

# **Jaderná energetika (JE)**

Pavel Zácha  
2015-03

## **11. Základní typy současných energetických reaktorů**

**Základní dělení**

**Přehled používaných typů konstrukcí energetických reaktorů**

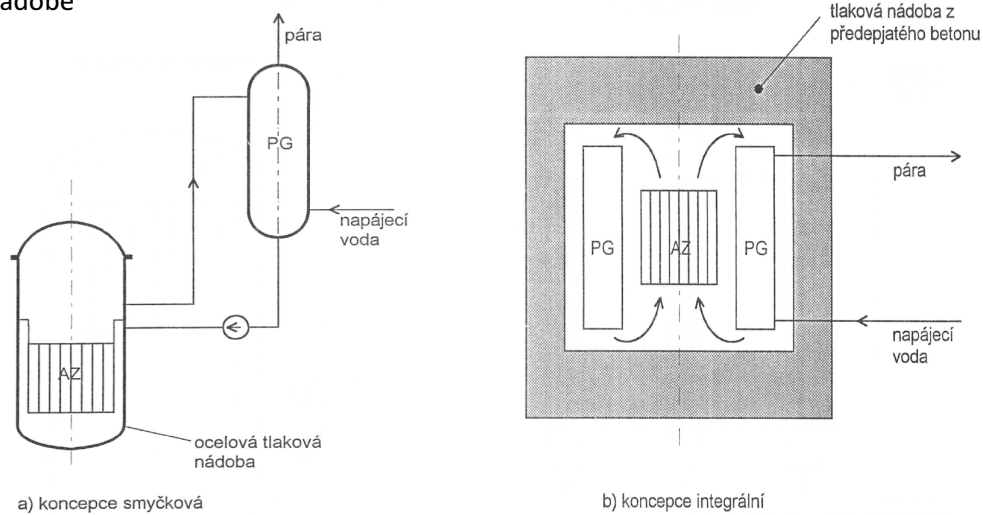
**Provozované komerční jaderné bloky**

**Jaderné bloky v pokročilém vývoji**

**Časová osa výstavby energetických reaktorů**

## 11.1 Základní dělení

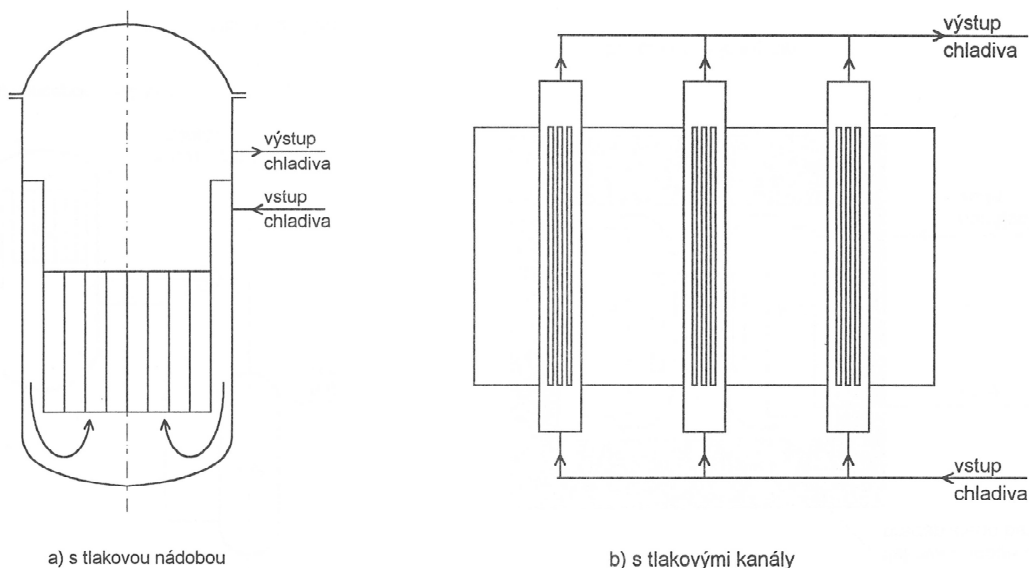
- podle způsobu rozmístění paliva v AZ
  - homogenní – práškové nebo tekuté palivo, homogenně rozptýleno v AZ
  - heterogenní – palivo ve formě tyčí, trubek apod. (s povlakem)
- podle konstrukce I.O.
  - **smyčková** - chladivo z reaktorové nádoby proudí několika větvemi/smyčkami do výměníku
  - **integrální** - kdy aktivní zóna spolu s tepelným výměníkem jsou umístěny v téže reaktorové nádobě



Obr. 11.2. Principiální koncepční uspořádání jaderné výroby páry

## 11.1 Základní dělení

- podle uspořádání paliva (u heterogenních reaktorů)
  - **reaktor s tlakovou nádobou** - aktivní zóna a celý systém řízení reaktoru jsou umístěny v tlakové nádobě, která snáší potřebný tlak
  - **reaktor kanálového typu** - každý palivový článek je umístěn ve vlastní tlakové trubce
  - **beztlakové provedení** – AZ v nádrži se sodíkem



Obr. 11.1. Principiální koncepční uspořádání reaktoru

## 11.1 Základní dělení

- podle změny skupenství chladiva (je-li chladivem  $H_2O$ , či  $D_2O$ )
  - **varný reaktor** - v reaktoru dochází k varu a výrobě páry
  - **tlakovodní reaktor** - reaktor pracuje s vodou v kapalném skupenství
- podle způsobu výměny paliva
  - **kampaňová výměna paliva** – tj. při odstaveném reaktoru (zpravidla u reaktorů s tlakovou nádobou)
  - **nepřetržitá výměna paliva** – tj. za provozu (zejména reaktory s tlakovými kanály)

## 11.1 Základní dělení

### Kolik je tedy konstrukčních variant?

**stovky**, celé stovky variant... ale nereálných

- nelze např. chladit rychlý reaktor vodou, chladit  $H_2O$  palivo s přírodním uranem...

