzem 1986-tól

Leállítva 1998-ban

SP: 2990 MW_{th}; 1242 MW_e, alaperőművi kapacitás

Superphenix



Superphenix

Háromkörös

Medence kialakítás, primer FKSZ-ek és a primer hőcserélő a reaktortartályban

Reaktortartály méretek:

- **Magasság: 17,3 m**
- **Belső átmérő: 21 m**

Zóna méretek:

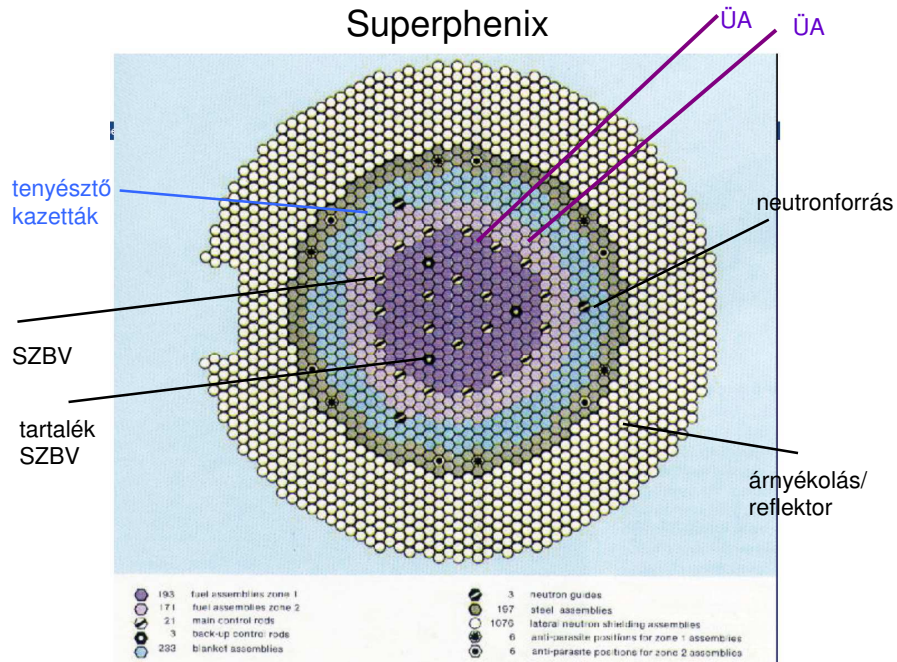
- **Aktív magasság: 1000 mm**
- **Belső átmérő: 2600 mm**

Maximális Na üregegyűthető **+5.9\$**

Fő jellemzők – SP

Hőteljesítmény	2990 MW _{th}
Nettó villamos teljesítmény	1242 MW _e
Na a zónában	3200 t
Zóna kilépő hőmérséklet	542 °C
Zóna forgalom	15,7 t/s
GF belépő/kilépő hőmérséklet a gőzoldalon	237°C / 490°C
Gőznyomás	177 bar
ÚA	PuO ₂ -UO ₂
Maximális burkolat hőmérséklet	620 °C
Átlagos lineáris teljesítménysűrűség	30 kW/m

Superphenix



KoNET - LFR, MSR, GFR, SCWR

Dr. Yamaji Bogdán, BME NTI

45

Superphenix

A reaktor nátriummal történő feltöltése **2 hónapot vett** igénybe, a tartály nitrogénnel 150°C-ra történő felhevítése után

Az első hosszabb leállás 1987. május és 1989. január között volt egy Na táptartályban jelentkező szivárgás miatt (20 l/h). A tartály nem volt javítható, kicserélték. Az eset után a teljes rendszert ellenőrizték.

Második hosszabb leállás 1990. július és 1992. július között. Ennek oka az volt, hogy levegő jutott az argon rendszerbe, ami megengedhetetlen oxidációt okozott a primer Na-ban. A primer Na közeget megtisztították, a tisztítás nyolc hónapot vett igénybe. További tizenhat hónapig tartott a reaktor átvizsgálása és a biztonsági elemzések elvégzése.

Üzemzavarok összesen:

- 2 INES 2 üzemzavar
- 6 INES 1 üzemzavar
- 72 INES 0 esemény (nem biztonsági jellegű)

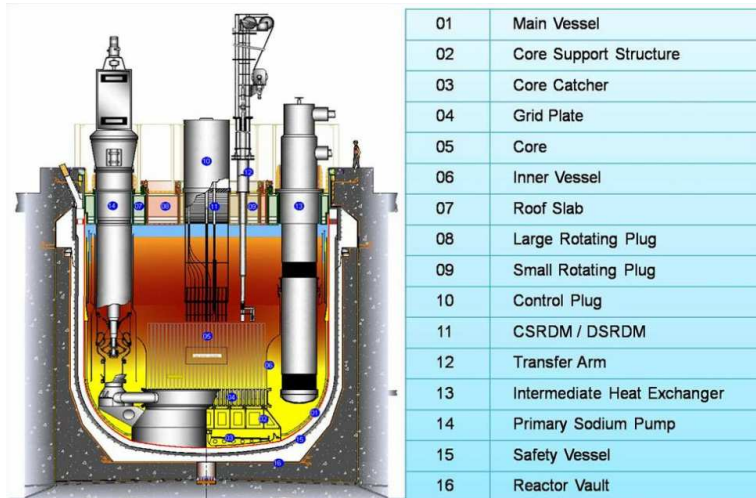
KoNET - LFR, MSR, GFR, SCWR

Dr. Yamaji Bogdán, BME NTI

46

Kalpakkam, PFBR

500 MW, Na hűtésű, MOX üzemanyag



KoNET - LFR, MSR, GFR, SCWR

Dr. Yamaji Bogdán, BME NTI

47

Kalpakkam, PFBR

500 MW
Na hűtésű
MOX üzemanyag

Design features	
Thermal power, MWt	1250
Electric output, MWe	500
Core height, mm	1000
Core Diameter, mm	1900
Fuel	PuO ₂ -UO ₂
Fuel pin outer diameter, mm	6.6
Pins per fuel subassembly	217
Fuel clad material	20 % CW D9
Diameter of main vessel, mm	12900
Primary circuit layout	Pool
Primary inlet / outlet temp, °C	397 / 547
Steam temperature, °C	490
Steam pressure, MPa	16.6
Reactor containment	Rectangular
Plant life, y	40
No of shutdown systems	2
No. of decay heat removal systems	2

