



KEE/JE – Jaderné elektrárny

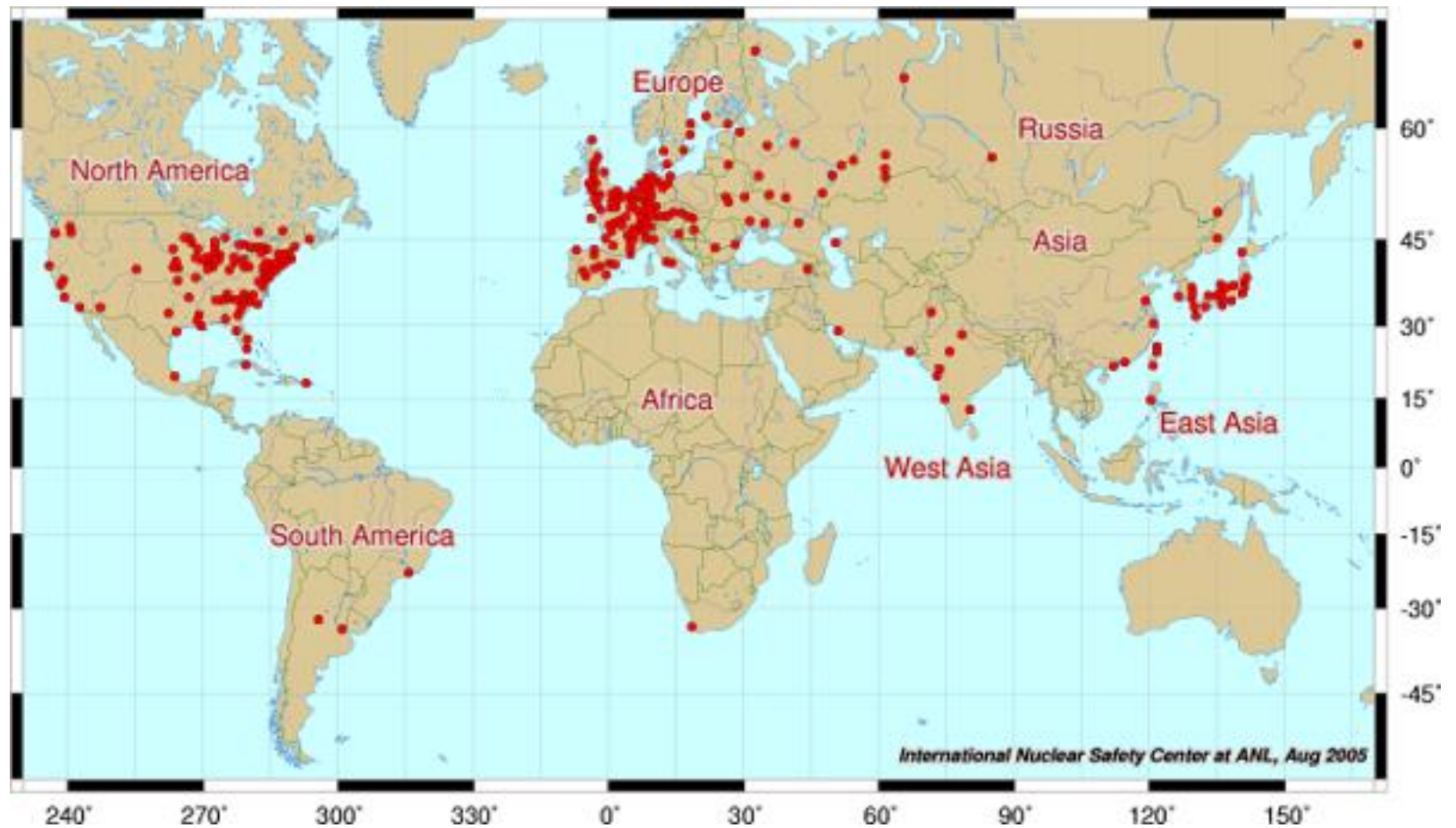
Plzeň, 2014

2. přednáška

Stav jaderné energetiky v zemích G8

2

Stát	Současný počet reaktorů	Instalovaný výkon (MW)	Podíl JE na celkové výrobě státu v r. 2005	Budoucnost jaderných elektráren v zemi
USA	103	99 200	19 %	plánováno nejméně 13 nových reaktorů
Rusko	31	21 700	16 %	plánováno 30 nových reaktorů
Francie	59	63 400	79 %	plánován 1 nový reaktor + obnova stávajících
Japonsko	56	47 800	29 %	plánováno 12 nových reaktorů
Anglie	23	11 900	20 %	blíže nespecifikovaný rozvoj
Kanada	15	12 600	16 %	zatím rozvoj neplánuje, plánuje náhradu „jádro za jádro“
Německo	17	20 300	31 %	postupný útlum do roku 2021
Itálie	0	0	0 %	možný návrat k jaderné energetice



Klasifikace jaderných reaktorů

4

- Podle základního jaderného procesu, který probíhá v jaderném zařízení, lze jaderné reaktory rozdělit na dvě základní skupiny:
 - ▣ Štěpné jaderné reaktory – Štěpení těžkých jader
 - ▣ Termojaderné reaktory – Syntéza lehkých jader

- ▣ Další skupinu tvoří tzv. hybridní reaktory

Klasifikace jaderných reaktorů

5

- Podle průměrné energie neutronů při štěpení dělíme reaktory obvykle na tři typy:
 - ▣ Tepelné
 - Pomalé reaktory pracují s neutrony s energií ~ 0.025 eV
 - ▣ Střední
 - Střední reaktory pracují s neutrony s energií $\sim 10^2$ eV
 - ▣ Rychlé
 - Střední reaktory pracují s neutrony s energií $> 10^5$ eV

