

# **JADERNÉ SYSTÉMY I**

**Téma č. 1**

**Základní pojmy**

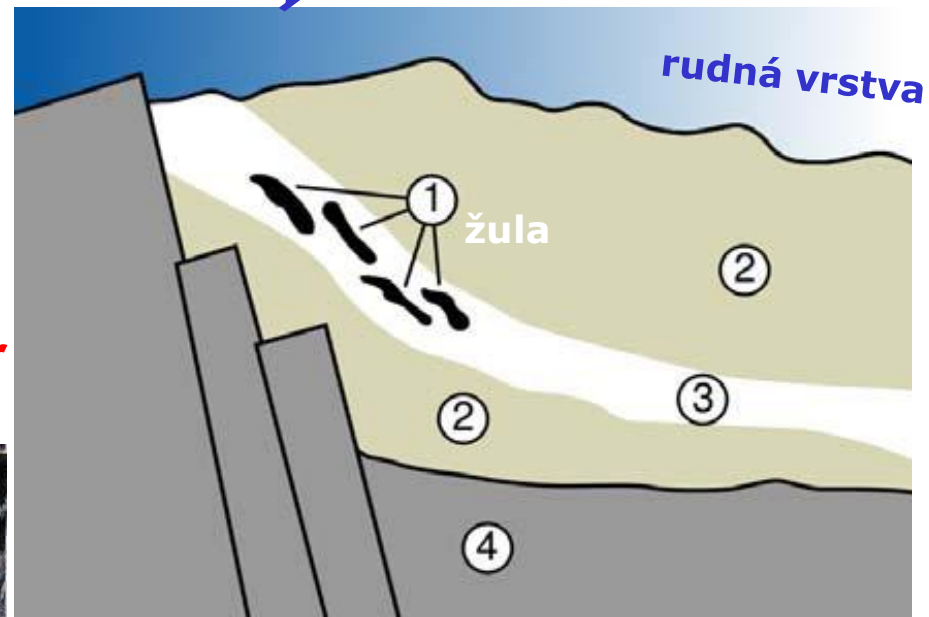
**Ing. Jan Zdebor, CSc.**

## Témata přednášek :

1. **Základní pojmy**
2. **Základní typy provozovaných energetických reaktorů**
3. **Perspektivní reaktorové systémy**
4. **Hlavní technologické celky primárního okruhu jaderné elektrárny**
  - 4.1 **Jaderné reaktory (PWR, VVER)**
    - 4.1.1 *Tlakové nádoby a víka JR*
    - 4.1.2 *Konstrukce HB JR, (BER, konstr. řešení přírubových spojů )*
    - 4.1.3 *Vnitřních části JR (BOT, ŠR, ...)*
    - 4.1.4 *Palivové články*
    - 4.1.5 *Řídící tyče*
    - 4.1.6 *Pohony řídicích tyčí*
  - 4.2 *Parogenerátory*
  - 4.3 *HČČ,*
  - 4.4 *HCP,*
  - 4.5 *KO*
  - 4.6 *Aktivní a pasivní havarijní systémy( SAOZ)*
  - 4.7 *Strojní vybavení šachty reaktoru*
  - 4.8 *Technologická měření na primárním okruhu JE („in core“)*
5. **Odstavení reaktoru na výměny paliva, transport a ukládání JP**
6. **Spolehlivost jaderných reaktorů**
7. **Bezpečnost jaderných reaktorů**
8. **Servis zařízení primárního okruhu JE**



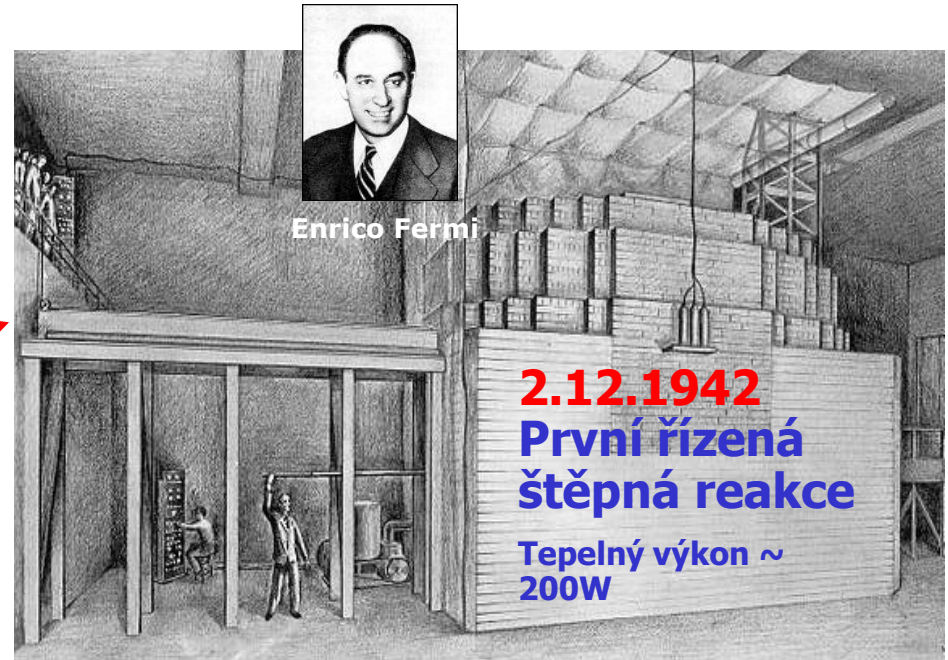
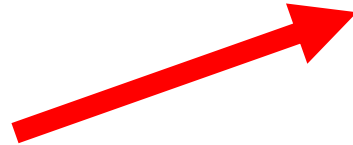
## První přírodní jaderný reaktor



1972 - objeven přírodní jaderný reaktor v dole Oklo v Gabonu v západní Africe.

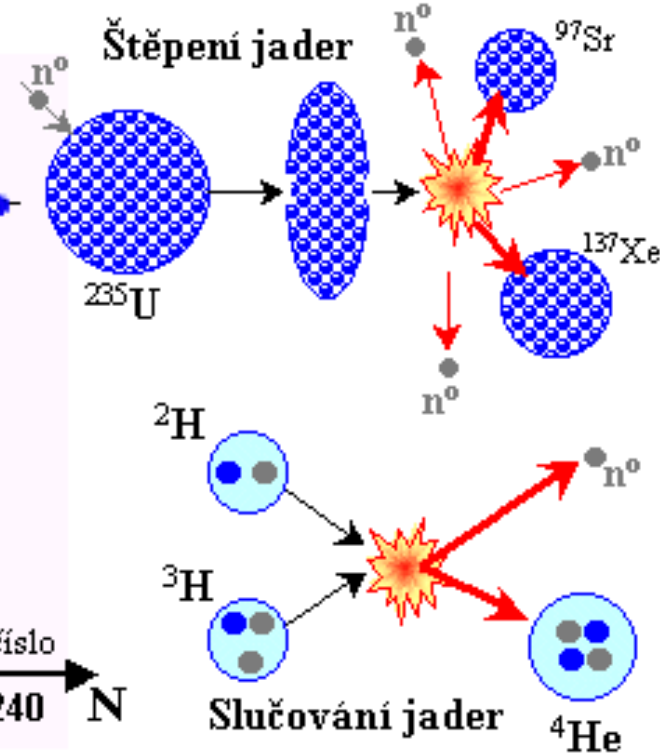
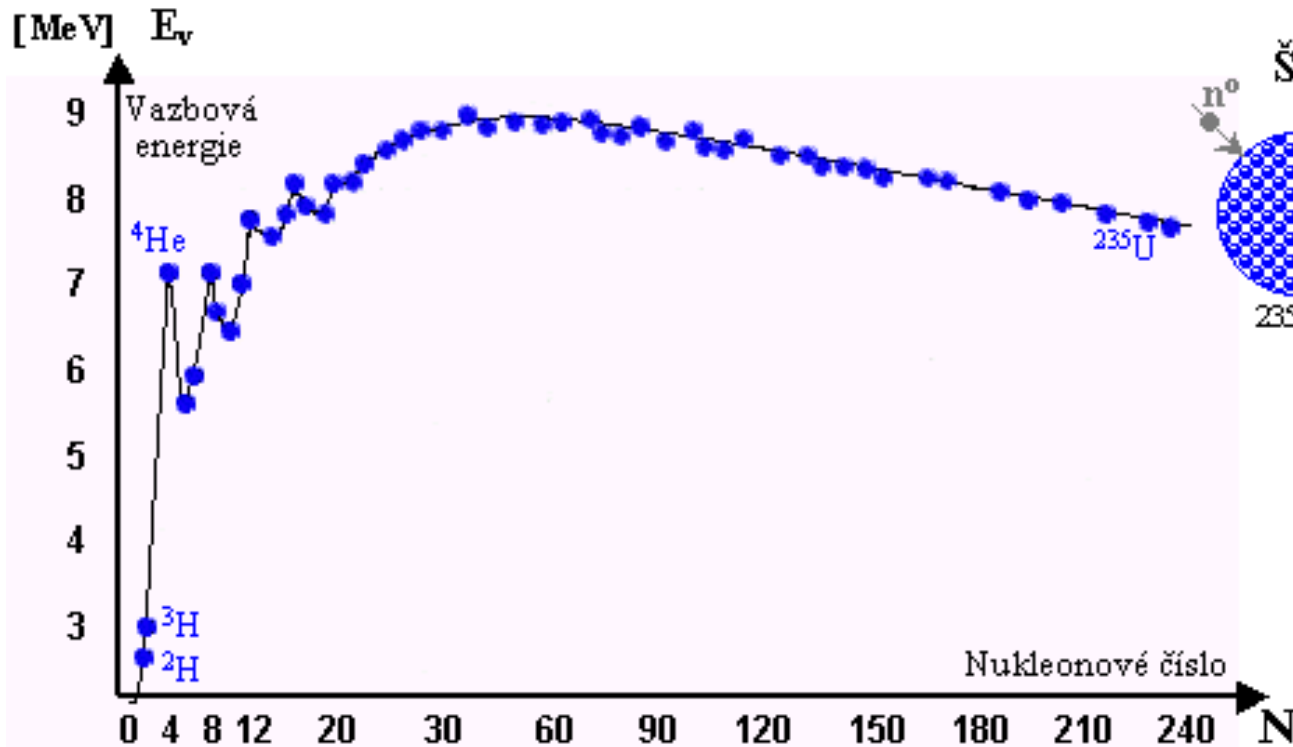
2 miliardy let staré ložisko uranu o tloušťce 5 až 10 metrů a šířce 600 až 900 metrů bylo ponořeno pod dnem řeky. Tento přírodní "reaktor" celkem uvolnil energii asi 15 GW-let s průměrným výkonem 100 kW

