

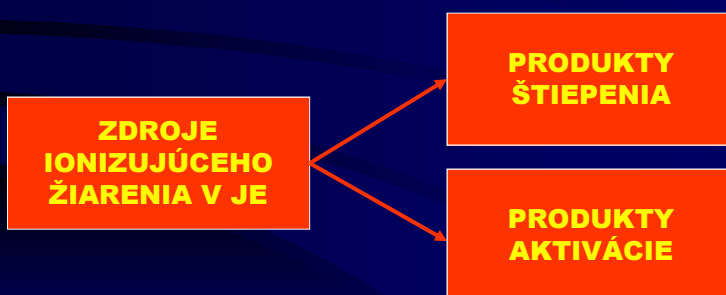
Zdroje žiarenia v jadrovej elektrárni

Ing. Róbert Hinca

Dozimetria a radiačná ochrana

Jadrový reaktor ako zdroj žiarenia

- Žiarenie v jadrovej elektrárni pochádza zo zdrojov ionizujúceho žiarenia 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

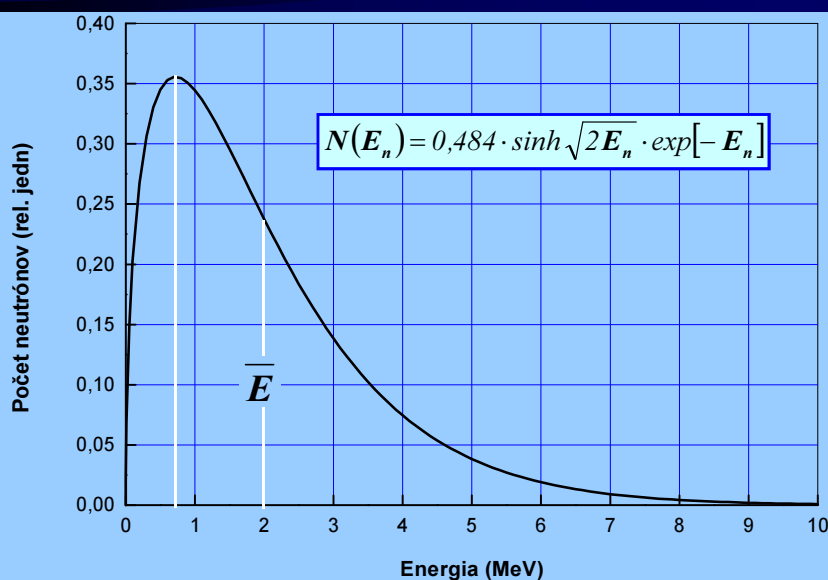
- **Okamžité neutróny** vznikajú emisiou zo štiepných fragmentov bezprostredne po štiepení (hovorí sa o čase 10^{-13} s).
- V priemere sa pri štiepení jadra ^{235}U uvoľní 2,46 neutrónov.
- Neutróny odnášajú v priemere na jedno štiepenie energiu 5 MeV.
- Energetické spektrum okamžitých neutrónov popisuje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



Dozimetria a radiačná ochrana

9

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.

Dozimetria a radiačná ochrana

10

Hlavné zdroje gama žiarenia v JE

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

Dozimetria a radiačná ochrana

11

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.

