

JE

Jaderné elektrárny

Cíl

- Seznámit studenty s hlavními prvky a principy výroby elektrické energie v jaderných elektrárnách. Seznámit studenty s typy průmyslově využívaných energetických reaktorů a vlivem jejich provozu na elektrizační soustavu. Seznámit studenty s elektrotechnickou částí primárního a sekundárního okruhu jaderného bloku, palivovými cykly a ekonomikou jaderných elektráren. Seznámit studenty s vybavením elektrické části jaderné elektrárny, vlastní spotřebou elektrické energie jaderné elektrárny. Seznámit studenty s jadernou bezpečností a legislativou, s vlivem jaderné energetiky na životní prostředí. Seznámit studenty s problematikou jaderného odpadu, jeho zpracováním a přepracováním. Seznámit studenty s problematikou jaderná fúze.
- .

- Přednášky : Jana Jiříčková
 - Katedra elektroenergetiky a ekologie
 - E-mail:jjiricko@kee.zcu.cz
 - Místnost:EL 306 ([Univerzitní 26 , Plzeň](#))
 - Telefon:37763 **4018**

Přednášky externistů povinné

- účast kontrolovaná
 - zohledněno při hodnocení testu u zkoušky

- Externisté:
- 11.10.2012 Primární část – Ing. Růžička ČEZ a.s
- 18.10.2012 Sekundární část – Ing. Trubka ČEZ a.s.
- 25.10.2012 Elektro – Ing. Trubka ČEZ a.s
- 1.11.2012 Provoz – Ing. Růžička ČEZ a.s
- Atd.....

O přednáškách externistů budete informováni hromadným emailem.

I

- Zápočet :
 - Zápočtový test – 10 otázek – forma abc
 - Termín – 13.12.
- Zkouška:
 - Písemná
 - Předtermín 20.12.

Informace a podklady

- Courseware
- Portal
- Hromadný email
- Konzultační hodiny
 - Jiříčková : úterý 11:00-12:00

literatura

- Doporučená: Ibler, Zbyněk. *Provoz jaderných elektráren*. 1. vyd. Plzeň
- Doležel J. a kol.: Jaderné a klasické elektrárny, Praha 2011, ISBN 978-80-01-04936-5
- A řada dalších zdrojů....
- www.iaea.org
- www.euronuclear.org

Historie

- 1896: objev radioaktivity (H.A.Becquerel)
- 1932: objeveny neutrony
- 1938: O. Hahn vysvětlil „uranovou anomálii“, kdy při ozařování n nevzniká jeden těžší isotop, ale hned několik lehčích
- 2. 12. 1942: 1. jaderný reaktor – Chicago
- 16. 7. 1945: 1. využití štěpné reakce – bomba – Trinity desert v Novém Mexiku
- srpen 1945: uranová bomba – Hiroshima
plutoniová bomba - Nagasaki
- 1954: 1. jaderná elektrárna – Obninsk
- 26. 4. 1986: Černobyl (4. blok)
 - » dodnes už více než 6000 reaktorů

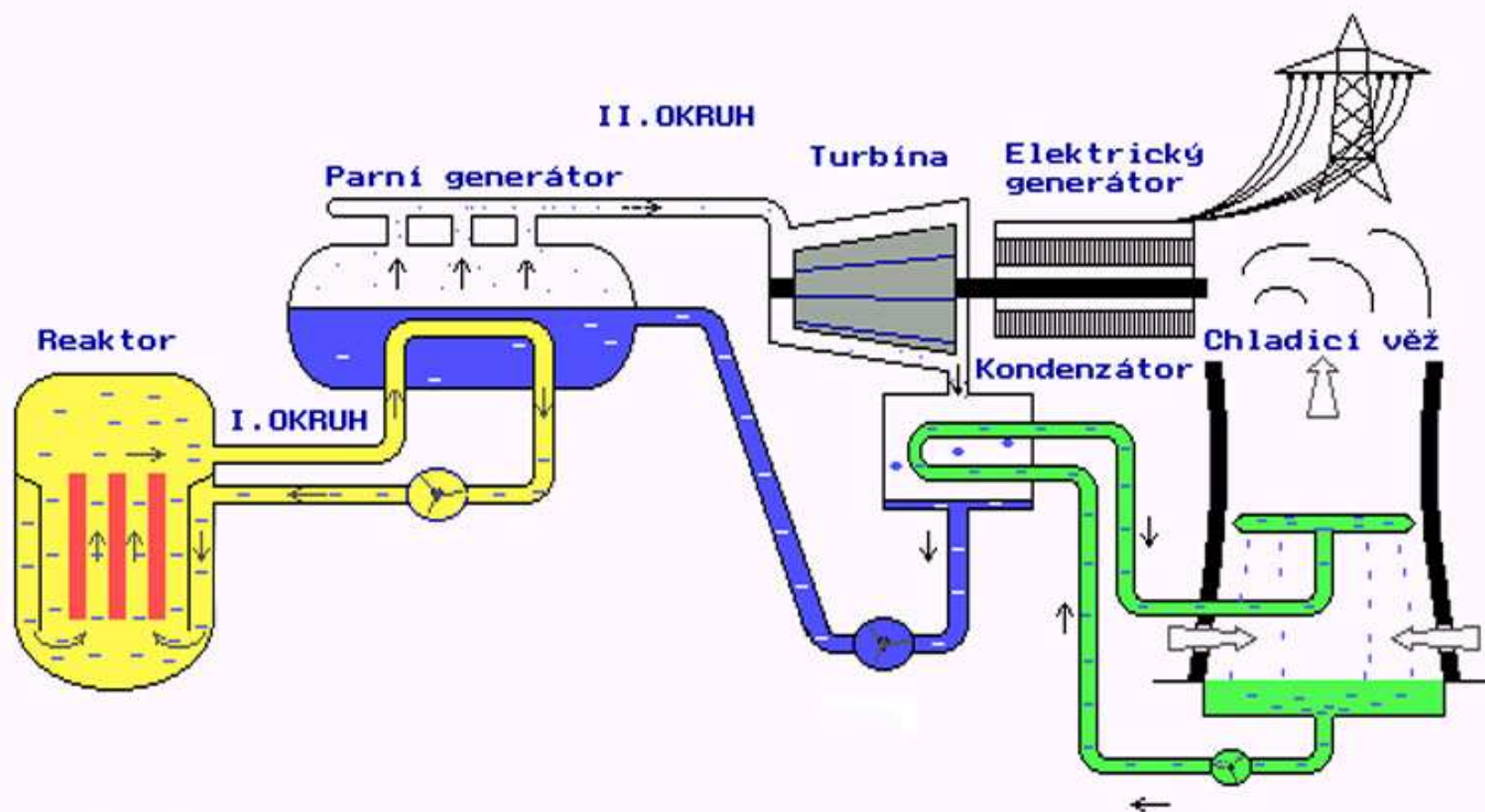
E. Fermi uvedl první jaderný reaktor na světě do kritického stavu v r. 1942



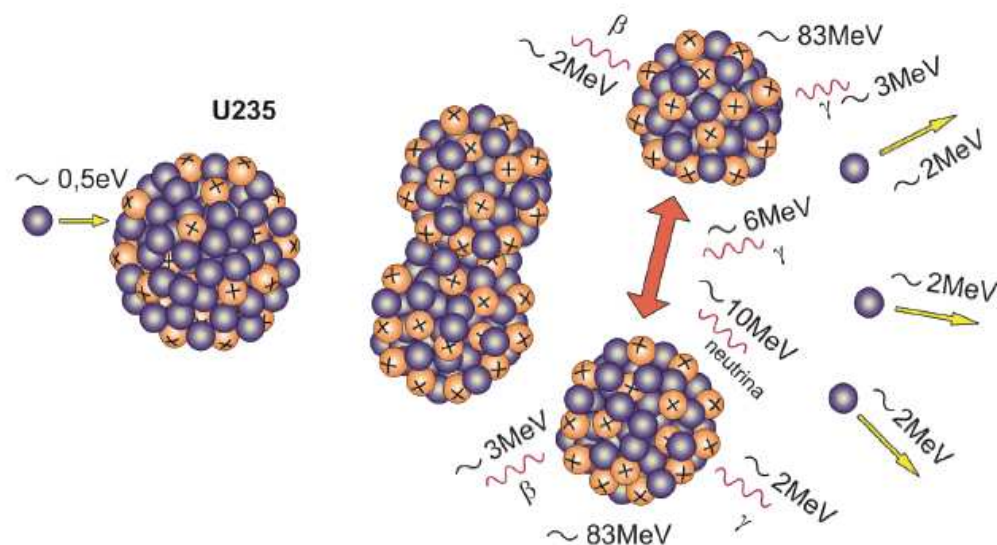
**Rok 1954 - první jaderná elektrárna na světě
v OBNINSKU o výkonu 5 MW_e**



