

Jaderná a termojaderná energie a její vliv na životní prostředí.

/ plánovaný rozsah 3 hod /

1. Jaderné a termojaderné reakce.

Obečný typ jaderných reakcí.

Reakce štěpení.

Reakce slučování.

Jaderné reaktory.

Termojaderné reaktory.

2. Jednotky používané v jaderné fyzice.

Jednotka pro množství.

Jednotky pro dávku a dávkovou rychlost (expoziční rychlost)

3. Jaderné záření, jeho detekce.

Elementární částice.

Přehled zařízení používaných k detekci částic .

4. Radioaktivní odpady.

• Odpady vznikající při provozu jad. a termoj. zařízení.

Ukládání odpadů.

Dozimetrická měření.

Literatura:

Abramov A.i.: Osnovy jadernoj fyziki, Moskva, Energoatomizdat 1983.

Příslušné čs. normy.

Kapitola : Biophysikální faktory životního prostředí

Působení radioaktivního záření na živé organismy

V.Kapička, KFE PŘF MU Brno

Úvod

Před lety došlo k havárii reaktoru v Černobyli. Tehdy byly uváděné v tisku následující údaje. Počet lidí ozářených exposicí 6 - 16 Sv bylo 24, zemřelo 24

4 - 6 Sv	24	7
1 - 4 Sv	240	1
0,1- 1 Sv	24000	-
do 0,1	110000	-

I když nešlo o údaje konečné, bylo z nich možné usuzovat, že expozice kolem 4-10 Sv způsobuje smrt. Jaké jsou jednotky expozice, případně další jednotky? Jaké je působení záření na lidské tělo a živé organismy vůbec?

Jednotky používané v dozimetrii

Dozimetrie, která se zabývá působením radioaktivního záření na živé látky, nepoužívá zavedených fyzikálních jednotek pro množství radioaktivní látky a expozice (dříve dávku záření), protože necharakterizuje vůbec toto působení. Proto jsou používány jiné jednotky. Jednotka Curie, Ci udává množství radioaktivní látky jako počet ropadů za 1/sec, které v ní nastávají. 1 Curie je $3,7 \cdot 10^{10}$ rozp./sec, menší jednotky jsou mCi, μ Ci, pCi apod.

Jednotka pro expozici D, nebo též dávku je dána hodnotou energie pohlčené v jednotce hmoty, nikoliv tedy energií procházející, tj. procházející jednotkovou plochou umístěnou kolmo k šíření záření za 1 sec. Jednotkou expozice je proto 1J/lkg = 1 Grey.

Protože nepříznivé účinky záření na živé organismy jsou dány především počtem vytvořených iontů, jsou tyto účinky u různých druhů záření různé (počet iontů vytvořených na celkové dráze záření je přibližně stejný, ale vzhledem k různým délkám doběhu záření je počet iontů vytvořených α zářením na 1 cm dráhy největší, u β záření menší a u γ záření ještě menší, záleží však i na energii záření). Proto různé účinky záření jsou charakterizovány tzv. jakostním faktorem Q majícím pro různé záření tyto hodnoty:

γ , x záření elektrony l	
pomalé neutrony $T \leq 0,1 \text{ eV}$	2,3
ostatní neutrony, n protony	
a částice s nábojem $q = 1e$	10
α částice a částice	
s nábojem $q > 1e$	20

Dávkový ekvivalent H pak stanovuje energii vystihující stejné účinky různého záření na tkáň, tj.

$$H = Q \cdot D$$

Jednotkou je 1 Sievert, 1 Sv.

Hodnota Q tedy závisí na hustotě předávané energie tkáni, zahrnuje tedy i procesy, které v ní záření vyvolává. Starší používané jednotky jsou uvedeny v dodatku článku. Účinky záření mohou být popsány buď teorií přímého účinku záření, která předpokládá zasažení zářením aktivního objemu buňky (např. kritickou strukturou je chromozonální DNA kódující genetickou informaci. Při velkých dávkách se mění genetický kód, při velmi vysokých nastává smrt buněk a při malých nastává indukce mutací), nebo teorií nepřímého účinku /1/, předpokládající, že místem chemické reakce nemusí být místo počáteční absorpce energie (dochází k přenosu energie v rámci molekuly i mezi molekulami).