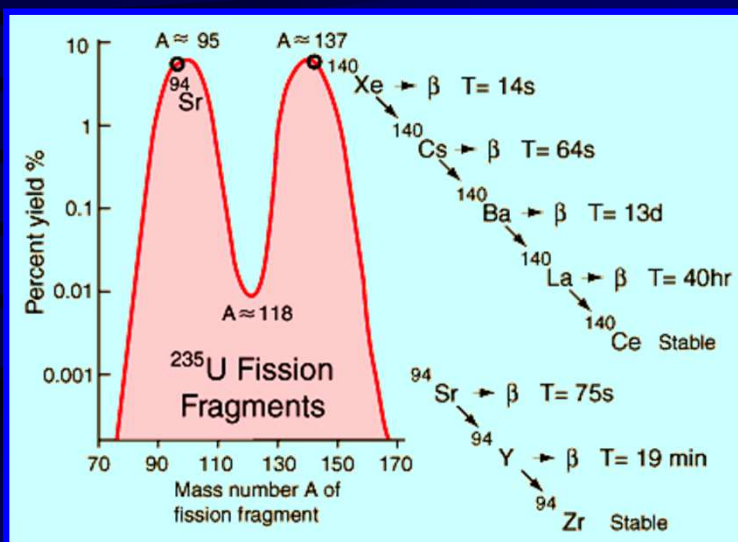
Dozimetria a radiačná ochrana

12

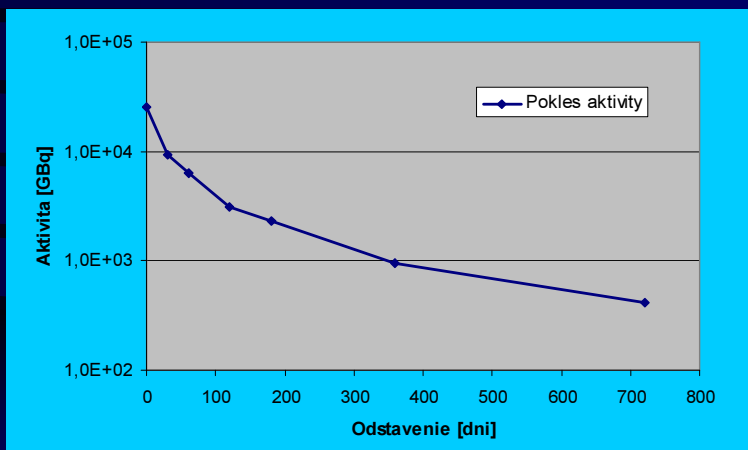
Hlavné zdroje gama žiarenia v JE

- 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



Pokles aktivity produktov štiepenia ^{235}U po odstavení reaktora.



Dozimetria a radiačná ochrana

15

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

16

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 absorbované 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

17

Céziu-137

- Céziu 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 vyzrážaných 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.

Dozimetria a radiačná ochrana

18

Céziu-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.

Dozimetria a radiačná ochrana

19

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

20

Spád ^{137}Cs v okolí Černobyľa

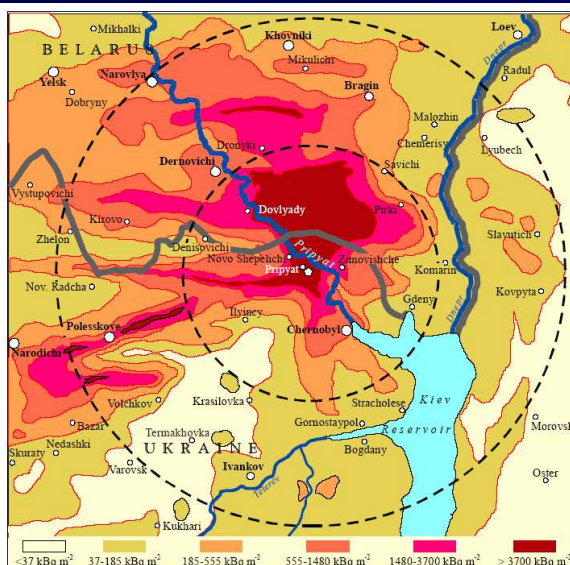


Figure VII. Surface ground deposition of caesium-137 in the immediate vicinity of the Chernobyl reactor [11, 124]. The distances of 30 km and 60 km from the nuclear power plant are indicated.