Princip práce jaderné elektrárny

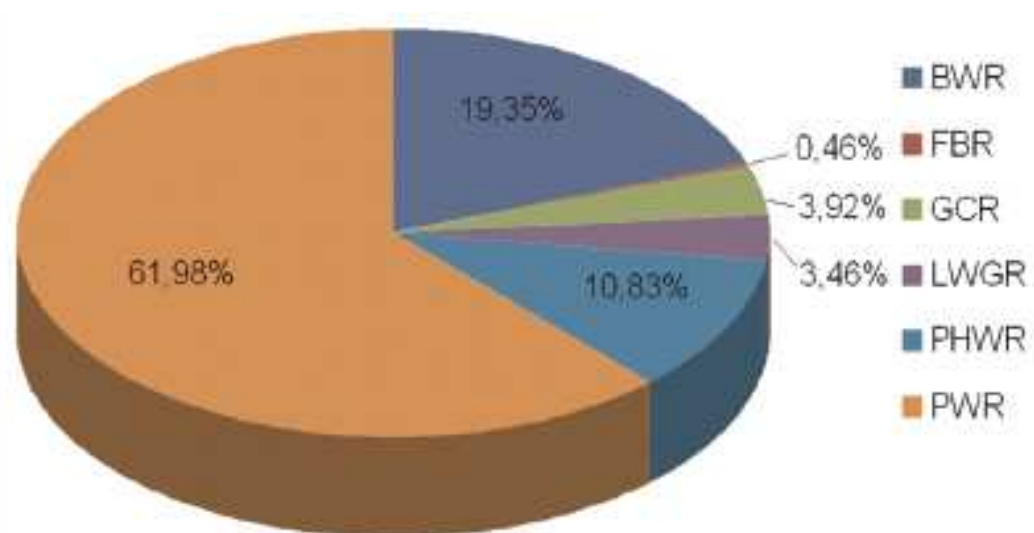


Jako příklad lze uvést jeden z častějších případů štěpení v reaktoru:



jednotky	(10^{-13} J)	(MeV)	(%)
kinetická energie odštěpků	265,0	165,4	83,4
energie volných neutronů	9,6	6,0	3,0
energie okamžitého záření gama	9,6	6,0	3,0
energie neutrin	17,8	11,1	5,6
energie záření gama při rozpadu	8,0	5,0	2,5
energie záření beta při rozpadu	8,0	5,0	2,5
celkem	318,0	198,0	100,0

- Za stejné období, při průměrné výrobě 1 kWh z 1 kg uhlí, by tepelná elektrárna o stejném výkonu spotřebovala 8,76 milionů tun uhlí, tedy přibližně $1,78 \cdot 10^6$ krát větší hmotnost paliva než jaderná. U elektráren s rychlými reaktory je vzhledem k vyššímu využití paliva tento poměr ještě výraznější.
- Spálením gramu uhlí se uvolní energie 20 kJ.
- Štěpením gramu uranu 235 se uvolní energie 88 GJ.
- Sloučením gramu vodíku na helium se uvolní energie 426 GJ .



BWR	Boiling water reactor	Varný lehkovodní reaktor
FBR	Fast Breeder Reactor	Rychlý množivý reaktor
GCR	Gas Cooled, Graphite Moderated Reactor	Plynem chlazený, grafitem moderovaný reaktor
LWGR, RBMK	Light Water Cooled, Graphite Moderated Reactor - Reaktor bolšoj moščnosti kanalnyj	Vodou chlazený, grafitem moderovaný reaktor (kanálový)
PHWR, CANDU	Pressurized Heavy Water Moderated and Cooled Reactor, Canada Deuterium Uranium	Tlakovou těžkou vodou chlazený a moderovaný reaktor
PWR, VVER	Pressurized Water Reactor - Vodo-Vodjanoj Energetičeskij Reaktor	Tlakovou vodou chlazený a moderovaný reaktor

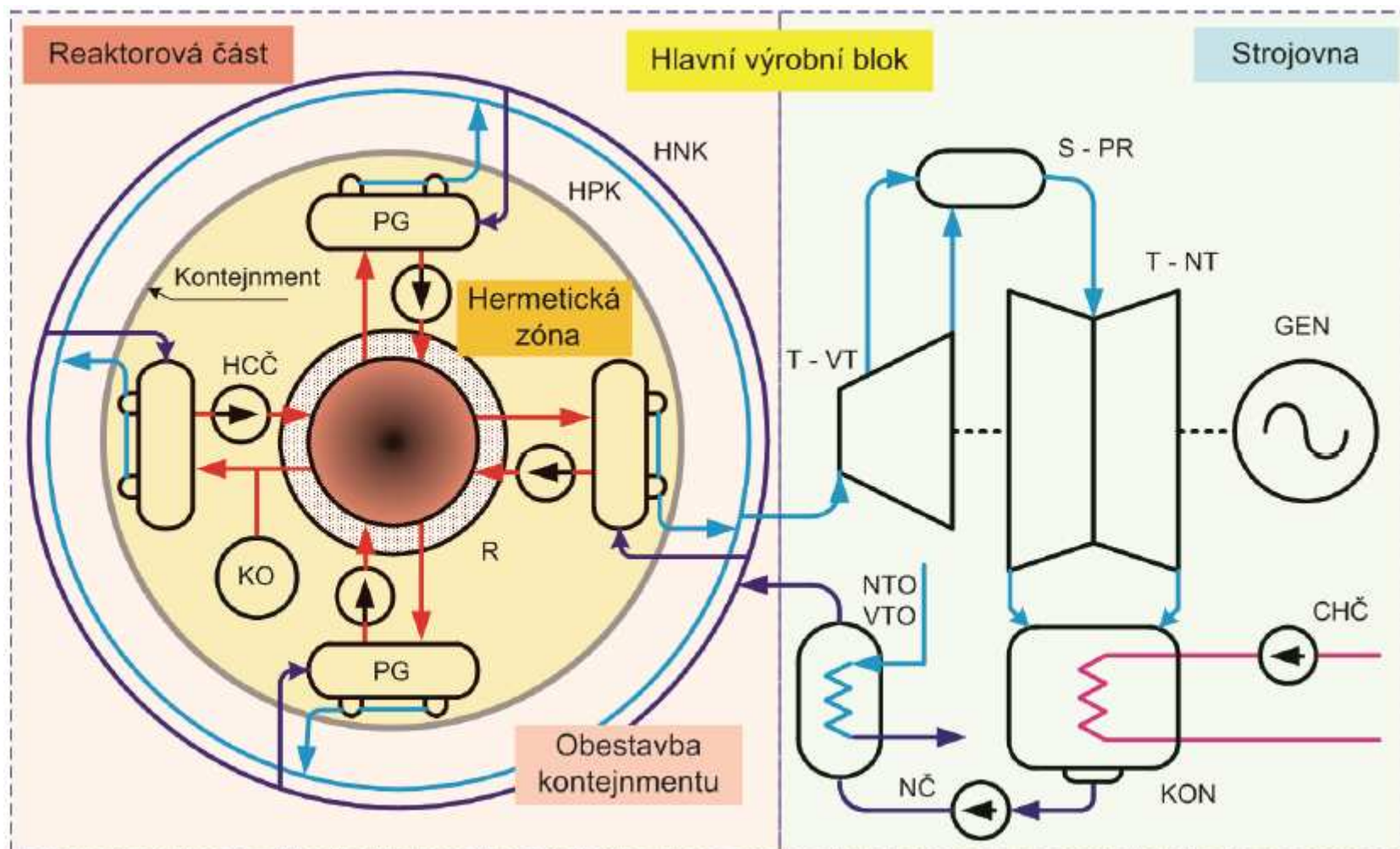
Další speciální hlediska pro klasifikaci:

