

Jaderná energetika (JE)

Pavel Zácha

2015-03

12. Bezpečnost jaderných reaktorů

Základy jaderné bezpečnosti

Reaktor - zdroj záření

Izolace radioaktivních látek od životního prostředí

Jaderná bezpečnost

12.1 Základy jaderné bezpečnosti

Štěpení + následný rozpad radioaktivních látek jsou doprovázeny zářením – emisí elem. částic hmoty. Lze je dělit dle:

- a) **druhu záření** – neutronové, protonové, α , β , γ
- b) **energie částic** – kinetická energie emitovaných částic (energetická spektra)
- c) **radioaktivity** – počet jader, které se rozpadnou za 1s [Bq];
- dřívější jednotka - Currie: $1\text{Ci} = 3,7 \times 10^{10} \text{Bq}$
- d) **rychlosti ubývání radioaktivních jader** – poločas rozpadu

- základní vztahv:

$$A = \frac{dN}{dt} = N \cdot \lambda \quad [\text{Bq}]$$

kde N je počet radioaktivních jader,

λ je tzv. rozpadová konstanta [1/s].

=> závislost počtu radioaktivních jader na čase:

$$N(t) = N(0) \cdot e^{-\lambda t} \quad (14.2)$$

kde N(0) je počet radioaktivních jader na počátku (v čase $t = 0$)

N(t) je počet radioaktivních jader po uplynutí času t.

=> poločas rozpadu:

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} \quad [\text{s}]$$

12.1 Základy jaderné bezpečnosti

Protože záření působí na živé buňky a poškozuje je, je nutné se před rad. zářením chránit => **radiační ochrana**. Proto lze dále dělit elementární částice hmoty podle:

e) formy zářiče:

- uzavřené – pevné kompaktní + uzavřené v hermetickém obalu
- otevřené – rozptýlené pevné částice; kapaliny; plyny

f) způsobu působení na člověka:

- zevně (uzavřené zářiče)
 - => způsobují pouze vnější ozáření
- způsobuje kontaminaci vzduchu, vody, půdy,... (otevřené zářiče)
 - => způsobují vnější ozáření i vnitřní kontaminaci a ozáření (inhalace, požití)



g) pronikavosti záření:

- nepronikavé – částice s elektrickým nábojem (α , β)
- pronikavé – částice bez elektrického náboje (γ , neutrony)

h) druhu ozařování:

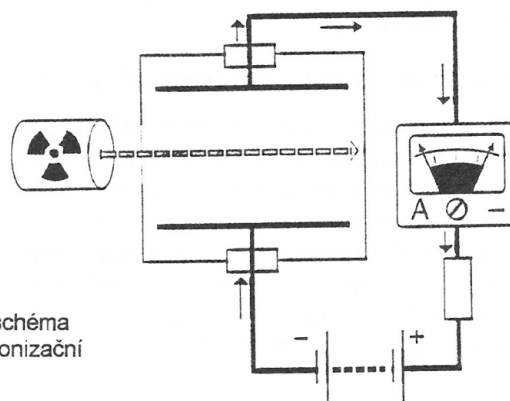
- vnější – nebezpečná jsou pronikavá záření (nutno masivně stínit)
- vnitřní - nebezpečná záření obojí (pronikavá i nepronikavá), neb dochází k přímému styku s buňkami

12.1 Základy jaderné bezpečnosti

Detekce a kvantifikace záření

vědní obor zabývající se detekcí a kvantifikací záření se nazývá **DOZIMETRIE**. Záření má různé projevy, např.:

- **filmová dozimetrie** – zčernání filmu působením γ záření
- **aktivační dozimetrie** – působením neutronů se stabilní izotopy stávají radioaktivními
- **ionizační dozimetrie** – záření (elementární částice) vyráží elektron z elektronového obalu atomu, čímž se v prostředí vystaveném záření vytváří volné elektrony (záporné ionty) a z dotčených atomů se stávají kladné ionty.
 - **ionizační komora** – přístroj pro měření expozice záření. Proud protékající komorou je měřítkem expozičního příkonu záření působícího na komoru