## Využití jaderné energie



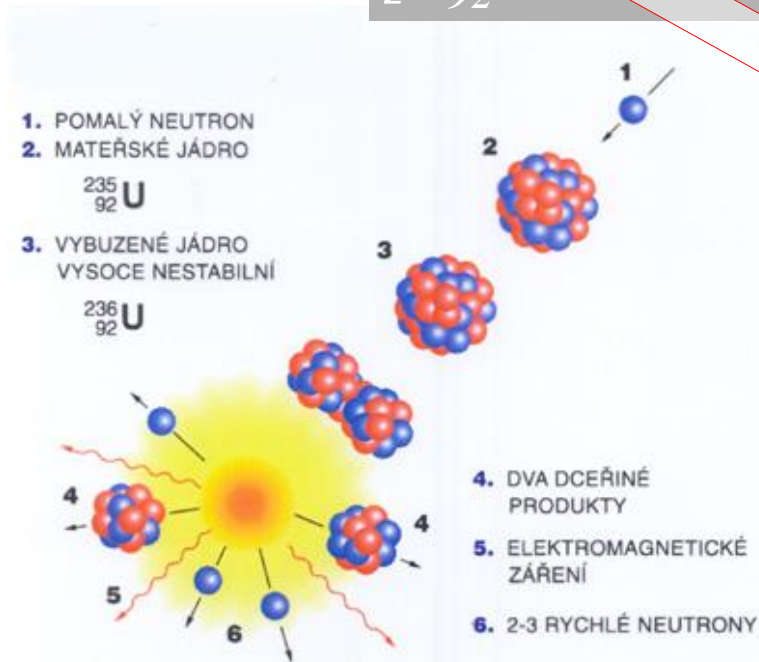
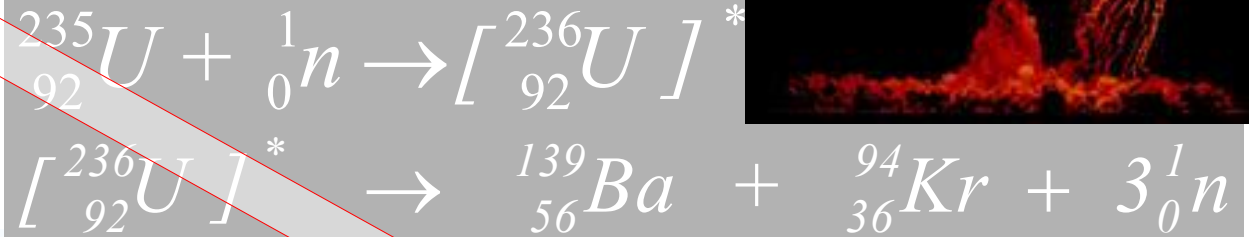
*První jaderný reaktor  
– první „primární okruh“*

## Vazebná energie



## Štěpná řetězová reakce

- Neřízená – jaderná exploze
- Řízená – jaderný reaktor



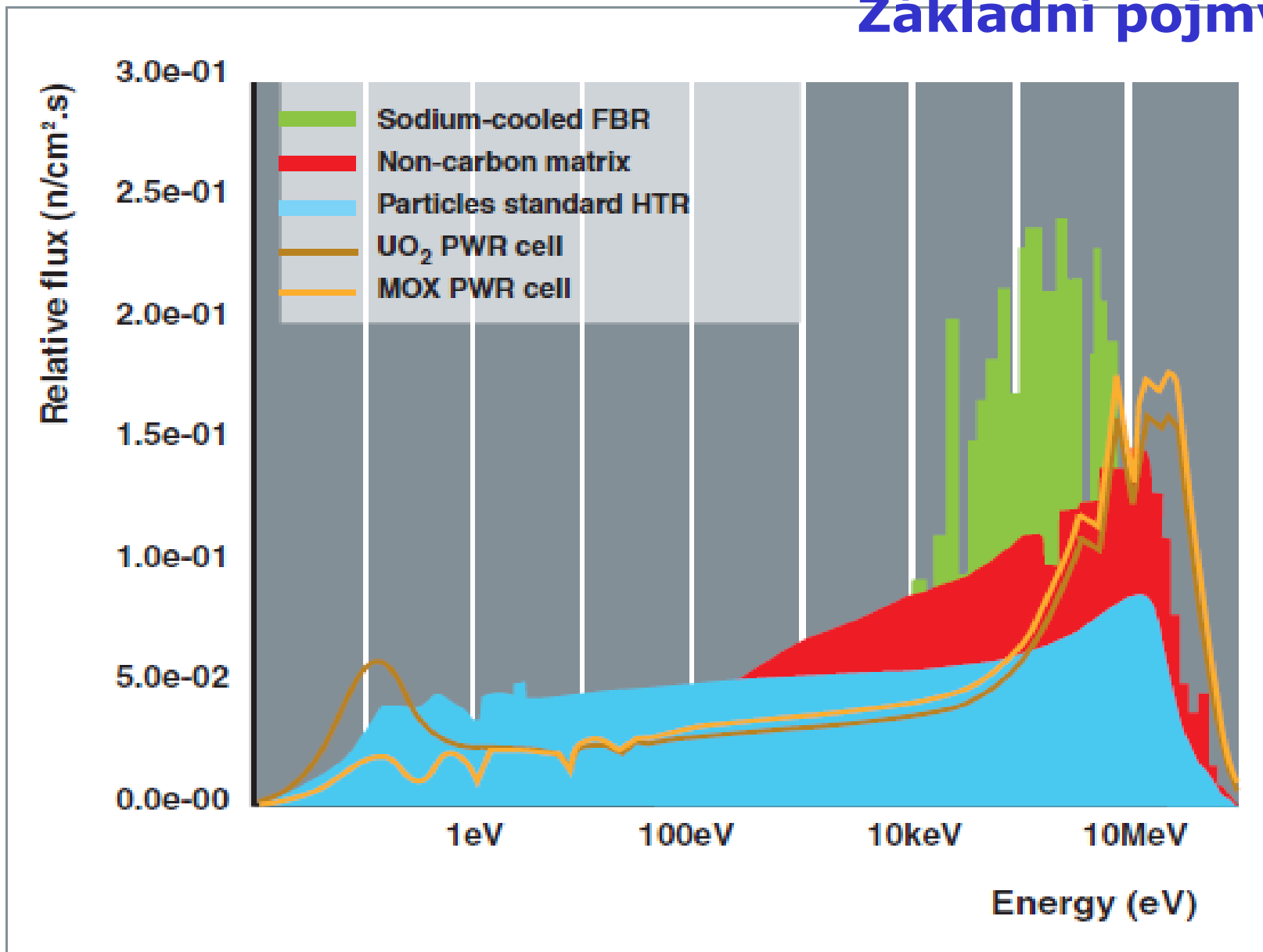


Fig. 35. Neutron spectrum\* for different reactor types.

## *Fyzika reaktoru*

Rovnice kinetiky reaktoru

$$P_R(\tau) = f[\rho(\tau)]$$

časová závislost výkonu JR  
(množství neutronů)  
na velikosti reaktivity

**reaktivita**  $\rho = (k - 1)/k$ , relativní přírůstek neutronů  
za dobu života jedné generace

## *Neutronová bilance v JR*

**multiplikační koeficient** (násobení)

$k =$  poměr počtu neutronů jedné generace  
k počtu neutronů předcházející generace

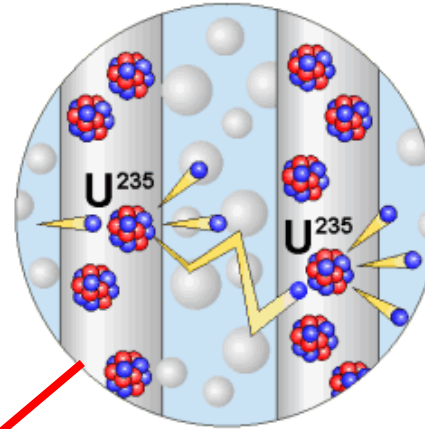
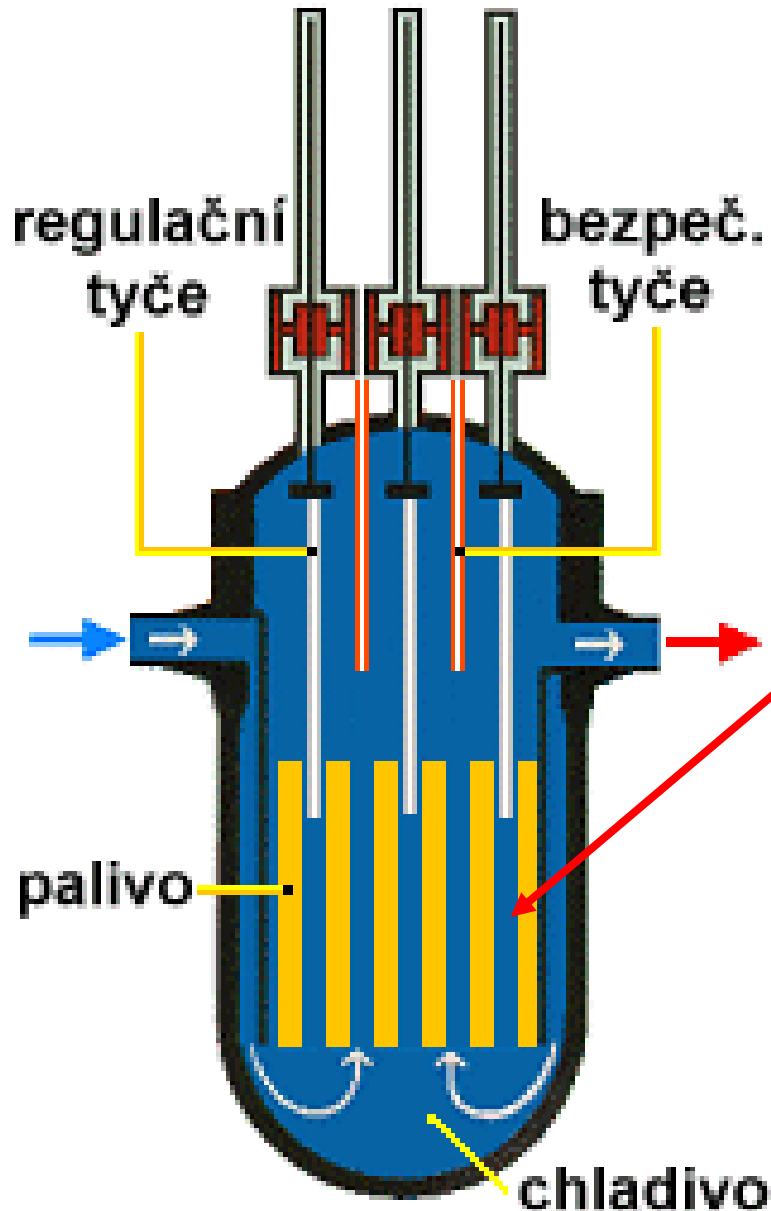
$k < 1 \Rightarrow \rho < 0$  - JR je podkritický

