

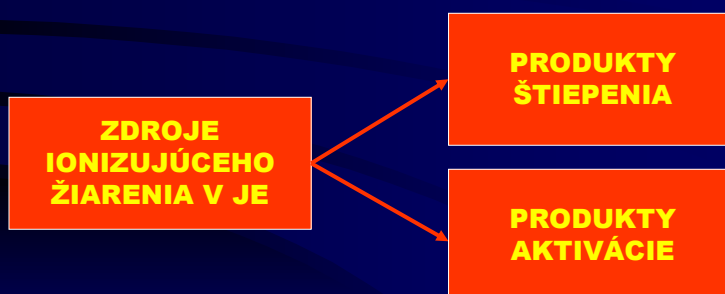
Zdroje žiarenia v jadrovej elektrárni

Ing. Róbert Hinca

Dozimetria a radiačná ochrana

Jadrový reaktor ako zdroj žiarenia

- Žiarenie v jadrovej elektrárni pochádza zo zdrojov ionizujúceho žiarenie vznikajúcich pri štiepení jadrového paliva a pri aktivácii neutrónmi.



Žiarenie v JE

- Obsah rádionuklidov v reaktore sa nazýva inventár reaktora.
- Inventár štiepných produktov je oveľa väčší ako inventár aktivačných produktov.
- Rádionuklidy, ktoré môžu významným spôsobom vplývať na biosféru a môžu sa dostať do potravinového reťazca nazývame biologicky významnými (^{14}C , ^3H , ^{90}Sr , ^{131}I , ^{137}Cs a pod.).

Okamžité primárne žiarenie pri štiepení

- Fragmenty štiepenia sú vo vysoko excitovanom stave.
- Prebytočnej energie sa zbavujú emisiou neutrónov, protónov, alfa častíc a napokon gama kvantov.
- Pravdepodobnosť emisie jednotlivých častíc závisí od väzobnej energie častice E_v a energetickej bariéry E_B .
- Z tabuľky je vidieť, že najväčšiu pravdepodobnosť emisie majú neutróny.

Fragment	Neutrón		Protón		α - častica	
	E_v (MeV)	E_B (MeV)	E_v (MeV)	E_B (MeV)	E_v (MeV)	E_B (MeV)
^{72}Ni	7,39	1,15	17,68	5,05	13,18	8,73
^{72}Cu	4,76	1,15	10,80	5,23	10,27	9,05
^{100}Zr	7,23	0,93	12,82	6,86	5,21	12,04
^{100}Nb	5,87	0,93	9,62	6,86	5,99	12,04
^{137}Te	4,5	0,75	11,93	8,36	0,55	14,9
^{137}Xe	3,88	0,75	10,57	8,36	1,95	14,9
^{161}Gd	5,46	0,67	9,24	9,45	0,82	17,0
^{161}Sm	4,38	0,67	11,04	9,45	2,54	17,0

Hlavné zdroje neutrónov v JE

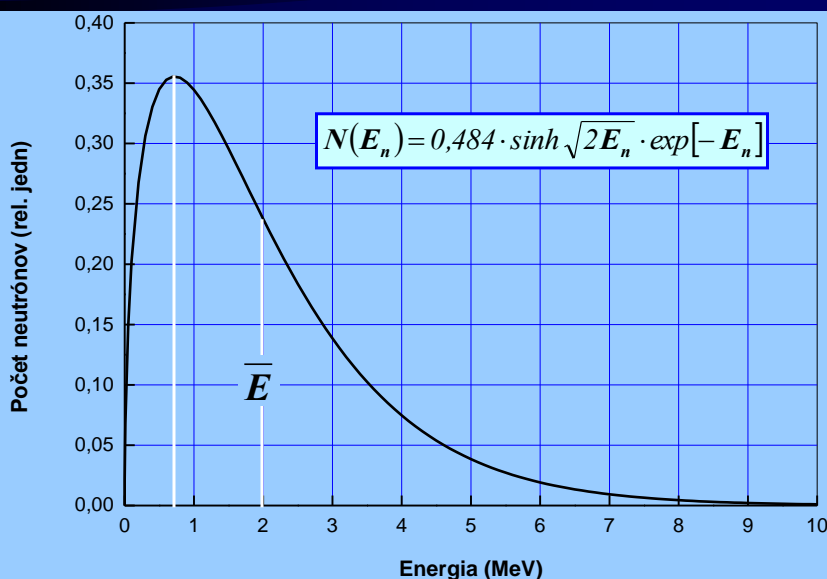
- Okamžité neutróny vznikajú emisiou zo štiepných fragmentov bezprostredne po štiepení (hovorí sa o čase 10^{-13} s).
- V priemere sa pri štiepení jadra ^{235}U uvoľní 2,46 neutrónov.
- Neutróny odnášajú v priemere na jedno štiepenie energiu 5 MeV.
- Energetické spektrum okamžitých neutrónov popisuje Wattovo spektrum (1952).

$$N(E_n) = 0,484 \cdot \sinh \sqrt{2E_n} \cdot \exp[-E_n]$$

Dozimetria a radiačná ochrana

5

Wattovo štiepne spektrum



Energia uvoľnená pri štiepení

Forma uvoľnenia energie	Množstvo energie
Kinetická energia štiepných fragmentov	162 MeV
Okamžité gama	5 MeV
Oneskorené gama (~10 fotónov)	8 MeV
Okamžité neutróny	5 MeV
Oneskorené neutróny	7 MeV
Beta častice fragmentov	8 MeV
Záchytné žiarenie gama	7 MeV
Energia produktov rozpadu produktov štiepenia	...
Stredná energia uvoľnená pri štiepení	~200 MeV

Dozimetria a radiačná ochrana

7

Hlavné zdroje neutrónov v JE

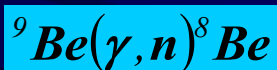
- Oneskorené neutróny sú emitované z excitovaných stavov štiepných produktov.
- V priemere 0,65% neutrónov sa pri štiepení ^{235}U (0,21% pre ^{239}Pu) uvoľní s oneskorením (priemerný čas je 14 s).
- Majú veľký význam pre kinetiku reaktora a bezpečnosť JE.
- Reaktory sú kritické len vrátane oneskorených neutrónov.
- Stredná energia oneskorených neutrónov je 500 keV.

Dozimetria a radiačná ochrana

8

Hlavné zdroje neutrónov v JE

- Fotoneutróny sú emitované pri reakcii (γ, n) .
- Reakcie so vznikom fotoneutrónov sú prahové a spôsobujú ho hlavne vysoko-energetické fotóny γ .
- Hlavnými zdrojmi sú ^2H alebo ^9Be .
- V reaktore sú málo významné.
- Môžu byť zdrojom neutrónov v materiáloch mimo reaktora.



Hlavné zdroje gama žiarenia v JE

- Okamžité gama je uvoľnené fragmentami štiepenia okamžite. Časovo považujeme za hranicu $5 \cdot 10^{-8}$ s. Hranica je výsledkom dohody.
- Celková uvoľnená energia je asi 5 MeV.
- Je rozdelená na cca. 10 fotónov. Teda priemerná energia je menšia ako 1 MeV.
- Spektrum fotónov je spojité a rýchlo klesá s rastúcou energiou. Ojedinele však môžeme v spektre objaviť aj fotóny s energiou 10 MeV.

