

CORE122 Chemie a společnost
– Mgr. Jiří Křivohlávek



Náplň přednášky

1. Přirozená a umělá radioaktivita
2. Objev přirozené radioaktivity a navazující výzkum
3. Využití radionuklidů a ionizujícího záření
4. Objev štěpné reakce a následný výzkum vedoucí k válečnému a mírovému využití
5. Jaderná energetika
6. Jaderný odpad
7. Jaderná fúze
8. Legislativa a dohled nad jadernou bezpečností

Literatura

Jiří Hála: [Radioaktivita, ionizující záření, jaderná energie](#), Konvoj, Brno, 1998

Jiří Hála: [Radioaktivní izotopy](#), Sursum, Tišnov, 2013

Aplikace

[Isotope Browser](#)

1. Přirozená a umělá radioaktivita:

- **Přirozená radioaktivita:** Objevena Henri Becquerelem v roce 1896, kdy zjistil, že uranové soli emitují záření. Přirozená radioaktivita pochází z přírodních zdrojů jako uran, thorium a radon.
- **Umělá radioaktivita:** Objevili ji v roce 1934 Irène Joliot-Curie a Frédéric Joliot-Curie, kteří vytvořili radioaktivní izotopy bombardováním stabilních atomů alfa částicemi.

Objev přirozené radioaktivity a navazující výzkum

- Henri Becquerel objevil přirozenou radioaktivitu v roce 1896 při zkoumání fluorescenčních materiálů. Marie a Pierre Curie následně izolovali radium a polonium, což vedlo k dalšímu výzkumu radioaktivních prvků a jejich vlastností.

2. Využití radionuklidů a ionizujícího záření:

- Radionuklidy se používají v medicíně (např. v radioterapii pro léčbu rakoviny), průmyslu (např. v radiografii pro kontrolu kvality materiálů) a ve vědeckém výzkumu (např. jako stopovací látky). Ionizující záření se využívá pro sterilizaci lékařských nástrojů a potravin.

3. Objev štěpné reakce:

- Štěpnou reakci objevili Otto Hahn a Fritz Strassmann v roce 1938. Teoreticky ji vysvětlili Lise Meitnerová a Otto Frisch. Tento objev vedl k vývoji jaderných zbraní během druhé světové války (projekt Manhattan) a následně k mírovému využití v jaderné energetice.

4. Jaderná energetika

- Jaderná energetika využívá štěpnou reakci pro výrobu elektřiny. První komerční jaderná elektrárna byla spuštěna v roce 1954 v Obninsku, Rusko. Jaderné elektrárny poskytují významnou část světové elektřiny s nízkými emisemi CO₂.

5. Jaderný odpad

- Jaderný odpad vzniká při provozu jaderných elektráren a zahrnuje vyhořelé palivo a radioaktivní materiály. Tento odpad je nutné bezpečně ukládat na dlouhé období. Existují metody jako hlubinné úložiště, které poskytují bezpečné a trvalé řešení pro skladování jaderného odpadu.

6. **Jaderná fúze:**

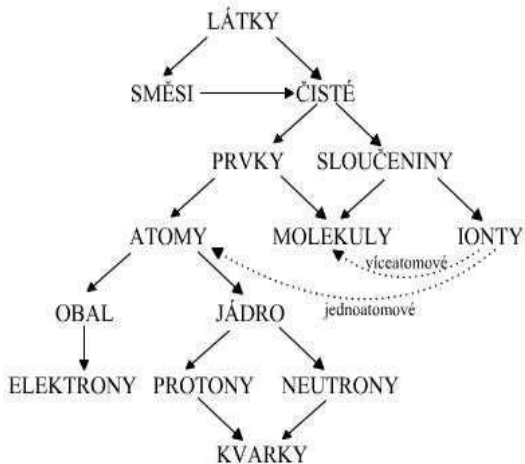
- Jaderná fúze je proces, při kterém se spojují lehčí jádra za vzniku těžšího jádra a uvolňuje se obrovské množství energie. Fúze je základem energie hvězd, včetně Slunce. V současnosti probíhají výzkumy, jako projekt ITER, zaměřené na využití fúze pro výrobu elektřiny, která by mohla poskytnout nevyčerpatelný a čistý zdroj energie.

7. **Legislativa a dohled nad jadernou bezpečností:**

- Legislativa a dohled nad jadernou bezpečností jsou klíčové pro zajištění bezpečného provozu jaderných zařízení. Organizace jako Mezinárodní agentura pro atomovou energii (IAEA) a národní regulační úřady stanovují a prosazují bezpečnostní normy a předpisy, monitorují jaderná zařízení a zajišťují, aby byly dodržovány bezpečnostní protokoly.

Struktura hmoty

Hmota je tvořena z hlediska vnějšího pohledu různými látkami.
Následující schéma uvádí tento pojem do souvislosti s dalším členěním



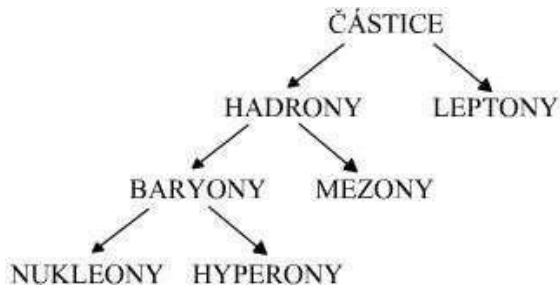
Atomy jsou tvořeny **elementárními částicemi** (pojem původně vyhrazený pro nedělitelný útvar bez vnitřní struktury)

Elementární částice dnes – cca: **100 částic**

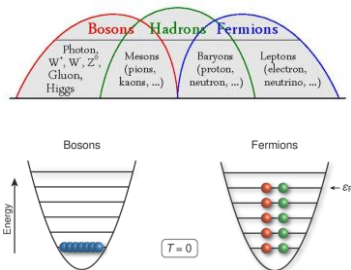
100 antičástic

Následující schémata naznačují zjednodušeně členění elementárních částic.

Podle interakce



Podle spinu



Atom je nejmenší hmotnou a **chemicky nedělitelnou částicí**.

Je tvořen **jádrem**, které obsahuje protony a neutrony, a **elektronovým obalem**.

Elementární částice tvořící atom				
Elementární částice	Objevitel (rok)	Hmotnost	Náboj Q/C	Symbol
		m/u		
proton	Rutherford (1920)	1,0072	$+1,60210 \cdot 10^{-19}$	p^+ nebo ${}_1^1p^+$
neutron	Chadwick (1932)	1,0086	0	n^0 nebo ${}_0^1n$
elektron	Thomson (1897)	$5,4857 \cdot 10^{-4}$	$-1,60210 \cdot 10^{-19}$	e^- nebo ${}_{-1}^0e^-$

A
Z
X

protonové (atomové) číslo Z
nukleonové číslo A
neutronové číslo N

počet protonů v jádře
počet nukleonů, tj. protonů a neutronů v jádře
počet neutronů v jádře $A - Z$

Definice prvku

Soubor atomů, které mají stejné atomové číslo Z (N mohou mít různé) se nazývá **prvkem**.

Příklad:

Bílý fosfor je tvořen atomy ${}_{15}\text{P}_4$.

