

Palivo pro jadernou energetiku

Vladimír Wagner

Ústav jaderné fyziky AV ČR, FJFI ČVUT Praha

- 1) Úvod
- 2) Princip fungování jaderného reaktoru
- 3) Jak probíhá těžba uranu?
- 4) Úprava po těžbě
- 5) Obohacování uranu
- 6) Produkce paliva
- 7) Přepřacování vyhořelého paliva
- 8) Trvalé uložení vyhořelého paliva
- 9) Závěr



Těžba v dole Rožná



Nově se připravuje realizace bloků APR1000

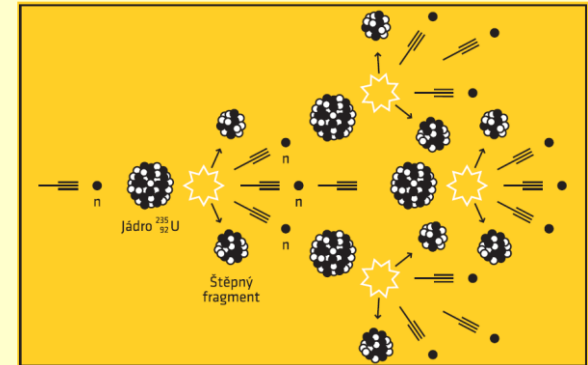


Ukončení těžby uranu v Česku v roce 2017

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

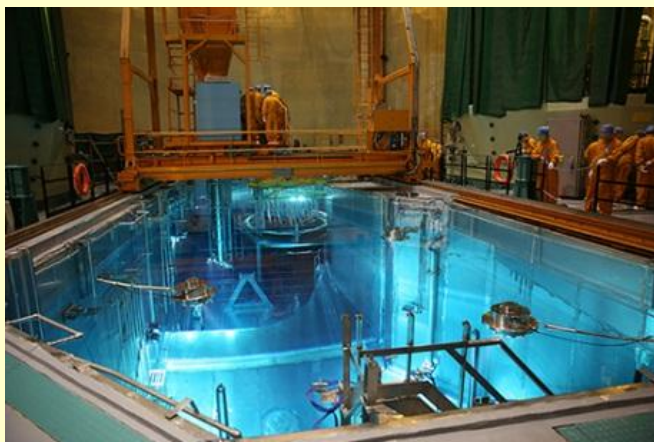
$k < 1$ podkritický systém

$k = 1$ 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)

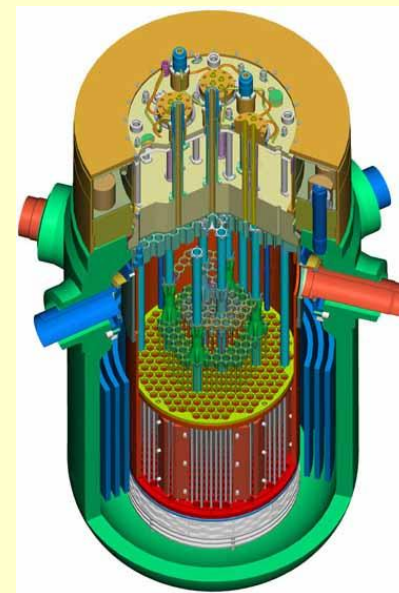
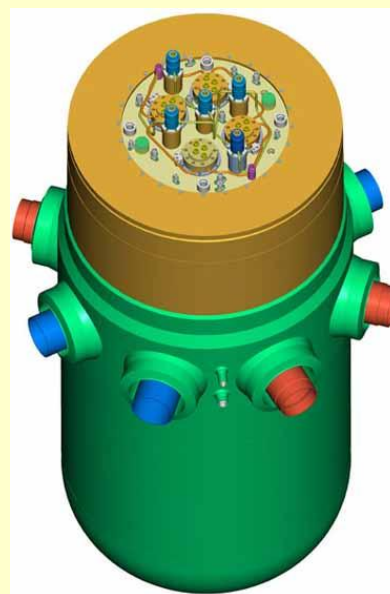
$$T_{1/2}(^{238}\text{U}) = 4,51 \cdot 10^9 \text{ r}, \quad T_{1/2}(^{235}\text{U}) = 7,13 \cdot 10^8 \text{ r}$$

většinou ve formě UO_2

Moderátor: Voda, grafit

Ovládání: Regulační, kompenzační
a bezpečnostní tyče
Využití bóru (kyseliny borité)