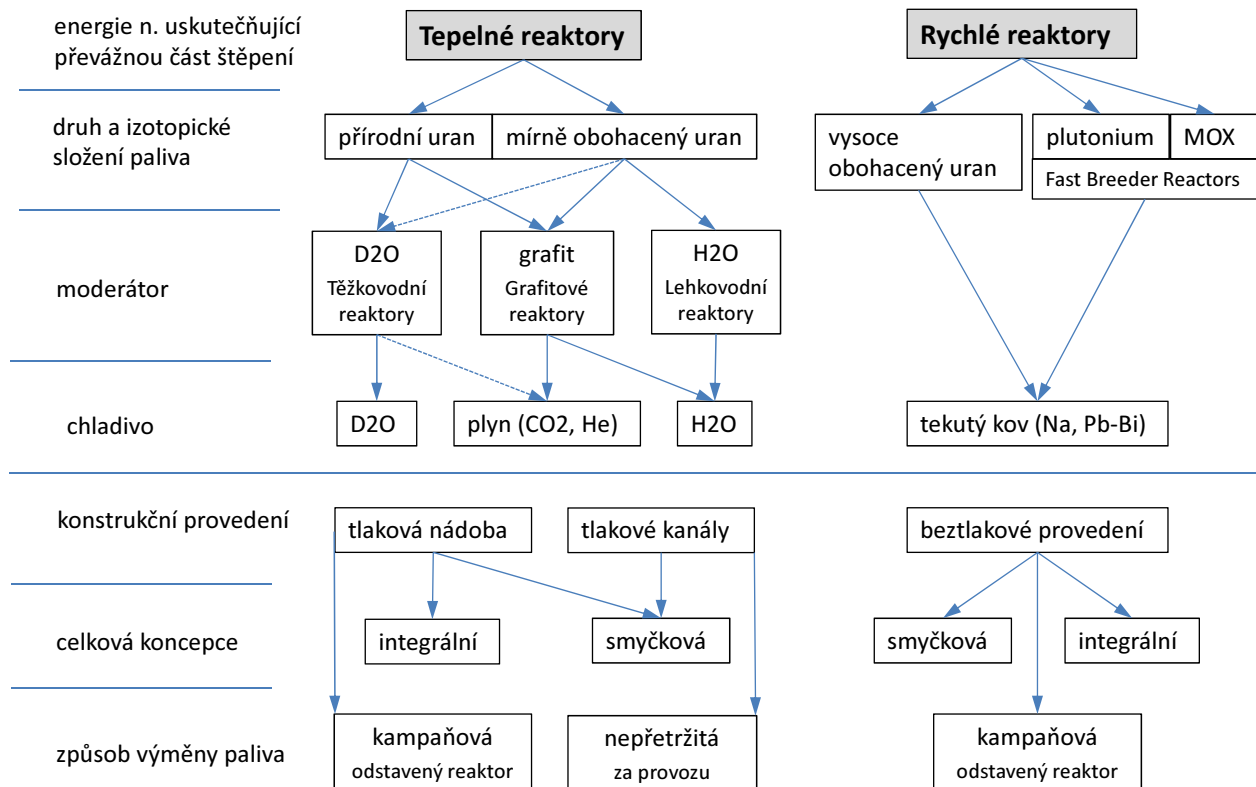
**desítky** variant... prototypů, které se neosvědčily

- československá A-1 ( $U235-D_2O-CO_2$ )
- anglické, kanadské či japonské SGHWR ( $U235-D_2O-vroucí H_2O$ )
- ...

**několik** variant... se prosadilo do komerční výroby

a **několik** variant... je perspektivních

## 11.1 Základní dělení



## 11.2 Přehled používaných typů konstrukcí energetických reaktorů

Tab.11.3. Reaktory na přírodní (nebo velmi málo obohacený) uran (opakovaně komerčně se prosadily jen MAGNOX a CANDU)

moderátor	chlادivo	označení	země vedoucí vývoj	firemní označení (ev. lokalita)	palivo (povlak)	konstrukční provedení	výměna paliva	poznámka
grafitové	CO <sub>2</sub>	GGCR	Anglie Francie	MAGNOX	kov. U (Mg-Be)	tlaková nádoba	kontinuální	Velmi napjatá neutronová bilance diktuje celou koncepci. Dvouúčelové-výroba el.energie a Pu. Prosadily se pro opakovanou průmyslovou výrobu.
(méně napjatá neutronová bilance, více možností)	CO <sub>2</sub>	HWGCR	Českosl. a býv. SSSR	A - 1 (Jaslovské Bohunice)	kov.U (Mg-Be)	tlaková nádoba	kontinuální	Prototypová JE (150MW). Po havárii, která vážně poškodila reaktor, byl další vývoj zastaven. Byl připravován projekt bloku o výkonu 400 MW.
			Švýcarsko	Lucens	kov.U (Mg-Be)	tlakové kanály (Zr)	kontinuální	Prototyp o tepelném výkonu 30 MW, umístěný v podzemní jeskyni. Po havárii s poškozením paliva byl další vývoj zastaven.
			Francie	EL - 4	UO <sub>2</sub> (Be-ocel)	tlakové kanály (Zr)	kontinuální	Záměr vyvinout nosné trubky z Be se nezdařil. U prototypového reaktoru bylo nutno použít ocel => mírně obohacený uran. Proto byl další vývoj zastaven.
	D <sub>2</sub> O	PHWR	SRN	Siemens	UO <sub>2</sub> (Zr)	tlaková nádoba	kontinuální	Ve SRN se pro průmyslovou výstavbu neprosadily. Průmyslová výstavba dvou energetických bloků byla realizována v Argentíně (JE Atucha).
			Kanada	CANDU	UO <sub>2</sub> (Zr)	tlakové kanály vodorovné	kontinuální včetně průchodu paliva reaktorem	Prosadily se pro průmyslovou opakovanou výstavbu jak v Kanadě, tak pro export (Indie, Pakistán, Argentina, Jižní Korea, Rumunsko). Konkurence pro PWR.
			Švédsko	Marviken	UO <sub>2</sub> (Zr)	tlaková nádoba	kontinuální	Vzhledem k nepříznivým regulač. vlastnostem nebyl realizovaný prototyp připuštěn do provozu. Využívá se jako mezinárodní výzkum. centrum.
vařící se H <sub>2</sub> O	SGHWR	Kanada Anglie Japonsko	Gentily Winfrith Fugen	UO <sub>2</sub> (Zr)	tlakové kanály (Zr)	kontinuální	Vyžaduje mírně obohacený uran. Proto vývoj v Kanadě zastaven. V Anglii neobstál v konkurenci s PWR. V Japonsku vývoj pokračuje - palivo je směs přírodního uranu a plutonia.	

