

Kapitola 18 – Jaderné reaktory

Předmět: Stavba a provoz strojů

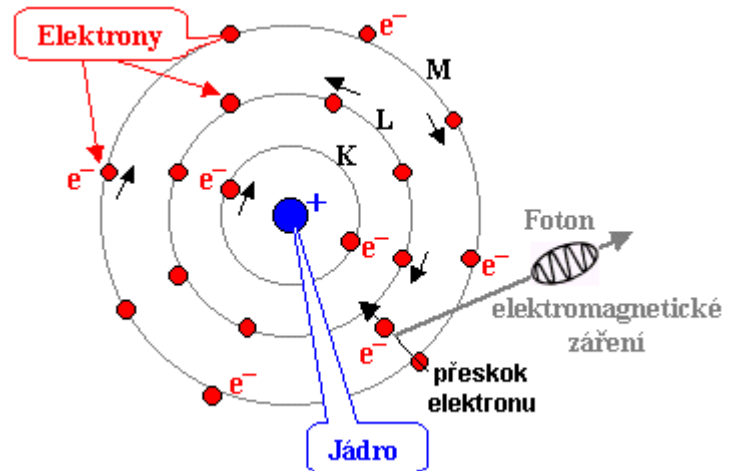
Ročník: 4.

Anotace : Tento digitální učební materiál poskytuje ucelený přehled o základních typech jaderných reaktorů používaných v současné energetice. Důraz je kladen především na princip funkce a konstrukci jednotlivých typů.

Klíčová slova: jaderná energetika, jaderné reaktory, stavba atomu

Stavba atomu

- ▶ atom je **nejmenší částice** hmoty!
- ▶ nelze dále **chemicky** dělit!
- ▶ Pouze **fyzikální** dělení:
 1. jádro
 - **proton** (kladný náboj)
 - **neutron** (neutrální náboj)
 2. obal
 - **elektron** (záporný náboj)



Obr. 1: Schématické znázornění stavby atomu [1].

- ▶ **Doplňující informace:**
- ▶ Podle Bohrova modelu obíhají elektrony kolem jádra pouze po **kvantovaných diskrétních dráhách**, na nichž nevyzařují.
- ▶ Při přeskoku elektronu z vyšší na nižší dráhu se příslušný rozdíl energií vyzáří jako kvantum (foton) elektromagnetického záření.

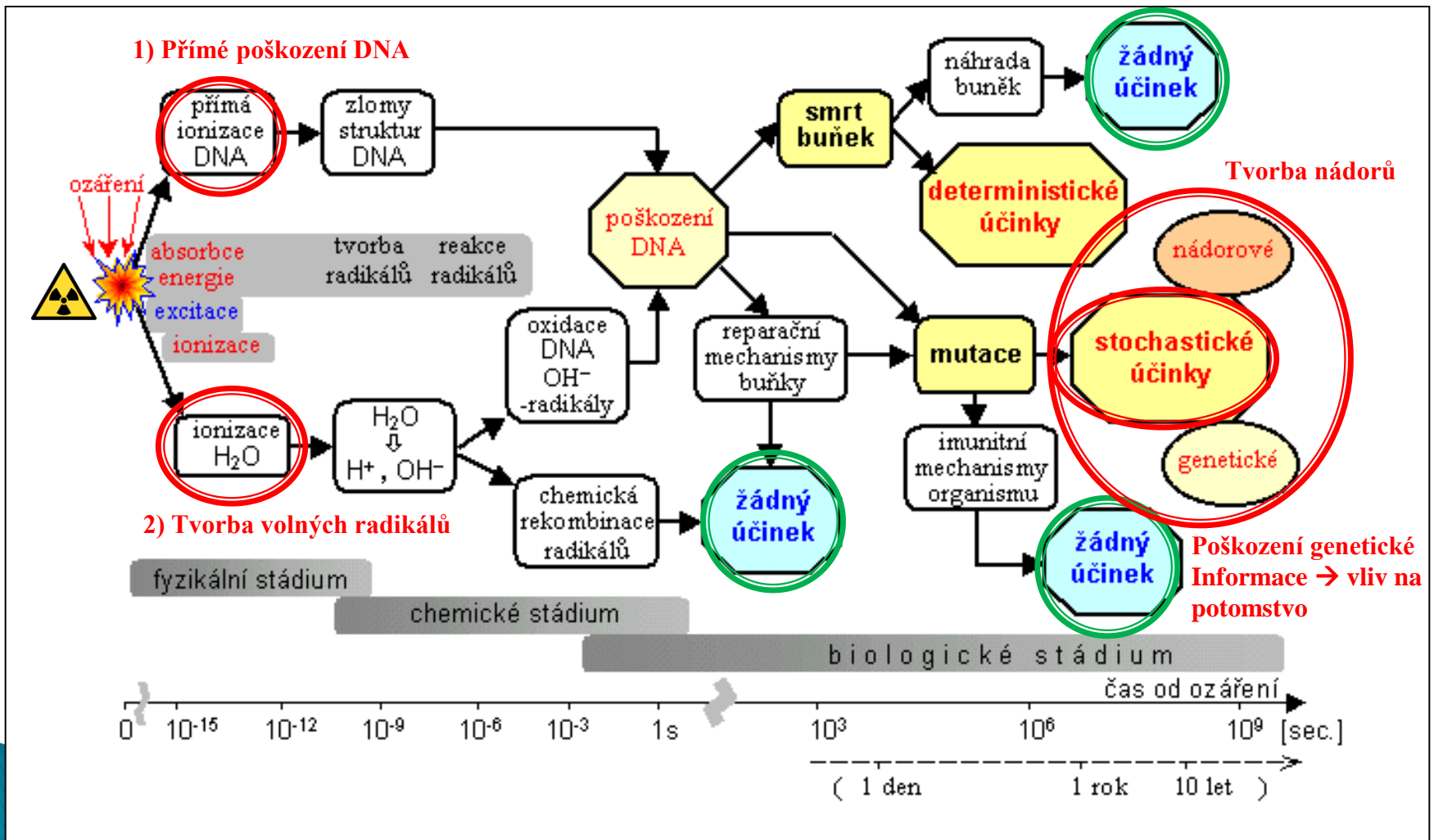
Radioaktivita

- ▶ Jde o **samovolnou přeměnu jader nestabilních nuklidů na jiná jádra**, při níž je emitováno **ionizující záření** do okolí.
- ▶ **Změní-li se počet protonů v jádře, dojde ke změně prvku! Např.:** ${}_{13}^{27}\text{Al} + {}_2^4\alpha \rightarrow {}_{15}^{30}\text{P} + n$
 - Rozpady mohou být α (jádra helia), β^+ (pozitrony), β^- (elektrony) a nakonec nejsilnější γ (elektromagnetické záření o vysoké energii).
- ▶ **Historie:**
 - Radioaktivitu objevil v roce **1896 Henri Becquerel** u solí uranu. Po něm je také pojmenována jednotka aktivity (Bq).
 - K objasnění podstaty radioaktivity zásadním způsobem přispěli i francouzští fyzikové **Pierre Curie a Maria Curie-Sklodowska** na vzorcích českého Smolince z Jáchymova.
- ▶ **Důležité pojmy:**
 - **Exponenciální zákon radioaktivního rozpadu** $n = n_0 e^{-\lambda t}$
 - Počet částic (n) v čase t je možno získat pomocí znalosti původního množství (n_0) a rozpadové konstanty lambda (λ).
 - **Poločas rozpadu** $T = \frac{\ln 2}{\lambda} \approx 0,693 \cdot \lambda^{-1}$
 - Jde o čas (T) kdy se přemění právě polovina původního počtu jader (n_0)



Obr. 2 a 3: Klasická a nová doplňující značka nebezpečí radioaktivity [4].

Biologické účinky radioaktivity

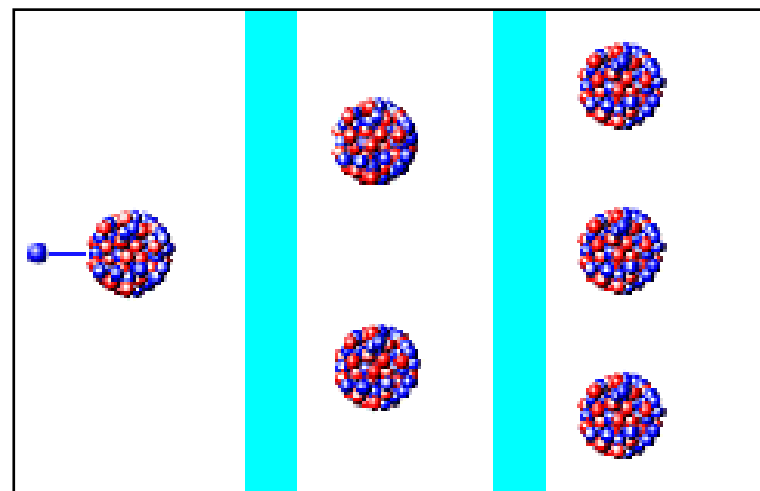


Obr. 4: Biologické účinky na organismus v závislosti na čase [1].

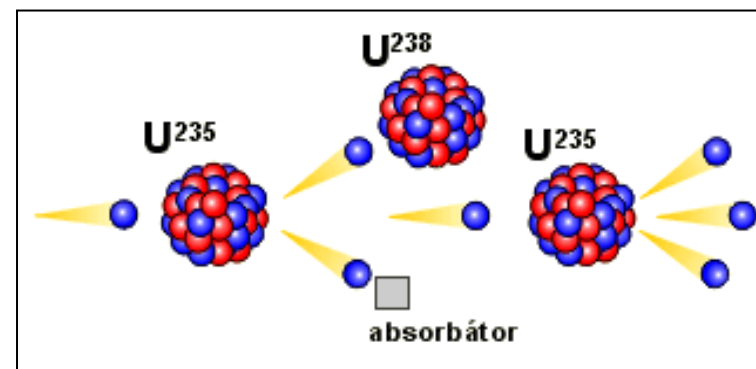
Štěpná reakce

- ▶ Je o **řetězovou jadernou reakci**, při níž dochází k rozbití nestabilního atomu vniknutím **neutronu**, pocházejícího z předchozího rozpadu u na lehčí štěpné produkty a další neutrony.
- ▶ Tato srážka je doprovázena **velkým uvolněním energie**, které je využíváno v energetice pro ohřev vody, která je pak pohonem pro turbínu, která vyrábí **elektrický proud**.

Pozn.: Neutrony bývají zpomalovány pro lepší iniciaci dalšího rozpadu.



Obr. 5: Řetězová reakce [2].



Obr. 6. Znázornění samočinně se udržující štěpné reakce [2].

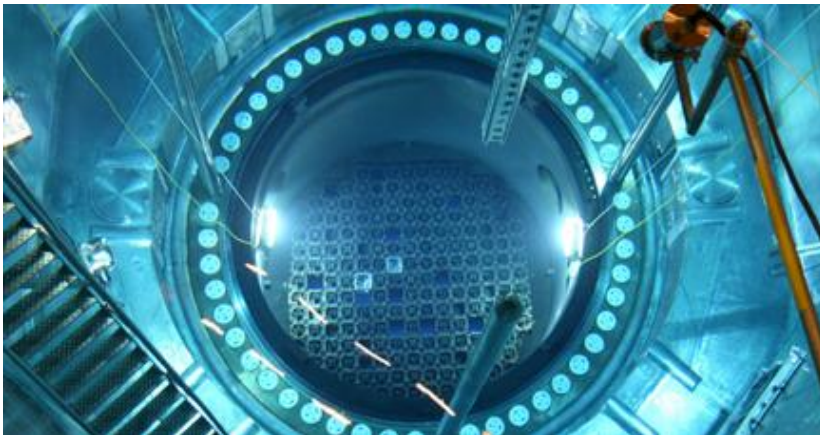
Jaderné reaktory

- ▶ Jsou uloženy v **Jaderných elektrárnách (JE nebo NPP – Nuclear Power Plant)** a vyrábí nepřímo elektrickou energii (energii vyrábí až generátor).
- ▶ **Jaderný reaktor** je zařízení (resp. nádoba), ve kterém probíhá řetězová jaderná reakce, kterou lze **kontrolovat a udržovat ve stabilním běhu**, na rozdíl od **nekontrolovatelného jaderné exploze** (atomová bomba).
- ▶ **Typy podle principů činnosti:**
 - **Reaktory štěpné – běžně používané v praxi**
 - založené na štěpení větších jader (^{235}U , $^{235}\text{UO}_2$, ^{239}Pu)
 - **Reaktory fúzní – používané pouze experimentálně**
 - založené na slučování lehčích jader (T)*

*(T – tritium, radioaktivní izotop vodíku, značí se: ^3H , voda obsahující takový izotop by potom byla $^3\text{H}_2\text{O}$)

Štěpné reaktory

- ▶ Principem je **řízená řetězová štěpná reakce**, kdy se radioaktivní palivo **samovolně rozkládá** za vzniku lehčích jader a **neutronů**, které jsou pomocí moderátoru **zpomalovány** a jejich kinetická energie je přeměněna na tepelnou.
- ▶ Tato tepelná energie je následně transformována na **elektrickou energii (obdobně jak u tepelné elektrárny)**.
- ▶ Jde např. o typy RBMK, VVER, BWR...