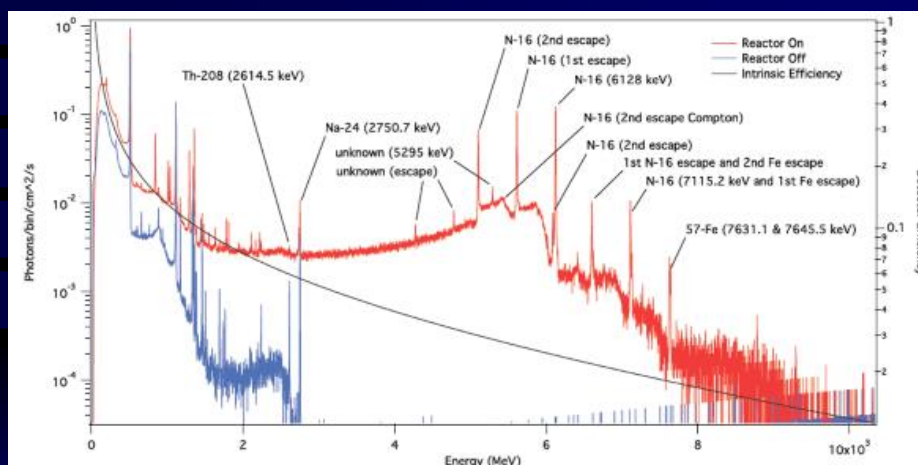
Hlavné zdroje gama žiarenia v JE

- Gama z radiačného záchytu neutrónov - vzniká v komponentoch reaktora a mimo reaktora, napr. v samotnom tienení.
- Fotóny majú v priemere vyššiu energiu ako okamžité a oneskorené fotóny.
- Napr. pri záchyte na ^{10}B až 11,43 MeV, na ^{14}N až 10,83 MeV a na ^{56}Fe od 3,2 do 7,6 MeV (27 čiar).
- Energia závisí od zloženia konštrukčných materiálov.
- Energia uvoľnená touto formou dosahuje 2-8 MeV na jedno štiepenie.

Dozimetria a radiačná ochrana

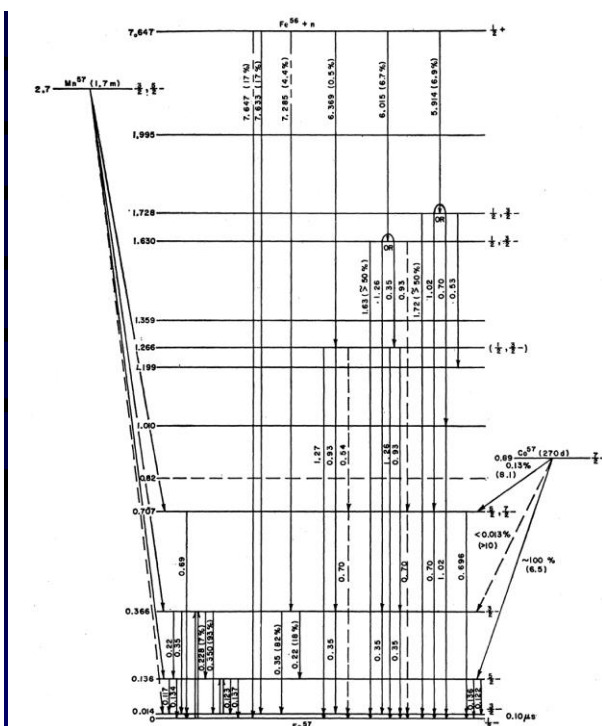
11

Spektrum gama žiarenia v okolí reaktora



Radiačná ochrana

12



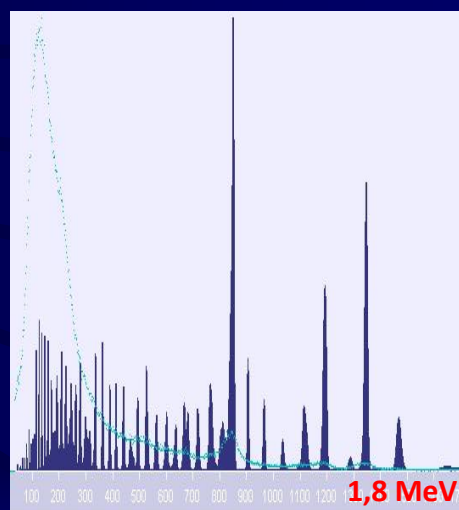
**Radiačný
záchyt
tepelných
neutrónov v
železe Fe-56**

**Štruktúra
energetických
hladín**

13

Zložky spektra dávkového príkonu nad poklopom PG14 EMO1, odstavený reaktor

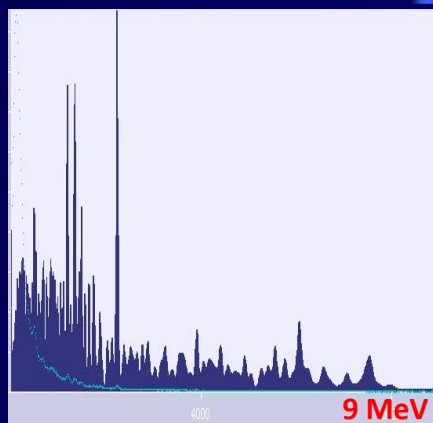
Nuklid	$T_{1/2}$	E [keV]	γ [%]
Anih.		511.0	
Cs-137	30.17 r	661.7	85.1
Mn-54	312.7 d	834.8	100
Fe-59	44.63 d	1 099.2	56.5
Fe-59	44.63 d	1 291.6	43.2
Co-58	71 d	810.8	99.4
Co-60	5.3 r	1 173.2	100
Co-60	5.3 r	1 332.5	100
Ag-110 m	249.85 d	657.7	94.4
Ag-110 m	249.85 d	677.6	10.7
Ag-110 m	249.85 d	706.7	16.7
Ag-110 m	249.85 d	763.9	22.3
Ag-110 m	249.85 d	884.7	72.6
Ag-110 m	249.85 d	937.5	34.2
Ag-110 m	249.85 d	1 384.3	24.3
Ag-110 m	249.85 d	1 505.0	13.1
K-40	1.3 10^9 r	1 460.8	32.5



14

Spektrum dávkového príkonu, reaktorová sála (poklop HCČ 6)

Nuklid, interakcia	E [keV]	γ [%]
Fe-56 (n, γ)	7 646,73	24,1
	7 632,47	28,5
	6 019,41	9
	5 921,17	9
N-16	6 129,85	69
H-1 (n, γ)	2 225,5	
Anih,	511	
Co-60	1 332,501	100
	1 173,237	100
Mn-54	834,838	100
Cs-137	661,657	85,1



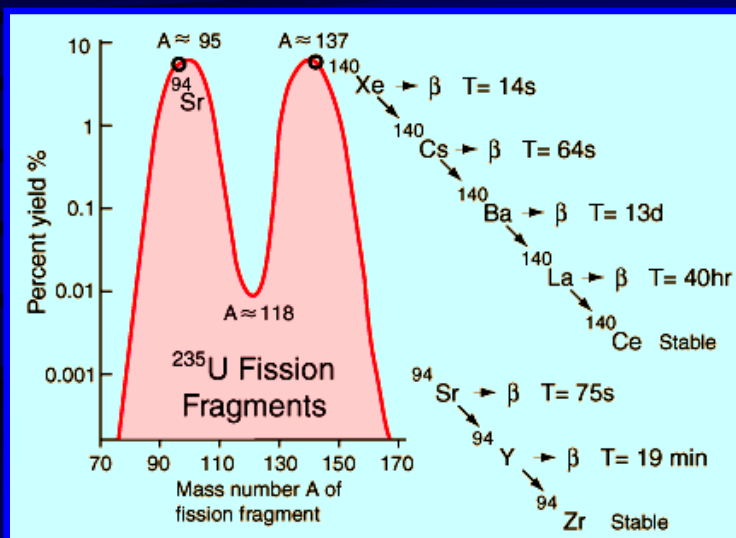
Hlavné zdroje gama žiarenia v JE

- Oneskorené gama je emitované produktami štiepenia.
- Väčšia časť sa vyžiarí v dobe do 10^{-3} s.
- 75% sa vyžiarí do 10^3 s.
- Počas prevádzky môžeme túto zložku považovať za konštantnú.
- Po odstavení prevláda gama žiarenie z dlho žijúcich produktov štiepenia.

Hlavné zdroje gama žiarenia v JE

- Gama z nepružného rozptylu neutrónov má oveľa menší význam.
- Nepružný rozptyl je prahový proces.
- Významný je pre energie 5 - 10 MeV.
- Energia uvoľnená touto formou dosahuje 2-8 MeV na jedno štiepenie.