Energie neutronů	Moderátor	Chladivo	Označení
Tepelné	Voda (H ₂ O)	H ₂ O	Tlakovodní (PWR, VVER)
			Varný (BWR)
	Grafit	CO ₂	Plynem chlazený (GCR), zdokonalený (AGR)
		He	Vysokoteplotní (HTGR)
		H ₂ O	Vodou chlazený (LWGR)
	Těžká voda (D ₂ O)	D ₂ O	Těžkovodní (CANDU) (PHWR)
		H ₂ O	Těžkovodní chlazený lehkou vodou (HWLWR)
		CO ₂	Těžkovodní chlazený plynem (HWGCR)
Rychlé	-	Na	Rychlý, množivý (FBR)

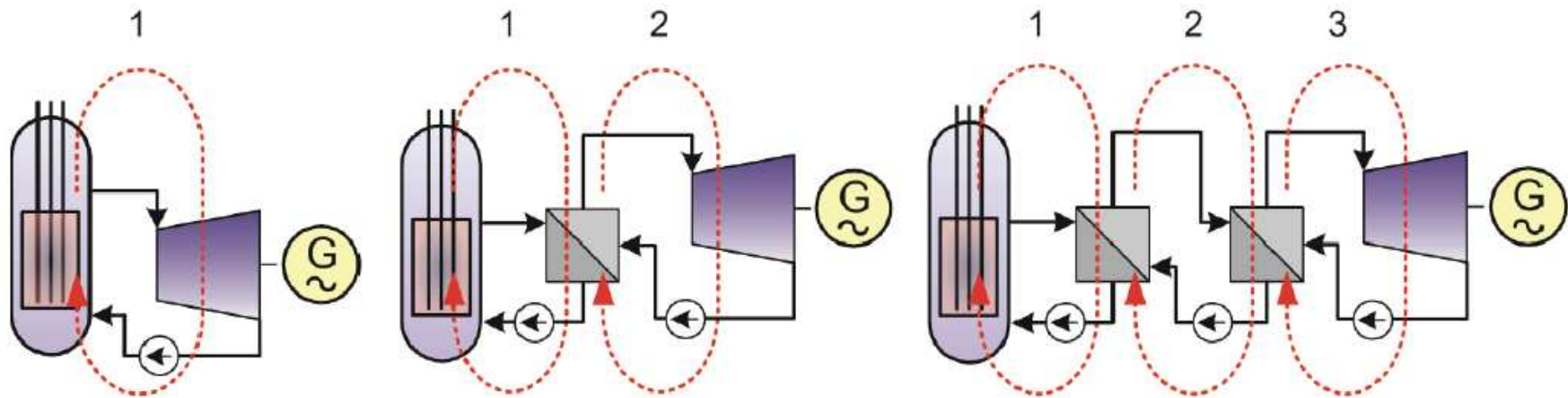
jaderne energetiky.

Jaderná elektrárna

- V zásadě každou jadernou elektrárnu lze prostorově rozdělit z hlediska technologií, provozního režimu a zabezpečení na část zajišťující **provoz reaktoru**, část **strojní** - zajišťující provoz turbín a výroby elektrické energie a část zajišťující **technologický provoz** elektrárenského bloku.
- Reaktorová část se strojní zpravidla tvoří jeden společný stavební celek, tzv. **hlavní výrobní blok**, rozdělený vnitřními vestavbami na zařízení s aktivními provozny – reaktorovnu a část se strojním a k němu příslušejícím technologickým zařízením – strojovnu



Okruhy v jaderných elektrárnách



Štěpné jaderné reaktory můžeme třídit podle různých hledisek.

Mezi nejdůležitější hlediska patří:

- průměrná energie neutronů při štěpení,
- konzistence a koncentrace jaderného paliva,
- druh moderátoru,
- geometrické uspořádání paliva a moderátoru v aktivní zóně,
- druh chladiwa v aktivní zóně.

ad 1) Podle průměrné energie neutronů při štěpení dělíme reaktory obvykle na tři typy:

- tepelné,
- střední,
- rychlé.

Tepelné (pomalé) reaktory pracují s neutrony zpomalenými na energii, která je srovnatelná s energií molekul prostředí, tj. $E_n \sim 0,025 \text{ eV}^{1)}$. V reaktorech se středními neutrony je štěpení vyvolávané z zejména neutrony s energií kolem 10^2 eV . V rychlých reaktorech dochází ke štěpení paliva neutrony s energií blízkou energii štěpení, tj. $E_n > 10^5 \text{ eV}$. Často se setkáváme také s epitermálními reaktory. Jsou to reaktory, ve kterých je štěpení vyvolávané převážně neutrony s energií kolem 1 eV .

¹⁾ Podle měrových jednotek SI $1 \text{ eV} = 0,160210 \text{ aJ (attojoule)} = 0,16021 \cdot 10^{-18} \text{ J}$. Pak $E_n = 0,0253 \text{ eV} = 0,00405 \text{ aJ}$

ad 2) Podle druhého 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. Obohacení může být **nízké, asi do 5% ^{235}U** , střední nebo **vysoké (nad 90% ^{235}U)**. Pokud jde o chemické složení paliva, používá se nejčastěji přírodního kovového uranu, kysličníku uranu UO_2 , nebo karbidu uranu UC. V perspektivních transmutačních systémech (ADTT - Accelerator driven transmutation technology) se uvažuje použít palivo ve formě roztavených fluoridů.

ad 5) 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).

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.

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: $^{238}\text{U} \rightarrow ^{239}\text{Pu}$, $^{232}\text{Th} \rightarrow ^{233}\text{U}$).

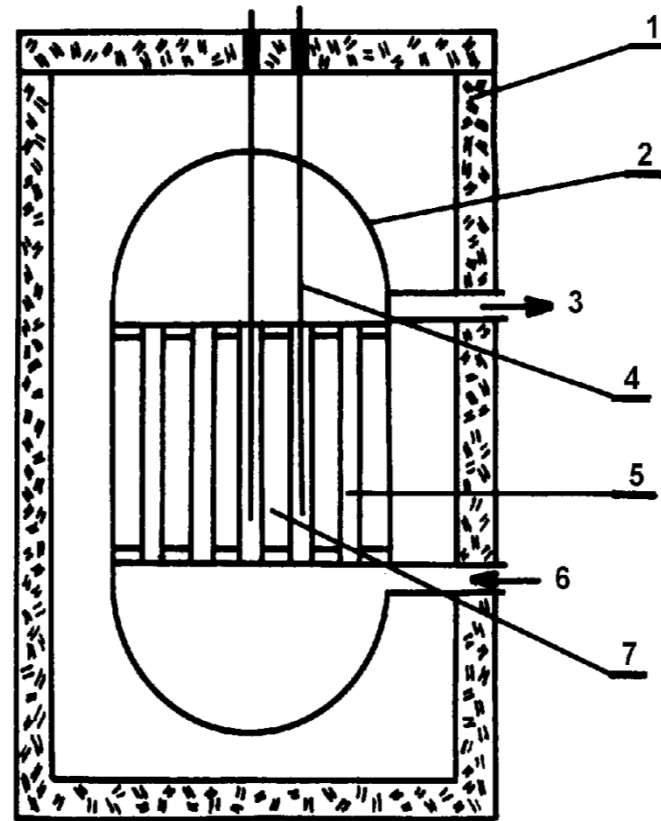
Další speciální hlediska pro klasifikaci:

Energie neutronů	Moderátor	Chladivo	Označení
Tepelné	Voda (H ₂ O)	H ₂ O	Tlakovodní (PWR, VVER)
			Varný (BWR)
	Grafit	CO ₂	Plynem chlazený (GCR), zdokonalený (AGR)
		He	Vysokoteplotní (HTGR)
		H ₂ O	Vodou chlazený (LWGR)
	Těžká voda (D ₂ O)	D ₂ O	Těžkovodní (CANDU) (PHWR)
		H ₂ O	Těžkovodní chlazený lehkou vodou (HWLWR)
		CO ₂	Těžkovodní chlazený plynem (HWGCR)
Rychlé	-	Na	Rychlý, množivý (FBR)