Klasifikace jaderných reaktorů

6

- Podle dalšího hlediska dělíme reaktory na:
 - ▣ Reaktory s *tuhým palivem* (tyče, desky, trubky)
 - ▣ Reaktory s *tekutým palivem* (suspenze, roztok)
- V reaktorech se používá nejčastěji přírodního nebo obohaceného uranu
 - ▣ **Nízké, asi do 5% ^{235}U**
 - ▣ **Střední**
 - ▣ **Vysoké (nad 90% ^{235}U)**

Klasifikace jaderných reaktorů

7

- Jako palivo se nejčastěji používá:
 - ▣ Přírodní kovový uran
 - ▣ Kysličníku uranu UO_2
 - ▣ Karbid uranu UC

- V perspektivních transmutačních systémech (ADTT - Accelerator driven transmutation technology) se uvažuje použít palivo ve formě roztavených fluoridů

Klasifikace jaderných reaktorů

8

- Podle druhu moderátoru třídíme pouze tepelné reaktory a to na:
 - ▣ Reaktory s ***tuhým moderátorem*** (grafit, Be, BeO, UC),
 - ▣ Reaktory s ***kapalným moderátorem*** (H_2O , D_2O , organické látky).

Klasifikace jaderných reaktorů

9

- Podle uspořádání paliva a moderátoru v aktivní zóně (hledisko je kombinací předcházejících dvou) dělíme reaktory na:
 - ▣ **Homogenní** (*mají palivo rovnoměrně rozptýleno nebo rozpuštěno v moderátoru*),
 - ▣ **Heterogenní** (*reaktory s blokovým uspořádáním paliva*).

Klasifikace jaderných reaktorů

10

- Podle použitého chladiva rozeznáváme reaktory chlazené:
 - ▣ Plynem (CO_2 , helium, vodní pára, vzduch),
 - ▣ Kapalinou (H_2O , D_2O , organické látky),
 - ▣ Tekutými kovy (sodík, NaK), roztavenými (tekutými) solemi (UF_4).

Klasifikace jaderných reaktorů

11

- Podle účelového hlediska (je univerzálnější) můžeme reaktory rozdělit na čtyři skupiny:
 - ▣ **Energetické** - pro výrobu tepelné nebo elektrické energie
 - ▣ **Experimentální** - pro ověření zvolené koncepce energetických jaderných zařízení
 - ▣ **Výzkumné** - pro experimentální práce v oblasti neutronové a reaktorové fyziky
 - ▣ **Speciální** - např. množivé, chemické, dvojúčelové, transmutační a pod.

Klasifikace jaderných reaktorů

12

- Jaderné reaktory, které produkují nové palivo, tzv. množivé nebo plodivé reaktory, se obvykle dělí na:
 - ▣ Breedery
 - ▣ Konvertory (vyrábí se palivo odlišné od paliva používaného pro provoz reaktoru: $^{238}\text{U} \rightarrow ^{239}\text{Pu}$, $^{232}\text{Th} \rightarrow ^{233}\text{U}$).

Klasifikace jaderných reaktorů

13

- Další speciální hlediska pro klasifikaci:
 - ▣ Reaktorová nádoba (tlaková nádoba, tlakové trubky),
 - ▣ Poloha palivových článků v aktivní zóně (horizontální, vertikální)
 - ▣ Typ reaktorové mříže (čtvercová, trojúhelníková,...) a jiné.

