

Současný stav a budoucnost jaderné energetiky

Vladimír Wagner

Ústav jaderné fyziky AV ČR, FJFI ČVUT Praha

- 1) Úvod – nízkoemisní energetika
- 2) Principy fungování reaktoru
- 3) Pět výzev pro jadernou energetiku
- 4) Co nejdelší provoz stávajících bloků
- 5) Současnost – přechod k III. generaci
- 6) Malé modulární reaktory
- 7) Budoucnost – reaktory IV. generace
- 8) Jádru a Česká republika
- 9) Závěr



Plovoucí jaderná elektrárna Akademik Lomonosov



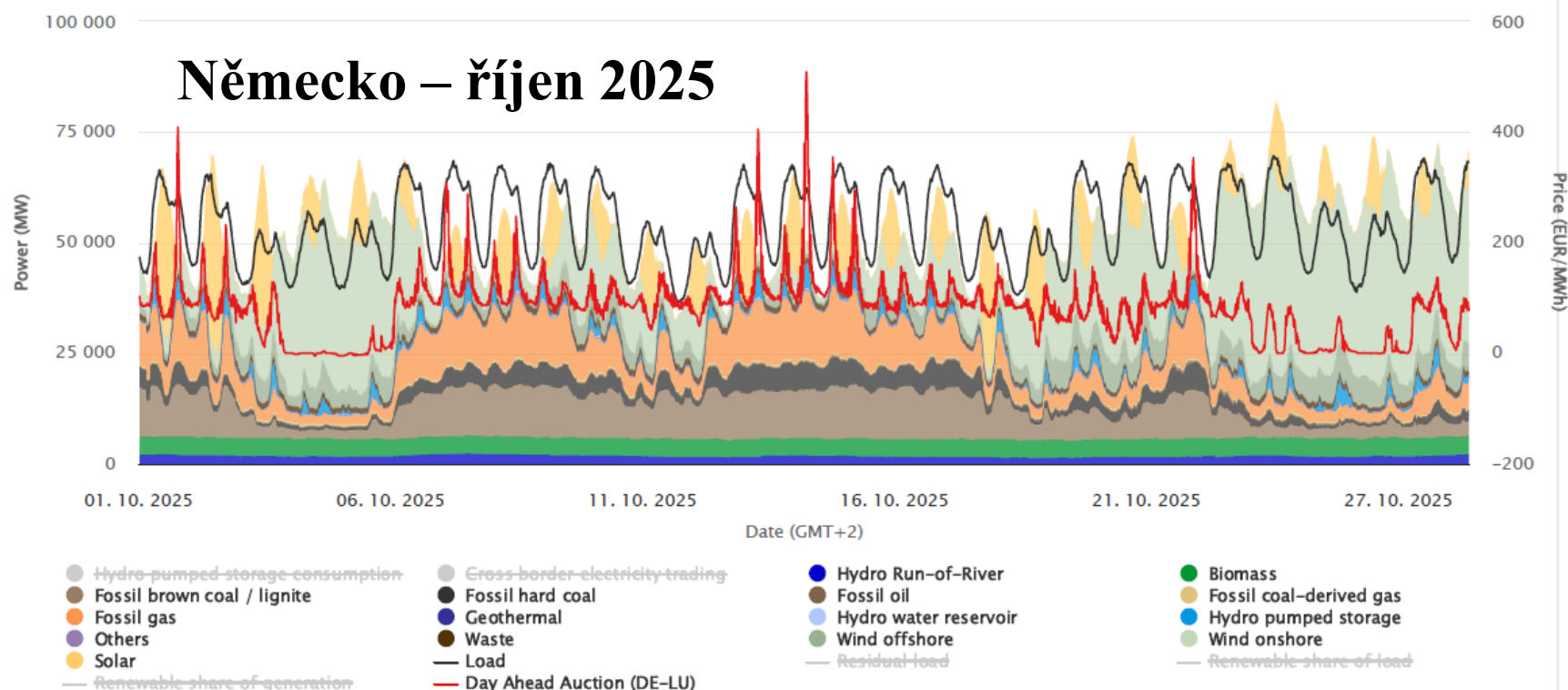
Olkiluoto 3 - reaktory III+ generace



Sodíkový reaktor BN-800 je předstupěň reaktoru IV. generace

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



Udržitelnost a bezpečnost

Jak je to s udržitelností OZE a jaderných zdrojů?

Jaderné zdroje nezávisí na počasí a mohou podle potřeby zvyšovat a snižovat výkon – rotující hmotnosti zároveň umožňují udržovat stabilitu frekvence a řeší první okamžiky krizových výpadků

Rozpad jednotné elektrosoustavy ENTSO-E v Evropě – 8. 1. 2021 rozdělení sítě na přebytkovou jihovýchodní část a nedostatkovou severozápadní – vliv „Dunkelflaute“ a kaskády poruch vedení v oblasti Balkánu

Black-out ve Španělsku a Portugalsko – přesný zdroj spuštění události je diskutován, citlivost k výpadku a neudržení frekvence však ovlivnil nedostatek rotující hmotnosti

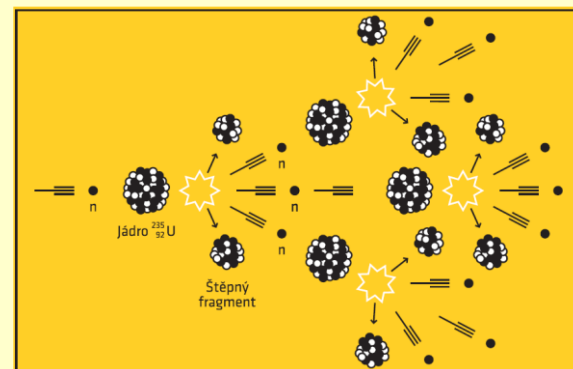


Rotující hmotnosti turbín stabilizují síť Noční pohled na Evropu v době blackoutu ve Španělsku

Klasické jaderné reaktory

Štěpná reakce - štěpení jádra samovolné nebo po získání energie

- obvykle se dodá energie záchytem neutronu
- doprovázena vznikem neutronů s energiemi v oblasti jednotek MeV (2 - 3 neutrony na štěpení) (část hned – část zpožděná)



Řetězová štěpná reakce: Štěpení nuklidů ^{235}U , ^{239}Pu , ^{233}U ...
záchytem neutronu $^{235}\text{U} + n \rightarrow ^{236}\text{U}^*$: 85 % - štěpení
15 % - emise fotonu

Velmi vysoké hodnoty účinných průřezů záhytu neutronů pro malé energie neutronů (10^{-2} eV)

Nutnost **zpomalování neutronů** - moderátor

Štěpení - vznik **štěpných produktů**

Záchyt $\rightarrow$ emise fotonu $\rightarrow$ rozpad beta - vznik **transuranů**

Multiplikační faktor k - počet neutronů následující generace neutronů produkováných na jeden neutron předchozí generace

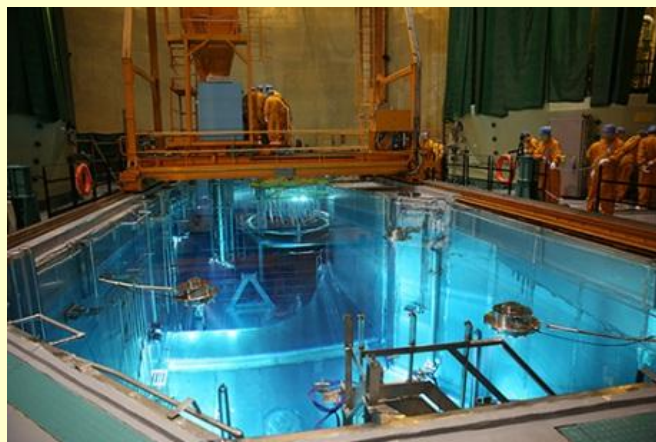
$k < 1$ podkritický systém

$k = 1$ kritický systém

$k > 1$ nadkritický systém



Instalace reaktorové nádoby prvního bloku nové elektrárny Shin Hanul (Jižní Korea)



Dukovany – reaktorový sál

Manipulace s palivem (Fangjiashan 1)

Vnitřek reaktoru – instalace Sanmen I

Palivo:

- 1) přírodní uran - složen z ^{238}U a jen 0,72 % ^{235}U
- 2) obohacený uran - zvýšení obsahu ^{235}U na 3-4%
(klasické reaktory – i přírodní –
moderace těžkou vodou - CANDU)

