

6. Jaderná energetika

Základy energetiky

Vyučující

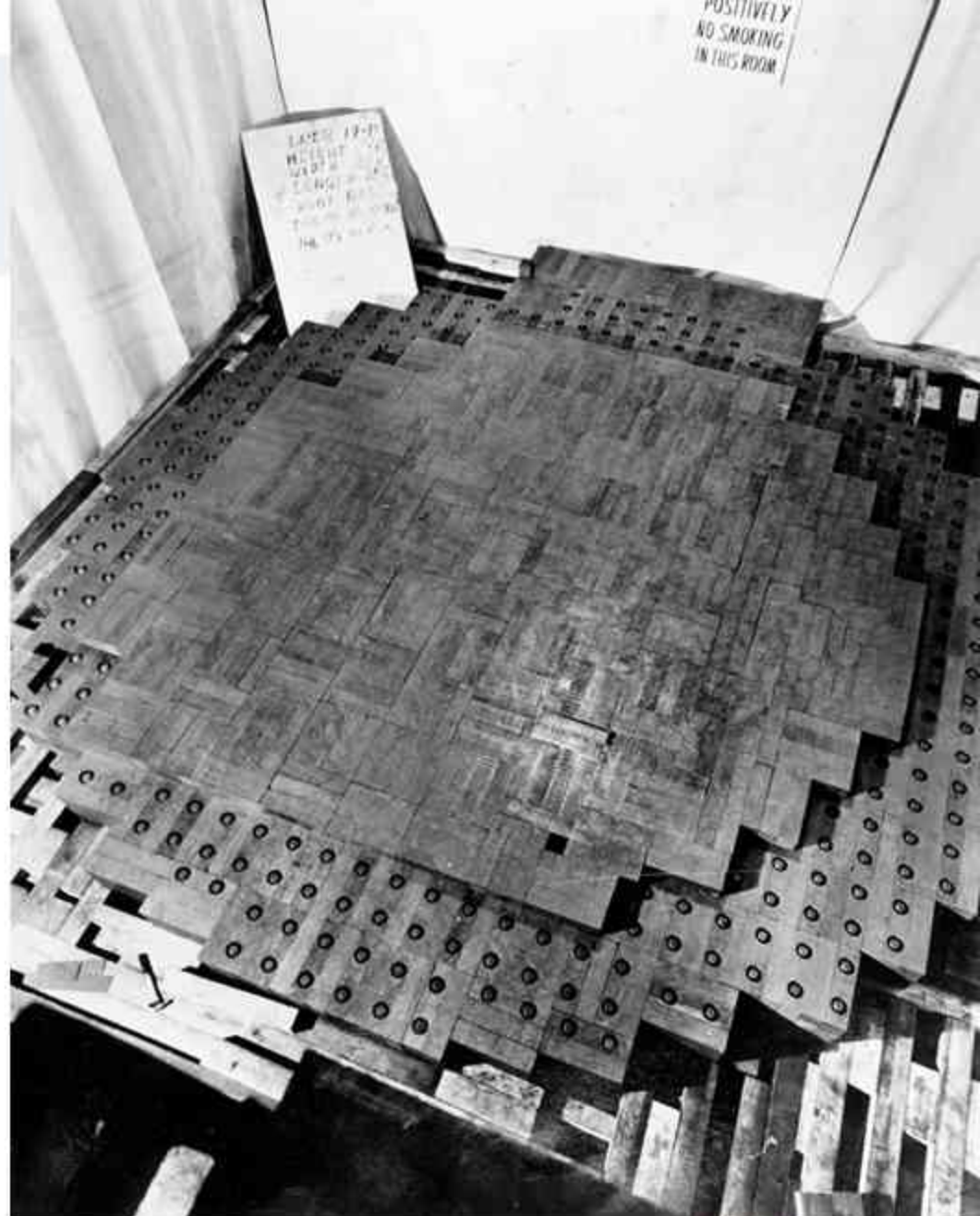
Luděk Jelínek

Chicago pile

2. září 1942

Enrico Fermi
Leo Szilard

Zdroj: Archival Photographic Files, [apf digital item number apf2-00502] Special Collections Research Center, University of Chicago Library.



Projekt Manhattan



Zdroj obrázku: Wikimedia Commons, Autor: Fastfission

Jaderné palivo

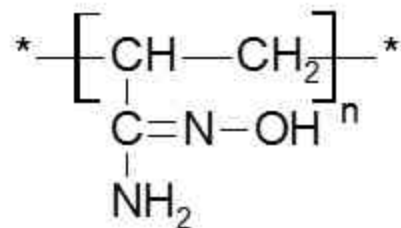
- Těžba uranu
- Přepřacování paliva

Zdroje uranu

- Přírodní uran je směsí ^{238}U , ^{235}U (0,72%), ^{234}U a dalších izotopů ve stopových koncentracích
- Nejznámější uranovou rudou je **smolinec** (uraninit), který jako hlavní složku obsahuje oxid uraničitý UO_2
- Dalším zdrojem uranu může být do budoucna mořská voda, v které se uran vyskytuje v koncentraci asi $3\text{ }\mu\text{g/l}$ pro jeho získávání je možno využít **sorbenty s amidoximovou funkční skupinou**



Zdroj obrázku: Wikimedia Commons,
Autor: Rob Lavinsky / iRocks.com



Těžba uranu - dopady

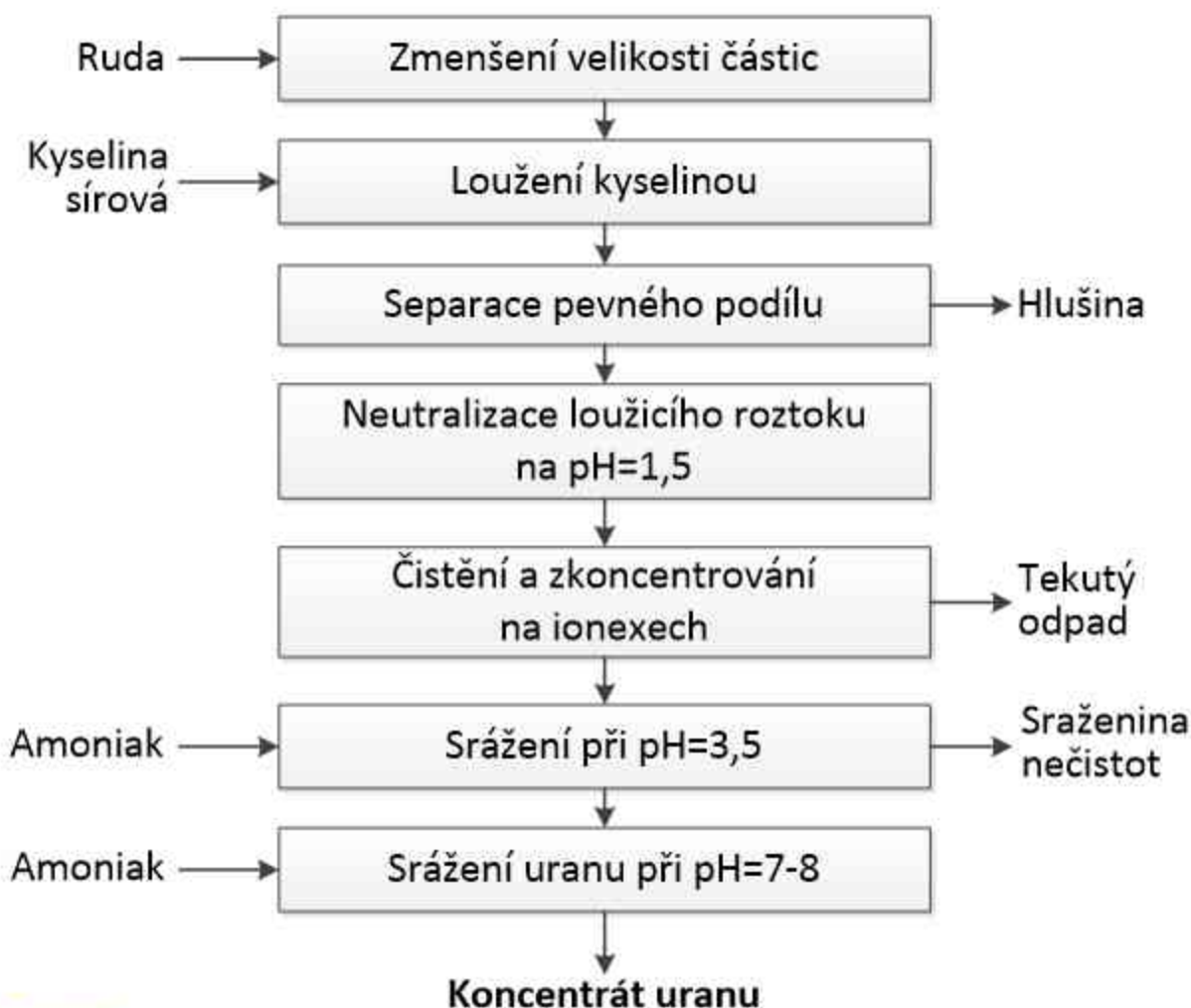
- Uran se v Československu a později v České Republice těžil na mnoha lokalitách, většinou klasickým hlubinným dobýváním
- Nejproblematictější je ale **in-situ loužení** uranových rud H_2SO_4 a HNO_3
- **Kyselina dusičná je oxidačním činidlem** pro převedení $\text{U}^{\text{IV}}\text{O}_2$ na $\text{U}^{\text{VI}}\text{O}_2^{2+}$
- **Kyselina sírová váže uranyl do formy sulfáto komplexů** např. $[\text{UO}_2(\text{SO}_4)_3]^{4-}$
- **Stráž pod Ralskem**
 - 4 100 000 t H_2SO_4 (800 000 tun v podloží)
 - 312 000 t HNO_3
 - 112 000 t NH_3
 - 26 000 t HF
 - 1 000 t HCl
- Vtláčení milionů tun kyselin do podloží způsobilo velké problémy se znečištěním podzemních vod

