

# Jaká je budoucnost jaderné energetiky?

Vladimír Wagner

Ústav jaderné fyziky AV ČR, energetická komise AV ČR

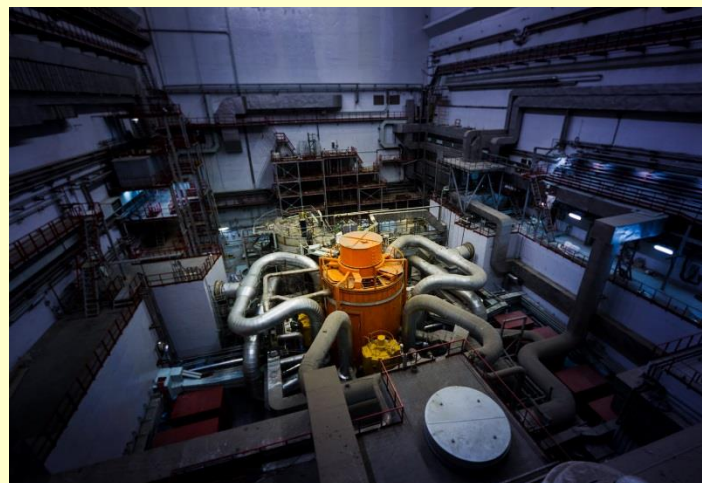
- 1) Úvod
- 2) Jak reaktor funguje?
- 3) Současnost – přechod k III. generaci
- 4) Malé modulární reaktory
- 5) Budoucnost – reaktory IV. generace
- 6) Reaktorem řízené transmutory
- 7) Jaderná fúze
- 8) Závěr



Vysokoteplotní reaktory HTR-PM – cesta k SMR



Novovoronež 6 je první reaktor III+ generace



Sodíkový reaktor BN-800 je předstupeň reaktoru IV. generace

# Úvod

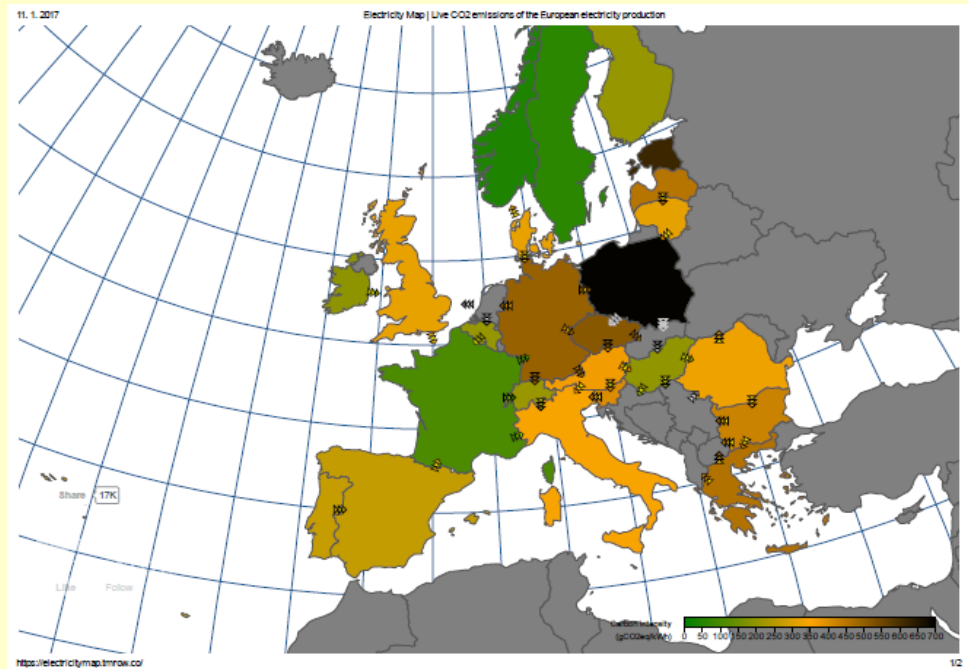
Jaderná energetika dodává zhruba 10,5 % elektřiny, v Evropě okolo 25 %, Podíl na nízkoemisních zdrojích: Evropa okolo 50 %, USA okolo 60 %, Česko okolo 75 %

## 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.tmrw.co/>*

## Emise škodlivin a CO<sub>2</sub>

- 1) Přírůstek oxidu uhličitého a jeho průmyslový původ je potvrzen kvalitním měřením, velikost jeho dopadů na klima je stále otevřenou otázkou
- 2) Zdravotní a ekologické dopady emisí dalších škodlivin jsou také prokázány
- 3) Ústup od uhlí a ropy snižuje i množství zdravotně závadných škodlivin
- 4) Škodliviny produkuje i spalování biomasy
- 5) Spalování plynu minimum škodlivin, ale CO<sub>2</sub> sníženo jen na zhruba polovinu
- 6) Efektivní a racionální zavádění nízkoemisních zdrojů má smysl



Enormní znečištění čínských měst



Měření CO<sub>2</sub> a <sup>14</sup>C v ÚJF AV ČR



# Jaderné zdroje - současnost

**Tři základní témata:**

- 1) Přechod k reaktorům III. generace
- 2) Zavedení Malých modulárních reaktorů
- 3) Vývoj reaktorů IV. generace

**Instalovaný výkon 393 GWe (začátek roku 2018)**

**Rozestavěno: 61,6 GWe**

**Renesance v Číně, stagnace v Evropě a USA**

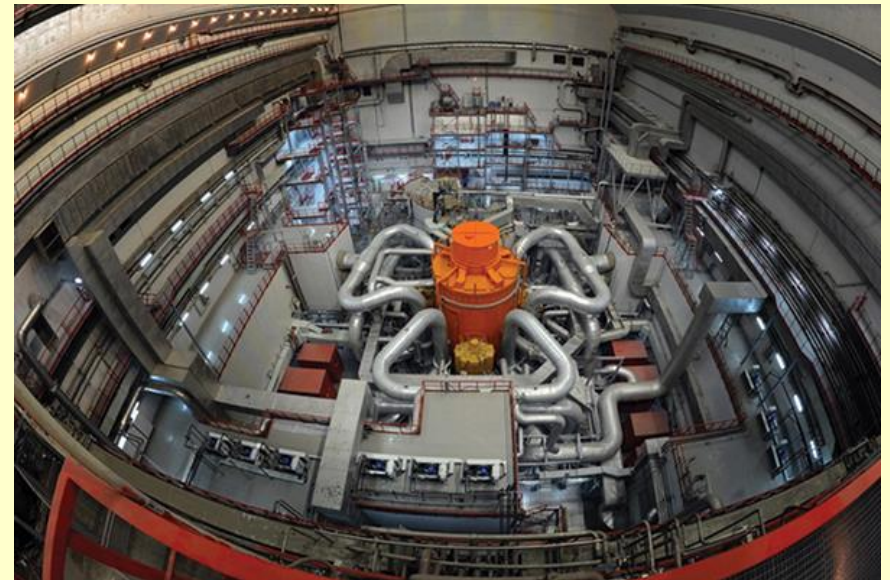
**USA a Evropa – prodlužování životnosti bloků**



