

ALLEGRO: gázhűtésű gyorsreaktor Közép-Európában

Czifrus Szabolcs

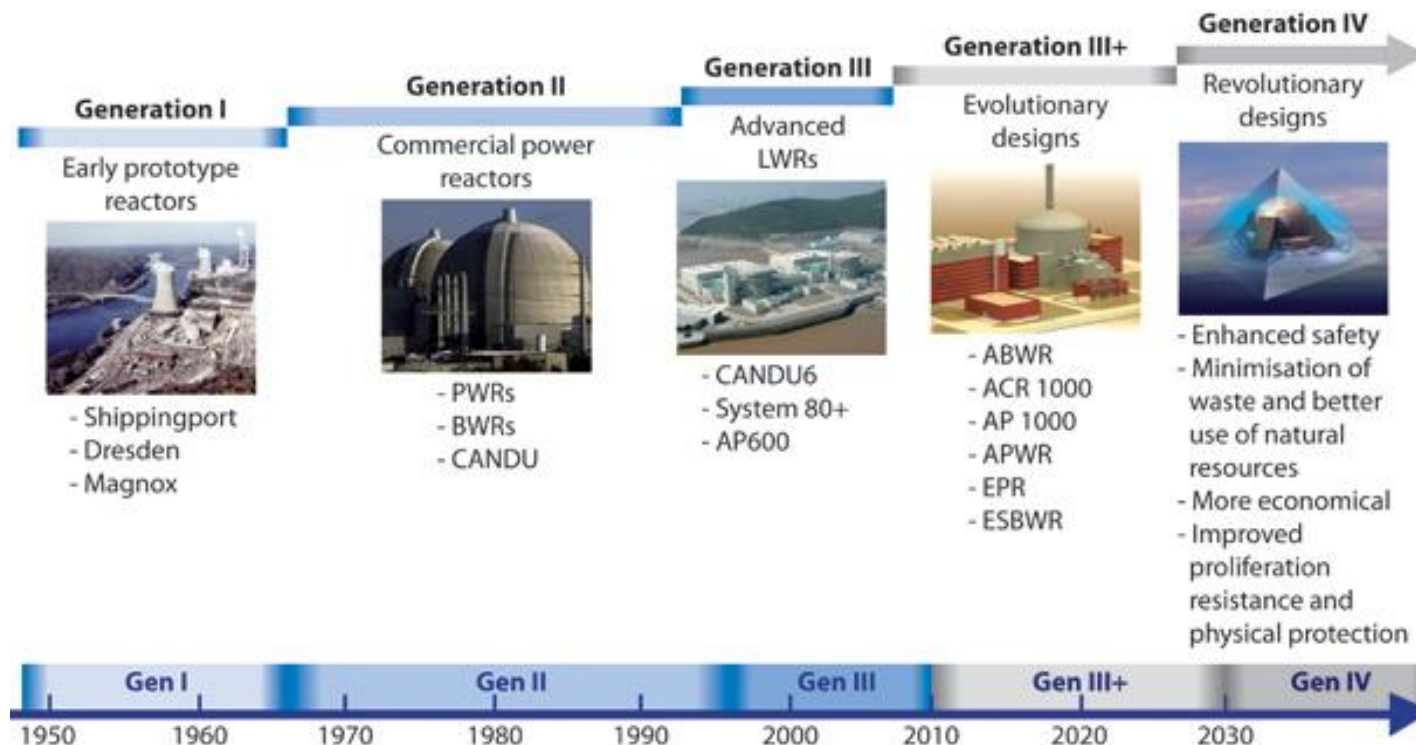
BME Nukleáris Technikai Intézet

A nukleáris energiatermelés fő problémái

- Fenntarthatóság
- Radioaktív hulladékok és kiégett üzemanyag kérdése
- Biztonság
- Balesetek - megítélés
- Hatásfok
- Tudunk-e jobbat?



Reaktorgenerációk



I: 1970-es évek előtti reaktorok

II: A 70-es évektől kifejlesztett, többségében könnyűvízes reaktortípusok, jelenleg is működnek

III: A II. generációs reaktortípusok optimalizálása biztonsági és gazdaságossági szempontok szerint

IV: Fejlesztés alatt, 6 fő típus vizsgálata nemzetközi projektekben. Céljuk fenntartható energiaforrás biztosítása (villamos- és hőtermelés, tengervíz sótalánítás), illetve a hidrogéntermelés.

A III. generációs reaktorok

A második generációs atomerőművek szisztematikus továbbfejlesztésének eredményeként születettek meg

Ezért evolúciós atomerőműveknek is nevezik őket

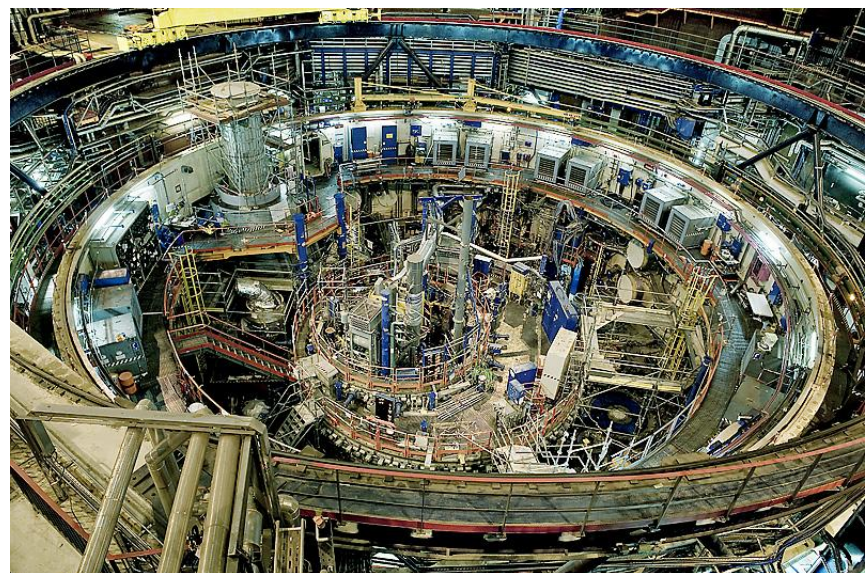
A fejlesztési munka ma is tart. Valószínű, hogy a következő egy-két évtizedben szinte kizárólag ilyen atomerőművek épülnek a világon

- Fokozott biztonság – a súlyos balesetek kockázatának nagyfokú (nagyságrendekkel történő) csökkentése – zónaolvadás valószínűsége $< 10^{-6}/\text{év}$
- Hosszabb élettartam (60 év, amely tovább nyújtható)
- Megnövelt hatásfok
- Az üzemanyagciklus nem záródik
- A hulladék kérdését nem enyhíti
- Az uránkészletek kihasználhatóságát jelentősen nem emeli



IV. generációs reaktortípusok

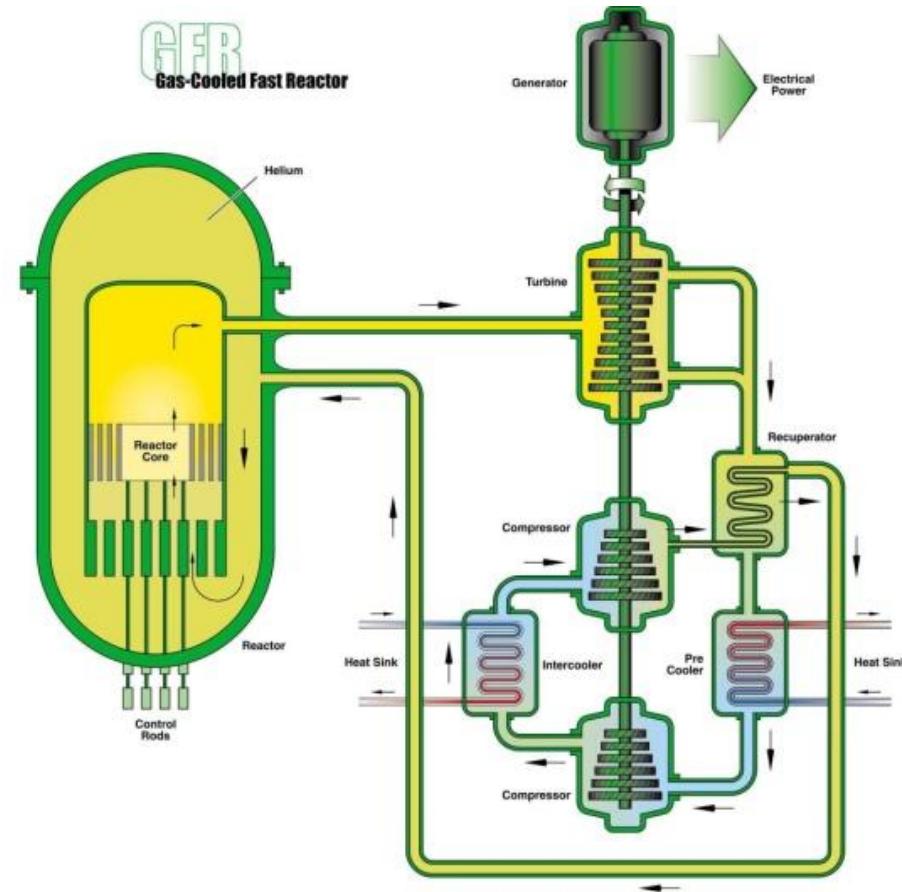
- Fenntarthatóság – a hasadóanyag-készletek jelentősen megnövelt és hosszabb távú kihasználhatósága
- A nukleáris/radioaktív hulladékok mennyiségének minimalizálása, a jövő generációk terheinek csökkentése
- Megbízhatóság és biztonság további növelése
- Proliferáció-állóság, növelt fizikai védelem