Biologické účinky se projevují buď jako nestochastická poškození (kdy je nutná minimální dávka, tj. práh, aby k poškození došlo) a stochastická, kdy výskyt poškození roste s dávkou (práh zde neexistuje, patří sem karcinogenní a genetické účinky) - viz dále str. 6).

U stochastických poškození se udává počet onemocnění na 1Sv (tj. např. pro leukémii $2 \cdot 10^{-3} \text{ Sv}^{-1}$). Proto se zavádí také kolektivní dávkový ekvivalent S s jednotkou: (manSv) /2/.

$$S = \sum_i H_i P_i$$

Zde H_i je dávkový ekvivalent, který obdrželo počet lidí P_i , tj. P_i . Počet onemocnění např. pro leukémii při $S=500$ manSv je

S.pravděpodobnost onemocnění = $500 \frac{\text{manSv}}{\text{manSv}} \cdot 2 \cdot 10^{-3} \text{ Sv}^{-1} = 1$ man, tj. 1 člověk.

Protože pro různé živé orgány je pravděpodobnost a závažnost poškození jiná, bere se v úvahu tzv. váhový faktor w_i tohoto orgánu. Místo celkového dávkového ekvivalentu dostáváme tak efektivní dávkový ekvivalent $H_{ef} = \sum_i w_i H_i$ (váhový faktor např. pro gonády je 0,25 pro kostní dřeň 0,12, pro štítnou žlázu 0,03, stejně jako pro povrch kostí. Pro ostatní části těla je 0,3.

Experimentálně lze jednotky Curie i Sievert určovat detektory záření /4/. V současné době nejpoužívanější jsou plynové (Geiger-Müllerovy trubice), scintilační a polovodičové, [5].

Expozice ozařující člověka [3]

Přírodní izotopy ^{40}K a ^{14}C i prvky uranové a thoriové řady mohou být zdrojem ozáření. Podobně kosmické záření: s ním se počítá ročně asi s expozicí $280 \mu\text{Sv}/\text{rok}$ (na úrovni moře, každých 100 metrů se zvyšuje o $10 \mu\text{Sv}/\text{rok}$). Většina ale jde na účet ^{40}K rozptýleného v těle.

V USA se počítá s tímto ozářením:

Kosmické záření	280 μ Sv/rok
záření z přír. izotopů	260
Vnitřní zdroje (např. K^{40})	270
Medicínské zdroje	380
Rad. záření z voj. výbuchů	40

$$1230 \mu\text{Sv/rok} = 1,23 \text{ mSv/rok}$$

Hraniční expozice v mSv/rok:

Stochastické efekty	Pracující záření	Ostatní
celé tělo	50	5
Nestochastické		
čočka v oku	150	15
ostatní tkáň	500	50

Příklad: Pracovník je ozářen po celém těle 10mG záření, 5 mG pomalých neutronů a 2 mG rychlých. Kolik může vyčerpat za rok?

$$H = D \cdot Q = 10 \cdot 1 = 10 \text{ mSv}$$

$$H = 5 \cdot 3 = 15 \text{ mSv}$$

$$H = 2 \cdot 10 = 20 \text{ mSv}$$

45 mSv, tj. při stochastických efektech pracovník může být ozářen ještě 5 mSv.

Které nejčastější prvky mohou být zdrojem ozáření v reaktorech - viz Tab.1.

Pokud skončí kampaň reaktoru (chlazeného vodou) o výkonu 1000 MW, v aktivní zóně reaktoru je aktivita 12000MCI ($4,4 \cdot 10^{20}$ Becquerell). V palivu je ještě cca 4000 MCI od těžkých prvků, které při záchytu neutronů vznikají a jsou

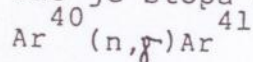
radioaktivní. (Aktivita náplně reaktorů - tyčí - je 300 Ci, po skončení kampaně až $1,4 \cdot 10^{10}$ Ci).

