

Radioekologie

Obsah

1. OBECNÉ POJMY	3
1.1. SYMBOLIKA	3
1.2. POJMY	3
1.3. HMOTNOST ATOMU	3
1.4. ENERGIE	4
2. RADIOAKTIVITA	5
2.1. HMOTNOSTNÍ PODMÍNKA	5
2.2. DRUHY RADIOAKTIVNÍCH PŘEMĚN	5
2.3. KINETIKA RADIOAKTIVNÍCH PŘEMĚN	8
2.4. PŘÍRODNÍ RN	11
3. IONIZUJÍCÍ ZÁŘENÍ	13
3.1. VLASTNOSTI IONIZUJÍCÍHO ZÁŘENÍ	13
3.2. ZDROJE IZ	16
3.3. DETEKCE IZ	17
3.4. BIOLOGICKÉ ÚČINKY IZ	31
3.5. OCHRANA PŘED IZ	47
3.6. OCHRANA PŘED IZ V ČR – LEGISLATIVA	49
4. RADIOAKTIVITA A IZ V ŽIVOTNÍM PROSTŘEDÍ	67
4.1. KOSMICKÉ ZÁŘENÍ A KOSMOGENNÍ RN	69
4.2. PŘÍRODNÍ RN S DLOUHÝM POLOČASEM ROZPADU	73
4.3. RADON	74
4.4. JADERNÉ ELEKTRÁRNY A JEJICH BUDOUCNOST	82
4.5. HAVÁRIE JADERNÝCH REAKTORŮ	111
4.6. NEHODY PŘI PRÁCI S RADIOAKTIVNÍMI LÁTKAMI	123
4.7. POKUSNÉ JADERNÉ A TERMONUKLEÁRNÍ VÝBUCHY	143
4.8. UMĚLÉ ZDROJE IZ	155
4.9. RADIOAKTIVNÍ ODPADY	155

1. Obecné pojmy

1.1. Symbolika

${}^A_ZX^N$ běžný zkrácený zápis: AX

A – nukleonové číslo ($A=Z+N$)

Z – protonové číslo

N – neutronové číslo

Zvláštní symbolika: D – deuterium – ${}^2\text{H}$
T – tritium – ${}^3\text{H}$

1.2. Pojmy

nuklid(y) – soubor identických atomů, jejichž jádra tedy mají identické složení, stejné A i Z

isotopy – soubor atomů, které mají stejné protonové (Z) ale různé neutronové N (tím pádem i A) číslo

isobary – nuklidy, které mají stejné nukleonové (A) ale různé protonové číslo

radio – značí, že jádro je nestabilní a samovolně se rozpadá

Příklady: Isobary: ${}^{40}\text{Ar}$, ${}^{40}\text{K}$, ${}^{40}\text{Ca}$.

1.3. Hmotnost atomu

kg x u definice u: $u = 1/12 \text{ m}({}^{12}\text{C})$

po vyčíslení: $u = 0,012 / (12,6,022 \cdot 10^{23}) = 1,6606 \cdot 10^{-27} \text{ kg} = 1 \text{ u}$

1.4. Energie

J x eV definice eV: je to energie kterou elektron získá při průchodu potenciálovým spádem 1V **$E = Q \cdot \Delta U$**

po vyčíslení: **$E = Q \cdot \Delta U = 1,602 \cdot 10^{-19} \cdot 1 = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J} = 1 \text{ eV}$**

Příklady: Energie fotonu viditelného záření.

$\lambda = 550 \text{ nm} = 5,5 \cdot 10^{-7} \text{ m}$; $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J s}$; $c = 2,997 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$

$E = h \cdot \nu = h \cdot c / \lambda = 6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 2,997 \cdot 10^8 / 5,5 \cdot 10^{-7} = 3,6 \cdot 10^{-19} \text{ J} = 3,6 \cdot 10^{-19} / 1,602 \cdot 10^{-19} = 2,3 \text{ eV}$

Ekvivalentní energie 1 u:

$m = u = 1,6606 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$; $c = 2,997 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$

$E = m c^2 = 1,6606 \cdot 10^{-27} (2,997 \cdot 10^8)^2 = 1,492 \cdot 10^{-10} \text{ J} = 1,492 \cdot 10^{-10} / 1,602 \cdot 10^{-19} = 931,3 \text{ MeV}$

2. Radioaktivita

2.1. Hmotnostní podmínka

Základní hmotnostní podmínka radioaktivity:

$$M(X) > M(Y) + M(\text{ČÁSTIC})$$

Energie uvolněná při radioaktivní přeměně:

$$E_{\text{přeměny}} = E_{\text{kin}}(Y) + E_{\text{kin}}(\text{ČÁSTIC}) + E_{\gamma}$$

Příklad:

^{12}C (6 p, 6 n), $m(p) = 1,6726 \cdot 10^{-27}$ kg; $m(n) = 1,6750 \cdot 10^{-27}$ kg; $m(e) = 9,1095 \cdot 10^{-31}$ kg; $c = 2,997 \cdot 10^8$ m s $^{-1}$; $u = 1,6606 \cdot 10^{-27}$ kg

teoretická $m(^{12}\text{C}) = 6 m(p) + 6 m(n) + 6 m(e) = 2,0091 \cdot 10^{-26}$ kg

skutečná $m(^{12}\text{C}) = 12 u = 1,9927 \cdot 10^{-26}$ kg

$\Delta = 1,9927 \cdot 10^{-26} - 2,0091 \cdot 10^{-26} = -1,6407 \cdot 10^{-28}$ kg

$E_{\nu} = 1,6407 \cdot 10^{-28} \cdot (2,997 \cdot 10^8)^2 = 1,4736 \cdot 10^{-11}$ J = $1,4736 \cdot 10^{-11} /$

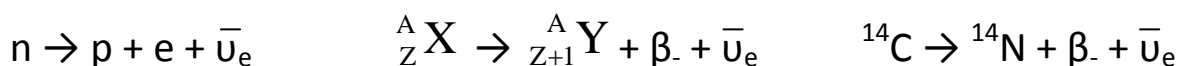
$1,602 \cdot 10^{-19} = 92$ MeV

$\epsilon = 9,2 \cdot 10^7 / 12 = 7,7$ MeV

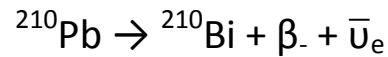
Zajímavost: Při vzniku 12g (1 mol) ^{12}C z p a n, by se uvolnilo $1,4736 \cdot 10^{-11} \cdot 6,022 \cdot 10^{23} = 8,9$ TJ, rozštěpením 12g uranu se uvolní asi 1 TJ.

2.2. Druhy radioaktivních přeměn

A) Přeměna β .



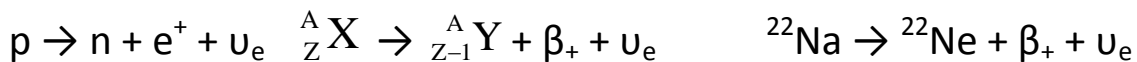
měříme e^-



Energie se rozdělí mezi jádro (málo), elektron a $\bar{\nu}_e$ náhodně, spektrum je proto spojité, část vznikajících jader může být excitovaná.

Příklad: ^3H , ^{14}C , ^{32}P , ^{35}S

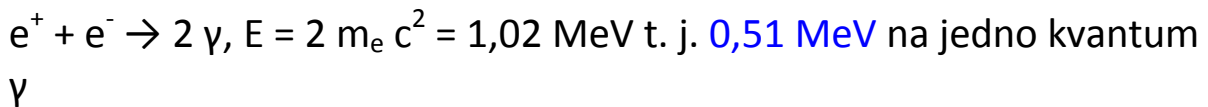
B) Přeměna β_+



měříme e^+

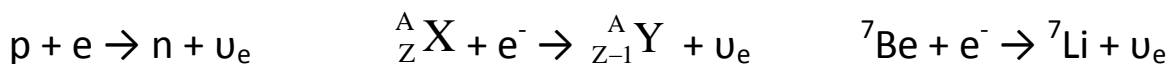
Platí stejné energetické zásady jako u β_- přeměny (spojité spektrum apod.).

Čistý β_+ rozpad je vzácný, většinou probíhá spolu s elektronovým záchytem (EZ). Měří se pomocí anihilačních fotonů a ionizačních účinků e^+ :



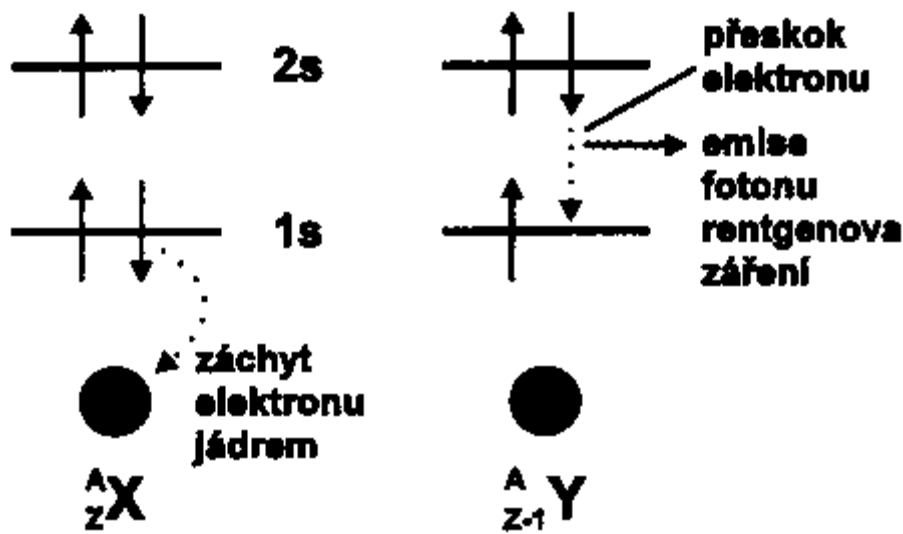
Příklad: ^{22}Na

C) Elektronový záchyt (EZ)



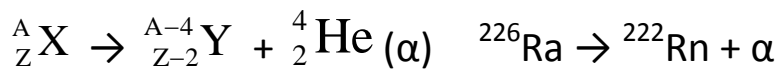
Po EZ dochází k následným dějům pomocí kterých se tato radioaktivita měří: zaplňování vakancí ve slupkách K či L \rightarrow emise RTG fotonů či Augerových elektronů (elektrony vyražené RTG zářením z vyšších slupek elektronového obalu, mají diskrétní energii, $E_{\text{aug}} = E_{\text{RTG}} - E_{\text{vaz.}}$). Měří se RTG fotony.

Použití v medicíně: ^{13}N , ^{15}O , ^{11}C



Obrázek 13: K výkladu elektronového záchytu.

D) Přeměna α

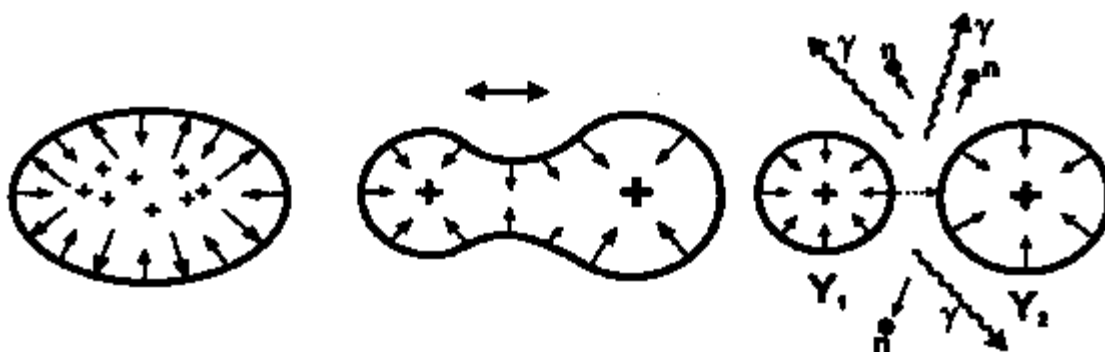


měříme α

Alfa částice je velice stabilní, a proto je její emise výhodná, zvláště u těžších prvků. Na rozdíl od spektra β je spektrum α spojitě ale stejně jako při β rozpadu vzniká část jader excitovaná.

E) Samovolné štěpení (SŠ)

Je-li splněna hmotnostní podmínka, rozštěpí se jádro těžší na dvě lehčí plus dva až tři neutrony. Existuje ale i štěpení bez emise neutronů.



Obrázek 16: Průběh samovolného štěpení jádra.

2.3. Kinetika radioaktivních přeměn

- za dostatečně krátký časový interval se přemění vždy stálá část z přítomného počtu (N) atomů radioaktivního nuklidu (radionuklidu)

$$(dN / N) / dt = \lambda$$

λ [s^{-1}] – přeměnová konstanta

Příklad: $\lambda = 1 \cdot 10^{-3} s^{-1}$ – z přítomného počtu RN se přemění každou sekundu 1 / 1000 atomů

Tabulka 9: Přeměnové konstanty a poločasy některých radioaktivních nuklidů.

Nuklid	λ (s^{-1})	poločas
^{238}U	$4,87 \cdot 10^{-18}$	$4,51 \cdot 10^9$ roků
^{14}C	$3,84 \cdot 10^{-12}$	5736 roků
^{137}Cs	$7,23 \cdot 10^{-10}$	30 roků
^{131}I	$9,93 \cdot 10^{-7}$	8,1 dní
^{211}At	$2,67 \cdot 10^{-5}$	7,2 hodin
^{223}Fr	$5,25 \cdot 10^{-4}$	22 minut
^{262}Db	0,0204	34 s
^{263}Sg	0,77	0,9 s

Rychlost přeměny **závisí na:**

- výchozím a konečném stavu jádra
- vlnové funkci obou jader
- na parametrech slabé, silné a elektromagnetické interakce

nezávisí na:

- tlaku, teplotě, koncentraci, chemické formě

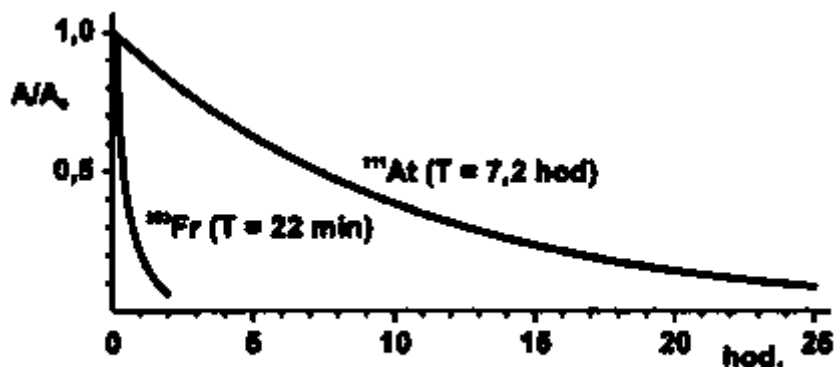
Aktivita: rychlost přeměny radioaktivního nuklidu

$$A = dN / dt \qquad A = \lambda N$$

- závisí na počtu radioaktivních atomů v radioaktivní látce
- rozměr s^{-1}
- jednotka 1 becquerel (Bq), násobné kBq, MBq, GBq apod.
- měrná aktivita: vztaženo na m, V, c apod.

Časová změna aktivity:

$$-dN / dt = \lambda N \rightarrow N = N_0 e^{-\lambda t} \rightarrow A = A_0 e^{-\lambda t}$$



Obrázek 21: Časový průběh aktivity.

- aktivita RN klesá s časem exponenciálně, rychlost poklesu je dána konstantou λ .

Poločas přeměny: $A = A_0 / 2 \rightarrow A_0 / 2 = A_0 e^{-\lambda t}$
 $1 / 2 = e^{-\lambda t}$
 $\ln(1 / 2) = -\lambda t$
 $-\ln 2 = -\lambda t$
 $t = \ln 2 / \lambda$
 $T_{1/2} = \ln 2 / \lambda$

Měření poločasu rozpadu z úbytku aktivity lze jen u krátkodobě žijících radionuklidů. Jinak se poločas rozpadu počítá z aktivity radionuklidu o známé hmotnosti (měrné aktiviy).

Aktivita radionuklidu o hmotnosti m : $N = n N_A$
 $N = (m N_A) / A_r$
 $A = (\lambda m N_A) / A_r$

Pak z λ spočítáme $T_{1/2}$, popřípadě se znalosti λ spočítáme m .

Příklad využití vztahu $A = A_0 e^{-\lambda t}$:

- uhlíková metoda $^{14}\text{N} (n, p) ^{14}\text{C}$
- ^{14}C se během minut až hodin oxidují na CO_2
- rozdělení mezi rostliny, organismy, oceány
- rovnováha 15,3 přeměny za minutu v 1g C živé hmoty

- po smrti konec rovnováhy, citlivost asi do 50 000 roků ($T_{1/2} = 5,7$ tisíc roků)
- měří se dřevo, uhlíky, textil, kůže
- **moderní metoda:** urychlovačová hmotnostní spektrometrie, použitelná až do 100 000 roků
- stačí i 0,05 mg vzorku, ve vakuu se vzorek bombarduje ionty Cs^+ za vzniku $^{14}C^-$ (izobarický ^{14}N záporné ionty netvoří) poté se ionty $^{14}C^-$ dostávají do prostoru s Ar, vzniká $^{14}C^{3+}$ a vstupují do hmotnostního spektrometru.
- stejná metoda se používá ke stanovení obsahu př.: ^{10}Be (mořské sedimenty, polární led), ^{36}Cl a ^{129}I (podzemní vody), ^{27}Al (mořské sedimenty).

2.4. Přírodní RN

Přirozeně se vyskytující radioaktivní prvky: přírodní X umělé (není mezi nimi rozdíl)

1. $T_{1/2} > 10^8$ let, vznikly při syntéze prvků ve vesmíru

Tabulka 10: Některé přírodní radioaktivní nuklidy s velkými poločasy přeměny

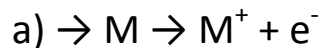
Nuklid	Poločas (roků)	Zastoupení v příslušném prvku (%)
^{40}K	$1,27 \cdot 10^{10}$	0,012
^{87}Rb	$4,7 \cdot 10^{10}$	27,85
^{88}Sr	$> 3 \cdot 10^{16}$	82,56
^{115}In	$6 \cdot 10^{14}$	95,77
^{138}Ba	$> 1 \cdot 10^{15}$	71,66
^{147}Sm	$6,7 \cdot 10^{11}$	14,97
^{159}Tb	$> 5 \cdot 10^{16}$	100
^{186}W	$> 6 \cdot 10^{15}$	28,41
^{187}Re	$5 \cdot 10^{10}$	0,93
^{209}Bi	$2,7 \cdot 10^{17}$	100
^{232}Th	$1,39 \cdot 10^{10}$	100
^{235}U	$7,13 \cdot 10^8$	0,715
^{238}U	$4,51 \cdot 10^9$	99,274

2. $T_{1/2} < 10^8$ let, vznikají jako produkty přeměny mateřských nuklidů z radioaktivních řad a jadernými reakcemi v zemské atmosféře působením kosmického záření (^3H , ^{14}C , ^{10}Be aj.)

3. Ionizující záření

3.1. Vlastnosti ionizujícího záření

Energie záření (γ , β , α apod.) keV – MeV, ionizační energie atomů a molekul < 25 eV proto **ionizující záření**.



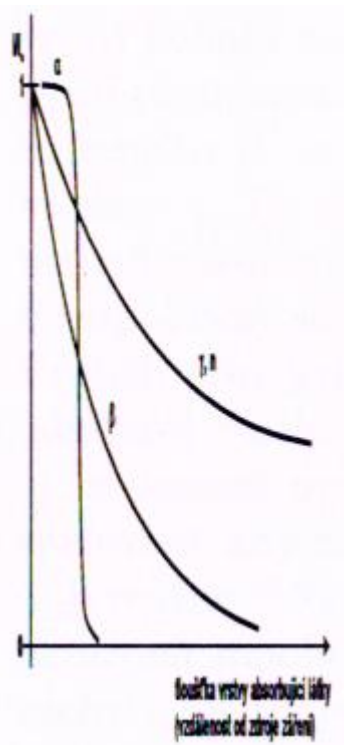
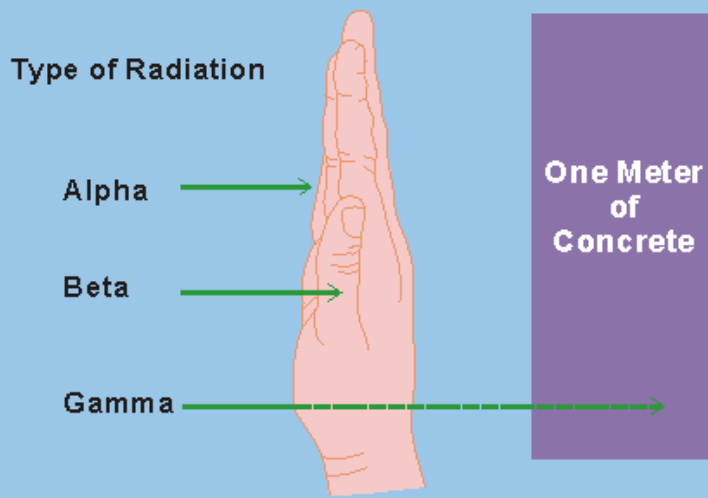
Rychlost asi $10^{-16} - 10^{-15}$ s, poměr a) a b) 1:2, elektrony způsobují další sekundární ionizaci a excitaci. Excitace je mnohonásobná a do vysokých excitačních stavů (na rozdíl od UV)

Pojmy a veličiny: ionizující záření, jaderné záření (pouze při radioaktivních přeměnách), radioaktivní záření (nesprávné, záření není radioaktivní {kromě n})

Absorpce záření – postupné odevzdávání energie až do stavu kdy už není schopno dále ionizovat

Dosah záření – tloušťka vrstvy, která úplně absorbuje záření

RELATIVE PENETRATING POWER OF ALPHA, BETA, AND GAMMA RADIATION



Absorpční křivky:

Dávka záření – energie sdělená ionizujícím zářením (energie získaná od všech primárně i sekundárně ionizujících částic) malému objemu látky

$$D = d\varepsilon / dm$$

Rozměr je $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$, jednotkou Gray (Gy), $1 \text{ Gy} =$ energie 1 J absorbovaná v 1 kg látky.

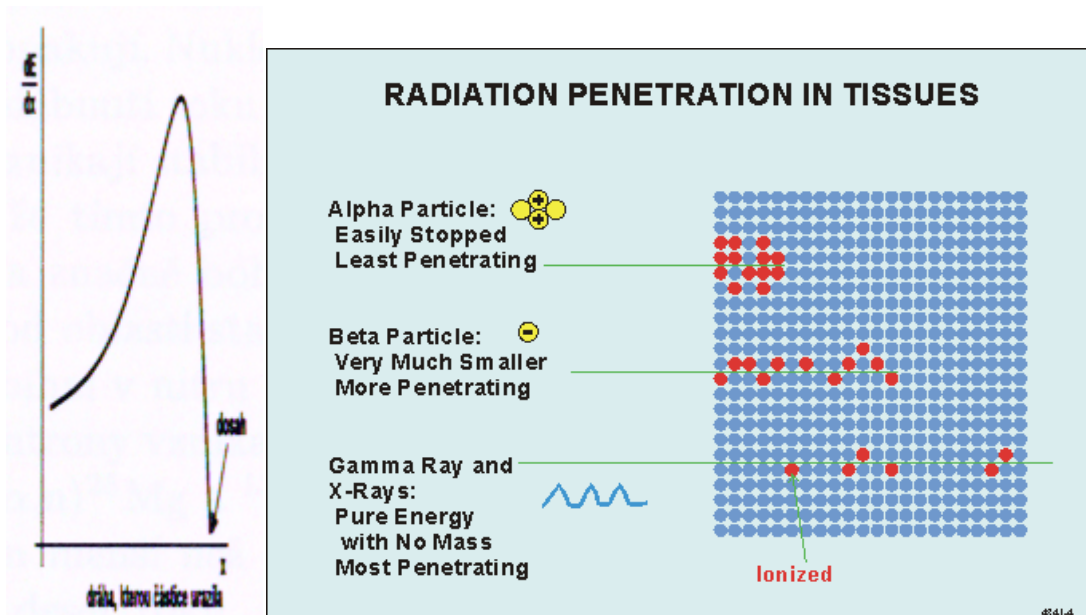
Rozsah dávek: $10^{-6} - 10^{-2} \text{ Gy}$ při monitorování dávek v životním prostředí, $10^{-4} - 1 \text{ Gy}$ při monitorování dávek u profesionálních pracovníků se zářením, $10^{-1} - 10^2 \text{ Gy}$ v léčebném použití záření, $10^{-1} - 10^4 \text{ Gy}$ v radiobiologii a $10^2 - 10^5 \text{ Gy}$ v radiační chemii a technologii.

Dávkový příkon – rychlost s jakou je látce energie sdělována, rozměr W kg^{-1} , jednotka Gy s^{-1}

$$\dot{D} = dD / dt$$

Lineární přenos energie – používá se při posuzování biologických účinků IZ a udává rozložení sdělené energie podél dráhy částice, rozměr J m^{-1} , běžně $\text{keV } \mu\text{m}^{-1}$

$$L = dE / dx$$



(tzv Braggova křivka)

Lineární přenos energie ve vodě pro různé druhy záření

záření	keV, μm^{-1}
γ záření ^{60}Co (1,17 a 1,31 MeV)	0,22
rtg záření (200 keV)	1,7
rtg záření (50 keV)	6,3
elektrony (záření β) (1–2 MeV)	0,2
elektrony (10 keV)	0,3
elektrony (100 eV)	20
protony (10 MeV)	4,7
záření α (5 MeV)	40
jádra vzniklá jaderným štěpením (100 MeV)	1800

3.2. Zdroje IZ

1. **aparaturní** – záření vzniká jen během provozu zařízení
2. **radionuklidové** – emitují záření nepřetržitě

Zdroje γ a RTG záření: γ : ^{241}Am , ^{109}Cd , ^{57}Co , ^{55}Fe , ^{60}Co , ^{137}Cs , ^{192}Ir ; RTG: RTG lampy, ^{109}Cd , radionuklidy generující brzdné záření při absorpci β záření, urychlovače elektronů

Zdroje elektronů: ^{90}Sr / ^{90}Y , ^3H , ^{147}Pm ; urychlovače elektronů

Zdroje pozitronů: ^{22}Na , ^{68}Ge

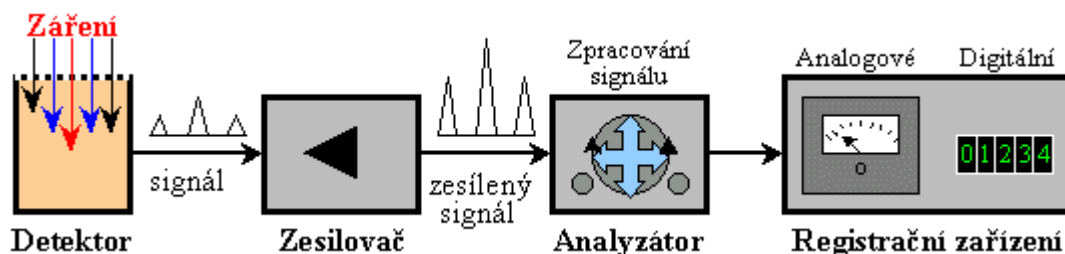
Zdroje těžkých kladných částic: α : ^{210}Po , ^{226}Ra , ^{238}Pu , ^{239}Pu , ^{241}Am , urychlovače částic

Zdroje neutronů: radionuklidové zdroje založené na reakci (α , n), (γ , n) a samovolném štěpení ($^{226}\text{Ra}(\gamma, n)\text{Be}$ – „rabe“, $^{239}\text{Pu}(\alpha, n)\text{Be}$ –

„pube“, $^{241}\text{Am}(\alpha, n)\text{Be}$ – „ambe“, neutronový generátor ($^3\text{H}(\text{d}, n)^4\text{He}$), jaderný reaktor

3.3. Detekce IZ

- IZ není vnímatelné lidskými smysly
- registruje se na základě dějů, které vyvolává při absorpci ve vhodné látce
- důsledky těchto dějů se většinou elektronicky převádějí na pozorovatelné signály
- elektronický způsob detekce vyžaduje zařízení sestávající z několika částí
- část citlivá na záření se nazývá detektor záření (energie záření se mění na elektrické či optické signály, které se dále zpracovávají (zesílení, integrace))
- zpracované signály se přivádějí na registrační jednotku (**pulsní** - zobrazují se přímo impulsy, či **integrální režim** - počet impulsů za čas (tzv. **dozimetry** – udávají dávkový příkon př. $\mu\text{Gy hod}^{-1}$))



- většina detektorů neměří IZ se 100% účinností, pro četnost R platí: $R = \eta A$ (η – účinnost < 1 ; A – aktivita v Bq)
- zařízení, které rozlišuje energii záření podle výšky impulsů – spektrometr záření
- relativní chyba měření vzorku je tím menší, čím větší počet impulsů zaznameneáme

K detekci ionizujícího záření se běžně užívají tyto **sekundární projevy absorpce**:

- fotografické účinky
- ionizace plynů
- luminiscence
- schopnost zvyšovat elektrickou vodivost některých materiálů
- změna struktury materiálu

Podle toho lze rozdělit detektory ionizujícího záření do pěti základních skupin:

1. fotografický film
2. ionizační komora, proporcionální detektory, Geiger-Müllerovy detektory
3. fluorescenční stínítka, scintilační detektory, termoluminiscenční detektory
4. polovodičové detektory
5. stopové detektory částic

Důležitými charakteristikami všech typů detektorů jsou:

- účinnost
- linearita
- energetická proporcionalita
- rozlišení

Účinnost

Účinnost detektoru popisuje možnosti detektoru zaznamenávat různé druhy záření o různých energiích, která na něho dopadají. Ideální je stav, kdy počet částic dopadajících na snímač je roven počtu impulsů registrovaných detektorem.

Linearita

Proces konverze jednotlivých částic na elektrické pulsy je extrémně rychlý - řádově několik mikrosekund. Pokud je vysoký tok částic, může se stát, že částice přicházející do detektoru není zaznamenána, protože detektor ještě zpracovává částici předcházející. Doba potřebná pro registraci částice (přeměnu na elektrický puls) se označuje jako mrtvá doba detektoru (τ). Část částic, které mohou být náležitě zpracovány, je popsána linearitou detektoru. Jednotlivá částice s energií E , která vstoupí do detektoru, produkuje elektrický puls V , takže částice, které dopadají na detektor v počtu I částic za sekundu vyvolají vznik napěťových pulsů v počtu R pulsů za sekundu. Detektor považujeme za lineární, dokud trvá přímá úměra mezi R a I .

Jelikož je detektor po určitou dobu τ "mrtvý", bude měřené množství pulsů R_m vždy nižší než skutečné množství pulsů R_t :

$$R_t = \frac{R_m}{1 - R_m \tau}$$

Průměrná mrtvá doba činí:

- 200 μ s u Geiger-Müllerova detektoru
- 0,23 μ s u scintilačního detektoru s krystalem NaI (TI)
- 0,027 μ s u scintilačního detektoru s krystalem YAP (Ce)
- 0,001 μ s u polovodičových detektorů

Energetická proporcionalita

Jedná se o úměrnost signálu detektoru k energii dopadající částice. Velikost výstupního signálu je závislá na proudu vzniklém v čítači a tento proud je závislý na počtu ionizačních přeměn vedoucích ke vzniku pulsu. Jestliže počet ionizačních přeměn bude úměrný energii dopadajících částic, velikost výstupního napětí bude rovněž úměrná energii dopadajících částic. Detektor bude proporcionalní, pokud je velikost výstupního napětí detektoru V úměrná energii E dopadajících částic.

Rozlišení

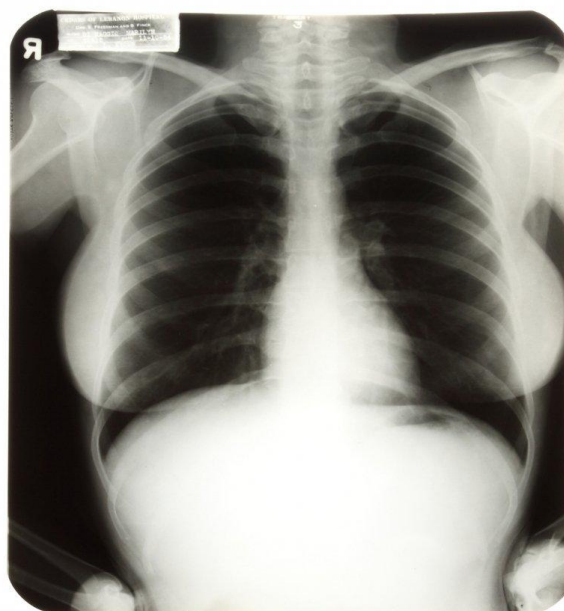
Je to schopnost detektoru rozlišit částice různých energií. V proporcionálně pracujícím detektoru způsobí částice o energii E výstupní puls o napětí V . Prakticky budou tedy částice o stejné energii produkovat výstupní pulsy o stejném napětí

Jednotlivé druhy detektorů IZ

Fotografický film

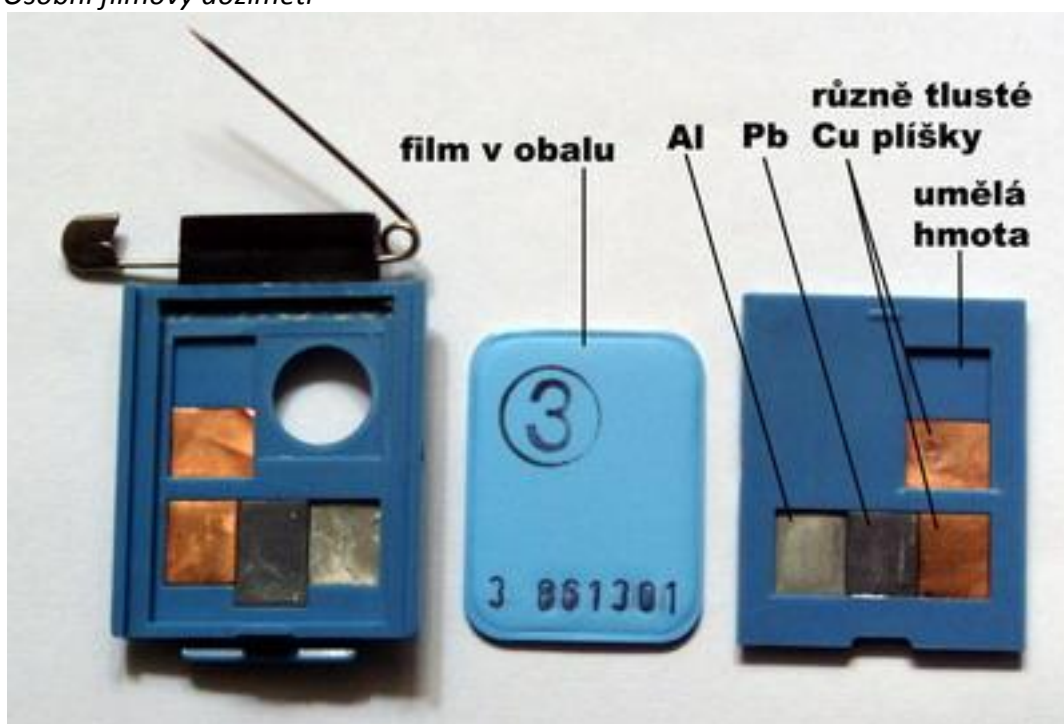
Fotografická detekce ionizujícího záření je založena na tom, že **ionizující záření**, stejně jako viditelné světlo, **vyvolává ve fotografické emulzi** (krystalky Agar v želatině) **latentní obraz**, který lze zviditelnit chemickým vyvoláním. Ozářená místa emulze vykazují po vyvolání zčernání, jehož intenzita je úměrná počtu částic, které na emulzi působily. Používají se k detekci RTG záření, záření γ a neutronů. Neutrony, které sami na fotografickou emulzi nepůsobí, je třeba převést na detekci ionizujících částic. Například překrytím fotografické emulze kadmiovou fólií, v níž se pomalé neutrony zachycují reakcí $^{113}\text{Cd} (n, \gamma) ^{114}\text{Cd}$ a vzniklé fotony pak způsobují zčernání emulze.

Fotografická detekce ionizujícího záření se používá v **osobní dozimetrii** pracovníků s ionizujícím zářením. A v různých **radiografických metodách**. Osobní filmový dozimetr obsahuje film v papírovém obalu, který je uložen v plastické kazetě. Na vnitřních stěnách kazety, jsou upevněny měděné a olověné proužky, které umožňují přibližně určit energii záření tím, že různě absorbují záření dopadající na film. Dozimetr je připevněn na pracovním oděvu a nepřetržitě registruje záření, obvykle po dobu jednoho měsíce. Po vyvolání filmu se dávka záření určí z intenzity zčernání filmu.



Ruka ženy W. Röntgena, exponováno 22. 12. 1895

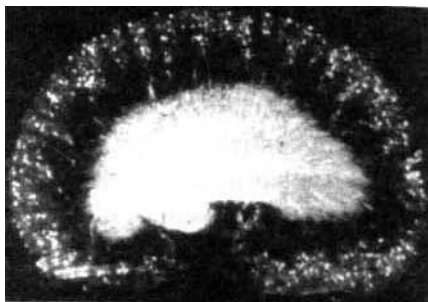
Osobní filmový dozimetr



Autoradiografické metody jsou významné tím, že poskytují informace o rozložení radioaktivity ve zkoumaném objektu. To je velmi užitečné v biologických studiích, kde se zjišťuje rozložení radioaktivních látek v živočišných orgánech, částech rostlin a buněčných strukturách. Zkoumaný radioaktivní objekt se na určitou dobu přiloží na film, který se pak vyvolá.



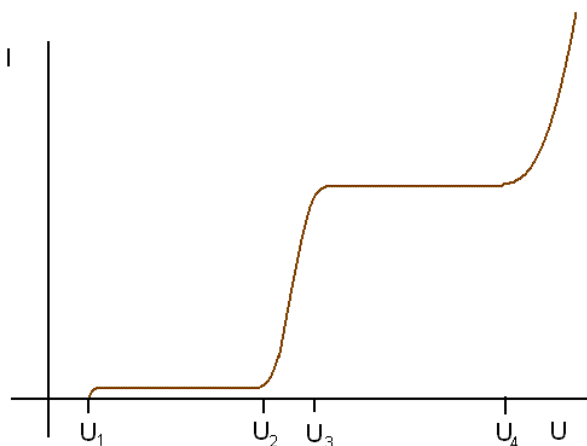
Autoradiogram zmrazeného řezu krysou pořízený 6h po injekci roztoku $\text{Na}_2^{35}\text{SO}_4$



Autoradiogram řezu ledvinou krysy, ukazující lokalizaci receptorů endothelinu

Fotografická detekce ionizujícího záření se také používá v průmyslové radiografii a v lékařské rentgenové diagnostice.

Plynové ionizační detektory



Všechny detektory mají za základ nádobu s tenkým, málo absorbujícím vstupním okénkem a dvěma elektrodami uvnitř. Detektor je plněn vzácnými plyny (argon, xenon). Po určité době budou vzniklé iontové páry rekombinovat a přejdou zpět do základního stavu. V případě, že je na elektrody vloženo určité napětí, budou elektrony přitahovány k anodě a ionty ke katodě a sníží se tím rozdíl potenciálů. Velikost vzniklého napěťového impulsu závisí na napětí mezi elektrodami.

Závislost počtu elektronů vzniklých v komoře působením ionizujícího záření na napětí mezi elektrodami lze vyjádřit graficky. Je-li hodnota U menší než U_1 bude část elektronů a iontů rekombinovat ještě před zachycením na elektrodách. V oblasti napětí U_1-U_2 dopadnou všechny elektrony na anodu a ionty na katodu - jejich počet závisí pouze na počtu absorbovaných částic. V oblasti, kde je napětí mezi elektrodami vyšší než U_2 , budou mít volné elektrony dostatečnou energii, aby na cestě k anodě ionizovaly další atomy plynu a probíhá tzv. lavinová ionizace. Koeficient plynového zesílení (A) udává, kolikrát více párů dopadlo na elektrody, než vzniklo účinkem ionizujícího záření.

Ionizační komora:

Ionizační komora pracuje v oblasti U_1-U_2 ($A = 1$), ionizační proud je úměrný energii ionizujícího záření. Napětí nutné k dosažení nasyceného proudu závisí na intenzitě záření. Citlivost komory závisí na vlnové délce a stejně tak i absorpce záření v plynu. K plnění se používá těžkých vzácných plynů (Ar, Kr).

Proporcionální a Geiger-Müllerův detektor:

Jedná se o detektory pracující v oblasti U_3-U_4 . Počet vzniklých párů elektron-iont je úměrný energii ionizujícího záření. Pokud je koeficient plynového zesílení konstantní je elektrický napěťový impuls na výstupu úměrný absorbované energii ionizujícího záření a detektor dovoluje rozlišit ionizující záření s různými energiemi.