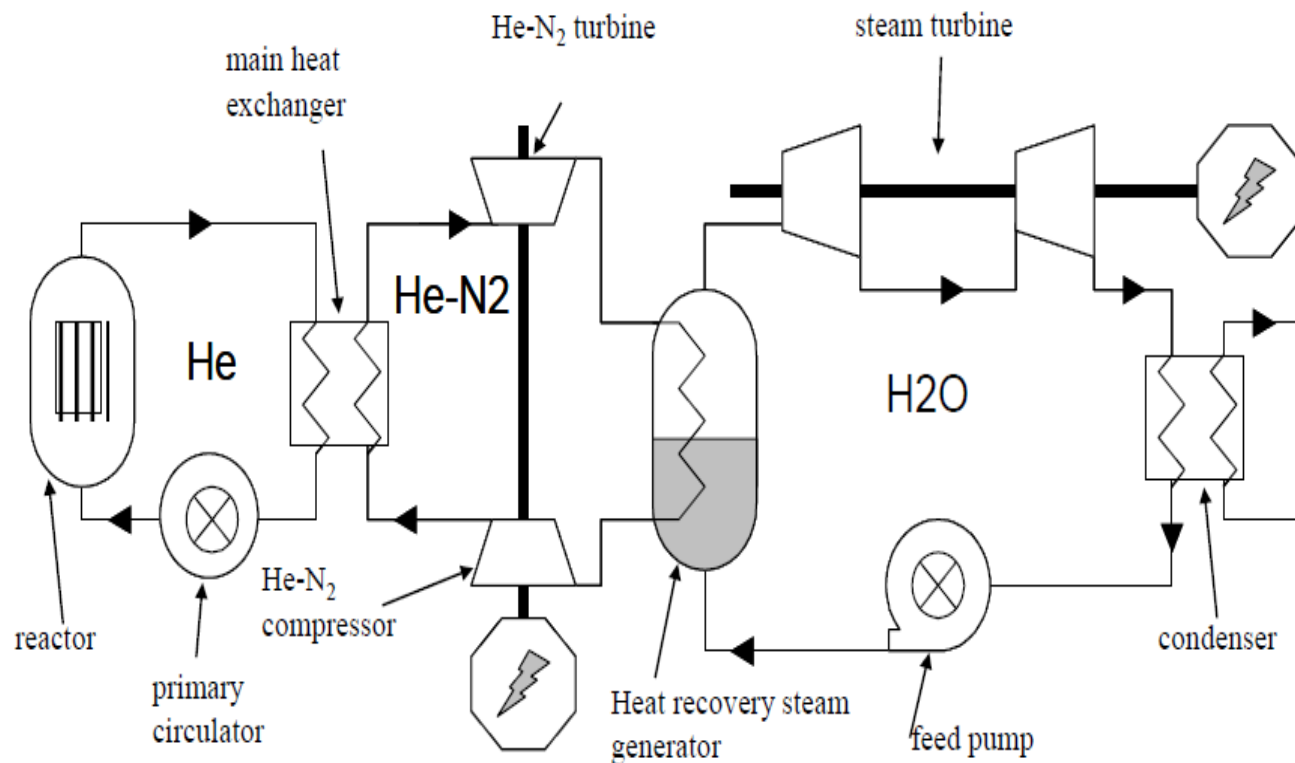
IV. Generációs típusok – előnyök, kihívások

- Gázhűtéses gyorsreaktor (GFR):

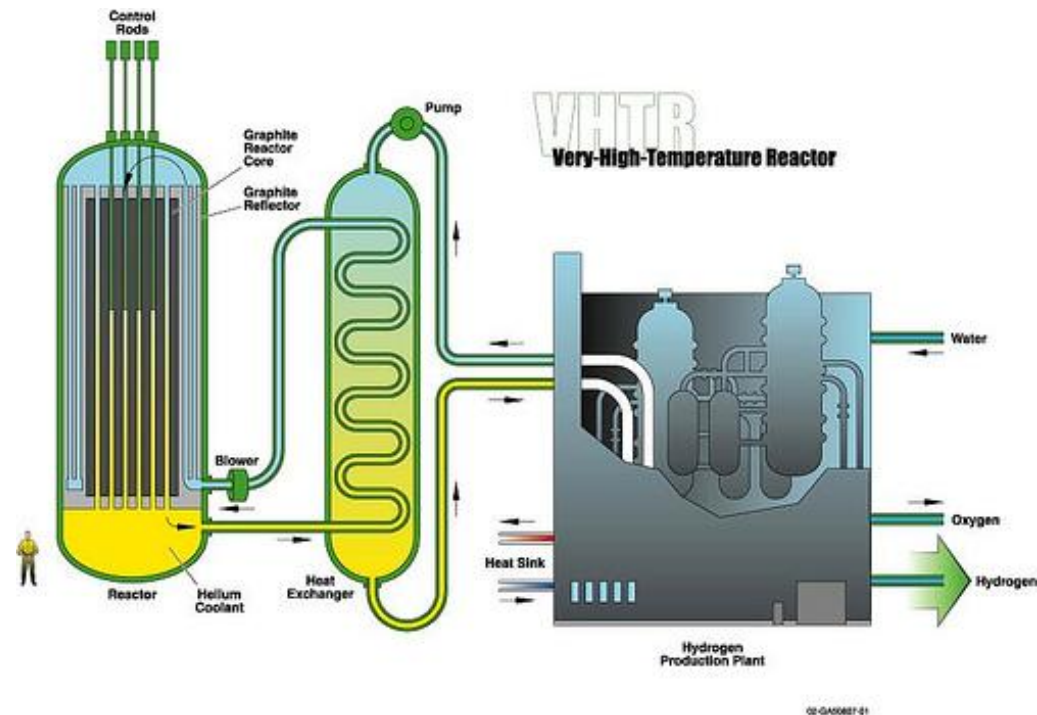
- soha nem működött még ilyen, de gázhűtéses reaktorok már voltak/vannak
- Új technológiák
- Nagyon magas hatásfok
- Zárt üzemanyagciklus, a hulladék minimalizálása
- Gyors neutronspektrum, nincsen termalizáció (lassítás)
- A hűtőközeg: 70 bar nyomású hélium
- Tesztek az ALLEGRO kísérleti reaktoron történének