Definice nuklidu

Soubor naprosto identických atomů, které mají stejné atomové číslo Z a neutronové číslo N, se nazývá **nuklidem**. Vykazuje-li nuklid radioaktivitu, pak jde o **radionuklid**.

Příklad:

Atomová hmotnostní jednotka je definována pomocí hmotnosti nuklidu ${}^{12}_6\text{C}$.

Definice pojmu izotop

Izotop je označení pro nuklid v rámci souboru nuklidů jednoho chemického prvku. Tento pojem vyjadřuje skutečnost, že prvek je tvořen několika typy jader, tedy atomy, které mají stejné Z, ale liší se počtem neutronů v jádře.

Příklad:

Vodík je v přírodě zastoupen třemi izotopy ${}^1_1\text{H}$, ${}^2_1\text{H}$, ${}^3_1\text{H}$.

Prvky polyizotopické

Prvek	A_r (stř.)	Izotop	Výskyt v přírodní izotopové směsi (%)	A_r
Vodík	1,0179	^1H	99,985	1,007825
		^2H	0,015	2,014102
Lithium	6,941	^6Li	7,52	6,015126
		^7Li	92,48	7,016005
Uhlík	12,011	^{12}C	98,892	12,00000
		^{13}C	1,108	13,003354
Kyslík	15,9994	^{16}O	99,759	15,994915
		^{17}O	0,037	16,999133
		^{18}O	0,204	17,999150
Draslík	39,08	^{39}K	93,08	38,963714
		^{41}K	6,92	40,961385
Cín	118,69	^{112}Sn	0,96	111,904940
		^{114}Sn	0,66	113,902960
		^{115}Sn	0,35	114,903530
		^{116}Sn	14,30	115,902110
		^{117}Sn	7,61	116,903060
		^{118}Sn	24,03	117,901790
		^{119}Sn	8,58	118,903390
		^{120}Sn	32,85	119,902130
		^{122}Sn	4,72	121,903410
		^{124}Sn	5,94	123,905240
Uran	238,029	^{235}U	0,72	235,03493
		^{238}U	99,28	238,050760

Prvky monoizotopické	beryllium (⁹Be)	fosfor (³¹P)
	fluor (¹⁹F)	kobalt (⁵⁹Co)
	sodík (²³Na)	jod (¹²⁷I)
	hliník (²⁷Al)	zlato (¹⁹⁷Au) aj.

Přirozené radionuklidy

Radionuklid	Poměrný výskyt (%)	Poločas (roky)	Základní emise a jejich zastoupení (‰)	Energie záření (MeV)
⁴⁰ K	0,012	1,26 · 10 ⁹	β ⁻ (89) γ (11)	1,33 1,46
⁵⁰ V	0,25	6 · 10 ¹⁵	β ⁻ (30) γ (70)	0,78 1,55
⁸⁷ Rb	27,9	4,8 · 10 ¹⁰	β ⁻ (100)	0,28
¹¹⁵ In	95,8	6 · 10 ¹⁴	β ⁻ (100)	0,48
¹³⁸ La	0,089	1,12 · 10 ¹¹	β ⁻ (80) γ (70)	0,21 0,81; 1,43
¹⁴⁴ Nd	23,9	2,4 · 10 ¹⁵	α	1,83
¹⁴⁷ Sm	15,1	1,05 · 10 ¹¹	α	2,23
¹⁵² Gd	0,20	1,1 · 10 ¹⁴	α	2,1
¹⁷⁴ Hf	0,163	2 · 10 ¹⁵	α	2,5
¹⁷⁶ Lu	2,6	2,2 · 10 ¹⁰	β ⁻ , γ	0,43
¹⁸⁷ Re	62,7	4,3 · 10 ¹⁰	β ⁻	0,003

Dnes je známo více než 2000 nuklidů, z nichž je pouze cca 266 stabilních. Ostatní jsou nukleárně nestabilní, a proto podléhají radioaktivní přeměně.

Pojem radioaktivní prvek lze použít pouze pro prvky:

- které nemají stabilní nuklidy
- mohou se vyskytovat v přírodě nebo jsou připraveny uměle
- neoznačují se tak prvky, které mají pouze jeden radioaktivní izotop s "malou" aktivitou.

Pojem izobary (používá se v množném čísle) je vyhrazen nuklidům, které mají stejné nukleonové a různé protonové číslo, např.: ^{40}Ar , ^{40}K , ^{40}Ca

Platí Mattauchovo pravidlo, které říká, že v takové řadě izobar, bývá prostřední nuklid radioaktivní.

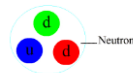
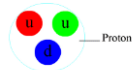
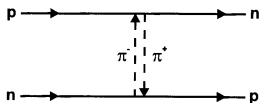
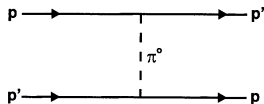
⇒ ^{40}K je přirozeným beta zářičem, součástí přirozeného radioaktivního pozadí

Izotony (příliš se nepoužívá) představují nuklidy, které mají stejný počet neutronů v jádře, např. ^3_1H a ^4_2He .

Atomové jádro

- Jádra běžných atomů se skládají z protonů a neutronů, mezi kterými existují silné jaderné interakce. **Jaderné síly** jsou nábojově nezávislé (možnost výměny mezi protonem a neutronem), krátká doba interakce (10^{-23} s).
- Je v něm soustředěna prakticky veškerá hmotnost atomu.
- Nukleony mají svůj jaderný spin rovný $\frac{1}{2}$.
- Mezi nukleony působí silné jaderné interakce, které jsou podstatou jaderných sil (**výměna virtuálního π mezonu**).

Výměnné reakce
nukleonů

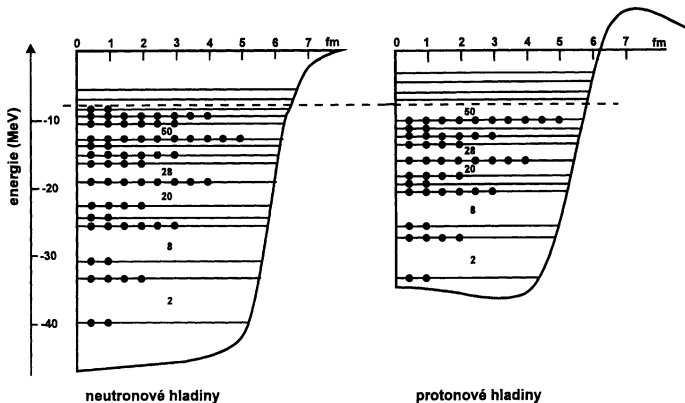


Výměna gluonu mezi
dvěma nukleony

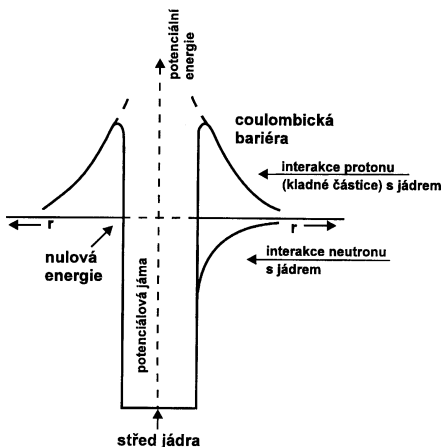


Hladinový model jádra

- spin protonu i neutronu je $\frac{1}{2}$,
- platí obdoba Pauliho principu: nukleony v potenciálové jámě obsazují postupně jednotlivé kvantové stavy a vyšší stav se obsadí tehdy, až je nižší plně obsazen,
- pro výpočet energie nukleonů platí obdobné vztahy jako pro elektrony (částice mají dualistický charakter),
- pro protony a neutrony existují samostatné soustavy energetických hladin.