Vznik lavin elektronů je v proporcionálním detektoru lokální záležitostí - vznikají v té části, kde bylo ionizující záření pohlceno. Vyhasnutí lavin proběhne aniž by se rozšířili do celého objemu. **Plynové zesílení A tohoto Geiger-Müllerova detektoru je kolem 10^7 .**

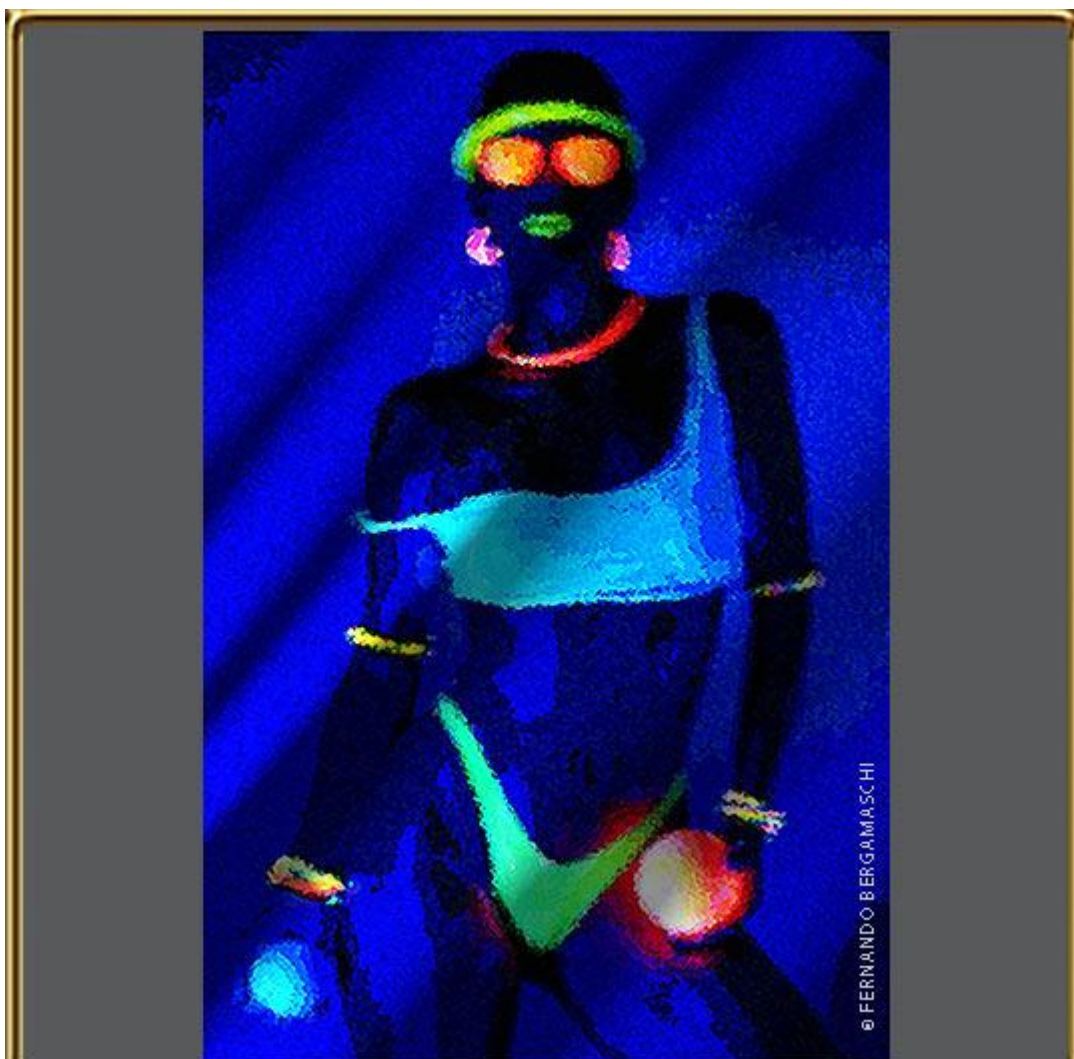
Geiger-Müllerův detektor



Luminiscenční detektory

Fluorescenční stínítka:

Při ozáření některých látek ionizujícím zářením může dojít k uvolnění elektronů z valenčního pásu a přechodu do pásu vodivostního a **při zpětném přechodu může vzniknout viditelné záření.** Tento jev se pak využívá k visuelní detekci ionizujícího záření. Jako fluoreskujících látek se používá wolframian vápenatý, křemičitan zinečnatý nebo sirník zinečnatý. Ačkoliv existuje závislost mezi intenzitou fluorescence a intenzitou dopadajícího svazku, používá se fluorescenčních stínítek hlavně při justaci přístrojů.



Žena v bikinách v UV světle.

Scintilační detektory:

V scintilačních detektorech je převod ionizujícího záření na elektrický impuls dvojstupňový proces. Prvním krokem je vznik záblesku (emise světla) na vhodném krystalu a druhým krokem je uvolňování elektronů na fotonásobiči a jejich detekce a převod na elektrický impuls.

Ionizující záření, dopadající na uzemněný scintilační krystal detektoru, uvolní elektron, který při pohybu krystalem přivede do excitovaného stavu desítky atomů. Zpětný přechod do základního stavu je doprovázen emisí světla, jehož vlnová délka nemusí nutně

ležet ve viditelné oblasti, ale musí být vhodná k uvolňování elektronů z fotokatody.

Scintilačním krystalem emitovaný foton dopadne na světlocitlivou katodu a uvolní z ní určitý počet (n) fotoelektronů. Tyto dopadají na nejbližší dynodu (parabolická elektroda) a každý z nich vyprodukuje jistý počet R sekundárních elektronů. Na druhou dynodu dopadá již nR elektronů, na třetí nR^2 elektronů atd. Při počtu dynod m vzroste počet primárních elektronů na nR^m , kde R^m je koeficient zesílení fotonásobiče. **Mezi jednotlivými dynodami je udržováno napětí 100-200 V** a na výstupu z fotonásobiče je impuls napětí přímo úměrný energii absorbovaného ionizujícího záření. **V běžných detektorech je počet dynod 8-15, a koeficient zesílení je 10^7 - 10^8 .**

Fotonásobič



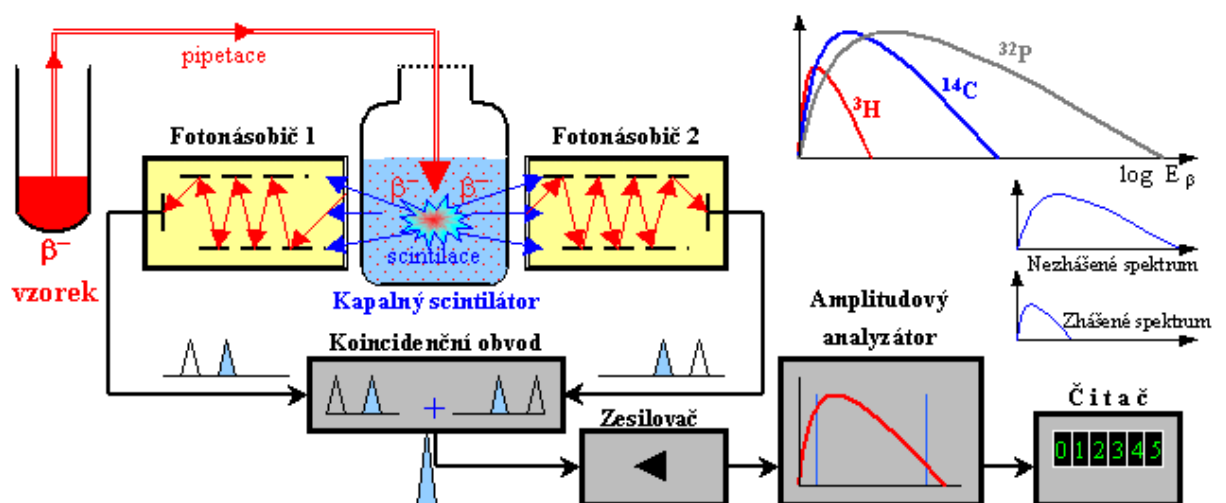
Jako scintilačního krystalu se nejčastěji používá krystal **Nal aktivovaný 1% Tl**. Thallium vytváří v pásové struktuře krystalu hladinu nečistot, tzv. fluorescenční centra. Pro nízkoenergetická RTG záření (3-20 keV) není tento krystal vhodný a alternativně se používají monokrystaly $YAlO_3$ aktivované Ce (YAP:Ce). Tento krystal může být v tenčí destičce a je mnohem stabilnější. Podstatný je i rozdíl v délce

scintilačních záblesků - u NaI je to 230 ns, u YAP je to pouze 27 ns. Maximální intenzita fluorescenčního pásu NaI je na vlnové délce 410 nm, u krystalu YAP 350 nm. Fotokatoda v scintilačních detektorech je zpravidla antimon-cesiová.

Scintilační krystal z NaI dotovaný thaliem



Kapalný scintilátor je taková látka kapalného skupenství, která při interakci s ionizujícím zářením převádí část absorbované energie na světelné záblesky (scintilace), podobně jako výše popsané scintilátory pevného skupenství.



Polovodičové detektory

V těchto detektorech je jednostupňová detekce ionizujícího záření prováděna pevnou látkou, ve které dokáže dopadající kvantum **generovat dvojici nábojů**, a ty jsou schopny rychlého pohybu k elektrodám, kde vyvolají elektrický impuls. Tato pevná látka je umístěna mezi dvěma elektrodami pod vysokým napětím. **Je to vlastně typ ionizační komory, která je místo plynem vyplněna krystalem.** Použitý krystal musí mít v zásadě tyto vlastnosti:

- vysoký odpor, který zajišťuje sběr nábojů polem vysokého napětí a snižuje šum ze zbytkových proudů
- dovoluje prodloužit dobu životnosti vzniklých nábojů
- umožňuje vysokou pohyblivost nábojů
- má malou šířku zakázané zóny (předpoklad dobrého energetického rozlišení)
- velkou absorpční schopnost

Těmto podmínkám vyhovují polovodičové materiály jako křemík a germanium. Tyto materiály jsou zpravidla driftované lithiem, které napomáhá k záchytu dopadajících fotonů. Jejich stabilitu je však nutno zajistit teplotami kapalného dusíku.

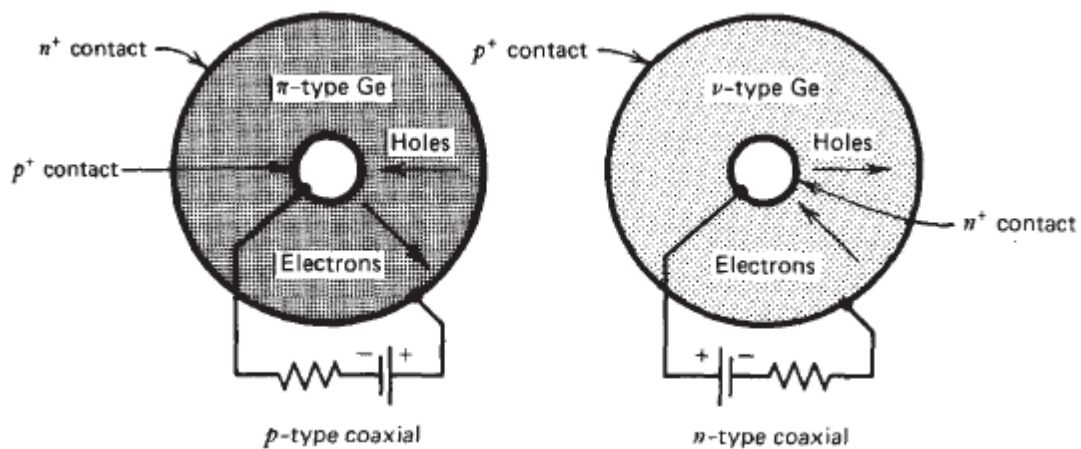
Si(Li) detektor je tvořen monokrystalem p-typu křemíku tloušťky několik mm, který je pod napětím 300-1000 V. Vysoká koncentrace Li atomů na jeho okrajích tvoří oblast n-typu, kdy z jedné strany je kontakt zlatý a z druhé strany je tzv. Schootkyho bariéra (p-i-n dioda). Při vstupu fotonu dojde ke vzniku mraku elektronových párů, jejichž počet je přímo úměrný energii dopadajícího kvanta. Elektrony jsou pak směřovány ven z krystalu díky rozdílu potenciálů na čítací obvod. Na rozdíl od jiných typů detektorů, neexistuje zde žádné vnitřní zesílení, takže výstupní signál je velmi slabý.

Výhodou těchto detektorů je možnost připojení na vícekanálový analyzátor, vysoká účinnost ve sběru pulsů a velké úhly při sběru dat. Nevýhodou je dlouhá mrtvá doba.

Si(Li) krystaly pracují spolehlivě v oblasti asi 2-20 keV. V krátkovlnné oblasti však ztrácejí na účinnosti a jsou nahrazovány krystaly Ge(Li). Podmínkou je užití vysoce čistého germania, v opačném případě se radikálně zvyšuje mobilita Li.

Problém chlazení kapalným dusíkem lze odstranit při použití teluridu kadmia, který je schopen pracovat při pokojové teplotě, ale jeho nevýhodou je poměrně vysoký šum.

Germaniové jádro Ge(Li) detektoru



Stopové detektory částic

Jsou látky, v nichž těžká jádra či α záření vyvolávají mikroskopické poruchy v jejich struktuře. Nejčastěji se používá slída, různá skla, či organické polymery. Poruchy vznikají tím, že procházející částice vytvářejí podél své dráhy v pevné látce vysoce ionizované atomy. Tyto ionty se silně odpuzují a vzájemně vytlačují z původních poloh., čímž vzniká mikroskopická oblast s porušenou strukturou, tzv. **radiační stopa** (válcový kanálek o průměru 1 – 10 nm). Lze je zviditelnit chemickým leptáním, protože v místech poruch je ozářená látka náchylnější k chemické korozi. Počet stop je přímo úměrný počtu částic, které dopadly na detektor.

Stopové detektory se používají **v dozimetrii α záření**, zejména **k měření dávek záření způsobených radonem a jeho dceřinými produkty**. Lze je použít i **k dozimetrii neutronů**. Pro tento případ se dozimetr překrývá fólií z uranu mírně obohaceného izotopem ^{235}U , který se neutrony štěpí a štěpné fragmenty vyražené z fólie pak vyvolávají poruchy v detektoru. Pokryje-li se detektor vrstvou boru, lze neutrony registrovat prostřednictvím α částic vznikajících reakcí $^{10}\text{B} (n, \alpha) ^7\text{Li}$.

Stopové detektory se používají také **k registraci těžkých iontů v kosmickém záření a k měření dávek, kterým jsou vystaveny posádky kosmických letů**.



3.4. Biologické účinky IZ

Základní pojmy:

Dávka D : $D = dE / dm$ [Gy]

Dávkový příkon \dot{D} : $\dot{D} = D / t$ [Gy / s]

Ekvivalentní dávka H_T : $H_T = w_R D_{TR}$ [Sv]

Druh záření	w_R
fotony a elektrony všech energií	1
neutrony 10 keV	5
neutrony 10 – 100 keV	10
neutrony 0,1 – 2 MeV	20
neutrony 2 – 20 MeV	10
záření α	20

Efektivní dávka E: $E = \sum w_T H_T$ [Sv]

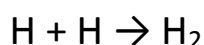
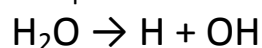
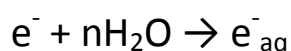
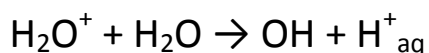
Tkáň, orgán	w_T
gonády	0,20
červená kostní dřev	0,12
tlusté střevo	0,12
plíce	0,12
žaludek	0,12
močový měchýř	0,05
mléčná žláza	0,05
játra	0,05
jícen	0,05
štítná žláza	0,05
kůže	0,01
povrchy kostí	0,01
ostatní orgány a tkáně	0,05

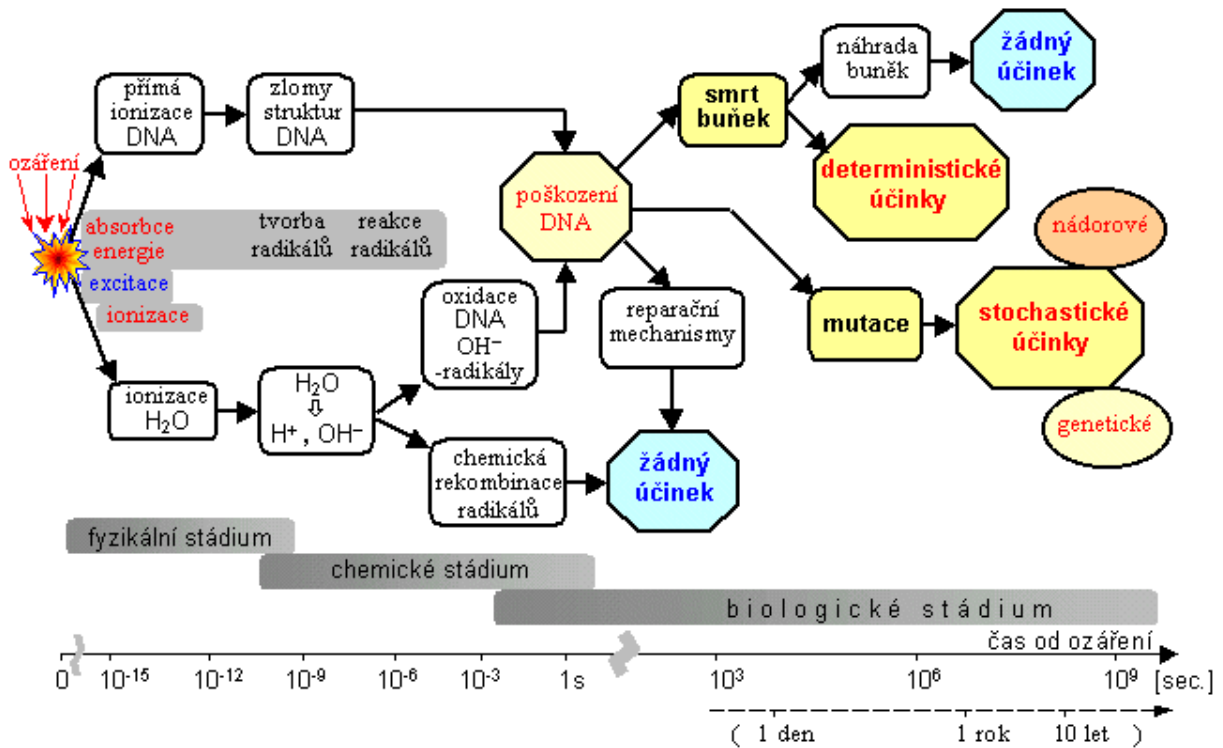
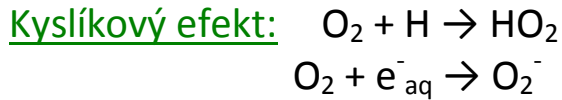
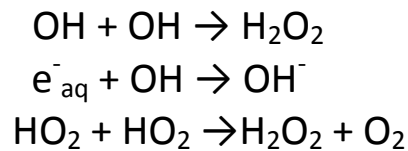
Účinky IZ se projevují ve větší či menší míře u všech živých organismů. Závažnost účinků závisí na dávce a druhu organismů.

Přímé účinky: změna biologicky důležité makromolekuly (nukleových kyselin) přímým zásahem částic IZ či sekundárními částicemi

Nepřímé účinky: souvisí s radiolýzou vody (změny způsobené radikály, peroxidem vodíku a hydratovaným elektronem (vysušené enzymy vykazují menší poškození než roztoky enzymů))

Radiolýza vody:



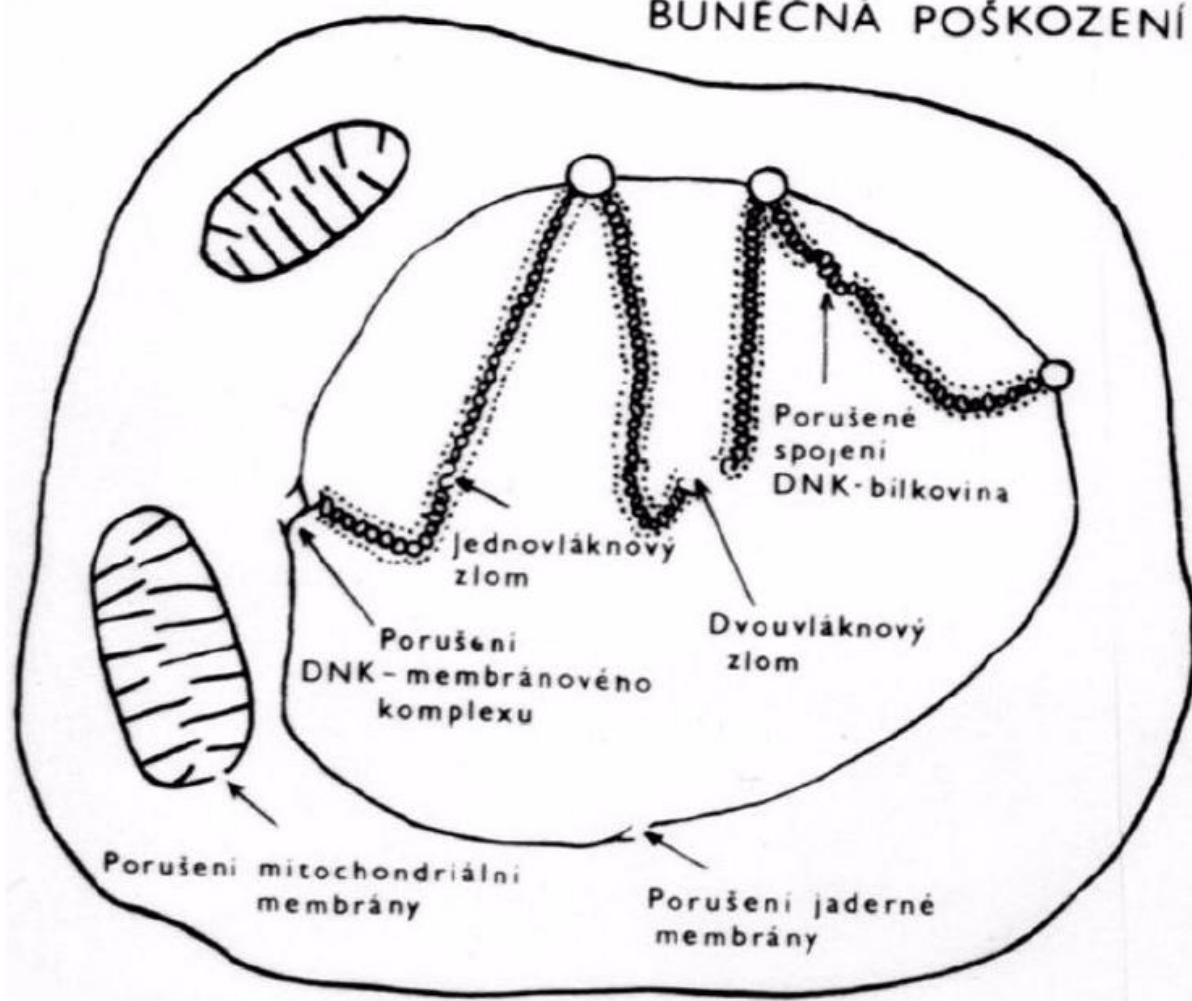


Poškození na buněčné úrovni:

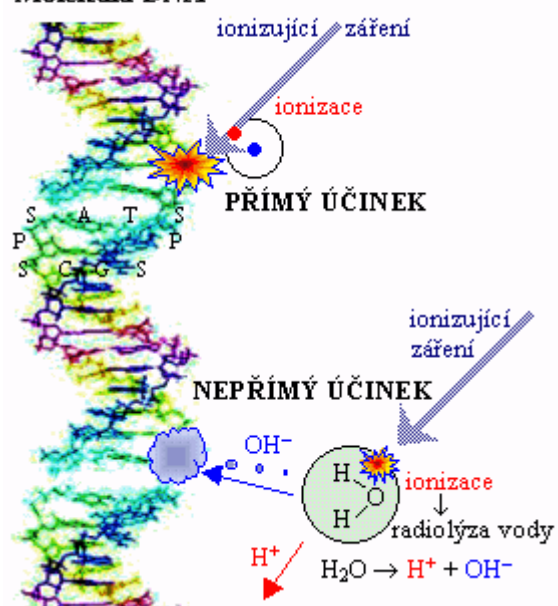
- změny ve struktuře a biosyntéze DNA
- chybná syntéza enzymů
- chybně syntetizované bílkoviny (chovají se cizě a jsou toxické)
- změny v propustnosti buněčných membrán
- časem poruchy dělení, smrt buňky

Větší rozmnožovací schopnosti, malá diferencovanost = výraznější poškození

BUNĚČNÁ POŠKOZENÍ



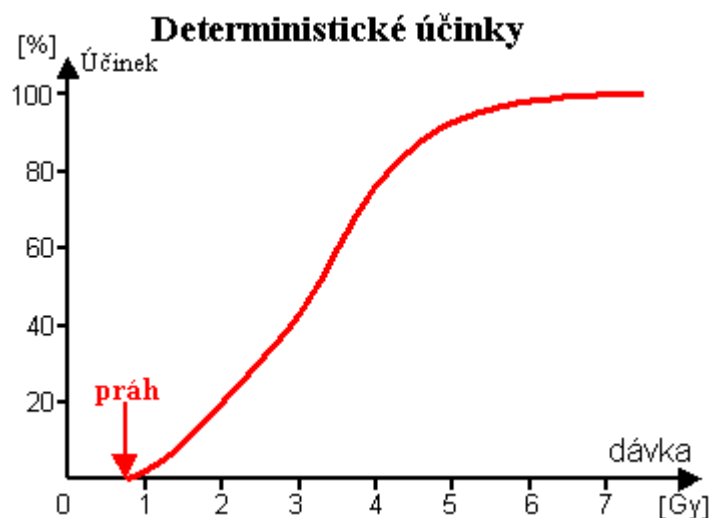
Molekula DNA



Účinky IZ na lidský organismus

Nestochastické:

- projeví se po ozáření IZ během krátké doby
- je postiženo současně mnoho buněk
- nemohou se uplatnit všechny opravné procesy
- prahová dávka vyvolá poškození u 1 – 5% osob
- z rostoucí dávkou **roste závažnost poškození**
- lze rozpoznat, že vznikly působením IZ
- možnost vzniku těchto účinků popisuje ekvivalentní dávka



a) akutní nemoc z ozáření:

- jednorázové ozáření celého těla vysokými dávkami
- poškození krvetvorných orgánů, trávicího ústrojí a CNS
- ekvivalentní dávka 2 Sv
- projevuje se ve 3 fázích:
 - 1) **Nevolnost, skleslost, bolesti hlavy, zvracení, změny krevního obrazu**
 - 2) **Období latence** – přechodné ustoupení příznaků, je tím kratší čím větší byla absorbovaná dávka
 - 3) **Intenzivní rozvinutí počátečních příznaků** + padání vlasů, vnitřní krvácení, silná vnímavost vůči infekcím - zlepšování stavu po 6 – 8 týdnech, uzdravení

- při ozáření ekvivalentní dávkou 6 Sv převládá **hematologická forma choroby** (poškození krevní dřeně, krvetvorby, krvavé průjmy, poruchy funkce střev)
- při ozáření ekvivalentní dávkou 10 Sv a více převládá **nervová forma choroby** (psychická dezorientace, zmatenost, křeče, bezvědomí, smrt během hodin až dnů v důsledku oběhového kolapsu, zástavy dýchání a poruch mozku)
- **pravděpodobnost úmrtí**: 6 Sv 80%, 10 Sv 100%
- zlepšování stavu po 6 – 8 týdnech, uzdravení
- **dlouhodobé následky** (poruchy krvetvorby, poruchy funkce pohlavních orgánů, neplodnost, zvýšená vnímavost k infekcím a nádorovým onemocněním, trvalá slabost a únava)

b) lokální akutní poškození kůže:

- **radiační dermatitida** (zarudnutí až špatně hojitelné vředy)
- prahová dávka 3 Sv (výrazně se zvyšuje frakcionací dávky)
- lokální akutní poškození kůže: radiační dermatitida (stupeň 1 – 3, zarudnutí až špatně hojitelné vředy)
- prahová dávka 3 Sv (výrazně se zvyšuje frakcionací dávky – prahová dávka roste až k 15 Sv)

Obrázek: Radiační dermatitida 1. stupeň



Obrázek: Radiační dermatitida 2. stupeň



c) poškození plodu:

- 1. – 2. týden: „všechno nebo nic“, plod buď přežije bez újmy, nebo dojde k potratu (prahová dávka 250 mSv)
- 3. – 8. týden: organogeneze - vznik malformací (prahová dávka 250 mSv)

- 8. – 15. týden: mikrocefalie (špatně vyvinutý mozek), oční defekty, rozštěp patra, celkové zaostávání (mentální retardace, zakrslost) (prahová dávka 100 mSv)
- v dalších týdnech je plod stejně odolný jako matka

d) poruchy plodnosti:

- přechodná aspermie (porucha v tvorbě spermií)
- prahová dávka 0,1-1 Sv, od 3Sv trvalá aspermie
- u žen dávka do 1,5 Sv bez odezvy, sterilita od cca 3 Sv

e) zákal oční čočky:

- dlouhá doba latence
- prahová dávka cca 1,5 Sv (výrazně závisí na frakcionaci dávky)

<i>Činnost</i>	<i>Počet úmrtí na 1 milion obyvatel za rok</i>
Dobrovolná rizika	
Kouření (20 cigaret denně)	5 000
Pití (jedna láhev vína denně)	75
Jízda na motocyklu	20 000
Automobilové závody	1 200
Horolezectví	140
Řízení automobilu	170
Používání antikoncepčních pilulek	20
Nedobrovolná rizika	
Přejetí automobilem (Velká Británie)	60
Povodně (USA)	2,2
Zemětřesení (Kalifornie)	1,7
Tornáda (střední západ USA)	2,2
Bouře (USA)	0,8
Přírodní katastrofy celkem	1
Zřícení letadla (Velká Británie)	0,02
Výbuch tlakových nádob (USA)	0,05
Únik z jaderných elektráren (na hranici pozemku elektrárny -USA)	0,1
Emise oxidu siřičitého	3
Protržení hrází (Holandsko)	0,1
Chřipka	200

Tabulka 1: Dobrovolná a vnucená rizika

Stochastické:

- poškození malého počtu buněk (i jediné)
- projeví se po ozáření jednou či více podprahovými dávkami
- vznik nádorových onemocnění (latentní doba 10 – 40 let), leukémie (l. d. 5 – 20 let), genetické poškození další generace
- **projeví se ve skupině náhodně**
- **s rostoucí dávkou roste pravděpodobnost vzniku poškození ne jeho závažnost**
- **nelze rozpoznat, že vznikly působením IZ**
- **lze odhalit jen sledováním velkého počtu osob**

- pravděpodobnost vzniku těchto účinků popisuje efektivní dávka
- 6400 osob v Hirošimě ozářeno ekvivalentní dávkou 1,2 Sv, za 25 let 11 případů leukémie navíc nad přirozený výskyt ve stejně velké neozářené skupině

Díky opravným mechanismům je vznik poškození při malých dávkách velmi málo pravděpodobný, přesto dosud převládá tzv. **konzervativní přístup:**

- stochastické účinky – mutace jediné buňky
- závislost na dávce podprahová
- předpokládá sčítání dávek, ignoruje opravné procesy

Moderní přístup:

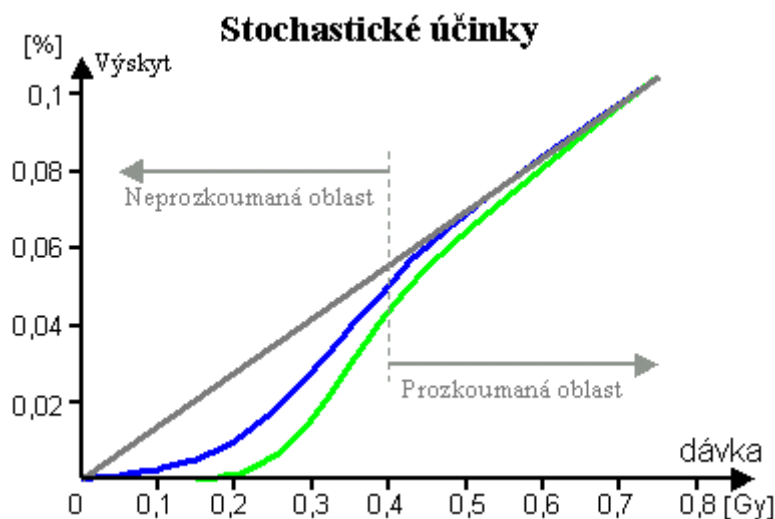
- buňka může poškození DNA opravit
- při ozáření dávkami pod 0,2 Gy nelze prokázat škodlivé účinky (kromě ranného vývoje plodu)
- u lidí ozářených při bombardování atomovými bombami dávkami menšími než 0,2 Gy zjištěna nižší úmrtnost na rakovinu a nebyl pozorován vyšší výskyt leukémie
- britští radiologové s celoživotní dávkou 1-5 Gy, radiologičtí pracovníci 0,5 Gy: žádný výskyt rakoviny navíc
- 28 000 pracovníků britských loděnic ozářeno dávkou 5 mSv: úmrtnost o 24% nižší
- kanadské ženy vyšetřované pomocí RTG na tuberkulózu, dávky 0,15 – 0,25 Gy: nižší úmrtnost na rakovinu
- Coloradská plošina, přirozené dávky záření 3x vyšší než USA průměr: úmrtnost na rakovinu o 15% menší

Ochranný efekt:

- leukocyty ozářeny nejprve dávkou 0,02 Gy a pak 0,15 Gy – poloviční výskyt chromozomových aberací než po samostatné dávce 0,15 Gy

Hormeze – stimulační účinky malých dávek IZ

- vyšší metabolická aktivita bakterií
- urychlení klíčení semen, vycházení, odnožování, růst, dřívější květenství, dozrávání
- prodloužení života myši (celoživotně ozařovány 8h denně 1mGy)
- u lidí: léčivé účinky radioaktivních koupelí (Jáchymov)
- léčí se především: revmatismus, degenerativní změny obratlů, inf. onemocnění nervového systému, poruchy vylučování k. močové, poruchy při vylučování žluči játry apod.



Reklamní pauza –

Na základě žádosti ministerstva zdravotnictví a ministerstva veřejných prací se roku 1927 vytvořila ve spolupráci se Státními lázněmi Jáchymov a Kolínskou Lučební a.s. firma RADIUMCHEMA. Předmětem její činnosti byla distribuce emanovaných radioaktivních vod a zpracování radioaktivních zbytků z jáchymovských lázní na výrobu kompresů a náplastí.



Vážení radioaktivních preparátů v kolínské Radiumchemě:





Jáchymov

Jáchymov

Trade **RADIUMCHEMA** mark

Radio-active compress
Radiumchema

Large size: 6/8 in.

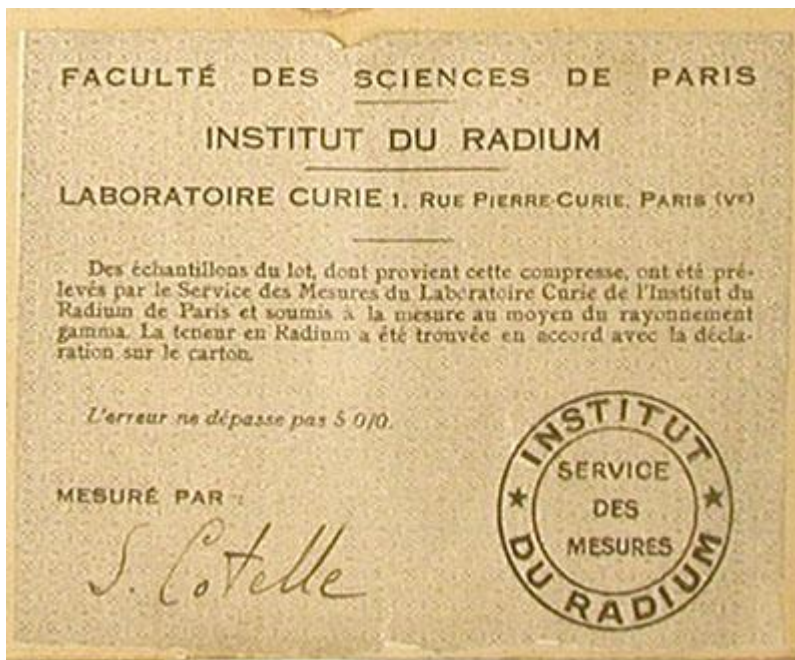
The activity of this compress is constant.

Contents of Radium:
0.1 mg

Directions for use inside.

*The quantity and the content of Radium are guaranteed
only as long as the original seals remain intact.*

Chemical Works Kolín-Jáchymov/Československo/
Radiumchema Department.



<http://www.orau.org/ptp/collection/quackcures/quackcures.htm>

Konec reklamní pauzy

Léčení pomocí IZ:

Teleterapie – dálkové ozařování především ^{60}Co ($5 \cdot 10^{13} - 10^{15}$ Bq)

Kontaktní terapie – β . zářič na povrchu těla (^{32}P či ^{90}Sr)

Brachyterapie – tělesnými dutinami se zářič zavede k nádoru

Endoterapie – vpravení radionuklidového zářiče do postižené tkáně metabolickým procesem (štítná žláza ^{131}I apod.)

Radioimunoterapie – RN je vázán na protilátku, selektivně se váže na spec. antigeny a receptory v nádorových buňkách

Velikost dávek – cca 60 Gy (frakcionace po 2 Gy)

Nevýhoda γ ozařování – ozařuje se i zdravá tkáň (různé směry ozařování)

Současné trendy:

- ozařování urychlenými protony (vysoký lin. přenos energie na konci dráhy, 180 MeV dosah 15cm), v Japonsku $^{12}\text{C}^{6+}$
- ozařování svazkem záporných pionů (nestabilní částice (doba života $2,6 \cdot 10^{-8}\text{s}$), vznikají při ozařování terče protony o $E > 500$ MeV), po zpomalení dojde k zachycení v jádře a uvolnění 140 MeV = roztržení jádra
- bórová terapie $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$

Rentgenová diagnostika		Radioisotopová diagnostika	
Druh vyšetření	Ef. dávka [mSv]	Druh vyšetření	Ef. dávka [mSv]
Snímek plic	0,05	Statická scintigrafie ledvin	1,5
Páteř	1,8	Dynamická scintigrafie ledvin	2,2
Břicho	3 - 8	Dynamická cholescintigrafie	2,3
Urografie	2,1	Scintigrafie skeletu	3,4
Mamografie	0,5	Perfúzní scintigrafie plic	1,2
Angiografie	3 - 9	Scintigrafie štítné žlázy	2,2
CT hlava	1,1	Scintigrafie perfuze myokardu	7,5
CT tělo	9,2		

Přibližná radiační zátěž pro nejčastější metody rentgenové a radioisotopové diagnostiky

Účinky IZ na hmyz:

- 100x odolnější než obratlovci, smrtelné dávky $10^3 - 10^4$ Gy

- nižšími dávkami lze hmyz **sterilizovat**
- radiační hubení hmyzu: potměšník v obilí, při 100 Gy dochází ke sterilizaci samečka ale k přímému usmrcení je třeba 5000 Gy
- ochrana starých dřevěných uměleckých předmětů (výhoda proti chemické sterilizaci)
- hubení hmyzu ve volné přírodě: vypouštění sterilizovaných samečků (nezanáší se do přírody insekticidy)

Účinky IZ na mikroorganismy:

- jsou velmi odolné, smrtelné dávky $10^3 - 10^4$ Gy
- **radiační sterilizace**: obvazový materiál, chirurgické potřeby, injekční stříkačky, jehly, umělé srdeční chlopně, apod)
- **radiační ozáření potravin**: dávka 30 – 70 kGy, potraviny jsou vakuované a zmrazené (masné výrobky) – potlačení vzniku zapáchajících produktů radiolýzy
- jednotlivé země povolují ozařování různých druhů potravin
- nepovoluje se ozařovat čerstvé maso, ovoce a zeleninu

Účinky IZ na rostliny:

- **pozorovaný účinek závisí na objemu chromozomů** (objem jádra připadající na jeden chromozom), na rychlosti růstu rostliny, na frakcionaci dávky záření
- **jednorázové ozáření**: odolnější pomaleji rostoucí rostliny
- **chronické ozařování**: odolnější rychleji rostoucí rostliny
- **jehličnaté dřeviny**: zpomalení růstu při 0,01 – 0,1 Gy/den
- **ostatní rostliny**: zpomalení růstu při 1-100 Gy/den
- **radiační šlechtění**: ozáření semen 100 – 1000 Gy, vznik mutací, část užitečných (odrůda obilí s většími výnosy a odolnější vůči chorobám apod.)

LD50 v Gy pro RTG a γ záření:

Druh	Dávka
Ovce	1.5-2
Člověk	2.5-3.5
Pes	2.5-3
Myši různých linií	5.5-12
Ptáci, hadi	8-20
Členovci	10-1000
Kvasinky	300-500
Rostliny	10-1500
<i>Micrococcus radiodurens</i>	10 ⁵ Gy/den

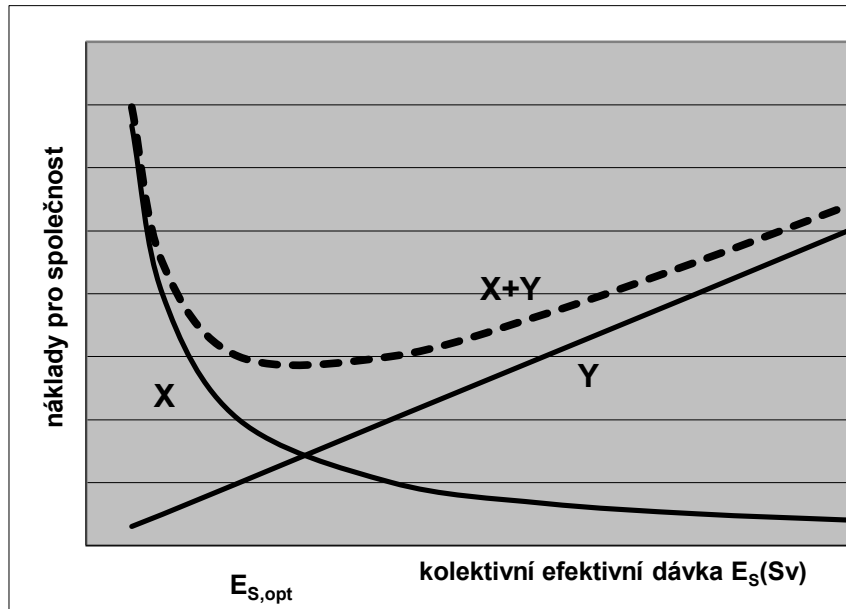
Ostatní účinky IZ:

- odstraňování statické elektřiny (ionizace vzduchu α zářením ^{210}Po či ^{241}Am)
- **ionizační hlásiče kouře** (^{241}Am o malé aktivitě + ionizační detektor záření, kouř mění ionizační proud)
- **radionuklidové baterie** využívají tepelných účinků IZ (absorpce α a β záření v látce), tepelnou energii převádí na elektrickou ($^{238}\text{PuO}_2$ v kardiostimulátorech (g) či družicích (kg), poločas 86 let, použití asi 20 let, nevzniká γ : $^{238}\text{Pu} \rightarrow ^{234}\text{U} + \alpha$)
- **radionuklidové světelné zdroje** jsou založeny na emisi viditelného světla při absorpci IZ v některých látkách (kdysi ^{226}Ra a ZnS), dnes ^3H , ^{85}Kr , ^{147}Pm , signalizační lampy, číselníky hodinek a měřicí přístroje apod.
- **barvení skel**: ozařování dávkami 1 kGy, vytvářejí se poruchy absorbující viditelné světlo, trvanlivost desítky let (měření dávek), zkracuje se za vyšších teplot

3.5. Ochrana před IZ

Základní princip radiační ochrany spočívá v zeslabení dávky záření na hodnotu, při níž je riziko ohrožení života, zdraví a životního prostředí sníženo na společensky přijatelnou míru.

Princip ALARA (as low as reasonably achievable) - smyslem je, aby při provozování zdrojů záření velikosti individuálních dávek, počet ozářených osob a pravděpodobnost ozáření byly tak nízké, jak lze rozumně dosáhnout při respektování hospodářských a společenských hledisek.



X - náklady na ochranu

Y - náklady (škody) ze zdravotní újmy v důsledku ozáření

Ochrana je optimalizována, pokud celkové náklady pro společnost (X+Y) jsou minimální.

„Hodnota zdravotní újmy“ **Y** je v ČR je současně stanoven (vyhl. č. 307/2002 Sb., § 17 odst. 3) pro různé způsoby ozáření:

- 0,5 mil. Kč/Sv pro radiační činnosti, kdy průměrná efektivní dávka u jednotlivce nepřesáhne jednu desetinu příslušných limitů ozáření,
- 1 mil. Kč/Sv pro radiační činnosti, kdy průměrná efektivní dávka u jednotlivce přesáhne jednu desetinu, ale nikoliv tři desetiny příslušných limitů ozáření,

- 2,5 mil. Kč/Sv pro radiační činnosti, kdy průměrná efektivní dávka u jednotlivce přesáhne tři desetiny příslušných limitů ozáření,
- 1 mil. Kč/Sv pro lékařské ozáření,
- 0,5 mil. Kč/Sv pro ozáření z přírodních zdrojů ionizujícího záření, které nejsou záměrně využívány,
- 2,5 mil. Kč/Sv pro havarijní ozáření.

