EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ, MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

1. Úvod do bezpečnosti a spolehlivosti v energetice a průmyslu

Bezpečnost a spolehlivost v energetice a průmyslu - M216019

Dílo podléhá licenci Creative Commons 4.0 Česko
Uveďte původ - Zachovejte licenci

Růst průmyslu vs. bezpečnost

1987 - Nobelovu cenu za ekonomiku - profesor R. M. Solow (ekonom na Massachusetts Institute of Technology)

Téma práce: otázka stanoveni zdrojů ekonomického růstu.

Závěr: zdrojem ekonomického růstu jsou výsledky dosahované ve vývoji a aplikaci nových technologií.

„nové technologie“ = náročnější technologické podmínky (vyšší provozní teploty a tlaky, reaktivnější chemikálie, náročnější provozní podmínky pro stroje, nástroje, zařízení, aparáty, potrubí).

Náročnější provozní podmínky a používané látky jsou potenciálním zdrojem rizika.

CC BY SA

Typické rysy dnešních průmysl. výrob

- nepřetržitost výroby (s dlouhým obdobím mezi plánovanými odstávkami)
- rostoucí výrobní kapacita linek (náklady na zařízení s dvojnásobnou kapacitou vzrostou méně než dvojnásobně
- intenzifikace pochodů (náročnější podmínky)
- vzájemná propojenost výrobních linek (návaznost výrob)
- integrace procesů (vzájemná provázanost procesů)

CC BY SA

Špatný obraz chemických výrob

Chemické závody (vč. plynárenských) jsou zdrojem různorodých ohrožení:

Běžné mechanické – převrhnutí, spadnutí, od pohybu zařízení apod.

Chemické ohrožení – exploze, požár, reaktivita a toxicita

Ekologické hrozby – úniky toxických látek, postupné poškozování ekosystémů a ŽP

Skutečnost:
Chemické provozy jsou jedny z nejbezpečnějších (!!!) průmyslových výrob, ale mají potenciál k nehodám katastrofického charakteru!

„velké ohrožení“ ► „velké nehody“

CC BY SA

Bezpečnostní inženýrství

Od 1950 - významného pokroku v rozvoji bezpečnosti chemického procesu.

Dnes - bezpečnost je považována za důležitou vlastnost výrobních technologií a bezpečnostní inženýrství se rozvinulo ve vědeckou disciplínu, která zahrnuje mnoho složitých teorií i praktických poznatků.

Příklady :

- hydrodynamický model dvoufázového toku pojišťovacím ventilem
- dispersní modely reprezentující vývin toxického mraku po úniku
- matematické postupy pro - odhalení různých příčin poruchy
- stanovení pravděpodobnosti poruchy

CC BY SA

Etapy vývoje bezpečnostního inženýrství

• do 50. let 20. století - etapa "okrajového" zájmu o bezpečnost (období ojedinělých, byť závažných havárií – oprava po poruše)

• od 50. do 70. let 20. století - etapa zvýšeného zájmu o bezpečnost, tj. bezpečnost především„ (po neočekávaných velkých světových haváriích se závažnými následky a dopady na veřejnost)

• od 70. let 20. století do dneška - etapa „ekonomicky přijatelné“ bezpečnosti

CC BY SA

Bezpečnostní inženýrství

je odborná disciplína, která přednostně řeší dvě základní otázky:

- ✓ identifikace nebezpečí - zdrojů rizika (odhalení míst, jevů, stavů, které mají potenciál způsobit ztrátu
- ✓ hodnocení rizika - stanovení velikosti ztrát a odhad pravděpodobnosti ztrát

CC BY SA

Základní pojmy

Nebezpečí (Hazard) – fyzikální nebo chemická vlastnost objektu způsobit neočekávaný jev (jeho skrytá vlastnost a tedy i schopnost).

Ohrožení - aktivované nebezpečí v konkrétním prostoru a čase, kdy jsou vykonávány činnosti, při kterých se vyskytují nebezpečí, která můžeme specifikovat a určit.

Riziko (Risk)– obecně se definuje jako součin velikosti následků určité události a pravděpodobnosti, že tato událost nastane v určitém časovém úseku.

Pojem *Bezpečnost* (*Safety*) v původním významu znamená prevenci pracovních nehod, postupně je nahrazován pojmem *Loss Prevention* (předcházení ztrátám).

CC BY SA

Vnímání rizika X skutečné riziko

Subjektivní vnímání některých skutečností jako více rizikových než objektivně jsou

Příklady:

- Jaderná energetika X klasické elektrárny
- Chemický průmysl X zemědělství
- Letecká X automobilová doprava

CC BY SA

Bezpečnostní programy

Předpoklady úspěšné „prevence ztrát“:

Bezpečnostní znalosti – dají se naučit ve škole či samostudiem (znalost přírodních zákonů, nebezpečných vlastností látek a toho jak to aplikovat do oblasti bezpečnosti).

Zkušenosti s bezpečností – zkušenosti s procesy a procedurami používanými v provozu (PHA, HAZOP, DFI apod.)

Technická kompetentnost – schopnost činit správné rozhodnutí na základě technického vyhodnocení bezpečnosti

CC BY SA

Bezpečnostní programy - pokračování

Předpoklady úspěšné „prevence ztrát“:

Manažerská podpora systému bezpečnosti – vytvoření systému,který monitoruje ztráty a „skoronehody“

Angažovanost a podpora celého závodu – pojištění apod.

BY SA

Kvalita bezpečnostního programu

✓ Dobrý bezpečnostní program identifikuje a eliminuje bezpečnostní ohrožení

✓ Výborný bezpečnostní program obsahuje manažerský systém, který vytváří prevenci vzniku bezpečnostního ohrožení

CC BY SA

Statistika nehod a ztrát

Statistiky ztrát a nehod jsou důležitými měřítky účinnosti bezpečnostních programů:

✓ Je mnoho metod – je třeba vybírat pečlivě a opatrně

✓ Jedná se o průměrné hodnoty, které neodrážejí potenciál pro konkrétní nehody!!

✓ Bohužel žádná z metod nepracuje se všemi požadovanými aspekty!!

CC BY SA

Přehled nejpoužívanějších metod

✓ OSHA incidence rate (IR)
(OSHA - Occupational Safety and Health Administration - U.S. federální agentura zabývající se bezpečnostní legislativou a ochranou zdraví)

✓ Fatal accident rate (FAR)
(FAR se používá především v britském chemickém průmyslu)

✓ Fatality rate per person and year (FRPPY, FR)

CC BY SA

OSHA incidence rate (IR)

Je založena na počtu případů za sto dělníkoroků

(dělníkorok = 50 pracovních týdnů ročně x 40 odpracovaných hodin týdně = 2000)

100 x 2000 = 200000 hodin expozice

$$IR = \frac{\text{Number of OSHA Recordable Cases} \times 200{,}000}{\text{Number of Employee labor hours worked}}$$

Souhrnně sleduje úmrtí, poranění a nemoci, ale nelze z ní vyčíst údaje např. pouze o úmrtí

CC BY SA

Fatal accident rate (FAR)

Je založena na počtu úmrtí na 1000 zaměstnanců pracujících celý život

Předpokládá se, že zaměstnanec pracuje 50 let (tj. 10^8 pracovních hodin)

$$FAR = \frac{\text{Počet úmrtí x } 10^8}{\text{Počet hodin odpracovaných všemi pracovníky za sledované období}}$$

FAR i OSHA IR jsou závislé na počtu hodin expozice!

CC BY SA

FR (fatality rate PPY)

- ✓ je dle definice nezávislá na počtu hodin expozice
- ✓ udává počet úmrtí připadajících na osobu a rok

$$FR = \frac{\text{Počet úmrtí za rok}}{\text{Celkový počet lidí v dané populaci}}$$

- ✓ FAR a FR lze navzájem přepočítávat, je-li znám počet hodin expozice (OSHA IR nikoliv !)

CC BY SA

Příklady

1) Jestliže se zdvojnásobí počet „motorkářů“ (tj. osob využívajících motocykl a budeme uvažovat, že všichni využívají v průměru motocykl stejně často), jaký to bude mít vliv na IR, FAR a FR? Proč?

2) Jestliže všichni motorkáři začnou užívat motocykl dvakrát tak často, co se stane s IR, FAR a FR? Proč?

CC BY SA

Přehled IR a FAR pro vybraná odvětví

Odvětví	IR	FAR
Chemie	0,49	4,0
Doprava	1,08	1,3
Ocelářství	1,54	8,0
Papír	2,06	
Těžba uhlí	2,22	40
Potravinářství	3,28	
Stavebnictví	3,88	67
Zemědělství	4,53	10
Nákl. doprava	7,28	

CC BY SA

Komentář k předchozí tabulce

Pro chemický průmysl je FAR 4, přičemž přibližně polovina je důsledkem běžných (mechanických) nehod – spadnutí, převrhnutí, přejetí apod.). Druhá polovina je důsledkem expozice chemických dějů.

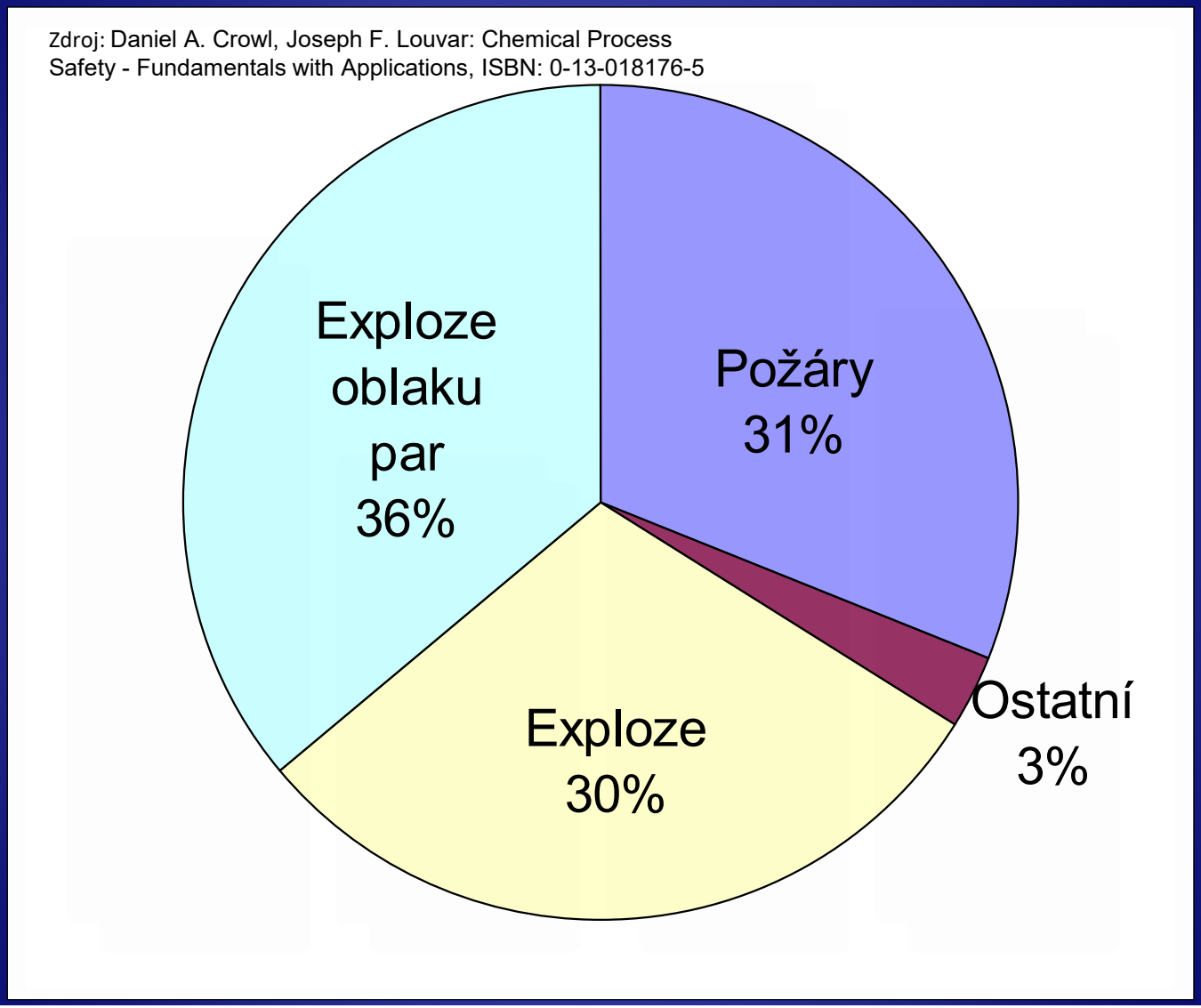
Hodnota 4 udává, že z 1000 lidí pracujících celý život v chemickém průmyslu 4 zemřou.

Pro srovnání:

- 20 zemře v důsledku neprůmyslových nehod (nejčastěji při \dopravní nehodě
- 40 zemře v důsledku kouření
- 370 zemře v důsledku choroby

CC BY SA

Příčiny největších ztrát podle typu



CC BY SA

Tři typy nehod v chemickém průmyslu

Typ nehody	Pravděp odobnost výskytu	Potenciál SÚ	Potenciál ekonom. ztrát	Potenciál ekologických škod
požár	vysoká	nízký	střední	střední
exploze	střední	střední	vysoký	střední
únik toxický ch látek	nízká	vysoký	nízký	Vysoký

CC BY SA

Akce ovlivňující fáze nehody

Fáze	Žádoucí efekt	Akce
Iniciace Událost která „startuje“ nehodu	předejít	Uzemňování, inertizace, obchůzkové prohlídky, povolení k horkým pracem, znalosti
Propagace Událost(i) která udržuje nebo dále rozvíjí nehodu	zmenšit	Snížení zásob hořlavin, odolnější materiály, instalace havarijních systémů
Terminace Událost, která nehodu zastavuje nehodu	zlepšit zvětšit	Pojišťovací a protipožární systémy, sprchy

CC BY SA

Modelový proces vývoje události vedoucí k nehodě

1. Pracovník zakopl
2. Zachytil se ventilu
3. Otočil ventilem
4. Unikla kapalina
5. Vytvořil se oblak par
6. Kolemjdoucí auto iniciovalo explozi
7. Požár trval 6 dní, dokud vše neshořelo

CC BY SA

Vývojový diagram identifikace rizika a následných opatření



CC BY SA

Významné průmyslové havárie

Průmyslové havárie = prakticky jediný zdroj reálných informací pro :

- zdokonalení postupů ,
- předcházení podobným událostem ,
- rozvoj bezpečnostního inženýrství.

Mezi tři nejvýznamnější havárie v procesním průmyslu patří :

FLIXBOROUGH	**Velká Británie**	**1974,**
SEVESO	**Itálie, Lombardie**	**1976,**
BHOPAL	**Indie, Madhya Pradesh**	**1984.**

Uvedené havárie :

- značně ovlivnily veřejné mínění,
- ovlivnily rozvoj chemické inženýrství (důraz na bezpečnost procesu) a formulaci nové discipliny - bezpečnostního inženýrství

CC BY SA

Další významné průmyslové havárie

místo události	stát	rok	ztráty	substance
OPPAU	Německo	1921	(430)	dusičnan amonný
TESSEANDERLOO	Belgie	1942	(>:100)	dusičnan amonný
PHILADELPHIA	USA	1963	(430)	chlór
FEYZIN	Francie	1966	(18)	sklad propanu a butanu
	Německo	1968	(24)	vinylchlorid monomer
POTCHESTROOM	J.Afrika	1973	(18)	amoniak
	Brazílie	1972	(37)	butan
LITVÍNOV	ČR	1974	(14)	etylén
SAN CARLOS	Španělsko	1978	(211)	propylén
HOUSTON	USA	1989	(23)	vysokotlaký PE
MEXICO City	Mexico	1984	(500)	terminál LPG
BANTRY BAY	Irská rep.	1979	(50)	nafta

CC BY SA

Flixborough

Flixborough - pravděpodobně nejlépe dokumentovaná havárie (britská vláda trvala na rozsáhlém prověřování havárie)

Havárie : FLIXBOROUGH WORKS
United Kingdom
červen , 1974
společnost : NYPRO Limited

netěsnost reaktoru → náhrada spojovacím potrubím → prasknutí potrubí → únik 30 tun cyklohexanu → inicializace → exploze

Proces : KAPROLAKTAM → NYLON
CYKLOHEXAN (proces : 155 °C ; 7.9 atm) (při T = 180 ° C má tenzi p°=6.6 atm)
→ EXPANZE (atmosférické podmínky)
OXIDACE → CYKLOHEXANOL → CYKLOHEXANON
kapacita : 70 000 t/rok

CC BY SA

Flixborough

KASKÁDA REAKTORŮ (každý 20 tun)

na 5. reaktoru TRHLINA → odstavení ,

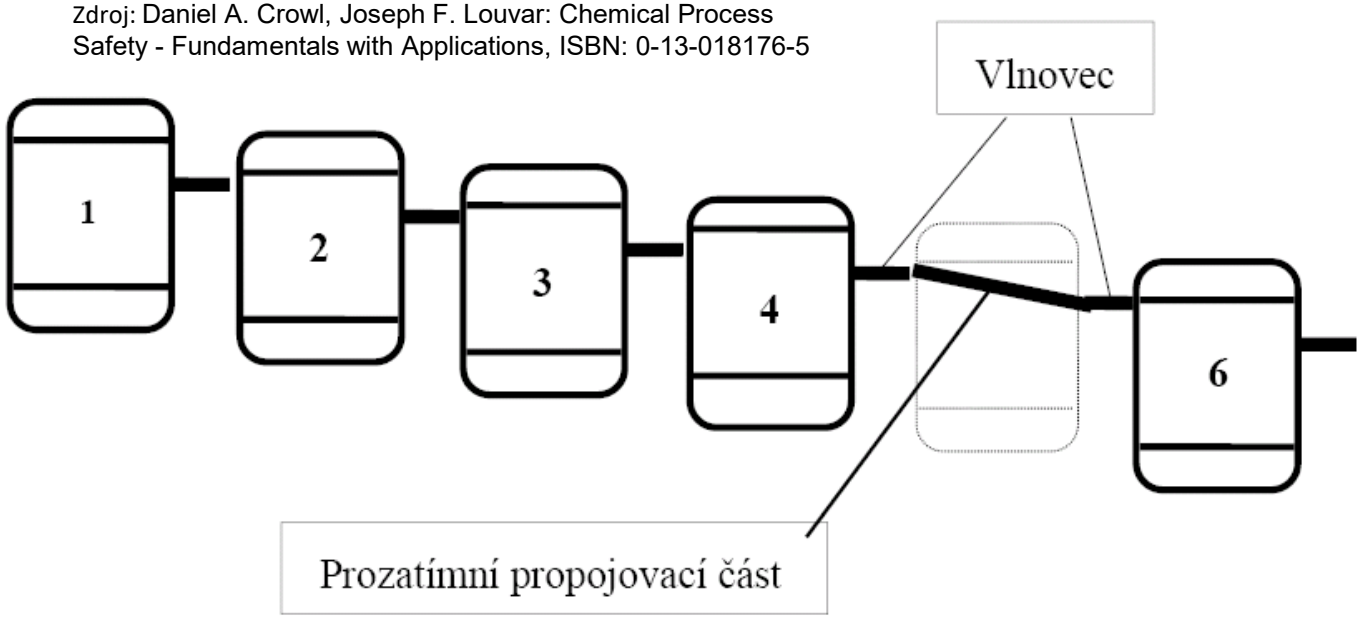
oprava 28 inch. potrubí →náhrada 20 inch potrubím + kompenzátory

Nepřiměřený posuv v potrubí + OVER FLEXING → PRASKLÉ POTRUBÍ

30 tun CYKLOHEXANU → ÚNIK → NEZNÁMÁ INICIALIZACE 45 sec. po úniku

→ **EXPLOZE**

Zdroj: Daniel A. Crowl, Joseph F. Louvar: Chemical Process Safety - Fundamentals with Applications, ISBN: 0-13-018176-5



Flixborough

HLAVNÍ PŘÍČINY:

1. Potrubní spojka instalována bez prověření bezpečnosti, bez dozoru zkušených inženýrů. Výrobní výkres potrubí byl nakreslen křídou na dveřích strojovny.
2. Propojovací potrubí bylo navrženo zcela nevyhovujícím způsobem.
3. Je třeba dodržet pravidlo, podle kterého žádná úprava na zařízení nesmí být v horší kvalitě než ostatní zařízení.
4. V provozu uskladněno velké množství nebezpečných látek (1 galon = 3.78 litru):

- 330 000 gal cyklohexanu,
- 66 000 galonů nafty,
- 11 000 galonů toluenu,
- 26 400 galonů benzenu
- 460 galonů plynového oleje.
- sklad se po iniciačním výbuchu vzňal

CC BY SA

Flixborough

Následky havárie:
- 28 smrtelných zranění
- 36 zraněných
- zničený provoz, administrativní budova atd.
- poškozeno 1821domů a 167 dalších objektů

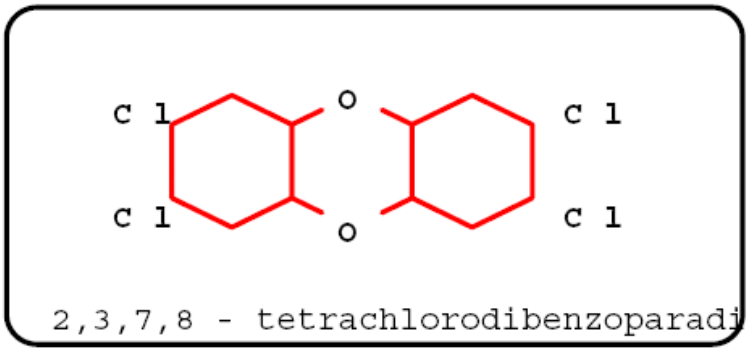
Ztráty při havárii byly zcela neočekávané a překvapivé. Zájem světové veřejnosti byl nebývalý, vláda trvala na velmi pečlivé analýze příčin rozsáhlé havárie.

Seveso

Havárie : SEVESO
Itálie, Lombardie, okolí Milána
10. červen 1976
společnost : Icmesa Chem. Corp.

produkce trichlorfenolu →zpracování na hexachlorofen → možnost tvorby nežádoucího tetrachlordibenzoparadioxinu (TCDD) → reaktor mimo kontrolu → únik TCDD do okolí

tetrachlordibenzoparadioxin - TCDD : pravděpodobně nejnebezpečnější známé toxikum (karcinogen, mutagen, teratogen)



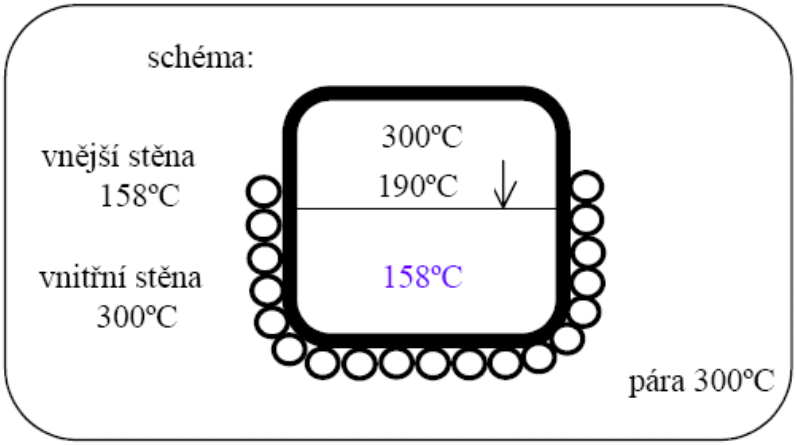
Koutský, Tenkrát, Vodrážka: Hodnocení rizik technologických procesů

TCDD - smrtelná dávka pro člověka < než 10^{-9} násobek tělesné hmotnosti
rozpustný ve vodě -> dekontaminace velmi obtížná

CC BY SA

Seveso

obr.3.2



UDÁLOST :

- → reaktor s trichlorfenolem mimo kontrolu
- → zvýšená produkce TCDD
- → bílý mrak nad Sevesem
- → kontaminováno rozsáhlé území
- → překročení provozní teploty
- → únik pojišťovacím ventilem
- → silný liják spláchl TCDD do půdy

Následky havárie :

- **250 případů postižení**
- **více než 600 případů evakuace**
- **2 000 pacientů - krevní zkoušky**
- **kontaminovaná oblast ohrazena**

CC BY SA

Seveso

Žádné bezprostřední oběti na lidských životech
ale

Značné škody na ekosystémech a životním prostředí

BY SA

Seveso

továrna ICMESA švýcarské společnosti ROCHE po havárii:
- uzavřena
- dekontaminována (odmořena)
- srovnána se zemí

5 lidí (spol. ICMESA) odsouzeno, (3 zbaveni viny, 2 podmíněné tresty)

kontaminované látky:
- 2 utěsněné jámy
- 41 sudů odpadů do Basileje

náklady na odškodnění obyvatel : 300 mil. CHF (6,66 mld CZK)

obsah dioxinu po havárii v krvi postižených 3.103 vyšší než u US vojáků manipulujících ve Vietnamu s plynem „ Agent Orange "

CC BY SA

Seveso

dnes: po navezení hlíny – sportoviště

z továrny - stěna z růžových cihel

dlouhodobé následky:
• vysoký výskyt kardiovaskulárních problémů
• následky popálenin kůže
• v Sevesu se rodí více děvčat
(dioxin ovlivňuje hormonální stav nebo přímo geny)

V důsledku této havárie vznikla tzv. direktiva SEVESO (dnes SEVESO 2)

v ČR: zákon 82/2004 Sb.o prevenci závažných havárií způsobených vybranými nebezpečnými chemickými látkami a chemickými přípravky.

Bhopál

Havárie : BHOPAL
Indie, Madhya Pradesh
3. prosinec 1984
společnost : Union Carbide

produkce pesticidů → meziprodukt - methylizokyanát (MIC) → došlo k chemické reakci MIC s vodou → únik toxické látky do okolí

meziprodukt v tomto procesu : **m e t h y l i z o k y a n á t (M I C)**
extrémně nebezpečná látka -
reaktivní, toxická, těkavá a hořlavá

maximální přípustná koncentrace v průběhu devítihodinové pracovní doby je 0,02 ppm
(koncentrace MIC 21 ppm drsně dráždí krční a nosní sliznici vyšší koncentrace - smrtelná)

Páry MIC - 2x těžší než vzduch i po úniku se drží při zemi

MIC reaguje exotermicky s vodou

reakce je pomalá , při neadekvátním chlazení roste teplota, může dojít k varu MIC,

zásobníky s MIC musejí být chlazeny !

CC BY SA

Bhopál

UDÁLOST : Zásobník s velkým množstvím MIC - kontaminován vodou -> Chemická reakce - > MIC nad teplotu bodu varu

Páry MIC unikly - na fléru , fléra mimo provoz, uvolnilo značné množství (odhaduje se asi 25 tun) toxického MIC ve formě par

TOXICKÝ MRAK se rozšířil na přilehlé městečko - obydlené centrum 1,5 míle - v okamžiku výstavby dominantní zdroj obživy v oblasti -> vyrostla u závodu osada

Následky havárie :

- **2000 smrtelných zranění**
- **20 000 zraněných**
- **v provozu nikdo nezahynul**
- **žádné škody na zařízení**

CC BY SA

Mexico City

MEXICO CITY, San Juanico, velkokapacitní sklad LPG, 1984

Dne 19. listopadu 1984, přibližně v 5 hod.45 minut ráno došlo k rozsáhlému požáru a sérii explozí ve skladu LPG v podniku PEMEX, San Juan Ixhuatepec (San Juanico). Velkokapacitní sklad byl při havárii zcela zničen, o život přišlo asi 500 lidí.

Dva největší kulové zásobníky a 48 válcových zásobníků bylo naplněno na 90 procent, čtyři menší kulové zásobníky byly naplněny na 50 procent, což představovalo 11 000 m^3 LPG v okamžiku havárie.
Přibližně v 5.45 hod. byl zaznamenán pokles tlaku, stejně jako v čerpací stanici vzdálené 40 km. Potrubí o průměru 8 inch. mezi kulovým zásobníkem F4 a skupinou válcových zásobníků G4 prasklo.

CC BY SA

Mexico City

Ve velíně se snažili identifikovat příčinu poklesu tlaku, ale bez úspěchu. Doba úniku se odhaduje na 5 - 10 minut, byl mírný vítr 0,4 m/sec. Vlivem větru a tvaru terénu se plyn šířil na jihozápad. Lidé v nedalekých domech slyšeli hluk unikajícího plynu a cítili zápach plynu.
Když mrak uvolněného plynu dosáhl rozměrů 200 x 150 metrů a výšky 2 m, vznítil se od fléry. To se stalo ráno v 5.45 hod.

A) Posloupnost explozí - údaje seismografu

1. 5 h 44 min 52 s
2. 5 h 46 min 01 s
3. 6 h 15 min 53 s
4. 6 h 31 min 59 s
5. 6 h 47 min 56 s
6. 6 h 49 min 38 s
7. 6 h 54 min 29 s
8. 6 h 59 min 22 s
9. 7 h 01 min 27 s

exploze 2 a 7 byly nejsilnější
(5. stupeň Richterovy stupnice)

B) Sled událostí
5.30 Roztržení potrubí (8 palců.) Zaznamenán pokles tlaku ve velíně
5.40 Vznícení uvolněného mraku par, bouřlivé hoření a vysoký plamen
5.45 První exploze na seismografu, BLEVE
Povoláni hasiči
5.46 Druhá exploze, BLEVE, jedna z nejsilnějších
6.00 Policie zasahuje, je zastavena doprava
6.30 Dopravní chaos
7 .01 Poslední exploze na seismografu, BLEVE
7.30 Pokračující exploze zásobníků
8.00-10.00 Záchranné práce vrcholí
11.00 Poslední exploze zásobníku
12.00-18.00 Záchranné práce pokračují
23.00 Zdolán požár na posledním velkém zásobníku

CC BY SA

Studie příčin a následků havárií

SOURCE : INSTITUT NATIONAL DE L´ ENVIRONNEMENT INDUSTRIEL ET DES RISQUES

PŘÍČINY :

➢	**VADY MATERIÁLU**	48 %
➢	**CHYBA ČLOVĚKA**	31 %
➢	**CHEMICKÁ REAKCE**	12 %
➢	**JINÉ PŘÍČINY**	18 %
➢	**VNĚJŠÍ VLIVY**	7 %

NÁSLEDKY :

➢	**TOXICKÉ EMISE**	21 %
➢	**POŽÁRY**	21 %
➢	**ZNEČIŠTĚNÍ OVZDUŠÍ**	17 %
➢	**EXPLOZE**	12 %
➢	**ZNEČIŠTĚNÍ VODY**	45 %

CC BY SA

Srovnání přímých a nepřímých ztráty

Přímé ztráty – vynaložené na likvidaci škod způsobených havárií
Nepřímé ztráty – ztráty způsobené přerušením výroby

číslo	výrobna	země	příčina	ZTRÁTA (miliony dolarů)	
				přímá	přerušení provozu
rok 1987					
1	kyselina octová	USA	výbuch	200	160
2	rafinérie ropy	USA	výbuch, požár	15	37
rok 1988					
3	polyetylén	Holandsko	výbuch, požár	4.4.	22.3
4	amoniak	Libye	výbuch, požár	10.4	-
5	rafinérie ropy	USA	výbuch, požár	300	-
6	kys.akrylová estery	Francie	výbuch, požár	8.2	20.4
7	fertilizéry	Itálie	požár	16.5	5.8
8	peroxid	Německo	požár	8.8	16.4
9	barvy ,laky	Francie	výbuch, požár	26.6	-
10	vinyl chlorid (monomer)	Norsko	výbuch, požár	16.7	67.4
11	čerpací stanice, terminál	Francie	výbuch, požár	26.6	-
12	petrochemie	Holandsko	požár	4.3	18.4
13	syntetické palivo	J.Afrika	požár	18	39
14	lineární alkylbenzen	Indie	požár	9.6	22.7
15	barvy, zprac. suroviny	Německo	výbuch, požár	62.6	76.5
16	polyester	Francie	výbuch, požár	6.8	32.5
17	rafinérie ropy	Japonsko	výbuch, požár	30.7	43.6
18	etylénoxid a glykoly	Belgie	výbuch, požár	79.4	208.8

CC BY SA

Legislativa

Direktiva 82 / 501 / EEC (SEVESO)
" On the Major-Accident Hazards of Certain Industrial Activities“ - tato direktiva již byla nahrazena direktivou SEVESO II

Direktiva 96/82/EC (SEVESO II)
„On the control of major-accident hazards involving dangerous substances“

OSHA 1910.190
Process Safety Management of Highly Hazardous Chemicals

•primární pozornost věnovat nebezpečným látkám, seznam je vypracován a doplňován
•jakékoliv modifikace procesu vyžadují následnou studii bezpečnosti (multidisciplinární tým posuzovatelů)
•obyvatelstvo musí být nutně seznámeno s nebezpečím a rizikem, jinak nemůže spolupracovat
• v ČR platí zákon 82/2004 Sb. o prevenci závažných havárií způsobených vybranými nebezpečnými chemickými látkami a chemickými přípravky (nahradil starší zákon 353/1999 Sb.)

Rekapitulace

- Co je tzv. „bezpečnostní inženýrství“ a čím se zabývá
- Základní pojmy:
  - Nebezpečí
  - Ohrožení
  - Riziko
- Bezpečnostní programy
- Statistika nehod a ztrát
  - OSHA IR
  - FAR
  - FRPPY, FR
- Typy nehod v chemickém průmyslu
- 3 fáze nehody
- Nejvážnější průmyslové havárie
- Nejčastější příčiny havárií

Typ na referát:

1. Metody hodnocení mechanických vlastností a vad konstrukčních materiálů.

2. Hodnocení rizik lidského faktoru v energetice a ostatním průmyslu.

CC BY SA

Použité zdroje

- Ľ. Jelemenský, J. Labovský, Z. Labovská, J. Markoš: Hodnotenie nebezpečenstva chemických procesov,Slovenská technická univerzita v Bratislave 2011,
- Daniel A. Crowl, Joseph F. Louvar: Chemical Process Safety - Fundamentals with Applications, ISBN: 0-13-018176-5
- Interní materiály Ú216 VŠCHT
- Interní materiály skupiny ÚJV Řež

CC BY SA



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ, MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

2. Základy toxikologie

Bezpečnost a spolehlivost v energetice a průmyslu - M216019



Dílo podléhá licenci Creative Commons 4.0 Česko
Uveďte původ - Zachovejte licenci

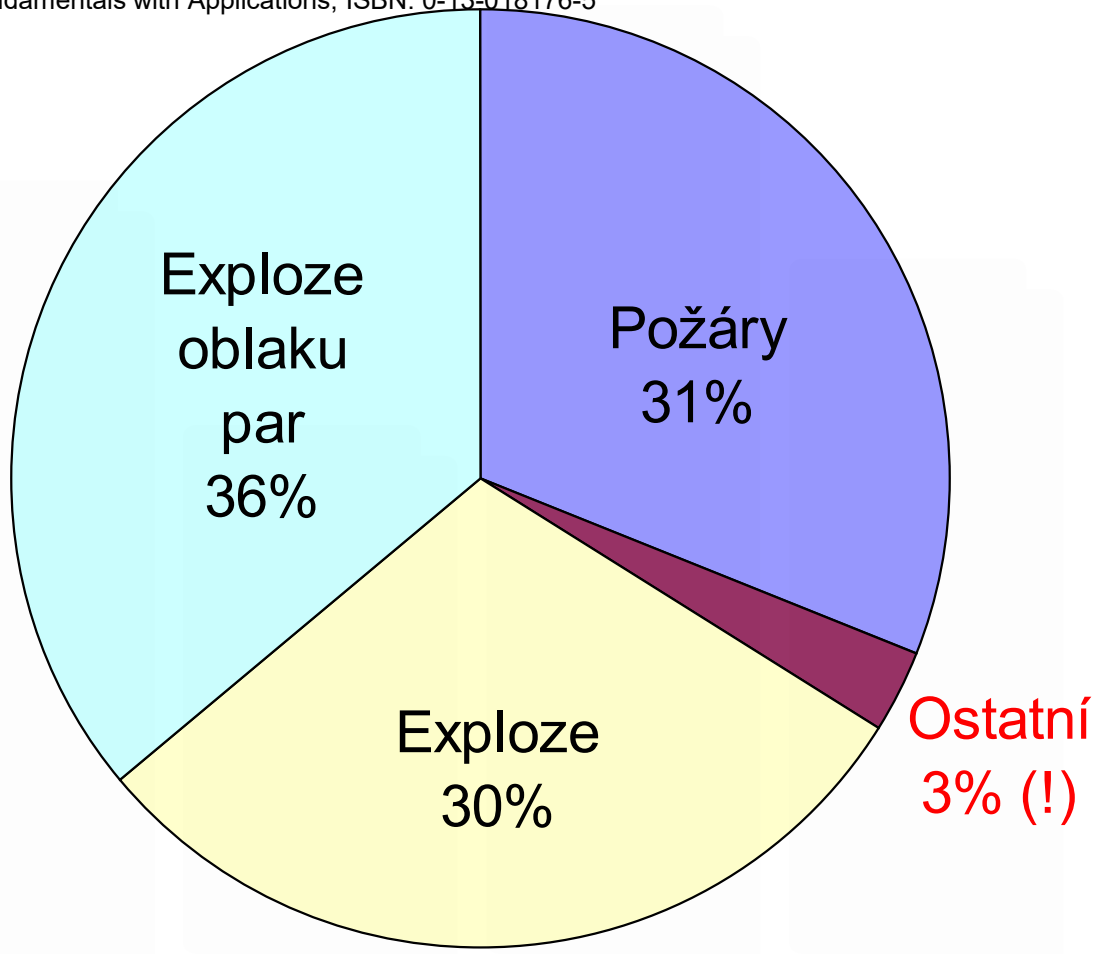
Tři typy nehod v chemickém průmyslu

Typ nehody	Pravděp odobnost výskytu	Potenciál SÚ	Potenciál ekonom. ztrát	Potenciál ekologických škod
požár	vysoká	nízký	střední	střední
exploze	střední	střední	vysoký	střední
únik toxický ch látek	nízká (!)	vysoký(!)	nízký(!)	Vysoký

CC BY SA

Příčiny největších ekonom. ztrát podle typu

Zdroj: Daniel A. Crowl, Joseph F. Louvar: Chemical Process Safety - Fundamentals with Applications, ISBN: 0-13-018176-5



CC BY SA

Definice jedu

Laik: „Jed je látka, jež může způsobit otravu“.

Paracelsus (1537): „Všechny látky jsou jedy; toliko dávka je příčinou, že látka přestává být jedem.

Druckrey (1957): Nevratnost účinku činí z látky jed“.

V zákonech: „Jedy jsou takové látky, které způsobují otravu i v jednorázových malých i opakovaných dávkách a jsou uvedeny v seznamech jedů“.

Jinak – toxikologický postulát: „Neexistují neškodné látky, existují neškodné způsoby použití látek“.

