

Malé modulární reaktory – současný stav

Vladimír Wagner

Ústav jaderné fyziky AV ČR, FJFI ČVUT Praha

- 1) Úvod
- 2) Pět výzev pro jadernou energetiku
- 3) Malé modulární reaktory – proč?
- 4) Různé typy těchto reaktorů
- 5) Malé modulární reaktory
- 6) Mini a mikro-reaktory
- 7) MMR a Česká republika
- 8) Závěr



Dokončuje se MMR ACP100 v Číně



Vizualizace reaktoru Rolls-Royce



Várný malý modulární reaktor BWRX-300

Úspěchy i problémy jaderné energetiky

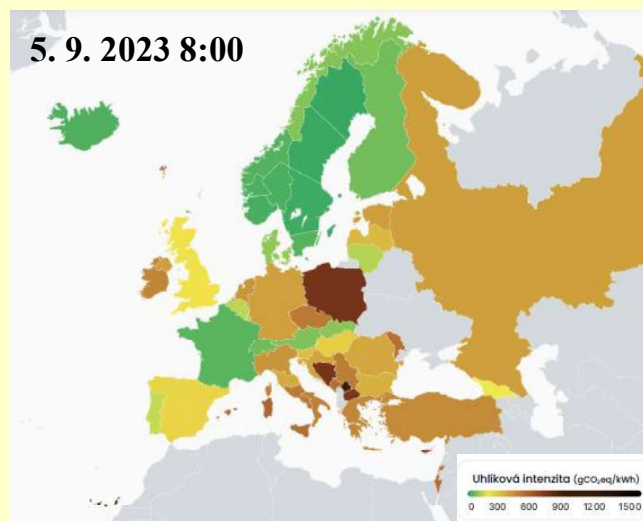
Jaderná energetika dodává zhruba 9,3 % (bylo až 17 %) elektřiny, v Evropě okolo 22 %
Podíl na nízkoemisních zdrojích: Evropa okolo 40 %, USA okolo 60 %, Česko okolo 75 %

Úspěchy jaderné energetiky:

- 1) Ukázala možnost úspěšného přechodu k nízkoemisní energetice (Francie, Švédsko, Švýcarsko, Ontario, Slovensko ...)
- 2) Reálně jde o nejbezpečnější zdroj (na statistiky obětí a škod na vyrobenou MWh)
- 3) Reálná životnost 50 i více let

Problémy jaderné energetiky:

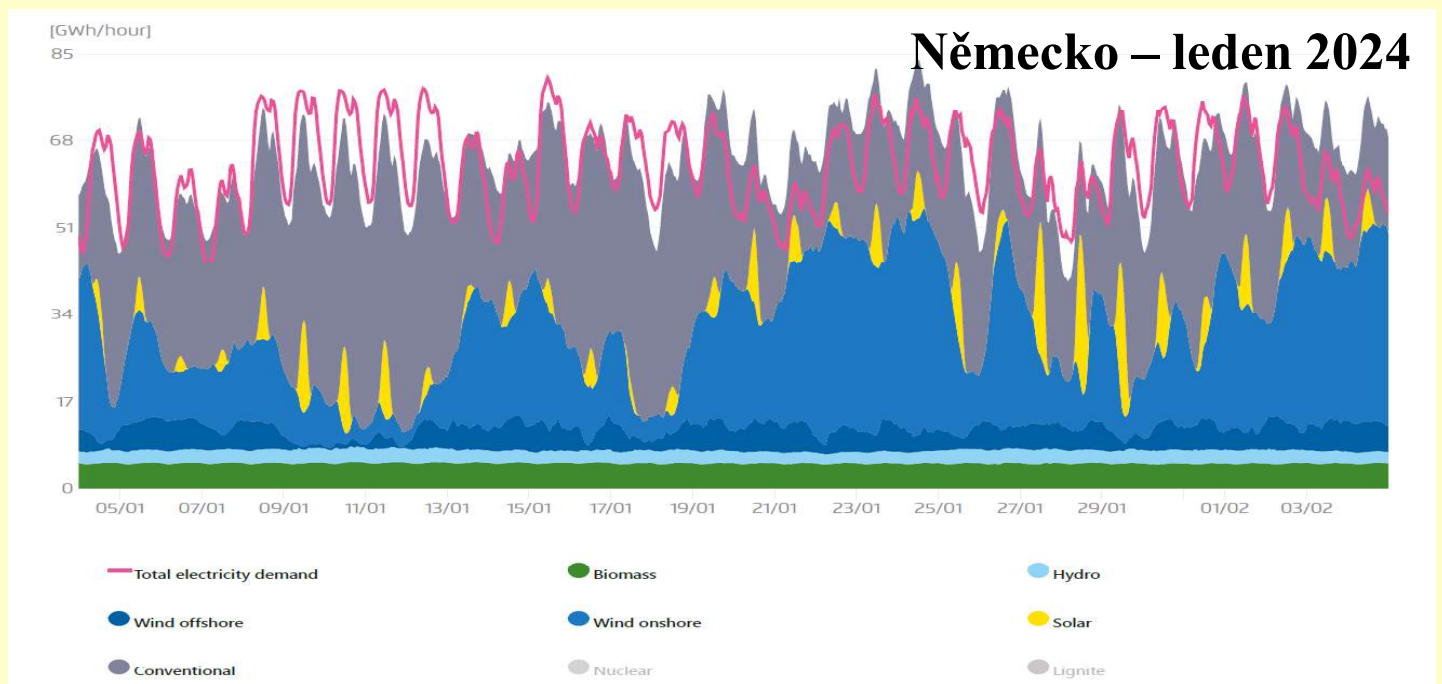
- 1) V povědomí společnosti zmíněné úspěchy nerezonují
- 2) Problém s přechodem na modulární a sériovou výstavbu
- 3) Vysoké počáteční investiční náklady
- 4) Citlivost na stabilitu podpory jaderné energetiky