Prehľad štiepných rádionuklidov



Biologicky najvýznamnejšie štiepne produkty

Vzácne plyny	^{85}Kr ^{87}Kr ^{88}Kr	$T_{1/2}=10,8 \text{ r}$ $T_{1/2}=1,3 \text{ h}$ $T_{1/2}=2,8 \text{ h}$	^{133}Xe ^{135}Xe	$T_{1/2}=5,3 \text{ d}$ $T_{1/2}=9,2 \text{ h}$
Prchavé látky	^{129}I ^{131}I ^{133}I	$T_{1/2}=1,6 \cdot 10^7 \text{ r}$ $T_{1/2}=8 \text{ d}$ $T_{1/2}=21 \text{ h}$	^{135}I ^{134}Cs ^{137}Cs	$T_{1/2}=6,7 \text{ h}$ $T_{1/2}=2,1 \text{ r}$ $T_{1/2}=30 \text{ r}$
Trícium	^3H	$T_{1/2}=12,3 \text{ r}$		
Neprchavé látky	^{140}La ^{89}Sr ^{90}Sr ^{140}Ba	$T_{1/2}=40,2 \text{ h}$ $T_{1/2}=50 \text{ d}$ $T_{1/2}=28,5 \text{ r}$ $T_{1/2}=12,8 \text{ d}$	^{91}Y ^{95}Nb ^{103}Ru ^{106}Ru	$T_{1/2}=58 \text{ d}$ $T_{1/2}=35 \text{ d}$ $T_{1/2}=40 \text{ d}$ $T_{1/2}=1 \text{ r}$

Dozimetria a radiačná ochrana

20

Céziu-137

- Céziu je alkalický kov, chemicky agresívny, vlastnosťami podobný na **sodík a draslík**, vytvára soli dobre rozpustné vo vode.
- Polčas rozpadu ^{137}Cs je $T_{1/2} = 30$ rokov, preto sa môže nachádzať v životnom prostredí stovky rokov po jeho úniku. Iné izotopy: ^{134}Cs vzniká aktiváciou ^{133}Cs a má $T_{1/2} = 2$ roky.
- V ľudskom organizme sa nachádza prevažne **v mäkkých tkanivách a telových tekutinách**. Céziu v rozpustnej forme je prakticky úplne absorbovaný v tráviacom trakte. Absorpcia cézia z potravín je v priemere 80 %.
- Biologický polčas cézia v organizme priemerného dospelého jedinca je 110 dní a priemerného 10-ročného dieťaťa je 50 dní

Dozimetria a radiačná ochrana

21

Céziom-137

- Céziom je produkt štiepenia s vysokým výťažkom ($\approx 5\%$).
- Pri havárii v Černobyle unikol hlavne vo forme aerosólov so stredným priemerom v rozmedzí 0,5-1,0 mikrometra.
- V dažďovej vode sa nachádzal v koloidnej forme a len veľmi málo v iónovej forme.
- V morskej vode zostáva hlavne v iónovej forme (95%).
- V sladkej vode sa väčšia časť nachádza vo vyvrážděných kaloch.
- V pôde sa rýchlo chemicky viaže a len malá časť (15%) zostáva dostupná pre rastliny.
- \Rightarrow forma závisí od minerálneho obsahu vôd resp. pôd.

Céziom-137

- ^{137}Cs , ktoré je v súčasnosti ešte stále merateľné **v hubách, lesných plodoch, v machoch, v pôde, tráve, v drevnej hmote**,... pochádza z rádioaktívneho spad, ktorý sa k nám dostal po havárii jadrového reaktoru v Černobyle v roku 1986. Vyššie koncentrácie ^{137}Cs v životnom prostredí sú zaznamenávané v regiónoch, kde v období po havárii v Černobyle najviac pršalo.
- Najvyššie prípustné úrovne kontaminácie potravín pre pretrvávajúce ožiarenie po černobyľskej havárii sú uvedené v nariadení vlády č. 345/2006 Z. z. o základných bezpečnostných požiadavkách na ochranu zdravia pracovníkov a obyvateľov pred ionizujúcim žiarením. Pre ^{137}Cs v hubách je to **600 Bq/kg**. Rovnaké „limity“ platia v celej EÚ.

Merania húb v BB kraji, sezóna 2011

Druh huby	Miesto odberu	^{137}Cs (Bq/kg v čerstvom stave)*
Masliak zrnitý	Riečka - Buliková	(2,1 ± 0,4)
Plávky zmes	B. Bystrica – Marková	(34,7 ± 3,3)
Peniazovka maslová	Donovaly – Polianka	(4,1 ± 0,4)
Plávka celistvookrajová	Lom nad Rimavicou	(3,7 ± 0,5)
Suchohrúb žltomäsový	Lom nad Rimavicou	(4,1 ± 0,5)
Kuriatko jedlé	Hrochoť – Dúbrava	(16,7 ± 1,5)
Kozák hrabový - klobúčiky	Hrochoť – Hlboká	(1,5 ± 0,4)
Kozák hrabový - hlúbiky	Hrochoť – Hlboká	(2,1 ± 0,3)
Plávka krehká - klobúčiky	Ponická Huta - Veľká dolina	(3,7 ± 0,6)
Plávka krehká - hlúbiky	Ponická Huta - Veľká dolina	(1,3 ± 0,3)
Kozák hrabový - klobúčiky	Ponická Huta - Veľká dolina	(17,4 ± 1,5)
Kozák hrabový - hlúbiky	Ponická Huta - Veľká dolina	(8,3 ± 0,9)
Hrúb smrekový- klobúčiky	Ponická Huta - Veľká dolina	(7,5 ± 1,1)
Hrúb smrekový- hlúbiky	Ponická Huta - Veľká dolina	(2,4 ± 0,6)
Rýdzik pravý	Ponická Huta - Veľká dolina	(16,3 ± 1,6)

Dozimetria a radiačná ochrana

24

Stroncium-90

- Chemicky patrí do skupiny kovov alkalických zemín
- Stroncium je produkt štiepenia s vysokým výťažkom (≈5%).
- Polčasy premeny ^{89}Sr a ^{90}Sr sú 50 dní resp 28,8 roka.
- Vo vode sa dobre rozpúšťa a len malá časť sa dostáva do usadenín a kalov (v morskej vode ~1% v sladkej <10%)
- V metabolizme sa správa podobne ako **vápnik** a je veľmi nebezpečný z pohľadu ukladania v kostiach živých organizmov. Ako súčasť kostí je potom prakticky nemožné odstrániť resp. vylúčiť Sr-90 z organizmu. Tu môže potencionálne spôsobiť rakovinu poprípade poškodenie rýchlo reproduktujúcich sa buniek kostnej drene.

Dozimetria a radiačná ochrana

28

Stroncium-90

- ^{137}Cs spolu so ^{90}Sr sú najnebezpečnejšie rádioaktívne izotopy s ohľadom na dlhodobé účinky v životnom prostredí.
- Cs-137 a Sr-90 sú produkty ľudskej činnosti a v životnom prostredí sa pôvodne vôbec nenachádzali. Ich výskyt v prírode je dôsledkom atmosferických jadrových testov a jadrových havárií ako boli vo Windscale alebo v Černobyle.

Jód-131

- Jód-131 spôsobuje najväčšie znepokojenie pri únikoch počas jadrových nehôd, pretože je prchavý, rádioaktívny, s polčasom premeny $T_{1/2} = 8$ dní.
- Jód-131 môže spôsobiť väčšie počiatočné dávky u obyvateľstva pri úniku, ale jeho krátky polčas premeny zabezpečí jeho rýchly rozpad.
- Jód je nebezpečný pri jeho vnútornom príjme človekom, pričom sa prednostne hromadí v štítnej žľaze a môže spôsobiť jej rakovinu.
- Profilaktikou k príjmu rádioaktívneho jódu organizmom môže byť včasné podávanie KI tablietiek (jodid draselný), čo zabezpečí nasýtenie organizmu jódom a neskôr prijímaný rádioaktívny jód bude z organizmu vylučovaný.

Jód-131

- Jód je halogén. V prírode sa vyskytuje v nízkych koncentráciách no je „všadeprítomný“.
- Pri havárii jód unikal v rôznych formách, hlavne v plynnej forme elementárneho jódu, prchavých organických jodidov, pevných častíc aerosólov.
- V pôde sa 10% jódu nachádza vo forme dostupnej pre rastliny.
- Zo vzduchu sa usadzuje hlavne suchým spôsobom v elementárnej forme.
- Do ľudského organizmu postupuje v rozpustnej forme cez pokožku, pľúca a zažívací trakt.