CC BY SA

Další definice

Toxicita látky je vlastnost této látky popisující její vliv na biologický organismus

Toxické ohrožení je pravděpodobnost poškození biologického organismu v závislosti na expozici organismu po kontaktu (transportu do organismu) a dalších fyzikálních faktorech

CC BY SA

Vstupy/Výstupy látek do/z organismu

Vstup do organismu:

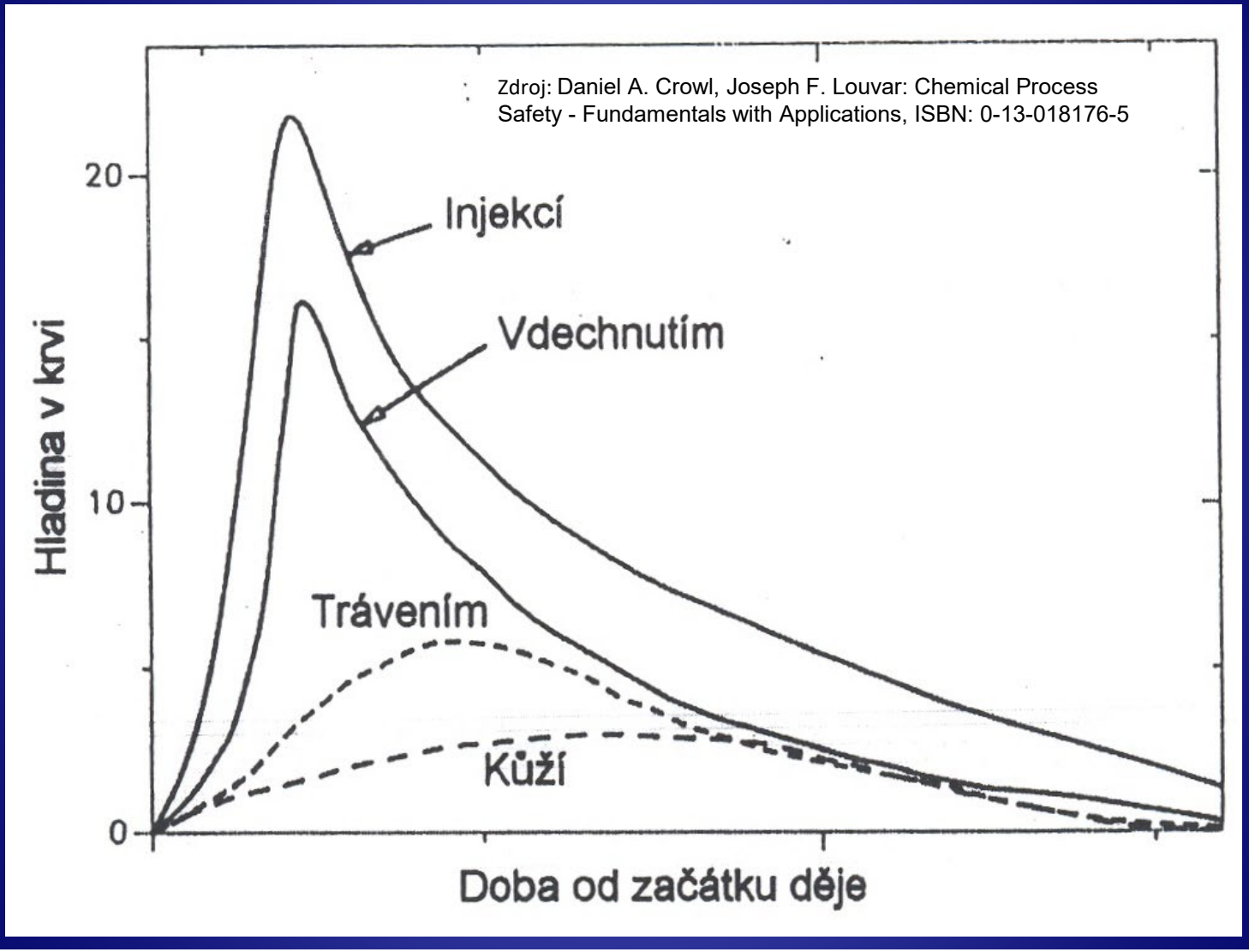
- ústy
- vdechováním
- přes rány
- přes kůží

Eliminace z organismu

- vylučování – játra, ledviny, plíce
- detoxifikace – změna na neškodnou látku biotransformací
- uložením – v tukové tkáni

CC BY SA

Vliv způsobu expozice na konc. toxické látky v krvi



Vlivy na organismus

Nereversibilní:

- karcinogenní
- mutagenní
- teratogenní
- poškozující reprodukční systém

Reversibilní

- dermatické projevy na kůži
- hemotoxické jevy
- poškození jater
- poškození ledvin
- poškození nervového systému
- Poškození dýchacího systému

CC BY SA

Typy účinků

Akutní

- otrava následuje bezprostředně po masivní expozici
- akutní toxicita vyjadřována jako smrtelná dávka – LD_{50}
- Radiotoxicita – při dávkách nad 1 sV – tzv. akutní radiační syndrom

Chronický

- expozice nízkým dávkám po dlouhou dobu
- příznaky akutního a chronického účinku nebývají shodné
- U nízkých dávek záření tzv. stochastické účinky

Pozdní

- dlouhá doba latence
- chronické působení chemikálie nemusí existovat
- karcinogeny a mutageny – projevy se mohou vyskytnout až za několik let po expozici, která může být i akutní

CC BY SA

Mechanismus účinku

1. Látky dráždící sliznice a kůži – místní účinek

- kyseliny, zásady, oxidanty – poleptání
- aldehydy, alkylační a acylační činidla – reakce s proteiny

2. Narkoticky účinné látky – celkové působení

• těkavá rozpouštědla – benzin, benzen, toluen, CCl_4, C_2Cl_4, inhalační anestetika
• rozpouštění v membránách, brzdí přenos nervového vzruchu, potlačení aktivity nervové soustavy

3. Látky inhibující transport kyslíku a elektronů

•interakce s vazebným místem hemoglobinu pro O_2 – CO, NO
•látky měnící hemoglobin na methemoglobin (hemiglobin) – oxidace Fe^{2+} na Fe^{3+} - dusitany, chlorečnany, nitrobenzen, anilin
•inhibice cytochromoxidasu – HCN, H_2S

CC BY SA

Mechanismus účinku - pokračování

4. Látky inhibující enzymy

- ionty těžkých kovů Pb^{2+}, Hg^{2+}, Cd^{2+}, AsO_3^{3-}, alkylační činidla – reakce s –SH a $–NH_2$ skupinami enzymů
- Pb^{2+} - porfobilinogensyntetasu
- analogy substrátu – kyselina fluorooctová – inhibice akonitasy
- organofosfáty a karbamáty – inhibice acetylcholinesterasy

5. Látky indukující tvorbu enzymů

PCB, PAH, dioxiny – indukce syntesy cytochromů P-450 endoplasmatického retikula v játrech

6. Látky vyvolávající tvorbu radikálů a lipoperoxidaci

- CCl4, O3, halogenuhlovodíky, benzopyren, ...
- inaktivace bílkovin, lipoperoxidace polyenových mastných kyselin – vydechování ethanu a pentanu

CC BY SA

Mechanismus účinku - pokračování

7. Látky účinkující alkylačním a arylačním mechanismem

- alkylace dusíkatých bází NA – mají mutagenní a karcinogenní účinky
- dimethylsulfát, diazomethan, ethylenoxid, methyljodid, dimethylnitrosamin
- látky s dvojnou vazbou účinkují až po biotransformaci na epoxidy

CC BY SA

Základní zdroje toxikologických dat

- pozorování lidí vystavených účinku toxické látky
  - v pracovním prostředí
  - v životním prostředí
  - v důsledků havárií apod.

} Epidemiologické studie

⇣

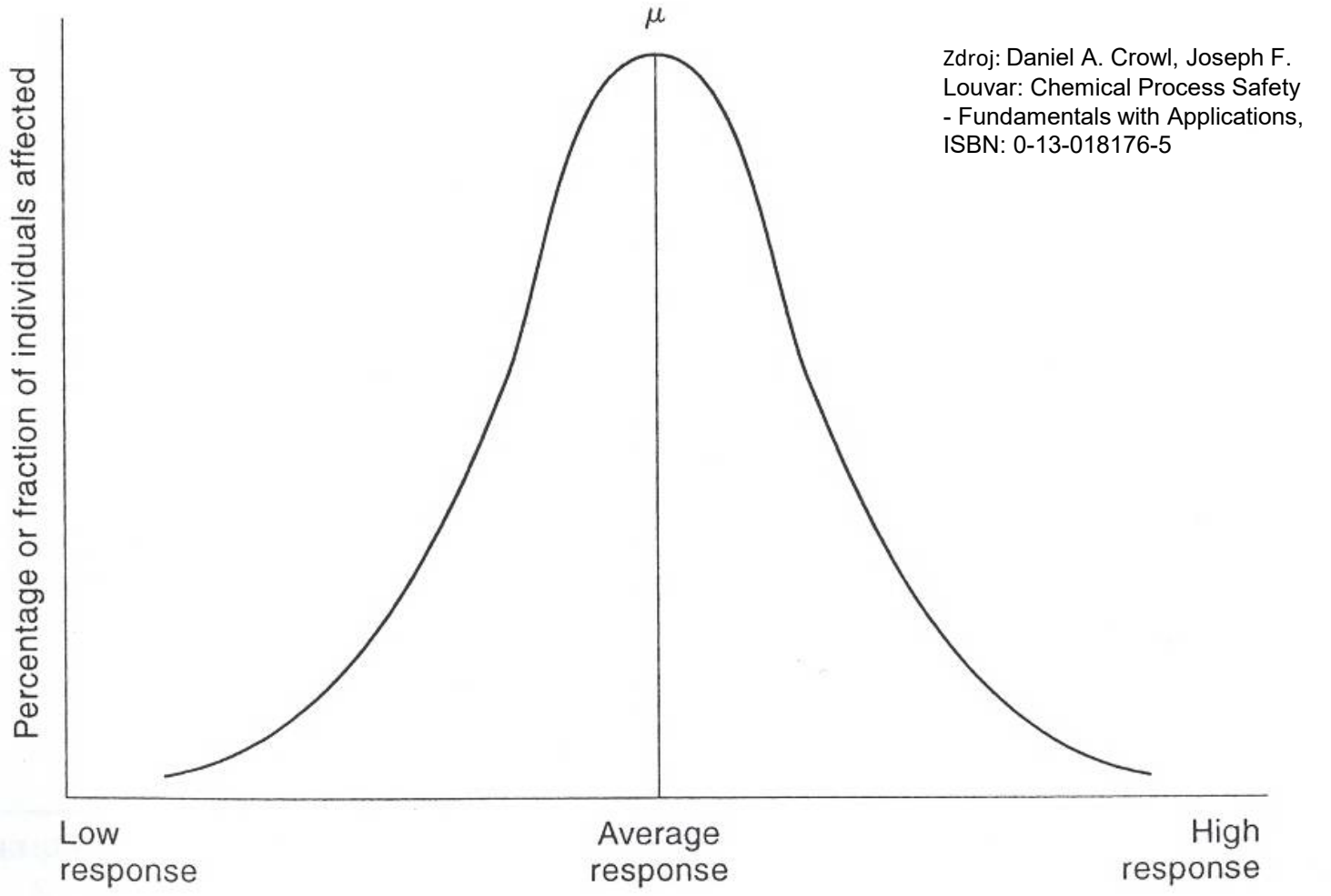
  - záměrná kontrolovaná
  - expozice dobrovolníků

} Klinické studie

- pokusy na laboratorních zvířatech *(in-vivo)*
- pokusy na tkáňových kulturách a mikroorganismech *(in-vitro)*
  - *Amesův test - test genotoxicity na histidin auxotrofním kmenu bakterie Salmonela Typhimurium*

CC BY SA

Vztah dávka *vs.* odezva (Gaussova křivka)



Zdroj: Daniel A. Crowl, Joseph F. Louvar: Chemical Process Safety - Fundamentals with Applications, ISBN: 0-13-018176-5

Figure 2-2 A Gaussian or normal distribution representing the biological response to exposure to a toxicant.

CC BY SA

Výpočetní vztahy

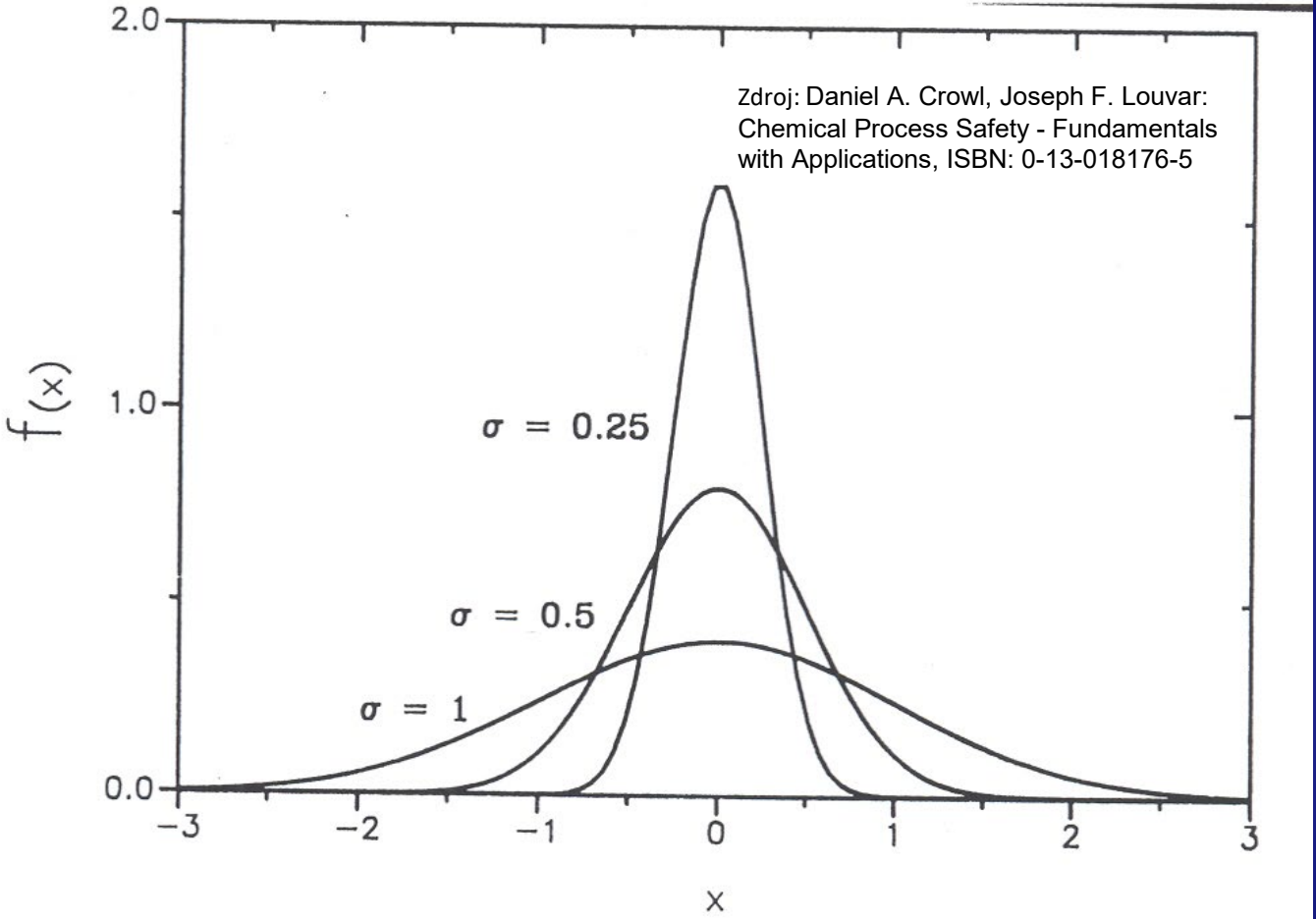
Rovnice Gaussovy křivky: $$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2}$$

Průměr: $$\mu = \frac{\sum_{i=1}^{n} x f(x_i)}{\sum_{i=1}^{n} f(x_i)}$$

Směrodatná odchylka: $$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n} (x_i - \mu)^2 f(x_i)}{\sum_{i=1}^{n} f(x_i)}$$

CC BY SA

Vliv různých hodnot σ na tvar křivky

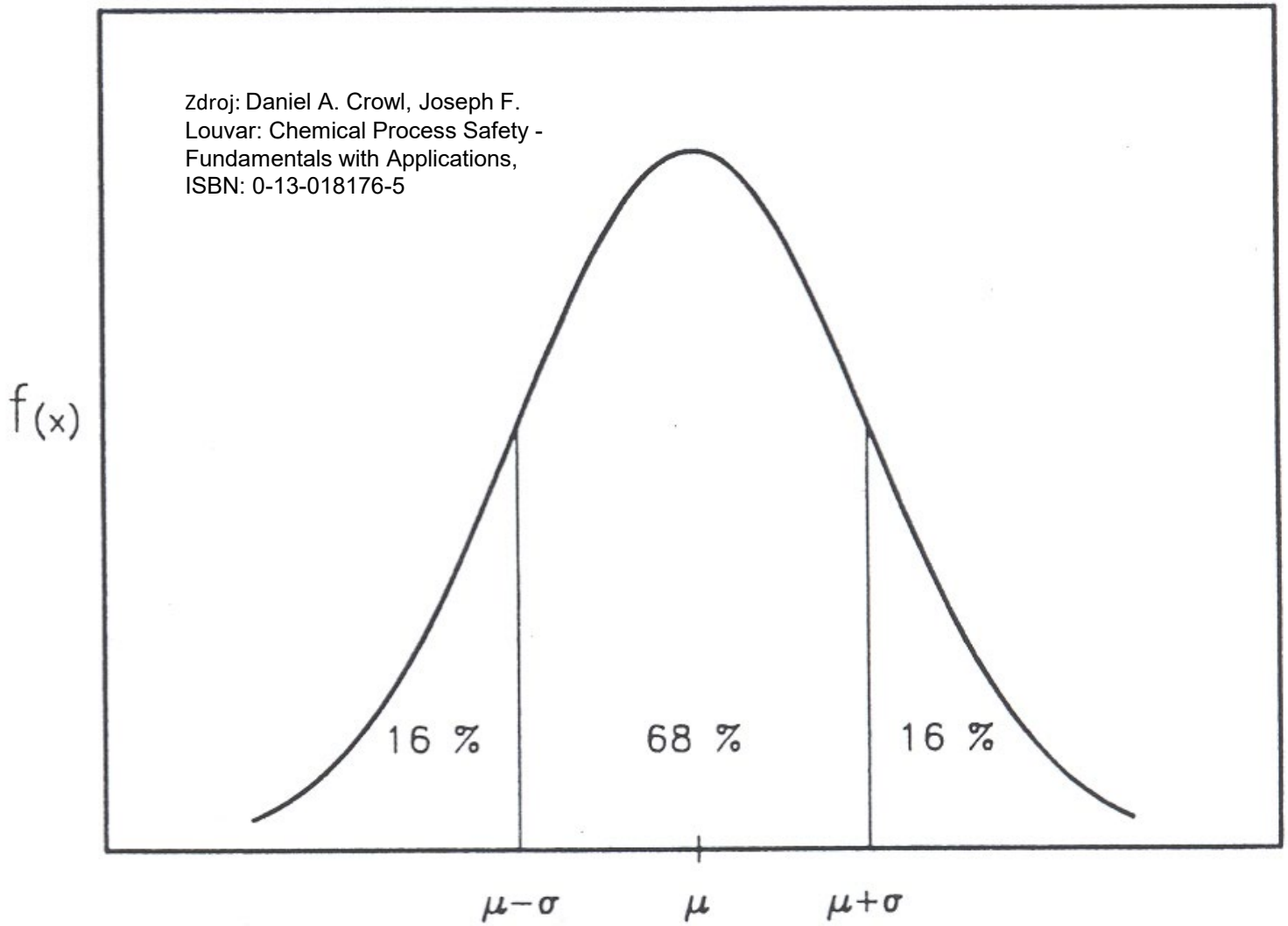


Zdroj: Daniel A. Crowl, Joseph F. Louvar: Chemical Process Safety - Fundamentals with Applications, ISBN: 0-13-018176-5

Figure 2-3 Effect of the standard deviation on a normal distribution with a mean of 0. The distribution becomes more pronounced around the mean as the standard deviation decreases.

CC BY SA

μ ± σ = 68 %-ní pokrytí vzorku



CC BY SA

μ ± 2σ = 95,5 %-ní pokrytí vzorku

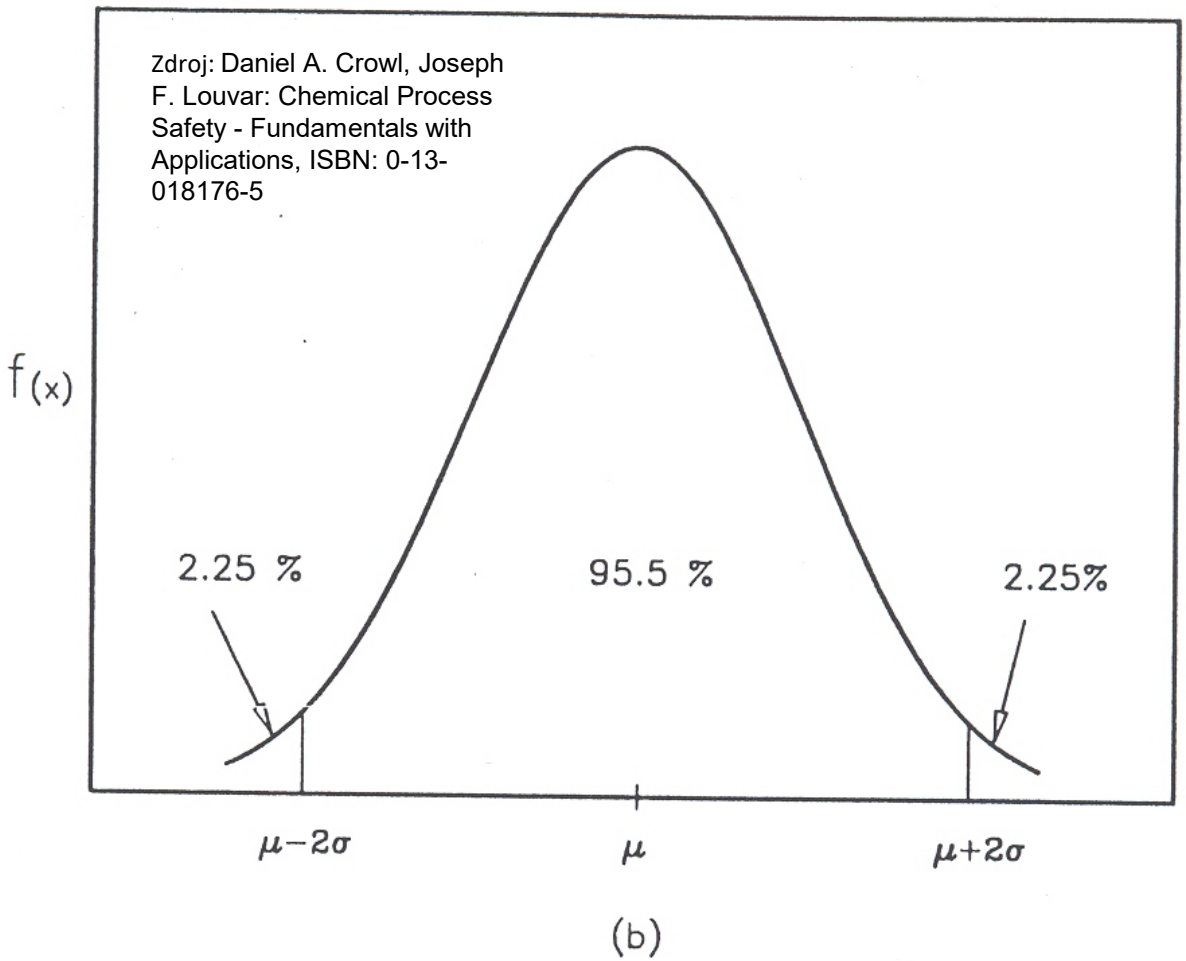


Figure 2-4 Percentage of individuals affected based on a response between one and two standard deviations of the mean.

Příklad 1

75 lidí bylo testováno na podráždění kůže na specifickou dávku látky. Odezva byla zaznamenána ve stupnici od „0“ reprezentující žádnou odezvu do „10“ označující největší odezvu. Počet osob f(x) vykazující konkrétní odezvu (x) je uveden v následující tabulce:

Odezva (x_i)	Počet osob f (x_i)
0	0
1	5
2	10
3	13
4	13
5	11
6	9
7	6
8	3
9	3
10	2
Celkem	75

Úkoly:

1. Určit střední hodnotu a standardní odchylku.
2. Nakreslit histogram vyjadřující relaci mezi odezvou a počtem ovlivněných osob.
3. Zakreslit normální rozdělení do histogramu původních dat.

CC BY SA

Výpočet průměru a směrodatné odchylky

Odezva (x_i)	Počet osob f (x_i)	x_i . f (x_i)	$(x_i-\mu)^2 f(x_i)$
0	0	0	0
1	5	5	61,48
2	10	20	62,83
3	13	39	29,51
4	13	52	3,34
5	11	55	2,68
6	9	54	20,07
7	6	42	37,30
8	3	24	36,61
9	3	27	60,57
10	2	20	60,35
Celkem	75	$\mu = 4,51$	$\sigma^2 = 5,00$ $\sigma = 2,24$

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2}$$

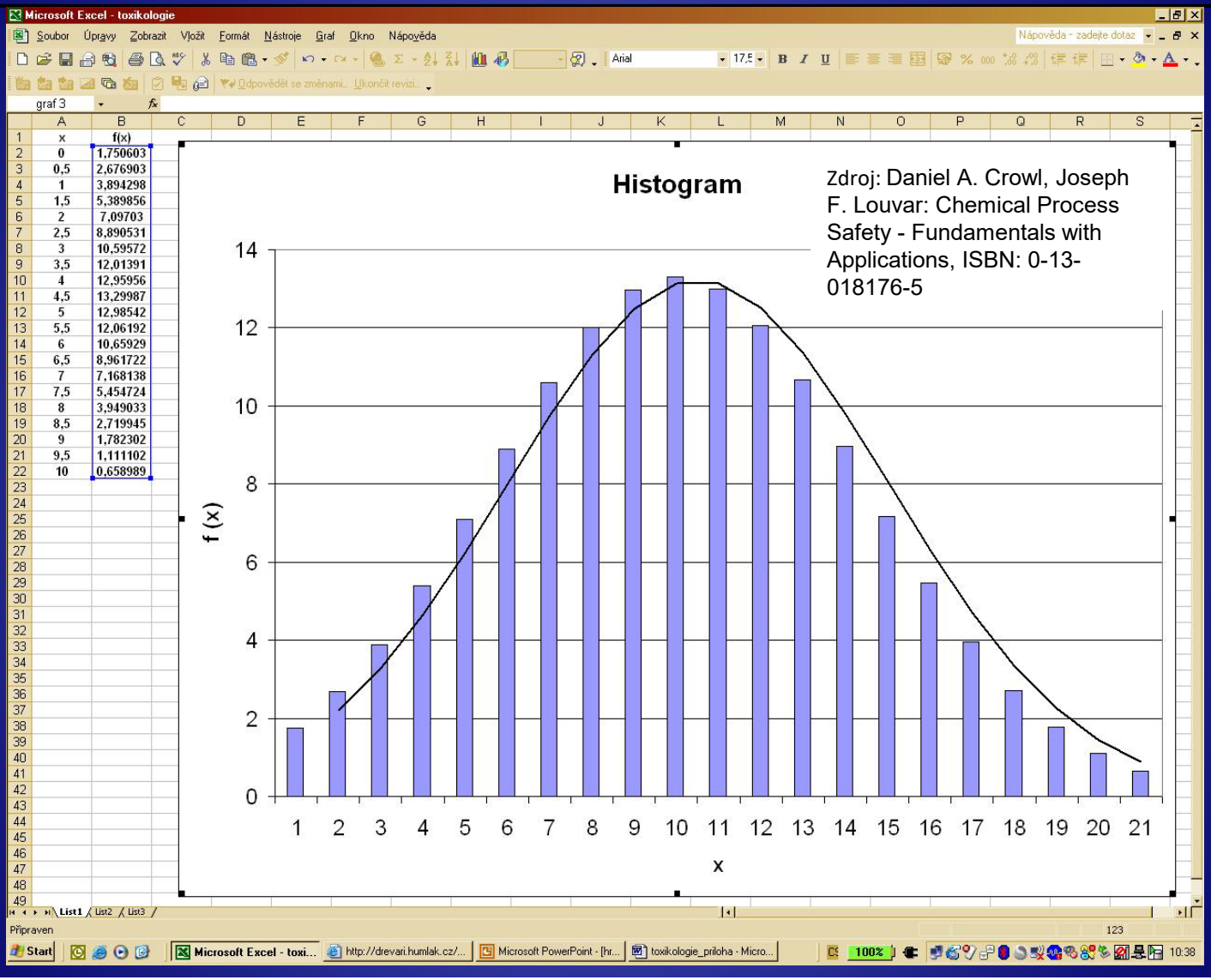
$$f(x) = 0,178e^{-0,1(x-4,51)^2}$$

resp. pro soubor 75 lidí

$$f(x) = 13,3e^{-0,1(x-4,51)^2}$$

CC BY SA

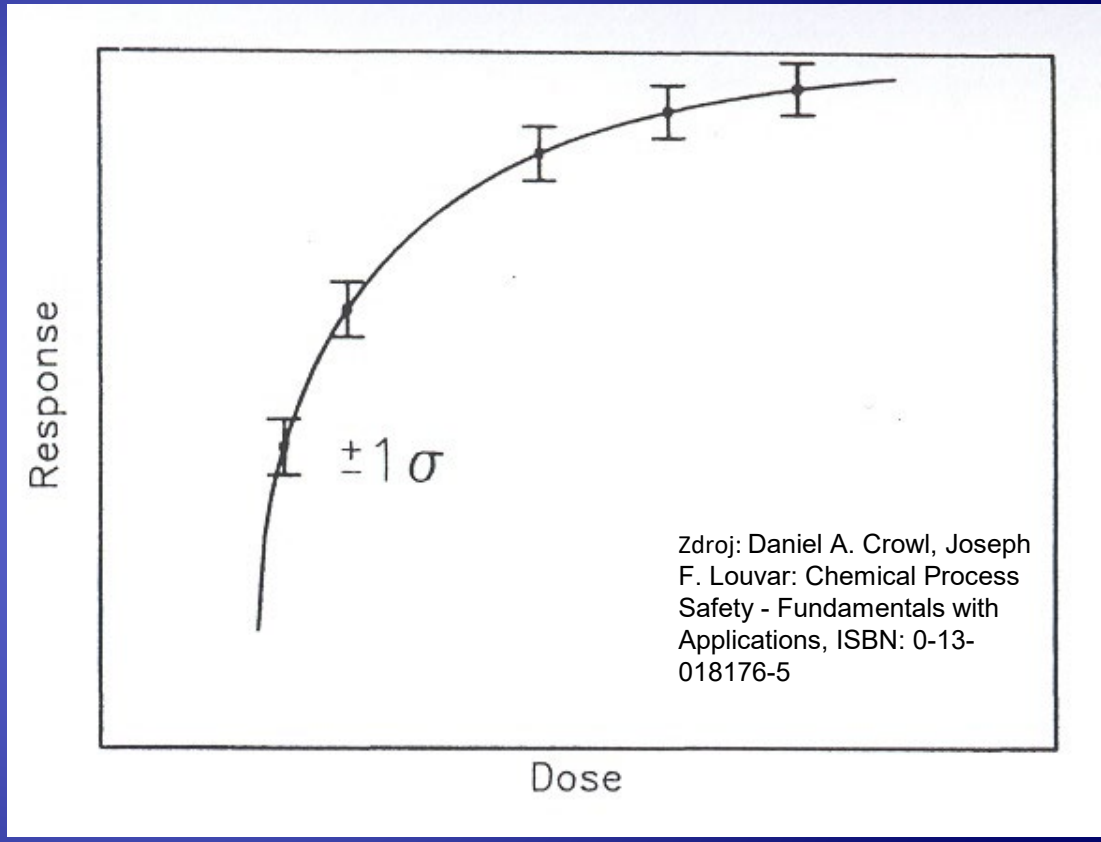
Histogram



x	f(x)
0	1,750603
0,5	2,676903
1	3,894298
1,5	5,389856
2	7,09703
2,5	8,890531
3	10,59572
3,5	12,01391
4	12,95956
4,5	13,29987
5	12,98542
5,5	12,06192
6	10,65929
6,5	8,961722
7	7,168138
7,5	5,454724
8	3,949033
8,5	2,719945
9	1,782302
9,5	1,111102
10	0,658989

Závislost *účinku* na *dávce*

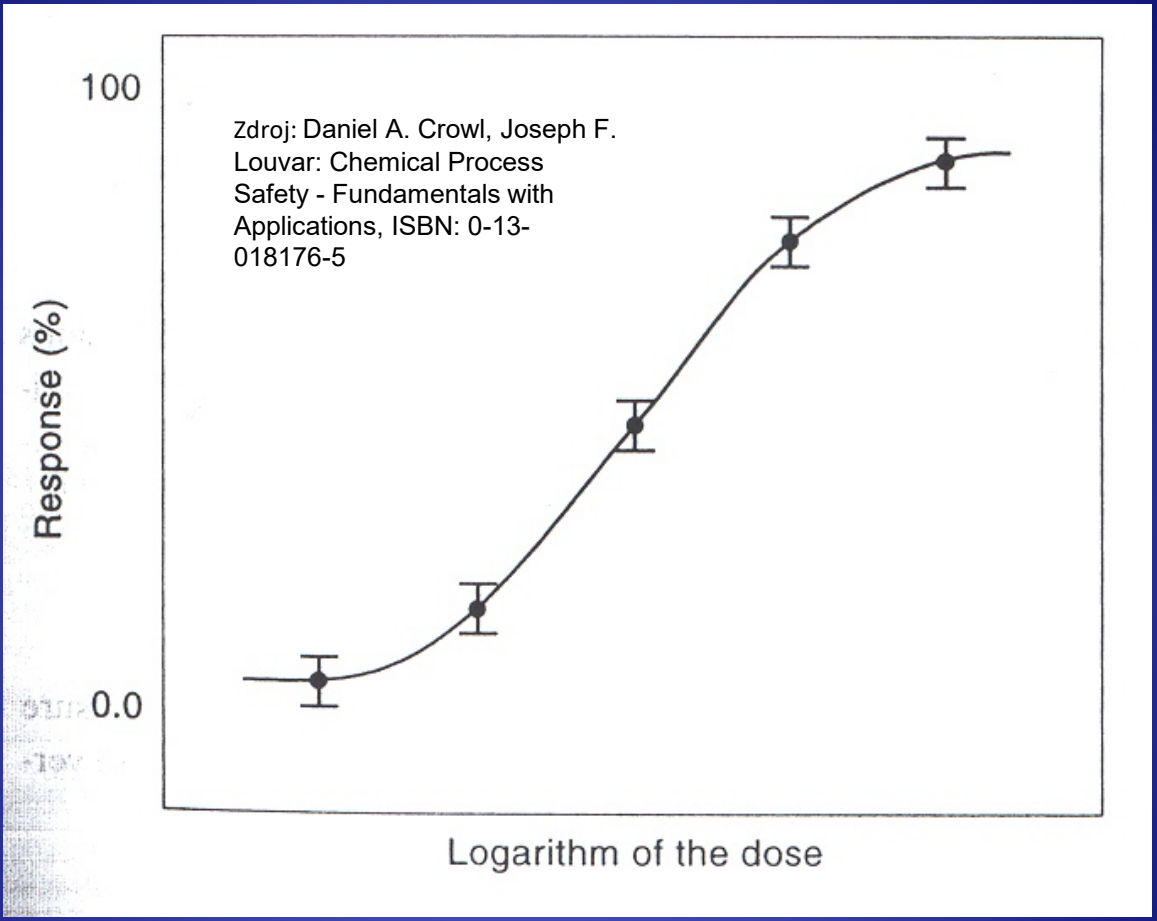
Křivka závislosti účinku na dávce má většinou složitou rovnici, proto se ji snažíme nahradit nějakou jednodušší (nejlépe lineární). V prvním kroku ji převedeme do logaritmického tvaru.
Pozn.: uvedená křivka přestavuje kumulovanou odezvu na danou dávku (porovnej s obrázkem na folii 16)



Zdroj: Daniel A. Crowl, Joseph F. Louvar: Chemical Process Safety - Fundamentals with Applications, ISBN: 0-13-018176-5

CC BY SA

Křivka po převodu do logaritmického tvaru



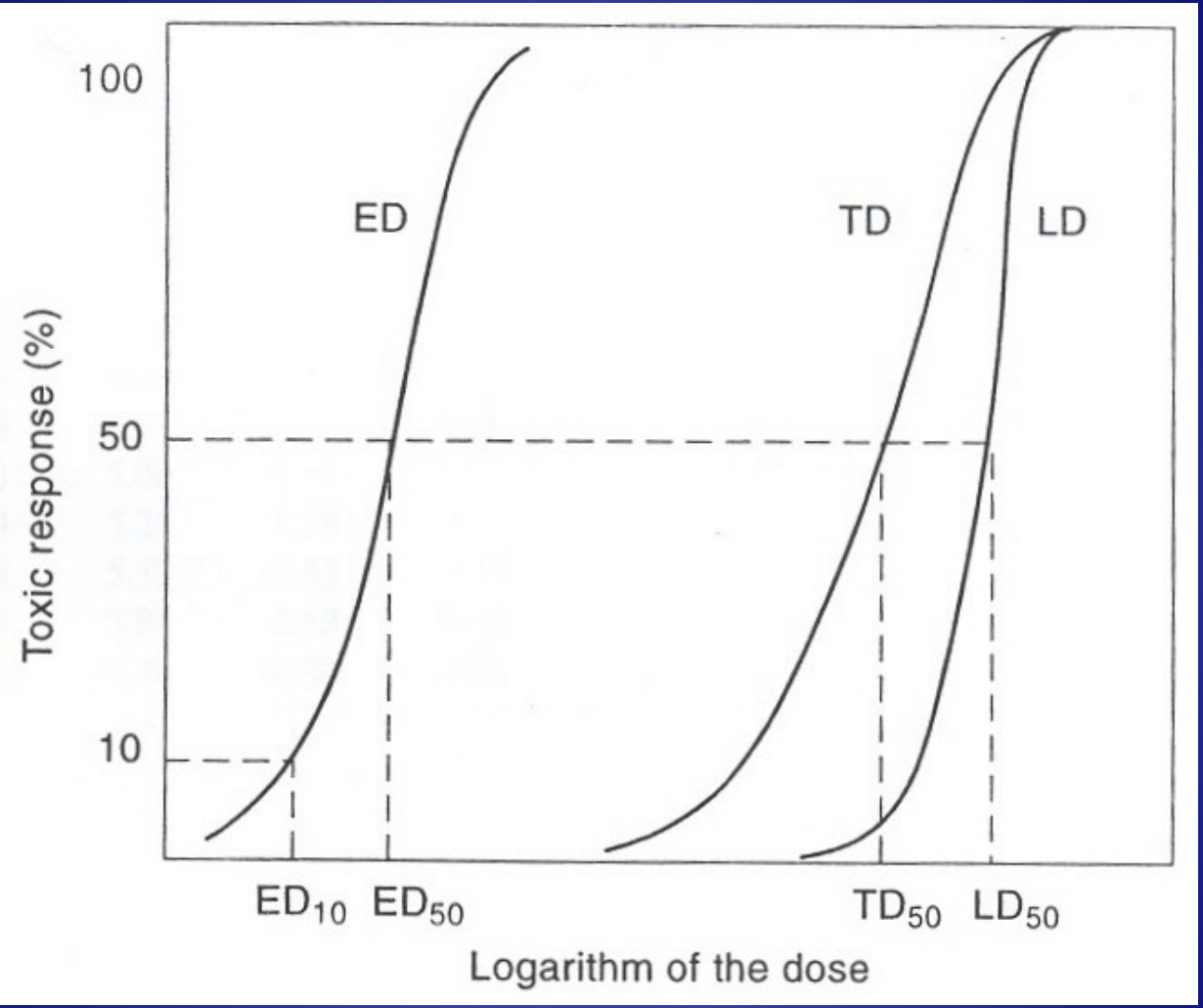
Zdroj: Daniel A. Crowl, Joseph F. Louvar: Chemical Process Safety - Fundamentals with Applications, ISBN: 0-13-018176-5

V této podobě jsou často publikovány výsledky měření toxicity chemických látek a z těchto křivek se zjišťují hodnoty efektivní, toxické a lethální dávky (např. LD_{50})

CC BY SA

Křivka po převodu do logaritmického tvaru

Zdroj: Daniel A. Crowl, Joseph F. Louvar: Chemical Process Safety - Fundamentals with Applications, ISBN: 0-13-018176-5



ED – efektivní dávka, TD – toxická dávka, LD – lethální dávka

CC BY SA

Nahrazení % probitovou funkcí

Pro linearizaci křivky *ln dávky* na *odezvě* nahradíme procenta u odezvy tzv. probity.
Graf závislosti % na probitech je na následujícím obrázku:

Zdroj: Daniel A. Crowl, Joseph F. Louvar: Chemical Process Safety - Fundamentals with Applications, ISBN: 0-13-018176-5

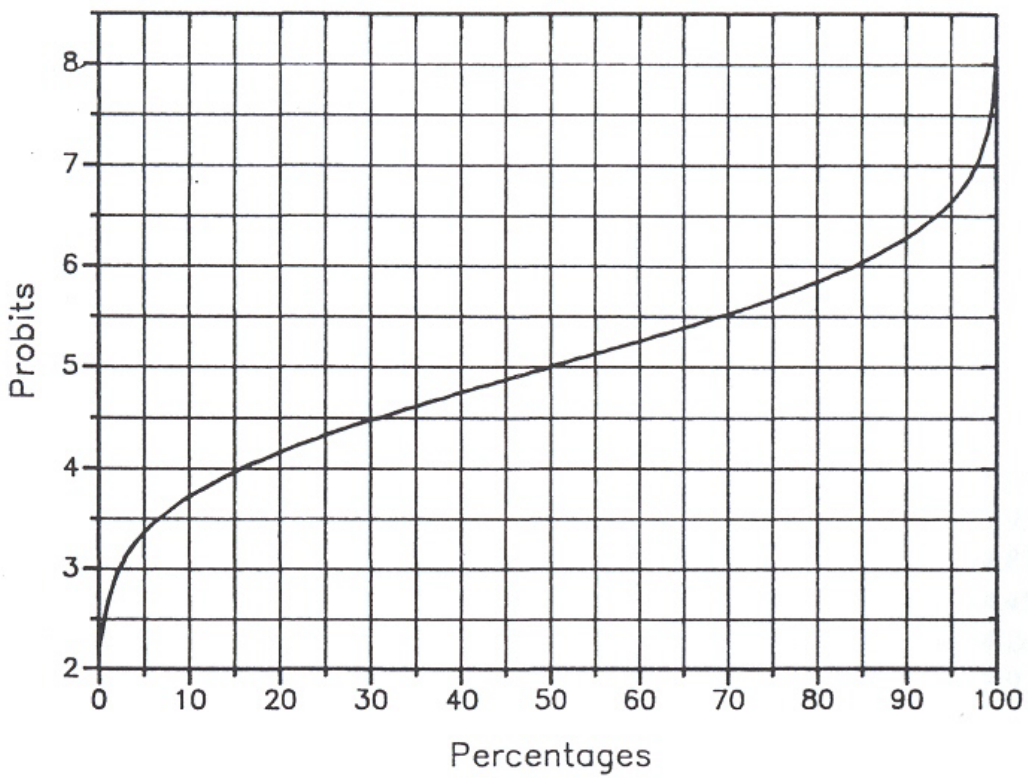


Figure 2-9 The relationship between percentages and probits. (Source: D. J. Finney, *Probit Analysis*, 3d ed. (Cambridge: Cambridge University Press, 1971), p. 23. Reprinted by permission.

