

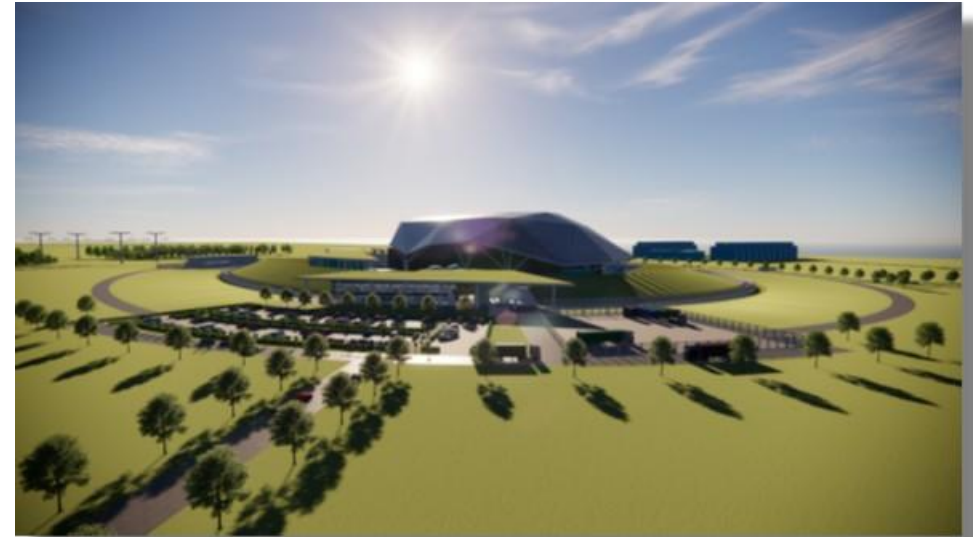
# SMR

# Malé modulární reaktory

Daneš Burket

# SMR – Malé modulární reaktory

- Definice SMR
- Názory stakeholderů
- Ekonomika SMR
- Přehled konceptů SMR
- Stav realizace SMR ve světě



# SMR

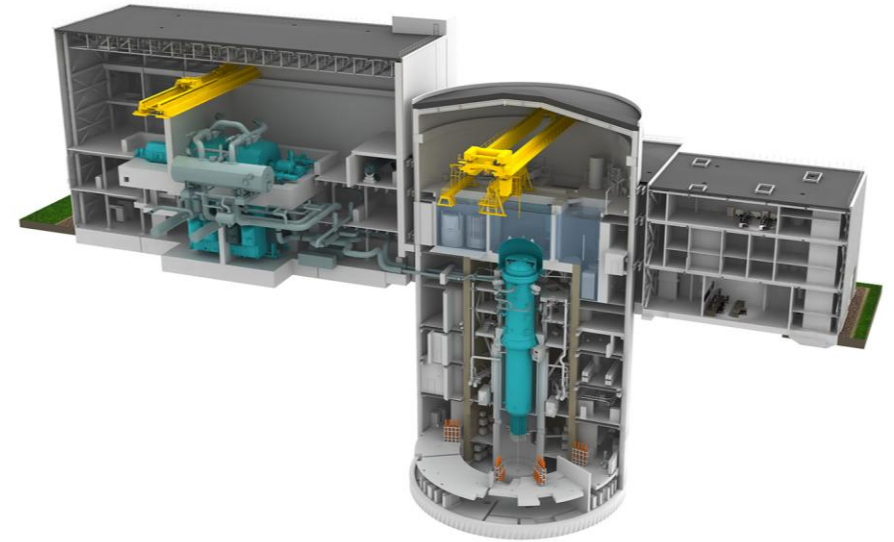
## Small (Medium) Modular Reactor

**Small** = malý, výkon do 300 MWe

**Medium** = střední, výkon do 700 MWe

**Modular** = koncept umožňující prefabrikaci komponent s možností jejich sériové výroby a vzhledem k jejich menším rozměrům i nižšími nároky kladenými na dopravu a instalaci

**Reactor** = zařízení využívající štěpení jader na produkci tepla k výrobě elektrické energie



# SMR

## ČEZ

- S výstavbou SMR se pojí hospodářský růst a dlouhodobá vize mj. i ve školství a průmyslu.
- SMR jsou vhodným zdrojem i díky očekávaným nižším kapitálovým investicím, vyšší flexibilitě umístění, větší škálovatelnosti.
- Hlavním cílem programu SMR Skupiny ČEZ je vybudovat 3 000 MWe instalovaného výkonu v SMR v ČR do konce 40. let.
- První SMR je naplánován k výstavbě v lokalitě JE Temelín a další v nejaderných lokalitách Tušimice a Dětmárovice.
- Program SMR je zaměřen na technologii lehkovodních SMR prioritně určených pro výrobu elektrické energie, tepla, případně dalších výstupů.

## IAEA

- Flexibilní a cenově dostupná výroba energie pro širší spektrum uživatelů a aplikací, náhrada fosilních zdrojů.
- Zvýšená bezpečnost díky inherentním a pasivním bezpečnostním prvkům.
- Lepší dostupnost počátečních kapitálových nákladů.
- Možnost pro odlehlé regiony s méně rozvinutou infrastrukturou.
- Možnost synergických hybridních energetických systémů.

## SÚJB

- SÚJB považuje a bude považovat SMR za jaderné zařízení, nezávisle na jeho výkonu, musí vycházet ze všech legislativních požadavků.
- Nelze proto předpokládat, že dojde k jakémukoli zmírnění legislativních požadavků a zrychlení správních řízení.
- S komerčním využitím SMR v podmínkách ČR tedy nelze počítat v tak krátké době, aby se mohly stát alternativou již plánovaných nových bloků jaderných elektráren.

# Ekonomika SMR

## Velký blok (1000 MW)

cena: 200 mld. Kč

doba výstavby: 9 let

úrok: 3 %

celkové náklady: **261 mld. Kč**



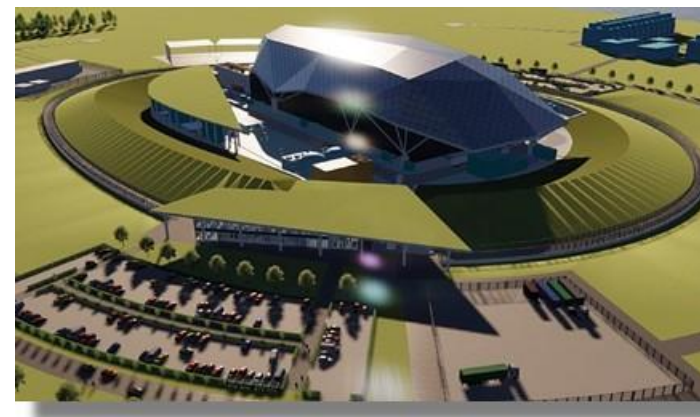
## SMR (500 MW)

cena: ~130 mld. Kč

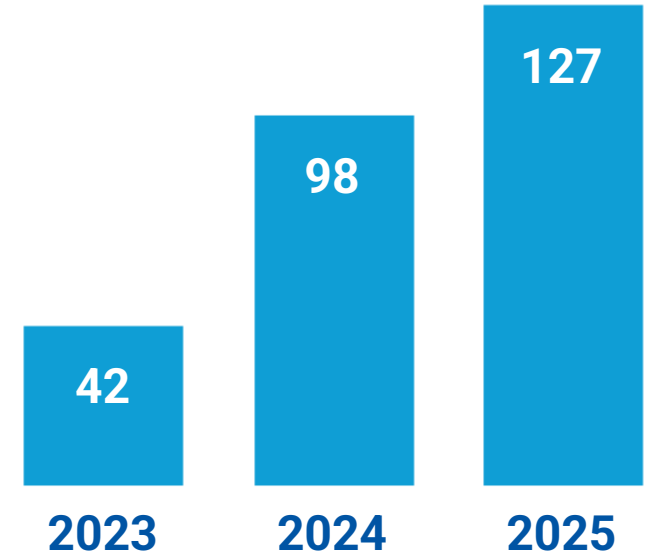
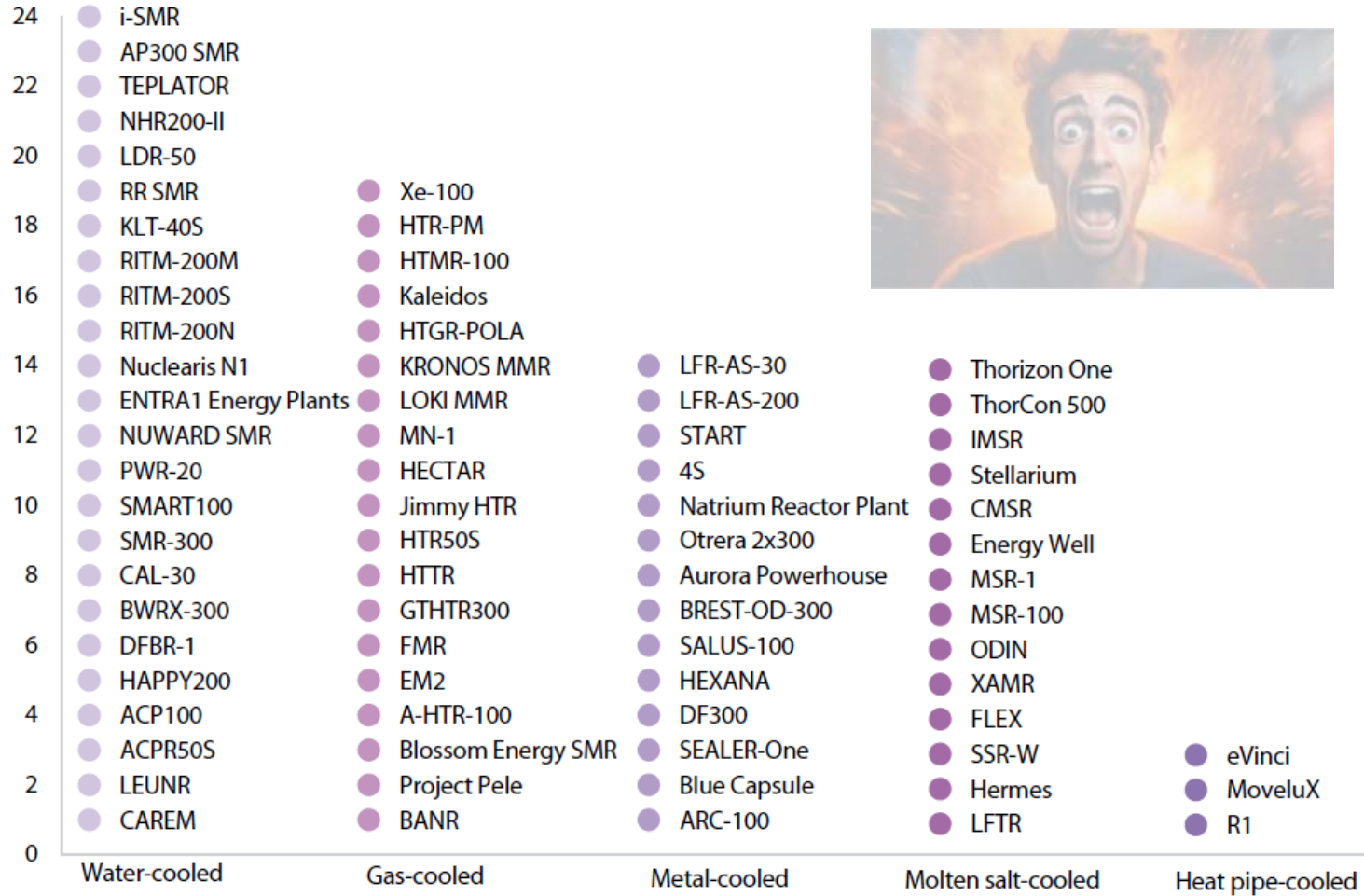
doba výstavby: 5 let