$k = 1 \Rightarrow \rho = 0$  - JR je kritický

$k > 1 \Rightarrow \rho > 0$  - JR je nadkritický



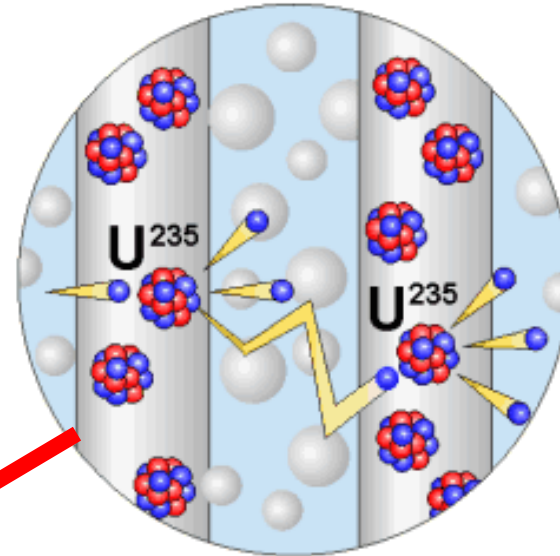
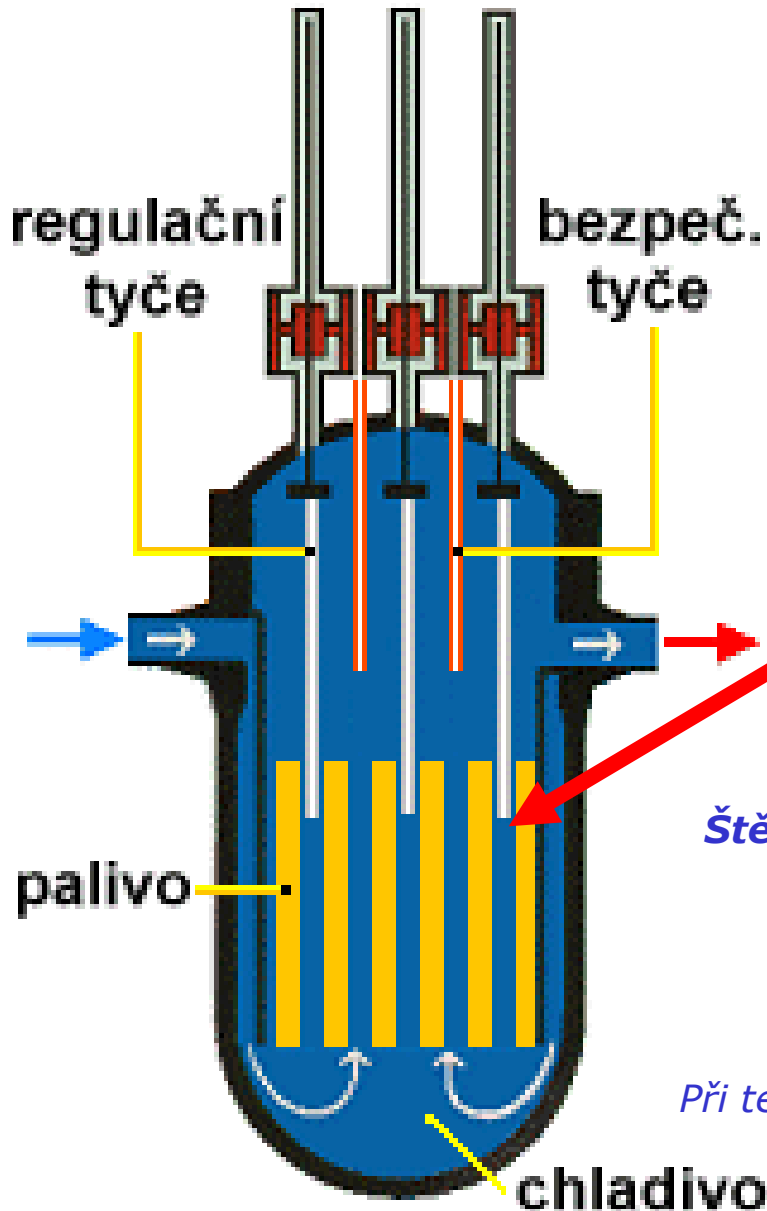
## Vývin tepla v jaderném reaktoru [06,07]



Forma uvolněné energie	Uvolněná energie		Vzdálenost od místa štěpení	Zpoždění
	[MeV]	[%] přibližně		
Kinetická energie štěpných trosek	$167 \pm 5$	81.5	$< 0,1$ mm	ne
Okamžité záření gama	$6 \pm 1$	3	$\sim 1$ m	ne
Kinetická energie štěpných neutronů	5	2.5	0,1 - 1 m	ne
Rozpad štěpných trosek:				
beta	$8 \pm 1,5$	4	$< 0,1$ mm	ano
gama	$6 \pm 1$	3	$\sim 1$ m	ano
Neutrino	$12 \pm 2,5$	6		ano
Celková energie uvolněná na jedno štěpení	$204 \pm 7$	100		

**Prakticky využitelná energie (bez neutrin) ze štěpení 1 jádra je  $\sim 192$  MeV (30,9 pJ)**

## Vývin tepla v jaderném reaktoru [06,07]



**1 kg  $U^{235}$  obsahuje  $N_A/A$  atomů, tj.**  
 $6,022 \cdot 10^{26} / 235 \sim 2,56 \cdot 10^{24}$  atomů

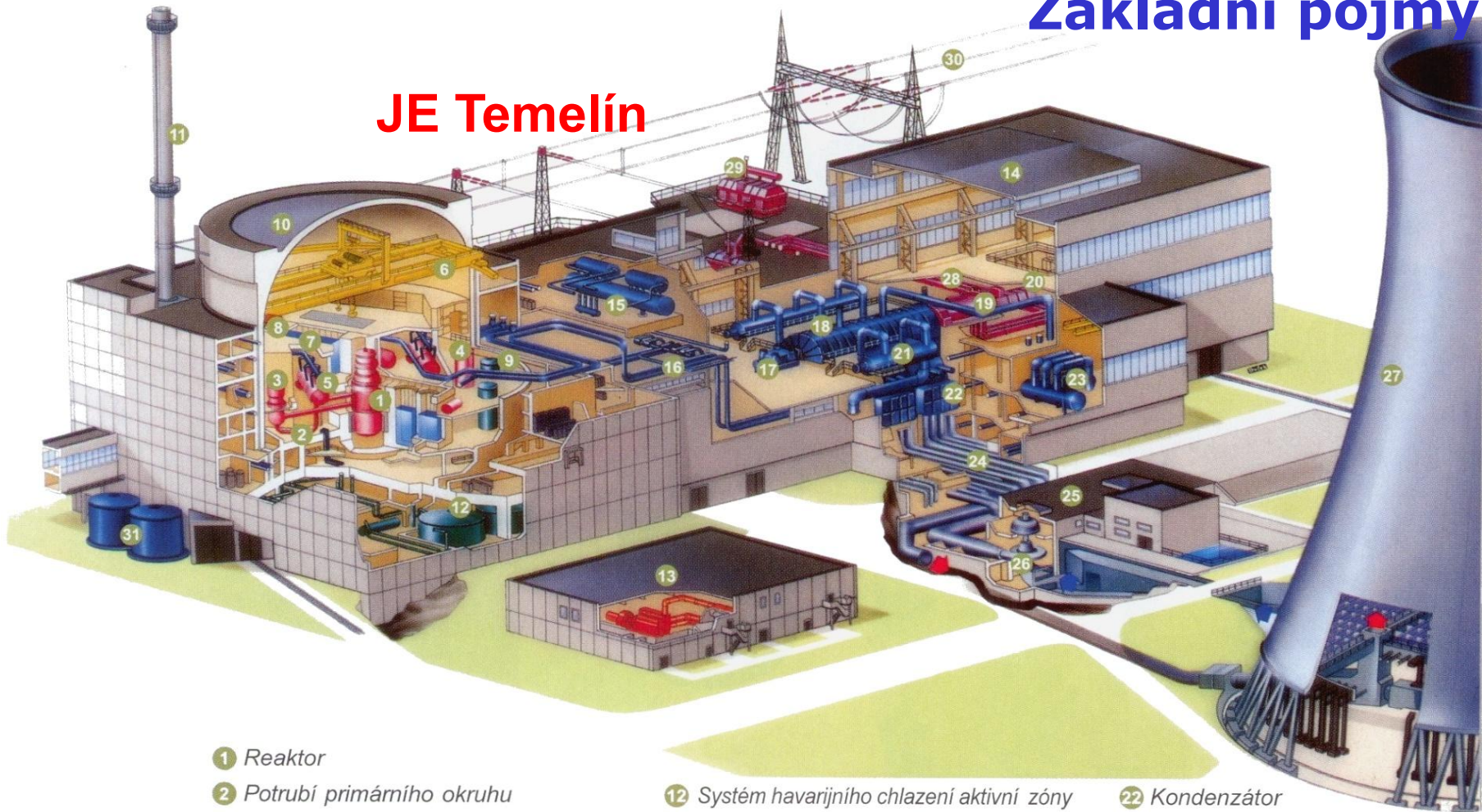
**Štěpení 1 jádra  $U^{235}$   $\sim 192$  MeV (30,9 pJ)**

$$\text{1 kg } U^{235} \cdot 2,56 \cdot 10^{24} \times 30,9 \cdot 10^{-12} = 8 \cdot 10^{23} \text{ J}$$

$$8 \cdot 10^{23} \text{ J} \sim 2,22 \cdot 10^7 \text{ kWh} \sim 1000 \text{ MWd}$$