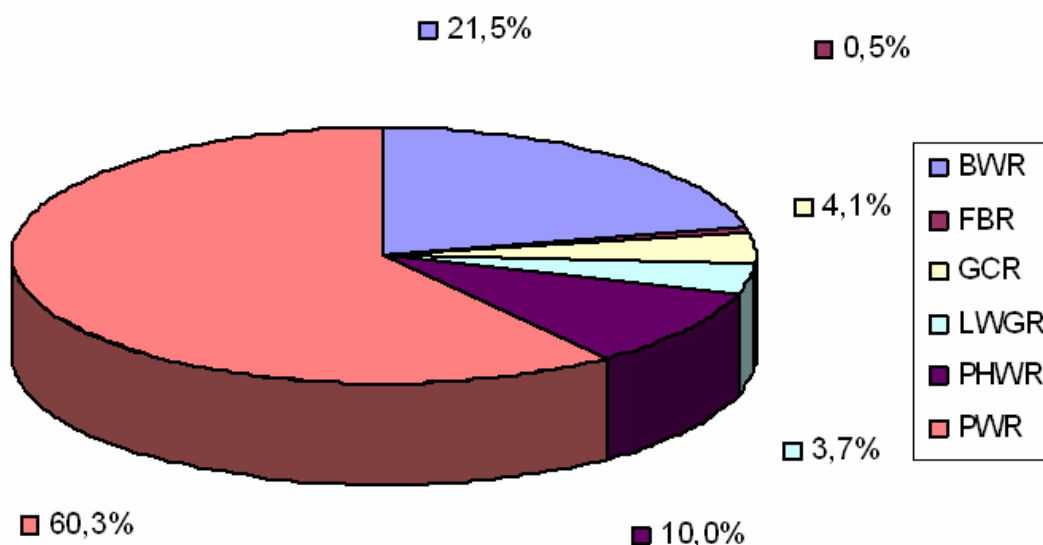
## 11.2 Přehled používaných typů konstrukcí energetických reaktorů

Tab.11.4. Reaktory na obohacený uran (na tepelných neutronech)

moderátor	chladiivo	označení	země vedoucí vývoj	firma (označení)	palivo (povlak)	konstrukční provedení	Výměna paliva	Poznámka
lehkovodní	H <sub>2</sub> O	PWR	USA	Westinghouse	UO <sub>2</sub> (Zr)	tlaková nádoba	kampaňová	Charakteristická hustá mříž paliva v moderátoru, která předurčuje celkovou koncepci a konstrukci reaktoru (moderátor musí být zároveň chladiivem, není možné provedení s tlakovými kanály), která se vyznačuje poměrnou jednoduchostí a výraznou kompaktností. Nejrozšířenější typ reaktoru v řadě zemí.
	tlakovodní	VVER	býv. SSSR		UO <sub>2</sub> (Zr)			
	vařící se H <sub>2</sub> O varné	BWR	USA	General Electric	UO <sub>2</sub> (Zr)		Obdobné charakteristiky jako tlakovodní. Umožňuje tzv. jednookruhové uspořádání, tj. bez parního generátoru - má řadu výhod, ale i nevýhody. Druhé místo za PWR.	
grafitové	vařící se H <sub>2</sub> O varné	SGGR	býv. SSSR	(RBMK)	UO <sub>2</sub> (Zr)	tlakové kanály	kontinuální	Umožňuje realizovat varný reaktor v kanál. provedení. Průmyslová výstavba jen v býv.SSSR. Koncepce obdobná jako u SGHWR - kladný parní koef.reaktivity (Černobyľ). Neúspěch.
	CO <sub>2</sub>	AGR	Anglie		UO <sub>2</sub> (ocel)	tlaková nádoba a integrální provedení	kontinuální	Uvolnil všechna neutronové fyzikální omezení typu MAGNOX. Parní turbíny s konvenčními parametry páry = vysoká $\eta$ . Vývoj a omezená prům. výstavba pouze v Anglii. Neúspěch.
	He	HTGR vysokoteplotní	USA	(Fort St.Vrain)	obalené částice paliva (grafit)		kampaňová	Další vývoj AGR. Vedle výroby el. energie s moderním parním cyklem rozšiřuje aplikace jaderné energetiky i pro výrobu vysokopotenciálního tepla pro průmyslové účely. Vysoká inherentní bezpečnost
			SRN	(HTTR) thorium			kontinuální	

## 11.3 Provozované komerční jaderné bloky

### Rozdělení podle typu reaktoru v % počtu kusů



(stav k roku 2007)

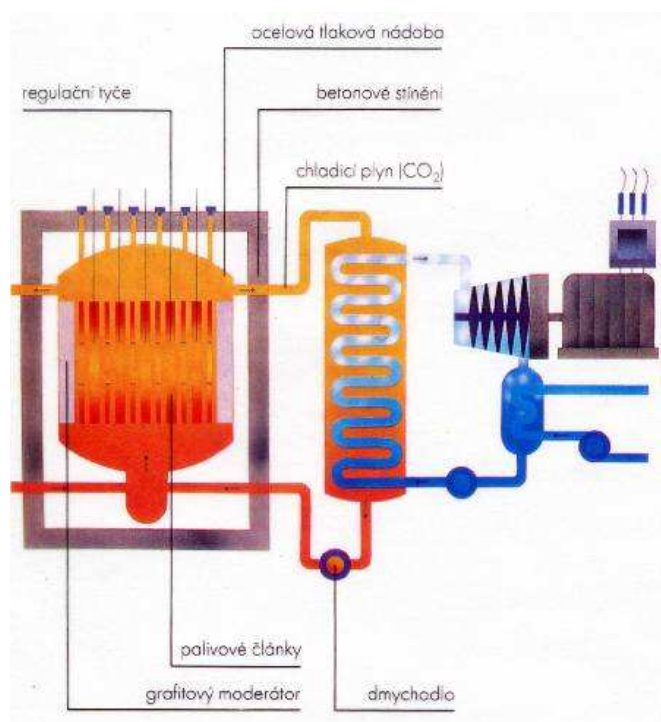
## 11.3 Provozované komerční jaderné bloky

### MAGNOX

- GGCR (Gas Cooled, Graphite Moderated Reactor)
- 1. generace GGCR
- používán ve Velké Británii a v Japonsku
- palivem je přírodní kovový uran ve formě tyčí pokrytých oxidem magnezia
  - anglicky magnesium oxid = **Magnox**
- AZ se skládá z grafitových bloků (moderátor), kterými prochází několik tisíc kanálů, do každého se umísťuje několik palivových tyčí
- AZ je uzavřena v kulové ocelové nádobě s betonovým stíněním
- kontinuální výměna paliva
- chladivem je CO<sub>2</sub>, který se po ohřátí vede do PG, kde předá teplo vodě sekundárního okruhu