Metody ochrany před IZ:

- a) udržováním patřičné vzdálenosti od zdroje záření $\sim 1 / I^2$ (důležité u γ záření)
- b) odstíněním záření (všude kromě α záření, u β stačí 1-2 cm skla, plexiskla, u γ olovo, železobeton, beton s barytem (BaSO_4 – těživec), pozitrony se stíní jako γ , stejně se stíní γ při reakci pomalých neutronů s jádry atomů, neutrony se zpomalují př. parafínem)
- c) nejkratší dobou pobytu v prostoru kde záření působí

3.6. Ochrana před IZ v ČR – legislativa

Zákon 18/1997 Sb., o mírovém využívání jaderné energie a ionizujícího záření (**atomový zákon**), ve znění pozdějších předpisů, upravuje způsob využívání jaderné energie a ionizujícího záření a podmínky vykonávání činností souvisejících s využíváním jaderné energie a činností vedoucích k ozáření, systém ochrany osob a životního prostředí před nežádoucími účinky ionizujícího záření, povinnosti při přípravě a provádění zásahů vedoucích ke snížení přírodního ozáření a ozáření v důsledku radiačních nehod, zvláštní požadavky pro zajištění občanskoprávní odpovědnosti za škody v případě jaderných škod, podmínky zajištění bezpečného nakládání s radioaktivními odpady, výkon státní správy a dozoru při využívání

jaderné energie, při činnostech vedoucích k ozáření a nad jadernými položkami.

Vyhláška 307/2002 Sb., ve znění pozdějších předpisů, Státního úřadu pro jadernou bezpečnost o radiační ochraně, která je jedním z prováděcích předpisů atomového zákona. Prováděcí předpis je právní předpis určený k upřesnění obsahu právní normy obsažené v zákoně.

Aktuální znění obou dokumentů najdete na stránkách Státního úřadu pro jadernou bezpečnost <http://www.sujb.cz> .

V následujícím textu zmíníme některé důležité skutečnosti uvedené ve vyhlášce 307/2002 Sb., ve znění pozdějších předpisů.

§ 1 Předmět úpravy

(1) Tato vyhláška v souladu s právem Evropských společenství upravuje

a) podrobnosti ke způsobu a rozsahu zajištění radiační ochrany při práci na pracovištích, kde se vykonávají radiační činnosti, včetně podrobností pro vymezování, označování a oznamování nebo schvalování sledovaných nebo kontrolovaných pásem na těchto pracovištích,

d) zprošťovací úrovně, uvolňovací úrovně, limity ozáření, optimalizační meze, mezní hodnoty obsahu přírodních radionuklidů ve stavebních materiálech a vodách a nejvyšší přípustné úrovně radioaktivní kontaminace potravin,

e) podrobnosti ke klasifikaci zdrojů ionizujícího záření a kategorizaci radiačních pracovníků a pracovišť, kde se vykonávají radiační činnosti,

g) rozsah a způsob nakládání se zdroji ionizujícího záření, nakládání s radioaktivními odpady a uvádění radionuklidů do životního prostředí, k nimž je třeba povolení, a upravuje podrobnosti pro zajištění radiační ochrany při těchto radiačních činnostech,

j) vymezuje veličiny, parametry a skutečnosti důležité z hlediska radiační ochrany, stanoví rozsah jejich sledování, měření, hodnocení, ověřování, zaznamenávání, evidence a způsob předávání údajů Státnímu úřadu pro jadernou bezpečnost (dále jen "Úřad").

§ 2 Základní pojmy

Pro účely této vyhlášky se rozumí

- c) **běžným provozem** – provoz zdroje ionizujícího záření za podmínek stanovených v povolení k jeho provozu nebo k nakládání s ním a ve schválené dokumentaci,
- d) **generátorem záření** – zařízení nebo přístroj vysílající ionizující záření, jehož součásti pracují při rozdílu potenciálu vyšším než 5 kV, zejména rentgenová zařízení a urychlovače částic,
- h) **kosmickým zářením** – ionizující záření kosmického původu,
- i) **lékařským dohledem** – sledování zdravotní způsobilosti a vývoje zdravotního stavu u pracovníků kategorie A z hledisek případných vlivů ionizujícího záření na jejich zdraví
- j) **monitorováním** – cílené měření veličin charakterizujících ozáření, pole záření nebo radionuklidy a hodnocení výsledků těchto měření pro účely usměrňování ozáření,
- m) **osobními dávkami** – souhrnné označení pro veličiny charakterizující míru zevního i vnitřního ozáření jednotlivé osoby, zejména efektivní dávku, úvazek efektivní dávky a ekvivalentní dávky v jednotlivých orgánech nebo tkáních; osobní dávky se měří osobními dozimetry,
- n) **otevřeným radionuklidovým zářičem** – radionuklidový zářič, který není uzavřeným radionuklidovým zářičem,
- o) **pracovištěm s otevřenými zářiči** – pracoviště, kde je nakládáno s otevřenými radionuklidovými zářiči,
- p) **pracovním místem** – část pracoviště jednoznačně charakterizovaná svými ochrannými (izolačními, ventilačními a stínicími) vlastnostmi, vymezená prostorově nebo technologicky (pracovní stůl, aplikační nebo vyšetřovací box, digestoř, hermetizovaná podtlaková skříň ap.), kde mohou být prováděny

samostatné práce se zdroji ionizujícího záření; v jedné místnosti může být více pracovních míst, pokud každé tvoří z hlediska organizace práce samostatný celek,

s) **přírodním zdrojem ionizujícího záření** – zdroj ionizujícího záření pozemského nebo kosmického původu,

t) **radioaktivní kontaminací** – znečištění jakéhokoli materiálu či jeho povrchu, prostředí nebo osoby radioaktivní látkou; pokud jde o lidské tělo, zahrnuje jak zevní kontaminaci kůže, tak vnitřní kontaminaci bez ohledu na cestu příjmu,

x) **radionuklidem** – druh atomů, které mají stejný počet protonů, stejný počet neutronů, stejný energetický stav a které podléhají samovolné změně ve složení nebo stavu atomových jader,

y) **radionuklidovým zářičem** – zdroj ionizujícího záření obsahující radioaktivní látky, kde součet podílů aktivit radionuklidů a zprošťovacích úrovní aktivit (zprošťovací úrovně jsou uvedeny v příloze vyhlášky a pro některé radionuklidy i na konci této kapitoly) pro tyto radionuklidy je větší než 1 a současně součet podílů hmotnostních aktivit radionuklidů a zprošťovacích úrovní hmotnostních aktivit pro tyto radionuklidy je větší než 1,

cc) **umělým zdrojem ionizujícího záření** – zdroj ionizujícího záření jiný než přírodní zdroj ionizujícího záření,

dd) **uzavřeným radionuklidovým zářičem** – radionuklidový zářič, jehož úprava, například zapouzdrněním nebo ochranným překryvem, zabezpečuje zkouškami ověřenou těsnost a vylučuje tak, za předvídatelných podmínek použití a opotřebování, únik radionuklidů ze zářiče,

ee) **vnitřním ozářením** – ozářením osoby ionizujícím zářením z radionuklidů vyskytujících se v těle této osoby, zpravidla jako důsledek příjmu radionuklidů požitím nebo vdechnutím,

gg) **výpustí** – kapalná nebo plynná látka vypouštěná do životního prostředí, která obsahuje radionuklidy v množství nepřevyšujícím uvolňovací úrovně nebo vypouštěná do životního prostředí za podmínek uvedených v povolení k uvádění radionuklidů do životního prostředí,

hh) **zevním ozářením** – ozáření osoby ionizujícím zářením ze zdrojů ionizujícího záření, které se nacházejí mimo ni,

ii) **zneškodňováním radioaktivních odpadů** – umístění radioaktivních odpadů na úložiště nebo na určité místo bez úmyslu je znovu použít; zneškodňování zahrnuje rovněž oprávněné uvolnění radioaktivního odpadu přímo do životního prostředí a jeho následný rozptyl,

ll) **nevyužívaným zdrojem** – zdroj ionizujícího záření, který se již k činnosti, pro niž bylo Úřadem vydáno povolení podle § 9 odst. 1 písm.

i) zákona, nevyužívá a jehož další využití k této činnosti se nepředpokládá.

§ 3 Veličiny radiační ochrany

Pro účely této vyhlášky se veličinami radiační ochrany rozumí

a) **ekvivalentní dávka H_T** , což je součin radiačního váhového faktoru w_R uvedeného v tabulce č. 1 přílohy č. 5 a střední absorbované dávky D_{TR} v orgánu nebo tkáni T pro ionizující záření R, nebo součet takových součinů, jestliže pole ionizujícího záření je složeno z více druhů nebo energií,

b) **efektivní dávka E**, což je součet součinů tkáňových váhových faktorů w_T uvedených v tabulce č. 2 přílohy č. 5 a ekvivalentní dávky H_T v ozářených tkáních nebo orgánech T,

Tabulka č. 1 a č. 2 přílohy č. 5 vyhlášky 307/2002 Sb.

Tabulka č. 1
Radiační váhové faktory

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

Tabulka č. 2.
Tkáňové váhové faktory

Tkáň, orgán	Tkáňový váhový faktor w_T
Gonády	0,20
Červená kostní dřeň	0,12
Tlusté střevo	0,12
Plíce	0,12
Žaludek	0,12

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

Močový měchýř	0,05
Mléčná žláza	0,05
Játra	0,05
Jícen	0,05
Štítná žláza	0,05
Kůže	0,01
Povrchy kostí	0,01
Ostatní orgány a tkáně	0,05

c) **kolektivní efektivní, popř. ekvivalentní dávka S**, což je součet efektivních, popř. ekvivalentních dávek všech jednotlivců v určité skupině,

d) **úvazek efektivní dávky $E(\tau)$, popř. ekvivalentní dávky $H_T(\tau)$** , což je časový integrál příkonu efektivní dávky, popř. ekvivalentní dávky po dobu τ od příjmu radionuklidu; není-li uvedeno jinak, činí tato doba 50 roků pro příjem radionuklidů u dospělých a období do 70 let věku pro příjem radionuklidů u dětí; obdobně je definován také úvazek kolektivní efektivní, popř. ekvivalentní dávky,

e) **dávkový ekvivalent H**, což je součin absorbované dávky v uvažovaném bodě tkáně a jakostního činitele Q uvedeného v tabulce č. 3 přílohy č. 5 vyjadřujícího rozdílnou biologickou účinnost různých druhů záření,

Lineární přenos energie L [keV/ μ m]	Jakostní činitel Q(L)
méně než 10	1
10 až 100	$0,32 \cdot L^{-2,2}$
více než 100	$300 \cdot L^{-0,5}$

f) **osobní dávkový ekvivalent $H_p(d)$** , což je dávkový ekvivalent v daném bodě pod povrchem těla v hloubce tkáně d,

i) **příjem**, což je aktivita radionuklidu přijatá do lidského organismu z prostředí, obvykle požitím nebo vdechnutím,

§ 4 Kritéria pro klasifikaci zdrojů

- (1) Zdroje ionizujícího záření se podle vzestupného ohrožení zdraví a životního prostředí ionizujícím zářením klasifikují jako **nevýznamné, drobné, jednoduché, významné a velmi významné**, a to na základě
- a) příkonu dávkového ekvivalentu,
 - b) technické úpravy a způsobu provedení,
 - c) aktivity a hmotnostní aktivity radionuklidových zářičů, zpravidla ve vztahu ke zprošťovacím úrovním,
 - d) možnosti úniku radionuklidů z radionuklidových zářičů,
 - e) možnosti vzniku radioaktivních odpadů a náročnosti jejich zneškodnění,
 - f) typického způsobu nakládání a související míry možného ozáření,
 - g) potenciálního ohrožení plynoucího z předvídatelných poruch a odchylek od běžného provozu, neoprávněného použití, nebo nesprávného použití,
 - h) rizika vzniku radiační nehody nebo havárie, závažnosti následků takové události a možnosti zásahů.

Tabulka č. 1 přílohy č. 1

Zprošťovací úrovně aktivity a hmotnostní aktivity některých radionuklidů

Pro vybrané radionuklidy, označené značkou **+** v prvním sloupci této tabulky, se hodnoty zprošťovacích úrovní aktivity a hmotnostní aktivity vztahují nejen na tyto radionuklidy samotné, ale reprezentují také tyto radionuklidy v rovnováze s produkty radioaktivní přeměny.

Nuklid	Aktivita [Bq]	Hmotnostní aktivita [kBq/kg]
³ H	10 ⁹	10 ⁶
¹⁴ C	10 ⁷	10 ⁴
²² Na	10 ⁶	10
³² P	10 ⁵	10 ³
³³ P	10 ⁸	10 ⁵
³⁵ S	10 ⁸	10 ⁵
⁴⁰ K	10 ⁶	10 ²

Nuklid	Aktivita [Bq]	Hmotnostní aktivita [kBq/kg]
⁶⁰ Co	10 ⁵	10
⁹⁰ Sr+	10 ⁴	10 ²
¹³⁷ Cs+	10 ⁴	10
²³⁸ U+	10 ⁴	10
²³⁹ Pu	10 ⁴	1

§ 6 Nevýznamné zdroje

Nevýznamným zdrojem ionizujícího záření je

- a) elektrické zařízení emitující ionizující záření, avšak neobsahující komponenty pracující s rozdílem napětí převyšujícím 5 kV,
- b) katodová trubice určená k zobrazování nebo jakékoli jiné elektrické zařízení pracující při rozdílu potenciálů nepřevyšujícím 30 kV, u něhož příkon dávkového ekvivalentu na kterémkoli přístupném místě ve vzdálenosti 0,1 m od povrchu zařízení je menší než $1 \mu\text{Sv/h}$,
- c) radioaktivní látka, u níž součet podílů aktivit radionuklidů a příslušných zprošťovacích úrovní aktivity není větší než 1 nebo součet podílů hmotnostních aktivit radionuklidů a příslušných zprošťovacích úrovní hmotnostní aktivity není větší než 1,
- d) uzavřený radionuklidový zářič, u něhož součet podílů aktivit radionuklidů a příslušných zprošťovacích úrovní aktivity nebo součet podílů hmotnostních aktivit radionuklidů a příslušných zprošťovacích úrovní hmotnostní aktivity není větší než 10,

§ 7 Drobné zdroje

Drobným zdrojem ionizujícího záření je

- a) generátor záření, který není nevýznamným zdrojem, konstruovaný tak, že příkon dávkového ekvivalentu na kterémkoli přístupném místě ve vzdálenosti 0,1 m od povrchu zařízení je menší než $1 \mu\text{Sv/h}$ s výjimkou míst určených za běžných pracovních podmínek k manipulaci a obsluze zařízení výhradně rukama, kde může příkon dávkového ekvivalentu dosahovat až $250 \mu\text{Sv/h}$,
- b) uzavřený radionuklidový zářič, který není nevýznamným zdrojem, u něhož součet podílů aktivit radionuklidů a příslušných zprošťovacích úrovní aktivity nebo součet podílů hmotnostních aktivit radionuklidů a příslušných zprošťovacích úrovní hmotnostní aktivity je menší než 100 v případě dlouhodobých alfa zářičů, včetně alfa-neutronových zdrojů, a menší než 1000 v ostatních případech,

- d) otevřený radionuklidový zářič, který není nevýznamným zdrojem, u něhož součet podílů aktivit nebo hmotnostních aktivit jednotlivých radionuklidů a hodnot aktivit nebo hmotnostních aktivit těchto radionuklidů uvedených v tabulce č. 1 přílohy č. 1 je menší než 10,
- e) ionizační hlásiče požáru, u nichž je součet aktivit zářičů větší než desetinásobek příslušné zprošťovací úrovně aktivity, nacházející se současně v jedné budově a v držbě jedné osoby.

§ 8 Jednoduché zdroje

Jednoduchými zdroji ionizujícího záření jsou všechny zdroje ionizujícího záření, které nejsou nevýznamnými, drobnými, významnými ani velmi významnými zdroji ionizujícího záření.

§ 9 Významné zdroje

Významným zdrojem ionizujícího záření je

- a) generátor záření určený k radioterapii nebo radiodiagnostice v humánní medicíně, kromě kostních densitometrů, kabinových rentgenových zařízení a zubních rentgenových zařízení,
- c) zdroj ionizujícího záření určený k radioterapii protony, neutrony a jinými těžkými částicemi,
- e) radionuklidový ozařovač pro ozařování potravin a surovin nebo jiný stacionární průmyslový ozařovač, u kterých s ohledem na obsah radionuklidů, na dávkový příkon a s ohledem na typický způsob nakládání s nimi, související míru možného ozáření a potenciální riziko plynoucí z předvídatelných poruch a odchylek od běžného provozu bylo toto zařazení potvrzeno v rámci typového schvalování podle § 23 zákona nebo v rámci vydání povolení k nakládání se zdroji ionizujícího záření podle § 9 odst. 1 písm. i) zákona,
- f) mobilní defektoskop s uzavřenými radionuklidovými zářiči.

§ 10 Velmi významné zdroje

Velmi významným zdrojem ionizujícího záření je jaderný reaktor.

§ 11 Kritéria pro kategorizaci pracovišť

(1) Pracoviště, kde se vykonávají radiační činnosti, se kromě pracovišť, kde se používají výhradně nevýznamné nebo typově schválené drobné zdroje ionizujícího záření, kategorizují vzestupně podle ohrožení zdraví a životního prostředí ionizujícím zářením na pracoviště I., II., III. a IV. kategorie na základě

- a) klasifikace zdrojů ionizujícího záření, o nichž se předpokládá, že se s nimi bude na pracovišti nakládat,
- b) očekávaného běžného provozu pracoviště a související míry možného ozáření pracovníků a obyvatelstva,
- c) zaměření radiační činnosti a náročnosti na zajištění radiační ochrany a jakosti při této činnosti,
- d) vybavení a zajištění pracoviště pro bezpečnou práci se zdroji ionizujícího záření, zejména ochrannými pomůckami, izolačními a stínícími zařízeními, provedením ventilace a kanalizace,
- e) možnosti radioaktivní kontaminace pracoviště nebo jeho okolí radionuklidy,
- f) možnosti vzniku radioaktivních odpadů a náročnosti jejich zneškodnění,
- g) potenciálního ohrožení plynoucím z předvídatelných poruch a odchylek od běžného provozu,
- h) rizika vzniku radiační nehody nebo havárie, závažnosti následků takové události a možnosti zásahů.

§ 12 Pracoviště I. kategorie

Pracovištěm I. kategorie je

- a) pracoviště s drobnými typově neschválenými zdroji ionizujícího záření,
- c) pracoviště s veterinárním, zubním nebo kabinovým rentgenovým zařízením,

- e) pracoviště s technickým rentgenovým zařízením, na němž charakter radiační činnosti nevyžaduje vymezení kontrolovaného pásma,
- f) pracoviště s otevřenými radionuklidovými zářiči, pokud vybavení izolačními a ventilačními zařízeními a úroveň provedení kanalizace splňuje příslušné minimální požadavky podle tabulky č. 1 přílohy č. 4 a zařazení do této kategorie potvrdil Úřad v rámci vydání povolení k nakládání se zdroji ionizujícího záření podle § 9 odst. 1 písm. i) zákona.

Tabulka č. 1 přílohy č. 4

Kategorie pracoviště s otevřenými zářiči	Základní požadavky na vybavení pracoviště ventilačními a izolačními zařízeními a na úroveň provedení kanalizace
I.	Jako běžná chemická laboratoř, tj. stěny a strop s omyvatelným a neporézním povrchem, podlaha pokryta odolnou dobře čistitelnou podlahovinou (např. PVC), pracovní povrchy z lehce čistitelného materiálu (např. laminát nebo nerez), celistvé a bezešvé, odpadní jímka z lehce čistitelného materiálu, může být přímo napojena na kanalizaci.
II.	Jako dobře vybavená chemická laboratoř, tj. kromě požadavků na pracoviště kategorie I navíc utěsněné spoje mezi podlahou, stěnami, stropem a pracovními povrchy, digestoř, kanalizace zpravidla napojena na samostatnou záchytnou nádrž.
III.	Jako velmi dobře vybavená chemická laboratoř, tj. kromě požadavků na pracoviště kategorie II navíc vybavení podtlakovými skříněmi a kanalizací napojenou na samostatnou záchytnou nádrž.

§ 13 Pracoviště II. kategorie

Pracovištěm II. kategorie je

- a) pracoviště s jednoduchým zdrojem ionizujícího záření, které není pracovištěm I. kategorie,
- g) pracoviště s otevřenými radionuklidovými zářiči, pokud vybavení izolačními a ventilačními zařízeními a úroveň provedení kanalizace splňuje příslušné minimální požadavky podle tabulky č. 1 přílohy č. 4 a zařazení do této kategorie potvrdil Úřad v rámci vydání povolení k nakládání se zdroji ionizujícího záření podle § 9 odst. 1 písm. i) zákona,

§ 14 Pracoviště III. kategorie

Pracovištěm III. kategorie je

- b) pracoviště se zařízením obsahujícím uzavřený radionuklidový zářič určené k radioterapii, včetně brachyterapie, klasifikovaným jako významný zdroj,
- c) uznaný sklad,
- d) pracoviště s otevřenými radionuklidovými zářiči, pokud vybavení izolačními a ventilačními zařízeními a úroveň provedení kanalizace splňuje příslušné minimální požadavky podle tabulky č. 1 přílohy č. 4 a zařazení do této kategorie potvrdil Úřad v rámci vydání povolení k nakládání se zdroji ionizujícího záření podle § 9 odst. 1 písm. i) zákona,
- e) pracoviště se stacionárním průmyslovým ozařovačem určeným k ozařování potravin a surovin, předmětů běžného užívání nebo jiných materiálů,
- f) pracoviště pro těžbu a zpracování uranové rudy zahrnující těžbu, úpravu, nakládání s koncentrátem, provoz dekontaminačních stanic, shromažďování produktů hornické činnosti na odvalech a v kalových polích.

§ 15 Pracoviště IV. kategorie

Pracovištěm IV. kategorie je

- a) jaderné zařízení ve smyslu § 2 písm. h) bod 1 zákona,
- b) úložiště radioaktivních odpadů ve smyslu § 2 písm. u) zákona,
- c) pracoviště s otevřenými radionuklidovými zářiči, které s ohledem na vysoké aktivity zpracovávané současně na jednom pracovním místě, na typický způsob provozu pracoviště a související míru možného ozáření a potenciální riziko plynoucí z předvídatelných odchylek od běžného provozu, z nehod nebo havárií nelze zařadit do nižší kategorie,
- d) sklad vyhořelého nebo ozářeného jaderného paliva.

§ 16 Kategorizace radiačních pracovníků

(1) Pro účely monitorování a lékařského dohledu se radiační pracovníci podle ohrožení zdraví ionizujícím zářením zařazují do kategorie A nebo B na základě očekávaného ozáření za běžného provozu a při předvídatelných poruchách a odchylkách od běžného provozu, s výjimkou ozáření v důsledku radiační nehody nebo havárie.

(2) Pracovníky kategorie A jsou radiační pracovníci, kteří by mohli obdržet efektivní dávku vyšší než 6 mSv ročně nebo ekvivalentní dávku vyšší než tři desetiny limitu ozáření pro oční čočku, kůži a končetiny stanoveného v § 20 odst. 1 písm. c) až e); ostatní radiační pracovníci jsou pracovníky kategorie B.

§ 19 Obecné limity

(1) Obecné limity jsou

a) pro součet efektivních dávek ze zevního ozáření a úvazků efektivních dávek z vnitřního ozáření hodnota **1 mSv za kalendářní rok** nebo za podmínek stanovených v povolení k provozu pracoviště III. nebo IV. kategorie výjimečně hodnota 5 mSv za dobu 5 za sebou jdoucích kalendářních roků,

b) pro ekvivalentní dávku **v oční čočce** hodnota **15 mSv za kalendářní rok**,

c) pro průměrnou ekvivalentní dávku **v 1 cm² kůže** hodnota **50 mSv za kalendářní rok**.

§ 20 Limity pro radiační pracovníky

(1) Limity pro radiační pracovníky jsou

a) pro součet efektivních dávek ze zevního ozáření a úvazků efektivních dávek z vnitřního ozáření hodnota **100 mSv za 5 za sebou jdoucích kalendářních roků**,

- b) pro součet efektivních dávek ze zevního ozáření a úvazků efektivních dávek z vnitřního ozáření hodnota **50 mSv za kalendářní rok**,
- c) pro ekvivalentní dávku **v oční čočce** hodnota **150 mSv za kalendářní rok**,
- d) pro průměrnou ekvivalentní dávku **v 1 cm² kůže** hodnota **500 mSv za kalendářní rok**,
- e) pro ekvivalentní dávku na ruce od prstů až po předloktí a na nohy od chodidel až po kotníky hodnota 500 mSv za kalendářní rok.

§ 23 Omezování ozáření ve zvláštních případech

(2) Ozáření plodu u těhotných žen pracujících na pracovištích I. až IV. kategorie se neprodleně poté, co žena těhotenství oznámí zaměstnavateli, omezí úpravou podmínek práce tak, aby bylo nepravděpodobné, že součet efektivních dávek ze zevního ozáření a úvazků efektivních dávek z vnitřního ozáření plodu alespoň po zbývající dobu těhotenství překročí 1 mSv.

§ 26 Informování a příprava pracovníků

(1) Osoba, která provozuje pracoviště, kde je vymezeno sledované pásmo, (dále jen "provozovatel sledovaného pásma") a držitel povolení, který provozuje pracoviště, kde je vymezeno kontrolované pásmo, (dále jen "provozovatel kontrolovaného pásma") musí prokazatelně předem informovat radiační pracovníky, kteří mají pracovat v těchto pásmech, a osoby používající v těchto pásmech zdroje ionizujícího záření po dobu jejich specializované přípravy na výkon povolání

a) o charakteru a rozsahu možného ohrožení zdraví, o rizicích spojených s jejich prací a o případné zdravotní újmě s tím spojené,

b) o obecných postupech radiační ochrany a opatřeních, která musí být přijata, zejména o těch, která odpovídají provozním a pracovním podmínkám vztahujícím se jak k dané činnosti obecně, tak i k jednotlivým pracovištím a pracím, na které mohou být přiděleni,

- c) o důležitosti plnit požadavky ochrany zdraví i technické a administrativní požadavky k zajištění radiační ochrany,
- d) a v případě žen také o významu včasného oznámení těhotenství z důvodu rizik ozáření pro nenarozené dítě a radioaktivní kontaminace kojence v případě vnitřní kontaminace radionuklidy.

§ 27 Soustavný dohled nad radiační ochranou

(1) Soustavný dohled nad radiační ochranou podle § 18 odst. 1 písm. i) zákona musí být zajištěn v rozsahu odpovídajícím zdrojům ionizujícího záření, s nimiž se na pracovišti nakládá, způsobu nakládání s nimi, související míře možného ozáření, včetně ozáření plynoucího z předvídatelných poruch a odchylek od běžného provozu a s uvážením rizika vzniku radiační nehody nebo havárie. Soustavný dohled nad radiační ochranou se zajišťuje **osobami s přímou odpovědností za zajištění radiační ochrany a dohlížejícími osobami.**

§ 29 Sledované pásmo

- (1) Sledované pásmo se vymezuje všude tam, kde se očekává, že efektivní dávka by mohla být vyšší než 1 mSv ročně nebo ekvivalentní dávka by mohla být vyšší než jedna desetina limitu ozáření pro oční čočku, kůži a končetiny stanoveného v § 20 odst. 1 písm. c) až e).
- (2) Sledované pásmo se zpravidla vymezuje na všech pracovištích I. až IV. kategorie. Sledované pásmo se nevymezuje, pokud by jeho rozsah nepřesáhl vymezení kontrolovaného pásma.
- (3) Sledované pásmo se vymezuje jako ucelená a jednoznačně určená část pracoviště, zpravidla stavebně oddělená. Na vchodech nebo ohraničení se sledované pásmo označuje upozorněním "Sledované pásmo se zdroji ionizujícího záření" (viz konec této kapitoly), případně i znakem radiačního nebezpečí a údaji o charakteru zdrojů a rizik s nimi spojených.



SLEDOVANÉ PÁSMO SE ZDROJI IZ

§ 30 Kontrolované pásmo

(1) Kontrolované pásmo se vymezuje všude tam, kde by efektivní dávka mohla být vyšší než 6 mSv ročně nebo kde by ekvivalentní dávka mohla být vyšší než tři desetiny limitu ozáření pro oční čočku, kůži a končetiny stanoveného v § 20 odst. 1 písm. c) až e).

(2) Kontrolované pásmo se vymezuje jako ucelená a jednoznačně určená část pracoviště, zpravidla stavebně oddělená, a s takovým zajištěním, aby do ní nemohly vstoupit nepovolané osoby. Na vchodech nebo ohraničení se kontrolované pásmo označuje znakem radiačního nebezpečí a upozorněním "Kontrolované pásmo se zdroji ionizujícího záření, vstup nepovolaným osobám zakázán", případně i údaji o charakteru zdrojů a rizik s nimi spojených.

Výpočet maximální možné zpracovávané aktivity na pracovišti dané kategorie

Koeficienty vybavenosti pracovního místa

Vybavení pracovního místa izolujícími a ventilačními zařízeními	Kategorie pracoviště s otevřenými zářiči		
	I.	II.	III.
Podtlaková hermetizovaná skříň s rukavicemi nebo manipulátory	10	10	1
Částečně hermetizovaná podtlaková skříň	10	1	0,1
Uzavřený eluční, či podobný systém	1	1	0,1
Radiochemická digestoř, skříň s laminárním prouděním	1	1	0,1
Volná plocha anebo pracovní stůl v místnosti se sestupným laminárním prouděním	0,1	0,1	0,01
Běžná chemická digestoř	0,1	0,01	0,001
Skříň bez ventilace (ochranný štít, stan ap.)	0,1	0,01	0,001
Volná plocha, pracovní stůl	0,01	0,001	0,0001

Maximální aktivity na pracovním místě

Kategorie pracoviště s otevřenými zářiči	Maximální aktivita na jednom standardně vybaveném pracovním místě v závislosti na charakteristice materiálů a práci s nimi			
	normální	za mokra	těkavé kapaliny	potenciálně prašné
I.	60 Sv / h _{inh.}	3000 Sv / h _{inh.}	1 Sv / h _{inh.}	3 Sv / h _{inh.}
II.	600 Sv / h _{inh.}	30000 Sv / h _{inh.}	150 Sv / h _{inh.}	600 Sv / h _{inh.}
III.	8000 Sv / h _{inh.}	30000 Sv / h _{inh.}	1600 Sv / h _{inh.}	8000 Sv / h _{inh.}

Konverzní faktory h_{inh.} pro příjem radioaktivních aerosolů (upraveno, dle tabulky č. 4 přílohy č. 3 vyhlášky 307/2002 Sb.)

Nuklid	h _{inh.} [Sv / Bq]	Nuklid	h _{inh.} [Sv / Bq]
²² Na	1,5 x 10 ⁻⁹	⁹⁰ Sr	2,7 x 10 ⁻⁸
³² P	3,2 x 10 ⁻⁹	¹³⁷ Cs	5,5 x 10 ⁻⁹
³³ P	1,4 x 10 ⁻⁹	²³² Th	3,5 x 10 ⁻⁵
³⁵ S	1,3 x 10 ⁻⁹	²³⁸ U	5,5 x 10 ⁻⁷
⁶⁰ Co	2,0 x 10 ⁻⁸	²³⁹ Pu	4,0 x 10 ⁻⁵

Například pro nejvyšší aktivitu roztoku obsahující ¹³⁷Cs na jednom pracovním místě, který zpracováváme na běžném pracovním stole

v laboratoři I. kategorie (koeficient vybavenosti 0,01) platí $0,01 \times 3000 / (5,5 \times 10^{-9}) = 5,5 \times 10^9$ Bq tedy 5,5 GBq.

Příklady maximální aktivity roztoků dalších, na pracovištích Masarykovy univerzity běžných nuklidů, které lze současně zpracovávat na jednotlivých pracovních místech v laboratoři I. kategorie jsou:

Radionuklid	Pracovní místo	Maximální aktivita	Radionuklid	Pracovní místo	Maximální aktivita
^3H	laboratorní stůl	244 MBq	^{32}P	laboratorní stůl	9,38 GBq
	digestoř	2,44 GBq		digestoř	93,8 GBq
^{14}C	laboratorní stůl	17,2 MBq	^{33}P	laboratorní stůl	21,4 GBq
	digestoř	172 MBq		digestoř	214 GBq
^{35}S	laboratorní stůl	23,1 GBq	^{137}Cs	laboratorní stůl	5,5 GBq
	digestoř	231 GBq		digestoř	55 GBq

Rozdělení radionuklidů do tříd podle radiotoxicity a potenciálního ohrožení zevním ozářením

Radionuklidy jsou podle toxicity zařazeny do čtyř tříd, v závislosti na nejvyšším přípustném ročním příjmu inhalací. Rozdělení vybraných radionuklidů do tříd ukazuje tabulka (viz níže).

Pro vybrané radionuklidy, označené značkou + se hodnoty uvolňovacích úrovní vztahují nejen na tyto radionuklidy samotné, ale reprezentují také tyto radionuklidy v rovnováze s jejich produkty radioaktivní přeměny.

Třída	Radiotoxicita	Radionuklidy
1	vysoká	^{22}Na , ^{60}Co , ^{137}Cs +, ^{235}U +, ^{239}Pu , ^{241}Am
2	vyšší střední	^{11}C , ^{90}Sr , ^{232}Th , ^{238}U +
3	nížší střední	^{14}C , ^{32}P , ^{36}Cl , $^{99\text{m}}\text{Tc}$
4	nízká	^3H , ^{33}P , ^{35}S

4. Radioaktivita a IZ v životním prostředí

Ozáření člověka z přírodních a umělých zdrojů ionizujícího záření:

zdroj záření	\dot{H} ($\mu\text{Sv rok}^{-1}$)	podíl (%)
kosmické záření	380	12,5
kosmogenní radionuklidy	12	0,4
přírodní radionuklidy — zevní ozáření ^a	460	15,0
přírodní radionuklidy — vnitřní ozáření ^a	230	7,5
radon a produkty jeho přeměny	1300	43,1
těžební průmysl ^b	24	0,75
jaderná energetika ^c	8	0,2
výroba radionuklidů	0,8	0,02
radioaktivní spotřební produkty	0,4	0,01
lékařské aplikace	660	20,6

a – Mimo radon a produkty jeho přeměny.

b – Radon a produkty jeho přeměny z těžby a spalování fosilních paliv a z těžby a zpracování fosfátových hnojiv.

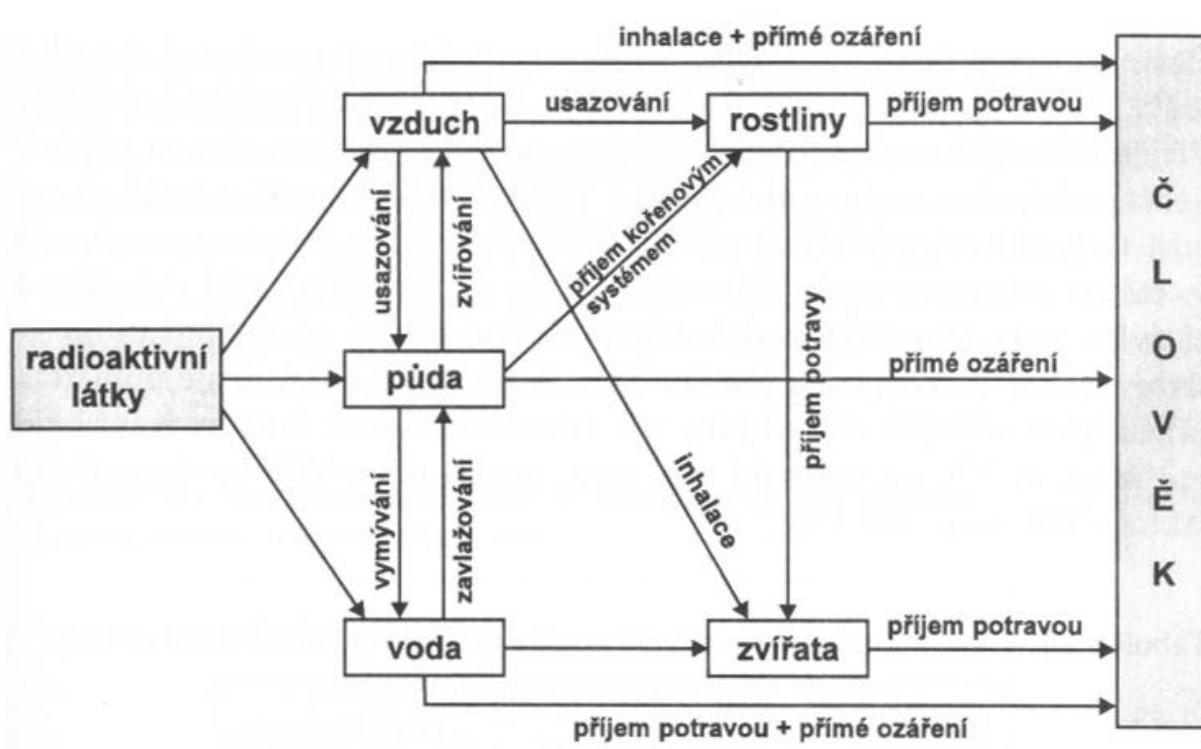
c – Nezahrnuje ozáření v případech havárií jaderných zařízení.