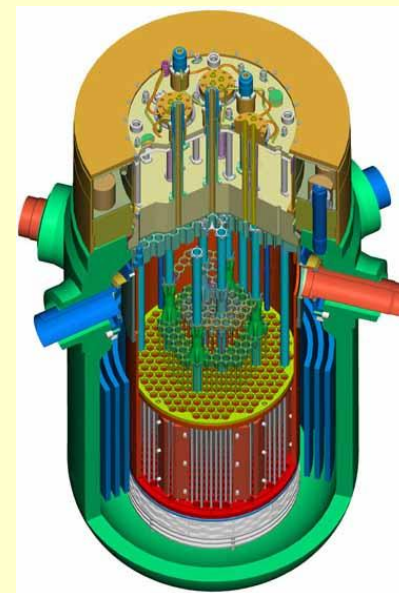
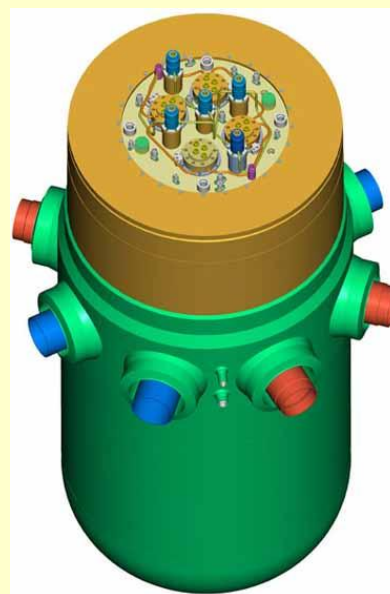
$$T_{1/2}(^{238}\text{U}) = 4,51 \cdot 10^9 \text{ r}, \quad T_{1/2}(^{235}\text{U}) = 7,13 \cdot 10^8 \text{ r}$$

většinou ve formě UO_2

Moderátor: voda, grafit

Ovládání: Regulační, kompenzační
a bezpečnostní tyče

Chlazení: Důležitý odvod tepla (voda)



Principiální schéma reaktoru

Různé typy jaderných reaktorů

1) Klasické na pomalé neutrony

Velmi vysoké hodnoty účinných průřezů zachytu neutronů pro malé energie neutronů (10^{-2} eV)

Nutnost zpomalování neutronů - moderátor

Palivo: 1) přírodní uran - složen z ^{238}U a jen 0,72 % ^{235}U

2) obohacený uran - zvýšení obsahu ^{235}U na 3-4% (klasické reaktory)

2) Rychlé (množivé) na rychlé neutrony – Pro vesmír rychlé reaktory s vysokým obohacením

Nemoderované neutrony → nutnost vyššího obohacení uranu 15 - 50 % ^{235}U (ekvivalentně ^{239}Pu)

Vysoké obohacení → vysoká produkce tepla → nutnost výkonného chlazení → roztavený sodík, olovo (teplota přes 550°C)

Produkce ^{239}Pu : $^{238}\text{U} + n \rightarrow ^{239}\text{U}(\beta^-) \rightarrow ^{239}\text{Np}(\beta^-) \rightarrow ^{239}\text{Pu}$

Z ^{239}Pu více neutronů (3 na jedno štěpení) → **produkce více plutonia** než se spotřebuje (plodivá zóna)

Produkce ^{233}U : $^{232}\text{Th} + n \rightarrow ^{233}\text{Th}(\beta^-) \rightarrow ^{233}\text{Pa}(\beta^-) \rightarrow ^{233}\text{U}$

Je kompaktnější, produkuje více energie – dlouhodobá zkušenost s reaktory na ponorkách

3) Vesmírné reaktory - ještě vyšší obohacení (i přes 90 %), beryliové zrcadlo a tím i kompaktnější

Někdy vhodné využít LEU (Low Enrichment fuel)

< 20 %



Rychlý reaktor chlazený sodíkem BN-800

Různé generace jaderných reaktorů

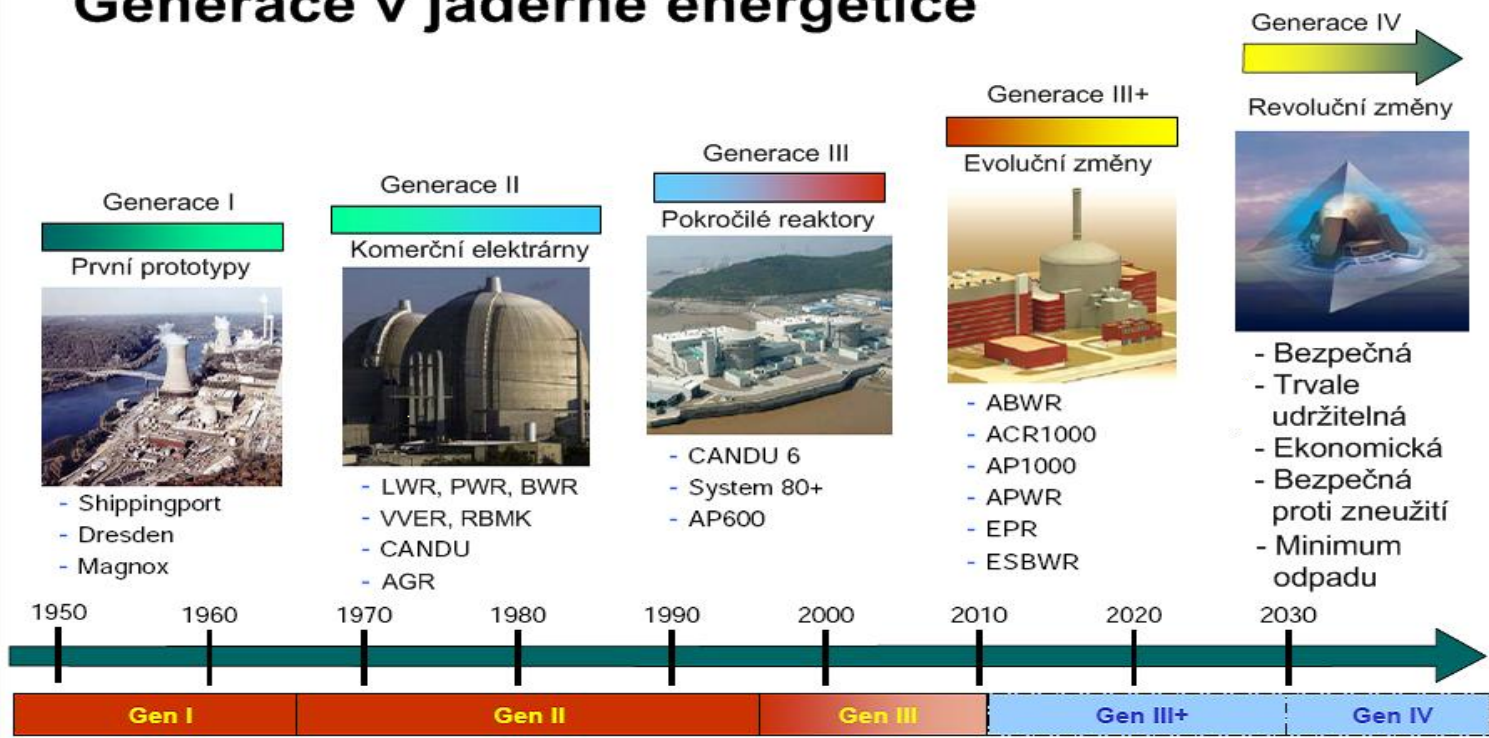
Využívání jaderné energie od padesátých let

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

Generace v jaderné energetice



Pět základních výzev

- 1) Co nejdelší bezpečné provozování
- 2) Přejít k reaktorům III. generace
- 3) Teplo pro teplárny 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