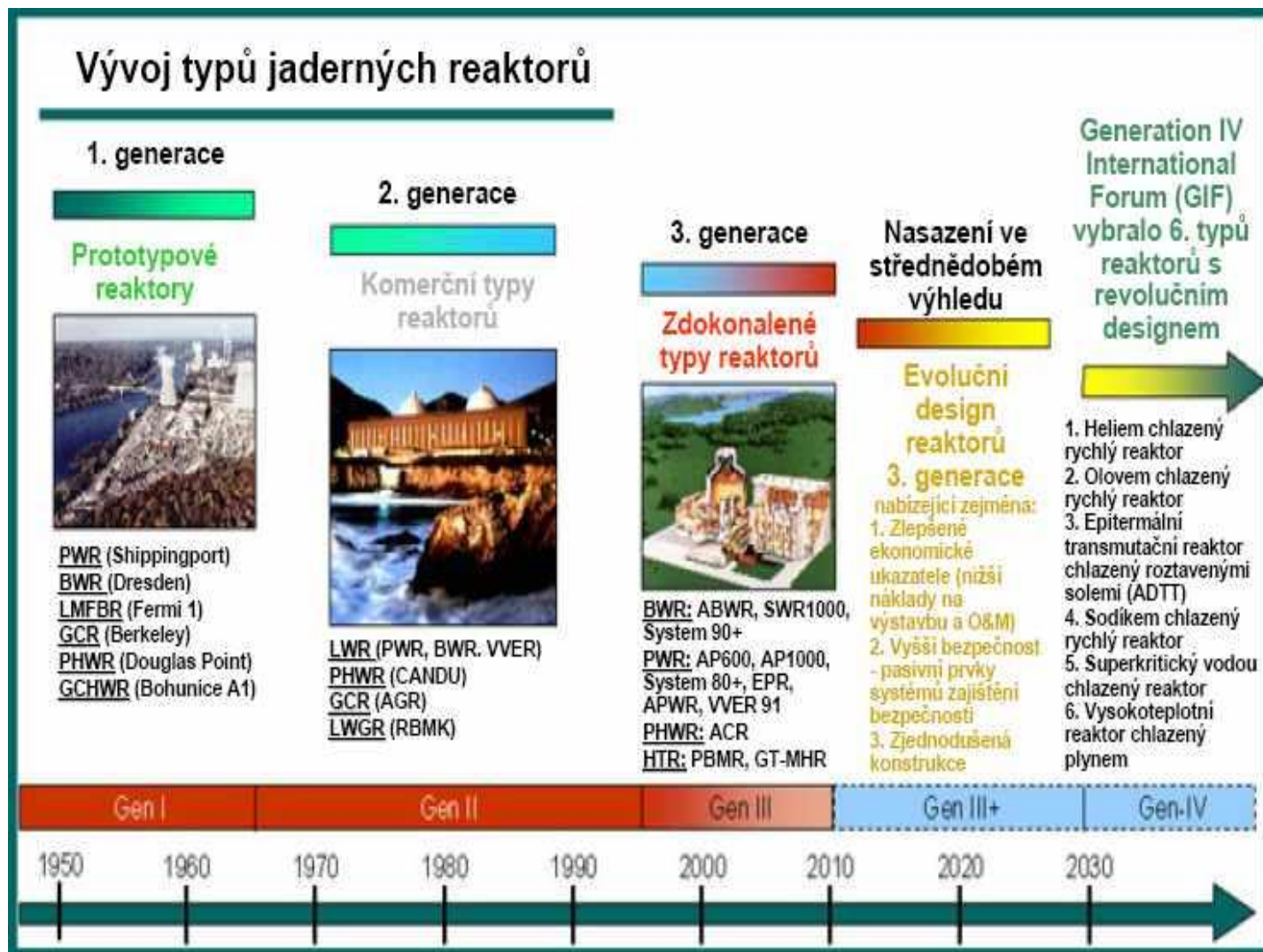
Klasifikace jaderných reaktorů

14

- Z uvedeného rozboru hledisek je zřejmé, že je možné teoreticky vytvořit veliký počet kombinací. Ovšem pouze některé z nich se dají realizovat
- **Štěpný tepelný jaderný reaktor** je ve světě zatím nejrozšířenější, v současné době je základem i naší jaderné energetiky

Rozdělení jednotlivých typů energetických jaderných reaktorů do jejich generací

15



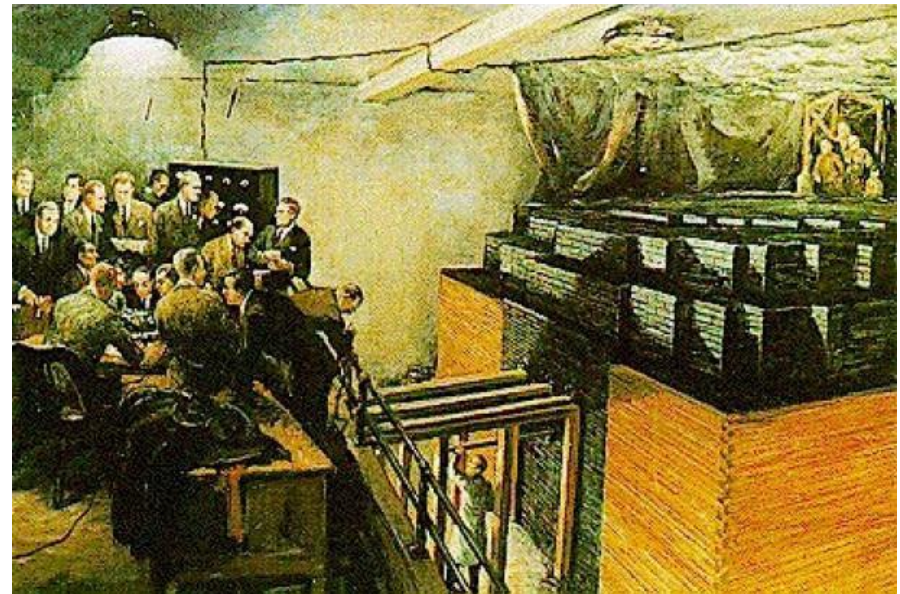
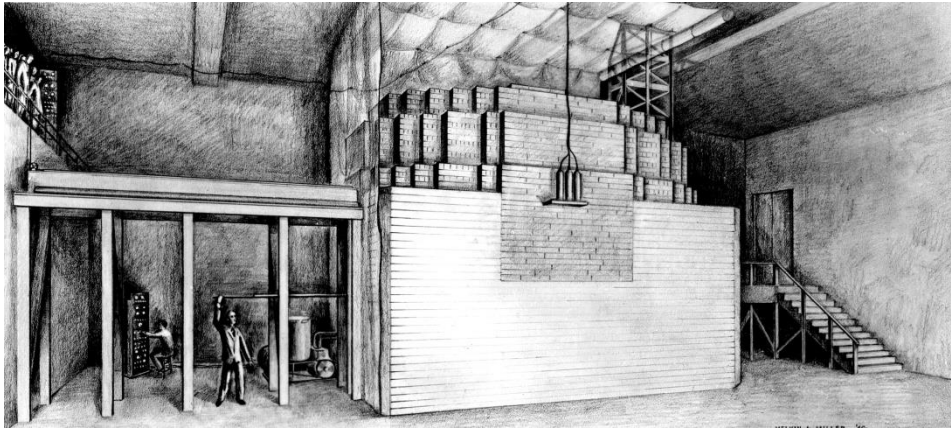
První reaktor – Chicago Pile 1