Veterná ružica prvé dni po havárii

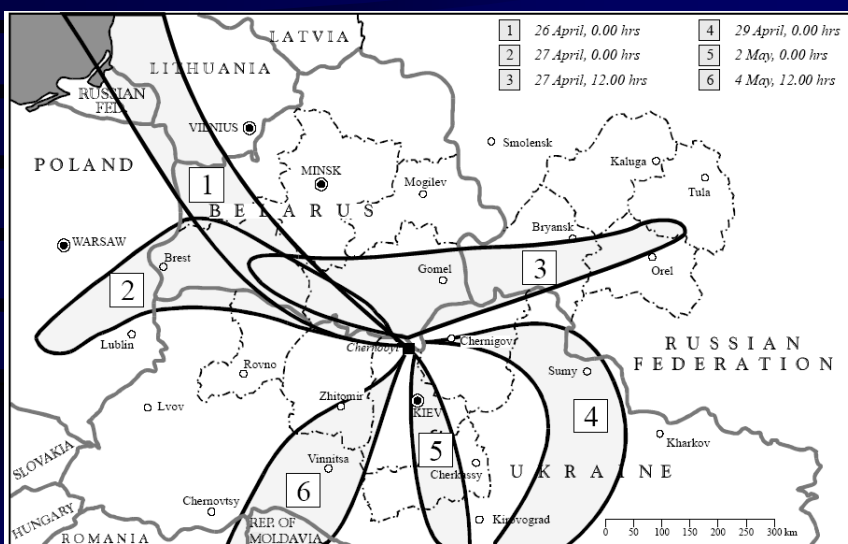
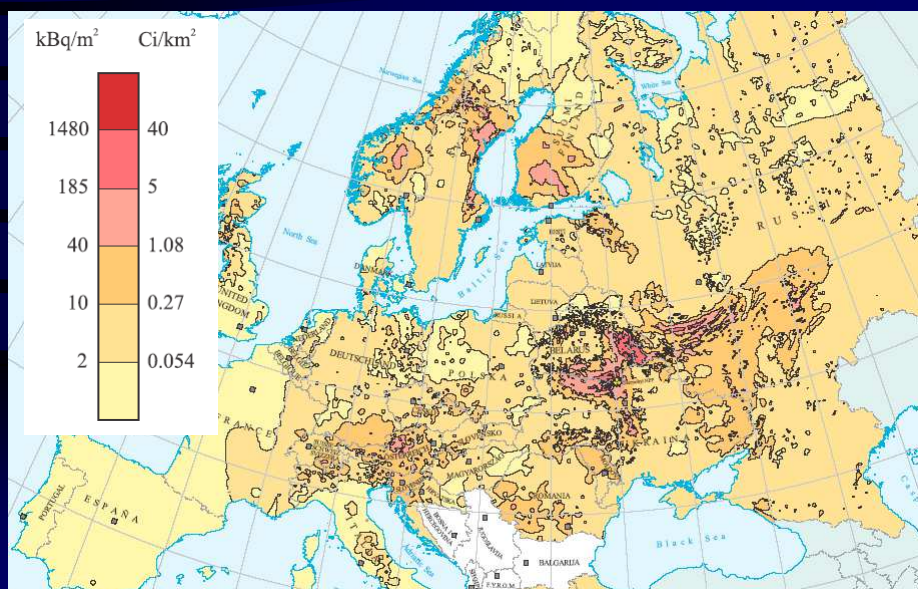


Figure V. Plume formation by meteorological conditions for instantaneous releases on dates and times (GMT) indicated [B7].

Celková kontaminácia ^{137}Cs v Európe



Stroncium-90

- Chemicky patrí do skupiny kovov alkalických zemín
- Stroncium je produkt štiepenia s vysokým výťažkom ($\approx 5\%$).
- 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 $\sim 1\%$ 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 potencióálne spôsobiť rakovinu poprípade poškodenie rýchlo reproduktujúcich sa buniek kostnej drene.

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.