**Malý modulární reaktor  
HTR-PM v Číně**



**Reaktor EPR (Olkiluoto 3)**



**Rychlý reaktor chlazený sodíkem BN-800 –Bělojarsk 3**

# 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)

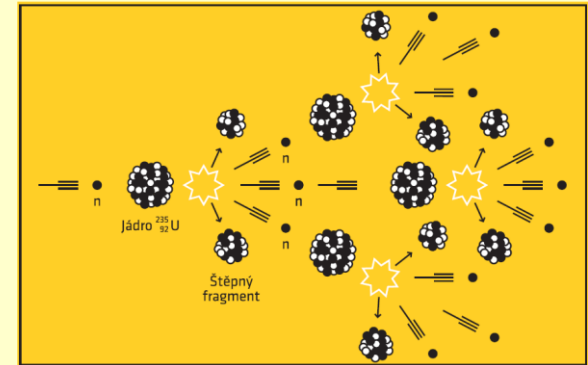
**Řetězová štěpná reakce:** Štěpení nuklidů  $^{235}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{233}\text{U}$  ...  
záchytem neutronu  $^{235}\text{U} + n \rightarrow ^{236}\text{U}^*$  : 85 % - štěpení  
15 % - emise fotonu

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**

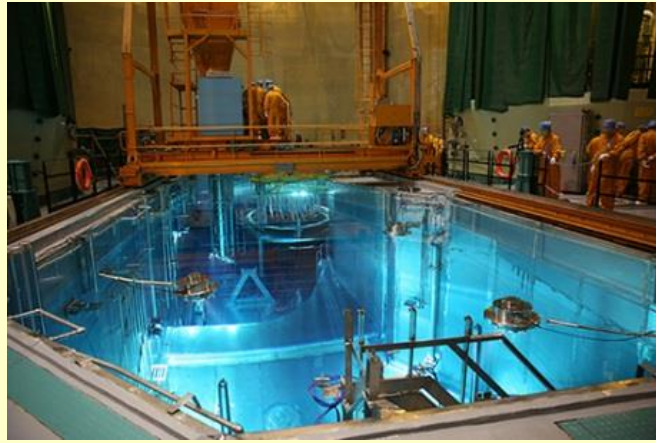
**Multiplikační faktor**  $k$  - počet neutronů následující generace neutronů produkováných na jeden neutron předchozí generace

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

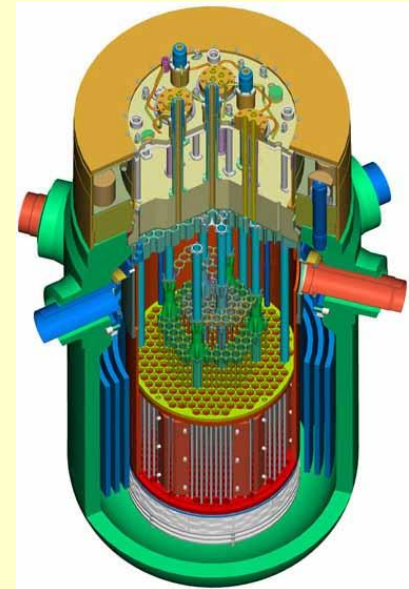
$$T_{1/2}(^{238}\text{U}) = 4,51 \cdot 10^9 \text{ r}, \quad T_{1/2}(^{235}\text{U}) = 7,13 \cdot 10^8 \text{ r}$$

většinou ve formě  $\text{UO}_2$

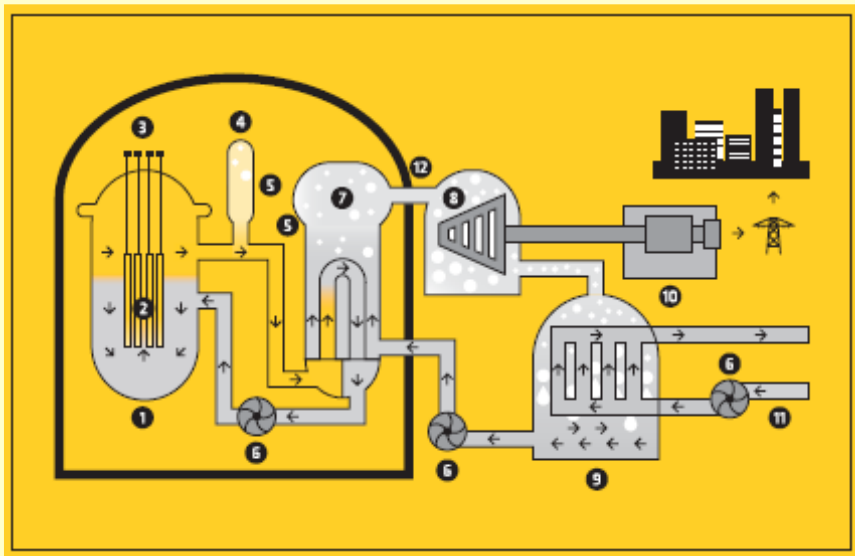
**Moderátor:** voda, grafit

**Ovládání:** Regulační, kompenzační  
a bezpečnostní tyče

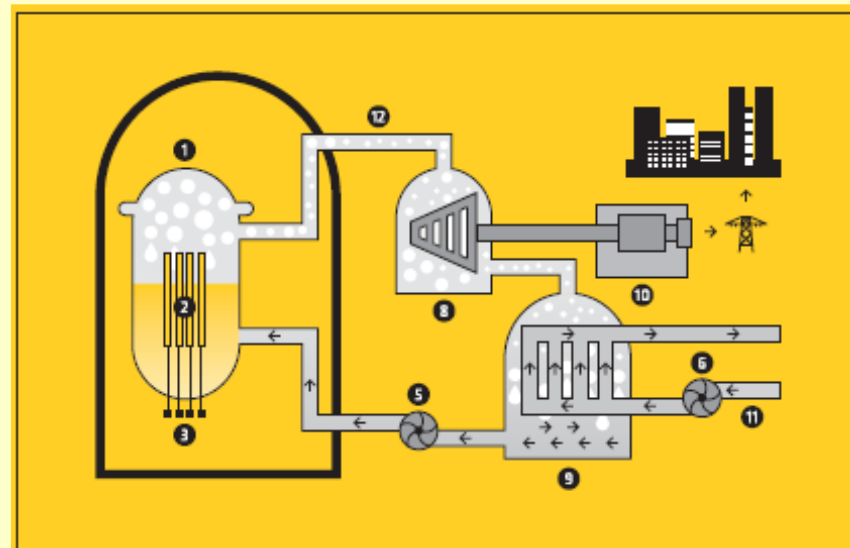
**Chlazení:** Důležitý odvod tepla (voda)