Potenciálová jáma a energetická bariéra



Výška potenciálové bariéry (v MeV)

$$B = \frac{Z_1 Z_2}{A_1^{1/3} + A_2^{1/3}}$$

(obdoba Coulombova zákona)

Z_1, Z_2 – protonová čísla jádra a kladné částice (zde protonu)

A_1, A_2 – jejich nukleonová čísla

Poloměr jádra

Působnost jaderných sil je omezena na oblast jádra – síly mají krátký dosah (cca 10^{-15} m).

Hovoříme o **poloměru jádra** $r = r_0 A^{1/3}$ ($r_0 = 1,4 \cdot 10^{-15}$ m, A je nukleonové číslo).

Hmotnost a vazebná energie jádra

Jestliže srovnáme hmotnost jádra atomu s hmotností částic, které jádro tvoří, dojdeme k poznání, že hmotnost jádra je menší.

$$M_j < Z m_p + (A - Z) m_n$$

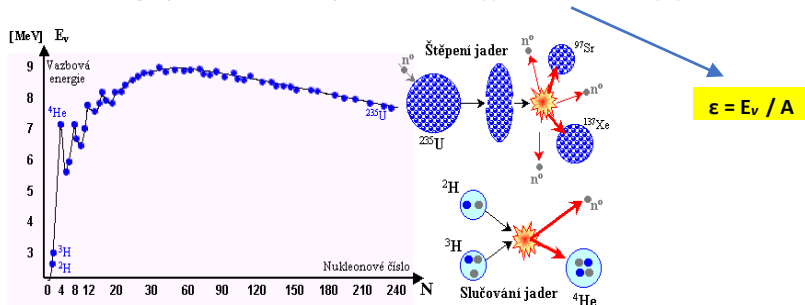
Rozdíl $\Delta = M_j - (Z m_p + (A - Z) m_n)$ se nazývá **hmotnostní úbytek (hmotnostní defekt)**, který má zápornou hodnotu. Jemu ekvivalentní energie je podle Einsteinova vztahu rovna

$$E_v = - \Delta c^2$$

a nazývá se **vazebnou energií jádra**. Je to energie, která by se hypoteticky uvolnila při vytvoření jádra z volných nukleonů.

Např. pro jádro ${}^4_2\text{He}$ je: $\Delta = 5,000618 \cdot 10^{-29} \text{ kg} = 4,5 \cdot 10^{-12} \text{ J/atom} = 2,71 \cdot 10^{12} \text{ J/mol} = 678 \text{ TJ/kg}$.
Toto množství tepla ohřeje 6500 tun vody z 0°C k varu.

Vazebná energie jádra vztažená na jeden nukleon vypovídá o tom, zda je jádro stabilní!



Radioaktivita

Jádra  **nukleárně stabilní (cca 266)** **N:Z \cong 1:1 – 3:2** Výjimky jsou ${}^1_1\text{H}$ a ${}^3_2\text{He}$
nukleárně labilní (více než 2000)

- relativní zvýšení počtu neutronů má příznivý vliv na stabilitu jádra, protože se snižuje odpuzování protonů
- některá jádra jsou stabilní jen při jediné kombinaci N a Z (monoizotopické prvky)
- většina prvků je však polyizotopických \Rightarrow existuje jisté rozmezí poměru N/Z, kdy jsou jádra stabilní
- pokud je poměr N/Z mimo uvedené hranice, tj. $N/Z = 1 - 1,5$, je jádro s velkou pravděpodobností nestabilní a **je jádrem radioaktivním.**

Radioaktivita je projevem nukleární nestability jader.

Spočívá v jejich přeměně na jiný nuklid, přičemž dochází současně k eliminaci některé z elementárních částic, ev. jejich skupin, z prostoru rozpadajícího se jádra.

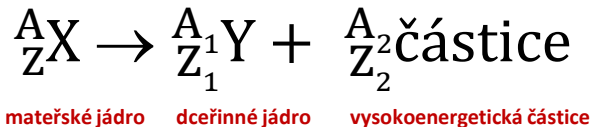
Pro radioaktivní přeměnu platí následující charakteristiky:

- přeměna je děj samovolný (spontánní)
- nezávisí na chemickém stavu atomu
- platí zákon zachování hmotnosti a energie
- platí zákon zachování nukleonového a atomového čísla

$$A = A_1 + A_2$$

$$Z = Z_1 + Z_2$$

- při samovolné radioaktivní přeměně se **vždy** uvolňuje energie (**exoergický děj**)



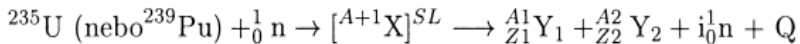
Štěpná reakce obecně

- samovolné štěpení těžkých jader nemá z hlediska uvolňování energie praktický význam
- v úvahu přichází pouze ^{238}U , poločas přeměny je velký a uvolněná energie je mizivá

⇒ průmyslové využití energie jádra je založeno na štěpné reakci jiných nuklidů, a to:

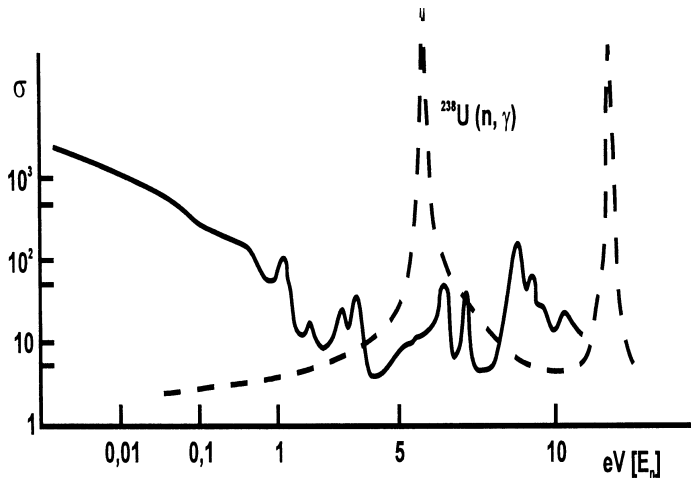
^{235}U a ^{239}Pu

- děj je vyvolán jaderným projektilem (**pomalé neutrony**)



Štěpení jádra popisuje kapkový model jádra. Při štěpení vznikají dvě tzv. trosky (jedna lehčí a jedna těžší – viz dále distribuční křivka), 1-2 neutrony a uvolňuje se značné množství tepla Q

Účinný průřez štěpné reakce σ (tj. pravděpodobnost jejího provedení) závisí na energii neutronů.



Účinný průřez pro štěpení ^{235}U v závislosti na energii neutronů. (Čárkovaně je znázorněn účinný průřez pro reakci $^{238}\text{U}(n, \gamma)$).