- celkem 3,1 mSv / rok (v ČR)
- náhorní plošiny Iránu až 250 mSv / rok
- aktuální data na <http://www.suro.cz/cz/rms/svz/tabulka>

<i>Materiál</i>	<i>Měrná aktivita radionuklidů</i>				<i>Celkem (zaokrou- hleno)</i>
	<i>α - částice</i>			<i>záření β, γ</i>	
	<i>Radon-226</i>	<i>Thorium-232</i>	<i>Uran-238</i>	<i>Draslík-40</i>	
Vyvěřeliny	48	48	48	800	940
Žula	90	80			170
Pískovec	26	14	24	330	400
Břidlice	40	40	15	800	900
Vápenec	16	5	15	80	120
Fosfáty	1400	50		260	1710
Půda	70	40	24	440	470
	(7- 180)	(4-100)	(8-110)	(0,2-1200)	
Cihly	60	46		600	700
	(2-90)	(3-80)		(10-1000)	
Sádra	300	25		90	415
	(20-800)	(8-60)		(40-160)	
Písek	4	20-200	20-90	30	74-320
Beton	60	30		500	590
	(7-140)	(13-42)		(210-560)	
Papír	0,9-30			100	101-130
	(polonium-210)				
Uhlí	20	20	20	300	360
Popílek	200 (600	200	200	500	1100
	polonium-210)				
Superfosfát	770	20	740		1530
Koncentrovaný superfosfát	800	10	2000		2810
Seno	300			600	900
	(polonium-210)				

Tabulka 2: Přirozená radioaktivita některých látek (počet rozpadů na 1 kg)

Působení radioaktivních nuklidů v životním prostředí na člověka:



Efektivní poločasy a kritické orgány pro některé radioaktivní nuklidy:

Nuklid	T	T_{ef}^a	kritický orgán
^3H	12,35 roků	10–20 dní	celé tělo
^{14}C	5736 roků	35 dní	tuková tkáň
^{90}Sr	28,1 roků	15 roků	kost
^{131}I	8,05 dní	7,5 dní	štítná žláza
^{137}Cs	30 roků	70 dní	celé tělo
^{210}Po	138,4 dní	58 dní	celé tělo
^{226}Ra	1620 roků	45 roků	kost
^{239}Pu	24400 roků	110 roků	kost, plíce

$$T_{ef} = T_{1/2} * T_b / (T_{1/2} + T_b)$$

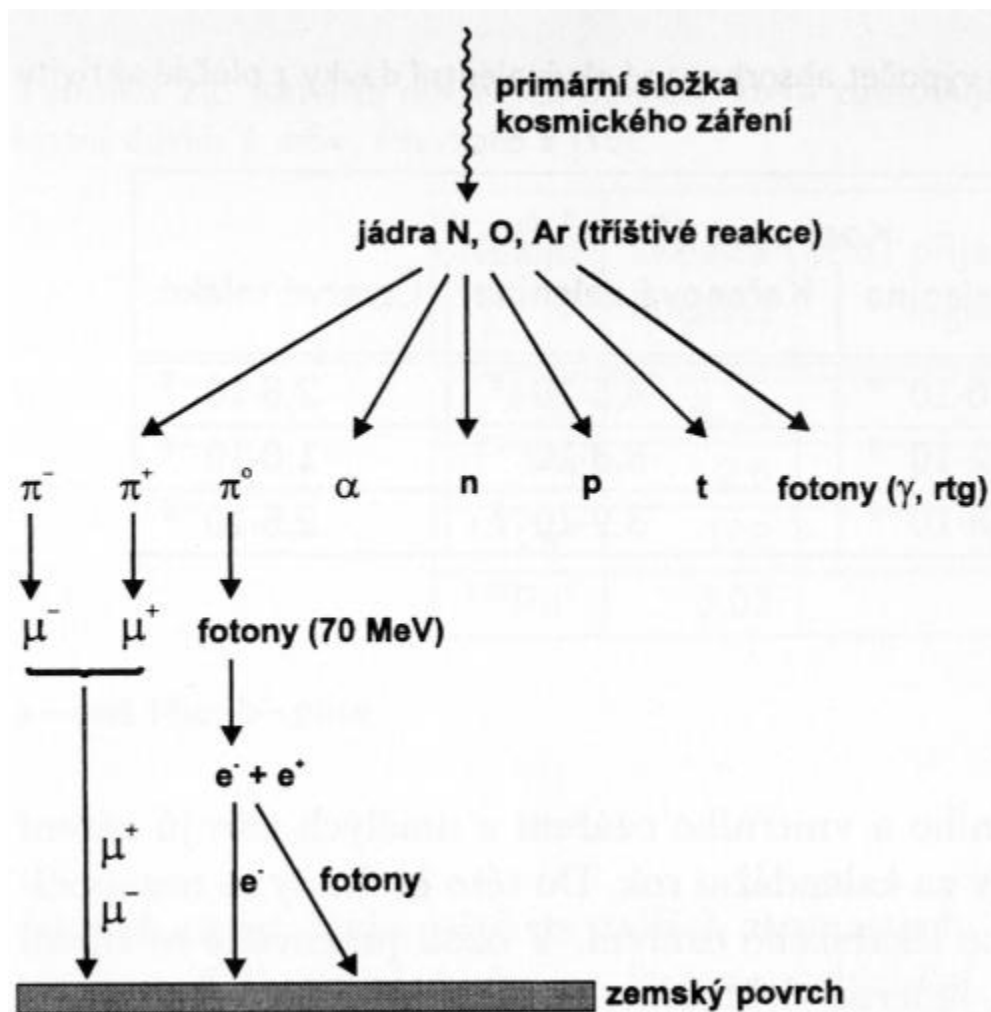
4.1. Kosmické záření a kosmogenní RN

Primární složka kosmického záření – 85% protonů, α 12,5 %, elektrony, těžší jádra od Li po Fe (rozdělují se galaktická a solární), **intenzita** – $10\,000\text{ na cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, energie – $10^9 - 10^{20}\text{ eV}$

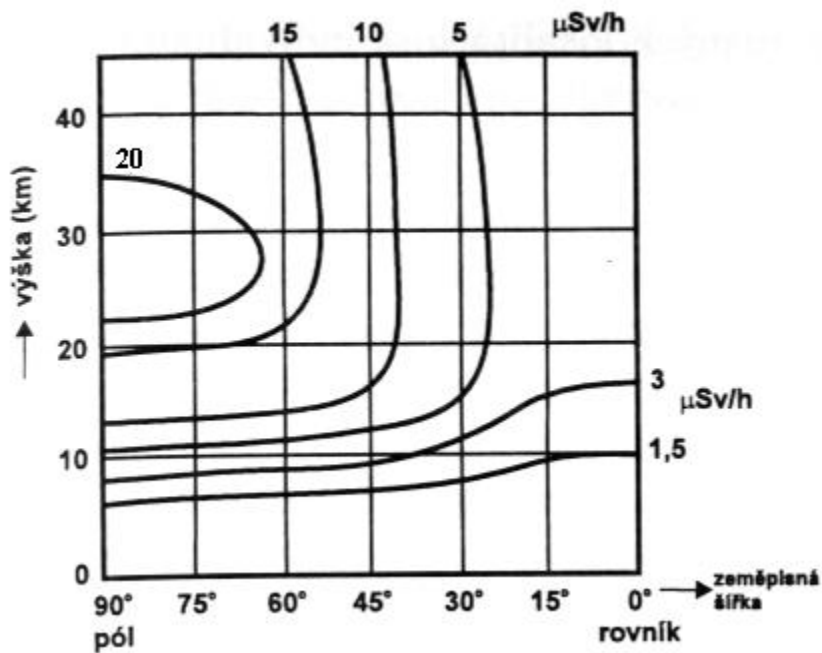
Sekundární složka kosmického záření – protony, neutrony, piony, miony, lehká jádra (^2H , ^3H) a fotony (až 10 MeV), **jaderné reakce** – vznik kosmogenních radionuklidů

Na povrch dopadá:

- **tvrdá složka KZ**, miony až 600MeV, protony do 400 MeV, piony – proniká až 1km pod zem
- **měkká složka KZ**, elektrony, pozitrony, fotony, protony s nízkou energií, lze odstínit cca 10 cm olova



Intenzita KZ závisí na zeměpisné šířce a nadmořské výšce:



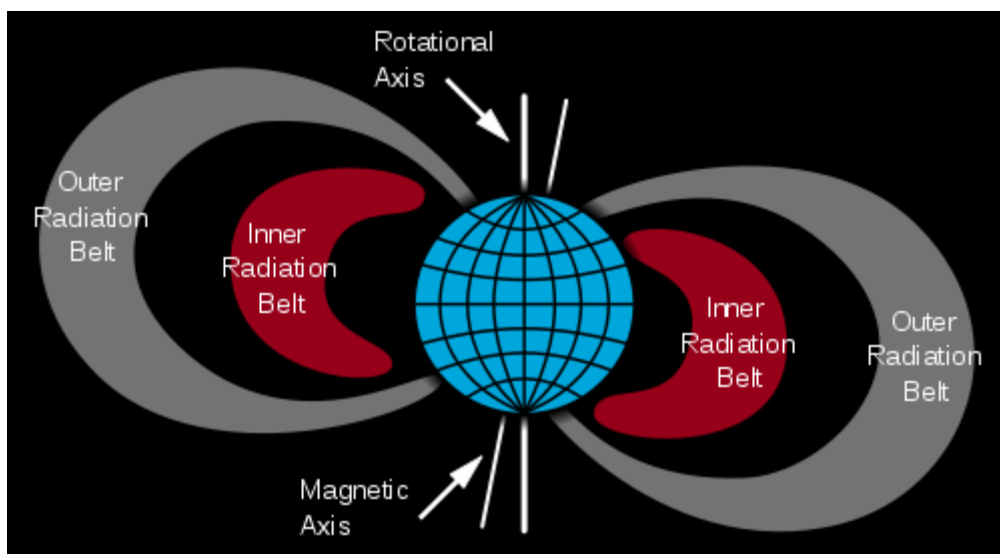
Průměrná roční ekvivalentní dávka z KZ: 380 μSv

Průměrná ekvivalentní dávka za 600 letových hodin (n a γ sekundární složky):

10 km – 4 mSv
12km – 7,5 mSv

Posádky orbitálních stanic (primární KZ, záření z Van Allenových pásů):
100 – 500 $\mu\text{Sv/den}$ (6,5 $\mu\text{Sv/den}$ z přír. zdrojů)

Při meziplanetárních letech je riziko menší (nejsou tam Van Allenovy pásy), nebezpečná těžká jádra $w_R = 10 - 15$ (Apollo 11 podivné záblesky – těžké částice v očích)



Efektivní dávky během cestování letadlem

Let	Doba trvání letu (h)	Efektivní dávka (μSv)
San Francisco to Washington, DC	12	60
Atlanta to Chicago	4	20
Dallas/Ft. to Chicago	4	20
Boston to Los Angeles	10	50
Chicago to Honolulu	18	90
New York to Las Vegas	10	50

Efektivní dávky (přibližné) obdržené astronauty při misích Apollo

Číslo mise	Datum startu	Druh orbity	Trvání mise (h)	Dávka mSv
VII	Aug. 1968	Earth orbital	260	1,20
VIII	Dec. 1968	Circumlunar	147	1,85
IX	Feb. 1969	Earth orbital	241	2,10
X	May 1969	Circumlunar	192	4,70
XI	July 1969	Lunar landing	182	2,00
XII	Nov. 1969	Lunar landing	236	2,00
XIV	Jan. 1971	Lunar landing	286	5,00
XV	July 1971	Lunar landing	286	5,00

Kosmogenní RN:

- vznikají jadernými reakcemi v atmosféře
- nejvýznamnější je $^{14}\text{N}(n, p)^{14}\text{C}$
- v atmosféře se ^{14}C rychle oxiduje na $^{14}\text{CO}_2$, dostává se do rostlin a živočichů ($A = 2,5 \text{ kBq}$ v lidském těle)
- **tritium** vzniká např. reakcí $^{14}\text{N}(n, t)^{12}\text{C}$, oxiduje se na H^3HO , aktivita u pólu 5 Bq/l , na rovníku $0,06 \text{ Bq/l}$, v ČR asi $0,6 \text{ Bq/l}$

4.2. Přírodní RN s dlouhým poločasem rozpadu

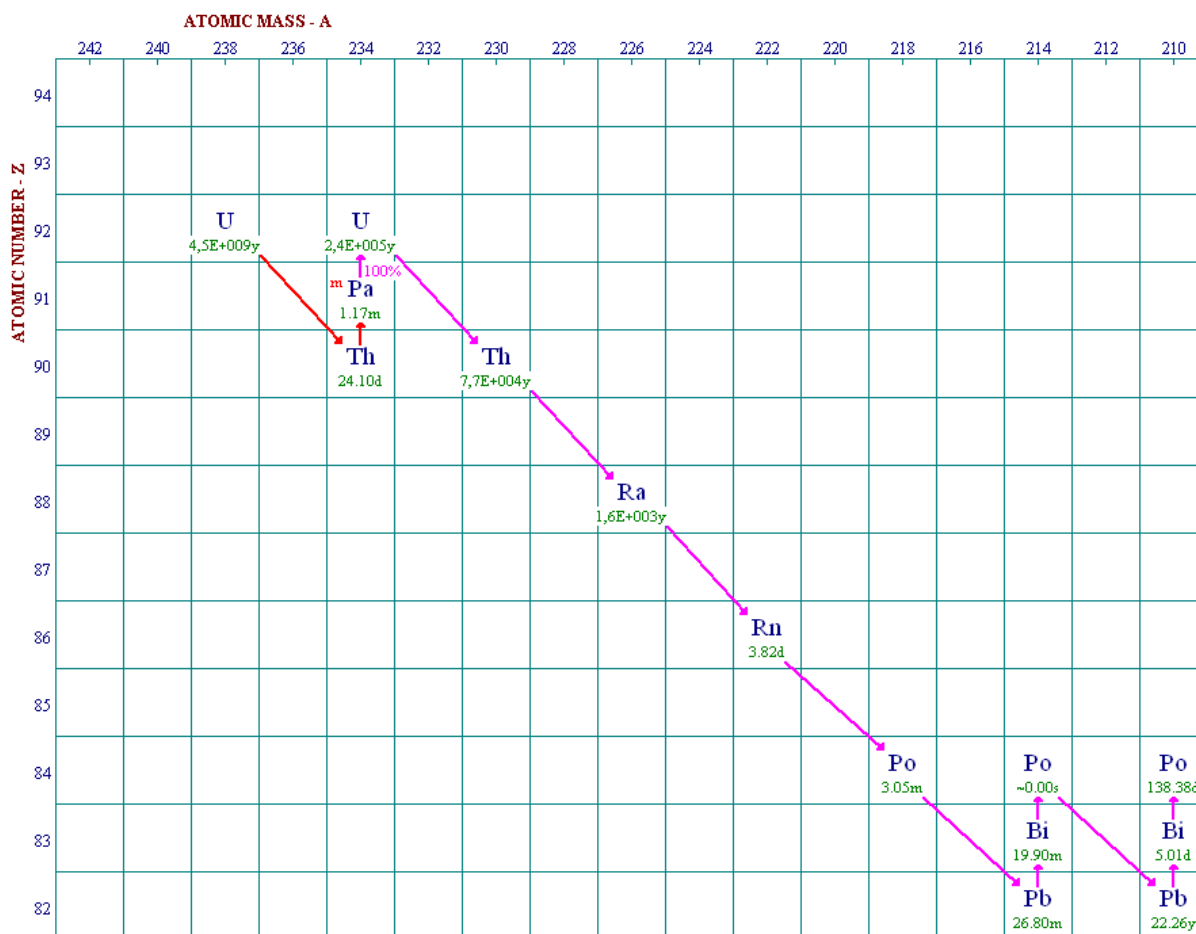
- zemská kůra obsahuje **asi 30 RN**
- významné jsou pouze ^{232}Th a ^{238}U a jejich produkty přeměny a ^{40}K

^{40}K :

- zastoupení v K $0,012 \%$
- průměrná měrná aktivita v horninách 313 Bq/kg
- **aktivita v zemské kůře je větší než všech přírodních radionuklidů dohromady**
- podílí se na zevním i vnitřním ozáření lidského organismu (součást těla $22 - 76 \text{ kBq/70kg}$, horniny, stavební materiály)
- aktivita v potravinách $20 - 240 \text{ Bq/kg}$

U a Th:

- 1 kg zemské kůry průměrně obsahuje 6 mg U (70 Bq/kg) a 12 mg Th (50 Bq/kg)
- Th je v horninách pevně vázán, ale **U se oxiduje na UO_2^{2+} a luhuje se vodou** ($5 \cdot 10^{-7} - 3 \cdot 10^{-5} \text{ g/l}$)
- **důležitý je i ^{226}Ra** (je v rovnováze s ^{238}U), α rozpadem vzniká ^{222}Rn (riziko rakoviny plic), **^{226}Ra se po požití ukládá v kostech** (homolog Ca) a ozařuje krevetvornou tkáň, **Ra se z hornin luhuje vodou** ($3 \cdot 10^{-14} - 2 \cdot 10^{-13} \text{ g/l}$)
- Jáchymovské prameny obsahují velmi mnoho Ra ($0,7 - 18,5 \text{ MBq/m}^3$), používají se k léčebným účelům



Z $230 \mu\text{Sv}/\text{rok}$ (průměrná dávka z vnitřního ozáření) připadá $200 \mu\text{Sv}$ na ^{40}K , $5 \mu\text{Sv}$ na ^{226}Ra , zbytek připadá na další produkty přeměny ^{238}U a ^{232}Th .

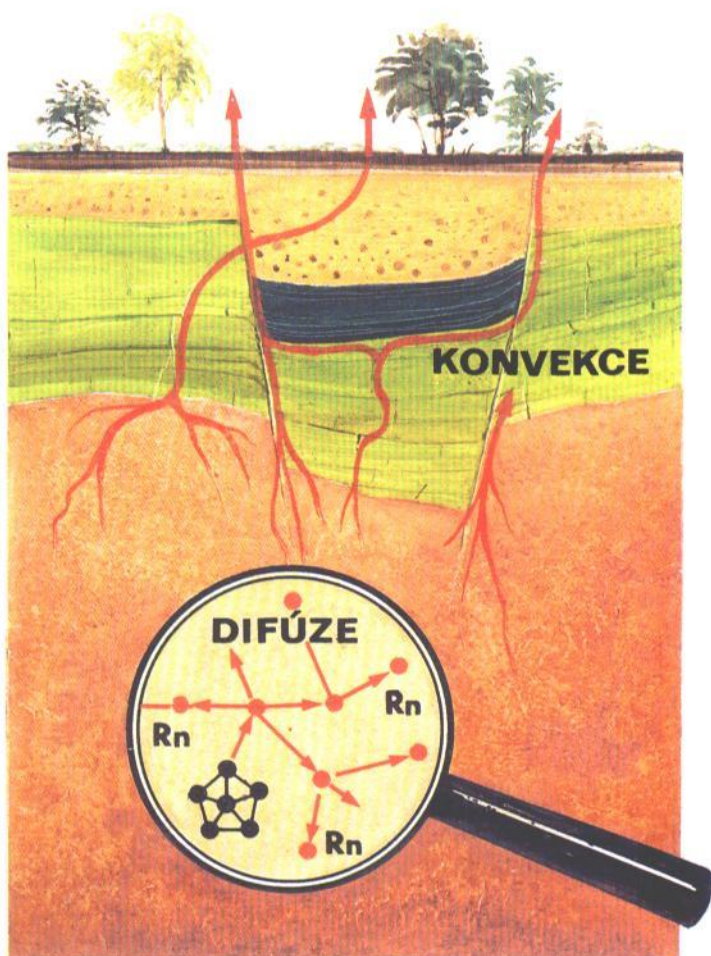
Spalování uhlí:

- průměrná měrná aktivita uhlí $70 \text{ Bq} / \text{kg}$
- v popílku cca $550 \text{ Bq} / \text{kg}$
- pro kritickou skupinu obyvatel $10\text{-}50 \mu\text{Sv} / \text{rok}$ (1-5 % dávky z přírodních RN) (JE – $8 \mu\text{Sv} / \text{rok}$)

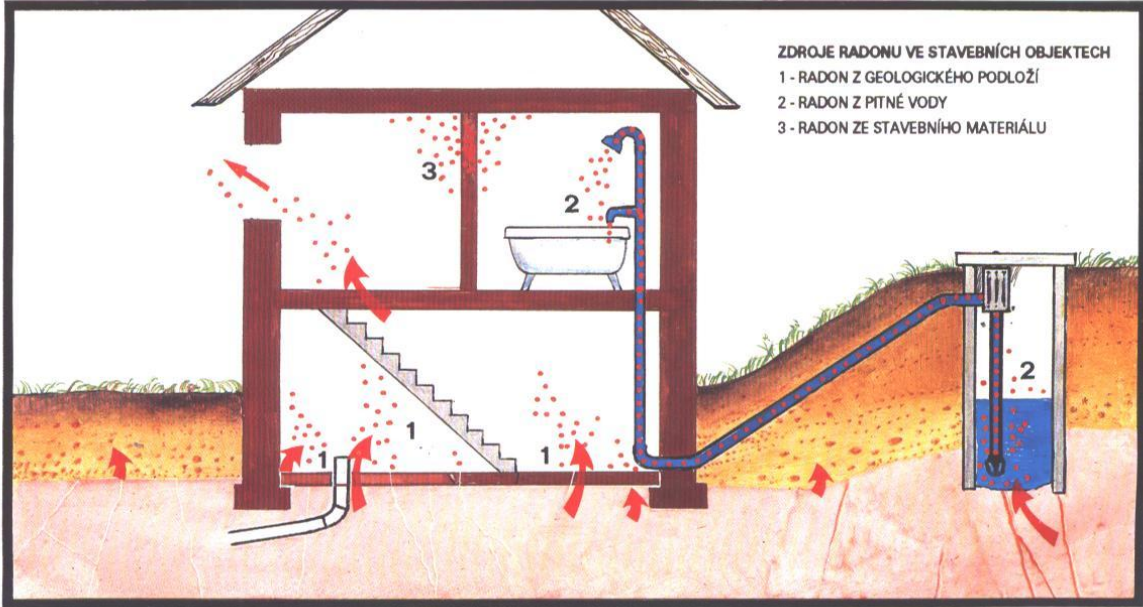
4.3. Radon

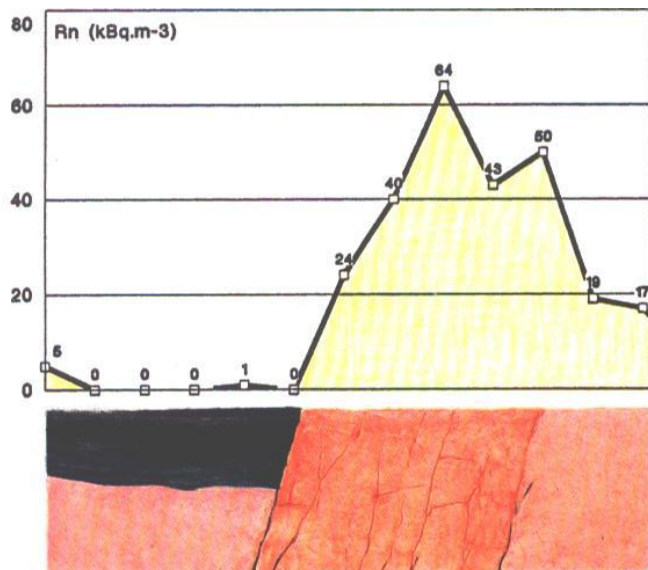
Vzniká přeměnou ^{232}Th , ^{235}U a ^{238}U , významný je jen ^{222}Rn ($T_{1/2} = 3,8$ dne) vznikající přeměnou ^{238}U

Zdrojem radonu je **především půda** (40 Bq / kg). Ten pak dále **difunduje z půdy ven** (do domů, dolů, do atmosféry)

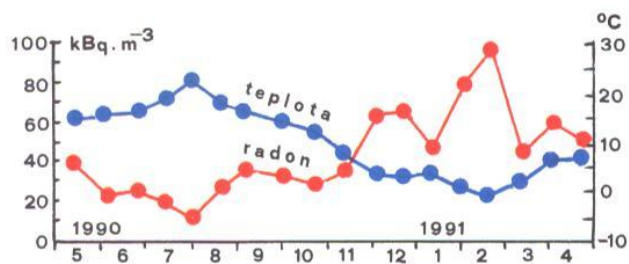


Do domů vniká **nasáváním půdního vzduchu**, především v zimě.

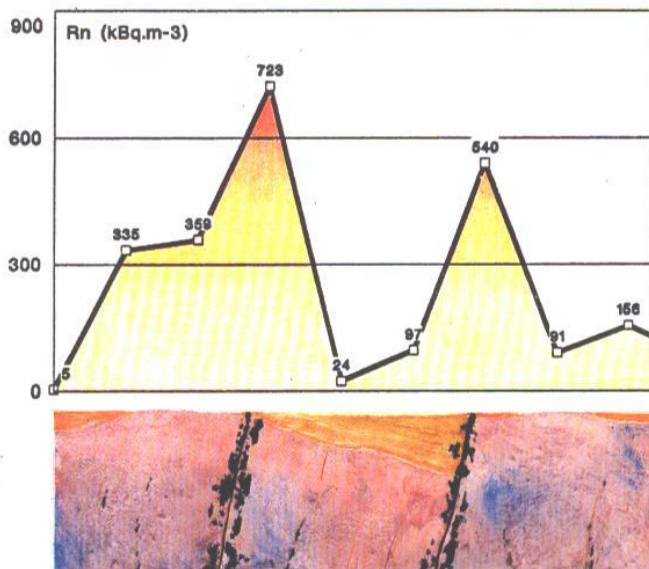




Vliv nepropustného jílovitého pokryvu na snížení hodnoty objemové aktivity radonu. Pod jílovou vrstvou vzniká bariérový efekt, radon migruje podél tektonické poruchy (lokality Radvanov u Milevska).



Sezónní změny objemové aktivity radonu v závislosti na teplotě atmosféry (lokality Mukařov u Říčán). Křivka objemové aktivity radonu je vyznačena červeně, křivka teploty modře.



Uranové zrudnění na tektonické poruše se projevuje zvýšenou hodnotou objemové aktivity radonu (lokality Kovářov u Milevska).

Stavební materiály produkují **minimum radonu**. **Vyjímka**: domy Start postavené z tvárnic ze škváry z uhelných elektráren, uhlí obsahovalo uran (1 - 4 kBq / kg).

Radonový program – měření radonu v 95 000 domech v letech 1991 – 1996

A (Bq/m ³)	200-300	300-600	600-1000	>1000
počet domů	6020	6152	1592	580

V současnosti měření pozemků před stavbou a **stanovení radonového indexu** (dříve radonové riziko). Závisí nejen na množství uranu v podloží ale i na propustnosti půd.

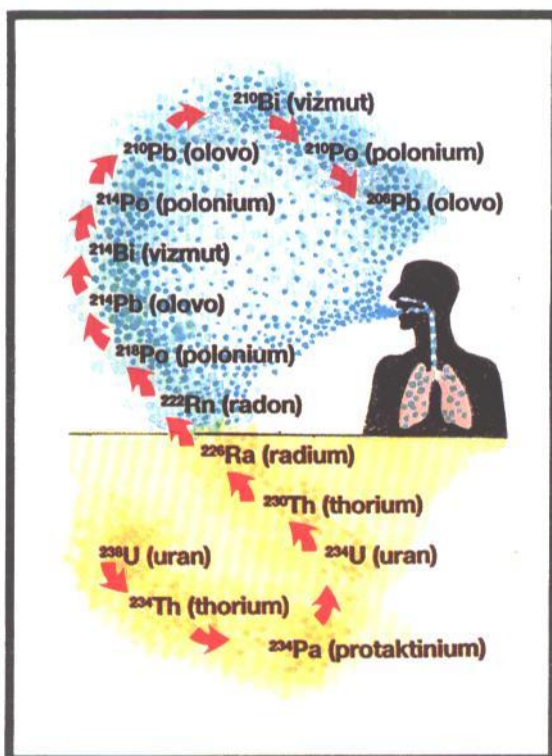
Průměrná hodnota v domech: 40 Bq/m³.

Ve volném prostoru: 10 Bq/m³.

Zdrojem radonu může být i voda, ve které je rozpustný, uvolňuje se až při vyšších teplotách (**koupelny!**).

Méně významné zdroje:

- spalování fosilních paliv
- zemní plyn (většinou ale vymře dřív, než se dostane ke spotřebiteli)



Riziko radonu:

- **riziko nepředstavuje radon** (vydechuje se) **ale produkty přeměny** (^{218}Po , ^{214}Pb , ^{214}Bi a ^{214}Po), jsou to α a β zářiče.
- **adsorbují se na aerosoly** a ty se pak usazují v plicích a **ozařují plicní epitel** (kouření snižuje riziko plynoucí z ozáření plic radonem), ovšem u kuřáků působí vliv kouření a radonu **synergicky**
- u nižších dávek **neodpovídá riziko bezprahovému modelu**, ale uplatňuje se hormeze ovšem v menší míře než u vnějšího ozáření
- rakovina plic způsobená kouřením 80 % případů; radonem 10-15 % případů

Výskyt rakoviny plic způsobený produkty přeměny radonu

Měrná aktivita produktů přeměny [Bq m^{-3}]	Roční ekviv. dávka [mSv]	Celoživotní dávka [mSv]	Počet případů rakoviny plic za rok ve skupině 10^6 osob
15	0,915	55	16,5
50	3,05	183	55
75	4,58	275	82

100	6,10	366	110
200	12,20	732	220
400	24,40	1454	439

Průměrné měrné aktivity radonu v obytných budovách

země	A [Bq m ⁻³]
Německo	40
Finsko	64
Velká Británie	28
- Cornwall	390
- Devon	150
Švédsko	67
Holandsko	26
Švýcarsko	60
- jihovýchodní Alpy	255
- centrální Alpy	174
Česká republika	58
USA	65
Kanada	17
Austrálie	15

Směrné hodnoty pro provedení zásahů (dříve přispíval stát, v současnosti na vlastní náklady):

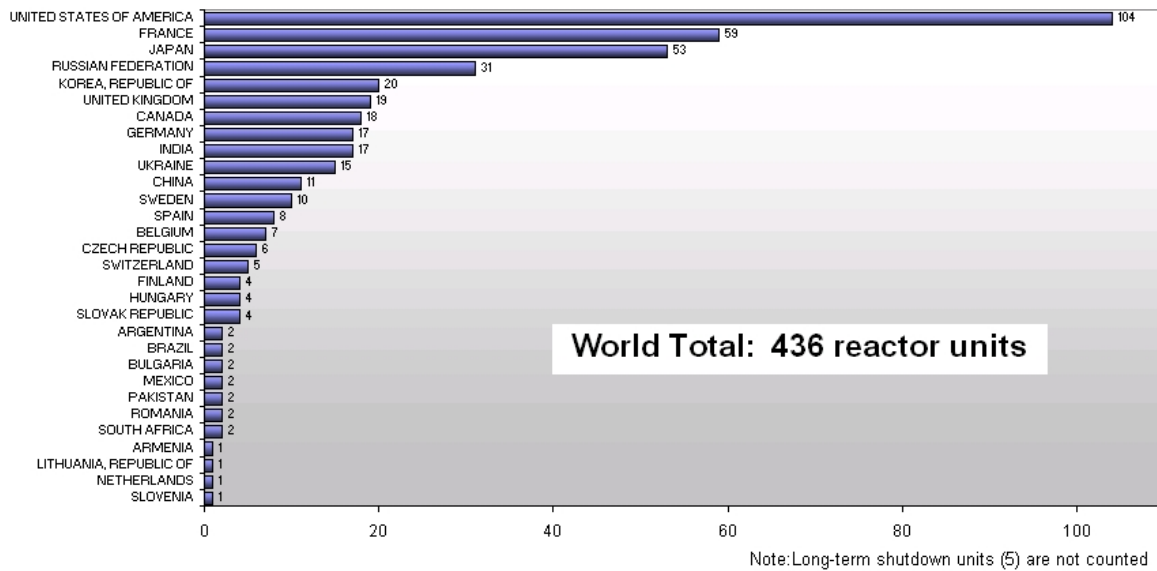
Ekvivalentní objemová aktivita radonu (Bq/m ³)	Přiměřený typ zásahu
200 – 300	jednoduchá opatření: zvýšení přirozeného větrání, případně zavedení nucené ventilace
300 – 600	složitější opatření: středně nákladné stavební úpravy, nucená ventilace
600 – 2000	zásadní stavební úpravy objektu

> 2000	vyloučení pobytu osob
--------	-----------------------

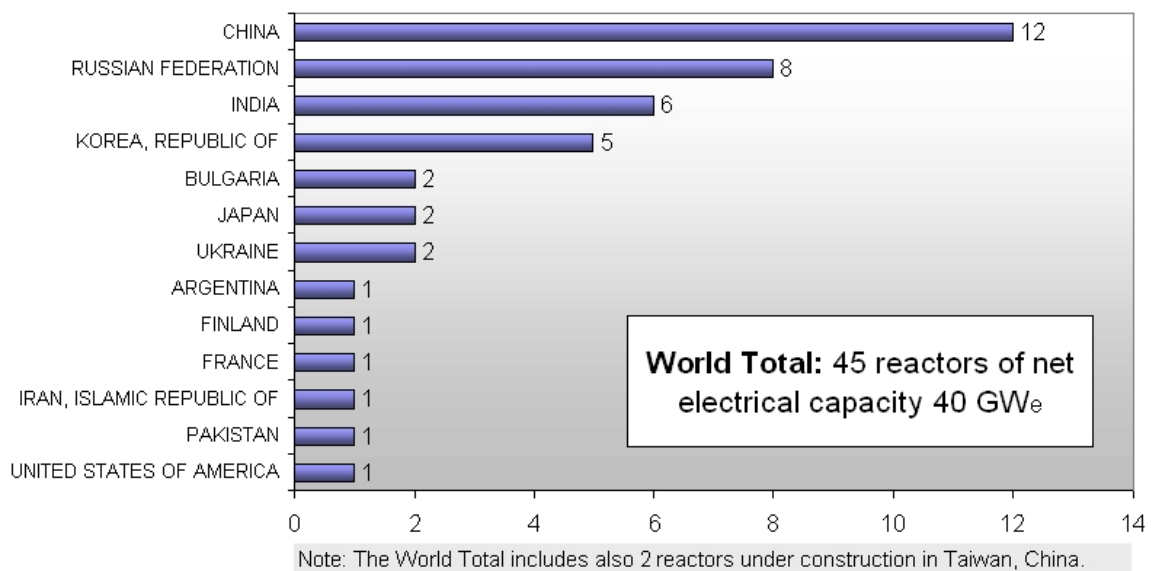
4.4. Jaderné elektrárny a jejich budoucnost

K 1. 1. 2009

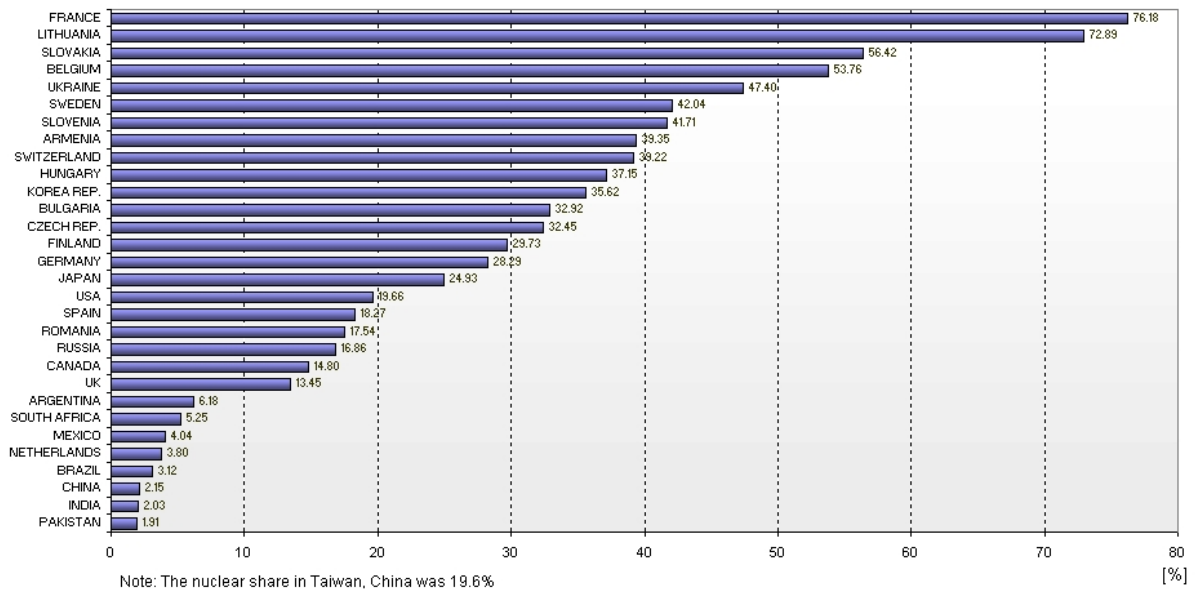
Number of Reactors in Operation Worldwide



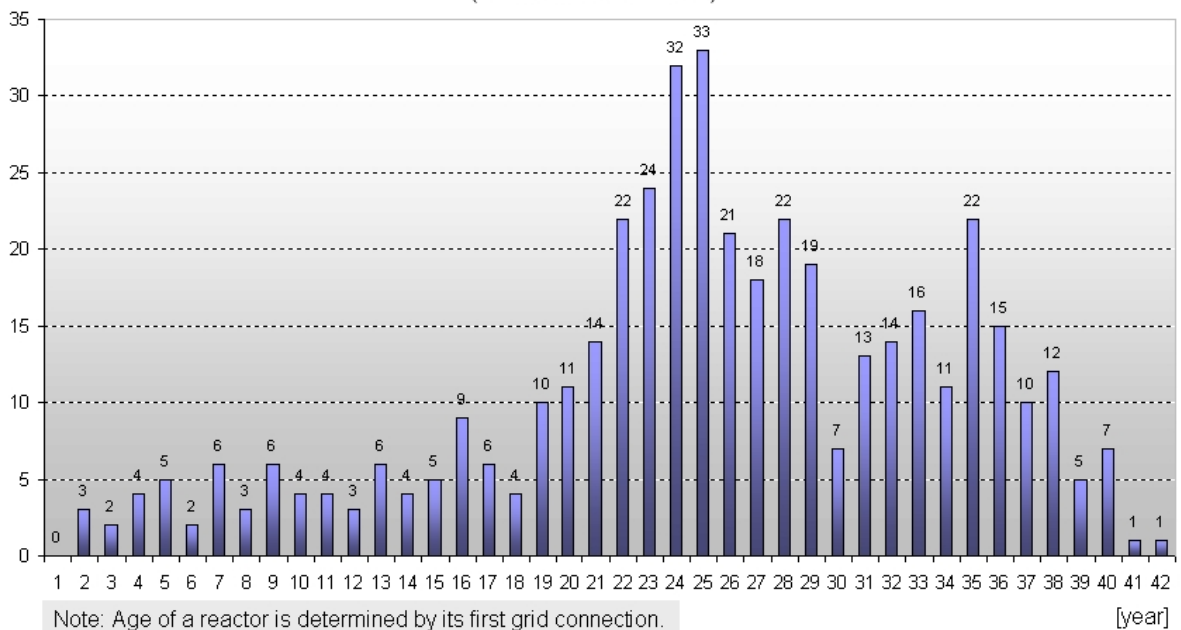
Number of Reactors under Construction Worldwide



Nuclear Share in Electricity Generation in 2008



Number of Operating Reactors by Age (as of March 2009)



Množství RN vypouštěných z JE se uvádí jako **celková aktivita, měrná aktivita (Bq/MW, Bq/m³)**

Radioaktivita převážně v chladící vodě (tlakovodní reaktory):

- **jod, cesium, vzácné plyny** – únik mikrotrhlinami z palivových tyčí
- **tritium** – vzniká ve vodě reakcemi: $^2\text{H}(n, \gamma)^3\text{H}$ a $^{10}\text{B}(n, 2\alpha)^3\text{H}$ (10^{10} – 10^{11} Bq/m³)

- ^{51}Cr , ^{54}Mn , ^{59}Fe , ^{58}Co a ^{60}Co – nejvýznamnější RN pocházející z konstrukčních materiálů reaktoru a vznikající reakcemi (n, γ) tzv. korozivní produkty

Chladicí voda se filtruje a vede přes iontoměniče. Uvolňují se **izotopy vzácných plynů** a přes vymírací nádrž se postupně dostávají do atmosféry (^{85}Kr (10%) $T_{1/2} = 11$ let a ^{133}Xe (90%) $T_{1/2} = 5$ dnů).

Odpadní voda kromě **stop korozivních produktů** obsahuje i **tritium**.

Stejně vypustě produkují i závody na přepracovávání jaderného paliva.

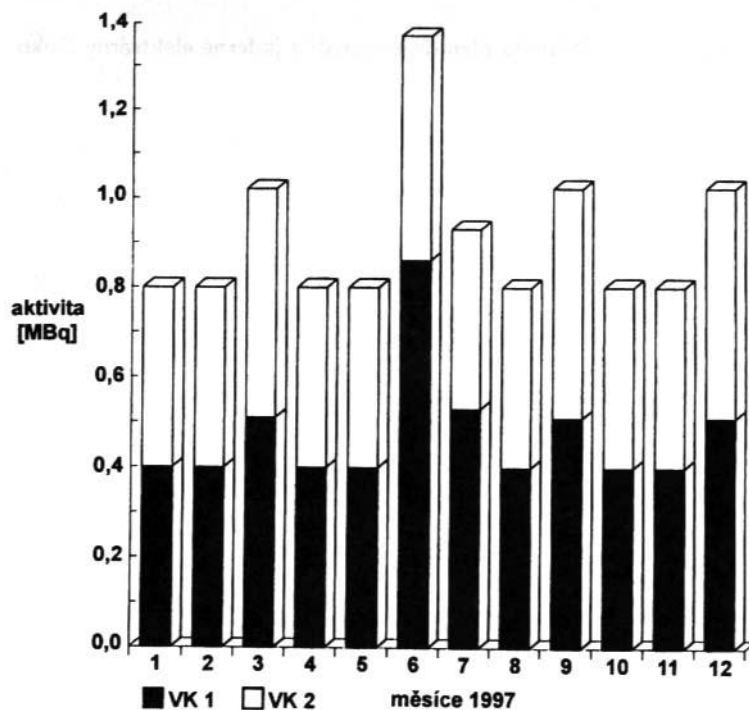
Současný průměrný obsah ^{85}Kr ve vzduchu je 1 – 2 Bq/m³ (β zářič o střední energii β).

Mezinárodní doporučení: $E_{\text{kolektivní}} < 40\text{mSv/MW}$ (pro kritickou skupinu obyvatel, ve skutečnosti cca 1%)

Uhelná elektrárna: na 1GW za rok spotřebuje 3 milióny tun uhlí vyprodukuje 7 miliónů tun CO₂, 120 000 tun SO₂, 20 000 tun oxidů dusíku a 750 000 tun popílku

Jaderná elektrárna: na 1GW za rok spotřebuje 30 tun paliva (snadná doprava), cca 1% množství CO₂ z uhelných elektráren, jednotky až desítky tun ra odpadu.

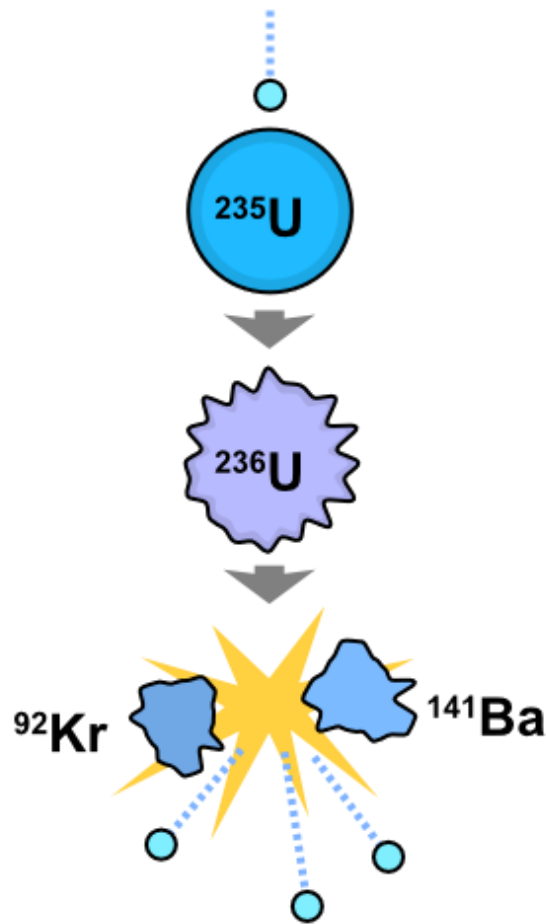
Obsah izotopů jodu (indikátor netěsnosti pokrytí palivových elementů) v plynných vypustech ve větracích komínkách z elektrárny Dukovany:



Limitní a skutečná aktivita plyných výpustí z jaderné elektrárny Dukovany v roce 1997:

Složka	Limit (Bq)	Výpust za rok 1997 (Bq)	Procento ročního limitu
rad. vzácné plyny	$4,1 \cdot 10^{15}$	$4,17 \cdot 10^{11}$	0,010
aerosoly	$1,8 \cdot 10^{11}$	$2,44 \cdot 10^8$	0,136
^{131}I	$4,4 \cdot 10^{11}$	$1,11 \cdot 10^7$	0,0025
$^{89}\text{Sr} + ^{90}\text{Sr}$	$5,7 \cdot 10^8$	$1,36 \cdot 10^5$	0,024
^3H	není stanoven	$3,08 \cdot 10^{11}$	–

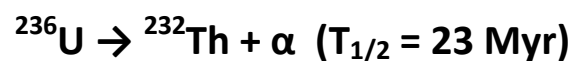
Reakce probíhající v běžných jaderných elektrárnách



Lise Meitner, O. R. Frisch. "Disintegration of Uranium by Neutrons: a New Type of Nuclear Reaction", *Nature*, 1939 Vol. 143, Number 3615, 239–240.

Meitnerová v roce 1944 nedostala NC, místo toho O. Hahn a také E. Fermi, v roce 1997 byl pojmenován 109. prvek jako Meitnerium (Mt) (nejd. poločas má ^{278}Mt asi 30 min).

Neexcitované jádro ^{236}U se rozpadá:

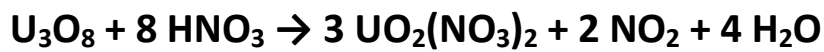


Největší problémy současných jaderných elektráren

1. Obohacování U o ^{235}U z 0,7 % na cca 5 %
2. Malé množství vysoce aktivního odpadu (uhelné elektrárny velké množství nízkoaktivního odpadu)

Ad 1

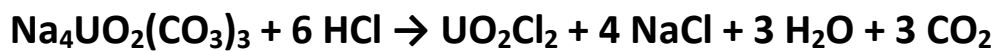
Ruda se louží kyselinou dusičnou:



Dusičnan uranylu se poté převádí na uhličitan uranylo-sodný:



Dále se připraví chlorid uranylu a provádí se čištění na iontoměničích apod.

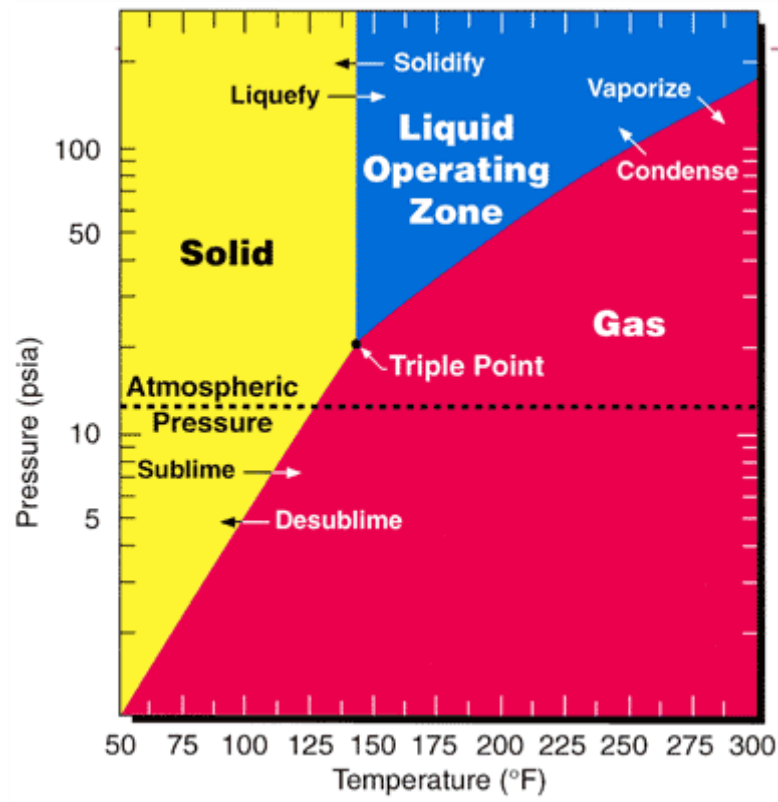
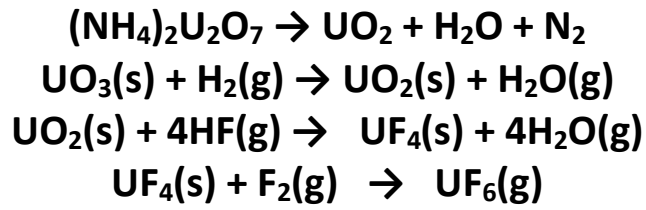


Vyčištěný chlorid uranylu se poté převede na finální prodejný produkt, který je evidován a sledován MAAE.