Pozn. Dopady těžby uranu intenzivně odstraňuje podnik DIAMO, produktem ionexových technologií separaci uranu z důlních vod je diuranát amonný $(\text{NH}_4)_2\text{U}_2\text{O}_7$. Likvidují se nejen následky loužení uranových rud ale i například i důlní vody z Příbramských jam

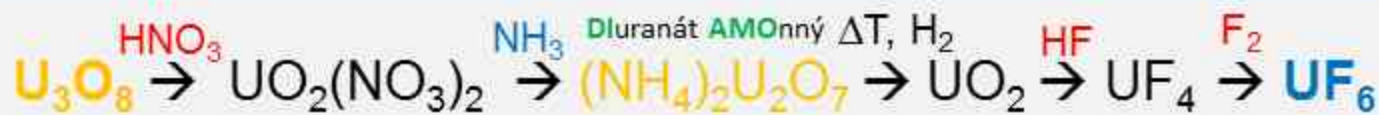
Zdroj dat: www.diamo.cz

Loužení vytěžené uranové rudy

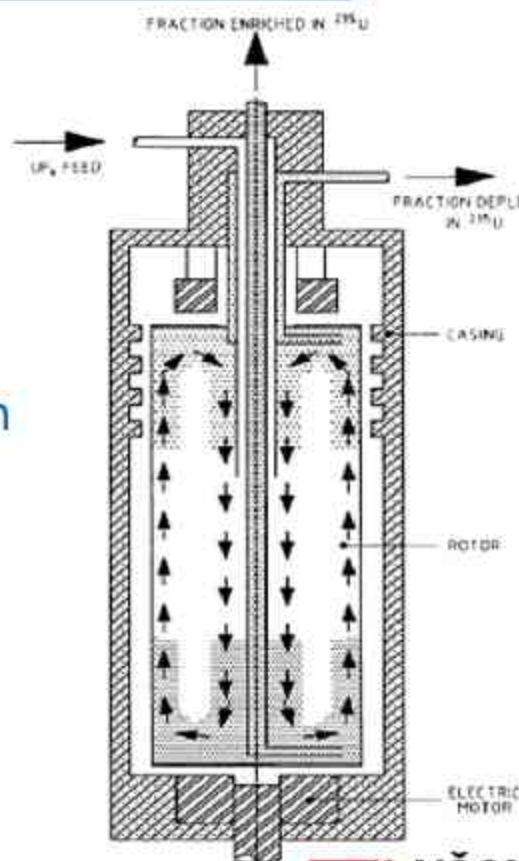
Podle: Guettaf, H.; Bedis, A.; Ferhat, K.; Hanou, K.; Bouchiha, D.; Yakoubi, K.; Ferrad, F., Concentration-Purification of Uranium from an Acid Leaching Solution. Physics Procedia 2009, 2 (3), 765-771.



Obohacování U



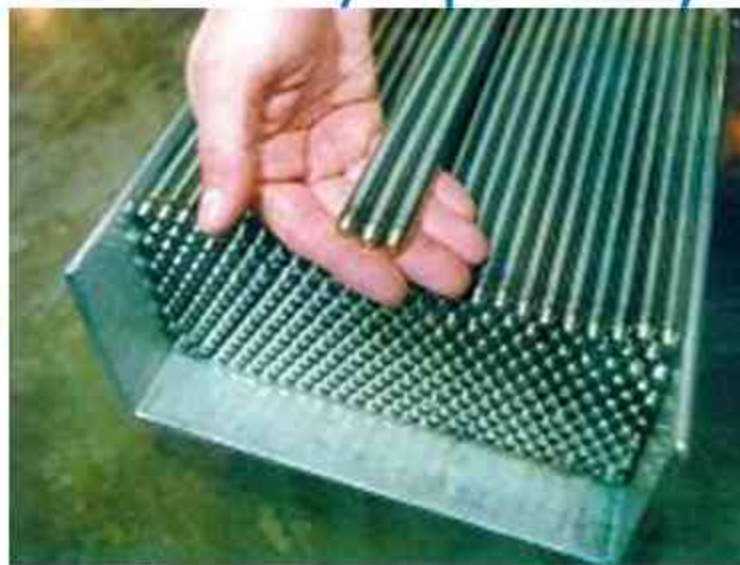
- Výchozí surovinou jsou většinou oxid uraničito-uranový $\text{UO}_2 \cdot 2\text{UO}_3$ nebo $(\text{NH}_4)_2\text{U}_2\text{O}_7$ které jsou pro svou barvu nazývány **yellow cake**
- Po převedení na fluorid uranový UF_6 je uran obohacován většinou v plynových odstředivkách
- Další způsoby obohacování jsou:
 - hmotnostní spektrometrie
 - semipermeabilní membrány
 - ionexy



Zdroj obrázku: Wikimedia Commons, Autor: U.S. NRC

Jaderné palivo

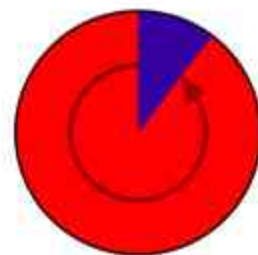
- Palivo na bázi oxidu uraničitého je obohaceno na zhruba 3-5% ^{235}U
- Pro palivo vnašich VVER reaktorech je to 4,25 % ^{235}U (energie $\sim 4 \cdot 10^6$ MJ/kg)
- Pelety paliva jsou uloženy v palivových proutcích pokrytých slitinami Zr legovanými Sn a Nb



Natural uranium
> 99.2% U-238
0.72% U-235



Low-enriched uranium
(reactor grade)
3-4% U-235

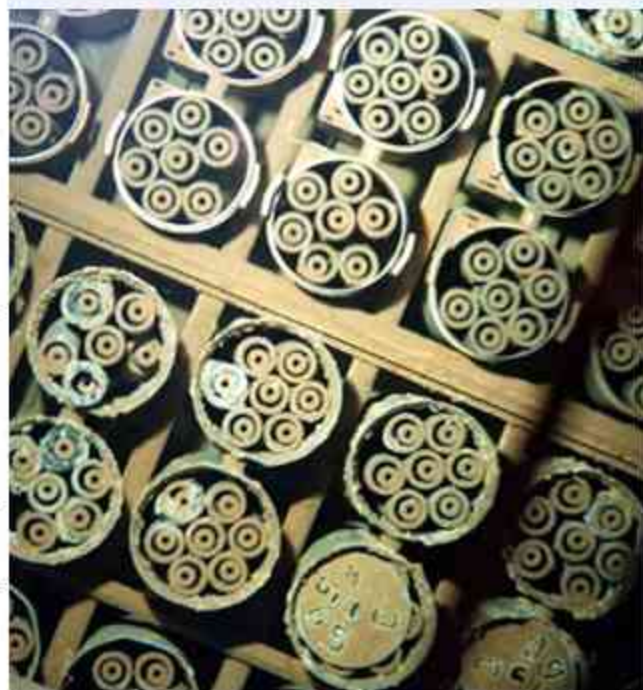


Highly enriched uranium
(weapons grade)
90% U-235

Zdroj: Wikipedia Commons, Autor: Fastfission

Zdroj: www.cez.cz

Vyhořelé ? palivo

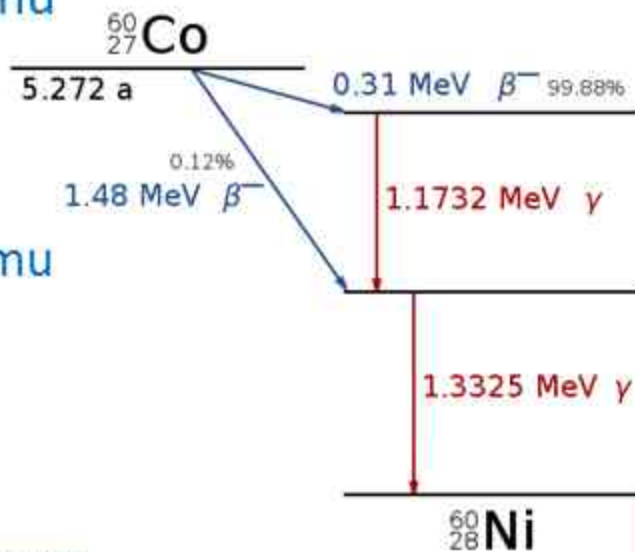


Zdroj: Wikipedia Commons, Autor: USDOE

- **Majoritní aktinoidy**
 - ^{238}U a ^{235}U (96%)
 - ^{239}Pu a ^{240}Pu (1%)
- **Minoritní aktinoidy**
(Np, Am, Cm, Cf)
- **Štěpné produkty (3%)**
Zr, Mo, Tc, Ru, Rh, Pd, Ag / I, Xe, Cs, Ba, La, Ce, Nd
Izotopy s dlouhým poločasem rozpadu ^{90}Sr , ^{137}Cs , ^{99}Tc a ^{129}I