CC BY SA

Tabulka hodnot probitů

Převod procent na probity (tentokrát tabelárně):

Zdroj: Daniel A. Crowl, Joseph F. Louvar: Chemical Process Safety - Fundamentals with Applications, ISBN: 0-13-018176-5

TABLE 2-4 THE TRANSFORMATION FROM PERCENTAGES TO PROBITS.*

%	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	—	2.67	2.95	3.12	3.25	3.36	3.45	3.52	3.59	3.66
10	3.72	3.77	3.82	3.87	3.92	3.96	4.01	4.05	4.08	4.12
20	4.16	4.19	4.23	4.26	4.29	4.33	4.36	4.39	4.42	4.45
30	4.48	4.50	4.53	4.56	4.59	4.61	4.64	4.67	4.69	4.72
40	4.75	4.77	4.80	4.82	4.85	4.87	4.90	4.92	4.95	4.97
50	5.00	5.03	5.05	5.08	5.10	5.13	5.15	5.18	5.20	5.23
60	5.25	5.28	5.31	5.33	5.36	5.39	5.41	5.44	5.47	5.50
70	5.52	5.55	5.58	5.61	5.64	5.67	5.71	5.74	5.77	5.81
80	5.84	5.88	5.92	5.95	5.99	6.04	6.08	6.13	6.18	6.23
90	6.28	6.34	6.41	6.48	6.55	6.64	6.75	6.88	7.05	7.33
%	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
99	7.33	7.37	7.41	7.46	7.51	7.58	7.65	7.75	7.88	8.09

*D. J. Finney, *Probit Analysis*, 1971, p. 25. Reprinted by permission of Cambridge University Press.

CC BY SA

Linearizace logaritmické závislosti

Zdroj: Daniel A. Crowl, Joseph F. Louvar: Chemical Process Safety - Fundamentals with Applications, ISBN: 0-13-018176-5

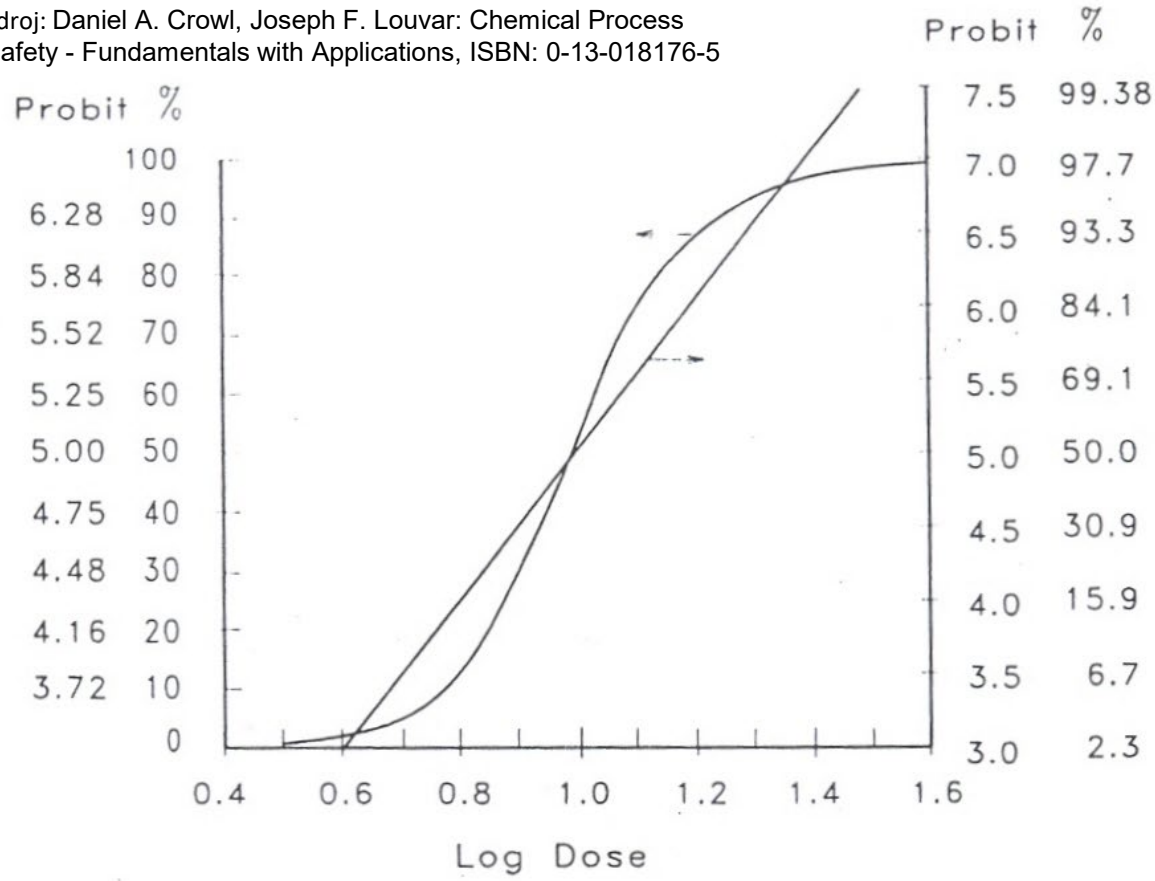


Figure 2-10 The probit transformation converts the sigmoidal response vs. log dose curve above into a straight line when plotted on a linear probit scale. (D. J. Finney, *Probit Analysis*, 3rd ed., 1971, p. 24. Reprinted by permission of Cambridge University Press, London.)

CC BY SA

Korelace probitu pro různé události

Příčinná proměnná reprezentuje veličiny charakterizující rozsah expozice

$$Y = k_1 + k_2 \ln V$$

Y … probitová proměnná

k1, k2 … parametry rovnice

V … příčinná proměnná (viz dále):

t_e – efektivní čas (s)

I_e – efekt. Radiační intensita (W/m^2)

P° – maximální přetlak (N/m^2)

J – impuls/náraz ($N.s/m^2$)

C – koncentrace (ppm)

T – časový interval (min)

Typ poranění nebo poškození	Příčinná proměnná	Parametry	
		k_1	k_2
Požár			
Úmrtí z popálenin po mžikovém prohoření	$t_e I_e^{4/3}/10^4$	-14,9	2,56
Úmrtí po požáru rozlivu (bazénu)	$tI^{4/3}/10^4$	-14,9	2,56
Exploze			
Úmrtí poškozením plic	p°	-77,1	6,91
Prasknutí ušního bubínku	p°	-15,6	1,93
Úmrtí po nárazu	J	-46,1	4,82
Poranění po nárazu	J	-39,1	4,45
Úmrtí z letících předmětů	J	-27,1	4,26
Poškození staveb a konstrukcí	p°	-23,8	2,92
Rozbití skla	p°	-18,1	2,79
Úniky toxik			
Úmrtí po expozici chlóru	$\Sigma C^{2,75}T$	-17,1	1,69
Poranění po expozici chlóru	C	-2,40	2,90
Úmrtí po expozici amoniaku	$\Sigma C^{2,75}T$	-30,57	1,385

CC BY SA

Příklad 2

Eisenberg udává následující údaje prasknutí ušních bubínků v důsledku přetlaku po explozi.

Přetlak (N/m^3)	Podíl poškozených (%)
16500	1
19300	10
43500	50
84300	90

Krok 2 - logaritmování

ln (přetlak)	Podíl poškozených (%)
9,71	1
9,87	10
10,68	50
11,34	90

Krok 3 - převod na probity

Podíl poškozených (%)	Probit
1	2,67
10	3,72
50	5
90	6,28

Krok 4 - hledání funkční závislosti

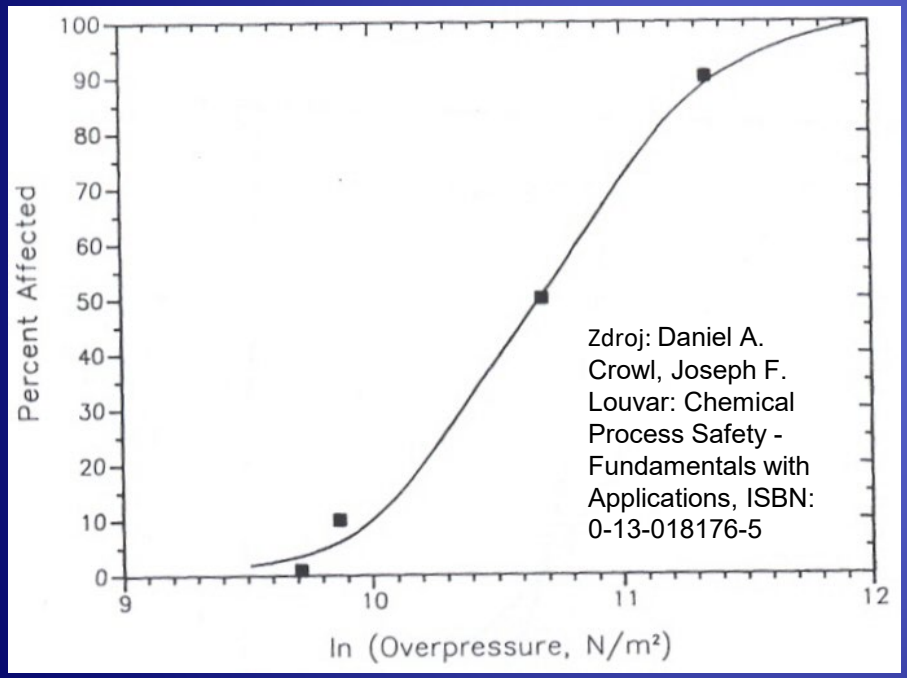
ln (přetlak	Probit
9,71	2,67
9,87	3,72
10,68	5
11,34	6,28

CC BY SA

Příklad 2 - grafy

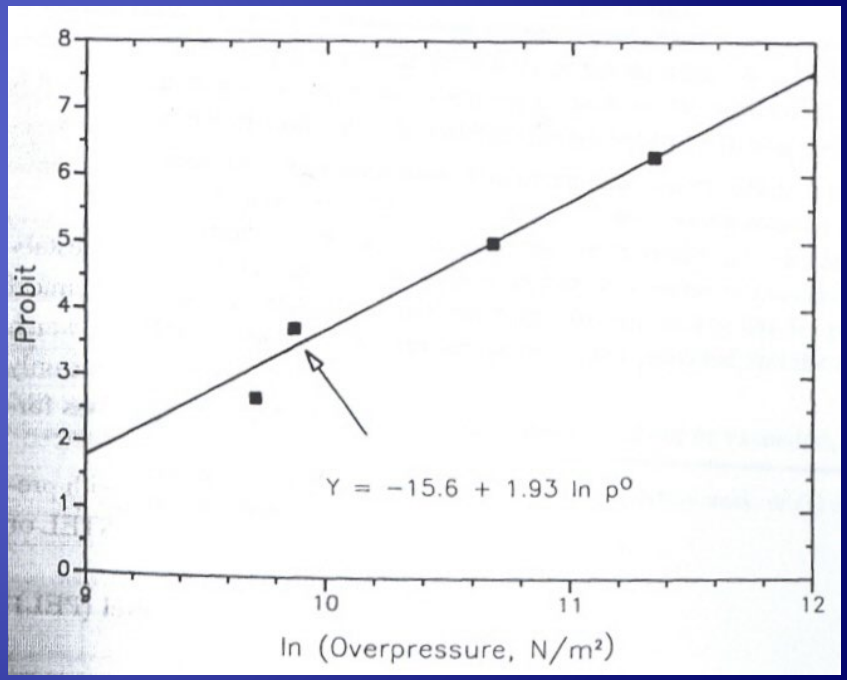
Eisenberg udává následující údaje prasknutí ušních bubínků v důsledku přetlaku po explozi.

Krok 2 - logaritmování



Zdroj: Daniel A. Crowl, Joseph F. Louvar: Chemical Process Safety - Fundamentals with Applications, ISBN: 0-13-018176-5

Krok 3 - převod na probity



CC BY SA

Poškození přetlakem

PSIG	kPa	Poškození
0,03	0,2	Velké skleněné plochy, které jsou již pod pnutím praskají
0,04	0,3	Hlasitý zvuk. Možné praskání skla.
0,15	1	Typická hodnota pro praskání skla.
0,3	2,1	95% jistota pro žádné závažné škody
0,5 - 1	3,4	Velké i malé skleněné tabule se roztříští
0,|7	4,8	Malá poškození na konstrukci budov
1	6,9	Částečná demolice domů vedoucí k neobyvatelnosti
1,3	9	Ocelové konstrukce a oplášťované budovy lehce pokřiveny
2 - 3	13,8 – 20,7	Zdi z nearmovaného betonu se hroutí
2,3	15,9	Spodní limit závažných poškození konstrukcí
3	20,7	Ocelové konstrukce budov se hroutí a oddělují od základů
3 - 4	20,7 – 27,6	Praskání zásobníků s ropou
5	34,5	Lámání dřevěných stožárů
5 - 7	34,5 – 48,3	Téměř totální destrukce domů
7	48,3	Převracení naložených železničních vagónů
9	62,1	Naložené skříňové vagóny kompletně zdemolovány
10	68,9	Pravděpodobně totální destrukce budov
300	2068,4	Limit pro vytváření kráterů

CC BY SA

Rekapitulace - opáčko

- Jedy a jejich definice
- Vliv jedů na organismus (opáčko z toxikologie)
- Něco ze statistického zpracování toxikologických dat

CC BY SA

Použité zdroje

- Ľ. Jelemenský, J. Labovský, Z. Labovská, J. Markoš: Hodnotenie nebezpečenstva chemických procesov,Slovenská technická univerzita v Bratislave 2011,
- Daniel A. Crowl, Joseph F. Louvar: Chemical Process Safety - Fundamentals with Applications, ISBN: 0-13-018176-5
- Interní materiály Ú216 VŠCHT
- Interní materiály skupiny ÚJV Řež

CC BY SA



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ, MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

3. Bezpečnost s spolehlivost v jaderné energetice – 1/3

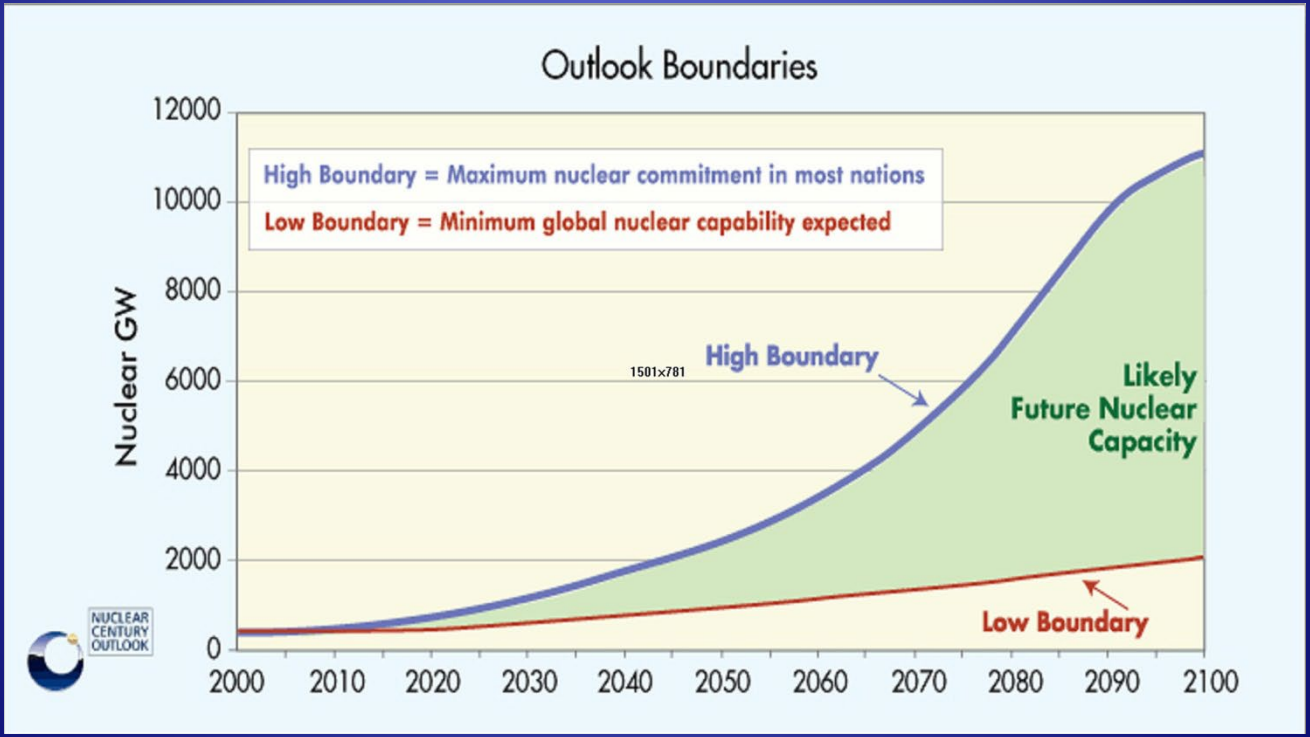
Bezpečnost a spolehlivost v energetice a průmyslu - M216019



Dílo podléhá licenci Creative Commons 4.0 Česko
Uveďte původ - Zachovejte licenci

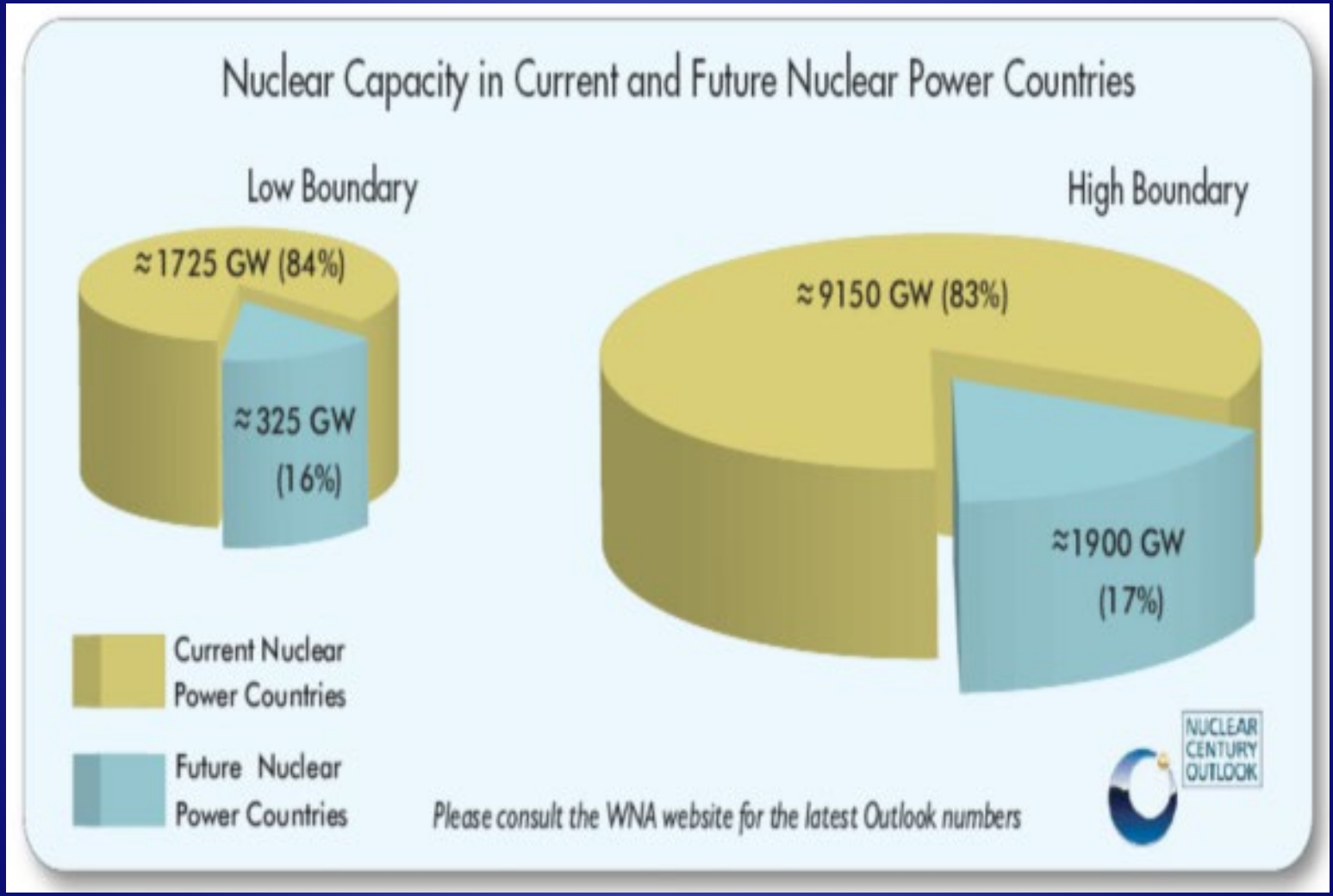
Postavení jaderné energetiky ve světě

- Dnes – 16% světové energie z jaderných zdrojů (370 GW) – více než celková produkce energie v 60. letech 20. stol.
- Odhad produkce jaderné energie do budoucna:



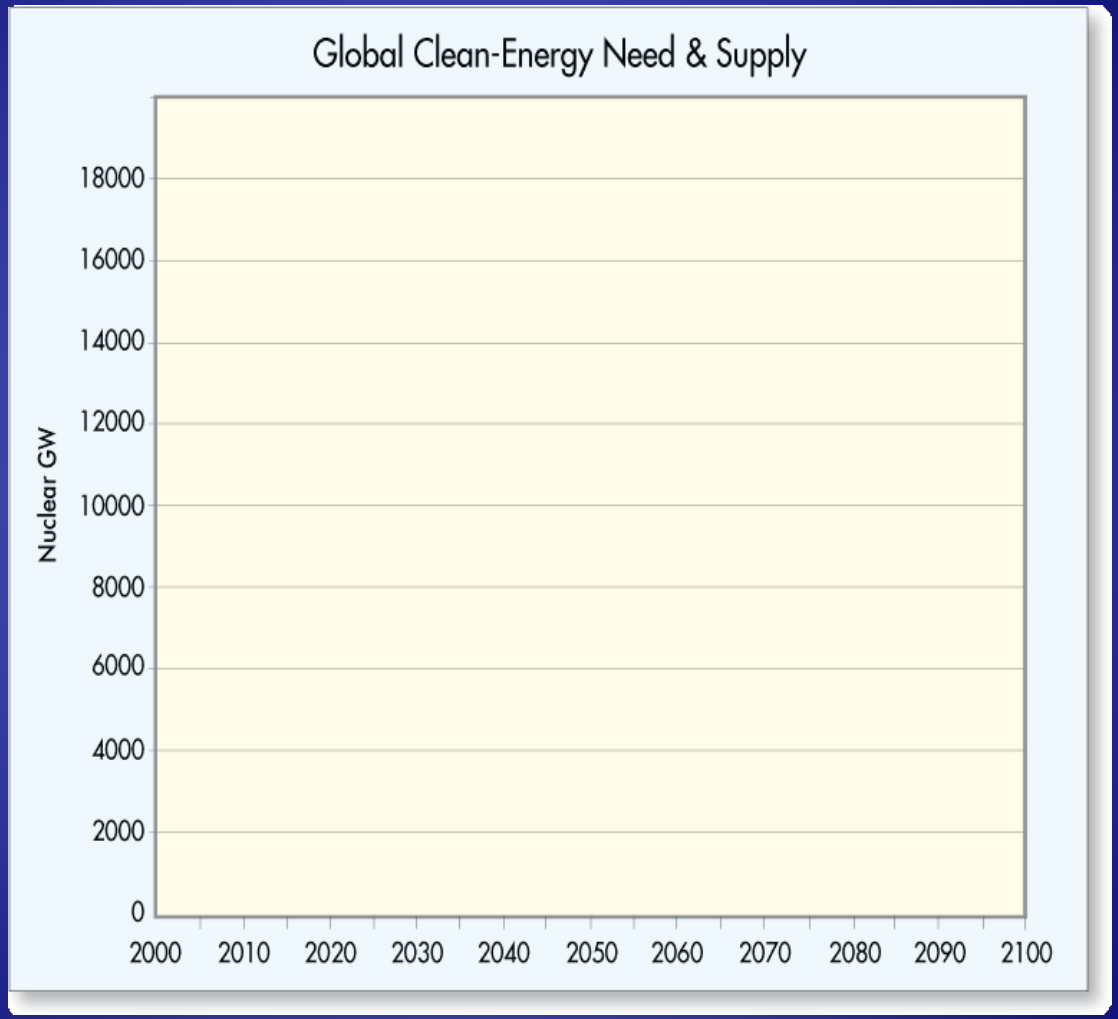
CC BY SA

Budoucnost jaderné energie



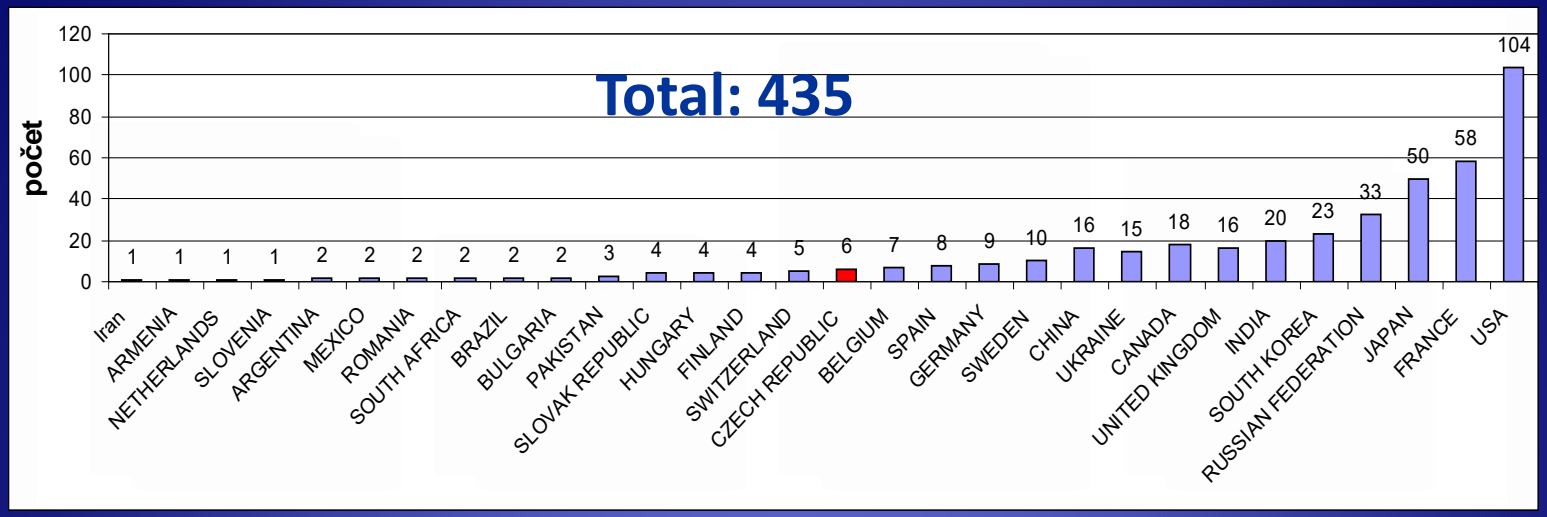
CC BY SA

Kapacity energetických zdrojů



CC BY SA

Energetické jaderné reaktory ve světě

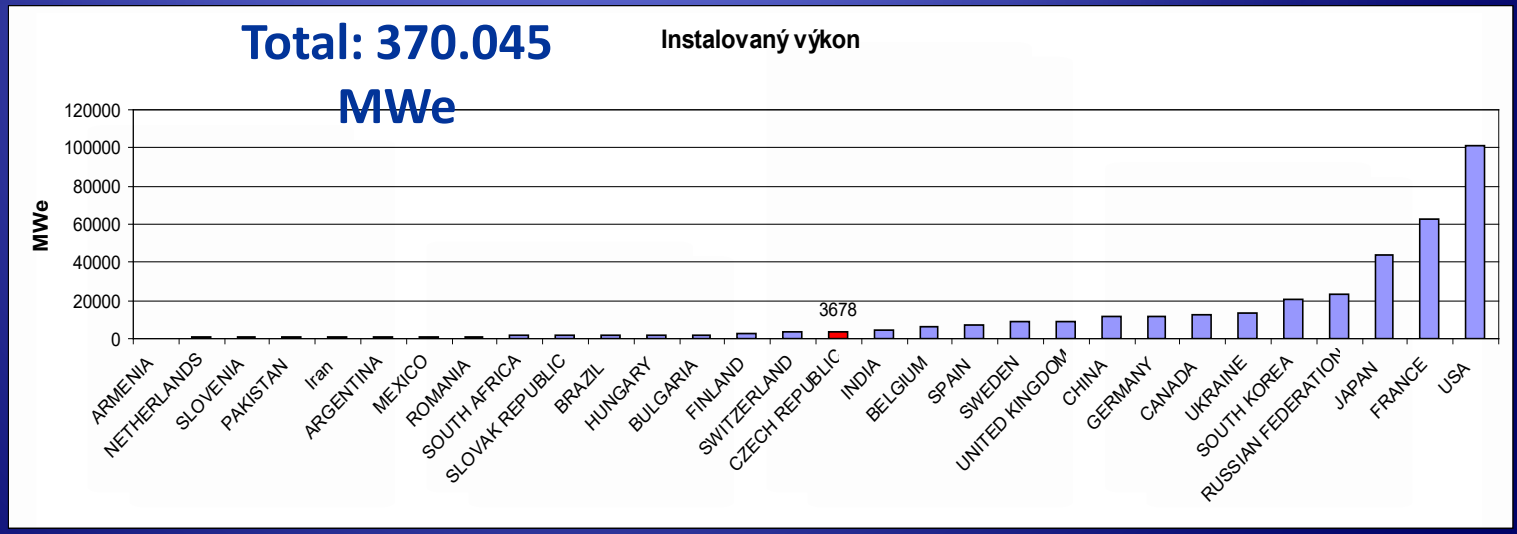


R. 2010: 441

R. 2011: 433

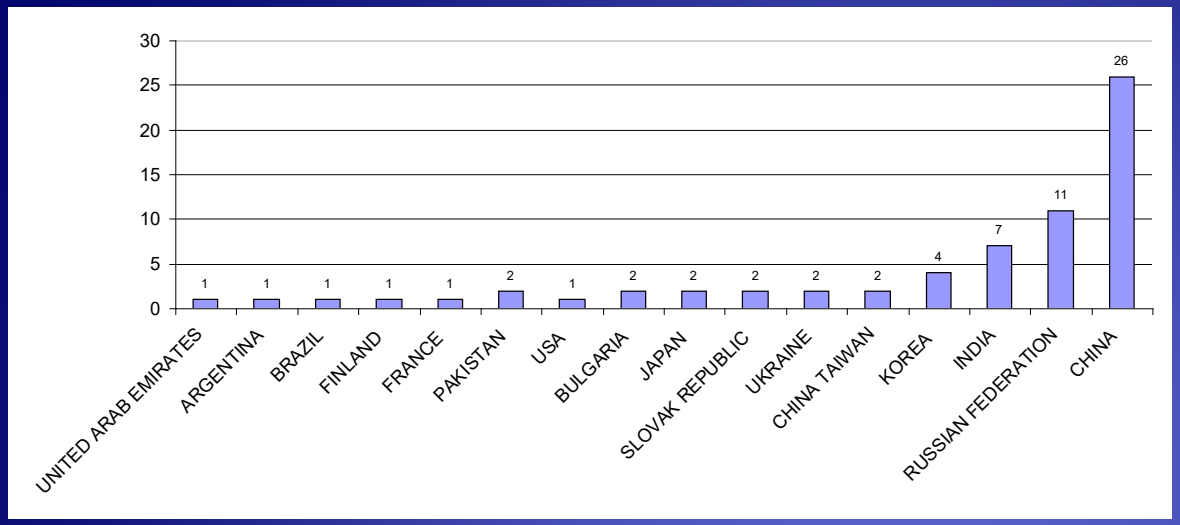
R.2011: 366.555 MWe

R. 2010: 374.692 MWe



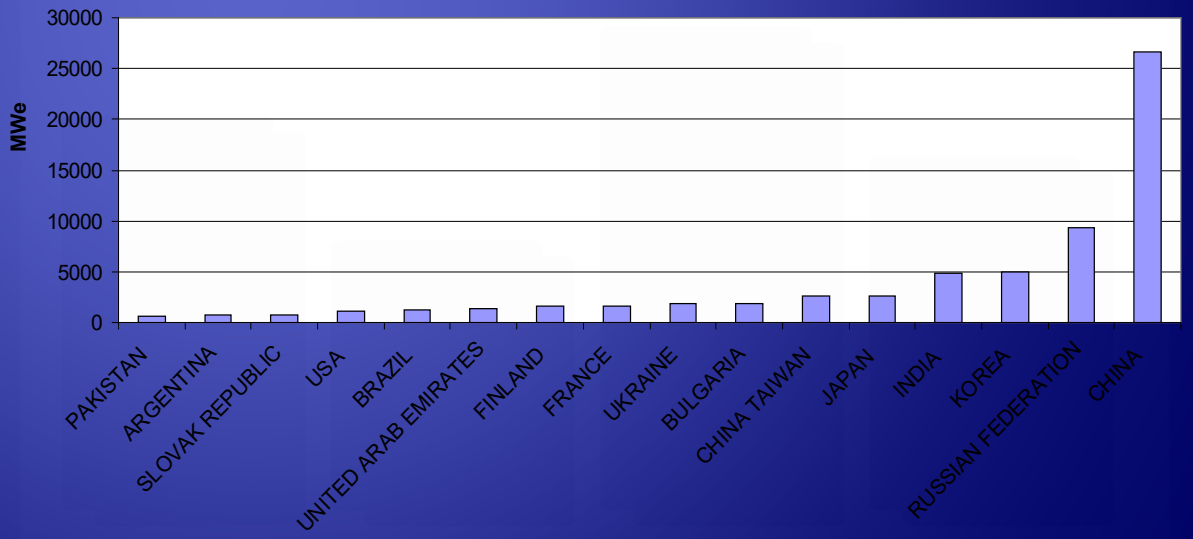
CC BY SA

Energetické reaktory ve výstavbě



Total: 64

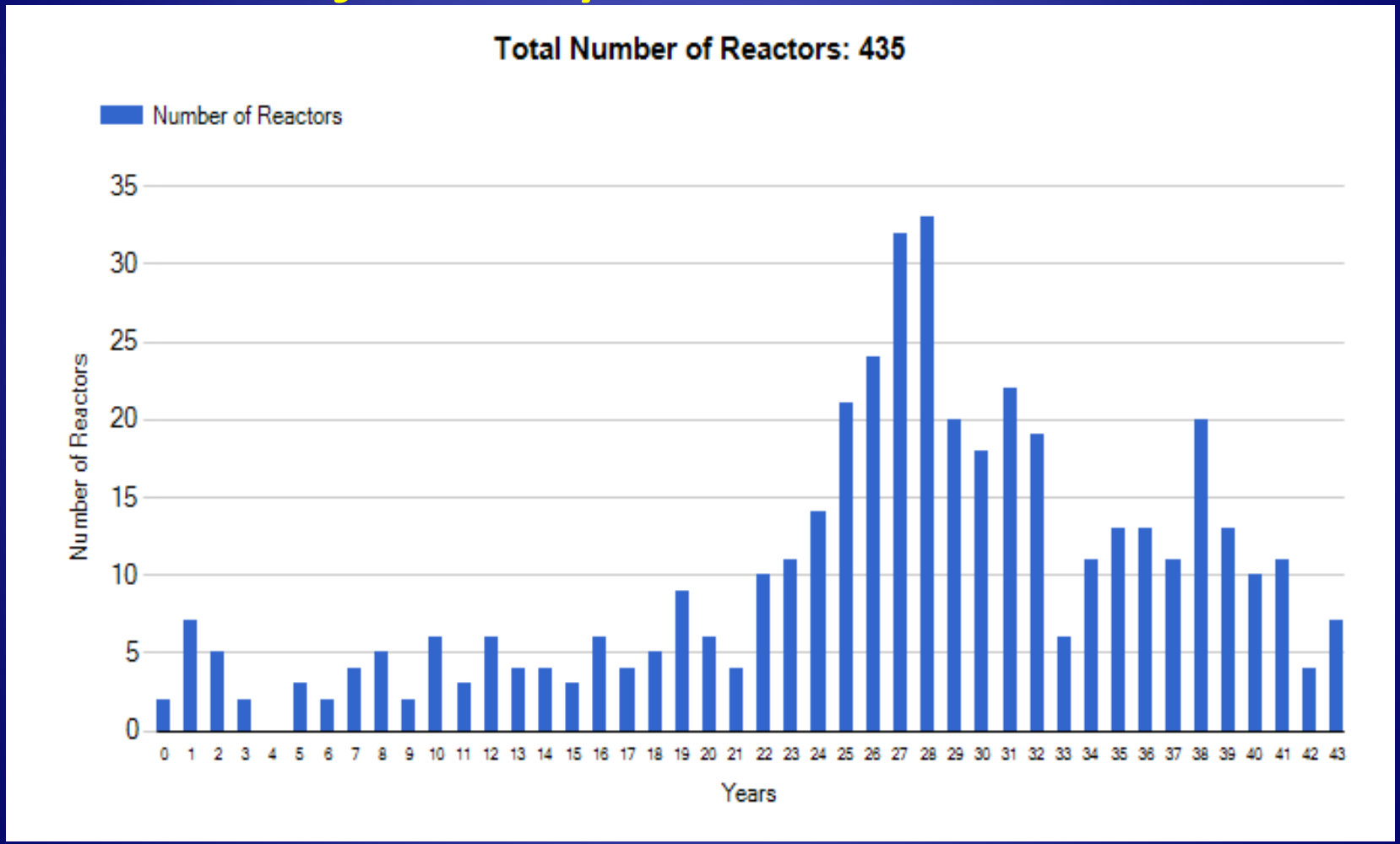
Total: 61.930 MWe



06.04.2023

CC BY SA

Průměrné stáří energetických jaderných reaktorů



CC BY SA

Využití jaderné energie

- Výroba elektřiny
- Výroba tepla pro přímé využití ve výrobě a technologických procesech
- Desalinace (odsolování) mořské vody
- Výroba vodíku (palivo pro mobilní zdroje)

CC BY SA

Ekologické aspekty využívání jaderné energie

- Vznik umělých radioizotopů v jaderných reaktorech
- Uvolňování ionizujícího záření
- Je třeba uvažovat celý palivový cyklus
- Vznik radioaktivních odpadů a vyhořelého paliva
- Prakticky žádné emise CO_2 při provozu JE

CC BY SA

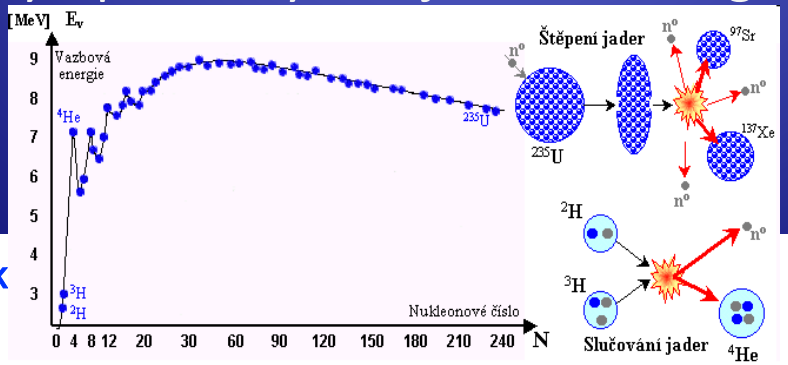
Součásti palivového cyklu

- Dobývání a úprava uranové rudy
- Chemické zpracování rudy
- Obohacování přírodního uranu izotopem U235
- Výroba palivových článků
- Provoz jaderného reaktoru
- Skladování vyhořelého paliva
- Přepracování paliva
- Uložení RAO
- Doprava mezi jednotlivými provozy palivového cyklu

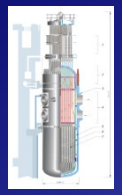
CC BY SA

Způsoby získávání jaderné energie

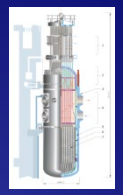
- Jaderná syntéza
  - Slučování jader deuteria a tritia
  - Nutno překonat odpudivé síly ($2{,}2.10^{-14}$ J = 0,14 MeV)
  - Tato energie odpovídá teplotě $1{,}1.10^{9}$ K
  - Práh udržení řetězové reakce 45.10^{6} K
  - Na tomto principu funguje „vodíková bomba“
- Jaderné štěpení
  - Řetězová reakce se zajišťuje pomocí neutronů emitovaných při štěpení
  - Vhodné ke štěpení jsou izotopy štěpitelné zpomalenými neutrony (U_{92}^{235}, Pu_{94}^{239})
  - dnes jediný způsob využití jaderné energie ke komerčním účelům