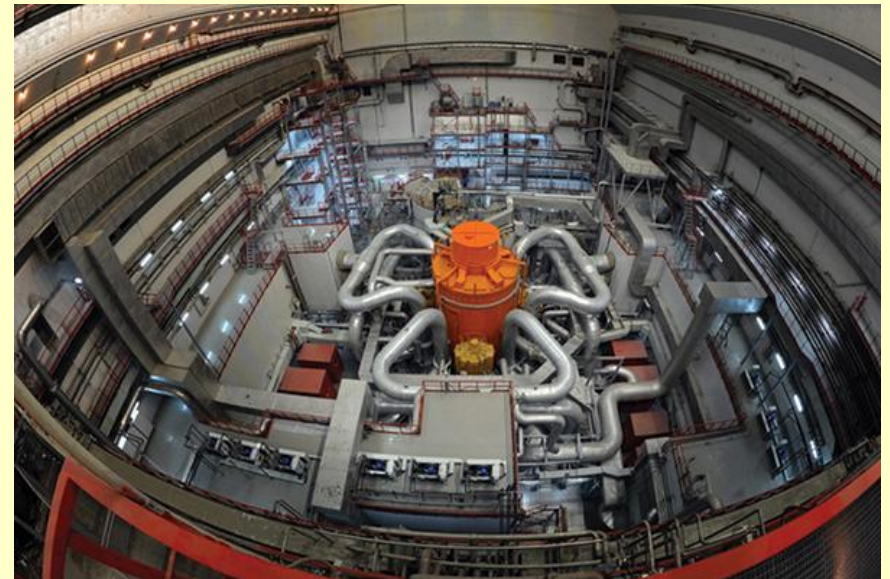
Klíčové pro Evropu je obnovení kompetencí a znalostí v tomto odvětví



Malý modulární reaktor
HTR-PM v Číně



Reaktor EPR (Olkiluoto 3)



Rychlý reaktor chlazený sodíkem BN-800 –Bělojarsk 3

Jaderné zdroje - současnost

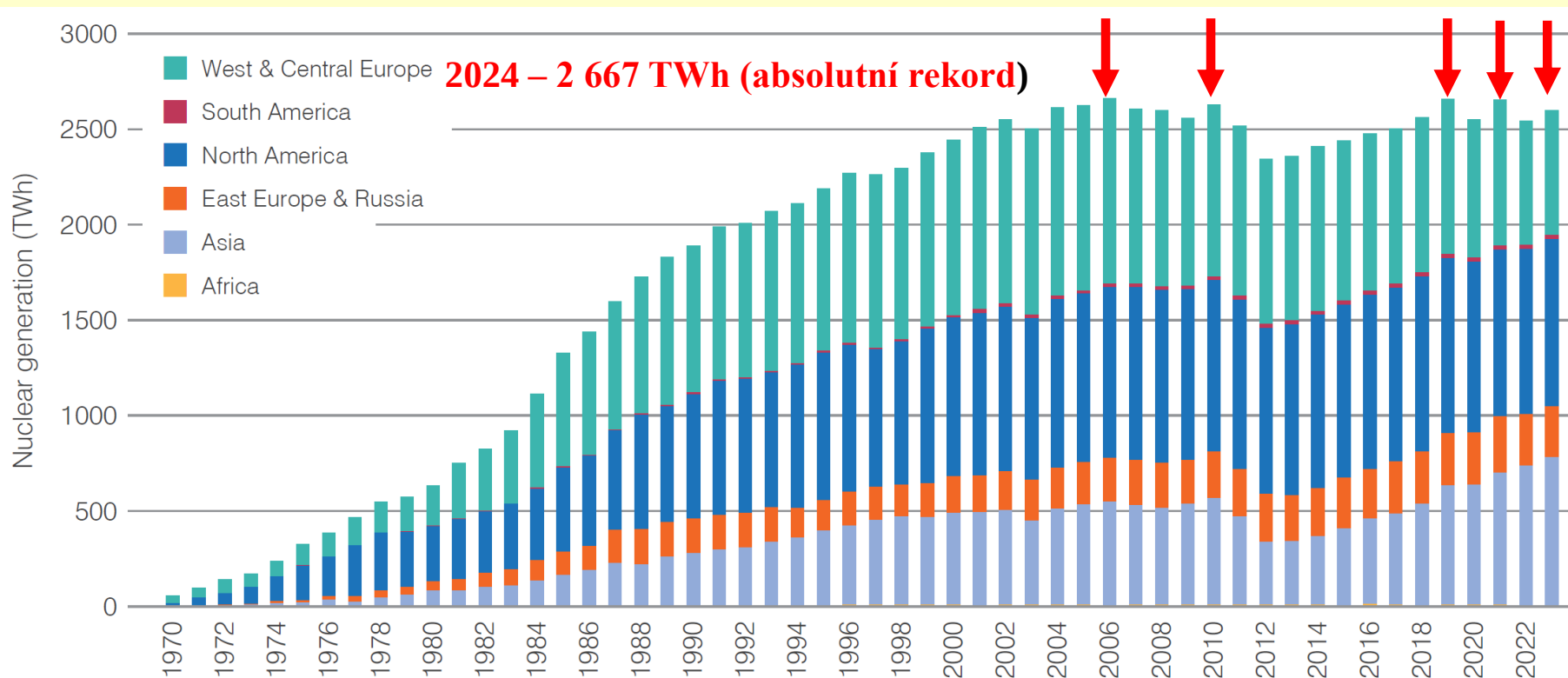
Co nejdelší bezpečný provoz stávajících bloků a přechod od II. ke III. generaci

Počet bloků: 439 Instalovaný výkon: 398 GWe (polovina června 2025)

Rozestavěno: 69 bloků s výkonem 75,6 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).



Co nejdelší bezpečné provozování

- 1) Většina komponent se dá vyměnit, kritický je stav reaktorové nádoby (vyžihání)
- 2) V současné době se dostaly některé bloky už do šesté desítky let provozu
- 3) Řada bloků má či žádá o licenci na 60 let a některé i na 80 let
- 4) V USA se připravují k opětovnému spuštění i již „trvale“ odstavené bloky – firma Constellation připravuje opětovné spuštění Three Miles Island (přejmenováno na Crane Clean Energy Center) – předpoklad spuštění 2027
- 5) Pro prodloužení provozování se rozhodly Švédsko, Francie, Švýcarsko, Belgie, ...
- 6) Firma ČEZ nyní předpokládá provoz Dukovan 70 let (do roku 2055) – intenzivní příprava, pečlivá údržba a vyčleněné finance – do přípravy nových Dukovan zahrnuty i práce na zajištění dostatku vody pro souběžné chlazení



Bloky v Loviisa 1 a 2 (VVER440)
běží přes 40 let, žádají o licenci na 70



Dukovany by měly běžet do roku 2055



Three Mile Islands 1 by měl běžet v 2027

Firma Holtec přechází od vyřazování k provozování a výstavbě

Elektrárna Palisades (USA) 800 MWe byla odstavena v roce 2022.

Převzal ji Holtec, aby zajistil likvidaci.

Od roku 2023 pracuje na opětném spuštění.

30. 5. 2025 NRC vydalo kladné stanovisko k dopadům na životní prostředí

Spuštění se předpokládá do konce roku 2025

V areálu postaví ještě dva SMR-300



Elektrárna Palisades by mohla být znovu spuštěna už letos



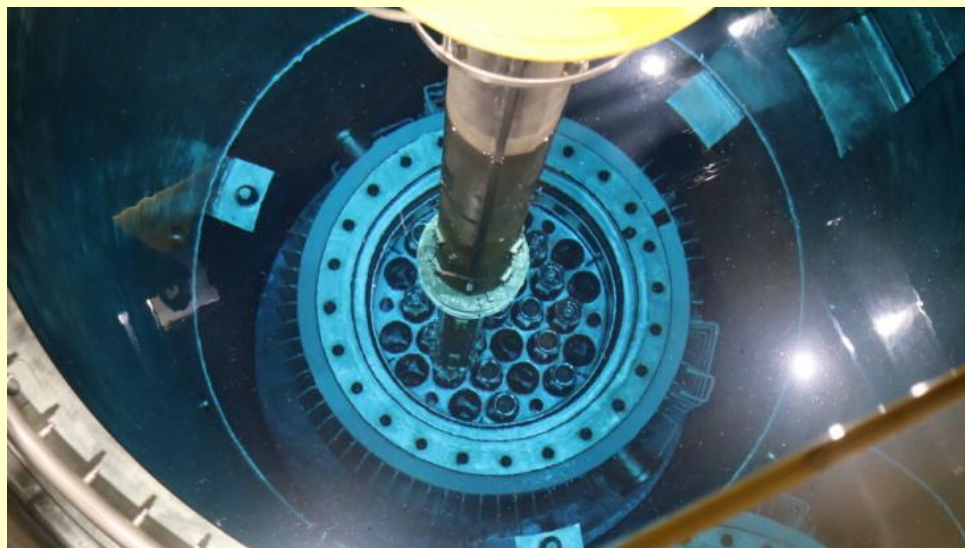
Firma Holtec má svůj projekt malého modulárního reaktoru SMR-300