GFR – legújabb koncepciója: 3 kör

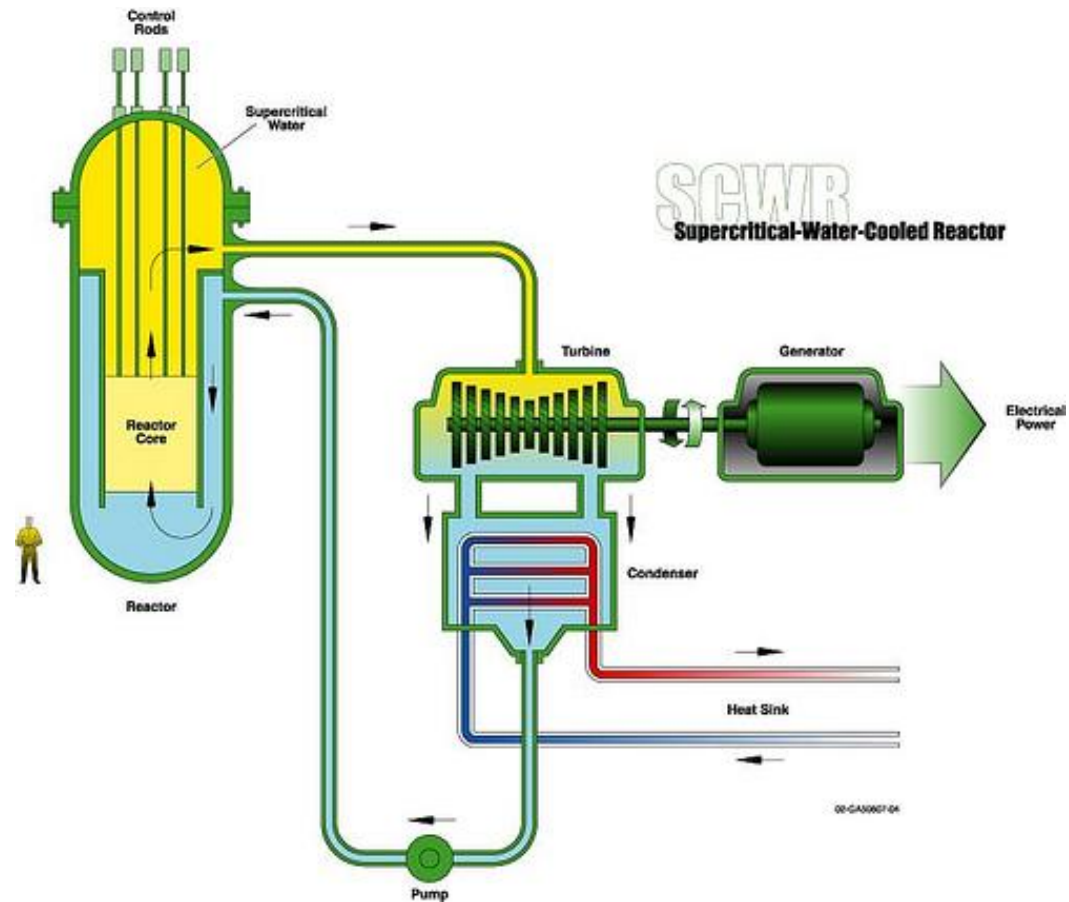


- Nagyon magas hőmérsékletű reaktor (VHTR):
 - A technológia részben új: magas hőmérsékletű reaktorok gázhűtéssel már működtek (USA, Németország)
 - Jelenleg is vannak kísérleti reaktorok (Japán, Kína)
 - Az üzemanyag grafitba ágyazva, sokmillió kis gömböcskében helyezkedik el
 - Az üzemanyagciklus nyitott
 - Magas hatásfok, fűtésre és hidrogéntermelésre is használható
 - Hélium hűtőközeg, 1000 C körüli kilépő hőmérséklettel
 - Speciális üzemanyag



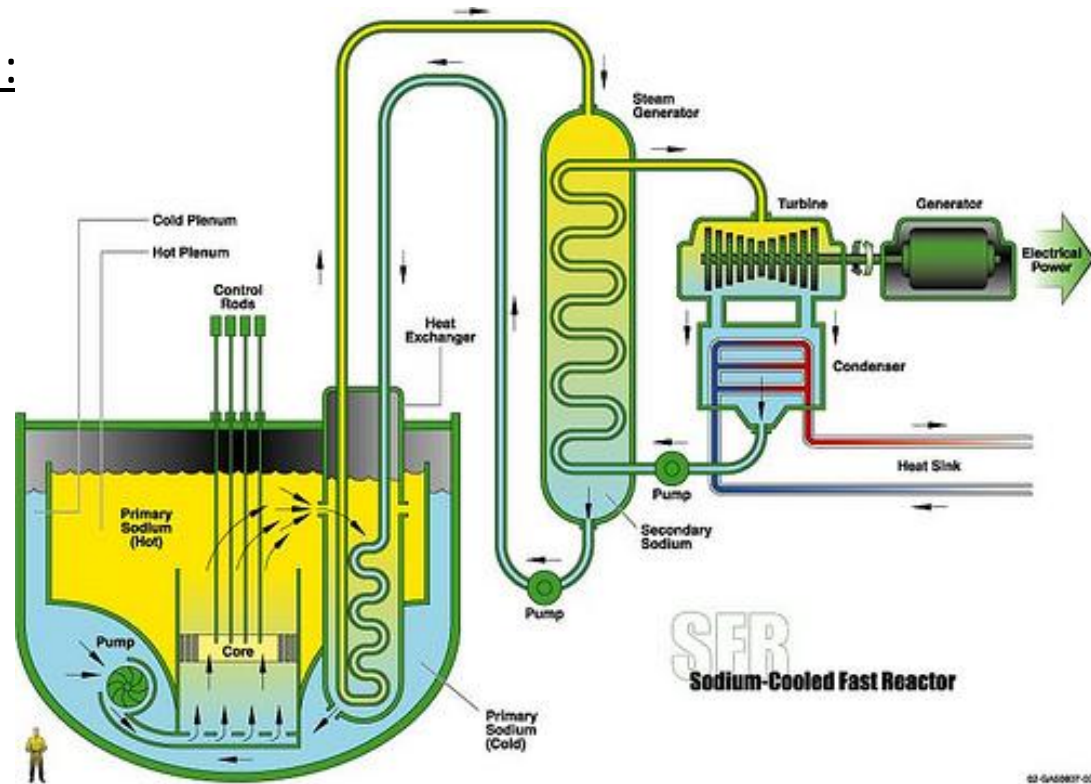
- Szuperkritikus nyomású vízzel hűtött reaktor (SCWR):

- Termikus hatásfoka kb. 30%-al magasabb, mint a jelenleg üzemelő nyomottvizes atomerőműveké
- Víz hűtőközeg, de nincs fázisátalakulás
- Kilépő hőmérséklet 510-550 C
- Lehet termikus vagy gyorsreaktor is
- Urán-oxid üzemanyag

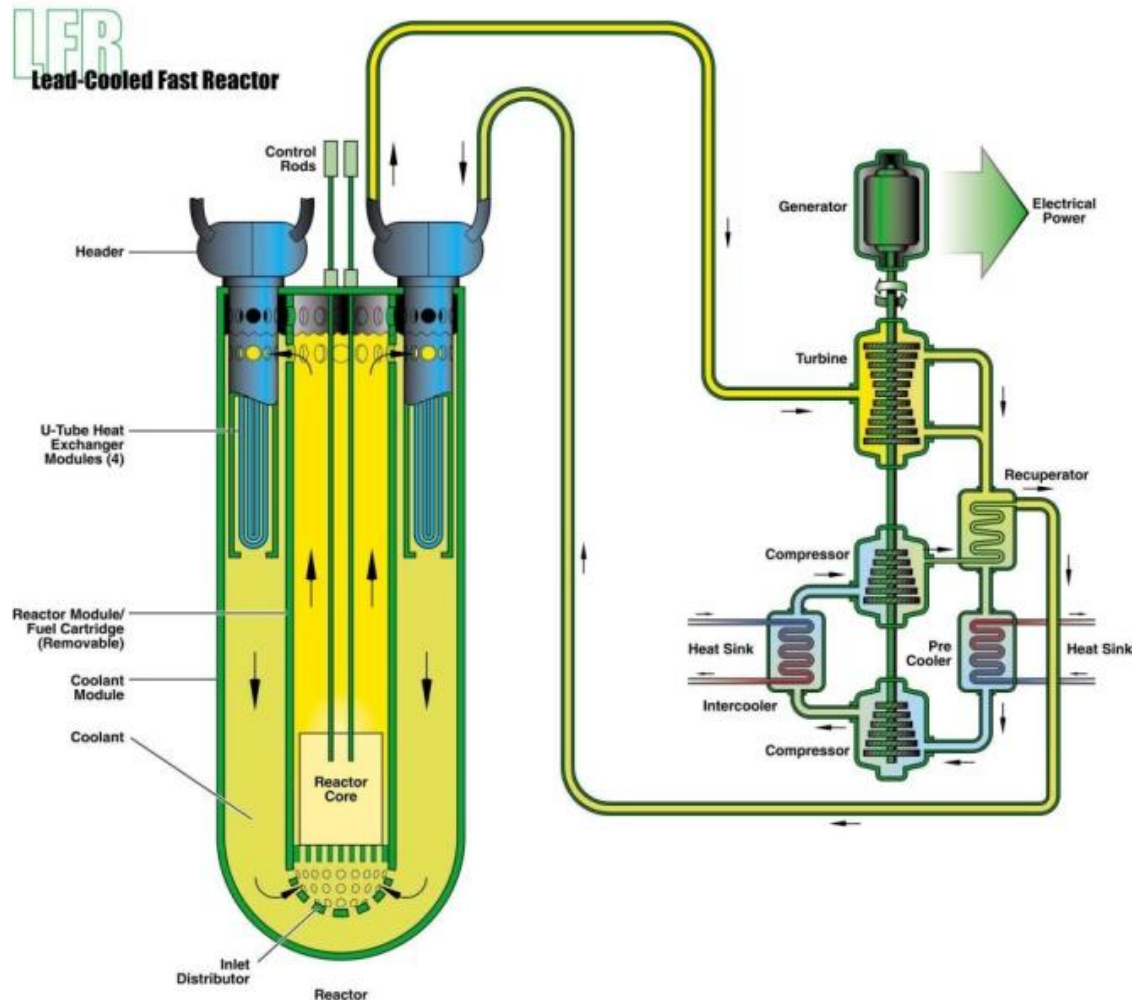


- Nátriumhűtésű gyorsreaktor (SFR):