OPPA PRAHA PRAGUE PRAGA EVROPSKÁ UNIE
CC BY SA
VŠCHT PRAHA



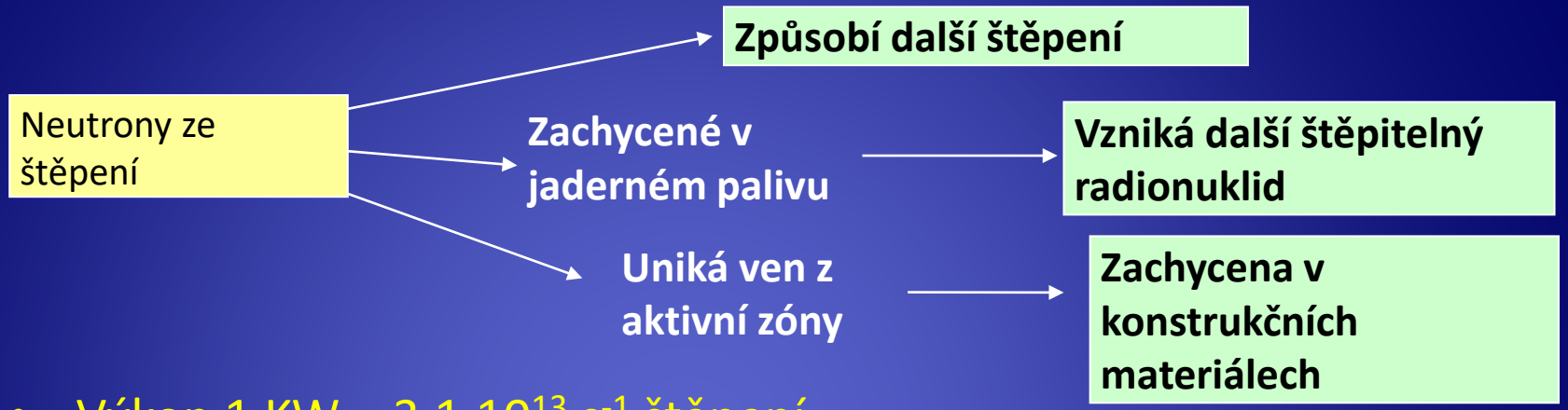
Základní pojmy



- Jaderný reaktor – zařízení, ve kterém probíhá řetězová jaderná reakce, která lze kontrolovat a udržovat ve stabilním běhu
- Aktivní zóna - část reaktoru, v níž se uvolňuje jaderná energie
- Jaderné palivo – materiál, ze kterého se uvolňuje energie jadernou reakcí (štěpení, fúze). Dnešní komerční jaderné elektrárny pracují jen se štěpným palivem (U^{238}, U^{235}, Pu, Th)
- Palivové články – uspořádání paliva. Jsou hermeticky pokryté obalem z MgO, grafitu, slitin Zr nebo nerez oceli)
- Moderátor – zmenšuje kinetickou energii rychlých neutronů ze štěpení (grafit, H_2O, D_2O). Může tvořit s jaderným palivem heterogenní mříž nebo homogenní směs nebo roztok
- Reflektor – zmenšuje únik neutronů z aktivní zóny
- Řídící tyče – regulace výkonu reaktoru, obsahují silný absorbér neutronů (Cd, B).
- Chladivo – transport energie z jaderného štěpení (H_2O, D_2O, Pb, Na, Pb-Bi, He, CO_2)

CC BY SA

Řetězová štěpná reakce v jaderném reaktoru

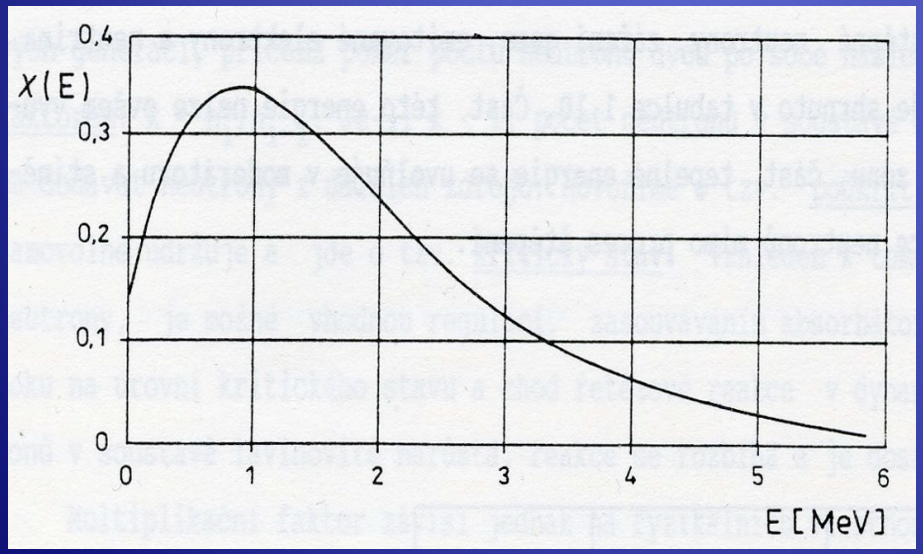


- Výkon 1 KW = $3{,}1.10^{13}$ s^{-1} štěpení
- Pro udržení jaderné reakce – Potřeba zajistit ve všech generacích stejný počet neutronů způsobujících štěpení – tzv. kritický stav
- Kritická hmota – množství jaderného paliva, které odpovídá kritickému stavu
- Použití zpomalených neutronů – v některých případech usnadňuje dosažení kritického stavu
- Kritický stav na okamžitých neutronech by mohl vést k jaderné explozi – v jaderných reaktorech je dosahováno kritického stavu jen na tzv. zpožděných neutronech

CC BY SA

Okamžité a zpožděné neutrony

- **Okamžité neutrony**: uvolňovány v krátkém intervalu: cca 10^{-14} s
- **Zpožděné neutrony:** uvolňovány beta rozpadem z excitovaných jader úlomků štěpení. Zpoždění 0,2 – 80 s
- Díky zpožděným neutronům lze regulovat reaktor zasouváním absorpčních elementů



Spektrum okamžitých neutronů při štěpení U235

EVROPSKÁ UNIE
Evropský sociální fond
Praha & EU: Investujeme do vaší budoucnosti
CC BY SA
VŠCHT PRAHA

Energie uvolněné při štěpení U235

Forma energie	Uvolněná energie		Vzdálenost	Zpoždění
	MeV	%		
Kinetická energie odštěpků	167±5	81,5	<0,1 mm	ne
Okamžité záření	6 ±1	3	1 m	Ne
Kinetická energie štěpných neutronů	5	2,5	0,1 - 1 m	Ne
Rozpad odštěpků β	8 ±1,5 6 ±1	4 3	1 m	Ano Ano
Neutrino	12 ±2,5	6		Ano
Celková	204 ±7	100		

CC BY SA

Energie uvolněné při štěpení U235

- Celková energie na rozpad jednoho jádra: cca 200 MeV
- 1 t U235 = 2 700 000 t vysoce kvalitního uhlí
- 1 t U235 = 1 rok provozu elektrárny 100 MWe

Kde vidíte riziko energetických jednotek využívajících JE?

EVROPSKÁ UNIE
Evropský sociální fond
Praha & EU: Investujeme do vaší budoucnosti
CC BY SA
VŠCHT PRAHA

Historie jaderné energetiky

- 1943 USA Chicago – první nepřetržitá štěpná reakce (Fermi)
- První reaktory – sloužily k výrobě plutonia pro výrobu atomové bomby
- První jaderné elektrárny – demonstrační – neschopné vyrábět elektrickou energii ekonomicky (Calder Hall – Velká Británie: 225MWt, 41 MWe)
- První jaderná elektrárna připojená na veřejnou síť – 1954 – SSSR - Obminsk (5 MW)
- První jaderný reaktor v ČSSR – experimentální lehkovodní – 6MW - ÚJV Řež
- První jaderná elektrárna v ČSSR – 1972 - A1 Jaslovské Bohunice – moderátor – těžká voda, chladivo: CO_2, palivo – přírodní uran, výkon 560 MWt, 144 MWe, provoz skončil havárií

Kontrolní otázka:

Jaká je celková dnešní světová produkce jaderné energie?

CC BY SA

Historie jaderné energetiky

- 1978 – Jaslovské Bohunice – VVER – 440
- 1985 – JE Dukovany – zpuštěn první blok VVER – 440

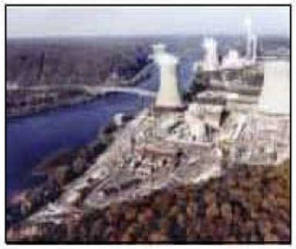
- JE Temelín
- 1980 – schváleno k výstavbě vládou ČSSR
- 1987 – začátek výstavby – původně plánované 4 bloky
- 1990 – přepracování projektu – redukce výstavby pouze na 2 jaderné bloky
- 2002 – zahájen zkušební provoz prvního bloku
- 2003 – zahájení provozu druhého bloku

CC BY SA

Generace jaderných reaktorů

Generation I

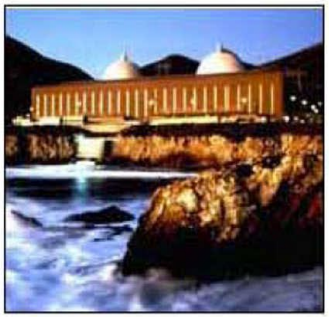
První prototypy reaktorů



- Shippingport
- Dresden, Fermi I
- Magnox

Generation II

Komerční výkonové reaktory



- LWR - PWR, BWR
- CANDU
- AGR

Generation III

Pokročilé LWR reaktory



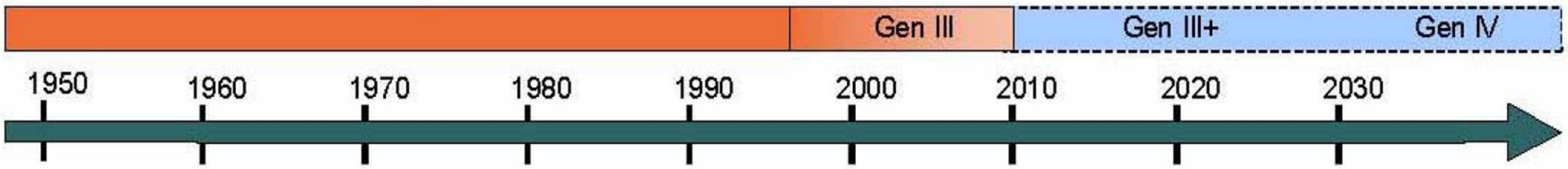
- ABWR
- System 80+

Generation III +

Zavedení vývojových konstrukčních zlepšení v oblasti ekonomiky a bezpečnosti provozu v krátkodobém rozmezí

Generation IV

- Vyšší ekonomičnost
- Zvýšená bezpečnost
- Minimalizace odpadů
- Ochrana proti zneužití jaderných materiálů



CC BY SA

Jaderné reaktory I. generace

- Stavěny v 50. a 60. letech 20.stol.
- Kusové prototypy
- Sloužily více méně k ověření, zda je možné využít jaderný reaktor pro výrobu elektrické energie
- Dnes již nejsou v provozu s výjimkou reaktorů Magnox v Elektrárně Wilfa (Velká Británie)



- Reaktory Magnox – Grafitem moderovaný, CO_2 chlazený reaktor spalující přírodní uran
- Posledním skončí životnost v r. 2010

Kontrolní otázka:

K čemu slouží moderátor v jaderném reaktoru?

CC BY SA

Jaderné reaktory II. generace

- Jaderné reaktory, jak je známe dnes
- Počátek v 70. letech 20. století
- Výroba v sériích, použití stejných principů i komponent
- Drtivá většina lehkovodních reaktorů
- Do této generace patří reaktory v Dukovanech i v Temelíně



- Další typy:
  - CANDU - těžkovodní reaktor spalující přírodní uran
  - Varné reaktory
  - AGR – CO_2 chlazený, grafitem moderovaný (Velká Británie)
  - RBMK - vodou chlazený, grafitem moderovaný (tzv. „Černobylský typ reaktoru“)

CC BY SA

Jaderné reaktory III. generace

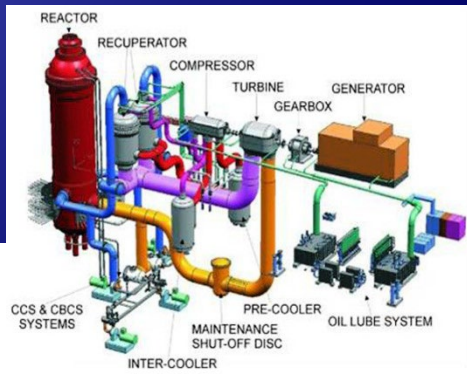
- Vychází z konceptů II. Generace
- Lepší bezpečnostní mechanismy
- Standardizované typy – usnadňuje výstavbu, větší odolnost proti lidským chybám
- Delší životnost – standardně 60 let
- Redukovaná možnost nehod s roztavením jádra
- Vysoké vyhoření uranu – zmenšená spotřeba paliva
- Důraz na pasivně bezpečnostní prvky (založené na gravitaci, přirozeném proudění, odolnosti proti teplotám a tlakům)
- Kontejnment – zajišťuje odolnost proti pádu letadla
- Zástupci
  - Candu 6
  - Vylepšený tlakové lehkovodní reaktor Systém 80+
  - Vylepšený tlakovodní reaktor AP600 (Westinghouse)



CC BY SA

Jaderné reaktory generace III+

- Vylepšené prvky pasivní bezpečnosti – reaktor se dostane do bezpečného stavu automaticky bez pomoci aktivních částí
- EPR - European Pressurised water Reaktor: 1600 – 1750 MWe, Francie (ve výstavbě)
- Vylepšený VVER-1000 a VVER-1200 (Rusko): Dvojitý konteinment – vylepšená odolnost proti pádu letadla a zemětřesení
- AP1000 (Westinghouse)
- APWR (Advanced Pressurized Water Reactor – Westinghouse + Mitsubishi) – 1500 MWe
- PBMR – Heliem chlazený, grafitem moderovaný - 400 MWt, 166 MWe, teplota chladiva až 900°C (JAR)



CC BY SA

Jaderné reaktory IV. generace

- 6 konceptů jaderných reaktorů, dnes ve stádiu výzkumu, komerční nasazení nejdříve kolem r. 2030:
  - Olovem chlazený rychlý reaktor (LFR)
  - Plynem chlazený rychlá reaktor (GFR)
  - Tekutými solemi chlazený rychlý reaktor (LFR)
  - Sodíkem chlazený rychlý reaktor (SFR)
  - Superkritický lehkovodní reaktor (SCWR)
  - Vysokoteplotní plynem chlazený reaktor (VHTR)
- „Nové“ typy reaktorů s vyšší teplotou chladiva (až 1000°C)
- Důraz na ekonomičnost a uzavřený palivový cyklus
- Viz. další přednáška

Kontrolní otázka:

Kdy a kde byla postavena první jaderná elektrárna připojená na elektrickou s

BY SA

Základy jaderné fyziky

- Stabilita atomových jader
  - Nejvíce stabilní: Jádra A=2.Z (A-nukleonové číslo, Z-atomové číslo), např. He_2^4, C_6^{12}, O_8^{16}, každá odchylka se projeví snížením stability
- Jednoduchý radioaktivní rozpad

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N$$

- Pravděpodobnost nestability jádra dána rozpadovou konstantou λ
- Zákon jednoduchého rozpadu:

$$N(t) = N(0)e^{-\lambda t}$$

- Poločas rozpadu: $T = \frac{\ln 2}{\lambda} \approx \frac{0{,}693}{\lambda}$

- V přírodě se jednoduché rozpady vyskytují velmi zřídka. Častější je vícenásobný rozpad. Rovnice pro dvoustupňový rozpad:

$$N_2(t) = N_1(0)\lambda_1\left[\frac{e^{-\lambda_1 t}}{\lambda_2 - \lambda_1} + \frac{e^{-\lambda_2 t}}{\lambda_1 - \lambda_2}\right] + N_2(0)e^{-\lambda_2 t}$$

CC BY SA

Základy jaderné fyziky

- α rozpad: emise jádra helia (helionu)

$$X_Z^A \rightarrow X_{Z-2}^{A-4} + \alpha_2^4$$

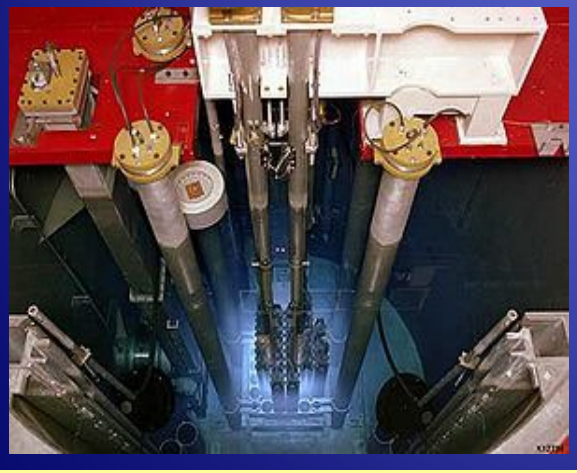
- Střední energie α částice: $9{,}6.10^{-12}$J, Typický pro jádra nad Z>80
- β rozpad: rozpad jádra za emise negatronu, pozitronu nebo záchyt elektronu atomovým jádrem
  - Emise negatronu: rozpad tritia na helium: $H_1^3 \xrightarrow{\beta^-} He_2^4$
  - Emise pozitronu: Rozpad uhlíku 11 na bór 11: $C_6^{11} \xrightarrow{\beta^+} B_5^{11}$
  - Záchyt elektronu jádrem: Pohlcení elektronu ze slupky K jádrem Be 7 za uvolnění rentgenového záření: $Be_4^7 \xrightarrow{K} Li_3^7$
- γ záření – emise fotonového záření z atomových jader doprovázející α nebo β rozpad. Energie až 4.10^{-13} při β rozpadu.

Který druh záření má nejvyšší toxicitu?

CC BY SA

Základy jaderné fyziky

- Záření Vavilova – Čerenkova
  - Vyzařování světelných protonů při průchodu nabitých částic látkou, v níž je rychlost světla nižší než rychlost nabitých částic
  - Dobře pozorovatelné ve vodních reaktorech (modré)





Kontrolní otázka:

Co je to kritický stav jaderného reaktoru?

CC BY SA

Základy jaderné fyziky

- Interakce neutronového pole s látkou
  - Neutrony snadno pronikají do jádra atomů a způsobují jaderné reakce
  - Volný neutron je radioaktivní, rozpadá se z poločasem rozpadu cca 700 s na proton a elektron
  - V jaderném reaktoru dosahuje energií od 10^{-21} až 10^{-12} J.
  - Účinný průřez – schopnost látky absorbovat neutrony

CC BY SA

Štěpení atomových jader

- Štěpení jádra na 2 přibližně stejné jádra:

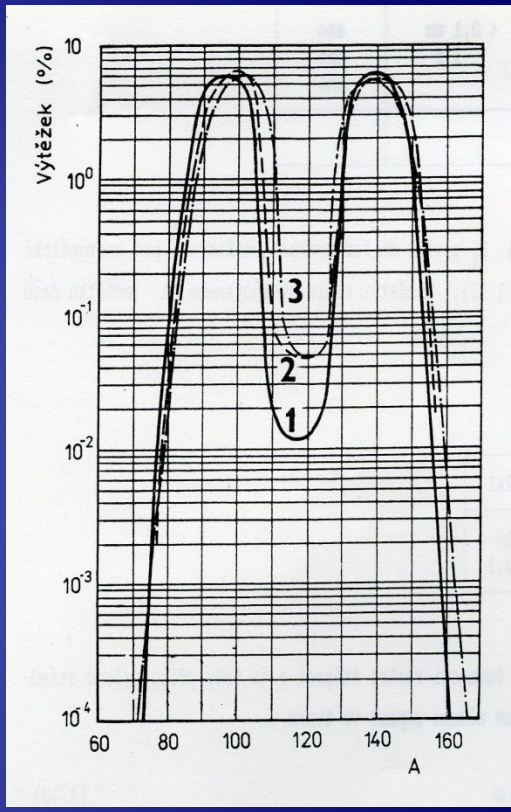
$A=A_1 + A_2$

$Z=Z_1 + Z_2$

- Štěpná energie:

$Q=[M-(M_1+M_2)]c^2$

Výtěžek produktů štěpení:
1-U233
2-U235
3-Pu239



- Experimentálně stanoveno:

$$\frac{A_1}{A_2} \approx \frac{Z_1}{Z_2} \approx \frac{3}{2}$$

- Při štěpení jsou dochází ke vzniku α, β, γ záření a k emisi neutronů, které mohou způsobit další štěpení

CC BY SA

Fyzika aktivní zóny

- Podmínka pro udržení řetězové reakce – vyjádřena multiplikačním koeficientem k
  - k<1 – soustava je podkritická, reakce se nemůže udržet
  - k=1 – soustava je kritická, počet štěpení je konstantní
  - k >1 – soustava je nadkritická, počet štěpení i výkon exponenciálně stoupají, v tomto stavu může soustava zůstat jen krátkou dobu
  - Efektivní multiplikační koeficient – zahrnuje únik neutronů ze zóny: $k_{ef}=k_{\infty}P$
  - k_{∞} - multiplikační koeficient pro nekonečné prostředí, P – pravděpodobnost, že nenastane únik ze zóny
- Vliv na multiplikační koeficient má stupeň obohacení paliva a velikost úniku neutronů z aktivní zóny.
- Únik neutronů lze omezit reflektorem nebo snížením poměru povrchu aktivní zóny k jejímu objemu

CC BY SA

Multiplikační koeficient

$$k = \frac{n_k}{n_{k-1}}$$

Poměr neutronů dvou po sobě jdoucích generací nk-1 a nk

Regenerační faktor – počet rychlých neutronů uvolněných při štěpení na jeden neutron pohlcený

$$\eta = \nu \frac{\sum_f}{\sum_a}$$

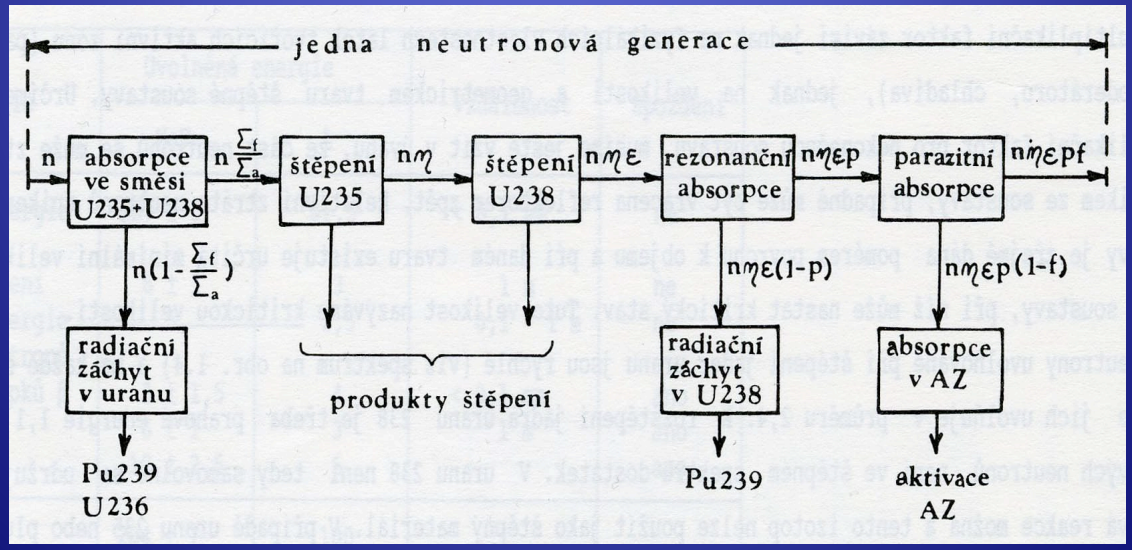
v-počet neutronů na jedno štěpení, Σf a Σa – makroskopické účinné průřezy štěpení a absorpce

Štěpný materiál	η
U235	2,08
Pu239	2,12
U233	2,29

CC BY SA

Multiplikační koeficient

- Multiplikační faktor rychlých neutronů: ε
- Pravděpodobnost úniku rezonančnímu zachycení: p
- Koeficient využití tepelných neutronů (část netronů může být zachycena moderátorem): f $= \frac{\text{neutrony pohlcené v uranu}}{\text{celkový počoč pohlcených neutronů}}$
- $k_\infty = \eta \varepsilon p f$



CC BY SA

Fyzika aktivní zóny

- Přebytek multiplikačního koeficientu:

$$\Delta k = k_{ef} - 1 = \delta k$$

- Reaktivita reaktoru:

$$\rho = \frac{\delta k_{ef}}{k_{ef}}$$

- Během provozu reaktoru se snižuje reaktivita aktivní zóny:
  - Poklesem množství jader štěpného materiálu v aktivní zóně
  - Otravou reaktoru
  - Zamořením reaktoru
  - Vzrůstem koncentrace jader izotopu Xe^{135} po odstavení reaktoru – tzv. jódovou jámou

CC BY SA

Otrava reaktoru

- Vznik nových izotopů s hmotnostním číslem od 72 do 161. Některé z nich mají velký účinný průřez pro absorpci tepelných neutronů.
- Nejvyšší podíl Xe^{135}
- 95% vzniká jako produkt štěpení jádra I^{135}
- Do této skupiny patří ještě Xe^{133}, I^{131}, Sr^{89}

$$U + n \rightarrow Te^{135}(0{,}5m) \xrightarrow{\beta} I^{135*}(6{,}5h) \rightarrow Xe^{135*}(15{,}3m)$$

$$\downarrow$$

$$Xe^{135}(9{,}2h) \xrightarrow{\beta} Cs^{135}(2{,}6.10^{6}\,r) \xrightarrow{\beta} Ba^{135}(stab.)$$

$$\downarrow$$

$$Xe^{136}$$

CC BY SA

Otrava reaktoru

- K hromadění I^{135} a Xe^{135} dochází při každém rychlejším snížením výkonu reaktoru – proto je nutné rezervovat určitou zásobu reaktivity na překonání hromadění Xe^{135}.
- Pokud zásoba reaktivity nestačí krýt vzrůst otravy xenonem – reaktor se dostává do tzv. „jodové jámy“.
- Dojde k odstavení reaktoru, lze jej spustit až počet jader Xe opět klesne pod horní hranici.
- Zamoření reaktoru – dochází vlivem izotopů s velkým absorbčním průřezem a dlouhým poločasem rozpadu

CC BY SA

Vliv teploty na reaktivitu

- na začátku práce reaktoru se mění jeho teplota
- vzrůst teploty má vliv na reaktivitu minimálně ze dvou příčin
  - vzroste průměrná energie neutronů a tím se změní účinné průřezy pro absorpci neutronů
  - změní se hustota materiálů, tím i střední volná dráha a pravděpodobnost, že nedojde k úniku neutronů

- z praktického hlediska je vhodné, aby teplotní koeficient reaktivity byl malý a záporný.
  - je-li malý, pak malé změny teploty vyvolají pouze malé změny reaktivity a reaktor bude nadále v ustáleném stavu
  - bude-li teplotní koeficient navíc záporný, to znamená, že reaktivita klesá se vzrůstající teplotou, bude se reaktor samočinně regulovat.
  - kladný teplotní koeficient podporuje nestálý chod reaktoru, neboť kritický reaktor se vzrůstem teploty se stává nadkritickým (typické pro RBMK – „černobylský typ“)

CC BY SA

Vývin tepla ve štěpném reaktoru

- Především z kinetické energie z odštěpků (přeměna na tepelnou energii už po cca 10^{-5} m)
- Celkový tepelný výkon reaktoru lze vyjádřit jako integrál přes objem AZ:

$$\int_{V_{AZ}} E_f(\bar{r}) \sum_f (\bar{r}) \varphi(\bar{r}) d\bar{r}$$

- E_f – energie štěpení, Σ_f – účinný průřez pro štěpení, ϕ – tok tepelných neutronů, r – souřadnice AZ
- V uniformní mříži – E_f, Σ_f jsou konstanty: $P = E_f.\Sigma_f.V_{AZ}.\phi$

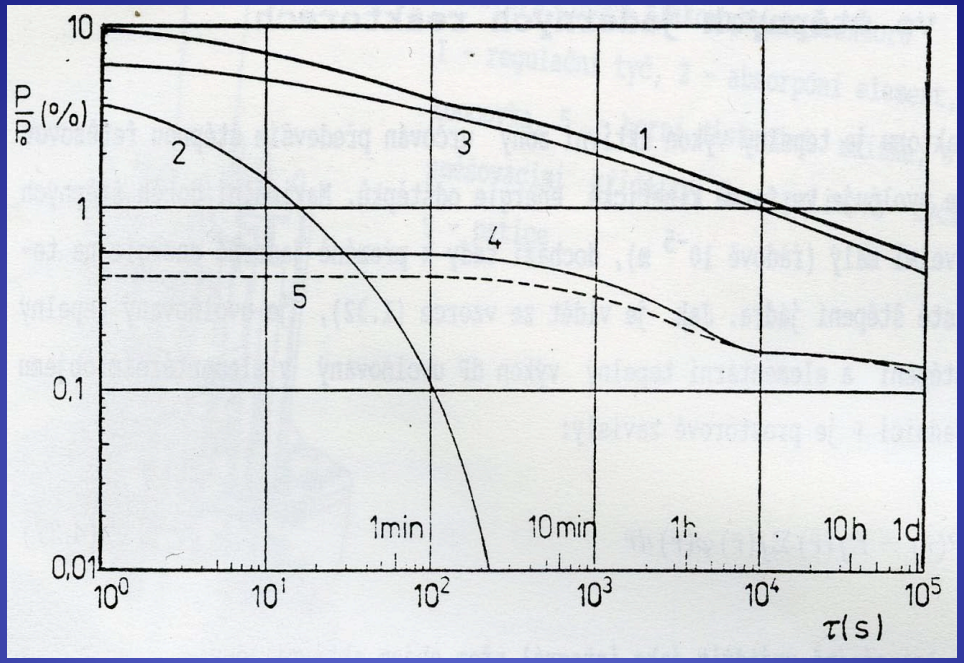
CC BY SA

Zbytkový vývin tepla v reaktoru

- Při rychlém (havarijním) odstavení reaktoru – rychlost poklesu tepelného výkonu je omezena
- Intenzita štěpné reakce klesá exponenciálně, při nízké výkonové hladině se uplatňuje teplo vznikající radioaktivním rozpadem produktu štěpení a radioizotopů
- Tepelné zdroje působící po odstavení reaktoru:
  - Dobíhající štěpná reakce
  - Radioaktivní rozpad produktů štěpení
  - Rozpad izotopů vzniklých radiačním záchytem neutronů
  - Rozpad aktivovaných materiálů AZ
- V případě odstavení v důsledku havárie ještě:
  - Exotermická reakce zirkonových povlaků s vodní parou
  - Exotermická reakce vodní páry s dalšími kovovými povrchy

CC BY SA

Zbytkový vývin tepla v reaktoru



1 – celkový výkon (2+3+4)

2 - výkon štěpné řetězové reakce

3 – radioaktivní rozpad produktů štěpení

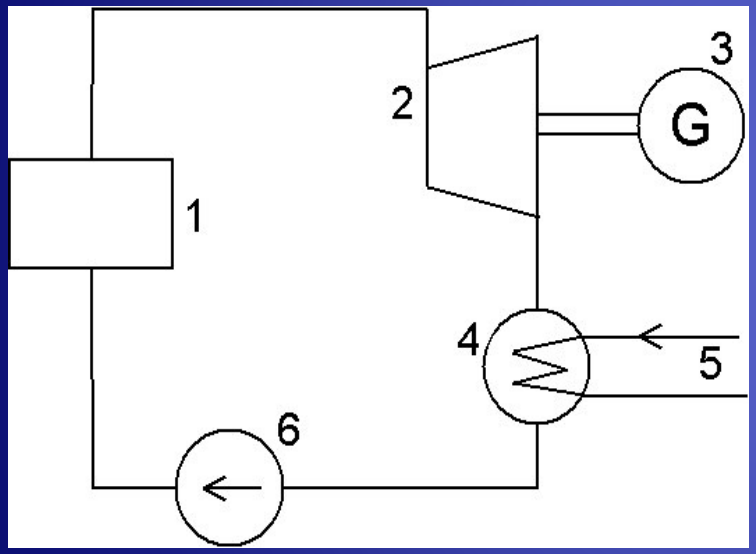
4- rozpad nuklidů

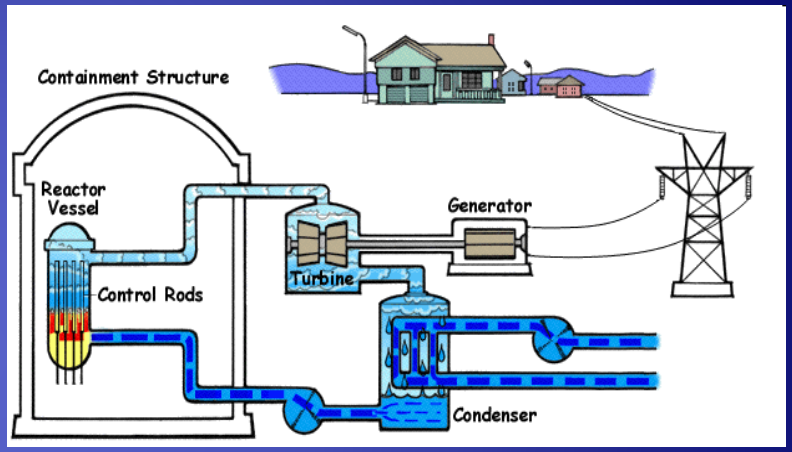
5-X_p=0,8

CC BY SA

Jadené elektrárny

- Jednookruhová



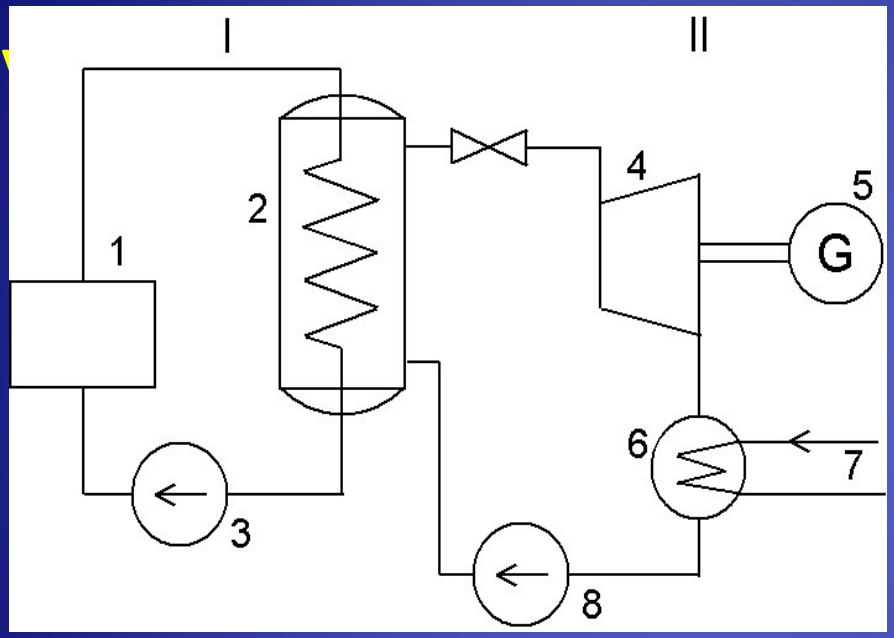


1 - jaderný reaktor
2 - turbína
3 - generátor
4 - kondenzátor
5 - přívod chladící kapaliny
6 – čerpadlo (dmychadlo v případě plynem chlazeného reaktoru)

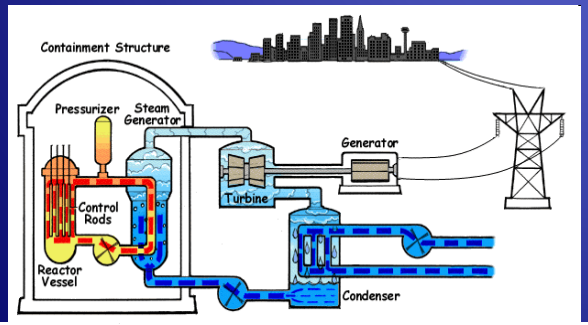
CC BY SA

Jaderné elektrárny

- Dv



I - primární okruh
II - sekundární okruh
1 - jaderný reaktor
2 - výměník tepla
3 – čerpadlo (dmychadlo u plynem chlazené JE)
4 - turbína
5 - generátor
6 - kondenzátor
7 - přívod chladící vody
8 - čerpadlo

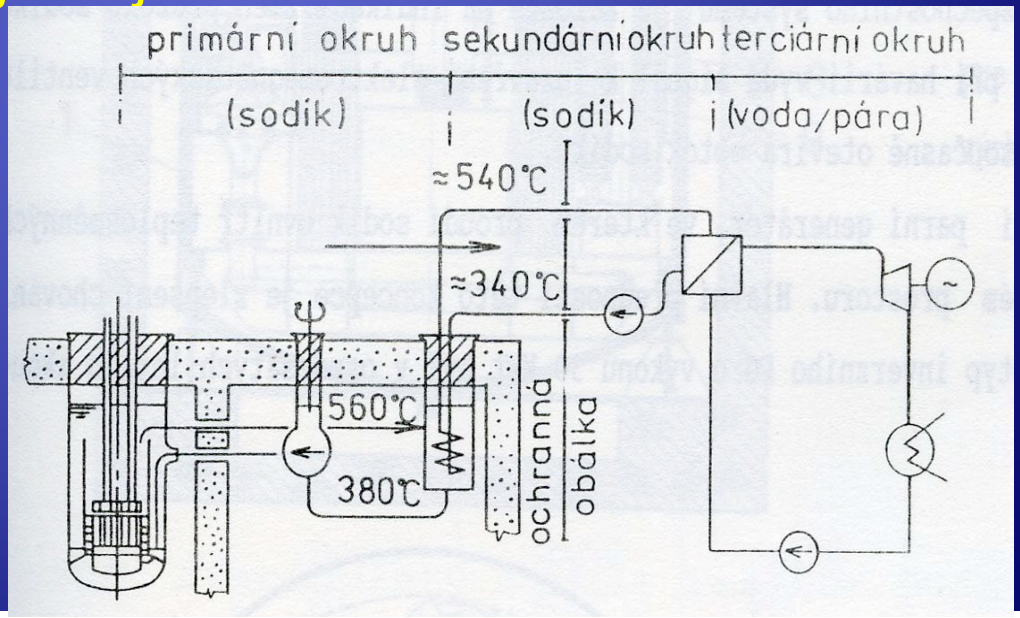


Kromě těchto součástí obsahují jaderné elektrárny ještě např. pomocné chladící a havarijní oruhy, záchytné bazény, nouzové dieselové generátory, atd.