*Emisi oxidu uhličitého lze průběžně sledovat na stránkách
na stránkách <https://www.electricitymap.org/map>*

Evropská energetika – nynější situace

- 1) Francie je opět největším vývozcem elektřiny (dále Švédsko a Česko)
- 2) Německo se stalo čistým dovozcem (v uhlí má sice stále dostatek výkonu, ale z ekonomických důvodů raději dováží z Francie i Česka)
- 3) Rostou přebytky v ideální době pro slunce a vítr a nedostatek v době bez větru a slunce
- 4) Bez jaderné energetiky se k nízkoemisní energetice nedostaneme



<https://www.agora-energiewende.de/>

Pět základních výzev

- 1) Co nejděší bezpečné provozování
- 2) Přeclod k reaktorům III. generace
- 3) Teplo pro teplárenství a průmysl
- 4) Zavedení malých modulárních reaktorů
- 5) Vývoj reaktorů IV. generace

Renesance v Číně, stagnace v Evropě a USA
USA a Evropa – prodlužování životnosti bloků
Klíčové pro Evropu je obnovení kompetencí a znalostí v tomto odvětví



Malý modulární reaktor
HTR-PM v Číně



Reaktor EPR (Olkiluoto 3)



Palivo s aktinidy pro rychlý reaktor BN-800

Velké bloky (i ty malé)

Každý typ reaktoru začínal jako malý, ve světě fungovala a funguje řada malých reaktorů

Výkon roste rychleji než cena → z ekonomických důvodů rostl výkon bloků

Preferovanými se postupně staly lehkovodní (tlakovodní a varné) reaktory

Ještě se více stavěly těžkovodní (CANDU) a plynem chlazené (MAGNOX)

Jedna z preferovaných velikostí byla okolo 500 MWe (např. VVER440)

Současné výkony reaktorů dominantně 1000 – 1800 MWe (VVER1000)

Evolucí vznikly reaktory III. generace, zatím se reálně budují lehkovodní (tlakovodní a varné)