Principiální schéma reaktoru



**Tlakovodní reaktor**

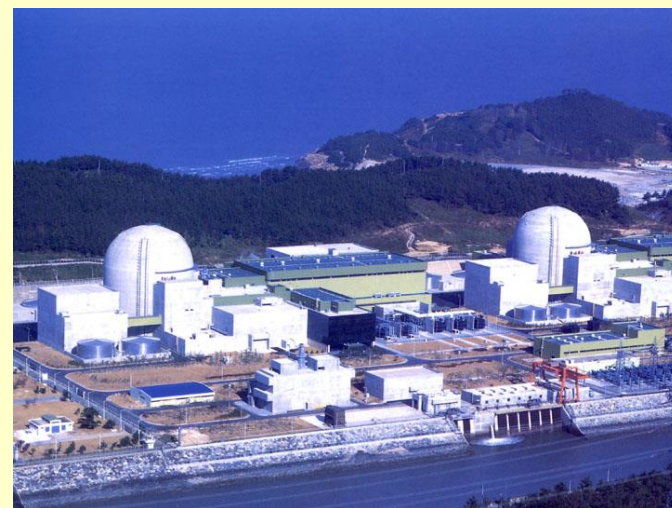


**Varný reaktor**

**Tlakovodní a varný reaktor, systém předávání tepla turbíně, která vyrábí elektřinu**

**V únoru 2018 (podle World Nuclear Association):**

**445 energetických reaktorů s výkonem 396 GWe  
 (28 z nich je v Japonsku dočasně odstavených),  
 staví se 57 s výkonem 62 GWe,  
 plánované 132 s výkonem 131 GWe  
 produkce téměř 11 % elektřiny  
 celková provozní zkušenost: > 25 000 reaktorroků**



**Jaderná elektrárna Yonggwang v Jižní Koreji**

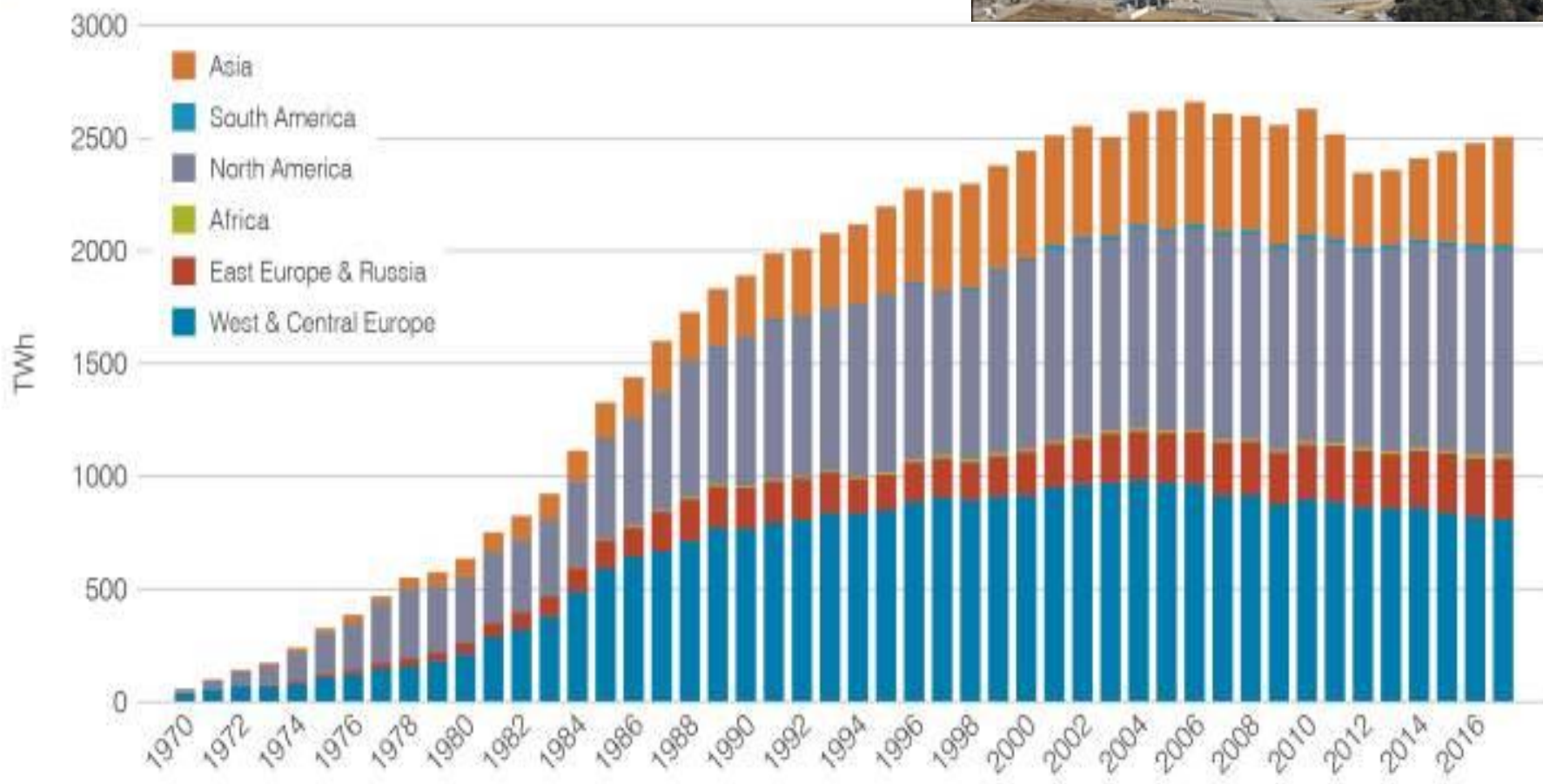
Po roce 2011 dopad Fukušimy I, 38 japonských reaktorů je vypnuto

Podíl jádra na produkci elektřiny něco pod 11 %



WORLD NUCLEAR ASSOCIATION

Rok 2017 – 2519 TWh 10,3 %



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



# Rychlé (množivé) reaktory

Nemoderované neutrony → menší pravděpodobnost reakcí → větší intenzita neutronů

→ větší počet štěpení → nutnost vysokého obohacení uranu 20 - 50 %  $^{235}\text{U}$  (ekvivalentně  $^{239}\text{Pu}$ )

Produkce  $^{239}\text{Pu}$ :  $^{238}\text{U} + \text{n} \rightarrow ^{239}\text{U}(\beta^-) + \gamma \rightarrow ^{239}\text{Ne}(\beta^-) \rightarrow ^{239}\text{Pu} \rightarrow$  **produkce paliva**

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

**Efektivnější využití paliva** – menší citlivost na složení paliva, spalování transuranů

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

Doba života generace rychlých neutronů velmi krátká → větší role zpožděných neutronů při regulaci