CC BY SA

Jaderné elektrárny

- Tříokruhová elektrárna:
- Příklad – rychlé reaktory chlazené taveninou Na
- Kvůli riziku průniku vody z parovodního okruhu do okruhu Na
- Aby byl chráněn reaktor, a zabránilo se ekologickým rizikům spojeným s reakcí radioaktivního sodíku s vodou, je mezi primárním a parovodním okruhem ještě jeden okruh z taveninou Na



CC BY SA

Rozdělení jaderných reaktorů

- Podle využití
  - Transportní (např. pro pohon ponorek)
  - Stacionární energetické (pro výrobu energie v elektrárnách, teplárnách aj.)
- Schopnost zúčastnit se reprodukce jaderného paliva
  - Burner – vůbec se neúčastní reprodukce (např. ponorkové PWR na vysoce obohacený uran)
  - Konvertor– spalují více jader štěpných materiálů, než kolik vyrábějí nových (např. PWR)
  - Pseudobreeder – vyrábí více jader nových štěpných materiálů, než kolik spalují, která mohou být chemicky jiného druhu než palivo (např. MSBR)
  - Breeder (množivý reaktor) – produkují více jader nových štěpných materiálů chemicky stejného druhu, než kolik jich spalují (např. sodíkem chlazený rychlý reaktor)

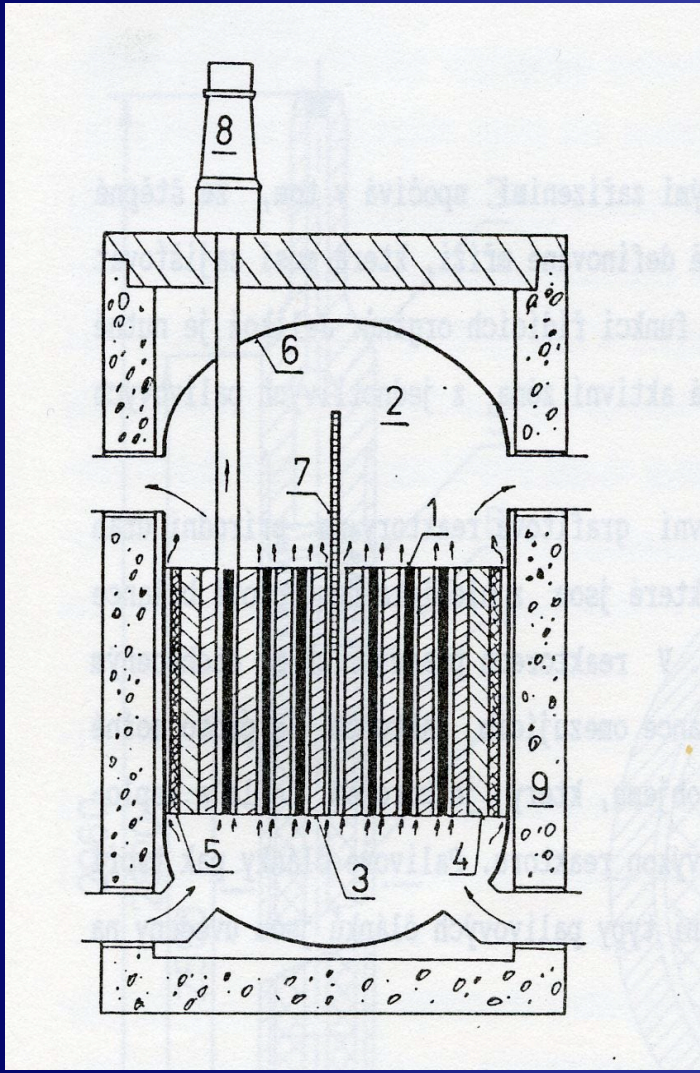
CC BY SA

Rozdělení jaderných reaktorů

- Energie neutronů způsobující štěpení
  - >1,6.10^{-14} J (0,1 MeV) – rychlé reaktory
  - <1,6.10^{-20} J (0,1 eV) – reaktory tepelné
  - 1,6.10^{-19} – 1,6.10^{-16} J- reaktory nadtepelné (epitermální)
  - U tepelných a nadtepelných reaktorů – nutno neutrony zpomalovat pomocí moderátoru
- Podle chladiva a moderátoru
  - Plynem chlazený
  - Lehkovodní
  - Těžkovodní
  - Olovem/sodíkem chlazený
  - Atd…

CC BY SA

Jaderný reaktor a jeho součásti



1. Palivový článek
2. Chladivo
3. Moderátor
4. Reflektor
5. Stínění reaktoru
6. Reaktorová nádoba
7. Systém řízení reaktoru
8. Systém výměny paliva

OPPA PRAHA PRAGUE PRAGA
EVROPSKÁ UNIE
Evropský sociální fond
Praha & EU: Investujeme do vaší budoucnosti
CC BY SA
VŠCHT PRAHA

Hlavní součásti jaderného reaktoru

- Reaktorová nádoba
- Aktivní zóna
  - Třísložková – u termálních a epitermálních reaktorů-obsahuje palivo, moderátor, chladivo
  - Dvousložková – u rychlých reaktorů – obsahuje palivo a chladivo
  - Jednosložková – jen u homogenních reaktorů, kde je palivo rozpuštěno v chladivu, které má i funkci moderátoru
- Regulační tyče – slouží k řízení výkonu reaktoru, procházejí aktivní zónou
- Reflektor – odráží neutrony zpět do zóny

Kontrolní otázka:

Co je příčinou otravy reaktoru?

CC BY SA

Základní materiály jaderných energetických reaktorů

Palivo	Množivý materiál	Moderátor	Chladivo
U235	Th232	Grafit	CO_2
U233	U238	H_2O	He
Pu239		D_2O	H_2O
		Terfenyl	D_2O
		Bez moderátoru	Terfenyl
			Na

CC BY SA

Chladivo jaderných reaktorů

- požadavky na chladivo reaktoru
  - musí mít příslušné tepelné vlastnosti
  - Nemělo by korodovat konstrukční materiál reaktoru
  - musí být stabilní vůči ozařování
  - především však, aby chladivo mělo malý účinný průřez pro záchyt neutronů

- chladiva, která těmto účelům vyhovují
  - plyn (CO_2, He) - účinný teprve při vyšším tlaku (větším než 1 MPa)
  - voda
  - těžká voda
  - Taveniny solí
  - tekuté kovy, např. Na, Pb, Pb-Bi a K - používají se v energetických reaktorech, kde je požadována vysoká pracovní teplota

CC BY SA

Jaderné palivo

- Uvažované štěpné materiály: U^{235}(výskyt v přírodním uranu 0,712%), U^{233}, Pu^{239}, U^{238} (pro rychlé reaktory)
  - Pu^{239} vzniká krátkodobým ozařováním uranu, při dlouhodobém ozařování vznikají i Pu^{240} a Pu^{241}, které mají nízký účinný průřez pro štěpení
- Množivé materiály: U^{238}, Th^{232}
- Uran – ve formě kovu – použitelnost do t=500°C, při vyšších teplotách dochází k nárůstu objemu vlivem radiace
- Legury Cr, Ce, Y, Be – 0,01-0,1% - zabraňují nárůstu objemu
- Pro výkonnější reaktory (PWR, BWR, HTGR, rychlé reaktory) se používá palivo ve formě sloučenin - oxidů, karbidů, sulfidů, nitridů nebo v disperzní fázi z neštěpného kovu (Al, austenitická ocel) nebo grafitu

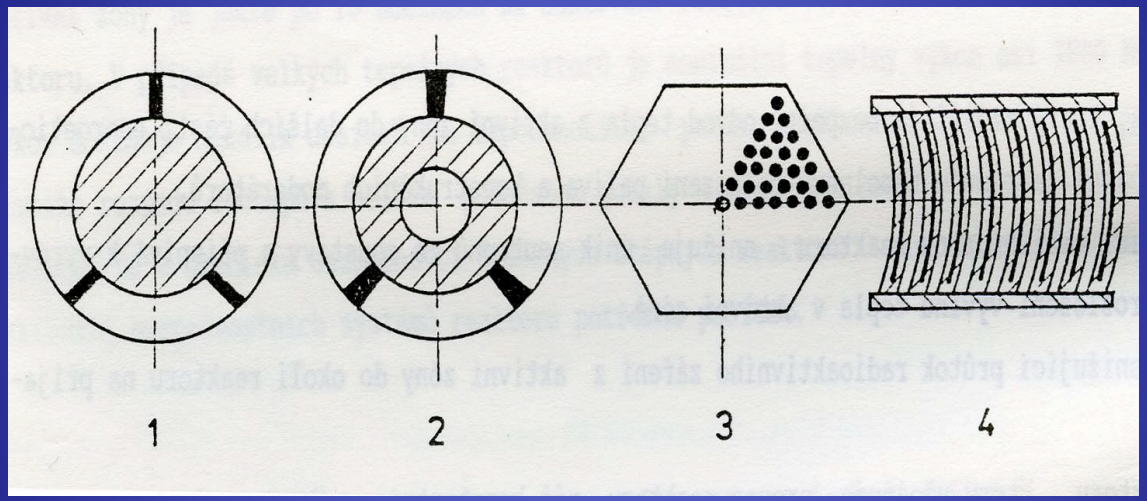
CC BY SA

Vlastnosti jaderných paliv

		Izotop	Výskyt	Užití
Uran	Teplotně stálý do 662°C	U233	Ne	Štěpný materiál
		U234	0,006%	
		U235	0,72%	Štěpný materiál
		U238	99,28%	Množivý materiál
thorium	Teplotně stálé do 1400°C	Th232	100%	Množivý materiál
Plutonium	Silně toxické	Pu239	Ve smolinci 10^{-9}%	Štěpivý materiál
		Pu240		
	Poločas rozpadu 14 let	Pu241		Štěpný materiál

CC BY SA

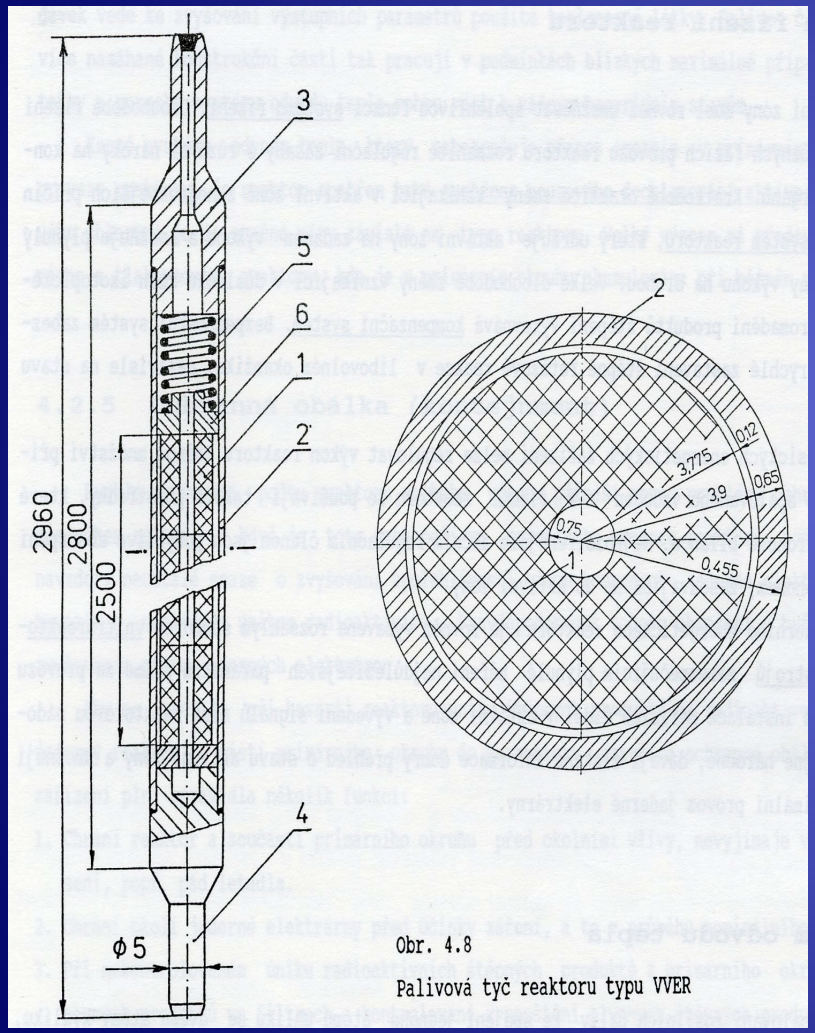
Palivové články



1-jednotyčový, 2-trubkový, 3-prutový, 4-destičkový

EVROPSKÁ UNIE
Evropský sociální fond
Praha & EU: Investujeme do vaší budoucnosti
CC BY SA
VŠCHT PRAHA

Palivová tyč reaktoru VVER



Obr. 4.8
Palivová tyč reaktoru typu VVER

1. Tableta UO2
2. Povlaková trubka
3. Horní koncovka
4. Dolní koncovka
5. Distanční pružina
6. Přítlačná destička
7. Opěrná destička

CC BY SA

Pokrytí paliva

- Zabraňuje přímému styku paliva z chladivem
- Mg a jeho slitiny
  - V reaktorech Magnox
  - Použitelné cca do 400°C, některé slitiny až 530°C
  - Silně korodují ve vodě a páře – ve vodou chlazených reaktorech nelze použít
- Zr a jeho slitiny
  - Vysoká teplota tání, vysoká korozní odolnost
  - Použití např. v reaktorech PWR a BWR
  - Běžné použití pro teploty 400 – 500°C, některé slitiny i do 700°C
- Austenitické oceli a slitiny Ni
  - Max. 400°C pro vodní chladivo, 550°C pro CO_2, některé slitiny až 700°C
  - Problém – vysokoteplotní křehnutí – lze snížit legováním bórem za cenu snížení korozní odolnosti

CC BY SA

Charakteristické parametry palivových článků

Parametr	Chladivo		
	Pára	plyn	sodík
Tlak chladiva [MPa]	12-16	7-9	0,7
Palivo	Oxidy U	Oxidy U Karbidy U Nitridy U	Oxidy U Karbidy U Nitridy U
Materiál pokrytí	Incaloy 800	AISI 316 Ocel 12R72HV Slitina vanadu	Ocel 4988 AISI 316 Ocel 12R7HV
Hlavní problémy	-Deformace tečením -Kompatibilita při vysokých T	-deformace tečením -kompatibilita	-Zvětšování průměru následkem tečení -kompatibilita

CC BY SA

Obohacení uranu

- Většina tepelných reaktorů používá uran obohacený o izotop U^{235}
- Obohacení může být:
  - nízké (do 5%)
  - střední (do 20%)
  - vysoké (do 93%)
- Dnešní energetické reaktory (PWR) používají zpravidla obohacení do 5%
- Větší obohacení používají výzkumné reaktory
- Kvůli nebezpečí zneužití štěpného materiálu je nyní snaha používat palivo s nižším obohacením i v experimentálních reaktorech

CC BY SA

Moderátory a reflektory

- Požadované parametry moderátoru:
  - Na jednu srážku s jádrem moderátoru musí připadat velká ztráta energie neutronu – ztráta energie se vyjadřuje jako *průměrný logaritmický úbytek (dekrement)* na jednu srážku $\xi = \ln(E/E')$
  - Veliká pravděpodobnost pro rozptylovou srážku neutronu Σ_r
  - Zpomalovací schopnost $\xi.\Sigma_r$
  - Malý účinný průřez pro absorpci neutronů Σ_a
  - Koeficient zpomalení $\frac{\xi\Sigma_r}{\Sigma_a}$
  - Dostatečná hustota
- Požadované parametry reflektoru
  - Co největší schopnost odrážet elektrony
  - Co nejmenší pravděpodobnost absorpce neutronu

→ Dobré moderátory bývají i dobrými reflektory

CC BY SA

Vlastnosti některých moderátorů

moderátor	ξ	h	Σ_r (b)	Σ_a (b)	$\xi\Sigma_r$	$\xi\Sigma_r/\Sigma_a$
H_2O	0.920	20	164	2.2	153	71
D_2O	0.509	36	35	0.0032	18	5670
Be	0.209	88	74	0.11	16	150
BeO	0.173	105	66	0.062	11	180
C	0.158	114	39	0.033	6.3	192
H	1.0	18				
D	0.725	25				
He	0.425	43				83
Na	0.084	217				1134
Fe	0.035	520				35
^{238}U	0.008	2170				0.0092

počet srážek nutných na zpomalení (ze 2 MeV na tepelnou energii)

$$h = \frac{\ln\left(\frac{2\times10^6}{0.025}\right)}{\xi}$$

CC BY SA

Výhody a nevýhody některých moderátorů

- Lehká a těžká voda
  - Korozní agresivita
  - Relativně nízký bod varu
  - Radiační rozklad vody
- Grafit
  - \+ Nízká cena
  - \+ Pevnost
  - \+ Obrobitelnost
  - \+ Žáruvzdornost
  - \+ Dobrá tepelná vodivost
  - Horší moderační vlastnosti v porovnání s vodou
  - Radiační růst (puchnutí) grafitu + změna dalších vlastností v radiaci (tepelná a elektrická vodivost, pružnost, atd.)

CC BY SA

Výhody a nevýhody některých moderátorů

- Berylium
  - \+ Velmi nízký absorpční průřez pro tepelné neutrony a dobrý průřez pro jejich rozptyl
  - \+ Nízká hmotnost, vysoká pevnost
  - – Vzácné
  - – Těžko zpracovatelné
  - – Drahé
  - – Toxické
  - – Za vyšších (nad 600°C) teplot velmi chemicky reaktivní, zejména s vlhkostí v plynu

CC BY SA

Zkratky některých typů reaktorů

AGR	Advanced gas cooled, graphite moderated reactor
BHWR	Boiling heavy water moderated and cooled reactor
BWR	Boiling light water moderated and cooled reactor
FBR	Fast breeder reactor
GCFBR	Gas cooled, fast breeder reactor
GCR	Gas cooled, graphite moderated reactor
HTGR	High temperature gas cooled, graphite moderated reactor
HWGCR	Heavy water moderated, gas cooled reactor
HWLWR	Heavy water moderated, light water cooled reactor
LMFBR	Liquid metal cooled, fast breeder reactor
LWGR	Light water cooled , graphite moderated reactor (RBMK)
PHWR	Pressurized heavy water moderated and cooled reactor
PWR	Pressurized light water moderated and cooled reactor

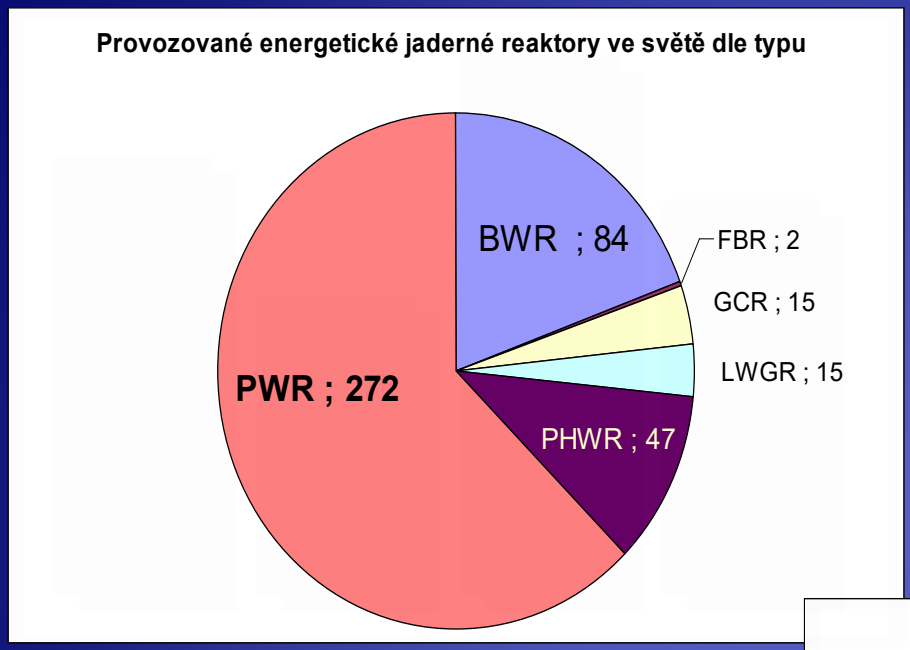
CC BY SA

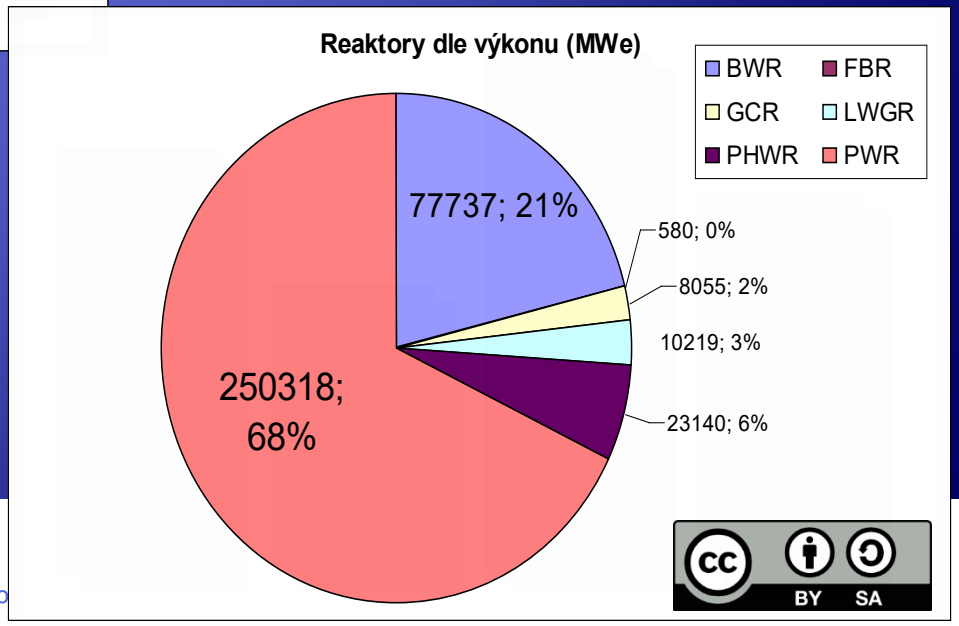
Základní typy jaderných reaktorů

Označení podle energie	Označení podle moderátoru	Chladivo	Zkratka podle IAEA
Tepelné reaktory	Lehkovodní reaktory (LWR)	H_2O	PWR Tlakovodní reaktor
			BWR Varný reaktor
	Grafitové reaktory	CO_2	GCR Magnoxový reaktor
			AGR Zdokonalený plynem chlazený reaktor
		He	HTGR Vysokoteplotní reaktor
		H_2O	LWGR Grafitový reaktor chlazený H_2O (RBMK)
	Těžkovodní reaktory	D_2O	PHWR Těžkovodní reaktor CANDU
		H_2O	HWLWR Těžkovodní reaktor chlazený H_2O
Rychlé reaktory		Na	FBR Rychlý množivý reaktor

CC BY SA

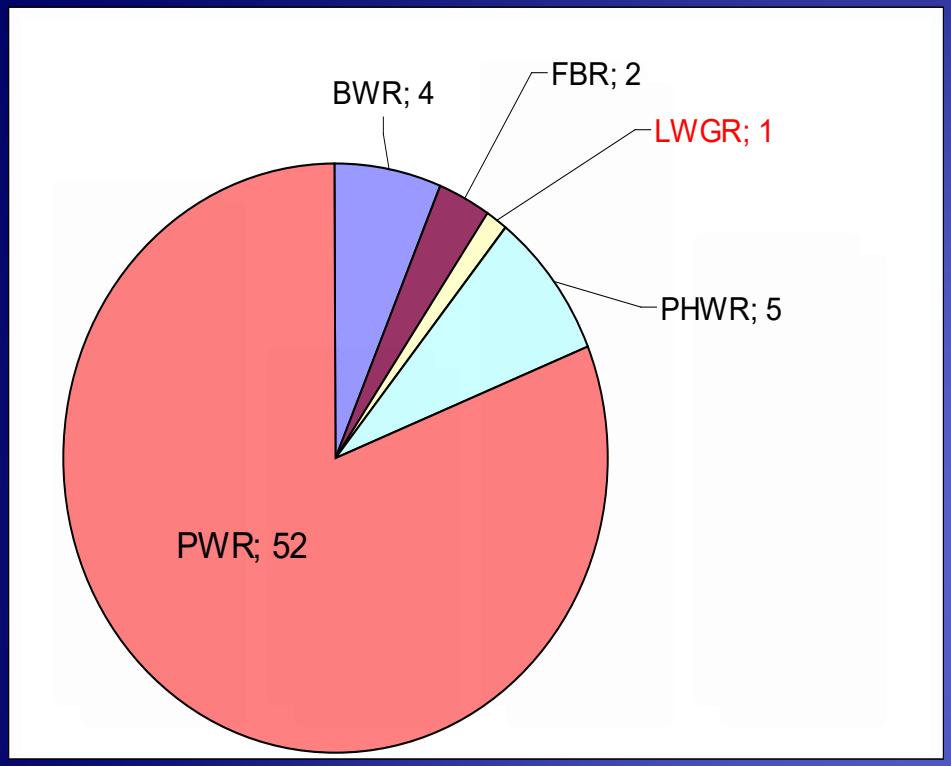
Typy reaktorů ve světě

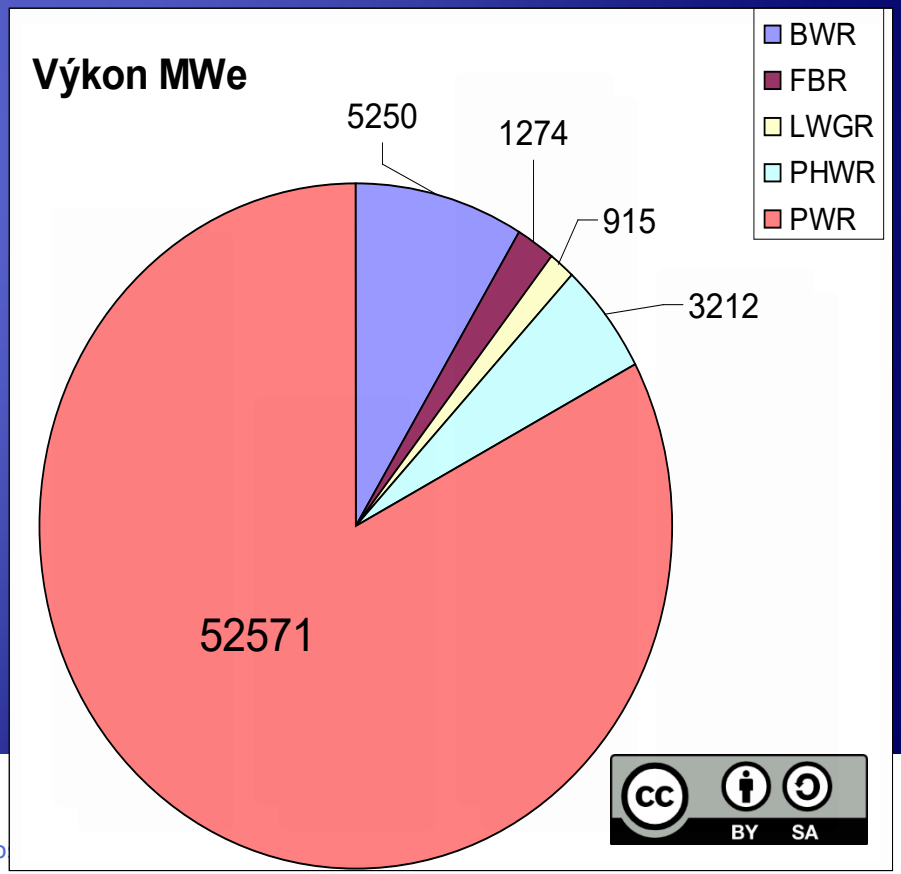




OPPA PRAHA PRAGUE PRAG
EVROPSKÁ UNIE
Evropský sociální fond
Praha & EU: Investujeme do vaší budo
CC BY SA

Reaktory ve výstavbě – dle typu a výkonu





Rekapitulace

- Světová produkce JE
- Počet reaktorů v jednotlivých zemích, zastoupení dle typů
- Využití jaderné energie
- Způsoby získávání JE
- Základní pojmy a definice
  - Jaderný reaktor
  - Moderátor
  - Reflektor
  - Atd.
- Řetězová reakce v jaderném reaktoru

CC BY SA

Rekapitulace

- Uvolňování energie při jaderné rakci
- Historie jaderné energetiky, generace jaderných reaktorů
- Základy jaderné fyziky
- Záření α, β, γ
- Důležité pojmy
  - Multiplikační koeficient
  - Regenerační faktor
  - Reaktivita
  - Otrava X zamoření reaktoru
- Vývin tepla v reaktoru, zbytková produkce tepla a vliv na bezpečnost

CC BY SA

Rekapitulace

- Typy jaderných elektráren dle počtu okruhů
- Ekologické aspekty využívání JE
- Jaderný reaktor a jeho součásti
- Typy jaderných reaktorů

CC BY SA

Použité zdroje

- J. Bečvář: Jaderné elektrárny, SNTL, rok vydání: 1981, ISBN: 04-237-81
- Ľ. Jelemenský, J. Labovský, Z. Labovská, J. Markoš: Hodnotenie nebezpečenstva chemických procesov,Slovenská technická univerzita v Bratislave 2011,
- Z. Kříž: Vznik a historie státního dozoru nad jadernou bezpečností Československé komise pro atomovou energii (1970-1992), Zsolt Staník, Praha 2012, ISBN: 978-80-904045-4-0
- B. Heřmanský, I. Štoll: Energie pro 21. století, ČVUT 1992, ISBN: 80-01-00817-7
- Interní materiály Ú216 VŠCHT
- Interní materiály skupiny ÚJV Řež
- https://pris.iaea.org/pris/home.aspx
- http://www.world-nuclear.org/outlook/clean_energy_need.html
- **Doc. Ing. P. Otčenášek: Jaderná energie.**

CC BY SA



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ, MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

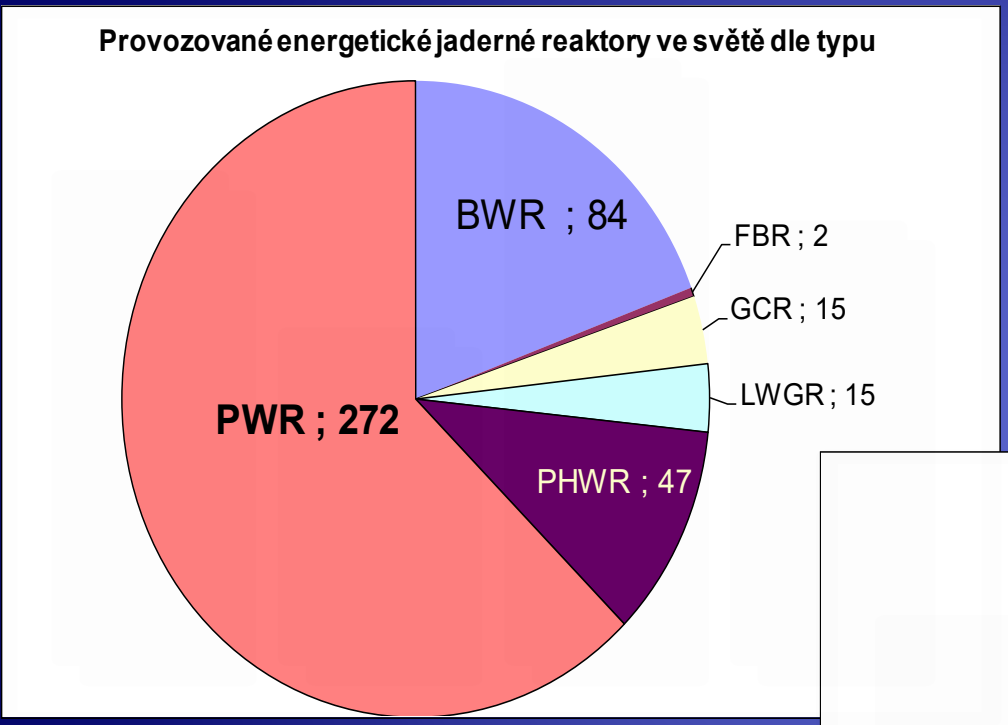
4. Bezpečnost s spolehlivost v jaderné energetice – 2/3

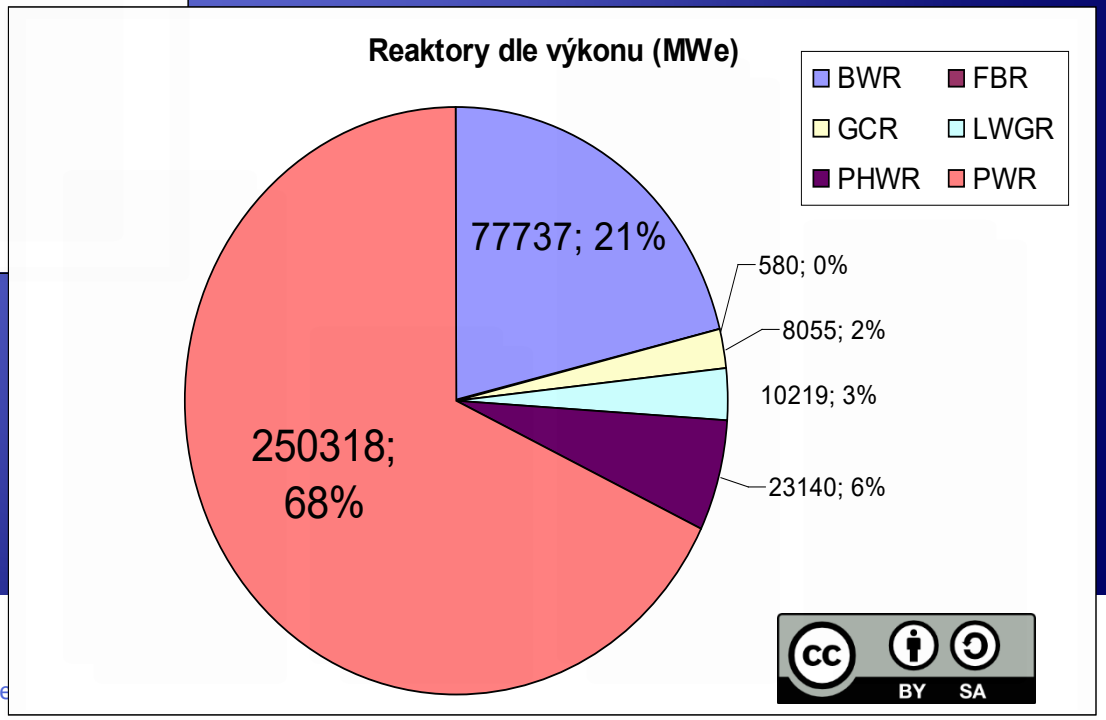
Bezpečnost a spolehlivost v energetice a průmyslu - M216019

Jan Berka

Dílo podléhá licenci Creative Commons 4.0 Česko
Uveďte původ - Zachovejte licenci

Typy jaderných reaktorů ve světě





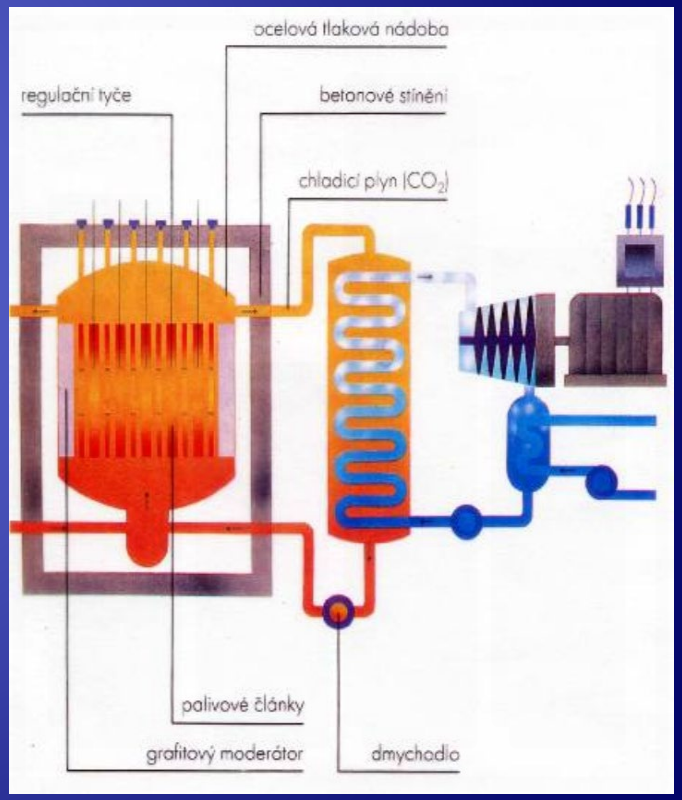
OPPA PRAHA PRAGUE PRAGA PRAG
EVROPSKÁ UNIE
Evropský sociální fond
Praha & EU: Investujeme
CC BY SA

Některé typy reaktorů

- Nejstarší (Fermiho) reaktor -1942 - grafitem moderovaný, vzduchem chlazený
- Plynem chlazené grafitové reaktory na přírodní uran – MAGNOX:

Typické parametry reaktoru Magnox (600 MW):

- ❑ palivo: Kovový přírodní uran (s obsahem 0.7% ^{235}U)
- ❑ rozměry aktivní zóny: 14 m průměr a 8 m výška
- ❑ tlak CO_2: 2.75 MPa
- ❑ teplota CO_2 na výstupu reaktoru: 400°C (omezení kvůli Mg pokrytí paliva)
- ❑ účinnost elektrárny: 25.8%
- ❑ Rozšíření: Velká Británie, v minulosti i Francie



CC BY SA

AGR - Advanced Gas Cooled, Graphite Moderated Reactor

- Snaha o větší efektivitu oproti typu MAGNOX
- Provozovány ve Velké Británii
- palivem je U obohacený izotopem ^{235}U ve formě UO_2
- moderátor: grafit
- chladivo: CO_2

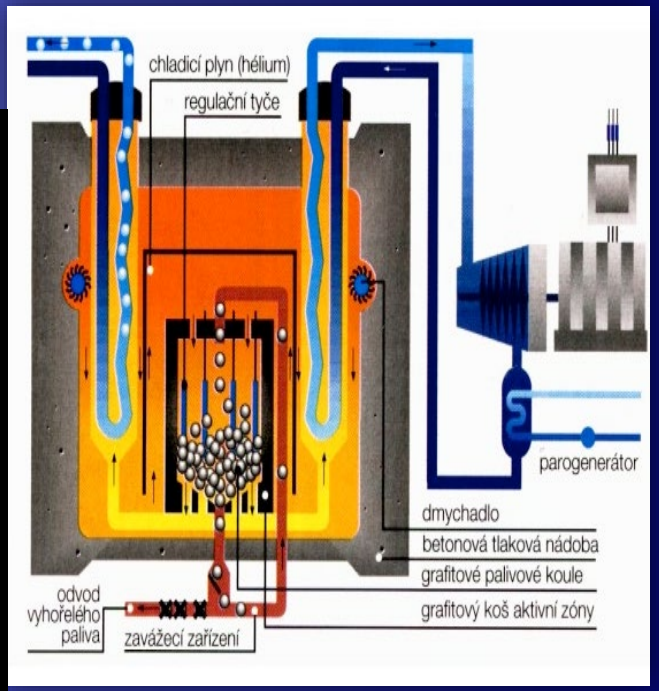
Typické parametry reaktoru AGR (s výkonem 600 MW):

- obohacení uranu izotopem ^{235}U: 2,3%
- rozměry aktivní zóny: 9,1 m průměr a 8,5 m výška
- tlak CO_2: 3,16 – 4,53 MPa
- teplota CO_2 na výstupu reaktoru: **650 -675°C**
- Max. jednotkový výkon 1500 MWt
- Tlaková nádoba z předpjatého betonu
- dvouokruhová elektrárna

EVROPSKÁ UNIE
Evropský sociální fond
Praha & EU: Investujeme do vaší budoucnosti
BY SA
VŠCHT PRAHA

Vysokoteplotní plynem chlazené grafitové reaktory (HTGR)

- Provozovány v USA (Oak Ridge 1964, Peach Bottom 1967, Fort St. Vrain 1974), NSR (AVR, Julich 1966, THTR 300 1986)
- Nyní již žádný neběží s výjimkou experimentálních: HTTR (Japonsko) a HTR-10 (Čína)
- vývoj prototyp PBMR – JAR pozastaven



Hlavní parametry

- Chladivo: Helium
- max. teplota chladiva: 825°C (AVR), tlak 4,8 MPa
- Moderátor: grafit
- Obohacení paliva: 4,2 – 92%
- Počítá se s U-Th Palivovým cyklem
- Palivo: UO2 + 3 vrstvy SiC (TRISO) a grafitu v kuličkách (výměna za provozu) nebo v blocích (americký typ)
- výkon: 330 MWe (Fort St. Vrain), byly ale projektovány i 1000 MWe bloky



SO (Tri-isotrop
ivo

CC BY SA

VŠCHT PRAHA

Vysokoteplotní plynem chlazené grafitové reaktory (HTGR, HTR)

- Vyšší účinnosti díky vyšší teplotě chladiva – význam pro ekologii
- Vysoká teplota dává možnost k přímému využití procesního tepla v technologických procesech – např. výrobě vodíku – znamená nižší produkci CO_2
- Díky vysokým teplotám a tlakům chladiva jsou kladeny značné nároky na konstrukční materiály
- Zatím provozovány dvouokruhové elektrárny s parovodním sekundárním okruhem
- Uvažovalo se o přímém cyklu s plynovou turbinou a přímém využití vysoké teploty chladiva
- Tlakové nádoby (Fort St. Vrain) z předpjatého betonu síla stěn 2,75 m, betonové víko a dno 4,72 m, výška nádoby 32,3 m, minimální šířka 14,9 m

EVROPSKÁ UNIE
Evropský sociální fond
Praha & EU: Investujeme do vaší budoucnosti
CC BY SA
VŠCHT PRAHA

Základní parametry demonstračních elektráren s HTGR

Reaktor	THTR-300 SRN	Fort St. Vrain USA
Elektrický výkon, MWe	307,5	342
Tepelný výkon, MW	750	842
Účinnost JE, %	39	
Tlak He v reaktoru, MPa	3,92	4,8
Teplota He na výstupu, °C	750	778
Střední obohacení paliva, %	93	93,15
Měrné zatížení AZ, MW/m^3	6	6,3
Max. teplota paliva, °C	1050	1260
Počet parních generátorů	6	12
Množství páry, t/h	155	96
Počet oběhových dmychadel	6	4
Počet turbin	1	1
Tlak páry před turbinou, MPa	17,15	16,87
Teplota páry před turbinou, °C	530	533