Dozimetria a radiačná ochrana

32

Uvoľňovanie jódu, cézia a telúru po havárii ČJE

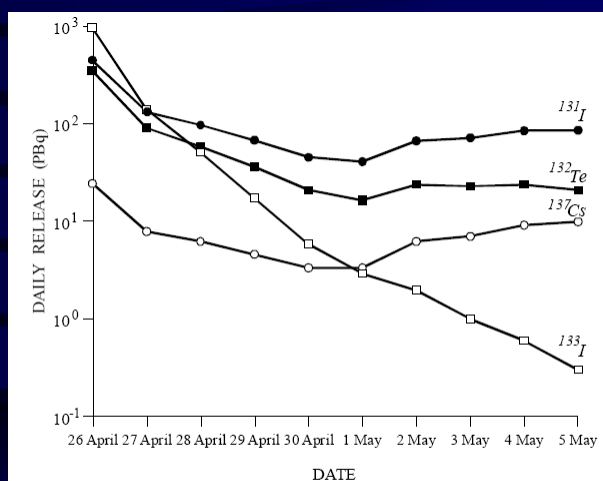


Figure II. Daily release of iodine-131, iodine-133, tellurium-132 and caesium-137 from the Chernobyl reactor.

Dozimetria a radiačná ochrana

33

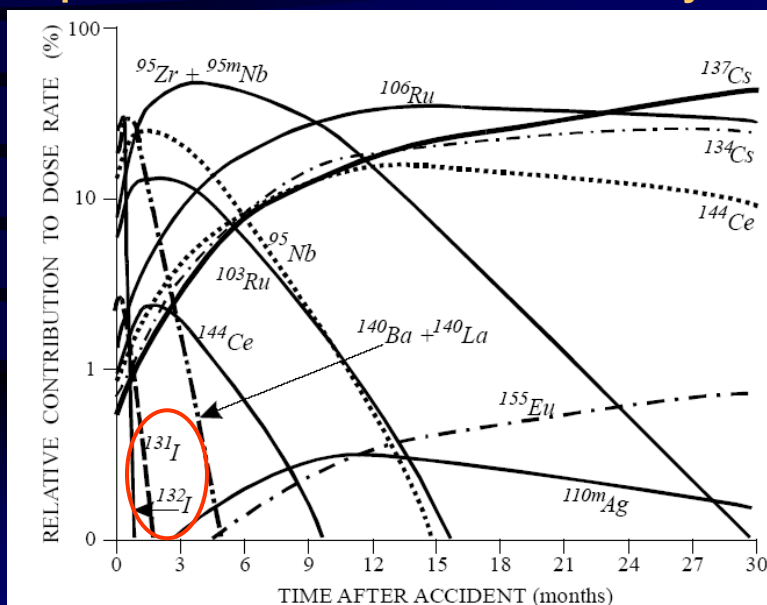
Iné rádioaktívne prvky

- **Ruténium** 103 a 106 ($T_{1/2}$ =39,3 a 368 dní) sa vo forme kysličníkov RuO_3 a RuO_4 a vo forme aerosolov dostali vo veľkom množstve do životného prostredia a spôsobili kontamináciu.
- Normálne je ruténium kov a „mal zostať“ v reaktore v pevnom zvyšku.
- **Cérium** je lantanoid, významný produkt štiepenia, izotopy 144 a 141 ($T_{1/2}$ =284 resp. 32,5 dní). V prírode cérium chemicky zamenil pôdne minerály čím kontaminoval pôdu. V malom množstve sa môže dostať do rastlín, len 5% sa nachádza v rozpustných formách.
- **Plutónium** je aktinoid s nízkou prchavosťou. Je málo rozpustný. Kontamínuje pôdu a usadeniny vodných tokov. Najčastejšie sa vyskytujú izotopy 238; 239 a 240 s polčasom 87,7; 24000 a 6600 rokov.
- Ag, Te, Zn, Ni, La, Tc, Am

Dozimetria a radiačná ochrana

34

Príspevok rôznych nuklidov k dávkovému príkonu vo vzduchu v okolí Černobyľa



Spôsoby vzniku trícia vo VVER

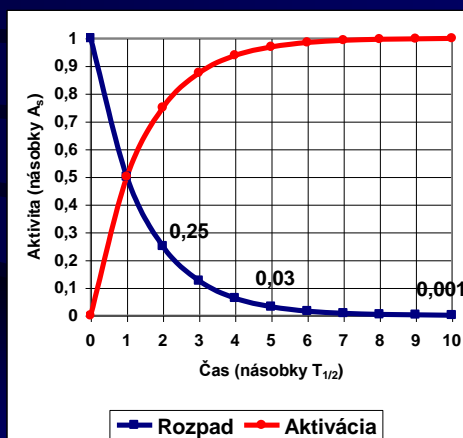
Zdroj	Aktivita, $\text{Bq} \cdot (\text{MW}_{\text{el}} \cdot \text{rok})^{-1}$
Delenie	$(6,66 - 7,4) \cdot 10^{11}$
Aktivácia	
$\text{D}(n, \gamma)\text{T}$	$3,7 \cdot 10^6$
${}^6\text{Li}(n, \alpha)\text{T}$	$7,4 \cdot 10^7$
${}^{10}\text{B}(n, 2\alpha)\text{T}$	$1,85 \cdot 10^{10}$

Dozimetria a radiačná ochrana

36

Aktivačné produkty

- Gama žiarenie zo zdrojov žiarenia vzniknutých aktiváciou konštrukčných materiálov, samotného paliva a prímiesí v chladiči, moderátore.



Dozimetria a radiačná ochrana

37

Indukovaná aktivita prvku:

$$A = \left[1 - e^{-\lambda t}\right] \cdot n \cdot \int_0^{\infty} \varphi(E) \sigma(E) dE$$

- λ - konštanta premeny s^{-1}
- $\sigma(E)$ - účinný prierez aktivácie daného nuklidu pre energiu neutrónu E
- $\varphi(E)dE$ - hustota toku neutrónov s energiou v intervale $(E, E+dE)$
- n - je počet jadier absorbátora v jednotke hmotnosti.

Indukovaná aktivita v materiáloch JE

Chladivo + moderátor - voda

Vlastná aktivita	$^{16}\text{O}(n, p)^{16}\text{N}$ $T_{1/2}=7,4$ s emituje γ	99,8% 0,039%
	$^{17}\text{O}(n, p)^{17}\text{N}$ $T_{1/2}=4,1$ s emituje β a n	
	$^{18}\text{O}(n, \gamma)^{19}\text{O}$	
	$^2\text{H}(n, \gamma)^3\text{H}$ $T_{1/2}=12,3$ r	
Aktivita prímiesí	minerálne soli ^{24}Na , $^6\text{Li}(n, \alpha)^3\text{H}$, $^{10}\text{B}(n, 2\alpha)^3\text{H}$ rozpuštené plyny ^{41}Ar , $^{14}\text{N}(n, p)^{14}\text{C}$ produkty korózie ^{59}Fe , ^{60}Co , ^{56}Mn , ^{51}Cr ... štiepne produkty Kr, Xe, I	

Konstrukčné materiály

$^{59}\text{Fe}(T_{1/2}=45 \text{ d})$, $^{60}\text{Co}(T_{1/2}=5,3 \text{ r})$, $^{54}\text{Mn}(T_{1/2}=312 \text{ d})$,
 $^{51}\text{Cr}(T_{1/2}=28 \text{ d})$, $^{58}\text{Co}(T_{1/2}=71 \text{ d})$, $^{65}\text{Zn}(T_{1/2}=244 \text{ d})$,
 $^{95}\text{Nb}(T_{1/2}=35 \text{ d})$, $^{95}\text{Zr}(T_{1/2}=64 \text{ d})$,
 $^{110}\text{Ag}(T_{1/2}=250 \text{ d})$, $^{14}\text{C}(T_{1/2}=5730 \text{ r})$

Palivo

Transuránové prvky	$^{237,239}\text{Np}$, $^{238-242}\text{Pu}$, $^{241, 243}\text{Am}$, $^{242, 244}\text{Cm}$
--------------------	---

Rádioaktívne plyny

- **Vzácne plyny** tvoria významnú časť plynných výpustí JE.
- Existuje najmenej 9 rádioizotopov **kryptónu** Kr a 11 rádioizotopov **xenónu** Xe, ktoré sa dostávajú z paliva do chladiča a neskôr do ventilácie.
- Aktiváciou vzduchu (^{40}Ar) vzniká rádioaktívny **argón** ^{41}Ar .
- **Trícium** ^3H tvorí podstatnú zložku plynných a kvapalných výpustí JE.
- Vo forme plynov (resp. plynných zlúčenín) sa uvoľňujú aktivačné produkty: ^{14}C , ^{16}N , ^{35}S , ^{41}Ar , ^{75}Se , ^{76}As , trícium, jód.