Vlastní obohacování:

Diuranan amonný se tepelně rozloží na oxid, ze kterého se postupně připraví fluorid uranový. UF_6 vaří při $56,5 \text{ }^\circ\text{C}$, F má jen izotop 19! - neruší při separaci.

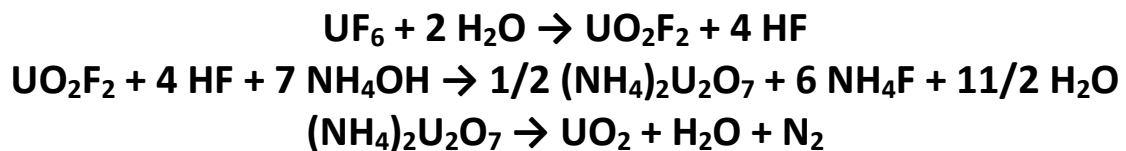


Pomocí difuze byl připraven U a následně Pu pro Trinity - 1. jaderná bomba odpálena v Alamogordu v Novém Mexiku 16. června 1945



The Trinity explosion, 0.016 seconds after detonation. The fireball is about 200 meters wide.

Po separaci izotopů se nakonec přes nerozpustný diuranan amonný připraví oxid uraničitý – palivo do reaktorů.



Ad 2 viz kapitola 3.13

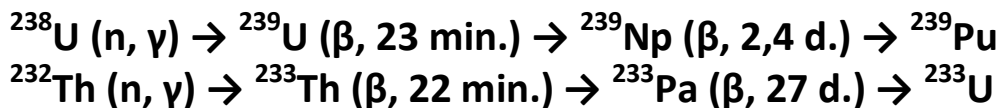
Množivé reaktory a nové druhy jaderného paliva

- vyrobí více štěpitelného paliva, než sám spotřebuje
- uvolní se 50 – 60 x více energie
- spaluje mnohem dostupnější ^{238}U a ^{232}Th

RN	^{232}Th	^{235}U	^{238}U
$T_{1/2}$ [Gyr]	13,9	0,7	4,5

Množství [%]	$1 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-4}$ (0,7 %)	$3 \cdot 10^{-4}$ (99,3 %)
---------------------	-------------------	---------------------------	----------------------------

Při vzniku Země ^{235}U 23 % a ^{238}U 77 %.



Masové použití výhledově za cca 20 - 50 let.

Výhody proti klasickým reaktorům:

- ^{233}U má větší účinný průřez pro reakci (n, f) než ^{235}U a ^{239}Pu
- o 50 % méně radioaktivního odpadu (o nižší aktivitě)
- ^{232}Th 3x větší zastoupení v zemské kůře
- MR má velký význam jako „žrout“ jaderného odpadu

Množivý poměr:

- množství nových štěpitelných atomů / počet rozštěpených atomů
- v současnosti od 0,7 – 1,2 (teoreticky až 1,8)

Typy množivých reaktorů:

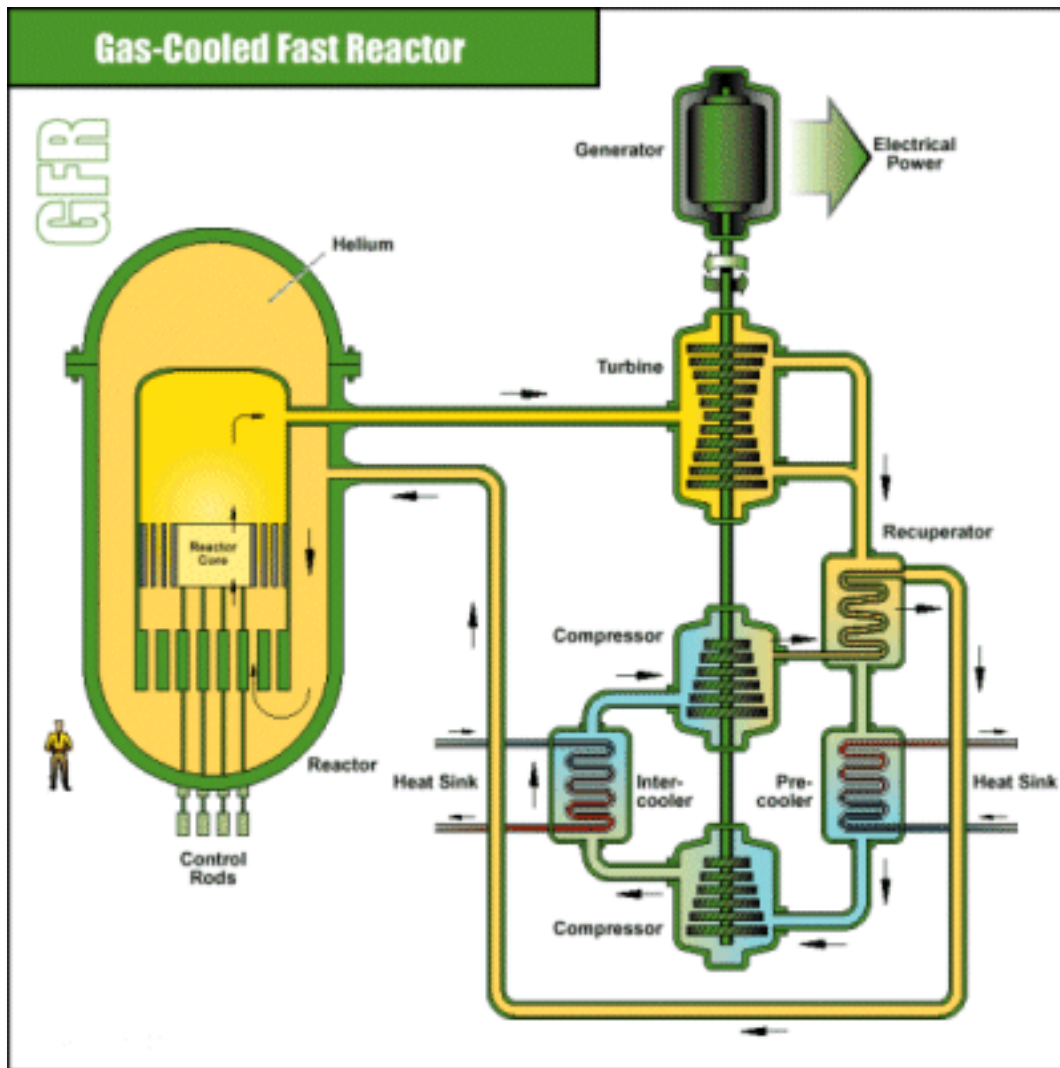
- FBR (fast breeder reactor)
- TBR (thermal breeder reactor)

ad FBR:

- základem je palivo z Pu
- dále se doplňuje jen palivo s přírodního či dokonce ochuzeného U
- případně i Th

Typy FBR:

- GFR (gas-cooled fast reactor)
- SFR (sodium-cooled fast reactor)
- LFR (lead-cooled fast reactor)



Chladivo:

CO₂ či He - neabsorbují n, a tudíž primární okruh není radioaktivní!

Pracovní charakteristika:

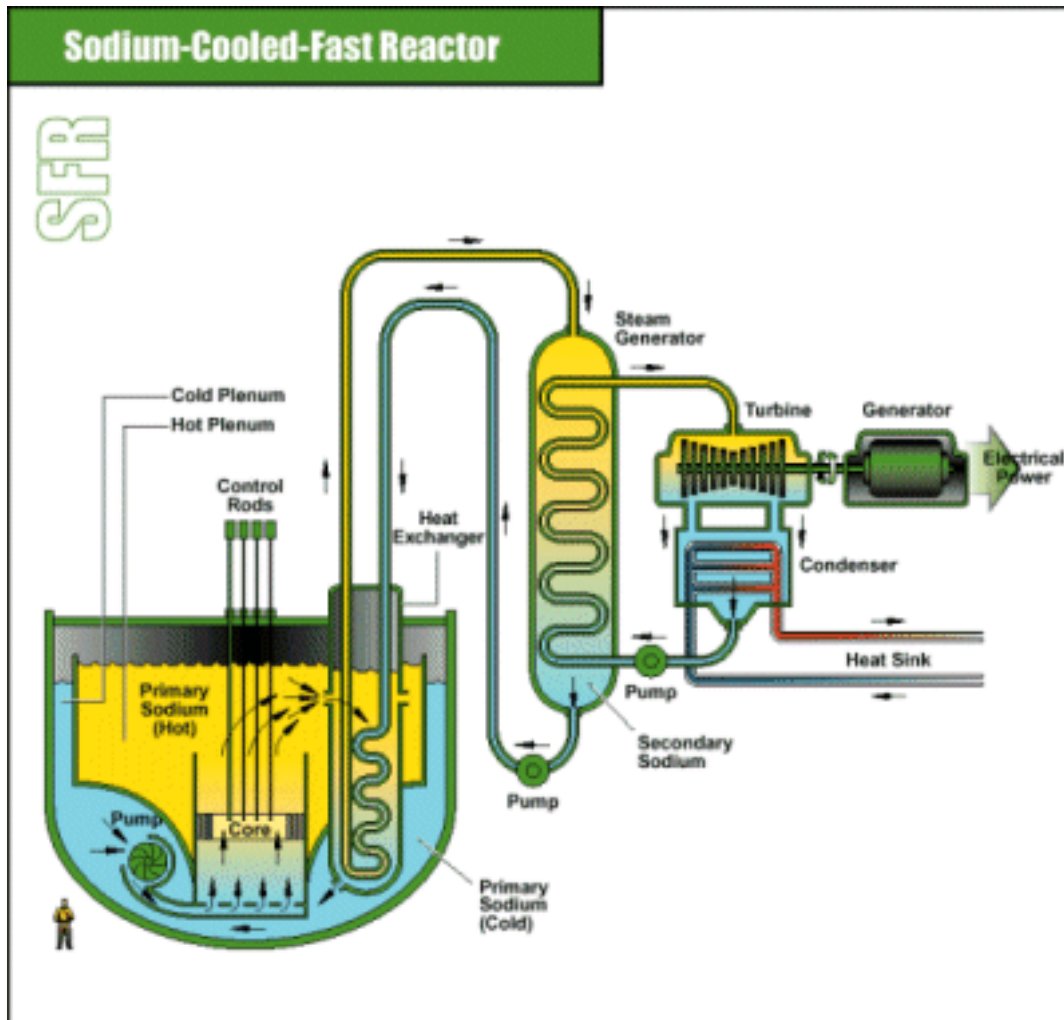
teploty (1600 °C i výše) funguje to na bázi Braytonova cyklu, vhodné k produkci H₂

Nevýhody:

malá tepelná kapacita He

V provozu:

THTR-300 Německo, Peach Bottom a Fort St. Vrain US, HTTR
Japonsko, HTR-10 Čína



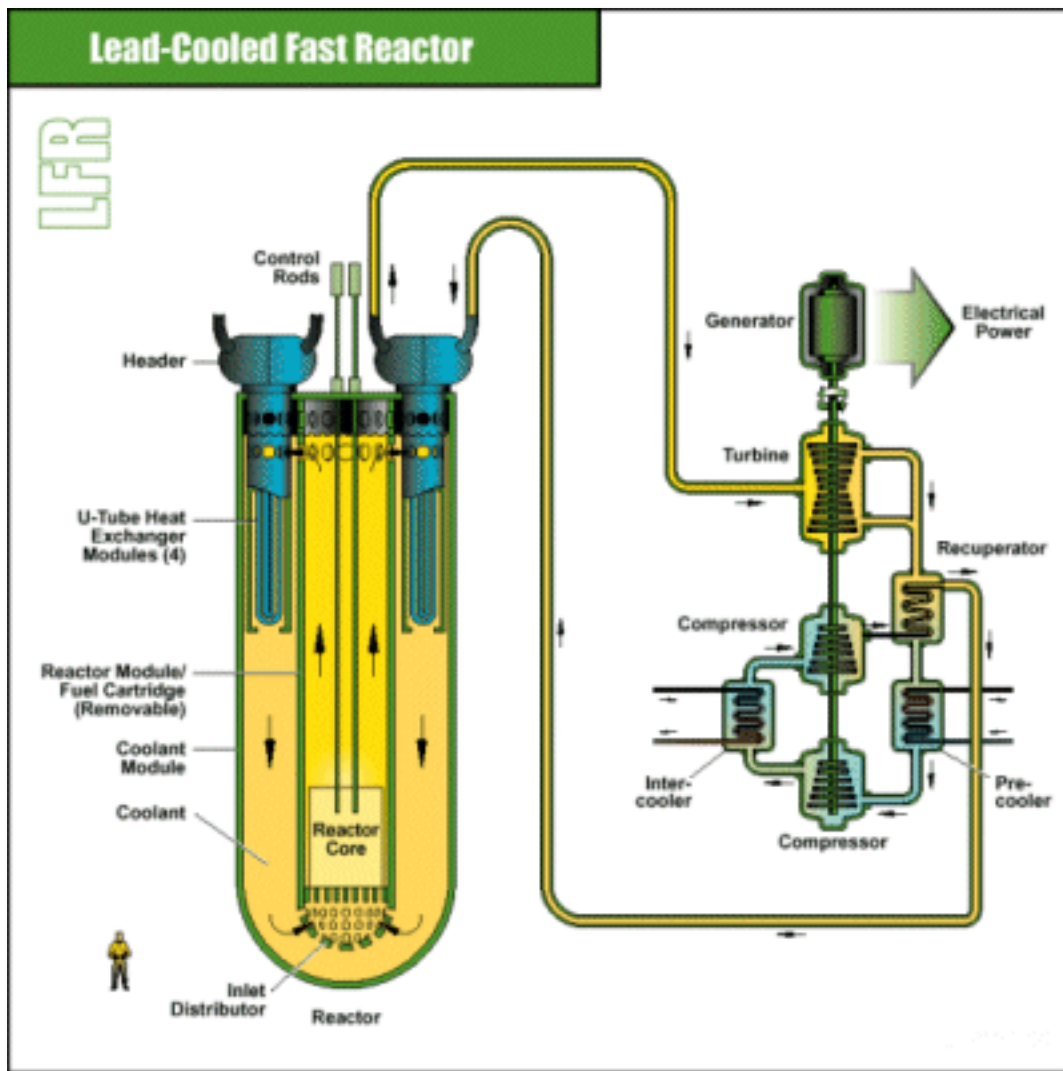
Palivo: SFR-MOX (20% transuranic ox. and 80% uranium oxide)

Pracovní charakteristika: teplota 550 °C, obložení reaktoru s MgO, problematický je sodík, který z vodou prudce reaguje, běžný výkon 500 – 1500 MW, je navržen na zpracování vysokoaktivního odpadu, plutonia a dalších aktinoidů.

S. Bays, M. Pope, B. Forget, R. Ferrer, "Transmutation Target Compositions in Heterogeneous Sodium Fast Reactor

Geometries", INL/EXT-07-13643 Rev. 1, 2008

M. J. Lineberry and T. R. Allen, Argonne National Laboratory, "The Sodium-Cooled Fast Reactor (SFR)



Palivo: kovové či nitridy (U_2N_3 či nitridy aktinoidů)

Pracovní charakteristika: chladivo Pb či eutektikum Pb-Bi, přirozená cirkulace chladiva, výkon 300 – 1200 MW, pracovní teplota 550 °C výhledově i 800 °C (od 830 °C možná termochemická produkce H_2)

V provozu: OK-550, BM-40A Rusko, OK-550, BM-40A – reaktory v ruských ponorkách projekt „Alfa class“

ad TBR:

- základem je palivo z obohaceného U či MOX
- MOX (mixed oxid fuel – směs oxidů Pu a U (ochuzený i přírodní)
- dále už se jen přidává Th

Typy TBR:

- AHWR (Advanced Heavy Water Reactor)
- LFR (Liquid Fluoride Reactor)

AHWR:

- vývoj především v Indii (velké zásoby Th)
- palivo - PuO₂-ThO₂ moderátor amorfní C a těžká voda

LFR:

- primární chladivo, moderátor a palivo roztavená sůl (UF₄)
- palivo se stává kritickým v jádře s uhlíkovým moderátorem
- lepší tepelná výměna - zmenšení aktivního jádra
- snadná separace štěpných produktů

Material	Total Neutron Capture Relative to Graphite (per unit volume)	Moderating Ratio
Heavy Water	0.2	11,449
Light Water	75	246
Graphite	1	863
Sodium	47	2
UO ₂	3,6	0,1
2LiF-BeF ₂	8	60
LiF-BeF ₂ -ZrF ₄ (65-30-5)	8	54
NaF-BeF ₂ (57-43)	28	15
LiF-NaF-BeF ₂ (31-31-38)	20	22
LiF-ZrF ₄ (51-49)	9	29
NaF-ZrF ₄ (59.5-40.5)	24	10
LiF-NaF-ZrF ₄ (26-37-37)	20	13

KF–ZrF ₄ (58–42)	67	3
RbF–ZrF ₄ (58–42)	14	13
LiF–KF (50–50)	97	2
LiF–RbF (44–56)	19	9
LiF–NaF–KF (47–11–42)	90	2
LiF–NaF–RbF (42–6–52)	20	8

Další typy množivých reaktorů:

ADTT (Accelerator Driven Transmutation Technologies)

- neutrony se generují pomocí urychlených p (0,8 - 1,5 GeV)
- na jeden p připadá při tříštění terče až 50 n
- podkritické množství paliva (vyloučena možnost havárie)
- spaluje Th, Pu – pocházející např. ze zbraní
- spaluje aktuální jaderný odpad (nový odpad vymře za cca 100 let)

aktuální problémy

- chlazení terčíku
- přechod protonů z vakua urychlovače do horkého terčíku
- vyšší investiční náročnost

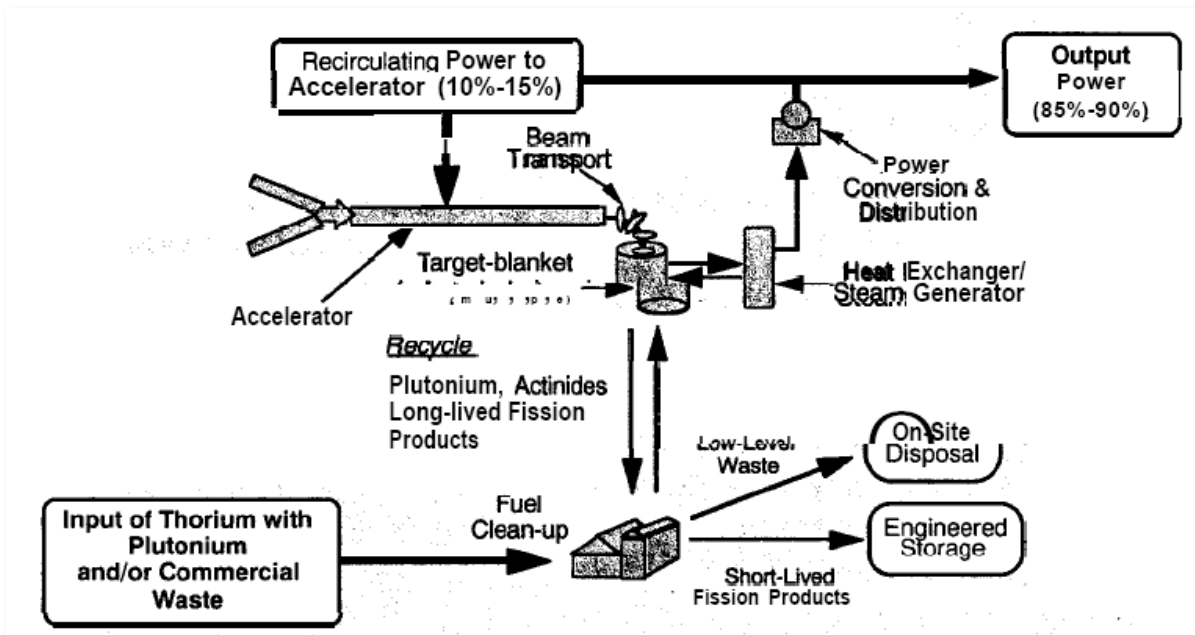
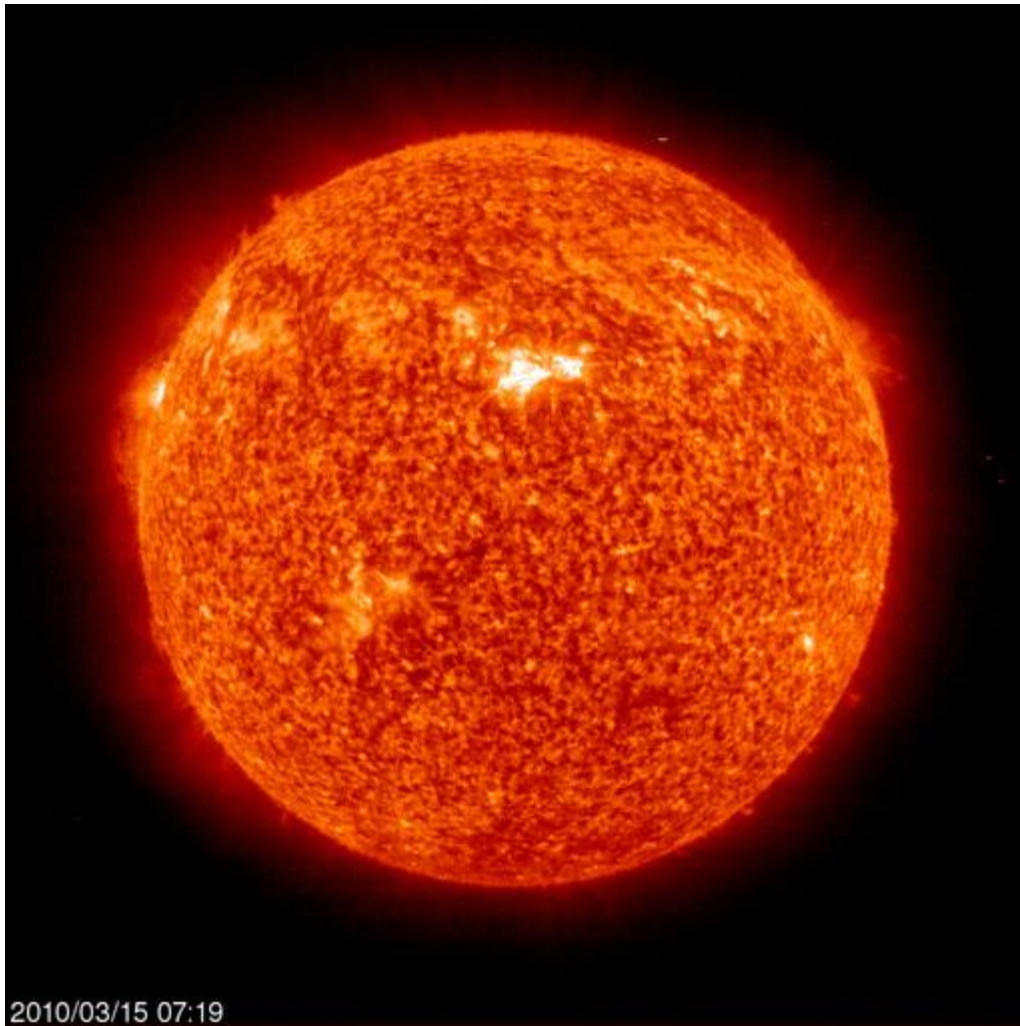


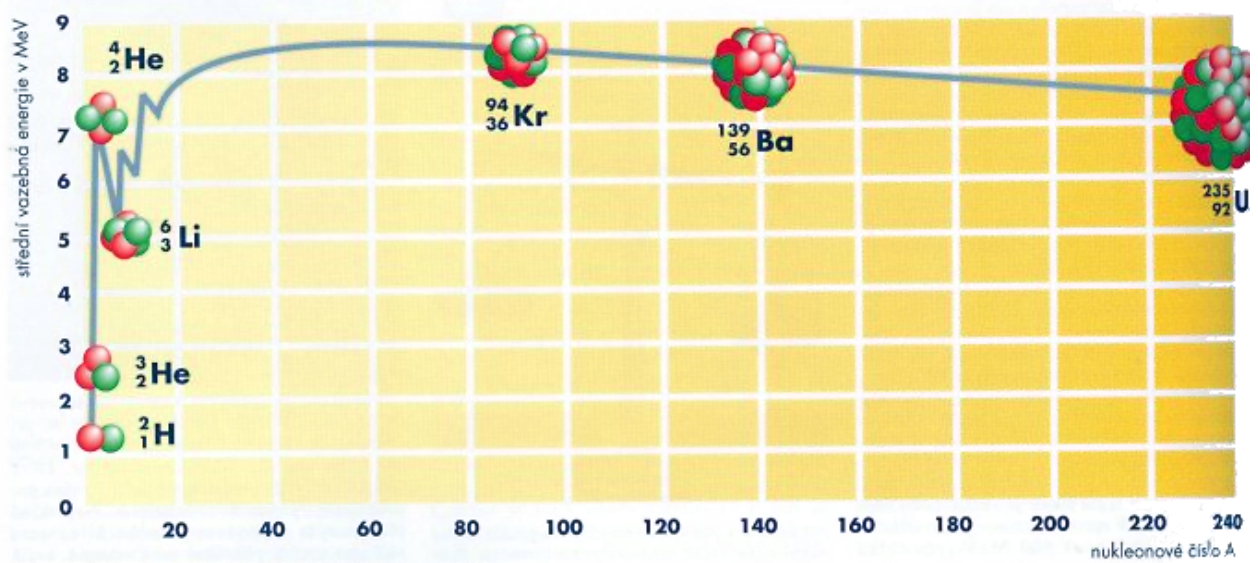
Schéma ADTT

Termonukleární elektrárny

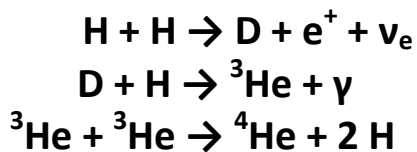
Nejlepší termonukleární reaktor je Slunce.



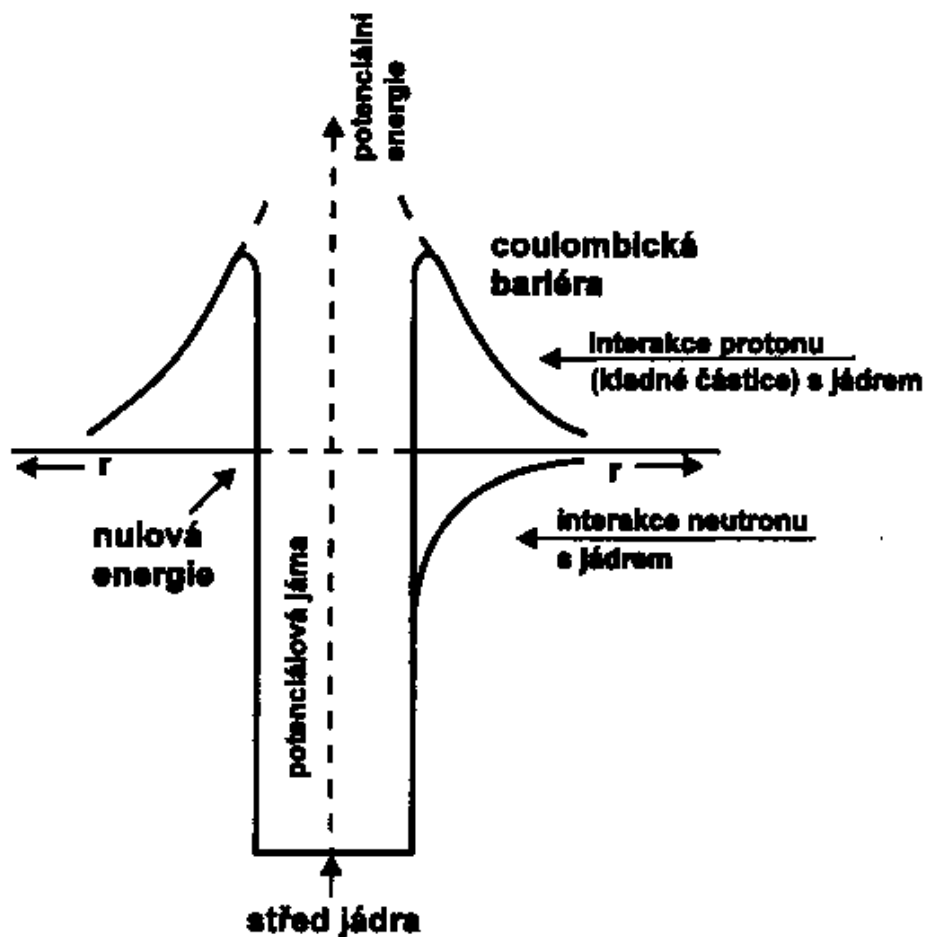
Slučování X štěpení



Graf závislosti střední vazebné energie na nukleonovém čísle A.



- pozitrony anihilují
- vysoce energetické fotony „měknou“
- foton letí ven 1 Myr
- teplota v jádru cca 15 MK
- v našem těle, $7 \cdot 10^{14}$ neutrin/s
- za život 2 – 3 neutrina v těle zaniknou
- odnáší 4 % energie



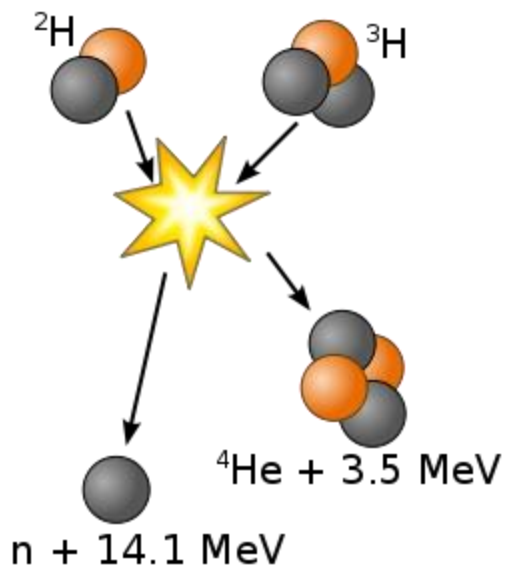
Ve Slunci je teplota relativně nízká, p neprojdou přes energetickou bariéru, ale tunelují skrz ni (termonukleární doutnání).

Na Zemi je nejlepším TN reaktorem TOKAMAK
тороидальная камера с магнитными катушками

- Navrhl Andrei Sacharov a Igor Tamm v ústavu I.V. Kurčatova v Moskvě v r. 1950. Nutná teplota až 150 MK.

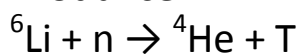


- zásoby D „nevyčerpatelné“
- 1 D na 6500 H



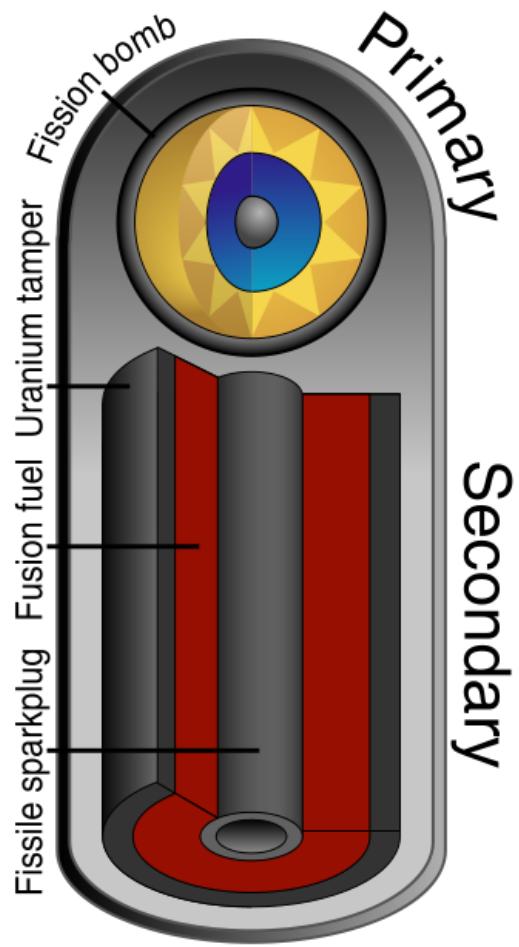
- α ohřívá palivo
- γ a n výroba elektřiny

Produkce T:



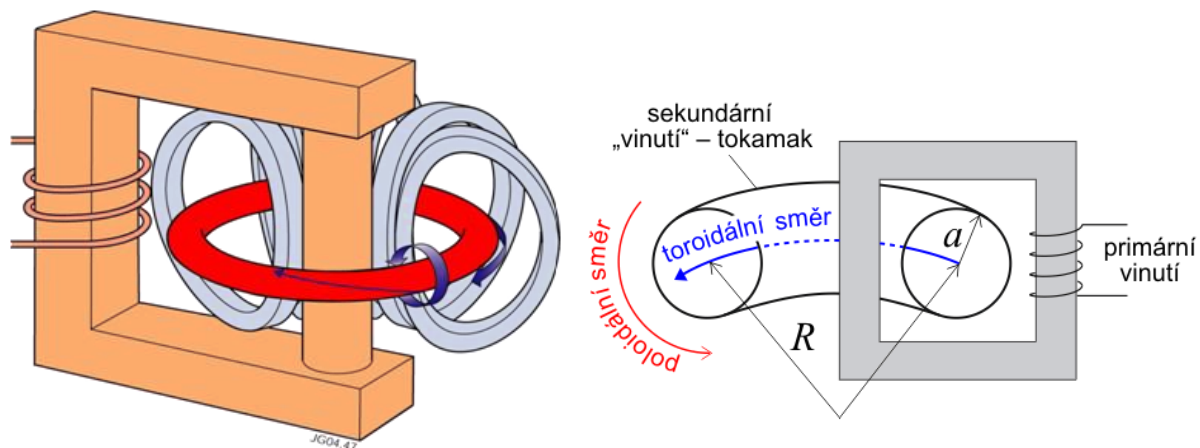
„Lithium z jedné baterie pro laptop a voda v jedné vaně vody stačí zásobit průměrného Evropana po dobu 30ti let!“

...anebo vodíková bomba



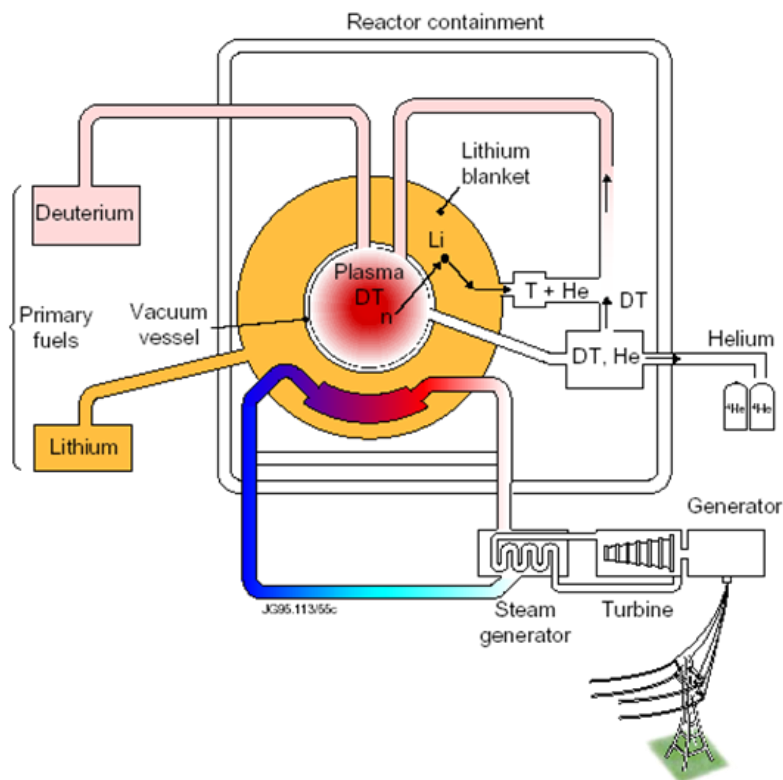
Царь, 57 Mt, 30. 10. 1961, Новая Земля

Princip TOKAMAKu:



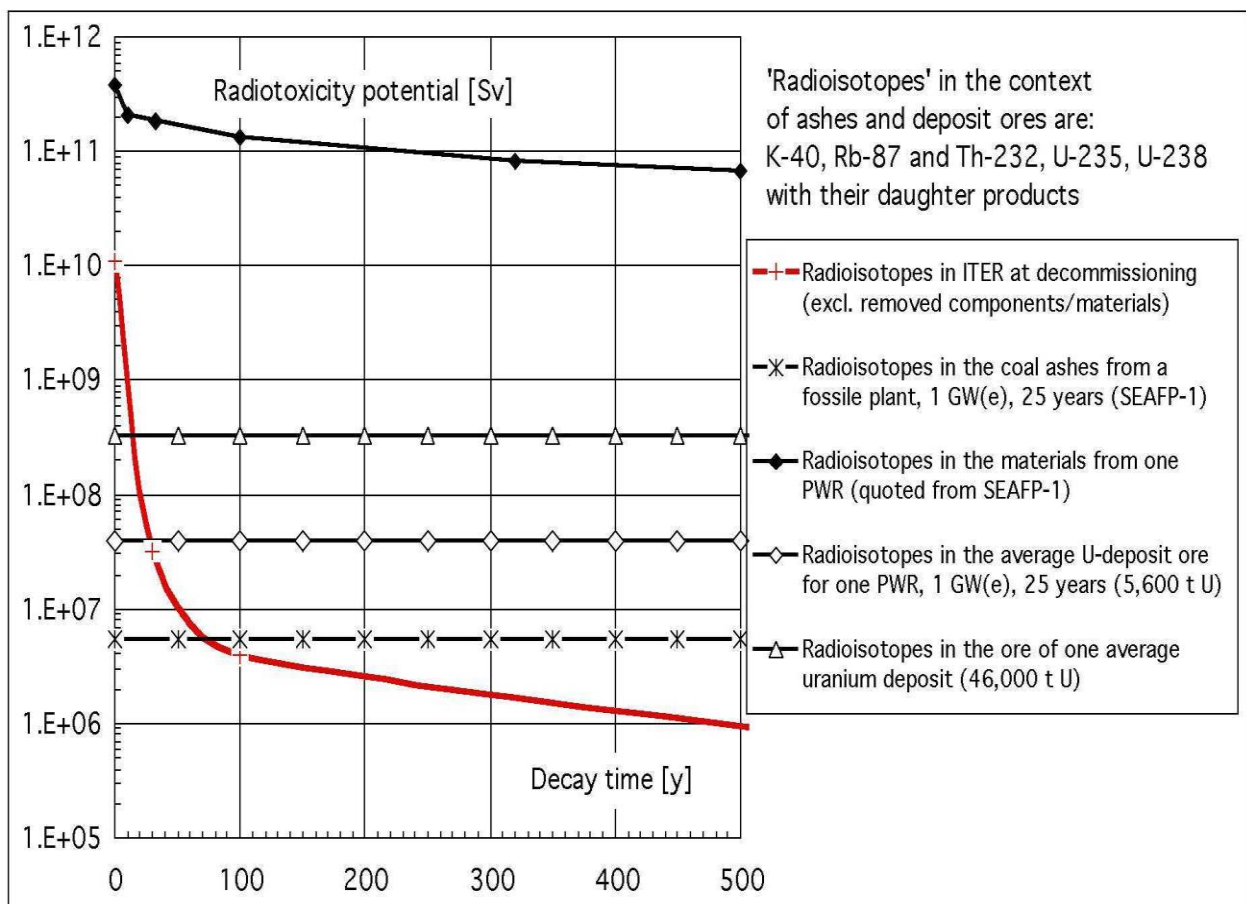
- plazma je udržováno uprostřed toroidu magnetickým polem
- plazma tvoří sekundární vinutí transformátoru
- plazma je ohříváno indukčním proudem $P_{oh} = R \cdot I^2$

Schéma TN elektrárny:



Výhody jaderné fúze

- reaktor je vnitřně bezpečný
- minimální množství radioaktivních materiálů (několik kilogramů tritia)
- zásoby paliva (deuterium + lithium) vystačí na tisíce let
- palivo je rovnoměrně rozděleno po celé zeměkouli
- náklady na dopravu paliva jsou minimální
- deuterium se snadno připraví opakovanou elektrolýzou vody
- produkt fúzní reakce - zcela přátelský k životnímu prostředí
- fúzní elektrárna neprodukuje skleníkové plyny
- zbytková radioaktivita – relativně rychle zmizí