Základní děje a pojmy

- Radioaktivní rozpad je obdobou reakce I. řádu
$$N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda t} \qquad t_{1/2} = \frac{\ln(2)}{\lambda} = \tau \cdot \ln(2)$$
 - Kde: λ je rozpadová konstanta, $t_{1/2}$ je **poločas rozpadu** a τ střední doba života
 - Při alfa rozpadu vzniká ${}^4_2\text{He}$, příklad ${}^{241}_{95}\text{Am} \xrightarrow{\alpha} {}^{237}_{93}\text{Np} + {}^4_2\text{He}$
 - Rozlišujeme β^- a β^+ rozpad vzniká elektron e^- a elektronové antineutrino $\bar{\nu}_e$ respektive pozitron e^+ a elektronové neutrino ν_e a mění se poměr protonů a neutronů
- ${}^{239}_{92}\text{U} \xrightarrow{\beta^-} {}^{239}_{93}\text{Np} + e^- + \bar{\nu}_e$
- ${}^{242}_{95}\text{Am} \xrightarrow{\beta^+} {}^{242}_{94}\text{Pu} + e^+ + \nu_e$
 - Gama záření vzniká přechodem atomu z excitovaného stavu do kterého se atom může dostat např. některým z výše uvedených způsobu rozpadu



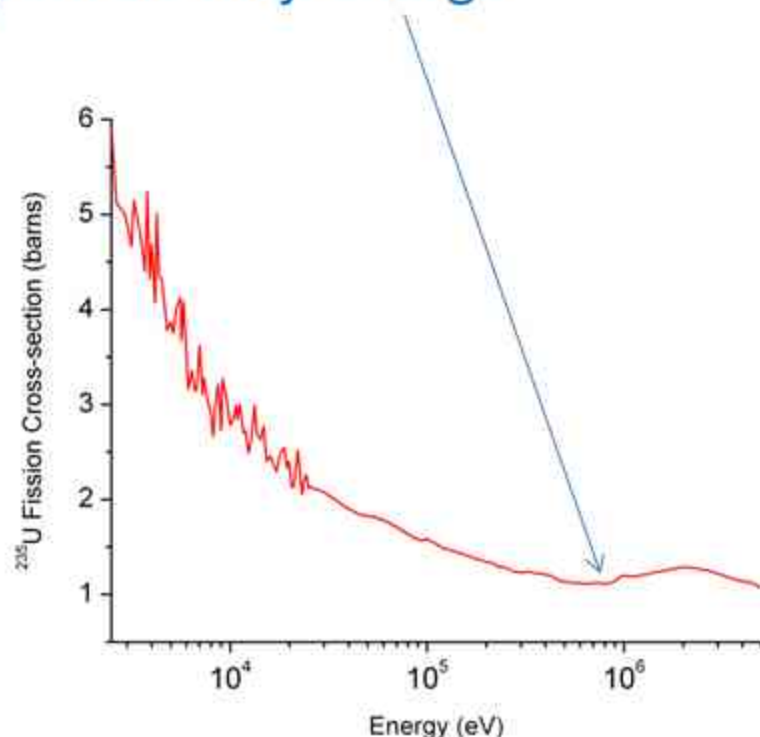
Zdroj obrázku: Wikipedia
Commons, Autor: Inductiveload

Role neutronů

- Pravděpodobnost štěpné reakce ^{235}U roste s klesající energií neutronů. Neutrony vznikající při štěpení ale mají energii řádově 10^6 eV (MeV)
- Pokud nemáme k dispozici vysoce obohacené palivo (rychlé reaktory) je nutné neutrony zpomalit pomocí **moderátoru** na energie **desetin eV** takovým neutronům se říká **tepelné neutrony**

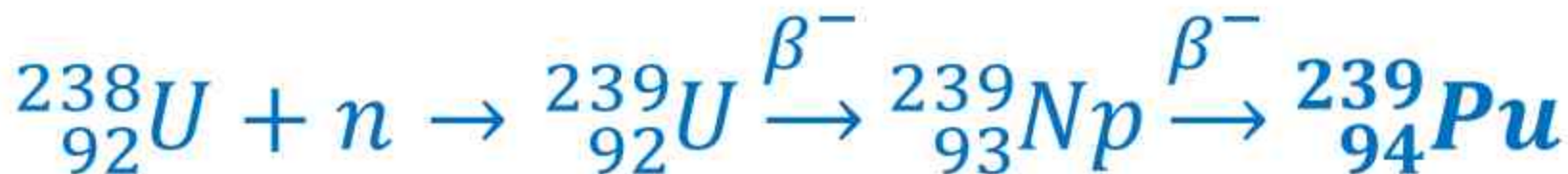


- Záchytem neutronů dochází také k transmutaci např. U na Pu – viz dále

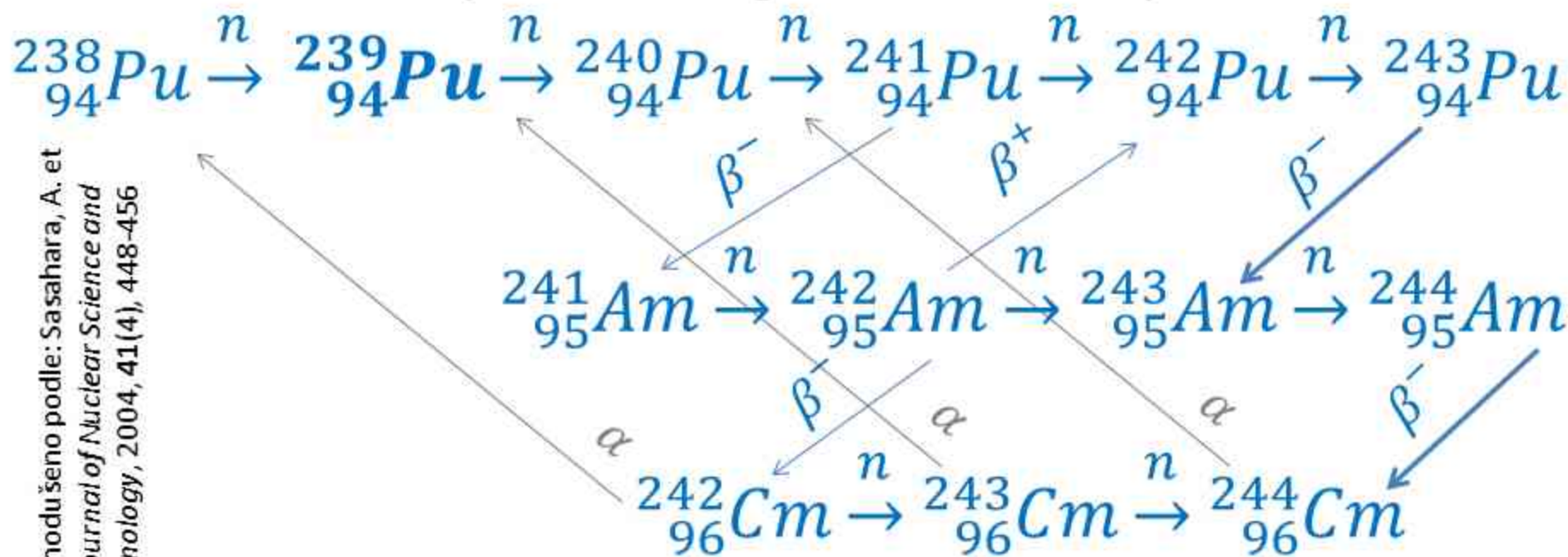


Zdroj obrázku: Wikipedia Commons,
Data: Los Alamos National Lab

Aktinoidy ve vyhořelém palivu



- Při delší kampani – energetické reaktory - ${}^{240}\text{Pu}$



Zjednodušeno podle: Sasahara, A. et al.: *Journal of Nuclear Science and Technology*, 2004, 41(4), 448-456

Přepracování vyhořelého paliva

- Původně výroba Pu pro vojenské účely – krátké kampaně pro vysoký výnos ^{239}Pu
- Výroba plutonia s podílem $^{240}\text{Pu} < 7\%$

Složení zbraňového Pu dle: Mitchell, P. I. et al.: Perturbation in the $^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ global fallout ratio in local sediments following the nuclear accidents at Thule (Greenland) and Palomares (Spain). *Sci Total Environ* **1997**, 202 (1-3), 147-153.