Tab.1.

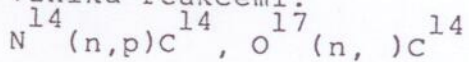
	^{83}Kr metastab.	1,86 hod	vzniká rozpadem ^{83}Bor , β má energii nab. 42 keV
	^{85}Kr metastab.	4,4 hod	
	^{85}Kr	10,76 r	
	^{87}Kr	76 min	
	^{88}Kr	2,8 hod	
	^{89}Kr	3,18 min	
	^{90}Kr	33 s	
	^{129}I	$1,7 \cdot 10^7$ r	
	^{131}I	8,05 den	
	^{132}I	2,26 hod	
	^{133}I	20,3 hod	
	^{134}I	52,2 min	
	^{135}I	6,68 hod	
	^{136}I	83 dnů	
	^{131}Xe metastab.	11,8 dne	
	^{133}Xe metastab.	2,26 dne	
	^{133}Xe	5,27 dne	
	^{135}Xe metastab.	15,6 min	
	^{135}Xe	9,14 hod	
	^{137}Xe	3,9 min	
	^{138}Xe	17,5 min	
	^{139}Xe	430	
Tritium	^3H	12,3 let	
	^{16}N	7,1 s	vzniká v prim.okruhu ^{16}O (n,p) ^{16}N
	^{17}N	4,1 s	vzniká v prim.okruhu ^{17}O (n,p) ^{17}N
	^{19}O	29 s	vzniká v prim.okruhu ^{18}O (n, γ) ^{19}O
	^{40}Ar	1,83 hod	- " -

^{14}C

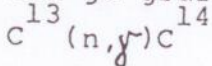
kde je stopa Ar,



5730 let vzniká reakcemi:



kde je grafit



Aktivita ve vzdušných prostředích u vodních reaktorů je 2000 Ci/rok, ve vodách 100-200 Ci/rok. Pokud reaktor pracuje, dostává se toto i mimo reaktor.

Vliv ionizujícího záření na živé organismy

je somatický (vliv vzniká hned) a genetický (může se projevat po pokoleních).

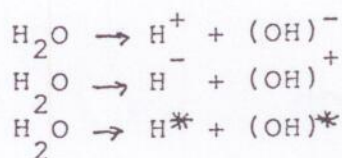
α - částice pronikají do malé hloubky (35 μm při energii 5 MeV)

β - (mm při energii 1 MeV)

γ - hluboko

n - ztrácejí svoji energii při srážkách s lehkými prvky, mohou u atomu H vznikat protony

Výsledné působení závisí na pohlčené energii. Je buď přímé (narušení chemických vazeb v molekule) nebo nepřímé: často u molekuly H_2O to vede k vytvoření chemicky aktivních iontů nebo radikálů, které mohou migrovat v buňce a mít vliv na složité molekuly. U vody může jít o tři reakce:

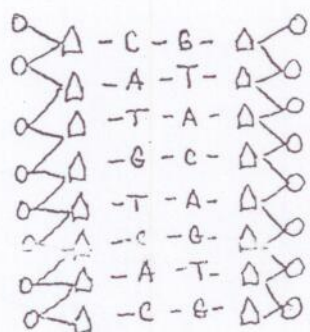


V prvních dvou vznikají ionty, v poslední vysoce aktivní svobodné radikály. Při jejich rekombinaci mohou vznikat chemické jedy pro tělo, jako kysličník vodičitý.

Vliv na molekulu DNK (deoxyribonukleová kyselina)

Tato molekula sestává z genů a vytváří chromozomy, upravující činnost buňky (Při vzniku života vzniká 23 párů chromozomů - 1/2 z každého rodiče - které se pak dělí mitosou na dvě skupiny - duplikují se. Každá větev se rozdělí na dvě - vodíkové vazby mezi A,C,G,T se přerušují a každá větev se doplňuje o Δ a O .