Řešení dodávek východních typů paliva

Palivové soubory pro reaktory VVER1000 jsou v nabídce firmy Westinghouse dlouhodobě, dodávaly je na počátku století i do Temelína, nyní je smlouva mezi Westinghousem a Framatomem o dodávkách paliva pro Temelín (prvních 30 dodáno)

Westinghouse má nyní i palivo pro reaktory VVER440, které připravoval na přání Finska a Ukrajiny. Na začátku září 2024 vložily do reaktoru Loviisa 2 první várku paliva od Westinghouse. Toto palivo dodávali už v letech 2001 až 2007

První palivové soubory VVER440 (80 kazet) Westinghouse ze Švédska jsou přebírány firmou ČEZ v elektrárně Dukovany – první možné testovací využití podzim 2026. Zásoby ruského paliva TVEL na 2 -3 roky



Palivové soubory Westinghouse jsou v Loviisa 2 Stejné palivové soubory jsou už i v Dukovanech

Reaktory III. a III+ generace

- 1) Současná doba – přechod k reaktorům III. generace
- 2) Mochovce 3 a 4 – poslední reaktory II. generace rok 2023 a rok 2025
- 3) Zvýšená bezpečnost – odolnější kontejnment, efektivní chlazení, pasivní prvky, bazén pro chlazení kontejnmentu, rekombinace vodíku, lapač aktivní zóny
- 4) Modulární a sériová produkce komponent – efektivnější a levnější (je třeba ověřit)
- 5) Snadnější, efektivnější a levnější provoz (první zkušenosti v provozu už máme)
- 6) Životnost přesahující 60 let, spíše i 100 let
- 7) Využívání paliva typu MOX (efektivnější využití uranu)
- 8) Rozsáhlé možnosti regulace



Mochovce 3 a 4 poslední reaktory II. generace



Reaktory APR1400, menší verze bude v Dukovanech

Současné modely reaktorů III. generace

AP1000 (Westinghouse, USA): 4 v Číně, 2 v USA, čínské verze CAP1000 a CAP1400

APR1400 (KHNP, Jižní Korea): 4 v Jižní Koreji, 4 v SAE, 2 ve výstavbě

EPR (EDF, Francie): 2 Čína, 2 Evropa, 2 ve výstavbě

VVER1200 (Rosatom, Rusko): 4 v Rusku, 2 v Bělorusku, 14 ve výstavbě

Hualong One HPR1000 (Čína): 5 v Číně, 2 v Pákistánu, 13 ve výstavbě

ACPR1000 (Čína): 6 v Číně

ABWR (Japonsko): 4 v Japonsku, 2 ve výstavbě

Už 37 bloků v provozu, více než 30 ve výstavbě a celá řada v přípravě, začínají mít významný podíl na produkci nízkoemisní elektřiny a tepla

Čína, Rusko a Jižní Korea, které kontinuálně staví bloky, mají dobu výstavby pod 10 let – tendence je zkracující se, provozní zkušenosti (roční využití výkonu) jsou pozitivní



Jihokorejský APR1400



Čínský HPR1000



Americký AP1000

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

Využití tepla z JE Dukovany a JE Temelín.

- 1) Horkovod s Temelína do Českých Budějovic byl dokončen – letos první zimní sezóna s dodávkami tepla z Temelína
- 2) Intenzivní práce na projektu horkovodu z Dukovan do Brna, klíčovou podmínkou je výstavba nových bloků
- 3) V principu existuje i potenciál pro navýšení dodávek tepla



Výstavba horkovodu z Temelína



Výstavba horkovodu z Temelínu do Českých Budějovic



Čerpací stanice Obora v půlce trasy

Malé modulární reaktory jako zdroje tepla

Malé modulární reaktory spíše až střední – výkony vyšší než 100 MWe - zaměřené na náhradu kogeneračních fosilních elektráren většího výkonu

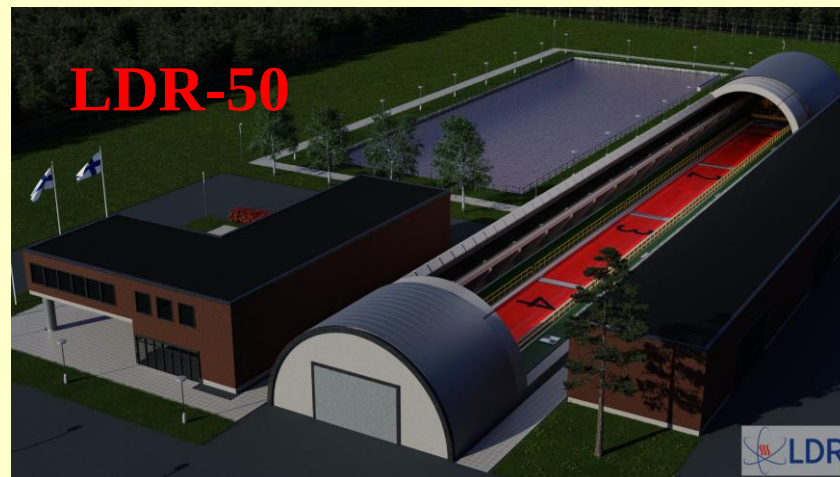
Výhoda: Není tak velká potřeba změn v licencování, ekonomika není tak odlišná od velkých reaktorů

Nevýhoda: Nejde o dramatický průnik do decentralizované oblasti energetiky a teplárenství

Malé až minireaktory určené čistě pro produkci tepla

Výhoda: Razantní proniknutí do decentralizovaného teplárenství, možnost efektivního zapojení do systému CZT

Nevýhoda: Nutnost výrazných změn v licencování odpovídajícího jejich bezpečnostním parametrům, náročnější cesta k dosažení potřebné ekonomiky



Proč potřebujeme Malé Modulární Reaktory (MMR)?

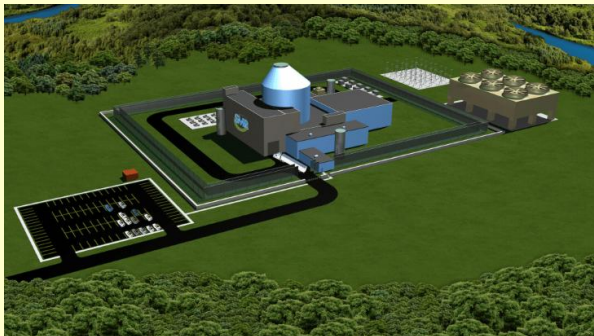
Zásadní problémy velkých bloků – velmi velká investice, významný vliv ceny peněz, nedají se uvádět do provozu postupně, rozlehlá bezpečnostní zóna

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

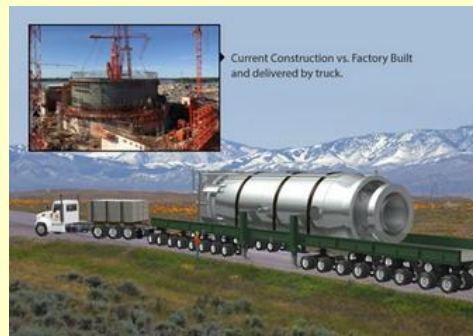
Strategický finanční model (stát, rodinná firma) – strategická dlouhodobá investice → návratnost i srovnatelná s životností zdroje, stát má nízké úroky úvěru

- 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

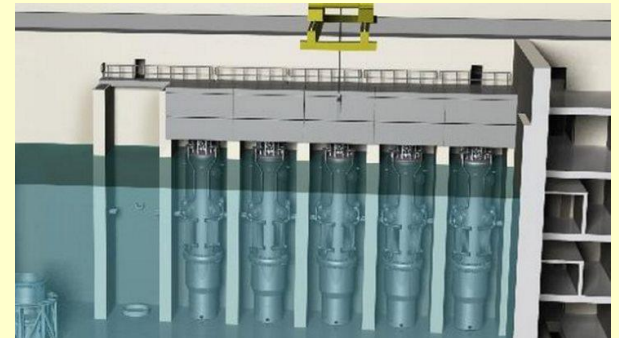
Kompenzace zlepšení ekonomiky s velikostí – modulární sériová výroba částí v továrnách, na staveništi jen jejich sesazování



SMR160 (Firma Holtec)