16

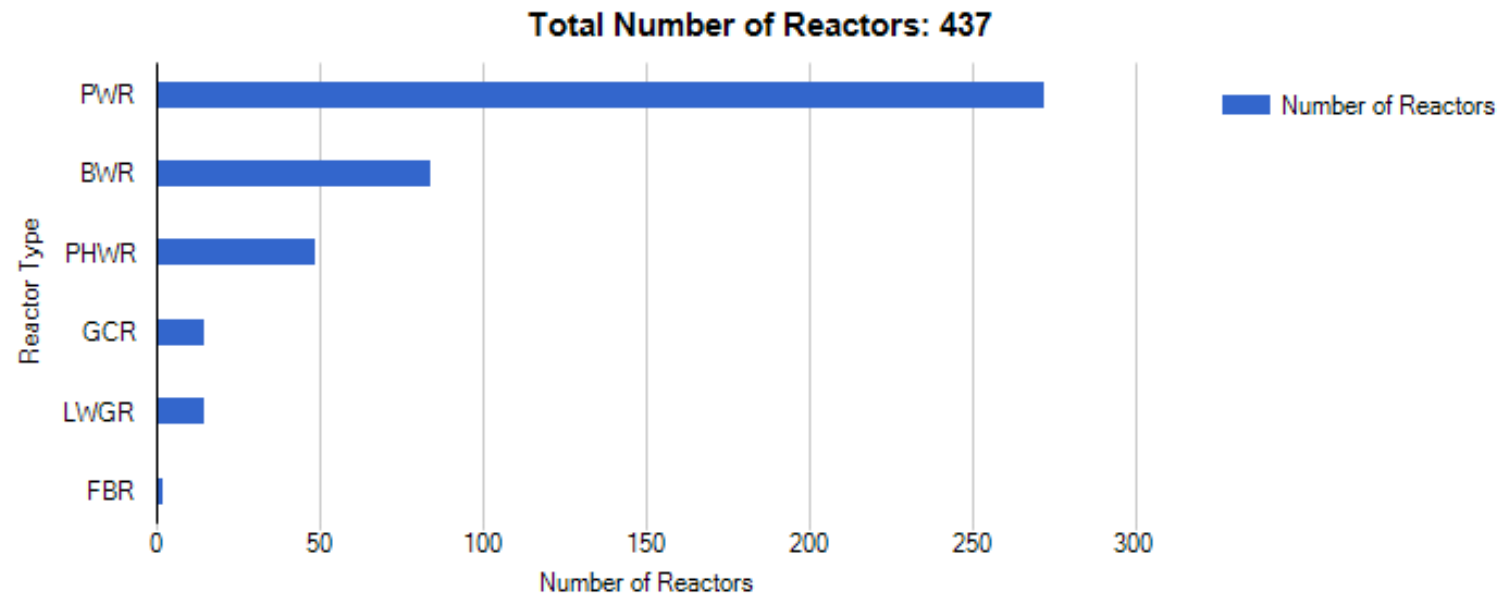
- Chicago Pile I
- •Součást projektu Manhattan (1942-1946)
- •Pro utajení vybudován pod tribunou opuštěného stadionu
- •Kritického stavu bylo dosaženo grafitovými bloky moderátoru
- •První člověkem udržovaná řetězová reakce po dobu 28 minut
- •Vznik pojmu „SCRAM“

První reaktor – Chicago Pile 1

17



Provozované reaktory celosvětově



Typ reaktoru	Chladivo	Moderátor	Obohacení paliva	Příklady
GCR	CO ₂	C	0,7 % (přírodní)	Magnox, UNGG
AGR	CO ₂	C	2,5 - 3,5 %	Magnox II. generace
HWGCR	CO ₂	D ₂ O	0,7 % (přírodní)	A-1,EL-4
PHWR	D ₂ O	D ₂ O	0,7 % (přírodní)	EC6
HWLWR	H ₂ O	D ₂ O	2,2 - 2,5 %	ACR1000
BWR	H ₂ O	H ₂ O	< 5%	ABWR, KERENA
PWR	H ₂ O	H ₂ O	< 5%	VVER, AP1000, EPR
LWGR	H ₂ O	C	2,2 - 2,4 %	RBMK

GCR (Gas Cooled Reactor)

- Tepelný, plynem chlazený, grafitem moderovaný reaktor, chlazený zpravidla oxidem uhličitým CO_2
- S jeho vývojem nejvíce pokročila Velká Británie a Japonsko, ale tyto typové bloky se dnes již nestaví a více méně dosluhují
- První britská jaderná elektrárna v Calder Hallu byla vybavena tímto typem reaktoru
- Konstrukce reaktoru umožňuje výměnu paliva za provozu