Čínský reaktor CEFR  
s výkonem 20 MWe v  
spuštěný v roce 2014



BN600 Bělojarská  
jaderná elektrárna  
v Rusku

Rychlý reaktor BN800  
Bělojarská elektrárna  
Spuštěn 2014



# Různé generace jaderných reaktorů

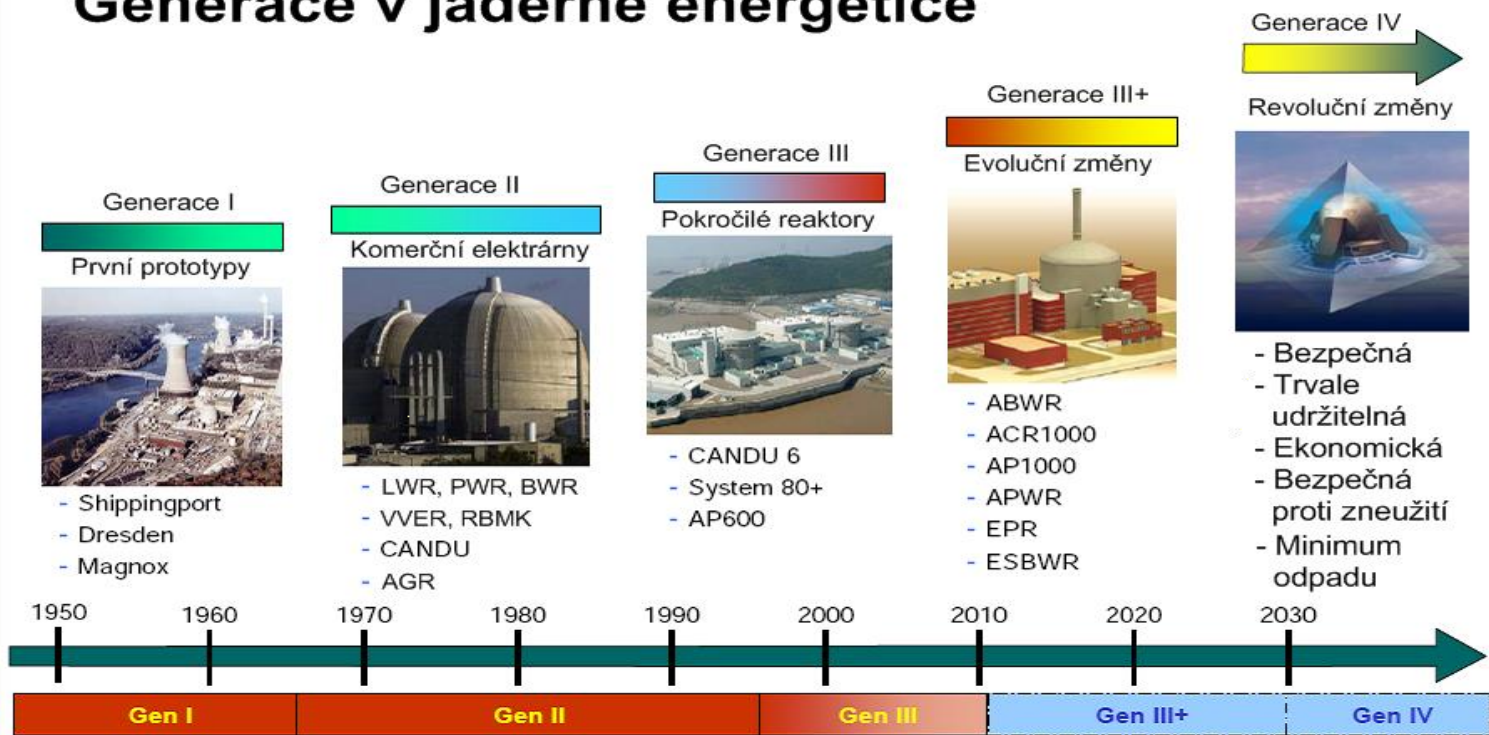
Využívání jaderné energie od padesátých let

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



## Současné reaktory

Až na výjimku generace II. Spolehlivá funkce, stále efektivnější využití  
Prodlužování životnosti (přes 40 let), zkracování přestávek, optimalizace  
výkonu (dukovanské reaktory dříve 440 MW<sub>e</sub>, nyní téměř 500 MW<sub>e</sub>)

V USA výkon jaderné energetiky roste, i když se nové reaktory nestavěly

Podíl jaderné energie v některých státech velký (Francie až 71 %)

V současnosti boom výstavby v rozvíjejících se zemích Asie

V Evropě se dostavují nedokončené reaktory – nové budou už III. generace



Transport české reaktorové nádoby pro  
dostavbu Mochovců(reaktory VVER 440)



Dva dokončené bloky 1 a 2 jaderné elektrárny  
Cernavoda v Rumunsku (reaktor CANDU)



## Přechod od generace II ke generaci III



Hlavně v Číně se dokončuje řada  
bloků II. generace

Evolucí přechod ke generaci III

U dokončovaných bloků II. generace  
řada prvků III. generace

Bloky elektrárny Fang-čcheng-kang 1 a 2



Instalace reaktorové nádoby bloku Rostov 3 (VVER 1000) Bloky VVER1000 Kudankulam Indie

## 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

## Zvýšení bezpečnosti



- 1) Pasivní chlazení v případě havárie
- 2) Přirozená cirkulace vzduchu přes tepelné výměníky
- 3) Dvojitý kontejnment
- 4) Vodní bazén k ochlazování kontejnmentu
- 5) Rychlé vstřikování kyseliny borité
- 6) Zařízení pro rekombinaci vodíku
- 7) Lapač aktivní zóny (Lapač koria)

Vnější vzhled kontejnmentu AP1000



Vnější vzhled kontejnmentu VVER1000,  
elektrárna Kudankullam (blíží se III. generaci)



Lapač aktivní zóny bloku VVER1200  
(elektrárna Ostrovec, Bělorusko)



# Rok 2018 – průlom u bloků III. generace

Spouští se šest nových reaktorů III. generace, přičemž úplně první typu AP1000 a EPR



EPR – Tchaj-šan



VVER1200 - Novovoronež



AP1000 – San-men



Barakah 1

# Které bloky jsou k dispozici?

## Fungující a ve výstavbě

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

**AP 1000** – již tři běží v Číně, Westinghouse má velké problémy, nechce se už podílet na samotné výstavbě, negativní zkušenosti z USA (III+)

**EPR** – jeden běží v Číně (Finsko, Francie bude v roce 2019), 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, Turecku, Bangladeši. 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 ...)**