## 11.3 Provozované komerční jaderné bloky

### MAGNOX, 600/400 MWe



palivo:  
přírodní uran (0,7% <sup>235</sup>U)

rozměry aktivní zóny:  
14 m průměr a 8 m výška

tlak CO<sub>2</sub>:  
2,75 MPa

teplota CO<sub>2</sub> na výstupu reaktoru:  
400°C

účinnost elektrárny:  
25,8%

aktivní zóna:  
595 t U

## 11.3 Provozované komerční jaderné bloky

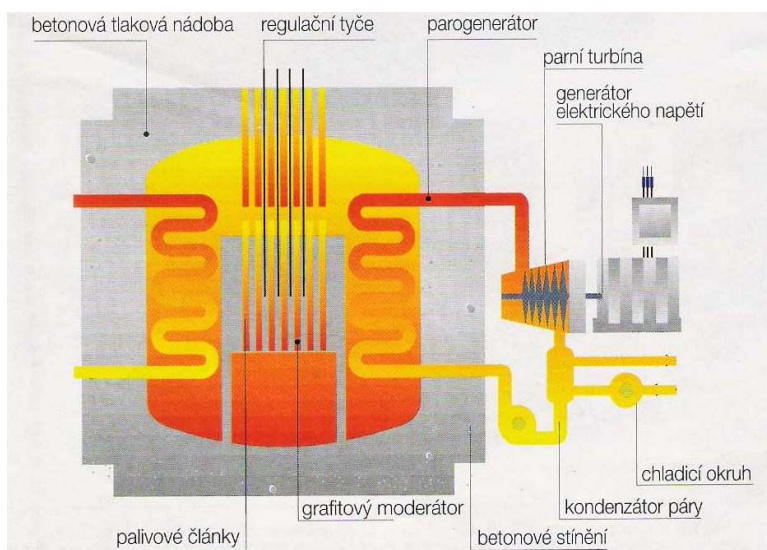
### AGR

- Advanced Gas Cooled, Graphite Moderated Reactor
- 2. generace GGCR
- používá se výhradně ve Velké Británii, kde pracuje 14 takových reaktorů
- palivem je U obohacený izotopem  $^{235}\text{U}$  ve formě  $\text{UO}_2$
- max. teplota paliva  $1500^\circ\text{C}$
- pokrytí: nerez ocel
- moderátor: grafit
- chladivo:  $\text{CO}_2$



## 11.3 Provozované komerční jaderné bloky

### AGR, 600 MWe



palivo:

obohacení izotopem  $\text{U}^{235}$  na 2,3%

rozměry aktivní zóny:

9,1 m průměr a 8,5 m výška

tlak  $\text{CO}_2$ :

5,5 MPa

teplota  $\text{CO}_2$  na výstupu reaktoru:

$650^\circ\text{C}$

účinnost elektrárny:

42%

## 11.3 Provozované komerční jaderné bloky

### CANDU

- tlakový, těžkou vodou chlazený a moderovaný reaktor (PHWR)
- byl vyvinut v Kanadě a exportován do Indie, Pákistánu, Argentiny, Koreje a Rumunska
- palivem je přírodní uran ve formě  $UO_2$
- AZ je v nádobě tvaru ležatého válce s vodorovnými průduchy pro tlakové trubky
- těžkovodní moderátor v nádobě musí být chlazen, neboť moderační schopnost se snižuje se zvyšující se teplotou
- těžká voda z prvního chladicího okruhu předává své teplo obyčejné vodě v parogenerátoru, odkud se vede pára na turbínu

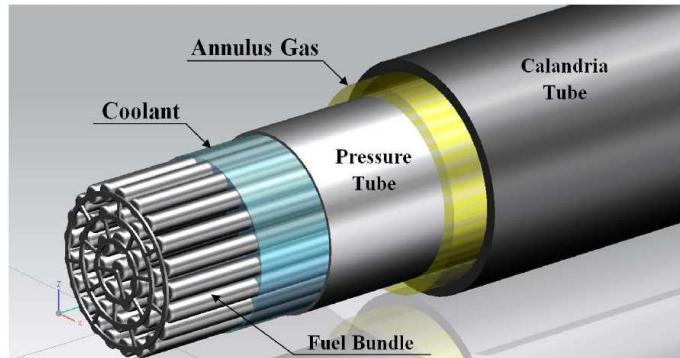
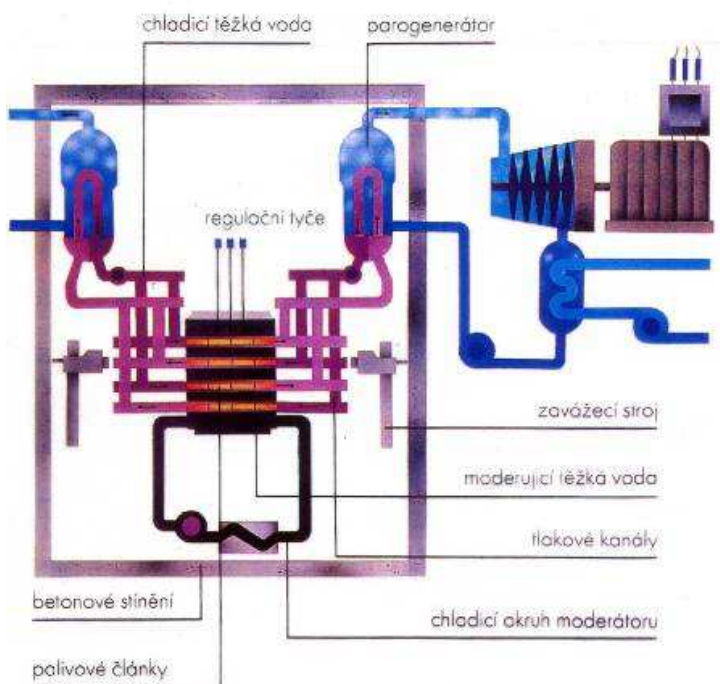


Figure 1.8. Current CANDU-reactor fuel channel design (figure is courtesy of W. Peiman, UOIT).

## 11.3 Provozované komerční jaderné bloky

### CANDU, 600 MWe



palivo:  
přírodní uran (0,7%  $U^{235}$ )

rozměry aktivní zóny:  
7 m průměr a 5,9 m výška

tlak  $D_2O$ :  
9,3 MPa

teplota  $D_2O$  na výstupu reaktoru:  
305°C

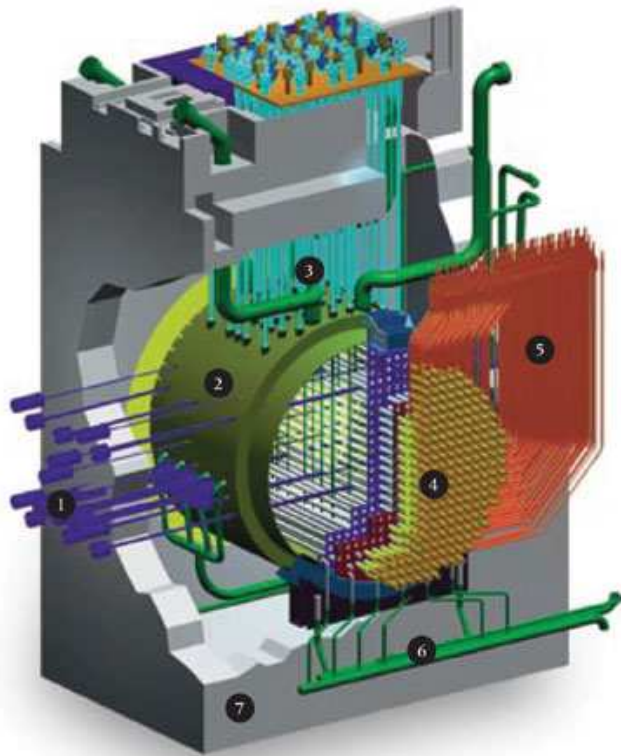
účinnost elektrárny:  
30,1%

aktivní zóna:  
117 t  $UO_2$



## 11.3 Provozované komerční jaderné bloky

### CANDU, 600 MWe



1. Emergency shut down system
2. Calandria
3. Control rods
4. Fuel channels and end fittings
5. Inlet feeder pipes
6. Moderator inlets
7. Reactor vault

