

Jaká je budoucnost jaderné energetiky?

Vladimír Wagner

Ústav jaderné fyziky AV ČR, energetická komise AV ČR

- 1) Úvod
- 2) Současnost – přechod k III. generaci
- 3) Malé modulární reaktory
- 4) Budoucnost – reaktory IV. generace
- 5) Urychlovačem řízené transmutory
- 6) Jaderná fúze
- 7) Závěr



Vysokoteplotní reaktory HTR-PM – cesta k SMR



Novovoronež 6 je první reaktor III+ generace



Sodíkový reaktor BN-800 je předstupeň reaktoru IV. generace

Úvod

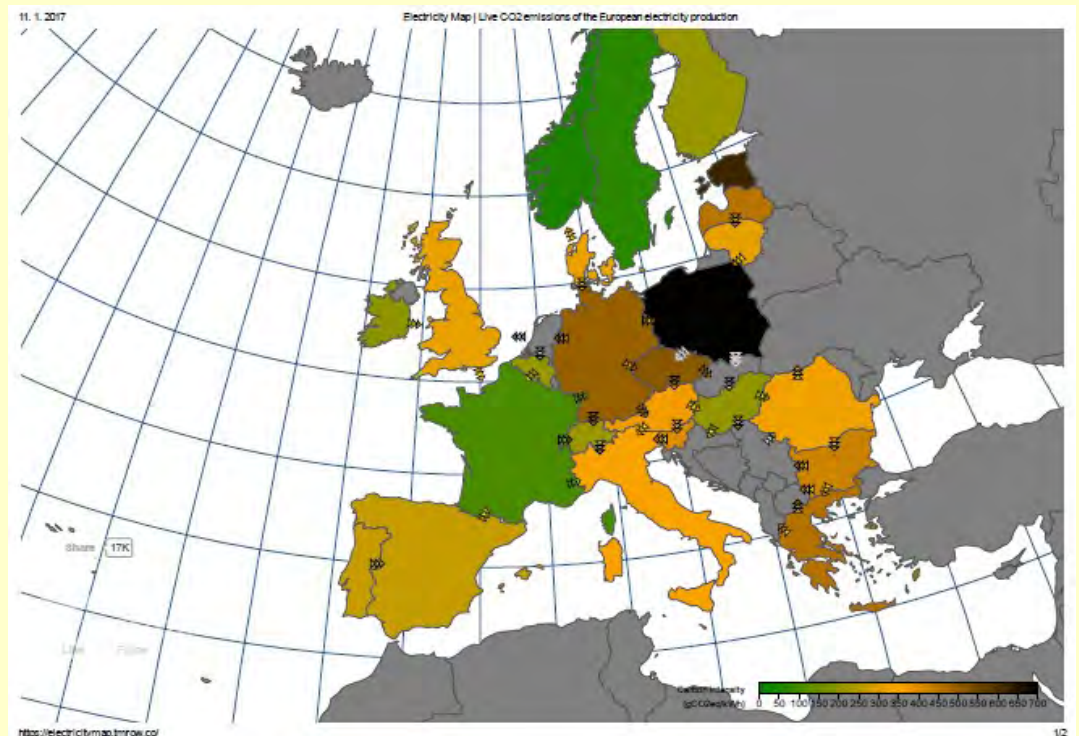
Jaderná energetika dodává zhruba 10,5 % elektřiny, v Evropě okolo 25 %,
Podíl na nízkoemisních zdrojích: Evropa okolo 50 %, USA okolo 60 %, Česko okolo 75 %

Úspěchy jaderné energetiky:

- 1) Ukázala možnost úspěšného přechodu k nízkoemisní energetice (Francie, Švédsko, Švýcarsko, Ontario ...)
- 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://electricitymap.tmrow.co/>*

Reaktory III. a III+ generace

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



Reaktorová nádoba VVER1200 (Ostrovec)



Vizualizace elektrárny Hinkley Point C

Které bloky jsou k dispozici?

Ve výstavbě

ABWR – varný reaktor vybudovaný v Japonsku a na Tchaj-wanu, nyní odstavené (III.)