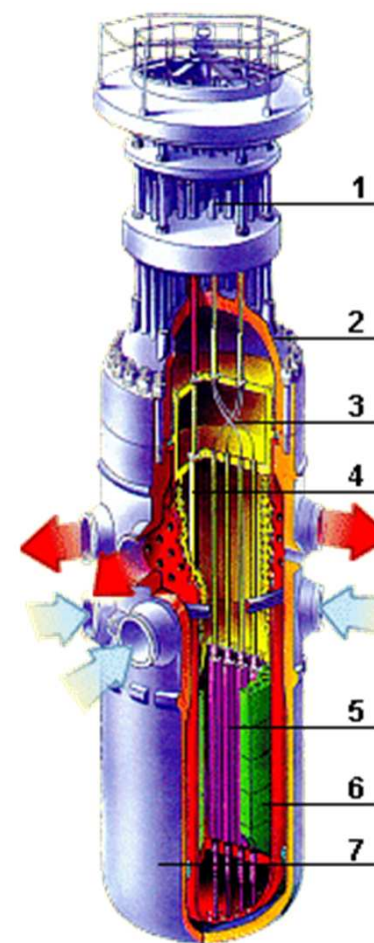
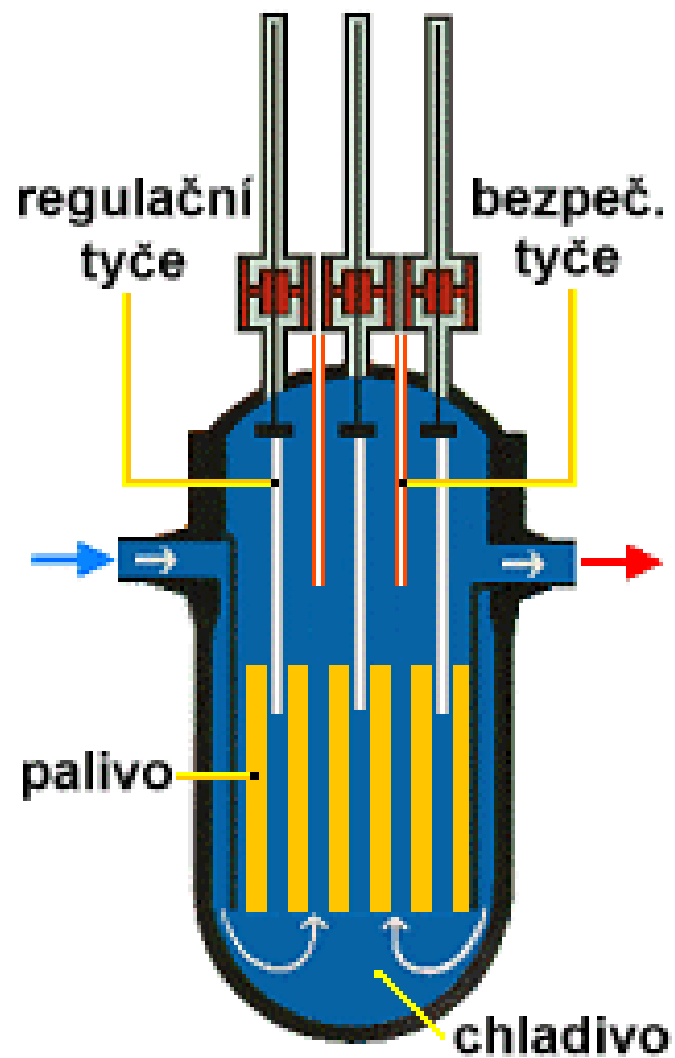
jaderné energetiky.

1.2 Principiální schéma jaderného reaktoru

1. stínění
2. nádoba reaktoru
3. výstup chladiva
4. regulační tyč
5. palivový článek
6. výstup chladiva
7. moderátor



Principiální schéma
jaderného reaktoru Reaktor JE Temelín



Poznámky ke chladivu

- většina reaktorů pracuje s takovým výkonem, že je nutno reaktor chladit
- požadavky na chladio reaktoru
 - nesmí korodovat konstrukční materiál reaktoru
 - musí mít příslušné tepelné vlastnosti
 - musí být stabilní vůči ozařování
 - především však, aby chladio mělo malý účinný průřez pro zachyt neutronů
- chlady, která těmto účelům vyhovují
 - plyn (CO_2 , He) - účinný teprve při vyšším tlaku (větším než 1 MPa)
 - voda
 - těžká voda
 - tekuté kovy
 - tekuté kovy, např. Na, Pb, Bi a K - používají se v energetických reaktorech, kde je požadována vysoká pracovní teplota

Základních části standardního reaktoru

- **palivo**
 - dochází v něm ke štěpení a uvolňuje se energie
- **moderátor**
 - pomocí srážek neutronů s jádry atomů snižuje kinetickou energii neutronů
- **chladio**
 - tekutina odvádějící vznikající tepelnou energii ven z reaktoru
- **stavební materiály**
 - tvoří ochranný obal paliva a moderátoru a dále vnitřní vestavby reaktoru
- **reflektor**
 - část reaktoru přiléhající k aktivní zóně a sloužící k odražení co největšího počtu unikajících neutronů zpět do aktivní zóny
- **regulační a ovládací zařízení**
 - absorpcí neutronů umožňují udržovat výkon reaktoru na žádané hodnotě
- **ochranný kryt**
 - chrání obsluhu reaktoru před zářením vznikajícím v rektoru

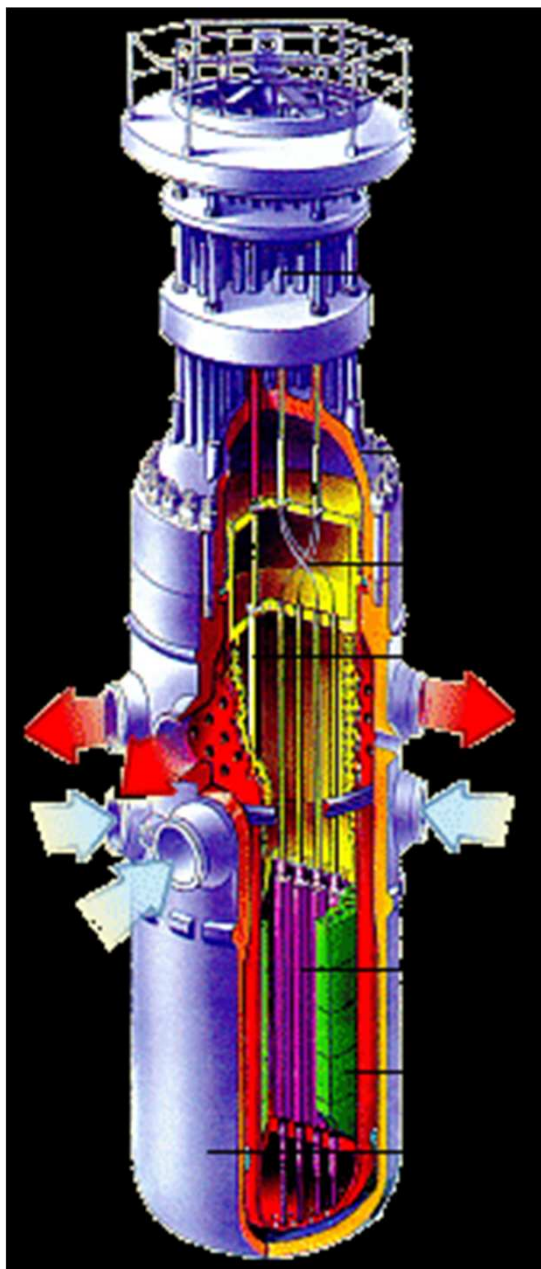
Moderátor

- pro práci jaderných reaktorů s tepelnými n má velký význam moderátor
- rychlé n, vznikající při štěpení, se postupně zpomalují při srážkách s jádru moderátoru
- pro popis zpomalování n se zavádí průměrný pokles přirozeného logaritmu energie neutronu při jedné srážce, tzv. **průměrný logaritmický dekrement energie** na jednu srážku
 - je to (střední) hodnota veličiny $\xi = \ln(E/E')$
 - za velmi dobré přiblížení (s chybou do 5%) můžeme považovat vztah $\xi = \frac{2}{A + 2/3}$
 - čím větší hodnota ξ , tím menší průměrný počet srážek na zpomalení
- moderátor by však neměl n zachycovat, musí být tedy zároveň velký $\Sigma_s \Rightarrow$ zavádí se **zpomalovací schopností** $\xi\Sigma_s$
- zpomalovací schopnost však nezahrnuje ještě jeden důležitý faktor a tím je, že látky mohou n také absorbovat - jakákoli látka, která silně absorbuje neutrony, nemá jako moderátor význam
- zavádí tzv. **koeficient zpomalení** (moderace) $(\xi\Sigma_s)/(\Sigma_a)$
 - tento koeficient je pak nejdůležitější veličinou, charakterizující vlastnosti moderátoru

Reflektor

Jaká látka by měla tvořit reflektor?