## 11.3 Provozované komerční jaderné bloky

### PWR / VVER + BWR

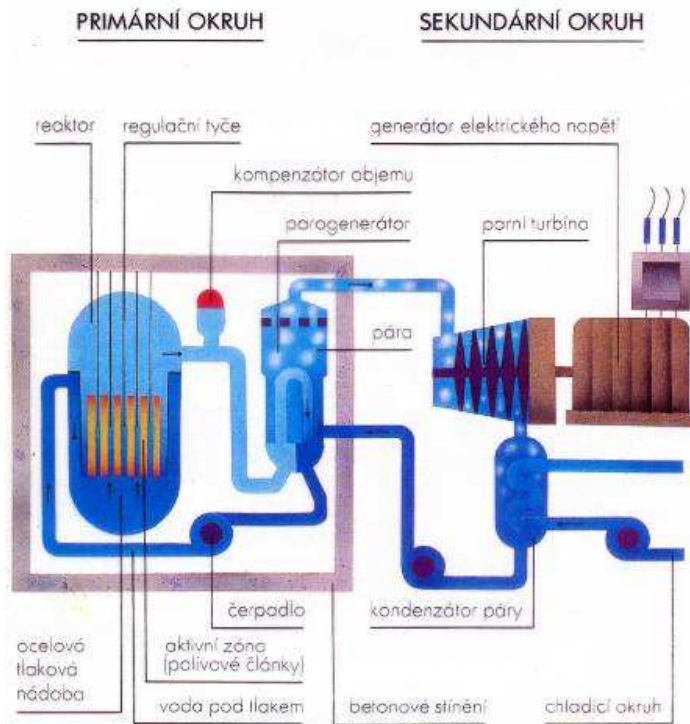
- od 70 let 20. století základní typ elektráren, především PWR
- nutnost použít obohacený U, či Pu jako palivo
- existují 2 základní typy:
  - tlakovodní reaktor (PWR) (1957 – Shippingport, USA)
    - PWR - Pressurized light-Water moderated and cooled Reactor
    - VVER - Vodo-Vodjanoj Energetičeskij Reaktor (ruský typ)
  - varný reaktor (BWR) – pára vzniká přímo v AZ (1960 – Dresden, USA). Páru lze použít pro pohon turbíny
    - BWR - Boiling Water Reactor
- výborné autoregulační vlastnosti (vysoký záporný teplotní koeficient reaktivity)
- jsou prostorově kompaktní
- technickým limitem není ocelová tlaková nádoba, ale teplota povlaků palivových článků z hlediska dlouhodobých mechanických vlastností a koroze
  - užívají se materiály na bázi Zr (T musí být menší než 380 °C)

[https://cs.wikipedia.org/wiki/Tlakovodn%C3%AD\\_reaktor](https://cs.wikipedia.org/wiki/Tlakovodn%C3%AD_reaktor)

[https://cs.wikipedia.org/wiki/Jadern%C3%A1\\_elektr%C3%A1rna\\_Shippingport](https://cs.wikipedia.org/wiki/Jadern%C3%A1_elektr%C3%A1rna_Shippingport)

## 11.3 Provozované komerční jaderné bloky

### PWR / VVER, 1000 MWe



palivo:  
obohacení izotopem U235 na  
3,1% až 4,4%

rozměry aktivní zóny:  
3 m průměr a 3,5 m výška

tlak H<sub>2</sub>O:  
15,7 MPa

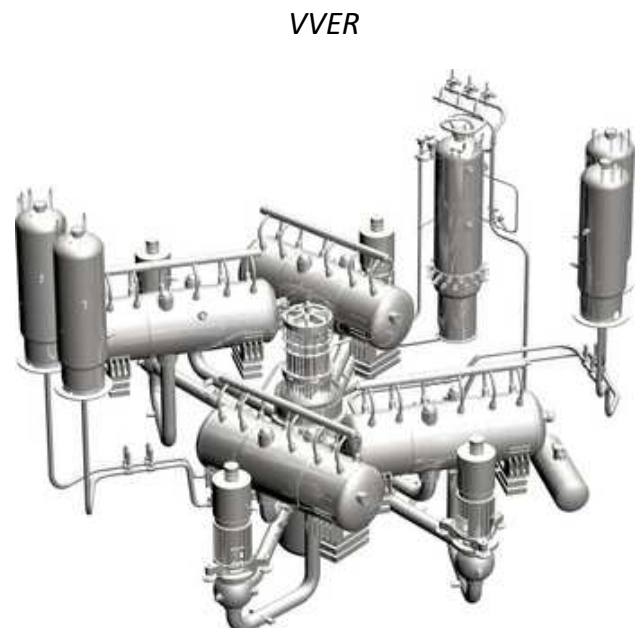
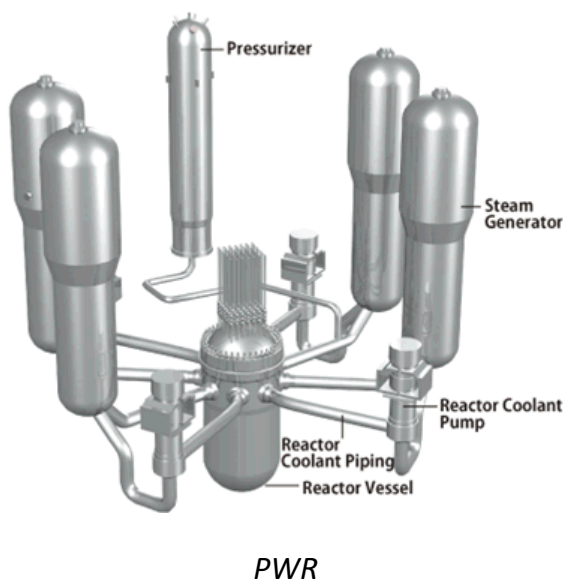
teplota H<sub>2</sub>O na výstupu reaktoru:  
324°C