Takové se staví v současné době a plánují i pro Dukovany a Temelín



Reaktor EPR



Reaktor AP1000



Reaktor APR1400

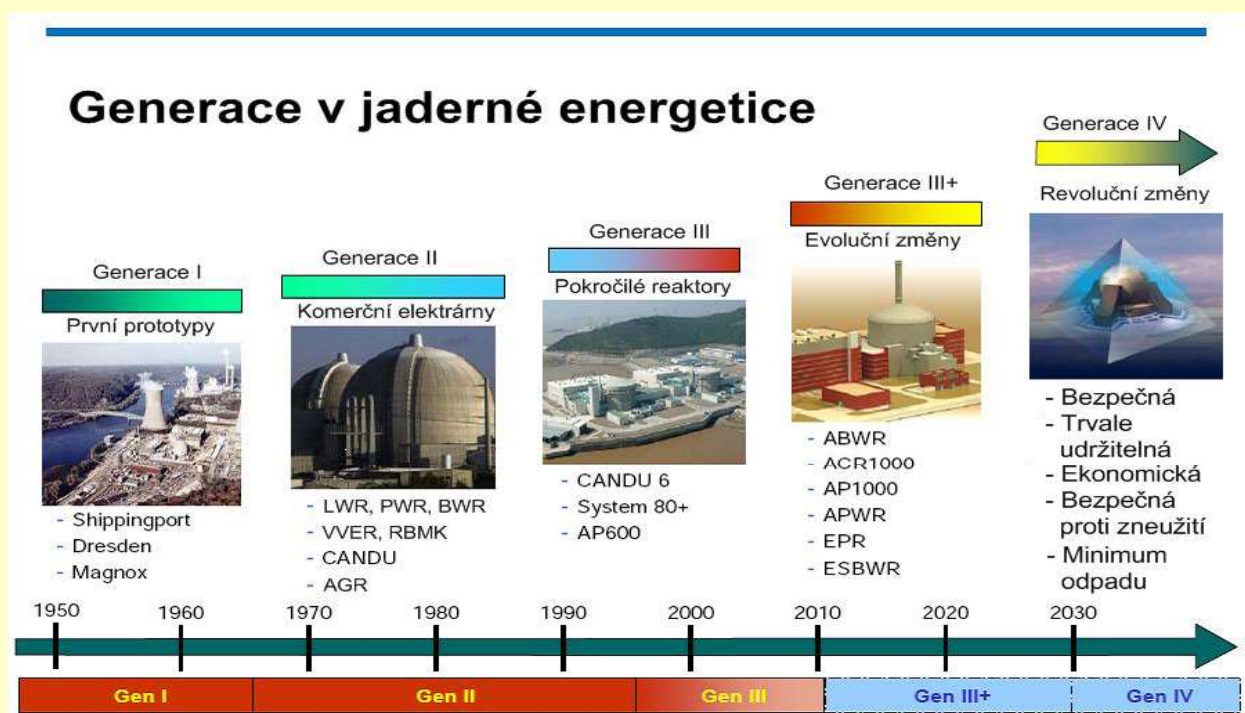
Různé generace jaderných reaktorů

Využívání jaderné energie od padesátých let

Komerční reaktory od šedesátých, sedmdesátých let

osmdesátá a devadesátá léta - stále efektivnější a bezpečnější

Začátek tohoto století – nová III. generace – evoluční vývoj - efektivní, bezpečné (kontejnment, pasivní bezpečnostní prvky), dlouhodobá životnost



Jaderné zdroje - současnost

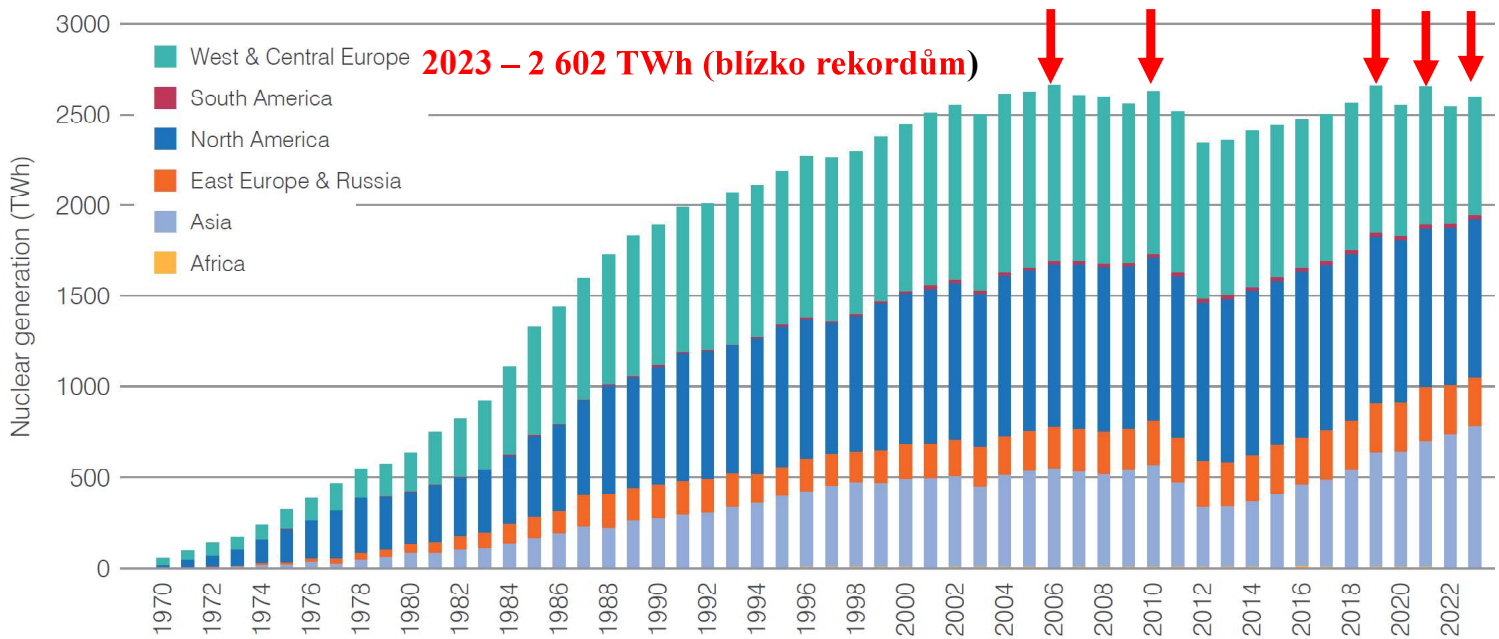
Co nejdelší bezpečný provoz stávajících bloků a přechod od II. ke III. generaci