úrok: 3 %

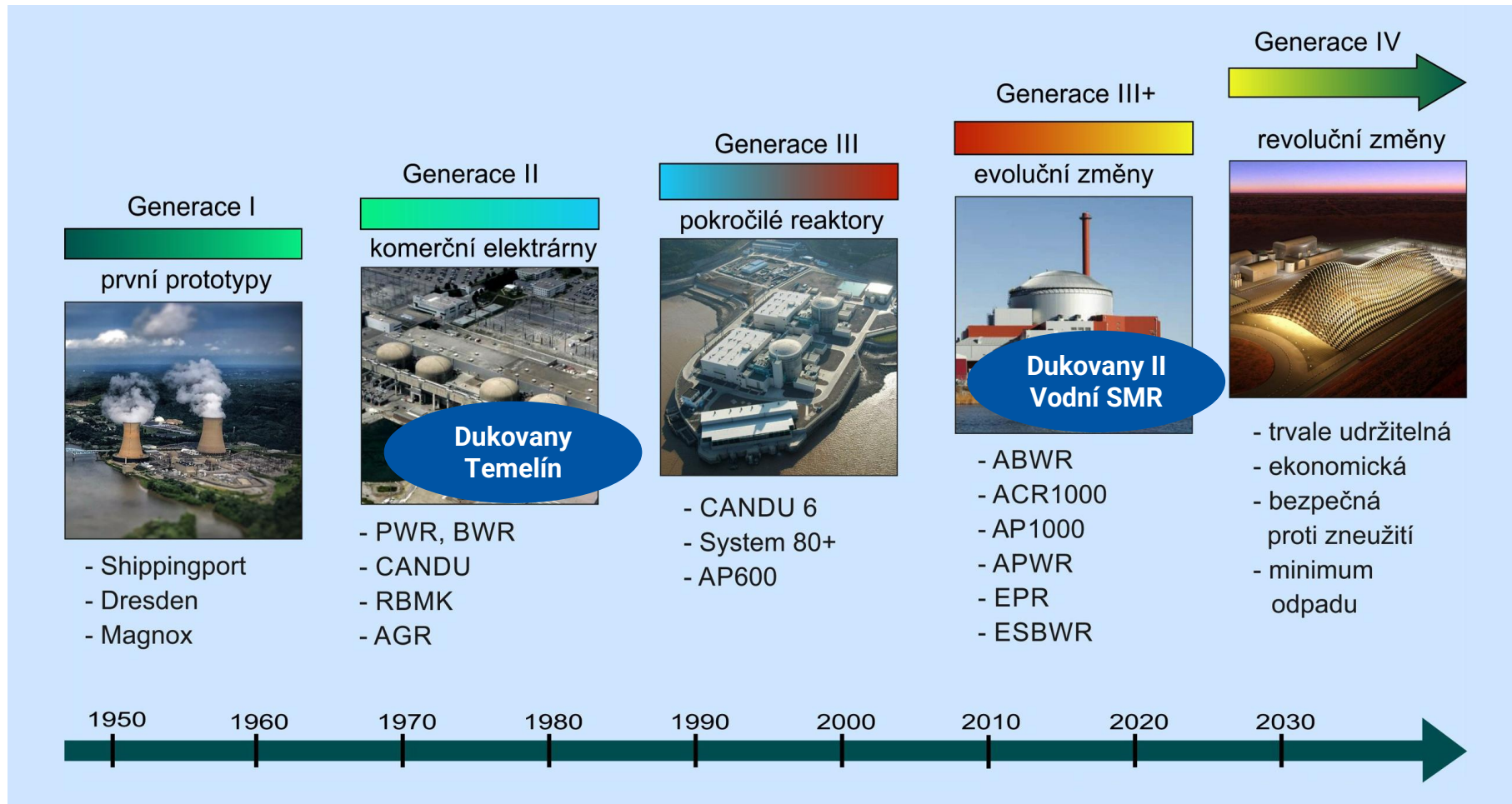
celkové náklady: **151 mld. Kč**

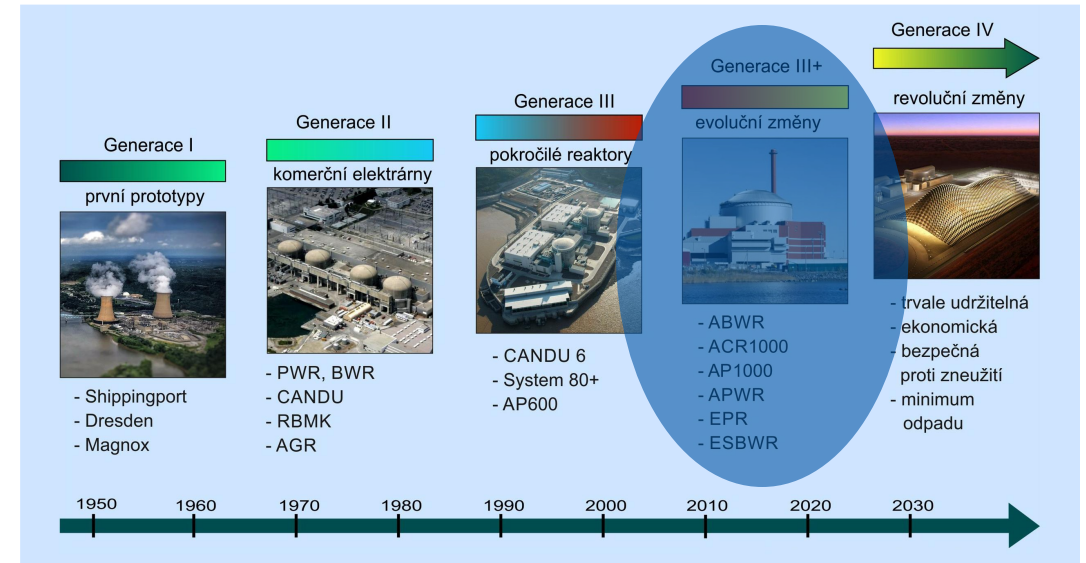


# OECD NEA Small Modular Reactor Dashboard



# Generace jaderných reaktorů





# SMR Generace III+

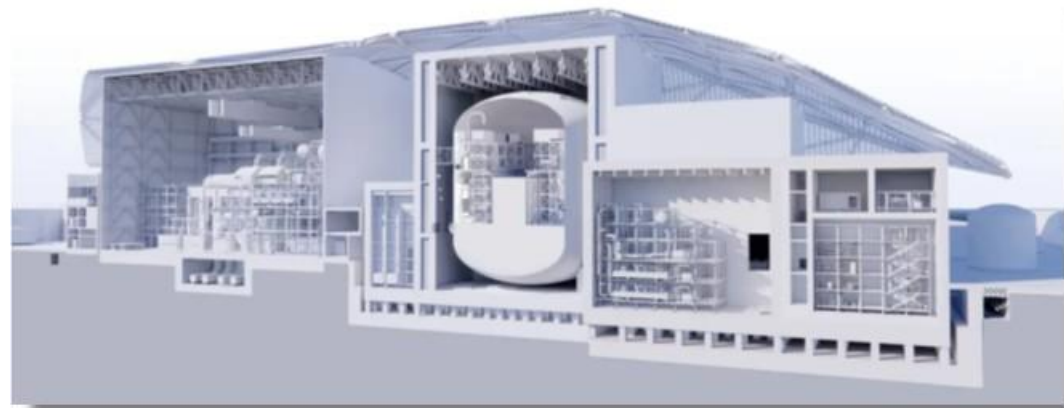
# Přehled vodních SMR

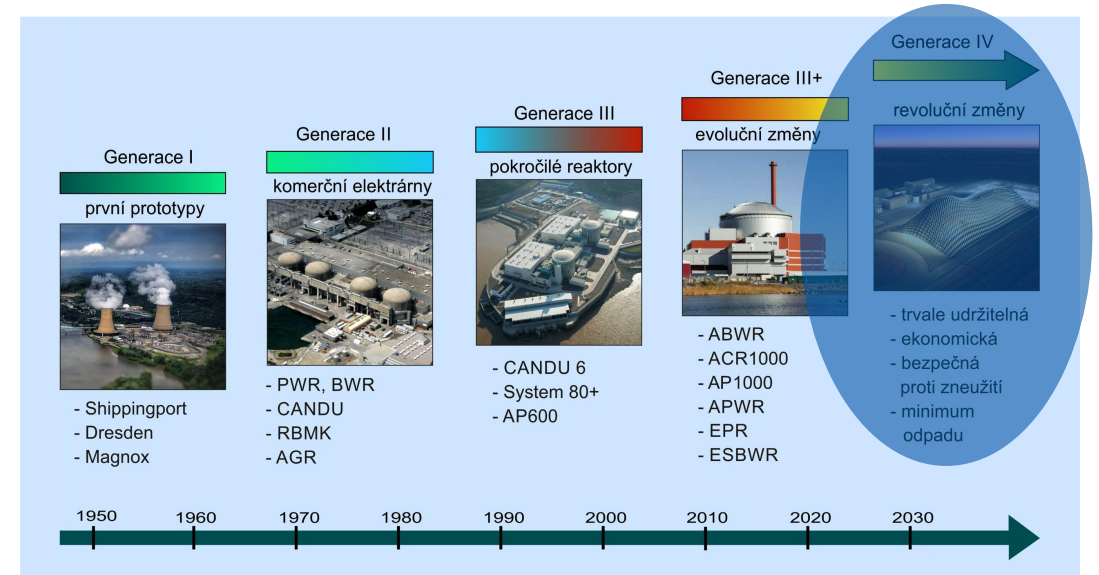
koncept	typ	výkon (MWe)	země	stav
NuScale VOYGR	PWR	77 / modul	USA	certifikován
BWRX-300	BWR	300	USA / Japonsko	ve výstavbě
SMR-300	PWR	300	USA	vývoj
AP 300	PWR	300	USA	vývoj
CAREM	PWR	25	Argentina	ve výstavbě
ACP 100	PWR	125	Čína	ve výstavbě
RITM-200N	PWR	55	Rusko	v provozu
Rolls-Royce SMR	PWR	470	Velká Británie	vývoj
EDF NUWARD	PWR	340	Francie	vývoj
KLT-40S	PWR	35	Rusko	v provozu