Obr. 7: Pohled do aktivní zóny reaktoru [5].



Obr. 8: Chladicí věž – typický znak jaderné elektrárny [6].

Charakteristika štěpných reaktorů

▶ Prvky přítomné v reaktoru:

◦ **Jaderné palivo**

- Štěpná látka **hermeticky** uzavřená v palivových tyčích.
- Nejčastěji jde o přírodní oxid uraničitý (UO_2) nebo uměle připravené plutonium.

◦ **Moderátor/Absorbér**

- Látka schopná účinné **absorpce neutronů**.
- Nejčastěji lehká (H_2O), těžká voda (D_2O)* nebo grafit.

◦ **Chladivo**

- Látka odvádějící teplo z aktivní zóny reaktoru
- Např. moderátor (H_2O , D_2O) nebo speciální CO_2 , Na (*l*)

* (D – deuterium, izotop vodíku ^2H , tzn. záměnou za H ve vodě → těžká voda $^2\text{H}_2\text{O}$)

Charakteristika štěpných reaktorů

► Použití:

- Relativně levná a ekologická výroba elektrické energie + kogenerace energie v okolí (teplo).
- Pohon mobilních zařízení (vojenských ponorek a lodí).
- Výzkumné účely fyzikálních věd (U nás v ČR → FJFI ČVUT a CV Řež)

► Typy:

- Nejpoužívanější:
 - **RBMK** – grafitový (SSSR, např. Černobyl)
 - **VVER** – tlakovodní (Bývalý východní blok, např. V ČR Temelín a Dukovany)
 - **BWR** – varný (celosvětový, např. Fukušima)
- Ostatní málo používané (Severní Amerika):
 - **CANDU** – těžkovodní reaktor (Kanada)
 - **FBR** – množivý typ bez moderátoru (USA)



Obr. 9: Palivo Uranit (Smolinec) UO_2 [3].

Rozdělení reaktorů

▶ Podle počtu okruhů

- Jednookruhové (**RBMK, BWR**) – obě varianty poznamenané katastrofou (**JE Černobyl a Fukušima**)
- Dvouokruhové - bezpečnější (**VVER**) – **pro nás nejdůležitější (JE Temelín a Dukovany)!!!**
- Tříokruhové (zapojen další okruh s chladícím médiem → tekutým sodíkem nebo CO₂)

▶ Podle energie neutronů

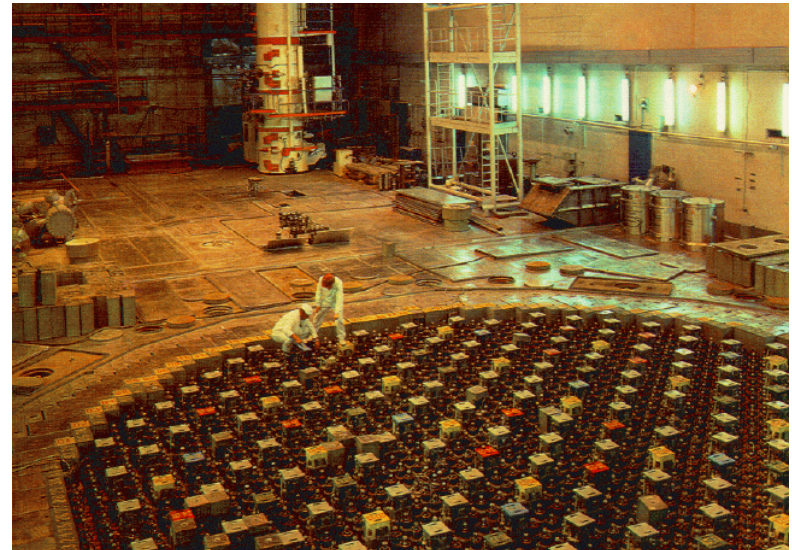
- S rychlými neutrony (FBR)
- S pomalými neutrony (ostatní)

▶ Podle odvodu tepla

- S tlakovodními kanály (RBMK, CANDU)
- S tlakovodní nádobou (VVER, BWR)
- Chlazené plynem (AGR)

▶ Podle použitého moderátoru

- S lehkou vodou (VVER, BWR)
- S těžkou vodou (CANDU)
- S grafitem (RBMK, AGR)
- Bez moderátoru (FBR)

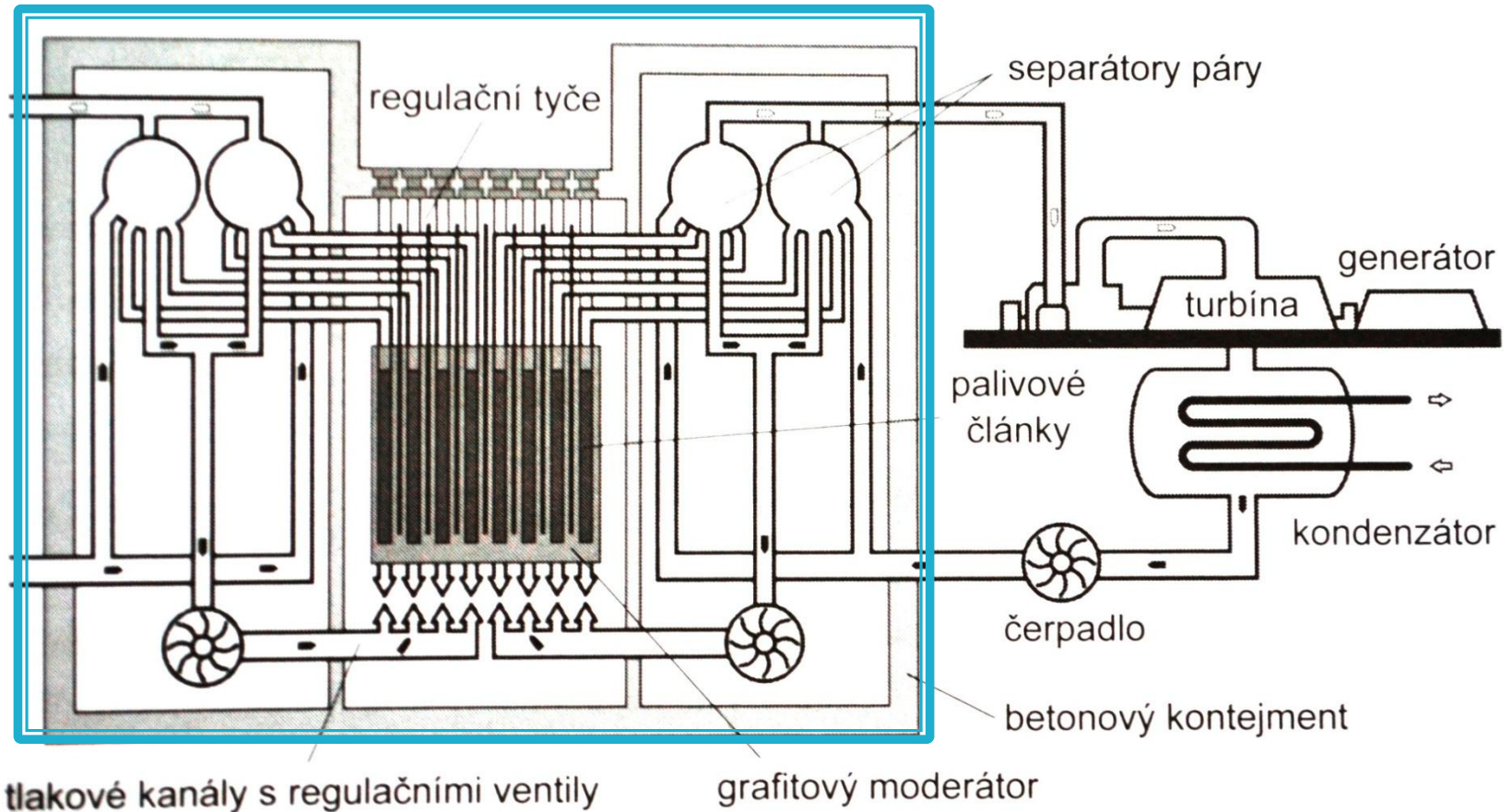


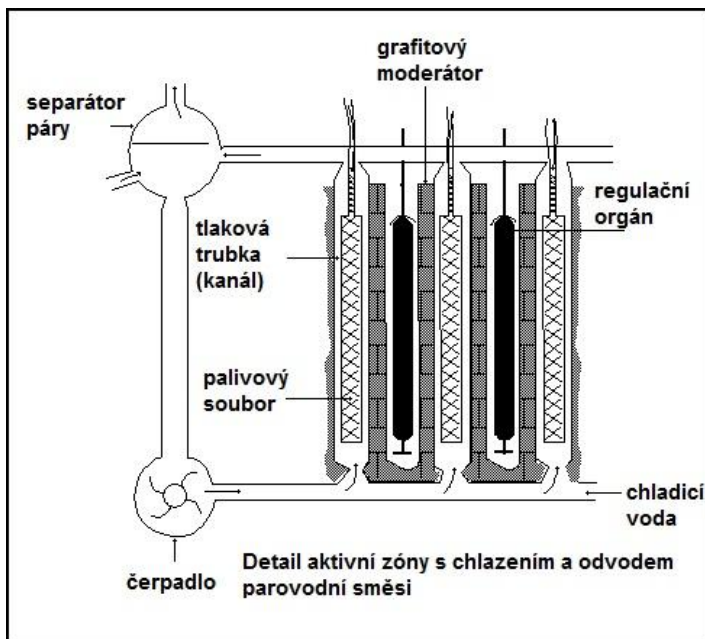
Obr. 10: Reaktorová hala (RBMK) JE Ignalina (Litva) [3].

1) RBMK

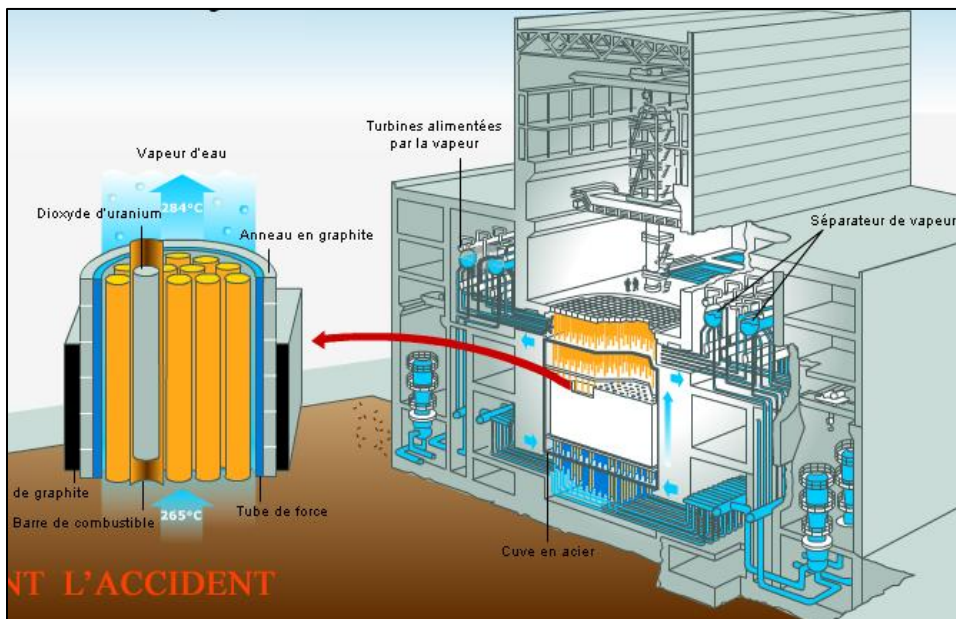
- ▶ Označení **RMBK** (Reaktor Bolšoj Moščnosti Kanalnyj)
 - **Kanálový reaktor vysokého výkonu**, také lze označovat **LWGR** (Light-Water-cooled Graphite-moderated Reactor)
- ▶ **Charakteristika:**
 - **Sovětský polovojeňský reaktor** – sloužil k výrobě plutonia!!!
 - **Jde o lehkovodní jednookruhový grafitový reaktor.**
 - První komerční typ reaktoru (II.generace) – **za určitých podmínek velmi nestabilní!!!**
 - Chladičem je **lehká voda (H₂O)**, která proudí **kanály** s palivovými tyčemi. V kanálech vzniká **pára**, která je vedena **rovnou do turbíny**.
 - **Moderátorem je grafit** (velkým nebezpečím je jeho **hořlavost!**).
 - Již se **nestaví** a nevyvíjí žádné varianty. Postaveny byly pouze na území SSSR!
 - **Černobyl (Ukrajina) – havárie 1986, (celkově odstaveno 2000).**
 - Kostroma (Rusko) – stavba **zastavena** po havárii Černobylu 1986.
 - Ignalina (Litva) – celkově **odstaveno 2009**.
 - Leningrad, Smolensk a Kursk (Rusko) – **stále v provozu** do roku 2025.