KoNET - LFR, MSR, GFR, SCWR

Dr. Yamaji Bogdán, BME NTI

48

Kalpakkam, PFBR

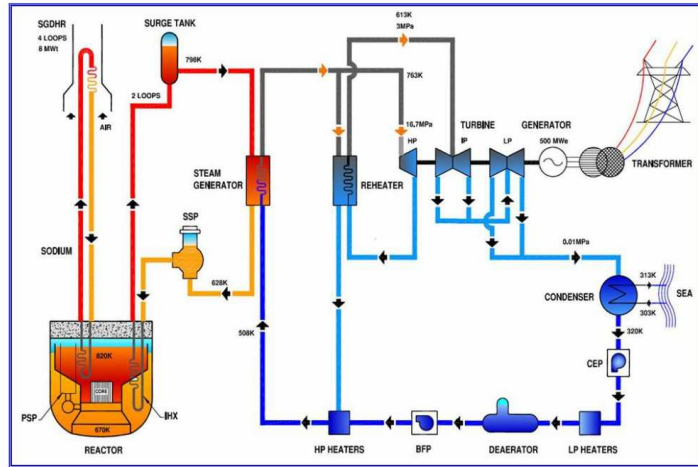
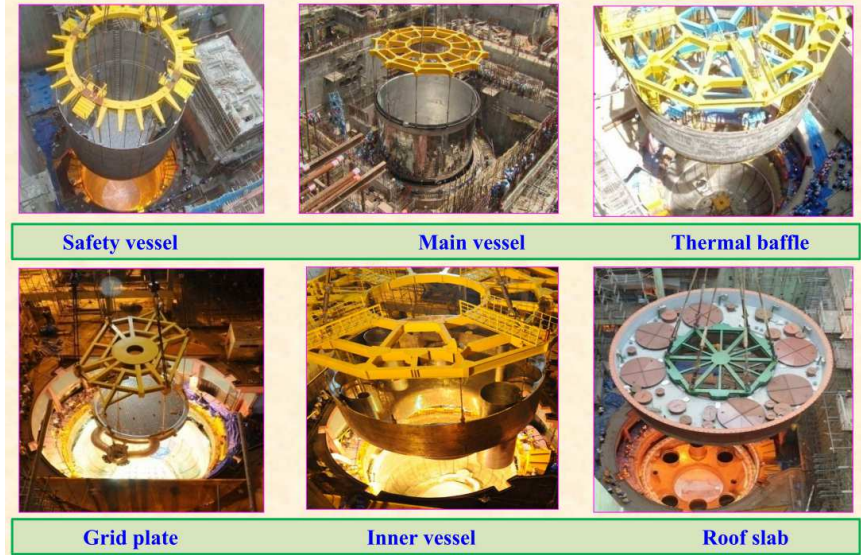


Figure-2: Prototype Fast Breeder Reactor flow chart

primer Na hűtőkör (Primary Sodium Circuit - PSC), szekudner Na hűtőkör (Secondary Sodium Circuits - SSC), üzemzavari hűtés (Safety Grade Heat Removal Circuits - SGDHR) tercier (viz) kör (Steam-Water Circuit - SWC), közbenső hőcserélő (Internal Heat Exchanger - IHX).

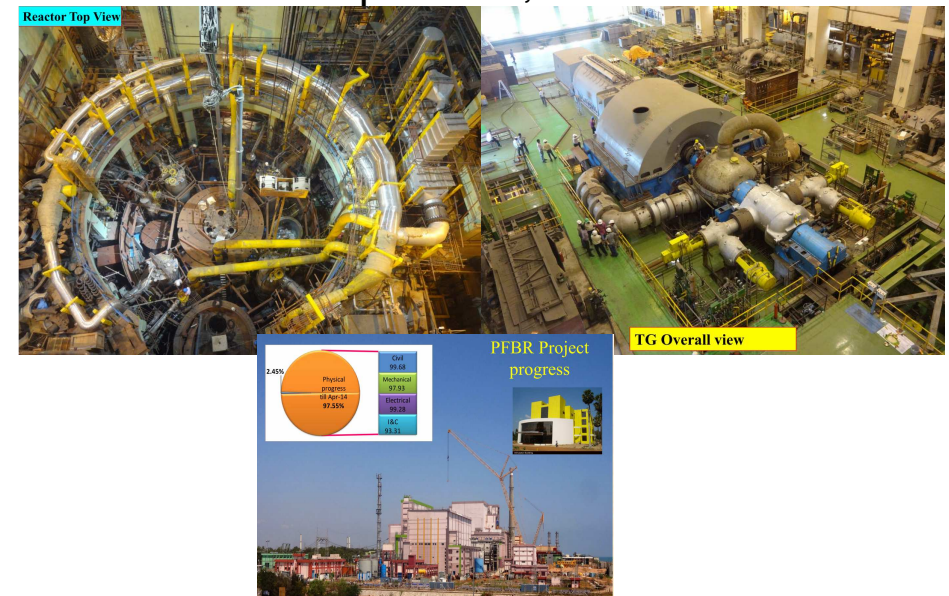
Kalpakkam, PFBR



Kalpakkam, PFBR

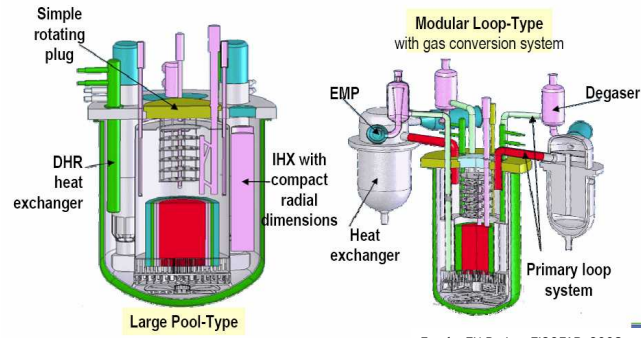


Kalpakkam, PFBR



Gen IV SFR fejlesztések

Medence típusú és hurkos elrendezés



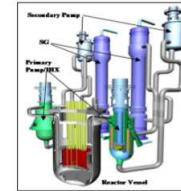
Forrás: EU Project EISOFAIR, 2008

felhasználva: Halász Máté Gergely: Nátriumhűtésű gyorsreaktor (SFR) – a létező technológia, Magyar Tudomány Ünnepe, 2017. nov. 20.

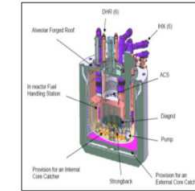
Gen IV SFR fejlesztések

Medence típusú és hurkos elrendezés

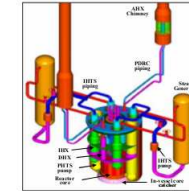
Hurkos elrendezésű JSFR



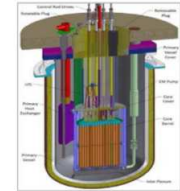
Medence típusú ESFR



Kis méretű, moduláris KALIMER



Kis méretű, moduláris AFR-100



Forrás: R. Hill, Sodium cooled fast reactors, Gen-IV webinar, 2016

felhasználva: Halász Máté Gergely: Nátriumhűtésű gyorsreaktor (SFR) – a létező technológia, Magyar Tudomány Ünnepe, 2017. nov. 20.