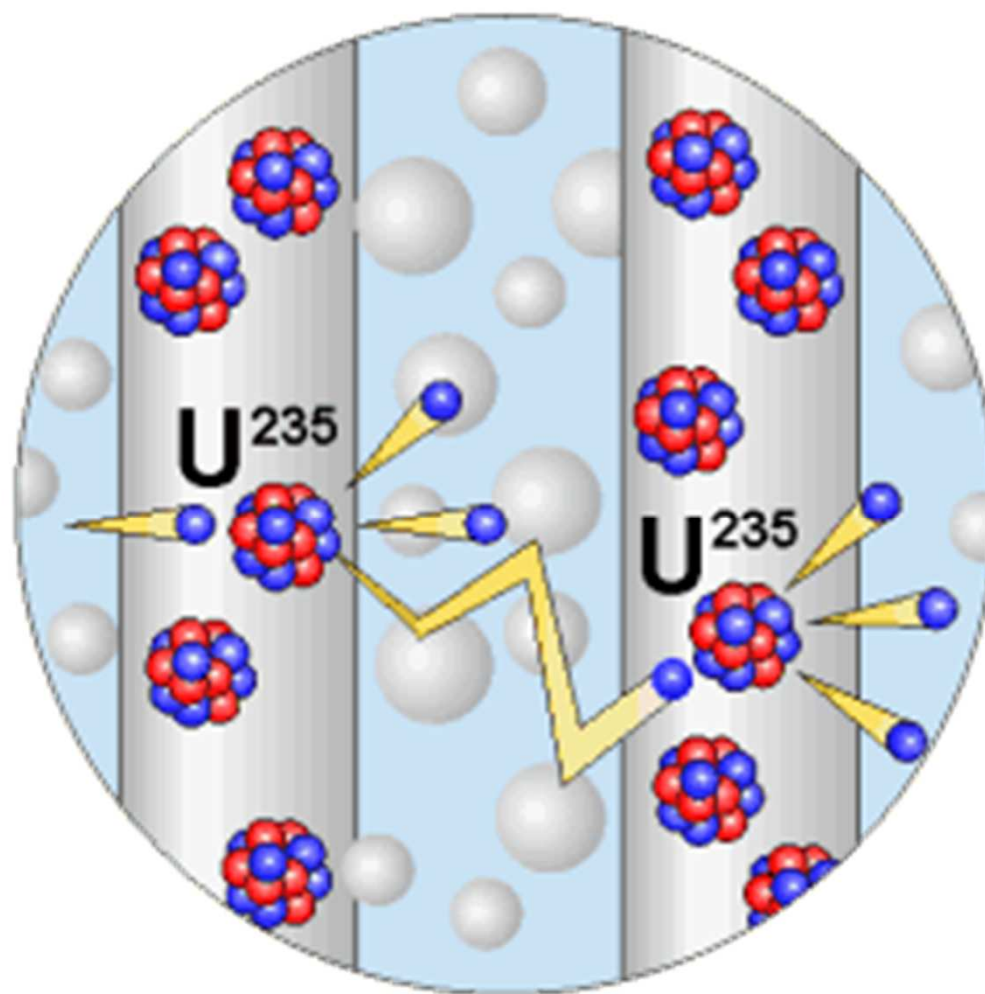
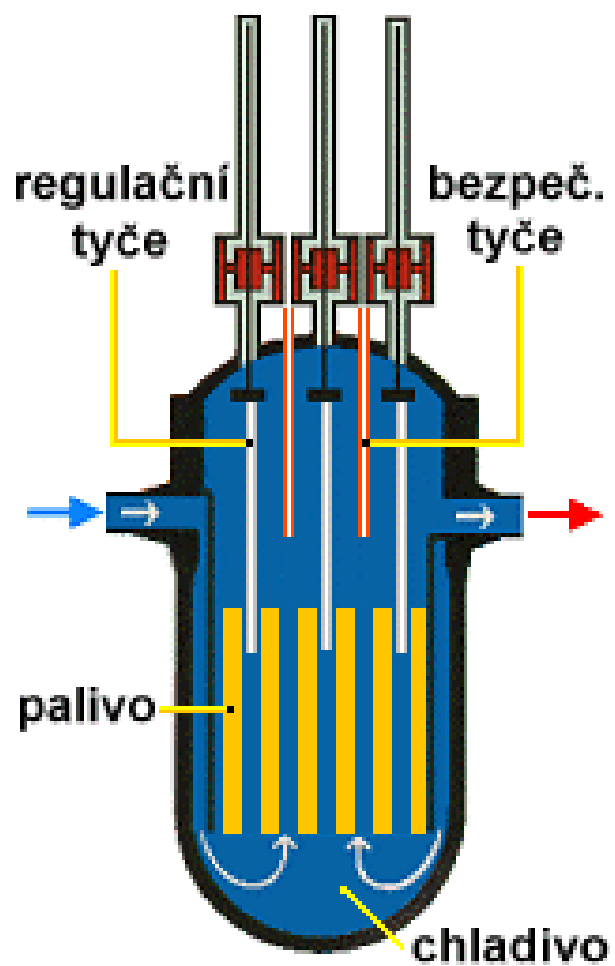
- jednou z vlastností reflektoru by měla být co největší schopnost odrážet neutrony zpět do rozmnožujícího prostředí - aby se neutron mohl vrátit zpět, musí se co nejdříve srazit s jádrem reflektoru.
- dále potřebujeme, aby v prostředí reflektoru nebyl neutron pohlcován, tedy aby se neutron mohl vrátit z co největší hloubky reflektoru
- \Rightarrow je vidět, že látky, které jsou dobrými moderátory, budou i dobrými reflektory



Tepelný jaderný reaktor JE Temelín

- 1-pohon svazkové řídicí tyče,
- 2-víko tlakové nádoby reaktoru,
- 3-vývody vnitroreaktorového měření,
- 4-ochranná trubka svazkové tyče,
- 5-palivové kazety,
- 6-plášť aktivní zóny,
- 7-tlaková nádoba reaktoru