Zóna	Podíl z celkového obsahu Pu [%]			
	^{238}Pu	^{239}Pu	^{240}Pu	^{241}Pu
Palomares I-4	0.0094	94.4	5.3	0.34
Thule 1	0.0085	94.6	5.2	0.23
Thule 2-5	0.0053	96.7	3.2	0.13
Rocky Flats	0.04	93.3	6.0	0.58
Nevada Test Site	-	93.8	6.0	0.25
Chernaya Bay	-	97.0	2.9	0.12

Pu z energetických reaktorů

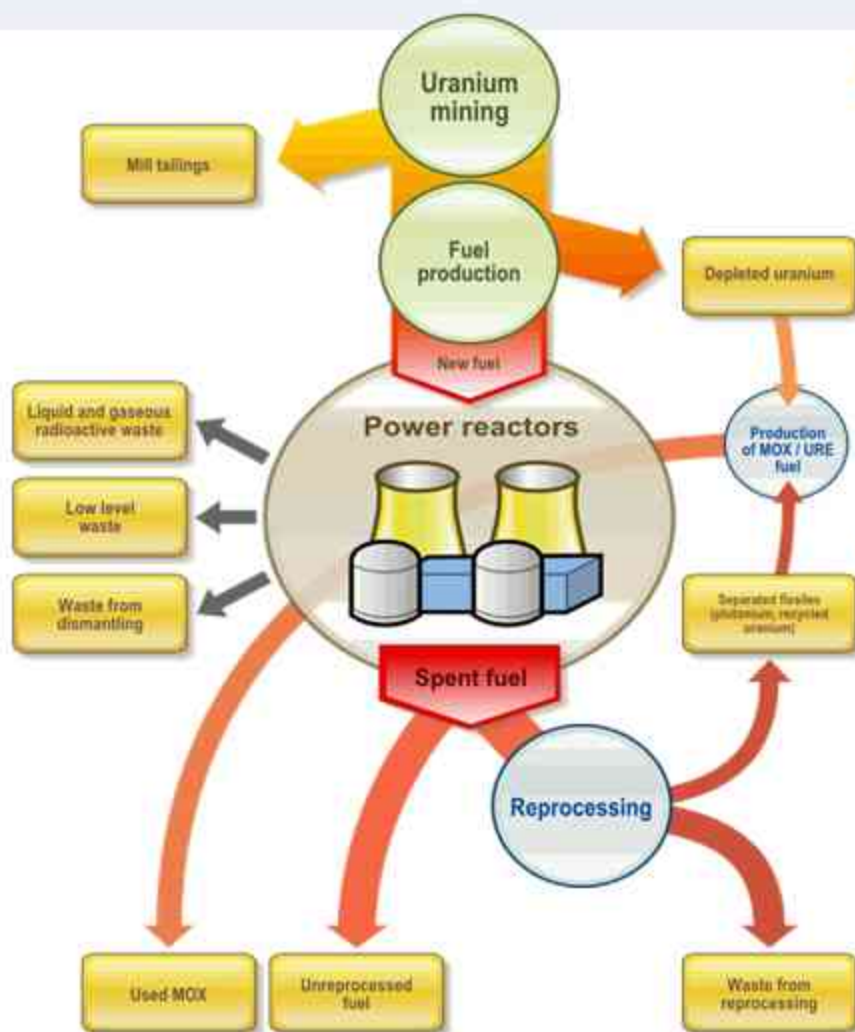
Složení Pu z varných reaktorů podle Nakano, Y.; Okubo, T., Plutonium isotopic composition of high burnup spent fuel discharged from light water reactors. *Annals of Nuclear Energy* **2011**, 38 (12), 2689-2697.

Reaktor	HB-BWR (70 GWd/t)			ABWR (45 GWd/t)			ABWR (45 GWd/t)		
Gadolinium	neobsaženo			obsaženo			neobsaženo		
Chlazení (roky)	0	5	10	0	5	10	0	5	10
Pu-238	4.4	4.6	4.5	2.3	2.4	2.4	2.3	2.4	2.4
Pu-239	48.9	50.4	51.7	47.7	49.3	50.5	47.6	49.3	50.5
Pu-240	25.2	26.0	26.8	28.4	29.1	29.9	28.6	29.2	30.0
Pu-241	13.8	11.1	8.9	13.5	10.8	8.7	13.4	10.7	8.6
Pu-242	7.7	7.9	8.1	8.1	8.3	8.5	8.1	8.3	8.5
Štěpitelné Pu	62.7	61.6	60.6	61.1	60.1	59.2	61.0	60.0	59.1

- Díky dlouhým kampaním obsahuje mnoho ^{240}Pu proto se nehodí k vojenským účelům ale lze jej dále použít jako štěpný materiál – palivo MOX

Přepřacování vyhořelého paliva

- Přepřacování vyhořelého jaderného paliva
 - oddělíme využitelné izotopy (U, Pu – proces PUREX) a problematické izotopy (Sr, Cs) (další partitioning)
 - zvýšíme využití energie paliva
 - zjednodušíme trvalé ukládání jaderného odpadu
- Získané Pu lze využít pro přípravu paliva **MOX**
 - MixedOxide PuO_2/UO_2
 - 5-7% Pu ve směsi
 - lze využít ochuzený (depleted) uran
 - lze využít ^{239}Pu z vyřazených jaderných hlavic



Zdroj obrázku: Wikimedia Commons, Autor: Ilmari Karonen, Nicolas Lardot

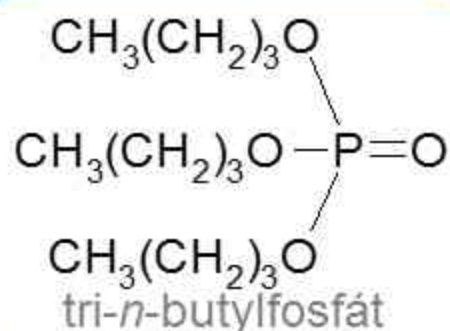
Hanford Site

první reaktor na produkci plutonia na světě



Zdroj obrázku: Wikimedia Commons
Author : US DoE, Image N1D0069267

PUREX (Plutonium - Uranium Extraction)

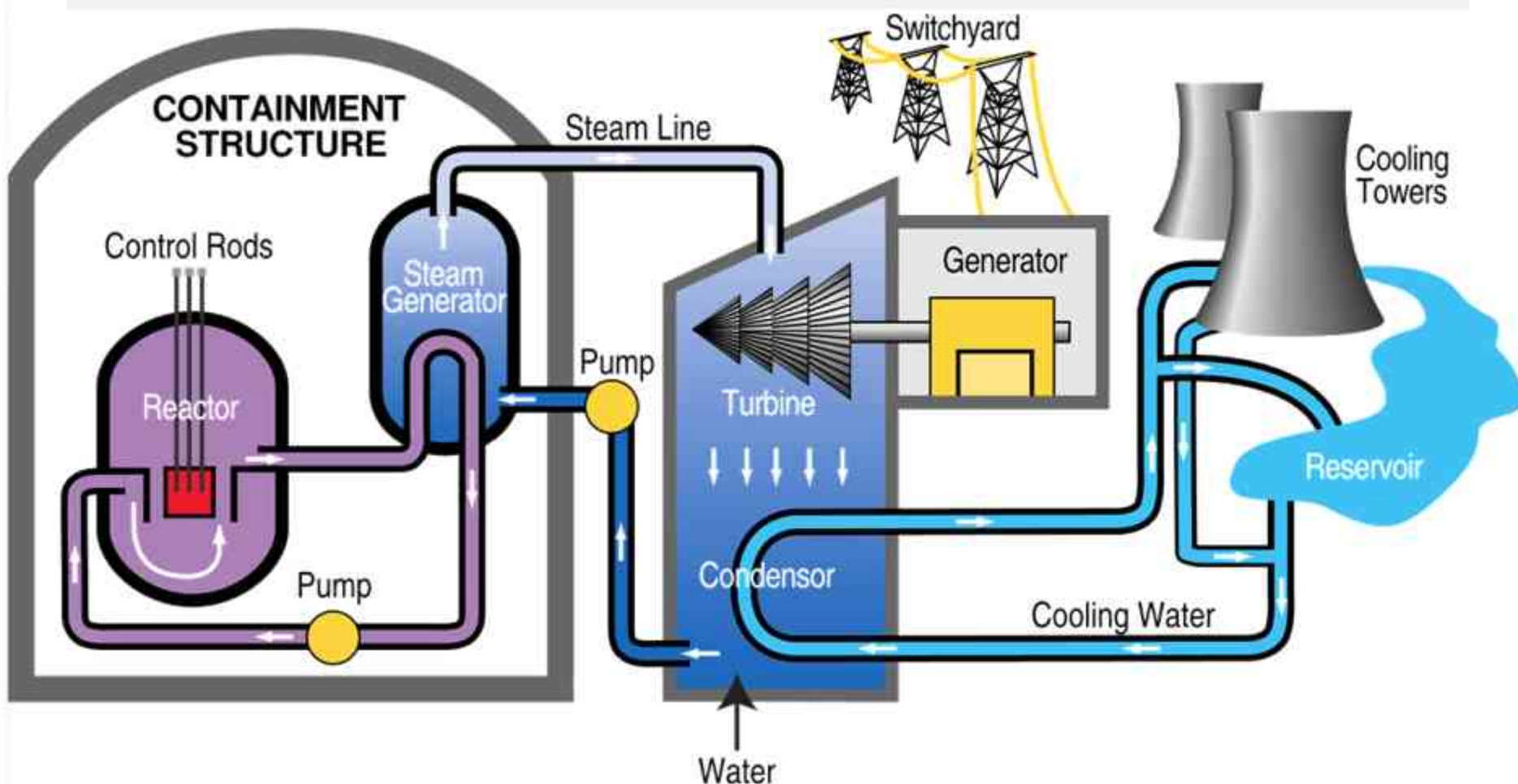


- ❑ Rozpuštění paliva v cca. 6M HNO₃ popř. za přispění oxidačních činidel Ag(II), Ce(IV)
- ❑ Dokonalá filtrace k eliminaci susp. částic
- ❑ Extrakce neutrálních komplexů U a Pu do 30% TBP v lehkém petroleji (kerosinu)
- ❑ Vytěsnění U a Pu z TPB možné pouhým snížením koncentrace HNO₃. V případě Pu je možné i redukční vytěsnění

Jaderná energetika

- Reaktory VVER (PWR)
- Reaktory BWR
- Reaktory III a IV generace

JE s tlakovodními reaktory (PWR)