Počet bloků: 439 (10 % III. generace) Instalovaný výkon: 395 GWe (srpen 2024)

Rozestavěno: 64 bloků s výkonem 71,4 GWe

Podíl jádra na produkci elektřiny něco přes 9 %

Budoucí vývoj závisí na obnově práce japonských bloků a dvou trendech, odstavování starých bloků a spouštění nových (Čína předběhla Francii a je na druhém místě).



Source: World Nuclear Association and IAEA Power Reactor Information Service (PRIS)

Jaderná energie pro teplárenství a průmyslové teplo

Velká část emisí – teplárenství a průmysl

1) Teplárenství:

Vytápění elektrinou – takovou cestou šla Francie, možnost využít při regulaci

Tepelná čerpadla – využívají elektrinu

Kogenerace u velkých bloků – výstavba teplovodu z Temelína, v plánu z Dukovan, řada projektů v Rusku a Číně (Leningrad 2-1 a 2-2, Chung-jen-che 1-4)

Využití malých modulárních reaktorů – kogenerace i čistě teplárenství (ACP100)

2) Teplo pro průmysl:

Využití současných reaktorů – pouze nižší teploty (Tchien-wan 3 a 4)

Využití vysokoteplotních reaktorů (velkých i malých modulárních) – HTR-PM

Efektivní produkce vodíku



Tchien-wan 3 a 4 – dodávky páry pro chemičku Výstavba reaktoru ACP100 Palivo TRISO

Proč potřebujeme Malé Modulární Reaktory (MMR)?

Zásadní problémy velkých bloků – velmi velká investice, významný vliv ceny peněz, nedají se uvádět do provozu postupně, rozlehlá bezpečnostní zóna

Investorský finanční model – cílem je rychlý akcionářský zisk → krátká doba návratnosti (do 20 let), většinou dražší úvěry

Strategický finanční model (stát, rodinná firma) – strategická dlouhodobá investice → návratnost i srovnatelná s životností zdroje, stát má nízké úroky úvěru

- 1) Řešení investorského finančního modelu – rozdělení velké investice
- 2) Proniknutí jaderných zdrojů do decentrální energetiky (teplárenství)
- 3) Snížení bezpečnostních rizik – menší bezpečnostní zóna, snazší licencování

Kompensace zlepšení ekonomiky s velikostí – modulární sériová výroba částí v továrnách, na staveništi jen jejich sesazování



SMR160 (Firma Holtec)



Přeprava modulů tahači



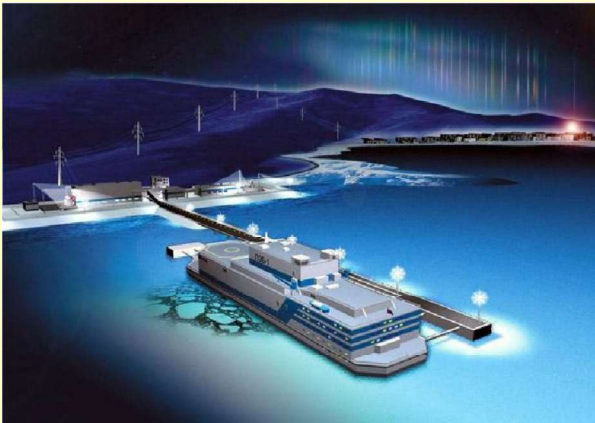
NuScale

Různé typy malých modulárních reaktorů

- 1) Malé modulární reaktory (MMR) (výkon menší než 300 MWe, 500 MWe)
- 2) Minireaktory, mikroreaktory – menší než 100 MWe, až ke zlomkům MW –
přechod k speciálním reaktorům (například pro vesmír)

Možné varianty:

- 1) Založené na klasickém základě (varné a tlakovodní)
- 2) Založené na klasickém základě integrální
- 3) Malé modulární reaktory IV. generace (vysokoteplotní reaktory)
- 4) „Baterie“ s dlouhou periodou výměny paliva



Plovoucí elektrárna Akademik Lomonosov Architektonická vize kompaktní „baterie“ StarCore Nuclear

Už využívané klasické lehkovodní reaktory SMR

Ledoborce a plovoucí jaderná elektrárna Akademik Lomonosov

Už rok v provozu **KLT-40S** (Rusko) – 2 reaktory tlakovodní, 35 MWe, plovoucí elektrárna Akademik Lomonosov dodává od začátku roku 2020 elektrinu a teplo pro město Pevek

Sériové plovoucí elektrárny – reaktory **RITM-200** 50 MWe z ledoborce (4 se budují)

Sériové pozemní malé elektrárny – stejné reaktory (buduje se v Jakutsku)



Pracuje už 7 (3 nové) atomových ledoborců 4 jsou ve výstavbě a 3 nového typu Lider



Plovoucí elektrárna Akademik Lomonosov nahrazuje Bilibinskou elektrárnu



Příprava využití reaktoru RITM-200 pro malou elektrárnu v Jakutsku

Klasické lehkovodní typy – tlakovodní a varné

Zmenšené verze současných velkých lehkovodních reaktorů

Tlakovodní:

SMR-160 (Holtec, USA) - 160 MWe, první prototyp Oyster Creek, hotový 2030

Rolls Royce (Velká Británie) – 470 MWe, pokročilé stádium

AP300 (Westinghouse, USA, Kanada)

VBER-300 (OKBM Fabrikantov, Rusko) – palivo VVER

Varné:

BWRX-300 (GE-Hitachi Nuclear Energy, Japonsko) – pokročilé stádium

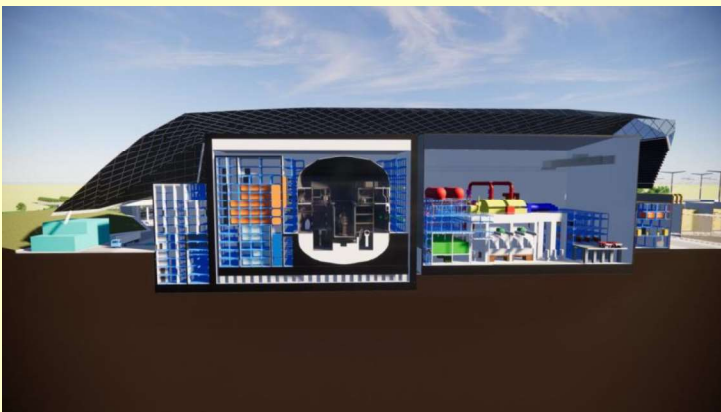


Schéma reaktoru Rolls-Royce

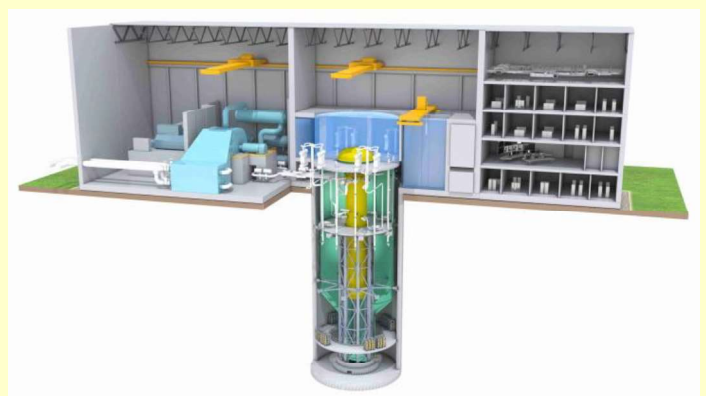


Schéma reaktoru BWRX-300

Klasické lehkovodní typy – integrální konstrukce

Zlepšení bezpečnostních parametrů se dosahuje integrací parogenerátoru, kompenzátoru objemu a mechanismu řídicích tyčí do tlakové nádoby reaktoru

Integrální tlakovodní:

NuScale (USA) – moduly o výkonu 77 MWe, USA licence 2020, Prototyp (12 modulů): (Idaho) – prototypový projekt ZRUŠEN, hledá se nové místo

SMART100 (KHNP, KAERI, Jižní Korea) – 330 MWt, 100 MWe

NUVARD™ (EDF Francie) - kompaktní systém s dvěma nezávislými reaktory – moduly, každý s výkonem 170 MWe – ZRUŠEN (Pozastaven?)