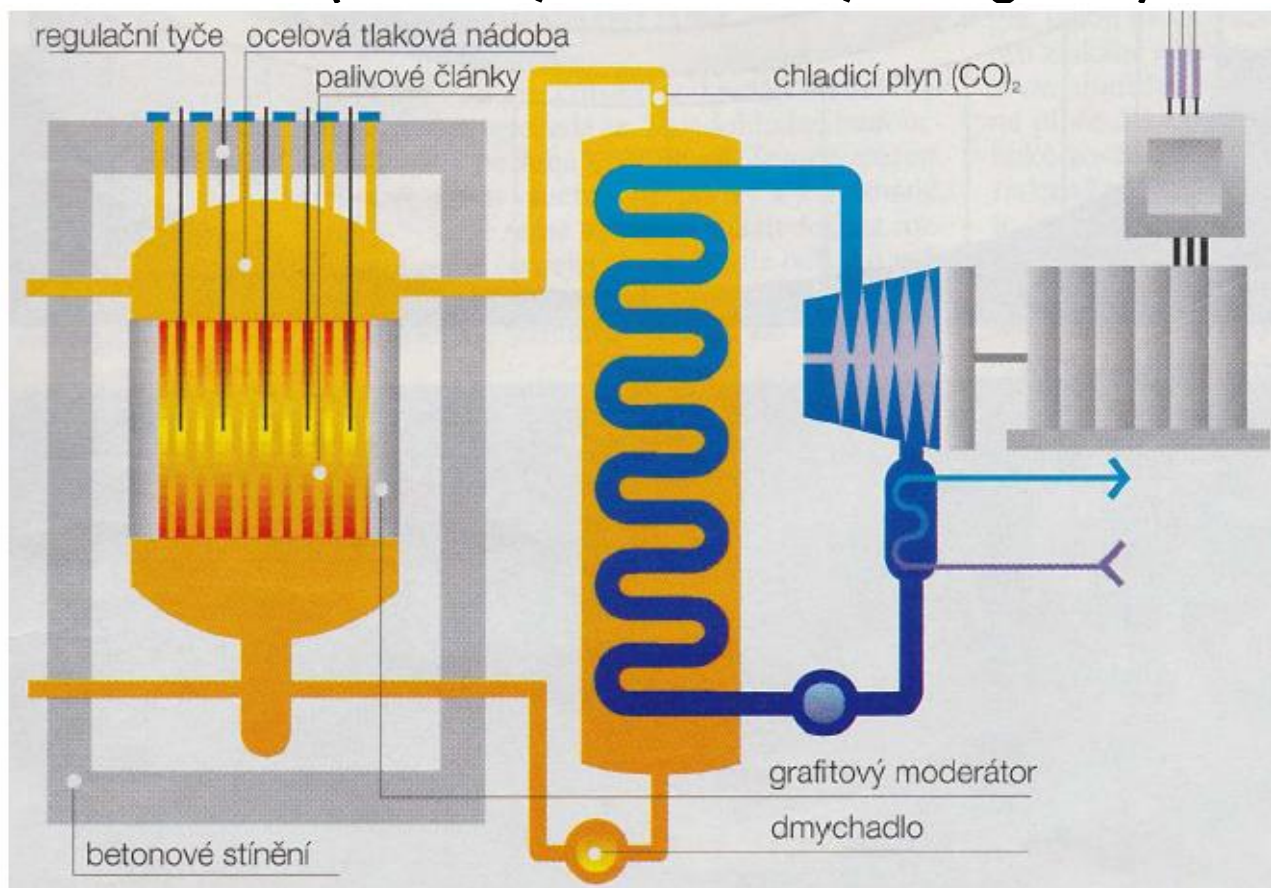
GCR

- Kompaktní palivové články tvoří tyče z kovového přírodního uranu, pokryté oxidem hořčíku (magnesium oxid = Magnox)
- Aktivní zóna ve tvaru svislého válce se skládá z grafitových bloků a prochází jí několik tisíc svislých kanálů - do každého se nad sebou umísťuje několik palivových tyčí.
- Celá aktivní zóna je uzavřena v kulové ocelové tlakové nádobě, která je obestavěna silným betonovým stíněním.

GCR - Přenos tepla a výroba elektřiny

- Chladicí plyn proudí kanály kolem palivových tyčí, ohřívá se a je veden do parogenerátorů, ve kterých předává své teplo vodě sekundárního okruhu.
- Ochlazený plyn ženou dmychadla zpět do reaktoru, pára vzniklá v parogenerátorech pohání turbínu připojenou na generátor elektrického napětí

GCR (AGCR, GCHWR, Magnox)