Výpuste rádioaktívnych látok pri normálnej prevádzke JE pre lokalitu Jaslovské Bohunice (V1+V2)

Plynné výpuste:

Typické nuklidy a hodnoty pre JE EBO:
Ročný limit (čerpanie z ročného limitu %)

vzácne plyny: $^{133}, ^{135}\text{Xe}, ^{85\text{m}}, ^{88}\text{Kr}$	4 000 TBq·rok⁻¹ (0,5-1 %)
prchavé štiepne produkty: $^{131-135}\text{I}, ^{134}, ^{137}\text{Cs}$	130 GBq·rok⁻¹ (0,5-1 %)
trícium (HTO a HT): ^3H	4,3 TBq·rok⁻¹ (0,1%)
aerosoly $^{89}, ^{90}\text{Sr}, ^{58}, ^{60}\text{Co}$ a iné	160 GBq·rok⁻¹ (0,1-0,5 %)

Výpuste rádioaktívnych látok pri normálnej prevádzke JE pre lokalitu Jaslovské Bohunice (V1+V2)

Kvapalné výpuste:	Ročný limit (čerpanie limitu %)
štiepne produkty, aktivované korózne produkty, ^{58, 60} Co, ²³⁹ Pu a iné úniky celkom:	38 GBq·rok⁻¹ (0,3 - 0,5 %)
trícium (HTO):	43,7 TBq·rok⁻¹ (35 - 65%)
Celkové množstvo odpadových vôd do recipientu Váh	15,6·10⁶ m³·rok⁻¹ (10-20%)
Celkové množstvo odpadových vôd do recipientu Dudvák	1,1·10⁶ m³·rok⁻¹ (8-15%)

Dozimetria a radiačná ochrana

42

Výpočet rizika z prevádzky JE

- Pri výpočte rizika z plyných výpustí JE sa vychádza z nasledovných údajov:
 - množstvo rádioaktívnych látok v úlete JE,
 - meteorologické údaje - stredná rýchlosť vetra, veterná ružica, koeficienty turbulentnej difúzie, výška komína,
 - demografické údaje, hustota osídlenia v okolí JE,
 - koeficient rizika úmrtia v dôsledku zhubných nádorov a genetických následkov.

Dozimetria a radiačná ochrana

43

Výpočet efektívnej dávky

$$E = E_{\text{external}} + \sum_j h(g)_{j,\text{ing}} \cdot I_{j,\text{ing}} + \sum_j h(g)_{j,\text{inh}} \cdot I_{j,\text{inh}}$$

E [Sv] - je celková efektívna dávka, ktorá sa porovnáva s limitnou hodnotou

E_{external} [Sv] - efektívna dávka z vonkajšieho ožiarenia

$I_{j,\text{ing}}$ [Bq] - je príjem rádionuklidu j za rok potravou

$h_{(g)j,\text{ing}}$ [Sv·Bq⁻¹] - konverzný faktor na výpočet úväzku efektívnej dávky z príjmu rádionuklidu j potravou pre vekovú skupinu g (NV 345/2006)

$I_{j,\text{inh}}$ [Bq] - je príjem rádionuklidu j za rok dýchaním

$h_{(g)j,\text{inh}}$ [Sv·Bq⁻¹] - konverzný faktor na výpočet úväzku efektívnej dávky z príjmu rádionuklidu j dýchaním pre vekovú skupinu g (NV 345/2006)

Príjem rádionuklidov potravou a dýchaním

$$I_{j,\text{ing}} = \sum_p a_{p,j} \cdot P_p$$

$$I_{j,\text{inh}} = a_{v,j} \cdot B$$

$a_{p,j}$ [Bq·kg⁻¹ resp. Bq·l⁻¹] - je priemerná ročná merná aktivita rádionuklidu j v potravine p a vode

P_p [kg resp. l] - je spotreba potravy P v jednom roku

$a_{v,j}$ [Bq·m⁻³] - je priemerná ročná merná aktivita rádionuklidu j vo vzduchu

B [Bq·m⁻³] - je množstvo vdychovaného vzduchu v jednom roku

Výpočet externého ožiarenia pre bodový, ploský a objemový zdroj žiarenia

$$\dot{K}_{vzd} = \frac{A \cdot \Gamma}{R^2}$$

Výpočet príkonu kermy vo vzduchu od
bodového zdroja [Gy]

A - aktivita zdroja [Bq]

Γ - kermová konštanta gama [Gy·m²]

R - vzdialenosť od zdroja [m]

$$\dot{V}_{vzd} = f_a \cdot a$$

Výpočet príkonu príslušnej
dozimetrickej veličiny pre ploský alebo
objemový zdroj žiarenia

f_a - konverzný faktor prevádzajúci plošnú
alebo objemovú aktivitu na príslušný príkon
veľičiny V [Sv·s⁻¹·Bq⁻¹·m³]

a - plošná alebo objemová aktivita
[Bq·m⁻², Bq·t⁻¹, Bq·m⁻³]

Dozimetria a radiačná ochrana

46

Konverzné koeficienty pre výpočet efektívnej dávky ožiarenia z rôznych zdrojov (vnútorné ožiarenie pri dýchaní, externé ožiarenie z rádioaktívneho mraku a zo zemského povrchu)

Nuclide	Inhalation Dose Coefficients (Sv Bq ⁻¹)						External Dose Coefficients ^(a)	
	3 months	1 Year	5 Years	10 Years	15 Years	Adult	Cloudshine (Sv s ⁻¹ Bq ⁻¹ m ³)	Groundshine (Sv s ⁻¹ Bq ⁻¹ m ²)
a) Particulates								
Hydrogen							0	0
Tritium compounds	3.4e-10	2.7e-10	1.4e-10	8.2e-11	5.3e-11	4.5e-11		
Carbon	8.3e-09	6.6e-09	4.0e-09	2.8e-09	2.5e-09	2.0e-09	2.60e-18	1.27e-20
C-14								
Sodium	2.3e-09	1.8e-09	9.3e-10	5.7e-10	3.4e-10	2.7e-10	2.08e-13	3.59e-15
Na-24								
Phosphorus	2.2e-08	1.5e-08	8.0e-09	5.3e-09	4.0e-09	3.4e-09	5.36e-16	8.52e-17
P-32								
P-33	6.1e-09	4.6e-09	2.8e-09	2.1e-09	1.9e-09	1.5e-09	1.45e-17	3.64e-20
Sulphur	5.9e-09	4.5e-09	2.8e-09	2.0e-09	1.8e-09	1.4e-09	3.11e-18	1.33e-20
S-35 (inorganic)								
Scandium	2.8e-08	2.3e-08	1.4e-08	9.8e-09	8.4e-09	6.8e-09	9.36e-14	1.88e-15
Sc-46								
Chromium	2.6e-10	2.1e-10	1.0e-10	6.6e-11	4.5e-11	3.7e-11	1.38e-15	2.97e-17
Cr-51								
Manganese	5.2e-09	4.1e-09	2.2e-09	1.5e-09	9.9e-10	8.5e-10	3.83e-14	7.91e-16
Mn-54								
Iron	1.9e-09	1.4e-09	9.9e-10	6.2e-10	4.4e-10	3.8e-10	0	0
Fe-55								
Fe-59	1.8e-08	1.3e-08	7.9e-09	5.5e-09	4.6e-09	3.7e-09	5.62e-14	1.10e-15
Cobalt	7.3e-09	6.5e-09	3.5e-09	2.4e-09	2.0e-09	1.6e-09	4.44e-14	9.25e-16
Co-58								
Co-60	4.2e-08	3.4e-08	2.1e-08	1.5e-08	1.2e-08	1.0e-08	1.19e-13	2.30e-15
Zinc	8.5e-09	6.5e-09	3.7e-09	2.4e-09	1.9e-09	1.6e-09	2.72e-14	5.41e-16
Zn-65								
Arsenic	5.1e-09	4.6e-09	2.2e-09	1.4e-09	8.8e-10	7.4e-10	2.06e-14	5.24e-16
Rubidium	1.9e-10	1.2e-10	5.2e-11	3.2e-11	1.9e-11	1.6e-11	3.33e-14	7.41e-16
Rb-88								
Sr-89	3.3e-08	2.4e-08	1.3e-08	9.1e-09	7.3e-09	6.1e-09	4.37e-16	6.86e-17
Sr-90								
Yttrium	1.5e-07	1.1e-07	6.5e-08	5.1e-08	5.0e-08	3.6e-08	9.83e-17	1.64e-18
Y-90								
Y-91	1.3e-08	8.8e-09	4.2e-09	2.7e-09	1.8e-09	1.5e-09	7.92e-16	1.10e-16
Zirconium	4.3e-08	3.4e-08	1.9e-08	1.3e-08	1.0e-08	8.9e-09	6.22e-16	7.46e-17
Zr-95								
Niobium	2.0e-08	1.6e-08	9.7e-09	6.8e-09	5.9e-09	4.8e-09	3.36e-14	7.04e-16
Nb-95								
Molybdenum	6.8e-09	5.2e-09	3.1e-09	2.2e-09	1.9e-09	1.5e-09	3.49e-14	7.28e-16
Mo-99								
Ruthenium	6.0e-09	4.4e-09	2.2e-09	1.5e-09	1.1e-09	8.9e-10	6.99e-15	1.78e-16
Ru-103								
Ru-106 ^(b)								
Silver								
Ag-110m								