Zdroj obrázku: Wikimedia Commons, Autor: Tennessee Valley Authority

Temelín – 2xVVER 1000/V320

V reaktoru je 92 tun paliva UO_2 (4,25 % ^{235}U)

- jednou za rok se vyměňuje zhruba čtvrtina - pětina paliva
- Palivový cyklus se prodloužil (ze 4 na 5 let u EDU)
- růst úrovně vyhoření paliva z 30GWd/t U (80-90léta) na současných 55GWd/t U (výkonový efekt)

163 palivových souborů
z 312 palivových proutků
61 regulačních tyčí
Reaktor má 4 parogenerátory

Parametry vody PO

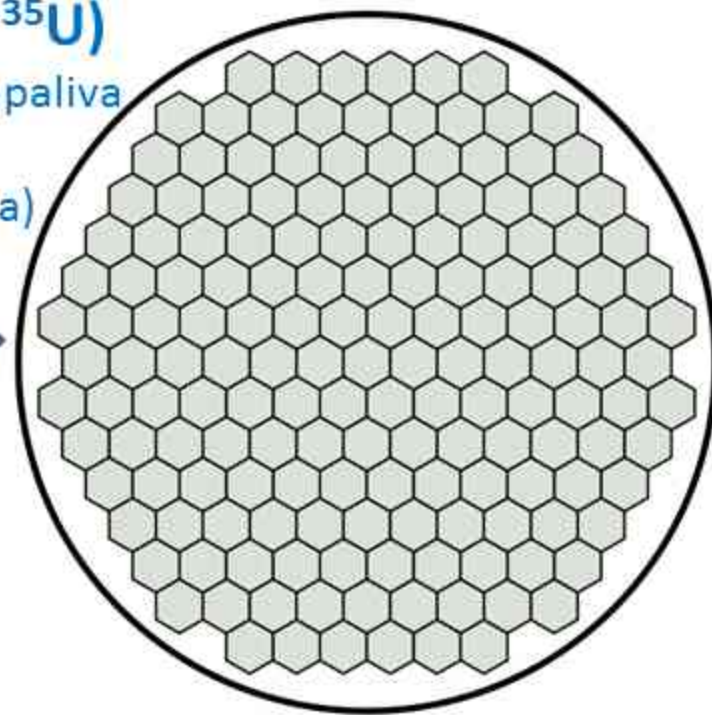
15 Mpa / 290-320 °C

337 m³ chladiva ohřev 290 - 320 °C

Parametry páry SO

6,3 Mpa / 278 °C

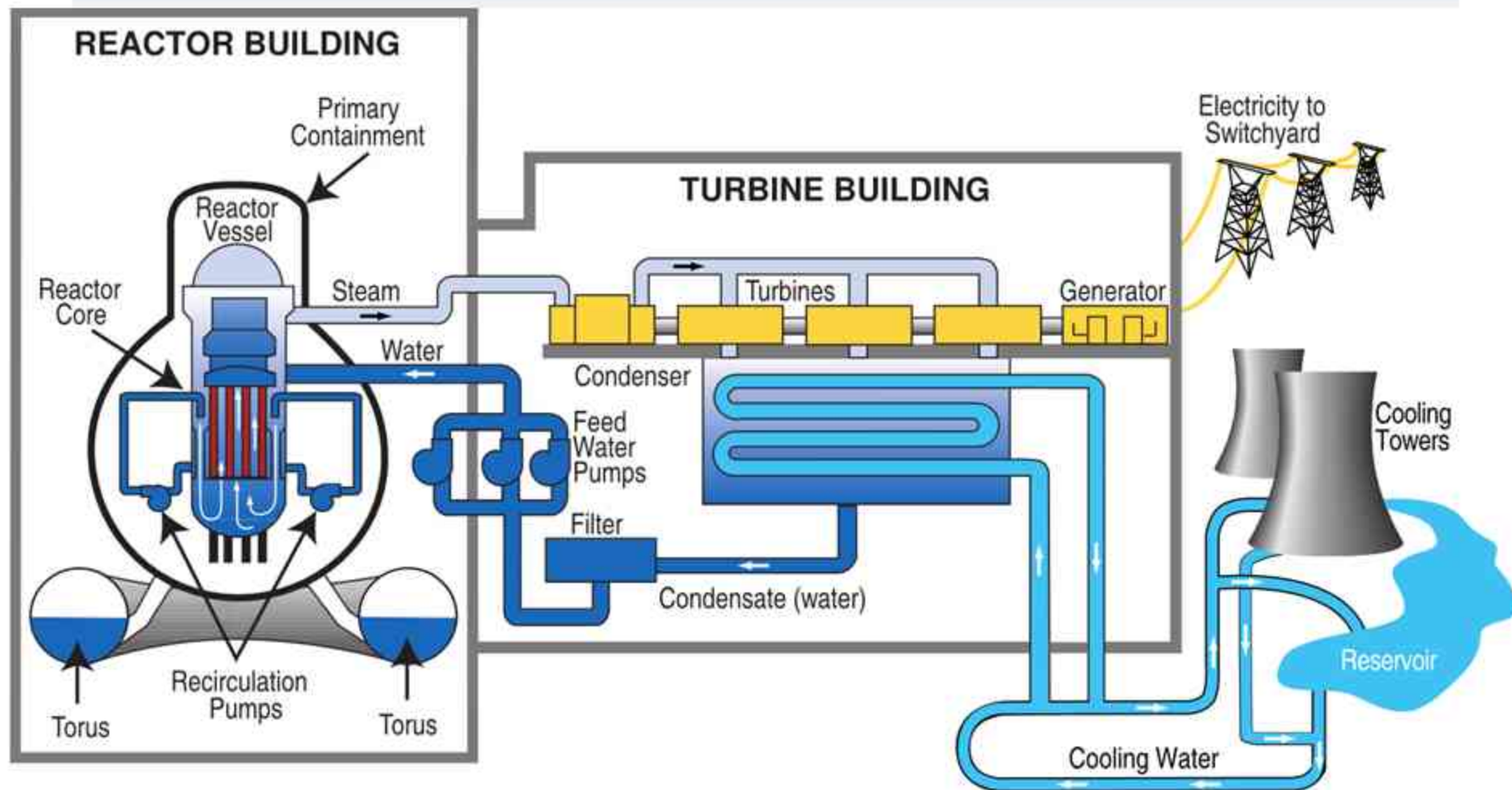
4 x 1470 t/h



BBЭР-1000

Zdroj obrázku: Wikimedia Commons,
Autor: Das steinerne Herz

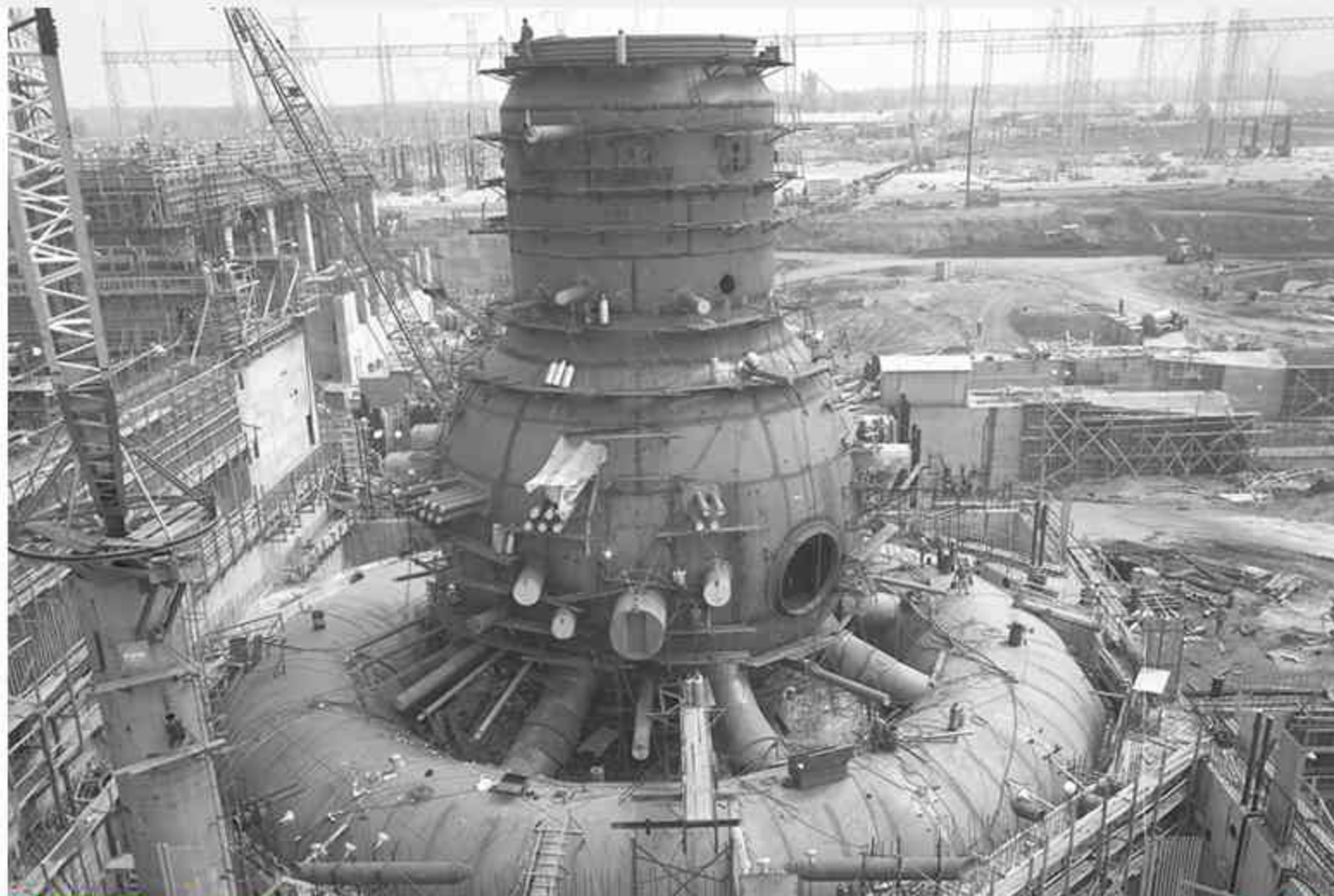
JE s varnými reaktory (BWR)