# Rolls-Royce SMR



- Tlakovodní SMR, trojsmyčkový
- 470 MWe (443 netto), účinnost 32-34 %
- 18-24měsíční palivový cyklus (4,95 % U235)
- V UK probíhá Generic Design Assessment (GDA), v USA zahájil předlicenční aktivity s NRC, ČEZ získal zhruba 20% podíl (Temelín probíhá EIA a technické přípravy, Tušimice... Do roku 2050 plánuje ČEZ 3 GW v SMR).
- 10.6.2025 bylo oznámeno, že Rolls-Royce SMR zvítězil ve výběrovém řízení GBN (GE Hitachi, Holtec, NuScale a Westinghouse) jako preferovaný dodavatel SMR technologie pro Spojené království. 2,5 miliardy liber do roku 2029 a další miliardy s postupem výstavby.
- Rolls-Royce SMR má postavit tři SMR jednotky ve Spojeném království ve spolupráci s nově vzniklou státní společností Great British Energy-Nuclear (GBE-N), GBE-N plánuje připojit reaktory k síti v polovině 30. let.





# Generace IV

# Generace IV

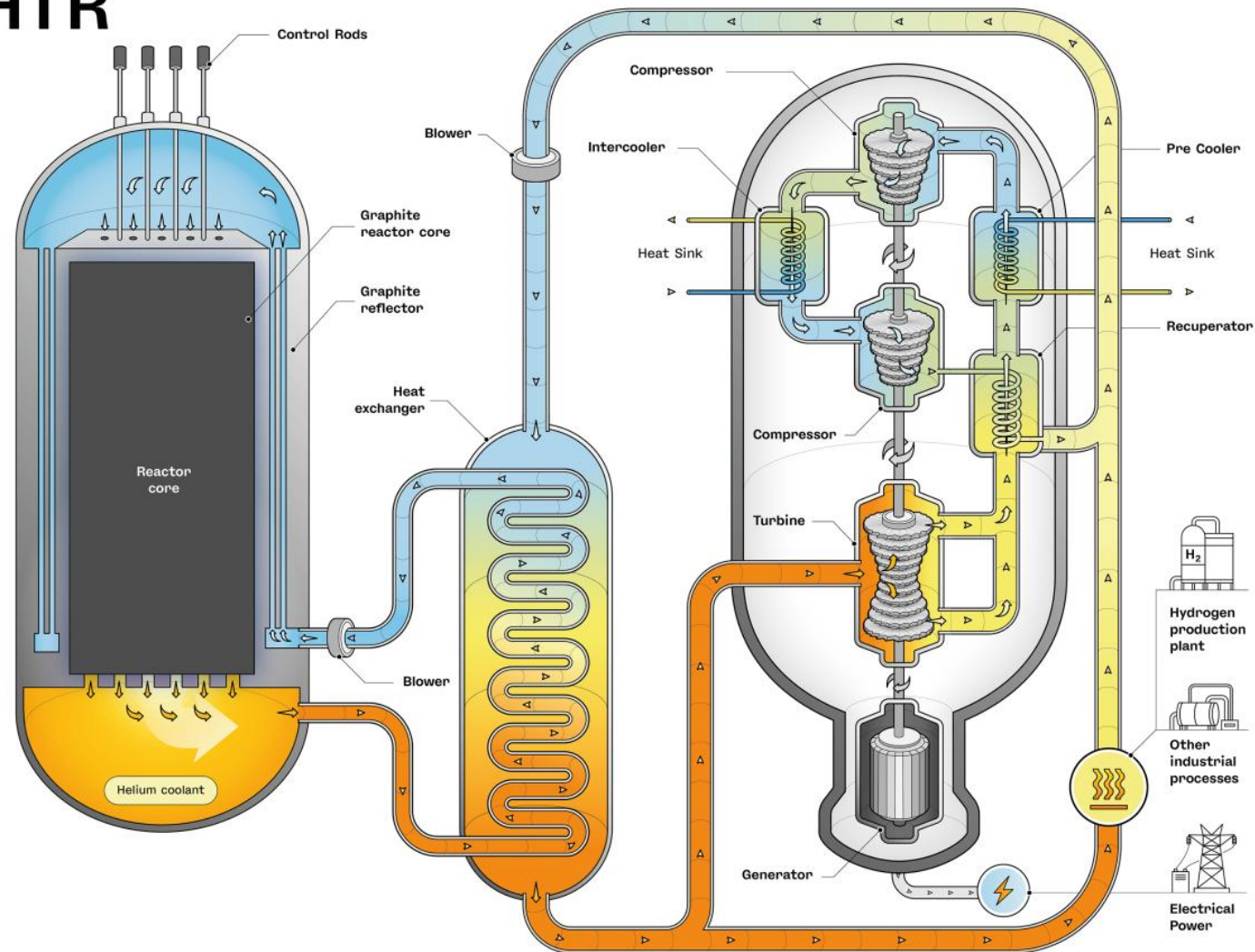
Generation IV System	Neutron spectrum	Coolant	Outlet temperature °C	Fuel cycle
<b>VHTR</b> (Very-high-temperature reactor)	Thermal	Helium	900-1000	Open
<b>SFR</b> (Sodium-cooled fast reactor)	Fast	Sodium	500-550	Closed
<b>SCWR</b> (Supercritical-water-cooled reactor)	Thermal/fast	Water	510-625	Open/closed
<b>GFR</b> (Gas-cooled fast reactor)	Fast	Helium	850	Closed
<b>LFR</b> (Lead-cooled fast reactor)	Fast	Lead	480-570	Closed
<b>MSR</b> (Molten salt reactor)	Thermal/fast	Fluoride salts	700-800	Closed



# VHTR

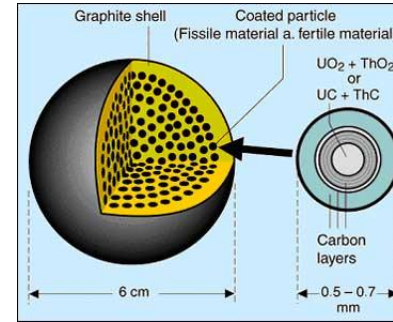
- Primárně určen pro kogeneraci elektřiny a tepla. Jeho vysoká výstupní teplota ho činí atraktivním pro výrobu vodíku, ale i pro chemický, ropný a železářský průmysl
- Referenční návrh využívá palivo na bázi částic TRISO, heliové chladivo, charakteristická nižší hustota výkonu, která umožňuje pasivní odvod zbytkového tepla
- Provozní zkušenosti 52 plynem chlazených reaktorů (GCR, chlazené CO<sub>2</sub>) a 7 vysokoteplotních plynových reaktorů (HTGR, chlazené He) v 5 zemích
- Inherentní bezpečnost, vysokou tepelnou účinnost, schopnost využití procesního tepla, nízké provozní a údržbové náklady a modulární konstrukci

## VHTR



Very-High-Temperature Reactor

# VHTR – historie



## DRAGON (Velká Británie, 1965-1976)

- Experimentální vysokoteplotní plynem chlazený reaktor (HTGR, předchůdce VHTR)
- 20 MWt, až 750 °C
- Obohacený uran ve formě keramických pelet, později TRISO částice (uran-oxid v keramickém obalu)
- Výzkum a ověření technologie, nikoli komerční výroba elektřiny

## AVR (Německo, 1967-1988)

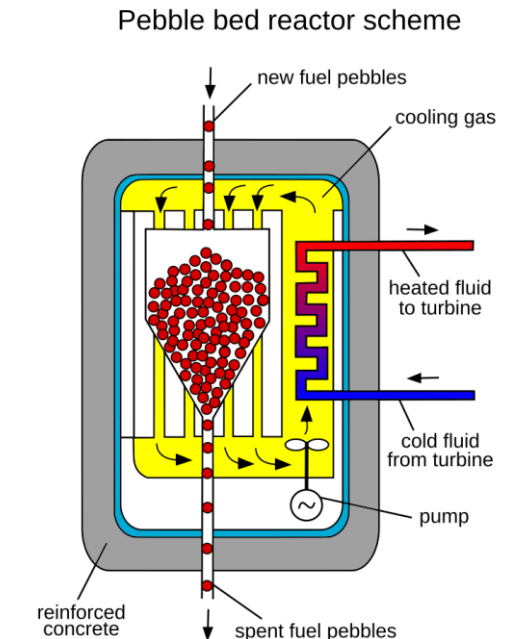
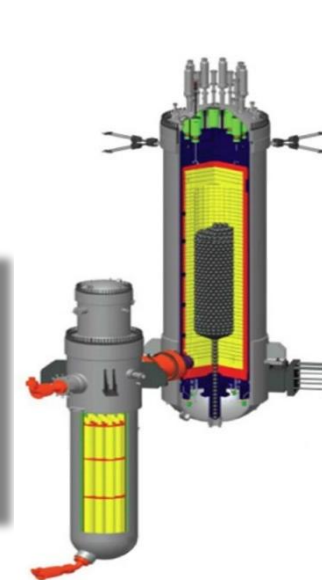
- Experimentální vysokoteplotní reaktor
- 46 MWt, 13 MWe, až 950 °C (rekordní hodnota)
- TRISO částice (uran-thoriové a uranové palivo v keramickém obalu)
- Ověřil dlouhodobý provoz a bezpečnostní vlastnosti paliva TRISO

## Peach Bottom Unit 1 (USA, 1967-1974)

- První americký vysokoteplotní plynem chlazený reaktor
- 40 MWt, 10 MWe, cca 750 °C
- Obohacený uran v grafitových blocích

## Fort St. Vrain (USA, 1976-1989)

- Komerční vysokoteplotní plynem chlazený reaktor
- 842 MWt, 330 MWe, až 785 °C
- TRISO částice v grafitových blocích



## HTR-PM (Čína, od 2023)

- High Temperature Reactor – Pebble-bed Module
- 2x250 MWt, 210 MWe (společná turbína pro oba reaktory)
- Palivo: 400 tis. koulí 60 mm (každá 12 tis. TRISO, 8,5 % U235), 7 MPa, 750 °C (pára 567 °C)
- Reaktor: 3 x 11 m
- První kritičnost 2021, komerční provoz od 2023