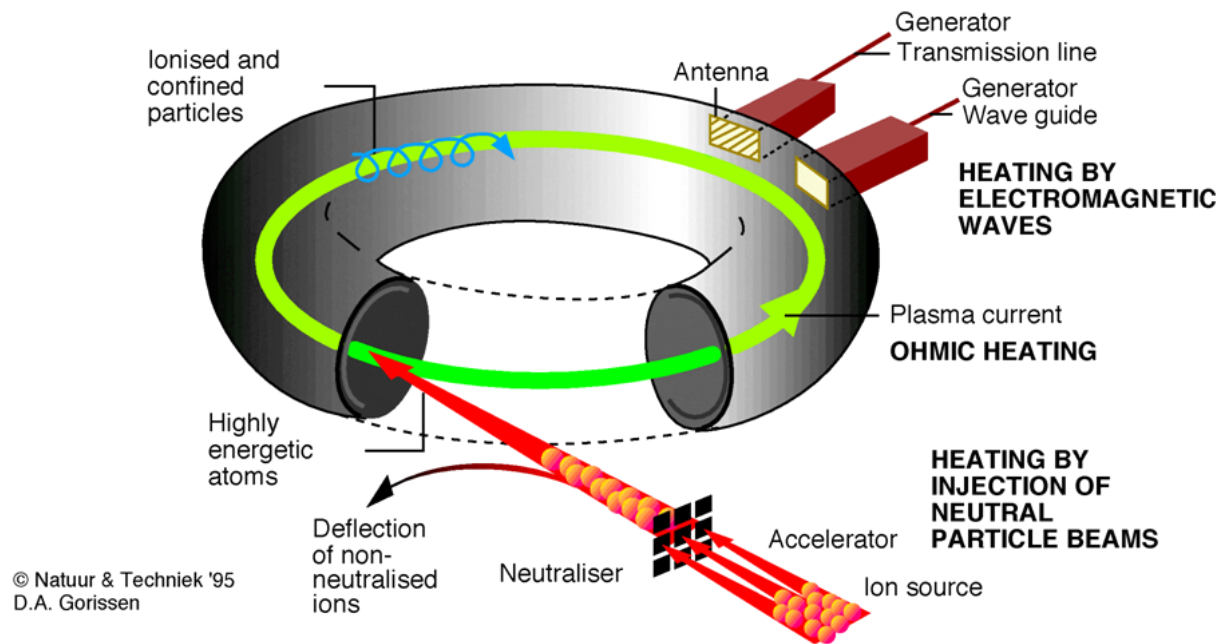


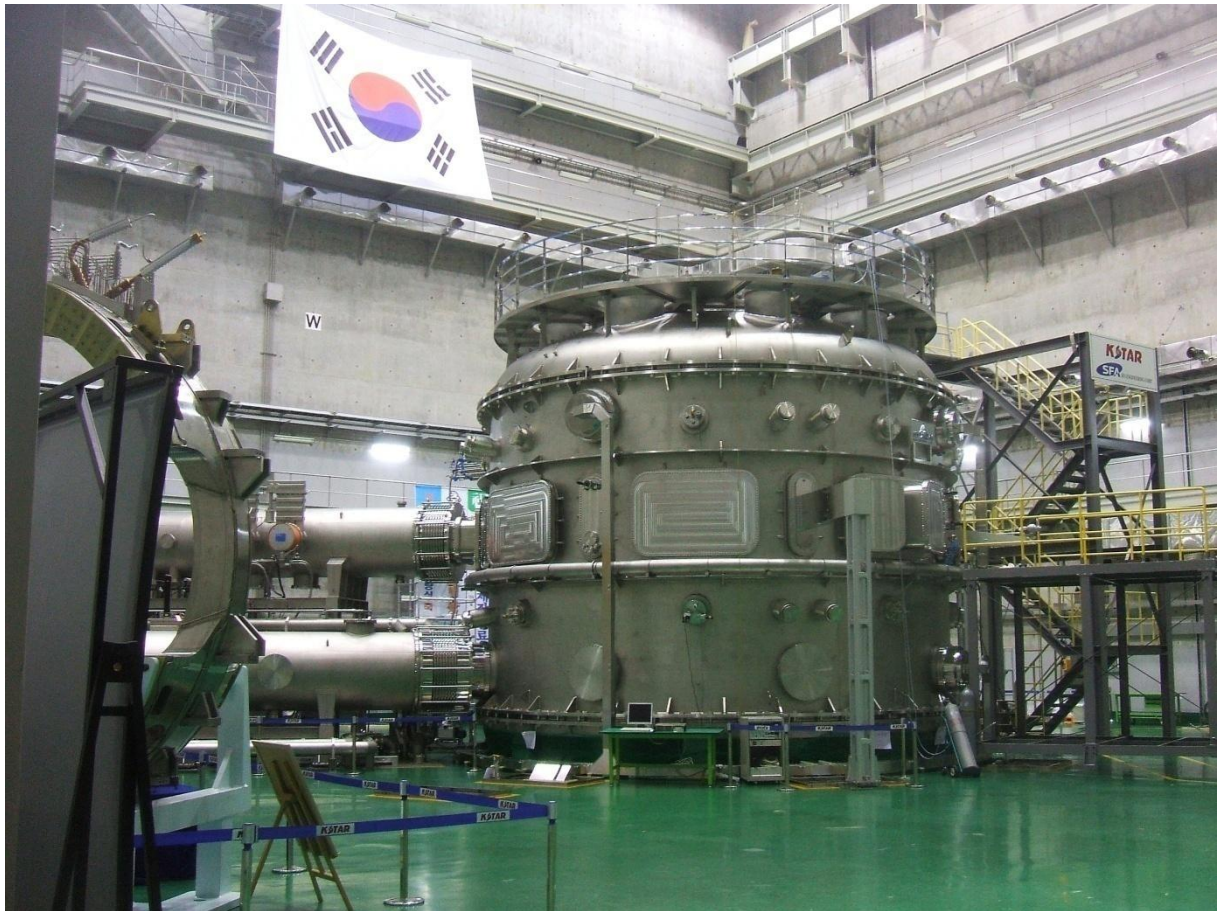
Fyzikální a technologické problémy

- udržení a ohřev plazmatu

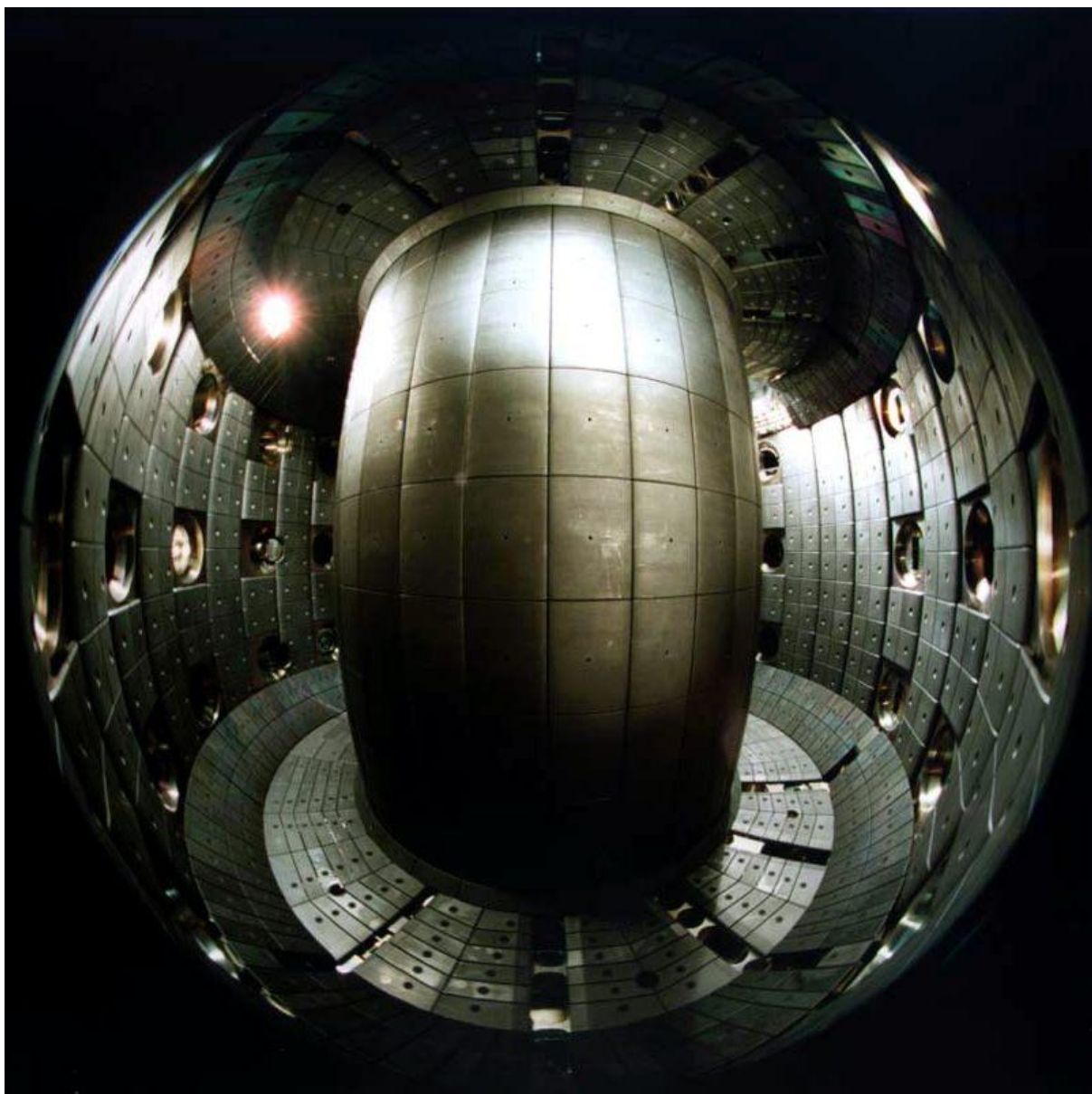
- obrovský teplotní gradient 200 000 000 °C/m
- obrovská tepelná a neutronová zátěž vnitřní stěny reaktoru
- **s rostoucí teplotou klesá ohmický odpor a tedy i ohmický příkon!**

Dodávání energie plazmě



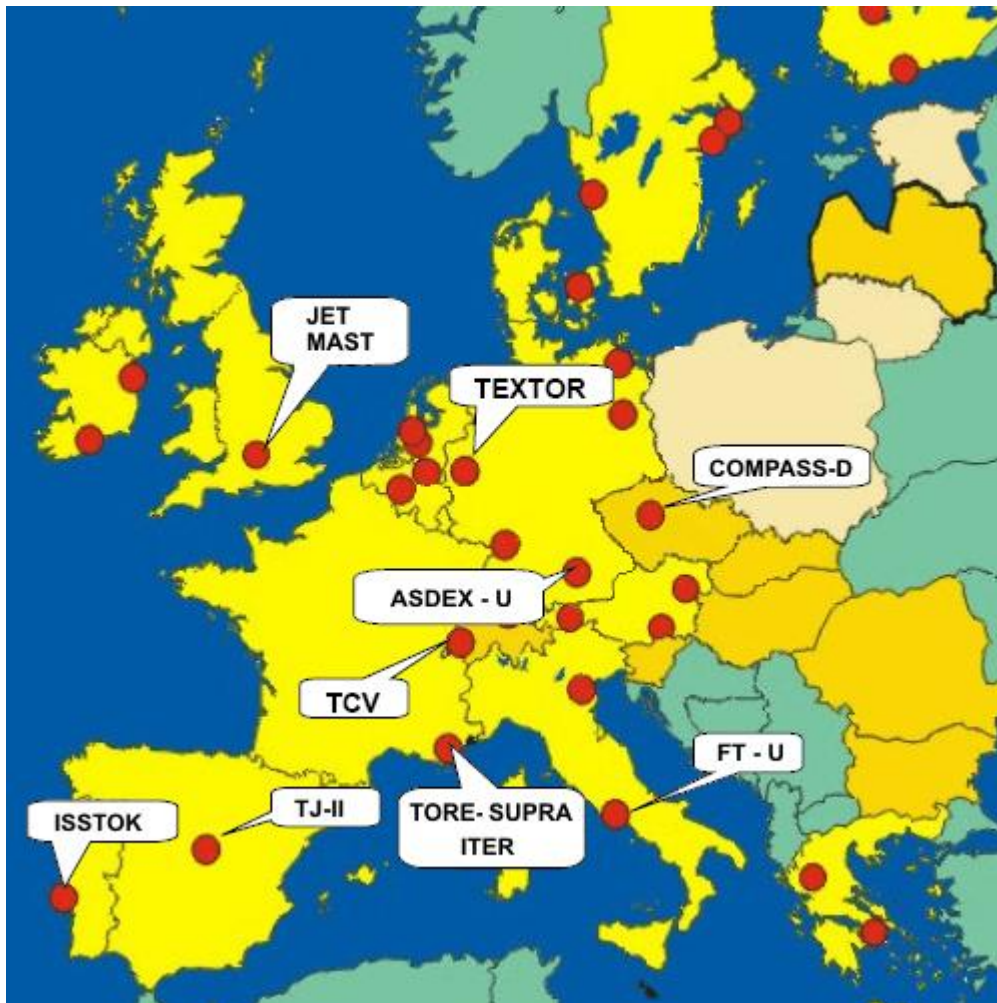


Projet KSTAR (Daejeon, Jižní Korea).

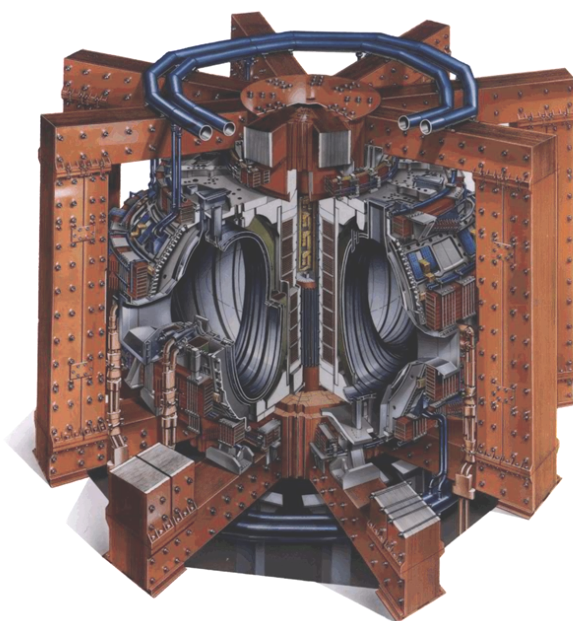


Tokamak à Configuration Variable (TCV): inner view, with the graphite-clad torus. Courtesy of CRPP-EPFL, Association Suisse-Euratom

TOKAMAKy v Evropě



JET (Joint European Torus)



Stavba 1975 – 1983, Provoz do 2014

TOKAMAKy v Česku

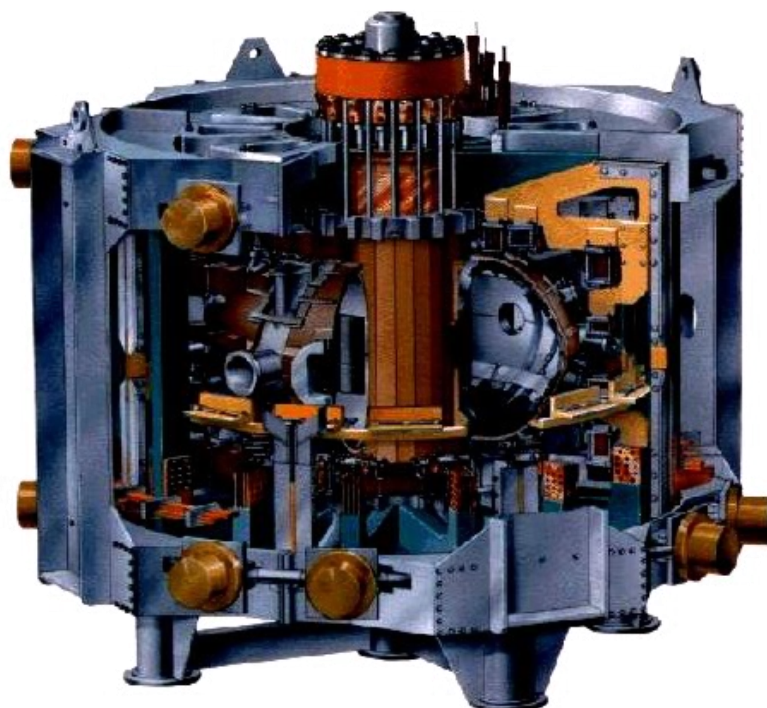
CASTOR (Czech Academy of Sciences TORus)

Objem 80 litrů, do konce roku 2006 byl v provozu v Ústavu fyziky plazmatu Akademie věd České republiky, postavený koncem 50. let 20. století v Kurčatovově ústavu v Moskvě a převezený do Československa v roce 1977.

COMPASS (COMpact ASSEMBly)

V roce 2004 byl zdarma nabídnut anglickou agenturou pro atomovou energii UKAEA. V ČR od roku 2008.

Parametr	CASTOR	COMPASS-D	MAST	JET	ITER
Hlavní poloměr R	0,4 m	0,56 m	0,85 m	2,96 m	6,2 m
Vedlejší poloměr a	0,085 m	0,23 až 0,38 m	0,65 m	1,25 m	2 m
Objem plazmatu	0,08 m ³	0,5 m ³	7 m ³	50 m ³	873 m ³
Proud	25 kA	400 kA	2 MA	5 MA	15 MA
Doba udržení	50 ms	2 s	5 s	20 s	400 s
Magnetické pole	1,5 T	2,1 T	0,6 T	3,5 T	5,3 T



CASTOR

TOKAMAK ITER

ITER - International Thermonuclear Experimental Reactor, též latinsky **cesta**.

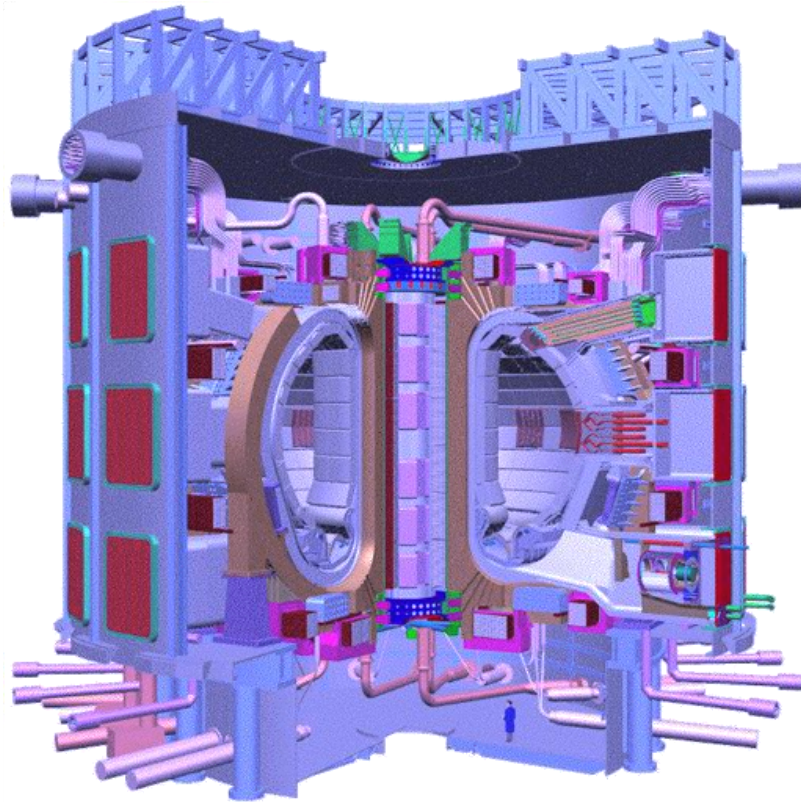
- 2. nejdražší projekt v historii lidstva
- celkový rozpočet projektu je 10 mld. € (polovinu uhradí EU)
- zbytek ostatní účastnické státy: USA, Rusko, Čína, Japonsko, Jižní Korea, Indie
- výkon cca 500 MW

Programový cíl

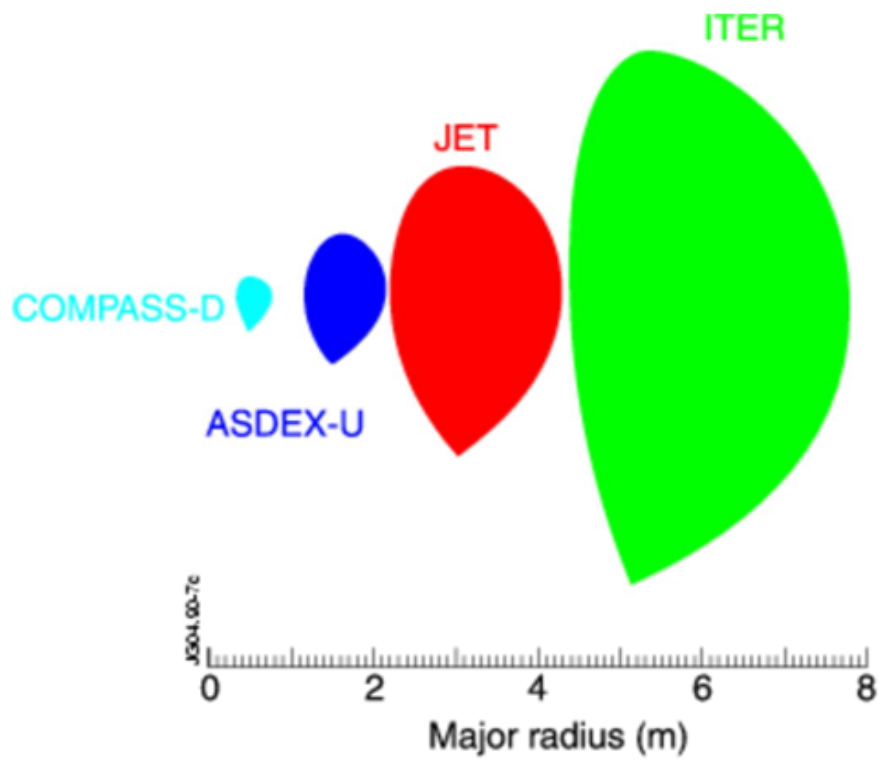
- prokázat vědecké a technologické využití fúzní energie pro mírové účely, tak aby bylo možno zkonstruovat elektrárnu v letech 2030-2050.

Technické cíle

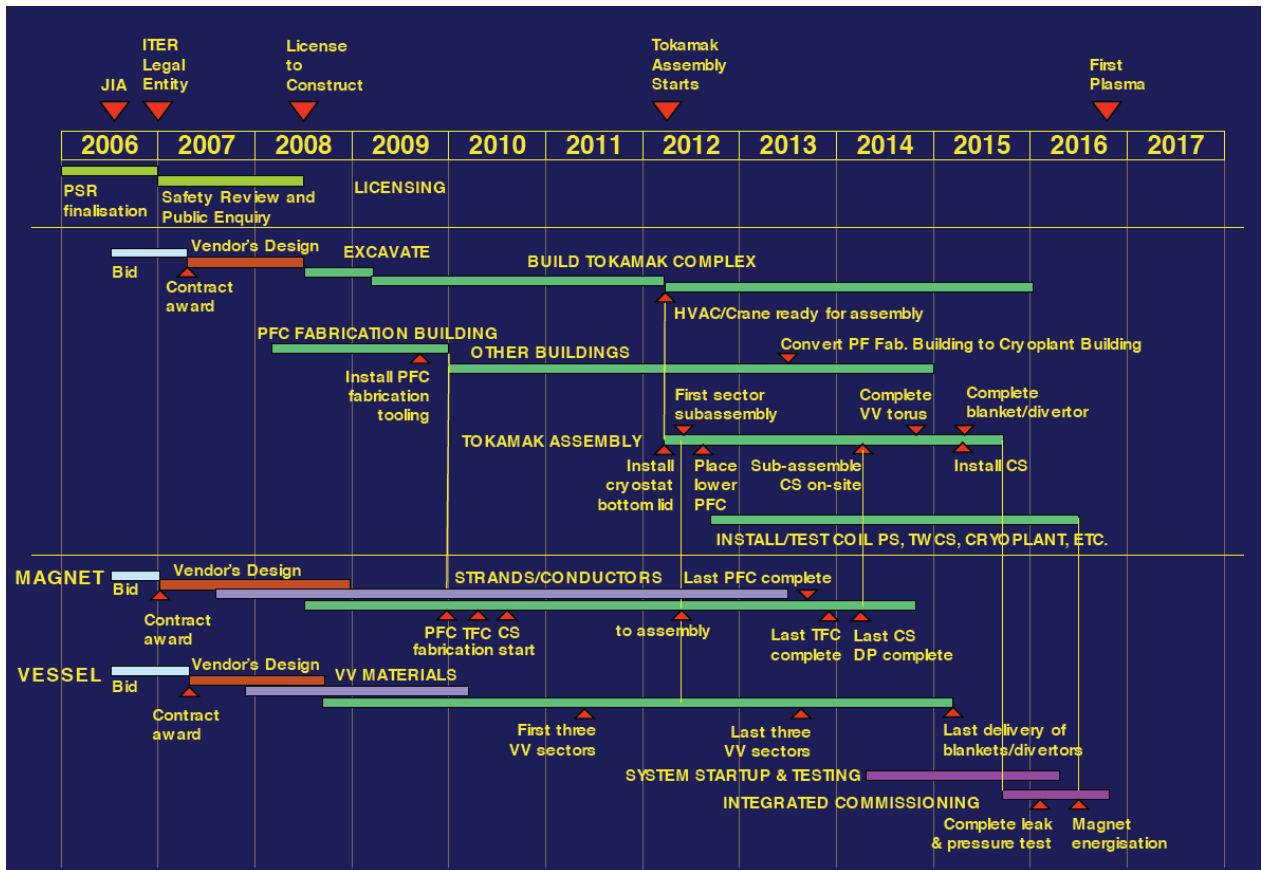
- prokázat vysoký energetický zisk ($Q = 10$) po dobu 400 sek při použití palivové směsi DT
- prokázat energetický zisk ($Q = 5$) v dlouhých pulsech delších než 1000 sek.
- testovat důležité technologie v reaktorových podmínkách
- testovat jednotlivé komponenty při vysokých neutronových tocích
- demonstrovat bezpečnost fúze a její kompatibilitu s životním prostředím



Srovnání parametrů TOKAMAKŮ



Časový plán projektu ITER



ITER ve francouzském Cadarache. Zatím se rozbíhají jen výkopové práce, celý nový komplex je jen počítačem doplněná vize.



Aktuální informace: spuštění se plánuje v roce 2018. O tomto posunu se oficiálně rozhodlo loni (2009). Koncem února se v Paříži konalo setkání zástupců partnerských stran, kde nejdříve padl návrh na další odložení termínu dokončení na rok 2020, ale ten neprošel a účastníci odhlasovali rok 2019.

<http://www.youtube.com/watch?v=hOiGeFolKek>

Projekt HiPER

- HiPER (High Power laser Energy Research facility), v současnosti se intenzivně rozbíhá
- britský „fúzní“ projekt, měl by za dvacet let zásobovat veřejné rozvodné sítě
- dokončení do roku 2030 Didcot v hrabství Oxfordshire, kde se již dnes vypíná šest mohutných chladících věží jaderné elektrárny
- projekt HiPER uvažuje s fúzní reakcí těžkých vodíkových izotopů řízenou pomocí vysoce energetických laserových paprsků

4.5. Havárie jaderných reaktorů

- v minulosti řada nehod a havárií
- **pouze u třech (4)** uniklo větší množství radioaktivních látek mimo elektrárnu

MAAE přijala v roce 1991 mezinárodní stupnici pro hodnocení jaderných nehod. Stupnice má sloužit především k rychlému informování veřejnosti o závažnosti nehod:

0. Událost pod stupnicí (Below scale)

Situace, při kterých nebyly překročeny provozní limity.

1. Odchylka (Anomaly)

Funkční, nebo provozní odchylky. Nepředstavují riziko, ale odhalují nedostatky bezpečnostních opatření.

2. Porucha (Incident)

Technické poruchy, nebo odchylky, které neovlivňují přímo chod a bezpečnost elektrárny, ale mohou vést k následnému přehodnocení bezpečnostních opatření.

Mihama-2, jaderná elektrárna, Japonsko, 1991

Pickering A-B, jaderná elektrárna, Kanada, 2003

3. Vážná porucha (Serious accident)

Únik radioaktivních látek mimo elektrárnu nad povolené limity. Individuální dávka pro obyvatele v blízkosti elektrárny je řádově 0,1 mSv. Personál je nadměrně ozářen (přes 50 mSv).

Vandellors, jaderná elektrárna, Španělsko, 1989

Davis Besse-1, jaderná elektrárna, USA, 2002

Paks, jaderná elektrárna, Maďarsko, 2002

4. Havárie s účinky v jaderném záření (Accident mainly in installation)

Malý únik radioaktivity mimo elektrárnu, individuální dávka pro obyvatele je řádově 1 mSv. Aktivní zóna reaktoru je částečně poškozena. Ozáření pracovníků elektrárny může vést k okamžitým zdravotním následkům (řádově Sv, **nemoc z ozáření**).

Jaslovské Bohunice, ČSSR, 1972

Windscale Pile, Přeracovatelský závod, Velká Británie, 1973

Saint Laurent, jaderná elektrárna, Francie, 1980

Tokaimura, závod na výrobu paliva, Japonsko, 1999

5. Havárie s účinky na okolí (Accident with off-site risks)

Únik radioaktivity (100 až 1000 TBq ^{131}I , nebo jiných, podobně biologicky účinných izotopů) mimo elektrárnu. Velká část zóny reaktoru poškozena tavením. Evakuace blízkého obyvatelstva.

Windscale, Velká Británie, 1957

Three Miles Island, USA, 1979

6. Závažná havárie (Serious accident)

Únik radioaktivity (1000 až 10 000 TBq jódu, nebo jiných, biologicky podobně účinných látek) mimo elektrárnu. K omezení účinků je třeba provést místní havarijní plán.

Kyštym, Přeracovatelský závod, SSSR, 1957

7. Velká havárie (Major accident)

Únik radioaktivních látek mimo elektrárnu je větší než 10 000 TBq různých izotopů. Možnost okamžitých zdravotních následků. Dlouhodobé následky pro životní prostředí.

Černobyl, SSSR, 1986

Jaslovské Bohunice (4), ČSSR, 1972:

- do reaktoru byl zaveden palivový článek, **ucpaný silikagelem** (zabraňoval zvlhnutí článku)
- ucpaným palivovým článkem nemohl proudit chladicí plyn a téměř **nechlazené těleso se začalo tavit**

- vysoká teplota způsobila poškození nádoby s tlakovou vodou, ta se dostala do primárního okruhu a způsobila rychlou erozi povlaků palivových článků a tím i uvolnění radioaktivních látek
- radioaktivita zamořila i sekundární okruh, všechny radioaktivní látky však **zůstaly uvnitř elektrárny**, nikdo z obsluhy nebyl zraněn, ani ohrožen.

Windscale (5), Velká Británie, 1957



- grafitový reaktor, chlazený vzduchem
- sloužil výhradně k produkci plutonia pro vojenské účely
- ráno 8. října došlo vinou nepozornosti obsluhy k **přehřátí několika palivových článků**
- následovalo **vznícení povlaků z hořčíkové slitiny**
- požár se podařilo uhasit za čtyři dny

- uvolněné radioaktivní látky (^{133}Xe , ^{85}Kr , $^{131\text{m}}\text{Xe}$, ^{131}I , ^{132}Te , ^{137}Cs , ^{89}Sr , ^{106}Ru , ^{144}Ce) se přes komín rozptýlily nad Anglii, Wales a severní Evropu
- uniklo 13 500 TBq radioaktivních látek, největší dávkový příkon **40 $\mu\text{Gy/h}$** (cca 1 mGy/den) **1,5 km od reaktoru po směru větru**
- **rychlý zásah zdravotnických organizací** zabránil rozšíření ^{131}I ($T_{1/2} = 8$ dnů)
- na území o rozloze 520 km² v okolí Windscale byl vyhlášen **zákaz spotřeby mléka**, který byl odvolán po 44 dnech
- dávky obyvatelstvu v nejbližším okolí se pohybovaly mezi **5 a 60 mSv**
- provoz elektrárny už nebyl obnoven
- ve své době havárie nezbudila prakticky žádnou pozornost, přestože její dopad na obyvatele byl oproti nehodě v Three Mile Island mnohem větší

Three Miles Island (5), USA, 1979



- blok 2 jaderné elektrárny s tlakovodním reaktorem o tepelném výkonu 2772 MW byl necelý rok starý
- havárii zahájil **výpadek jednoho ze dvou parogenerátorů** elektrárny
- po havarijním odstavení reaktoru začal **pomalý únik chladicí vody** z chladicího okruhu
- příčinou byl zaseknutý ventil, **únik nebyl včas odhalen**
- ztráta veškerého chladiva vedla k **tavení aktivní zóny**
- plné odstranění následků havárie trvalo týden, neboť se v horní části reaktoru vytvořila obtížně odstranitelná bublina, obsahující vodík, která bránila bezpečnému ochlazování aktivní zóny
- únik radioaktivity mimo elektrárnu byl velice nízký a **nevyžadoval žádná zvláštní opatření** (^{133}Xe , ^{131}I), v blízkém okolí elektrárny byla **maximální dávka 1 mGy**
- přesto však byla nehoda zařazena do třídy 5, vzhledem k silnému poškození elektrárny a vysokému zamoření aktivní zóny, reaktor byl natrvalo vyřazen z provozu
- **účinek na veřejnost** byl ale **mnohem větší** než v případě Windscale, americká média totiž o nehodě obšírně informovala (senzacectivost reportérů, panika, dopravní kolaps)
- celosvětové **přehodnocení koncepce jaderné bezpečnosti, revize stavu mnoha reaktorů**

Kyšтым (6), Přepřacovatelský závod, SSSR, 1957

- znečištění tisíců čtverečních kilometrů na Středním Uralu v Rusku, způsobila patrně **stovky lidských ztrát**
- **veškeré zprávy** o ní však byly **zamlčeny**
- Čeljabinsk-40, závodu na produkci plutonia, asi 16 kilometrů východně od průmyslového města Kyšтым na jižním břehu jezera Kyzyl-taš
- vědci byli pod **silným nátlakem**, aby vyrobili dostatek plutonia, které by umožňovalo provedení zkoušky **první sovětské bomby** před Stalinovými sedmdesátinami v prosinci 1949, (bomba byla nakonec přivedena k explozi v srpnu toho roku)

- k nehodě téměř jistě došlo koncem prosince 1957 či začátkem ledna 1958, protože 9. ledna 1958 radio Moskva věnovalo značnou část vysílacího času **informacím o nemoci z ozáření** a detailnímu seznamu preventivních opatření
- 100 km od Sverdlovsk výstražná tabule u cesty varovala řidiče, aby následujících třicet kilometrů nezastavovali a jeli maximální rychlostí se zavřenými okénky (Profesor Leo Tumerman 1960)
- města z asi sto kilometrů dlouhého sektoru tvaru písmene L zmizela = masový přesun obyvatelstva
- nejpravděpodobnější vysvětlení je **běžná chemická exploze způsobená nahromaděním plynů okolo horkého nukleárního odpadu**

Tehdejší stav:

1. Voda, používaná od roku 1950 k chlazení reaktorů, silně kontaminovaná průtokem dřevými palivovými tyčemi, byla **vypouštěna do řeky Teča** a tak se kontaminace rozšiřovala;
 2. Vegetaci v okolí 20 km okolo zařízení zničily kyselé deště. K extrakci ²³⁹Pu z ozářených palivových článků byla používána kyselina dusičná a vzniklé oxidy dusíku, jod a xenon byly odváděny ze zásobníků do atmosféry, kde z nich vznikaly **nebezpečné a patrně radioaktivní kyselé deště**;
 3. Sověti ukládali svůj nukleární odpad spíš v otevřených nádržích než v uzavřených cisternách. Po odpaření tekutiny se tak dno nádrže mohlo pokrýt **vysoce radioaktivním prachem**, který mohl být rozptýlen silnějším větrem.
- v šedesátých letech bylo do oblasti dopraveno "komando smrti" tvořené vězni, kteří na kontaminovanou plochu rozprostřeli metr vysokou vrstvu písku a hlíny
 - tato zpustošená krajina, ohrazená a přejmenovaná na "**Čeljabinský celosvazový radiologický manévrovací a cvičný prostor**", byla pak používána jako **cvičný prostor pro tankové oddíly**

- v prosinci 1988 došlo také k **prvnímu oficiálnímu sovětskému doznání** o nehodě v Kyštymu

Černobyl (7), SSSR, 1986



- ukrajinská Černobylská elektrárna s vodou chlazenými reaktory typu RBMK (grafitový moderátor) o tepelném výkonu 3200 MW (elektrický 950 MW)
- 25. dubna, 1986 bylo zahájeno **plánované odstavení 4. bloku elektrárny**

- před odstavením měl být proveden experiment, který měl ověřit, zda bude elektrický generátor (poháněný turbínou) **schopen dodávat proud po rychlém uzavření přívodu páry** a při svém **setrvačném doběhu ještě zhruba 40 vteřin napájet čerpadla havarijního chlazení**

Průběh experimentu

13:05:00

Výkon reaktoru byl snížen na polovinu a byl odstaven turbogenerátor. Krátce poté **byl odpojen systém havarijního chlazení**, aby nezačal fungovat během experimentu.

23:10:00

Při snižování výkonu došlo k neobvyklé události. **Chybou operátora výkon prudce klesl** na 30 MW. Reaktor je v tomto režimu značně nestabilní (navíc bylo palivo staré – na konci své životnosti) a **operátoři měli v tomto okamžiku experiment ukončit a reaktor definitivně odstavit**. Rozhodli se však v experimentu pokračovat.

01:23:04

Reaktor byl **stále nestabilní**, operátoři se pokusili stabilizovat jej a zvýšit výkon, což se jim nepodařilo ani za použití regulačních tyčí.

01:23:20

Byl zablokován havarijní signál, který by po uzavření přívodu páry na turbínu automaticky odstavil reaktor. Pak operátoři odstavili přívod páry – pokračovali tedy v plánovaném experimentu.

01:23:40

Operátoři dali signál k havarijnímu odstavení reaktoru, ale účinek byl příliš pomalý.

01:23:44

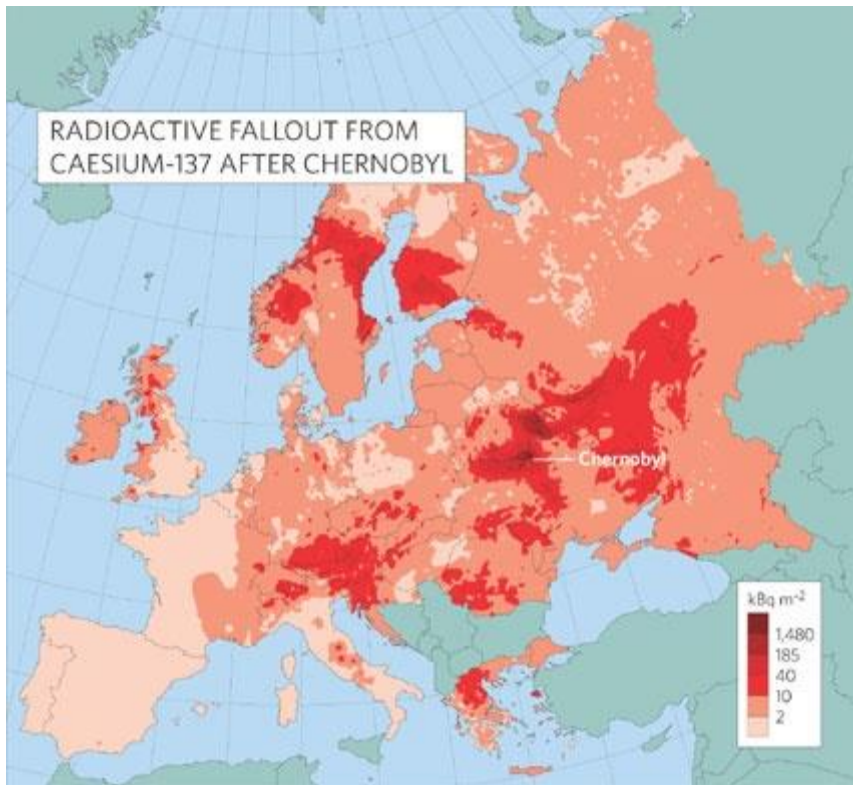
V části reaktoru došlo k „akutnímu neutronovému energetickému šoku“. Během čtyř sekund stoupl výkon čtvrtého bloku stonásobně. Část paliva rozložila a vypařila chladicí vodu. Výbuch (1) páry roztrhl tisícitunový příklop čtvrtého bloku. Žhnoucí trosky padaly na okolní budovy a založily přes třicet požárů. Další voda reagovala s do červena rozpáleným grafitovým jádrem reaktoru o hmotnosti 1 700 tun, při čemž vznikl plynný vodík, který během sekundy detonoval (2) a vymrštil radioaktivní odpad a radionuklidy do výše přes 1,5 kilometru do ovzduší.

02:20:00

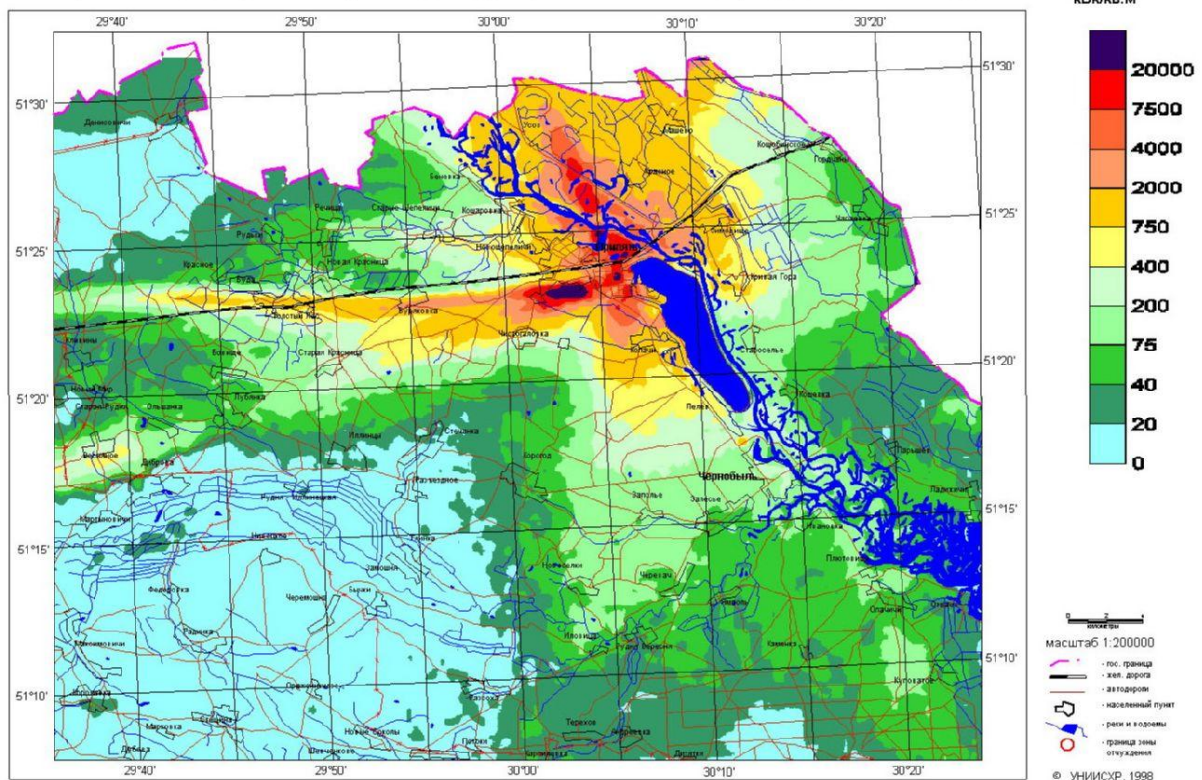
Požár byl lokalizován a za 3 hodiny později uhašen za cenu životů hasičů hasičů a pracovníků elektrárny, kteří utrpěli většinou těžké popáleniny z ozáření (31).