Zdroj obrázku: Wikimedia Commons, Autor: Tennessee Valley Authority

BWR reaktor (1065 MWe)

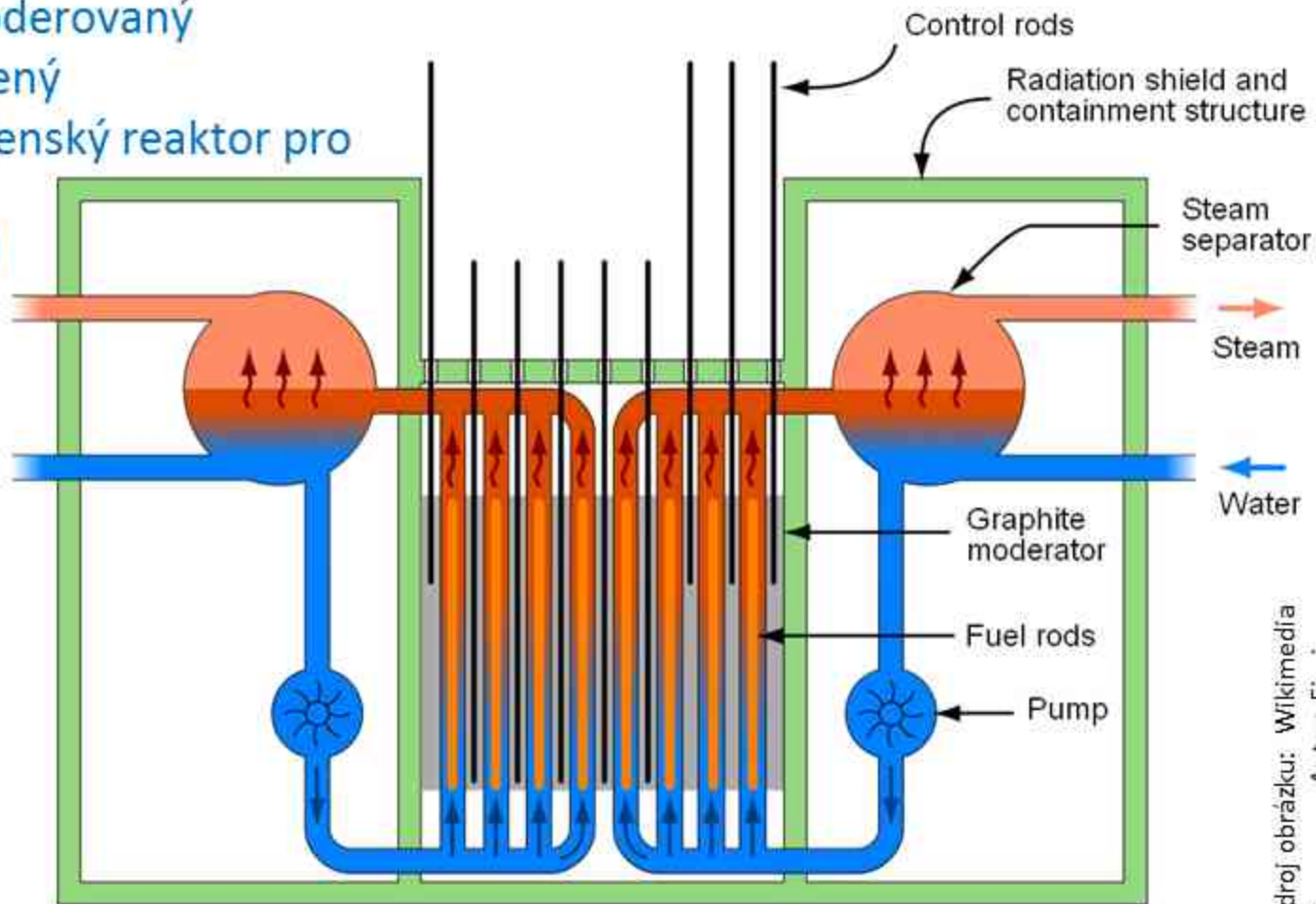
Zdroj obrázku: Wikimedia Commons, Autor: Tennessee Valley Authority



RBMK-1000

Реактор Большой Мощности Канальный

- Grafitem moderovaný
- Vodou chlazený
- Původně vojenský reaktor pro produkci Pu
- viz Černobyl



Zdroj obrázku: Wikimedia
Commons. Autor: Fireice

Reaktory III generace

- Pokračuje III(+) generace např.
- ABWR - Japonsko
- AHWR – Th - Indie
- CANDU (+) – Kanada
- EPR (+)
- EU-ABWR (+)

Reaktory moderované D₂O

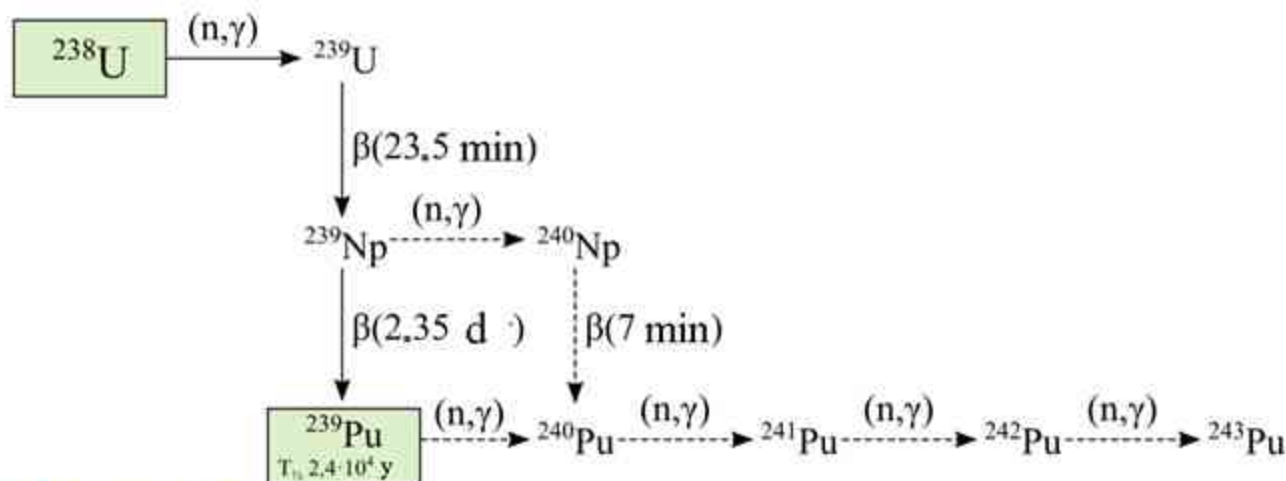
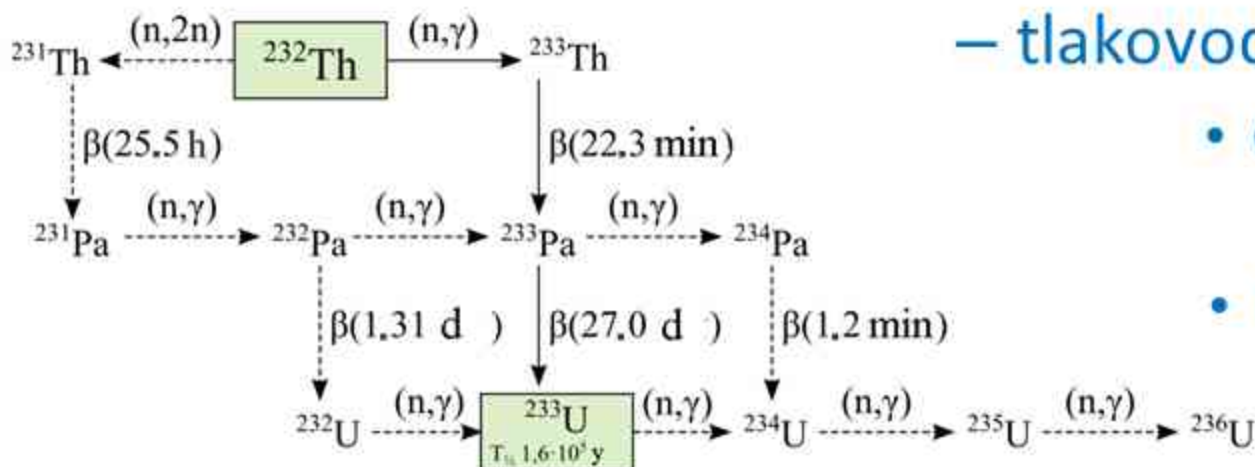
– tlakovodní reaktory

- CANDU (²³⁸U)