External dose coefficients apply to the 5 Year - Adult age groups. For
3 Month and 1 Year age groups, multiply values by 1.5 (default).

Reference: ICRP Publication 72 (1996) for noble gases.
Eckerman and Leggett (1996) for particulates

Dozimetria a radiačná ochrana

47

Nominálne koeficienty pravdepodobnosti stochastických efektov

Ožiarená populácia	Pravdepodobnosť ujmy (10^{-2} Sv^{-1})			
	Fatálny nádor	Iný nádor	Dedičné následky	Celková ujma
Dospelí profesionáli	4,0	0,8	0,8	5,6
Celá populácia	5,0	1,0	1,3	7,3

- zdroj ICRP 60

Pravdepodobnosť vzniku fatálneho nádoru pre jednotlivé tkanivá a orgány (10^{-2} Sv^{-1})

Tkanivo alebo orgán	Celá populácia	Profesionáli
Mechúr	0,3	0,24
Kostná dreň	0,50	0,40
Kosti	0,05	0,04
Prsník	0,20	0,16
Hrubé črevo	0,85	0,68
Pečeň	0,15	0,12
Pľúca	0,85	0,68
Pažerák	0,30	0,24
Pohlavné žľazy	0,10	0,08
Koža	0,02	0,02
Žalúdok	1,10	0,88
Štitna žľaza	0,08	0,06
Ostatné	0,50	0,40
Spolu	5,00	4,00
Dedičné následky	1,00	0,6

Koeficient celkovej ujmy pri ožiarení jednotlivých tkanív a orgánov (10^{-2} Sv^{-1})

Tkanivo alebo orgán	Celá populácia	Profesionáli
Mechúr	0,29	0,24
Kostná dreň	1,04	0,83
Kosti	0,07	0,06
Prsník	0,36	0,29
Hrubé črevo	1,03	0,82
Pečeň	0,16	0,13
Pľúca	0,80	0,64
Pažerák	0,24	0,19
Pohlavné žľazy	0,15	0,12
Koža	0,04	0,03
Žalúdok	1,00	0,80
Štitná žľaza	0,15	0,12
Ostatné	0,59	0,47
Spolu	5,92	4,74
Dedičné následky	1,33	0,80

50

Odhad karcinogénneho rizika pri inhalácii:

Spotreba vzduchu u dospelého jedinca: $8500 \text{ m}^3/\text{rok}$. Uvažovaná doba príjmu 70 rokov. Uvažované merné aktivity sú maximálne vypočítané hodnoty v okolí JETE.

Nuklid	Merná aktivita Bq/m^3	Celková aktivita, Bq	h_{inh} , Bq/Sv	Celková dávka, Sv	Pravdepodobnosť	
					fatálneho nádoru	celkovej ujmy
^3H	0,0493	29 333	$6,2 \cdot 10^{-12}$	$1,8 \cdot 10^{-07}$	$9,0 \cdot 10^{-09}$	$1,3 \cdot 10^{-08}$
^{14}C	$2,76 \cdot 10^{-04}$	164	$2,0 \cdot 10^{-10}$	$3,3 \cdot 10^{-08}$	$1,2 \cdot 10^{-09}$	$1,8 \cdot 10^{-09}$
^{131}I	$2,95 \cdot 10^{-06}$	1,2	$2,2 \cdot 10^{-08}$	$1,1 \cdot 10^{-10}$	$1,1 \cdot 10^{-09}$	$1,6 \cdot 10^{-09}$
^{137}Cs	$1,71 \cdot 10^{-07}$	0,1	$9,7 \cdot 10^{-09}$	$9,7 \cdot 10^{-10}$	$4,9 \cdot 10^{-11}$	$7,11 \cdot 10^{-11}$
Celkovo				$2,14 \cdot 10^{-07}$	$1,13 \cdot 10^{-08}$	$1,65 \cdot 10^{-08}$

Konvencia akceptovateľného rizika pri ožiarení

- Moderná spoločnosť akceptuje rôzne aktivity často bez ohľadu na riziko, ktoré prinášajú.
- Každá ľudská činnosť je sprevádzaná určitou mierou rizika.
- Je dôležité obmedziť riziko na najnižšiu rozumne dosiahnuteľnú úroveň a vyhnúť sa zbytočnému riziku.
- Miera akceptovateľného rizika v spoločnosti sa historicky vyvíjala.

Pracovné riziko pri vykonávaní niektorých povolání

Odvetvie, činnosť	Počet smrteľných prípadov $10^6 \cdot \text{rok}^{-1}$	Riziko úmrtia $\text{rok}^{-1} \cdot \text{man}^{-1}$
Odevný a obuvnícky priemysel	1 - 10	$10^{-6} - 10^{-5}$
Textilný, papierenský, polygrafický, lesný a chemický priemysel	10 - 10^2	$10^{-5} - 10^{-4}$
Metalurgický, lodiarsky, stavebný a uhoľný priemysel	$10^2 - 10^3$	$10^{-4} - 10^{-3}$
Posádky rybárskych lodí a lietadiel	$10^3 - 10^4$	$10^{-3} - 10^{-2}$

Limity ožiarania pre obyvateľstvo a riziko úmrtia

- Odporúčanie ICRP 26 (1977) $5 \text{ mSv} \cdot \text{rok}^{-1}$ bolo prijaté s ohľadom na tézu, že pravdepodobnosť úmrtia nesmie presiahnuť 10^{-3} za rok.
- Táto hodnota bola na prahu akceptovateľnosti, preto sa prišlo k zníženiu limitu v odporúčaní ICRP 60.
- Nový limit pre obyvateľstvo $1 \text{ mSv} \cdot \text{rok}^{-1}$ korešponduje s pravdepodobnosťou úmrtia 10^{-5} za rok.

Uvoľňovanie rádioaktívne kontaminovaných materiálov spod inštitucionálnej kontroly do životného prostredia

- Do životného prostredia možno uvoľňovať rádioaktívne kontaminované materiály ak priemerná efektívna dávka jednotlivcov v kritickej skupine obyvateľov spôsobená ich uvoľnením do životného prostredia v žiadnom kalendárnom roku nepresiahne **$10 \mu\text{Sv}$** a súčasne kolektívna efektívna dávka neprekročí **1 manSv** .
- Ak aktivita uvoľňovaných rádioaktívne kontaminovaných materiálov je nižšia, ako sú uvoľňovacie hodnoty uvedené v prílohe č. 8 NV 345/2006, považuje sa kritérium na uvoľňovanie za splnené.