ACP-100 (CNNC, Čína) – první prototyp v elektrárně Čchan-t'iang, dokončení 2026



iMMR NUVARD™



iMMR SMART100

ACP-100 (Linglong One)

Zahájení budování v roce 2021, červenec 2023 dokončena instalace centrálního modulu, srpen 2024 instalace integrované sestavy reaktorové nádoby, dokončení 2026



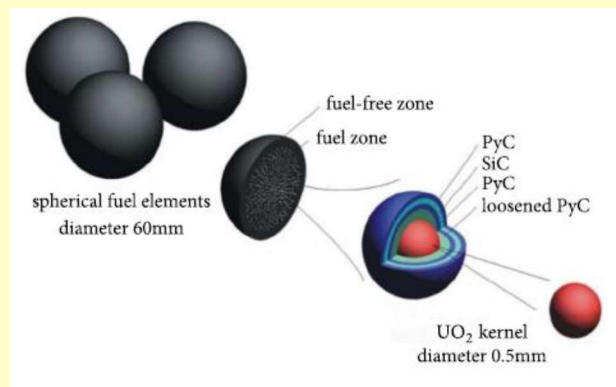
Inovativní malé modulární reaktory (IV. generace)

Dokončovaný **HTR-PM** – vysokoteplotní reaktor s kulovým ložem chlazený plynem, pracovní plyn hélium a teplota 750°C, teplota páry až 500 °C, moderace uhlíkem, palivo TRISO, dva bloky s jednou turbínou 210 MWe

Začátek roku 2021 – zahájení spouštění, konec 2022 výkon 100 %, 2023 komerční provoz, duben 2024 připojena do soustavy vytápění

Důležité zkušenosti s využitím helia a paliva TRISO – efektivita a ekonomičnost

Příprava většího bloku složeného z šesti modulů se společnou turbínou HTR-PM600



Malý modulární reaktor HTR-PM v elektrárně Š'-tao-wan

TRISO paliva pro bloky HTR-PM

Pestré možnosti chlazení i možnost tekutého paliva

Chlazený plynem – Xe-100 – 80 MWe, vysokoteplotní – TRISO palivo, elektrárna 4 – 12 modulů

Chlazený sodíkem, rychlý – PRISM, ARC-100, AURORA,

Chlazený olovem – BREST-300 (Rusko)

Chlazený bismutem a olovem – SVBR100 (Rusko)

Tekuté soli – Energy Well (CVŘ Řež, Česko) jen chlazení, ThorCon, Integral MSR (Kanada, USA) i tekuté palivo, SSR (Moltex) – spalování aktinidů

Kritické – dokončení prototypu a sériová výroba



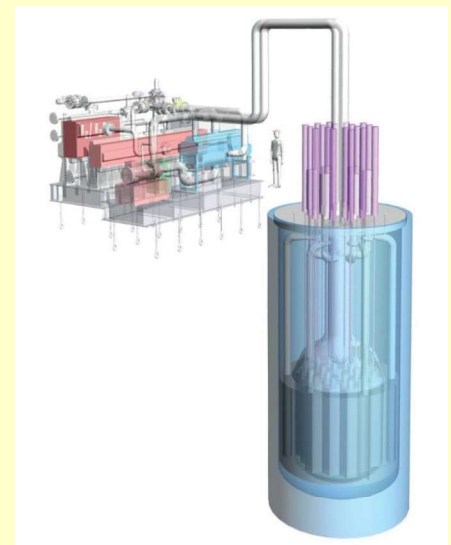
Schéma elektrárny Terrestrial Energy, Kanada



SMR Aurora firmy Oklo



SMR SSR firmy Moltex



Energy Well český projekt

MMR jako baterie – dlouhá doba vyhořívání

Dlouhá doba vyhořívání (10 – 20 let, i více),

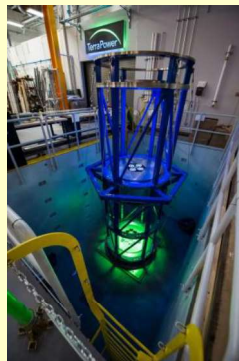
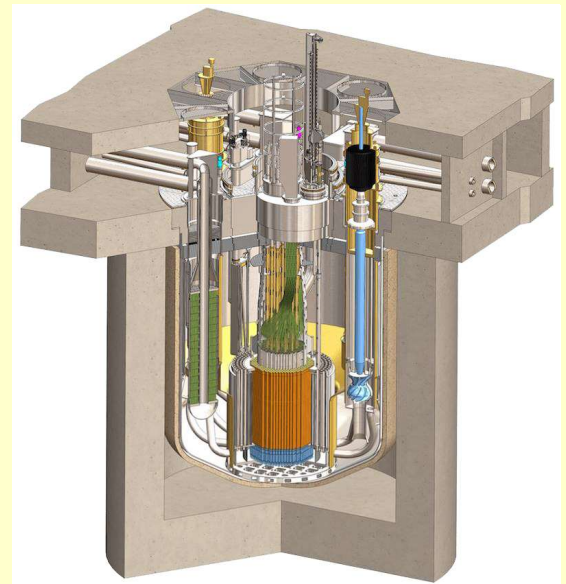
ThorCon reaktor **TMSR** Molten Salt Reactors