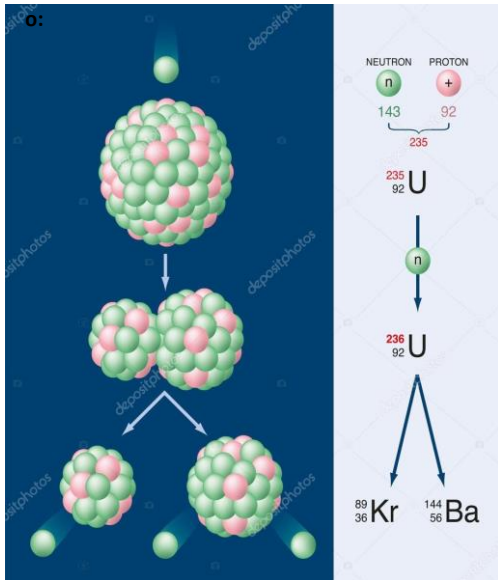
Z tohoto grafu plyne, že štěpení je nejúčinnější s pomalými neutrony.

Jeden z mnoha způsobů štěpení je následující:

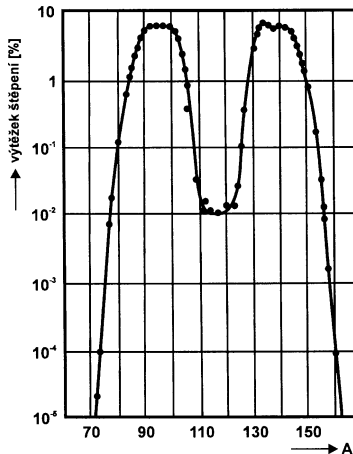


nebo

o:



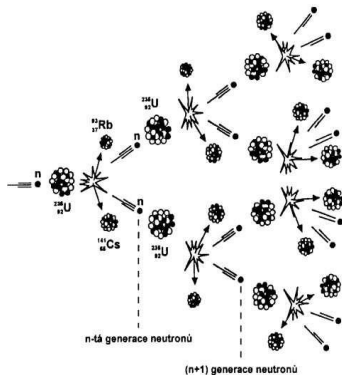
Distribuční křivka štěpných produktů při štěpení pomalými neutrony



Výtěžky produktů štěpení ^{235}U .

Tvar distribuční křivky závisí na energii neutronů, se zvyšující se energií neutronů se poloha sedla na křivce zvyšuje a nakonec přechází do tvaru „jednohrbého velblouda“.

Řízená štěpná reakce a regulace reaktoru



Řetězová štěpná reakce. (Generace neutronů jsou označeny čárkovaně.)

I bez záměrného zasahování do neutronové bilance je však v reaktoru méně neutronů, neboť probíhají další procesy spojené se spotřebou neutronů

- 15 % jader ^{235}U zachytí neutron $^{235}\text{U}(n,\gamma)^{236}\text{U}$
- část jader ^{238}U zachytí neutron, to nakonec vede ke vzniku ^{239}Pu
- 30 % jader ^{239}Pu podlehe reakci $^{239}\text{Pu}(n,\gamma)^{240}\text{Pu}$
- v reaktoru je mnoho materiálů a štěpných produktů, které parazitně absorbují neutrony
- jistý počet z reaktoru unikne (proto je součástí konstrukce reaktoru tzv. reflektor)

- z obrázku plyne skutečnost, že při každém aktu štěpení se počet neutronů znásobuje minimálně $2x \Rightarrow$ při nekontrolované reakci by došlo během zlomku vteřiny k explozi
- v řízeném jaderném reaktoru se ponechává k udržení jaderné reakce pouze jeden neutron, který je využit k dalšímu štěpení (ideální případ)
- proto se v jednom časovém okamžiku v soustavě nachází vždy stejný počet neutronů (tj. $k=1$) a uvolňuje se stále stejné (řízené) množství energie

Multiplikační faktor k

– číslo vyjadřující poměr počtu neutronů na konci každé generace k počtu neutronů generace předchozí

	multiplikační faktor k
kritická soustava (nutná podmínka pro udržení štěpné reakce)	$= 1$
nadkritická soustava (nebezpečný stav – reakce se velmi rychle rozbíhá, hrozí trvalé poškození reaktoru přehřátím)	> 1
podkritická soustava (počet neutronů se zmenšuje, až se reakce zastaví – tento stav se vyvolá tehdy, je-li potřeba reaktor zastavit)	< 1

Při štěpení jednoho atomu ^{235}U se uvolní asi **202,5 MeV** ($3,244 \cdot 10^{-11}$ J) energie, čemuž odpovídá **19,54 TJ mol⁻¹** nebo **83,14 TJ kg⁻¹**.

- z toho cca **175 MeV** připadá na kinetickou energii primárních štěpných produktů, jejichž jádra jsou v materiálu paliva silně brzděna a kinetická energie se přemění na energii tepelnou - ta je pak využívána pro tvorbu páry pro pohon turbíny.
- **zbytek energie** připadá na kinetickou energii neutronů, emisi fotonů a na excitační energii primárních štěpných produktů

Zpomalování (moderování) neutronů se realizuje pomocí moderátorů

lehká voda
těžká voda
grafit

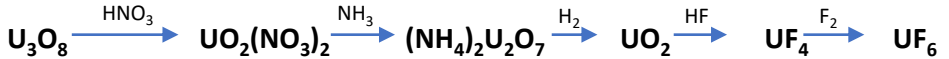
Z ekonomických důvodů se nejčastěji používá **obyčejná voda**, přestože má vyšší účinný průřez pro záchyt neutronů než ostatní materiály.

Voda v reaktoru plní funkci **moderátoru** i **chladiwa**.

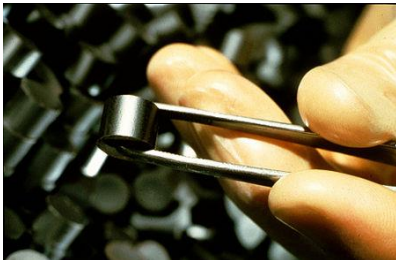
Pro udržení štěpné reakce v reaktoru platí následující kombinace paliva a moderátoru:

Palivo	Moderátor
přírodní uran	těžká voda
uran obohacený izotopem ^{235}U na 3-5 %	obyčejná voda, s přídavkem H_3BO_3
uran obohacený izotopem ^{235}U na 20 %	není třeba moderovat, štěpná reakce běží i s rychlými neutrony

Výroba jaderného paliva

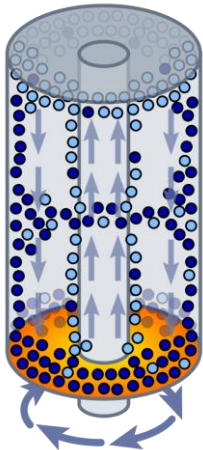


tzv. žlutý koláč



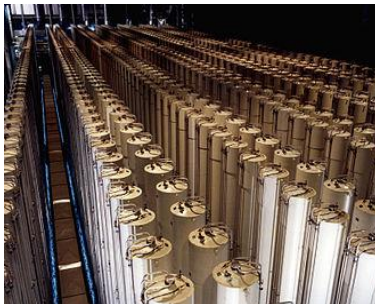
Tabletami se naplní palivové proutky, proutky jsou pak součástí palivových souborů.

