



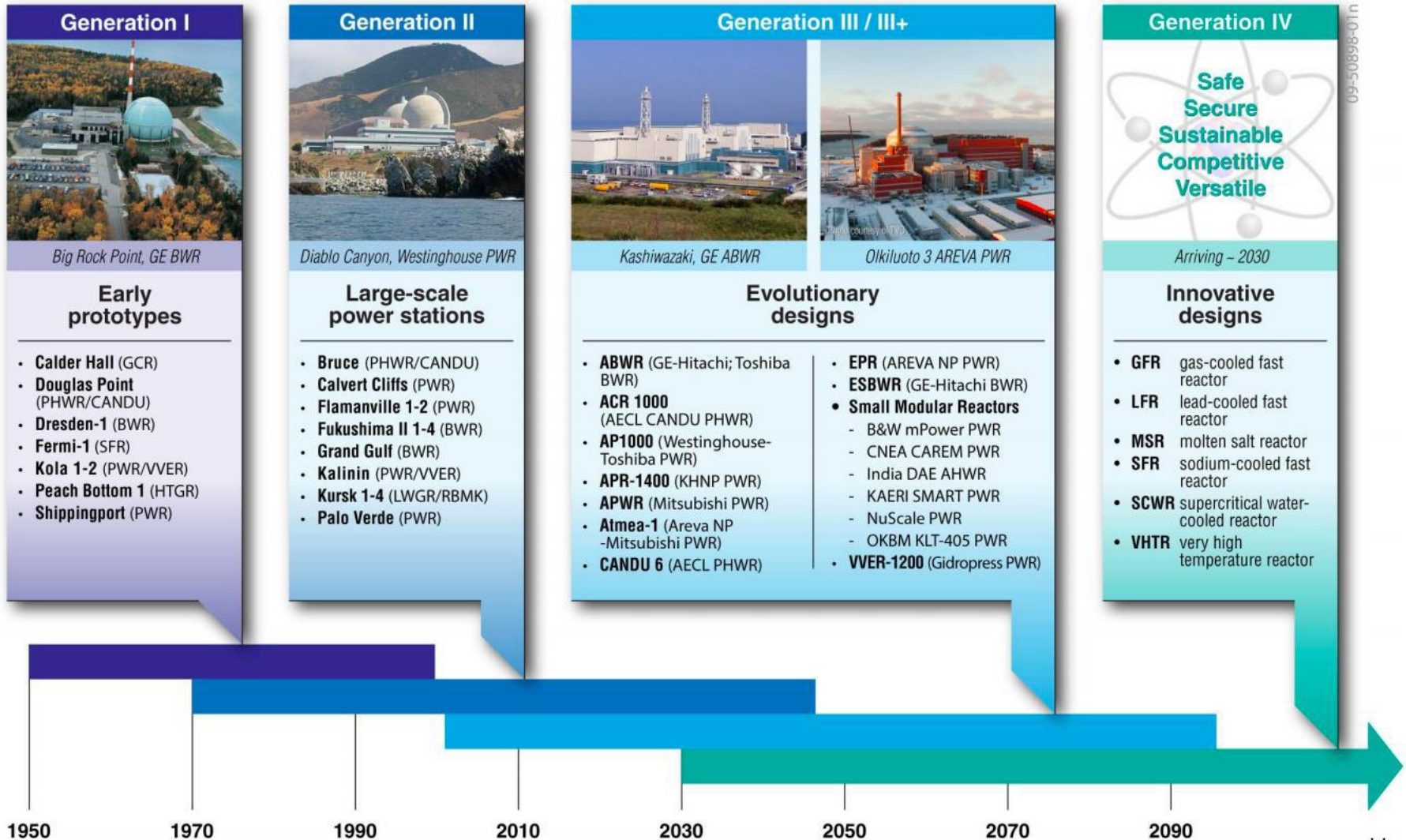
KEE/JE – Jaderné elektrárny

Plzeň, 2015

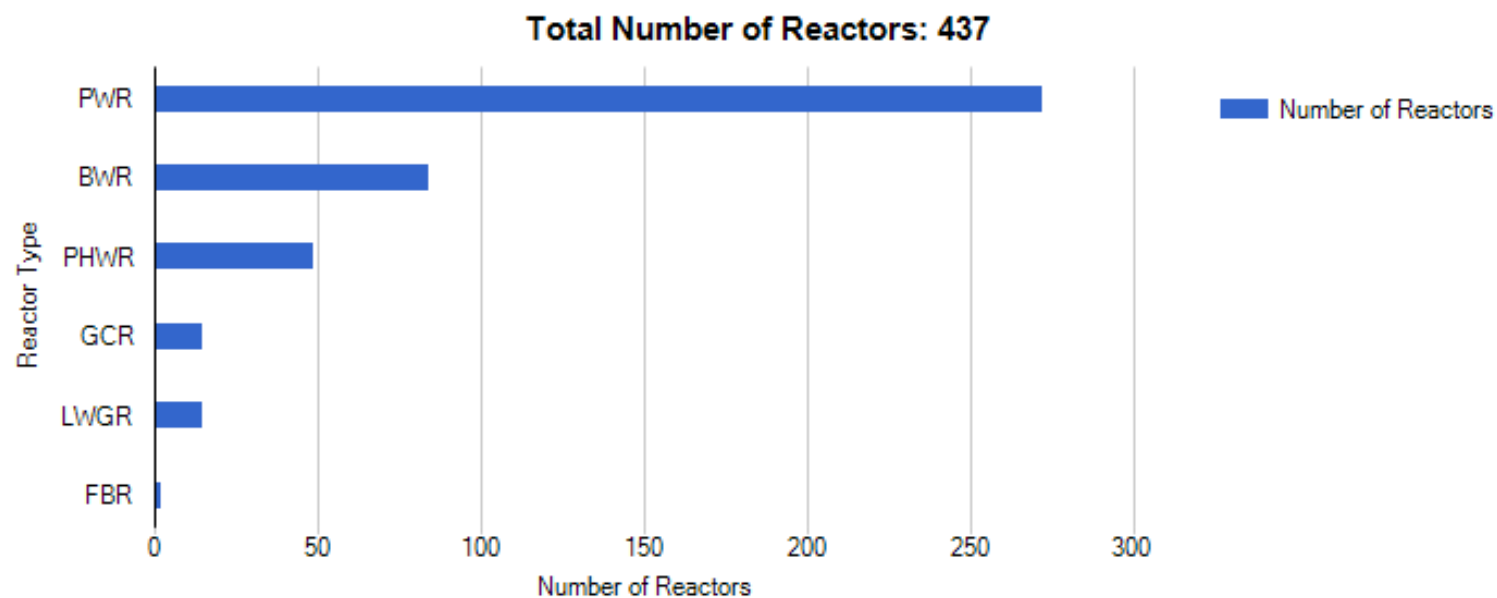
3. přednáška

Jaderné reaktory - Evoluce

2



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

BWR (ABWR)

- Boiling Water Reactor (Advanced)
- Tepelný, varný reaktor, moderovaný i chlazený obyčejnou vodou
- V dnešní době se jedná o druhý nejrozšířenější typ jaderného reaktoru (po PWR)
 - ▣ Cca 95 reaktorů tohoto typu
- Vyšší seismická odolnost
- Nižší stabilita než PWR – oscilace

BWR (ABWR) - AZ

- Malé válečky z UO_2 naskládané a hermeticky uzavřené v obalové trubce ze zirkoniové slitiny tvoří palivový proutek
- Svazky zhruba šedesáti pravidelně uspořádaných palivových proutků vytvářejí palivové články, ze kterých je sestavena aktivní zóna uvnitř tlakové nádoby reaktoru. (podobné VVER)