AP 1000 – zatím neběží (v Číně bude v roce 2018), Westinghouse má velké problémy, nechce se už podílet na samotné výstavbě, negativní zkušenosti z USA (III+)

EPR – zatím neběží (Čína, Finsko, Francie bude v roce 2018), problémy při stavbě, uvidíme zkušenosti z Velké Británie, příliš velký výkon až 1700 MW (III+)

APR1400 – běží v Jižní Koreji, dokončuje se v SAE, pozitivní reference, v domovská země odstupuje od jádra (III)

Hualong One – zatím neběží (první 2019), dobré zkušenosti z kontinuální výstavby reaktorů v Číně (III+)

VVER1200 – běží v Rusku, dokončuje se v Bělorusku, stavba ve Finsku, Maďarsku. Kontinuální stavba a evoluce reaktorů. Intenzivní zapojení českých firem. (III+)

Další projekty: ESBWR, ATMEA1, pokročilé typy CANDU



Je třeba alespoň některé z modelů začít stavět hromadně v sérii – nejbližší k tomu má VVER1200, případně čínské modely (důležitá kontinuita budování bloků)

Důležité je, jak se jednotlivé modely osvědčí v provozu, důraz na bezpečnost a ekonomiku

Nelze přeskočit hned k malým modulárním reaktorům, IV. generaci nebo fúzi, nutnost kontinuity a firem se zkušeností v oboru

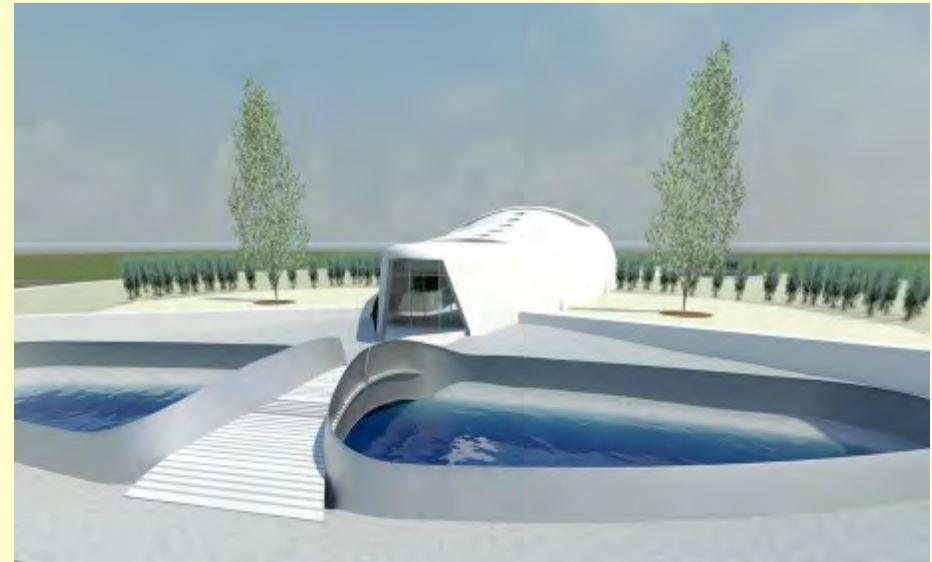
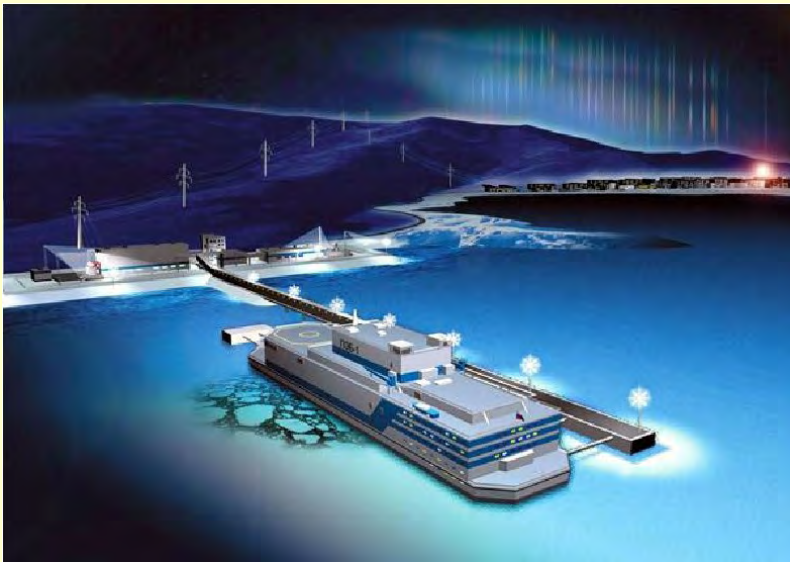
Nutnost nahrazení stárnoucí flotily v Evropě a USA a pokrytí rostoucích potřeb v rozvojových zemích (Indie, Čína, Turecko ...)