Zařízení pro obohacování uranu

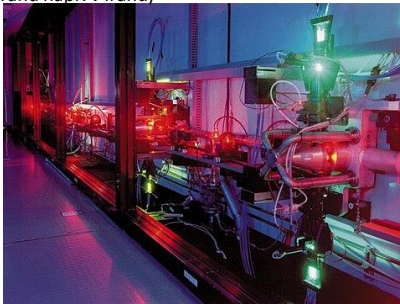


Princip centrifugy

Lehčí ²³⁵UF₆ se při centrifugování shromažďuje v horní části centrifugy (světle modré body), zatímco těžší ²³⁸UF₆ klesá do nižších poloh centrifugy.



Vzhledem k malému rozdílu v hmotnostech UF₆ je nutno proces dělení monohonásobněkrát opakovat – proto se konstruuují kaskády centrifug pro obohacování uranu např. v Íránu)



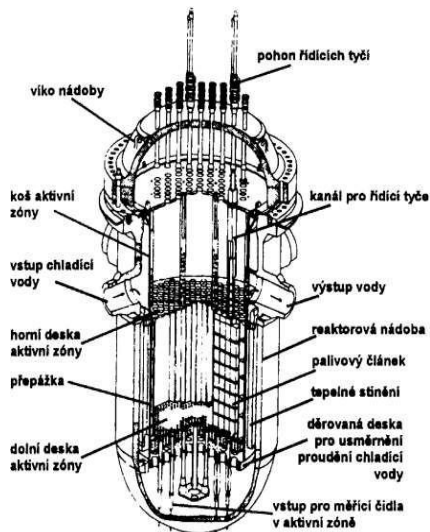
Laserový SILEX proces

Jaderné reaktory

Jaderný reaktor \equiv zařízení, ve kterém lze realizovat řízenou nepřetržitou štěpnou reakci a plynule odvádět vyvíjené teplo.

Typy reaktorů:

- školní,
- výzkumný,
- produkční (výroba izotopů),
- demonstrační (reaktory menšího výkonu pro ověření určité koncepce),
- energetický (viz dále).



Typický tlakovodní reaktor.

Regulace reaktoru

Reaktor jako dynamický systém podléhá během provozu změnám, neboť se v něm hromadí štěpné produkty, které mají vysoké účinné průřezy pro záchyt neutronů.

Dochází k tzv. otravě reaktoru

reaktorové jedy
 $^{133+135}\text{Xe}$, ^{149}Sm

Spuštění a provoz reaktoru

- na počátku provozu se do reaktoru vkládá více paliva, než odpovídá hodnotě $k=1$. Tento přebytek paliva pak určuje tzv. **reaktivitu reaktoru**
- reaktor má tedy před spuštěním jistou zásobu reaktivity, která se dá snížit pomocí **komenzačních tyčí**, které jsou zhotoveny z materiálu s vysokým účinným průřezem pro neutrony, to se provádí zpravidla na začátku energetického provozu reaktoru
- během provozu reaktoru se tok neutronů reguluje zasouváním **řídících tyčí** do aktivní zóny reaktoru, okamžité změny toku neutronů v aktivní zóně reaktoru
- kromě toho obsahuje reaktor **tyče havarijní**, (**obsahují B, Cd nebo Hf**)

Tlakovodní reaktory pro energetiku

- jsou nejrozšířenější,
- palivem je 2-5 % obohacený uran, obohaceno ^{235}U ,
- voda v reaktoru je pod vysokým tlakem (při teplotách cca 300 °C je kapalná),
- pára pro pohon turbíny vzniká v sekundárním okruhu elektrárny,
- řídicí tyče se zasouvají do reaktoru shora.

V ČR jde o reaktory: (jejich výkon je dnes díky novým poznatkům a režimu vyhořívání paliva poněkud vyšší, cca o 15 %)

- **VVER 440 MW (Dukovany)** – tepelný výkon je cca 3x vyšší
- **VVER 1000 MW (Temelín)** – tepelný výkon je cca 3x vyšší

Tlakovodní reaktory malých rozměrů

- pracují s vysoce obohaceným palivem (až 90 % ^{235}U),
- jsou malé, kompaktní, slouží jako pohon např. jaderných ponorek,
- vydrží v provozu 2-3 roky.

VVER – vodou chlazený, vodou moderovaný energetický reaktor

Válcová nádoba ze speciální oceli

- průměr cca 7 m,
- výška 23 - 30 m,
- několik set tun,
- mimořádné požadavky na kvalitu materiálů i konstrukci.

Aktivní zóna reaktoru \equiv prostor, ve kterém štěpení probíhá, reflektor, který snižuje úniky neutronů (voda, grafit u pomalých reaktorů; železo, ochuzený uran u reaktorů rychlých)

- palivo,
- moderátor u pomalých reaktorů,
- řídicí tyče,
- chladicí médium.

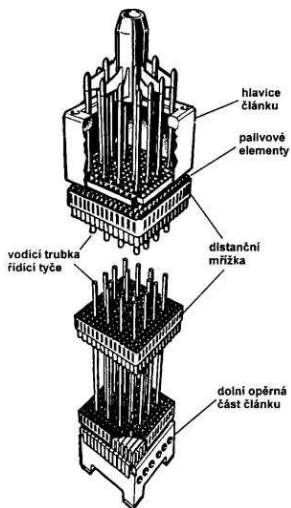
Palivo pro reaktor se vyrábí z přírodního nebo obohaceného uranu:

kovový uran pro těžkovodní reaktory (s příměsí legujících prvků pro zlepšení mechanických vlastností) má formu kovových prutů pokrytých vrstvou slitiny Mg+Al

palivo z obohaceného uranu pro lehkovodní reaktory je nejčastěji v podobě UO_2 (tzv. keramické palivo) a v podobě tablet o průměru 1 cm a výšce 1-2 cm, které jsou naskládány do kovového obalu délky 2-3 m, hermeticky uzavřené a zhotovené ze slitiny Zr nebo nerez oceli).

Kovový obal paliva (palivová kazeta) udržuje palivo v kompaktním stavu, brání rozrušení palivového elementu. Má zpravidla tvar hranolu, zadržuje radioaktivní štěpné produkty v uzavřeném prostoru.

Soubor palivových elementů tvoří **palivový článek**. Palivových článků je v reaktoru až několik set, do reaktoru se vkládají a z reaktoru vyjímají pomocí zavážecího stroje.



Palivový článek

Palivové články nemohou zůstat v reaktoru do úplného spotřebování (vyhoření) paliva, protože se snižuje reaktivita aktivní zóny, kde je vyhořívání paliva nejintenzivnější. Výrazně se také zhoršují mechanické vlastnosti palivového článku.

Aby se udržoval režim rovnoměrného vyhořívání paliva, je nutno:

- v průběhu provozu reaktoru jednotlivé kazety palivových článků v důsledku nerovnoměrného vyhořívání přemísťovat na jiné místo, tedy např. z aktivní zóny do okrajových částí reaktoru (nyní 5x ročně).
- nejvíce vyhořelé palivo se v pravidelných intervalech vyjímá a nahrazuje se palivem čerstvým.
- vyjmuté články se skladují po jistou dobu v bazénu s vodou v primárním okruhu elektrárny, kde se chladí ve vodním bazénu. Pak se přemísťují do tzv. **dočasného úložiště použitého jaderného paliva** – bývá v areálu jaderné elektrárny, doba uložení až 50 let). Po této době se přemísťují do hlubinného úložiště (min na cca 300 let). Po této době je reálná možnost přepracování tohoto paliva, které obsahuje mnoho uranu, a výroba paliva nového.