- po deseti dnech velkého úsilí se podařilo dostat jádro reaktoru zpět pod kontrolu
- helikoptéry shodily na otevřené jádro reaktoru více než 5 000 tun olova, bóru a jiných materiálů
- z reaktoru uniklo od okamžiku výbuchu do 6. května 1986 asi 4% radioaktivních látek přítomných v reaktoru ($2 \cdot 10^{19}$ Bq)
- nejvíce kontaminováno bylo nejbližší okolí elektrárny
- $30\,000\text{ km}^2 > 185\text{ kBq/m}^2$
- 200 000 osob se podílelo na likvidaci havárie, průměrná dávka 100 mSv
- z 237 osob se u 134 projevila akutní nemoc z ozáření, 28 zemřelo do 3 měsíců (26 radiační poškození kůže a poškození sliznic dýchacího ústrojí (tzv. horké částice, lokálně až 100 Gy), 2 zahynuly při explozi, 1 na infarkt
- během dalších měsíců zemřelo ještě 14 osob, ale souvislost z havárií nebyla prokázána
- osoby, které přežily vysoké ozáření, trpí řadou potíží včetně psychických poruch

- ke konci roku 1995 800 případů rakoviny štítné žlázy navíc, očekáváno objevování případů ještě několik desetiletí
- podle konzervativního modelu odhadnuto že mezi 7,2 mil. obyvatel bude 470 smrtelných případů leukémie navíc (norm. 25 000), 6600 výskytů rakoviny za 85 let (norm. 870 000)
- obyvatelé však nebyli včas a správně informováni o rozsahu a následcích výbuchu, evakuace začala až několik hodin po výbuchu
- nejbližší okolí elektrárny je uzavřenou zónou dodnes
- dnes již radioaktivita v okolí elektrárny poklesla a tak se někteří důchodci vracejí do svých domů
- protože foukal vítr směrem na sever (naštěstí pro Kyjev), radioaktivní mrak se vydal do Běloruska
- zasáhl celých 75 % jeho území
- dodnes je zamořeno 25% běloruského území
- v ČR průměrná dávka za 1. rok cca 0,3 mSv (přesto v důsledku nejasných informací bylo provedeno nadprůměrně vysoké množství potratů)
- následující rok vzrostla koncentrace ^{137}Cs v potravinách, pak rychle klesala
- u hub 1985 1kBq ^{137}Cs na 1kg sušiny, 1986 40 kBq na 1 kg sušiny



Карта плотности загрязнения стронцием-90 территории 30-км зоны ЧАЭС (по состоянию на 1997г.) Copyright 2001, UIAR - public PRIPYAT.COM



<http://pripyat.com>

<http://www.youtube.com/watch?v=101OEaksU0s&feature=fww>

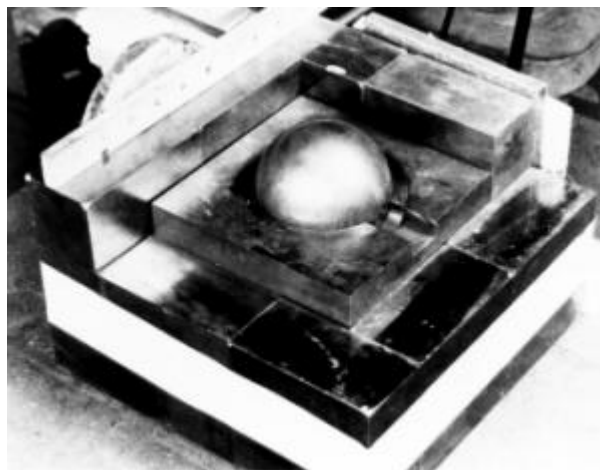
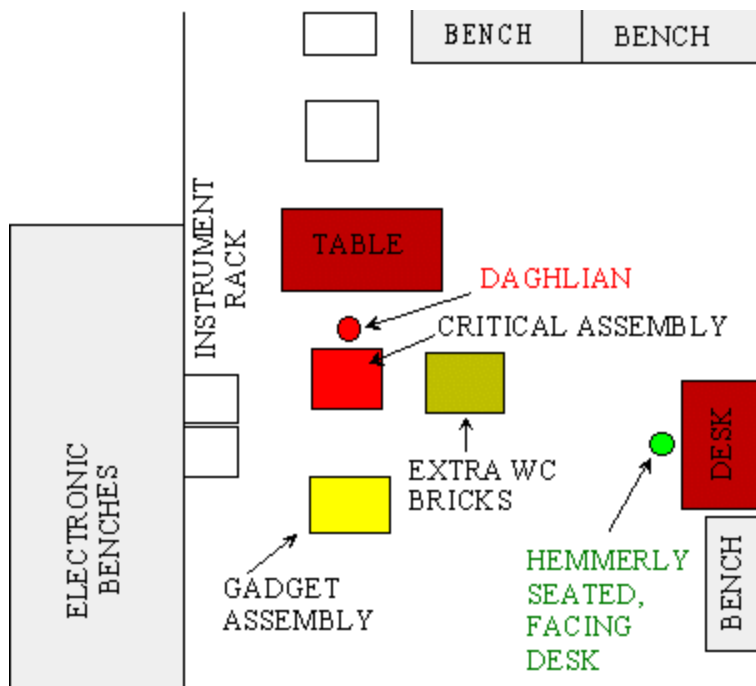
4.6. Nehody při práci s radioaktivními látkami

Nehoda 1.



- [Harry K. Daghlian Jr.](#) (1921-1945) student fyziky na Purdue University
- do Los Alamos přišel na podzim v r. 1943 (instalace cyklotronu, na jaře 1944 člen skupiny provozující malý výzkumný varný reaktor v Los Alamos, později přešel do "Critical Assembly Group" ([chování Pu a ²³⁵U v blízkosti kritického stavu](#) a testovala konstrukci plutoniové nálože pro pokusný výbuch Trinity v Alamogordo))
- prováděl experimenty [s koulí plutonia](#) (6.2 kg - velikost tenisového míčku) obklopenou cihličkami [karbidu wolframu](#): zjistit praktické uspořádání vnitřku plutoniové bomby
- ráno 21. srpna 1945 sestavil kolem plutoniové koule krychli z karbidových cihliček o hraně 38 cm: [toto uspořádání vede ke kritickému stavu ještě před dokončením šesté vrstvy cihliček](#)

- odpoledne jiné uspořádání, tentokrát měla krychle hranu 31 cm a uspořádání se **blížilo kritickému stavu při dokončení páté vrstvy cihliček**
- stále nevyřešen úspěšný kritický design obklopující plutoniovou kouli
- večer (21:30) se Daghlian vrátil do laboratoře, přestože **provádění nebezpečných pokusů po pracovní době a o samotě bylo proti předpisům**
- v laboratoři: **vojín Robert J. Hemmerly** (četl noviny)
- strážnému Daghlian připadal trochu nervózní, úkolem strážného ale bylo hlídat plutonium
- Daghlian vyndal plutoniovou kouli z trezoru a začal kolem ni stavět krychli z cihliček karbidu
- **řídil se hlasitým tikáním přístrojů** (Geiger-Müller)
- **dokončil asi polovinu páté vrstvy a téměř přiložil další cihličku doprostřed vrstvy**, přesahující nyní vrchol plutoniové koule, když ho **prudký vzrůst tikání** Geigeru upozornil, že se systém blíží kritickému stavu
- **rychle ucuknul**, a těžká karbidová cihlička mu vypadla z ruky a trefila se **přímo doprostřed nedokončené krychle s plutoniem uvnitř**
- Daghlian reflexivně smetl cihlu na zem
- **ucítil v pravé ruce mírné svrbění, když ji vnořil do modré záře obklopující plutoniovou kouli (21:55)**



- Hemmerly seděl u stolu **vzdáleného asi 3,7 m** od místa nehody, otočený zády, náhlý přechod tikání Geigeru na soustavné vrčení, modrý záblesk a bouchnutí těžké cihličky smetené na podlahu upoutaly jeho pozornost - otočil se a viděl, jak Daghlian stojí celý bezradný nad experimentem,
- Daghlian pak **demontoval havarovaný experiment do stabilnějšího uspořádání** a informoval Hemmerlyho o vzniklé situaci
- Daghlian byl odvezen do nemocnice
- Hemmerly informoval svého nadřízeného o havárii a **byl také hospitalizován**

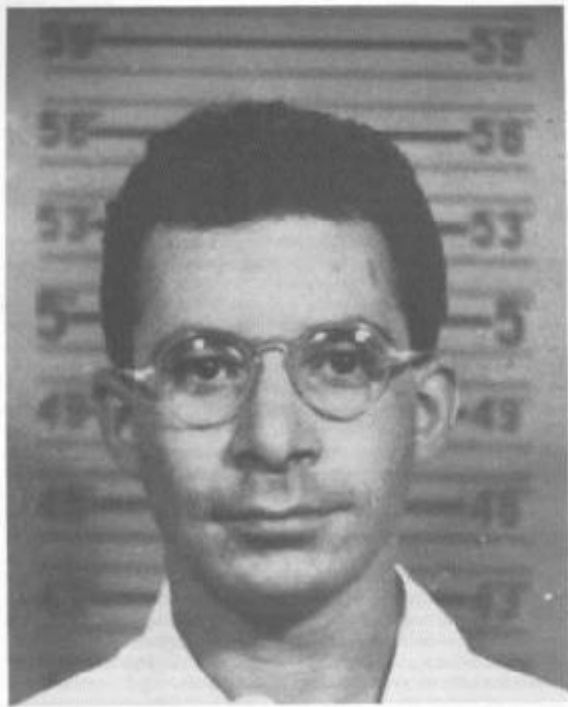
- plutoniová koule přežila havárii bez poškození, žádný radioaktivní materiál se nerozptýlil po laboratoři, laboratoř měla tlusté stěny (1,5 m zdiva), které ochránily ostatní lidi v budově před radiací
- Hemmerly byl v nemocnici na pozorování jen **dva dny**: krátkodobě zvýšený počet leukocytů
- strávil několik týdnů v rekonvalescenci, neprojevil se u něj žádné příznaky nemoci z ozáření, **po 2 měsících se vrátil do služby**
- efektivní dávka činila **cca 0,32 Sv**, během následujících 4 let se mu narodily **dvě zdravé děti**, kromě nadváhy a mírné hypertenze byl celkem zdravý, **zemřel ve věku 62 let na leukémii (celková dávka při působení v laboratoři?)**
- efektivní dávka u Daghliana činila přibližně **5,9 Sv**, distribuce velmi nerovnoměrná - **nejvíce ozářeny byly jeho ruce a horní polovina těla**, levá ruka přibližně **50 - 150 Sv**, pravá ruka **200 -400 Sv**
- pravá ruka **začala okamžitě otékat** a byla necitlivá na dotyk
- **prudká a neustávající nevolnost, záchvaty dávení a zvracení se dostavily 90 minut po nehodě**
- **nevolnost přetrvávala více než dva dny**, během nichž zvracení vystřídalo prudké neustávající škytání
- **po dvou dnech se vrátila chuť k jídlu**, avšak brzy se dostavily další vážné příznaky
- **2. dne po nehodě se na prsteníku pravé ruky objevil malý puchýřek a nehtová lůžka nabrala šedomodrý odstín - příznak špatného krevního oběhu**
- **3. den se vyvinulo množství puchýřů na dlani, hřbetu ruky a mezi prsty, puchýře se rychle zvětšovaly a bolestivě se nadouvaly tekutinou**



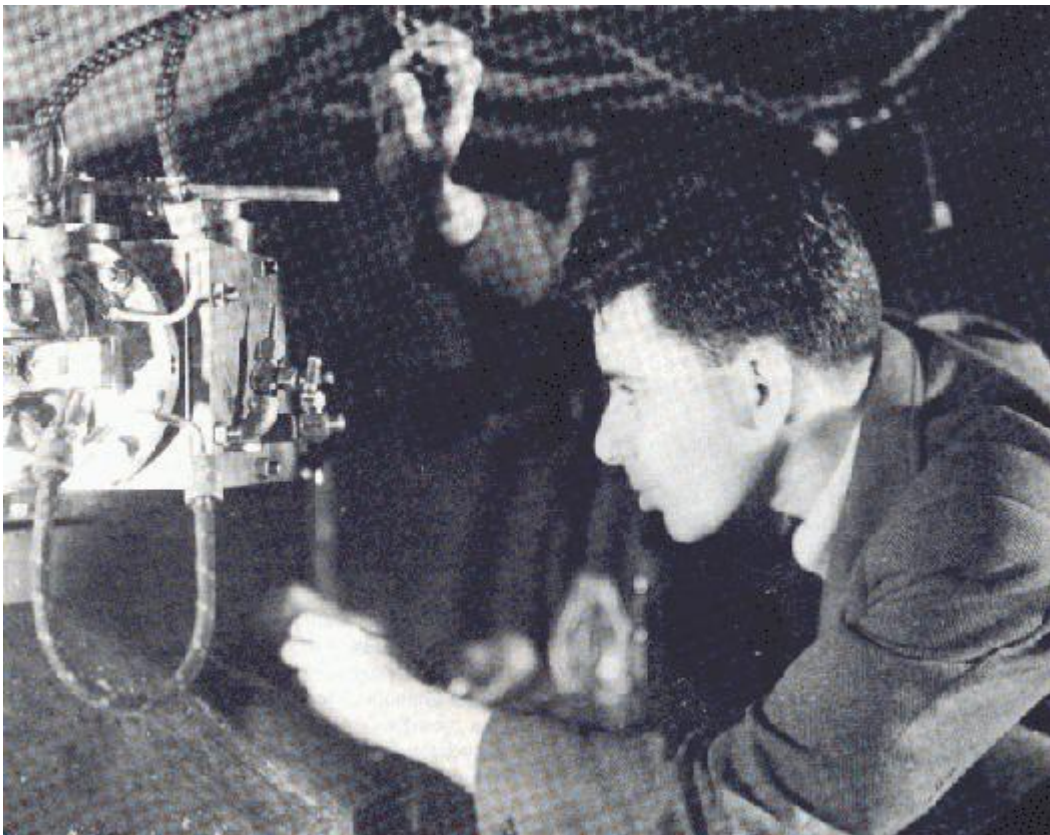
- kůže na levé ruce a na břicho také začala postupně rudnout
- pro úlevu bolesti lékaři otevřeli puchýře, odstranili odumřelou tkáň na pravé ruce a provedli paravertebrální blokádu na pravé straně
- odstraňování nekrotické tkáně a **otvírání puchýřů se opakovalo každé 3-4 dny**, rány byly zakryty gázou napuštěnou vazelínou
- pacient dostával **morfin, kodein a také velké dávky penicilinu**
- postupně se **celá pravá ruka pokryla puchýři**, barva se změnila na zlověstně modro-purpurovou (**4. den**)
- léky proti bolesti neměly dostatečný účinek, **postižené ruce byly proto chlazeny ledem**
- rozsah ozáření začal být zjevný s pokračujícím zrudnutím kůže, které postupně pokrylo obě paže, krk a přední část trupu, **následovalo loupání vrstev pokožky (desquamace)** na postižených místech
- **10. den po nehodě** nevolnost a bolesti břicha při jídle, břicho oteklé a citlivé na pohmat
- **prudké břišní křeče se zhoršovaly, avšak po několika dnech náhle pominuly**, od dvanáctého dne až do smrti trpěl konstantním průjmem
- **15. den** obdržel krevní transfúzi, **následky**: byl bledý, jeho kůže byla studená a zvlhlá, ačkoli jeho teplota (v konečniku) byla 40,6 °C, tep byl velmi rychlý a povrchní (250 tepu/min, tachykardie), krevní tlak poklesnul na 70/50
- podávání léků ani další léčba nepomáhaly, epizoda trvala do následujícího dne, kdy se stav upravil sám od sebe

- další transfúze a intravenózní tekutiny již nebyly podávány, obava z další srdeční epizody, navíc kvůli desquamaci cévy na ruku a krku nepoužitelné
- ošetřování pacienta: pouze tišení příznaků (morfin, kodein, penicilin, chinidin, podávání vitamínu (B1) a dietní strava), chlazení popálenin ledem, odstraňování puchýřů a odumřelé tkáně a zavádění trubic do střev
- několik dní před smrtí pacient začal blouznit a poslední den upadl do bezvědomí
- jeho vzezření se drasticky změnilo díky postupujícímu hubnutí, které začalo šestého dne a pokračovalo stále rychlejším tempem, úplně ztratil kůži na břicho a spodní polovině hrudníku, chlupy na ramenou, vousy ve tváři a vlasy na spáncích
- Daghlian zemřel 15 září 16:30, 25 dnů po nehodě
- úmrtní list uvádí jako příčinu smrti "rozsáhle popáleniny horních končetin a trupu"

Nehoda 2.



Een kopie van een originele pasfoto van Louis Slotin, die genomen werd toen hij in 1944 op Los Alamos gestationeerd werd. (Bron: Los Alamos National Laboratory)



- [Louis P. Slotin](#) (1910-1946) vystudoval chemii a fyziku na University of Manitoba v Kanadě, biochemii na King's College v Londýně
- od r. 1937 asistentem na University v Chicagu (práce s cyklotronem, poté s Fermim na [Projektu Manhattan](#))
- během války Slotin pracoval v Oak Ridge (reaktor na výrobu plutonia)
- koncem roku 1944 v Los Alamos (práce se štěpným materiálem)
- schopný, nebojácný při práci s radiací, manuálně zručný - v Chicagu před válkou Slotin se svými kolegy [postavili cyklotron vlastníma rukama](#), včetně letování obvodu osciloskopu ze základních součástek, a dokonce [pokládání kabelu a betonování základu v suterénu budovy](#)
- na „svém“ cyklotronu Slotin mimo jiné také vyráběl malá množství ^{14}C a jeho spolupracovníci krmili tímto značeným uhlíkem pokusná zvířata - [holuby](#) (pro radiobiologické pokusy se používala pouze játra pokusných zvířat), Slotin byl jediný z celé skupiny, [který ty radioaktivní holuby jedl](#), občas to v práci nabízel ostatním :-)

[Slotin rád šokoval své kolegy:](#)

Jednou v Oak Ridge bylo třeba provést změnu uspořádání experimentu.

Problém: zařízení je ponořeno v nádrži s vodou (moderátor) pod reaktorem

Klasické řešení: Týdenní odstávka, odstavení reaktoru, vypumpování vody, přeuspořádání experimentu, znovuzprovoznění reaktoru

Slotinovo řešení: ponoření se do vody a rychlé přeuspořádání experimentu za chodu reaktoru

Slotinovo zdůvodnění: Většina dávky pochází od γ , které voda částečně odstíní „A [když se trochu sníží výkon reaktoru](#), výsledný neutronový tok v ozařovací nádrži pod reaktorem nebude až tak silný, takže tam bude možné pod hladinou [chvilku vydržet](#)“.

- Slotin jeden z nejdůležitějších lidí v ["Critical Assembly Group"](#)

- experimenty se štěpným materiálem se často úmyslně přivedly až na samotný okraj rozjezdu lavinovité řetězové reakce ("lechtání draka pod ocasem")
- budovu Omega stála daleko od Los Alamos, uvnitř kaňonu a oddělená byla od města několika kaňony a náhorními plošinami

Experimenty:

- spouštění kusu ^{235}U (v podobě hydridu uranu) skrz větší, subkritický kus z téhož materiálu (krátkodobé překročení kritického množství, měření radiace od štěpných produktů)
- odraz neutronů od materiálu obklopujících plutonium v těsně podkritickém stavu (Daghlian)
- Slotin: bravurní experimentátor, učil ostatní techniku zacházení se štěpným materiálem, vše se dělá ručně (nedostatek času), provedl stovky kritických experimentů, sestavil vnitřek 1. atomové bomby (Trinity, Alamogordo, Nové Mexiko), podílel se na stavbě bomby svržené na Nagasaki

Slotin montuje první atomovou bombu Trinity:



- první vážná nehoda v budově Omega 21. srpna 1945 způsobila smrt studenta Harry K. Daghliana, Slotin svému příteli dělal společnost v nemocnici, po Daghlianově smrti Enrico Fermi varoval Slotina: "Pokud si budeš takhle zahrávat, do roka bude po tobě!"

- 21. 5. 1946 - po konferenci, vzal Luis Slotin ostatní šéfy z Los Alamos na exkurzi laboratoří, návštěvníci si prohlédli laboratoře a zase odešli, jen [Alvin Graves](#) – nástupce, který měl po Slotinovi převzít jeho skupinu - řekl, že **ještě nikdy neviděl kritický experiment**
- **S. A. Kline**, student fyziky, se chtěl také podívat, ve stejné době ve speciální tlustostěnné, stíněné laboratoři v budově Omega, pracovalo **dalších pět fyziků**
- všichni se zájmem pozorovali, jak se Slotin chystá předvést pokus

Experiment:

Koule z plutonia (6,2 kg - Daghlianova) z půlky zapuštěna v podstavci z berylia. Za současného ozařování **slabým zdrojem neutronů** se na odkrytou horní půlku plutoniového míčku zvolna spouští poklop z berylia - ve tvaru duté polokoule. Množství plutonia a tloušťka berylia byly zvoleny tak, aby **došlo k překročení kritického stavu v okamžiku, kdyby poklop téměř dosednul na plutoniovou kouli** zapuštěnou v beryliovém podstavci – tomu se zabránilo ponecháním volné štěrbině mezi beryliovým podstavcem a poklopem. Velikost štěrbině určovala vzdálenost systému od kritického stavu.

Fotografie znázorňující rekonstrukci experimentu po havárii:



- **bezpečnější provedení:** poklop upevněn ve stojanu a podstavec s plutoniem se opatrně přibližuje zvedákem
- **nebezpečné (jednodušší) provedení:** podstavec stojí na stole, Slotin drží poklop v ruce – palec zasunutý v otvoru v horní části poklopu - opírá beryliový poklop hranou o podstavec a opatrně ze strany přiklápí
- o nebezpečnosti takového postupu se vědělo – proto byly vyvinuty **jednoduché stavěcí zářky** s nastavitelnou tloušťkou, dávaly mezi podstavec a poklop
- Slotin však **zářky odstranil** a ve štěrbině mezi poklopem a podstavcem držel zastrčený **konec šroubováku**

Průběh experimentu:

Slotin opatrným pootáčením ploché hrany vsunutého šroubováku zvolna zmenšuje štěrbinu mezi nyní přiklopeným poklopem a podstavcem - **každá změna pozice se projevila odpovídajícím**

zesílením intenzity tikání Geigeru. Graves se naklání blíž, aby na to lépe viděl. Slotin tento experiment v minulosti již provedl mnohokrát a byl si s sebou jistý.

Pomalým otáčením šroubováku měnil velikost štěrby, poslouchal tikání Geigeru a zároveň podával výklad sedmi lidem ve svém okolí – mnohem větší publikum, než obvykle míval při experimentech.

Beryliový poklop se mu náhle smeknul z hrany šroubováku a zaklapnul se - a plutonium bylo kompletně obklopené reflektorem. Vzplálo oslnivě modrobílé světlo a vlna horkého vzduchu se převalila místností. Slotin, který stál nejbližší, ve stejnou chvíli ucítil pachutí na jazyku a bolest v ruce držící beryliový poklop.

Slotin měl pravou ruku na experimentu a zareagoval okamžitě – odtrhnul horní část reflektoru a odhodil ho na podlahu; světlo zhaslo.

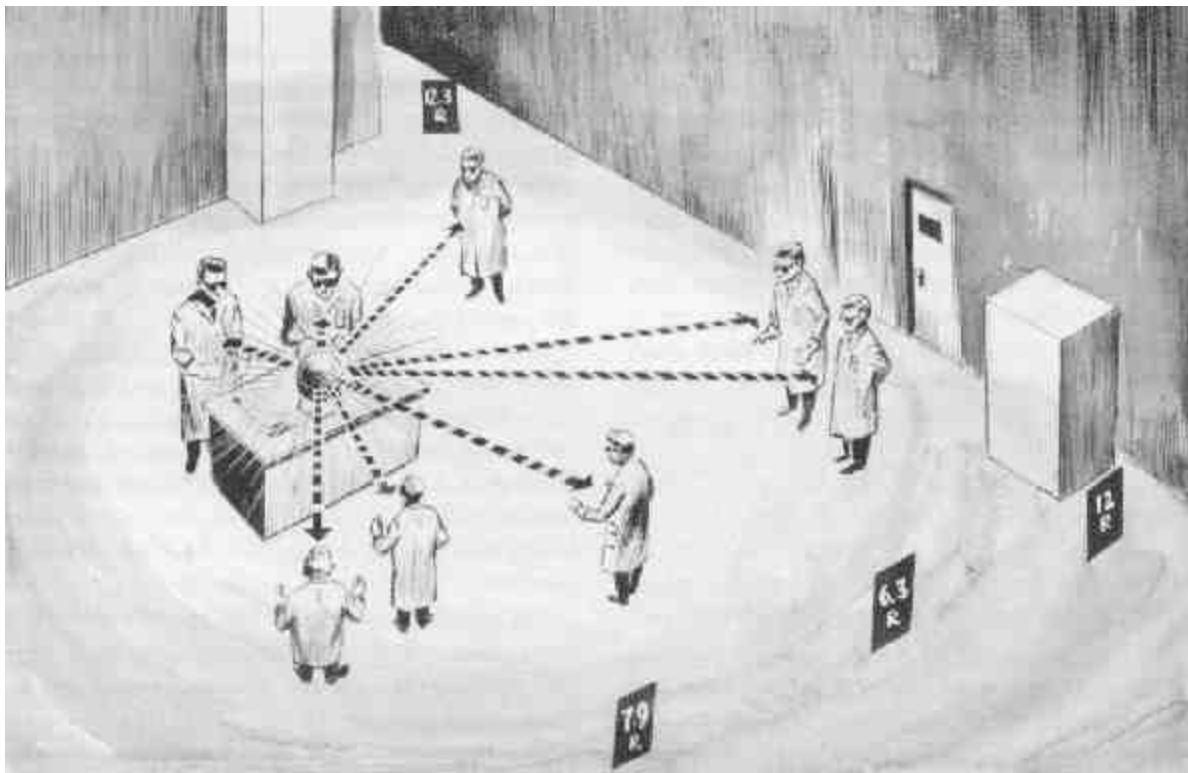
Fotografie po nehodě:



Po nehodě:

- červený graf zapisovaný ručičkou přístroje detekujícího neutrony byl na maximu – mimo okraj papíru - a Geigery dál zlověstně tikaly: prudký tok neutronů indukoval radioaktivitu v kovových předmětech v místnosti

- účastníci nehody uháněli k východu z budovy, přivolali strážného, aby jim odemknul bránu, zazněl **evakuační signál** a účastníci experimentu i ostatní lidé z budovy se rozprchli ven na silnici a za hliněný val, někteří vyběhli na nedaleký kopec s vrcholem asi 305 m nad úrovní terénu
- Slotin neutíkal - nejprve se venku potýkal se záchvatem zvracení, pak vyšel z budovy, aby oznámil kolegům, že se můžou vrátit - **radiace klesla na přijatelnou hodnotu**
- v laboratoři provedli rekonstrukci a nakreslili plánec, **aby bylo možné určit míru ozáření**, plutoniová koule přežila nehodu bez poškození



- Luis Slotin obdržel efektivní dávku cca **21 Sv**, Alvin Graves, který stál poblíž, obdržel efektivní dávku **3,6 Sv**, expozice ostatních lidí byla **2,5; 1,6; 1,1; 0,47 a 0,37 Sv** (analýza izotopového složení kovových předmětů jako jsou hodinky, mince, klíče ozářených osob, **Slotinovi se např. na jazyku udělal bolák – v okolí zlatého zubu**)
- Slotin utrpěl typické příznaky **těžké nemoci z ozáření** – výrazné zhoršení krevního obrazu, prudce bolestivý otok rukou spojený s

rozsáhlými puchýři následovala sněť, kůže na ostatních částech těla byla zrudlá a citlivá, po přechodném zlepšení se dostavil průjem, **těžké poškození ledvin**, paralýza žaludku a střev a nakonec poruchy všech ostatních životních funkcí, sedmý den po nehodě se dostavilo blouznění a potom koma

- Luis Slotin **zemřel v bezvědomí 9. den** po nehodě podobným způsobem jako Daghlian, ale rychleji; byl ozářen dávkou **čtyřikrát vyšší**

Alvin Graves a Samuel Allan Kline, přežili dávky radiace, které se v té době považovaly za smrtelné - ale dlouho se potýkali s těžkými následky ozáření (sterilita, ztráta zraku). **Graves zemřel v r.1965 na infarkt. Kline žil až do r. 2001.** Tři z pěti dalších osob však **zemřely během let na leukémii.**

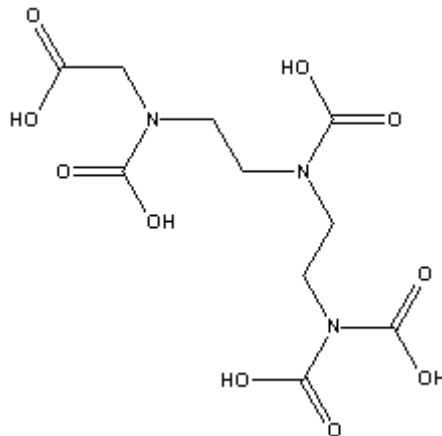
- byly zastaveny všechny kritické experimenty (do doby než byly instalovány dálkově ovládané manipulátory)

Nehoda 3.

po půlnoci 30. 9. 1976, Hanford, továrna na výrobu plutonia

- **nejtěžší případ ozáření člověka pracujícího v jaderném zařízení v americké historii – „atomový muž“**
- 65letý **Harold McCluskey** sledoval chemické pochody při dělení izotopů
- po několika hodinách této kritické směny zaslechl McCluskey syčení a spatřil hustý dým uvnitř digestoře, v příštím okamžiku **došlo k silnému výbuchu a gumová maska na jeho obličeji byla silou výbuchu stržena**, stovky úlomků radioaktivního kovu, oloveného skla a gumy se mu zasekly do kůže, **kyselina dusičná ho dočasně oslepila, což mu ztěžovalo únik**, během této doby vdechl největší kdy zaznamenanou dávku americia 241 (vedlejší produkt při výrobě Pu)

- maximální přípustné ozáření (vnitřní) americiem za celou dobu lidského života je 2 kBq, McCluskey vdechl asi 11 MBq
- 9 dalších zaměstnanců, kteří byli ozáření též, se po pár dnech vrátilo do práce
- McCluskey byl převezen do Richmondu na Nouzové odmořovací oddělení k dlouhodobé léčbě
- byl osprchován (voda ze sprchy obsahovala 100 MBq ^{241}Am)
- McCluskey strávil následujících 5 měsíců v železobetonové izolační komoře v péči sester, které nosily respirátory a ochranné oděvy
- po většinu této doby neviděl ani neslyšel
- dostával pokusné injekce DTPA (diethylenetriaminepentaacetic acid)



- léčba byla úspěšná a 14.2.1977 se McCluskey vrátil domů, protože se podařilo jeho vnitřní kontaminaci snížit o 80 %
- McCluskey se rozhodl vládu zažalovat o 975 000 dolarů odškodného, nakonec přijal 275 000 a plnou doživotní lékařskou péči
- zbytek svého života strávil v ústraní v městečku Prosser
- zemřel 17. srpna 1987 na infarkt

Nehoda 4. 1983, Mexiko

- tři pracovníci sběrný starého železa v mexickém městě Juarez poblíž hranic Texasu ukradli z nemocničního skladu vyřazený přístroj (3 tuny) na ozařování nádorů
- částí přístroje byla rotující hlavice s olověným krytem a 6010 kovovými kuličkami (1 mm \varnothing) 15 TBq ^{60}Co 2,5 GBq / kuličku
- po vhození přístroje na sběrný nákladník se olověný kryt roztrhl a kuličky se rozkutálely
- některé se přilepily na gumy okolo projíždějících aut, jiné na podrážky kolemjdoucích, hráli si s nimi děti ze skladiště starého kovu, přístroj byl zaslán dvěma mexickým slévárnám oceli, ty přístroj roztavily a použily při výrobě 500 tun armovacích želez a 17 000 noh ke stolům, které byly v první řadě určeny pro vývoz
- nehoda byla odhalena pouze náhodou: 16. ledna zabočil kamion s radioaktivními armovacími železy blízko Národní laboratoře v Los Alamos (důležité středisko amerického výzkumu jaderných zbraní) na špatnou odbočku, přitom přešel kolem speciálního čidla na měření IZ (mělo předejít tomu, aby byl vyvezen ze závodu radioaktivní materiál)
- do konce února se podařilo najít 94% všech noh od stolů; s armovacími železy byl oproti tomu větší problém, protože již byly částečně zabudovány do staveb
- železa musela být vytržena ze základů soukromých domů, státní věznice, zdravotnického centra; základy pak musely být znovu obnoveny (celkem 109 domů v Mexiku)
- v Mexiku našly přes 60 radioaktivních kuliček rozsypaných po silnici
- nejméně 200 lidí obdrželo dávky záření mezi 0,01 až 0,5 Sv, jeden mexičan dostal do rukou dávku 100 Sv, tři muži, kteří ukradli přístroj, a dva muži ze šrotového skladiště obdrželi efektivní dávku cca 4,5 Sv, nejméně 3 000 mexických pracovníků ze dvou sléváren obdrželo významnější dávky
- celkem zemřel 1 člověk a 4 významně postižení
- Mexická vláda uzavřela šrotové skladiště a uložila zamořený šrot - asi 2 000 až 6 000 tun radioaktivního kovu a kamion - do země na speciálně upraveném místě mezi Juárezem a Chihuahuou

Nehoda 5.

1985, Goiania, Brazílie

- při likvidaci radiobiologické kliniky bylo v budově ponecháno ozařovací zařízení se zdrojem ^{137}Cs (93 g $^{137}\text{CsCl}$, 50 TBq, ve vzdálenosti 1 m byl dávkový příkon 3 Gy/hod) (na BÚ A3 100 TBq)
- 2 muži odvezli zařízení domů, kde ho částečně rozebrali
- za několik dnů pak začali zvracet, přičítali to ale špatnému jídlu
- pokusili se také rozebrat kapsli (5 x 5 cm) s CsCl, po rozbití ozařovacího okénka je zaujalo tmavomodře světélkující CsCl, trochu vysypali a zkoušeli zapálit – mysleli si, že jde o střelný prach
- zařízení poté odvezli do sběrný, kde si majitel všiml, že zařízení modře světélkuje (chtěl z něj vyrobit prsten pro svou ženu) pak pozval příbuzné a známe, aby se na tento úkaz podívali
- jeden z účastníků si „onou záhadnou“ substancí udělal na břichu modře světélkující kříž a označil tak i několik domácích zvířat (několik jich později zemřelo)
- bratr majitele sběrný si CsCl odvezl domů, část vysypal doma na zem, kde si s ním hrála jeho 6 letá dcera, kterou fascinovalo jeho modré světlo, část prášku také snědla (1 GBq, dávka 6 Gy)
- první si nemocnosti v okolí všimla žena majitele sběrný
- vzala část CsCl a odvezla je do nemocnice, kde zjistili jeho vysokou aktivitu (lidé v autobuse kterým CsCl vezla, obdrželi max. dávku 0,3 Sv do nohou)

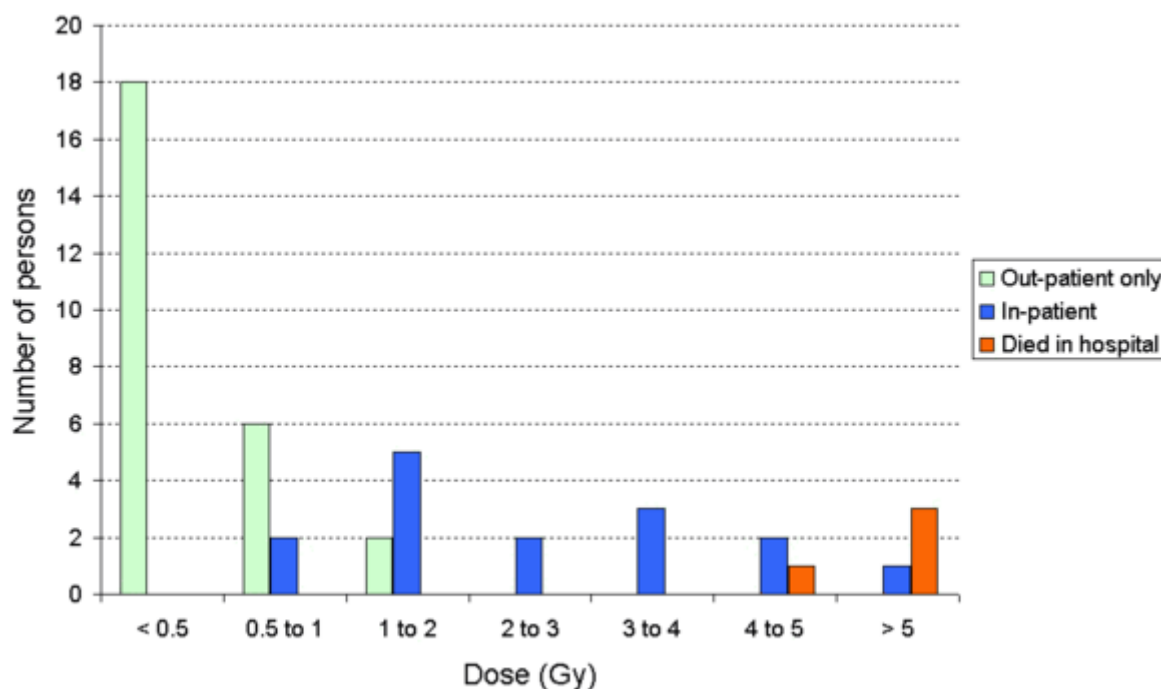
Zemřelí:

Jméno	Věk	Dávka [Gy]	Poznámky
Leide das Neves Ferreira	6	6,0	Zemřela měsíc po incidentu, pohřbena byla v olověné rakvi a zalita betonem
Gabriela Maria Ferreira	38	5,5	Zemřela měsíc po incidentu, žena majitele sběrný
Israel Baptista dos Santos	22	4,5	Zemřel cca měsíc po incidentu, zaměstnanec majitele sběrný
Admilson Alves de Souza	18	5,3	Zemřel cca 3 týdny po incidentu, zaměstnanec majitele sběrný

Přeživší:

Jméno	Věk	Dávka [Gy]	Poznámky
Devair Alves Ferreira	36	7,0	Majitel sběrný
Wagner Mota Pereira	19	-	
Maria Gabriela Abreu	57	4,3	Matka Gabriely
Geraldo Guilherme da Silva	21	3,0	
Ernesto Fabiano	-	4,5	Kladivem rozbil kontejner s CsCl
Edson Fabiano	42	5,3	Bratr Ernesta
Roberto dos Santos Alves	22	6,0	Amputováno pravé předloktí měsíc po nehodě
Ivo Alves Ferreira	40	-	Otec Leide, bratr majitele sběrný
Kardec Sebastião dos Santos	30	-	

Dávky 46 nejvíce ozářených lidí:



- u 249 osob se v různé míře projeví následky ozáření
- bylo nutné vyšetřit 119 000 osob, mnoho osob evakuovat ze zamořených domů a provést nákladné (CsCl je rozpustný) a rozsáhlé monitorovací, demoliční, odmořovací a likvidační práce (např. moč zasažených lidí byla zbavena Cs na ionexu a Cs poté uloženo na úložiště)



Nehoda 6.

1993, Ankara, Turecko

- 3 nepoužívané zářiče s ^{60}Co byly zabaleny a připraveny na převoz do USA
- balíky nebyly odeslány hned ale **proti předpisům** uloženy
- časem byly dva z nich odeslány do provozovny v Istanbulu, která byla prodána
- v prosinci 1998 noví majitelé (bratři) si vzali balíky domů a začali rozebírat ochranný kryt, pak zařízení odvezli do sběrný
- za několik dnů se u obou objevilo zvracení, doktor nejprve konstatoval otravu jídlem, poté ale správně určil příznaky nemoci z ozáření
- jeden zdroj se podařilo najít ve sběrně před roztavením, **druhý se doposud nenašel**
- 18 osob bylo hospitalizováno, u 10 se projevil příznaky nemoci z ozáření

Nehoda 7.

únor 2000, Samut Prakarn, Thajsko

- nepoužívané zařízení obsahující ^{60}Co určené pro teleterapii bylo **uskladněno ve špatně hlídaném skladu** určeném pro nová auta
- dva místní sběrači odpadu zařízení vzali, rozebrali a prodali do sběrnny
- u všech, kteří se nacházeli poblíž tohoto zdroje, se za čas vyskytla **nevolnost a zvracení**
- u těch, kteří se zařízení dotýkali, se objevili **spáleniny** (radiační dermatitida)
- u **10 lidí se projeví příznaky nemoci z ozáření, 3 zemřeli**
- přibližně 1870 lidí žijících v okruhu 100 m bylo nadměrně ozářeno
- 258 osob žijících v 50 m okruhu bylo dlouhodobě sledováno, jestli se nevyskytnou dlouhodobé účinky radiace

Zajímavá událost

listopad 2000, Francie/Čína

- při příchodu do práce dělník ve Francouzské jaderné elektrárně **spustil alarm**
- jelikož kontaminace mohla pocházet z elektrárny, byl dělník podrobně vyšetřen
- nakonec se ukázalo, že byly **radioaktivní jen jeho hodinky**
- vyšetřováním se ukázalo, že hodinky pochází z Číny, **kde v oceli roztavily kontejner s ^{60}Co používaný pro teleterapii**
- hodinky se prodávaly po celém světě
- nicméně žádné podobné hodinky se už nepodařilo objevit

Úmyslná otrava

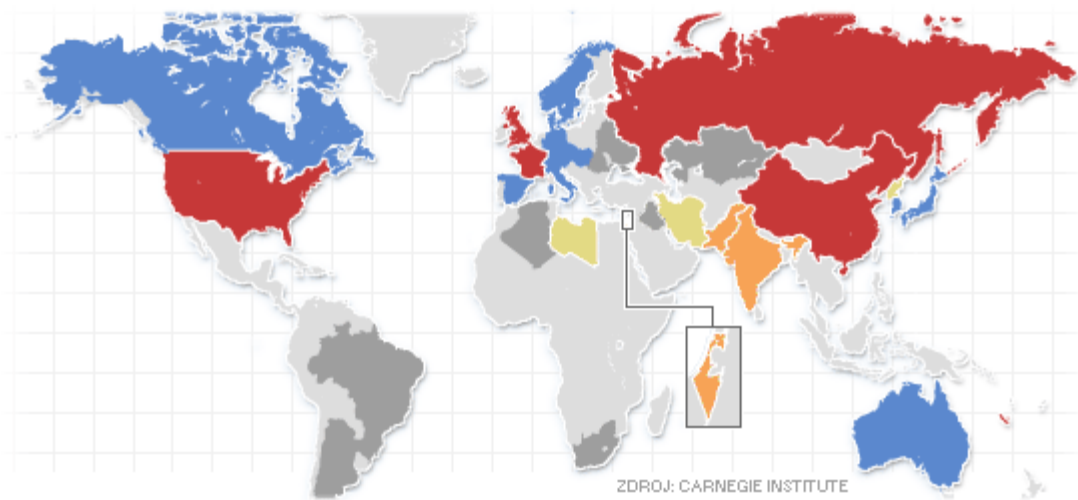
2006, Londýn, Velká Británie

Otrava (2) Alexandera Litviněnka poloniem za cca 30 milionu eur (na černém trhu), 1. 11. 2006 hospitalizován a **za 3 týdny zemřel** (jako první zemřel na otravu poloniem asistent M. C.-Sklodowské))



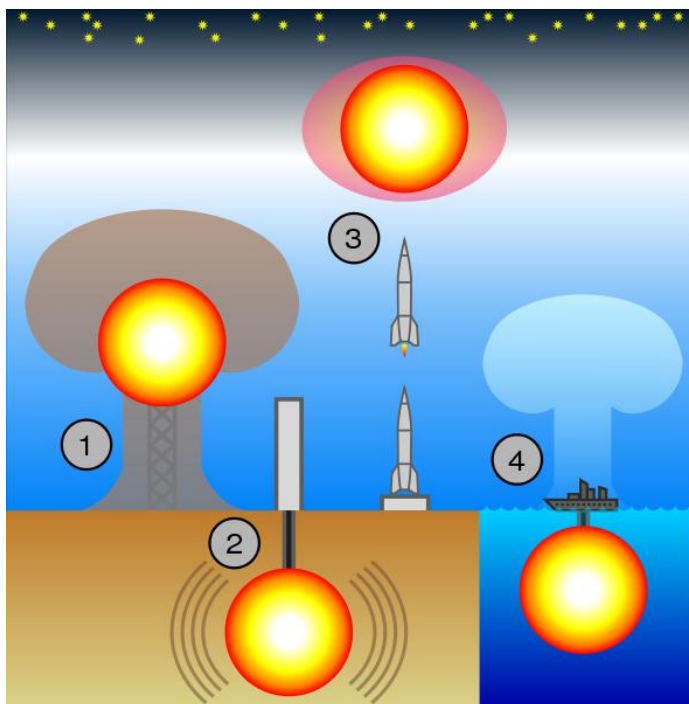
4.7. Pokusné jaderné a termonukleární výbuchy

<http://nuclearweaponarchive.org/>



- Země disponující nukleárními zbraněmi
- Země, které mají jaderný arzenál (nečlenové Smlouvy o nešíření jaderných zbraní)
- "Velmi rizikové" země
- Země, které upustily od vývoje jaderných zbraní
- Země, které v minulosti měly jaderné zbraně či jaderný program

Typy jaderných testů:



1. atmosférické, 2. podzemní, 3. stratosférické, 4. podvodní

Jaderné testy USA:

- **1. výbuch atomové bomby:** 16. 7. 1945 v 5:29:45 "Trinity" 21 kT TNT
- čtvrt hodiny po výbuchu se atomový mrak rozdělil na tři části
- největší část se pohybovala rychlostí asi 16 km/h ve výšce 14 – 17 km směrem na severovýchod
- v prvních dvou hodinách po explozi kleslo na zem jen malé množství spadu, pak bylo spadem poměrně těžce zamořeno území o rozloze asi 480 km²
- stopy radioaktivního zamoření byly zjištěny v Santa Fé, Las Vegas a v Trinidadu v Coloradu, tedy ve vzdálenosti až 420 km od místa výbuchu
- několik let po výbuchu tajně vnikali do této oblasti obyvatelé, aby nasbírali "Trinitit" – skelnou hmotu, která vznikla roztavením písku, zahřátého při výbuchu na několik milionů stupňů Celsia, hmotu pak prodávali turistům
- cca 50 km od epicentra se nachází vápencová vysočina, na které se pásli dobytek z většiny sousedících rančů, tato vysočina měla ze všech území vně zakázané oblasti největší radioaktivní zamoření
- na tomto dobytku byl také nejdříve pozorován účinek radioaktivního spadu
- asi měsíc po explozi začínaly herefordské krávy ztrácet srst, brzy jim sice zase narostla nová, ale nebyla již červenohnědá, nýbrž bílá
- krávy se proslavily jako „atomová telata“ a byly vystavovány v El Pasu a Alamogordu
- když vyšlo na základě vyšetřování najevo, že změna zbarvení srsti byla způsobena radioaktivním spadem po výbuchu Trinity, bylo 75 krav nejvíc postižených ozářením odkoupeno za finanční prostředky Projektů Manhattan a odvezeno do Los Alamos a Oak Ridge
- ve výzkumných zařízeních byla provedena další vyšetření, ještě v roce 1947 nebyly zjištěny žádné genetické změny nebo průkazné mutace, mnoho krav přežilo a zplodilo zdravé potomstvo, další byly zabity a snědeny.