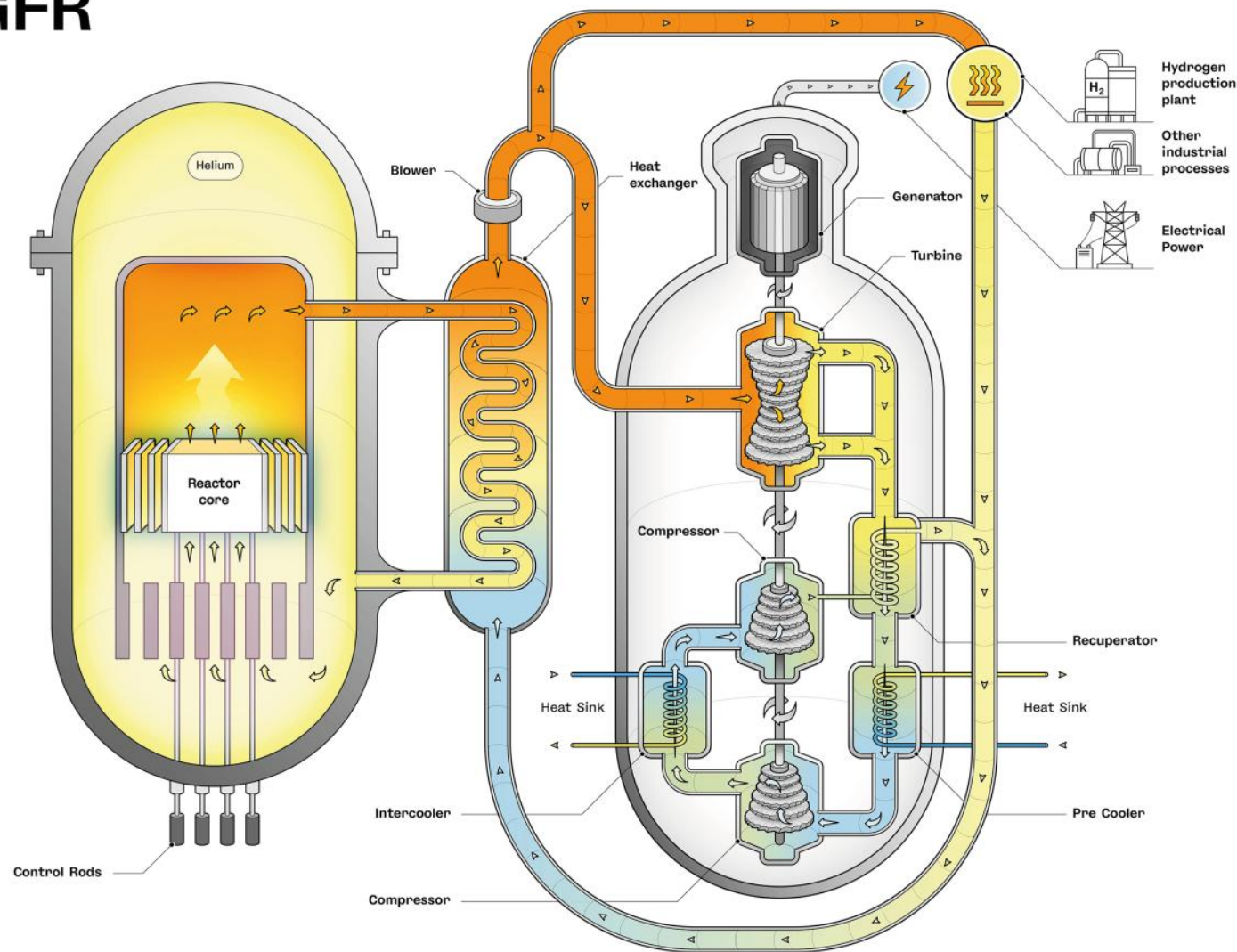


Progress of  
HTR-PM

# GFR

- Kombinuje výhody vysokoteplotních reaktorů (VHTR) a reaktorů s rychlým neutronovým spektrem
- He, vysoké výstupní teploty (až 850-900 °C), uzavřený palivový cyklus pro minimalizaci odpadu
- Vysoká účinnost, systémové teplo, možnost produkce vodíku
- Inherentně bezpečné, s cílem zajištění dlouhodobé udržitelnosti jaderných zdrojů
- Dosud nebyly postaveny ani provozovány

## GFR

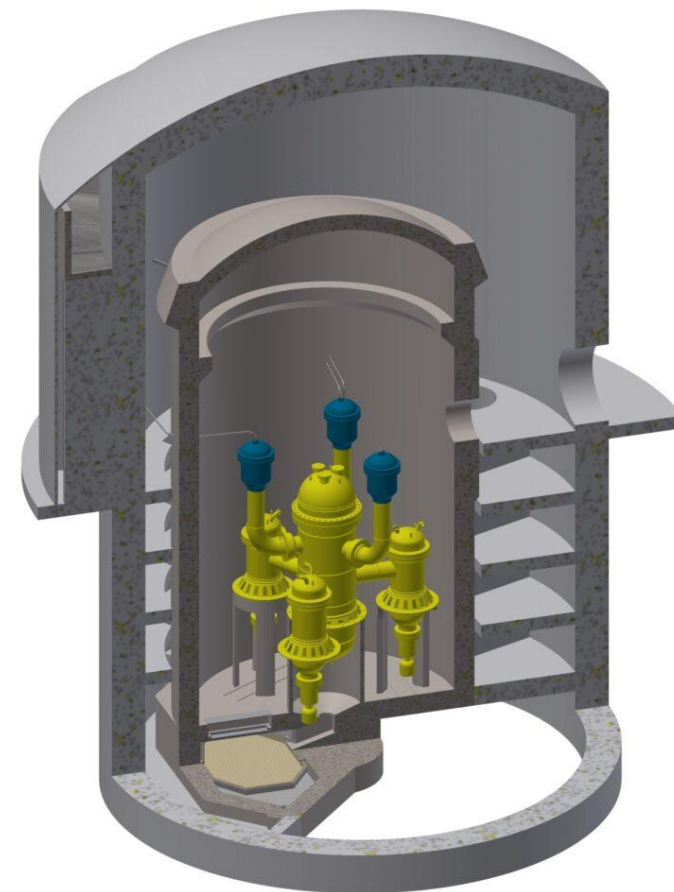


Gas-cooled Fast Reactor

# GFR – budoucnost ALLEGRO



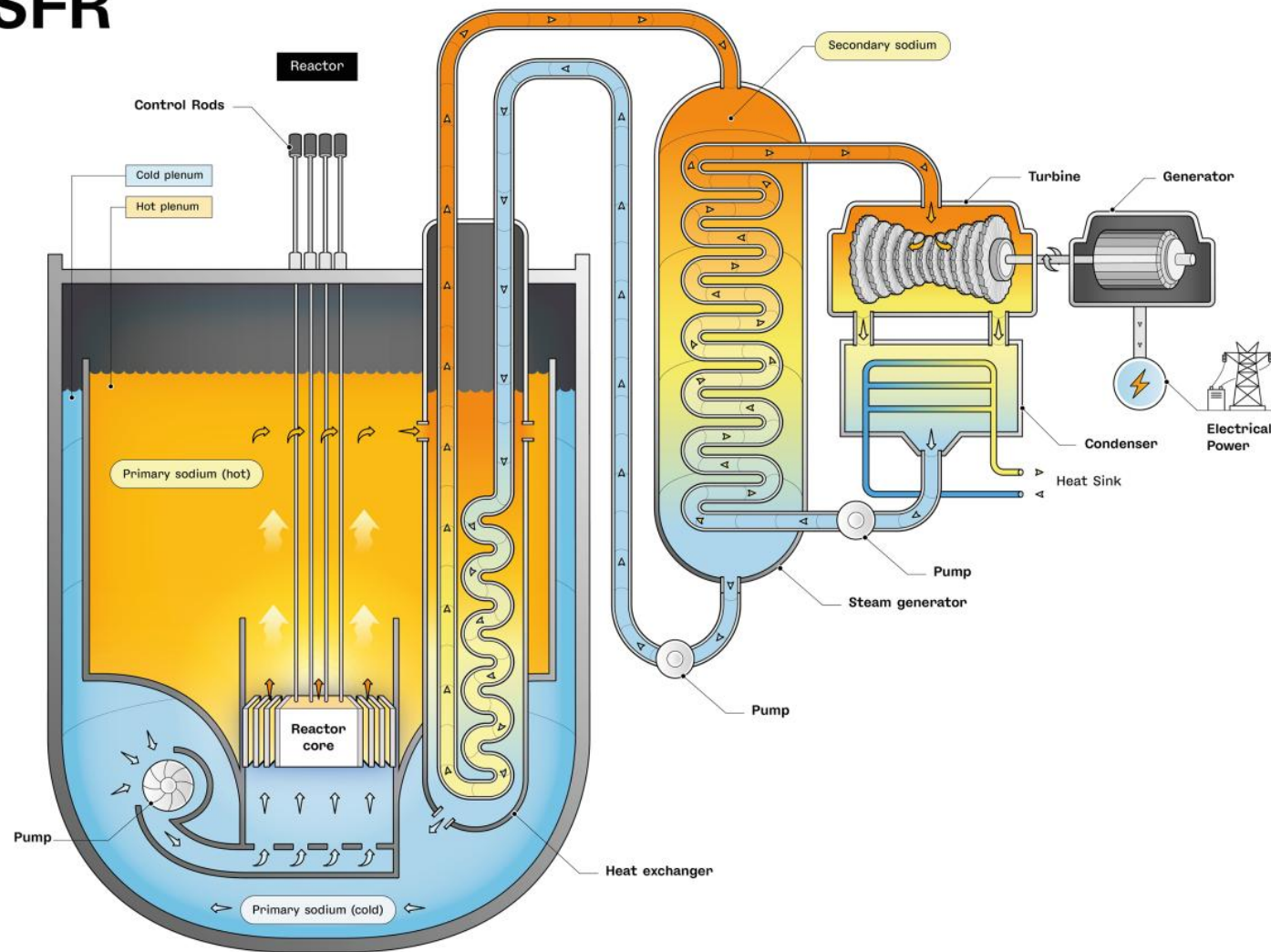
- **ALLEGRO**, V4G4 Centre of Excellence – ČR (ÚJV Řež, CVŘ), Slovensko (VÚJE), Maďarsko (EK), Polsko (NCBJ), Francie (CEA)
- Je podporován evropskou iniciativou ESNII v rámci platformy SNETP jako jeden z klíčových projektů IV. generace
- Maximální teplota: až 850 °C, 7 MPa, palivo MOX (v počáteční fázi), později pokročilé palivo (UPuC v SiC-SiCf)
- Bezpečnost: Plně pasivní systém odvodu zbytkového tepla (DHR), přirozená cirkulace, vysoká odolnost proti haváriím
- Probíhá vývoj konceptu a výzkum v rámci národních a mezinárodních projektů (SafeG, TREASURE) – cíl 2035-40