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

Jaderné zdroje - současnost

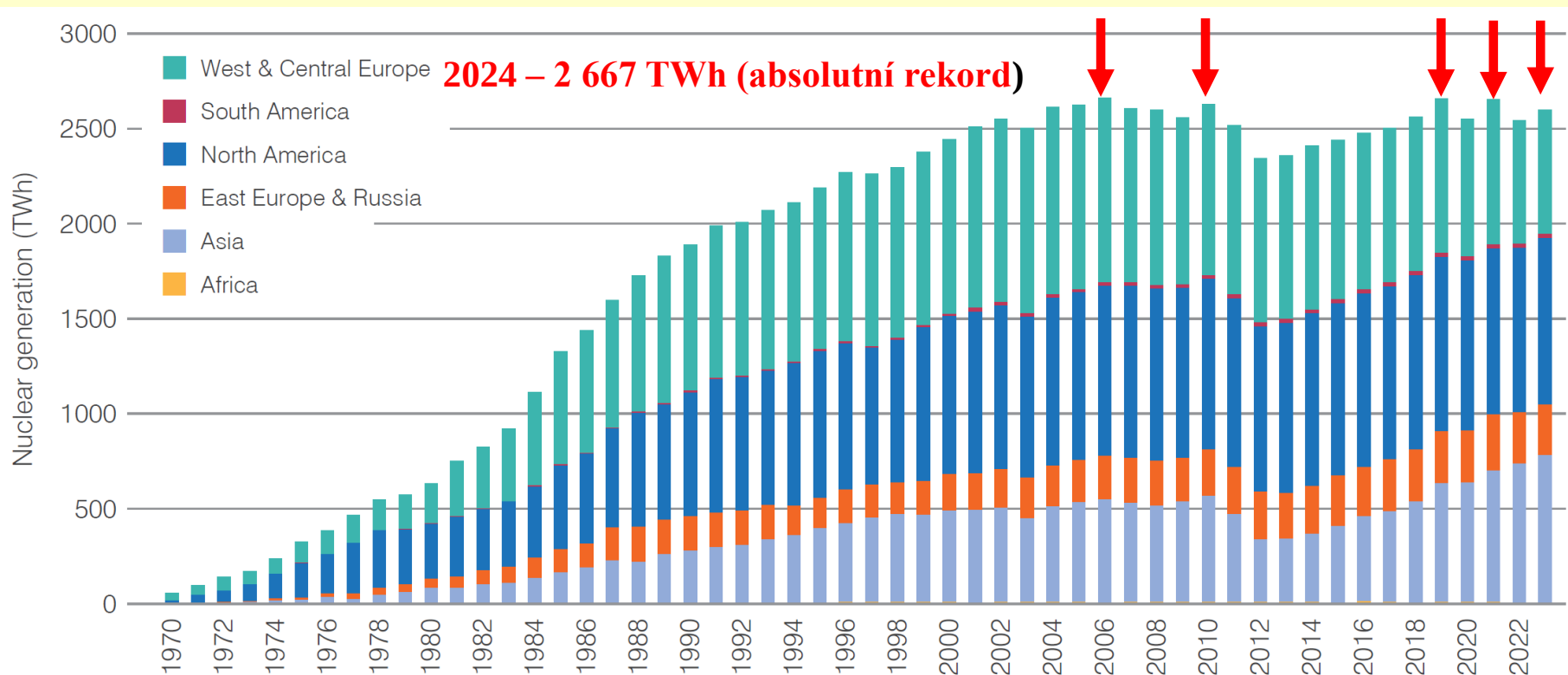
Co nejdelší bezpečný provoz stávajících bloků a přechod od II. ke III. generaci

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).