Při tepelné účinnosti 33%  $\sim 3$  kg  $U^{235}$  pro celodenní provoz  
1000 MW bloku

## JE Temelín



- |                              |   |                                 |
|------------------------------|---|---------------------------------|
| 1 Reaktor                    | 12 Systém havarijního chlazení aktivní zóny | 22 Kondenzátor                  |
| 2 Potrubí primárního okruhu  | 13 Diesलगenerátorová stanice                | 23 Tepelný výměník              |
| 3 Hlavní cirkulační čerpadlo | 14 Strojovna                                | 24 Vstup a výstup chladicí vody |
| 4 Kompenzátor objemu         | 15 Napájecí nádrž                           | 25 Čerpací stanice              |
| 5 Parogenerátor              | 16 Hlavní parní potrubí                     | 26 Čerpadlo chladicí vody       |
| 6 Polární jeřáb              | 17 Vysokotlaký díl turbíny                  | 27 Chladicí věž                 |
| 7 Bazén vyhořelého paliva    | 18 Nízkotlaký díl turbíny                   | 28 Vývod výkonu z generátoru    |
| 8 Zavážecí stroj             | 19 Generátor                                | 29 Transformátor                |
| 9 Hydroakumulátory           | 20 Budič                                    | 30 Vyvedení výkonu              |
| 10 Ochranná obálka           | 21 Separátor                                | 31 Zásobníky destilátu          |
| 11 Ventilační komín          |   |                                 |

## Primární okruh jaderné elektrárny (I.O.)

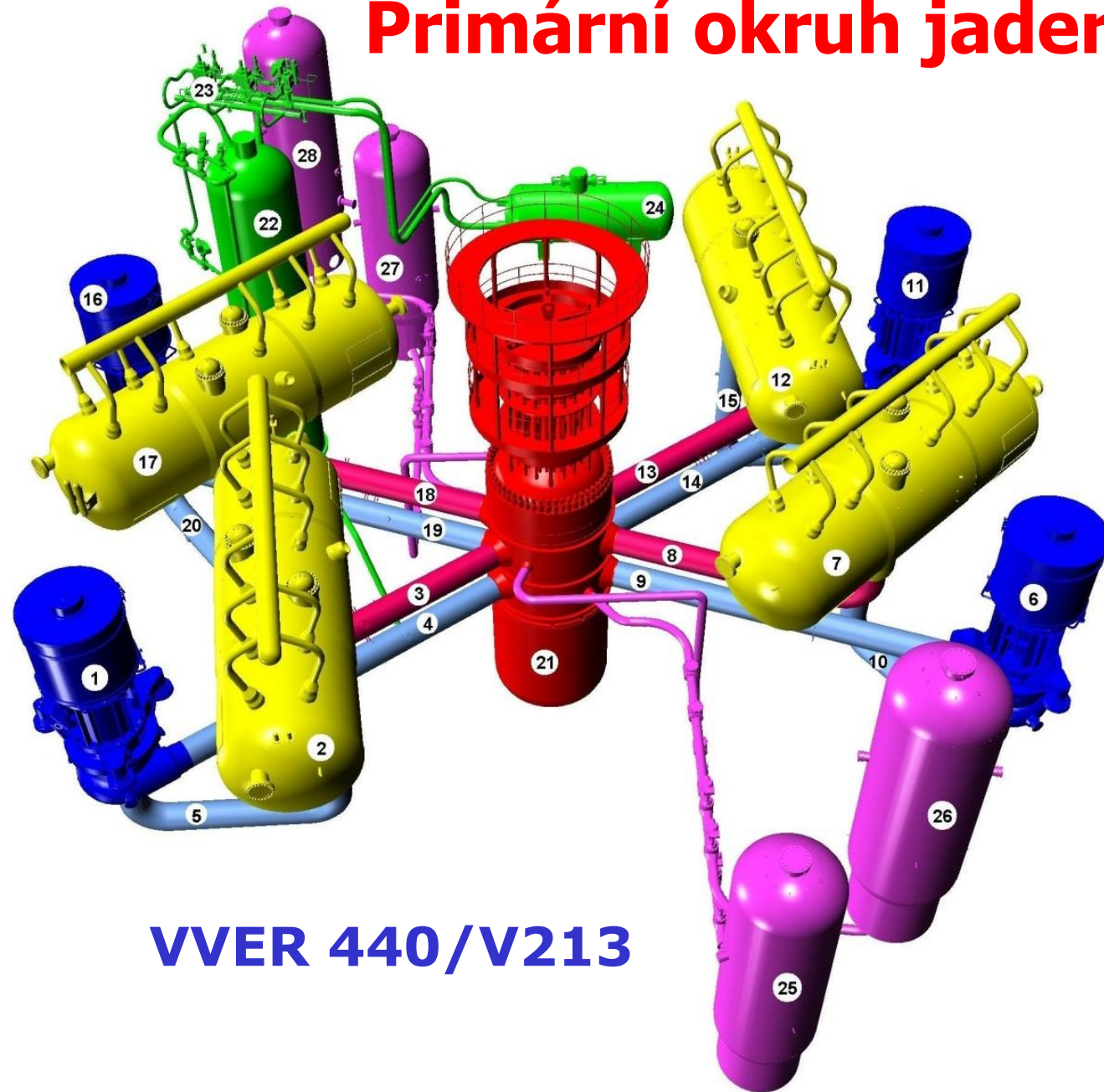
Je systém zařízení, který zajišťuje nepřetržitý přenos tepelné energie prostřednictvím chladiva z aktivní zóny (AZ) do parogenerátoru (PG) - horká větev a zpětný přívod ochlazeného chladiva do prostoru AZ - studená větev hlavního cirkulačního potrubí (HCP).



Zdrojem tepla pro ohřev chladiva je tepelná energie uvolněná při řízené štěpné řetězové reakci v jaderném palivu v AZ.

Uvolněné teplo je z AZ reaktoru odváděno nucenou cirkulací chladiva, kterou zajišťují hlavní cirkulační čerpadla (HCČ), umístěná na studené větvi HCP.

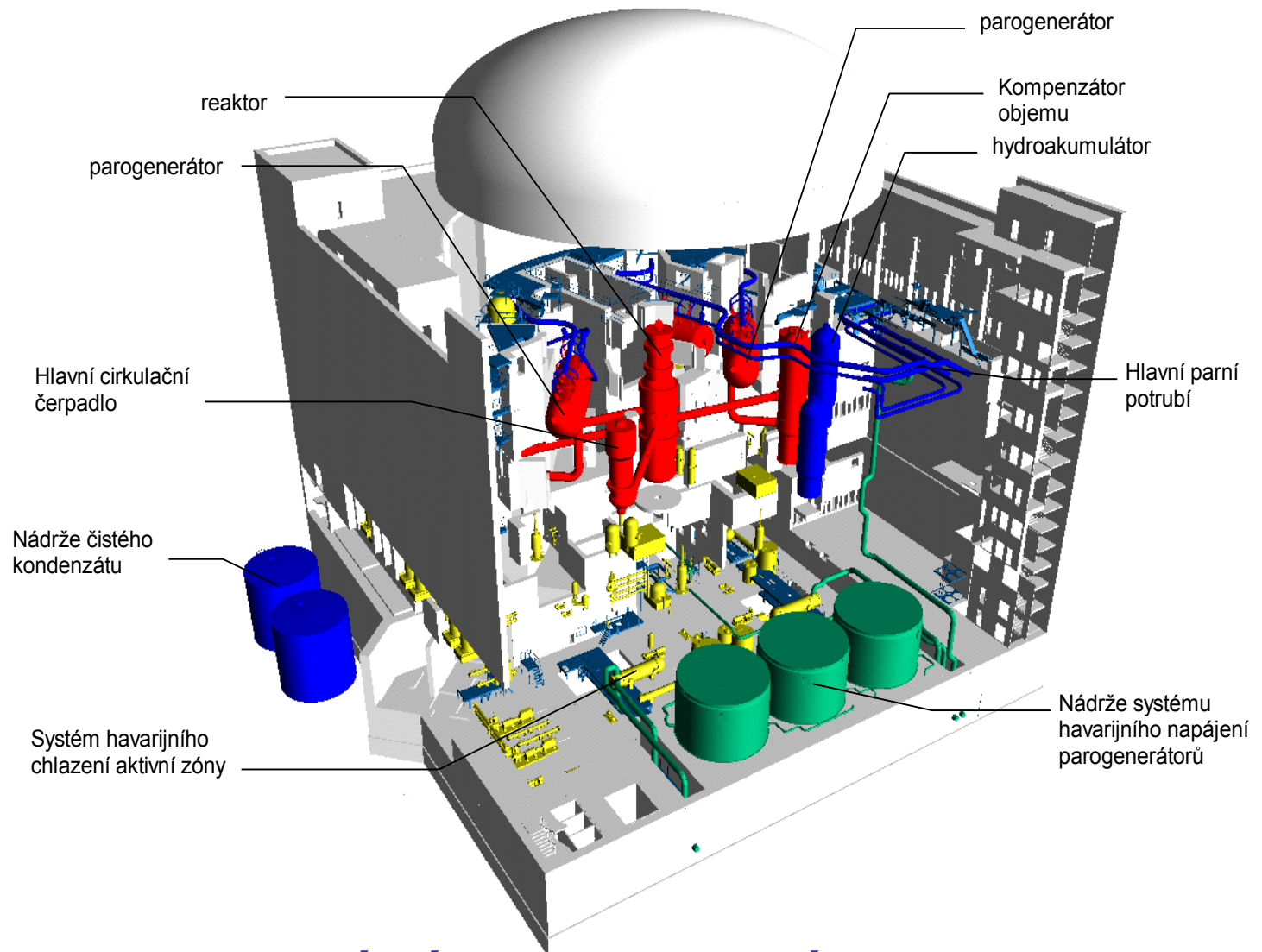
## Primární okruh jaderné elektrárny



**VVER 440/V213**

Č.	Technologické zařízení
1	Hlavní cirkulační čerpadlo
2	Parogenerátor
3	Horká větev cirkulační smyčky
4	Studená větev cirkulační smyčky
5	Studená větev cirkulační smyčky
6	Hlavní cirkulační čerpadlo
7	Parogenerátor
8	Horká větev cirkulační smyčky
9	Studená větev cirkulační smyčky
10	Studená větev cirkulační smyčky
11	Hlavní cirkulační čerpadlo
12	Parogenerátor
13	Horká větev cirkulační smyčky
14	Studená větev cirkulační smyčky
15	Studená větev cirkulační smyčky
16	Hlavní cirkulační čerpadlo
17	Parogenerátor
18	Horká větev cirkulační smyčky
19	Studená větev cirkulační smyčky
20	Studená větev cirkulační smyčky
21	Reaktor
22	Kompenzátor objemu
23	Uzel pojistných ventilů systému kompenzace objemu
24	Barbotážní nádrž
25	Hydroakumulátor
26	Hydroakumulátor
27	Hydroakumulátor
28	Hydroakumulátor