Obr.14.1. Principiální schéma uspořádání ionizační komory

12.1 Základy jaderné bezpečnosti

Detekce a kvantifikace záření

- **ionizační dozimetrie**

Odsud definujeme:

- **expozice záření X [C/kg]** - pokud máme v ionizovaném prostředí napětí, začne mezi elektrodami procházet elektrický proud, jehož velikost je úměrná tzv. **expozici záření X**. Základní jednotka [C/kg] znamená celkový elektrický náboj vznikající v 1 kg ionizovaného prostředí
 - starší jednotka Rentgen: $R = 2,58 \times 10^{-4} \text{ C/kg}$
- **expoziční příkon [A/kg]** – působení expozice záření v čase
- **dávka D [Gy=J/kg]** – energie záření absorbovaná v příslušných tkáních
- **ekvivalentní dávka D_{ekv} [Sv=Gy.QF]**– energie záření vztažená na biologické účinky – závisí na druhu záření, zohledněno tzv. faktorem kvality (QF-quality factor)
- **kolektivní ekvivalentní dávka [manSv=N.Sv]** – součet všech dávek v dané populaci [N]
- **dávkový ekvivalent** – dávka, které jsme běžné vystavováni (používá se pro porovnávání D_{ekv})

12.1 Základy jaderné bezpečnosti

Detekce a kvantifikace záření

QF=1 pro β, γ

QF=3(5)-10(20) pro n

(v závislosti na energii neutronu)

QF=20 pro α

Radiační váhové faktory (faktory kvality)

Typ záření a příp. energie	Radiační váhový faktor W_R
fotony	1
elektrony, miony	1
neutrony, méně než 10 keV	5
neutrony, 10keV až 100 keV	10
neutrony, 100 keV až 2 MeV	20
neutrony, 2 MeV až 20 MeV	10
neutrony, více než 20 MeV	5
protony, více než 2 MeV, (mimo odražené)	5
částice alfa, těžká jádra, štěpné fragmenty	20

12.1 Základy jaderné bezpečnosti

Základní jednotky - shrnutí

veličina (označení)	rozměr	jednotky		vzájemný vztah	veličina vztažená k jednotce času
		stará název-zkratka	nová název-zkratka		
radioaktivita (A)	<u>počet rozpadů</u> čas	$3,7 \times 10^{10}$ rozpadů/s Curie - Ci	1 rozpad/s Becquerel - Bq	$Bq = 0,27027 \times 10^{-10} Ci$	-
expozice záření (X)	<u>elektrický náboj</u> množství	<u>elektrostat. jednotka</u> cm ³ Rentgen - R	C/kg = 1As/kg -	$C/kg \cong 38 \times 10^2 R$	rychlost expozice (expoziční příkon)
dávka (D)	energie/množství	100 ergů/gram RAD	J/kg Grey - Gy	$Gy = 10^2 RAD$	dávková rychlost (dávkový příkon)
ekvivalentní dávka nebo dávkový ekvivalent (Dekv)	míra biologického působení na jedince	RAD x QF REM	Gray x QF Sievert - Sv	$Sv = 10^2 REM$	ekvivalentní dávková rychlost (ekvivalentní dávkový příkon)
populační ekvivalentní dávka nebo popul. dávkový ekvivalent	míra pozdního biologického působení ve velké populaci	REM x P manREM (člověkoREM)	Sv x P manSv (člověkoSievert)	$manSv = 10^2 manREM$	rychlost populační ekvivalentní dávky

QF ... faktor kvality záření; P ... počet členů ozařované populace (při homogenním ozařování)

QF=1 pro β, γ

QF=3-10 pro n (v závislosti na energii neutronu)