Dozimetria a radiačná ochrana

25

^{90}Sr povrchová kontaminácia v okolí ČJE

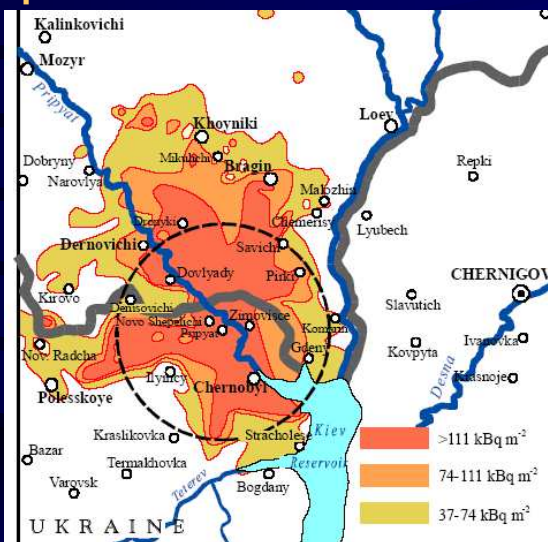


Figure VIII. Surface ground deposition of strontium-90 released in the Chernobyl accident [1].

26

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 počiatkové 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 tabletiiek (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 unikol 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.

Uvoľňovanie jódu, cézia a telúru po havárii ČJE

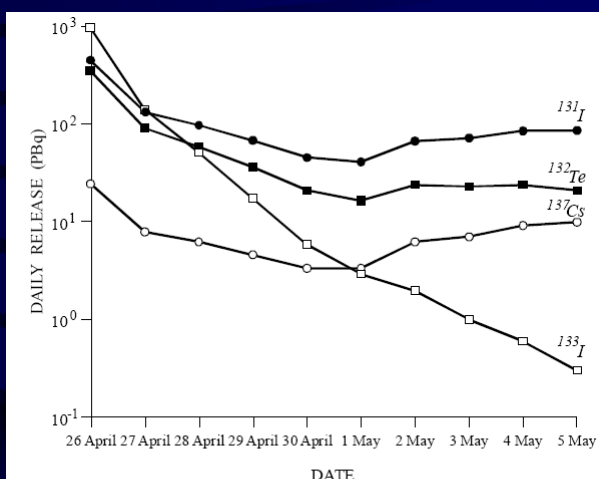


Figure II. Daily release of iodine-131, iodine-133, tellurium-132 and caesium-137 from the Chernobyl reactor.

Dozimetria a radiačná ochrana

29

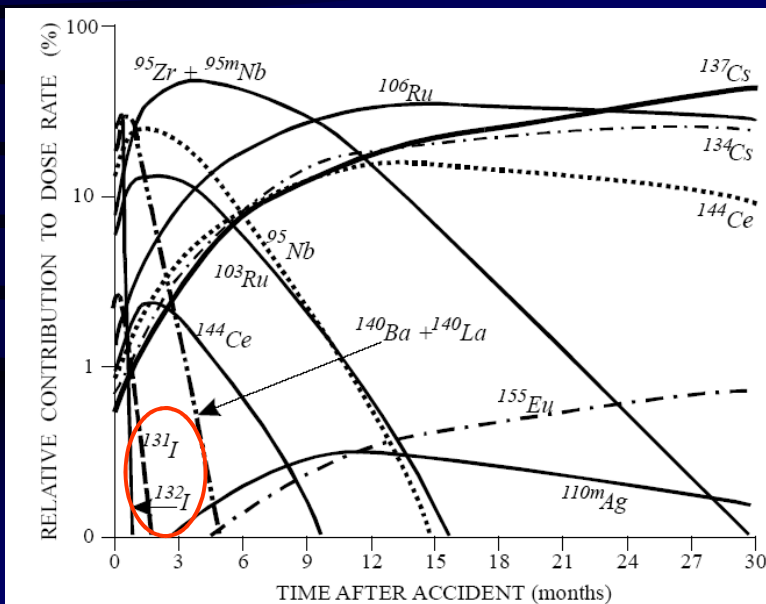
Iné rádioaktívne prvky

- **Ruténium** 103 a 106 ($T_{1/2}$ =39,3 a 368 dní) sa vo forme kyslíčnikov 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. Kontaminuje 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