Přeprava modulů tahači



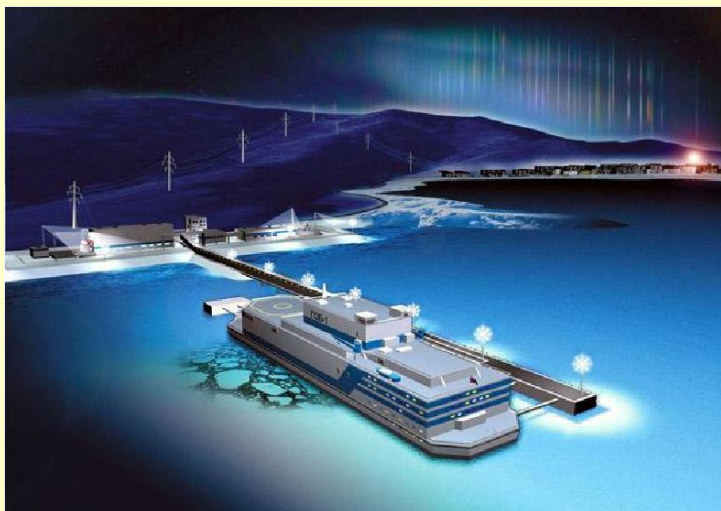
NuScale

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

Již fungující či budované malé modulární reaktory

Reaktory pro specifické podmínky – omezená možná využití jiných zdrojů → nevadí větší finanční náročnost

Využití sériově realizovaných reaktorů pro atomové ledoborce

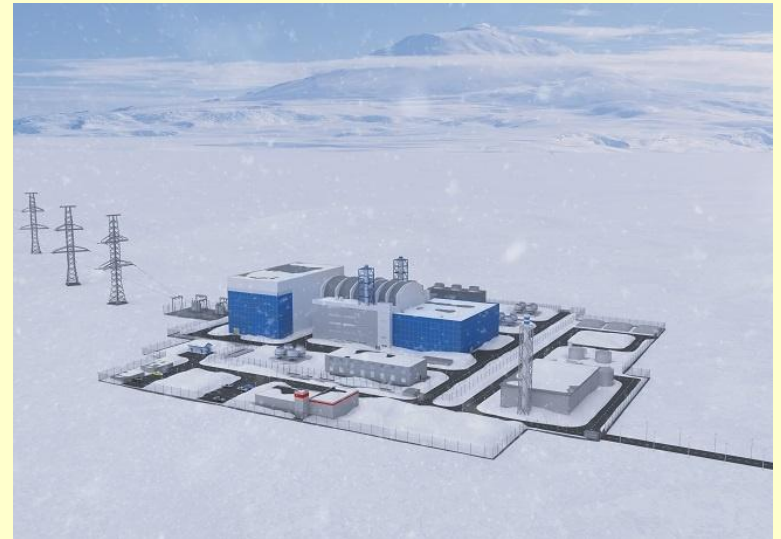
Specifické podmínky - plovoucí elektrárna Akademik Lomonosov už rok v provozu (Rusko) – 2 reaktory **KLT-40S** tlakovodní, 35 MWe, dodává od začátku roku 2020 elektřinu a teplo pro město Pevek, v roce 2024 výměna paliva i ve druhém bloku

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

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



Plovoucí elektrárna Akademik Lomonosov nahrazuje Bilibinskou elektrárnu



Příprava využití reaktoru RITM-200 pro malou elektrárnu v Jakutsku

První standardní typ - ACP-100 (Linglong One)

Tlakovodní malý modulární reaktor integrálního typu, výkon 125 MWe, pasivní způsob dochlazování, nemožnost havárie typu LOCA, flexibilní využití

Pracovní teplota 300°C, 15 MPa

Horká pára 600 t/h, > 290 °C, 4 MPa

Kogenerace: 300 t/h + 62,5 MWe

Zahájení budování v roce 2021, červenec 2023 dokončena instalace centrálního modulu, srpen 2024 instalace integrované sestavy reaktorové nádoby, 2025 - studené zkoušky, dokončení se plánuje v roce 2026

Možnost srovnání ekonomiky MMR a klasických velkých reaktorů



Konstrukce kontejnmentu je dokončena



Postup konstrukce, instalace integrované vnitřní části práce na turbíně

BWRX-300 – nejbliže k realizaci

Varný reaktor firmy Hitachi Ge

V elektrárně Darlington se pracuje na výstavbě celkově až čtyř reaktorů BWRX-300

V této elektrárně pracují 4 bloky CANDU a je místo s označením Darlington B pro další 4 bloky – půjde o zmíněné BWRX-300

4. dubna 2025 – kanadský úřad pro jadernou bezpečnost CNSC dal licenci pro výstavbu BWRX-300 reaktoru v lokalitě Darlington



Původní Darlington má těžkovodní reaktory CANDU



Na výstavbě je elektrárna Darlington B, která by mohla mít až 4 BWRX-300

Rolls-Royce vybrán jako preferovaný pro Velkou Británii

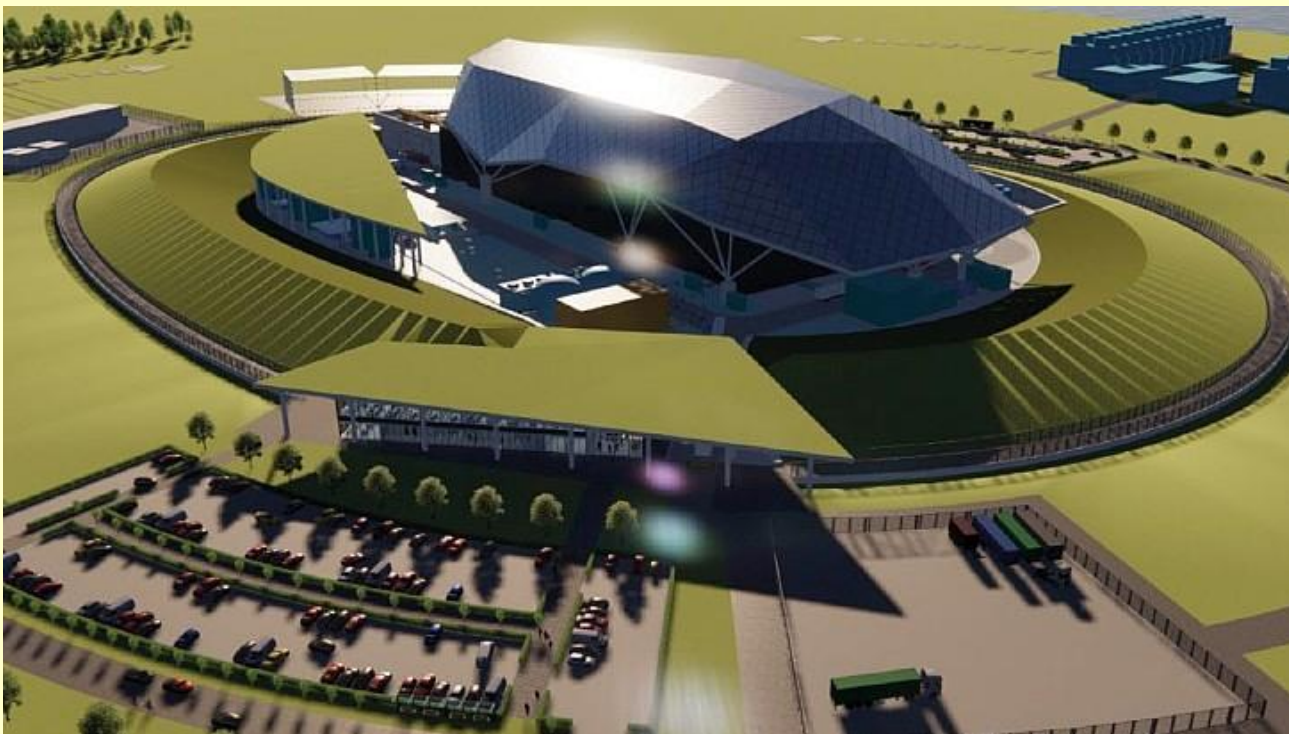
Malý modulární reaktor Rolls-Royce vybrán jako preferovaný partner. Do konce roku by měla být smlouva se státem a také vybrána první lokalita pro dva bloky

Vybíralo se po zúžení ze čtyř projektů: GE Hitachi, Holtec, Westinghouse a Rolls-Royce

Velká Británie plánuje do roku 2050 okolo 23 GWe velkých a malých bloků

Kritické rozhodnutí pro ČEZ a Českou republiku – nyní zvýší podíl na 20 %

Podílí na vývoji a přípravě licencování, příprava lokality Temelín a výběr dalších lokalit