LFR – Történeli háttér

The current experience base for HLMCs in the Soviet Union includes 80 reactor years.

Nuclear submarine-705 serial (1976-1996)

Nuclear submarine-705 demo (1971)

Prototype nuclear submarine Project 645 (1963)

Pb-Bi setup (1951)

Ezek alapvetően katonai programok, így az üzemeltetési tapasztalattal kapcsolatos információk korlátozottak.

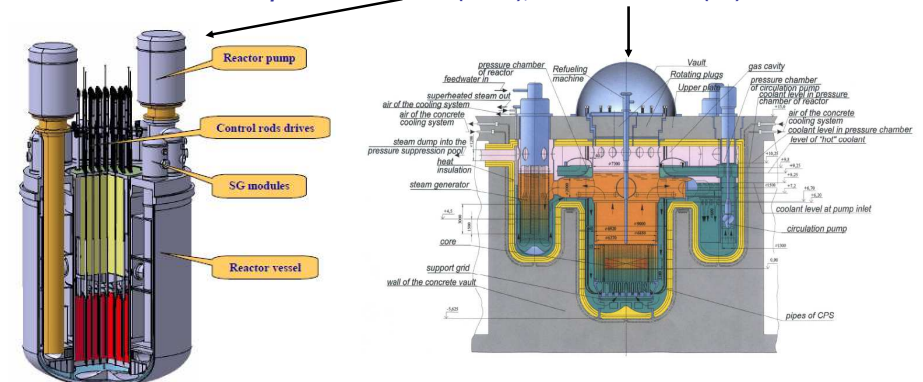
LFR koncepciók

Orosz:

Legnagyobb tapasztalat ólom-bizmut eutektikummal

Kevés hozzáférhető információ

Két fő koncepció: SVBR 75/100 (Pb-Bi), BREST 800/1200 (Pb)

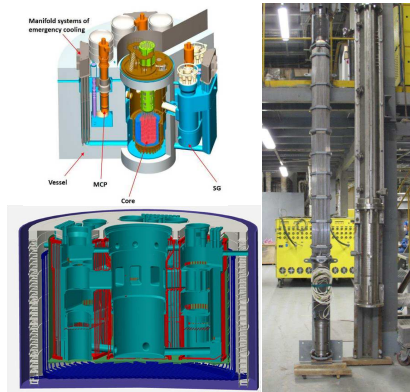


LFR koncepciók

Orosz fejlesztések:

BREST-OD-300

- 700 MW_{th}/300 MW_e teljesítményű demonstrátor
- 420/535 C belépő/kilépő hőmérséklet, szuperkritikus gőz szekunder kör
- U/Pu-nitrid üzemanyag:
 - jobb reprocessálhatóság
 - tesztelés BOR-60, BN-600 reaktorokban
- Kombinált medence-hurok elrendezés
 - többretegű vasbeton tartály
- Tervezett üzembe helyezés: 2021!



felhasználva: Dr. Szieberth Máté: Ólomhűtésű gyorsreaktor (LFR) – a tenger alól a felszínre, Magyar Tudomány Ünnepe, 2017. nov. 20.

USA és EURATOM koncepciók

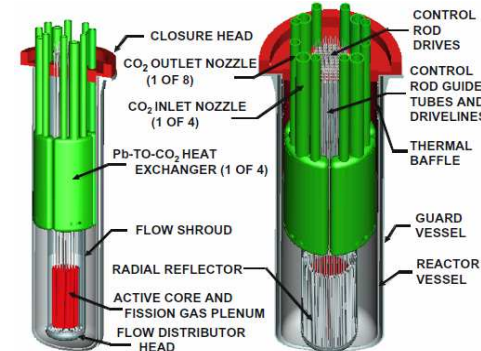
Kisméretű szállítható rendszerek távoli üzembehelyezésre (SSTAR) USA

Közepes méretű rendszerek (ELSY) Európa

SSTAR: Small Secure Transportable Autonomous Reactor

zóna élettartam 30 év

Az aktív zóna egy fűtőelemköteg 0,98 m hosszú, 1,22 m átmérőjű



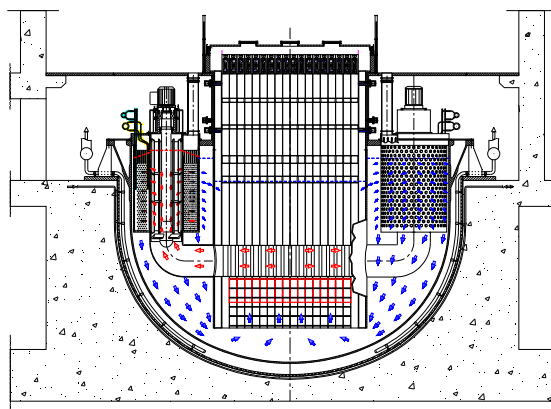
SSTAR	
Hőteljesítmény	45 MW _{th}
Nettó villamos teljesítmény	20 MW _e
Hatástok	44 %
Primer hűtőközeg	Pb
Primer cirkuláció	természetes
Zóna forgalom	2,1 t/s
Zóna belépő/kilépő hőmérséklet	420°C / 567°C
Szekunder hűtőközeg	Szuperkritikus CO ₂
Szekunder közeg maximális nyomás	200 bar
ÜA	Nitrid
Maximális burkolat hőmérséklet	650 °C

Európai koncepció - ELSY

ELSY: European Lead-cooled System

600 MW_e nettó teljesítmény

jelentős fejlesztéseket igényel



ELSY	
Nettó villamos teljesítmény	600 MW _e
hatástok	42 %
Primer hűtőközeg	Pb
Primer cirkuláció	Kényszerített
Zóna forgalom	2,1 t/s
Zóna belépő/kilépő hőmérséklet	400°C / 480°C
Szekunder közeg	víz / gőz
Gőz hőmérséklet	450 °C
Gőznyomás	180 bar
ÜA	MOX és nitrid
Maximális burkolat hőmérséklet	~ 550 °C

Európai koncepció - ELFR

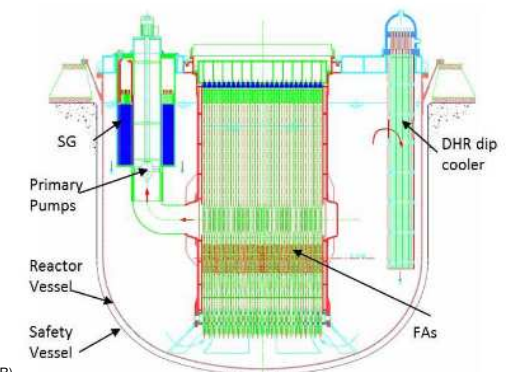
1500 MW_{th}, 600 MW_e

400-480 °C

medence típusú

ólom hűtőközeg

öntenyésztő (BR ~ 1), nincs tenyészköpeny



felhasználva: Dr. Szieberth Máté: Ólomhűtésű gyorsreaktor (LFR) – a tenger alól a felszínre, Magyar Tudomány Ünnepe, 2017. nov. 20.