DNK molekula tvoří dvojitou spirálu - rozvinutá je



- A adenin
- C citosin
- G guanin
- T timin
- Δ deoxyribóza
- kyselina fosforová

Jsou to jediné možné vazby, jiné jsou mutace (některé vedou ke zkáze buňky).

Vznik rakovinných buněk je snad dán mutací vnitrobuněčných virusů - toto se může předávat budoucím pokolením, až mutanty vyhynou v procesu přirozeného výběru.

Při ozáření vyšším než 1 Sievert u celého těla je pravděpodobnost nemoci rakoviny vyšší než přirozená o 10^{-5} (člověk . mSv)⁻¹.

Největší záporný vliv na obyvatelstvo mají prvky s dlouhým poločasem rozpadu H^3 , C^{14} , Kr^{85} , I^{129} .

Jestliže vzniká množství těchto prvků lCi/rok, pak se mění expozice (Sv/rok) v závislosti na čase (při stálé rychlosti vzniku) takto:

T roky	$Kr^{85} \cdot 10^{-16}$	C^{14}	$H^3 \cdot 10^{-14}$ v moři	$H^3 \cdot 10^{-15}$ v oceánech	$I^{129} \cdot 10^{-10}$ ve štít.žl.
1	0,5	$9 \cdot 10^{-13}$	0,2	0,1	0,3
10	4	$8 \cdot 10^{-12}$	0,8	0,7	2
50	8	$2 \cdot 10^{-11}$	1	1,5	7
100	9	$3 \cdot 10^{-11}$	1	1,6	8
500	9	$5 \cdot 10^{-9}$	1	1,6	1

Největší problémy jsou u zpracovatelských závodů, které způsobují i po 500 letech expozici obyvatelstva z 70% od C^{14} , 12% od H^3 a 18% od Kr^{85} .

Od celé činnosti energetického atomového průmyslu za 500 let lze očekávat expozici: člověk.MSv /na MW el.výkonu/rok/

	Odhad 1 (E.E.Pochin)	Odhad 2 (skupina odb.)
	obyvatel	personál
Dobývání rudy	-	<22
Práce reaktoru	1	20
Přepracování	13,5	20
celkem	14,5	~42
		Odhad 2 (skupina odb.)
		obyvatel
		personál
		<1,4
		2
		1
		11
		4
		1-6
		~6,4
		14-20

Předpokládáme-li energetický výkon 1kW na člověka, pak údaje v tabulce jsou i expozice $\mu\text{Sv/rok}$ - podle předešlého, přirozené pozadí je $1200 \mu\text{Sv/rok}$
Pravděpodobnost smrti z rakoviny na jednotku pohlčené

expozice je $10^{-8} \mu\text{Sv}^{-1}$. Pravděpodobnost úmrtí přirozeného na rakovinu je $2 \cdot 10^{-3} \text{ rok}^{-1}$. Při výkonu jaderných zařízení $1 \text{ kW}/\text{člověka}$ bude tedy pravděpodobnost úmrtí 10^{-7} rok^{-1} , tj. cca 20000 x menší než přirozené úmrtí na rakovinu.

Nejčastější havárie u reaktorů mohou nastat

- 1) vlivem změn reaktivity
- 2) vlivem havárie na chlazení (oběhy jsou zdvojeny, při poruše jednoho automaticky se včlení další apod.)