QF=20 pro α

12.1 Základy jaderné bezpečnosti

Dávkový ekvivalent

Radionuklidy produkované lidmi

nuklid	symbol	poločas	zdroj
Tritium	^3H	12.3 let	Testy jaderných zbraní, výpusti z jaderných zařízení a průmyslových podniků
Iod 131	^{131}I	8.04 dní	Testy jaderných zbraní, výpusti z jaderných zařízení, používá se v medicíně
Iod 129	^{129}I	1.57×10^7 let	Testy jaderných zbraní, výpusti z jaderných zařízení
Cesium 137	^{137}Cs	30.17 let	Testy jaderných zbraní, výpusti z jaderných zařízení
Strontium 90	^{90}Sr	28.78 let	Testy jaderných zbraní, výpusti z jaderných zařízení
Technetium 99	^{99}Tc	2.11×10^5 let	Používá se v medicíně
Plutonium 239	^{239}Pu	2.41×10^4 let	Vzniká z ^{238}U působením neutronů ($^{238}\text{U} + n \rightarrow ^{239}\text{U} \rightarrow ^{239}\text{Np} + \beta \rightarrow ^{239}\text{Pu} + \beta$)

Zdroj: WNA

12.1 Základy jaderné bezpečnosti

Dávkový ekvivalent

Radioaktivita některých materiálů

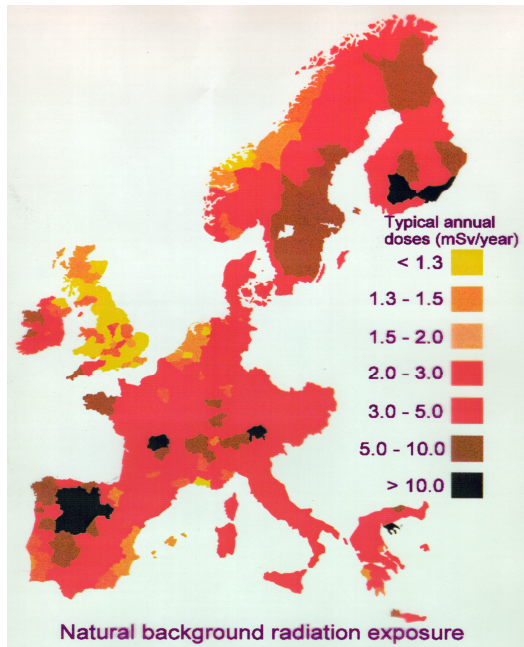
1 dospělý člověk (100 Bq/kg)	7000 Bq
1 kg kávy	1000 Bq
1 kg superfosfátového hnojiva	5000 Bq
Vzduch v průměrném domě (100 m ²) v Austrálii (radon)	3000 Bq
Vzduch v průměrném domě (100 m ²) v Evropě (radon)	až 30 000 Bq
1 domácí požární detektor kouře (obsahuje americium)	30 000 Bq
Radioisotopový zářič pro lékařskou diagnostiku (příklad)	70 milionů Bq
Radioisotopový zářič pro lékařskou terapii (příklad)	100 000 000 milionů Bq (100 TBq)
1 kg vitrifikovaných vysokoaktivních odpadů po 50 letech	10 000 000 milionů Bq (10 TBq)
1 luminiscenční světelné znamení „Exit“ (obsahuje tritium)	1 000 000 milionů Bq (1 TBq)
1 kg uranu	25 milionů Bq
1 kg uranové rudy (nálezště Kanada, 15 %)	25 milionů Bq
1 kg uranové rudy (nálezště Austrálie, 0.3 %)	500 000 Bq
1 kg nízkoaktivních jaderných odpadů (příklad)	1 milionů Bq
1 kg uhelného popílku	2000 Bq
1 kg granitu (žuly)	1000 Bq

Zdroj: JFI ČVUT v Praze

12.1 Základy jaderné bezpečnosti

Dávkový ekvivalent

Pro pochopení, jaká dávka je významná je nutné znát, jakému dávkovému ekvivalentu jsme běžně vystavováni.