Európai koncepció - ALFRED

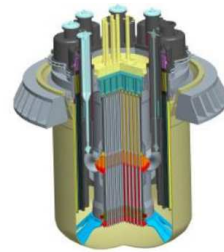
**Advanced Lead Fast REactor
Demonstrator**
300 MW_{th}/125 MW_e
demonstrációs reaktor

ólom hűtőközeg

400-480 °C

MOX (U+Pu oxid) üzemanyag

FALCON konzorcium
a létesítésre
lehetséges helyszín:
Románia



felhasználva: Dr. Szieberth Máté: Ólomhűtésű gyorsreaktor (LFR) – a tenger alól a felszínre, Magyar Tudomány Ünnepe, 2017. nov. 20.

Sóolvadékok

Zárójelben:

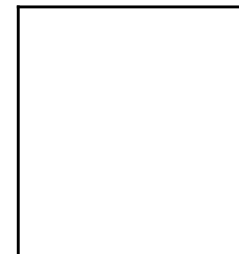
- Metallurgia
 - Extrakció
 - Elektrolízis
 - nemes- és ritkafémek kinyerési és tisztítási folyamatai
 - oxidáció elleni védelem
 - fémbevonatok készítése

Sóolvadék, mint hőszállító közeg

	Na	66% LiF - 34% BeF ₂	víz
Olvadáspont [°C]	98	458	0
Hőmérséklet* [°C]	500	700	300
Hőkapacitás [kJ/kg°C]	1,3	2,34	5,62
Sűrűség [kg/m ³]	841,3	2050	720
Hővezetési tényező [W/m°C]	66,8	1	0,558
Dinamikai viszkozitás [g/ms]	2,21	5,6	0,087

Sóolvadék, mint hőszállító közeg

Hélium



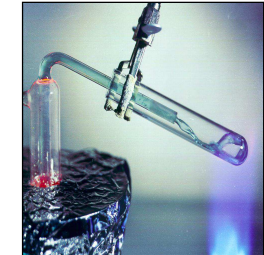
**Magas nyomás
átlátszó
forráspont: -
Inert**

Nátrium



**Légköri
nem átlátszó
883°C
hevesen reagál**

Sóolvadék

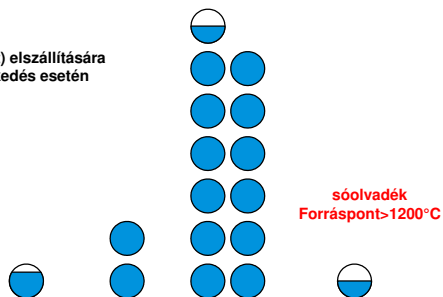


**Légköri
átlátszó
> 1200°C
enyhén reaktív**

Sóolvadék, mint reaktoros hűtőközeg

Tulajdonságokból adódóan csökkenthető a perendezések mérete (hossza, nagysága, száma) és a költségek (csövek, hőcserélők, szelepek, stb.)

1m átmérőjű csövek száma 1000 MW(t) elszállítására 100°C hűtőközhőmérséklet-emelkedés esetén



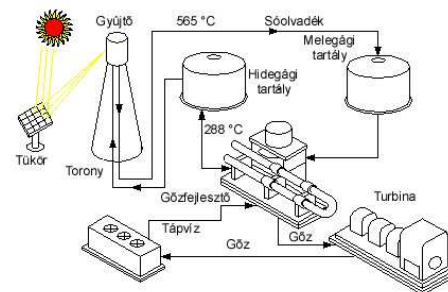
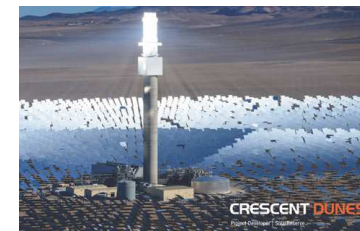
	Víz (PWR)	Nátrium (LMR)	Hélium	Sóolvadék
Nyomás (MPa)	15,5	0,69	7,07	0,69
Kilépő hőm. (°C)	320	540	1000	1000
hűtőközeg seb. (m/s)	6	6	75	6

SOURCE C.W. FORSBERG et al. ICAPP07

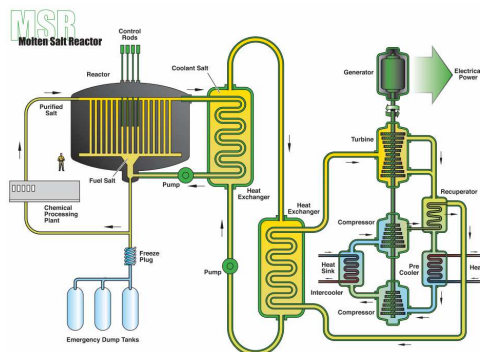
Sóolvadékos tornyok

Kiváló hőszállító és tároló közeg

- 60% NaNO₃ - 40% KNO₃



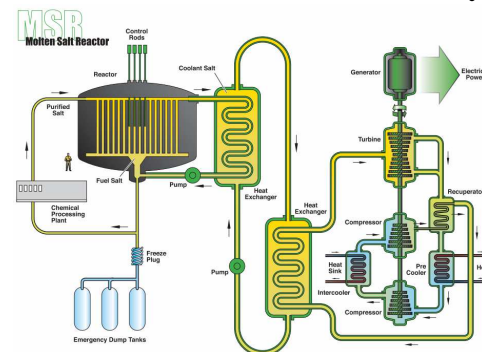
Sóolvadékos reaktor



Paraméter	Referencia érték
Nettó villamos teljesítmény	1000 MW
Hőteljesítmény-sűrűség	22 MW/m ³
Nettó termikus hatásfok	44-50 %
Sóolvadék belépő hőmérséklet	565 °C
Sóolvadék kilépő hőmérséklet	700 °C
hidrogéntermelés esetén	850 °C
Moderátor	grafit
Ciklus	Rekuperatív hélium Brayton ciklus
Neutronspektrum	termikus

A Technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy Systems
December 2002, GIF-002-00

Sóolvadékos reaktor



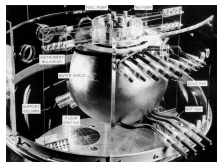
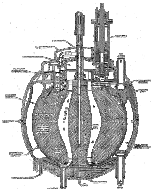
- **Folyékony üzemanyag**
 - változtatható összetétel
 - folyamatos üzemanyagcsere
 - Pu, Th hasznosítás
 - transzmutáció
 - magas hőmérséklet
 - alacsony nyomáson
 - magas hatásfok
 - folyamathő hasznosítás
 - nincs zónaolvadás
 - nem kell szerelni üzemanyagot (mást kell...)
- Akár tenyésztésre is alkalmas
- Nem reagál hevesen

A Technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy Systems
December 2002, GIF-002-00

Sóolvadékos reaktor történet

Aircraft Nuclear Propulsion program (1946-61)

- Aircraft Reactor Experiment (2,5 MWth)
- Aircraft Reactor Test („Fireball”, 60 MWth)
 - NaF-ZrF₄-UF₄



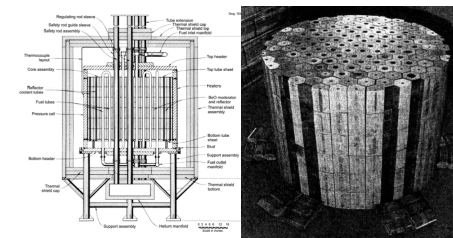
Full-Scale ART Model



Full-Scale ART Model



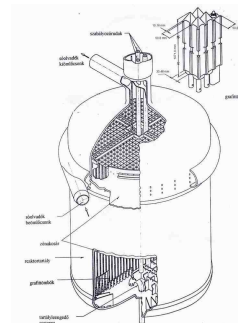
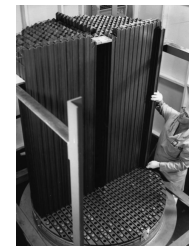
ART Building



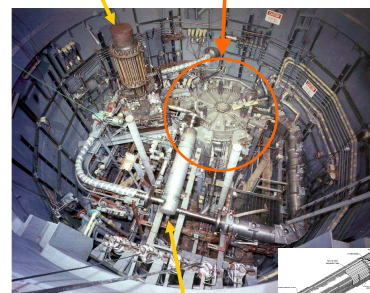
A sóolvadékos reaktor

Molten Salt Reactor Experiment (1965-1969)

- 10 MW (8 MW)
- 70,7% ⁷LiF - 16% BeF₂ - 13% ThF₄ - 0,3% UF₄ (mol%)
- 93% U-235
- Belépő hőmérséklet: 635 °C
- Kilépő hőmérséklet: 663 °C



szivattyú reaktortartály



hőcserélő

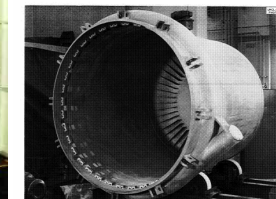
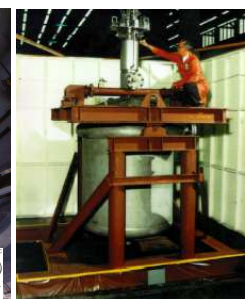
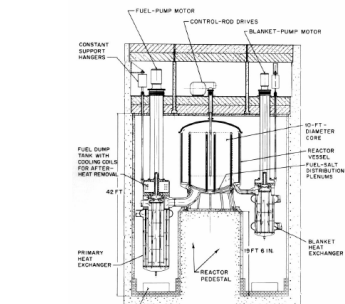
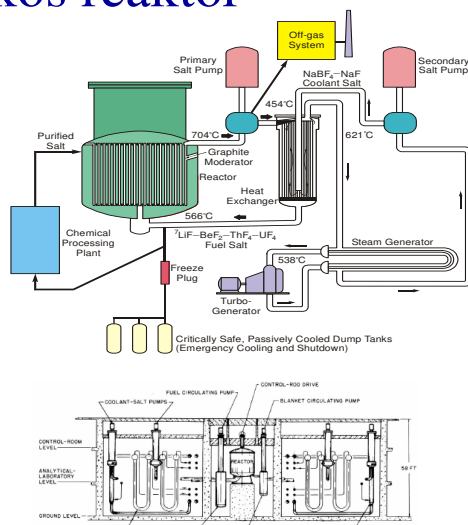


Fig. 39. Reactor Vessel Ready to Accept Graphite Core Assembly.

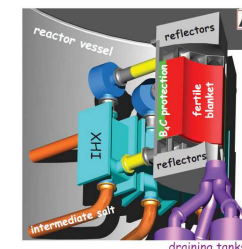
Sóolvadékos reaktor

- Molten Salt Breeder Reactor
- 2250 MWth, 1000 MWe
- 71,7% ⁷LiF - 16% BeF₂ - 13% ThF₄ - 0,3% UF₄ (mol%)
- tenyésztési tényező: 1,065

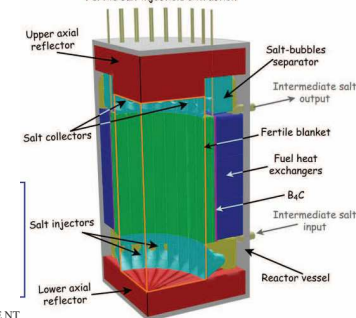


Sóolvadékos reaktor koncepciók - MSFR

- **Homogén, egyterű** koncepció
- Névleges paraméterek:
 - 3000 MWth
 - ~19 000 kg/s
 - Belépési hőmérséklet: 625 °C
 - Kilépési hőmérséklet: 775 °C
- Sóolvadék összetétele (primer): LiF-22,5% UNF₄
- 16 szegmens, alul belépő-, felül kilépőcsőcsok
- Háromkörös



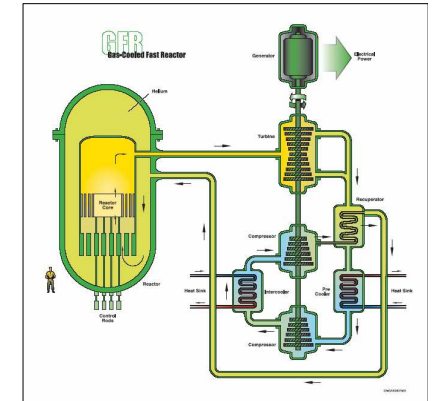
Fertile salt injection/extraction



Gázhűtésű reaktorok, szuperkritikus vízhűtésű reaktor

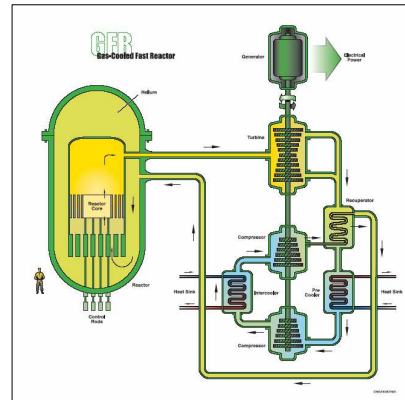
Gázhűtésű gyorsreaktor (GFR)

- A GFR egy **gyorsneutron-spektrumú, héliumhűtésű, zárt** üzemanyagciklusú reaktor, magas kilépési hűtőközeg-hőmérséklettel (**850 °C**).
- A magas hőmérséklet lehetővé teszi, hogy a GFR-hez közvetlen ciklusú gázturbinás rendszer kapcsolódjék (Brayton-ciklus), ami magas energiaátalakítási hatásfokú (**~48%**) villamosenergia-termelést tesz lehetővé.
- A magas kilépő hőmérséklet folyamathő előállítására, így pl. **hidrogéntermelésre is alkalmassá teszi** az atomerőművet.