Zjednodušené schéma reaktoru RBMK

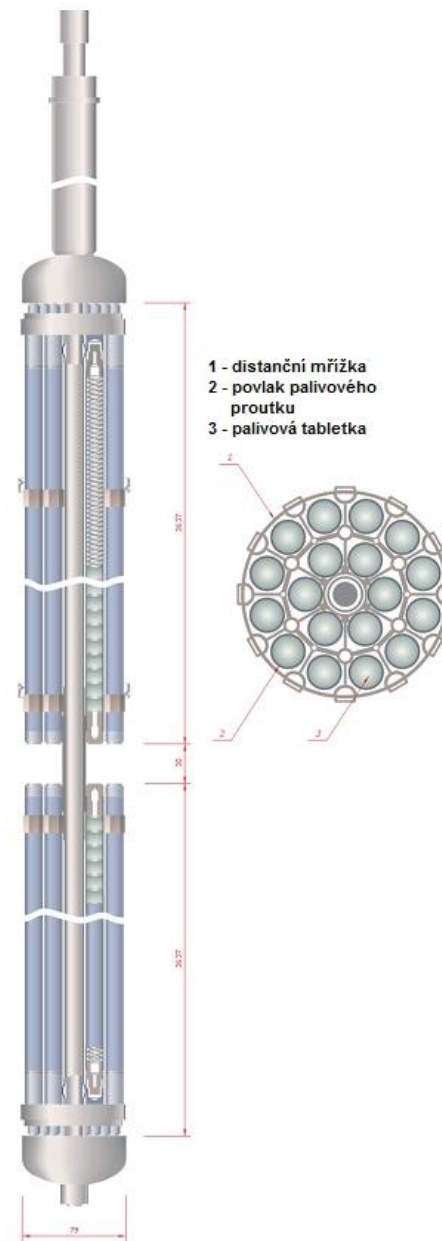




Obr. 12: Detail reaktoru RBMK [9].



Obr. 13: Reaktor RBMK a umístění v budově [10].

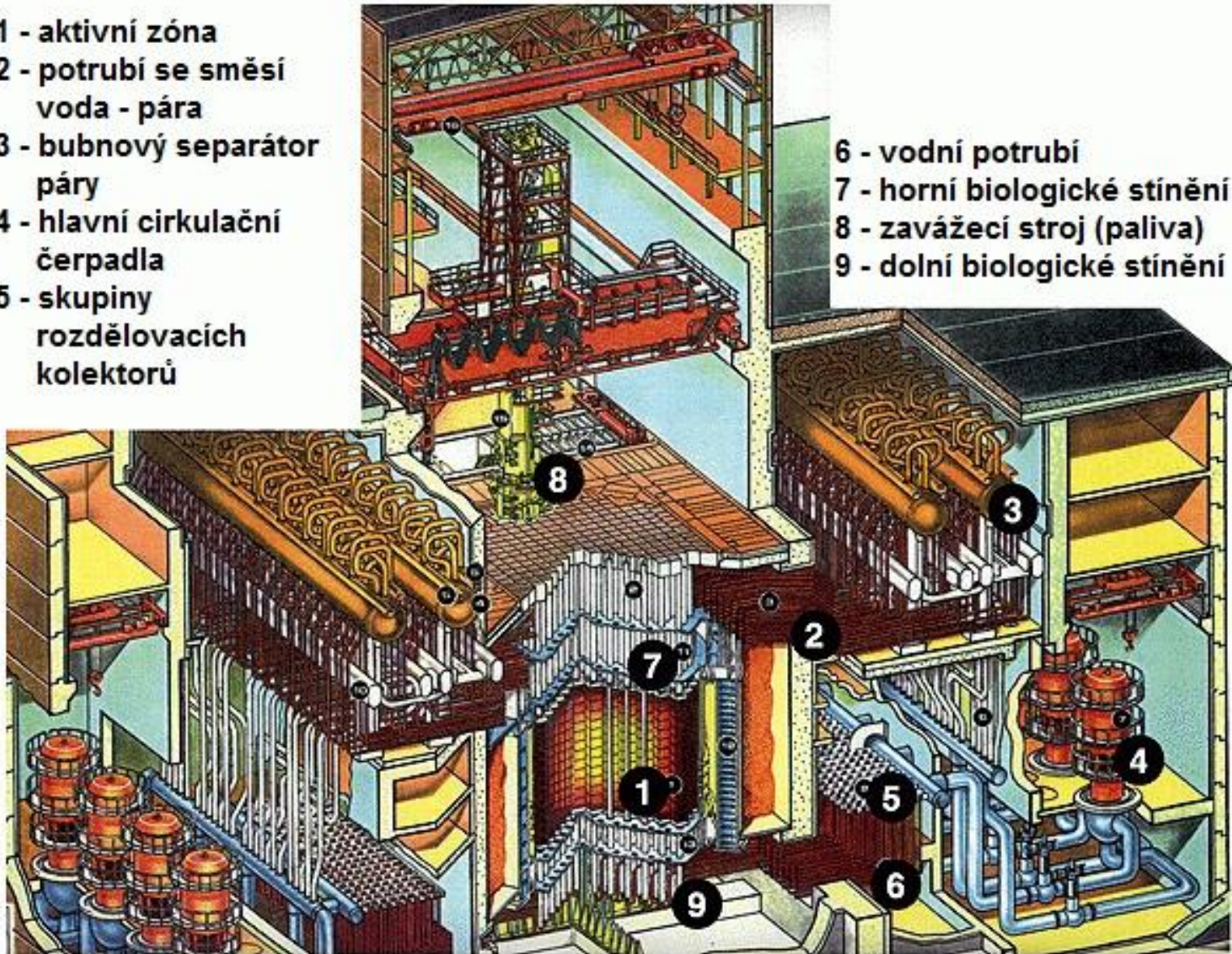


Obr. 14: Detail palivové náplně [8,9].

Ilustrované elektrárny s reaktorem typu RBMK

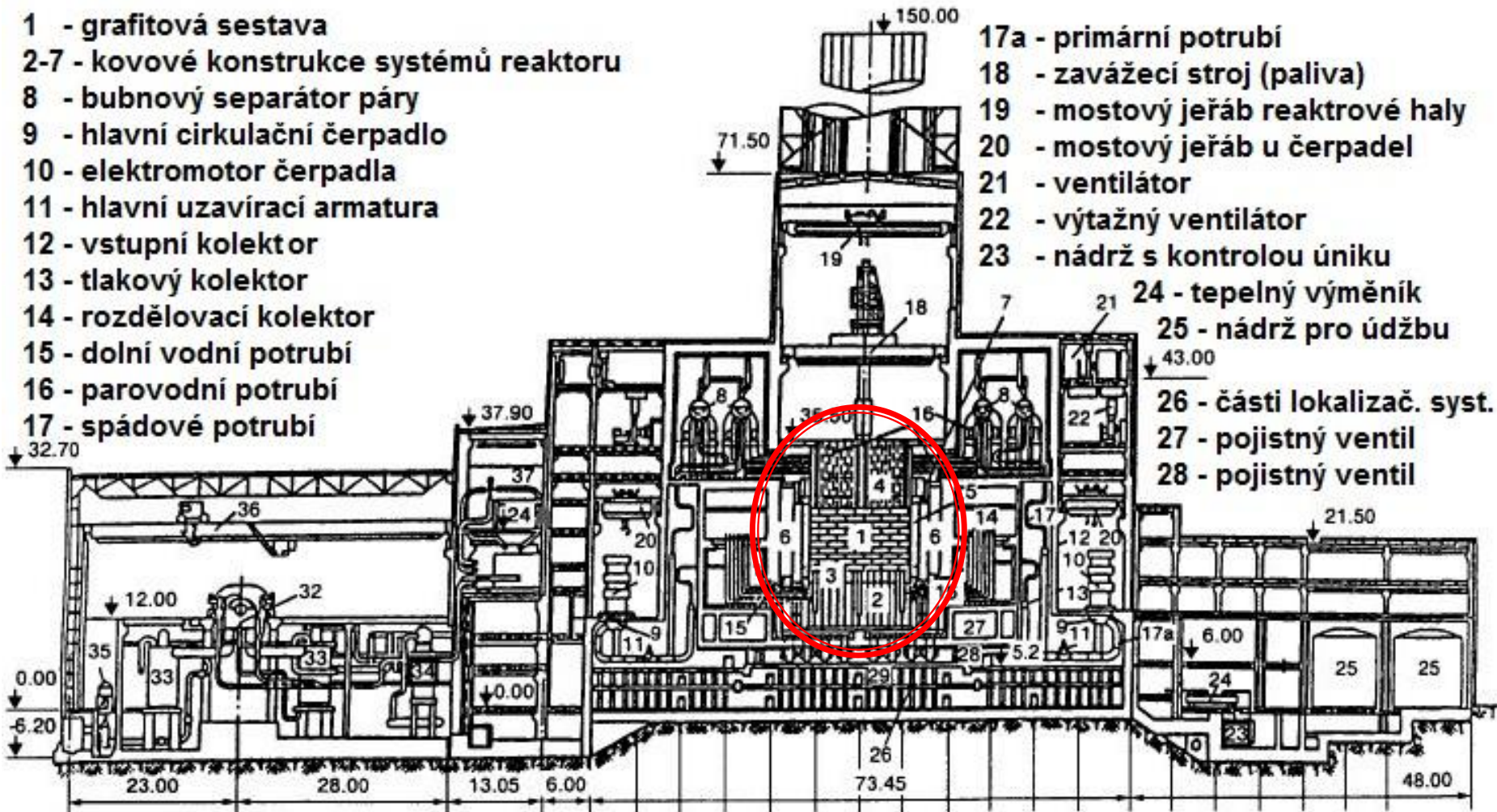
- 1 - aktivní zóna
- 2 - potrubí se směsí voda - pára
- 3 - bubnový separátor páry
- 4 - hlavní cirkulační čerpadla
- 5 - skupiny rozdělovacích kolektorů

- 6 - vodní potrubí
- 7 - horní biologické stínění
- 8 - zavážeční stroj (paliva)
- 9 - dolní biologické stínění



Obr. 15: Schéma reaktoru RBMK i s budovou [9].

Detailní schéma elektrárny s reaktorem typu RBMK



- 1 - grafitová sestava
- 2-7 - kovové konstrukce systémů reaktoru
- 8 - bubnový separátor páry
- 9 - hlavní cirkulační čerpadlo
- 10 - elektromotor čerpadla
- 11 - hlavní uzavírací armatura
- 12 - vstupní kolektor
- 13 - tlakový kolektor
- 14 - rozdělovací kolektor
- 15 - dolní vodní potrubí
- 16 - parovodní potrubí
- 17 - spádové potrubí

- 17a - primární potrubí
- 18 - závažecí stroj (paliva)
- 19 - mostový jeřáb reaktové haly
- 20 - mostový jeřáb u čerpadel
- 21 - ventilátor
- 22 - výtažný ventilátor
- 23 - nádrž s kontrolou úniku
- 24 - tepelný výměník
- 25 - nádrž pro údržbu
- 26 - části lokalizač. syst.
- 27 - pojistný ventil
- 28 - pojistný ventil

- 29 - kondenzátor lokalizač. systému
- 30 - turbogenerátor
- 31 - odlučovač páry (přehřívák)
- 32 - mostový jeřáb strojovny
- 33 - odplyňovák

Obr. 16: Detailní popis součástí elektrárny s reaktorem typu RBMK [9].

JE Černobyl (NPP Chernobyl)

- ▶ Nachází se u měst **Černobyl** a **Pripjat'** (dnes Ukrajina, dříve SSSR)
- ▶ V roce **1986** se zde udála **největší jaderná havárie (7.stupeň klasifikace INES (The International Nuclear Event Scale) – velmi těžká havárie).**

- ▶ Nachází se zde čtyři bloky RBMK-1000
 - Černobyl 1 (připojen 1977) – uzavřen roku 1996
 - Černobyl 2 (připojen 1978) – po požáru uzavřen roku 1991
 - Černobyl 3 (připojen 1981) – uzavřen v roce 2000
 - ⚠ **Černobyl 4 (připojen 1983) – těžká havárie roku 26.4.1986**



Obr. 17: Uzavřený chátrající řídicí můstek [11].

- ▶ Z důvodu nedostatku elektřiny na Ukrajině byly ostatní bloky ponechány v provozu a postupně odpojovány až do roku 2000, kdy byla elektrárna celkově odstavena.
- ▶ Město vybudované v 70. letech pro zaměstnance elektrárny a jejich rodiny (Pripjat') bylo kompletně přesídleno!