Zásoby uranu

Uran vznikl při výbuších supernov a splynutí neutronových hvězd - intenzivní pole neutronů

Jeho výskyt je podobný výskytu cínu a je 500krát častější než u zlata

Na zemi je rozprostřen poměrně rovnoměrně

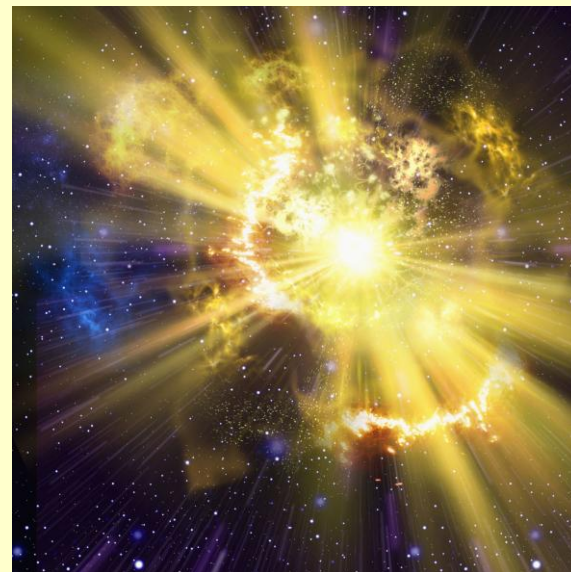
Slabě radioaktivní, poločasy rozpadu v řádu stovek milionů až miliard let

Nyní poměr $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$ 0,72 %, dříve vyšší, přírodní reaktor

Známé zásoby 6 milionů tun (130 \$/kg)

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

Lepší prospekci až řádové zvýšení zásob



Výbuchy supernov jsou zdrojem velmi těžkých prvků, i uranu



Uraninit jeden z typů uranové rudy



Těžba probíhala i v Jáchymově



V Oklo v Gabonu běžel přírodní reaktor

Těžba 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



Kazachstán, Namibie, Kanada, Austrálie, Niger, Rusko ...
V EU je v přípravě jediný důl v Salamance ve Španělsku

Současná těžba (2024) – 71 000 tun

Těžba loužením



Kanada je největším producentem uranu

**Zásoby uranu má i Česko,
Důl Rožná v Dolní Rožince**

Zajištění potřeb jaderné energetiky

Těžba v roce 2024: (70 000 t)	Kazachstán	23 270 t
	Kanada	14 309 t
	Namibie	7 333 t
	Austrálie	4 598 t
	Uzbekistán	4 000 t
	Rusko	2 738 t

Výhodou uranu je velmi malý objem a hmotnost – možno přepravovat levně i na velké vzdálenosti – dovoz z nejefektivnějších a nejlevnějších dolů



Zpracovatelský závod dolu Beverley (Austrálie)

Spotřeba: 1000 MW – 200 tun přírodního uranu ročně (23 tun obohaceného)

Svět – 400 000 MW – 80 000 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 skončila v roce 2017, v principu zásoby až 109 000 t (při ceně 300 \$)

Zbrojní uran a plutonium – ekvivalent 545 000 tun přírodního uranu

Přepřacování vyhořelého paliva – MOX – efektivnější využití

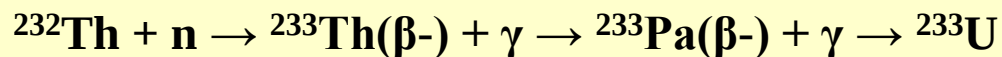
Spolehlivě zhruba na století i při zvýšení produkce několikanásobně

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

Ještě máme thorium

^{232}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

Přední část palivového cyklu – těžba, zpracování a obohacování

- 1) Přední část palivového cyklu: Těžba a mletí, úprava, obohacování a výroba paliva
- 2) Po těžbě se ruda zpracovává: mele se, louží se kyselinou nebo zásadu a suší → získáme koncentrát ve formě U_3O_8 , kde je obsah uranu větší než 80 %, který se nazývá **žlutý koláč**
- 3) Převedení do plynné formy UF_6 a čištění a obohacování na okolo 5 %
- 4) Formování paliva do pelet a produkce palivových souborů

Možné způsoby obohacování:

- 1) Elektromagnetická separace
- 2) Difuzní separace
- 3) Využití centrifug – odstředivá síla
- 4) Laserová separace