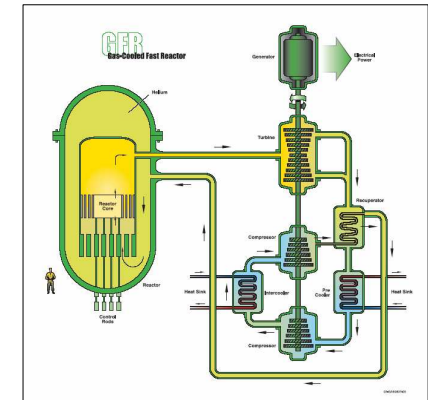
Gázhűtésű gyorsreaktor (GFR)

- A rendszer teljesen integrált kivitelben is megvalósítható, a kiegészítő üzemanyag reprocesszálható a helyszínen (**pirometallurgiai vagy más száraz eljárással**)
- Az összes hosszú életű radioizotóp (hasadási termék és aktinidák) az üzemanyagba történő helyszíni beépítését követően visszavezethetők a reaktorba transzmutálás céljából.
- Ezáltal minimalizálható a nukleáris anyagok szállítása → proliferáció-állóság.



Gázhűtésű gyorsreaktor (GFR)

- Különböző típusú üzemanyagok jöhetnek szóba a magas hőmérsékletű üzem feltételei között.
- A kemény gyorsneutron-spektrum jó hasadóanyag-újratermelő képességet (**legalább egységnyi tenyésztési tényezőt**) és magas transzmutációs hatékonyságot kölcsönöz a rendszernek.
- Az előbbi a rendelkezésre álló nukleáris üzemanyagkészletek — köztük a szegényített urán tartalmazó dúsítási maradék — hatékony hasznosítását, az utóbbi a hosszú életű transzuránokat tartalmazó radioaktív hulladékok mennyiségének minimalizálását eredményezi.

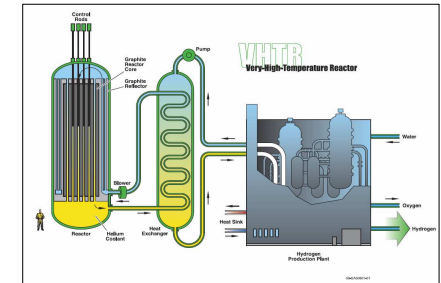


Gázhűtésű gyorsreaktor (GFR)

Reaktorparaméter	Referencia érték
Reaktorteljesítmény, MW _{hő}	600
Villamos teljesítmény (Brayton ciklusban), MW _e	288
Nettó erőműhatásfok, %	48
Hűtőközeg belépő/kilépő hőmérséklete, °C	490/850
Hűtőközegnyomás, bar	70
Átlagos teljesítménysűrűség, MW _{hő} m ⁻³	100
Referencia üzemanyag-kompozíció	UPuC/SiC(70/30%), kb.
Térfogatarány, üzemanyag/gáz/SiC	20% Pu-tartalommal 50/40/10%
Konverziós (tenyésztési) tényező	~1 (önellátó)
Kiegészi szint, %	5
Aktív zóna térfogata, m ³	5.8
Nyomásesés az aktív zónában, bar	0.4
Maximális üzemanyag-hőmérséklet, °C	1135
Nehézatomok tömege, tonna	16
Fajlagos Pu+MA tömeg, kg/MW _e	9.3

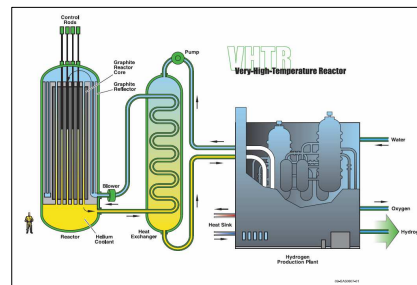
Nagyon magas hőmérsékletű reaktor (VHTR)

- A termikusneutron-spektrumú, nyitott üzemanyag-ciklusú VHTR rendszert a **villamosenergia-termelésen túl elsősorban magas hőmérsékletű folyamathő előállítására szánják:**
 - szénelgázosítás
 - termokémiai hidrogéntermelés céljából



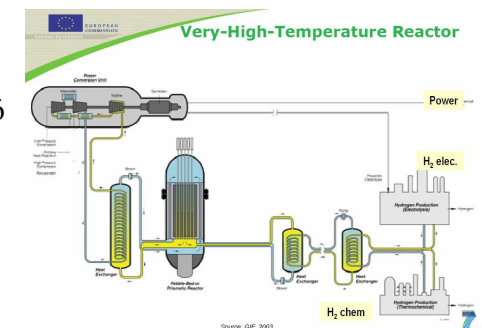
Nagyon magas hőmérsékletű reaktor (VHTR)

- Fejlesztése a grafitmoderátoros, héliumhűtésű reaktorok tekintélyes mennyiségű tapasztalatain alapul, ezért viszonylag gyors kifejlesztése és rendszerbe állítása remélhető.



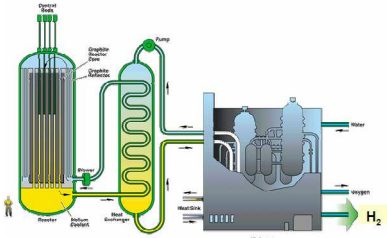
Nagyon magas hőmérsékletű reaktor (VHTR)

- Az aktív zóna építhető hasáb alakú blokkokból, amilyen a japán HTTR, valamint a General Atomics és mások közös fejlesztése alatt álló GT-MHR, vagy lehet golyóágyas (pebble bed), mint amilyen pl. a Dél-Afrikában fejlesztett PBMR.
- Az **1000 °C** körüli kilépő hőmérséklet alkalmas nagyon jó hatásfokú villamosenergia-termelésre és termokémiai hidrogén-előállításra egyaránt.



Nagyon magas hőmérsékletű reaktor (VHTR)

- Egy ilyen feladatra dedikált 600 MW_{hő} teljesítményű VHTR több, mint 2 millió normál m³ hidrogént képes előállítani naponta.
- A magas hőmérséklet eredményeként **a villamos energiát legalább 50%-os hatásfokkal termeli.**
- A hő és a villamos energia kogenerációja a VHTR-t **vonzó hőforrássá** teszi nagy ipari létesítményekhez.
- A 1000 °C feletti zónakilépő hőmérséklet a nukleáris hőt képessé teszi olyan folyamatokhoz történő alkalmazásra, mint pl. az acél- és az alumíniumtermelés.