- A technológia ismert: francia reaktorok (Phenix és Super Phenix, leállítva), valamint orosz reaktorok (BN-350, BN-600, működik)
- Plutónium és urán oxid üzemanyag (MOX, oxid-keverék)
- Újabb tervek szerint 3 körös lesz

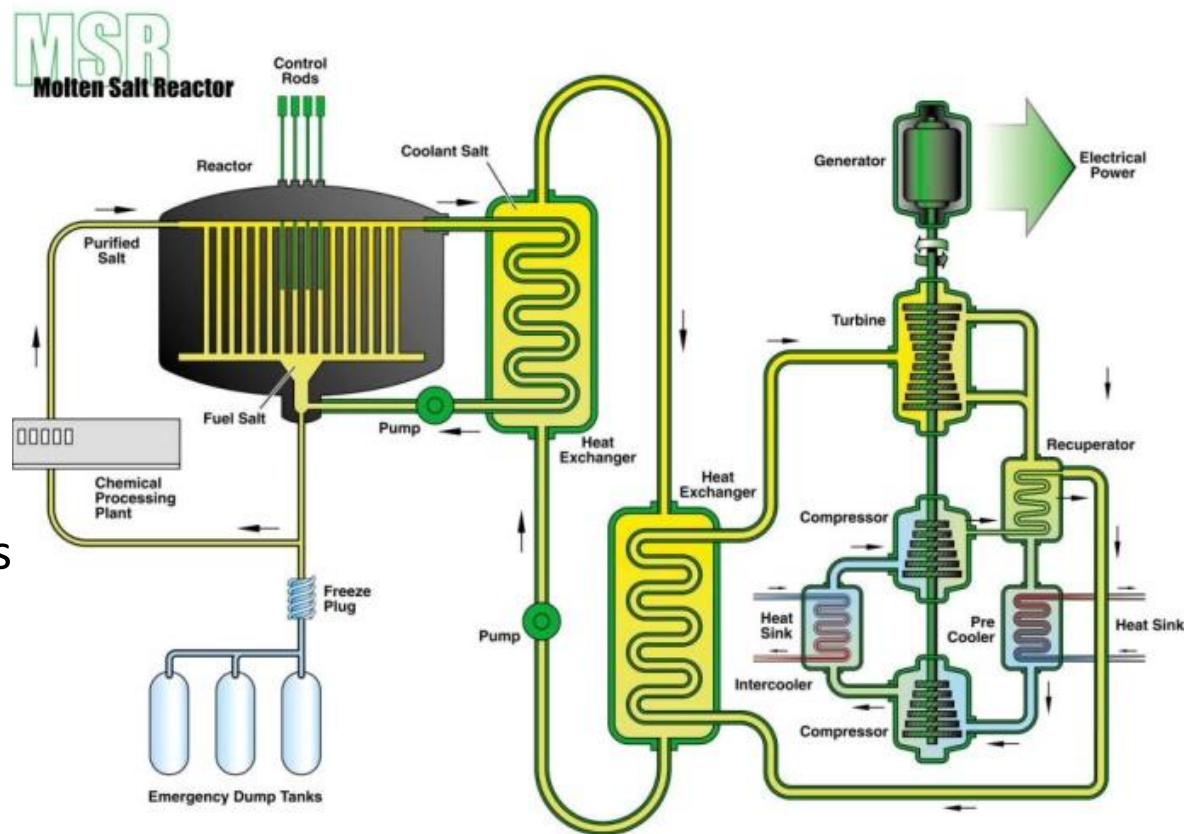


- Ólomhűtésű gyorsreaktor (LFR):
 - A technológia ismert: orosz reaktorok
 - Plutónium és urán oxid üzemanyag (MOX, oxid-keverék)
 - A hűtőközeg ólom-bizmut eutektikum



Sóolvadékos reaktor (MSR):

- A technológia részben ismert
- Plutónium és urán oxid üzemanyag (MOX, oxid-keverék)
- Folyamatos reprocessálás



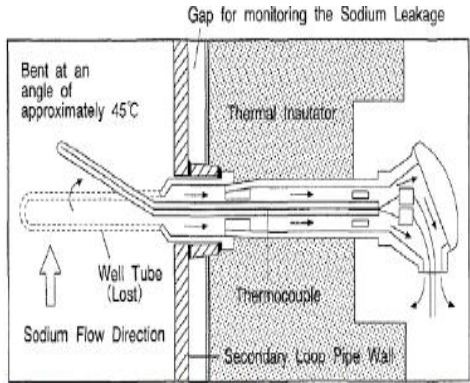
Hűtőközegek – eddigi alkalmazásuk tapasztalatai

- Folyékony fémek: nátrium, ólom, ólom-bizmut eutektikum
- A folyékony fémek előnyei:
 - kiváló hőátadási tulajdonságok
 - magas forráspont
 - alacsony olvadáspont
 - sugártűrő képesség
 - minimális hatás a neutronokra
- De: ha elfolyik, jelentős gondot okoz (Monju, BN-600 (27 esetben))
- Hélium:
 - Neutronokra átlátszó
 - Alacsony hővezetőképesség
 - Kis sűrűség miatt nagy áramlási sebesség és nagy nyomás kell
 - Legalacsonyabb „molekulatömeg”
 - Diffúzív veszteségek szelepeknél, tömítéseknél stb.
 - nem keletkezik radioaktív hulladék aktiválódással

Műszaki kérdések, kihívások

	Na	Pb	LBE	He
Atomic Weight	22.997	207.21	208	4
Melting Point (°C)	97.8	327.4	123.5	n/a
Boiling Point (°C)	892	1737	1670	-267
Density (kg/m³)	<i>880</i>	<i>10500</i>	<i>10300</i>	0.178
Specific Heat (J/kg-K)	<i>1300</i>	<i>160</i>	<i>146</i>	5200
Heat Capacity (MJ/m³-K)	<i>1.14</i>	<i>1.68</i>	<i>1.50</i>	0.0009
Thermal Conductivity (W/m-K)	<i>76</i>	<i>16</i>	<i>11</i>	0.152 <i>0.238</i>
Viscosity (cP)	<i>0.34</i>	<i>2.0-2.5</i>	<i>1.7</i>	0.018 <i>0.031</i>

Values at STP. *Italic = Evaluated at ~300°C*



Source: Figure 4 from A. Miyakawa et al., "Sodium Leakage Experience at the Prototype FBR Monju," Unusual Occurrences During LMFR Operation, IAEA-TECDOC-1180, October 2000. Used with permission.

Műszaki kérdések, kihívások

- Folyékonyfém-hűtés: ólom és ólom-bizmut eutektikum (LBE) esetében egy átlagos kapacitású atomerőmű primerkörében néhány ezer tonna nagyságrendű tömegű hűtőközeg van
- Kompatibilitási és korróziós kérdések:
 - Viszonylag sok tapasztalat
 - A nátrium kompatibilis a rozsdamentes acéllal
 - 60 évnél hosszabb üzemidőkre tervezhető
 - De: levegővel és vízzel nem érintkezhet (inert atmoszféra a reaktortartályon és primer rendszeren belül) – hőcserélő!
 - 50-100 évvel az alkalmazás után még szennyezett Na is inaktívnak tekinthető
 - Ólom-bizmut eutektikum (LBE)
 - Bizonyos acélfajtákkal alkalmazható
 - Ni oldhatósága problémát jelent
 - Védő oxidréteg alkalmazása az üzemanyag-burkolaton, de 550 C fölött az oxidréteg vastagodik és instabillá válik
 - Rontja a hőátadást
 - Erózió minimalizálása: kis áramlási sebességek
 - Ólom aktiválódása: biológiai veszélyeket hordoz, a keletkező ^{210}Po 138 napos felezési idejű
 - Ezért szigorúan zárt rendszerben kell keringetni
- Hűtőközegvesztés problematikája
- Üzemanyag: oxid helyett karbidok
- Üzemanyag burkolata: új anyagok, elsősorban karbidok (kerámia burkolat)
- Gyors neutronokkal működő rendszerek elsősorban, a neutronlassítás hiánya
- Szivattyúk
- Tesztelés bonyolult