Kontejnery CASTOR pro dočasné uložení použitého jaderného paliva v Dukovanech

Požadavky na chladicí médium

- vysoké měrné teplo,
- dobrou tepelnou vodivost,
- tepelně i radiačně stálé,
- nesmí příliš absorbovat neutrony
- nesmí způsobovat korozi pokrytí palivových elementů

pomalé reaktory	voda těžká voda helium
rychlé reaktory	roztavený sodík

- Chladicí kapalina cirkuluje mezi palivovými články a odvádí z aktivní zóny teplo.
- Teplo se pak předává v sekundárním okruhu elektrárny vodě v parogenerátoru, kde se pak vytváří tlaková pára pro pohon turbíny.

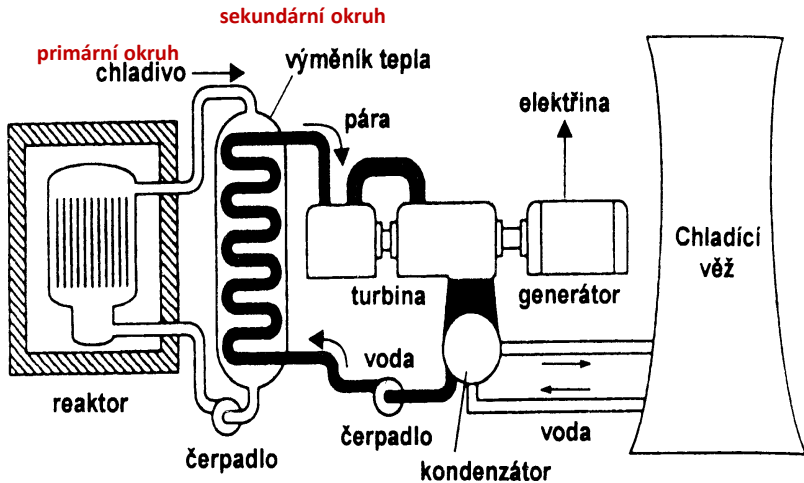
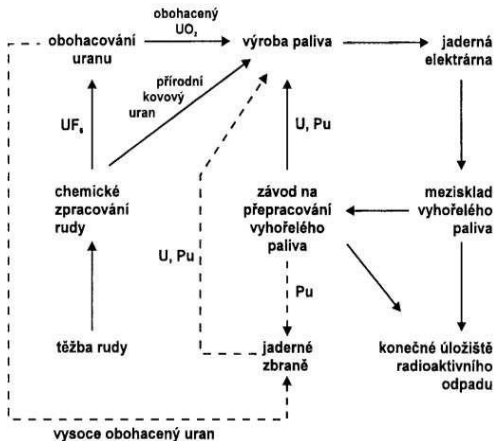
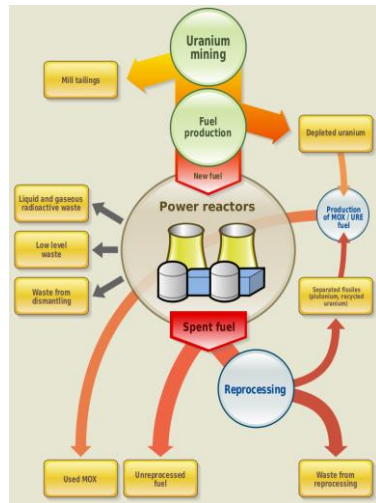


Schéma dvouokruhové jaderné elektrárny.

Palivový cyklus – zahrnuje celý proces koloběhu paliva, tj. od těžby uranové rudy, použití v reaktoru, jeho uskladnění po vyhoření a jeho další zpracování.

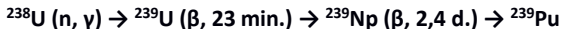


Palivový cyklus. (Čárkovaně je zakresleno využití vojenského štěpného materiálu pro výrobu paliva.)

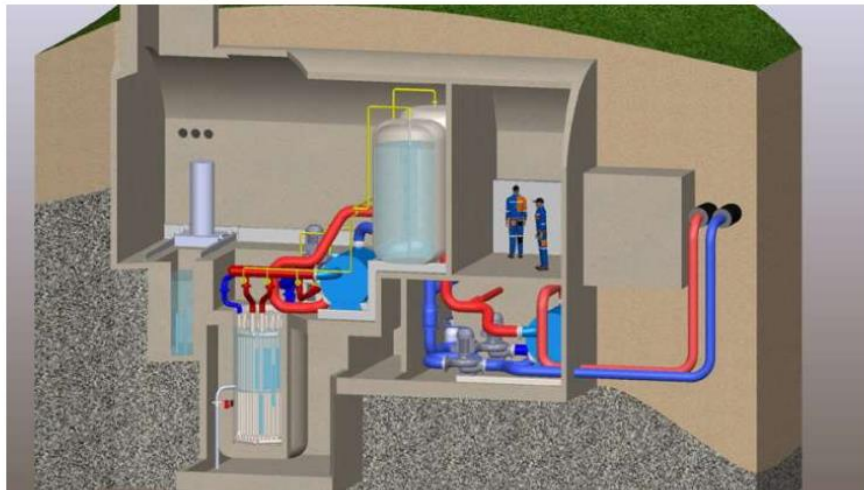


Další typy reaktorů

- **Varné reaktory** – jsou větší než tlakovodní, voda se částečně mění v páru, řídicí tyče se zasouvají zespolu.
- **Těžkovodní reaktor** – reaktor s tlakovými kanály, chlazen i moderován těžkou vodou, palivem je přírodní uran (Kanada – CANDU). Podobný reaktor byl i reaktor A1 v Jaslovských Bohunicích, v r. 1977 došlo k havárii a reaktor byl trvale odstaven.
- **Plymem chlazené grafitové reaktory** (Velká Británie) – reaktor je chlazen heliem, které proudí palivovými kanály pod tlakem 3-5 MPa. Pracuje s mírně obohaceným uranem, dosahuje se teploty až 850 °C.
- **Grafitové reaktory chlazené vodou** - provozovány pouze v zemích bývalého SSSR (např. v Černobylu). Palivem je mírně obohacený uran.
- **Rychlé reaktory** – používají nezpomalené neutrony. Vzhledem k tomu, že účinný průřez pro rychlé neutrony je podstatně menší než pro neutrony pomalé, musí se pracovat s palivem obohaceným na 20-50 % ^{235}U nebo palivo s odpovídajícím obsahem ^{239}Pu . Chladí se roztaveným sodíkem. Pracují hlavně ve Francii (Phénix, Superphénix).
- **Množivé (plodivé) reaktory (tzv. breeders)** – rychlé reaktory s plutoniem, kdy průměrný počet neutronů při jednom aktu štěpení je 3. Jeden z neutronů je využíván (zcela záměrně) k záchytné reakci $^{238}\text{U}(n,\gamma)$, která vede k plutoniu. Při provozu reaktoru vzniká více plutonia, než se spotřebuje. Vnější část reaktoru je proto obklopena tzv. plodivou zónou, která je zhotovena z tablet z ochuzeného UO_2 .