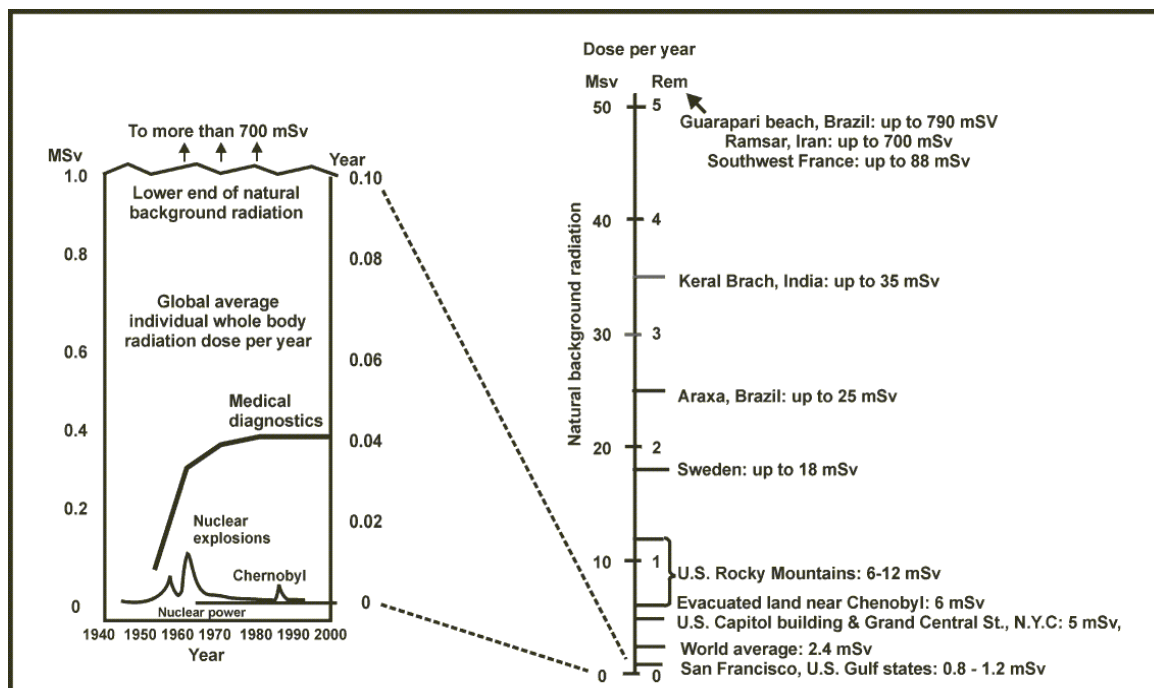


1) Objektivní dávkový ekvivalent - přírodní pozadí	
Kosmické záření	
na hladině moře	0,40 mSv/rok
každých 100m nadmořské výšky plus cca	0,03 mSv/rok
v našich podmínkách průměrně	0,5 mSv/rok
Záření z půdy: průměrně ve Střední Evropě:	0,35 mSv/rok
Záření ze stavebních materiálů:	0,4 mSv/rok
dřevo	0,3 mSv/rok
cihly, panely	0,4 mSv/rok
Záření ze vzduchu, z vody, z potravin: (průměrně podle druhu potravy):	0,25 mSv/rok
Objektivní přírodní pozadí průměrně celkem:	1,5 mSv/rok +)
+) z toho plyne rychlost (příkon) objektivního dávkového ekvivalentu 0,17 μ Sv/hod.	
2) Dávkový ekvivalent vyvolaný lidskou činností:	
a) lékařské aplikace záření:	
- jeden rentgenový snímek plic ... cca	2 mSv
- jedno rentgenové vyšetření zažívacího traktu ... cca	20 mSv
atd.	
b) 1 let tryskovým letadlem např. Evropa-New York a zpět ... cca	0,04 mSv
c) barevná televizní obrazovka: za každou hodinu sledování denně ... cca	0,02 mSv/rok
d) stálý pobyt v blízkosti jaderné elektrárny (normální provoz)... cca (maximálně)	0,01 mSv/rok (tj. méně než 1% přírodního pozadí)
e) zkoušky jaderných zbraní prováděné v atmosféře způsobily v 50-tých a 60-tých letech dávky, které v průměru dlouhodobě (po řadu let) převyšovaly přírodní pozadí asi o 150 %	