účinnost elektrárny:  
32,7%

aktivní zóna:  
60-80 t UO<sub>2</sub>

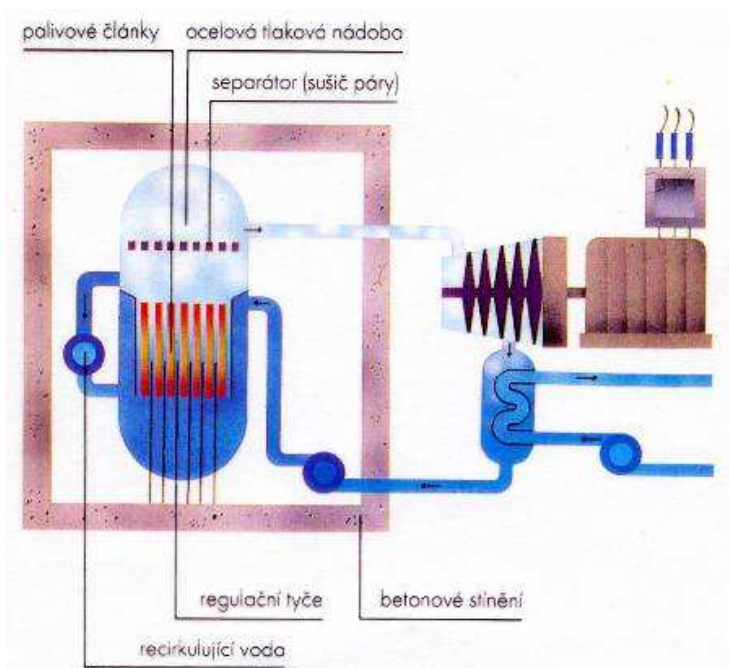
## 11.3 Provozované komerční jaderné bloky

### PWR / VVER, 1000 MWe



## 11.3 Provozované komerční jaderné bloky

### BWR, 1000 MWe



palivo:

obohacení izotopem U235 na  
2,1% až 2,6%

rozměry aktivní zóny:

4,5 m průměr a 3,7 m výška

tlak H<sub>2</sub>O:

7 MPa

teplota páry na výstupu z reaktoru:

286°C

účinnost elektrárny:

33,3%

aktivní zóna:

122 t UO<sub>2</sub>

## 11.3 Provozované komerční jaderné bloky

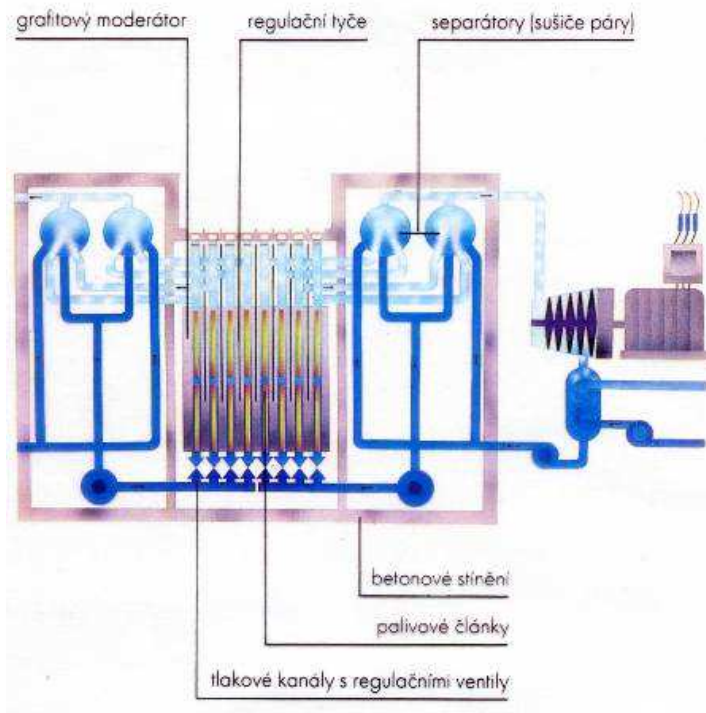
### RBMK

**RBMK** - Reaktor Bolšoj Moščnosti Kanalnyj

- používá se výhradně na území bývalého SSSR
- tohoto typu reaktor 1. jaderné elektrárny v Obninsku i reaktor v Černobylu
- další reaktory tohoto typu se již nestaví
- palivem je mírně obohacený uran ve formě UO<sub>2</sub>
- palivové tyče jsou vloženy v tlakových kanálech, kudy proudí chladivo - lehká voda
- v tlakových kanálech (cca 1600 ks) přímo vzniká pára, která po oddělení vlhkosti pohání turbínu
- moderátorem je grafit, který obklopuje kanály
- elektrárna je tedy jednookruhová
- v Černobylu nebyla ochranná obálka a ani systém řízení reaktoru neodpovídal bezpečnostním požadavkům IAEA
- tzv. inherentní nestabilita při některých (zakázaných) provozních stavech

## 11.3 Provozované komerční jaderné bloky

### RBMK, 1000 MWe



palivo:  
obohacení izotopem U235 na  
1,8%

rozměry aktivní zóny:  
11,8 m průměr a 7 m výška  
počet kanálů: 1693

tlak H<sub>2</sub>O:  
6,9 MPa

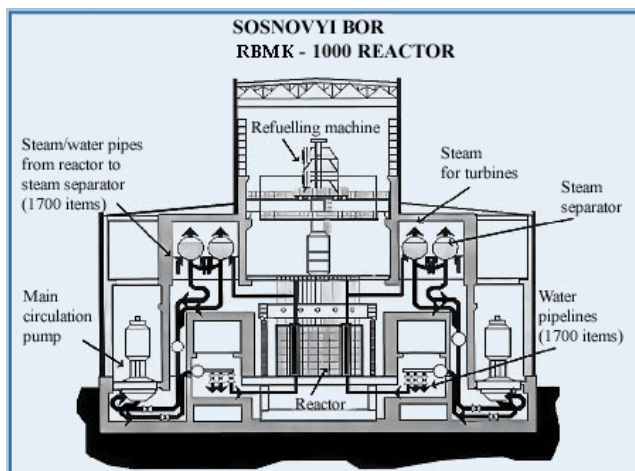
teplota parovodní směsi na  
výstupu z reaktoru:  
284°C