# SFR

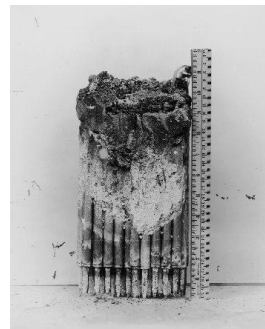
- Rychlé spektrum, vysoká hustota výkonu, nízký tlak, riziko sodík-voda
- Kolektivní zkušenosti více než 20 reaktorů po celém světě – 400 reaktorroků provozu
- Mezi systémy generace IV mají SFR nejvyšší počet postavených reaktorů a nejkomplexnější provozní historii
- Směsná oxidová nebo kovová, možnost uzavření palivového cyklu a spalování transuranů
- Některé konstrukce dosahují poměrů množení větších než jedna
- Provozní teploty v rozmezí 500–550 °C, vyšší tepelná účinnost

## SFR



## Sodium-cooled Fast Reactor

# SFR – historie



## EBR I (USA, INL 1951-1964)

- První reaktor na světě, který vyrobil elektřinu z jaderné energie (20. prosince 1951)
- Ověření teorie breeder reaktoru
- 1,5 MWt, několik desítek wattů elektricky (demonstračně),
- Palivo Pu 239, chladivo: NaK (sodík-draslík eutektikum)

## EBR II (USA, 1964-1994)

- Bazénový reaktor s pasivní bezpečností
- Demonstrace uzavřeného palivového cyklu (+ zařízení na přepracování paliva)
- V roce 1986 test, kdy byly vypnuty čerpadla a reaktor se bezpečně odstavil díky přirozené konvekci sodíku a Dopplerově efektu
- 62,5 MWt, 20 MWe, kovové palivo uran-zirkonium, později MOX

## SEFOR (USA, 1969-1972)

- Smyčkový reaktor, testování inherentní bezpečnosti rychlých reaktorů s MOX
- 20 MWt, MOX (směs plutonia a uranu)

## BN 350 (Kazachstán, 1973-1999)

- Kombinovaná výroba elektřiny a odsolování vody, první větší provozovaný SFR
- 350 MWt, 150 MWe
- BN 600 (od 1980), BN 800 (od 2015), BN 1200 (výstavba od 2026/7)

## Phénix I (Francie, 1973-2009)

- 250 MWe, testovací reaktor pro palivový cyklus
- Breeding ratio: 1,16

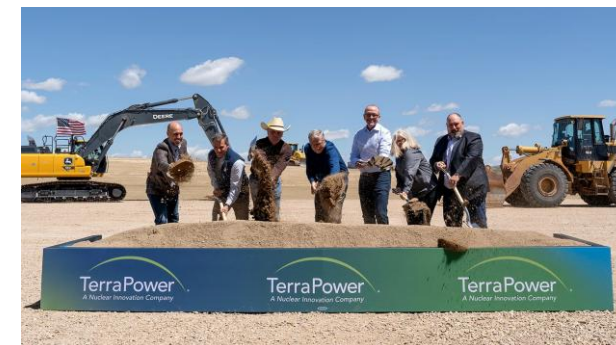
## Superphénix (Francie, 1986-1997)

- 1200 MWe, komerční provoz
- Silné protesty veřejnosti (včetně násilných incidentů), raketový útok v roce 1982, uzavření rozhodnuto vládou v roce 1997

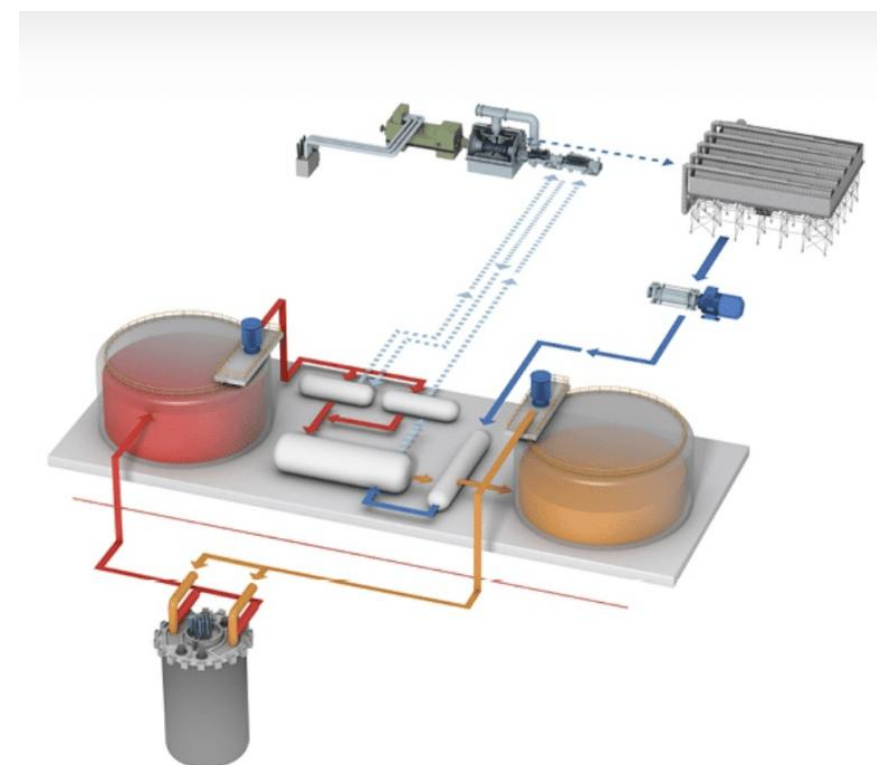
## Monju (Japonsko, 1994-2010/16)

- 280 MWe, MOX
- Komerční provoz nikdy plně nedosažen (1 hodina výroby elektřiny za celou dobu existence)
- 1995: únik sodíku a požár, dlouhodobé odstavení
- 2010: restart, další nehoda (pád zařízení do reaktorové nádoby)
- 2016: rozhodnutí o definitivním uzavření

# SFR – budoucnost TerraPower



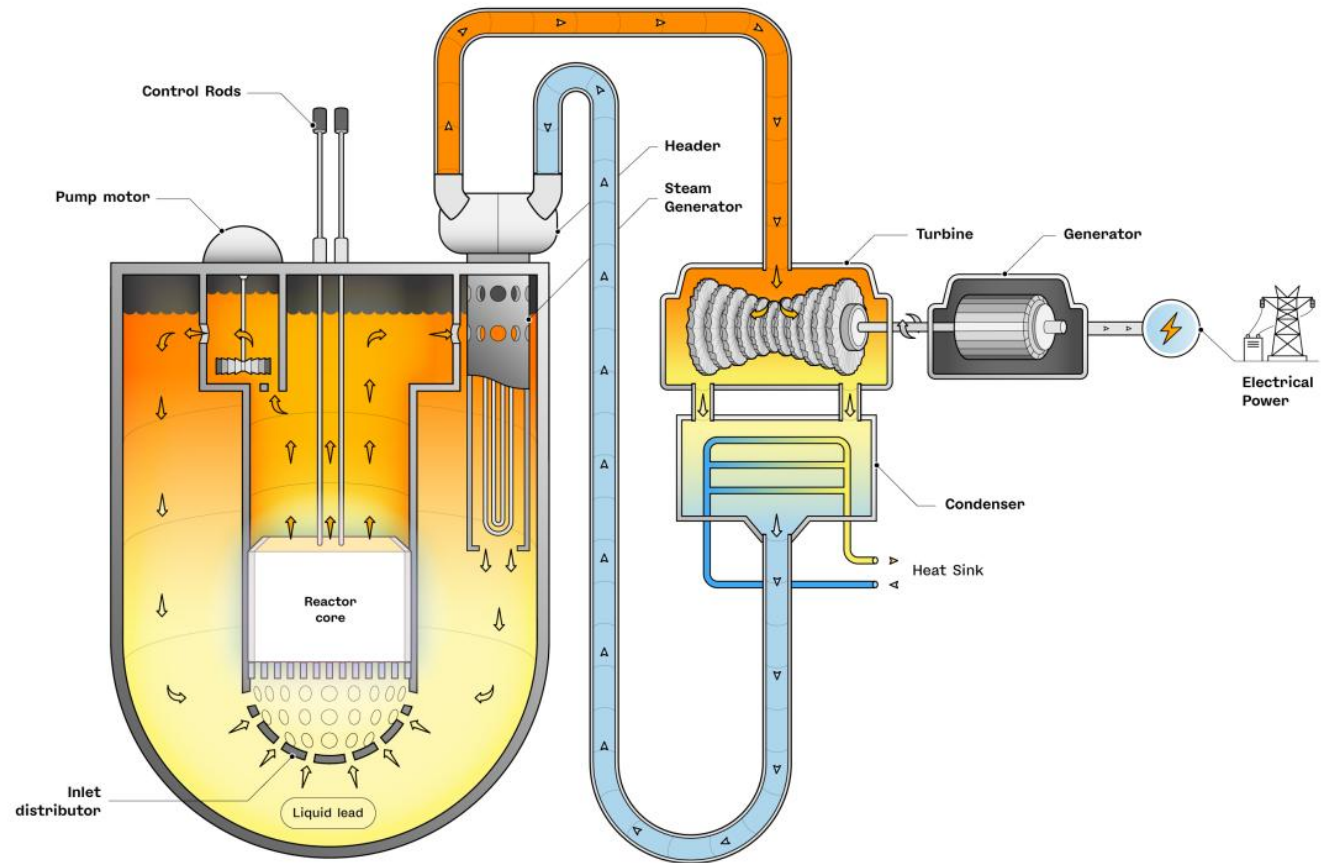
- Sodíkem chlazený SMR **Natrium**, TerraPower podala žádost o stavební povolení (Construction Permit Application) pro první reaktor Kemmerer Unit 1 v březnu 2024, v květnu 2025 NRC udělila výjimku pro část zařízení (základy, skladování energie), kompletní stavební povolení do konce 2025
- 345 MWe (s akumulací až 500 MWe), sodík-sůl-pára, účinnost 40-44 %
- Rychlý reaktor (až 19,75 % U235)
- Výstavba v Kemmerer (Wyoming) byla zahájena 10.6.2024 (stavba, TES), výstavba jaderné části má být zahájena v 12/2025