12.1 Základy jaderné bezpečnosti

Dávkový ekvivalent

Hodnoty radioaktivního pozadí



12.1 Základy jaderné bezpečnosti

Dávkový ekvivalent

Hodnoty radioaktivního pozadí

Ramsar, Iran

- vlivem radioaktivního vápence
- 400-600 mSV/rok



Pomeranč – 4 mikroSv/h
U obyvatele doma – 121 mikroSv/h
(v ČR je cca 0,2 mikroSv/h)



12.1 Základy jaderné bezpečnosti

Dávkový ekvivalent

Hodnoty radioaktivního pozadí

Guarapari, Brazílie

- thoriové písky
- 175-790 mSV/rok



Prospekt zve návštěvníky
do slavných mořských lázní.

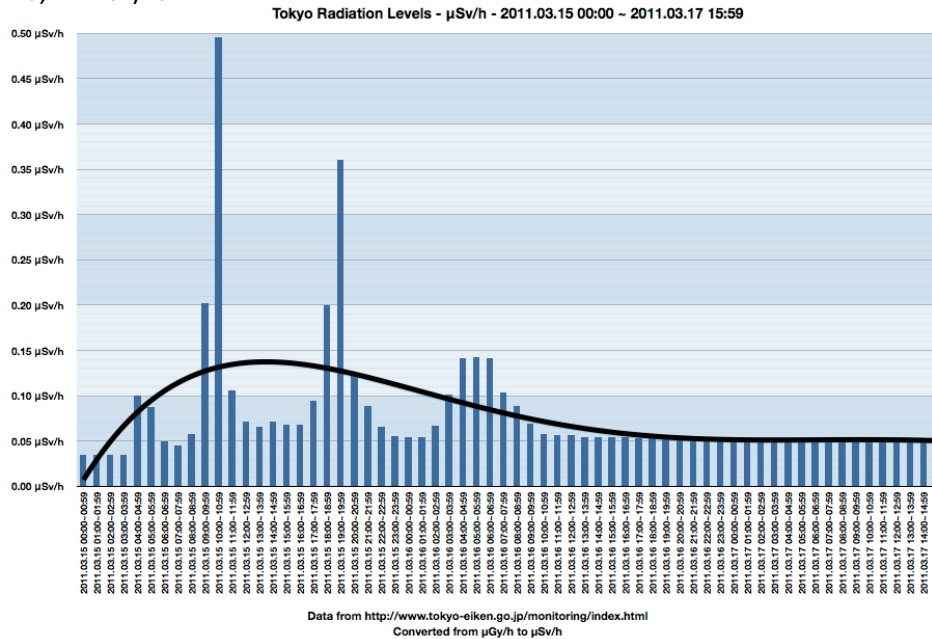
12.1 Základy jaderné bezpečnosti

Dávkový ekvivalent

Hodnoty radioaktivního pozadí

... a Tokyo?