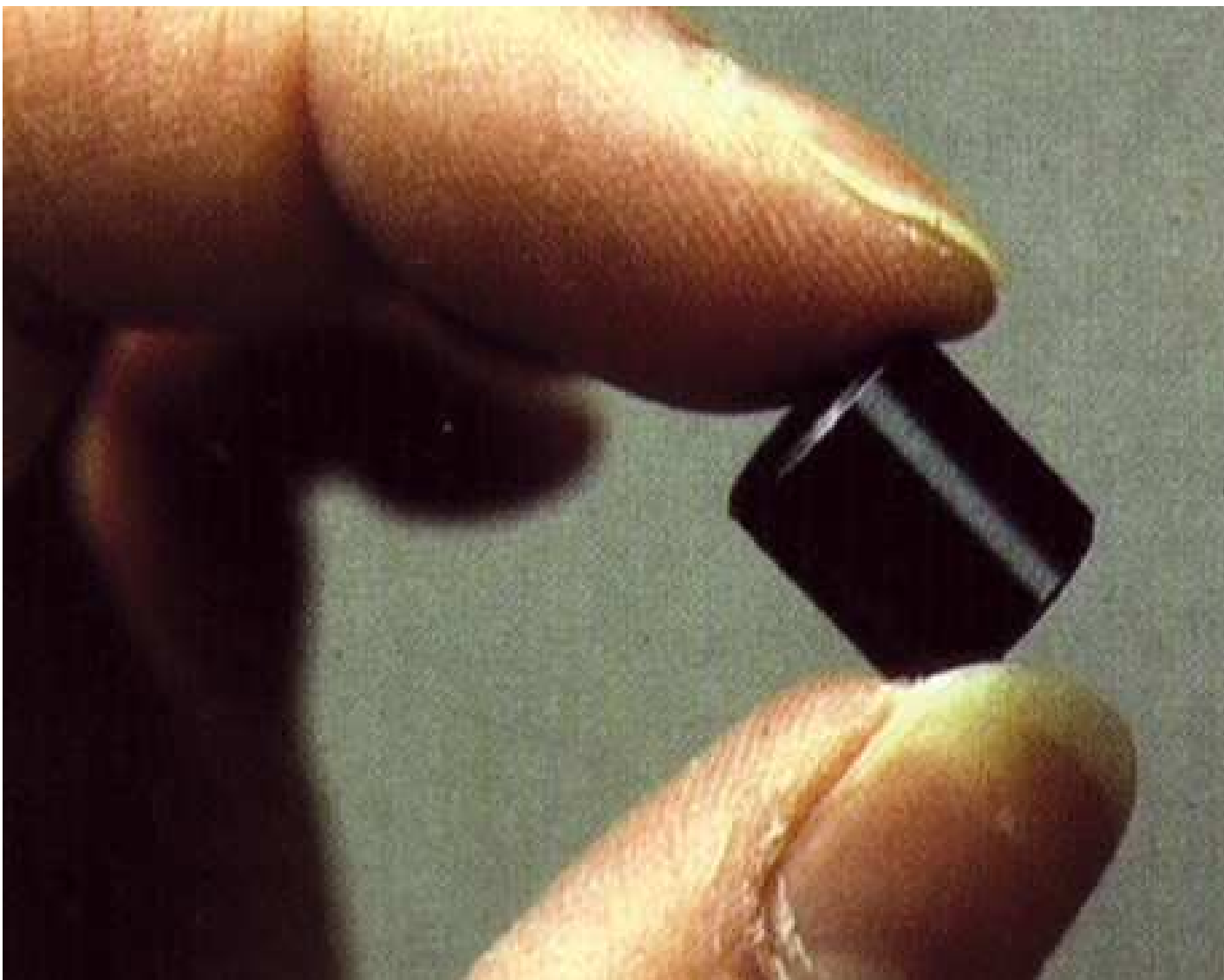
Co se děje v tepelném jaderném reaktoru ?



Palivová kazeta reaktoru VVER-1000



Palivová tableta reaktoru VVER-1000



1.3 Obecné problémy fyzikální teorie jaderných reaktorů

1.3.1. Rozložení neutronů v jaderném reaktoru

Rozložení neutronů v jaderném reaktoru je funkcí prostorových souřadnic, energie neutronů, směru jejich pohybu a v obecném tvaru může být vyjádřeno integro-diferenciální Boltzmannovou rovnicí, sestavenou na základě rovnováhy mezi různými jadernými procesy.

Zpravidla se používají zjednodušující předpoklady a omezení, a Boltzmannova rovnice se upravuje na vhodnější tvar.

1.3.2.Úkoly fyzikálního výpočtu jaderného reaktoru

- **Určení kritického parametru** (určení optimální konfigurace reaktorové mříže, odpovídající minimální hodnotě štěpného materiálu.)
- **Rozložení hustoty neutronů a energie štěpení** (návrhu systému ochlazování reaktoru, stanovení průběhu vyhoření jaderného paliva a vzniku štěpných produktů, intenzity radioaktivního záření a hustoty toku neutronů na povrchu reaktoru i v jeho okolí)
- **Účinnost regulačních orgánů** (můžeme měnit hustotu rozložení neutronů podle potřeby – rozvinutí nebo zastavení štěpné reakce.)
- **Stupeň stability** (v reaktorech s vysokým stupněm stability malé odchylky od stacionárního stavu rychle zanikají a reaktor se vrací do původního stavu.)
- **Vyhoření jaderného paliva a hromadění strusek**
- **Havarijní a speciální provozní režimy reaktoru**

1.3.3. Výpočtové metody jaderného reaktoru

Vyjádření vztahu rovnováhy v reaktoru– Boltzmannova kritická rovnice.

Pro výpočty **homogenních reaktorů** se používá několik modelů:

- **Model nekonečného prostředí** - zkoumání fyzikálních procesů uvnitř systému ve značné vzdálenosti od fyzikálních hranic
 - výpočet energetického spektra neutronů
- **Jednorychlostní přiblížení** - předpokládá, že neutrony v reaktoru mají stejnou energii danou tvarem energetického spektra
 - difúzní rovnice neutronů* - v násobícím prostředí přechází Boltzmannova rovnice na Helmholtzovu rovnice, rozložení neutronů je závislé pouze na prostorových souřadnicích
- **Fermiho teorie stárnutí** - rozložení neutronů je závislé na energii a poloze, Boltzmannova rovnice přechází na parciální diferenciální rovnici
 - zkoumání zpomalování v reaktorech s moderátorem tvořeným prvky s vysokým hmotnostním číslem

- **Mnohogrupové metody** - studium mnohozónových systémů s ohledem na energetické spektrum neutronů, jsou založeny na modelu spojitého zpomalování.
 - *dvougrupové přiblížení*- výpočet reaktorů s velkým počtem zón, vhodný pro výpočty tepelných i rychlých reaktorů.

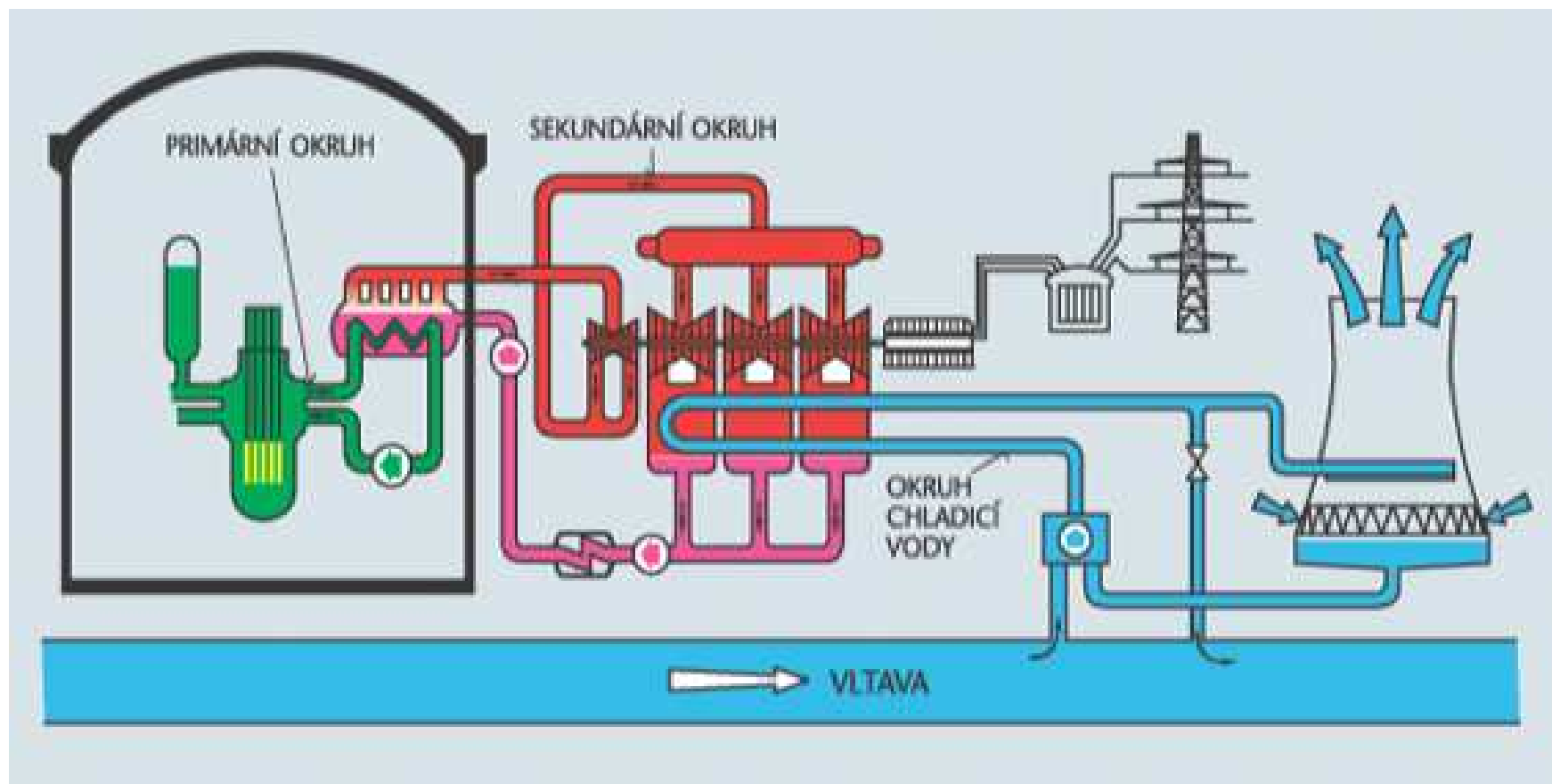
Heterogenní reaktory - aktivní zóna je tvořená mříží, která je složena z malých buněk, každá buňka obsahuje prostorově oddělené palivo a moderátor

- pro přesné výpočty je nutné detailní studium charakteristik jednotlivých buněk.