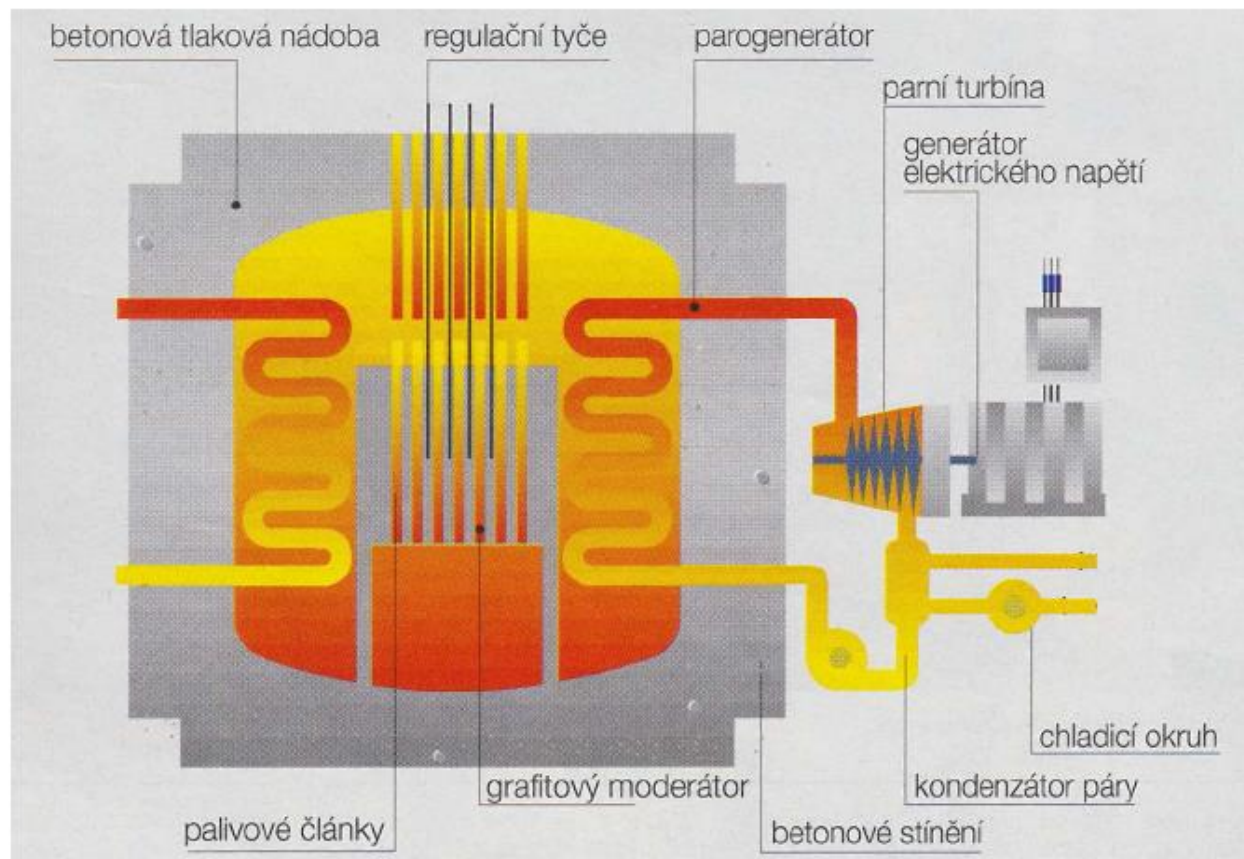
GCR

- Příklad 600MW reaktoru
 - ▣ Palivo - přírodní kovový uran
 - ▣ Rozměry aktivní zóny 14m průměr x 8m výška
 - ▣ Tlak plynu v reaktoru 2,75 MPa
 - ▣ Teplota plynu na výstupu z reaktoru 400°C
 - ▣ Účinnost elektrárny 25,8%
 - ▣ Množství paliva v reaktoru 595 tun uranu

AGR

- Advanced Gas Cooled Graphite Moderated Reactor
- Tepelný, plynem chlazený, grafitem moderovaný reaktor, chlazený oxidem uhličitým CO₂
- Využívá se výhradně ve Velké Británii
- Velmi podobný reaktoru GCR

AGR



AGR

- Příklad 600MW reaktoru
 - ▣ Palivo – uran ve formě UO_2 s obohacením 2,3% ^{235}U
 - ▣ Rozměry aktivní zóny 9,1m průměr x 8,5m výška
 - ▣ Tlak plynu v reaktoru 5,5 Mpa
 - ▣ Teplota plynu na výstupu z reaktoru 650°C

HWGCR

- A-1 (Atomová elektrárna 1)
 - ▣ Tepelný, plynem chlazený, těžkou vodou moderovaný reaktor.
 - ▣ Byl vyvíjen v Československu a postaven pouze v elektrárně v Jaslovských Bohunicích
 - ▣ Dnes již není v provozu. Byl vyvíjen tak, aby byl schopen pracovat s neobohaceným uranem (podobně jako CANDU)

HWGCR – AZ

- Kovový uran pokrytý slitinou hořčíku a berylia tvoří palivový proutek.
- Palivové články jsou složeny zhruba ze sedmdesáti palivových proutků.
- Základem aktivní zóny je válcová nádoba z hliníkové slitiny naplněná těžkou vodou, v níž jsou svisle vedeny palivové kanály.
- Každý kanál obsahuje jeden palivový článek chlazený proudícím oxidem uhličitým.