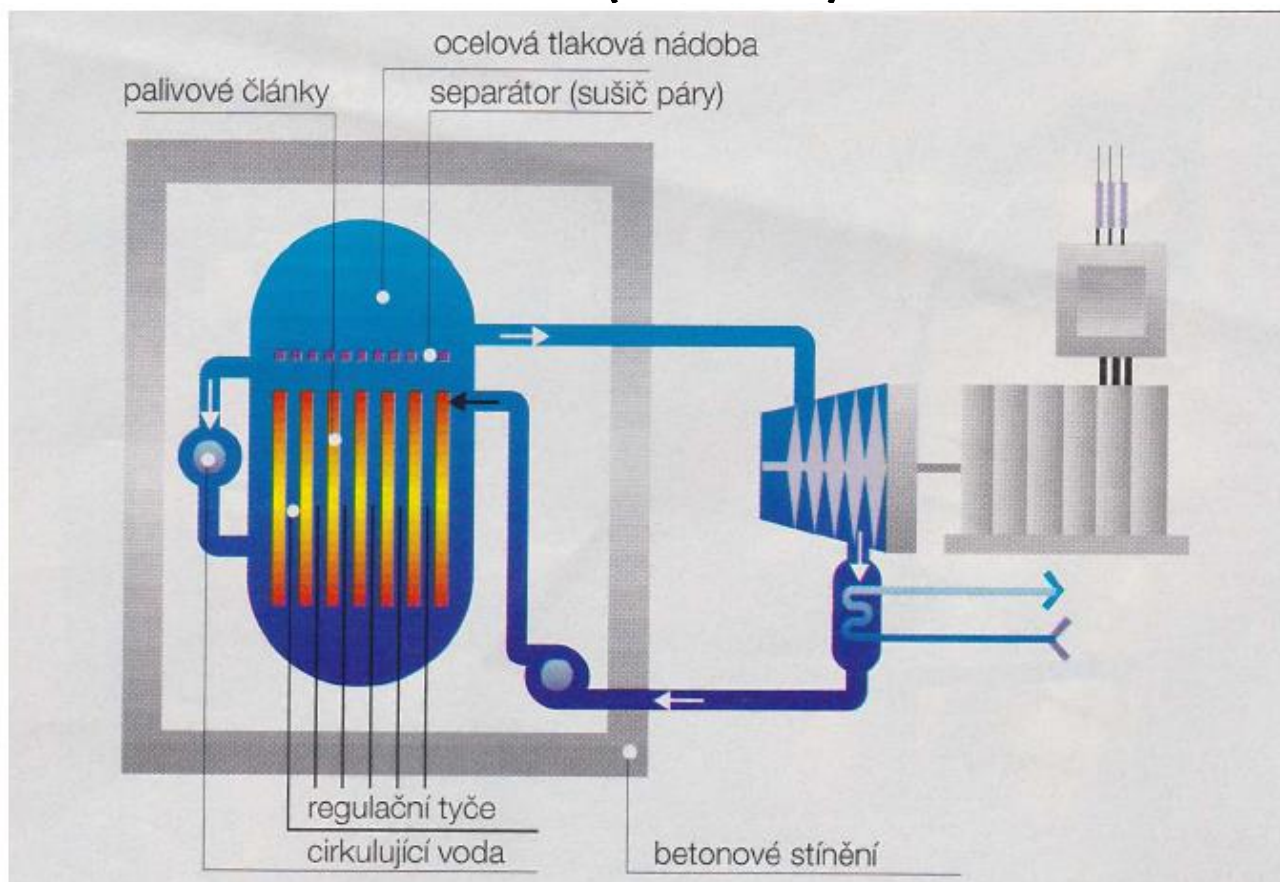
BWR (ABWR) - AZ

- Výměna vyhořelého paliva probíhá jednou za rok až rok a půl při odstavení reaktoru.
- Aktivní zóna reaktorů BWR se svým řešením podobá klasickým tlakovodním reaktorům.

BWR (ABWR)

- Přenos tepla a výroba elektřiny
 - ▣ Voda se ohřívá v aktivní zóně až do varu a přímo v tlakové nádobě reaktoru tak vzniká pára.
 - ▣ Ta je v horní části reaktoru zbavena kapek a odtud jde přímo na turbínu, která je spojena s generátorem elektrického proudu.
 - ▣ Toto zjednodušení oproti tlakovodnímu reaktoru PWR s sebou nese tu nevýhodu, že pára pohánějící turbínu je radioaktivní.

BWR (ABWR)



BWR (ABWR)

- Příklad 1000MW reaktoru
 - ▣ Palivo - mírně obohacený uran ve formě oxidu uraničitého (UO_2)
 - Obohacení izotopem ^{235}U na 2,1% - 2,6%
 - ▣ Rozměry aktivní zóny 4,5m průměr x 3,7m výška
 - ▣ Tlak vody v reaktoru 7 MPa
 - ▣ Teplota vody na výstupu z reaktoru 286°C
 - ▣ Účinnost elektrárny 33,3%
 - ▣ Množství paliva v reaktoru 122,3 tuny UO_2

VVER, PWR

- PWR (Pressurized Water Reactor)
- VVER (vodo-vodjanoj energetičeskij reaktor) tepelný, tlakový reaktor, moderovaný i chlazený obyčejnou vodou
- Dnes se jedná o nejrozšířenější typ jaderného reaktoru (cca 250 reaktorů)
- I v Temelíně a v Dukovanech pracují reaktory tohoto typu

VVER, PWR

- Původně byl vyvinut v USA, později koncepci převzalo Rusko
- Stejné reaktory jsou používány v ponorkách
 - ▣ Kvůli vysoké bezpečnosti

VVER, PWR – AZ

- Malé válečky z UO_2 naskládané a hermeticky uzavřené v obalové trubce ze zirkoniové slitiny tvoří palivový proutek
- Svazky zhruba tří set (u reaktorů s výkonem kolem 1000 MW) pravidelně uspořádaných palivových proutků vytvářejí palivové články, ze kterých je sestavena aktivní zóna uvnitř tlakové nádoby reaktoru