<http://www.youtube.com/watch?v=7VANyY87-Q>

<http://www.youtube.com/watch?v=XtddUNQYlu0>

Operace Crossroads:

- dva atomové výbuchy (plánovány 3) o síle asi 23 kilotun, které byly provedeny v létě 1946 v laguně ostrova Bikini
- test Able - atomová bomba byla svržena z letadla a explodovala ve výšce 160 metrů
- test Baker - byla atomová bomba zavěšena pod středně velkou výsadkovou lodí na asi 30 m dlouhém kabelu a odpálena pomocí dálkového ovládní
- při každé explozi sloužilo jako cíl asi 80 námořních lodí bez posádky
- operace Crossroads se zúčastnilo asi 42 000 lidí, 240 lodí (cílové a zásobovací) a 160 letadel, na cílových lodích bylo umístěno asi 200 koz, 200 prasat a 5 000 krys, aby na nich mohly být zkoumány účinky jaderných výbuchů

Test Able

Uskutečnil se 1. 7. 1946. Podle zprávy v příručce o radiologické ochraně, která byla publikována po operaci Crossroads, došlo při explozi k oslňujícímu světelnému záblesku, který trval několik milióntin sekundy, a potom se z bublajících žhavých plynů utvořila rychle rostoucí ohnivá koule. Z centra výbuchu se šířila rázová vlna, která byla viditelná na vodě jako ohromné mihotavé světlo šířící se všemi směry. Když ohnivá koule zmizela, vytvořil se velký bílý mrak ve tvaru hříbu, který obsahoval kouř, štěpné produkty, nerozštěpené částice a prach, a zvedl se do výšky 9 – 12 km.

Test Baker

Po vyhodnocení škod způsobených výbuchem při pokusu Able byl uskutečněn 25. 7. 1946 test Baker. Na rozdíl od prvního testu vystříkl při výbuchu Bakeru z laguny do vzduchu velký gejzír vody. Příručka o radiologické obraně publikovaná po Operaci Crossroads popisuje, jak se po počátečním záblesku vytvořil obrovský vodní sloup o průměru

téměř 800 metrů a vysoký 1,5 – 1,8 km. Na jeho vrcholu se rozpínal hřibovitý mrak plynů a vodní tříšť. Když se sloup vody zřítil zpět do laguny, rozšířila se všemi směry mohutná, asi 300 metrů vysoká vlna z napěněné vody a bahna, která zalila cílové lodě. Úřední zpráva odhadla, že by členové mužstva zdržující se na palubách lodí vzdálených do 640 metrů od epicentra obdrželi smrtelnou dávku záření za 30 až 60 sekund, ve vzdálenosti do 1 550 metrů za 7 minut a ve vzdálenosti do 2 300 metrů za 3 hodiny.

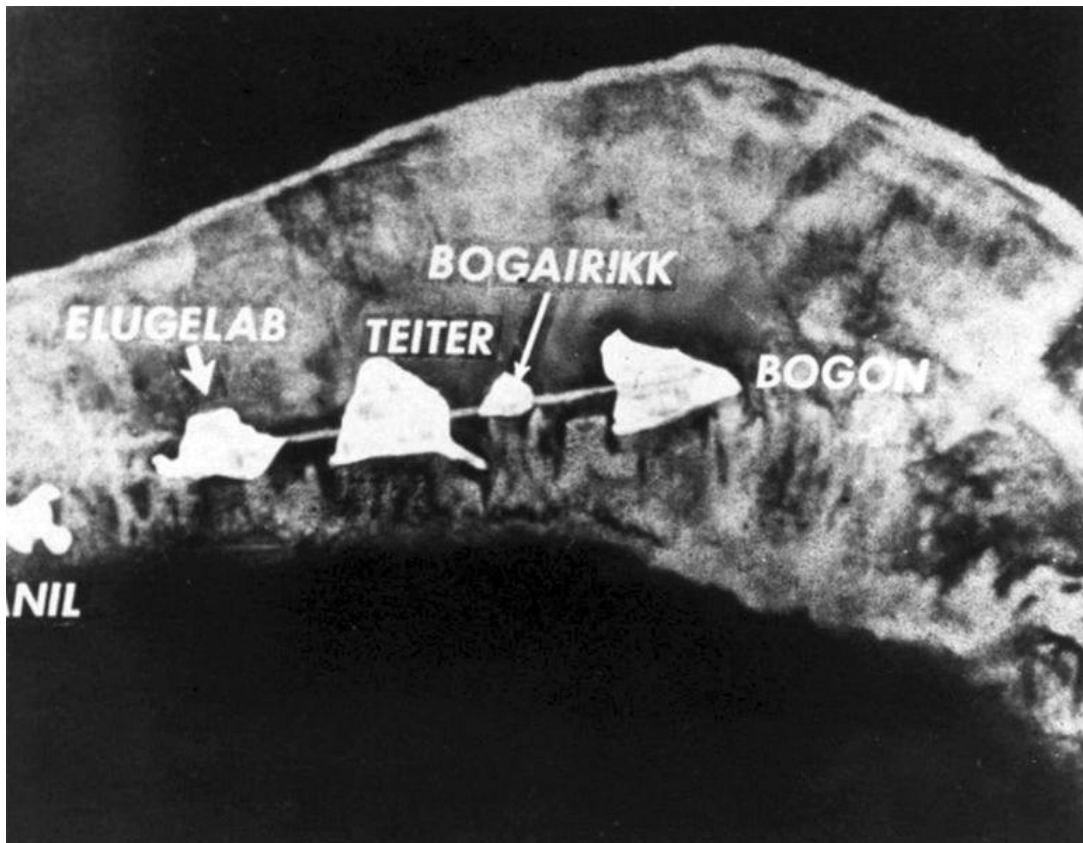
<http://www.youtube.com/watch?v=nZCFrnL3W5A>

- 1951 – 1958 bylo v USA na výzkumném území v Nevadě, 120 km na severozápad od Las Vegas, provedeno přes sto nadzemních atomových testů
- radioaktivní spad, vzniklý při testech, kontaminoval rozsáhlé okolí výzkumného území

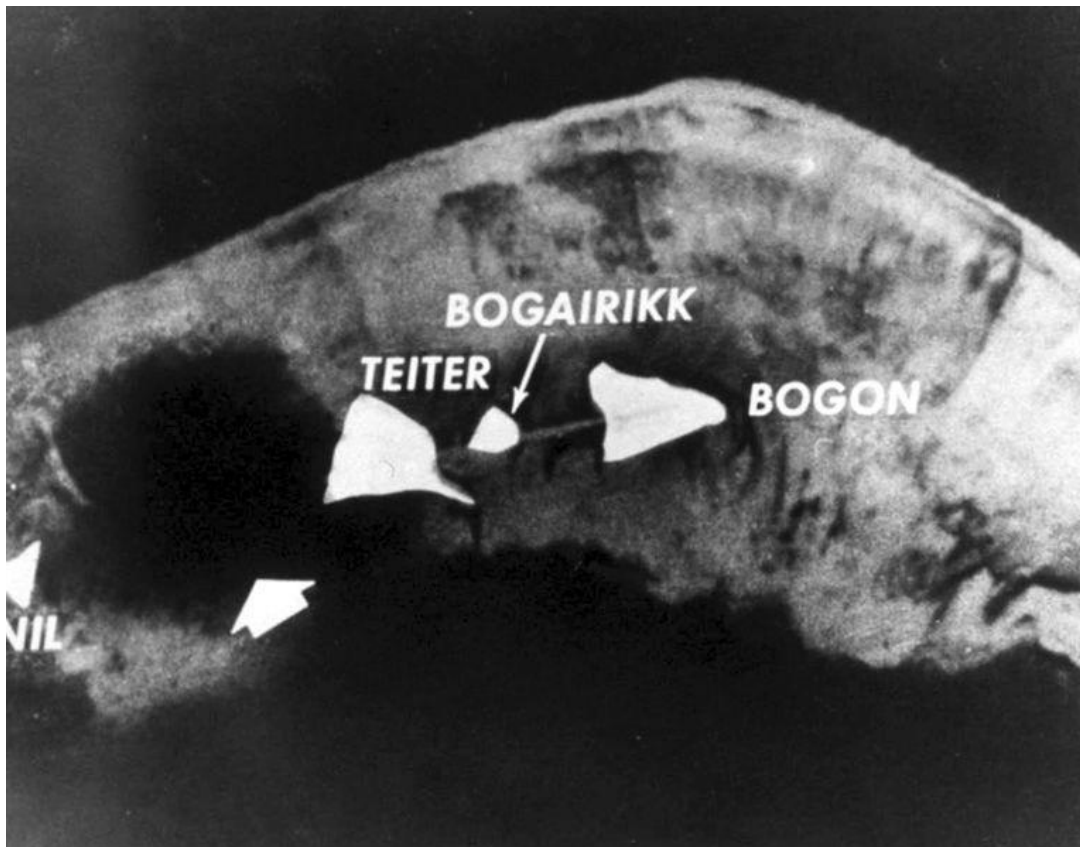
1. 11. 1952 7:15 byla odpálena první vodíková bomba s krycím jménem "Ivy Mike"

<http://www.youtube.com/watch?v=xEFXfMQ-vzQ>

Před:



Po:

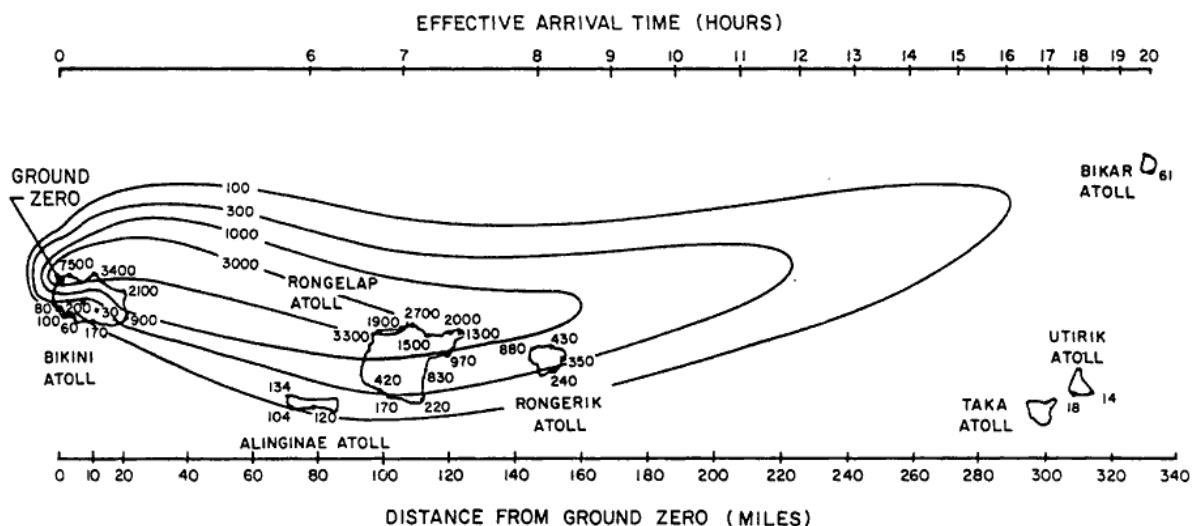


Test Bravo – největší USA TN bomba

„Dovoluji si poznamenat, že všechny testy jsou prováděny cíleně a testování se nikdy nevymklo kontrole.“

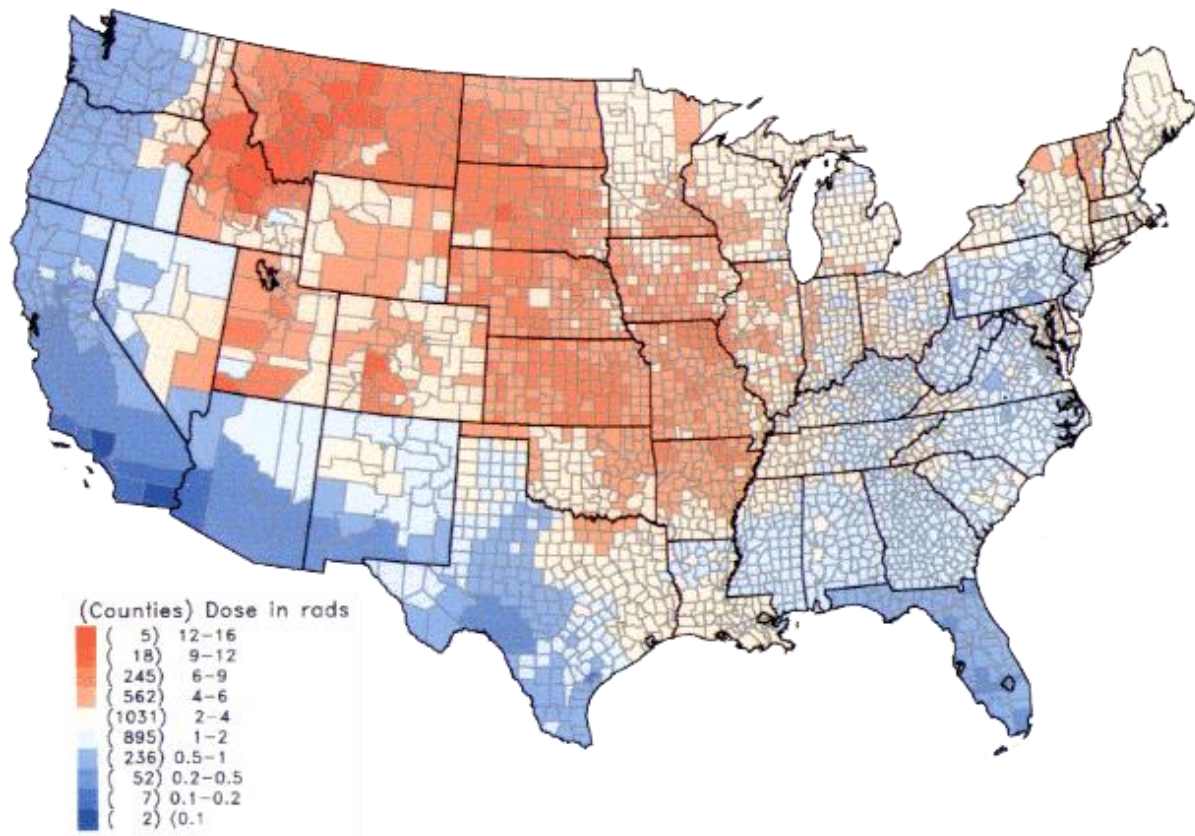
Admirál Lewis Strauss, 30.3.1954

- **1. 3. 1954 v 6.45** byla odpálena vodíková bomba s krycím jménem "Bravo" na ostrově Bikini v malé výšce nad zemí. Původně se očekávalo, že bude mít účinek **jen 6 Mt**, ale ve skutečnosti měla účinek **15 Mt**, Výbuch vytvořil kráter **hluboký 74 metrů a 1 800 metrů v průměru** a ohnivá koule rozrušila ohromné množství korálového atolu; vysála jej a roznesla nad široké území, kde se snesl ve formě radioaktivního spadu (zasáhl japonskou rybářskou loď).



<http://www.youtube.com/watch?v=fd1IFjBNNVo>

Od roku 1945 – 1962 USA provedly 331 atmosférických testů.



1 Rad = 0,01 Gy

Sovětské jaderné testy:

1. atomová bomba 29.8.1949

30. října 1961 Monster bomb (Царь - Car) 57 Mt – zmenšená verze 100 Mt bomby, letecky dopravovatelná, největší kdy odpálená

<http://www.youtube.com/watch?v=LxD44HO8dNQ>

Britské jaderné testy:

- koncem čtyřicátých let se rozhodli britští politici, stimulováni rostoucími obavami z atomové politiky Sovětského svazu a monopolu atomových zbraní USA, vyvinout ve Velké Británii vlastní atomovou zbraň
- jaderné testy byly provedeny v Austrálii

- v letech 1952 - 1958 bylo celkem provedeno 21 britských jaderných testů, 12 z nich na pevnině nebo v její blízkosti a devět na pokusném území na Vánočním ostrově

Francouzské jaderné testy:

- 1. pokus se uskutečnil 13. února 1960 pod krycím jménem Gerboise Bleue, účinky výbuchu byl kromě rozsáhlého arsenálu válečné výzbroje vystaven také celý zvěřinec a 150 alžírských zajatců (podle údajů alžírské televize, o kterých informovala francouzská tisková agentura - AFP - v Paříži 11. 5. 1985)
- v letech 1960 a 1961 následovaly tři další atmosférické pokusy a potom byly pokusy přemístěny do podzemí

5. 8. 1963 byla v Moskvě podepsána Smlouva o zákazu zkoušek jaderných zbraní v atmosféře (USA, SSSR a Velká Británie), na zemském povrchu a pod vodou (pod zemí zůstaly povoleny).

V té době se sovětský vládní předseda Chruščov dohodl s Čínou, že Rusko bude podporovat čínský program jaderných zbraní, pokud se k dohodě, která zakazuje jaderné pokusy, Čína přidá. Krátce poté Chruščov od této nabídky odstoupil a Čína na to reagovala tím, že k smlouvě o přerušení jaderných pokusů nepřistoupila.

Čína:

16. října 1964 odpálila Čína v atmosféře atomovou bombu s trhací silou 20 kt a stala se tak další atomovou velmocí.

17. června 1967 odpálila 3 Mt vodíkovou bombu.

<http://www.youtube.com/watch?v=9xoHbBkUGSQ>

Indie:

- asi 20 000 lidí se muselo přemístit z oblasti pouště Pakhran v Rádžastánu a 18. 5. 1974 tam byla provedena exploze zařízení o síle 15 kt (Smiling Buddha) v hloubce 100 m pod zemí
- kódované poselství zaslané do Nového Dillí o úspěchu exploze znělo: „Buddha se směje“

Shrnutí:

Podle **smlouvy o nešíření jaderných zbraní** (1. července 1968, v roce 1970 vstoupila v platnost, v současnosti je smlouva podepsána 189 zeměmi) existuje 5 jaderných velmocí (vlastní jaderné zbraně):

Spojené státy americké

- první jaderný výbuch: 16. 7. 1945
- první termonukleární výbuch: 1. 11. 1952
- počet nukleárních hlavic: > 10 000
- počet testů jaderných zbraní: 1030 (24 společně s Velkou Británií)

Sovětský svaz/Rusko

- první jaderný výbuch: 29. 8. 1949
- první termonukleární výbuch: 12. 8. 1953
- počet nukleárních hlavic: > 10 000
- počet testů jaderných zbraní: 715

Velká Británie

- první jaderný výbuch: 3. 10. 1952
- první termonukleární výbuch: 15. 5. 1957
- počet nukleárních hlavic: 185
- počet testů jaderných zbraní: 45

Francie

- první jaderný výbuch: 13. 2. 1960
- první termonukleární výbuch: 24. 8. 1968
- počet nukleárních hlavic: 350

- počet testů jaderných zbraní: 210

Čína

- první jaderný výbuch: 16. 10. 1964
- první termonukleární výbuch: 17. 6. 1967
- počet nukleárních hlavic: 400
- počet testů jaderných zbraní: 45

Navzdory smlouvě o nešíření jaderných zbraní provedly test jaderných zařízení další 3 státy:

Indie

- první jaderný výbuch: 18. 5. 1974
- počet nukleárních hlavic: > 60
- počet testů jaderných zbraní: 3

Pákistán

- první jaderný výbuch: 28. 5. 1998
- počet testů jaderných zbraní: 2

Korejská lidově demokratická republika

- v roce 2003 odstoupila od smlouvy o nešíření jaderných zbraní
- první jaderný výbuch 9. 10. 2006 (druhý 25. 5. 2009)

Státy podezřelé z vlastnictví jaderných zbraní:

Izrael

- počet nukleárních hlavic: > 300
- počet testů jaderných zbraní: 1?
- není signatářem smlouvy o nešíření jaderných zbraní

Irán

- počet nukleárních hlavic:?

- je signatářem smlouvy o nešíření jaderných zbraní

Státy, které vlastnily jaderné zbraně v minulosti:

Jihoafrická republika

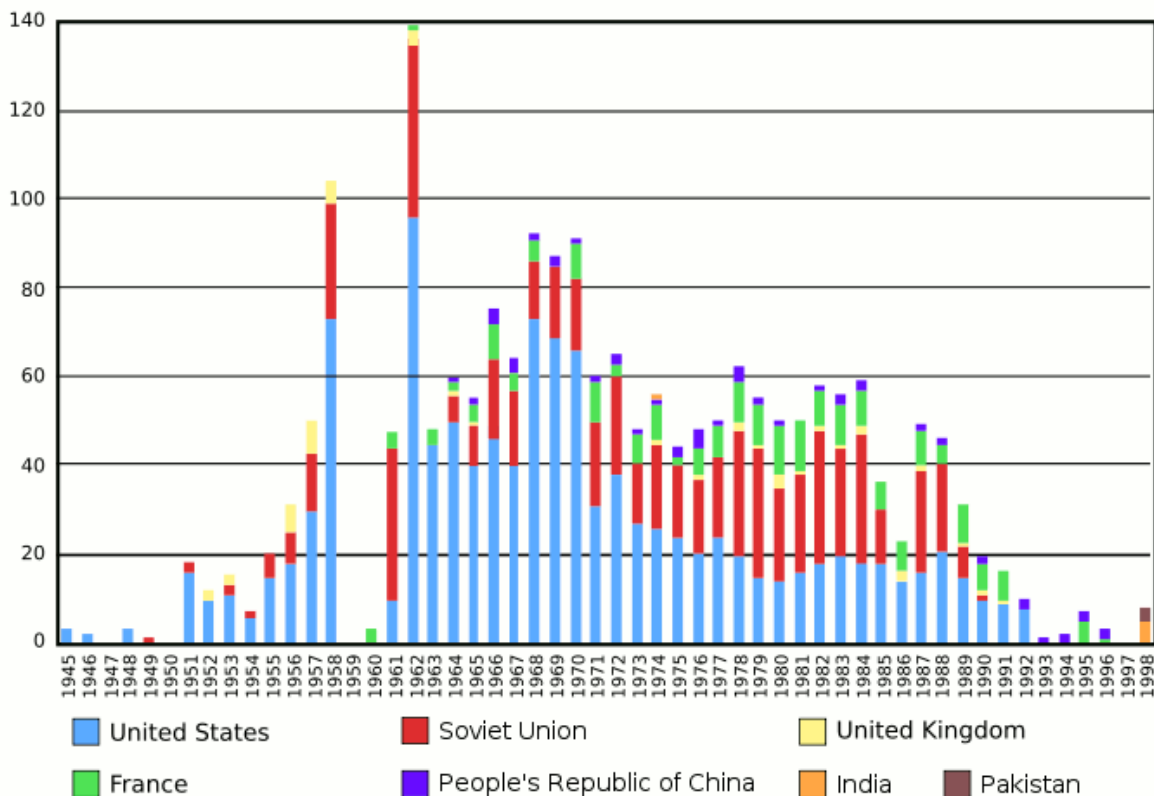
- počet nukleárních hlavic: cca 6 (dobrovolně se jich vzdala v roce 1993)

Bělorusko, Ukrajina a Kazachstán

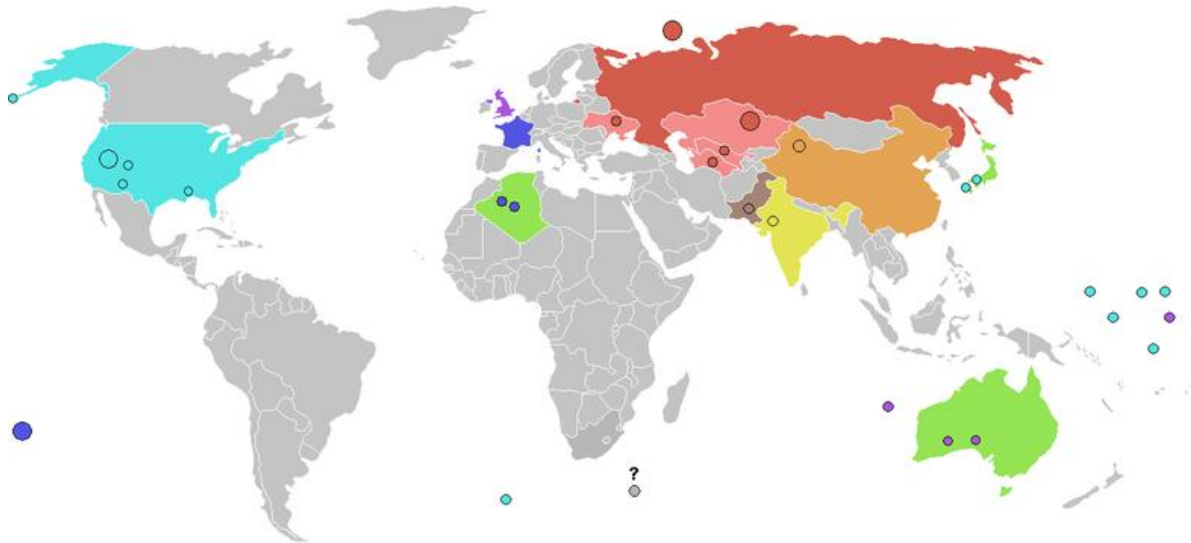
- dobrovolně zničily jaderné zbraně "zděděné" po rozpadlém Sovětském svazu
- celkový počet postavených nukleárních zbraní >128 000

Časový přehled testování jaderných zbraní:

Worldwide nuclear testing, 1945-1998



Testovací lokace jednotlivých států:



4.8. Umělé zdroje IZ

- největší podíl na ozáření z umělých zdrojů má používání ionizujícího záření a radioaktivních látek v lékařství (cca 85 %)
- RTG plic 1-10 mGy, zubní snímek 10 mGy, panoramatický snímek chrupu 300 mGy
- vážné ohrožení představovaly v 50. – 60. letech nadzemní zkoušky jaderných zbraní
- v roce 1963 testy zakázány od té doby aktivita RN klesá
- dalším zdrojem jsou radionuklidové zářiče γ (^{60}Co a ^{137}Cs), při neodborné likvidaci zemřelo 19 lidí (5 nehod)
- dalším malým umělým zdrojem IZ jsou nehody družic obsahující Pu (v roce 1964 shořela družice v atmosféře a rozptýlilo se $6,3 \cdot 10^{14}$ Bq ^{238}Pu (dávka 0,4 μSv z inhalace))
- TV zdroje RTG 15 – 25 keV, 5 cm od obrazovky 5 $\mu\text{Gy/hod}$

4.9. Radioaktivní odpady

- od ostatních odpadů se tyto odpady liší tím, že jsou radioaktivní
- vzniká při těžbě a zpracování uranových rud, výrobě jaderného paliva, provozu jaderných reaktorů a elektráren, přepracování vyhořelého jaderného paliva, likvidaci jaderných elektráren, při výrobě a používání radioaktivních látek v různých odvětvích lidské činnosti
- většina radioaktivních odpadů se zpracovává a po jistou dobu uchovává izolovaně od ŽP

Dělení odpadů (podle měrné aktivity a uvolňovaného tepla):

- nízko aktivní
 - krátkodobé
 - dlouhodobé
- středně aktivní
 - krátkodobé
 - dlouhodobé
- vysoce aktivní (2 kW/m³)

Nízko a středněaktivní odpady: z JE – iontoměniče, filtry, materiály z oprav a údržby, odpad z prádelen pracích oděvů, zamořené oděvy, dekontaminační materiál; ze zdravotnictví – pokusná zvířata, injekční stříkačky, nádobí, vata, chemikálie

Vysoko aktivní odpady: vyhořelé palivo, odpad ze závodů na přepracování vyhořelého paliva (1% hmotnosti všech odpadů ale 90% aktivity odpadů, obsahuje dlouhodobé RN – nutno uložit po dobu tisícovek let)

Úprava odpadů: zmenší se jejich objem a převedou se do stabilních nerozpustných forem:

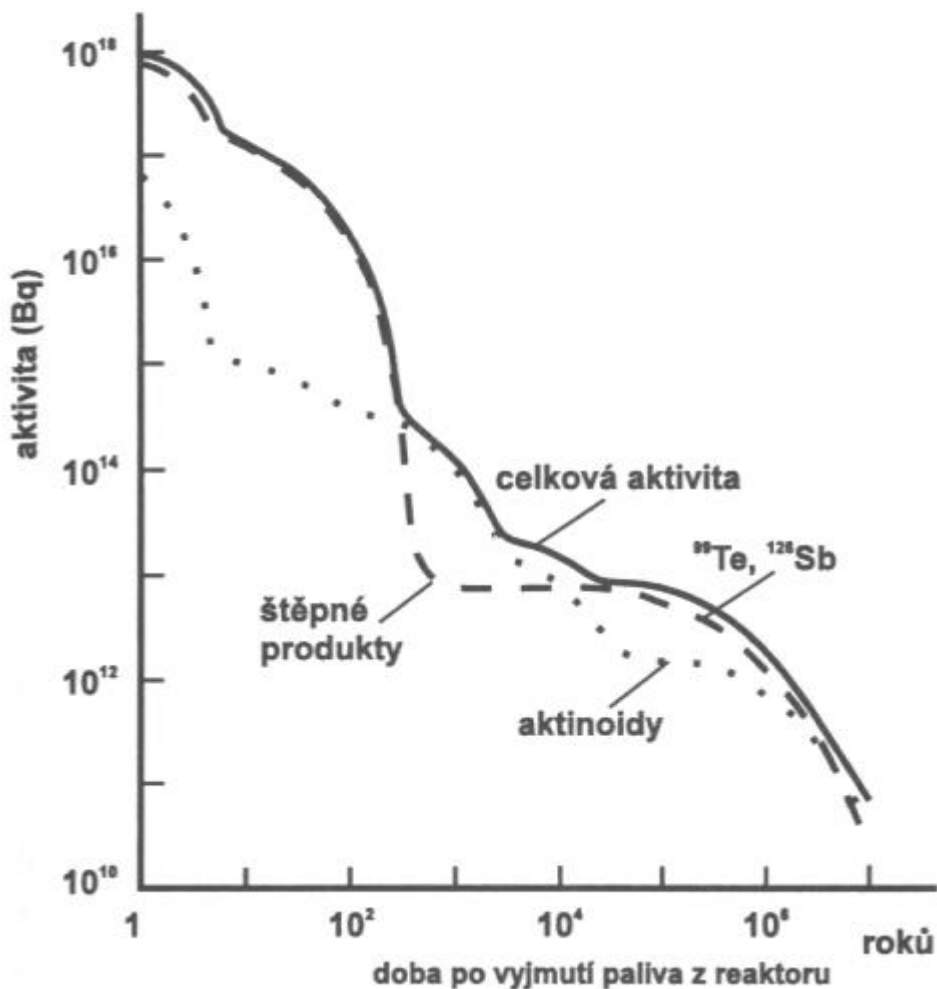
- cementování (mísení s cementem)
- bitumenace (mísení s bitumenem – asfaltová živice)
- vitrifikace (vysušení a vmísení do skloviny – vhodné pro vysoko aktivní odpady)

Ukládání odpadů:

- úložiště musí být zajištěno proti úniku radioaktivních látek do ŽP
- **nízko a středně aktivní odpady** se ukládají do povrchových či mělkých podpovrchových úložišť (dno je mírně skloněné s jílovitým terénem, vysypané pískem, voda se odvádí do monitorované jímky, **středně aktivní odpady** jsou uloženy v úložištích s betonovými jímkami, na podloží ze stabilních krystalických hornin, drenáž ústí do monitorovaných jímek, po zaplnění a uzavření by měla být garantována nepřístupnost po dobu 100 let
- vysoko aktivní odpady se ukládají **do hlubinných úložišť**, do dolů či pod hladinu (v roce 1972 zakázáno), předtím se nacházejí v meziskladu (mokrém – kontejnery v bazénu, suchém – kontejnery ve vhodné budově)
- u nás kontejnery **CASTOR** (litinová válcová nádoba 4,1 m vysoká o průměru 2,7 m a tloušťce stěn 37 cm, hmotnost 131 t, trojité víko plněné heliem (sleduje se tlak), povrch je kvůli odvodu tepla žebrován



- po 40 letech v meziskladu je aktivita dána především aktivitou štěpných produktů ^{90}Sr , ^{137}Cs a transuranů, pokud se nepřepřacovává, je uloženo do konečných úložišť
- po tisíci letech ^{90}Sr a ^{137}Cs zmizí a k aktivitě bude přispívat především ^{243}Am , ^{240}Pu , ^{239}Pu a ^{99}Tc
- za $10^5 - 10^6$ let bude k aktivitě přispívat ^{229}Th a produkty jeho přeměny, (^{229}Th vzniká z mateřského RN ^{237}Np ($2,1 \cdot 10^6$ let))



Recyklace vyhořelého jaderného paliva:

Používají se především extrakční metody

PUREX (Plutonium and Uranium Recovery by EXtraction)

- extrakce U a Pu z vodné do organické fáze
- nejrozšířenější proces v průmyslu v současnosti
- získává se tak i Pu pro zbraně

UREX (*URanium EXtraction*)

- zmenšení objemu vyhořelého jaderného
- modifikace PUREXu, Pu se neextrahuje
- odstraní se U a ten se následně přepracovává

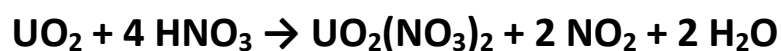
TRUEX (*TRansUranic EXtraction*)

- získává se Am a Cm
- snížení alfa aktivity odpadu, odstranění nejaktivnější části odpadu
- na rozdíl od PUREXu a UREXu se nejedná o extrakční proces

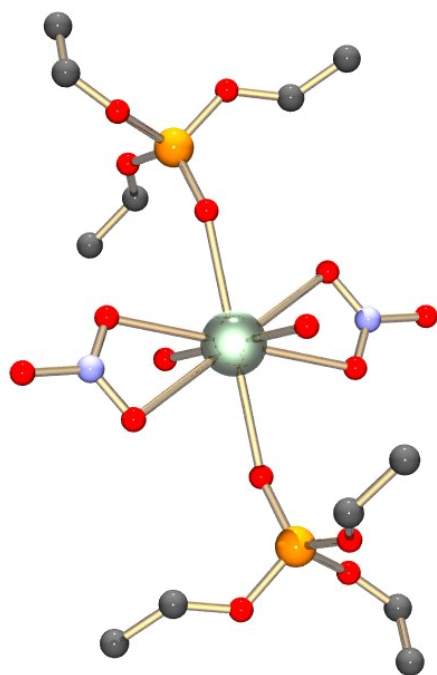
DIAMEX, SANEX, UNEX – vyvinutý v Rusku a ČR.

ad PUREX

- rozpouštění v HNO₃ (7 M)



- odfiltrování jemných nerozpuštěných částic
- extrakce do 30% TBP (tributylfosfát v petroleji)
- extrahuje se U a Pu
- štěpné produkty zůstávají v HNO₃
- následuje několik extrakcí za sebou
- radiolýzou vzniká dibutylhydrogenfosfát (nižší efektivita extrakce)
- je efektivní použít iontoměniče
- reextrakce do 0,2 M HNO₃, izolace, tepelný rozklad, redukce na UO₂ / PuO₂



J.H. Burns, *Inorganic Chemistry*, 1983, 22, 1174

Komplex vzniklý při extrakci triethylfosfátu a $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2$

ad UREX

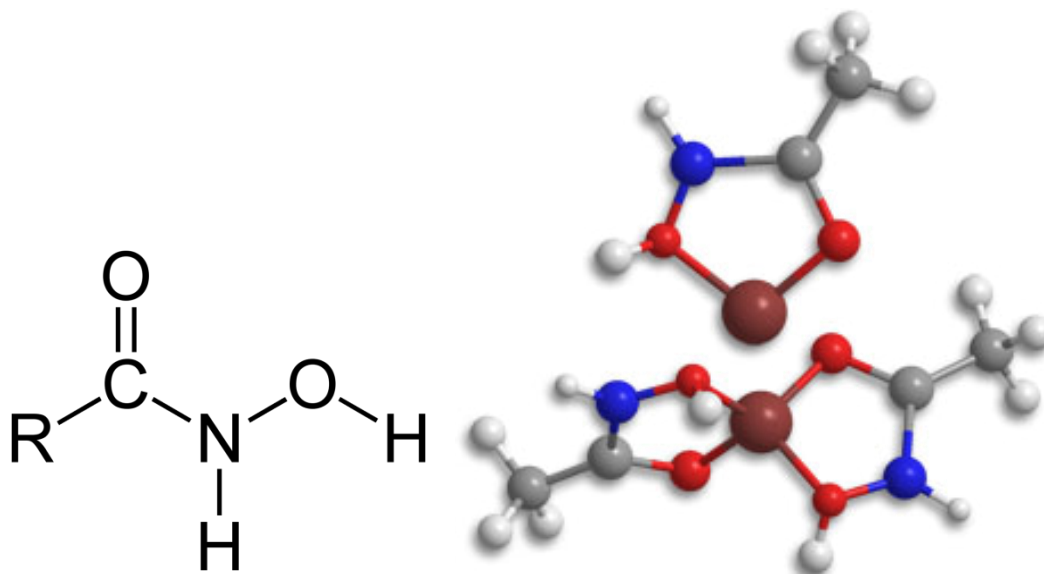
Přídavek AHA (k. acetylhydroxamové, či k. fenylhydroxamové)

$$\beta_{\text{U(VI)}} > \beta_{\text{U(IV)}} > \beta_{\text{Np(IV)}} > \beta_{\text{Pu(IV)}}$$

$$\beta_{\text{Pu(IV)}} / \beta_{\text{U(VI)}} = 10^{-4}$$

Silně se tedy sníží extrakce Pu do organické fáze

L. Nuñez, G. F. Vandegrift, ARGONNE NATIONAL LABORATORY, Report from March 2001



Starší postup separace Pu

- po extrakci do TBP redukce Pu^{IV} na Pu^{III} pomocí Fe(SO₃NH₂)₂
- vyloučené Pu se oxiduje na Pu^{IV} a vysrážení jako Pu(C₂O₄)₂ · 6 H₂O
- tepelným rozkladem vznik PuO₂

Další starší metody

Separace těkavých fluoridů

- převedení na fluoridy fluorem a následná destilace
- problém TcF₆ (b. p. 55,3 °C) a UF₆ (b. p. 56,5 °C)
- selektivní redukce fluoridů

Obdoba separace těkavých chloridů.

Country	Reprocessing site	Fuel type	Procedure	Reprocessing capacity tU/yr	Operating period
Belgium	Mol	LWR, MTR (Material test reactor)		80	1966-1974
Germany	Karlsruhe, WAK	LWR		35	1971-1990
France	Marcoule, UP 1	Military		1200	1958-1997
France	Marcoule, CEA APM	FBR	PUREX DIAMEX SANEX	6	1988
France	La Hague, UP 2	LWR	PUREX	900	1967-1974
France	La Hague, UP 2-400	LWR	PUREX	400	1976-1990
France	La Hague, UP 2-800	LWR	PUREX	800	1990
France	La Hague, UP 3	LWR	PUREX	800	1990
UK	Windscale	Magnox		1 000	1956-1962
UK	Sellafield, B205	Magnox	PUREX	1,500	1964
UK	Dounreay	FBR		8	1980
UK	THORP	LWR	PUREX	1,200	1990
Italy	Rotondella	Thorium		5	1968 (shutdown)
India	Kalpakkam	Military		100	1998
India	Trombay	Military	PUREX	60	1965

India	Tarapur	CANDU		100	1982
Japan	Tokaimura	LWR		210	1977
Japan	Rokkasho	LWR		800	2005
Russia	Mayak Plant B	Military		400	1948-196?
Russia	Mayak Plant BB, RT-1	LWR	PUREX + Np separation	400	1978
Russia	Krasnojarsk, RT-2	WWER		1,500	under construction
USA, NY	West Valley	LWR		300	1966-1972