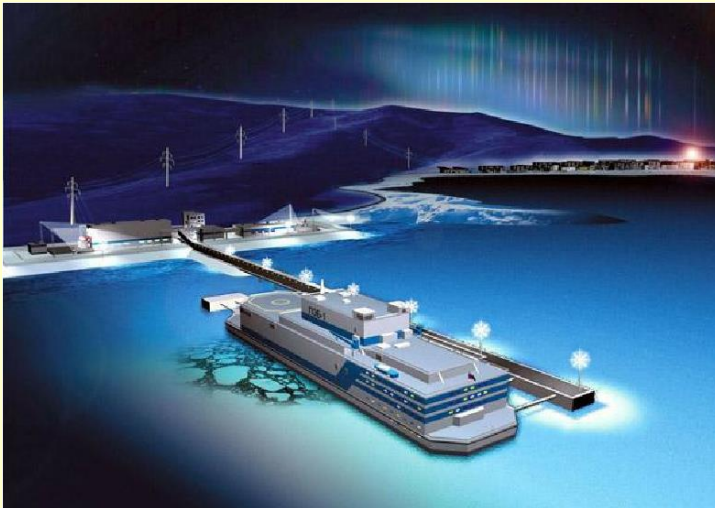


**Novovoronežská 6 a 7 – první fungující bloky III+ generace**



# 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)



Představa budoucí čínské plovoucí jaderné elektrárny

Plovoucí elektrárna Akademik Lomonosov nahradí Bilibinskou elektrárnu



## Pokročilý:

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



Výroba paliva pro bloky HTR-PM



### 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



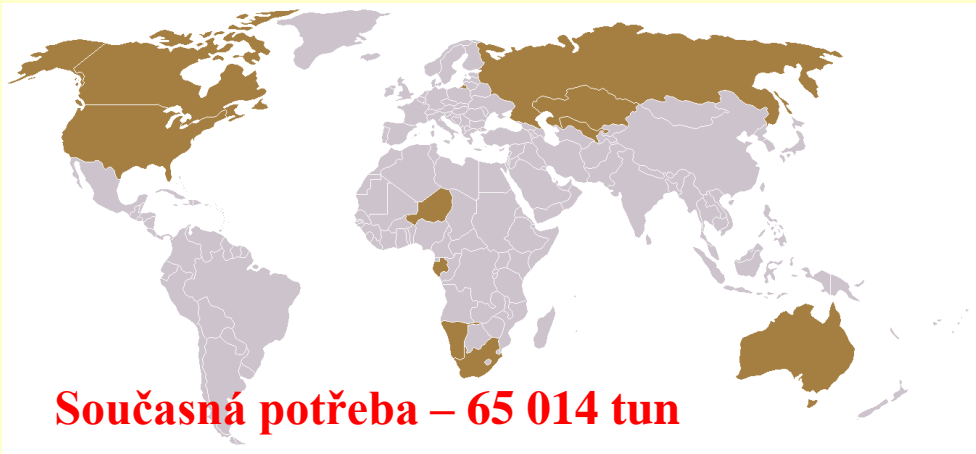


# Jak jsme na tom s palivem?

Známé zásoby 5,5 milionů tun (130 \$/kg)

Austrálie 23% Kazachstán 15 % Rusko 10 % Kanada 8 %

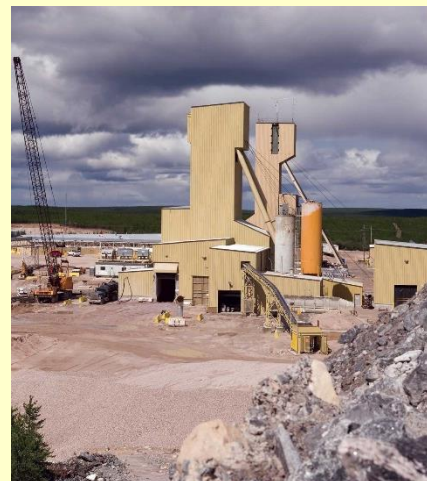
Lepší prospekci až řádové zvýšení zásob



Současná potřeba – 65 014 tun



Uraninit jeden z typů uranové rudy



Zásoby uranu má i Česko,  
Důl Rožná v Dolní Rožince

Kanada je největším producentem uranu

- Těžba:**
- 1) Podzemní
  - 2) Povrchová (61%)
  - 3) Loužením (29%)
  - 4) Vedlejší produkt (10%)  
(i obsahy uranu 0,025% a méně)
  - 5) Zpracování elektrárenského popílku

**Těžba v roce 2013:**

	Kazachstán	22567 t
	Kanada	9332 t
(59 678 t)	Austrálie	6350 t
	Niger	4528 t
	Rusko	3135 t



Zpracovatelský závod dolu Beverley (Austrálie)

**Spotřeba:** 1000 MW – 200 tun přírodního uranu ročně

Svět – 430 000 MW – 65 000 tun ročně (při takové spotřebě známé zásoby pro cenu 130 \$ na 85 let) – cena byla už i 300 \$ - odhad zásob o řád až dva větší

Těžba v Česku: 225 tun (2015), v principu zásoby až 109 000 t (při ceně 300 \$)

**Zbrojní uran a plutonium** – ekvivalent 545 000 tun přírodního uranu

Přepřepování vyhořelého paliva – MOX – efektivnější využití

Spolehlivě **zhruba na století** i při zvýšení produkce několikanásobně

Využití uranu 238 – přírodní uran 0,7 % uranu 235 → **více než 100krát více paliva**  
**Možnost i při vysokém zvýšení využití jádra na tisíciletí**

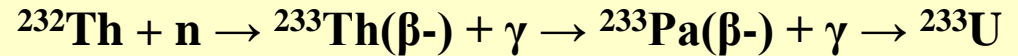


# Thoriový cyklus (výhoda – nevznikají transurany)

$^{232}\text{Th}$   $T_{1/2} = 1,405 \cdot 10^{10}$  let  $\rightarrow$  je ho ještě více než uranu 238

Produkce štěpného materiálu

Austrálie	452 000 tun
USA	400 000 tun
Turecko	344 000 tun
Indie	319 000 tun
Celkově	2 400 000 tun



Pozor, známé zásoby

Znalosti velmi sporé

Množství určitě řádově podceněné



Velké zásoby thoria má opět Austrálie a také Indie



výskyt v monazitu

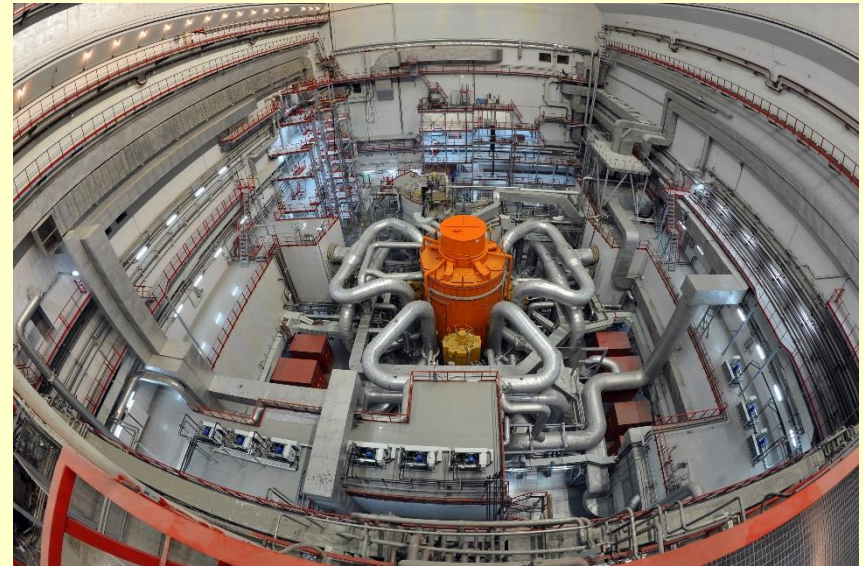
možnost zajištění jaderné energetiky na tisíciletí