účinnost elektrárny:  
31,3%

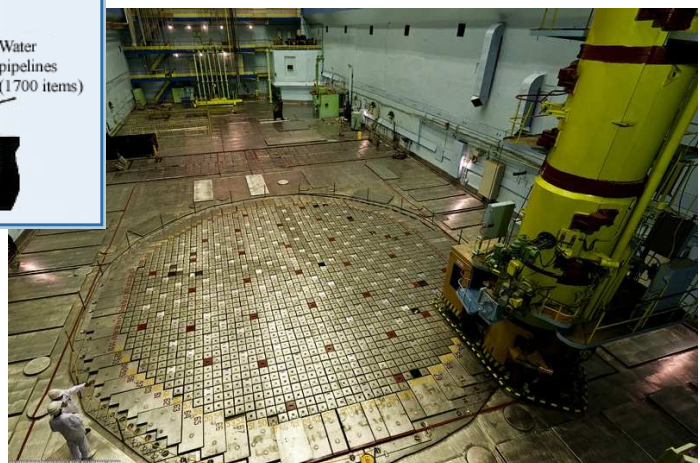
aktivní zóna:  
192 t UO<sub>2</sub>

## 11.3 Provozované komerční jaderné bloky

### RBMK, 1000 MWe



Reaktorový sál



## 11.4 Jaderné bloky v pokročilém vývoji

### FBR (Fast Breeder Reactor)

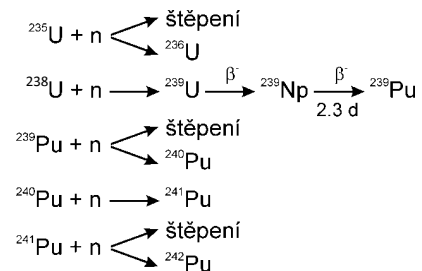
- zvláštností rychlých reaktorů s Pu palivem je jejich **množivý charakter**
  - při štěpení Pu238 vzniká více neutronů než v případě U (rozštěpením U vzniká přibližně **2,5 n**, při štěpení Pu rychlými neutrony **3,02 n**)
  - průměrně 2 n se spotřebují na další štěpení a zbytek transmutuje U na Pu. **Plutoniový koeficient** ( $b > 1$ )  $\Rightarrow$  při provozu vzniká více Pu, než se spotřebuje ke štěpení
  - pro zvýšení výtěžku Pu je aktivní zóna obklopena tzv. **plodivou zónou**, která sestává z ochuzeného uranu

#### Nevýhody oproti PWR:

- zatím drahá výroba
- nebezpečí zneužití Pu pro vojenské účely
- velká hustota štěpitelných prvků
- z daného objemu se uvolňuje velké množství tepla
- únik sodíku představuje nebezpečí požáru
- rychlé neutrony podstatně zkracují odezvu reaktoru na vnější vlivy (i na ovládání)

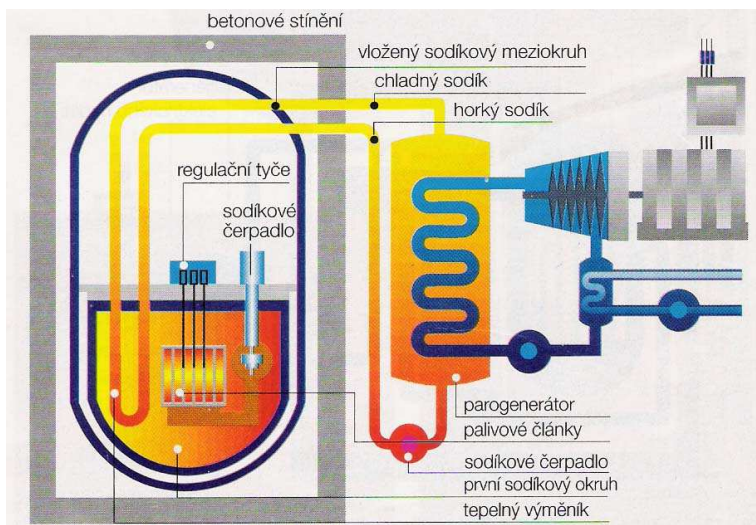
#### Výhody:

- Sodík má vyšší teplotu varu, než při jaké ochlazuje reaktor  $\Rightarrow$  v I.O. nemusí být vysoký tlak
- vynikající tepelná vodivost **Na** zajišťuje dostatečné havarijní chlazení reaktoru



## 11.4 Jaderné bloky v pokročilém vývoji

### FBR, 1300 MWe



palivo:

obohacení 20% (MOX)

rozměry aktivní zóny:

3,1 m průměr a 2,1 m výška

tlak Na:

0,25 MPa

teplota sodíku na výstupu z reaktoru:

620°C

účinnost elektrárny:

42%

aktivní zóna:

31,5 t MOX (PuO<sub>2</sub>/UO<sub>2</sub>)

## 11.4 Jaderné bloky v pokročilém vývoji

### HTGR - High Temperature Gas Cooled Reactor

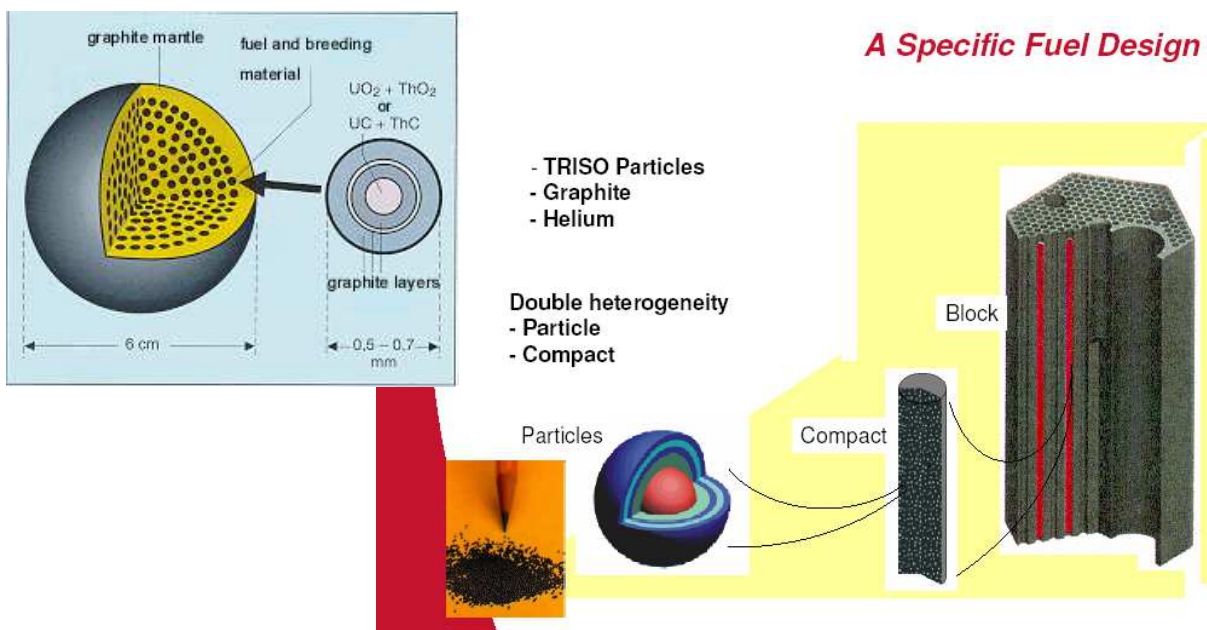
- velmi perspektivní typ reaktorů
- charakteristické rysy:
  - chladivo ( $\text{CO}_2$ ) nahrazeno teplotně stabilním a chemicky inertním **He**  $\Rightarrow$  možnost intenzifikace sdílení tepla a přechod na vyšší teploty ( $1000\text{ }^\circ\text{C}$ )
  - výborné bezpečnostní parametry (lepší než lehkovodní reaktory)
  - vysoká teplota a tlak vystupujícího chladiva umožňují pracovat s plynou turbínou a dosáhnout velké účinnosti výroby - až 40%
  - jsou menší problémy s odpadním teplem
  - počítá se i s použitím **Th** palivového cyklu
  - do r. 2000 vyvinuty pouze experimentálně v Německu, USA a Velké Británii
  - palivem je vysoce obohacený U ve formě mikro-kuliček  $\text{UO}_2$  ( $d \sim 0,5\text{ mm}$ )
    - kuličky povlékané třemi vrstvami SiC a C jsou rozptýlené v koulích grafitu, velkých asi jako tenisový míček; ty se volně sypou do AZ, na dně jsou postupně odebírány
    - v koncepci USA se používají místo koulí šestiúhelníkové bloky, které se skládají na sebe
  - technologie klade vysoké nároky na žáruvzdorné a žárupevné materiály