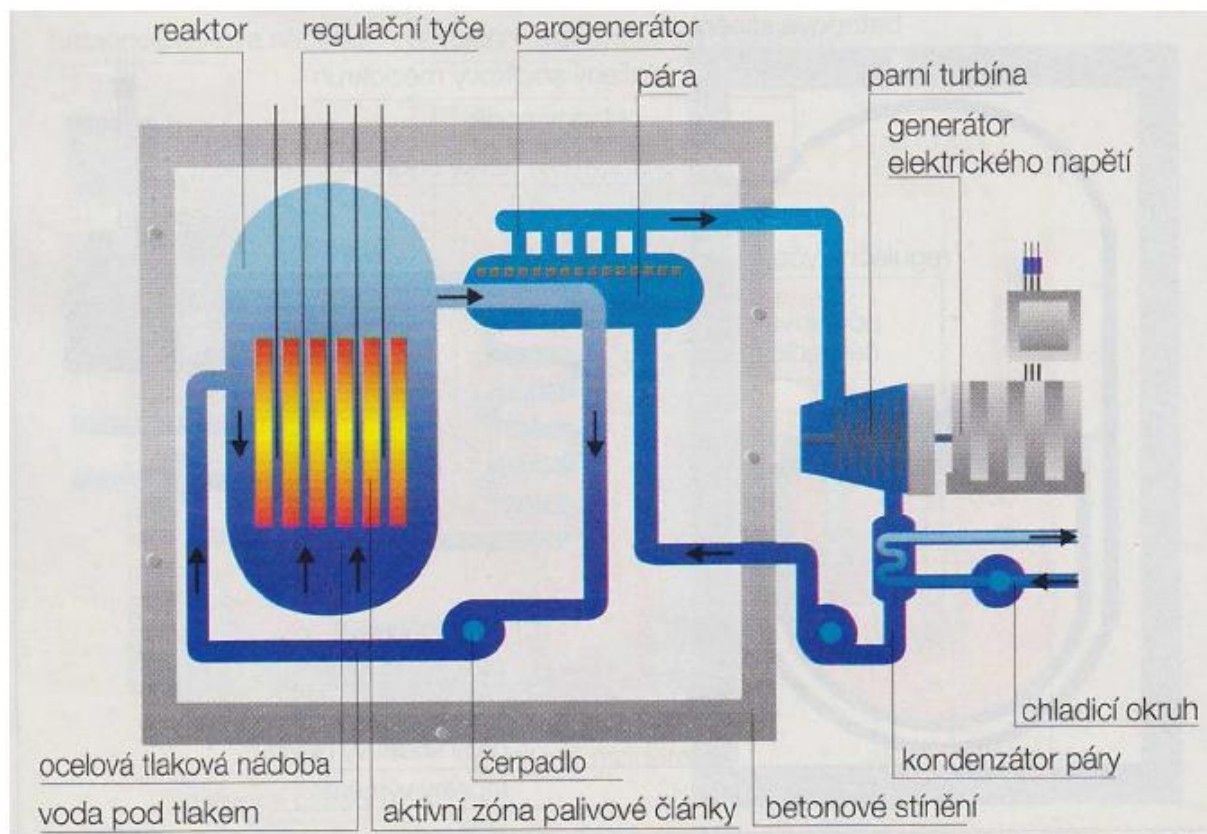
VVER, PWR - AZ

- Výměna vyhořelého paliva probíhá jednou za rok až rok a půl při odstavení reaktoru
- Obvykle se nahrazuje $1/3$ palivových souborů ($1/4$, $1/5$)

VVER, PWR

- Přenos tepla a výroba elektřiny
 - Voda pod vysokým tlakem proudí aktivní zónou kolem palivových proutků, ohřívá se a je vedena potrubím do parogenerátorů, ve kterých uvádí do varu vodu v sekundárním okruhu bloku
 - Vzniklá pára pohání turbínu spojenou s generátorem elektrického proudu
 - Sekundární okruh je dále ochlazován tzv. terciálním okruhem jehož dominantou bývají často vysoké chladicí věže

VVER, PWR



VVER, PWR

- Příklad 1 000 MW reaktoru
 - ▣ Palivo - obohacený uran ve formě oxidu urančitého (UO_2). Obohacení izotopem ^{235}U na 3,1% až 4,4%
 - ▣ Rozměry aktivní zóny 3m průměr x 3,5m výška
 - ▣ Tlak vody v reaktoru 15,7 MPa
 - ▣ Teplota vody na výstupu z reaktoru 324°C
 - ▣ Účinnost elektrárny 32,7%
 - ▣ Množství paliva v reaktoru 60 až 80 tun UO_2