30

Príspevok rôznych nuklidov k dávkovému príkonu vo vzduchu v okolí Černobyľa

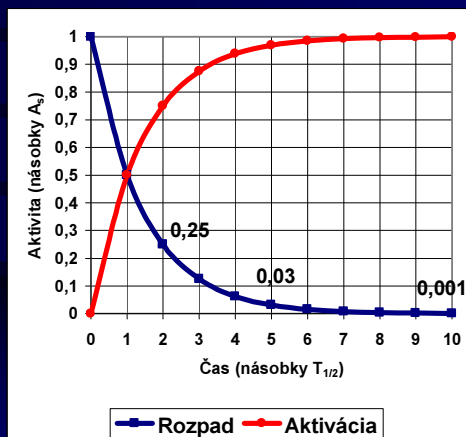


Spôsoby vzniku trícia vo VVER

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

Aktivačné produkty

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



Dozimetria a radiačná ochrana

33

Indukovaná aktivita prvku:

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

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

Dozimetria a radiačná ochrana

34

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

Dozimetria a radiačná ochrana

37

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

Kvapalné výpuste:

Ročný limit
(čerpanie limitu %)

štiepne produkty, aktivované korózne produkty, $^{58}, ^{60}\text{Co}, ^{239}\text{Pu}$ 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	$15,6 \cdot 10^6 \text{ m}^3 \cdot \text{rok}^{-1}$ (10-20%)
Celkové množstvo odpadových vôd do recipientu Dudváh	$1,1 \cdot 10^6 \text{ m}^3 \cdot \text{rok}^{-1}$ (8-15%)

Dozimetria a radiačná ochrana

38

Výpočet rizika z prevádzky JE

- Pri výpočte rizika z plynných 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.

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)

Prijem rádionuklidov potravou a dýchaním

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

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

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

$P_p [kg \text{ resp. } l]$ - je spotreba potravy P v jednom roku

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

$B [Bq \cdot m^{-3}]$ - je množstvo vdychovaného vzduchu v jednom roku

Výpočet externého ožiarenia pre bodový, plošný a objemový zdroj žiarenia

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

Výpočet príkonu kerry vo vzduchu od bodového zdroja $[Gy]$

A - aktivita zdroja $[Bq]$

Γ - kermová konštanta gama $[Gy \cdot m^2]$

R - vzdialenosť od zdroja $[m]$

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

Výpočet príkonu príslušnej dozimetrickkej veličiny pre plošný alebo objemový zdroj žiarenia

f_a - konverzný faktor prevádzajúci plošnú alebo objemovú aktivitu na príslušný príkon veličiny $V [Sv \cdot s^{-1} \cdot Bq^{-1} \cdot m^3]$

a - plošná alebo objemová aktivita $[Bq \cdot m^{-2}, Bq \cdot l^{-1}, Bq \cdot m^{-3}]$