Novovoronežská 6 a 7 – první fungující bloky III+ generace

Malé modulární reaktory

- 1) Zásadní problém – vysoké počáteční investice, jen velmi velký zdroj
- 2) Řešení – malé modulární reaktory (výkon menší než 300 MWe, 500 MWe)
- 3) Umožňují: a) Postavit velkou elektrárnu postupně
 - b) Postavit malý blok třeba pro teplárenské účely
- 4) Možné varianty: a) Založené na klasickém základě
 - b) Malé modulární reaktory IV. generace
 - c) „Baterie“ s dlouhou periodou výměny paliva
- 5) Zatím spíše exotika pro specifické účely (reálné modely zatím v projektech)



Plovoucí elektrárna Akademik Lomonosov

Architektonická vize kompaktní „baterie“ StarCore Nuclear

Současný stav – otázka budoucnosti otevřená

Dokončovaný **KLT-40S** (Rusko) – tlakovodní, 35 MWe, plovoucí elektrárna Akademik Lomonsov nahrazuje dosluhující Bilibinskou elektrárnu (4 bloky s 11 MWe) (klasický model – podobně i lodní reaktory RITM-200 s 50 MWe)

Zahájený **ACPR50S** (Čína) – 60 MWe, plovoucí i pozemní elektrárny (ACPR100)

Pokročilý:

Dokončovaný **HTR-PM** – vysokoteplotní reaktor chlazený plynem, dva bloky s jednou turbínou 210 MWe

Rozpracované projekty (cesta do budoucnosti):

Tlakovodní - VBER-300 (Rusko), SMR-160 (USA)

Integrální tlakovodní – NuScale (USA), ACP100 (Čína), SMART (Jižní Korea)

Sodíkový rychlý – PRISM, ARC-100

Integrální tekuté soli – Integral MSR (Kanada)

Chlazený olovem – BREAST (Rusko)

Chlazený bismutem a olovem – SVBR100 (Rusko)

Kritické – dokončení prototypu a sériová výroba

Schéma elektrárny
Terrestrial Energy,
Kanada



Reaktory IV. generace

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)

Sodíkem chlazený reaktor – rychlý reaktor, úspěšné komerční bloky BN600 a BN800 v Rusku, prototyp CEFR (Čína), dokončovaný blok Kalpakkam 500 MWe (Indie), evropský, hlavně francouzský projekt ASTRID

Olovem chlazený reaktor – rychlý reaktor, BREST-300 – prototypový reaktor (Rusko)



Palivový soubor a staveniště reaktoru BREST 300

Sodíkem chlazený reaktor BN800

Rychlý reaktor chlazený plynem – chlazení heliem, nemoderovaný, evropský projekt ALLEGRO, úvahy o jeho výstavbě ve Střední Evropě, heliová smyčka v ÚJV a.s. Řež

Reaktory využívající tekuté soli – využití fluorové soli s lithiem, tekuté palivo – nejinovativnější princip, různé typy moderace (energetického spektra). Vhodný pro konverzi thoria 232 na uran 233. Nejdále v Číně. Zapojení CVŘ a ÚJV.

Vysokoteplotní plynem chlazený reaktor – chlazený heliem (případně jiným plynem), moderovaný grafitem, vysoký stupeň vyhoření paliva, pasivní bezpečnost, dokončovaný reaktor s palivem v podobě koulí v Číně – HTR-PM, spolupráce se Saudskou Arábií

Reaktor chlazený superkritickou vodou – nadkritické bloky s klasickou moderací, velmi vysoká efektivita konverze tepla na elektřinu. Smyčka se superkritickou vodou v ÚJV.