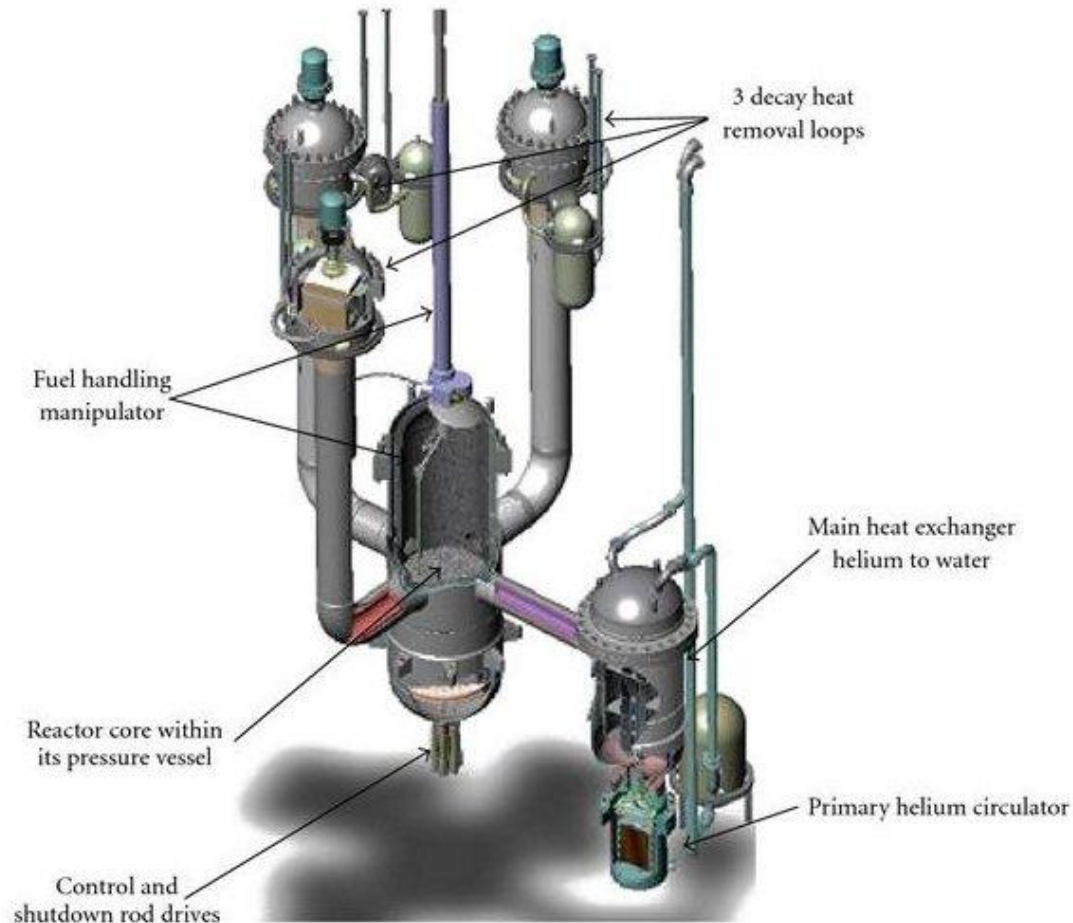
ALLEGRO – a gázhűtéses gyorsreaktor prototípusa

- Célja a GFR 2400 – 1200 MW elektromos teljesítményű erőmű létesítéséhez szükséges tesztfeltételek biztosítása

- Tervezett ALLEGRO zónák:

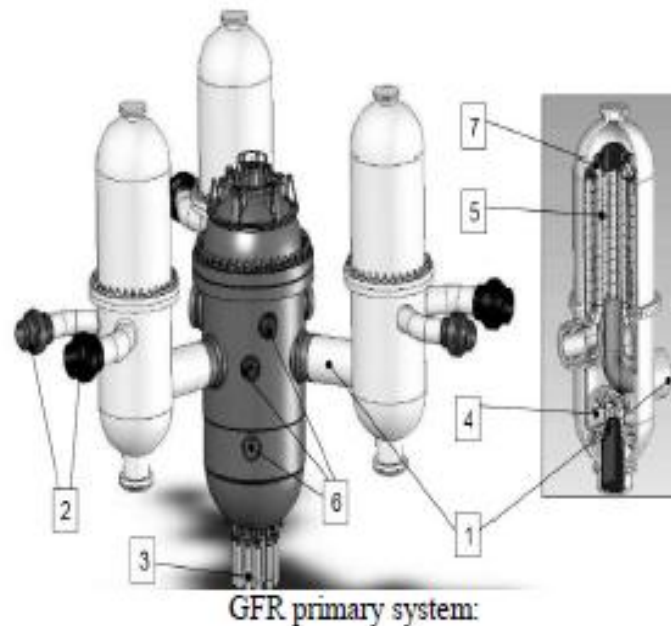
- Rozsdamentes acél üzemanyag-burkolat, MOX (mixed oxide fuel, Pu + U oxid) üzemanyaggal
Kilépő hőmérséklet: 560 C
- Keramikus üzemanyag: U és Pu karbid üzemanyag, karbid burkolatban

- Tervezett termikus teljesítmény: 75 MW, nem lesz turbina és generátor
- Lehetséges telephelyek: Magyarország, Szlovákia, Csehország
- Jelenleg csak tervek vannak
- 2018-ra jósolható egy engedélyeztethető változat terveinek véglegesítése
- Nemzetközi projektek, összefogás



Tenyésztő reaktor

- Az elhasznált (kiégetett) hasadóanyag mennyiségével közel megegyező mennyiségű hasadóanyagot termelhet
- Konverziós tényezője 1-hez lehet közel
- A hasadóanyag elsődlegesen plutónium, de urán is jelen van a tenyésztés érdekében (az ^{238}U neutronbefogással és béta-bomlással ^{239}Pu -á alakul a reaktorban)



1. Primary cross-duct
2. Secondary pipes with isolating valves
3. Control Rod Drive Mechanisms
4. Primary blower and associated motor
5. Compact Heat Exchanger modules
6. Pipe connections for Decay Heat Removal systems
7. Primary isolation valve

Biztonsági feltételek

- Biztosítani kell az üzemanyag burkolaton belül maradását még nagyon magas hőmérsékleteken is (tranziensek)
- Ezért a burkolatnak nagyon magas hőmérsékleten is meg kell őriznie integritását
- Bomlási- (remanens-) hő-elvonó rendszerek
- A hélium hűtőközeg nyomáscsökkenése – jelentős probléma, mivel kis nyomáson erősen lecsökken a hőelvitel
- Dupla falú reaktortartály – ennek ellenére az üzemzavari hőelvonás problematikus lehet
- A hélium és a SiC burkolat hőtehetetlensége nagyon kicsi – gyors tranzienseknél nagyon magas hőmérsékletek
- A reaktivitás-tartalék nagyon magas a tesztelhetőség miatt
- Reaktivitás-lezáró (láncreakciót leállító) rendszerek működése kritikus!

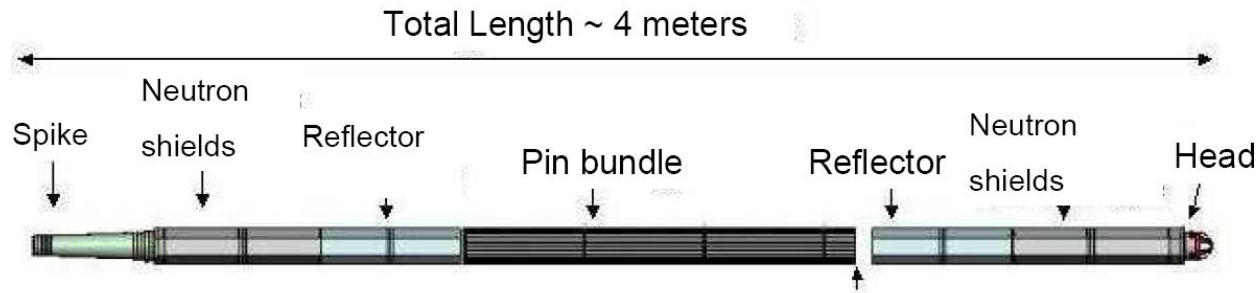
Reaktorfizikai érdekességek, problémák

- Rénium – az üzemanyagpálca belső felületén elhelyezkedő 50 μm vastag burkolat
- Célja: az üzemanyag és a burkolat közötti kölcsönhatás csökkentése, a burkolat védelme
- Azonban: a rénius rendkívül erős neutronbefogó
- Ezért kis méretváltozás is a reaktorfizikai jellemzők erős változását vonja maga után – jelentős vastagságváltozás (gyártási hiba) akár a üzemzavarhoz is vezethet
- Számításaink szerint a burkolat belsejében a megengedhető vastagság-tolerancia 0,5 μm körül van (1 μm változás már jelentős reaktivitás-változást okoz)