Chlazení tekutými solemi, tekuté palivo

Dva moduly (výkon 500 MWe)

Terrestrial Energy company (Kanada - reaktor **IMSR** (Integral Molten Salt Reaktor) (power 195 MWe)

Bill Gates **TerraPower** je typ **TWR** (**Traveling Wave Reactor**) – rychlý reaktor se sodíkovým chlazením, palivo HALEU (obohacení 19,75 %) Výkon: ~ 345 MWe



Minireaktory a mikroreaktory

Výkon je v oblasti zlomků MWe až do 20 MWe

Dominantně pro ostrovní režim

Kompaktní malá aktivní zóna – vyšší obohacení

Projekt **Pele** vysokoteplotní plynem chlazený mikroreaktor s výkonem od 1 do 3 MWe, palivo HALEU

Reaktor **eVinci** s výkonem 5 MWe bude využívat tepelné trubice

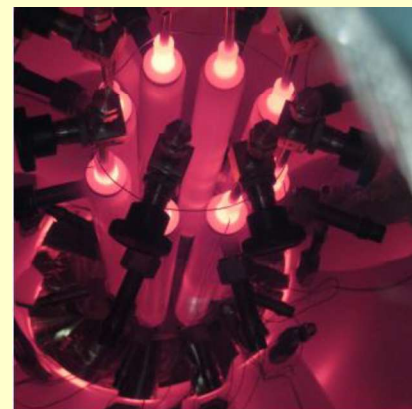
Vesmírné reaktory – Kilopower – tepelné trubice



Koncepce reaktoru Pele



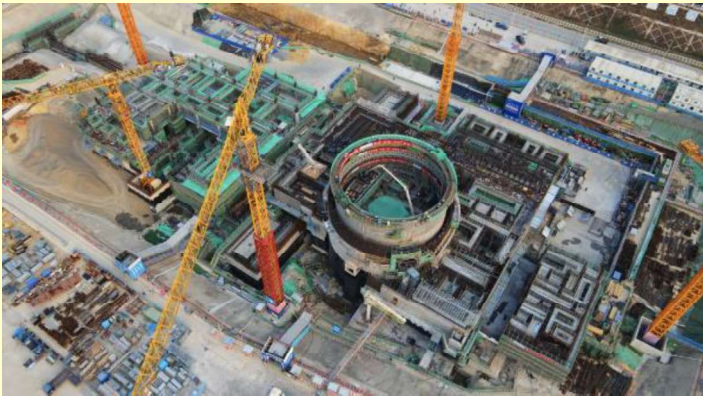
Vizualizace μ MR eVinci™ společnosti Westinghouse



Tepelné trubice Kilopower

Budování a spouštění prvních malých modulárních reaktorů

- 1) První malé modulární reaktory se dokončují a spouštějí. Zatím je to v Rusku a Číně. Zkušenosti z jejich provozování budou velmi důležité.
- 2) Řada projektů, jako je NuScale, BWRX-300, Rolls Royce a další se dostávají do pokročilé fáze projektování a předlicenčních etap.
- 3) Řada projektů už má vybrány lokality pro první prototyp a realizují licenční řízení pro dané lokality.
- 4) Je velmi důležitá široká spolupráce producentů i budoucích uživatelů malých modulárních reaktorů.