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

Nuclide		Inhalation Dose Coefficients (Sv Bq ⁻¹)						External Dose Coefficients ⁽⁶⁾	
								Cloudshine (Sv s ⁻¹ Bq ⁻¹ m ²)	Groundshine (Sv s ⁻¹ Bq ⁻¹ m ²)
		3 months	1 Year	5 Years	10 Years	15 Years	Adult	5 Years - Adult	5 Years - Adult
a) Particulates									
Hydrogen	Tritium compounds	3.4e-10	2.7e-10	1.4e-10	8.2e-11	5.3e-11	4.5e-11	0	0
Carbon	C-14	8.3e-09	6.6e-09	4.0e-09	2.8e-09	2.5e-09	2.0e-09	2.60e-18	1.27e-20
Sodium	Na-24	2.3e-09	1.8e-09	9.3e-10	5.7e-10	3.4e-10	2.7e-10	2.08e-13	3.59e-15
Phosphorus	P-32	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-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	S-35 (inorganic)	5.9e-09	4.5e-09	2.8e-09	2.0e-09	1.8e-09	1.4e-09	3.11e-18	1.33e-20
Scandium	Sc-46	2.8e-08	2.3e-08	1.4e-08	9.8e-09	8.4e-09	6.8e-09	9.36e-14	1.88e-15
Chromium	Cr-51	2.6e-10	2.1e-10	1.0e-10	6.6e-11	4.5e-11	3.7e-11	1.38e-15	2.97e-17
Manganese	Mn-54	5.2e-09	4.1e-09	2.2e-09	1.5e-09	9.9e-10	8.5e-10	3.83e-14	7.91e-16
Iron	Fe-55	1.9e-09	1.4e-09	9.9e-10	6.2e-10	4.4e-10	3.8e-10	0	0
	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	Co-58	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-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	Zn-65	8.5e-09	6.5e-09	3.7e-09	2.4e-09	1.9e-09	1.6e-09	2.72e-14	5.41e-16
Arsenic	As-76	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	Rb-88	1.9e-10	1.2e-10	5.2e-11	3.2e-11	1.9e-11	1.6e-11	3.33e-14	7.41e-16
Strontium	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	1.5e-07	1.1e-07	6.5e-08	5.1e-08	5.0e-08	3.6e-08	9.83e-17	1.64e-18
Yttrium	Y-90	1.3e-08	8.8e-09	4.2e-09	2.7e-09	1.8e-09	1.5e-09	7.92e-16	1.10e-16
	Y-91	4.3e-08	3.4e-08	1.9e-08	1.3e-08	1.0e-08	8.9e-09	6.22e-16	7.46e-17
Zirconium	Zr-95	2.0e-08	1.6e-08	9.7e-09	6.8e-09	5.9e-09	4.8e-09	3.36e-14	7.04e-16
Niobium	Nb-95	6.8e-09	5.2e-09	3.1e-09	2.2e-09	1.9e-09	1.5e-09	3.49e-14	7.28e-16
Molybdenum	Mo-99	6.0e-09	4.4e-09	2.2e-09	1.5e-09	1.1e-09	8.9e-10	6.99e-15	1.78e-16
Ruthenium	Ru-103				e-09	3.0e-0			e-16
	Ru-106 ⁽⁶⁾				e-08	3.1e-0			e-16
Silver	Ag-110m	3.5e-08	2.8e-08	1.7e-08	1.2e-08	9.2e-09	7.6e-09	1.27e-13	2.58e-15

Dozimetria a radiačná ochrana

43

Nominálne koeficienty pravdepodobnosti stochastických efektov

Ožiarovaná 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

Dozimetria a radiačná ochrana

44

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
Štitná žľaza	0,08	0,06
Ostatné	0,50	0,40
Spolu	5,00	4,00
Dedičné následky	1,00	0,6

45

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

46

Odhad karcinogénneho rizika pri inhalácii:

Spotreba vzduchu u dospelého jedinca: 8500 m³/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 újmy
³ H	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 ožiarenia 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 μSv** 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 ožiaraním

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. ingestciou 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 radiotoxicity 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 μSv za kalendárny rok.
- Vo výnimočných prípadoch môže byť efektívna dávka člena kritickej skupiny obyvateľov spôsobená uvedením rádioaktívne kontaminovaných materiálov do životného prostredia najviac 50 μSv , 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. ciele 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.

Dozimetria a radiačná ochrana

55

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

56

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

57

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.

Dozimetria a radiačná ochrana

58

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

- Z jadrových zariadení možno vypúšťať rádioaktívne látky do ovzdušia a povrchových vôd, ak je zabezpečené, že v príslušnej kritickej skupine obyvateľov efektívne dávky v dôsledku týchto vypúšťaní neprekročia 250 μSv za jeden kalendárny rok.
- Táto hodnota sa považuje za medznú dávku na projektovanie a výstavbu jadrových zariadení.
- Ak je v jednej lokalite viac jadrových zariadení, ktoré ovplyvňujú dávky obyvateľov v tej istej kritickej skupine, vzťahuje sa táto hodnota na celkové ožiarenie zo všetkých jadrových zariadení v lokalite alebo regióne.