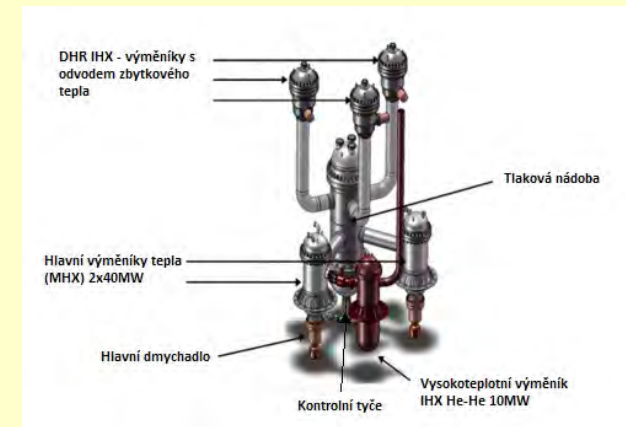


Schéma projektu reaktoru Allegro



Instalace reaktoru HTR-PM v Číně



Kulové palivo pro reaktor HTR-PM v Číně

Urychlovačem řízené transmutory

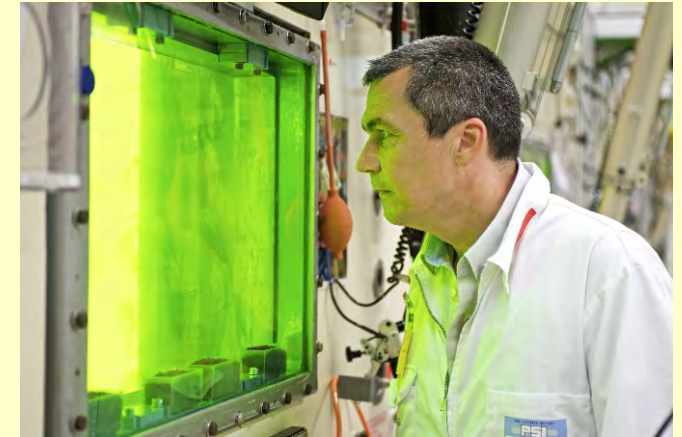
Z čeho se skládá:

- 1) Urychlovač protonů - energie 100 - 1000 MeV
- 2) Terč - olovo, wolfram ...
- 3) Nádoba obsahující systém jaderného odpadu, moderátoru

Nutnost separace stabilních a krátkodobých izotopů

Základní vlastnosti:

- 1) Využívá tříštivých reakcí
- 2) Velmi vysoká hustota neutronů → efektivní transmutace
- 3) Podkritický režim provozu
- 4) Produkce neutronů ve velmi širokém rozmezí energií