Difuzní
centrifuga



Žlutý koláč



Uranová peleta



Palivový soubor

Československo i Česko a přední část palivového cyklu

V Československu po II. světové válce
letech intenzivní těžba uranu

Obohacování je příliš náročné

Plán využít přírodní uran a dělat palivo

Reaktor KS-150 A1 byl těžkovodní

V sedmdesátých letech přechod k
sovětským lehkovodním VVER

Obohacené palivo z dovozu



Reaktor KS-150 jako Jaslovské Bohunice A1



Těžba uranu byla i v Rožné, nyní jsou zde testy uložště

Zadní část palivového cyklu

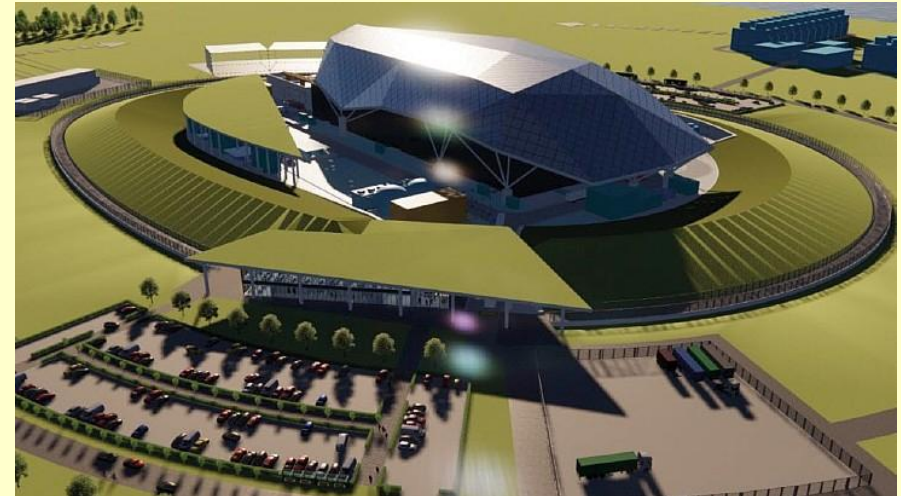
Po vložení do reaktoru probíhá zhruba čtyři roky vyhořívání palivových souborů

Po vyhoření zůstává stále 95 % ^{238}U , 1 % ^{235}U a 1 % Pu

Vyhořelé palivo musí nejdříve vychládat v bazénu pro vyhořelé palivo, zde je řadu měsíců i let.

Poté se přemístí do speciálního kontejneru a ten se skladuje v přechodném úložišti v areálu elektrárny, tam se v principu vejde veškeré vyhořelé palivo z doby života elektrárny

Pak se vyhořelé palivo pošle na recyklaci nebo do trvalého úložiště



Nově chce Česko začít využívat velké reaktory AP1000 a malé modulární reaktory Rolls-Royce