Jaderná elektrárna Temelín

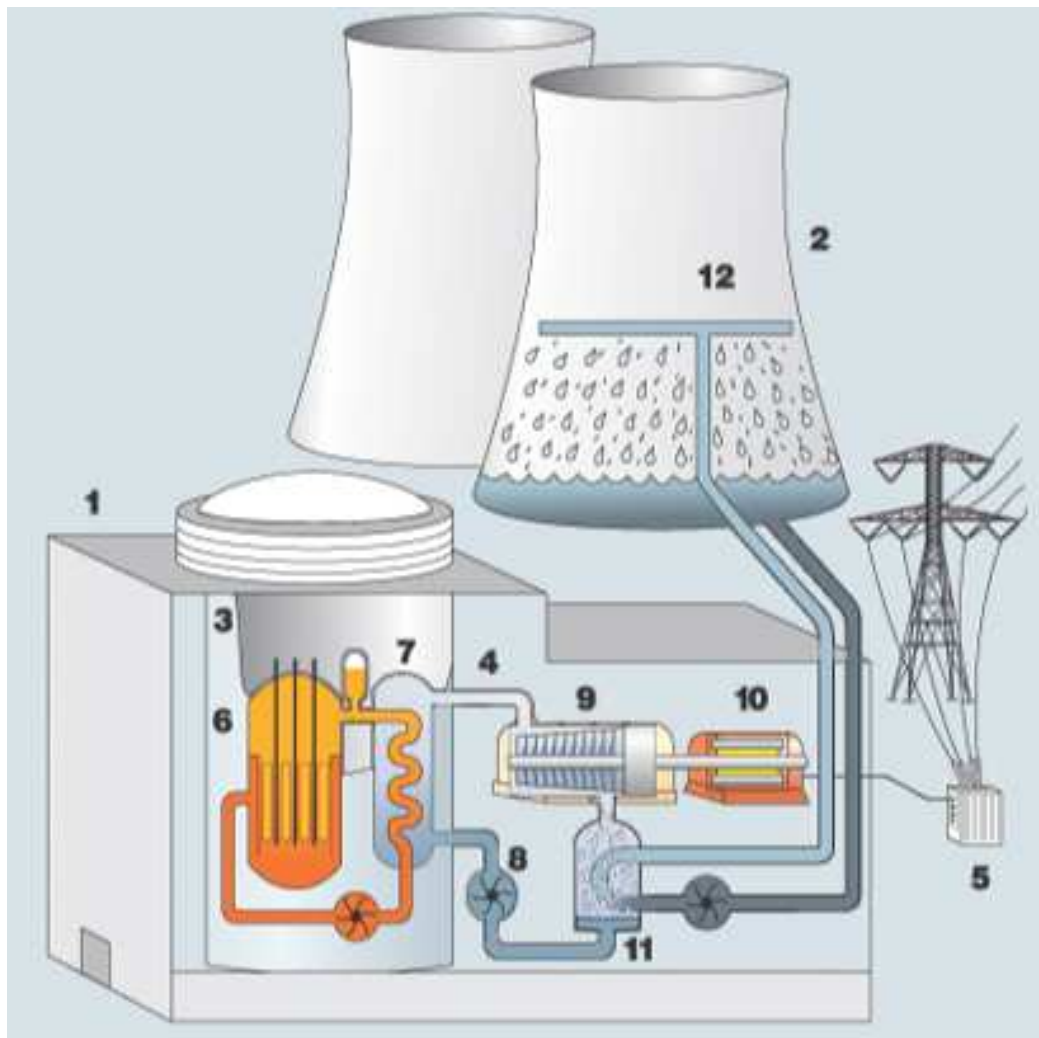


Schéma jaderné elektrárny Temelín s tepelným jaderným reaktorem



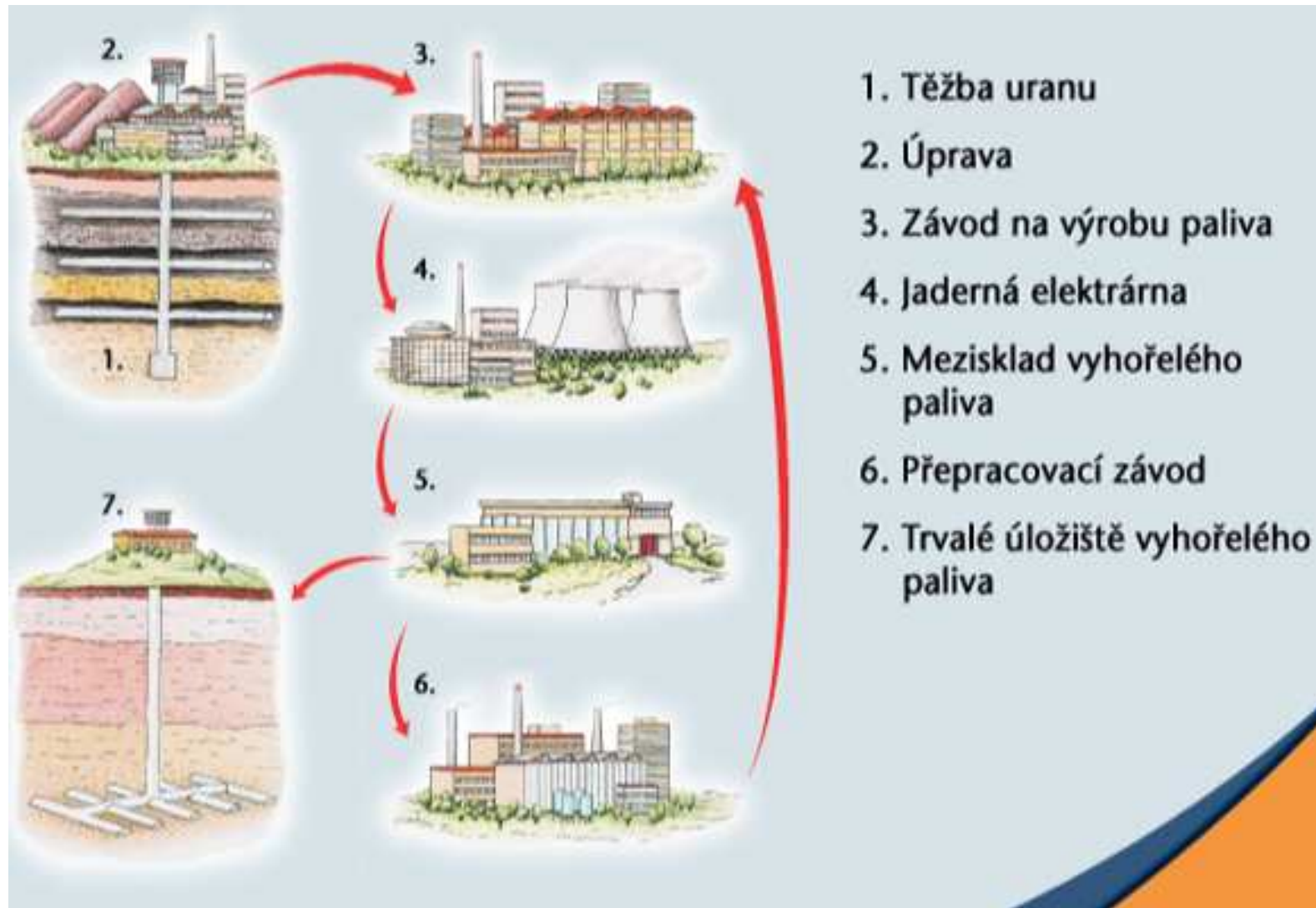
Obr. 1.2

Schéma výrobní jednotky jaderné elektrárny

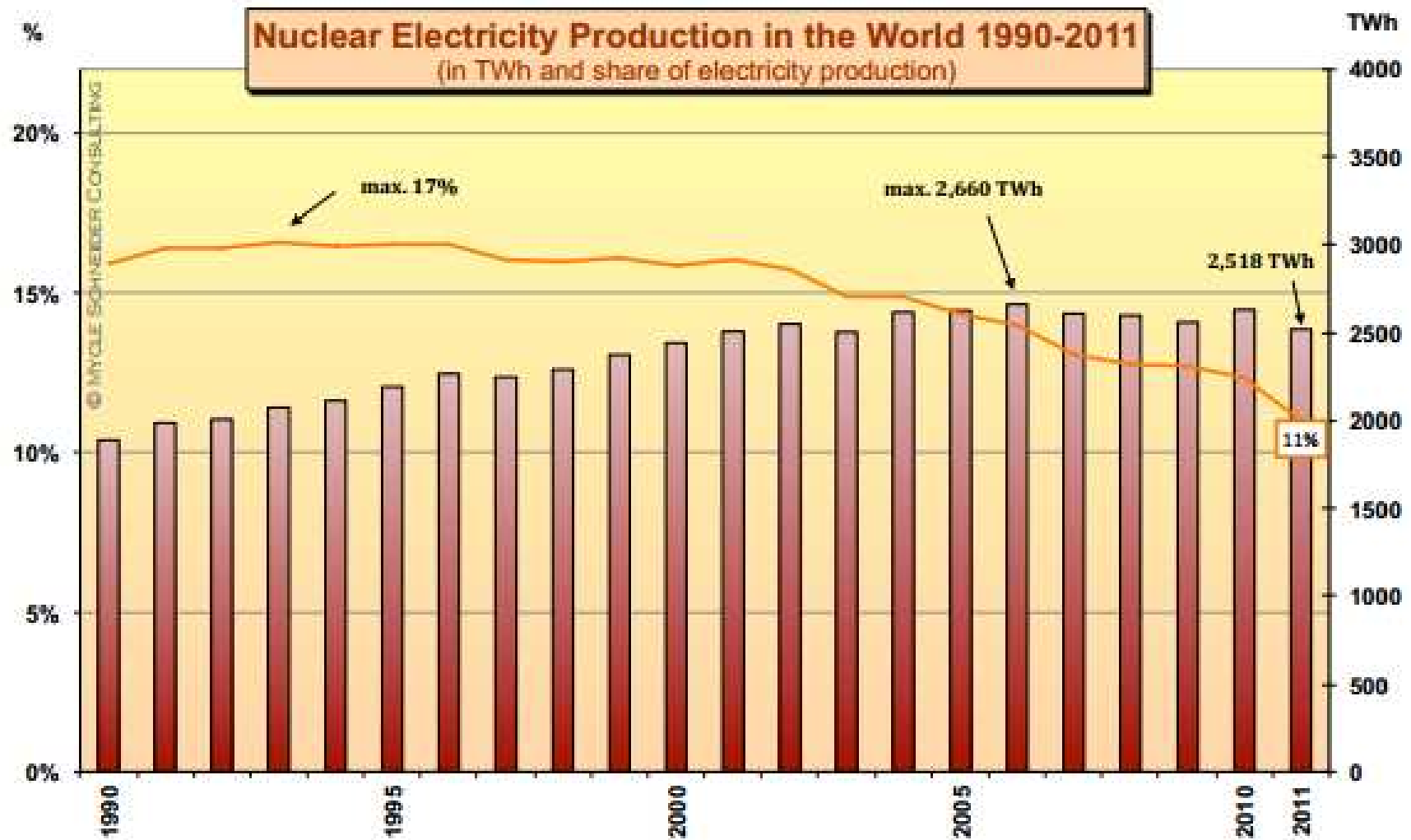


1. hlavní výrobní blok
2. chladicí věž
3. kontejnment
4. sekundární okruh
5. transformátor