– vzniká ²³⁹Pu

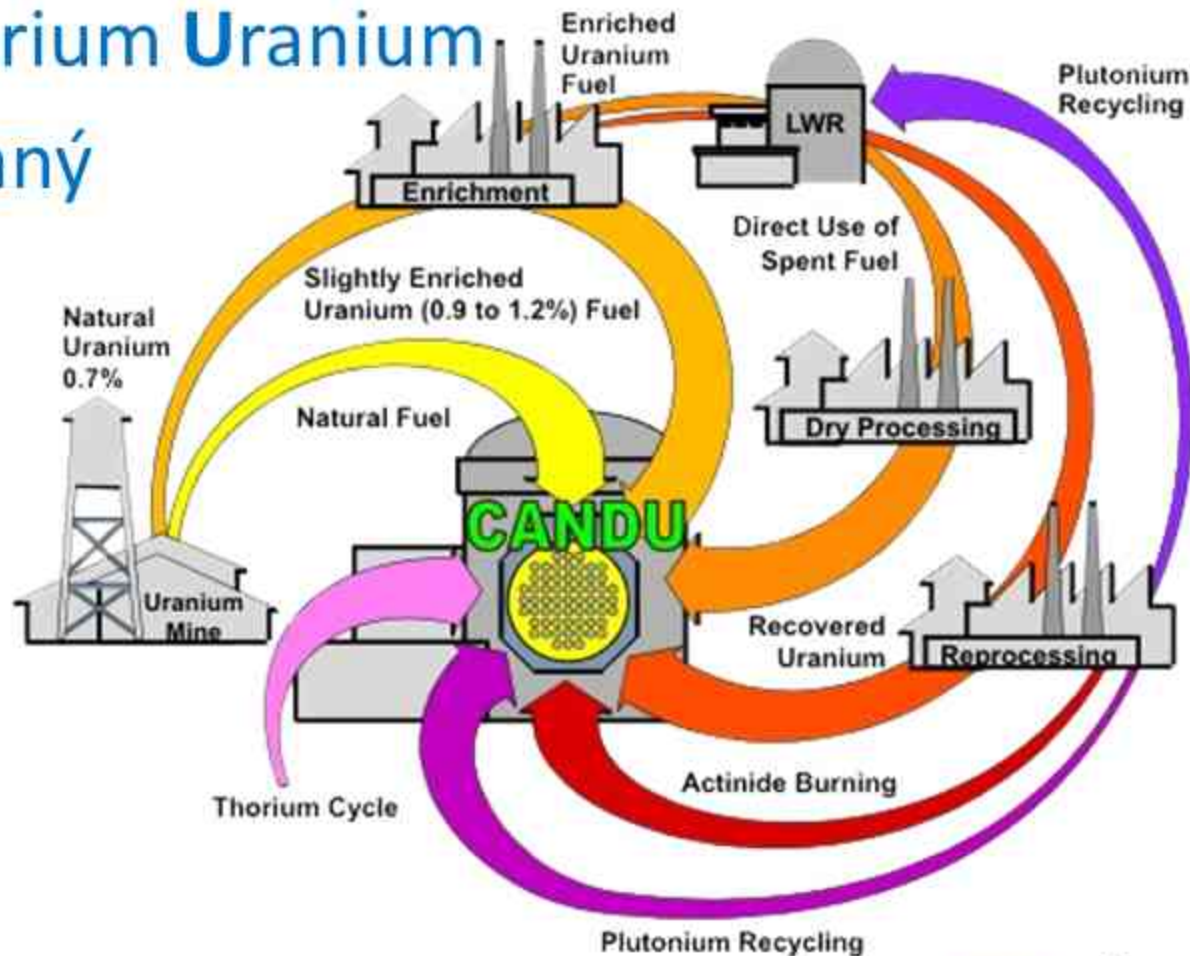
- PHWR (²³²Th)

– vzniká ²³³U



CANDU

- **C**Anada **D**euterium **U**ranium
- D₂O moderovaný
- Cyklus ²³⁸U



Zdroj obrázku: Wikimedia Commons, Autor: Whitlock

Reaktory IV generace

Klasické (**moderované**) reaktory

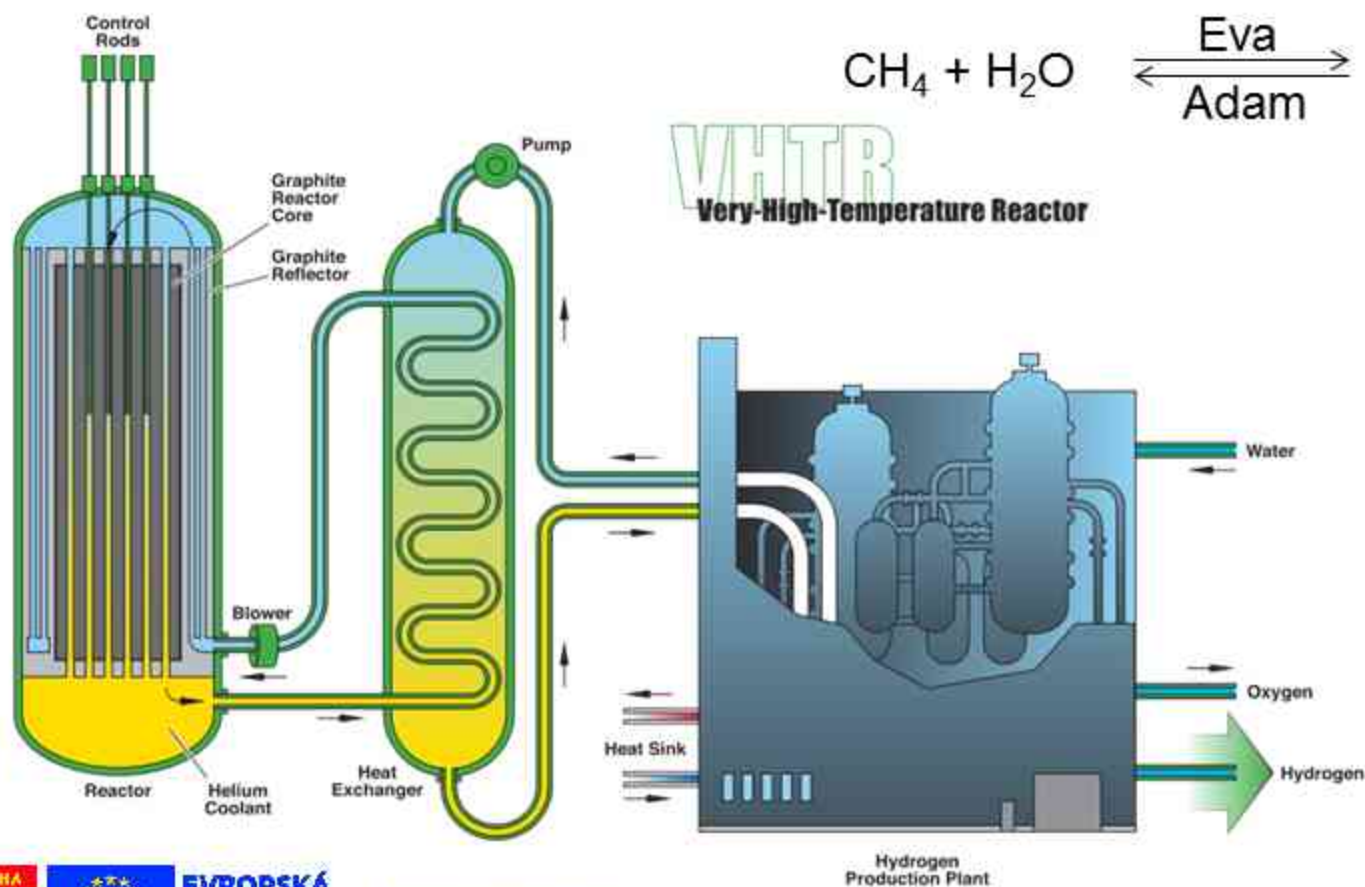
- Velmi vysokoteplotní reaktor (VHTR) – **Grafit**
- Superkritický vodou chlazený reaktor (SCWR) – **H₂O**
- Molten-salt reaktor (MSR) - **Grafit**

Rychlé reaktory

- Plynem chlazený rychlý reaktor (GFR)
- Sodíkem chlazený rychlý reaktor (SFR)
- Olovem chlazený rychlý reaktor (LFR)