Reaktorparaméter	Referencia érték
Reaktorteljesítmény, MW _{hő}	600
Hűtőközeg be/kilépő hőmérséklete, °C	640/1000
Hűtőközeg be/kilépő nyomása	Folyamattól függő
Hélium tömegárama, kgs ⁻¹	320
Átlagos teljesítménysűrűség a reaktorban, MW _{hő} m ⁻³	6-10
Referencia üzemanyag	ZrC-burkolatú szemcsék, pálcák vagy golyók.
Nettó erőműhatásfok, %	>50

Gázhűtésű gyorsreaktor (GFR)



- Reactor technology of VHTR
- Fuel cycle processes of the SFR
 - Pellet in plate : individual pellets confined, high burnup
 - backup : pellet in pin, lower global density
 - Composite cladding plate
- Specific safety approach (low thermal inertia)
 - Backup pressure by metallic close containment
 - Decay Heat Removal + Passive natural circulation
- **Demo ALLEGRO 80MWth under study**



Source: GIF, 2016

Nagyon magas hőmérsékletű reaktor (VHTR)

Much coating – little fuel, fully confined! Each particle is a separate containment (up to 98 MPa)

TRISO

10'000-20'000 TRISO particles in graphite matrix

Pyrolytic C-layer
SiC-layer
Pyrolytic C-layer
Porous C-buffer
UO₂

Nagyon magas hőmérsékletű reaktor (VHTR)

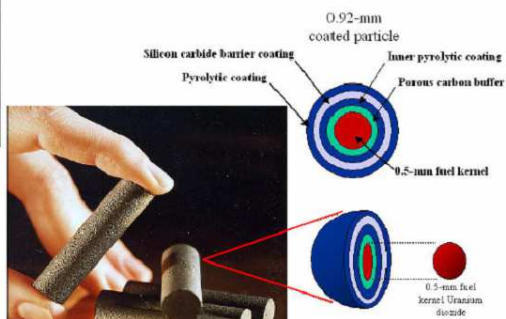
HTR core configurations

Pebble bed

Prismatic

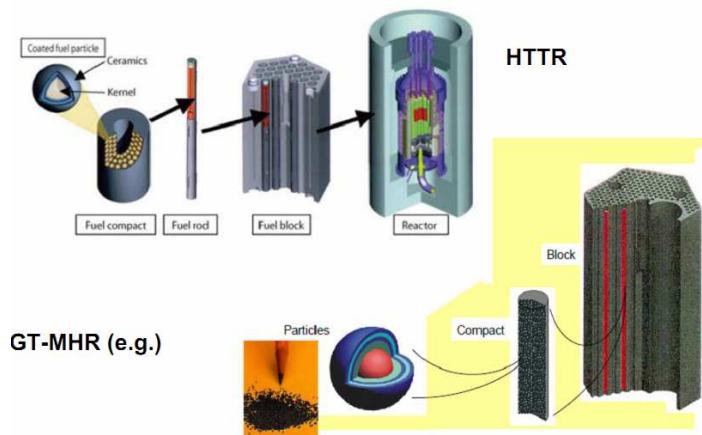
Nagyon magas hőmérsékletű reaktor (VHTR)

Prismatic fuel

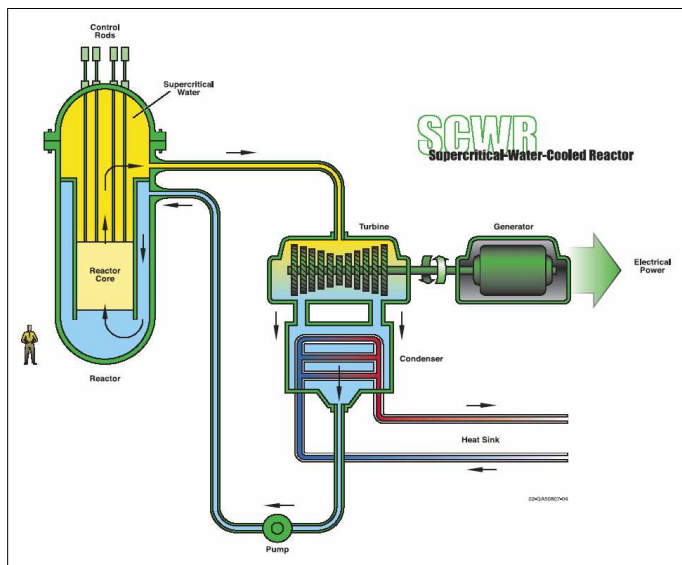


Nagyon magas hőmérsékletű reaktor (VHTR)

Fuel compacts (prismatic HTR)



Szuperkritikus vízű reaktor (SCWR)



SCWR paraméterek (HPLWR)

Reaktorparaméter	Referenciaérték
Fajlagos beruházási költség, USD/kW _e	900
Blokkteljesítmény, MW _e	1700
Neutronspektrum	termikus
Nettó hatásfok, %	44
Hűtőközeg belépő/kilépő hőmérséklete, °C	280/510
Hűtőközeg nyomása, MPa	25
Átlagos teljesítménysűrűség, MW _{hőm} ⁻³	~100
Referencia üzemanyag	UO ₂ magas szilárdságú ausztenites, vagy ferrites-martenzites rozsdamentes acél, vagy Ni-ötvényzet burkolattal
Kiegészi szint, MWnap/kgnehézfém	~45
Üzemanyag-károsodás, dpa	10-30
Biztonsági megközelítés	Hasonlít az ALWR-ekéhez

- Termikus hatásfok ~44%;
- Nem léphet fel kiszáradás;
- PWR-eknél egyszerűbb felépítés:

•nincs szükség térfogat-kompenzátorra, gőzfejlesztőre,

- BWR-eknél egyszerűbb felépítés:

•Nincs szükség reaktoron belül cseplevélasztóra, gőzszárítóra, recirkulációs szivattyúkra

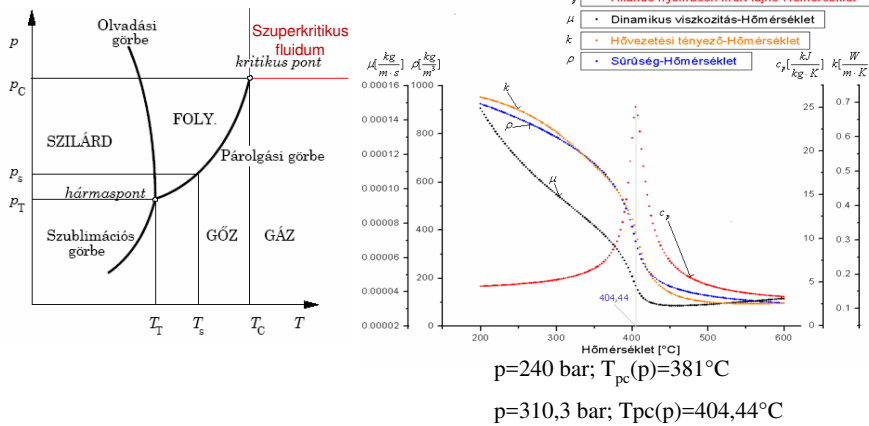
- Elméletileg alacsonyabb beruházási költség;

- Új eszköz: CFD kódok?
⇒ Validáció szükséges!