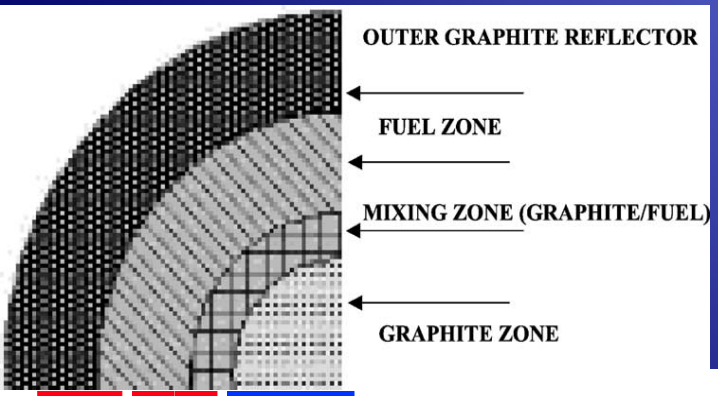
cc BY SA

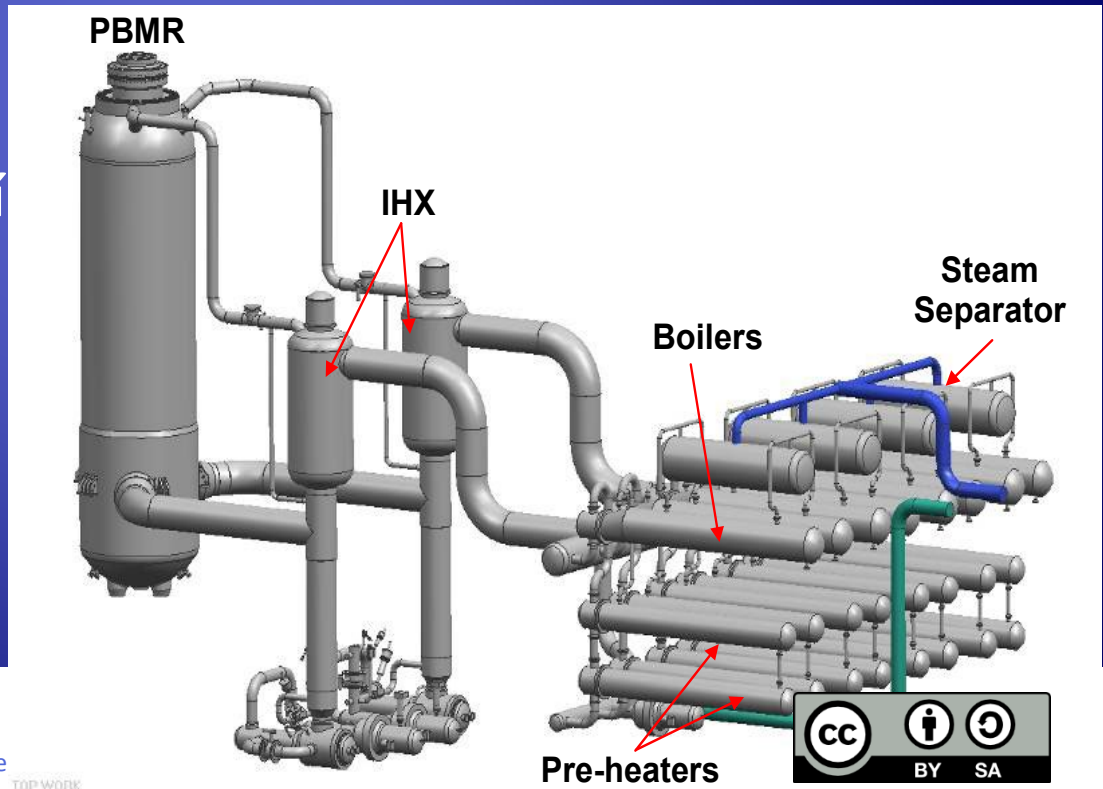
Reaktor PBMR

(Peble Bed Modular Reactor)

- Vychází z koncepce HTGR
- Je řazen do III. generace jaderných reaktorů
- Blíží se požadavkům IV. Generace
- Se stavbou se počítalo v JAR, nyní pozastaveno
- Chladivo – helium, moderátor grafit

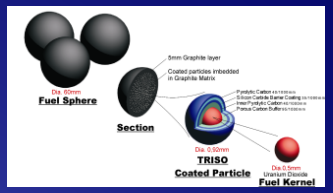
❑**Modulární uspořádání – umožňuje variabilní propojení modulů dle požadavků**





EVROPSKÁ UNIE
Evropský sociální fond
Praha & EU: Investujeme
CC BY SA

PBMR - palivo

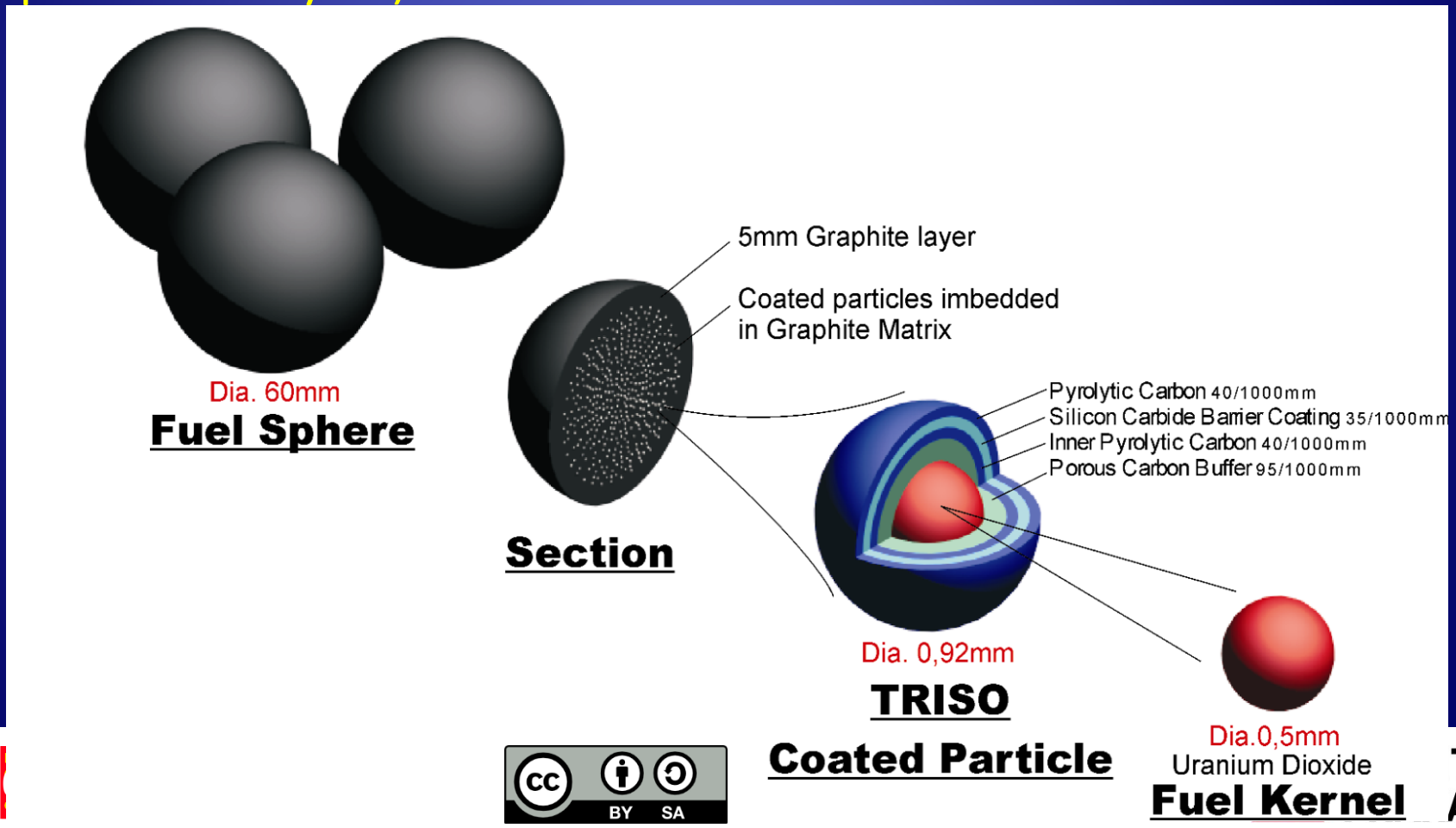


- Ve formě grafitových koulí 6 cm v průměru – cca 330.000 v aktivní zóně + přidává se cca 100.000 koulí je z grafitu pro lepší rozložení teploty a regulaci výkonu
- Koule dobře odolávají tlaku a dobře je z jejich povrchu odváděno teplo
- Každá koule obsahuje cca 15.000 částic UO_2 (alternativně lze využít i U + Th)
- Každá částice se stává z několika povlaků SiC a C – nepropustné pro produkty štěpení i při teplotních výkyvech (např. při ztrátě chladiva)
- Je vypočteno, že max. dosažitelná teplota koule je cca 1600°C, ale k její poškození dochází až nad 2000°C, nebezpečí tavení aktivní zóny je eliminováno – jeden z hlavních bezpečnostních prvků
- Kontinuální výměna paliva za provozu
- Zajištěno vysoké vyhoření paliva

EVROPSKÁ UNIE
Evropský sociální fond
Praha & EU: Investujeme do vaší budoucnosti
CC BY SA
VŠCHT PRAHA

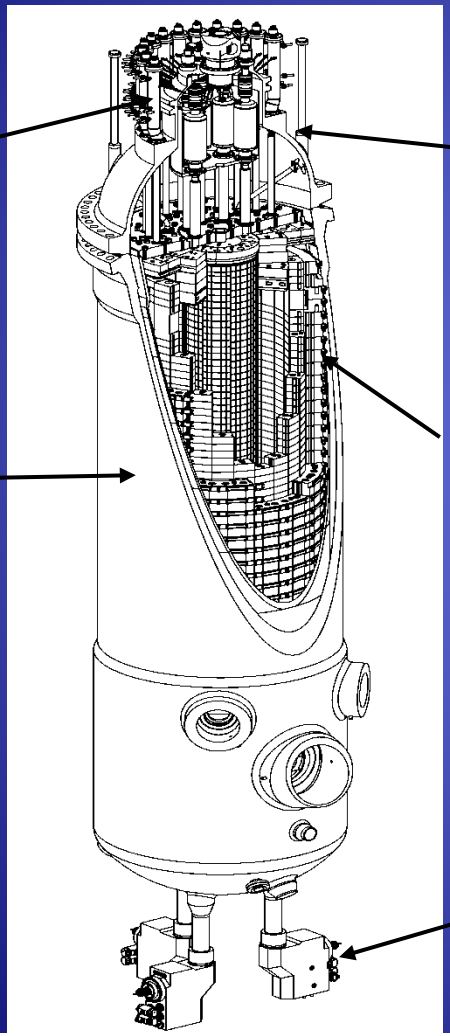
PBMR - palivo

- Vyhořelé palivo není atraktivní pro získávání štěpných produktů pro vojenské účely
- Na druhou stranu je složité jeho přepracování (vliv na ekologii palivového cyklu)



CC BY SA

Schéma PBMR reaktoru



Systém	Funkce
Struktura jádra	Udržuje geometrii jádra
Tlaková nádoba	Udržuje tlak helia
Systém řízení reaktivity	Řízení reaktivity a odstavení reaktoru
Rezervní systém pro odstavení	Odstavení reaktoru
Zařízení pro odstranění paliva	Odstranění palivových koulí z jádra reaktoru

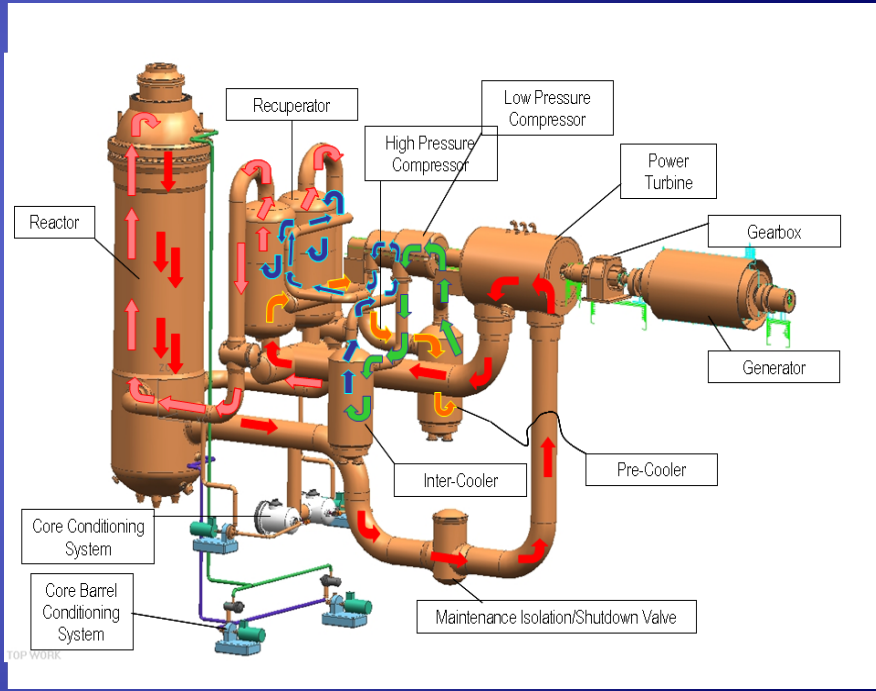
OPPA PRAHA PRAGUE PRAGA EVROPSKÁ UNIE
Evropský sociální fond
Praha & EU: Investujeme do vaší budoucnosti

CC BY SA

VŠCHT PRAHA

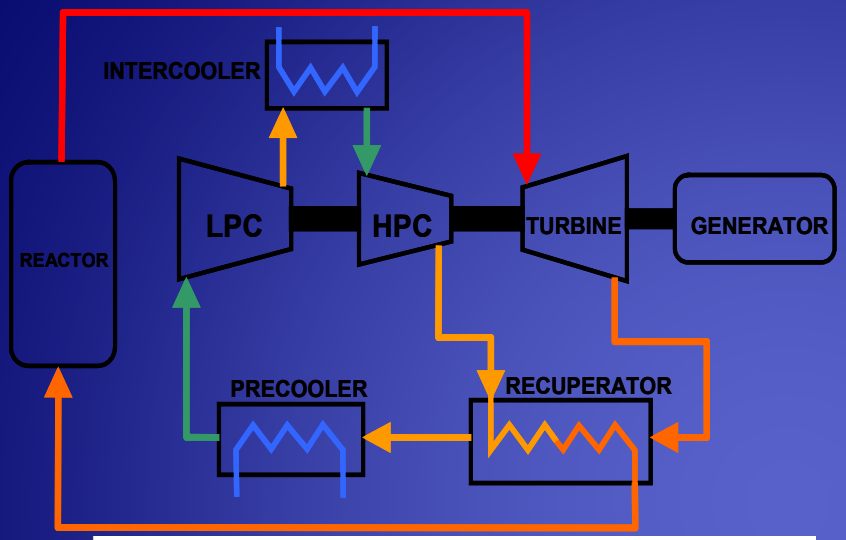
PBMR - charakteristiky

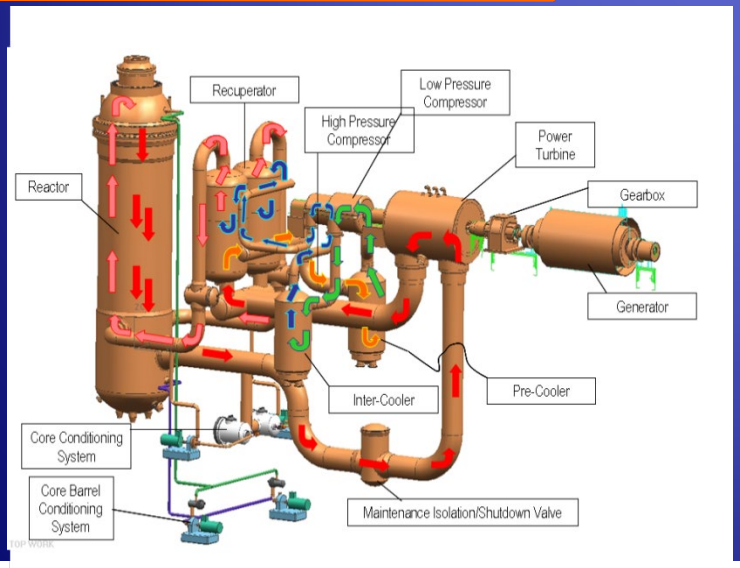
- Teplota chladiva na výstupu z aktivní zóny - 900 – 950°C při 8,1 MPa
- Uvažuje se pro využití vysoké teploty chladiva při výrobě H_2, odsolování mořské vody a dalších technologických procesech, nebo přímé zapojení turbiny v primárním okruhu pracující v Braytonově cyklu pro výrobu elektřiny – účinnost až 40%
- Záporný teplotní koeficient reaktivity (příznivý pro bezpečnost)

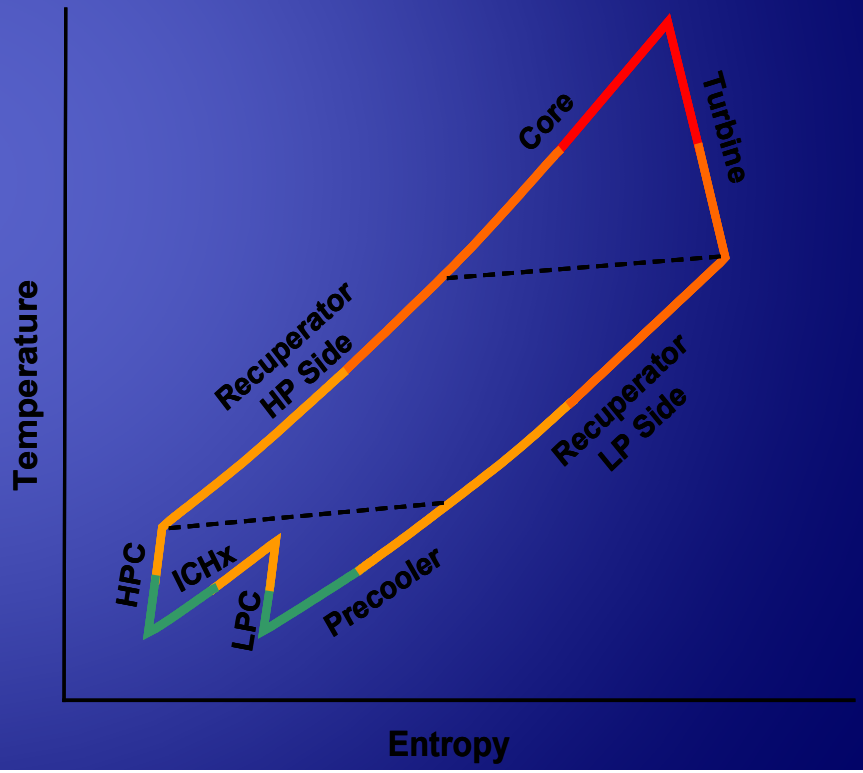


CC BY SA

PBMR Braytonův cyklus

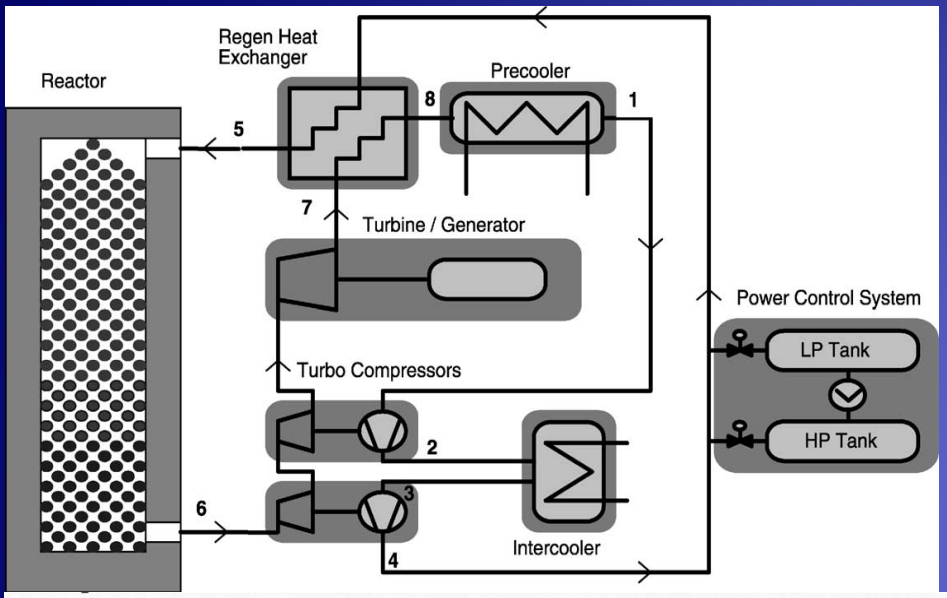


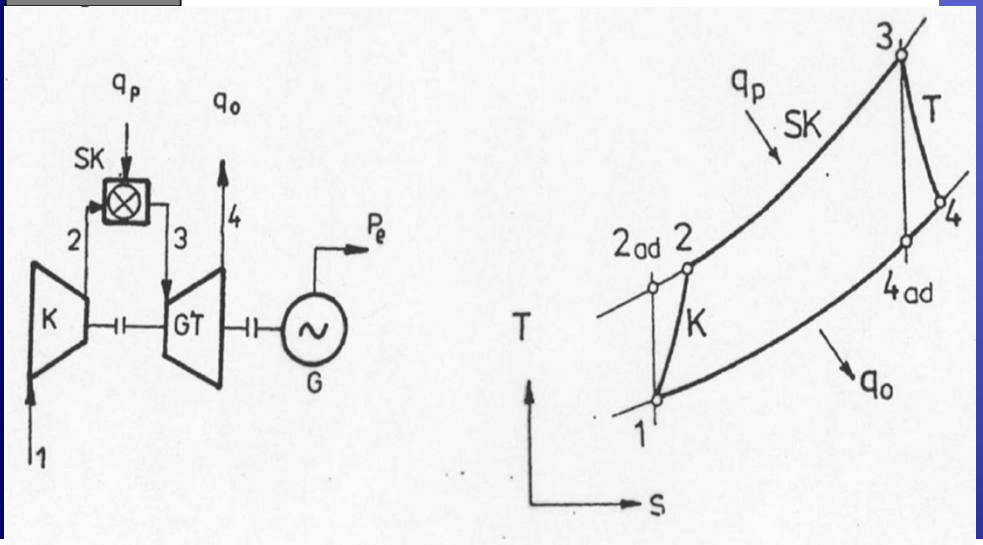


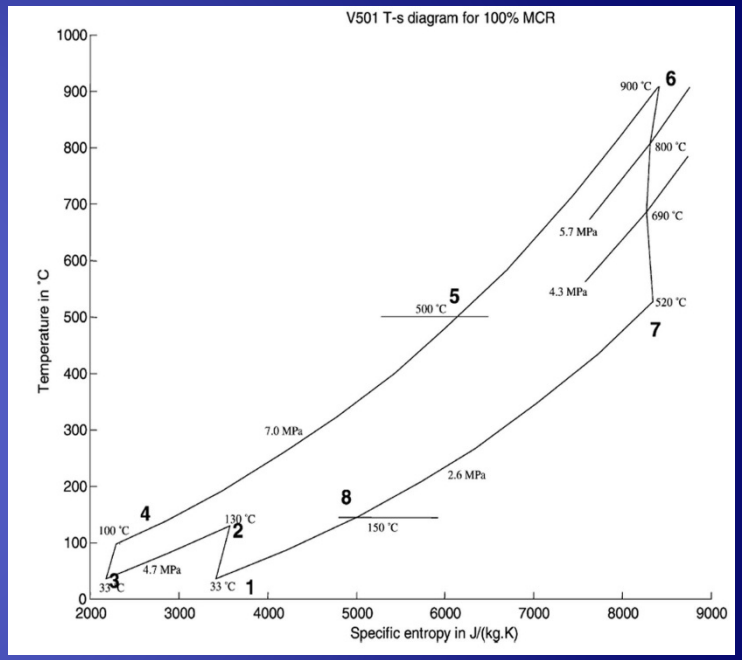


CC BY SA

PBMR Braytonův cyklus







Jednoduchá (téměř ideální) aplikace, dvě adiabaty, dvě izobary

CC BY SA

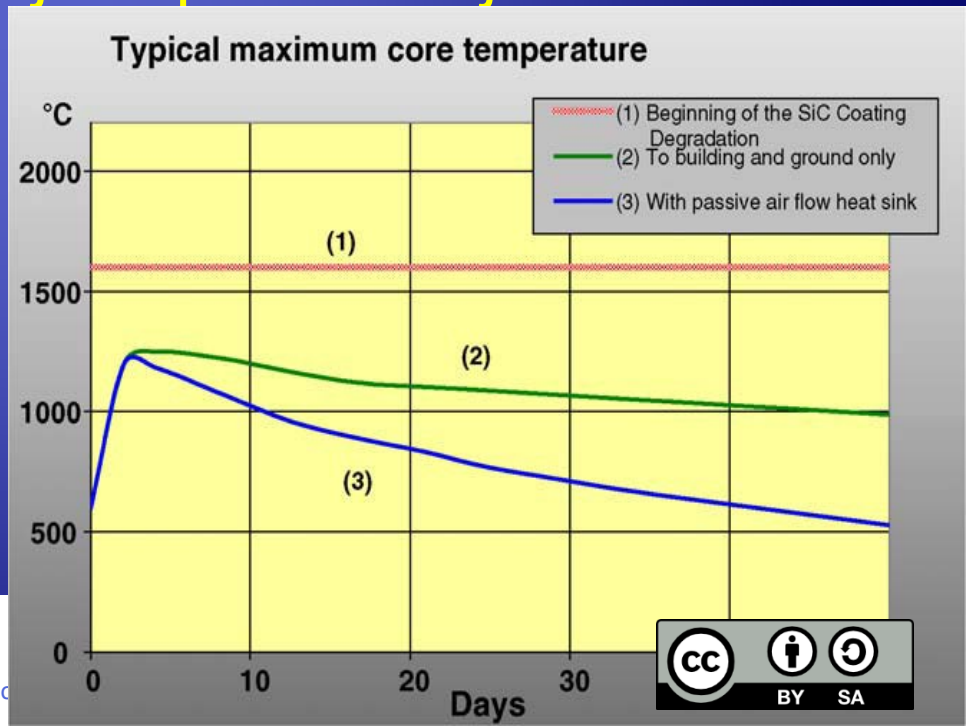
PBMR – výzkum a vývoj

- Zlepšení designu paliva
- Minimalizace radioaktivních odpadů
- Dekontaminace plynného chladiva
- Zvýšení životnosti
- Vývoj systému měření teploty paliva
- Vývoj výměníku tepla pro 950°C na straně chladiva
- Vývoj keramických řídicích tyčí
- Obavy ze zamoření turbiny v primárním okruhu prachem obsahujícím štěpné produkty → úvahy o návratu k dvouokruhovému uspořádání s PG

EVROPSKÁ UNIE
Evropský sociální fond
Praha & EU: Investujeme do vaší budoucnosti
BY SA
VŠCHT PRAHA

Bezpečnost reaktorů typu HTGR

- Design se liší od současně nejužívanějších reaktorů – LWR a BWR
- U LWR a BWR – jsou bezpečnostní analýzy vztaženy k riziku možnosti roztavení aktivní zóny po havárii
- Bezpečnostní studie pro LWR jsou pro HTGR jen těžko použitelné



Principy inherentní bezpečnosti moderních konceptů HTGR

- Částice paliva obalené vrstvami SiC a grafitu mají mnohem lepší odolnost vůči vysoké teplotě než palivo s kovovým obalem → první bariéra proti úniku štěpných produktů z paliva je mimořádně odolná
- Výrazně negativní teplotní koeficient HTGR → odstavení reaktoru i při malém nárůstu teploty nad normální stav
- Využití inertního plynu (He) jako chladiva a vysoce teplotně stabilního grafitu jako moderátoru
- Vysoká teplotní setrvačnost grafitu a jádra reaktoru, nízká hustota energie cca 10 MW/m^3 (LWR cca 50 MW/m^3) → malý nárůst teploty i v případě ztráty chlazení
- Možnost pasivního chlazení aktivní zóny při velkém poměru povrchu k objemu→udržení maximální teploty paliva pod teplotou, při které dojde k destrukci keramického obalu

EVROPSKÁ UNIE
Evropský sociální fond
Praha & EU: Investujeme do vaší budoucnosti
CC BY SA
VŠCHT PRAHA

HTGR – některé uvažované nehody

- Změna reaktivity v důsledku modifikace konfigurace jádra reaktoru
- Zablokování kanálů pro průtok chladiva
- Selhání hranice tlakového okruhu chladiva
- Vniknutí vzduchu s nebezpečím hoření grafitového jádra
- Vniknutí vody do primárního okruhu
- Kontaminace radioaktivními produkty při normálním provozu a při havárii (zkušenosti z provozu prototypů HTR ukazují, že toto riziko je relativně nízké)
- Utržení lopatek plynové turbiny

EVROPSKÁ UNIE
Evropský sociální fond
Praha & EU: Investujeme do vaší budoucnosti
BY SA
VŠCHT PRAHA

HTGR – hodnocení rizika úniku štěpných produktů

- Možnosti úniku štěpných produktů mimo reaktor:
  - Při úniku kontaminovaného chladiva z primárního okruhu nebo zásobního tanku
  - Při údržbě nebo inspekci systému
- Bariérou proti úniku štěpných produktů je obal paliva
- Určitá část štěpných produktů projde do primárního okruhu a systému čištění chladiva
- Adsorpce a desorpce štěpných produktů na povrchy v primárním okruhu
- Přítomnost štěpných produktů adsorbovaných v prachu v primárním okruhu

EVROPSKÁ UNIE
Evropský sociální fond
Praha & EU: Investujeme do vaší budoucnosti
BY SA
VŠCHT PRAHA

Štěpné produkty uvažované v systémech HTGR

FP	Poločas rozpadu	Vlastnosti
^{134}Cs	2,1 roku	Relativně snadná difúze z jádra paliva, hlavně při t>1200°C
^{137}Cs	30 let	Vysoký záchyt v grafitu
^{90}Sr	29 let	Rychlá difúze skrz SiC Snadný záchyt v palivovém jádru a matrici
^{131}I	8 dní	Uvolňován z poškozených palivových elementů
^{110m}Ag	250 dní	Rychlá migrace skrz pokrytí i jádro paliva Nejvyšší uvolňování z paliva Významné uvolňování během normálního provozu (Permeace skrz SiC)
^{85}Kr	11 let	Indikátor defektních palivových částic
^{133}Xe	5,3 dne	Shromažďuje se v systému čištění

OPPA PRAHA PRAGUE PRAGA
EVROPSKÁ UNIE
Evropský sociální fond
Praha & EU: Investujeme do vaší budoucnosti
CC BY SA
VŠCHT PRAHA

Omezení emise štěpných produktů

- Během stabilního provozu by teplota paliva neměla přesáhnout 1100°C
- Maximální teplota a maximální vyhoření paliva (resp. Kombinace obojího) mají být pod limitními hodnotami, při kterých ještě nedochází k úniku neušlechtilých kovů (Sr, Cs) z paliva (<1650°C, <10% FIMA)
- Vznik vzácných kovů (Ag), které nemohou být efektivně zachycovány, má být minimalizován složením paliva (štěpení Pu vede ke zvýšenému vzniku Ag)

Kontrolní otázka:

Proč se u některých reaktorů V/HTR používala jako palivo směs Th + U235 místo U238 a U235?

CC BY SA

Reaktory moderované těžkou vodou (HWR)

- atraktivnost těžkovodních reaktorů založena na 2 fyzikálních vlastnostech:
  - nízká absorpce (Σ_a) n $\Rightarrow$ dovoluje vysoké vyhoření paliva
  - U Th-U palivového cyklu umožňuje těžkovodní moderátor množení při použití tepelných neutronů
  - krátká migrační délka n (velké $\xi\Sigma_s/\Sigma_a$) $\Rightarrow$ kompaktní uspořádání aktivní zóny

Existuje několik typů těchto reaktorů

CC BY SA

Reaktory moderované těžkou vodou (HWR)

- tlakový, těžkou vodou chlazený a moderovaný reaktor PHWR
  (Pressurized Heavy Water Moderated and Cooled Reactor)
  - palivem je přírodní uran
  - jedním z těchto reaktorů je reaktor CANDU
- těžkou vodou moderovaný a plynem chlazený reaktor HWGCR
  (Heavy Water Moderated Gas Cooled Reactor)
  - A1 Jaslovské Bohunice (vývoj ukončen havárií 1977)
  - palivem je přírodní uran
- těžkou vodou moderovaný, lehkou vodou chlazený varný reaktor HWLWR
  (Heavy Water Moderated Boiling Light Water Cooled Reactor)
  - palivem je přírodní nebo nízko obohacený U (do 4%)
- varný reaktor moderovaný a chlazený těžkou vodou BHWR
  - (Boiling Heavy Water Cooled and Moderated Reactor)
  - palivem je přírodní uran

CC BY SA

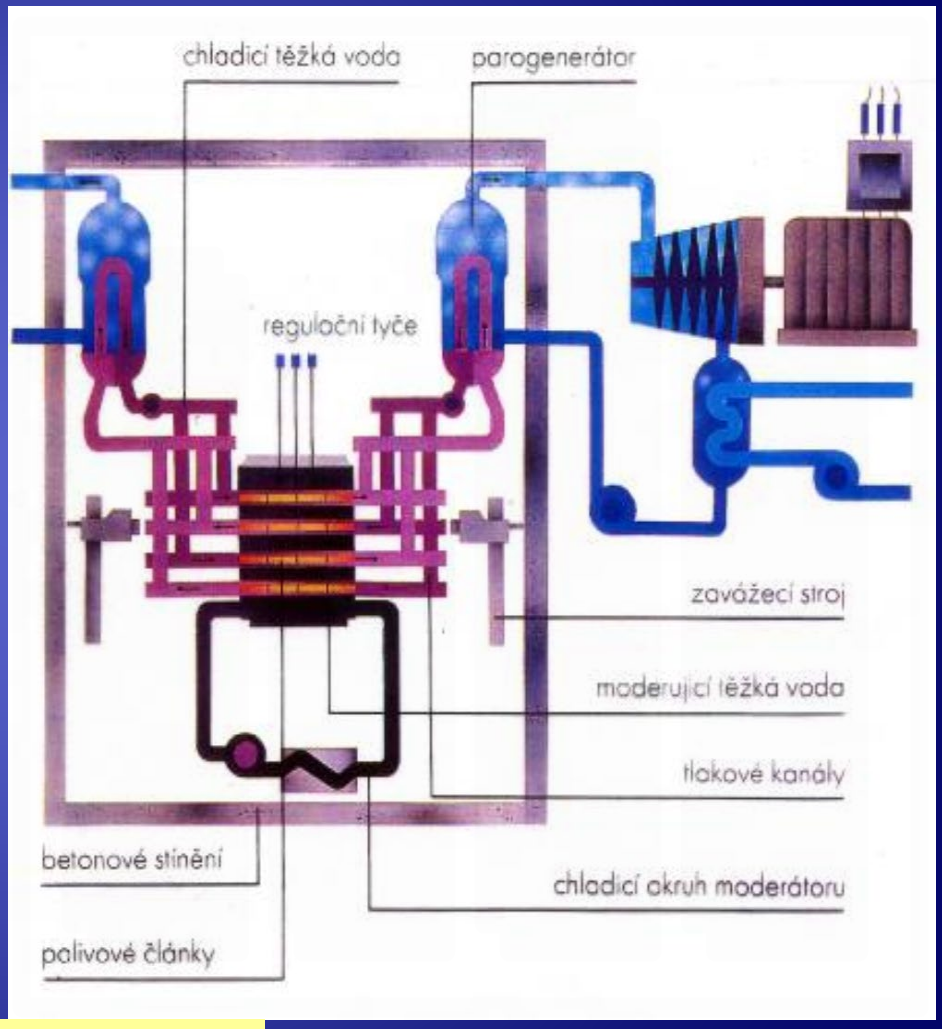
Reaktory moderované těžkou vodou

- Bezpečnost – vyžaduje se záporný výkonový koeficient reaktivity – tomu nevyhovují BHWR a HWLWR na přírodní uran
- CANDU reaktor
  - tlakový, těžkou vodou chlazený a moderovaný reaktor (PHWR)
  - byl vyvinut v Kanadě a exportován do Indie, Pákistánu, Argentiny, Koreje a Rumunska
  - palivem je přírodní uran ve formě UO_2
  - aktivní zóna je v nádobě tvaru ležícího válce z austenitické oceli o průměru 8,1 m a délce 8,25 m, která má v sobě vodorovné průduchy pro tlakové trubky
  - těžkovodní moderátor v nádobě musí být chlazen, neboť moderační schopnost se snižuje se zvyšující se teplotou
  - těžká voda z prvního chladicího okruhu předává své teplo obyčejné vodě v parogenerátoru, odkud se vede pára na turbínu.

CC BY SA

CANDU reaktor

- Typické parametry reaktoru CANDU (s výkonem 600 MWe):
- rozměry aktivní zóny: 7 m průměr a 5,9 m výška
- tlak těžké vody v reaktoru: 9,3 MPa
- teplota těžké vody na výstupu reaktoru: 305°C
- tepelná účinnost elektrárny: 30,1%
- množství paliva v reaktoru: 117 tun UO_2.
- Umožňuje výměnu paliva za provozu



Kontrolní otázka:

Jaké reaktory mohou využívat přírodní uran?