LWGR

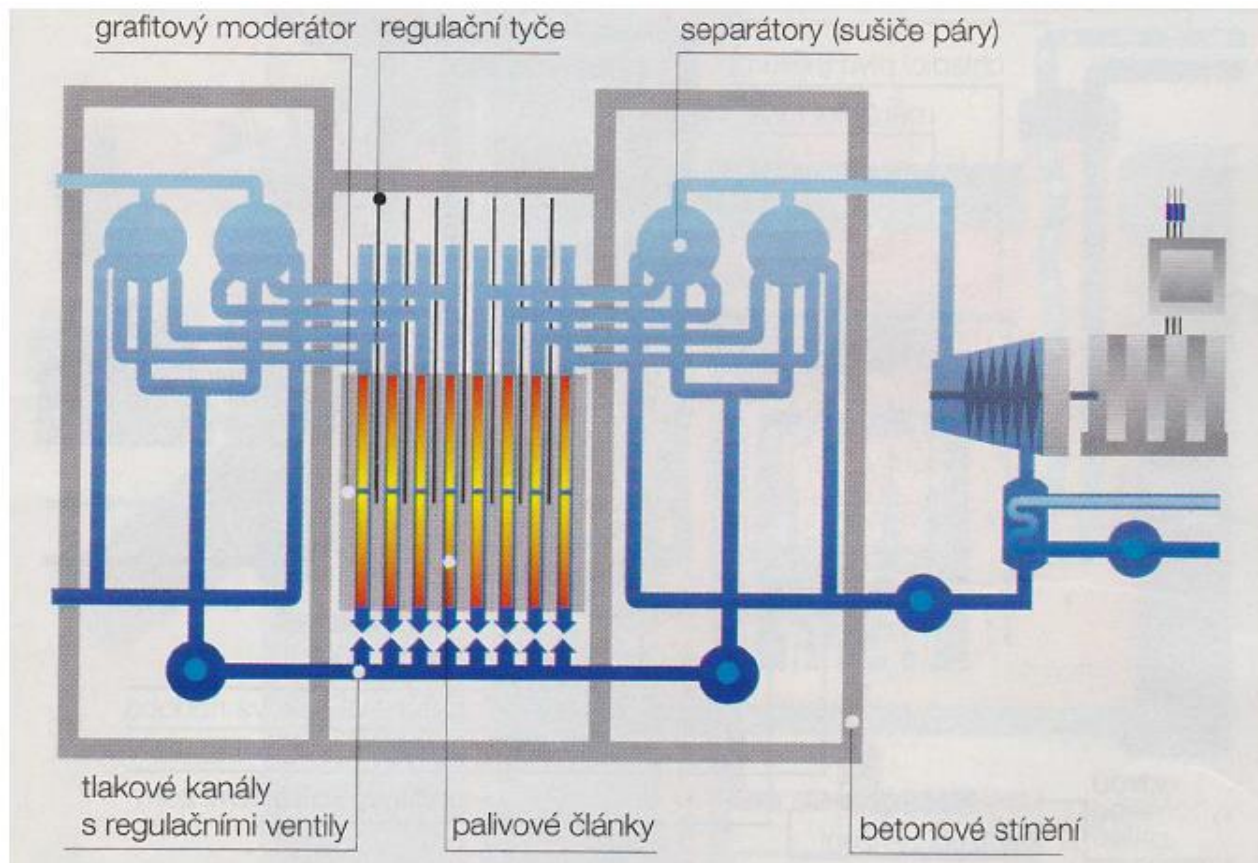
- LWGR (Light Water Graphite Reactor)
- První JE (Obninsk 1954) byla tohoto typu
- Kontinuální výměna paliva – malé obohacení paliva
- Největší reaktor na světě – RBMK 1500
- Smutně proslulý černobylský typ reaktoru
- Po černobylské havárii byla jejich výstavba pozastavena a v dnešní době je těchto reaktorů v provozu pouze několik.

LWGR – AZ

- Palivové pruty jsou štíhlé trubky ze slitiny zirkonia a niobu, ve kterých jsou naskládány válečky z UO_2
- Aktivní zóna 1000 MW reaktoru sestává ze 1693 svislých tlakových kanálků rovnoměrně rozmístěných v grafitovém válcovém bloku
- Každý tlakový kanál je naplněn 36 palivovými pruty

- Přenos tepla a výroba elektřiny
 - Do každého tlakového kanálu je čerpadly hnána voda, která se v kanálech zahřívá až k bodu varu, takže z kanálu proudí směs vody a páry
 - Tato směs jde do tzv. separátorů, ve kterých se oddělí zbylá voda a nasycená pára je vedena na turbínu spojenou s generátorem elektrického proudu
 - Elektrárna je jednookruhová - v turbínách proudí radioaktivní pára a je nutné je odstínit

LWGR

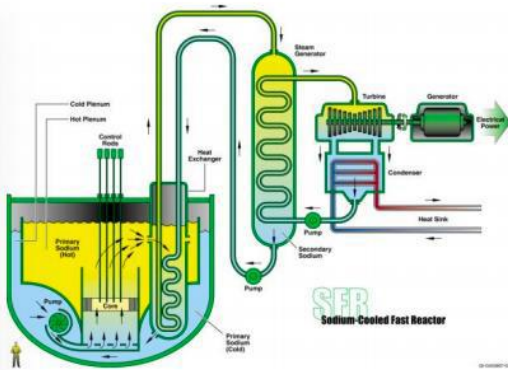


LWGR

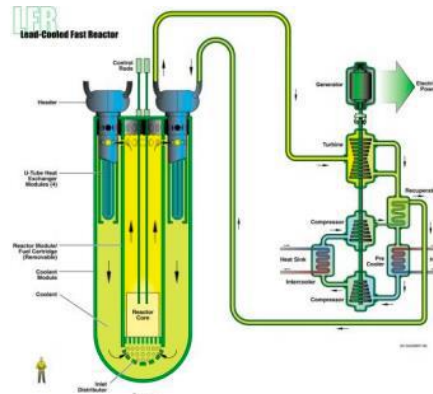
- Příklad 1000MW bloku
 - ▣ Palivo - mírně obohacený uran ve formě oxidu urančitého (UO_2). Obohacení izotopem ^{235}U na 1,8% až 2,4%
 - ▣ Rozměry aktivní zóny 11,8m průměr x 7m výška
 - ▣ Tlak nasycené páry v separátorech 6,9 MPa
 - ▣ Teplota vody na výstupu z reaktoru 284°C
 - ▣ Účinnost elektrárny 31,3%
 - ▣ Množství paliva v reaktoru 192 tun UO_2