## Tlakovodní reaktory VVER

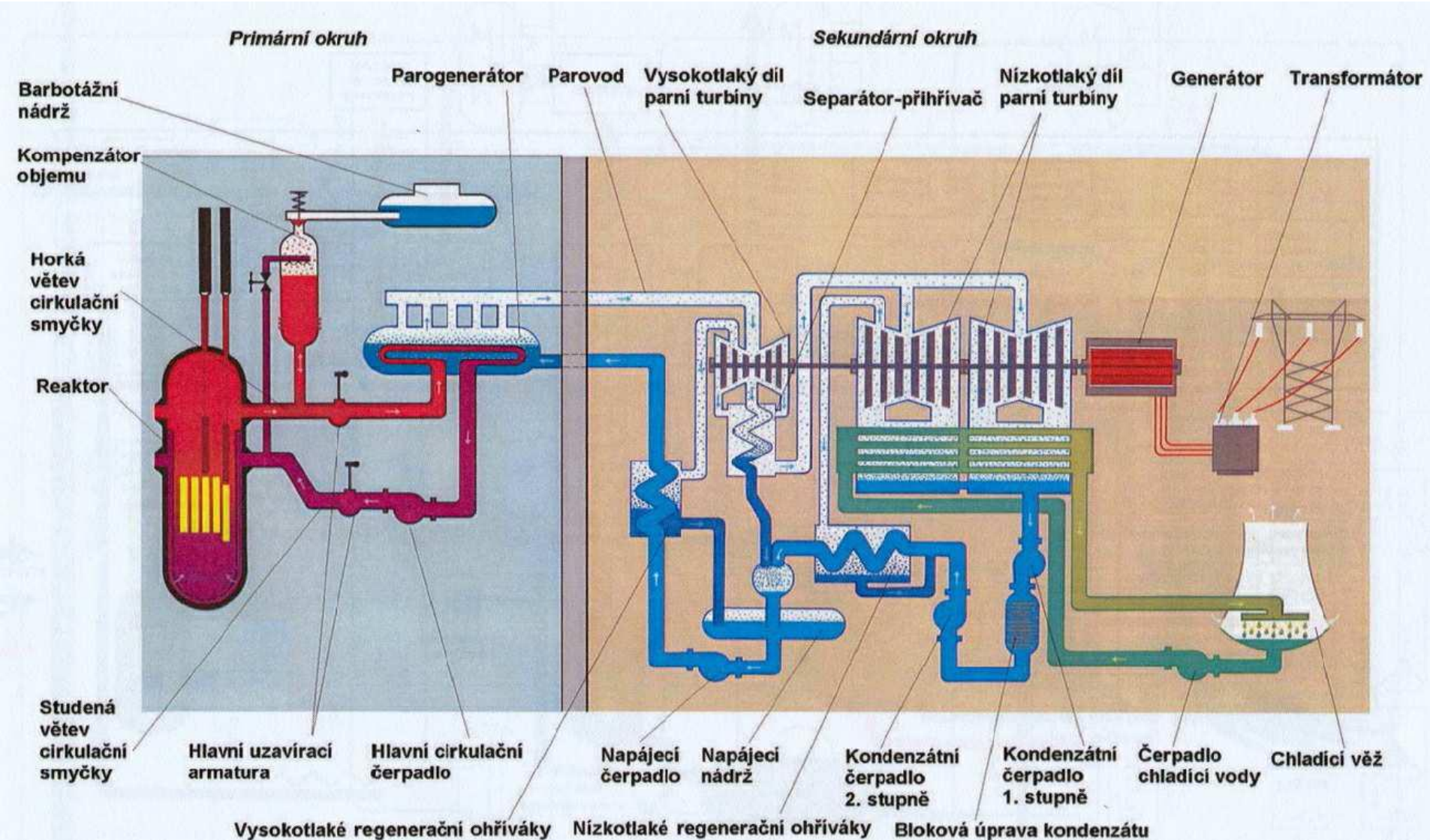


**Primární okruh JE Temelín**

# Základní pojmy

PS_DPS	DPS	Název	Название	Name
PS	3.01	Primární okruh	Первый контур	PRIMARY CIRCUIT
DPS	3.01.01	Tlakovodní reaktor	Реактор	Reactor
DPS	3.01.02	Parogenerátory	Парогенераторы	Steam generators
DPS	3.01.03	Hlavní cirkulační čerpadla	Главные циркуляционные насосы	Main coolant pumps
DPS	3.01.05	Systém kompenzace objemu	Система компенсации объема	Pressurizer
DPS	3.01.06	Zdvihací mechanismy	Подъемные механизмы	Handling equipment
DPS	3.01.07	Spojovací potrubí	Соединительные трубопроводы	Connecting piping
DPS	3.01.12	Technologické plošiny	Металлоконструкции	Steel constructions
DPS	3.01.15	Stínící desky a překrytí	Защитные плиты и перекрытия	Biological shields
DPS	3.01.16	Provozní diagnostika	Эксплуатационная диагностика	Diagnostic monitoring system
PS	3.02	Transportně technologická část	Транспортно-технологическая часть	FUEL TRANSPORT AND HANDLING
DPS	3.02.01	Zařízení pro přepravu, příjem a skladování čerstvého paliva	Оборудование для транспорта и хранения свежего топлива	Fresh fuel transport, reception and storage equipment
DPS	3.02.02	Zařízení pro výměnu paliva	Оборудование для перегрузки топлива	Refuelling system
DPS	3.02.03	Zařízení pro skladování vyhořelého paliva	Оборудование для хранения отработанного топлива	Spent fuel storage equipment
DPS	3.02.04	Zařízení pro přípravu transportních kontejnerů k odvozu VP	Оборудование для подготовки транспортного контейнера к выгрузке отработанного топлива	Equipment for preparation of spent fuel transport containers

## Principální schéma JE s reaktorem PWR v provedení VVER



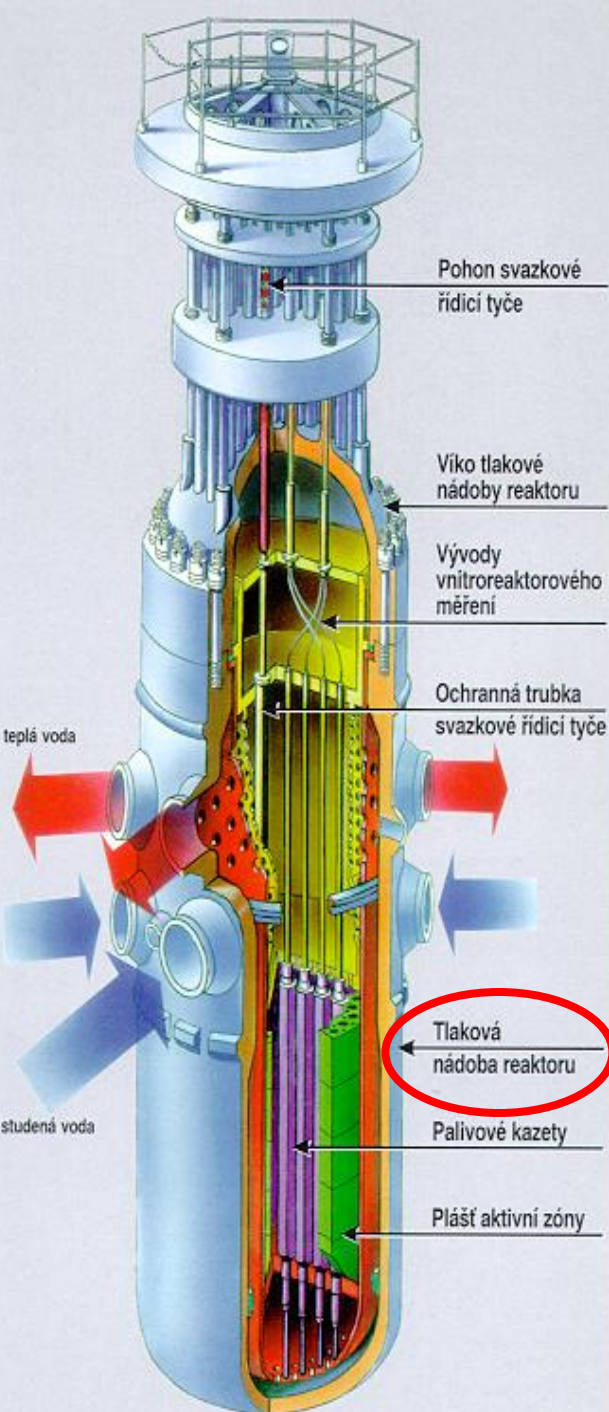


## Tlaková nádoba reaktoru (TNR)

### VVER 1000

Reactor pressure vessel

Корпус реактора



TNR slouží k umístění vnitřních částí reaktoru, a to včetně aktivní zóny (AZ).