2) VVER (PWR)

Nezávislý vývoj od dob studené války na obou stranách USA i SSSR.

1. **VVER** (Vodo-vodní energetický reaktor) – **sovětský typ** tlakovodního reaktoru (dnes modernizované **ruské** varianty MIR/AES).
 - **Ruský ekvivalent (ВВЭР)** – Водо-одеяной энергетический реактор
 - **Anglický ekvivalent (WWER)** – Water-water energetic reactor (vodovodní reaktor)
2. **PWR** (Pressurized water reactor) – **americký typ** tlakovodního reaktoru.

▶ **Charakteristika:**

- Jde o **lehkovodní tlakovodní reaktor**
 - **voda je pod vysokým tlakem (15 MPa) – nedochází k varu!!!**
- Chladičem i moderátorem je **lehká voda** (není zde žádný hořlavý grafit).
- **Reaktor má dva okruhy (dvouokruhový reaktor)** – zvýšení bezpečnosti!
- Jeden z **nejbezpečnějších typů** (použití i v mobilních prostředcích).

▶ **Použití ve světě:**

- Přes **60%** světových reaktorů je tlakovodního typu VVER/PWR.
- Všechny reaktory v ČR jsou VVER (Temelín VVER-1000, Dukovany VVER-440).

Historie VVER reaktorů (SSSR)

▶ VVER-440 typ 230.

- Vývoj reaktorů VVER začal v Sovětském svazu přibližně v polovině 60. let 20. století. Bylo postaveno 14 bloků elektráren s tímto reaktorem. Většina těchto elektráren je již odstavena a k žádné havárii nedošlo i přesto, že JE Kozloduj absolvovala v roce 1977 zemětřesení o síle 7 stupňů.

▶ VVER-440 typ 213 - Dukovany

- Dalším vývojovým typ VVER. Proti předchozímu typu byla výrazně zvýšena bezpečnost podle světových standardů. Tento typ reaktoru ještě nemá ochrannou obálku, ale je vybaven alespoň barbotážním systémem. V projektu jsou několikanásobné systémy nouzového dochlazování pro případ takové havárie.
- Jde o nejrozšířenější typ tlakovodního reaktoru v Evropě a Rusku (v ČR JE Dukovany).

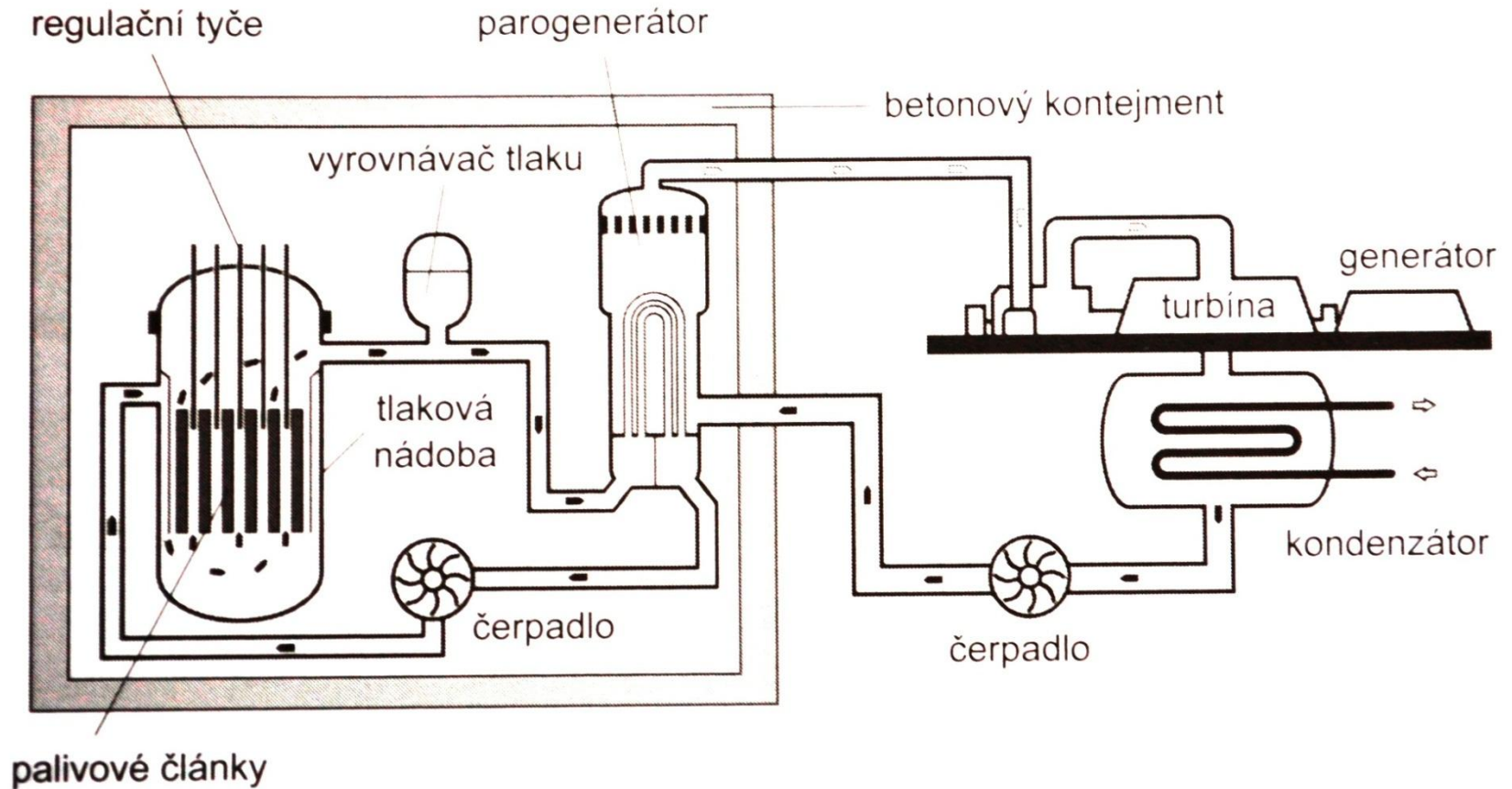
▶ VVER-1000 (V-320, V-392, V-466) - Temelín

- Tento typ byl již navržen již včetně haly s plnohodnotným kontejnmentem. Maximální projektová havárie, kterou musí reaktor zvládnout bez vlivu na okolí, je prasknutí hlavního potrubí, spojené se zemětřesením a výpadkem vnějšího napájení.
- Podstatným rysem všech nových tlakovodních reaktorů je zjednodušení konstrukce a nové bloky mají zdokonalený kontejnment a vyšší objemy vody v primárním i sekundárním okruhu, což ještě dále snižuje riziko havárie s případným roztavením aktivní zóny.
- VVER v modifikaci V-320 z 90. let je i v JE Temelín. Nové modifikace z přelomu století jsou VVER-1000 V-392 a VVER-1000 V-466.

Historie VVER reaktorů (Rusko)

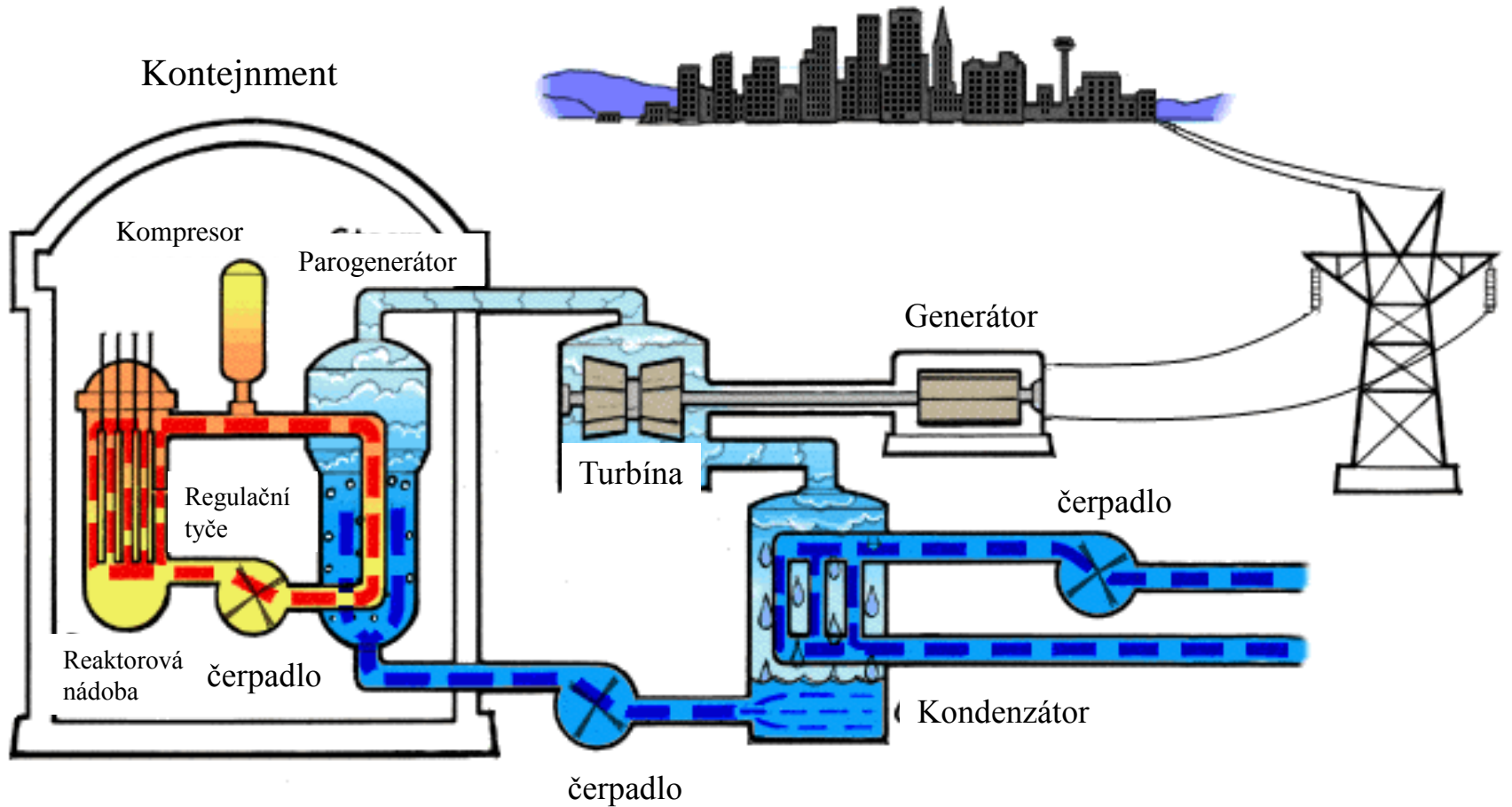
- ▶ **VVER-1200 (AES-2006 neboli MIR-1200) – Zvažováno pro Temelín**
 - Dnes nejmodernějším typ představený v roce 2006 v Rusku.
 - První dva prototypové bloky typu VVER-1200/491 jsou stavěny v lokalitě JE Leningrad II a prototypy typu VVER-1200/392M v JE Novovoronež II.
 - Hrubý výkon bloku je 1200 MWe (čistý výkon 1113 MWe, celkový tepelný výkon 3200 MWt).
 - Doba stavby je 4,5 roku (54 měsíců) a předpokládaná životnost 50–60 let.
 - Elektrárna disponuje ochranným kontejnmentem, systém havarijního chlazení (včetně záložních diesela agregátů) a nově je při výpadku proudu možné využít zbytkového výkonu.
- ▶ **VVER-TOI (AES-2010 neboli VVER-1200/510)**
 - VVER-TOI (Tipovoi Optimizirovanniy Informatizirovanniy) znamená typově optimalizovaný pokročilý projekt reaktoru VVER-1200 3,5 generace vycházející z typu VVER-1200/392M, který má optimalizovat vlastnosti těchto reaktorů.
 - Projekt by měl být připraven v roce 2012. Plánovaný hrubý výkon je 1255 MW a životnost 60 let. Důležitým faktorem by mělo být snížení nákladů na stavbu o 20% oproti 1200/392M a zkrácení doby stavby na 40 měsíců.

Jednoduché schéma elektrárny s VVER



Obr. 18: Schéma elektrárny s reaktorem typu VVER [3].

Schéma elektrárny s reaktorem VVER-1000



Obr. 19: Funkční schéma jaderné elektrárny s blokem VVER-1000 [12].

JE Temelín (NPP Temelin)

- ▶ **Provozovatel:** ČEZ, a.s.
- ▶ **Umístění:** obec Temelín v jižních Čechách
- ▶ **Typ reaktoru:** 2x Sovětský VVER-1000
- ▶ **Roční výroba:** 13 914 GWh
- ▶ **Stavba započata:** 1987
- ▶ **Plánované uvedení do provozu:** 1992-1997
- ▶ **Zapojeno do sítě:** 2003
- ▶ **Uvedeno do plného provozu:** 2006



Obr. 20: Letecký snímek území elektrárny z Google Maps.