Reaktory vyšších generací

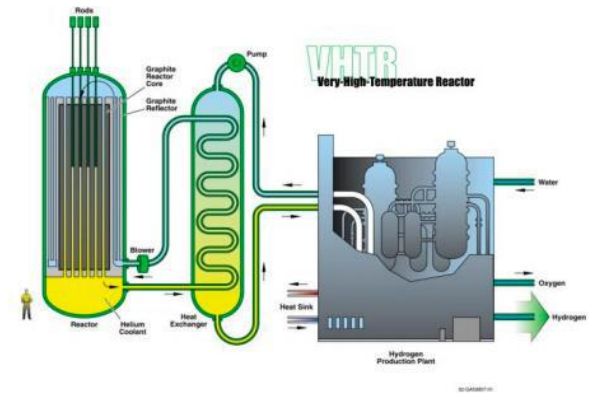
23



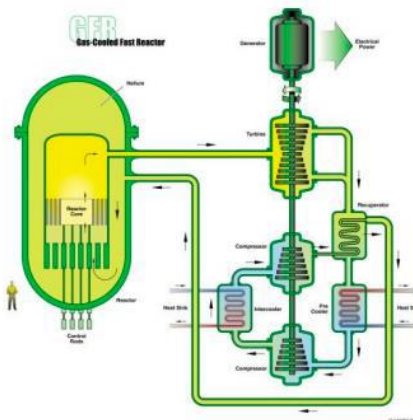
Sodium Fast Reactor



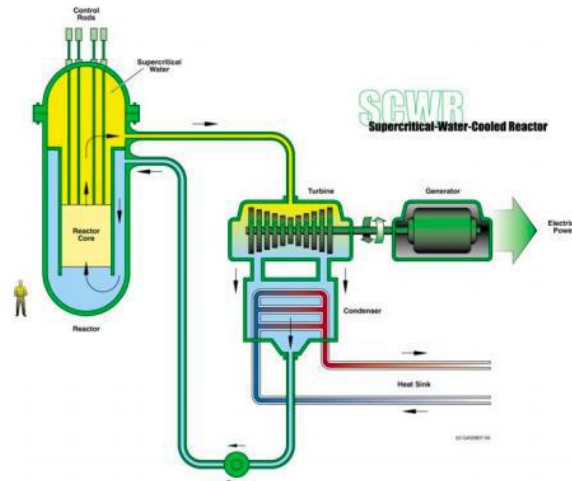
Lead Fast Reactor



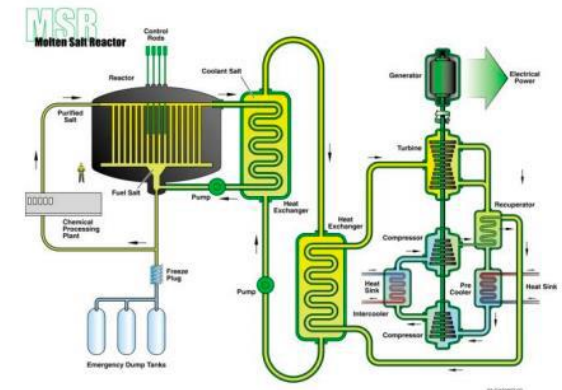
Very High Temperature Reactor



Gas Cooled Fast Reactor



Supercritical Water Cooled Reactor



Molten Salt Cooled Reactor

Reaktory vyšších generací

24

- **Reaktory s velmi vysokou teplotou VHTR (Very High Temperature Reactors)**
- Tento typ reaktoru vychází už z dřívějších typů reaktoru (Magnox, AGR) ty však pracovaly při nižší teplotě a s jiným chladičem
- Tento typ dokáže pracovat při velmi vysokých teplotách (zhruba 1000°C)
- Nepočítá se s využitím přepracovaného vyhořelého jaderného paliva.

Reaktory vyšších generací

25

- Jako chladicí médium je uvažováno hélium. Sloužil by pro výrobu tepla nebo vodíku
- Jedná se o jediný typ reaktoru IV. generace, který by mohl být k dispozici před rokem 2030.
- **Charakteristické parametry:**
 - ▣ Vstupní/výstupní teplota – $640^{\circ}\text{C}/1000^{\circ}\text{C}$
 - ▣ Výkon reaktoru – 600 MWt
 - ▣ Účinnost – větší než 50%
 - ▣ Plánovaná životnost – 60 let

Reaktory vyšších generací

26

- **Reaktory využívající vodu v superkritické fázi SCWR (SuperCritical Water Reactors)**
- Je založen na dvou známých a dobře odzkoušených technologiích – lehkovodní reaktory (varné i tlakové)
- Jako moderátor i chladicí médium je uvažována voda v superkritické fázi (tj. za vysokého tlaku a teploty)
- Teplota se uvažuje mezi 510 a 550° a tlak 25 MPa