Recyklace – palivo MOX – palivo REMIX

Využití uranu a plutonia z vyhořelého paliva

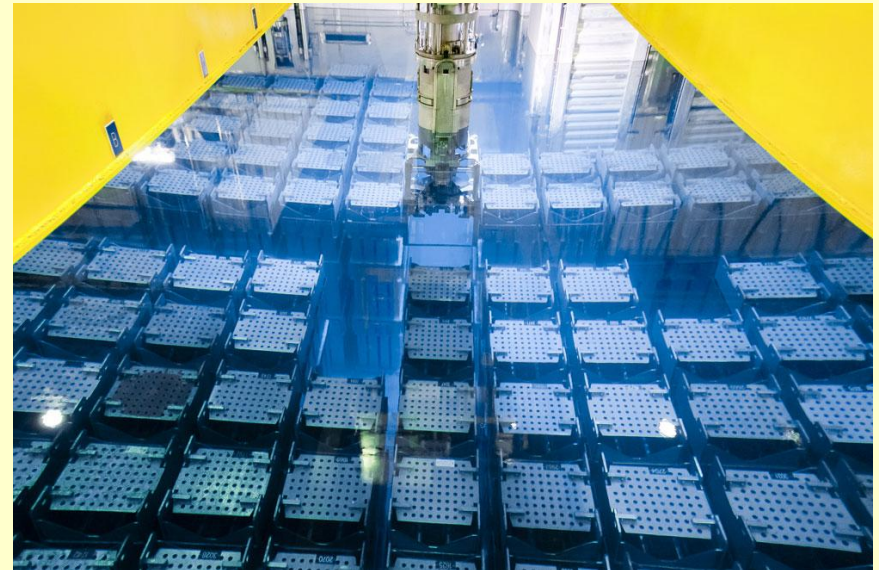
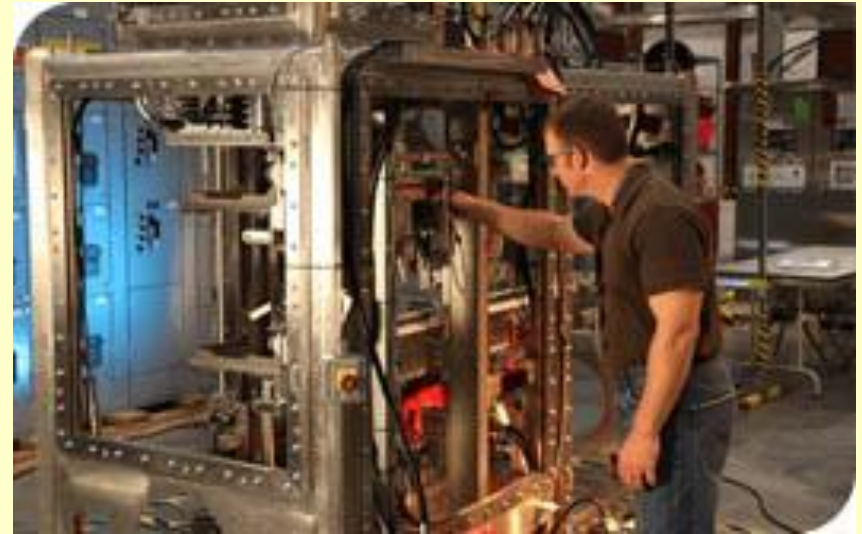
MOX – přidání separovaného plutonia

REMIX – vyhořelé palivo doplněno ^{235}U

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

Snížení potřeby čerstvého uranu a zmenšení
objemu odpadu

Počet recyklací je omezený (hodně ^{240}Pu ,
 ^{241}Pu ...)



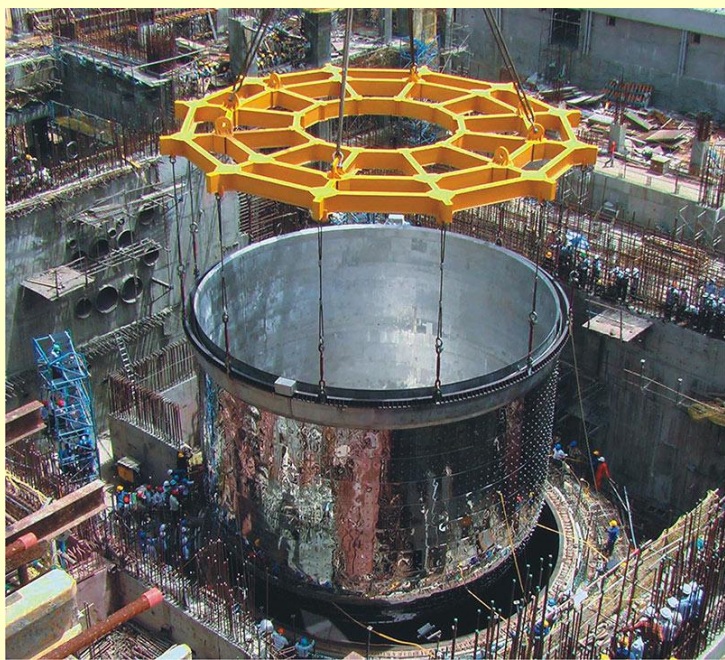
Sodíkem chlazený reaktor a další rychlé reaktory

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 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