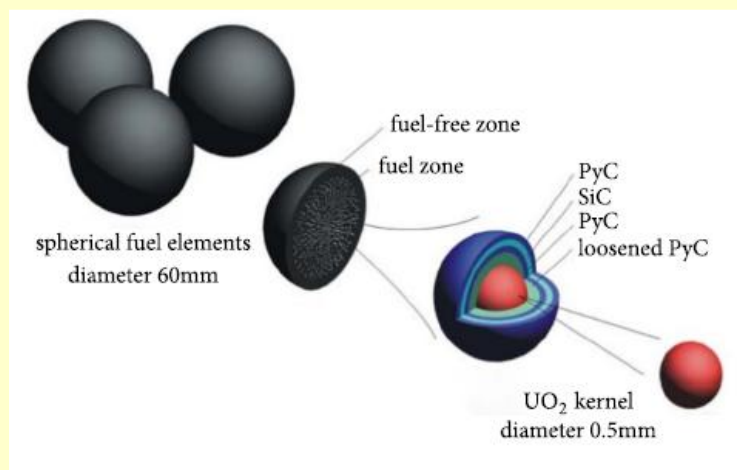
Inovativní malé modulární reaktory

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

Začátek roku 2021 – dokončení horkých zkoušek, zahájena fáze spouštění

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



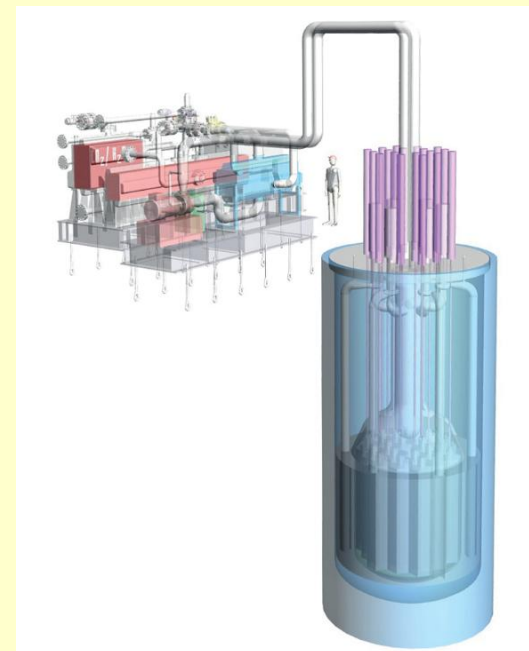
Schéma elektrárny Terrestrial Energy, Kanada



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),

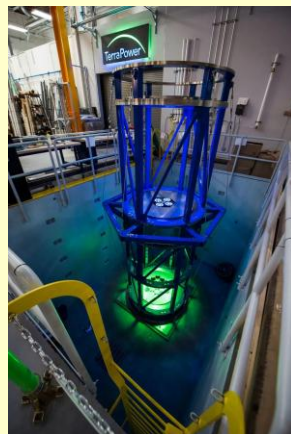
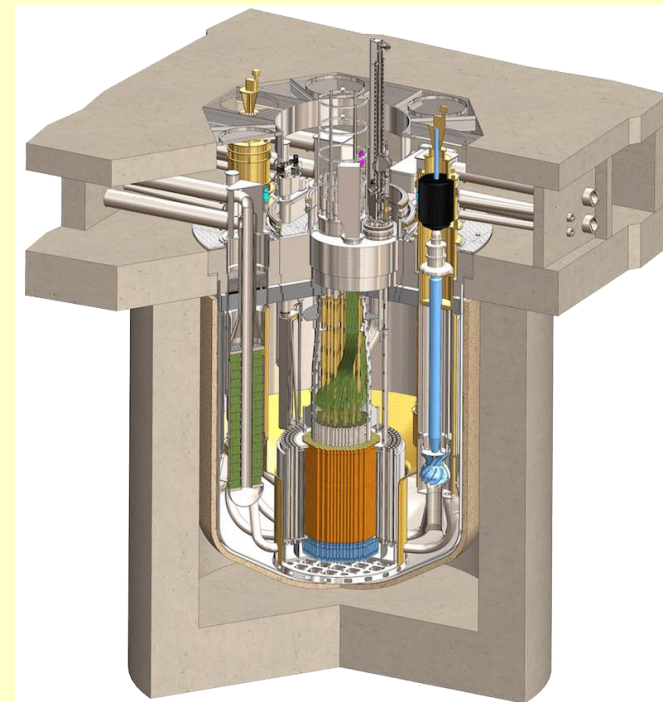
ThorCon reaktor **TMSR** Molten Salt Reactors

Chlazení tekutými solemi, tekuté palivo

Dva moduly (výkon 500 MWe)

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

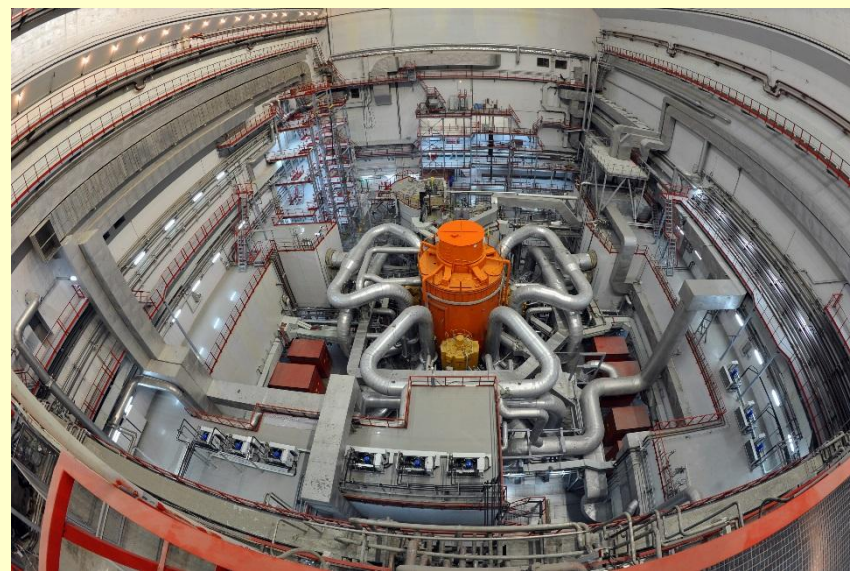
Bill Gates **TerraPower** je typ TWR (**Traveling Wave Reactor**) – rychlý reaktor se sodíkovým chlazením, palivo HALEU (obohacení 19,75 %)
Výkon: ~ 345 MWe



Reaktory IV. generace – využití uranu 238 i thoria

Proč je potřebujeme?

- 1) Zvýšení efektivity využití uranu a thoria (zásoby paliva na mnoho tisíciletí) – rychlé reaktory
- 2) Snížení objemu a nebezpečnosti radioaktivního odpadu (uzavření palivového cyklu) – exotické typy s tekutým palivem a průběžnou separací
- 3) Zvýšení efektivity produkce elektřiny a tepla pro průmysl (vysokoteplotní reaktory pro průmysl i produkci vodíku)
- 4) Úplně nové koncepty, někdy značně exotické – šest tříd konceptů



Sodíkem chlazený reaktor BN800

Sodíkem chlazený reaktor a ty další

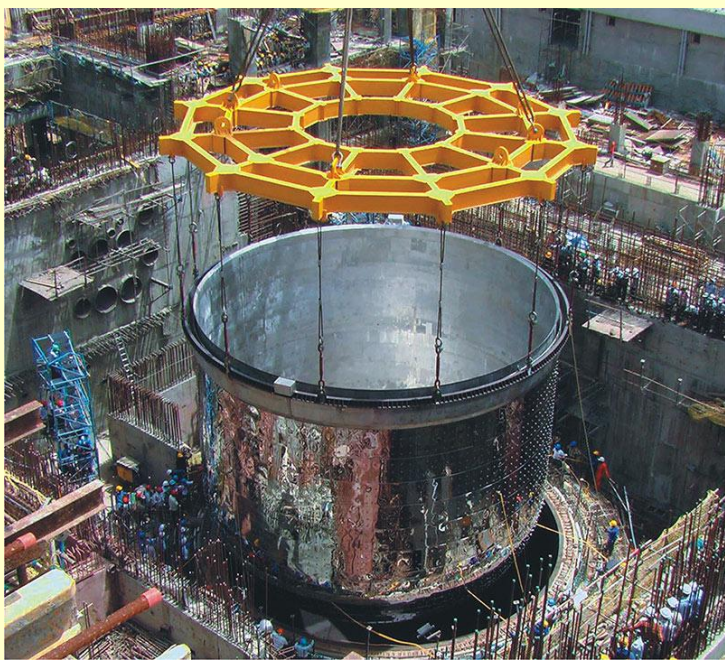
Rychlý reaktor chlazený tekutým sodíkem při normálním tlaku

Úspěšné komerční bloky BN600 a BN800 v Rusku, experimentální CEFR a nyní velký prototyp CFR600 (Čína), dokončovaný blok Kalpakkam 500 MWe (Indie)

Celá řada dalších konceptů rychlých reaktorů: chlazení tekutým olovem, plynem i tekutými solemi

Velmi efektivní typy klasických reaktorů, vysokoteplotní, chlazené superkritickou vodou

Velmi exotické typy využívající tekuté palivo na bázi tekutých solí s uranem či thoriem



Sodíkový reaktor Kalpakkam (Indie)



Experimentální čínský reaktor CEFR

Indie – důležitý krok ke thoriovému cyklu

Indie má nedostatek uranu ale velké zásoby thoria

Cesta k využití thoria pomocí kombinace těžkovodních reaktorů (modifikace CANDU vlastní provenience) a rychlých reaktorů.