Reaktory vyšších generací

27

- Díky vysoké teplotě vody se zvýší účinnost elektrárny na 45%
- Palivem bude oxid uranu. Hlavním cílem tohoto reaktoru bude levná a efektivní výroba jaderné energie.
- **Charakteristické parametry:**
 - ▣ Vstupní/výstupní teplota – 280°C/510°C
 - ▣ Výkon reaktoru – 1 600 MW
 - ▣ Plánovaná životnost – 60 let
 - ▣ Účinnost – 45%

Reaktory vyšších generací

28

- ❑ **Reaktory založené na roztavených solích MSR (Molten Salt Reactors)**
- ❑ Tyto reaktory patří k nejnáročnějším typům IV. generace a existují zatím jen na papíře
- ❑ Jako palivo i chladicí médium by sloužily roztavené soli
- ❑ Palivo by bylo v tomto případě v keramické formě rozprostřeno v grafitové matrici, která by sloužila i jako moderátor

Reaktory vyšších generací

29

- V jiných typech by bylo palivo obsaženo v solích ve formě fluoridu uraničitého nebo fluoridu thoričitého
- V jakém typu bude daný reaktor pracovat záleží na jeho konkrétní konstrukci

Reaktory vyšších generací

30

- **Plynem chlazený rychlý reaktor GFR (Gas Cooled Fast reactors)**
- Tento typ reaktoru využívá spektrum rychlých neutronů a uzavřený palivový cyklus
- Jako chladicí médium by bylo použito hélium a pracovní teplota reaktoru by byla okolo 850°C
- Jako palivo se uvažuje uran a plutonium ve formě kuliček nebo vícebokých hranolů
- Nejefektivnější spalování paliva je ve formě kuliček

Reaktory vyšších generací

31

- ❑ **Sodíkem chlazený rychlý reaktor SFR (Sodium Cooled Fast Reactors)**
- ❑ Tento typ reaktoru využívá spektrum rychlých neutronů
- ❑ Jako chladicí médium se využívá tekutý sodík
- ❑ Pracovní teplota se předpokládá okolo 550°C

Reaktory vyšších generací

32

- Předpokládají se dvě varianty tohoto reaktoru
 - ▣ Menší zařízení by měla být s výkonem 150 – 600 Mwe
 - Palivo obsahující (uran, plutonium a další transurany) by mělo být v kovové podobě
 - ▣ Větší zařízení s výkonem 500 – 1500 Mwe
 - Palivo obsahující směs plutonia a uranu by měla být v podobě oxidů těchto prvků

Reaktory vyšších generací

33

- **Olovem chlazený rychlý reaktor LFR (Lead Cooled Fast Reactors)**
- Jako chladicí médium se bude využívat olovo nebo eutektická směs olova a bismutu
 - ▣ Výhodou této směsi je snížení teploty tavení
 - ▣ Nevýhodou je, že při reakci neutronů s bismutem a následným rozpadem beta vzniká radioaktivní izotop, který je nebezpečný alfa zářičem

Reaktory vyšších generací

34

- Kromě středně velkých reaktorů s elektrickým výkonem 600MWe se plánuje i vývoj malého kompaktního mobilního reaktoru s výkonem 10 až 100 MWe
 - ▣ Výhodou kompaktního reaktoru by byl dlouhý interval mezi výměnou paliva (15 – 20 let)

Reaktory vyšších generací

35

- **IRIS**
- Program IRIS odstartoval v roce 1999
- Je to značně mezinárodní projekt pod vedením firmy Westinghouse
- Počítá se s tím, že výstavba těchto typů reaktorů začne po roce 2015
- Jedná se o menší lehkovodní reaktor chlazený vodou s výkonem jednoho bloku 335 MWe

Reaktory vyšších generací

36

- Jádro reaktoru je v porovnání s ostatními PWR reaktory daleko menších rozměrů, potřebuje tedy i méně vody
- Reaktory mohou být stavěny i jaké malé jednotky
- Ty by se mohly použít pro vytápění menších území nebo výrobu pitné vody
- Plně pasivní bezpečnostní systém včetně čerpadel, kompresorů, parogenerátorů je umístěn v jedné tlakové nádobě a tudíž je celý primární okruh bezpečně uzavřen

Reaktory vyšších generací

37

- Teplo se v případě havárie opět odvádí přirozenou cirkulací
- Palivo by mělo vydržet celou životnost reaktoru

Reaktory vyšších generací

38

- **Rychlý množivý reaktor FBR (Fast Breeder reactor)**
- 1. demonstrační elektrárna v USA (1963 – E. Fermi)
- Je postaven v Rusku (BN-600), ve Francii (Superphénix) a Velké Británii
- V USA, Německu a Japonsku byly demonstrační elektrárny tohoto typu
- V dlouhodobé perspektivě je těmto reaktorům přisuzován velký význam

Reaktory vyšších generací

39

- Palivem je Pu ve směsi PuO_2 a UO_2 - obohacené na 20 až 50% ^{239}Pu (nebo ^{235}U)
- K udržení řetězové reakce tyto reaktory používají nezpomalené neutrony
- \Rightarrow reaktor nemá moderátor
- Vysoké obohacení vede k intenzivnějšímu uvolňování tepla než u tepelných reaktorů
 - \Rightarrow plyn ani voda takové množství tepla nemohou odvádět, voda navíc zpomaluje neutrony
 - \Rightarrow proto je chladičem Na, který je při teplotách nad 100°C tekutý