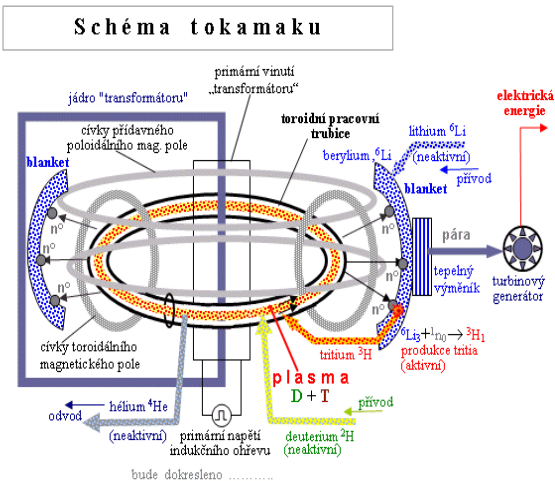
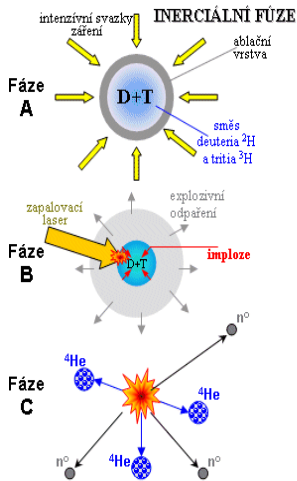


Reaktor pro domácí využití



Koncept malého podzemního reaktoru pro dálkové vytápění (Obrázek: Lappeenranta University of Technology)

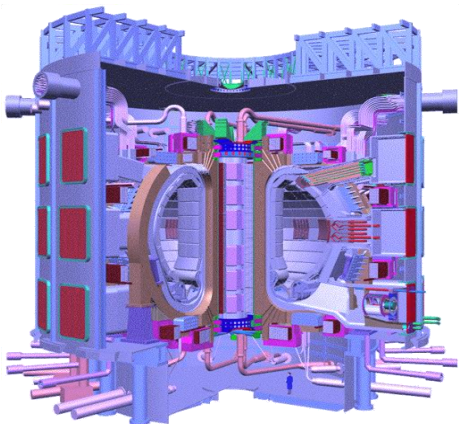
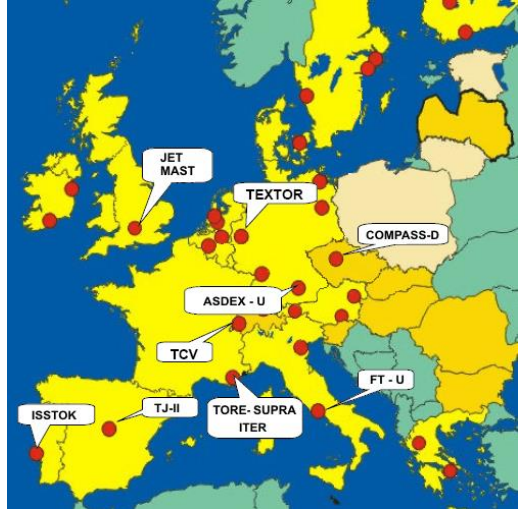
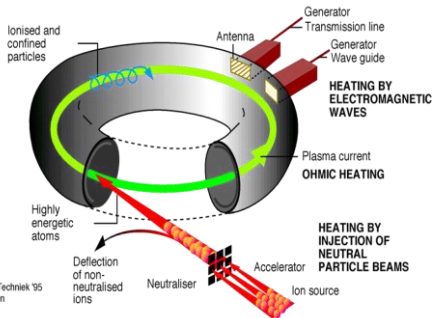
Termojaderná fúze – získávání tepla pro energetické účely slučováním lehkých jader



Dva základní způsoby řízení termonukleární fúze:

Vlevo: Zjednodušený princip inerciální fúze a průběh termonukleární mikro-exploze.

Vpravo: Zjednodušené principiální schéma tokamaku.

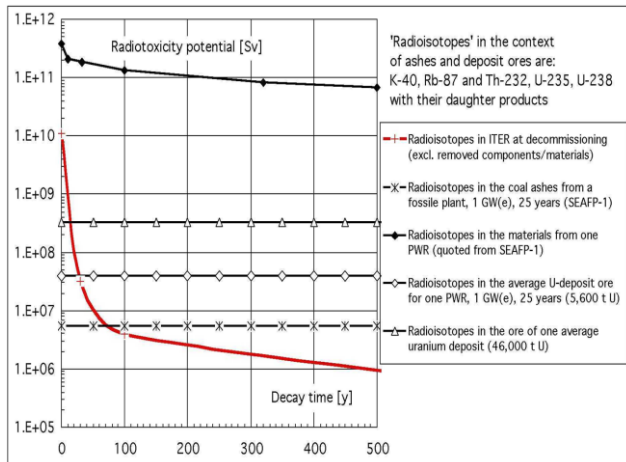


Výhody jaderné fúze

- 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 $200\,000\,000\text{ }^\circ\text{C/m}$
- obrovská tepelná a neutronová zátěž vnitřní stěny reaktoru
- neutrony se musí využít na 100 %
- **s rostoucí teplotou klesá ohmický odpor a tedy i ohmický příkon!**



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, přepracovávání 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 přepracovávání 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)

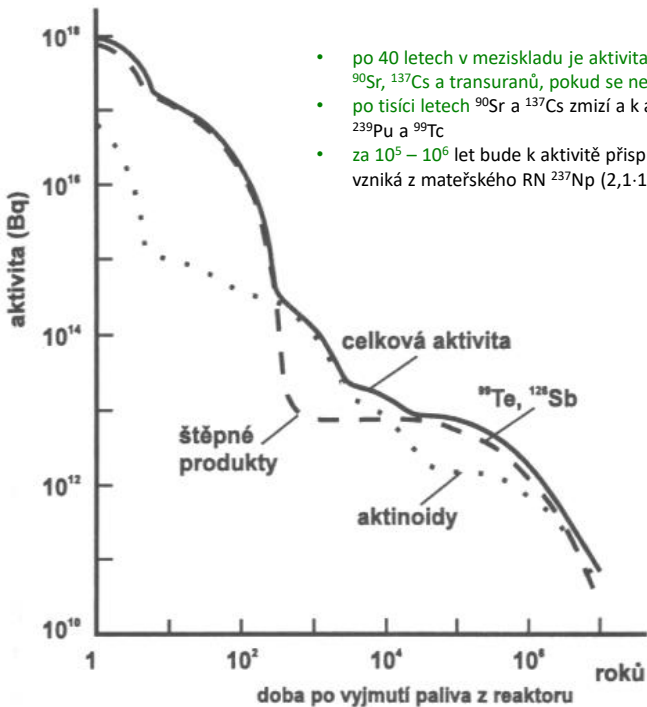
Ukládání odpadů:

- 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)