Při odstavení vodního reaktoru 1100 MW v el. výkonu dochází ke změně radioaktivity v MCi i výkonu v kW takto:

Den	J, Brom	Vzác. plyny	Celkem produkty	Akti- noidy	Mate- riál	Celkem radio- aktivita	Výkon zbytek
0	1435	1240	13800	3450	10,6	17250	225000
1	265	221	2890	1330	9,19	4230	17400
5	101	105	1870	432	8,42	2310	9720
15	28,7	29	1280	39,7	7,5	1330	5600
30	6,74	4,77	947	9,35	6,4	963	4060
60	0,494	0,784	656	6,32	4,70	666	2350
120	$2,82 \cdot 10^{-3}$	0,659	401	5,90	2,76	410	1740
210	$3,09 \cdot 10^{-6}$	0,648	244	5,56	1,36	250	1100
365	$2,18 \cdot 10^{-6}$	0,630	146	5,17	0,614	152	659
1097	$2,18 \cdot 10^{-6}$	0,553	47,3	4,45	0,324	52	204
3653	$2,18 \cdot 10^{-6}$	0,353	17,9	3,27	0,132	21,3	67

Při celkové havárii tohoto reaktoru by bylo možné předpokládat souhrnně:

Smrt z rakoviny	v počtu případů:
γ záření (ze spadu i zamoření vzduchu)	10.000
ozáření při vdechování	600-100 za 40 let
štítná žláza - β ozáření	500-4000 za 30 let
Onemocnění štítná žláza (β, γ záření)	22.500-300.000 případů zvětšení št. žlázy
Genetické defekty Celkové ozáření	3.000-20.000 gen. defektů

Pravděpodobnost události se smrtelným koncem je ze všech činností lidí i přírodních událostí nejmenší.

Přepracování paliva

Vezmeme-li reaktor s hloubkou vyhoření 33GW-den/tuna obohaceného uranu 3,3% U^{235} , v každé tuně paliva je 33 kg Uranu 235 . 25 kg "shoří". "Shoří" i 24 kg U^{238} . Palivo po skončení kampaně bude mít 35 kg zbytků štěpení, 8,9 kg plutonia (obvykle PU^{239}) a 4,6 kg U^{236} .

Několik měsíců jsou tyče umístěny v bazénu, aby krátkodobé prvky "vyhořely". Pak se palivo rozpustí v kyselině k získání 99,5% uranu a plutonia. Zbytek se umístí do borosilikátových kontejnerů ze skla a umístí cca 600 m v dolech.

Skleněné tyče jsou 3 m dlouhé a 30 cm v průměru, vše je uloženo v krytu z nerezavějící oceli. Tyče jsou umístěny 10 m od sebe, roční výkon je 1000MW(el.). 10 roků se udržuje odvod tepla.

Vliv produktů štěpení v jednotlivých letech od jejich vzniku je následující: Průměrně okolo 90% produktů štěpení nepotřebuje delší doby skladování, protože τ je menší než 4 roky, nebo naopak je větší než $4 \cdot 10^{10}$ roků (a jsou málo aktivní).

Prvých několik stovek roků hraje největší roli ^{90}Sr ($\tau = 29$ roků) a ^{137}Cs ($\tau = 30$ roků) a jejich dceřinné produkty $^{137\text{M}}\text{Ba}$ a ^{90}Y . To je zřejmé z obrázku, začátek časové osy je v době přepracování. Po 500 letech hlavní vliv mají Pu, Am, po 10⁵ letech Po²¹³, Th²²⁹. Počáteční vklad ^{90}Sr a ^{137}Cs je větší než odpovídá obrázku, protože jsou β aktivní (tj. menší energie než α záření).

Závěr: Kromě ^{237}Np , které je dlouhožijící, (i vzhledem k možnostem difuze) ostatní prvky nevyžadují zvláštního ochranného krytu - kromě stávajícího ^{237}Np , který je nebezpečný tím, že je to α zářič a 45% množství, které se dostane do lidského organismu, se ukládá v játrech. Celková rizika jsou menší než při činnosti jaderných elektráren.

Posloupnost nebezpečnosti onemocnění je dána: 200 let ^{90}Sr , ^{137}Cs , dalších 1500 r ^{241}Am , mezi 1500-10000 r ^{243}Am . Do 20.000.000 r ^{237}Np a dále transmutacemi ^{238}U . Za 50000 roků se nebezpečnost jaderných zbytků rovná nebezpečnosti jaderného paliva z uranu.