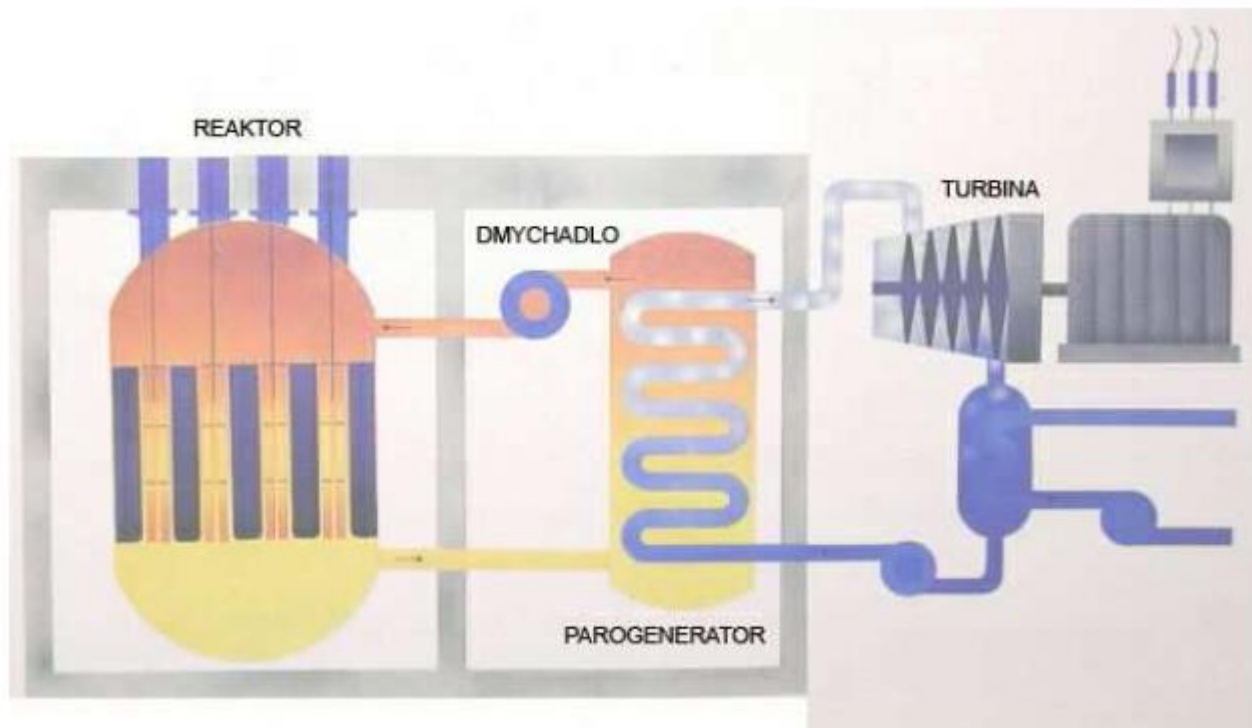
HWGCR - AZ

- Celá aktivní zóna je umístěna v tlakové nádobě, jejíž konstrukce umožňuje výměnu paliva během provozu reaktoru.
- Těžká voda musí být chlazena v samostatném okruhu, aby její teplota zůstala stále nízká (podobně jako u reaktorů CANDU).

HWGCR

- Přenos tepla a výroba elektřiny
 - ▣ Chladící plyn je dmychadly hnán kolem palivových článků, ohřívá se a proudí do parogenerátorů.
 - ▣ V nich předává své teplo obyčejné vodě v odděleném okruhu.
 - ▣ Vzniklá pára je hnána na turbíny, které jsou připojeny na turbíny generující elektrický proud

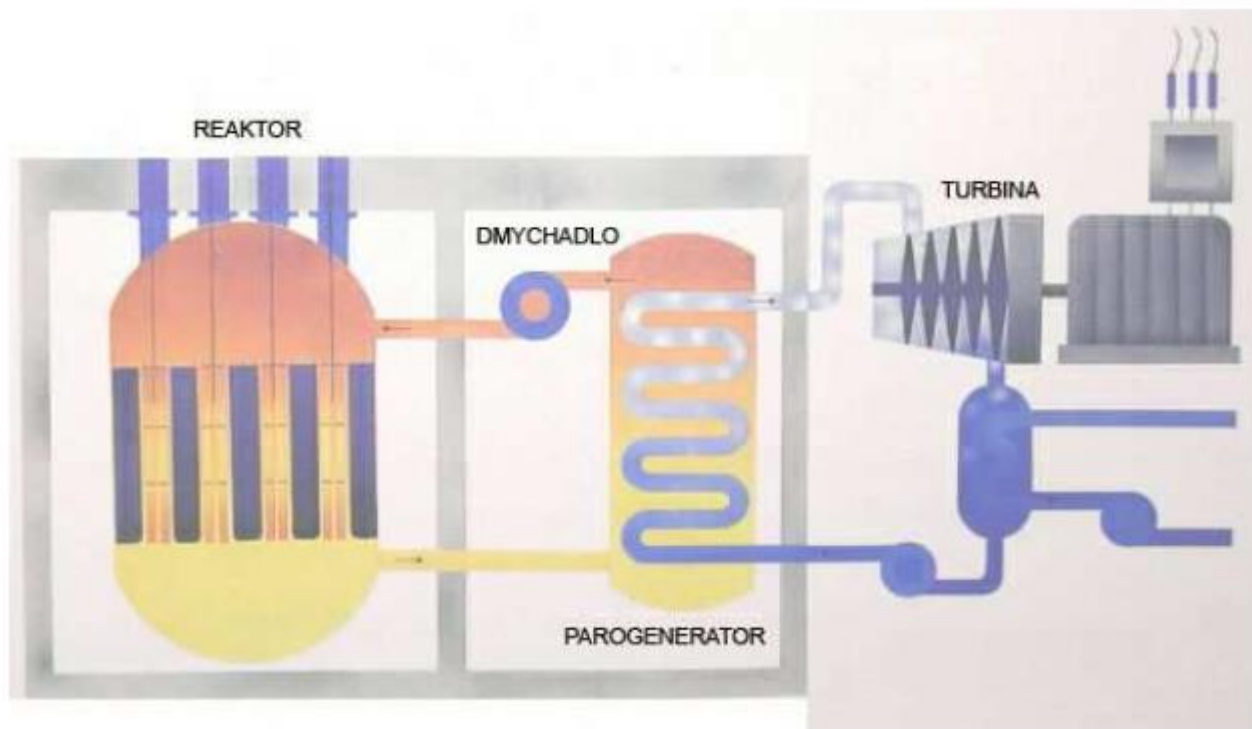
HWGCR



HWGCR

- Reaktor – 103MW
 - ▣ Palivo - přírodní kovový uran
 - ▣ Rozměry aktivní zóny 3,56m průměr x 4m výška
 - ▣ Tlak chladícího plynu na výstupu z reaktoru 5,4 MPa
 - ▣ Teplota chladícího plynu na výstupu z reaktoru 426°C
 - ▣ Účinnost elektrárny 18,5%
 - ▣ Množství paliva v reaktoru 23,1 tun uranu
 - ▣ Teplota těžké vody moderátoru 65°C

HWGCR



PHWR,HWLWR

- Tepelný těžkovodní reaktor chlazený vodou
- CANDU – CANada Deuterium Uranium
- Kontinuální výměna paliva – kanálový reaktor
- Původně chladio i moderátor D_2O

PHWR,HWLWR

- Reaktor vyvinutý pro štěpení přírodního uranu
- Kanada se tak chtěla vyhnout potřebě obohacování, které bylo náročné jak technologicky tak energeticky
- Druhá generace má jako chladivo lehkou vodu – nutno palivo lehce obohatit (ACR1000)
- Postupně se reaktor rozšířil i mimo Kanadu – Indie, Pákistán, Argentina, Rumunsko