CC BY SA

VŠCHT PRAHA

Lehkovodní reaktory s obohaceným uranem

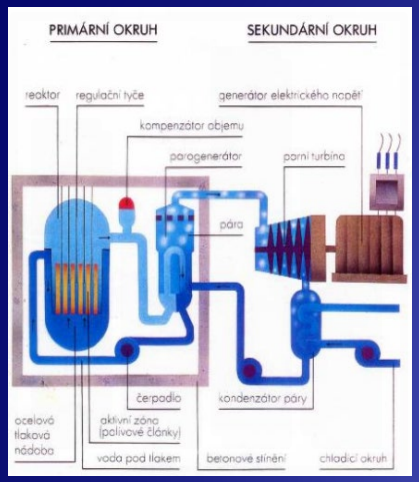
- Původně vyvinuté jako ponorkové reaktory – lehké, kompaktní řešení
- Náročné na uranovou surovinu, uran musí být obohacen
- existují 2 základní typy:
  - tlakovodní reaktor (PWR) (1957 – Shippingport, USA)
    - PWR - Pressurized light-Water moderated and cooled Reactor
    - VVER - Vodo-Vodjanoj Energetičeskij Reaktor) (ruský typ)
    - Tohoto typu jsou jaderné elektrárny v ČR- Dukovany, Temelín
  - varný reaktor (BWR) – pára vzniká přímo v aktivní zóně (1960 – Dresden, USA) lze páru užít pro pohon turbíny
    - BWR - Boiling Water Reactor
- výborné autoregulační vlastnosti (vysoký záporný T koef. reaktivity)
- technickým limitem není ocelová tlaková nádoba, ale teplota povlaků palivových článků z hlediska dlouhodobých mechanických vlastností a koroze
  - užívají se materiály na bázi Zr (T musí být menší než 380°C)

CC BY SA



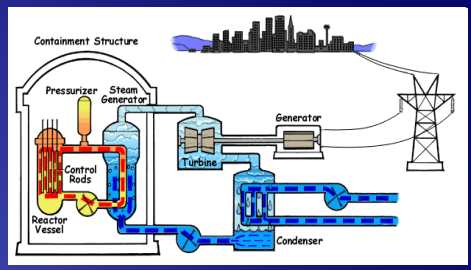


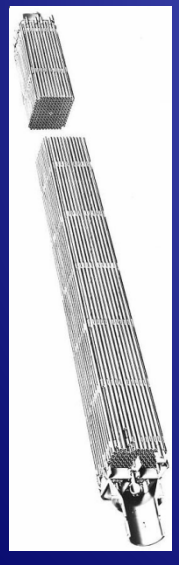
Tlakovodní reaktor PWR

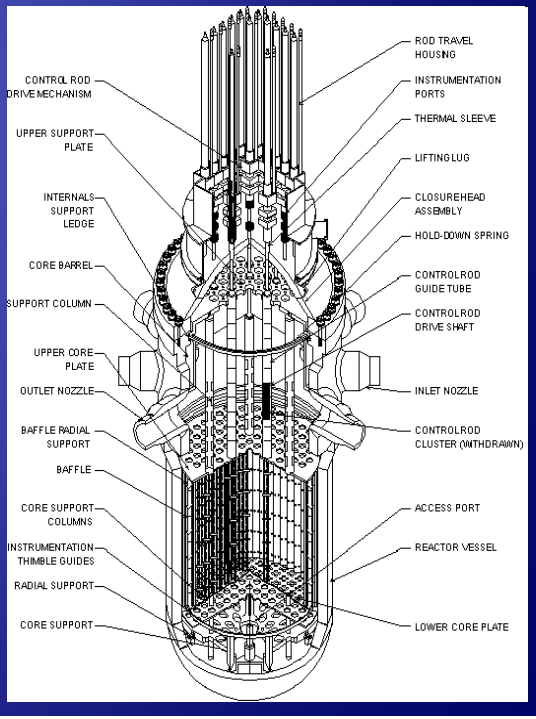


Typické parametry reaktoru VVER-1000:

- obohacení U izotopem ^{235}U: 3,1% až 5%
- rozměry aktivní zóny: 3 m průměr a 3,5 m výška
- tlak vody: 15,7 MPa
- Ocelová tlaková nádoba
- teplota vody na vstupu/výstupu reaktoru: 290/324°C
- účinnost elektrárny: 32,7%
- množství paliva v reaktoru: 60 až 80 tun UO_2
- Kampaňová výměna paliva (každý rok 1/3)
- Plánovány jsou i reaktory o výkonu 6000 MWt (2 GWe)







CC BY SA

PWR

- 1953 první PWR USA-pohon pro ponorku Nautilus
- 1957 – první prototypová elektrárna Shippingport, USA, 100 MWe
- V současnosti nejvíce využívaný energetický reaktor
- Smyčkové uspořádání: 2 – 6 smyček
- Jednoduchost, spolehlivost, nejvíce rysů s klasickou elektrárnou
- Nevyžaduje využití méně běžných materiálů

CC BY SA

Řízení reaktoru PWR

(některé typy se mohou lišit)

- Řízení pomocí 185 křížových absorpčních tyčí. U starších reaktorů ovládané zdola hydraulicky – neodpovídá požadavku na pasivní bezpečnost. U novějších reaktorů – ovládáno shora (možnost zasunutí tyče gravitační silou bez nutnosti vnějšího zdroje energie).
- Absorpční materiál – karbid boru
- + regulace aktivní zóny intenzitou vnitřní cirkulace (změnou otáček cirkulačních čerpadel)
- Dlouhodobá reaktivita - regulace pomocí absorpčních pásů (tyčí)
- Havarijní zastavení – vražením absorpčních tyčí do zóny (tzv. havarijní tyče, které se spustí do zóny za 0,1 s) + vstřik pentaboritanu sodného do moderátoru

CC BY SA

Bezpečnost reaktorů VVER

- Během vývoje bylo vyráběno několik typů
- VVER 440 typ 230
  - Vyvinut v SSSR v 60. letech 20. stol.
  - Zastaralá bezpečnostní koncepce (kompenzována menším zatížením komponet)
  - Největší projektovaná havárie – trhlina 32 mm v primárním okruhu
  - Elektrárny tohoto typu: 3. a 4. blok JE Voroněž, 1. a 2. blok JE Kola, 4 bloky JE Greisfald, 4 bloky JE Kozloduj, 2 bloky JE V1 Jaslovské Bohunice
  - Dnes většinou odstavené, JE Kozloduj přežila bez vážnějších následků i zemětřesení 7. stupně v r. 1977

CC BY SA

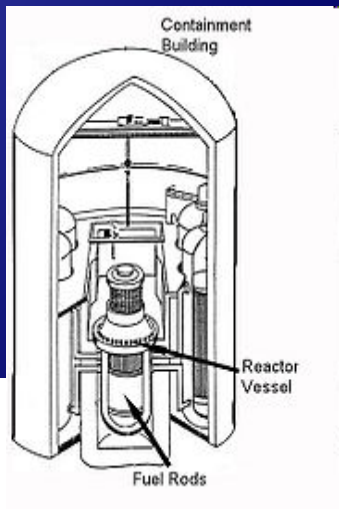
Bezpečnost reaktorů PWR (VVER)

- VVER 440 typ 213
  - Výrazně zvýšena bezpečnost oproti typu 230
  - Největší projektovaná havárie, kterou by měl reaktor ustát bez vlivu na okolí – prasknutí hlavního potrubí primárního okruhu
  - Vybaven barbotážním systémem – v případě havárie v něm dojde ke kondenzaci vzniklé páry → snížení tlaku
  - Použití zvláštních palivových kazet se spodní části vyplněnou palivem a horní pohlcovačem neutronů – v případě nouzového odstavení spadnou kazety volným pádem na dno palivového kanálu → dojde ke snížení množství paliva v zóně a zároveň k zastavení reakce pohlcením neutronů
  - Je konstruován na vyšší výkon než je projektovaných 440 MWe. Lze jej zvýšit úpravami (např. vyšším obohacením paliva) až na 510 MWe
  - Nejrozšířenější typ jaderného reaktoru v Evropě a v Rusku – např. JE Dukovany, JE Paks, JE Jaslovské Bohunice V2 a JE Mochovce (jeden blok)

CC BY SA

Bezpečnost reaktorů PWR (VVER)

- VVER 1000 – zahrnuje typy V-187 (5. blok JE Voroněž), V-302, V320 (JE Temelín)
  - Max. projektovaná havárie bez vlivu na okolí – prasknutí potrubí primárního okruhu spojené se zemětřesením a výpadkem vnějšího napájení
  - Čtyři smyčky primárního okruhu
  - Řízení pouze měnou množství pohlcovače neutronů v aktivní zóně
  - Pohlcovač neutronů má formu klastrů (souborů 18 řídících tyčí). Klastry jsou poháněny krokovým elektromechanickým motorem. V případě havarijního odstavení spadnou volným pádem do aktivní zóny
  - Tyto typy již mají navržený kontejnment
- Další vývoj: typy VVER 1000 V-392 a VVER 1000 V-466
  - Zjednodušení koncepce, posílení aktivní i pasivní bezpečnosti
  - Patří do generace III



OPPA PRAHA PRAGUE PRAGA PRAG EVROPSKÁ UNIE
Evropský sociální fond
Praha & EU: Investujeme do vaší budoucnosti
CC BY SA

Vývojové tendence PWR

- Zvyšování jednotkového výkonu reaktoru
  - Na začátku 70 let max. 665 MWe, nyní běžné 1000 MWe, v plánu až 2000 MWe
- Zvýšení pohotovosti elektrárny
  - Se současnými typy lze dosáhnout až 80%, cílem je 90% u pokročilých typů
  - Zkrácení odstávek, opatření zvyšující spolehlivost a snižující neplánované výpadky
- Snížení profesionální radiační expozice
  - Snížení doby pro výměnu paliva, dálková údržba

CC BY SA

Vývojové tendence PWR

- Zvyšování bezpečnosti
  - Snížení rizika havárií s tavením AZ na 10^{-6}
  - Posilování pasivních bezpečnostních prvků
  - Použití plnotlaké obálky, nejčastěji s dvojitým pláštěm
  - Zdokonalený systém havarijního chlazení AZ
  - zamezení rizika obnažení AZ při havárii – zvětšení obsahu vody nad AZ
  - Ochrana proti nadměrnému nárůstu tlaku a zlepšení průběhu přechodových stavů při haváriích – zvětšení kompenzátorů objemu a další úpravy
  - Zlepšení metod sledování stavu materiálů komponet, diagnostiky změn

CC BY SA

PWR s vysokou konverzí paliva (APWR)

- Současná generace – nízké využití přírodního uranu
- Obsah U235 v přírodním uranu je 071% - v otevřeném palivovém cyklu bez přepracování lze využít kolem 0,6% přírodního uranu
- V uzavřeném palivovém cyklu s přepracováním paliva a recyklací Pu lze teoreticky využít přírod. uranu: $\frac{0,71}{1-b}$
- U tepelných reaktorů konverzní faktor (poměr nově vzniklých jader k vyhořelým) b<1
- Dnešní PWR: b=0,55 →využití přírodního uranu cca 1%
- b lze zvýšit až na 0,9 u APWR →využití 5-10%
- Toho lze dosáhnout podmoderováním AZ→epitermální spektrum neutronů (1-10^4 eV)

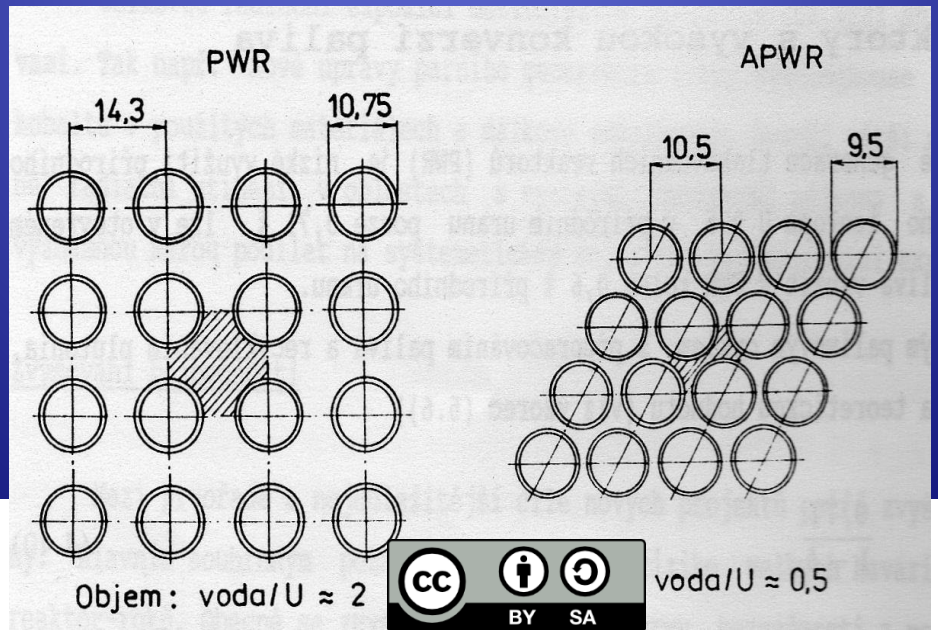
CC BY SA

Podmoderování AZ u APWR

- U současných PWR V_M/V_U=cca 2, v epitermálních reaktorech cca 0,5
- Změna geometrie AZ – šestihranné palivové články, těsná mříž

→Zvýší se tlaková ztráta a rychlost průtoku chladiva AZ

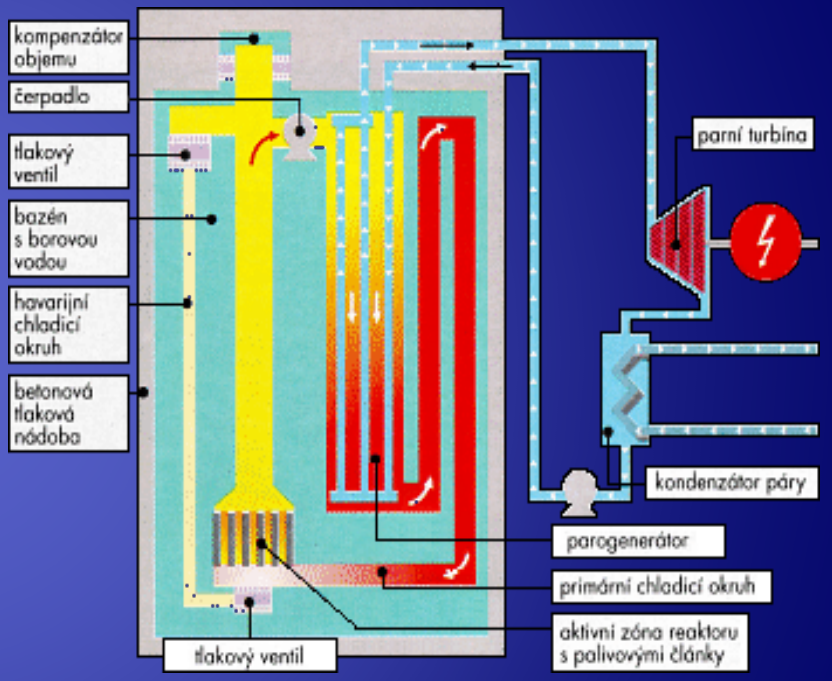
- Obohacení paliva Pu_f (Pu239 a 241)na 7-9%



CC BY SA

Projekty na koncepci PIUS (Process Inherent Ultimate Safe)

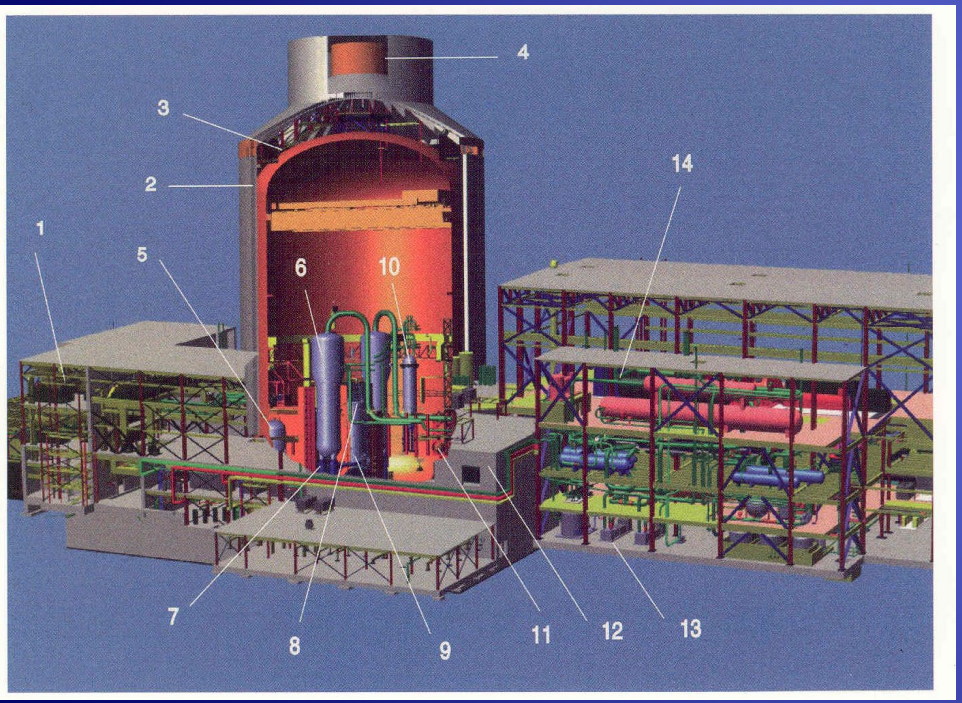
- Reaktor umístěný v podzemí v bazénu s vodou s bórem (cca 2300 m^3)
- V případě výpadku oběhového čerpadla nebo havarijního převýšení výkonu AZ dojde k nasátí vody z bazénu do reaktoru, přirozené cirkulaci a odstavení reaktoru
- Přirozené chlazení 1600 MWt reaktoru cca 1 týden



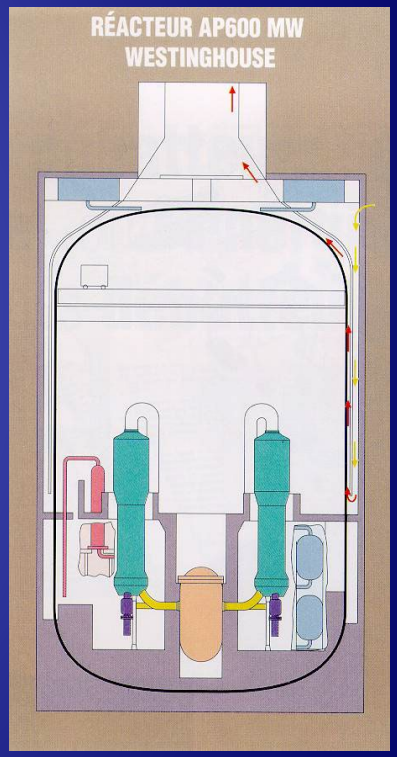
CC BY SA

Pokročilé reaktory typu PWR (generace III)

Toshiba-Westinghouse AP600 & AP1000 (1000 MWe)



- 1000 MWe per unit
- 90%+ plant availability
- 60 years operating lifetime
- No greenhouse emissions
- 18 to 24 month fuel cycles
- 36 month construction schedule from first concrete to fuel load



AP1000 **AP600**

EVROPSKÁ UNIE
Evropský sociální fond
Praha & EU: Investujeme do vaší budoucnosti

CC BY SA

VŠCHT PRAHA

EPR – European Pressurized water Reactor

AREVA

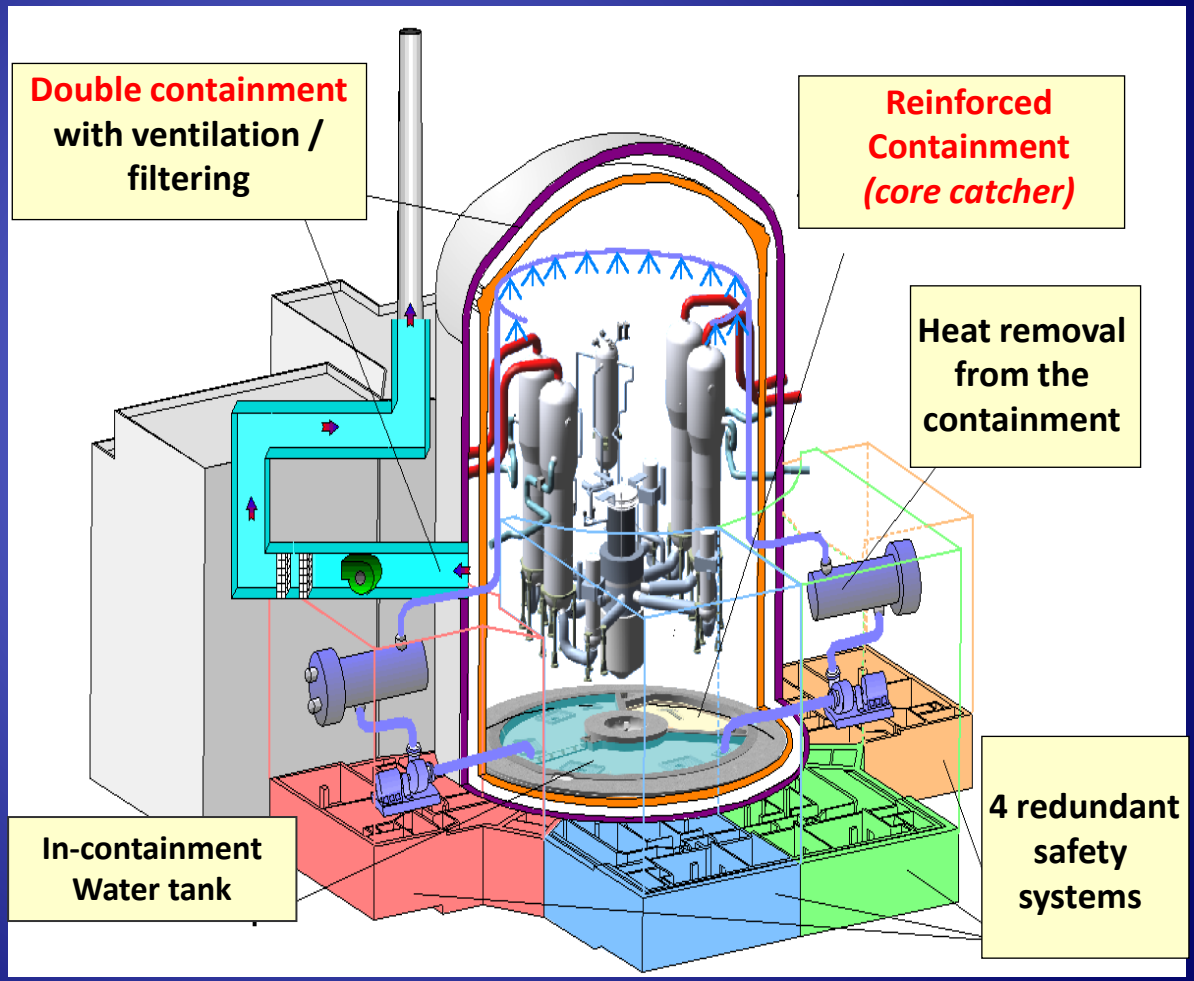
PWR, 1600 MWe, 60 years, KD~91%

EPR Flamanville *(2012)*



EPR Olkiluoto *(2012)*





Reinforced safety features and economic competitiveness

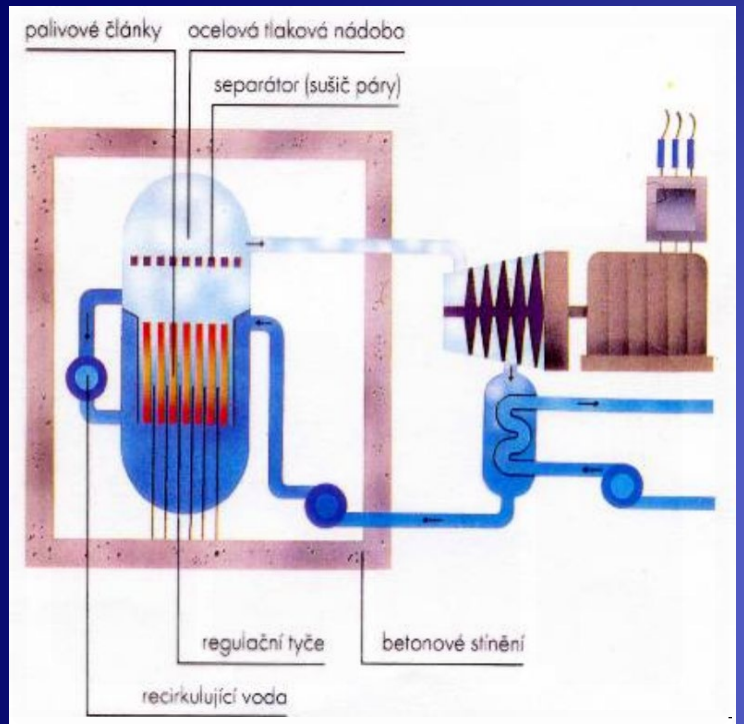
CC BY SA

Cíle pokročilých typů PWR

- Zvýšení konkurenceschopnosti
  - Zvýšení životnosti
  - Zkrácení doby nutné na stavbu elektrárny
  - Zvýšená flexibilita
  - Zlepšené využití paliva
- Bezpečnost zajištěna na nejvyšší možné úrovni
- Lepší využití na konci palivového cyklu (možnost využití přepracovaného paliva)

CC BY SA

Valrný lehkovodní reaktor (BWR)



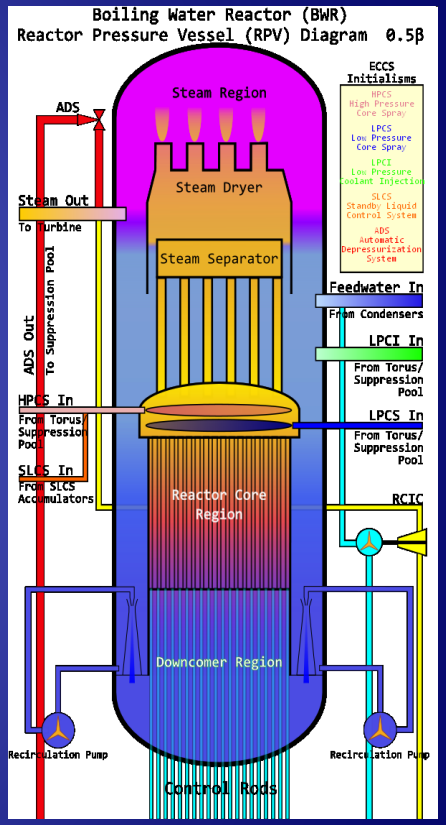
Typické parametry BWR
(s výkonem 1000 MW):

- obohacení U izotopem ^{235}U: 2,1% až 2,6%
- rozměry aktivní zóny: 4,5 m průměr a 3,7 m výška
- tlak vody v reaktoru: 7 Mpa
- teplota páry na výstupu z reaktoru: 286°C
- tepelná účinnost elektrárny: 33,3%
- množství paliva v reaktoru: 122,3 tuny UO_2
- Jednookruhová elektrárna

CC BY SA

Výhody a nevýhody BWR

+ Nižší tlak než u PWR
+ Nižší tepelné zatížení paliva
- Tlaková nádoba je větší než u PWR
- O něco nižší účinnost
- Regulační tyče umístěny dole, na jejich pohon je třeba zdroj energie
- Turbina v primárním okruhu může být zamořena štěpnými produkty – nutno hlídat jejich koncentraci v primárním okruhu



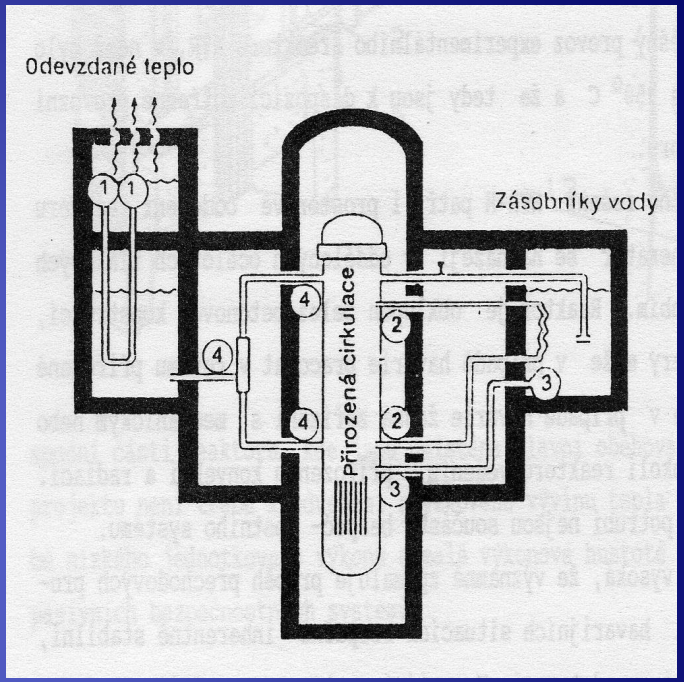
Kontrolní otázka:

Jaký moderátor používají plynem chlazené reaktory typu MAGNOX a HTGR?

CC BY SA

Zjednodušený varný reaktor SBWR

- Přirozená cirkulace chladiva. Odpadá využití hlavních cirkulačních čerpadel
- Snížení měrného výkonu v AZ
- Samostatný kondenzátor schopný odvádět veškerý tepelný výkon AZ
- Gravitační pasivní systém nouzového chlazení – dochlazování v případě ztráty chladiva
- Uvažuje se o zasouvání regulačních tyčí shora (nouzová regulace na principu gravitace)

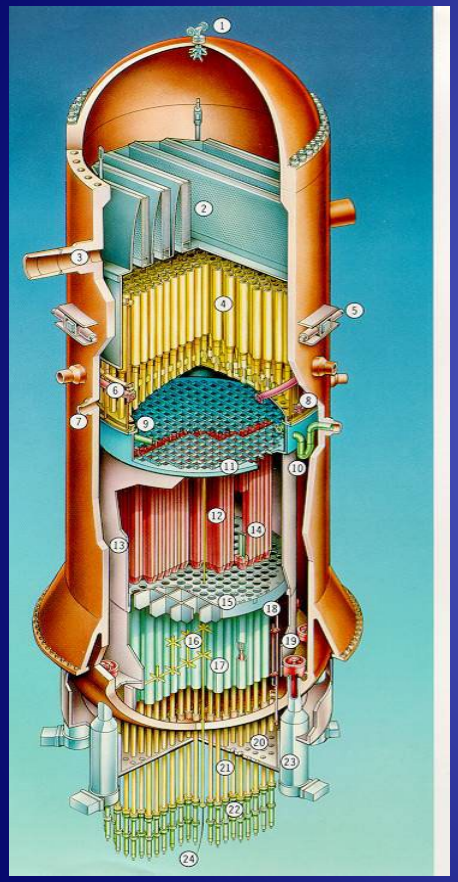


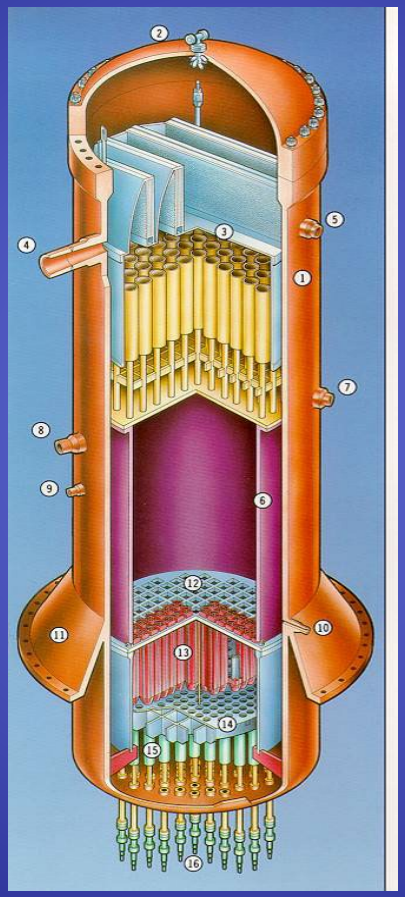
1. Pasivní systém chlazení kontejnmentu
2. Kondenzátor pro chod naprázdno
3. Samostatně pracující chladící systém
4. Pasivní přívod chladící vody (parní injektor)

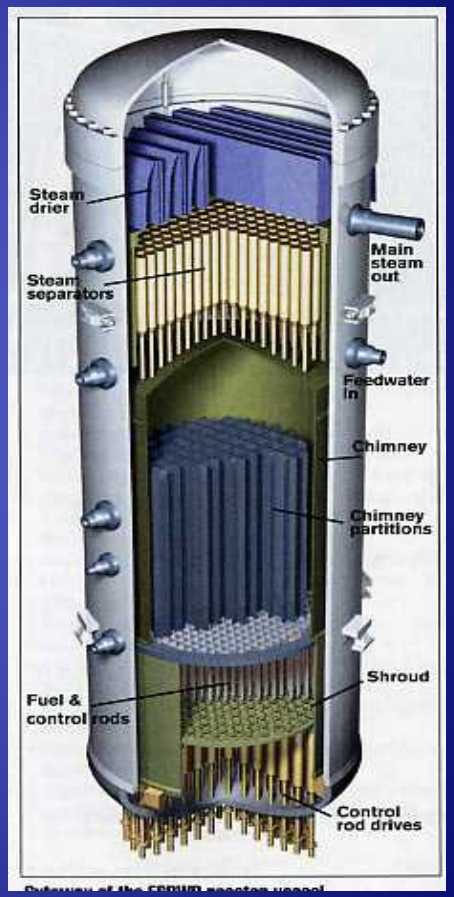
CC BY SA

Pokročilé typy BWR (generace III a III+)

GE ABWR *(1350 MWe)* and ESBWR *(1520 MWe)*







ABWR **SBWR** **ESBWR**

Chemie primárního okruhu PWR, BWR

- Požadavky na chemický režim chladiva:
  - minimální úbytky konstrukčních materiálů zařízení
  - Potlačení selektivní koroze
  - potlačení tvorby nánosů a usazenin na teplosměnných plochách
  - Vyloučení nežádoucích absorbentů (ovlivnění neutronové bilance nečistotami)
  - Umožnění chemické regulace reaktivity
  - Potlačení transportu korozních produktů a jejich aktivace v aktivní zóně reaktoru, potlačení kontaminace okruhu
  - Potlačení radiolýzy vody
  - Odstranění plynů z primárního okruhu v případě porušení povlaků palivových článků.

CC BY SA

Chemické látky v chladivu PWR, BWR

- Používá se velmi čistá voda s přísadou různých chemických látek
- Do chladiva se dostávají látky vznikající radiolýzou, korozí, aj.
- Chemické látky v chladivu
  - Chemikálie pro úpravu (alkalizační prostředky aj.)
  - Sloučeniny bóru (H_3BO_4)
  - Korozní a štěpné produkty
  - Plynné látky (H_2, N_2 aj.)
  - Atd.

CC BY SA

Radiolýza vody

- Velmi složitý proces, lze zjednodušeně vysvětlit takto:
  - Působením záření vznikají radikály a ionty H_2O^+, H_2O^*
  - Následují radikálové reakce:

$$2H_2O \rightarrow H_2 + H_2O_2$$
$$2H_2O \rightarrow 2H\bullet + H_2O_2$$
$$H_2O \rightarrow H\bullet + OH\bullet$$

- Vznikají molekuly vodíku a peroxidu vodíku
- Průběh a produkty radiolýzy závisí na přítomnosti různých součástí a nečistot ve vodě (oxidace organických molekul radikály aj.)
- Velký vliv – přítomnost O_2 ($>10^{-6}$ kmol.m^{-3}) – podporuje vznik peroxidu vodíku před rekombinací radikálů na H_2O:

$$O_2 + H\bullet \rightarrow HO_2\bullet$$
$$HO_2\bullet + HO_2\bullet \rightarrow H_2O_2 + O_2$$

Jaké riziko představuje vznik vodíku v energetických zařízeních?

CC BY SA

Radionuklidy v primárním okruhu

Radioaktivní nuklid	Matečný nuklid	Reakce vzniku	Poločas rozpadu	Energie γ-záření, MeV
^{60}Co	^{59}Co	n,p	5,26 let	1,17; 1,33
	^{60}Ni	n,γ		
^{59}Fe	^{58}Fe	n,γ	44,6 dne	1,1; 1,24
^{54}Mn	^{54}Fe	n,p	312,5 dne	0,835
^{58}Co	^{58}Ni	n,p	71,3 dne	0,511; 0,805
^{51}Cr	^{50}Cr	n,γ	27,7 dne	0,322
^{56}Mn	^{55}Mn	n,γ	2,6 hod	0,845; 1,81; 2,12
^{64}Cu	^{63}Cu	n,γ	12,8 hod	1,34
^{24}Na	^{27}Al	n,α	15 hod	0,437; 1,37; 2,75
^{95}Zr	^{94}Zr	n,γ	65,5 dne	0,722; 0,754
^{122}Sb	^{121}Sb	n,γ	2,75 dne	0,566; 0,692; 1,137; 1,258
^{124}Sb	^{123}Sb	n,γ	60,2 dne	0,609; 0,649; 0,723; 1,69; 2,09
^{65}Zn	^{64}Zn	n,γ	245 dne	1,12
^{110m}Ag	^{109}Ag	n,γ	249,8 dne	0,885; 0,935; 1,38
^{99}Mo	^{98}Mo	n,γ	66,7 h	0,140; 0,142; 0,180; 0,750
^{95}Nb	^{94}Nb	n,γ	35,5 d	0,745

CC BY SA

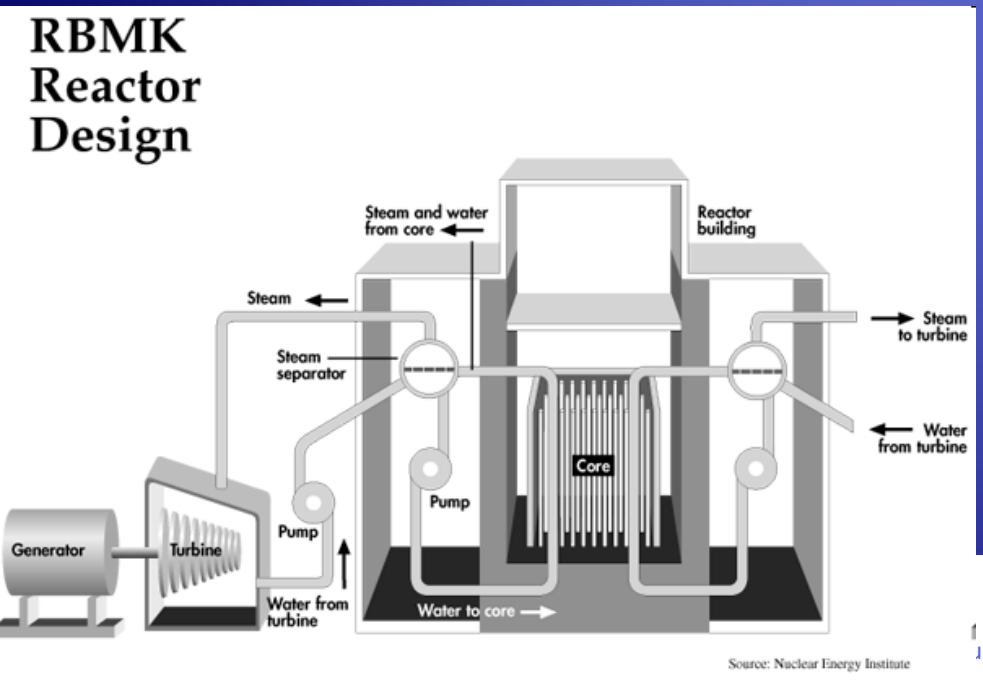
Další, krátkodobé zářiče

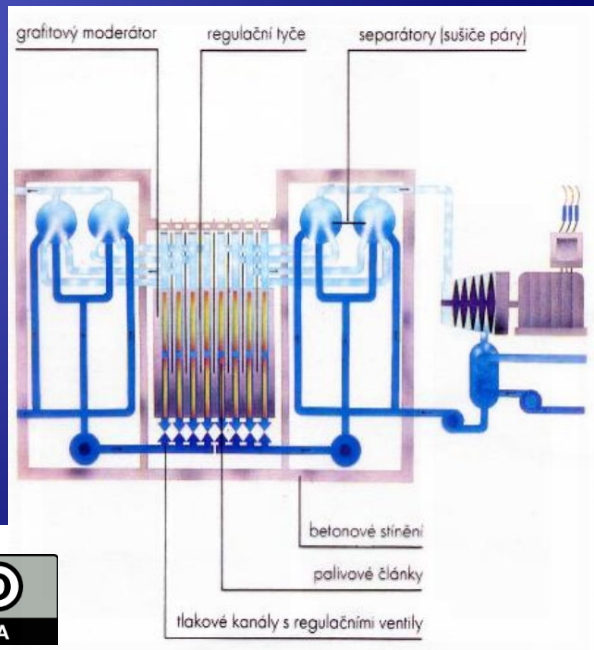
- ^{42}K, ^{24}Na
- Okamžitá radioaktivita chladiva primárního okruhu je tvořena především kyslíkovou aktivitou (např. radionuklidy ^{16}O, ^{16}N apod.)
- Indikátory netěsnosti palivových souborů: ^{131}I, ^{133}Xe a ^{135}Xe
- Koroze primárního okruhu:
  - Koroze pokrytí paliva, tvorba oxidů, Li, K, B, hydridace, (var)
  - freting – sekundární hydridace
  - IASCC - Korozní praskání za vlivu radiace (BWR, stáří)
  - „koroze“ konstrukčních materiálů – rozpouštění a rekrystalizace – aktivované korozní produkty.
  - Halogenidy, kyslík
  - Koroze roztoky bóru

CC BY SA

Lehkovodní grafitové reaktory (LWGR, RBMK)

- „Reaktor bolšoj mošnosti kalnálnyj“
- Výhradně na území bývalého SSSR, tohoto typu byl i reaktor v černobylské JE
- Umožňuje výměnu paliva za provozu
- Původně využíván pro výrobu plutonia
- Nemá reaktorovou nádobu – lépe se dopravují jednotlivé díly (vzhledem k omezení max. rozměrů na železnicích v Rusku)





ucnosti
BY SA

Lehkovodní grafitové reaktory (LWGR, RBMK)

- Použití kovového paliva (do 400°C) i oxidů uranu (až 530°C na palivu)
- Kladný teplotní koeficient – čím větší je teplota chladiva, tím více roste rychlost jaderné reakce – sehrálo svou úlohu při černobylské havárii

Typické parametry reaktoru RBMK (s výkonem 1000 MW):

- obohacení uranu izotopem ^{235}U: 1,8%
- Jenookruhová elektrárna s turbinou v primárním okruhu
- Poměrně rozměrná aktivní zóna:
  11,8 m průměr a 7 m výška
- počet kanálů: 1693
- tlak nasycené páry: 6.9 MPa
- teplota parovodní směsi na výstupu reaktoru: 284°C
- tepelná účinnost elektrárny: 31.3%
- množství paliva v reaktoru: 192 tun UO_2

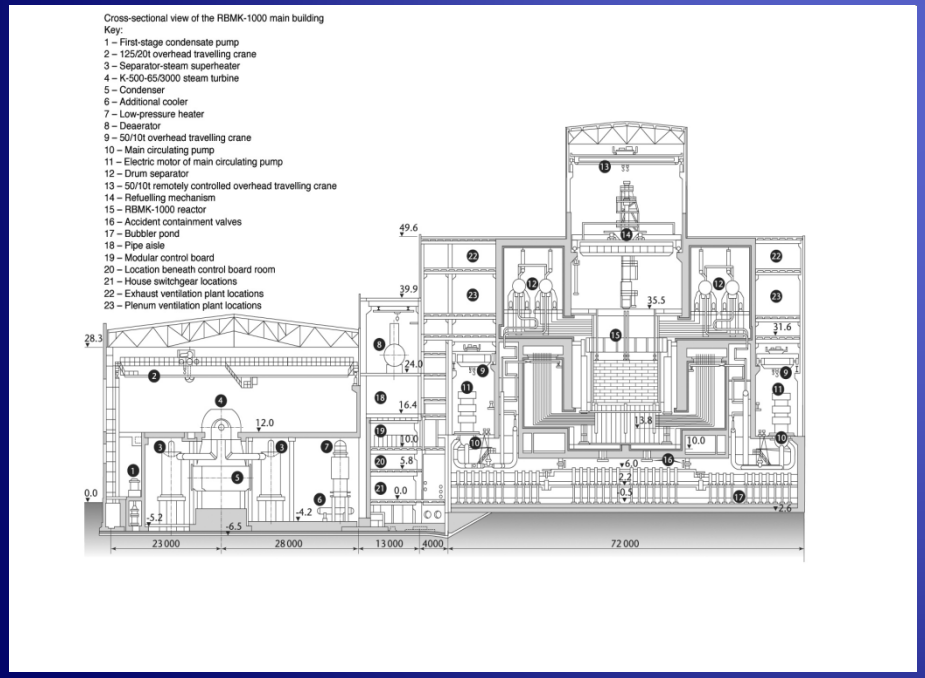
CC BY SA

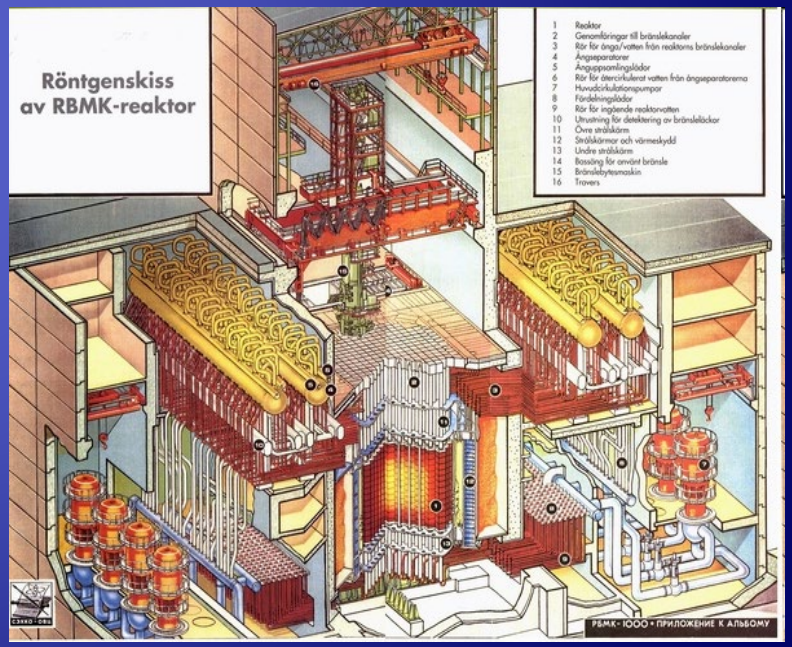


RBMK - elektrárny



- Ukrajina – Černobyl – celkem 4 bloky, poslední odstaven v r. 2000
- Rusko
  - Kursk – 4 bloky v provozu, 5. ve výstavbě
  - Leningrad – 4 bloky v provozu
  - Smolensk – 3 bloky RBMK v provozu, plánován 4. blok VVER 1500