Obr. 21: Panoramatická fotografie elektrárny [13].

Základní informace

- ▶ **Bloky:** prozatím instalované **2** bloky typu **VVER-1000 typ V 320** o nominálním tepelném výkonu 3 000 MWt – instalovaný elektrický výkon **2 x 1000 MW**).
- ▶ **Aktivní zóna:** obsahuje 312 proutků obohaceného ^{235}U ve 163 kazetách.
- ▶ **Parogenerátory:** na jeden blok připadají **čtyři parogenerátory**.
 - tlak 6,3 MPa, vstupní teplota 320 °C.
 - u **každého parogenerátoru jedno čerpadlo** (5 MW, průtok 21 200 m³/h).
 - množství vyrobené páry za hodinu cca **1 470 t/h**.
- ▶ **Kondenzátor:** titanový kondenzátor s **31 900 trubkami**.
- ▶ **Chladicí věže:** **4 věže** typu ITERSON s přirozenou cirkulací.
 - výška komínu 155 m, patní průměr 131 m, odpar z jedné věže až **413 l/s!**
- ▶ **Zdroj vody:** voda z vodního díla **Hněvkovice** (6,2 km od JE).
 - vlastní čerpací stanice na levém břehu.
 - **2 nezávislé potrubní trasy** pomocí potrubí DN 1600 mm.

Nelehká cesta JE Temelín

Téměř 25 let od plánů na výstavbu po spuštění elektrárny!

- ▶ **1979** – investiční záměr na výstavbu čtyř bloků VVER 1000
- ▶ **1982** – rozhodnuto o použití sovětského technického projektu
- ▶ **1985** – vypracován úvodní projekt Energoprojektem (EGP) Praha
- ▶ **1986** – vydáno stavební povolení
- ▶ **1987** – zahájení stavby čtyř bloků (generální dodavatel Škoda Plzeň)
- ▶ **1989** – zastavení stavby z důvodů politických změn

-----**Sametová revoluce**-----

- ▶ **1990** – velká řada úprav v původním projektu (západní technologie)
– nový dodavatel systému řízení a kontroly (Westinghouse USA)
- ▶ **1993** – rozhodnuto o výstavbě pouze dvou bloků a obnovení prací
- ▶ **2000** – dokončena stavba a dovezeno prvního palivo (21.12.2000)
- ▶ **2002** – zahájen zkušební provoz prvního bloku
- ▶ **2003** – zahájení plného zkušební provozu obou bloků
- ▶ **2006** – kolaudace elektrárny a zahájení plného provozu
- ▶ **2013** – desetileté výročí provozu bez jakýchkoli vážnějších poruch

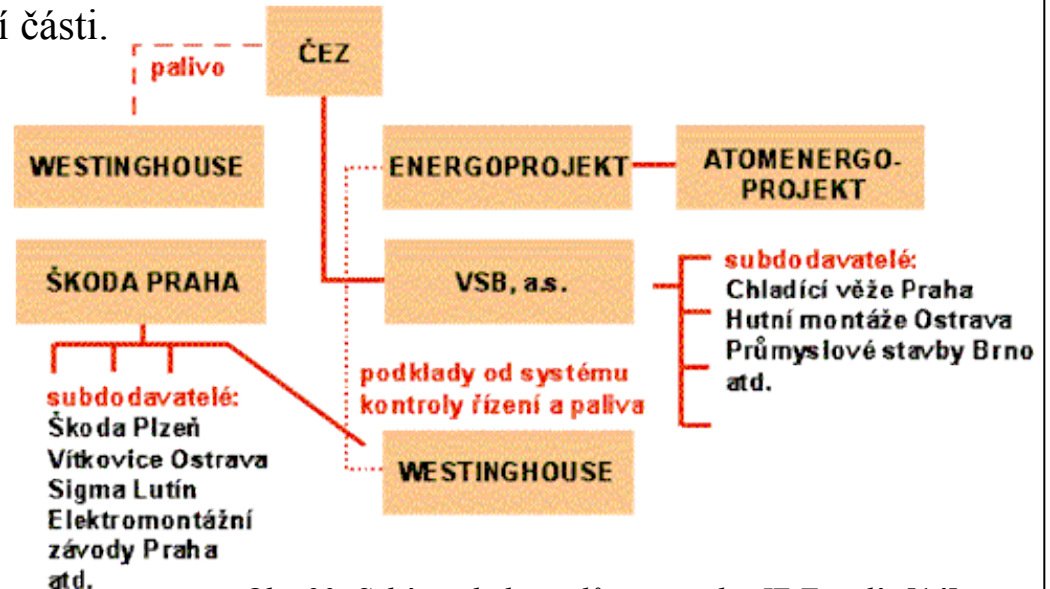
Hlavní dodavatelé

Konečné schéma hlavních dodavatelů:

- ▶ **ČEZ** – investor.
- ▶ **Energoprojekt Praha** - generální projektant.
 - **Atomenergoprojekt (SSSR)** - dodavatel sovětského technického projektu.
 - **Westinghouse Electric Corporation (USA)** - dodavatel paliva a moderního systému kontroly a řízení (výměna na sovětskou technologii po roce 1990).
- ▶ **Škoda Praha** - generální dodavatel technologické části.
- ▶ **VSB** - generální dodavatel stavební části.



Obr. 22: Stavba JE Temelín (90.léta) [14,15].



Obr. 23: Schéma dodavatelů pro stavbu JE Temelín [14].

Technické informace

Vybrané technické specifikace JE Temelín [15].

▶ Záložní dieselagregáty

- Pro případ ztráty elektrické energie nutné pro pohon čerpadel.
- Každý blok má tři dieselové generátory umístěné na dvou vzdálených místech.

▶ Parogenerátory

- Čtyři parogenerátory na každý blok.
- Jde o horizontální válcový výměník.
 - délka 14,8 m a průměr 4,5 m
- Teplosměnné trubky má z chromniklové korozivzdorné oceli.

▶ Turbogenerátor

- Skládá se z parní turbíny, elektrického generátoru a budiče.
- Turbíny má v okolí separátory a kondenzátory.

▶ Hlavní cirkulační čerpadla

- Zabezpečují cirkulaci chladiva primárního okruhu.
- Jde o vertikální jednostupňová odstředivá.
- Výška 11,9 m, výkon 5 MW, průtok 21 200 m³/h.



Obr. 24: Záložní dieselagregát [15].

Bezpečnost reaktoru

► Budova reaktoru

- Základem je **hermeticky uzavřený kontejnment** (obálka reaktoru).
- Mohutná železobetonová konstrukce.
 - Výška: **56 m**
 - Vnitřní průměr: **45 m**
 - Tloušťka stěn: **1,2 m**
- **Vnitřní povrch pokrytý 8 mm silnou vrstvou nerezové oceli.**
- Projektováno na maximální přetlak **0,49 MPa při 150 °C**.
- **Použití předpjatého betonu (132 lan o průměru 150 mm s napínací silou 10 MN)**

► Tlaková nádrž reaktoru

- Je zde umístěna aktivní zóna (zkráceně AZ).
- Výška **11 m**, vnější průměr **4,5 m**, tloušťka stěny **193 mm**.
- Projektováno na tlak **15,7 MPa při 320 °C**.
- **Vyrobena z nejkvalitnější nízkolegované Cr-Ni-Mo-V oceli***

► Aktivní zóna

- Výška **3,5 m**, průměr **3,2 m**, **163** palivových kazet a **312** proutků,
- Vsádka paliva **92 t** mírně obohaceného uranu **235**.

*chrom-nikl-molybden-vanadová ocel

Havarijní ochrana

▶ **Pasivní systém havarijního chlazení aktivní zóny (AZ)**

- ▶ Tento systém je tvořen čtyřmi **hydroakumulátory** a slouží k rychlému zaplavení AZ při havarijních situacích, které jsou spojeny s **náhlým poklesem tlaku v primárním okruhu**.
- ▶ **Čtyři aktivní systémy, které jsou zálohované třikrát!!!**
 1. **Nízkotlaký systém havarijního chlazení AZ:** systém slouží k havarijnímu dochlazování AZ a k dlouhodobému odvodu zbytkového tepelného výkonu reaktoru.
 2. **Vysokotlaký havarijní doplňovací systém:** systém slouží k potlačení havárií s rychlým nárůstem výkonu reaktoru.
 3. **Vysokotlaký systém havarijního chlazení AZ:** systém slouží k udržování AZ v podkritickém stavu při zachování vysokého tlaku a k chlazení AZ při malé a střední havárii typu LOCA, tj. při havárii spojené se ztrátou chladiva.
 4. **Sprchový systém ochranné obálky:** systém zajišťuje snížení tlaku v hermetických prostorech po havárii typu LOCA, tj. zabraňuje unikům radioaktivních látek do životního prostředí.
- ▶ **Systém ochrany primárního okruhu při převýšení tlaku:** systém zabraňuje porušení integrity primárního okruhu prostřednictvím kompenzátoru objemu a pojišťovacích ventilů.
- ▶ **Systém ochrany sekundárního okruhu:** systém zajišťuje regulaci tlaku páry v parovodech.
- ▶ **Mechanický systém odstavení reaktoru:** systém zajišťuje pád souboru absorpčních tyčí do AZ, a tím převedení AZ reaktoru do podkritického stavu. (tlačítko AZ-5 – viz Černobyl)

Dostavba JE Temelín

- ▶ Roku **2012** vyhlášeno výběrové řízení na dostavbu dalších **dvou bloků**.
- ▶ Na počátku tři kvalifikovaní zájemci:
 1. **Konsorcium firem Westinghouse Electric Company (USA), LLC (USA) a WESTINGHOUSE ELECTRIC ČR (ČR).**
 2. **Konsorcium firem ŠKODA JS (ČR), Atomstroyexport (Rusko) a Hidropress (Rusko)**
 3. **Areva (Francie) – vyřazena 5.10.2012 z důvodu nesplnění požadavků.**
 - **Podala trestní oznámení pro neoprávněné vyřazení ze soutěže**

- ▶ **Aktuálně pouze dva návrhy!**
 1. **Westinghouse AP1000 (USA)**
 - Americký revoluční typ tlakovodního reaktoru.
 - Zatím neozkoušený typ – možná rizika!
 2. **Gidropress MIR 1200 (Rusko)**
 - Nová generace sovětsko-ruských reaktorů VVER
 - Nejbezpečnější a nejdražší varianta!
 - Velké zapojení Českých strojírenských firem.



Obr. 25: Vizualizace budoucího stavu elektrárny se čtyřmi bloky [16].

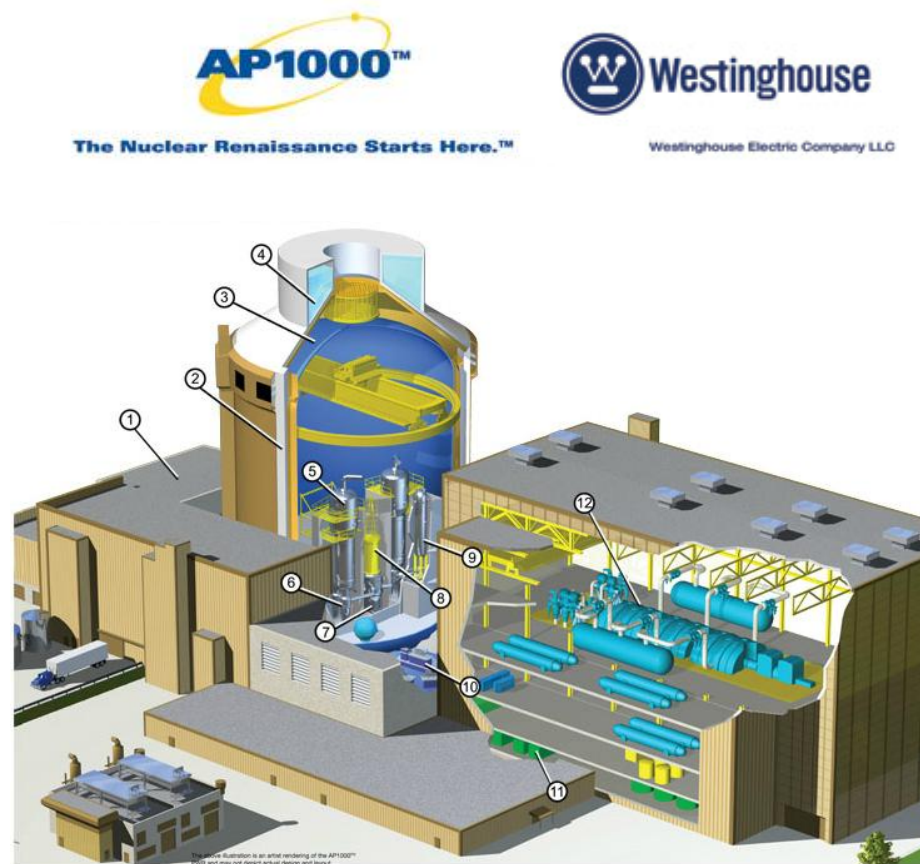
1. návrh: Westinghouse AP1000

Westinghouse a LLC (USA)

- ▶ **Typ reaktoru:** PWR
- ▶ **Elektrický výkon (čistý):** 1117 MWe
- ▶ **Evropská certifikace:** 2007
- ▶ **Další licence:** USA
- ▶ **Pozn.**
 - Schváleno ve Velké Británii.
 - Probíhá výstavba v Číně.