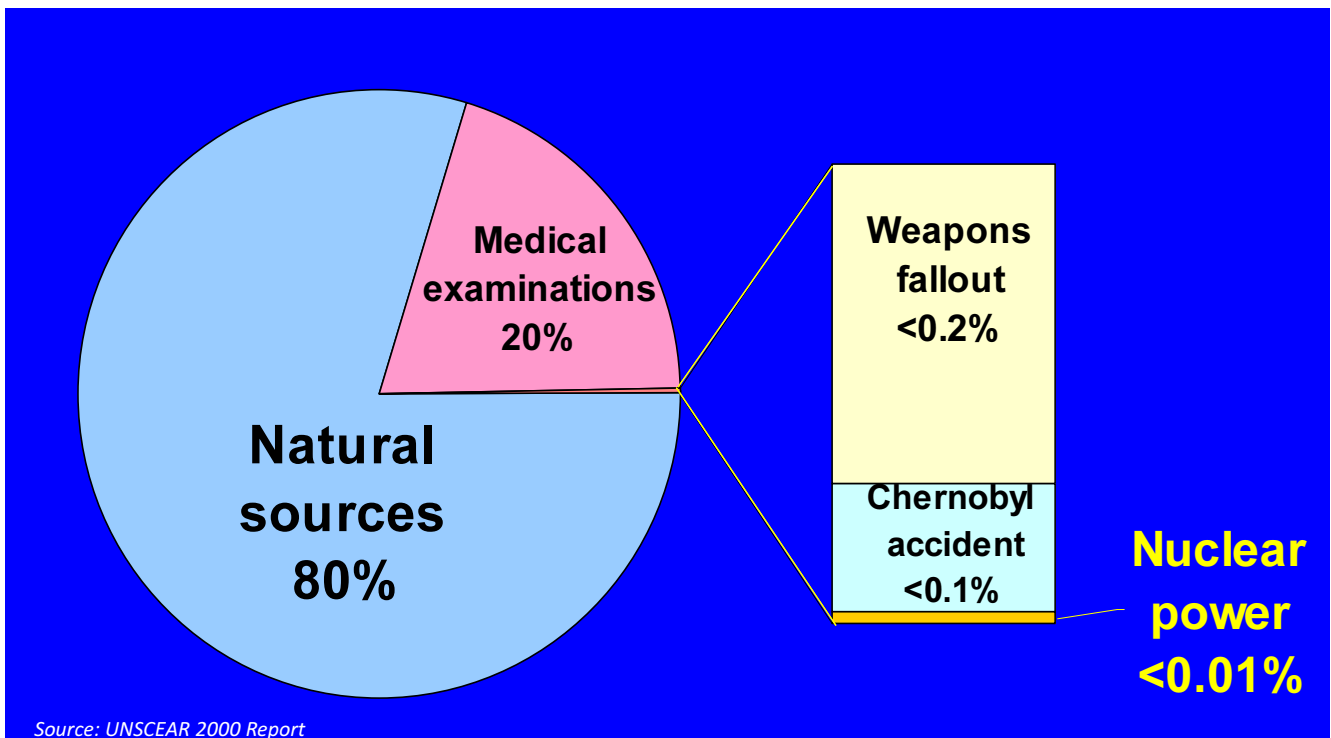
0,05 $\mu\text{Sv/h}$ = 0,44 mSv/rok



12.1 Základy jaderné bezpečnosti

Dávkový ekvivalent

poměrné dělení zdrojů ozáření - celosvětový průměr



12.1 Základy jaderné bezpečnosti

Biologické účinky záření

jsou popsány ekvivalentními dávkami

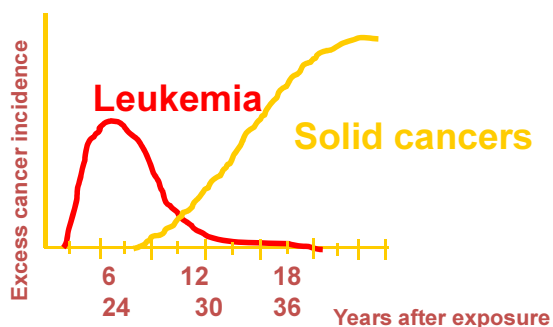
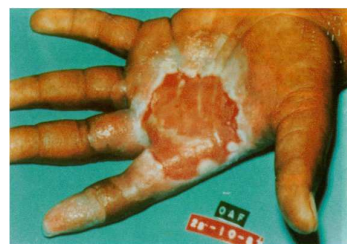
a) časné

- projeví se hned (velká dávka v řádu Sv)
- nemoc ze záření (fakticky pouze Černobyl)

b) pozdní

- typické pro pracovníky se zářením
- chronické, dlouhodobé onemocnění (leukemie, rakovina)
- stochastický jev, který zvyšuje pravděpodobnost onemocnění

1. somatické – projeví se u jedince
2. genetické – projeví se u potomků



12.1 Základy jaderné bezpečnosti

Biologické účinky záření

Každá zbytečná dávka škodí

– koncepte ALARA (As Low As Reasonable Achievable) = tak nízké, jak je rozumně dosažitelné

Tab. 14.3. Časné účinky záření při jednorázovém celotělovém ozáření velkými dávkami