Malý modulární reaktor ACP100 (Linglong One)



První zkušenost s HTR-PM

Česko a malé modulární reaktory

Potřeba náhrady větších kogeneračních uhelných elektráren a tepláren – klasicky několik bloků 200 MWe → velmi vhodným řešením jsou MMR

Česká republika má dlouholetou jadernou tradici – vývoje i výroby reaktorů

ČEZ provozuje jaderné elektrárny, vlastní vývojové (ÚJV a.s. Řež) i výrobní (Škoda JS) kapacity → chce se zapojit do vývoje, výroby i využívání MMR

ČEZ potřebuje MMR rychle → spojení s pokročilým projektem Rolls-Royce

(stejně pokročilý je BWRX-300 – varný reaktor u nás nemáme – pro SÚJB problém)

ČEZ potřebuje naskočit do vývoje a výroby → vstup do Rolls-Royce

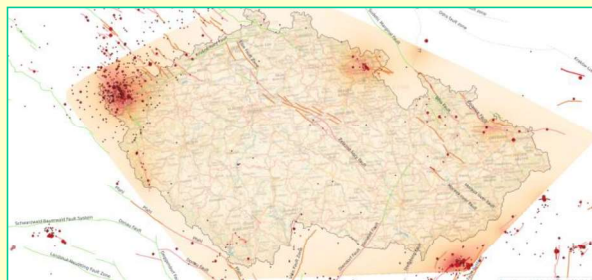
První prototypový projekt v areálu Temelín – jde o jadernou lokalitu, není problém s licencováním, půjde o školící pracoviště a vytvoří mustr pro licencování, stav. řízení ...

Další lokality: Tušimice, ... - zde se nyní provádí geologický a seismický průzkum

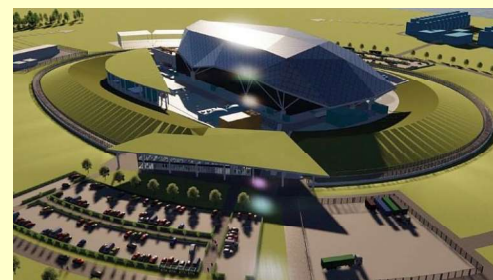
Možnost využití MMR i u dalších producentů energií (i závodní energetiky)



Tušimice II (2×200 MWe)



Mapa seismické aktivity a zlomů



Vizualizace MMR Rolls-Royce

České koncepty malých modulárních reaktorů

1) Tři klasické využívající palivové soubory VVER:

DAVID (Witkowitz) – dvě zóny nad sebou, výměna paliva v centrálním závodě

Teplátor - „pouze“ zdroj tepla, těžkovodní reaktor (využití i vyhořelých palivových souborů)

CR100 ÚJV a.s. – projekt klasického MMR s palivem VVER

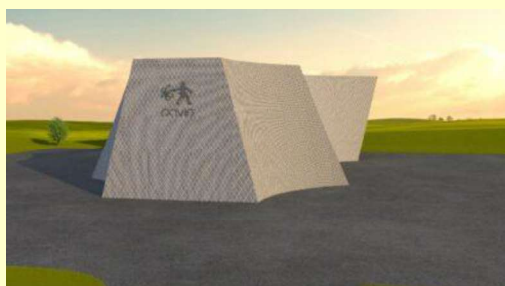
2) Inovativní typy (reaktory čtvrté generace) ÚJV a.s.:

EnergyWell – chlazení tekutými solemi, dlouhodobé vyhořívání ...

HeFASTo – rychlý reaktor chlazený héliem

Potenciál pro výchovu odborníků, rozvoj průmyslové základny a synergií s dalšími oblastmi

Zapojení do řady mezinárodních projektů – NuScale, Rolls-Royce, BWRX300 ...



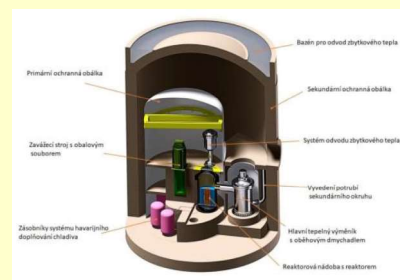
DAVID



Teplátor



EnergyWell



HeFASTo

Malé modulární reaktory - shrnutí

Výhody:

- 1) Rozložením investice umožňuje překonat problémy s cenou peněz.
- 2) Sériová hromadná výroba modulů v továrně, ekonomika z decentralizace.
- 3) Možnost dosáhnout pasivní bezpečnosti (i díky nižším celkovým výkonům).
- 4) Proniknutí do decentralizované energetiky a teplárenství.

Nevýhody:

- 1) Pořád nejspíše cena klesá pomaleji s růstem výkonu.
- 2) Menší zdroje - menší aktivní zóna, úniky neutronů, větší spotřeba paliva a odpad.
- 3) Klíčová výzva – přizpůsobení licenčního procesu

Malé modulární reaktory nenahradí velké jaderné bloky – pouze je doplní

Komerční bloky by mohly být na začátku třicátých let, prototypy i dříve

Je klíčové mít dostatek zákazníků pro sériovou výrobu → omezený počet typů v EU



Blok ACP100 se dokončuje U nás by mohly být už v polovině+ třicátých let Rolls-Royce MMR