Je cca 11 m vysoká a má vnější průměr asi 4,5 m.

Tloušťka stěny její válcové části je 193 mm.

Nádoba je navržena na výpočtový tlak 17,6 MPa

při teplotě 350 °C

(provozní tlak je 15,7 MPa při teplotách 290-320 °C)

TNR je vyrobena z vysoce kvalitní nízkolegované chrom - nikl - molybden - vanadové oceli.

TNR ETE 1,2 byla vyrobena ve ŠKODA JS Plzeň speciální technologií s cílem zajistit požadovanou radiční odolnost materiálu TNR. Ke sledování procesu křehnutí TNR v důsledku působení neutronového záření jsou v reaktoru umístěny svědečné vzorky materiálu, které se pravidelně vyhodnocují.

Odnímatelné víko TNR je k válcové části připevněno hydraulicky předepjatými svorníky a je utěsněno dvěma kovovými samotěsnícími kroužky, jejichž těsnost je nepřetržitě monitorována.

## Vnitřní části reaktoru (VČ)

Internal vessel

Внутрикорпусные устройства

tvorí :

- blok ochranných trub
- šachta reaktoru
- plášť aktivní zóny

Na vnitřním osazení děrovaného eliptického dna šachty je usazena distanční deska s podpěrami pro uložení palivových souborů. Dno šachty slouží k usměrnění a ke zrovnoměrnění toku chladiva AZ reaktoru. Plášť AZ chrání tlakovou nádobu před účinky toku neutronů. Shora je na aktivní zónu usazen blok ochranných trub, který určuje vzájemnou polohu palivových souborů a slouží k vedení regulačních tyčí (klastrů) a také k vývodu signálů z vnitroreaktorového měření.

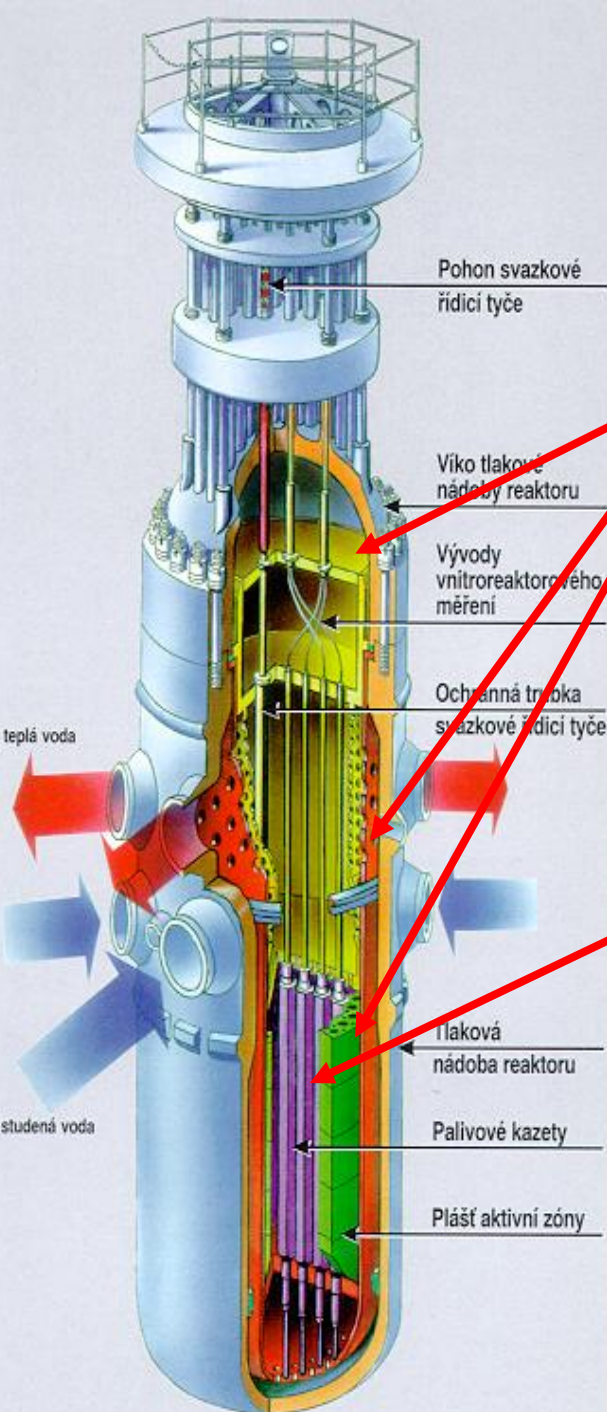
## Aktivní zóna reaktoru (AZ)

Corre

Активная зона

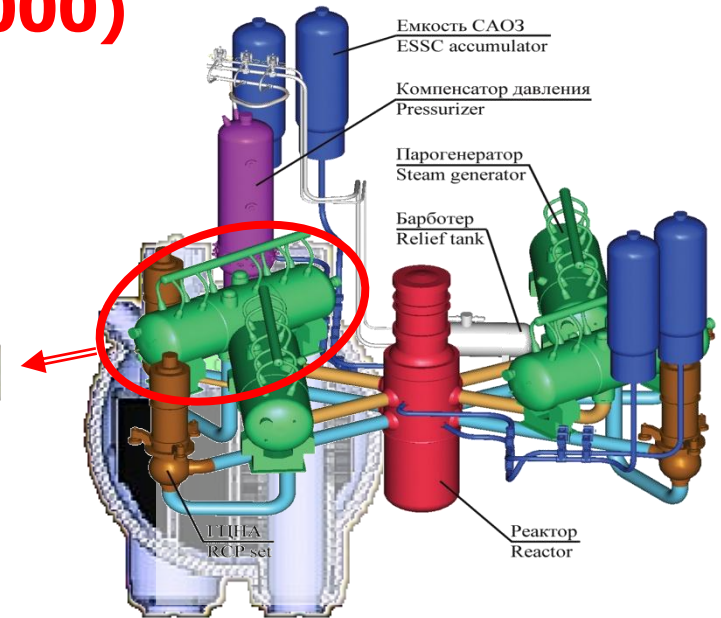
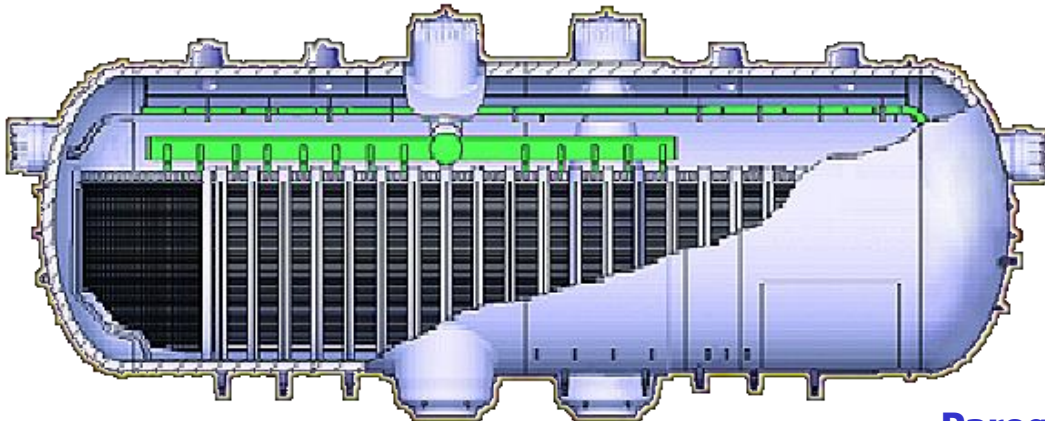
AZ reaktoru o výšce 3530 mm a průměru 3160 mm tvoří celkem 163 palivových souborů a 61 regulačních tyčí (klastrů). Palivové soubory jsou uspořádány v hexagonální mříži. Každý sestává z 312 palivových proutků, 18 vodících trubek a z jedné centrální měřicí trubky.

Palivové soubory jsou v AZ umístěny v přesně stanovených pozicích. V celé vsázce je 92 tun paliva, které je tvořeno mírně obohaceným uranem 235. Při výměně paliva se ročně vyjme z AZ asi 1/4 palivových souborů.



## Parogenerátor (VVER 1000)

Steam generator  
Парогенератор



### Parogenerátor (PG)

je horizontální válcový výměník, dlouhý 14,8 m s  
vnějším průměrem v rozmezí 4,2 - 4,5 m.  
PG jsou vyrobeny z nízkolegované konstrukční oceli.  
Teplosměnné trubky jsou vyrobeny z chromniklové  
korozivzdorné oceli.

Ve čtyřech parogenerátorech vzniká pára pro pohon  
turbogenerátoru. Má tlak 6,3 MPa a teplotu 278,5 °C.

### Funkční a pomocné systémy PG a I.O.:

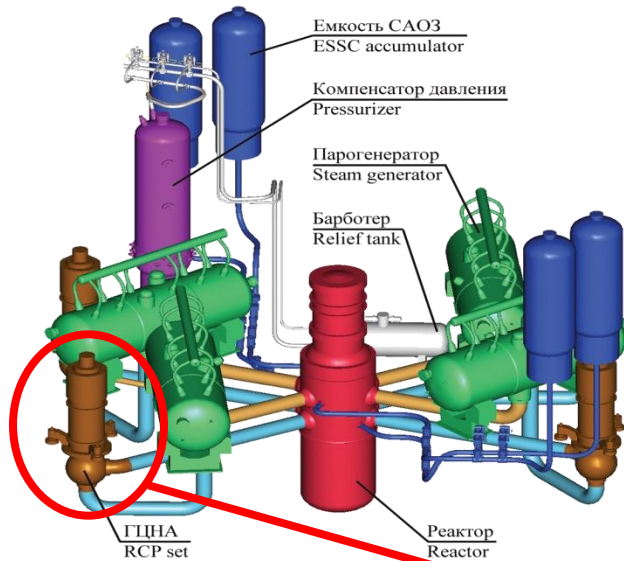
- Systém kontroly hladiny PG
- Systém kontroly vlhkosti páry v PG
- Systém RY – odluh a odkal PG
- Havarijní odvod paroplynové směsi z I.O. a PG (YR)