Zatím pouze malé těžkovodní reaktory s výkonem 200 MWe, tři spuštěné s výkonem 700 MWe. – buduje se další jeden a začíná stavba dalších čtyř

Rychlý sodíkový reaktor Kalpakkam PFBR s výkonem 500 MWe – **zavážení paliva zahájeno, do provozu by se měl dostat v příštím roce**

Začnou s využitím uranu a plutonia, postupně přejdou k thoriu a uranu 233 z něj

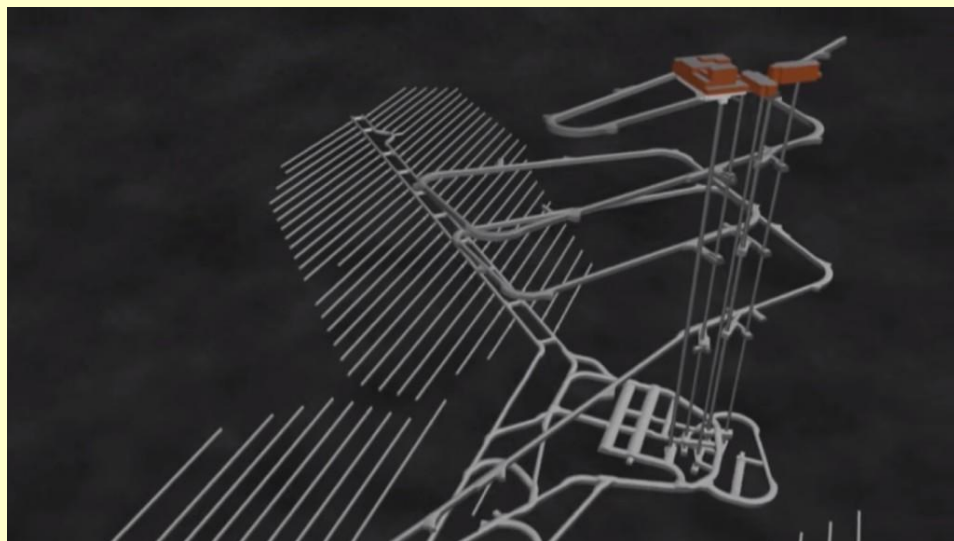


Bloky IPHWR700 Kakrapar 3 a 4



Rychlý reaktor PFBR v Kalpakkamu

První dokončované úložiště vyhořelého paliva



Onkalo

Finsko – blízko elektrárny
Olkiluoto
Žulový masív – umístění
500 m pod povrchem
2004 – začátek ražby
2015 – licence pro výstavbu
2020 – dokončení 1.etapy
2024 – začátek ukládání

Recyklace – palivo MOX – palivo REMIX

Využití uranu a plutonia z vyhořelého paliva

MOX – přidání separovaného plutonia

REMIX – vyhořelé palivo doplněno ^{235}U

Přepracování a produkci MOX – Francie, Velká Británie, Rusko i REMIX

Snížení potřeby čerstvého uranu a zmenšení objemu odpadu



Budeme využívat urychlovačem řízené transmutory?

Vnější zdroj neutronů umožňuje stabilní řetězovou štěpnou reakci i u pokritického štěpného systému s velmi různorodým složením paliva

Urychlovačem řízený transmutor – urychlovač relativistických protonů, terč z těžkého kovu, blanket se štěpným a štěpitelným materiálem nejlépe v tekuté formě

Kapalné palivo (ve formě tekutých solí) umožňuje kontinuální separaci radionuklidů

Možnost spalování vyhořelého paliva nebo thoriového cyklu

Dramatické snížení objemu jaderného odpadu a zvýšení efektivity využití zdrojů uranu a thoria

Nutnost zlepšení urychlovačové techniky, synergie s vývojem reaktorů IV. generace

Pokrok v Číně ve využití paliva v tekutých solích a transmutorů na bázi urychlovače

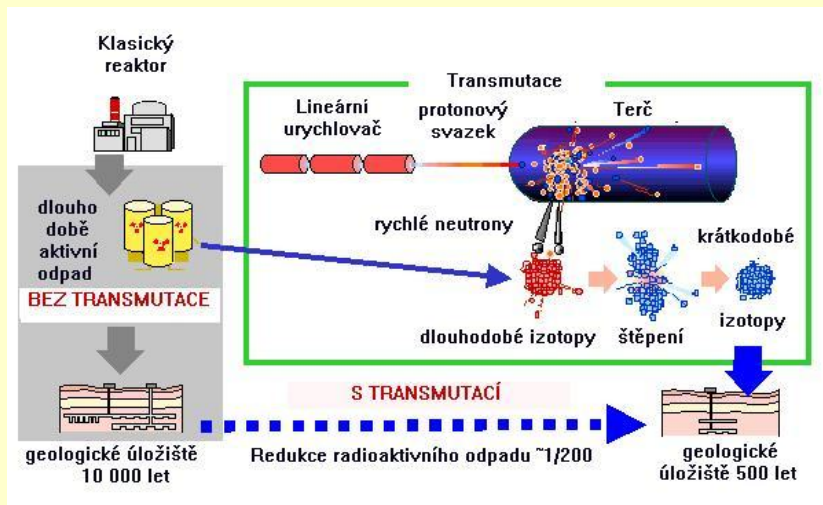


Schéma urychlovačem řízeného transmutoru Čínský experimentální reaktor s kapalným palivem

Fúze – velká synergie se štěpením

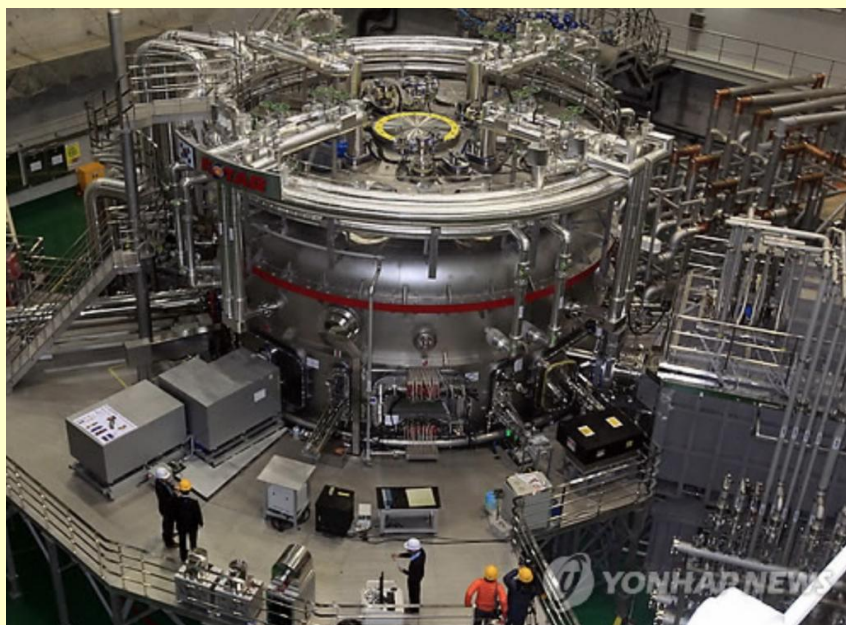
Využití fúzních termojaderných reakcí – termojaderná elektrárna