Jednotka 1 rentgen = 1 r byla definována pro rentgenovo záření tímto způsobem: 1r/s je energie záření, která v 1 cm³ vzduchu za normálních podmínek vytvoří za sekundu z 2,08.10⁹ párů iontů (to je vlastně náboj 1 elektrostatické jednotky). Energie absorbovaná látkou byla nazývána dávka. Byla to hodnota

$$D = \int_0^t i \cdot d t, [r]$$

Hodnota 1 rad byla absorbovaná energie záření 100 ergů v 1g látky.

Jednotka pro jiné druhy záření než rentgenovo se nazývala 1 rep (z anglického názvu fyzikální ekvivalent rentgenu). Byla to tatáž jednotka jako 1 r.

Různou škodlivost záření vystihoval koeficient biologické účinnosti (nyní jakostní koeficient): Q

$$\text{Jednotka 1 rem} \times Q = 1 \text{ rem}$$

V nynějších jednotkách 1 rem = 0,01 Sv

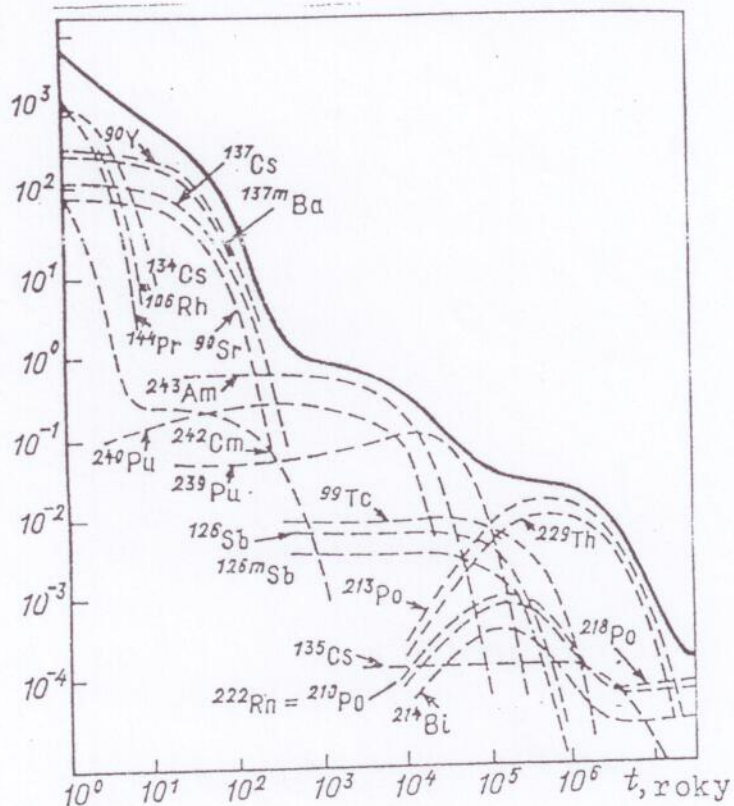
Pro jednotku množství se používala ještě jednotka 1 rutherford = 10⁶ rozp/sec a 1 becquerell = 1 rozpad/sec.

Polovrstvou byla definována taková tloušťka ochranného materiálu, která intenzitu záření zeslabí na 1/2 (např pro záření 1,33 MeV je to 0,011 m).

Literatura

- /1/ Fremuth F.: Účinky záření a chemických látek na buňky a organismus, SPN, Praha 1981.
- /2/ Janča J., Kapička, V., Trka Z., Štěrba F.: Obecná fyzika IV, Atomová fyzika, SPN Praha 1986.
- /3/ Cameron J.R.: Nuclear Fission reactors, New York Plenum Press, 1987.
- /4/ Delaney C.F.G.: Finch E.C. Radiation Detector, Clarendon Press Oxford 1992.
- /5/ Úlehla I., Suk M., Trka Z.: Atomy, jádra, částice. Academia Praha 1990.

Výkon
/W/



Vliv jednotlivých radioisotopů na celkový tepelný výkon
(od doby přepracování paliva)