Uvoľňovanie rádioaktívne kontaminovaných materiálov spod inštitucionálnej kontroly do životného prostredia (príloha č.8 NV345/2006)

Tabuľka č. 2

Rozdelenie rádionuklidov do tried podľa rádiotoxicity a potenciálneho ohrozenia vonkajším ožiarением

Trieda	Rádionuklidy*)
1	Na-22, Na-24, Mn-54, Co-60, Zn-65, Nb-94, Ag-110m, Sb-124, Cs-134, Cs-137, Eu-152, Pb-210, Ra-226, Ra-228, Th-228, Th-230, Th-232, U-234, U-235, U-238, Np-237, Pu-239, Pu-240, Am-241, Cm-244
2	Co-58, Fe-59, Sr-90, Ru-106, In-111, I-131, Ir-192, Au-198, Po-210
3	Cr-51, Co-57, Tc-99m, I-123, I-125, I-129, Ce-144, Tl-201, Pu-241
4	C-14, P-32, Cl-36, Fe-55, Sr-89, Y-90, Tc-99, Cd-109
5	H-3, S-35, Ca-45, Ni-63, Pm-147

*) Pre rádionuklidy v tabuľke č. 2 menovite neuvedené sa trieda určí ako rád minima z hodnôt $1 \text{ MeV}/(E_{\text{gamma}}+0,1 \cdot E_{\text{beta}}) \cdot (20/h_{\text{inh}}) \cdot \mu\text{Sv/Bq}$ a $(2/h_{\text{ing}}) \cdot \mu\text{Sv/Bq}$, kde E_{gamma} je efektívna energia rádionuklidom emitovaného žiarenia gama v MeV a E_{beta} je efektívna energia rádionuklidom emitovaného žiarenia beta a h_{inh} , resp. h_{ing} sú konverzné faktory pre príjem daného rádionuklidu inhaláciou, resp. ingestiou pre pracovníkov so zdrojmi, uvedené v tabuľkách prílohy č. 6.

NAJvyššie prípustné hodnoty povrchovej rádioaktívnej kontaminácie na pracovisku a na uvádzanie rádioaktívnych látok do životného prostredia

Tabuľka č. 1

Uvoľňovacie úrovne na uvádzanie rádioaktívnych látok do životného prostredia a najvyššie prípustné hodnoty pre rádioaktívnu kontamináciu materiálov a ich povrchov

Miesto rádioaktívnej kontaminácie	Trieda rádiotoxicity podľa tabuľky č. 2				
	1	2	3	4	5
Materiály, pevné látky a predmety vynášané z pracovísk alebo inak uvádzané do životného prostredia	Uvoľňovacie úrovne hmotnostnej aktivity pre rádioaktívnu kontamináciu [kBq.kg ⁻¹]				
	0,3	3	30	300	3000
Povrchy materiálov a predmetov vynášaných z pracovísk alebo inak uvádzaných do životného prostredia	Uvoľňovacie úrovne plošnej aktivity pre povrchovú rádioaktívnu kontamináciu [kBq.m ⁻²]				
	3	30	300	3000	3.10 ⁴
Povrchy podláh, stien, stropov, nábytku, zariadenia ap. v kontrolovanom pásme pracovísk s otvorenými žiaričmi	Najvyššie prípustné hodnoty povrchovej rádioaktívnej kontaminácie na pracovisku so zdrojmi ionizujúceho žiarenia [kBq.m ⁻²]				
	30	300	3000	3.10 ⁴	3.10 ⁵
Vonkajšie povrchy ochranného a prevádzkového zariadenia, osobných ochranných prostriedkov					
Povrch tela a vnútorné povrchy osobných ochranných prostriedkov	3	30	300	3000	3.10 ⁴
Pracovné povrchy mimo kontrolovaného pásma					

Uvoľňovanie rádioaktívne kontaminovaných materiálov spod inštitucionálnej kontroly do životného prostredia (NV345/2006)

- Ak rádioaktívne kontaminované materiály majú aktivitu vyššiu, ako je uvedené v prílohe č. 8, môžu byť uvoľnené do životného prostredia, ak sa preukáže, že individuálna efektívna dávka člena kritickej skupiny obyvateľov spôsobená uvedením rádioaktívne kontaminovaných materiálov do životného prostredia je nižšia ako $10 \mu\text{Sv}$ za kalendárny rok.
- Vo výnimočných prípadoch môže byť efektívna dávka člena kritickej skupiny obyvateľov spôsobená uvedením rádioaktívne kontaminovaných materiálov do životného prostredia najviac $50 \mu\text{Sv}$, ak sa súčasne preukáže, že navrhované riešenie je optimálnym riešením z hľadiska radiačnej ochrany v porovnaní s alternatívnymi riešeniami.

Uvoľňovanie rádioaktívne kontaminovaných materiálov spod inštitucionálnej kontroly do životného prostredia (NV345/2006)

- a) uvoľňovanie materiálov kontaminovaných rádionuklidmi z pracovísk so zdrojmi ionizujúceho žiarenia do životného prostredia na
 - i. neobmedzené ďalšie používanie,
 - ii. cielené a obmedzené použitie,
 - iii. prepracovanie,
 - iv. ukladanie na skládky odpadu,
 - v. spaľovanie,
 - vi. ukladanie do podzemia alebo na špeciálne skládky,
- b) uvoľňovanie priestorov, miestností, objektov, pôdy alebo území, ktoré boli súčasťou kontrolovaného pásma pracovísk so zdrojmi ionizujúceho žiarenia alebo boli kontaminované v dôsledku vykonávania činností vedúcich k ožiareniu alebo nakladania s materiálmi obsahujúcimi zvýšené množstvá prírodných rádionuklidov na voľné používanie.

Uvoľňovanie rádioaktívne kontaminovaných materiálov spod inštitucionálnej kontroly do životného prostredia (NV345/2006)

- Ak rádioaktívne kontaminované materiály obsahujú viac ako jeden druh rádioizotopu, pri posudzovaní dodržania uvoľňovacích hodnôt sa používa súčtové pravidlo.
- Súčet podielov zistenej aktivity a uvoľňovacej hodnoty všetkých zistených rádionuklidov a ťažko stanoviteľných rádionuklidov, ktoré sa predpokladajú v uvoľňovanom materiáli, musí byť nižší ako **jeden**.
- Do úvahy sa berú všetky rádionuklidy, ktorých podiel aktivity a uvoľňovacej hodnoty je vyšší ako 0,01.
- Ak ide o ťažko merateľné rádionuklidy, hmotnostná aktivita a plošná aktivita sa stanovujú **výpočtom**.

Dozimetria a radiačná ochrana

60

Miera obsahu rádionuklidov, ktorá umožňuje uvádzanie rádioaktívnych látok do životného prostredia

- je splnená ak pri vypúšťaní rádioaktívnych látok z jadrových zariadení do povrchových vôd a do ovzdušia, sa zmiešaním s neaktívnymi plynmi alebo neaktívnymi vodami a následným rozptýlením zabezpečí, že **efektívna dávka** kritickej skupiny obyvateľstva neprekročí **250 μSv** v kalendárnom roku.
- Táto hodnota sa vzťahuje na celkové ožiarenie zo všetkých jadrových zariadení danej lokality.
- **Kritická skupina obyvateľov** predstavuje skupinu osôb dostatočne homogénnu a reprezentatívnu, ktorá je najviac ožiarená z uvažovaného zdroja žiarenia.

Dozimetria a radiačná ochrana

61

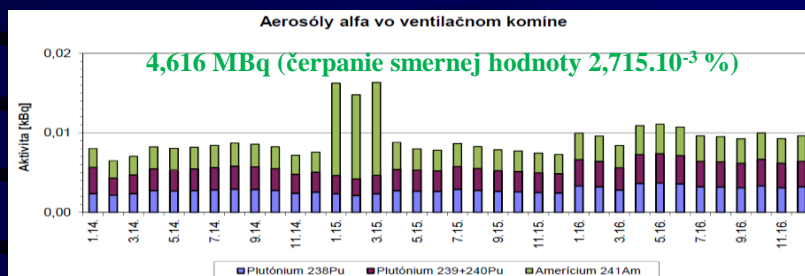
Vypúšťanie rádioaktívnych látok do ovzdušia a vôd podľa Prílohy č. 3 k nariadeniu vlády č. 345/2006 Z. z.