# LFR

## LFR

- Chlazené kapalným olovem (Pb) nebo ve velmi vzácných případech slitinou olova a bismutu (Pb-Bi)
- Rychlé spektrum při atmosférickém tlaku a vysoké teplotě (480-540 °C)
- Olovo má velmi vysoký bod varu (až 1743 °C), příznivé neutronové a radiační vlastnosti a příznivou interakci s vodou a vzduchem
- Používá uran a plutonium ve formě směsného oxidového paliva (MOX) nebo nitridu a umožňuje uzavření palivového cyklu a spalování transuranů
- Mezi klíčové body probíhající spolupráce ve výzkumu a vývoji patří výzvy související s materiály, kontrolou chemie a palivovým cyklem



## Lead-cooled Fast Reactor

# LFR – historie

## BM 40 (Rusko, 1969-1996)

- Alfa-class ponorky, projekt 705 (4 reaktory), epitermální spektrum, moderované beryliem
- Chladivo Pb-Bi eutektikum, dvousmyčkový parní oběh, vysoce obohacený uran
- 155 MWt

## OK 550 (Rusko, 1976-1996)

- Alfa-class ponorky, projekt 705 K (3 reaktory), epitermální spektrum, moderované beryliem
- Chladivo Pb-Bi eutektikum, trojsmyčkový parní oběh, vysoce obohacený uran
- 155 MWt

## BREST 300 (Rusko, výstavba od 2021)

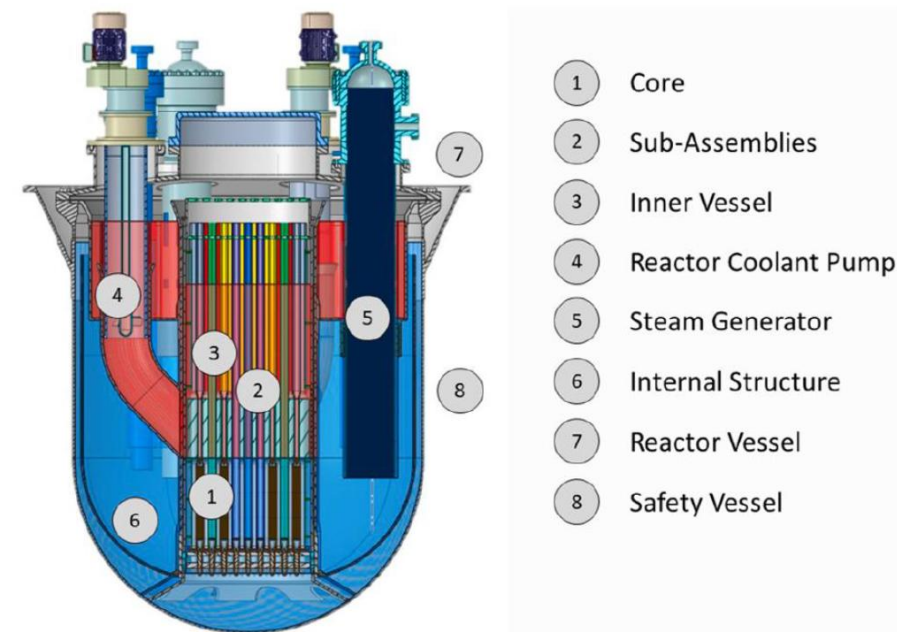
- rychlý reaktor, Pb
- demonstrace uzavřeného palivového cyklu IV. generace
- 300 MWe, palivo: MOX, plánováno i nitridové palivo
- Ve výstavbě v Seversku, součást projektu Proryv



# LFR – budoucnost FALCON

ansaldo | energia

- **ALFRED**, Advanced Lead Fast Reactor European Demonstrator, rychlý reaktor, Konsorcium FALCON (Itálie, Rumunsko, Francie)
- Design Ansaldo (CDP Equity 87.6%, Shanghai Electric Group of China 12.4%)
- 300 MWt, 125 MWe, MOX nebo uran (20 % U235), 520 °C
- Předlicenční fáze, plán výstavby v Rumunsku (lokality Pitești)
- Cíl: evropská demonstrace LFR technologie

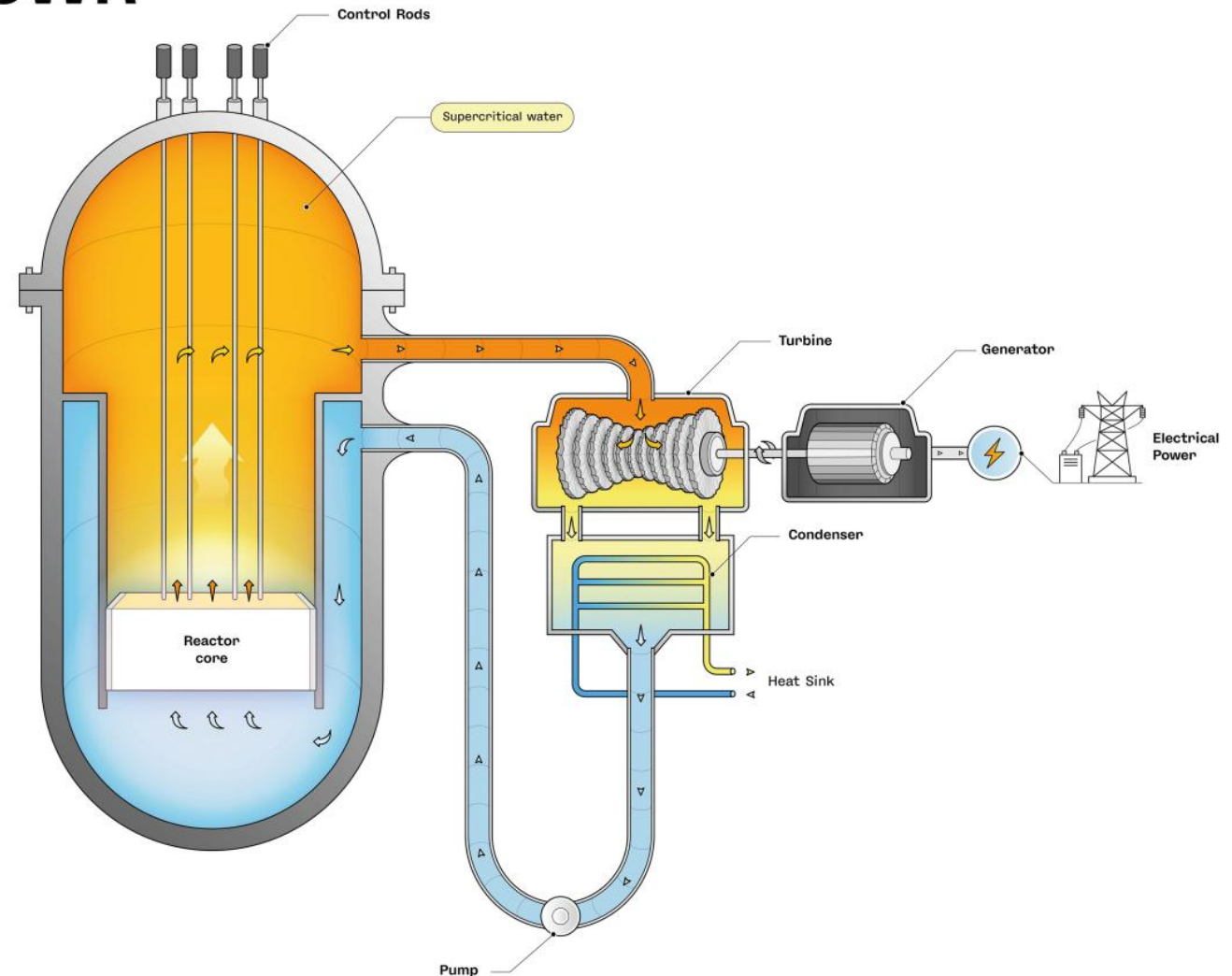


- 2011: Rumunsko vyjádřilo zájem hostit projekt
- 2014: Memorandum o výstavbě ALFRED schváleno rumunskou vládou
- 2015-2017: Projekt zařazen do národních strategií výzkumu, energetiky a inovací
- 2018: ALFRED zařazen do Fast Track programu ESNII
- 2021-2023: Investice 22 mil. EUR do výzkumné infrastruktury (v Rumunsku)
- Plánované zahájení výstavby 2024-2025. Dokončení výstavby a uvedení do provozu plánováno 2028. Aktuálně: probíhá vývoj a příprava na licencování

# SCWR

- Provoz při teplotách a tlacích nad kritickým bodem vody (374 °C, 22,1 MPa). Tepelné, rychlé nebo smíšené neutronové spektrum
- Jsou navrženy ve dvou konfiguracích: tlaková nádoba (podobně jako BWR a PWR) a tlakové trubice (jako reaktory CANDU)
- Kombinací konstrukčních poznatků ze stávajících vodou chlazených reaktorů a superkritických elektráren na fosilní paliva dosahují vyšší tepelné účinnosti 44–48 %
- Výhody díky zvýšené účinnosti a jednodušším konstrukcím
- Dosud nebyly postaveny ani provozovány