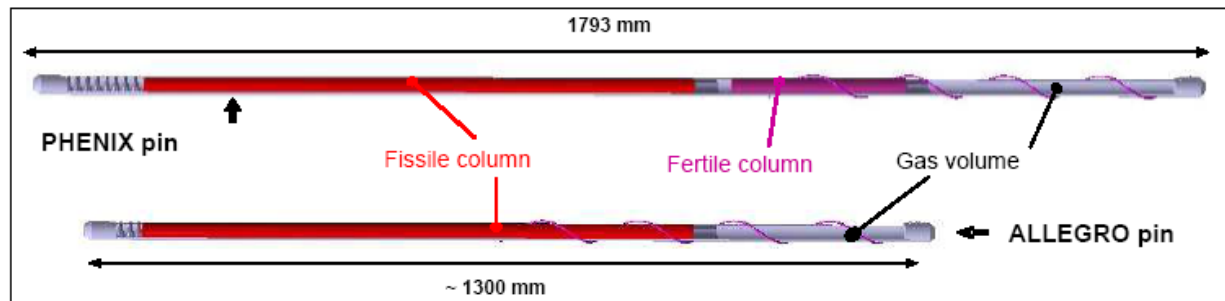
Reaktorfizikai és termohidraulikai modellezés

- A BME NTI 2007 óta tagja különböző, IV. generációs reaktorokat vizsgáló nemzetközi konzorciumoknak
- 2010 után: GoFastR projekt, a KFKI (most Eneriakutató Központ) és francia, angol, olasz, cseh, szlovák stb. konzorciumi partnerekkel
- Az NTI reaktorfizikai és termohidraulikai modellezést végzett és végez (ALLIANCE projekt)
- A záró jelentés érdekes eredményeket hozott – elsősorban a reaktor biztonsága szempontjából

ALLEGRO modellezés

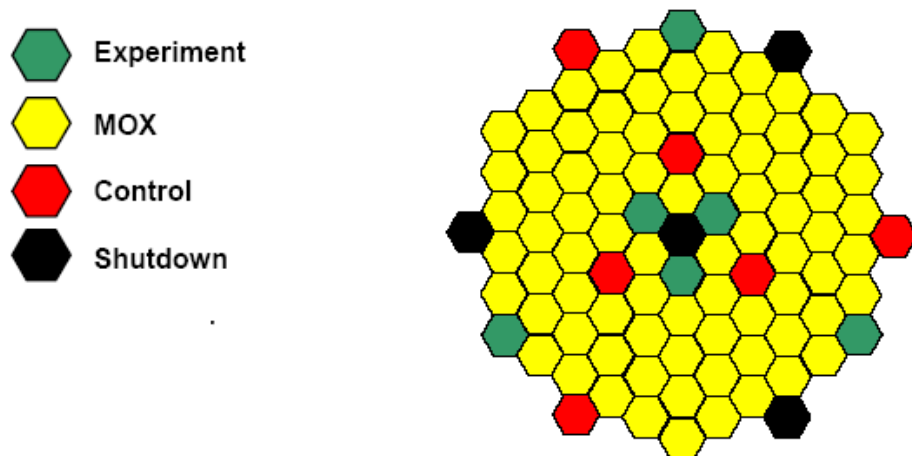


Üzemanyag- kazetta

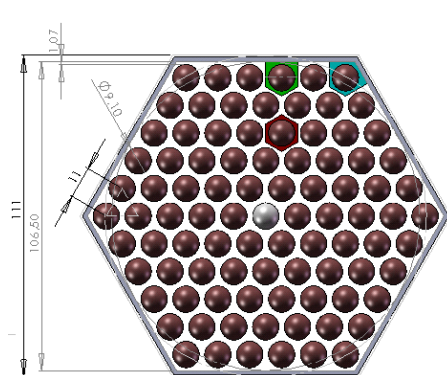


Üzemanyagpálca

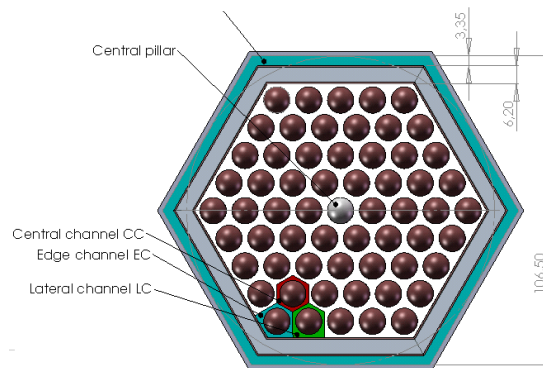
Az ALLEGRO aktív zónája és kazettája



Zónaelrendezés



Demonstration core



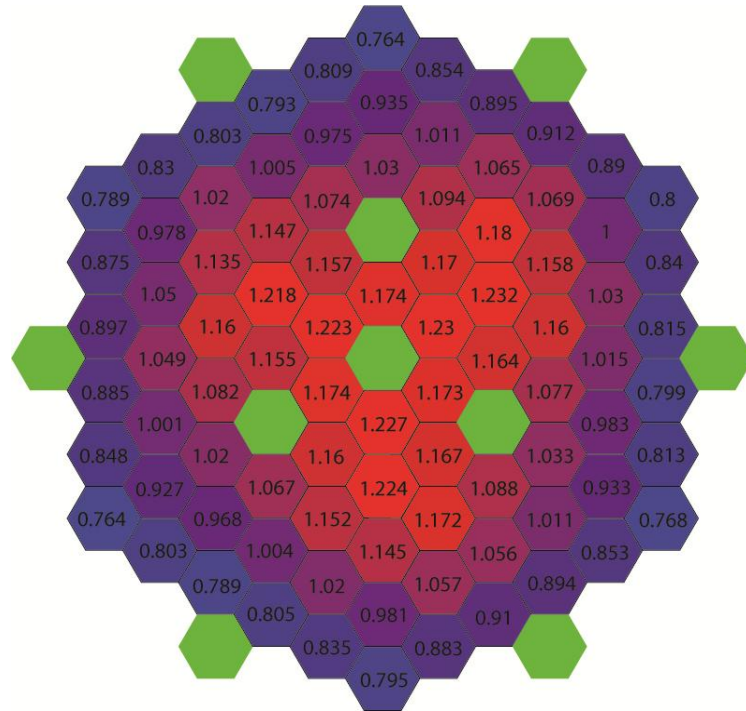
Irradiation core

Reduction pins number and hydraulic diameter

Kazetta-modell

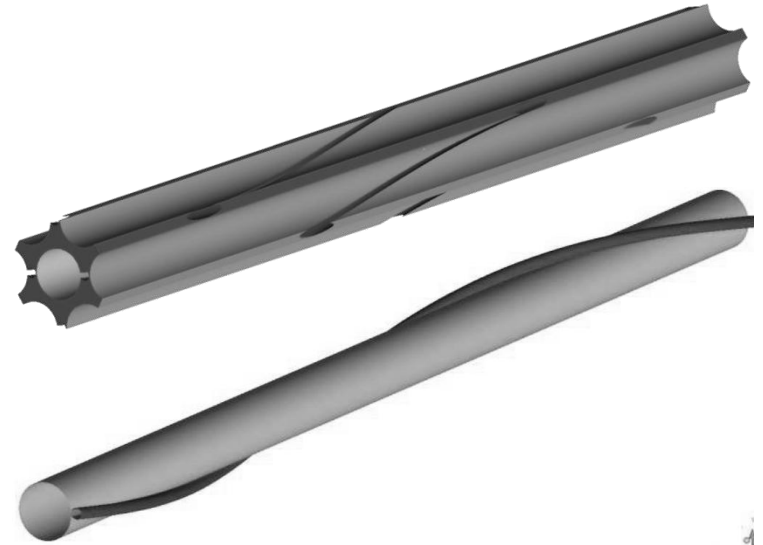
ALLEGRO modellek

- Monte Carlo modellezés
- Reaktorfizikai paraméterek számítása
- Rávilágított néhány komoly reaktivitás-lezárási hiányosságra