## 11.4 Jaderné bloky v pokročilém vývoji

### HTGR - High Temperature Gas Cooled Reactor

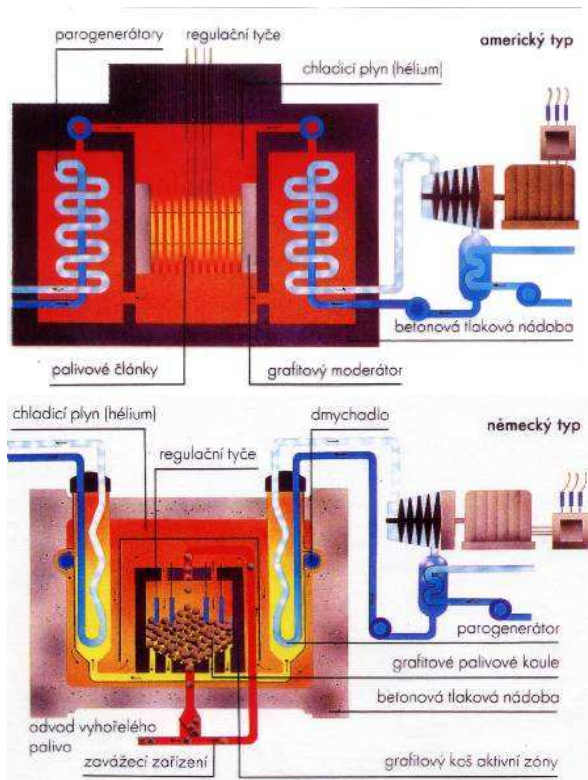
mikro-kuličky  $\text{UO}_2$  ( $d \sim 0,5\text{ mm}$ )

- kuličky povlékané třemi vrstvami SiC a C jsou rozptýlené v koulích grafitu, velkých asi jako tenisový míček; ty se volně sypou do AZ, na dně jsou postupně odebírány
- v koncepci USA se používají místo koulí šestiúhelníkové bloky, které se skládají na sebe



## 11.4 Jaderné bloky v pokročilém vývoji

### HTGR, 1300 MWe



palivo:  
obohacení U235 na 93%

rozměry aktivní zóny:  
5,6 m průměr a 6 m výška

tlak He:  
4 MPa

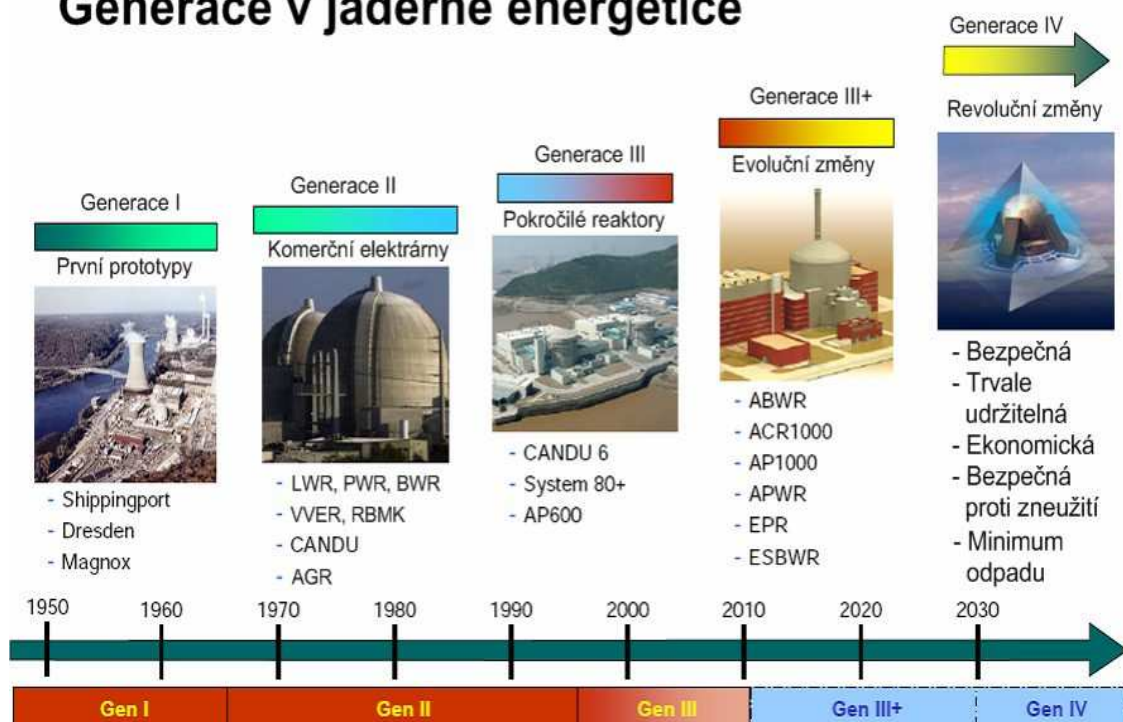
teplota He na výstupu z reaktoru:  
750°C

účinnost elektrárny:  
39%

aktivní zóna:  
0,33 t UO<sub>2</sub> a 6,6 t ThO<sub>2</sub>

## 11.5 Časová osa výstavby energetických reaktorů

### Generace v jaderné energetice



# 11. Základní typy současných energetických reaktorů

## výstupy z kapitoly

### Základní dělení

- konstrukce reaktoru, uspořádání paliva, tlakové uspořádání, způsob výměny paliva

### Typy energetických reaktorů

- 6 základních typů, které se uplatnily
- složení AZ (palivo, povlak, moderátor, chladivo)
- hlavní parametry (obohacení, tlak chladiva, rozměry bloku, výkon, účinnost, ...)

### Časová osa

- časový vývoj jednotlivých typů
- v dnešní době přes 80% LWR