Řada tokamaků zlepšuje parametry plazmatu, ITER ukáže možnost užití termojaderné fúze pro získání energie, následovat by měly demonstrační projekty elektrárny DEMO

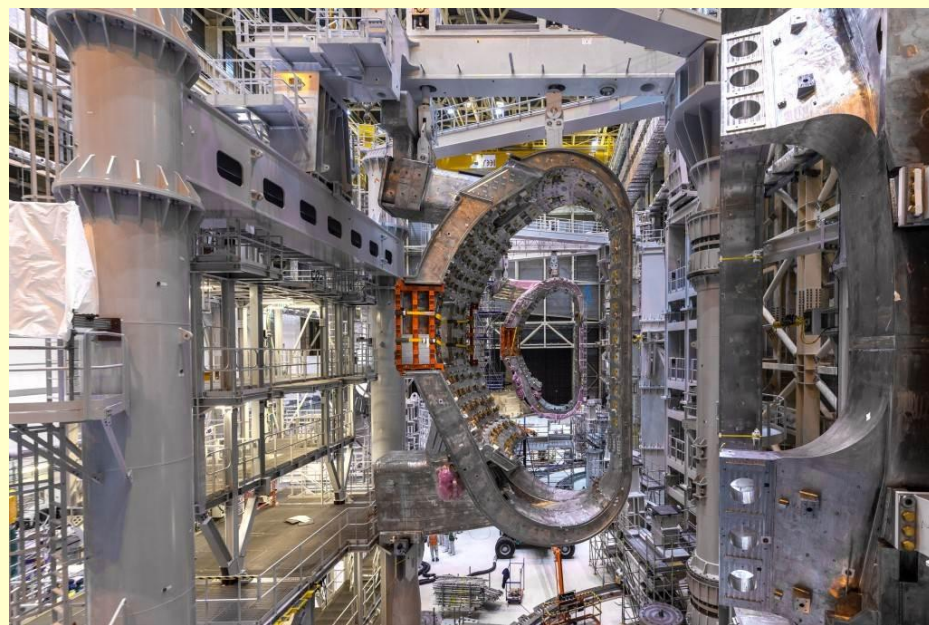
Pro produkci tritia se využívá reakce neutronů s lithiem v blanketu ve vnitřní stěně vakuové nádoby – je třeba multiplikovat neutrony, k tomu se hodí štěpný materiál

Podobné problémy s radiačním poškozením v intenzivních neutronových polích

Termojaderné elektrárny budou realizovat stejné firmy jako štěpné jaderné reaktory



Jihokorejský tokamak KSTAR



Tokamak ITER je ve výstavbě

Taxonomie EU ve směru k jaderné energetice

Co reálně říká?

- 1) Jaderné zdroje jsou udržitelné a v souladu s environmentálními cíli za splnění některých podmínek
- 2) Tyto podmínky se s našim poznáním mohou měnit, i proto se budou v budoucnu měnit. To je důvod pro existenci termínů zaručujících platnost současných podmínek. Například 2040 pro financování modernizace současných bloků II. generace a rok 2045 pro stavební povolení nových bloků III. generace.
- 3) Zmíněné termíny neznamenaají konec podpory financování starých bloků II. generace a nových III. generace, pouze se mohou změnit podmínky (i zmírnit).
- 4) Tlak na maximální dostupnou úroveň bezpečnosti.
- 5) Tlak na snížení objemu vyhořelého paliva (recyklaci a uzavření palivového cyklu).
- 6) Rozpor s předchozím je v tlaku na rychlé vybudování trvalého úložiště



Evropská unie a Česká republika

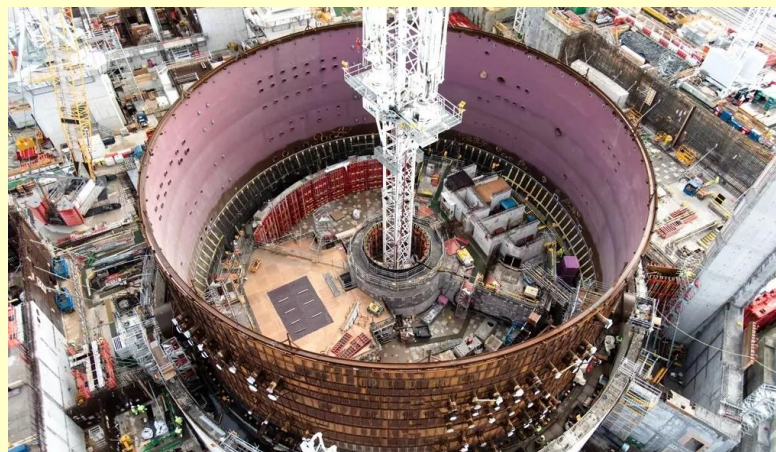
Ideologická kampaň způsobila zpomalení vývoje jaderné energetiky v Evropské unii i Česku a ztrátu kompetencí i průmyslové základny.

Současný vývoj potvrdil, že bez jádra se závislosti na fosilních palivech nezbavíme.

Události na Ukrajině ukázaly nutnost obnovit evropské (západní) kompetence v oblasti budování jaderných reaktorů – nelze spoléhat na ruské a čínské technologie. Zajištění odpovídajících západních dodavatelských řetězců.

Řada zemí rozhodnuta jádro rozvíjet (Francie, Švédsko, Finsko, Slovensko, Polsko, Maďarsko ...) – potřeba jaderných bloků.

Klíčová je péče o stávající bloky (vidět na Francii) pro zajištění dlouhé životnosti a zajištění dostupnosti paliva ze západu.



Budování bloků Hinkley Point C

Podmínky pro energetiku v České republice

- 1) Omezené možnosti pro využití obnovitelných zdrojů: voda téměř vyčerpána, biomasa konkuruje produkci potravin a ekologické funkci krajiny, vítr je hlavně v ekologicky cenných partiích (nemáme mořské pobřeží), z hlediska fotovoltaiky jsme ve vyšších geografických šířkách, máme vysokou hustotu osídlení
- 2) Nemáme zásoby plynu, ale máme zásoby uhlí (otázka dostupnosti?, limity?, skrývka?)
- 3) Máme velké zkušenosti s jadernou energetikou a vzdělanostní, technologické i průmyslové zázemí pro ni
- 4) Náš soused Německo instaluje obrovské výkony ve větru a fotovoltaice. Ve větrné a slunečné době budou přebytky elektřiny v regionu a v době bez větru a bez slunce naopak i dramatický nedostatek



Nelze energetice obětovat naši krajinu, zvláště, když se tím udržitelná a bezpečná nízkoemisní energetika nedosáhne

Česká koncepce

Státní energetická koncepce počítá se zhruba polovičním podílem jádra na elektřině

Důležitá je péče o stárnoucí bloky v Dukovanech, zajistit jim 70 let provozu (licencovat západní palivo VVER440)

Máme připravená místa pro velké bloky v Dukovanech a Temelíně

V roce 2024 se rozhodl tendr na výstavbu Dukovan 5, 6 (opce na další 2) - APR1000

Připraveno místo pro první prototypový malý modulární reaktor (u Temelína)

ČEZ rozhodl o partnerství v oblasti MMR s firmou Rolls-Royce

Klíčové je politické rozhodnutí o dlouhodobém rozvoji a využívání jaderné energetiky a dlouhodobé podpory této vize. **V budoucnu výstavba evropského DEMO u nás?**



Dukovany



Temelín

Závěr

- 1) Naše civilizace potřebuje zdroje energie, tyto potřeby i v budoucnu porostou
- 2) Jaderná energetika prokázala možnost velice efektivního přechodu k nízkoemisní elektroenergetice (Francie, Švédsko, Slovensko, Ontario, ...)
- 3) Zrychluje se přechod k reaktorům III. generace (získávají se zkušenosti s výstavbou a provozem). Některé z reaktorů už mají dostatek budovaných jednotek a kontinuitu.
- 4) Velký potenciál v malých modulárních reaktorech, potřeba vyvinout kompaktní model s masovou výrobou (klasické i inovativní typy)
- 5) Pro udržitelné využívání jaderné energie (uzavření palivového cyklu) jsou nutné reaktory IV. generace, nejdále jsou sodíkem a olovem chlazené
- 6) V budoucnu by mohly být využívány urychlovačem řízené transmutory a fúze
- 7) Česká republika plánuje využívat velké reaktory i ty malé modulární, ty by pomohly řešit i teplárenství
- 8) Žádné řešení není ideální – vždy jde o určitý kompromis