VHTR reaktor

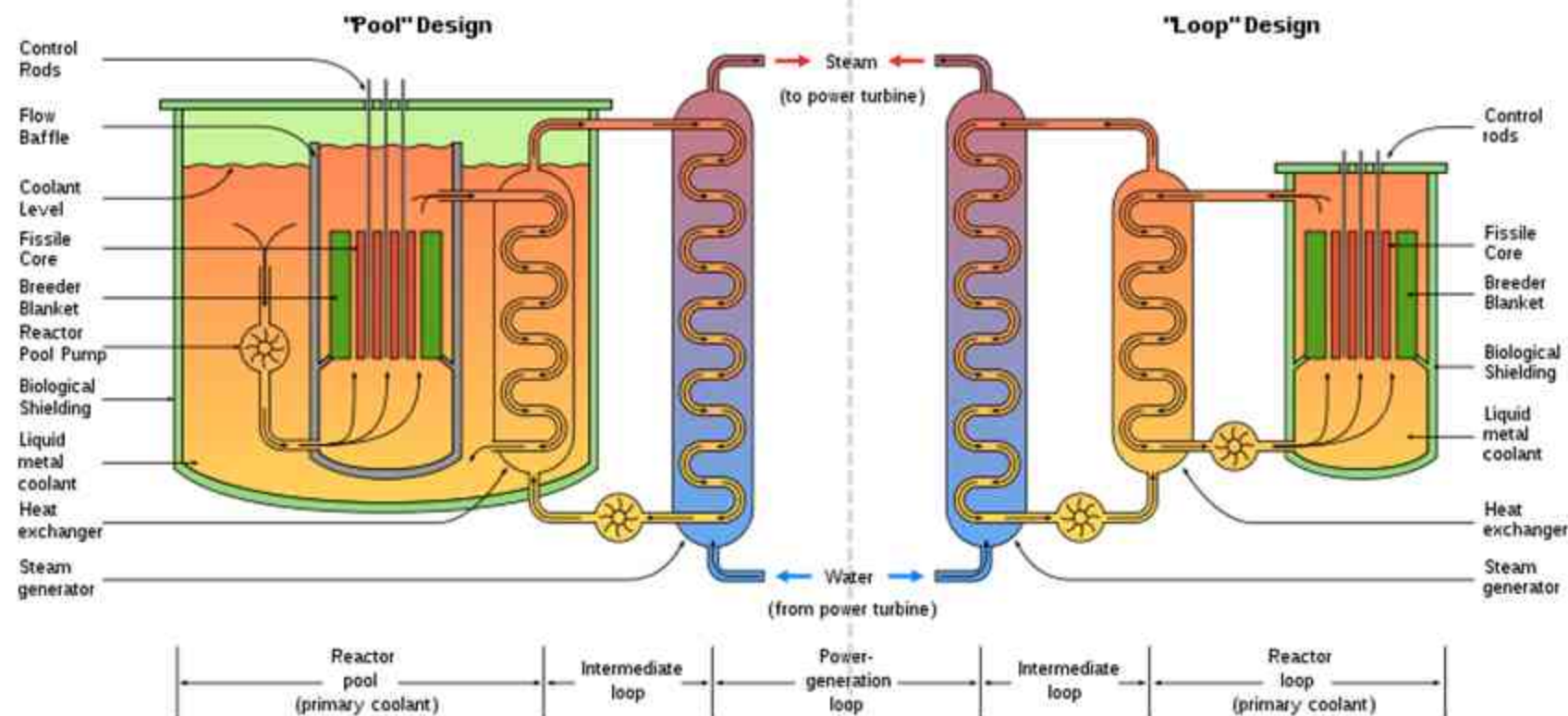
- Zdroj tepla pro chemické výroby např. vodíku nebo proces Adam/Eva
- Chlazení héliem – zkoumá i ÚJV ve spolupráci s VŠCHT



Rychlé množivé reaktory (Fast Breeder)

- Produkují více paliva než spotřebovávají
- ^{238}U , ^{232}Th

Liquid Metal cooled Fast Breeder Reactors (LMFBR)

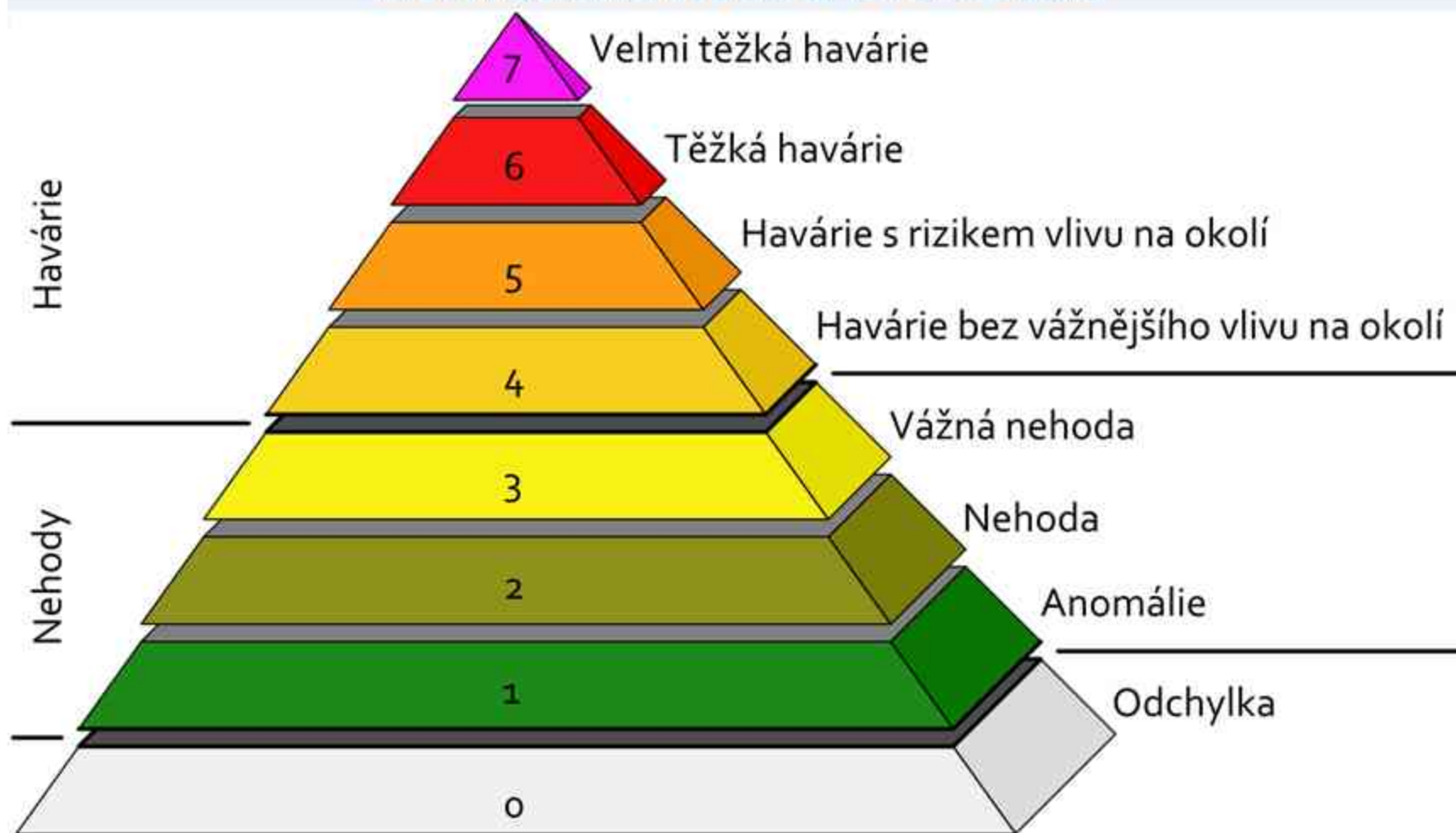


Jaderné havárie

- Černobyl
- Fukushima

Stupnice INES podle IAEA

International Nuclear Event Scale



Zdroj obrázku: Wikimedia Commons. Autor: Silver Spoon

Černobyl

- reaktory typu RBMK-1000
- 1982 – natavení jádra 1. bloku
- **1986 – 26.4. havárie 4. bloku**
- Podle závěrů IEAE bylo uvolněno asi 5200 PBq tj. $5,2 \times 10^{18}$ Bq



Zdroj obrázku: Wikimedia Commons Autor: Sovětské úřady

Fukushima I

- Celkem 6 BWR bloků
- Následek vlny **tsunami** kterou vyvolalo zemětřesení z **11. 3. 2011**
- Reaktory 1, 2 a 3 byly v provozu
 - reaktor 4 byl odstaven
 - do reaktorů 5 a 6 bylo zaváženo palivo
- Dle odhadů TEPCO bylo uvolněno asi 900 PBq tj. **9×10^{17} Bq**



Zdroj: Wikimedia Commons, Autor: Japan Ministry of Land, Infrastructure and Transport (1975), retuš: Qurren

Zdroj obrázku: Wikipedia Commons, Autor: Digital Globe



Fukushima I
(14:46 SCRAM bloků 1,2 a 3, 50% AC blackout)
15:41 (AC/DC blackout)

© 2011 MIRC/JHA
Image © 2011 DigitalGlobe
© 2011 Europa Technologies
© 2011 ZENRIN

14:46 JST

153 km

Zdroj obrázku: Google Earth (podklady viz dole)
TEPCO press release 3,
Zdroj času: <http://www.tepco.co.jp/en/press/corp-com/release/11031103-e.html>

Selhání chlazení – meltdown

Temperature [K]	Interactions	Damages
3120	Melting of fuel pellets (UO_2)	Total
2980	Melting of oxidized cladding (ZrO_2)	Extended
2810	Formation of (U, Zr) O liquid ceramic phase ₂	
2620	Melting of control rod absorber material (BC) ₄	
2245	Melting of Zr(O)	
2170	Formation of Zr(O) and UO eutectic ₂	
2130	Melting of fuel cladding and cans (Zircaloy)	
1815	Acceleration of $\text{Zr-H}_2\text{O}$ reaction ₂	
1720	Melting of control rod blades (Stainless Steel)	
1650	Melting of Inconel fuel spacers	
1500	Inconel-Zircaloy liquifaction	
1500	Control rod melting ($\text{BC-Stainless Steel}$ eutectic) ₄	Local
1400	$\text{Zr-H}_2\text{O}$ reactions ₂	

Zdroj: Wikipedia Commons, Autor: NH2501