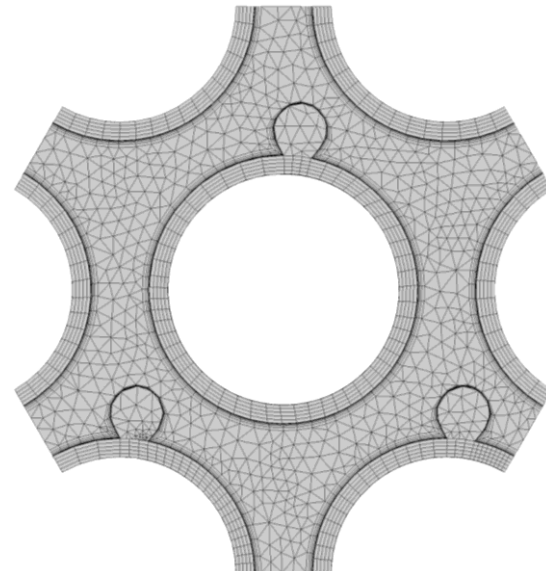
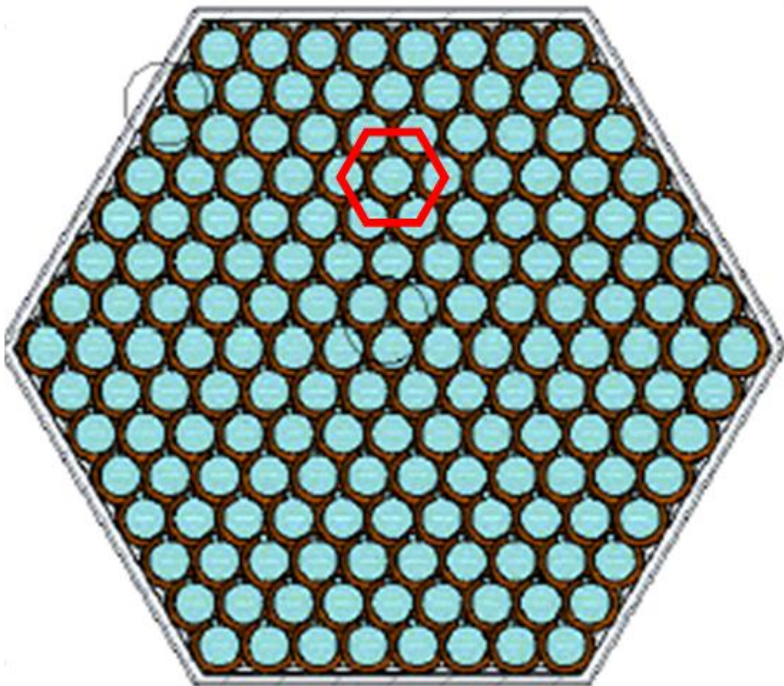


Termohidraulikai modellezés

- Six subchannels of bundle
- 0.86 m long active part
- Fluid (He) + solid regions (cladding, wires)
- Hybrid mesh
- 8.8 million/18.9 million nodes/cells (based on mesh test)

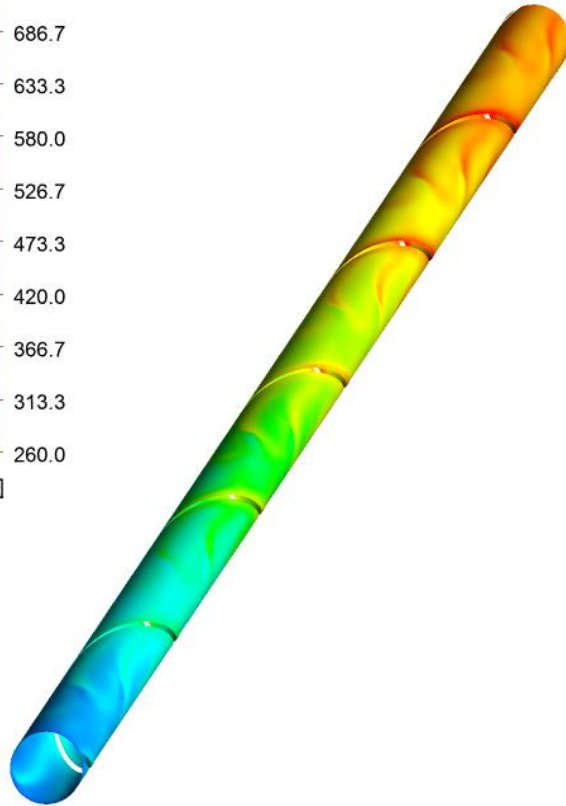
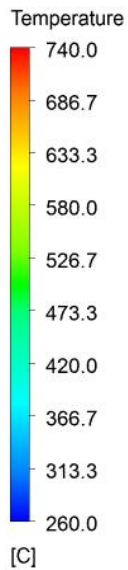


0.15 mm long part of model geometry

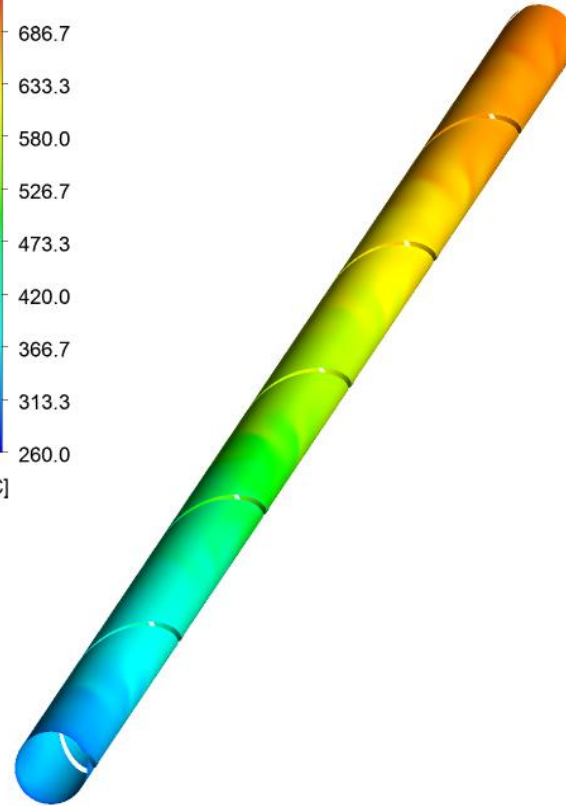
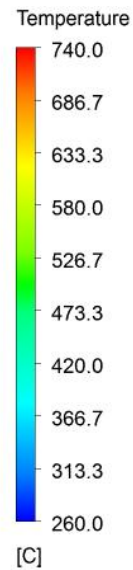