PHWR,HWLWR – AZ

- Válečky z UO_2 uzavřené v krátkých trubkách ze slitiny zirkonia tvoří palivové tyčky, z nichž se sestavuje palivový článek
- Základem konstrukce aktivní zóny je nádoba tvaru ležícího válce (tzv. Calandria), která má v sobě vodorovné průduchy pro umístění tlakových trubek ze zirkoniové slitiny

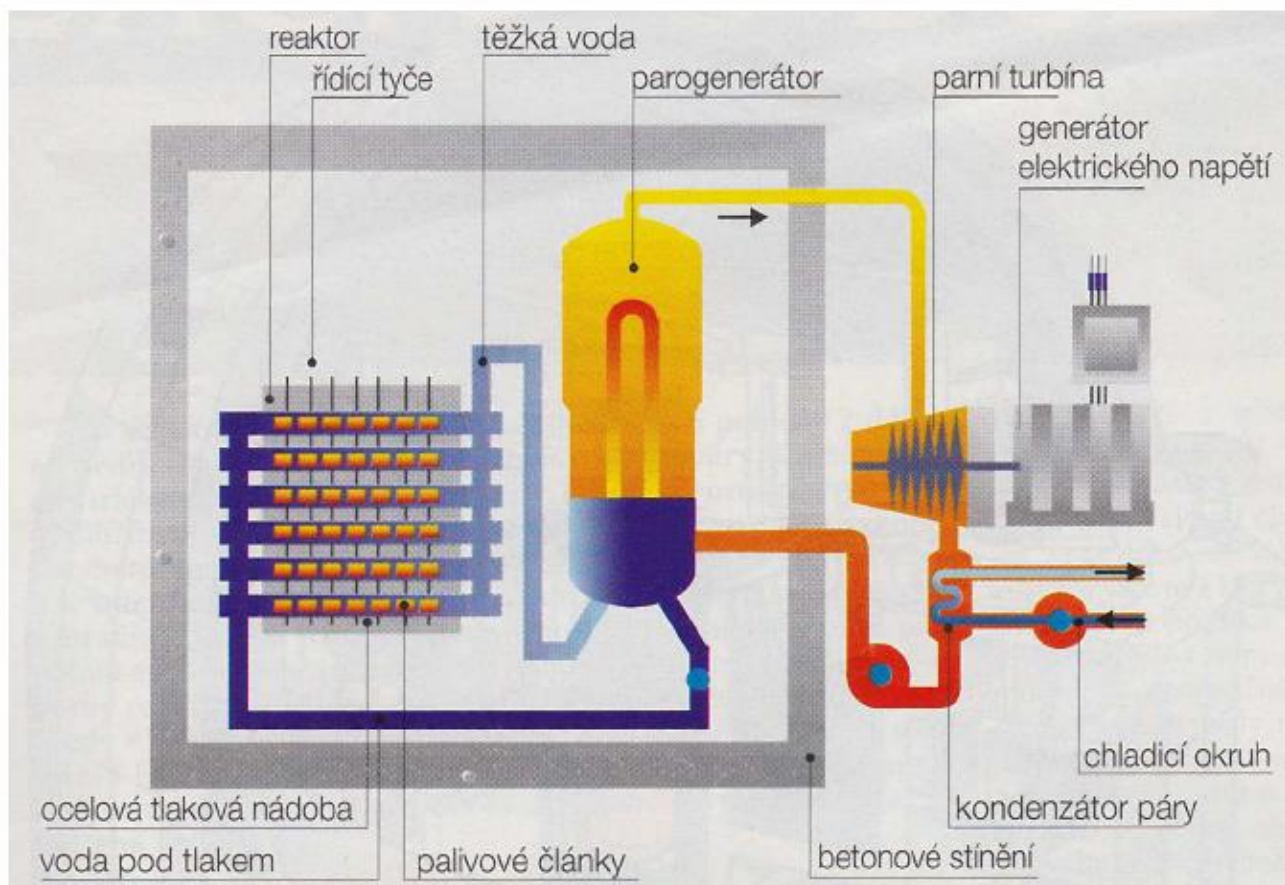
PHWR,HWLWR – AZ

- Do nádoby je napuštěn těžkovodní moderátor, který musí být chlazen speciálním okruhem, aby jeho teplota zůstala stále nízká (moderační schopnost se snižuje s teplotou)
- V tlakových trubkách jsou zasunuty palivové články a kolem nich proudí chladící těžká voda

PHWR,HWLWR

- Přenos tepla a výroba elektřiny
 - ▣ Chladící voda proudí kanály kolem palivových tyčí, ohřívá se a je vedena do parogenerátorů, ve kterých předává své teplo vodě sekundárního okruhu.
 - ▣ Ochlazenou vodu ženou čerpadla zpět do reaktoru, pára vzniklá v parogenerátorech pohání turbínu připojenou na generátor elektrického napětí.

PHWR, HWLWR



PHWR,HWLWR

- Příklad 600MW reaktoru
 - ▣ Palivo - přírodní kovový uran
 - ▣ Rozměry aktivní zóny 7m průměr x 5,9m délka
 - ▣ Tlak chladící těžké vody na výstupu z reaktoru 9,3 MPa
 - ▣ Teplota chladící těžké vody na výstupu z reaktoru 305°C
 - ▣ Účinnost elektrárny 30,1%
 - ▣ Množství paliva v reaktoru 117 tun UO_2
 - ▣ Teplota těžké vody moderátoru 30°C

Děkuji za pozornost

42