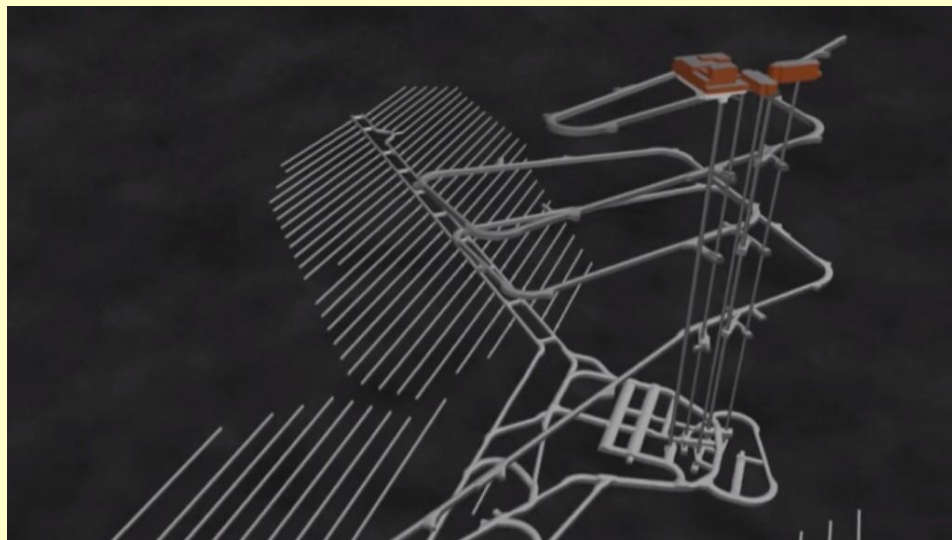


Bloky IPHWR700 Kakrapar 3 a 4



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

Máme fungující úložiště



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



Možnosti spalování transuranů

Počet recyklací je omezený, ne všechny transurany tak lze v systému z klasických a rychlých reaktorů spálit

Spalování transuranů v intenzivním poli neutronů nezávislém na řetězové štěpné reakci

Vnější zdroj neutronů mohou být tříštivé reakce svazku relativistických protonů s terčí z těžkých jader – neutrony by se využívaly v reaktoru pravděpodobně s tekutým palivem pro možnost separace různých radionuklidů

Další možnosti jsou neutrony z fúzních reakcí, blanket z vyhořelého paliva by zde sloužil i pro množení neutronů pro produkci tritia z lithia