Práce na analýze terče Megapie v horkých komorách v PSI



Olověný terč při testech v laboratoři CERN

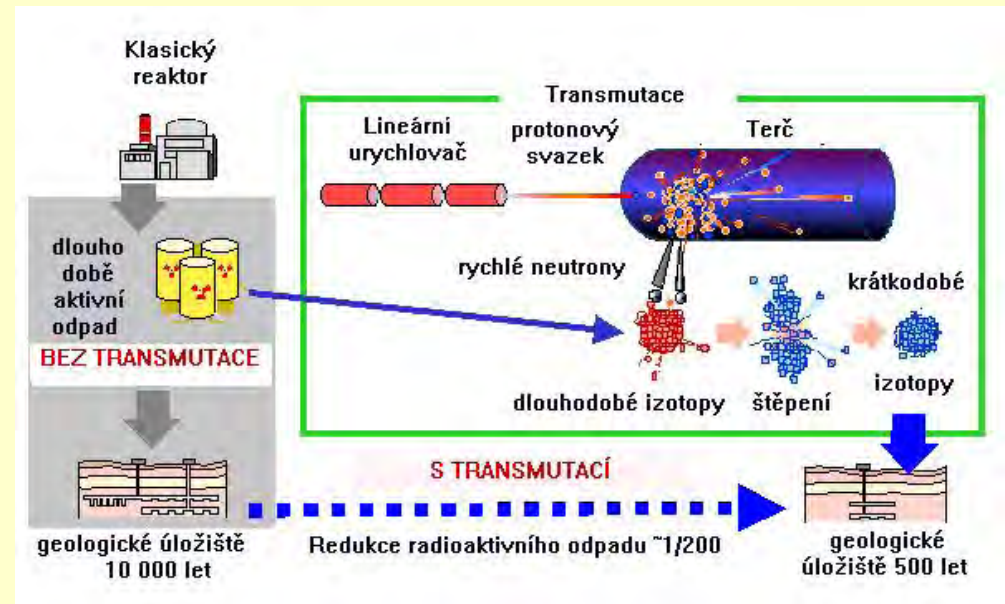


Schéma konceptu urychlovačem řízeného jaderného transmutatoru

Termojaderná elektrárna

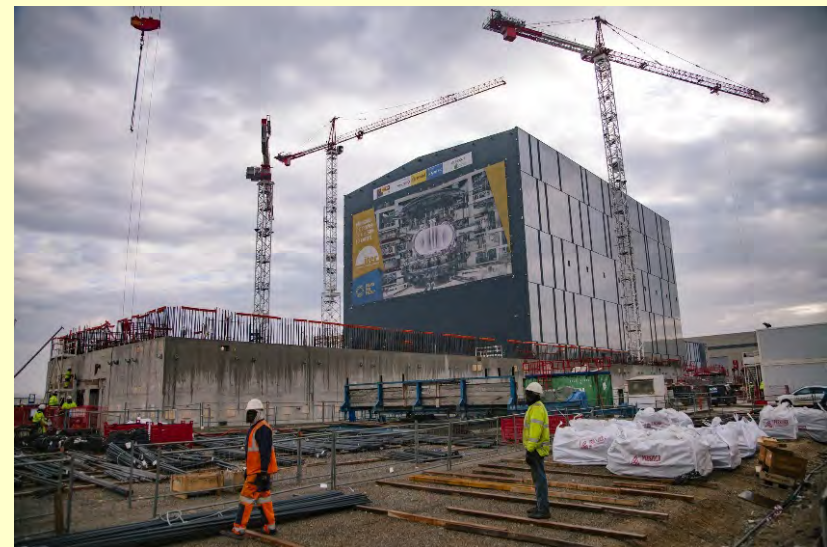
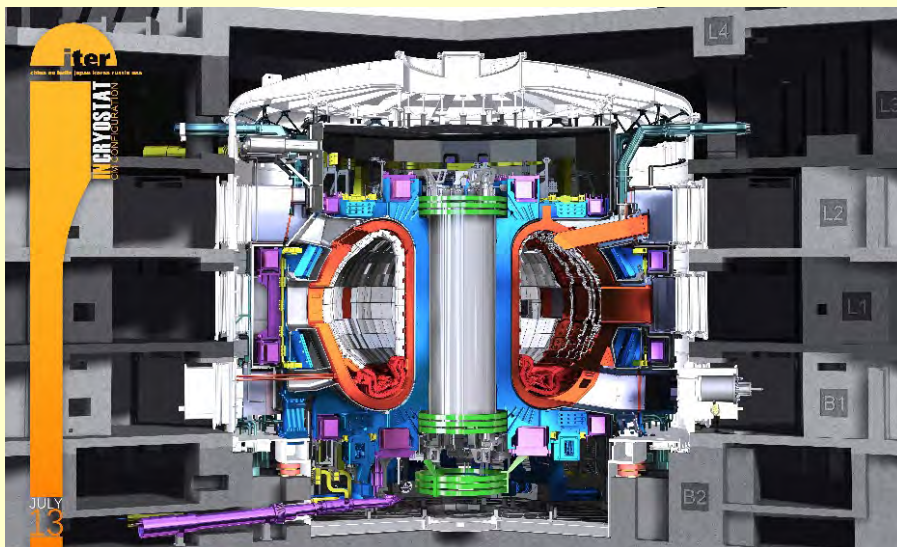
Tokamak **ITER** – první fúzní reaktor, výkon 500 MW, 10krát vyšší než vklad, demonstruje chování plazmy u elektrárny, fúzní reakce deuteria a tritia, testy s produkcí tritia

Současný časový plán: Sestavování a instalace zařízení **2018 – 2025**, první plazma – **2025**, přechod na studium fúzních reakcí d+t -**2035**

Na základě výsledků výzkumů za pomoci ITER (i jeho budování) přechod k reálné elektrárně:

DEMO – první prototyp fúzní elektrárny – i s turbínou a produkcí paliva (tritia) z lithia

Jiné cesty – stelarátor, inerciální udržení NIF (USA) – zatím daleko za tokamaky



Tokamak ITER – produkce 10krát více energie

Závěr

- 1) Jaderná energetika prokázala možnost velice efektivního přechodu k nízkoemisní elektroenergetice (Francie, Švédsko, Ontario, ...)
- 2) Problémy spojené s velikostí těchto zdrojů a citlivostí na společenskou podporu
- 3) Zatím otevřená otázka úspěšnosti přechodu k reaktorům III. generace (splnění očekávání z hlediska efektivity výstavby a provozu). K tomu potřeba i dostatek budovaných jednotek a kontinuita. Nejlépe na tom je VVER1200 a zatím i APR1400.
- 4) Velký potenciál v malých modulárních reaktorech, potřeba vyvinout kompaktní model s masovou výrobou (klasické i inovativní typy)
- 5) Pro udržitelné využívání jaderné energie nutné reaktory IV. generace, nejdále jsou sodíkem a olovem chlazené a vysokoteplotní chlazené plynem
- 6) Urychlovačem řízené transmutory a fúze – velký potenciál, ale komerční realizace zatím dost vzdálená – velká synergie mezi popsányi oblastmi
- 7) Míru využívání jádra silně ovlivní reálná míra vlivu emisí CO₂ a nutnost je potlačit