Obr. 26: Vizualizace budov reaktoru a strojovny [16,17].



Obr. 27: Schéma bloku AP1000 [17].

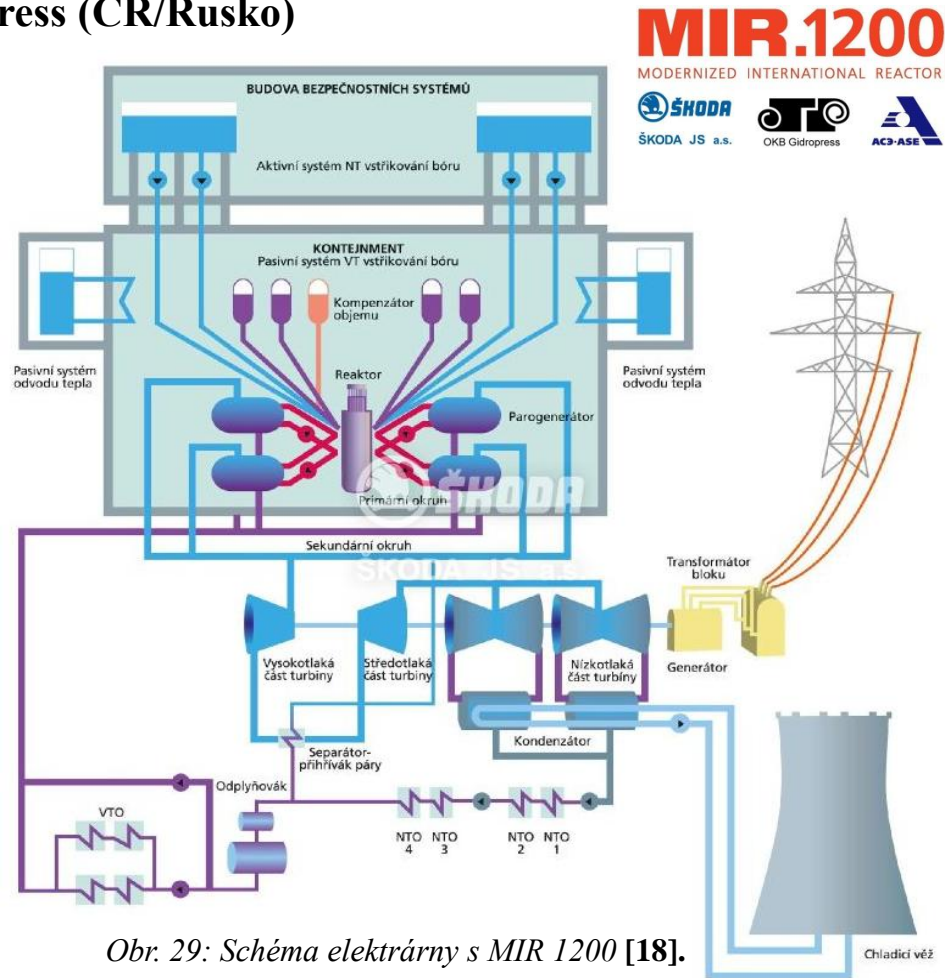
2. návrh: AES-2006 (MIR 1200)

ŠKODA JS a Atomstroyexport a Hidropress (ČR/Rusko)

- ▶ **Typ reaktoru:** VVER-1200
- ▶ **Elektrický výkon (čistý):** 1113 MWe
- ▶ **Evropská certifikace:** 2007
- ▶ **Další licence:** Rusko
- ▶ **Pozn.**
 - V provozu v Číně a Indii.
 - Probíhá výstavba v Rusku .
 - (Leningradská a Novovoronežská elektrárna)



Obr. 28: Vizualizace podoby bloků MIR 1200 [16,19].



Obr. 29: Schéma elektrárny s MIR 1200 [18].

JE Krym (NPP Crimea)

- ▶ **Krymská jaderná elektrárna na Ukrajině (bývalé SSSR).**
 - Po pro jadernou energetiku osudovém roce **1986** provedena rozsáhlá inspekce, rozestavěné elektrárny, kdy bylo zjištěno, že objekt stojí na **potenciálně nestabilním podloží** a bylo **rozhodnuto o likvidaci!**
 - **Nejdražší elektrárna na světě!** – byla téměř dokončena, ale nikdy nebyla uvedena do provozu a její náklady na provoz se nemohly nikdy navrátit.
 - Jednalo se o reaktory typu **VVER-1000**.
 - Dnes je elektrárna volně přístupná a množství součásti je již rozkradeno!



Obr. 30: Hroucí se budovy nedostavěné elektrárny [20].

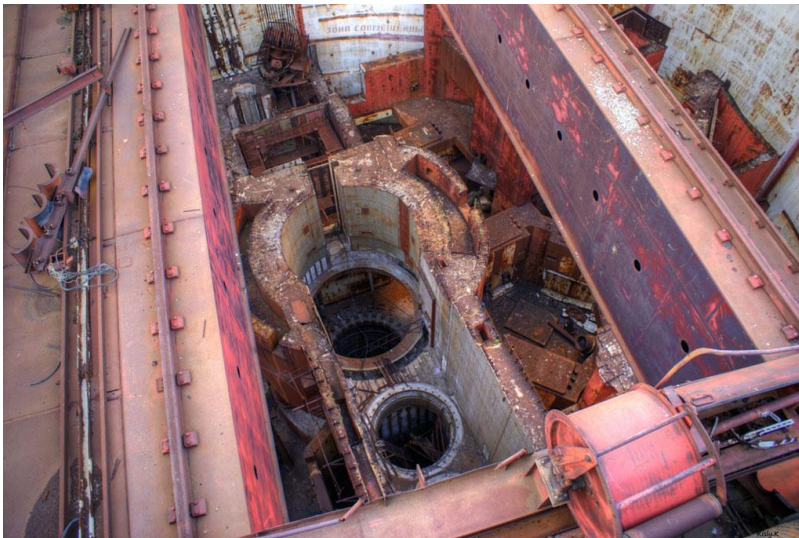
NPP Crimea



Obr. 31: Nedostavěný kontejnment [21].



Obr. 32: Hermetická brána [20].



Obr. 33: Útroby reaktoru (bez paliva) [21].

Tip na výlet



Obr. 34: Pohled z budovy reaktoru [21].

3) BWR

▶ BWR – Boiling water reactor (Varný reaktor)

▶ Charakteristika:

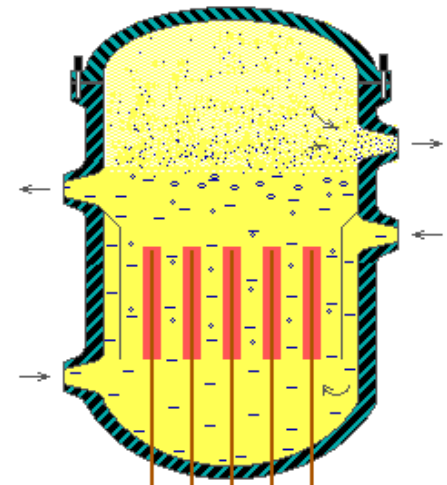
- Jde o **lehkovodní varný reaktor**.
- Chladivem i moderátorem je **lehká voda**.
- **Jednookruhový (vyšší účinnost, nižší bezpečnost)**.
- Palivem je **obohacený uran** ve formě UO_2 .
- Reaktor je umístěn v tlakové nádobě.

▶ Princip:

- Voda se ohřívá až do varu přímo v tlakové nádobě a v horní části reaktoru se hromadí pára. Pára se zbaví vlhkosti a žene se přímo k turbíně.

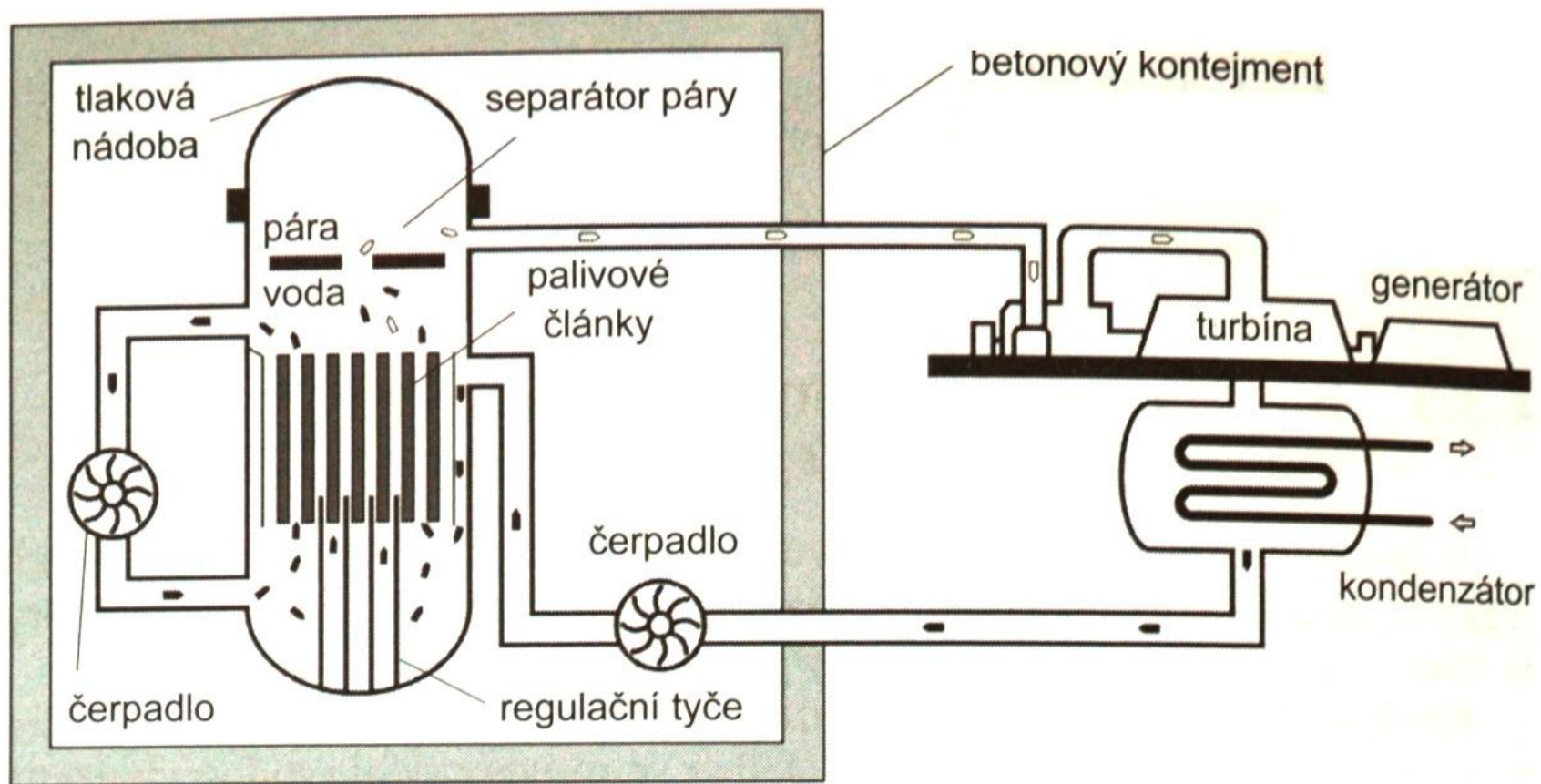
▶ Instalováno:

- Pracuje v okolo 100 elektrárnách všude po světě (cca 20% všech reaktorů)
- Např. elektrárna Fukušima I (havárie - březen 2011) – nikoli chyb konstrukce, ale vinou tsunami!



Obr. 35: Varná nádoba reaktoru [22].