# Reaktory IV. generace

## Proč je potřebujeme?

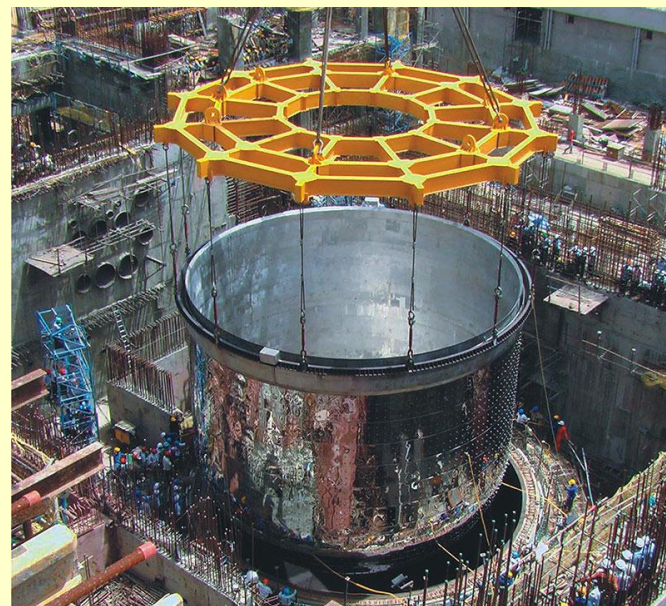
- 1) Zvýšení efektivity využití uranu a thoria (zásoby paliva na mnoho tisíciletí) – rychlé reaktory
- 2) Snížení objemu a nebezpečnosti radioaktivního odpadu (uzavření palivového cyklu) – exotické typy s tekutým palivem a průběžnou separací
- 3) Zvýšení efektivity produkce elektřiny a tepla pro průmysl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



Sodíkem chlazený reaktor BN800



**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, chlazený tekutým kovem, zkušenosti na ponorkách BREST-300 – prototypový reaktor (Rusko)

**Sodíkový reaktor Kalpakkam (Indie)**



**Palivový soubor a staveniště reaktoru BREST 300**

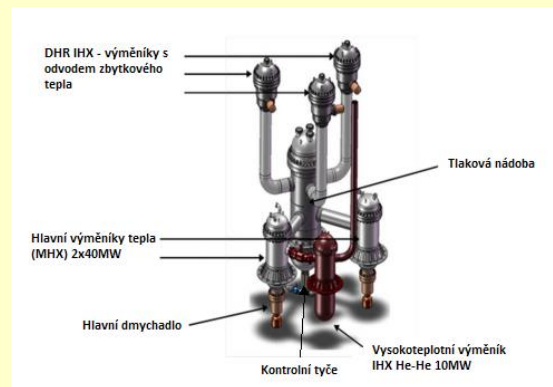
**Ruská ponorka s olovem chlazeným reaktorem**