# Základní pojmy

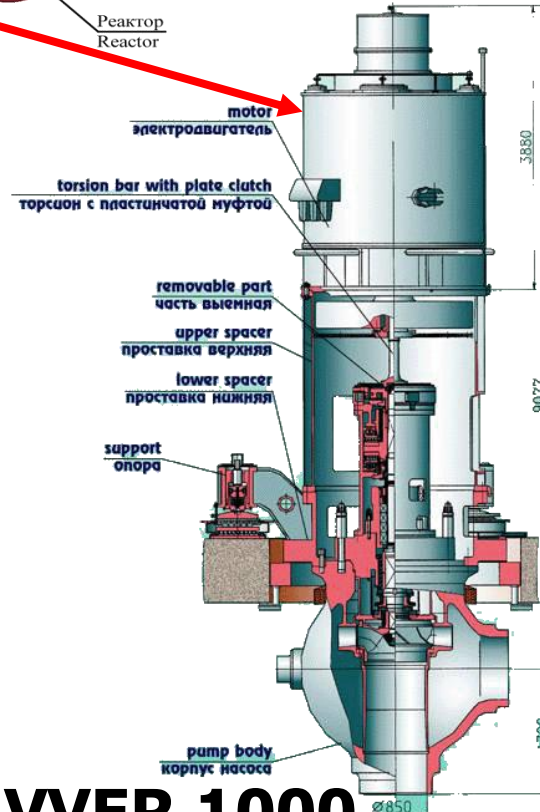
## Hlavní cirkulační čerpadlo

Reactor coolant pump

Главный циркуляционный насос



HCČ na VVER 1000 jsou rozmístěná po jednom na každé ze čtyř cirkulačních smyček a zabezpečují cirkulaci chladiva I.O., které odvádí teplo z AZ reaktoru do PG. Jsou použita vertikální odstředivá jednostupňová čerpadla, která jsou umístěná na studených větvích cirkulačních smyček I.O. HCČ jsou vysoká 11,9 m, jejich příkon za nominálního provozu je 5,1 MW. Průtok jedním HCČ při nominálních parametrech činí 21 200 m<sup>3</sup>/h. Bezporuchový provoz HCČ zabezpečují pomocné okruhy (olejové hospodářství, těsnicí voda, autonomní okruh chlazení a oplach koncového stupně ucpávek).



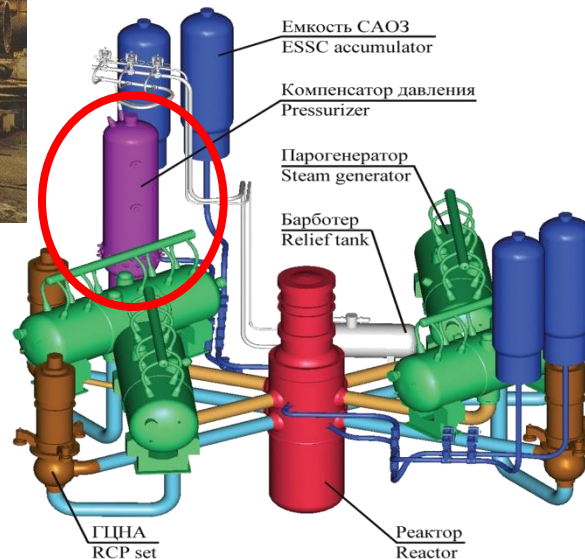
VVER 1000

## Kompensátor objemu

Pressurizer

Компенсатор объема

System kompenzace objemu vyrovnává objemové a tlakové změny v chladiči I.O. Hlavní částí systému je **kompenzátor objemu (KO)** - nádoba o výšce 16 m a průměru 3,5 m. KO je neoddělitelně připojený k I.O. Ze dvou třetin je zaplněn chladičem I.O. a z jedné třetiny parou. Tlak v I.O. je určován tlakem páry v horní části KO. Při poklesu tlaku v I.O. se zapínají elektroohříváky ve spodní části K.O. Tím se zvětší objem páry v horní části kompenzátoru objemu a v důsledku toho i tlak v I.O.



Při vzrůstu tlaku v primárním okruhu nad stanovenou hladinu je do činnosti uveden sprchový systém v horní části kompenzátoru. Jeho provozem se zmenší objem páry v parní části kompenzátoru a následně se sníží tlak v I.O. Pokud by sprchový systém nezajistil potřebné snížení tlaku v I.O., došlo by k otevření odlehčovacího ventilu a popřípadě i pojistných ventilů. Přes ně se pára přepouští do **barbotážní nádrže**, kde kondenzuje a při delším otevření pojistných ventilů přechází do **záchytných bazénů** v hermeticky uzavřených prostorech.

Výrobce KO i barbotážní nádrže pro ETE 1,2 byla firma VÍTKOVICE, a.s.

# Základní pojmy

## Hlavní cirkulační potrubí

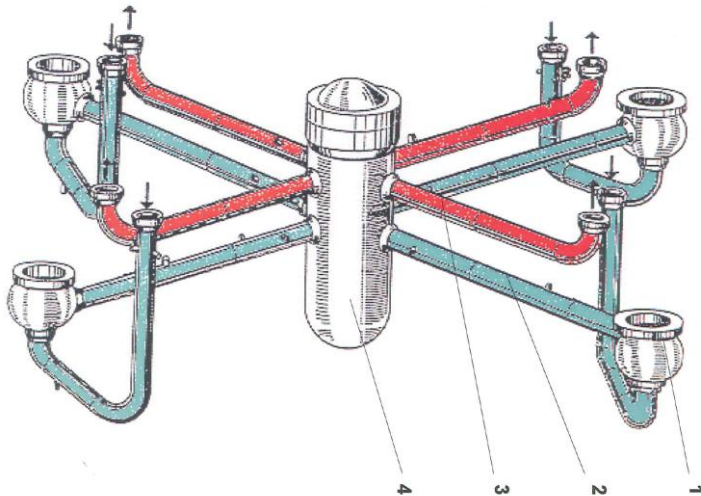
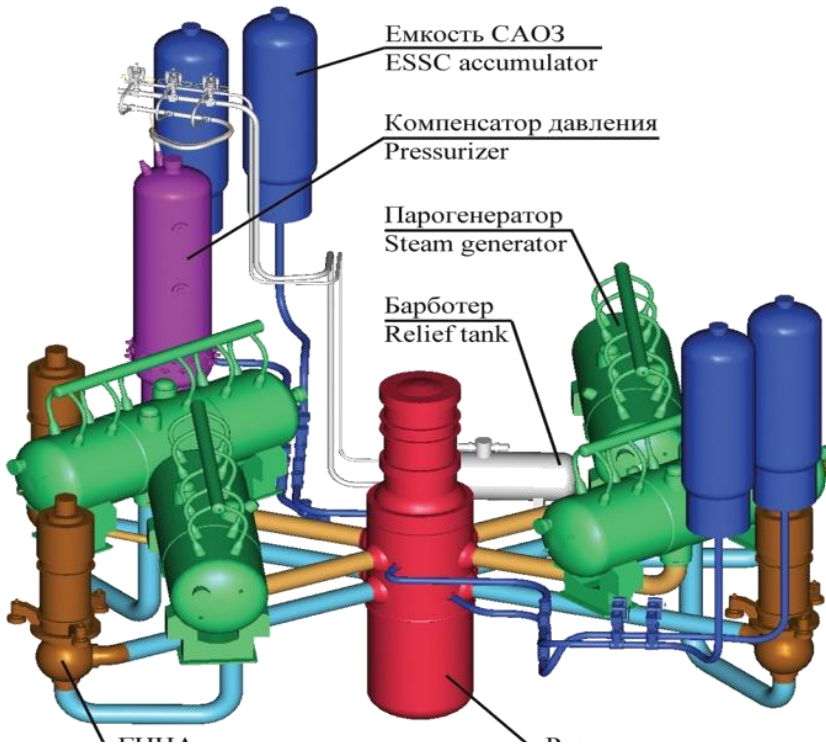
### Main coolant lines

### Главный циркуляционный трубопровод

HCP VVER 1000 je potrubí o průměru 850/995 mm z nízkolegované oceli s 2 vrstevným nerezovým návarem 5-7 mm, navzájem propojující reaktor, PG a HČČ. Pro snížení tepelných ztrát, ale současně pro umožnění kontroly jeho stavu, je toto potrubí opatřeno tepelnou snímací izolací. Ta část potrubí mezi reaktorem a PG, kterým proudí ohřátá voda z reaktoru do PG, je nazývána horkou větví, zbývající část potrubí, odvádějící vodu z PG přes HČČ do reaktoru, je nazývána studenou větví primárního okruhu.