Szuperkritikus folyadék

Vízre: $T_C=373,95\text{ }^\circ\text{C}$
 $p_C=220,64\text{ bar}$

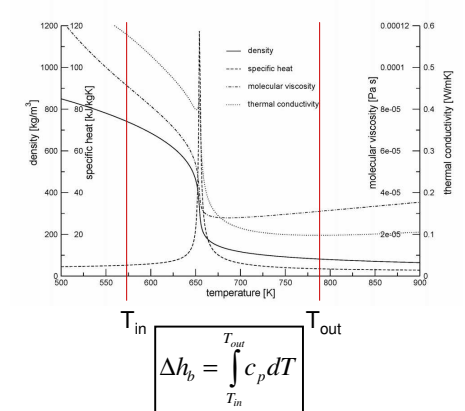
Merekek anyagjellemző változás a pszeudokritikus hőmérséklet szűk környezetében



Miért használjuk?

Az SCW műszaki jelentősége

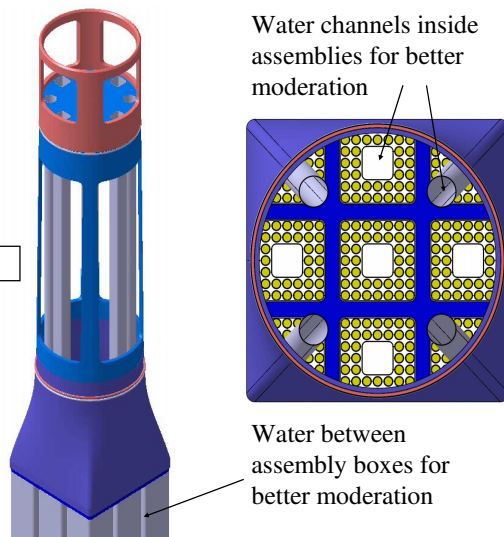
- A $p_{\text{krit}}=221\text{ bar}$ fölött melegítve a vizet nem lép fel fázisátalakulás \rightarrow nincs forráskriszís, kiszáradás, felületi túlhevülés;
- Izobár fajhő csúcs \rightarrow magasabb hűtőközeg entalpia növekedés \rightarrow azonos hűtőközeg tömegáram több hőt tud elvonni \rightarrow kevesebb hűtőközeg szükséges azonos blokkteljesítményű és így kisebb szivattyúk, kisebb belső átmérőjű primerköri csövek szükségesek.



Basis: Assembly Design Concept of Hofmeister et al. (2005)

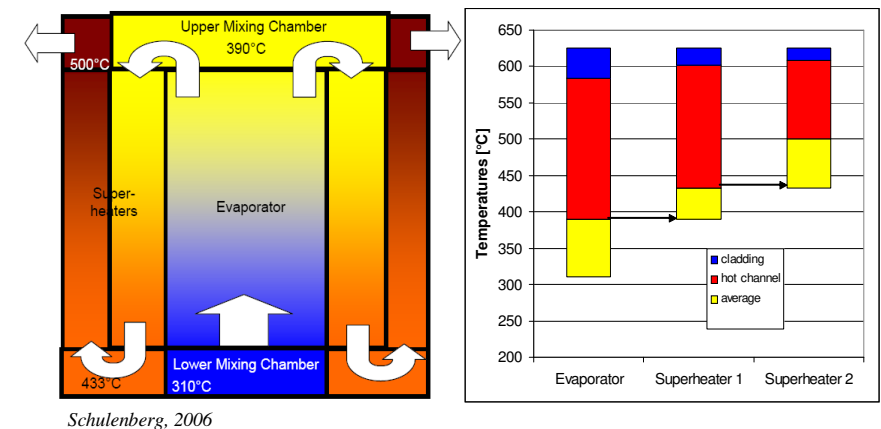
steam to turbines
 Head Piece

Cluster of 9 assemblies with 40 fuel pins each



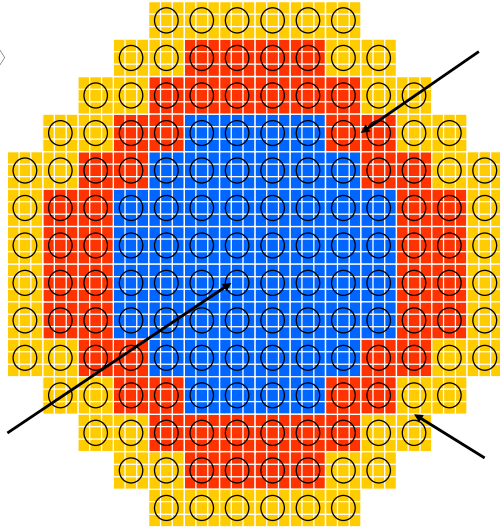
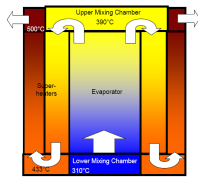
A 3-Pass Coolant Flow in the Core allows 500°C Average Core Exit Temperature with 625°C Cladding Temperature

Advantages of the Three Pass Core Design Proposal



Schulenberg, 2006

Core Arrangement



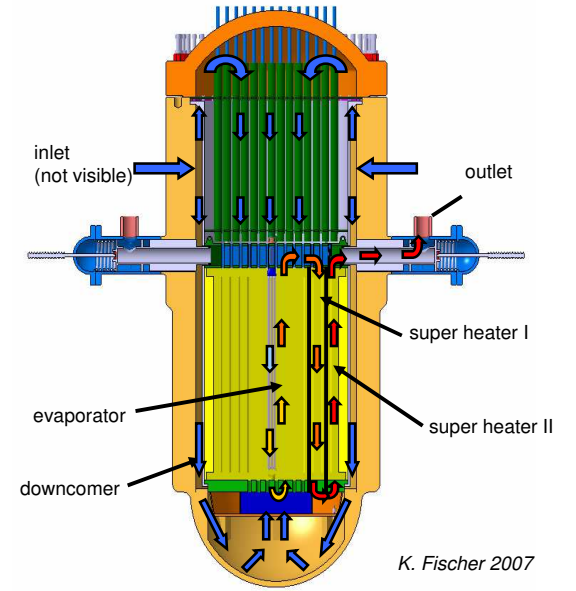
Superheater 1:
52 Clusters
Downward Flow

Evaporator:
52 Clusters
Upward Flow

Superheater 2:
52 Clusters,
Upward Flow

Coolant Flow Path

- inlet: moderator and gap water
- upward flow: downcomer water
- mixed in the center of the lower mixing plenum
- downward flow in superheater I
- upward flow in superheater II



K. Fischer 2007