CC BY SA

RBMK – výhody a nevýhody

+ Nízké zatížení aktivní zóny dovoluje odolat výpadkům vnějšího napájení a ztrátám výkonu až po dobu několika hodin bez poškození jádra
+ Výměna paliva za provozu
+ Díky grafitovému moderátoru umožňuje využít i palivo, které není vhodné pro LWR
- Chybí kontainment
- Při ztrátě chladiva roste výkon – kladný teplotní (dutinový) koeficient
- Účinnost systémů pro zabránění následkům nehod je limitovaná
- Špatné rozdělení a redundance elektrických a bezpečnostních systémů
- Nebezpečí reakce vodní páry s grafitem

CC BY SA

Rekapitulace

- Přehled hlavních typů tepelných jaderných reaktorů a jejich hlavních parametrů a vlastností
- Plynem chlazené JR
  - MAGNOX
  - AGR
  - HTGR (HTR)
- Vodou chlazené
  - Těžkovodní
    - PHWR
    - HWCGR
    - HWLWR
    - BHWR
  - Lehkovodní
    - PWR, VVER
    - BWR
    - LWGR (RBMK)

CC BY SA

EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ, MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

5. Bezpečnost s spolehlivost v jaderné energetice – 3/3

Bezpečnost a spolehlivost v energetice a průmyslu - M216019

Jan Berka

Dílo podléhá licenci Creative Commons 4.0 Česko
Uveďte původ - Zachovejte licenci

Teorie rychlých množivých reaktorů

- Štěpení probíhá rychlými neutrony, vyžaduje větší množství štěpného materiálu v AZ
- Část neutronů lze využít na produkci štěpných produktů na základě jaderných reakcí, např.:

$$^{238}_{92}U + ^{1}_{0}n \rightarrow ^{239}_{92}U \xrightarrow{22{,}5\,\mathrm{min}} ^{239}_{93}Np \xrightarrow{2{,}3\,dní} ^{239}_{94}Pu$$

$$^{232}_{90}Th + ^{1}_{0}n \rightarrow ^{233}_{90}Th \xrightarrow{22\,\mathrm{min}} ^{233}_{91}Pa \xrightarrow{27\,dní} ^{233}_{92}U$$

CC BY SA

Koeficient reprodukce

- Koeficient reprodukce (konverzní faktor, plutoniový koeficient) b: poměr počtu jader nově vzniklého paliva k počtu vyhořelých jader
- Regenerační faktor - počet neutronů vzniklých zachycením jednoho neutronu:

$$\eta = \nu \frac{\sigma_f}{\sigma_a}$$

ν-počet neutronů na jedno štěpení, σ_f a σ_a – mikroskopické účinné průřezy štěpení a absorpce

- Neutronová bilance: $\eta\varepsilon = 1 + \sum_i q_i + b$
- ε – koeficient rozmnožení rychlými neutrony, jeden neutron na udržení štěpné reakce, q_i neutronů parazitně zachyceno v AZ
- Jestliže b>1, pak:
- Pravděpodobně když: η-1>1,1 $\eta\varepsilon - 1 - \sum_i q_i > 1$

CC BY SA

Koeficient reprodukce

- Zásadní význam má:
  - Počet neutronů uvolněných na jedno štěpení – zvětšuje se s rostoucí energií neutronů (cca o 10% na 1 MeV)
  - Poměr účinných průřezů pro štěpení a radiační záchyt – v případě rychlých neutronů větší

  →Zlepšení neutronové bilance
- V případě rychlých neutronů je vyšší η-1 (s výjimkou U235)
- V tepelných reaktorech dosažení b>0,9 málo pravděpodobné
- Pro b<1 celková zásoba štěpného materiálu:

$$M(1+b+b^2+\ldots)=\frac{M}{1-b}$$

- M – zásoba U235 v přírodním uranu, po jeho použití je k dispozici bM Pu…
- Po započtení ztrát při přepracování lze očekávat využití cca 7% přírodního U.
- V rychlých reaktorech b>1→ principielně lze zpracovat veškeré zásoby U a Th

CC BY SA

Doba zdvojení

- Čas, za který v reaktoru vznikne stejné množství štěpného materiálu, jaké je potřebné pro provoz tohoto zařízení
- Je nepřímo úměrná výkonu reaktoru (čím vyšší výkon, tím kratší doba zdvojení)
- Závisí na koeficientu reprodukce
- *Experimentální rychlý reaktor ZEFIR v Harwellu měl b>2, ale v důsledku nepatrného výkonu (1W) byla doba zdvojení cca 100 000 000 let*
- V současných prototypech rychlých reaktorů je větší než 20 let
- Do budoucna cíl zkrátit pod 10 let

CC BY SA

Rychlý množivý reaktor (FBR)

- Pracuje s rychlými neutrony – látky zpomalující neutrony v aktivní zóně jsou nežádoucí → v aktivní zóně není přítomen moderátor
- Umožňuje množení – při jaderné reakci vzniká více paliva (plutonia), než se spálí
- FBR vyžaduje vysoce obohacené palivo (pro U_{92}^{235} min. 8%, pro Pu_{94}^{239} min. 6%) – typicky bylo využíváno Pu ve směsi PuO_2 a UO_2 obohacené 20 – 50% (Pu^{239} nobo U^{235})
- Aktivní zóna obklopena tzv. plodivou zónou z ochuzeného uranu
  - Štěpením U^{235} rychlými neutrony vznikne v průměru 2,5 neutronů, štěpením U^{239} 3,02 neutronů
  - V průměru 2 neutrony se spotřebují na další štěpení, zbytek pohlcen $U^{238} \rightarrow U^{239} \rightarrow Pu^{239} \rightarrow Pu^{240}$ a Pu^{242}
  - Jako množivý materiál možno použít „vyhořelé“ palivo z tepelných reaktorů
  - FBR může vyrobit palivo pro vlastní provoz a zároveň i pro další (tepelné) reaktory

CC BY SA

Rychlý množivý reaktor (FBR)

- Kompaktní aktivní zóna s vysokým tepelným zatížením (až 10X oproti PWR), palivové články – hexagonální nebo trojúhelníkovité, těsně u sebe
- Obaly palivových elementů – musí vzdorovat velikému radiačnímu poškození (10^{23} cm^{-2}) a koroznímu a eroznímu působení chladiva (2.10^4 h).
- Chladivo
  - Voda není jako chladivo vhodná – zpomaluje neutrony, nízký bod varu
  - Dosud provozované typy – chlazeny tekutým kovem (zpočátku se zkoušela rtuť (SSSR), směs NaK
  - Všechny velké prototypy chlazeny tekutým sodíkem
  - Důvody využití Na: vysoká teplota varu (880°C) umožňuje pracovat na nízkém tlaku, výborná tepelná vodivost zaručuje samovolné chlazení zóny v případě selhání cirkulace
  - Terciální okruh – paro-vodní

CC BY SA

Sodík jako chladivo rychlých reaktorů

- Součinitel tepelné vodivosti – 20X vyšší než voda→vysoký předstup tepla
- Teplota všech komponent AZ proto rychle sleduje náhlé teplotní změny chladiva →Vznik teplotních pnutí v konstrukčních materiálech
- Bod tuhnutí Na – kolem 100°C – součásti primárního okruhu musejí být vybaveny předehříváním proti zatuhnutí
- Vysoká elektrická vodivost Na – využití v haldinoměrech, průtokoměrech, dopravě pomocí elektromagnetických čerpadel (bez pohyblivých částí, dobrá regulace), atd.
- Nevýhoda sodíku: afinita ke kyslíku, reakce se vzduchem, vodou
- Ochrana hladiny inertní atmosférou
- Slabé místo – parní generátor

CC BY SA

Sodík jako chladivo rychlých reaktorů

- Hoření Na na vzduchu relativně pomalé
- 30% Na přechází během hoření na těkavé radioaktivní aerosoly
- Rychlost koroze konstrukčních materiálů v Na až do 600°C relativně nízká
- V reaktoru Super Phenix 3300 tun roztaveného sodíku

CC BY SA

Rychlý množivý reaktor (FBR)

- V rámci IV. Generace jaderných reaktorů jsou vyvíjeny typy rychlých reaktorů chlazené plynem

- Nevýhody oproti PWR:
  - zatím drahá výroba1,65X vyšší investiční náklady, 2,5X vyšší náklady na výrobu elektřiny)
  - nebezpečí zneužití Pu pro vojenské účely (riziko proliferace)
  - velká hustota štěpitelných prvků
  - z daného objemu se uvolňuje velké množství tepla
  - únik sodíku představuje nebezpečí požáru
  - rychlé n podstatně zkracují odezvu reaktoru na vnější vlivy (i na ovládání)

+ Výhody:
  + Na má vyšší teplotu varu, než při jaké ochlazuje reaktor →v primárním okruhu nemusí být vysoký tlak
  + vynikající tepelná vodivost Na zajišťuje dostatečné havarijní chlazení reaktoru
  + Do budoucna – množení paliva, zpracovávání vyhořelého paliva z tepelných reaktorů

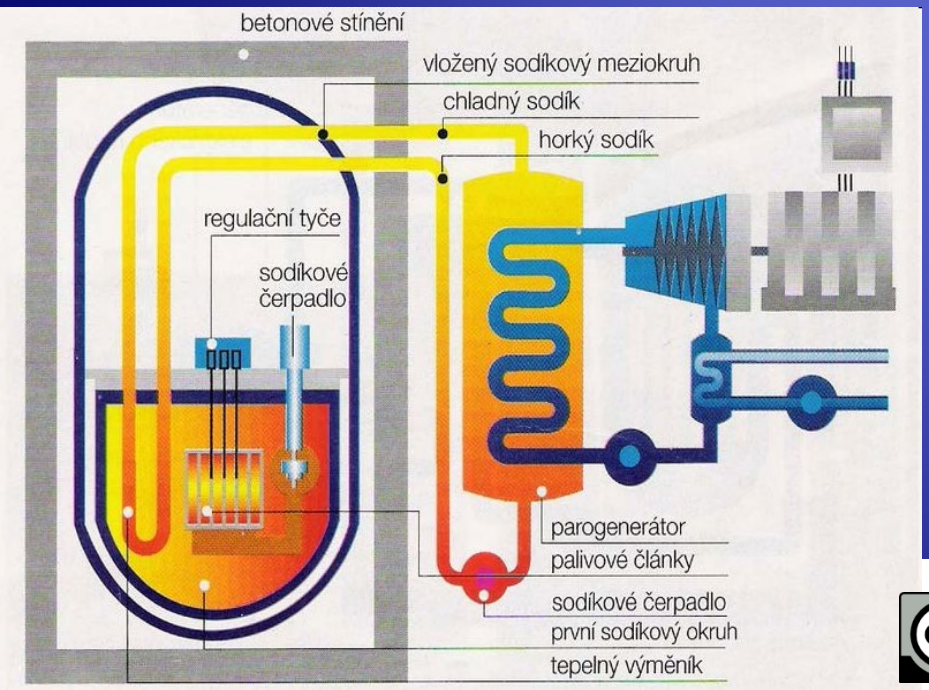
CC BY SA

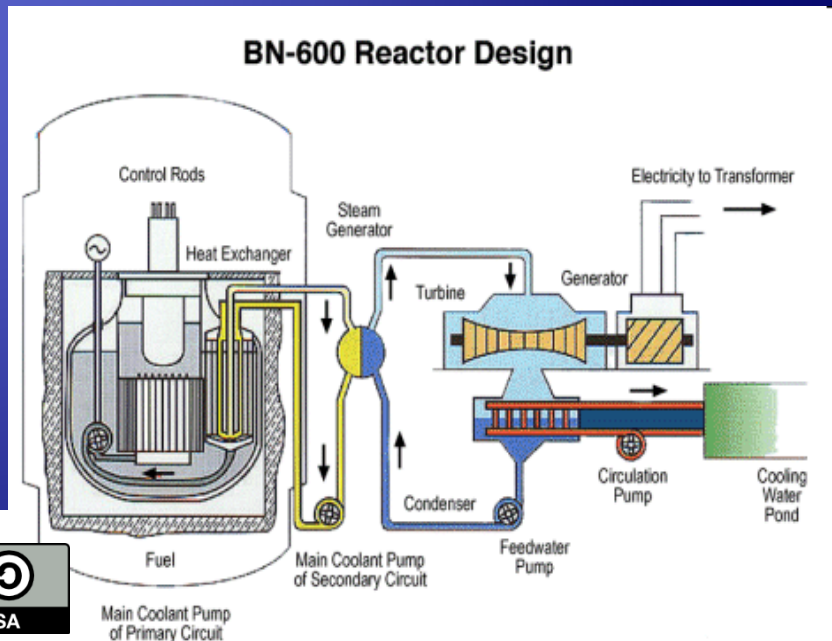
Schéma FBR

Typické parametry reaktoru FBR (s výkonem 1300 MW):

- palivo: obohacené 20% ^{239}Pu (nebo ^{238}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 PuO2/UO2
- Tříokruhová elektrárna





BY SA

Bezpečnost a hodnocení rizika provozu rychlých reaktorů

- Nepříznivé aspekty oproti LWR:
  - Aktivní zóna obsahuje za normálního provozu několikanásobek kritické hmoty
  - Vyšší obsah plutonia v AZ
  - Vysoký měrný výkon a kompaktní uspořádání AZ
  - Velmi rychlá odezva reaktoru na změny reaktivity
  - Na reaguje se vzduchem a s vodou → zvýšené riziko požáru
  - V případě havárie vytváří Na aerosoly umožňující šíření radioaktivních produktů štěpení
- Příznivé aspekty:
  - Na v primárním okruhu je pod bodem varu, v primárním okruhu není vysoký tlak → menší riziko prasknutí potrubí
  - Velká tepelná kapacita Na
  - Nízké riziko obnažení AZ (použití dvojité nádoby)
  - Schopnost dochlazování AZ přirozenou cirkulací (experimentálně ověřeno v prototypech FBR)

CC BY SA

FBR elektrárny

- 1. demonstrační elektrárna v USA (1963 – E. Fermi)
- je postaven v Rusku - Bělojarsk (BN-600), ve Francii – Phénix (590 MW_t/233 MW_e) Superphénix (1,2 GW_e – odstaven 1997) a Velké Británii
- v USA, Německu a Japonsku byly demonstrační elektrárny tohoto typu
- První elektrárny tohoto typu se potýkaly s problémy



OPPA PRAHA PRAGUE PRAGA PRAG EVROPSKÁ UNIE
Evropský sociální fond
Praha & EU: Investujeme do vaší budoucnosti

Základní parametry elektráren s rychlými reaktory

Reaktor	BN-600 Rusko	Super Phenix Francie
Tepelný výkon MW	1500	3000
Elektrický výkon MWe	600	1200
Účinnost JE %	38,6	40
Měrný výkon AZ MW/m^3	550	280
Obohacení plutoniem %	21-29,4	15,8-19,5
Koeficient reprodukce	1,4	1,3
Vstupní/výstupní teplota Na °C	377/550	390/545
Počet sodíkových čerpadel	3	4
Vstupní teplota páry °C	500	487
Tlak páry MPa	13,7	17,3
Počet turbin	3	2

OPPA PRAHA PRAGUE PRAGA PRAG EVROPSKÁ UNIE
Evropský sociální fond
Praha & EU: Investujeme do vaší budoucnosti
CC BY SA
VŠCHT PRAHA

Provozní zkušenosti s FBR

- Rusko BN-350 (odsolování mořské vody z Kaspického moře) a BN-600 (Bělojarská elektrárna)
  - Žádné závažné havárie
  - Běžné závady a poruchy
  - Nehermetické palivové tyče, únik plynných štěpných produktů
  - Místa průniku vody do sodíku → Výpadky PG
- Francie Phénix a Superphénix
  - Poruchy s únikem Na
  - Nestabilitou AZ
  - Super Phénix neběžel 25 měsíců kvůli technickým a 66 kvůli politickým a administrativním důvodům

CC BY SA

Úkol

Vypracujte krátkou studii na téma **Vliv rychlého jaderného reaktoru na ekologii** v porovnání s lehkovodními jadernými reaktory. V studii uvažujte tyto faktory:

- Použité palivo a složení AZ
- Palivový cyklus (přepracování a znovupoužití paliva)
- Použité materiály
- Chladivo primárního, sekundárního i terciálního okruhu
- Fyzikální parametry zařízení
- Pravděpodobné havárie
- Vnímání rizik spojených s tímto zařízení veřejností.

CC BY SA

Problematika tlakových nádob

- Mimořádné nároky kladené na bezpečnost a spolehlivost tlakové nádoby reaktoru – větší, než na tlakové nádoby v běžném průmyslu
- Životnost tlakové nádoby = životnost jaderné elektrárny
- Tlaková nádoba se stává po skončení životnosti vysoce aktivním RAO (vliv na ekologii)
- Působení teplot, tlaků + radiační poškození tlakových nádob – kladou značné nároky na provedení, design a použité konstrukční materiály
- TLAKOVÉ NÁDOBY
  - Ocelové (především PWR, BWR)
  - Z předpjatého betonu (GCR, HTGR)

CC BY SA

Tlakové nádoby ocelové

- Typicky až několik set tun, průměr do 7 m, výška do 23 m
- Větší nádoby – jako celek nepřepravitelné, stavějí se na staveništi JE
- Provozní namáhání tlakové námahy je dynamické, poškození vzniká v místech koncentrace napětí a/nebo nejslabších místech nádoby – většinou jde o mikrotrhlinky na povrchu, které se mohou dále šířit
- Vliv neutronového záření – nepříznivě ovlivňuje mechanické vlastnosti ocelí (stárnutí, snižování lomové houževnatosti), zejména ve svarových spojích a oblasti aktivní zóny, deformace se kumulují v nejtlustších místech nádoby
- Růst trhlin zvyšuje koroze pod napětím
- Tlaková nádoba musí být projektována tak, aby vydržela normální a přechodně i zhoršené (např. vyšší neutronový tok, více korozívní složení chladiva) provozní podmínky po dobu její projektované životnosti a za mimořádných podmínek byla zachována celistvost nádoby.

CC BY SA

Materiál a pevnost ocelových tlakových nádob

- Volba materiálu
  - Vychází z požadavků na pevnost po celou dobu plánované životnosti elektrárny (přechodně i v mezních stavech) – vyplývá z rozboru provozních podmínek
  - Musí být dobře svařitelný
  - Co nejméně citlivý na výrobní proces (vlastnosti materiálu na konci výrobního procesu jsou zpravidla horší než ve výchozím stavu – zjišťováno standardními testy na malých vzorcích)

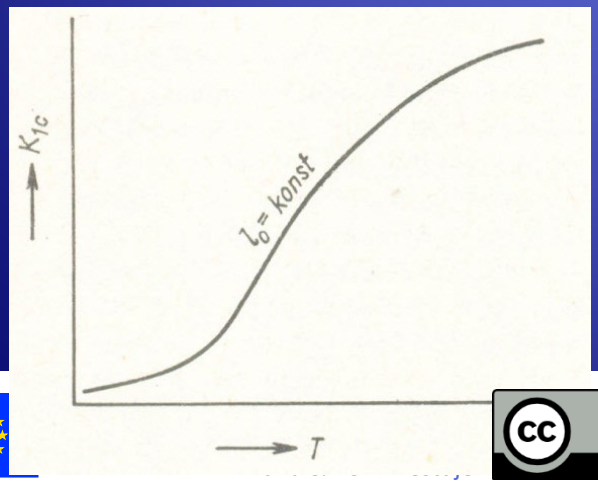
Kontrolní otázka:

Co je nechlazený rychlý jaderný reaktor nadkritický na okamžitých neutronech?

CC BY SA

Hodnocení životnosti materiálů reaktorové nádoby

- Křehká pevnost tlakových nádob – test vychází z poznatků lomové mechaniky
  - Na vzorcích z nejvíce namáhaných míst (svarové spoje, přechody do přírub, hrdel, zesílená místa pro podpory, atd.)
  - Hledání závislosti lomové houževnatosti na teplotě – hledání tzv. přechodové teploty (pod ní dochází ke křehkému lomu vzorku)
  - Lomová houževnatost vyjadřuje odolnost materiálu proti šíření křehkého lomu





CC BY SA

Hodnocení životnosti materiálů reaktorové nádoby

- Nejnižší provozní teplota tlakové nádoby – určí se z přechodové teploty pro největší součtové napětí v makroobjemu stěny: $T_{kr} + \Delta T$, ΔT – rezerva (volí se podle přesnosti určení napětí ve stěně nádoby 10 – 25°C)
- Stárnutí ocelí
  - Precipitační
  - Deformační
  - Degenerace houževnatosti vlivem neutronového toku
- Precipitační a deformační stárnutí lze volbou materiálu a designem nádoby omezit na nejnižší možnou míru
- Posun přechodové teploty vlivem neutronového toku lze odhadnout:

$$\Delta T_z = C\sqrt[3]{\Phi_{18}}$$

Φ_{18} – integrální neutronový tok za předpokládanou životnost nádoby v jednotkách 10^{18}

C – koeficient C= 40 až 50 pro teplotu stěny do 200°C

CC BY SA

Hodnocení životnosti materiálů reaktorové nádoby

- Čím je teplota stěny vyšší, tím menší je poškození materiálu – probíhá zotavování vad vyvolaných zářením
- Radiační poškození – vyšší u svarových spojů a namáhaných míst, stoupá se zvyšováním nečistot v oceli
- Podmínka pro vznik křehkého lomu
  - Buď dostatečně velký a ostrý výchozí makrodefekt
  - Nebo dostatečně rychlý růst podkritického makrodefektu během provozu
  - Musí platit

$$\frac{s}{l} \langle\langle 1$$

  s – velikost plastické deformace ve směru šíření trhliny

  l – délka trhliny ve směru šíření

  Když $l<l_{KR}$ – trhlina je podkritická a stabilní
- Čím je materiál pevnější a tvrdší, tím kratší je přípustná délka defektu l_{KR} (typicky 20 – 40 mm pro nejhorší případy ve svarových spojích)

CC BY SA

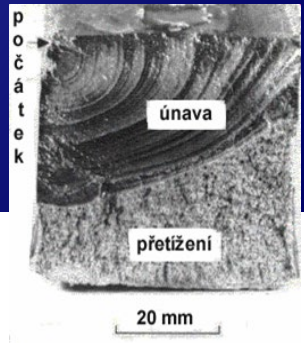
Kontrola životnosti reaktorové nádoby

- Tlakovou zkouškou nádoby
- Diagnostika defektů ultrazvukem, pomocí vířivých proudů, akustickou emisí, aj.
- Svědečný program:
  - V reaktorové nádobě jsou umístěny vzorky základního i svarového kovu (přesně stejného), za kterého je vyrobena reaktorová nádoba
  - Vzorky jsou vystaveny stejným podmínkám (především neutronovému toku), jako reaktorová nádoba
  - Během odstávek se vzorky postupně odebírají k testování
- Životnost tlakové nádoby lze prodloužit vyžíháním

CC BY SA

Únavová pevnost tlakových nádob

- Podílí se na poškození reaktorových nádob
- Statická únava
  - při dlouhodobém zatížení těles, růst a zahušťování vad materiálu
  - Při teplotách pod 400°C může jít např. o difúzi rozpuštěných plynů do kovu, zejména při velkých pnutí →snižuje pevnost materiálu (u jaderných reaktorů se ale uplatňuje málo)
  - Při teplotách nad 400°C – poškození tečením za horka (creep)
- Dynamická únava – závažnější problém
  - Cyklické namáhání nádoby střídáním provozu a odstávek
  - Nízký počet cyklů ($N<10^4$)
  - V oblasti koncentrace napětí může dojít ke vzniku únavové trhliny



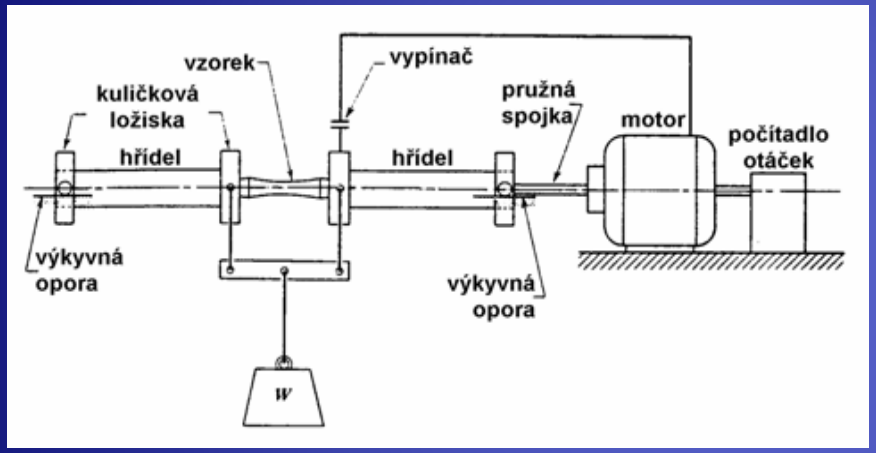
Kontrolní otázka:

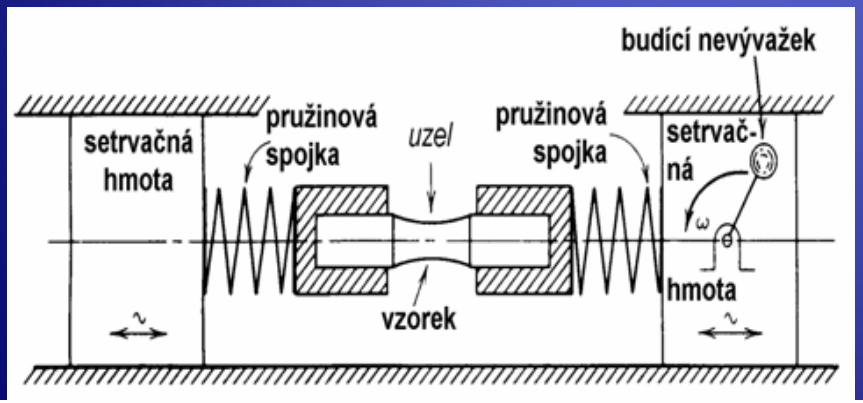
Jaký vliv mohou mít parametry tlakové nádoby reaktoru na ekonomické a ekologické parametry celé elektrárny?

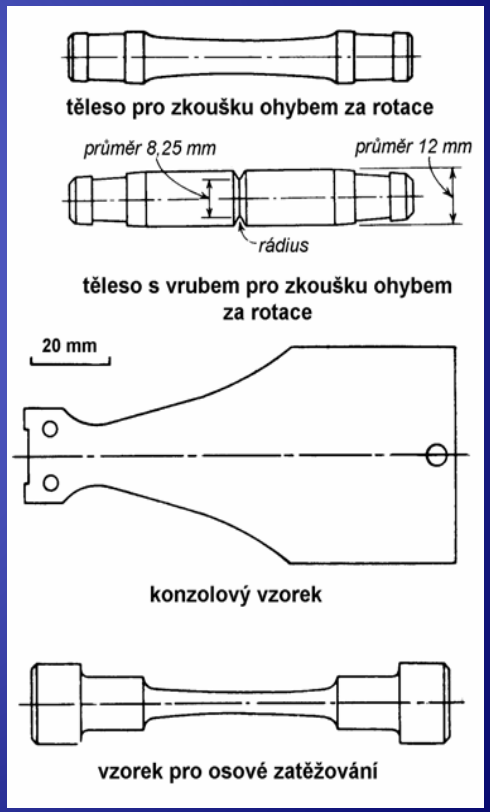
cc BY SA

Dynamická únava

- Špatně se předikuje, zjišťuje se experimentálně
- Použití únavových křivek pro jednotlivé materiály







CC BY SA

Dynamická únava

- Lze omezit konstrukcí některých míst tlakové nádoby, např. kvalitní, hladký a plynulý přechod stěny nádoby do hrdel a v místě napojení přírub, odstranění všech zjistitelných makrodefektů

CC BY SA

Oceli pro reaktorové nádoby

- Zvýšené nároky na čistotu ocelí, pevnostní charakteristiky a houževnatost
- Dobrá svařitelnost i ve velkých tloušťkách
- Odolnost proti radiačnímu poškození
- Indukovanou aktivitu omezit na minimum (hlavně Co)
- Protikorozní odolnost (u tepelných reaktorů proti korozi vlivem prostředí vody a páry, u rychlých reaktorů prostředí tekutého Na)
- Nádoby lehkovodních reaktorů jsou vyrobeny zpravidla z nízkolegované uhlíkové oceli, používají se ochranné výstelky navařením nebo naválcováním vysokolegovaných austenitických ocelí
- Nádoby rychlých reaktorů – zpravidla z vysokolegovaných austenitických ocelí typu 18/8 s nízkým obsahem C

CC BY SA

Oceli pro základní materiál tlakových nádob

- Rozdělení dle meze kluzu
- Oceli s nízkou mezí kluzu pod 500 MPa
  - Nízká přechodová teplota, vysoká lomová houževnatost při poměrně nízkých pevnostních hodnotách
  - Velká tloušťka stěny a hmotnost nádob, menší odolnost proti mechanické únavě
- Oceli se střední mezí kluzu 500 – 900 MPa
  - Vhodným zušlechtěním lze dosáhnout nízkých přechodových teplot
- Oceli s vysokou mezí kluzu nad 1 GPa
  - Vysoké nároky na výrobu a kontrolu

CC BY SA

Tlakové nádoby z předpjatého betonu

- U grafitem moderovaných a plynem chlazených toto řešení přineslo (oproti ocelovým nádobám) zvětšení velikosti (a tím i jednotkového výkonu), ekonomické efektivnosti a celkové bezpečnosti zařízení
- Beton se vuznačuje vysokou pevností v tlaku (např. 50 MPa) a nízkou pevností v tahu (2-3 MPa) – při provozu jsou tahová napětí nežádoucí.
- Eliminace tahových napětí: předběžným stlačením betonu pomocí předepínacích vláken ještě před tím, než je nádoba zatížena vnitřním přetlakem
- Zatěžovací faktor – nerovnoměrné rozložení teplot ve stěně nádoby (obvykle 60 – 70°C).
- Max. teplota v oblasti aktivní zóny 300 – 500 mm od vnitřního povrchu (vlivem absorpce záření)
- Porušení betonové nádoby nemůže nastat náhle, ale postupným rozevíráním trhlin – důležité pro bezpečnost

CC BY SA

Betonová tlaková nádoba

- Skládá se ze 3 hlavních částí:

1. Beton
   - Vyšší požadavky než na běžné betony
2. Systém pro vytvoření předpětí
   - Lana z pramenů nebo přímých drátů s vysokou mezí pevnosti (18-24 $MN.m^{-2}$). Umístěny na vnější části stěn (ochrana před zářením)
3. Vnitřní plášť s chladicím systémem
   - Hlavní plynotěsné uzavření nádoby
   - Ocelový plech, tloušťka 12-30 mm
   - Na vnitřní straně je tepelná izolace, na vnější straně systém chladicích trubek
   - Chladicí systém bývá zdvojen, každá část dimenzovaná na 50% chladicího výkonu

CC BY SA

Vliv reaktorového záření na vlastnosti konstrukčních materiálů

- Poškození materiálů – udává se v jednotkách DPA (displacement per atom) – lze vypočítat z neutronového toku
- Indukovaná (umělá) aktivita – vlivem radioaktivního záření vznikají v ozařovaném materiálu radioaktivní izotopy někdy s dlouhým poločasem rozpadu
- Záření α, β, γ – relativně malý vliv na poškození materiálů, největší vliv má ozařování (převážně rychlými) neutrony
- Neutrony vyrážejí atomy z krystalové mřížky (primárně vyražený atom – PVA), ty mohou vyrážet další atomy, vzniká *kaskáda* poškození krystalové mřížky
- Vznikají tak vakance a intersticiální atomy – tzv. *Frenkelovy páry*
- Vznik dislokačních smyček

Kontrolní otázka:

Jaká vlastnost charakterizuje odolnost materiálů proti křehkému lomu?

CC BY SA

Vliv reaktorového záření na vlastnosti konstrukčních materiálů

- Radiační poškození se projeví změnou všech vlastností konstrukčního materiálu včetně struktury
- Růst meze kluzu a meze pevnosti, klesá tažnost, posun přechodové teploty k vyšším hodnotám, klesá houževnatost, zvyšuje se tvrdost
- Změna (zpravidla růst) modulu pružnosti, , tepelné vodivosti, elektrického odporu, objemu, mřížkových parametrů
- Fázové transformace, zvýšená difúze, rozpad tuhých roztoků, precipitace

EVROPSKÁ UNIE
Evropský sociální fond
Praha & EU: Investujeme do vaší budoucnosti
CC BY SA
VŠCHT PRAHA

Vliv reaktorového záření na vlastnosti konstrukčních materiálů

- Vliv tepelných a nadtepelných neutronů se může projevovat jen jadernými reakcemi. Nejdůležitější jsou reakce se změnou atomového čísla – vzniká záření α, které zůstává uvnitř materiálu a nepříznivě mění jeho vlastnosti.

→ Mění se atomové číslo původního atomu, ten působí v krystalové mřížce jako cizí atom

- Zejména u štěpných a anizotropních materiálů se projevuje radiační růst
- Urychlení creepu (zpravidla o 1 až 3 řády) během ozařování (*radiační creep*)
- Objemový růst (*swelling*) – výsledek hromadění plynných produktů štěpení – zejména Kr (asi 9%) a Xe (asi 35%)
  - Hlavní důvod nevhodnosti použití čistého kovového uranu jako paliva
  - Swellingu uranu zabraňují legury (Mo, Al, Fe, Si)

CC BY SA

Účinek tepelných a nadtepelných neutronů ne konstrukční materiály

- Při ozařování konstrukčních materiálů při vysokých teplotách - 0,3 až 0,5.$T_{tání}$ – růst vlivem vzniku pórů (*void swelling*)
  - Póry tvořeny shluky vakancí
  - Tento jev potvrzen u kovů s mřížkou kubickou plošně centrovanou (austenitická ocel, Al, Ni, Cu) a kubickou prostorově centrovanou (Fe, Nb, V)
  - Nepotvrzen u kovů s hexagonální strukturou (α-Zr, Ti)
  - Na stabilizaci pórů se podílí He, které v materiálu vzniká
- Při ozařování grafitu – pozorován radiační růst, změna fyzikálních vlastností a *akumulace skryté energie* – jedná se o energii poruch v mřížce – nemůže se plně převést během ozařování na oscilace mřížky jako u kovů.
- K uvolnění skryté energie dochází až při dosažení teploty vyšší než je teplota ozařování (i 2,5 $MJ.kg^{-1}$ při ozáření 3.10^{25} m^{-2}) → silné přehřátí grafitu

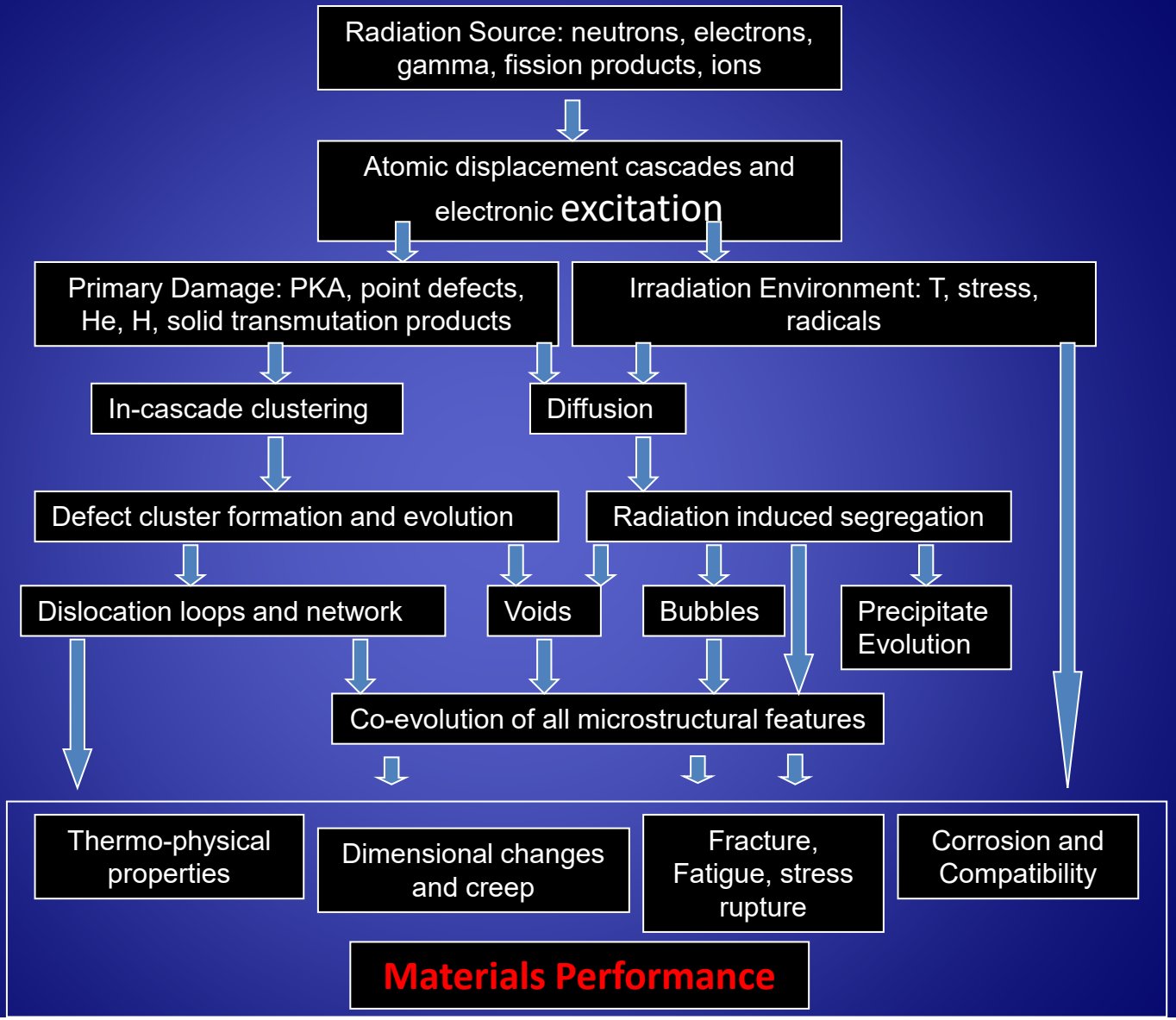
CC BY SA

Heliové křehnutí materiálů vlivem záření

- Např. u žáruvzdorných ocelí dochází ke křehnutí nad 500°C, jsou-li vystaveny záření
- Způsobeno (n, α) přeměnou prvků, např. ^{10}B (n, α)7Li nebo ^{58}Ni-(n, γ)^{59}Ni(n, α)^{56}Fe
- Helium (záření α – jádra He) se v kovu hromadí na hranicích zrn a v místech poruch krystalové mřížky → nárůst tlaku uvnitř materiálu, vznik křehkého lomu

CC BY SA

Vliv radiace na konstrukční materiály



CC BY SA

Vliv záření na korozi

- Radiace může mít vliv na zhoršení korozní odolnosti konstrukčních materiálů
- Korozní produkty v chladivu mohou způsobovat zanášení výměníků (zhoršení přestupu tepla), zadírání pohyblivých součástí, atd.
- Z korozních produktů mohou vznikat radionuklidy – usazují se na vnitřních stěnách reaktorového systému – ztěžuje údržbu. Proto jsou vysoké požadavky na odolnost proti korozi u materiálů aktivní zóny a primárního okruhu.
- Působení záření na korozi:
  - Radiolytický efekt – změna chemického potenciálu korozního prostředí vznikem nových látek vlivem radiolýzy
  - Destrukční efekt – tvorba defektů v ochranných oxidických vrstvách
  - Fotoradiační efekt – změna polovodičových vlastností oxidické vrstvy způsobené pohlcením energie záření

CC BY SA

Rekapitulace

- Rychlé množivé reaktory chlazené sodíkem
- Problematika reaktorových nádob
  - Lomová houževnatost a přechodová teplota
- Hodnocení životnosti reaktorové nádoby
- Vliv radiace na konstrukční materiály a na korozi

CC BY SA