### Hlavní cirkulační potrubí tvoří

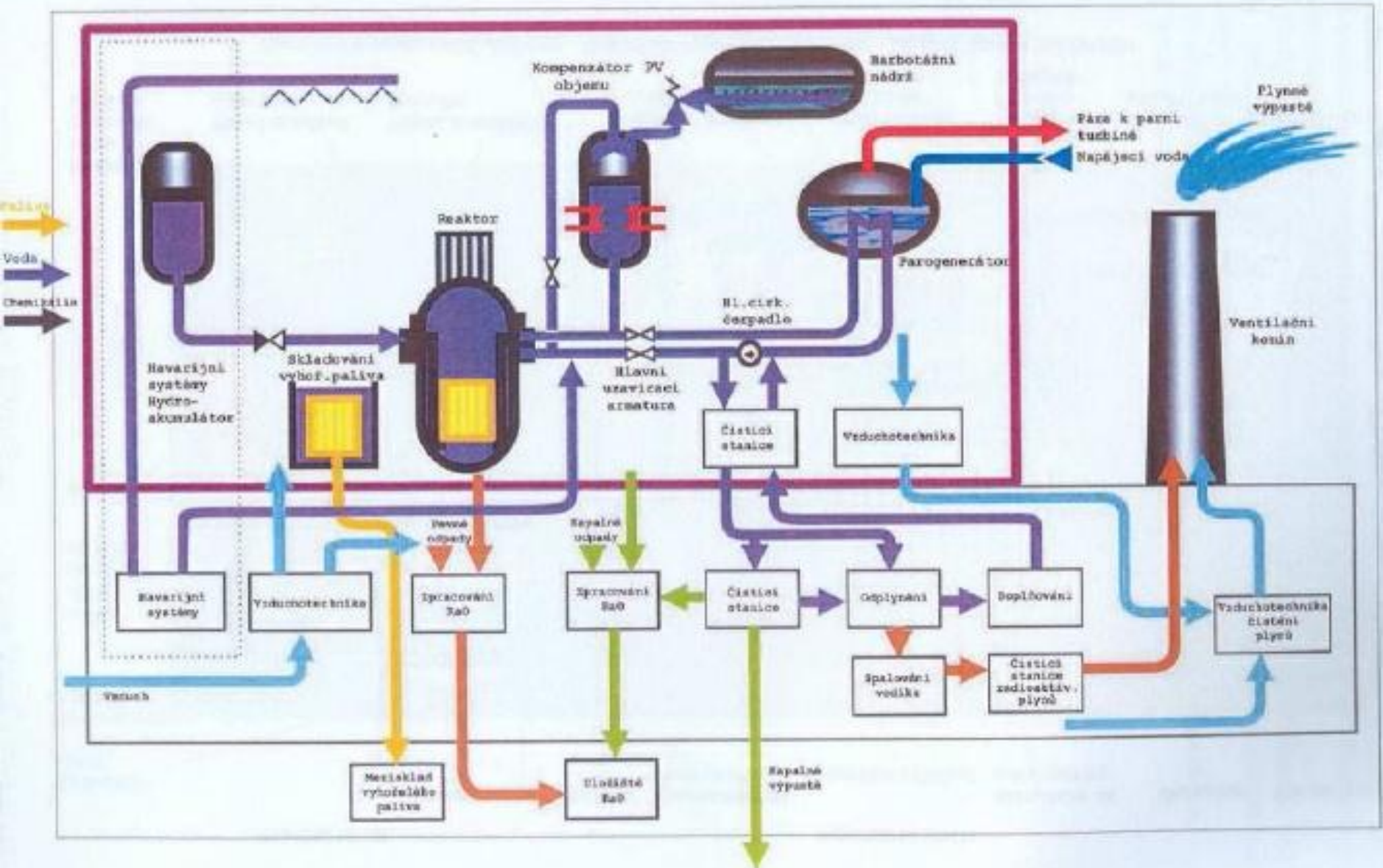
- potrubí a armatury kompenzace objemu primárního okruhu
- potrubí havarijního dochlazování
- systémy vložených okruhů chlazení
- potrubí technické vody
- potrubí pro vzduchotechniku
- ostatní potrubí, nádrže, čerpadla, armatury



## Pomocné systémy primárního okruhu JE Temelín

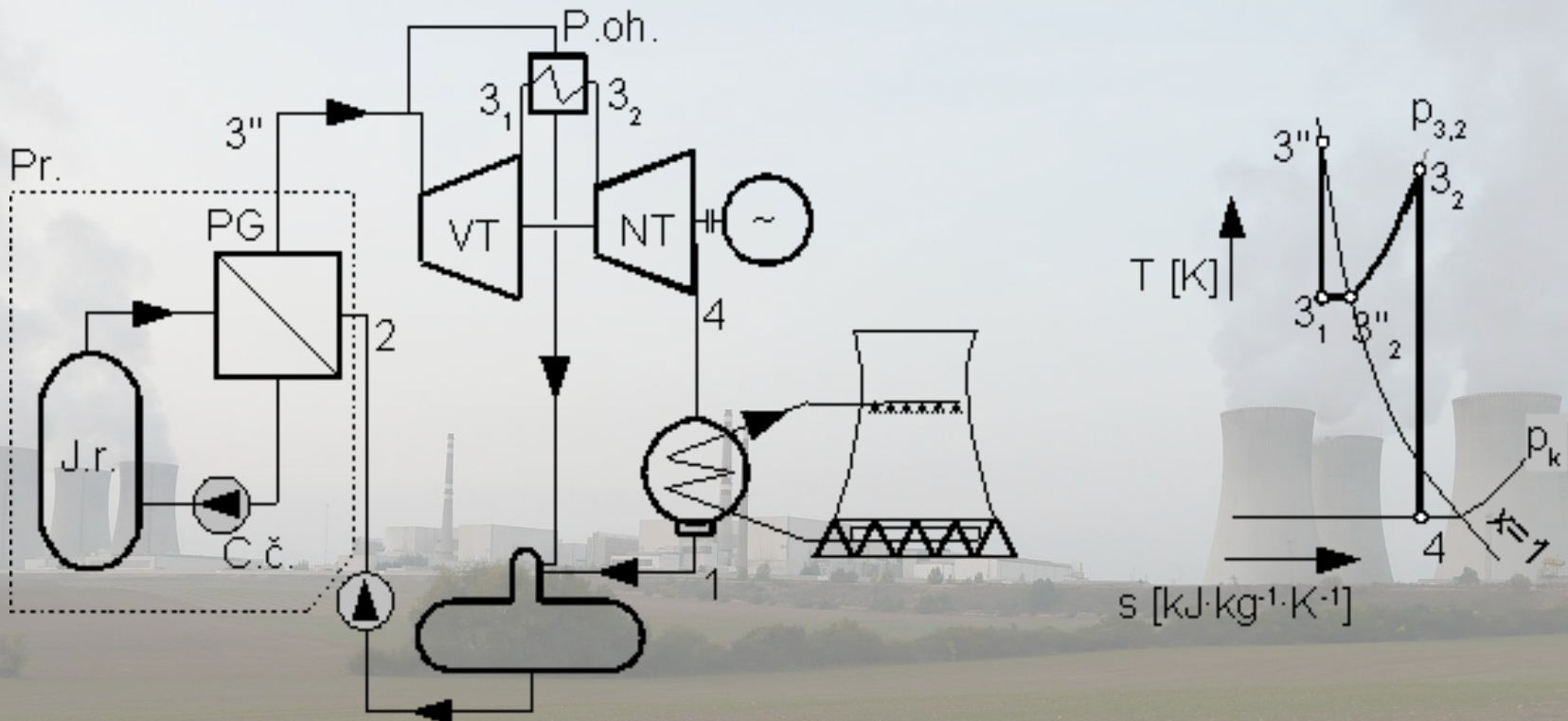
1. Systém sběru organizovaných úniků , systém TY
2. Systém doplňování a bórové regulace primárního okruhu, systém TK
3. Olejové hospodářství doplňovacích čerpadel, systém TK90
4. Olejové hospodářství reaktorovny, systém TA20
5. Systém spalování vodíku, systém TS10
6. Havarijní systémy, systémy TQ a YT
7. Systém chlazení bazénu skladování vyhořelého paliva, systém TG
8. Vložený okruh chlazení, systém TF
9. Systém bórového koncentrátu, systém TB10
10. Systém nečistého kondenzátu, systém TB30
11. Nádrže čistého kondenzátu, systém TB40 61
12. Systém doplňování čistého kondenzátu, systém TN
13. Systém sběru bórových vod reaktorovny, systém UR
14. Systém hydrozkoušek a proplachu čidel SK , systém UE,UD
15. Rozvod ostatních médií
16. Vzduchotechnika HVB a BPP

## Primární okruhu VVER 440/V213





## Primární okruhu VVER 440/V213



**Zjednodušené tepelné schéma jaderné elektrárny s reaktorem VVER 440 a průběh expanze v parní turbíně.**

Pr. primární okruh  
J.r. jaderný reaktor  
C.č. cirkulační čerpadlo,  
PG parogenerátor

P.oh. parní ohřívák  
VT vysokotlaký díl turbíny  
NT nízkotlaký díl turbíny



***...„Každá třetí žárovka v tomto státě svítí díky těm šesti jaderným blokům, které jsou spolehlivé, nikoho neohrožují, jsou i rozumně šetrné k životnímu prostředí. Tak pro mě by byla hloupost se toho vzdát z nějakých netechnických, neracionálních důvodů. „***

**Ing. Dana Drábová, PhD., Předsedkyně SÚJB  
Hospodářské noviny – Víkend, 20.2.2009**



## **VÝZVA FUKUŠIMY: FORMULACE SPRÁVNÉ ODPOVĚDI**

*ministerská konference MAAE o jaderné bezpečnosti*

*Vídeň, 21. června 2011*

*John Ritch, generální ředitel Světové jaderné asociace (WNA)*

**Při formování reakce na události ve Fukušimě je základní pravdou, že tato událost nijak nezměnila holou skutečnost, která přivedla v posledních letech tolik různých národů na společnou cestu využívání jaderné energie.**

- **Explozivní nárůst obyvatelstva na Zemi bude pokračovat – ze 3 miliard v roce 1960 na dnešních téměř 7 miliard, s předpokládaným zvýšením na 9 miliard do roku 2050.**
- **Světová poptávka po elektrické energii se bude ještě rychleji zvyšovat a do roku 2050 se ztrojnásobí.**
- **Věda o Zemi a jejích systémech nás bude nadále varovat, že musíme snížit emise uhlíku o 80% - jinak riskujeme radikální změny klimatu na Zemi, představující hrozbu pro celou civilizaci.**
- **A stále bude platit, že náš svět může dosáhnout revoluce čisté energie pouze při rozsáhlém a širokém využití jaderné energie.**

# Literatura ke kapitole

## 1. Primární okruh JE – Základní pojmy

- [01] J.R. Lamarsh, A.J. Baratta : Introduction to Nuclear Engineering, Prentice-Hall, Inc., New Jersey 2001
- [02] J. Bečvář a kol.: Jaderné elektrárny, SNTL Praha, 1981
- [03] Jaderná elektrárna s reaktory VVER-440 typ 213 včetně technologických systémů, Studie 1/1987, ÚISJP Zbraslav, 1987
- [04] Jaderná elektrárna s reaktory VVER-1000 včetně technologických systémů, Studie 3/1987, ÚISJP Zbraslav, 1987
- [05] Zařízení VVER, Dokumentace Interatomenergo
- [06] Učební texty ČEZ, Základní zařízení primárního okruhu, ČEZ 2003
- [07] B. Heřmanský : Termo – mechanika jaderných reaktorů, ČSAV Academia, Praha, 1986
- [08] F. Klik, J. Daliba - Jaderná energetika, Vydavatelství ČVUT, Praha, 2002
- [09] B. Heřmanský : Jaderné energetické reaktory, ÚISJP Zbraslav, 1988
- [10] Zařízení VVER, Dokumentace ŠKODA JS