- Z pracoviska so zdrojmi žiarenia možno vypúšťať rádioaktívne látky, ak je zabezpečené, že efektívna dávka spôsobená uvedením rádioaktívnych látok do životného prostredia u jednotlivca z kritickej skupiny obyvateľov nepresiahne 50 μSv v kalendárnom roku.

Základné ukazovatele radiačnej ochrany EMO

Indikátor	Kumulatív 2016
Kolektívna efektívna dávka EPD - Gama+ND	241,7 manmSv
Priemerná individuálna efektívna dávka pracovníka	0,106 mSv
Maximálna individuálna efektívna dávka pracovníka za mesiac z EPD - Gama+ND	2,539 mSv
Vnútoraná kontaminácia pracovníkov	0 prípadov
Dekontaminácia pracovníkov v deko-uzle	0 prípadov
Povrchová dávka na kožu	0 mSv

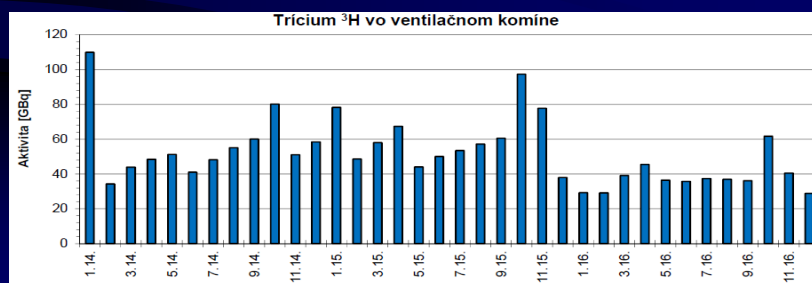
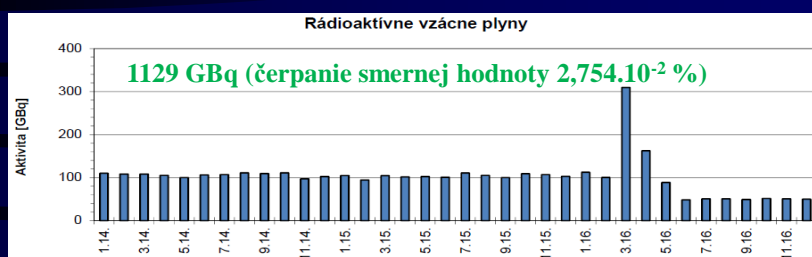
Plynné výpuste EMO



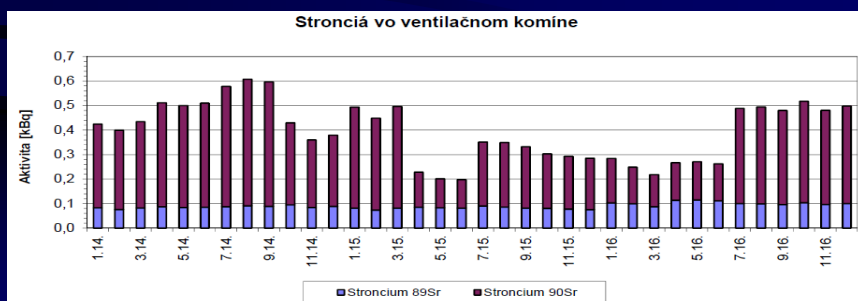
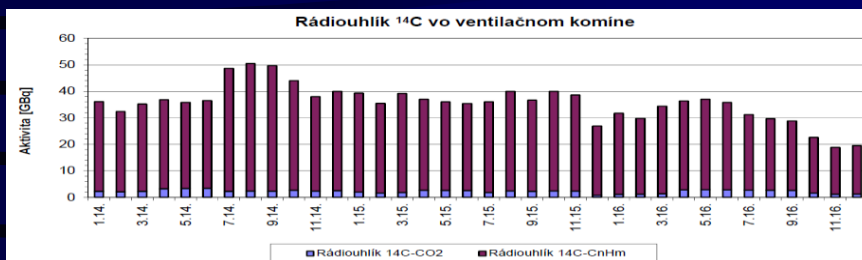
Radičná ochrana

64

Plynné výpuste EMO



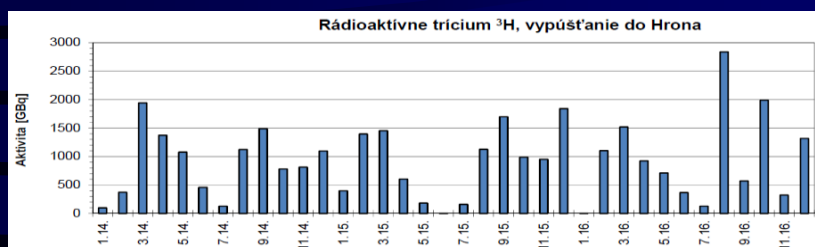
Plynné výpuste EMO



Radiačná ochrana

66

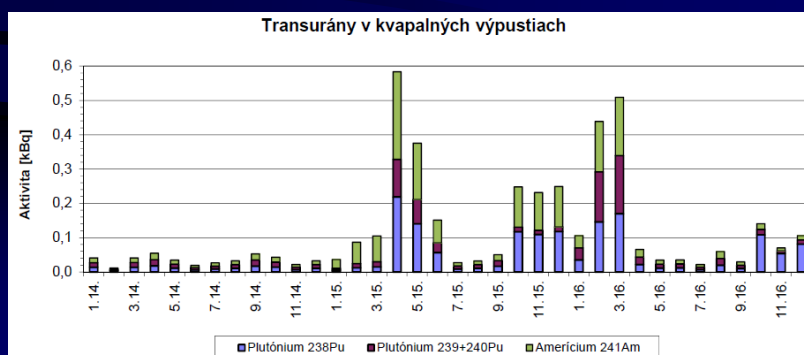
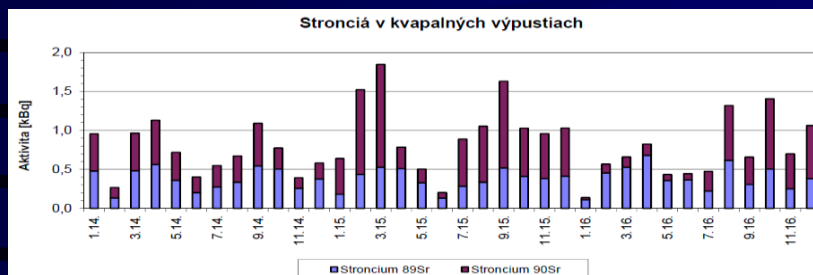
Kvapalnú výpuste



Radiačná ochrana

67

Kvapalné výpuste



Rádiologický vplyv výpustí rádioaktívnych látok na okolie



Z analýzy výpustí rádioaktívnych látok z AE Mochovce za celý rok 2016 vyplýva, že najvyššia hodnota 50(70)-ročnému úväzku efektívnej dávky bola vypočítaná v JV sektore c. 64 s trvalým osídlením s obcou Nový Tekov a dosiahla hodnoty pre dojča 153 nSv a pre dospelých 127 nSv. Hodnota úväzku kolektívnej efektívnej dávky pre všetkých obyvateľov regiónu (počet obyvateľov približne 1,13 milión v 60 km vzdialenosti od AE) dosiahla hodnotu 9,02 manmSv.

Záver

- Vypočítaná maximálna hodnota 50(70)-ročného úväzku individuálnej efektívnej dávky pre reprezentatívnu osobu (**0,0672 μSv**) je **zanedbateľná** v porovnaní s ročným **limitom** pre jednotlivca z obyvateľstva (**1 mSv**) resp. medznou dávkou pre kritickú skupinu obyvateľov z výpustí rádioaktívnych látok z jadrových zariadení, ktorá je stanovená pre projektovanie a výstavbu jadrových zariadení (**250 μSv**) t. j. hodnotami stanovenými Nariadením vlády Slovenskej republiky č. 345/2006 Z. z., ako aj v porovnaní s **úradom** stanoveným rádiologickým limitom pre vypúšťanie rádioaktívnych látok z AE Mochovce (**50 μSv**).