Dávkový ekvivalent [Sv]	Počátek symptomů po ozáření	Hlavní postižený orgán	Úmrtnost (doba)	Příčina smrti
50	30 min	ústřední nervová soustava	100% (do 2 dnů)	selhání dýchacích ústrojí, otok mozku
10 -50	30 min	zažívací trakt	90-100 % (do dvou týdnů)	kolaps krevního oběhu
6 - 10	1 hod	krvetvorné orgány	80-100 % (do 2 měsíců)	vnitřní infekce
2 - 6	2 hod	krvetvorné orgány	0-80 % (do 2 měsíců)	vnitřní infekce
2	3 hod	krvetvorné orgány	0	-

12.2 Reaktor - zdroj záření

podle zdrojů reaktorového záření jej dělíme na 3 druhy:

- **okamžité**
 - neutronové + γ
 - pronikavé, vznikají při štěpné řetězové reakci;
 - trvá pouze za provozu reaktoru
- **záření štěpných troskek**
 - mají přebytek n – emitují neutrony + γ , nebo emitují elektrony (tj. β) + γ
 - trvá za provozu i po odstavení reaktoru
 - za normálních podmínek jsou obsaženy pouze v palivu, představují cca 99% celkového inventáře radioaktivních látek v I.O.
 - energie štěpných troskek se pohlcuje v palivu => zbytkový výkon => po odstavení reaktoru je nutné palivo chladit a stínit (γ záření)
- **indukované záření**
 - zdrojem je tzv. indukovaná radioaktivita
 - vznik v materiálech ve styku s neutrony (povlak, moderátor, chladivo, vnitřní vestavby, nádoba, ...)
 - stabilní izotop + $n \rightarrow$ nestabilní izotop + $\gamma \rightarrow (\beta^-)$ další izotop + γ
 - trvá i po odstavení reaktoru - nutno vybírat takové konstrukční materiály, které mají nízké Σ_a

12.3 Izolace radioaktivních látek od životního prostředí

Nutné dodržet jak za normálního provozu, tak při ostatních provozních režimech včetně havárií

- **za normálního provozu**
 - samotné palivo
 - povlaky
 - stěny I.O.
 - stěny hermetických prostor I.O.
 - filtry ventilačního systému
- **během poruch a havárií** – bariéry na sobě nejsou nezávislé. Při jejich poruše může dojít ke
 - kontaminaci chladiva vnitřního povrchu I.O.
 - kontaminaci vnitřních prostor bloku
 - kontaminaci životního prostředí

12.4 Jaderná bezpečnost

JE musí být vyprojektována a provozována tak, aby rizika s únikem rad. látek byla na společensky přijatelné úrovni

Základní filozofií zajištění jaderné bezpečnosti je koncepce hloubkové ochrany, která má několik základních stupňů:

- **prevence havárií** – znalost procesů, soustavná informovanost, kvalita a spolehlivost, násobnost důležitých systémů a komponent, lidský faktor, nezávislý státní dozor
- **ochrana AZ** – zajištění dostatečného množství chladiva + odvod zbytkového tepla z AZ
- **ochrana ŽP** – lokalizace radioaktivních látek uniklých při poruše předchozích bariér (hermetický prostor)
- **snížení následků havárií** – pokud dojde k tavení AZ, dlouhodobé zajišťování ochrany kontejnmentu, řízení činnosti při havárii

12. Bezpečnost jaderných reaktorů

výstupy z kapitoly

Základy jaderné bezpečnosti

- formy zářičů, způsob působení na člověka, pronikavost záření , druhy ozařování
- ionizační komora
- dávka, ekvivalentní dávka, kolektivní ekvivalentní dávka
- dávkový ekvivalent - přírodní pozadí a lidská činnost
- biologické účinky, koncepce ALARA

Reaktor – zdroj záření

- znát, co je okamžité záření, záření štěpných trosků a indukované záření

Izolace radioaktivních látek od životního prostředí

- bariéry za normálního provozu i během poruch a havárií

Jaderná bezpečnost

- koncepce hloubkové ochrany – co vše zahrnuje