Zjednodušené schéma reaktoru BWR

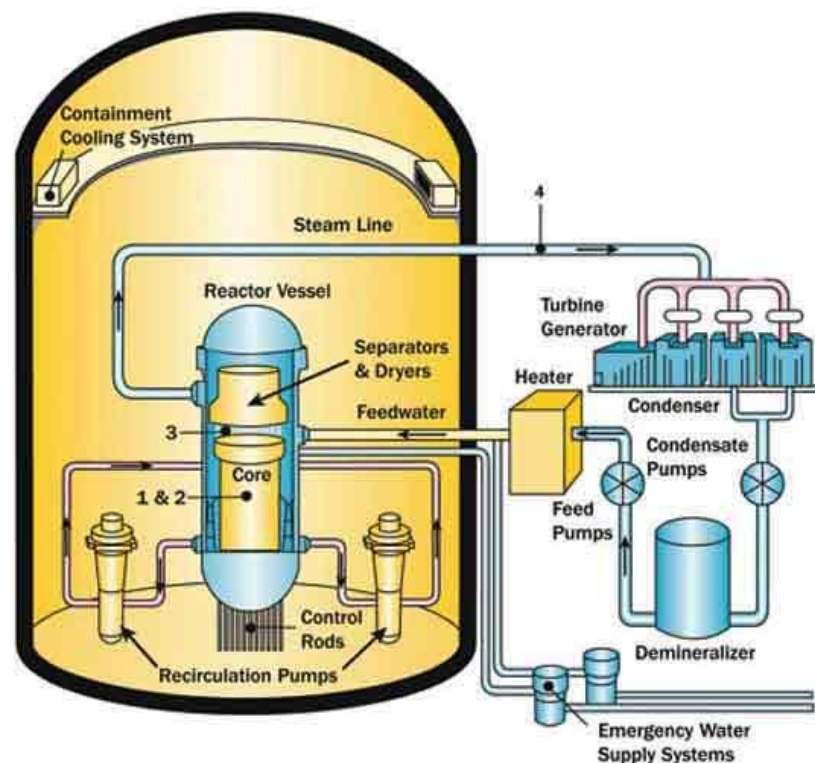
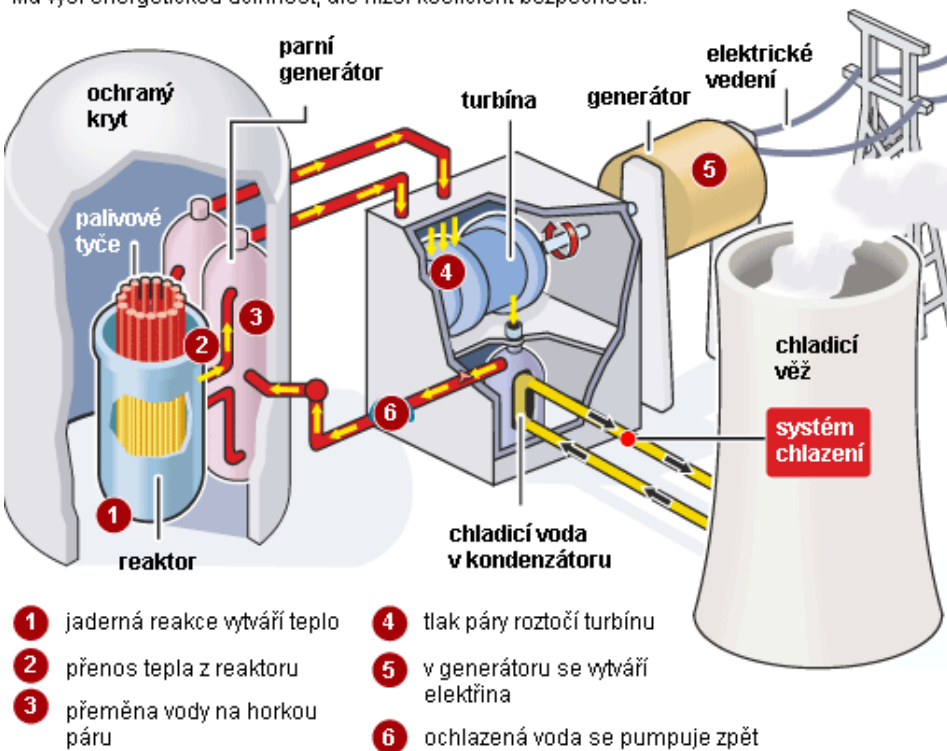


Obr. 36: Reaktor BWR [3].

Schéma elektrárny s reaktorem typu BWR

Jaderný reaktor BWR

BWR - varný reaktor (BWR - boiling water reactor), druhý nejrozšířenější typ reaktoru. Chlazení obstarává voda, která je také moderátorem. Je podobný tlakovodnímu reaktoru VVER (Temelín), ale k varu vody dochází přímo v tlakové nádobě reaktoru a vzniklá pára přímo pohání turbínu. Elektrárny s těmito reaktory jsou tedy jednookruhové. Má vyšší energetickou účinnost, ale nižší koeficient bezpečnosti.



Obr. 37: Schéma reaktoru BWR a dalších součástí elektrárny [23].

Obr. 38: Reaktor BWR [24].

Fúzní reaktory

▶ Princip:

- Lehčí jádra jsou za uvolnění **velkého množství tepla** slučovány na **těžší prvky** (opak štěpné reakce, kdy dochází k rozpadu na lehčí jádra).
- Teplo je opět následně **přeměněno na elektrickou energii**.

▶ Podmínky:

- Je nutné, aby se **reagující jádra přiblížila** vzájemně natolik, že **převládne jaderná síla přitažlivá nad elektrickou silou odpudivou**.
- Nejefektivnějším způsobem jak toho dosáhnout, je **ohřátí paliva na vysokou teplotu** (100 až 200 miliónů K).
- Dále je nutné **zabránit dotyku horkého plazmatu a stěny komory**.
- To je možné realizovat díky **tokamaku** pomocí silného **magnetického pole**.

▶ Typ reakce:

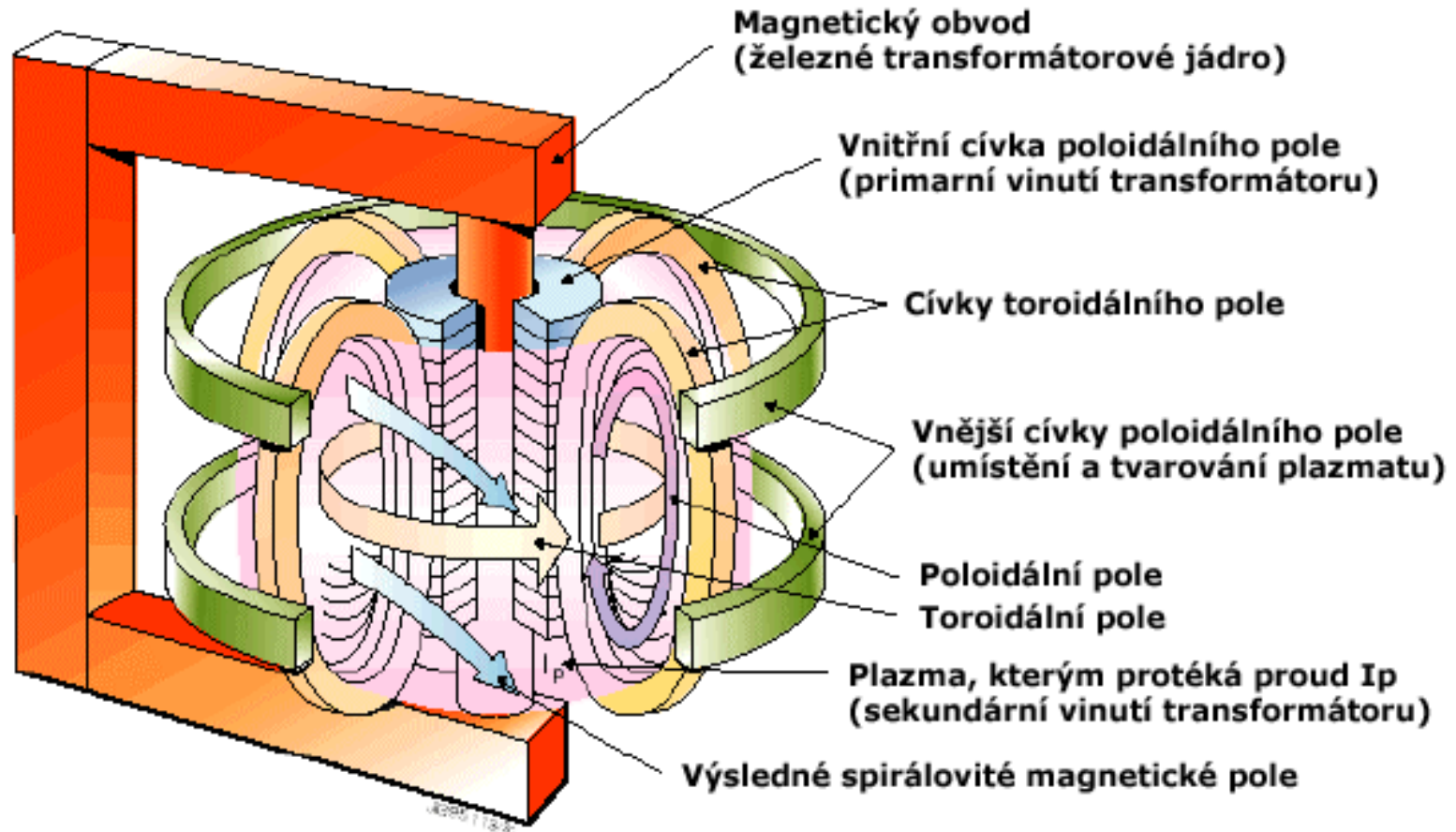
- Z energetického hlediska je nejvhodnější reakce **deuteria a tritia** (těžký a supertěžký izotop vodíku). Při této reakci vzniká helium a neutron.

▶ **V současné době pouze experimentální použití!!!**

Токамак

- ▶ Slovo pochází z ruštiny, kde je **Токамак** zkratkou pro magnetickou komoru.
 - **Rusky:** тороидальная камера с магнитными катушками"
 - **Česky:** toroidní komora v magnetických cívkách.
- ▶ Myšlenka tokamaku se zrodila v **50. letech** v SSSR v rámci tajného projektu v hlavách **Igora Jevgeněviče Tamme** a **Andreje Sacharova**.
- ▶ **Andrej Dmitrijevič Sacharov**
 - Žil v letech 1921 – 1989.
 - Byl to **přední sovětský fyzik, disident a obránce lidských práv a držitel Nobelovy ceny za mír.**
 - **Sestrojil první vodíkovou bombu!**
- ▶ Dnes se tokamaky považují za **jednu z nejnadějnějších cest** k realizaci **kontrolované jaderné fúze.**