**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**



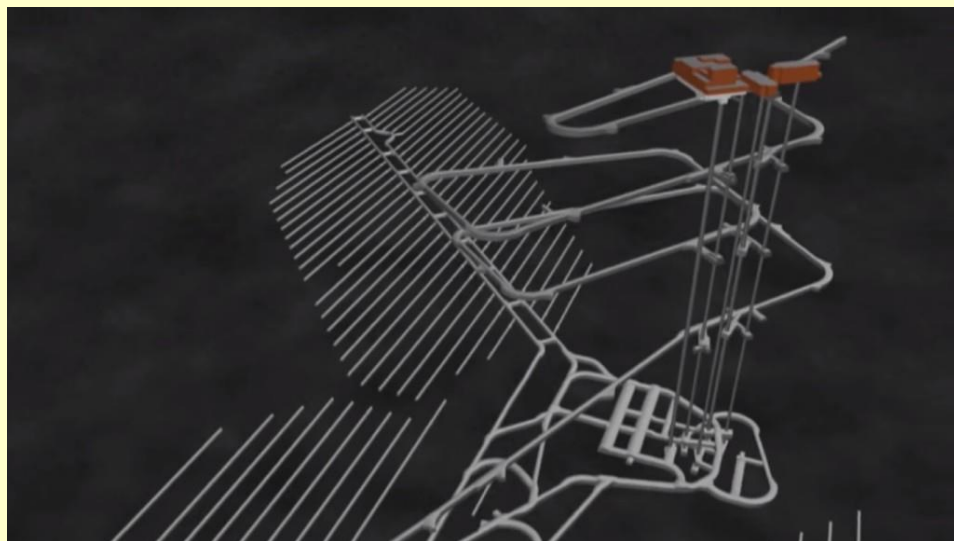
**Instalace reaktoru HTR-PM v Číně**



**Kulové palivo pro reaktor HTR-PM v Číně**



# 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

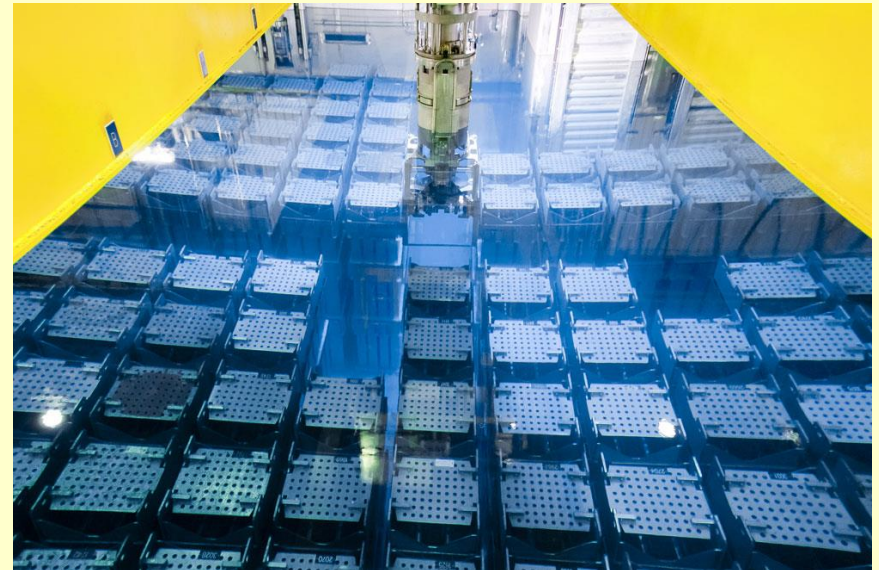
# Recyklace – palivo MOX

Využití uranu a plutonia z vyhořelého paliva

Přepřacovací závod – separace uranu a plutonia

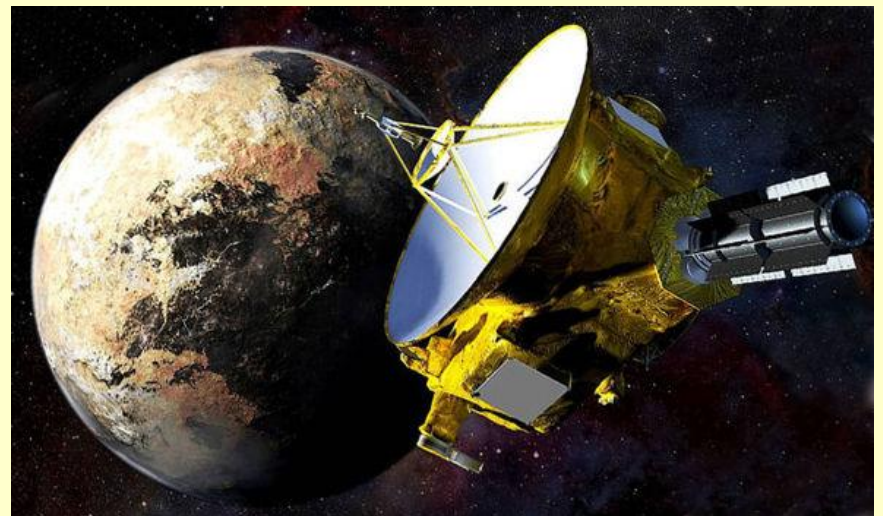
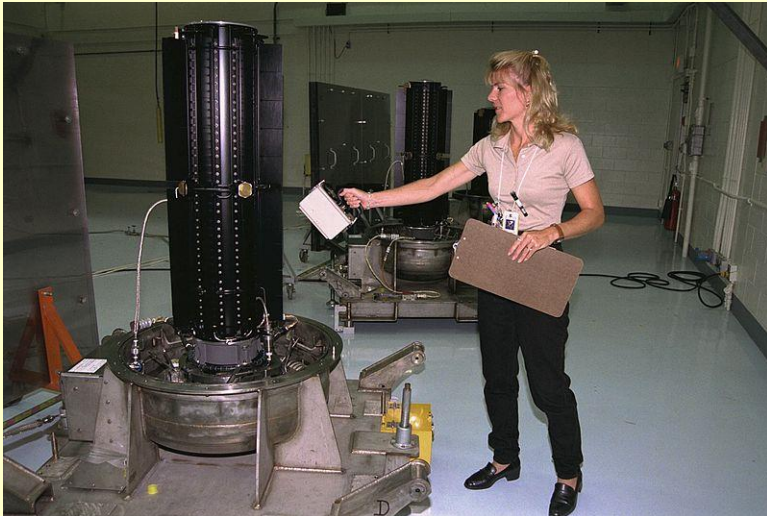
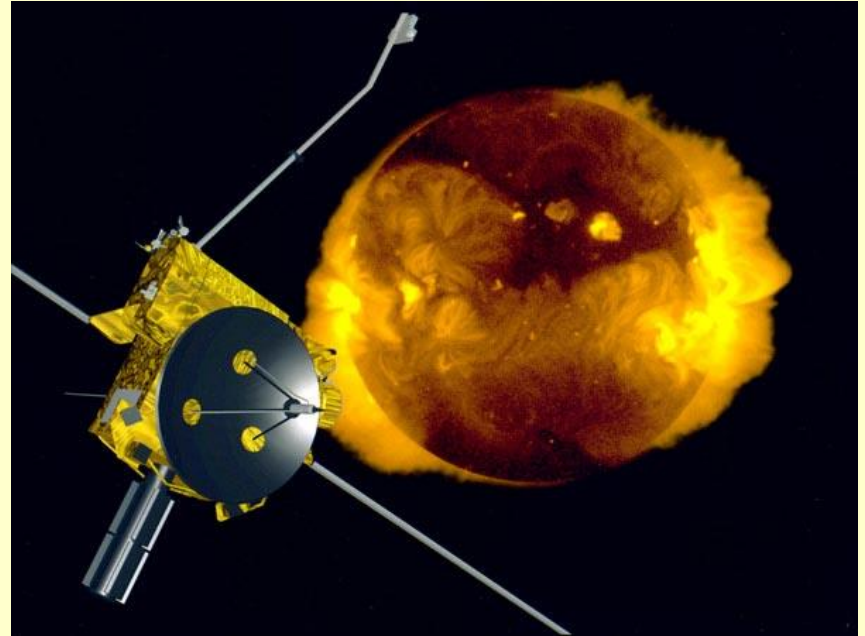
Přepřacování a produkci MOX – Francie, Velká Británie, Rusko

Snížení potřeby čerstvého uranu a zmenšení objemu odpadu





# Radionuklidové zdroje pro vesmír – chybí plutonium 238





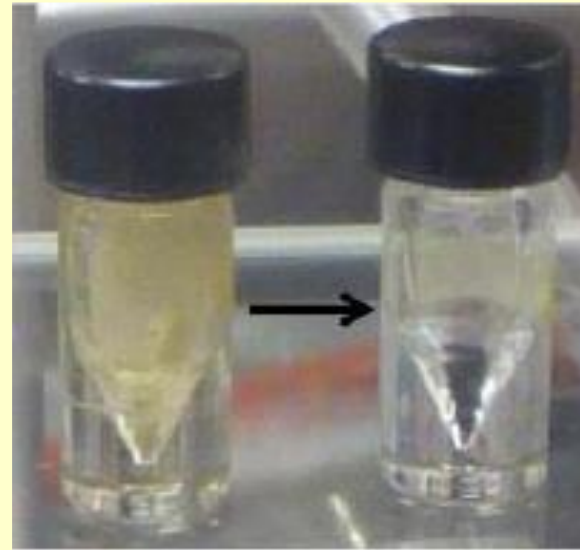
# Místo $^{238}\text{Pu}$ použít $^{241}\text{Am}$ z jaderného odpadu

Možnost získat chemickou separací z vyhořelého paliva (starých zásob plutonia)

**Výhody:** Možnost získání bez speciálního ozařování ve speciálním reaktoru  
Pomalejší pokles výkonu

**Nevýhody:** Téměř 5krát vyšší potřebná hmotnost ( 5krát nižší aktivita)  
Výraznější aktivita gama – nutnost řešit stínění před touto radiací

	plutonium 238	americium 241
poločas rozpadu	87, 7 let	432 let
Nejintenzivnější gama	0,04 %	36 %
Energie gama	43 keV	60 keV
Energie rozpadu:	5,6 MeV	5,6 MeV
Hustota energie	0,54 kW/kg	0,105 kW/kg



# Získávání americia 241

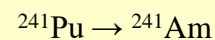


Separované plutonium

Přeprocessing  
paliva



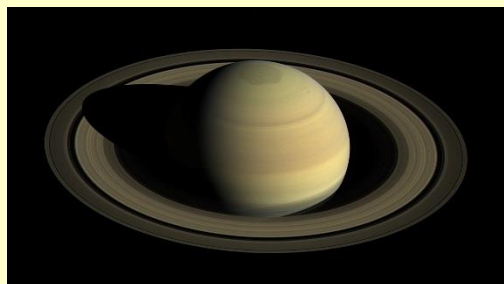
Čas uložení



Čisté plutonium

americium pro vesmír

Chemická  
separace  
americia



Z plutonií jediné  $^{241}\text{Pu}$  se rozpadá beta rozpadem, při rozpadu směsi plutonií tak vzniká pouze izotop americia  $^{241}\text{Am}$  ( $^{241}\text{Pu} \rightarrow ^{241}\text{Am}$ ,  $T_{1/2} = 14$  let)