Mesh at outlet

Termohidraulikai modellezés



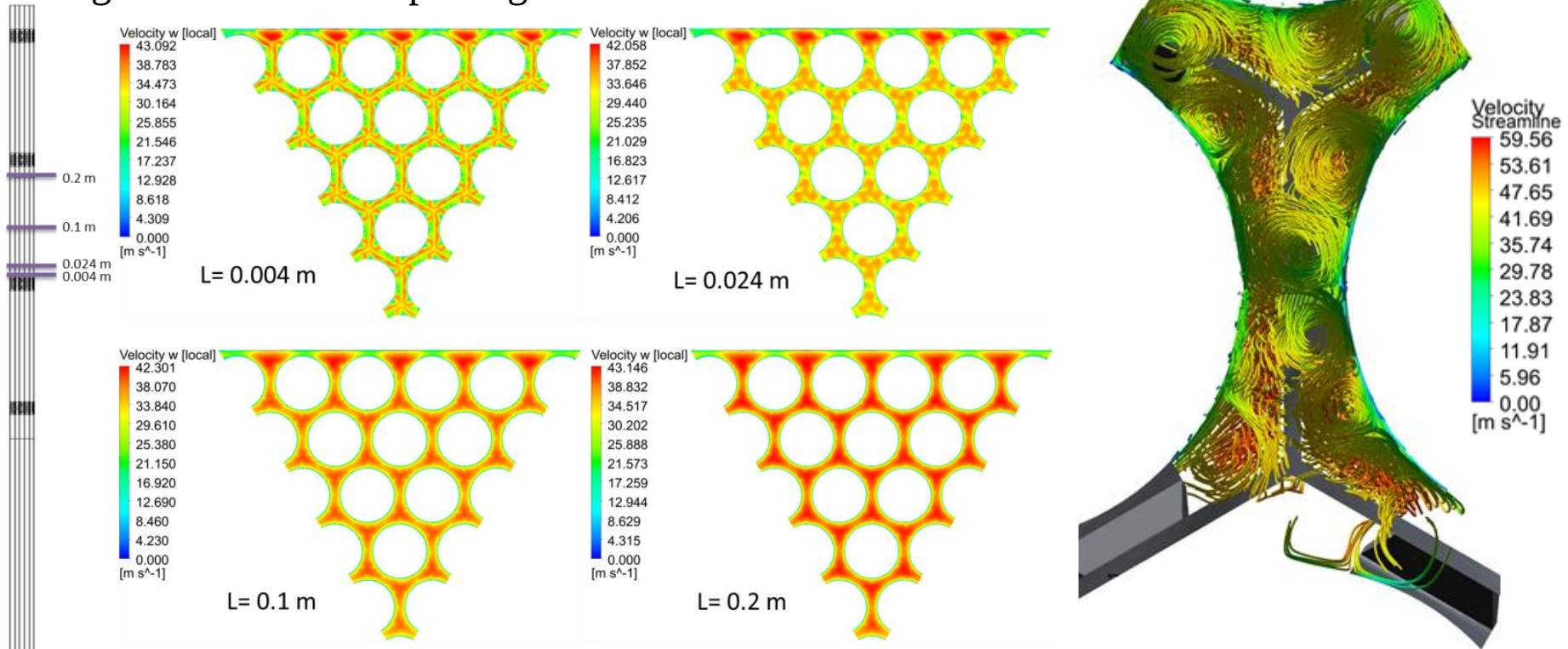
Without cladding



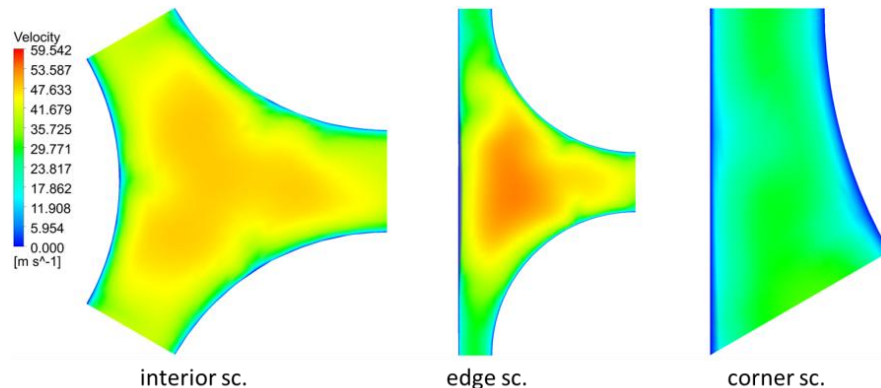
With cladding

Termohidraulikai modellezés

- Significant effect of spacer grids on flow



- Velocity distributions of different subchannels

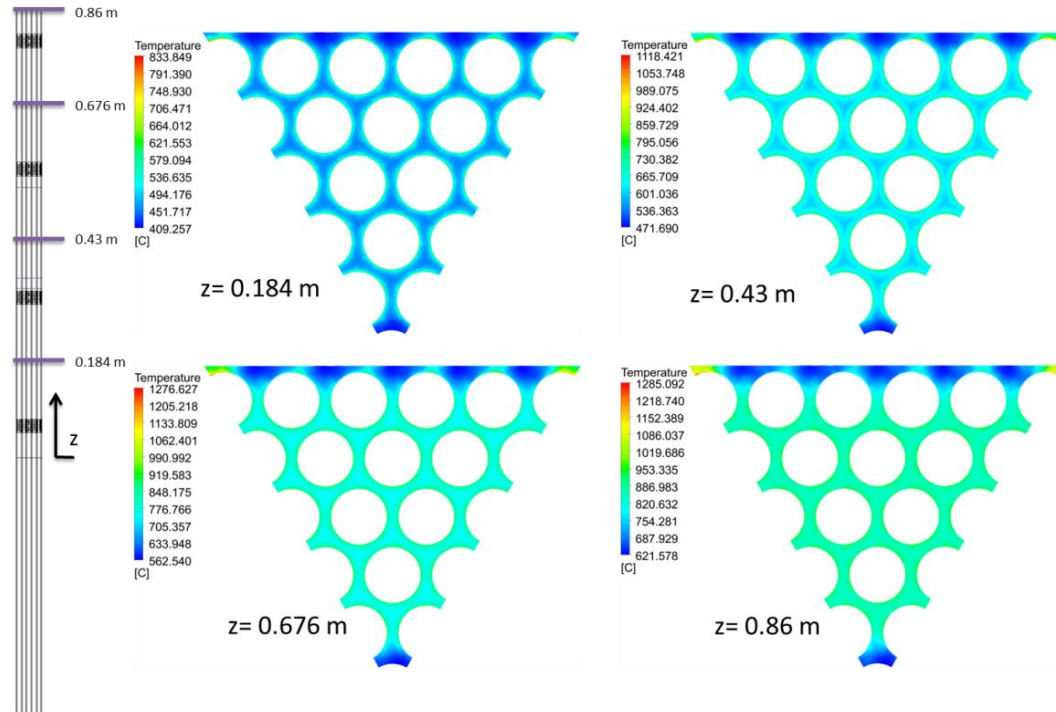


- Different hydraulic resistance
- Coolant mass flow is lower in corner subchannels
- Significant difference between corner and edge subchannels

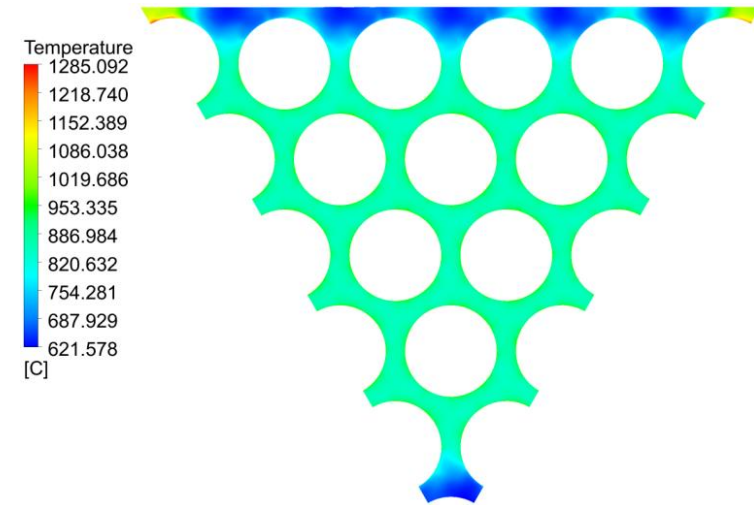
	Interior	Edge	Corner
Flow cross-section [mm ²]	19.9	29.3	7.4 (2x model)
Hydraulic diameter [mm]	5.56	4.63	2.63
Average axial velocity [m/s]	43.1	42.9	25.3
Mass flow rate [kg/s]	$2.4 \cdot 10^{-3}$	$3.95 \cdot 10^{-3}$	$0.42 \cdot 10^{-3}$ (2x model)

Termohidraulikai modellezés

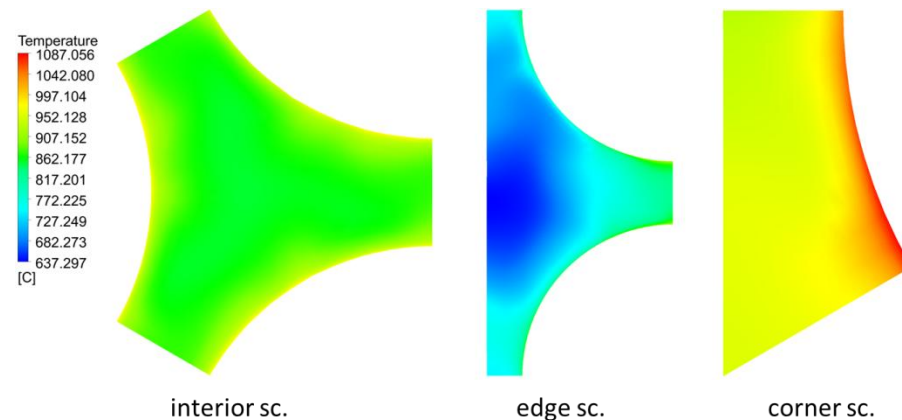
- Temperature distribution at different levels



- High outlet temperature of corner s.c.



- Temperature distribution of different subchannels



- Inhomogeneous temperature distribution at outlet
- Corner subchannels are hottest (low mass flow rate)

	Interior	Edge	Corner
Average axial velocity [m/s]	43.1	42.9	25.3
Mass flow rate [kg/s]	$2.4 \cdot 10^{-3}$	$3.95 \cdot 10^{-3}$	$0.42 \cdot 10^{-3}$ (2x model)
Average temperature [°C]	866.7	704.3	1077.6

Köszönetnyilvánítás

Az ALLEGRO-hoz kapcsolódó projekteken részt vettek:

Dr. Aszódi Attila

Dr. Tóth Sándor

Szieberth Máté

Kiss Béla

Gyuricza Erzsébet

György Hunor

Matulik Gábor

Kiss Attila

Nagy Máté