6. reaktor
7. parogenerátor
8. čerpadlo
9. turbína
10. generátor
11. kondenzátor
12. chlazení napájecí vody

Uranový palivový cyklus

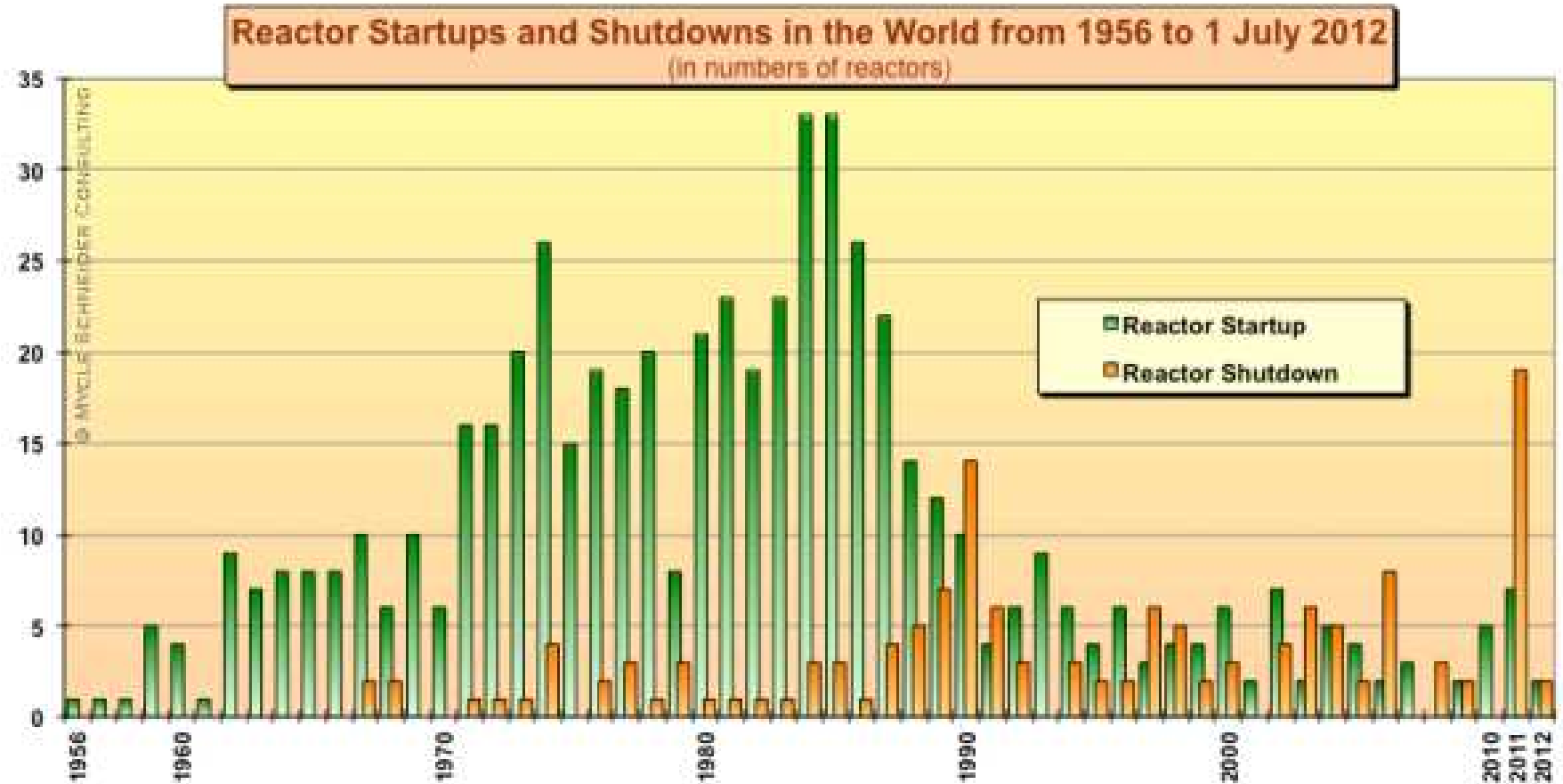


Nuclear Electricity Generation in the World



Source : IAEA-PRIS, BP, MSC, 2012

Nuclear Power Reactor Grid Connections and Shutdowns, 1956–2012



Source: IAEA-PRIS, MSC, 2012