## SCWR

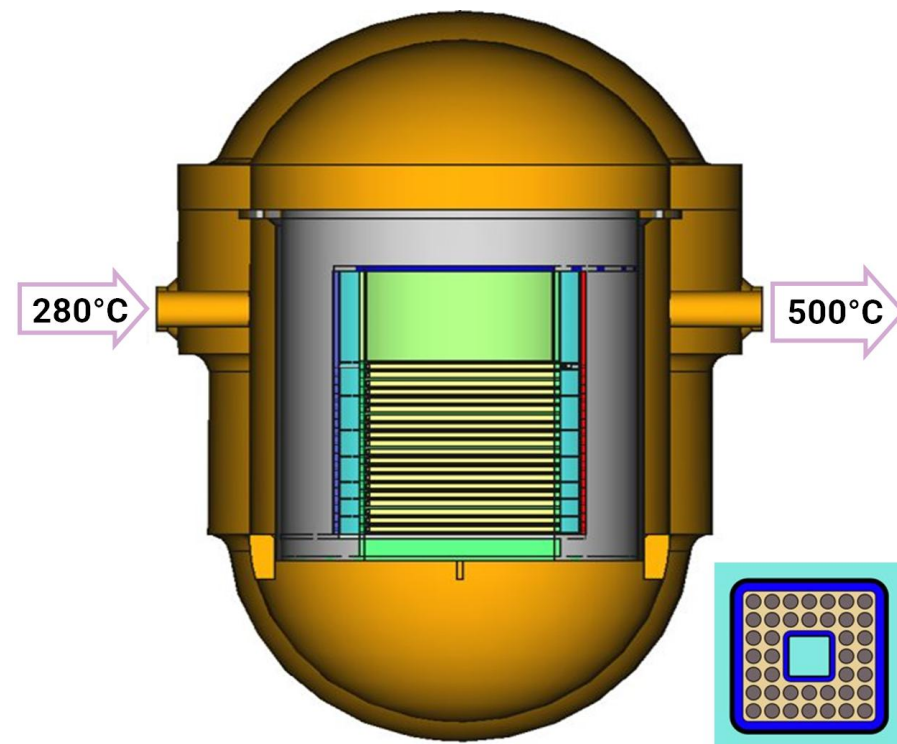


SuperCritical-Water-Cooled Reactor

# SCWR – budoucnost ECC-SMART



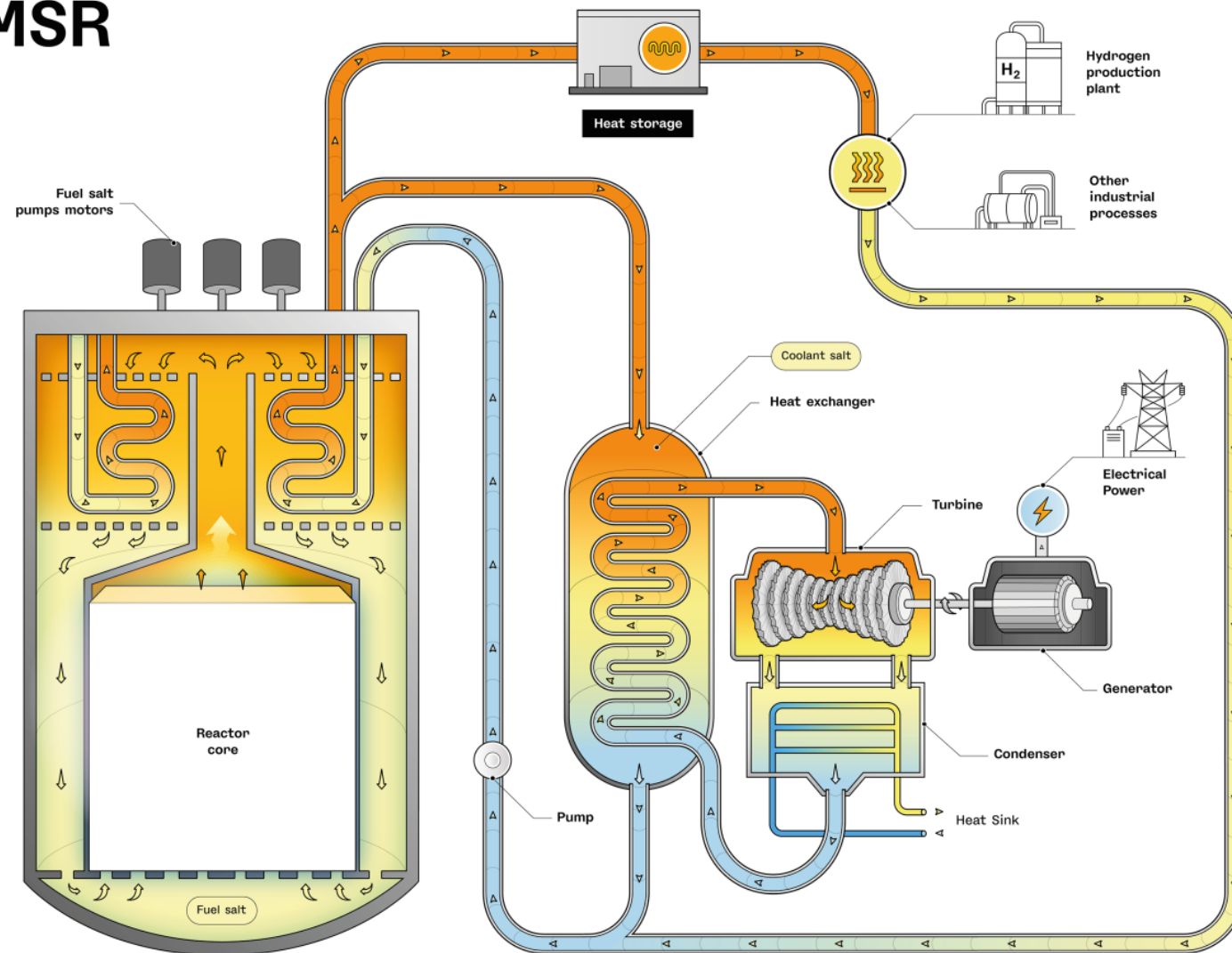
- **ECC-SMART**, Joint European Canadian Chinese development of Small Modular Reactor Technology, 20 partnerů ze 17 zemí (EU, Kanada, Čína, Ukrajina), CVŘ hlavní koordinátor
- Tlakovodní reaktor IV. generace chlazený superkritickou vodou (nad 374 °C a 22,1 MPa), 25 MPa, až 500 °C
- Do 300 MWe, palivo MOX
- Vývoj: koncepční design, materiály v prostředí SCW (800 vzorků, 10 tis. hodin), vývoj TH modelů, testování mechanických vlastností a korozní odolnosti pokrytí paliva a konstrukčních částí, analýzy bezpečnosti, neutronová fyzika
- Projekt skončil 2025, navazující zatím není



# MSR

- Roztavené soli slouží jako palivo, chladivo a/nebo moderátor reaktoru
- Výzkum MSR začal v rané fázi vývoje jaderné energie. Tyto reaktory mohou pracovat při nižších tlacích (atmosférický) a vysokých teplotách
- MSR pokrývají širokou škálu konstrukčních řešení a zkoumá se mnoho možností
- V současné době se vyvíjí několik konceptů MSR, z nichž mnohé se vyznačují malými, modulárními konstrukcemi v různých fázích technologické připravenosti

## MSR



## Molten Salt Reactor

# MSR – historie

## ARE – Aircraft Reactor Experiment (ARE) (USA, ORNL, 1954)

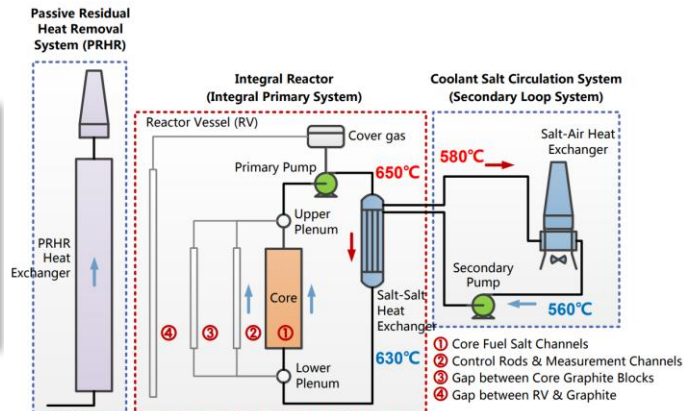
- Vývoj kompaktního reaktoru pro jaderný pohon letadel, v provozu několik dní
- Palivo: Fluorid uranu ( $UF_4$ ) rozpuštěný v roztavené soli
- 2,5 MWt, 860 °C, atmosférický tlak

## MSRE – Molten Salt Reactor Experiment (USA, ORNL, 1965-1969)

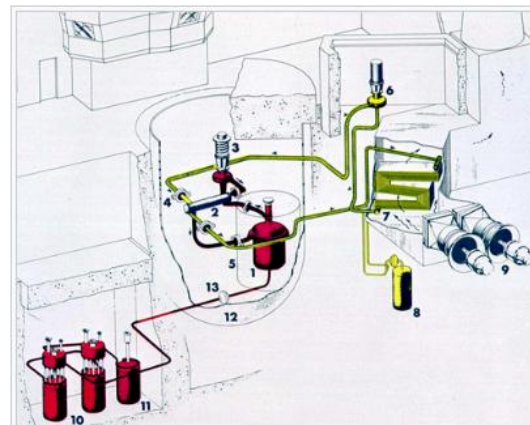
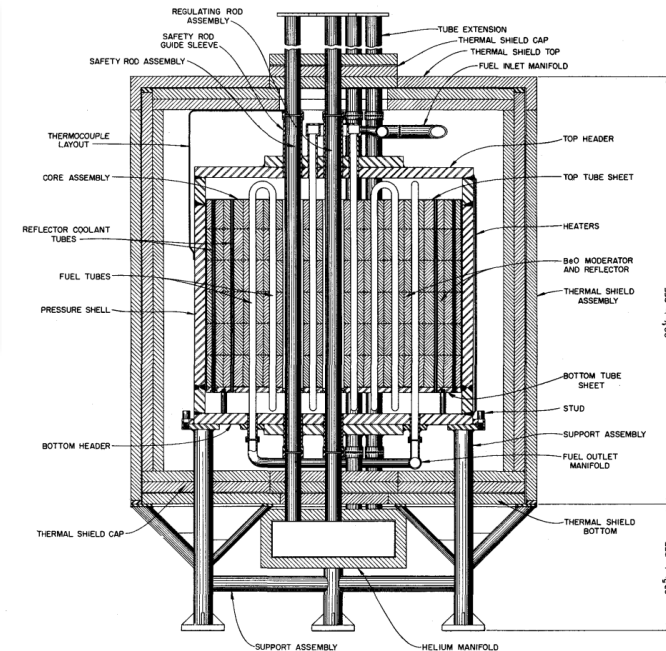
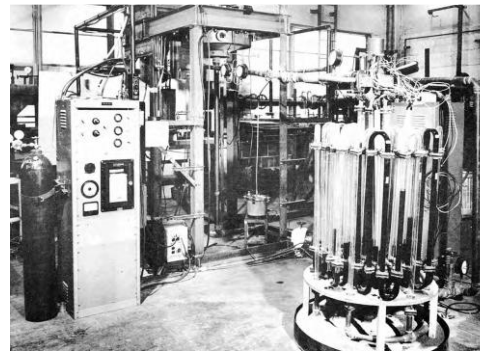
- Uran-235, později Uran-233 (z thorium cyklu), První reaktor, který běžel na U 233
- 7,4 MWt, 650 °C, atmosférický tlak

## TMSR-LF1 (Čína, od 2023)

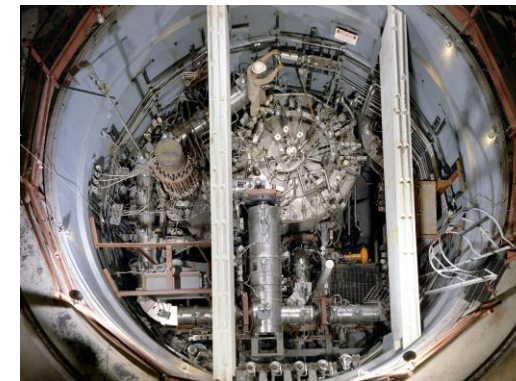
- Thorium MSR (LFTR – Liquid Fluoride Thorium Reactor), thorium breeding
- 2 MWt



Progress of TMSR



MSRE plant diagram: (1) Reactor vessel, (2) Heat exchanger, (3) Fuel pump, (4) Freeze flange, (5) Thermal shield, (6) Coolant pump, (7) Radiator, (8) Coolant drain tank, (9) Fans, (10) Fuel drain tanks, (11) Flush tank, (12) Containment vessel, (13) Freeze valve. Also note Control area in upper left and Chimney upper right.