Reaktory vyšších generací

40

- Na má mnohem lepší tepelnou vodivost i mnohem vyšší teplotu varu (téměř 900°C při atmosférickém tlaku) než voda
- Zásadním problémem sodíku je jeho velká chemická reaktivita s kyslíkem
- \Rightarrow musí se proto zajistit co nejbezpečnější oddělení Na okruhu od vody i vzduchu
- Na ze sekund. okruhu jde do parogenerátoru, kde v dalším okruhu ohřívá vodu na páru

- zvláštností rychlých reaktorů s Pu palivem je jejich **množivý charakter**
- – při štěpení ^{239}Pu vzniká více neutronů než v případě U
 - ▣ rozštěpením U vzniká přibližně 2,5 nových n, při štěpení Pu rychlými n je to 3,02 n

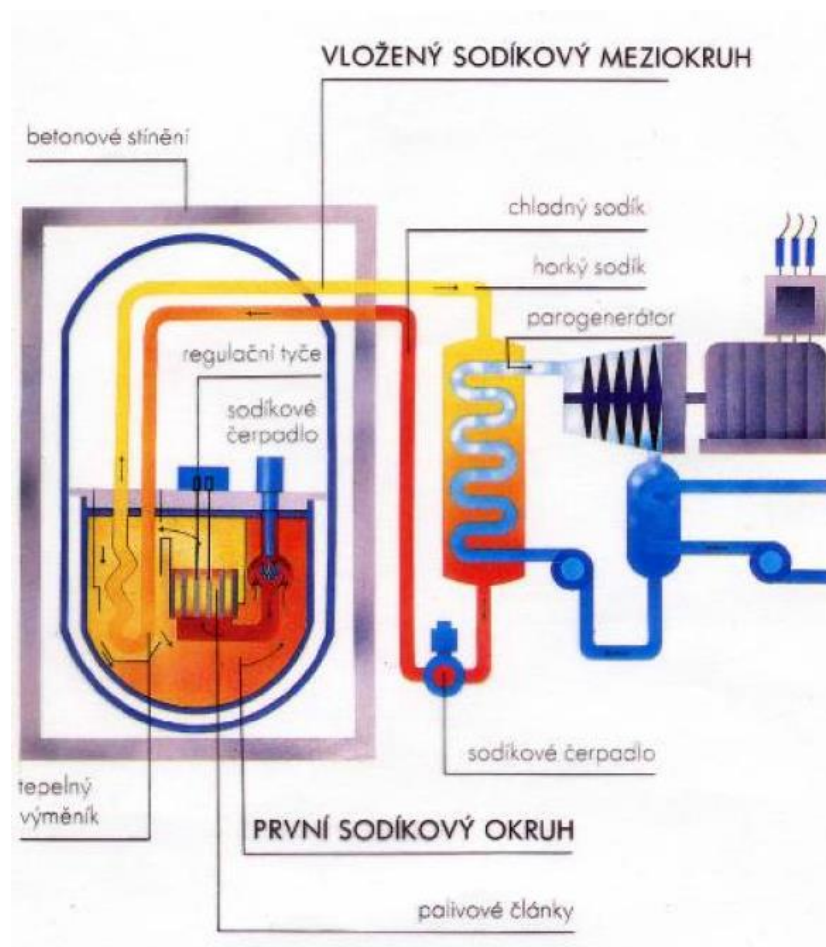
- – průměrně 2 n se spotřebují na další štěpení a zbytek transmutuje U na Pu
- \Rightarrow při provozu těchto reaktorů vzniká více Pu, než se spotřebuje ke štěpení
- – pro zvýšení výtěžku Pu je aktivní zóna obklopena tzv. **plodivou zónou**, která sestává z ochuzeného uranu

- 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 a podstatně zkracují odezvu reaktoru na vnější vlivy (i na ovládání)

□ Výhody:

- Na má vyšší teplotu varu, než při jaké ochlazuje reaktor \Rightarrow v primárním okruhu nemusí být vysoký tlak
- vynikající tepelná vodivost Na zajišťuje dostatečné havarijní chlazení reaktoru

- **Typické parametry reaktoru FBR**
- **(s výkonem 1300 MW):**
 - ▣ palivo: obohacené 20% ^{239}Pu (nebo ^{235}U)
 - ▣ rozměry aktivní zóny včetně plodivé oblasti: 3.1 m průměr a 2.1 m výška
 - ▣ tlak sodíku v reaktoru: 0.25 MPa
 - ▣ teplota sodíku na výstupu z reaktoru: 620°C
 - ▣ tepelná účinnost elektrárny: 42%
 - ▣ množství paliva v reaktoru: 31.5 tun směsi PuO_2/UO_2



Děkuji za pozornost

47