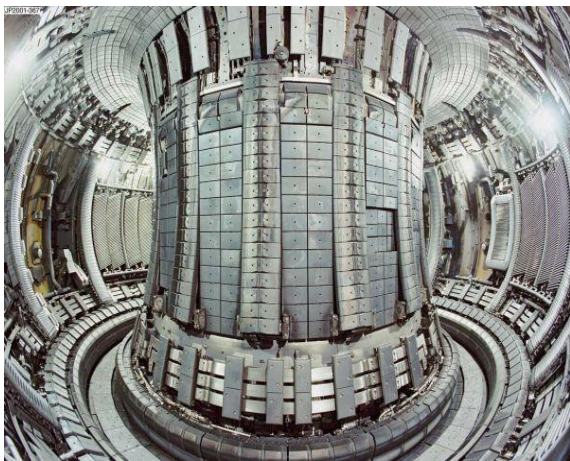
Popis TOKAMAKu



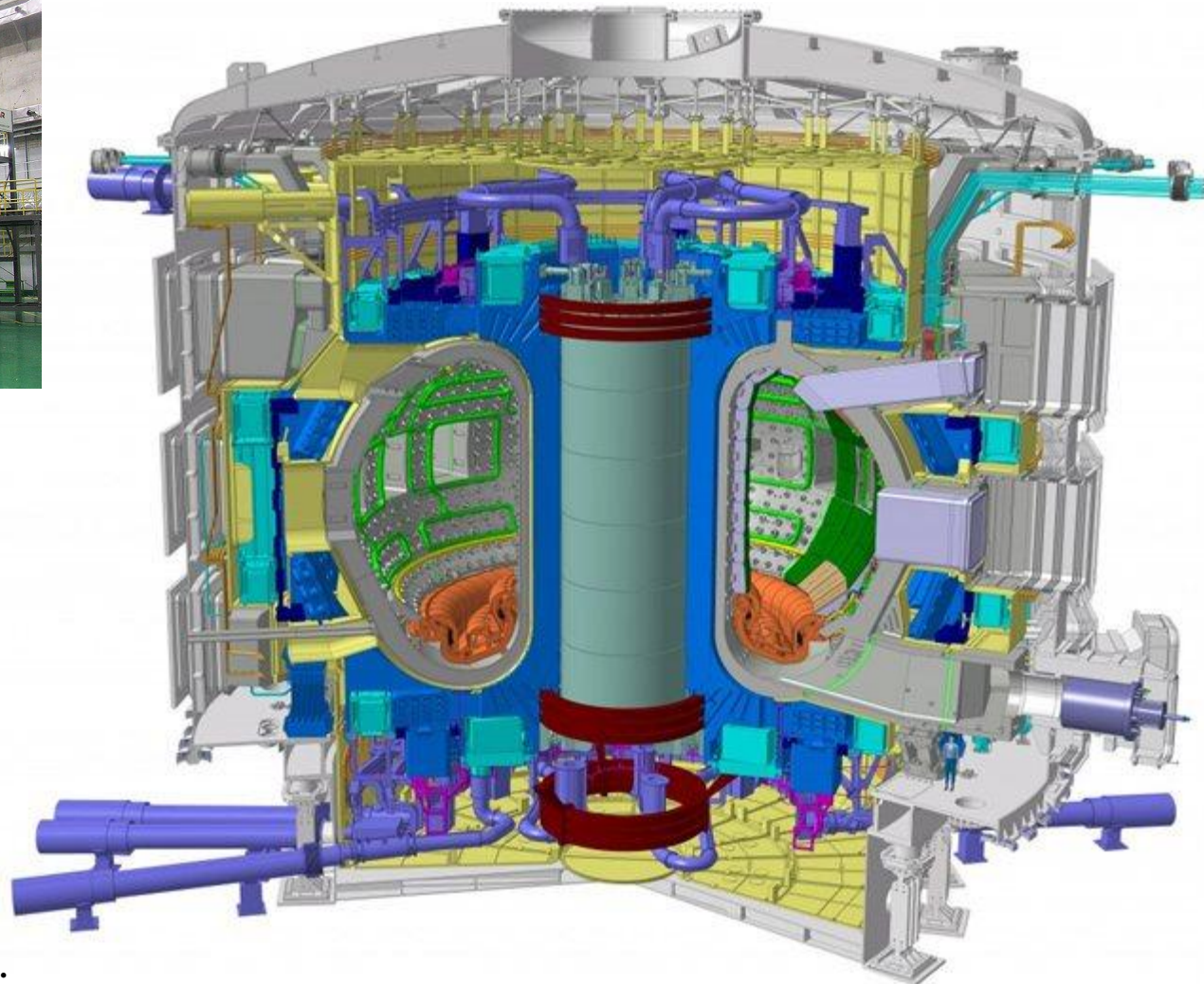
Reaktor nové generace – fúzní TOKAMAK



Obr. 40: Jihokorejský TOKAMAK [26].



Obr. 41: Fotografie vnitřku TOKAMAKu [25].



Obr. 41: Řez francouzským TOKAMAKem (ITER) [27].

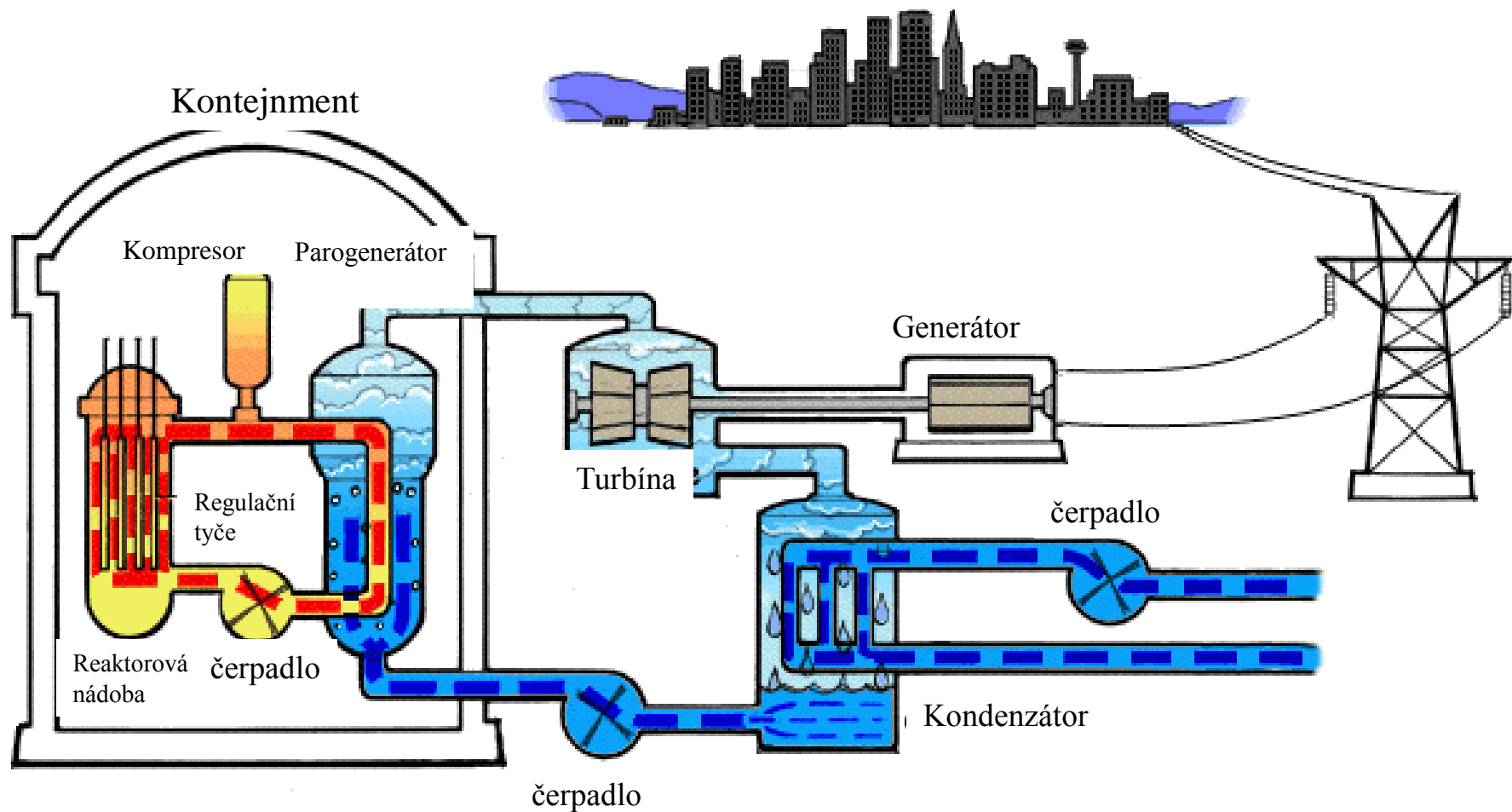
Jaderná elektrárna (JE, NPP)

- ▶ **Nejekologičtější výroba elektrické energie!!!**
 - V malé množství uranu je skryta obrovská energie.
 - Funguje bez znečišťování životního prostředí.
- ▶ **Nejbezpečnější výroba el. energie**
 - **Při dodržení určitých podmínek** – např. seismologická stabilita podloží, nezátopová oblast, odborné řízení reaktoru, pravidelné prohlídky MAAE – mezinárodní agentura pro atomovou energii)
- ▶ **V současné době po Fukušimě bohužel v recesi!**
 - Nové reaktory se v řadě zemí již nestaví a je možné že už nebudou z obavy před radioaktivitou (fenomén **Radiofobie**).
 - Řada reaktorů bude odstavena (Německo)!

Princip jaderné elektrárny (Na příkladu s reaktorem VVER)

- ▶ V **aktivní zóně reaktoru** se přeměňuje jaderná energie uranu 235 (palivové proutky) pomocí **řízené štěpné reakce** na energii tepelnou.
- ▶ **Palivové proutky** jsou **chlazeny vodou z primárního okruhu**, která je zároveň **moderátorem**. Cirkulaci chladiva v primárním okruhu zajišťují **čtyři hlavní cirkulační čerpadla**.
- ▶ Teplo z primárního okruhu se předává přes **tepelné výměníky (parogenerátory)** do **sekundárního okruhu**.
- ▶ Voda v sekundárním okruhu se v **parogenerátorech** na základě tepla získaného z primárního okruhu **odpaří a vznikne sytá pára, která pohání turbínu** (přeměna tepelné energie v energii mechanickou). Na **turbínu** je přímo připojen **generátor elektrické energie**. Napětí je poté transformováno z 24 kV na 400 kV (VVN) a je odvedeno do rozvodny, která jej připojuje do sítě.
- ▶ Po průchodu turbínou je pára odváděna do **kondenzátoru**, kde se **ochlazuje a přeměňuje ve vodu**.
- ▶ Voda, která **kondenzátorům** teplo odebírá, je odváděna do **chladicích věží**, ze kterých je zbytkové teplo odváděno do ovzduší.

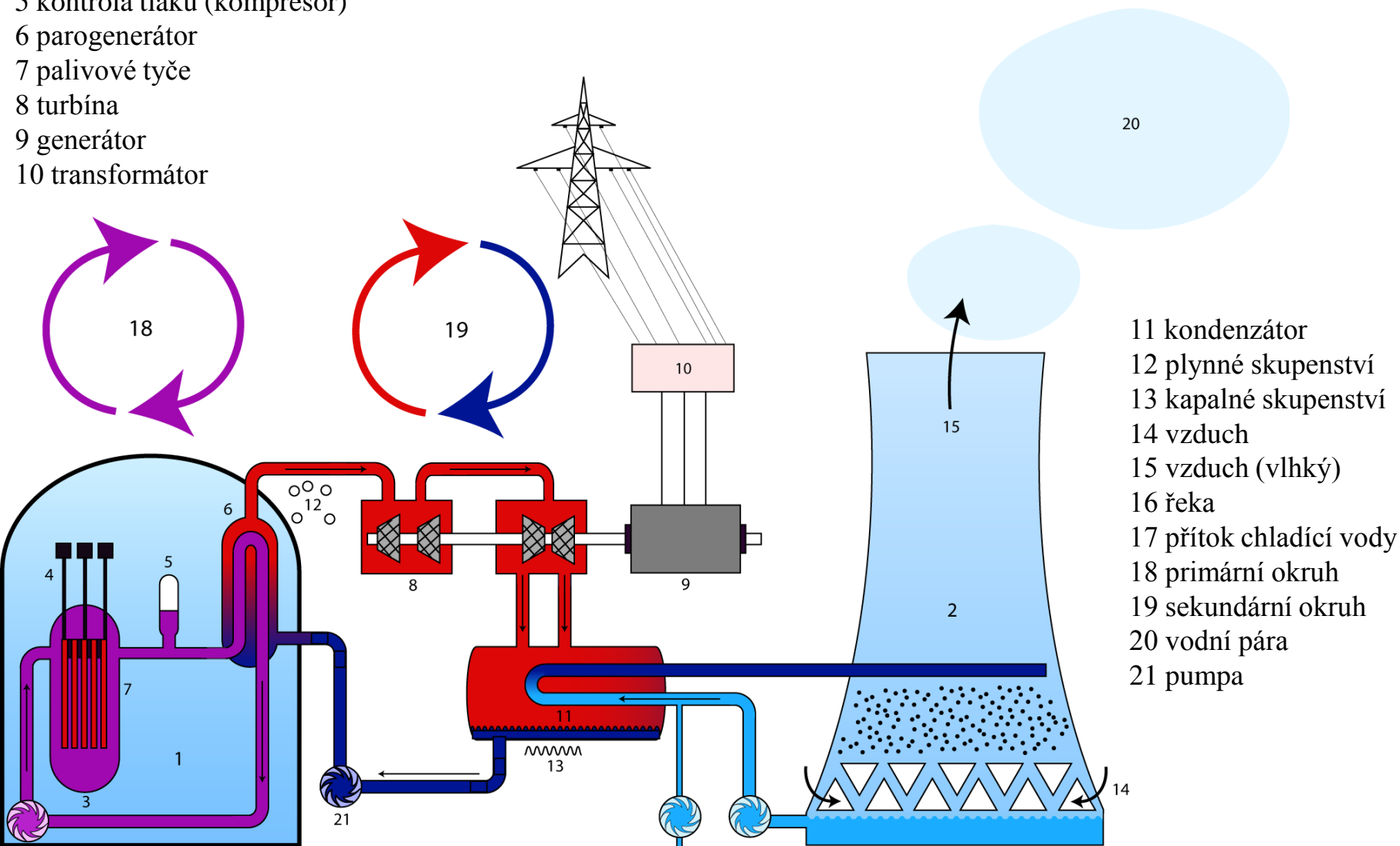
Funkční schéma dvouokruhové jaderné elektrárny



Obr. 42: Schéma jaderné elektrárny [12].

Detailní schéma dvouokruhové jaderné elektrárny

- 1 blok reaktoru
- 2 chladicí věž
- 3 reaktor
- 4 řídicí tyče
- 5 kontrola tlaku (kompresor)
- 6 parogenerátor
- 7 palivové tyče
- 8 turbína
- 9 generátor
- 10 transformátor



- 11 kondenzátor
- 12 plynné skupenství
- 13 kapalně skupenství
- 14 vzduch
- 15 vzduch (vlhký)
- 16 řeka
- 17 přítok chladicí vody
- 18 primární okruh
- 19 sekundární okruh
- 20 vodní pára
- 21 pumpa