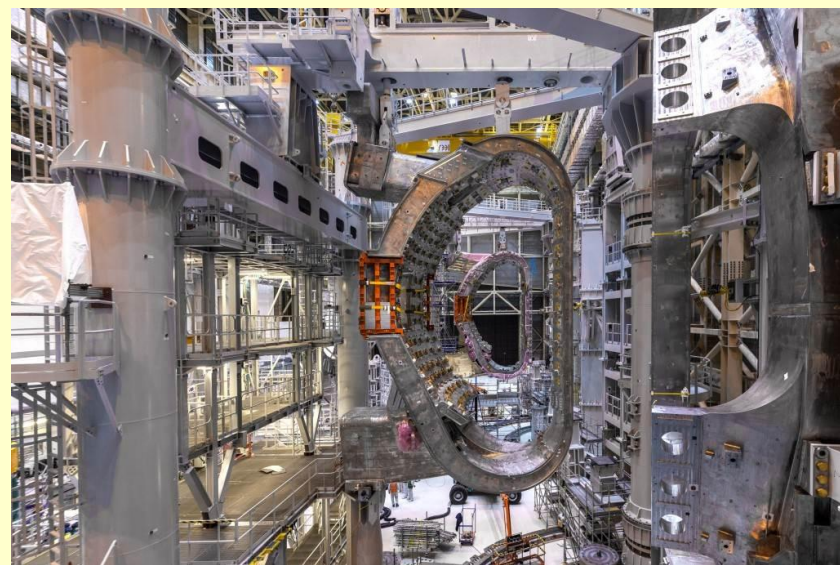
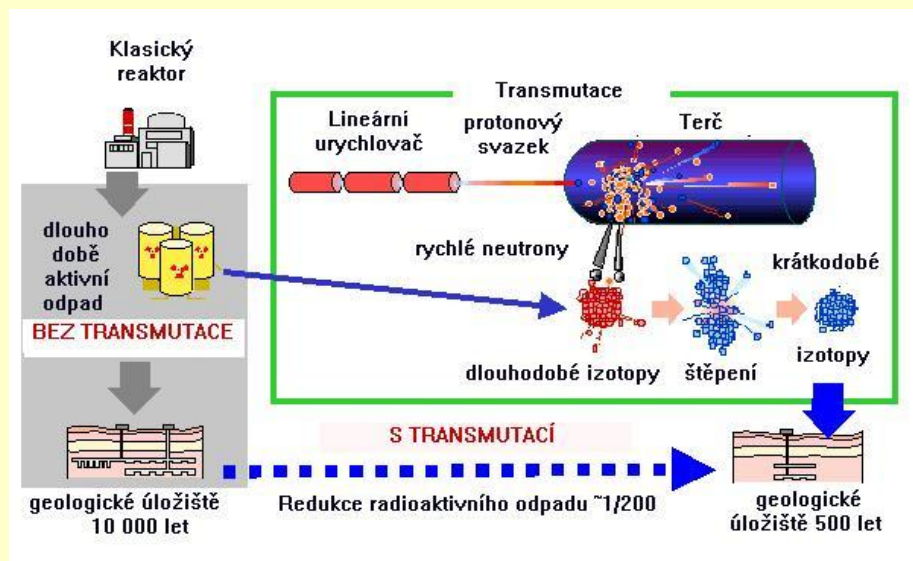
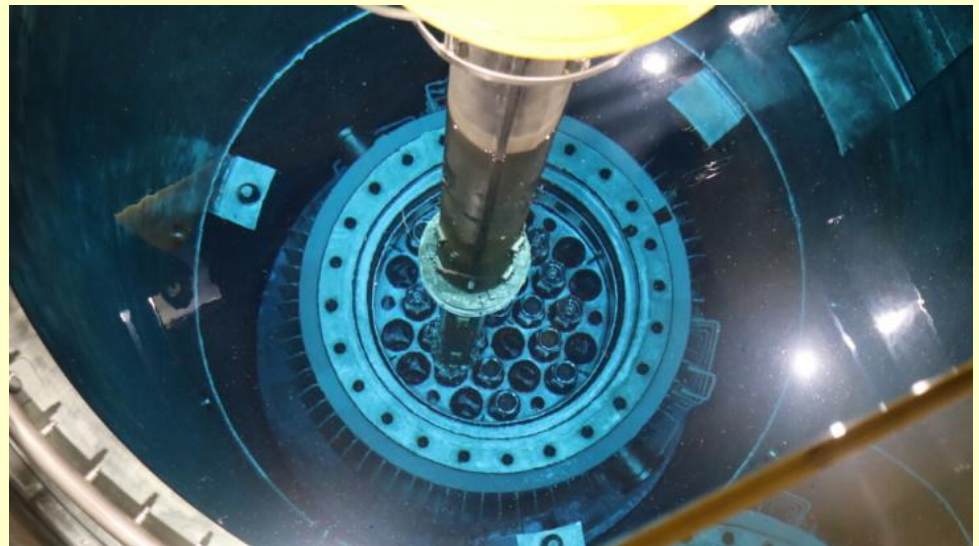


Schéma urychlovačem řízeného transmutatoru

Pokračují práce na tokamaku ITER

Závěr

- 1) Štěpné izotopy uranu a plutonia jsou s lichým počtem neutronů. Jde o ^{235}U , kterého je v přírodě 0,72 %, v přírodě se vyskytuje hojně a poměrně rovnoměrně
- 2) Vytěžený uran se rozemele a upraví do podoby žlutého koláče, stačí malé objemy
- 3) Obohacování je velmi náročná záležitost, proto Československo s dlouhodobou tradicí těžby uranu vyvíjelo těžkovodní reaktor a vyvíjelo kovové palivo s přírodního uranu
- 4) V reaktoru jsou palivové soubory zhruba čtyři roku, mění se jejich pozice
- 5) Vyhořelé palivo se může recyklovat nebo uložit d trvalého hlubinného úložiště
- 6) Uzavření palivového cyklu a využití thoria vede k potřebě rychlých reaktorů
- 7) Efektivní spalování transuranů → urychlovačové transmutory nebo fúzní reaktory



Palivové soubory pro VVER440 od Westinghouse jsou už v Dukovanech a testovaly se v Loviise 2