# Urychlovačem řízené transmutory

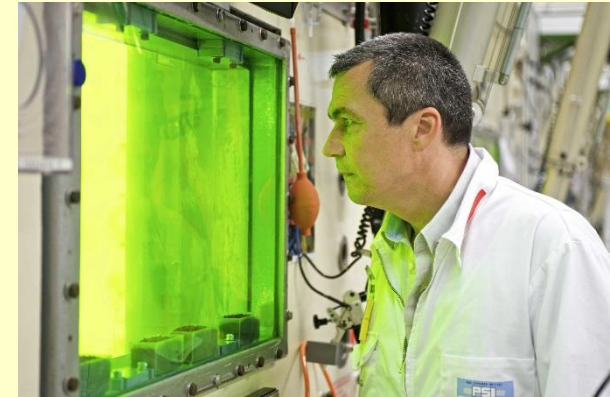
Z čeho se skládá:

- 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

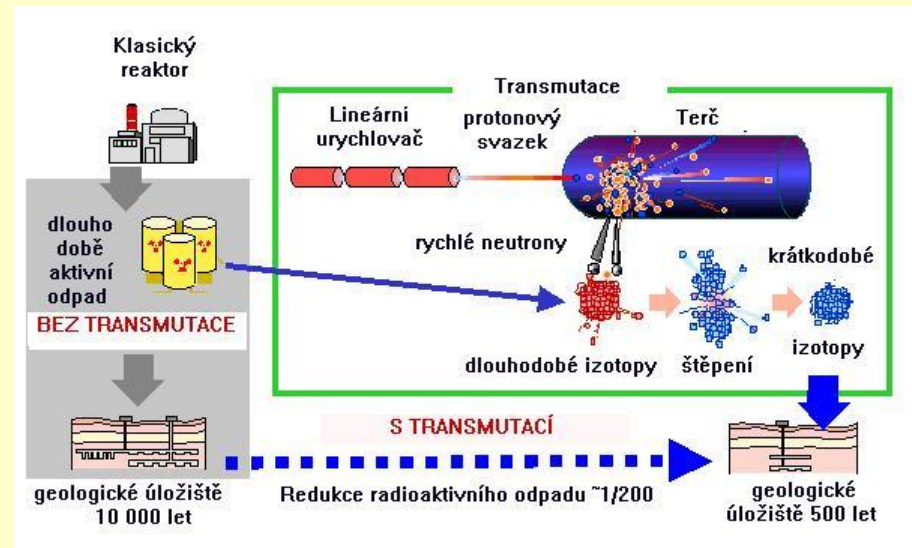


Schéma koncepce urychlovačem řízeného jaderného transmutoru



# Termojaderná elektrárna

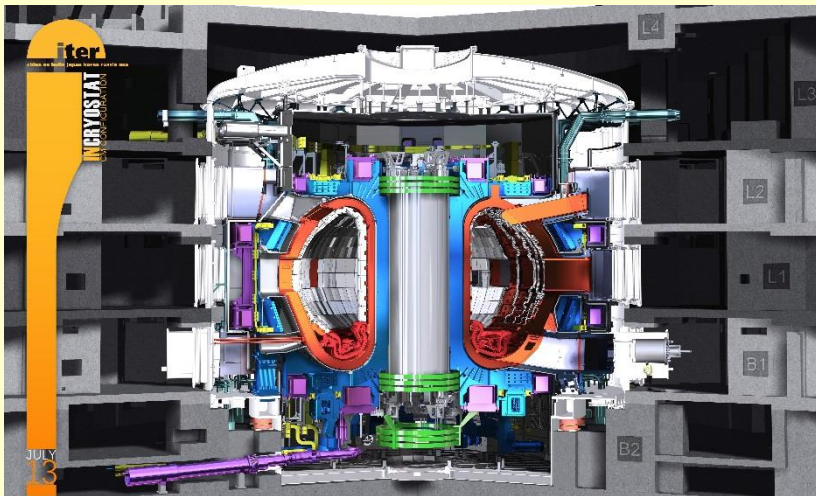
Tokamak **ITER** – první fúzní reaktor, výkon 500 MW, 10krát vyšší než vklad, demonstruje chování plazmy u elektrárny, fúzní reakce deuteria a tritia, testy s produkcí tritia

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

# Jaké možnosti jádro poskytuje?

Jaderná energetika není samospasitelná, ale může být významným zdrojem energie

Efektivní větší zdroj energie minimálně (chlazení) závislý na místních podmínkách  
stálý stabilní výkon → **vhodné základní větší zdroje**

U elektřiny by tak podíl mohl být až 70 – 80 % (nemá smysl být větší)

Nahrazení hlavně uhelných elektráren – snížení produkce CO<sub>2</sub>

Větší využití v dopravě v případě přechodu na elektromobily a **vodíkové hospodářství**

Teplárny – přechod na menší kompaktní zdroje

Možnost kompaktních malých zdrojů, kde by se neměnilo palivo, ale celá elektrárna

**Nutnost vhodné kombinace a doplňování s dalšími zdroji a úsporami**

**Česko** – Dukovany (4 × 500 MW) a Temelín (2 × 1000 MW) – celkem 4000 MW (36 %) úvaha – 2 bloky Temelín a 2 Dukovany (~ 5000 MW) – 60 % elektrické energie

**Slovensko** - Jaslovské Bohunice (2 bloky 440 MW) a Mochovce (2 bloky 440 MW) - 50% dokončovány – 2 bloky Mochovce (440 MW) , 1 blok Jaslovské Bohunice (~ 1500 MW)

V budoucnu i další elektrárny – podíl na elektřině 70 – 80 %, větší podíl u tepla, vodík



Budovaný plovoucí reaktor (70 MWe)

EPR reaktor

# Některé možné energetické scénáře

**Scénář 1: Supernízkoemisní** – postavení většího počtu jaderných bloků, intenzivní budování obnovitelných zdrojů, úložiště energie ...  
Česko by zásadně přispělo ke snížení emisí.  
Dnes už velmi nepravděpodobný

**Scénář 2: ASEK** – poměrně široké rozmezí umožňující optimalizaci podle podmínek, nutnost výstavby jaderných bloků a úspěšný rozvoj obnovitelných zdrojů a ukládání energie

**Scénář 3: Druhé Bavorsko** – postupný úbytek výkonu v jaderných a uhelných zdrojích, spoléhání na větrné zdroje na severu Německa a plynové zdroje regulující síť u nás i v Německu.  
Situace v Bavorsku ukáže, k čemu scénář vede.  
Scénář pravděpodobný v případě pokračování současné nečinnosti

**Scénář 4: Výpadek Dukovan už v roce 2025** – třeba tlakem Rakouska a Německa – spolu s odstavenými uhelnými bloky ztráta přes 6 GW výkonu.  
V případě nečinnosti a cestě k Bavorskému scénáři povede k velkým nárokům na regulaci a import elektřiny.

**Je třeba nalézt optimum a ve všech scénářích zajistit bezpečné fungování našeho energetické – výzva pro všechny související obory**



# 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 CO<sub>2</sub> a nutnost je potlačit