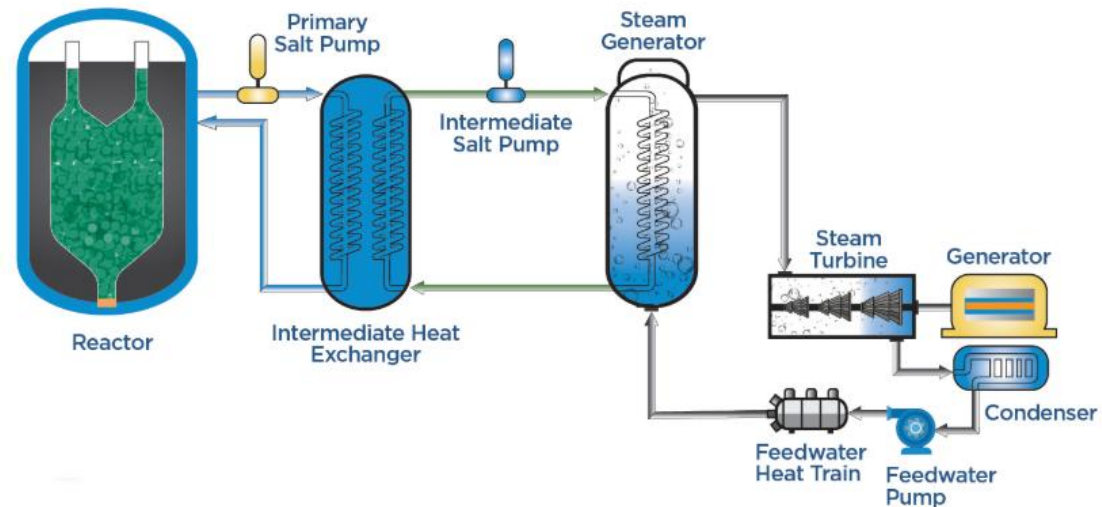


# MSR – budoucnost Kairos Power

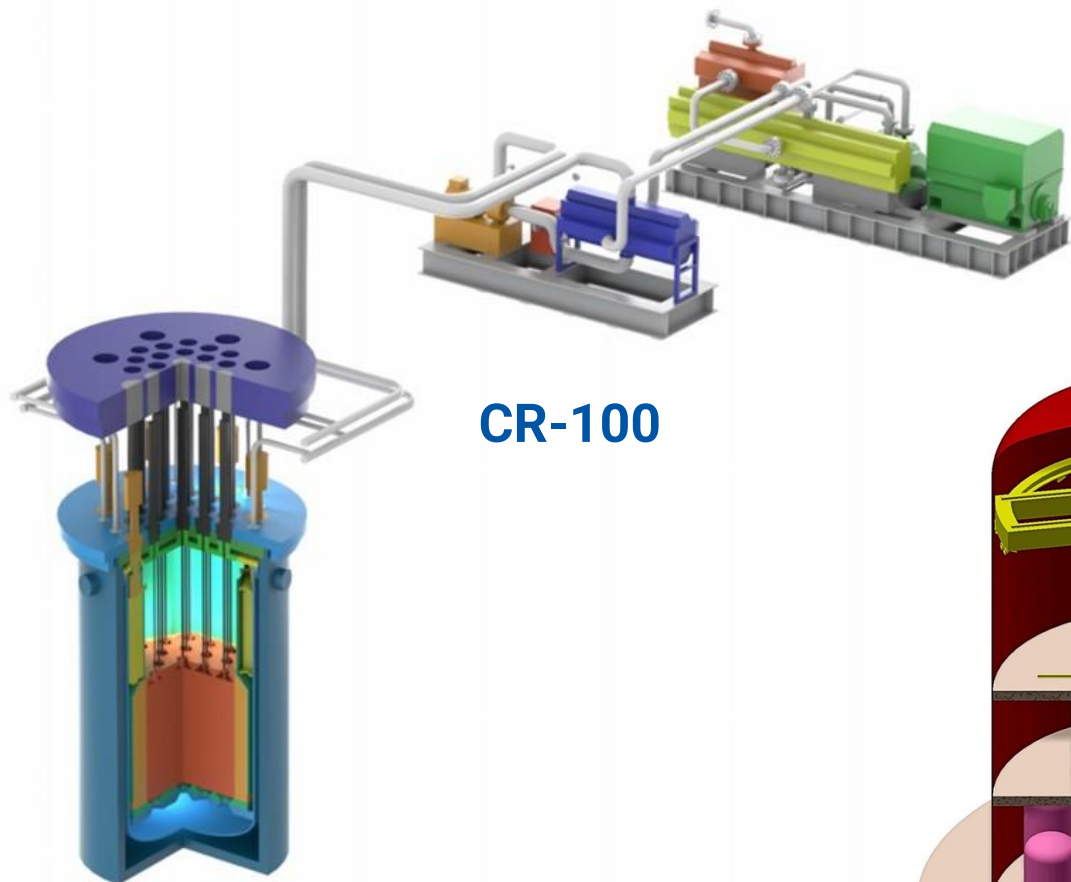


Kairos Power

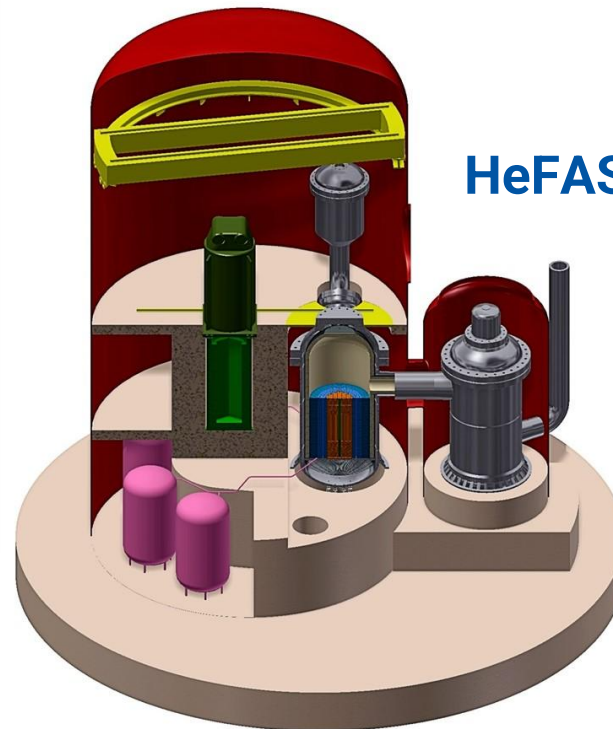
- FHR **KP-FHR**, Kairos Power získala od NRC stavební povolení pro své demonstrační reaktory Hermes i Hermes 2
- 150 MWe (2 × 75 MWe), účinnost 45 %
- TRISO palivo, chladivo FLiBe, online doplňování (19,75 % U235)
- 303 mil. USD  
z Advanced Reactor Demonstration Program (DOE), Google spolufinancuje Hermes 2, podíl Tennessee Valley Authority (TVA)



# SMR – česká stopa

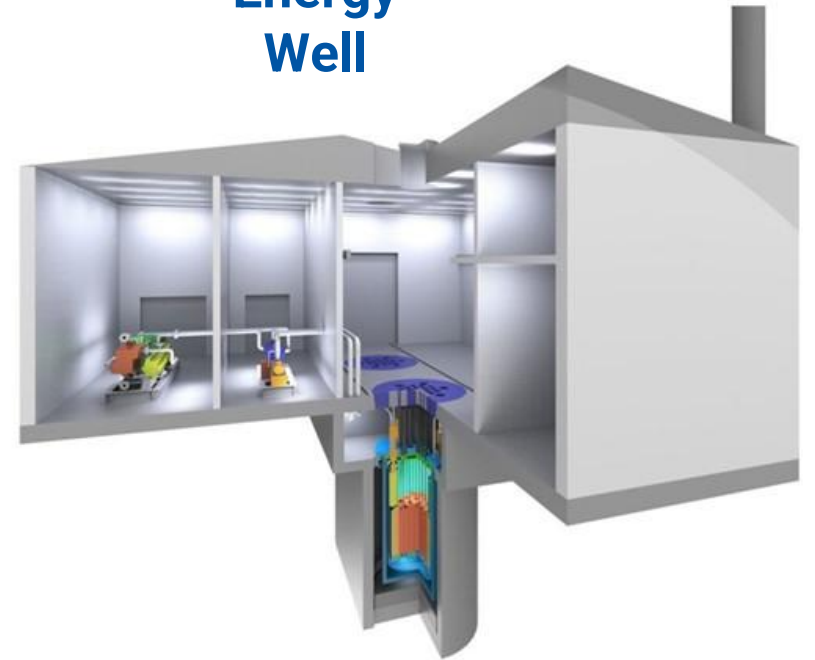


CR-100



HeFASTo

Energy Well



# Stav realizace SMR ve světě

## Generace III+

- od 2014 ve výstavbě **CAREM** (Argentina)
- od 2020 v komerčním provozu **KLT-40S** (Rusko)
- od 2021 ve výstavbě (provoz 2026) **ACP 100** (Čína)
- od 2025 ve výstavbě (provoz 2029) **BWRX-300** (Kanada)

## Generace IV

- Helium: od 2023 v komerčním provozu **HTR-PM** (Čína)
- Sodík: od 2024 ve výstavbě (provoz 2031) **Sodium** (USA)
- Olovo: od 2021 ve výstavbě (provoz 2026) **BREST 300** (Rusko)
- Soli: od 2023 v provozu **TMSR-LF1** (Čína),  
od 2024 ve výstavbě (provoz 2030) **Hermes 1/2** (USA)



# Závěr

- SMR mohou být v blízké budoucnosti alternativou k velkým jaderným blokům.
- Mohou být náhradou fosilních elektráren a tepláren, doplňkem k obnovitelným zdrojům.
- Díky modulárnímu uspořádání, škálovatelnosti a rychlejší výstavbě jsou jejich výhodou nižší kapitálové náklady.
- Není to sci-fi – ve světě probíhá intenzivní vývoj, výstavba, SMR jsou v provozu.



# Děkuji za pozornost

Daneš Burket

[dan.es.burket@cvrez.cz](mailto:dan.es.burket@cvrez.cz)