V ČR

- pro nakládání s **nízko a středně aktivním** jaderným odpadem se v ČR využívá technologie lisování a bitumenace, zaručuje produkt, který je v dlouhodobém horizontu stabilní a odolný účinkům radiace, vyznačuje se nízkou loužitelností a cca 2,5 násobnou redukcí objemu
- upravené nízko a středně aktivní odpady jsou ukládány v ÚRAO v areálu JE Dukovany, od roku 2002 zde probíhá ukládání jaderného odpadu z obou českých elektráren
- ke konci roku 2004 (po 20 letech provozu JE Dukovany a po čtyřech letech provozu JE Temelín) bylo zaplněno celkem 9 z celkového počtu 112 jímek o celkové kapacitě 55 000 m³
- **vysokoaktivní odpady** se budou ukládat do hlubinných úložišť, v ČR se plánuje s uvedením do provozu hlubinného úložiště kolem roku 2065, do té doby se odpad skladuje v areálech JE
- kontejnery **CASTOR** (litinová válcová nádoba 4,1 m vysoká o průměru 2,7 m a tloušťce stěn 37 cm, hmotnost 131 t, trojitě 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*)

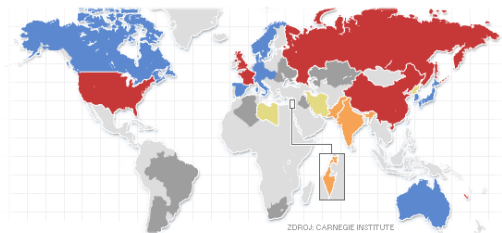
- zmenšení objemu vyhořelého jaderného
- modifikace PUREXu, Pu se neextrahuje
- odstraní se U a ten se následně přepracovává

TRUEX (*TRansUranic EXtraction*)

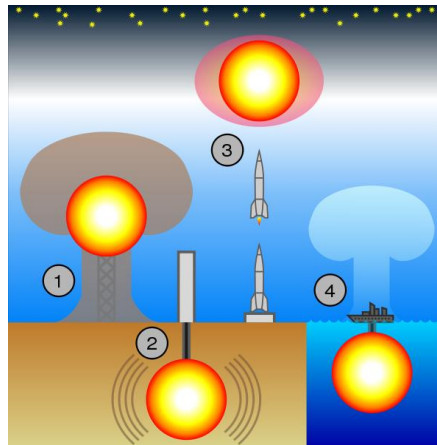
- získává se Am a Cm
- snížení alfa aktivity odpadu, odstranění neaktivnější části odpadu
- na rozdíl od PUREXu a UREXu se nejedná o extrakční proces

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

Pokusné jaderné a termonukleární výbuchy



- 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:

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)

Velká Británie

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

Čína

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

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

Francie

- první jaderný výbuch: 13. 2. 1960
- první termonukleární výbuch: 24. 8. 1968
- počet nukleárních hlavic: 350
- počet testů jaderných zbraní: 210

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 (poslední 6. 3.9.2017)

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

Státy podezřelé z vlastnictví jaderných zbraní:

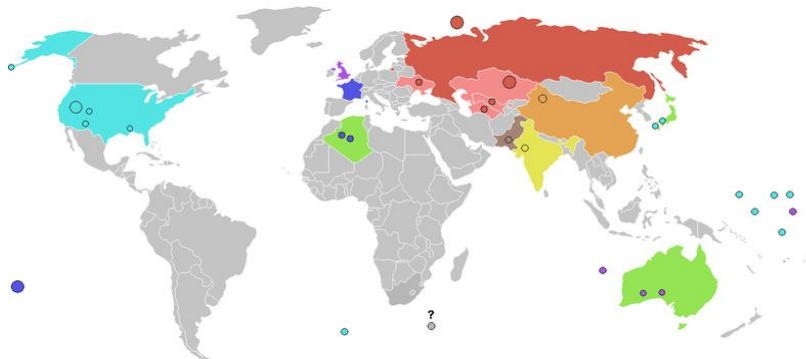
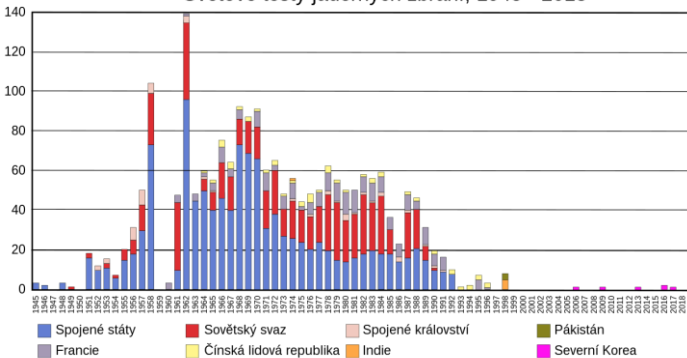
Izrael

- 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

Světové testy jaderných zbraní, 1945 - 2018



Použití radionuklidů a iz v biologii a lékařství

Izotopový indikátor – prvek, jehož přirozené izotopové složení bylo změněno (^{14}C byl přidán k přírodnímu C, či ^{198}Au k přírodnímu zlatu), většinou radioaktivním izotopem

Indikátorová metoda – metoda využívající izotopové indikátory ke sledování různých dějů a procesů

Izotopové indikátory:

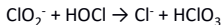
- sledujeme chování určité chemické látky, izotopový indikátor **musí být ve stejné chemické formě**, jako je sledovaná látka (př. sledování biochemických dějů)
- sledujeme určitou látku či objekt, přičemž **chemické vlastnosti** izotopového indikátoru **nejsou podstatné** (sledování proudění kapalin v potrubí)

Izotopicky substituované sloučeniny – sloučeniny, ve kterých je stabilní izotop nahrazen izotopem radioaktivním ve všech molekulách (2- ^{14}C)-octová kyselina)

Izotopicky značené molekuly – směs látky s přírodním izotopovým složením a látky izotopově substituované (2- ^{14}C)-octová kyselina)

Indikátory v chemii a biochemii:

Reakce chloritanu s kyselinou chlornou:



Ze stechiometrického zápisu není zřejmé, zda kyselina chlorečná vzniká oxidací chloritanu či kyseliny chlorné. Tím, že se v jednom reaktantu chlór označí, např. izotopem ^{36}Cl , lze jednoznačně původ chlóru v kyselině chlorečné zjistit.



Významným přínosem bylo použití radioaktivních indikátorů pro pochopení procesů fotosyntézy. Používá se $^{14}\text{CO}_2$ (rostliny) a $\text{NaH}^{14}\text{CO}_3$ (řasy).

Studium metabolických přeměn:

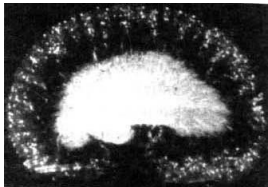
Látka, jejíž metabolismus se zkoumá (**A**), se podá organismu ve značené formě. Po určité době se izoluje látka **B** (předpokládaný metabolit látky A). **Je-li látka B radioaktivní, je metabolitem látky A.** Metabolismus složitějších látek probíhá přes řadu **mezistupňů**, které je **možné všechny identifikovat metodou radioaktivních indikátorů.**

V kombinaci s **autoradiografickou** detekcí bývají izotopové metabolické studie také spojeny se zjišťováním, **ve kterém orgánu k metabolismu dochází, případně kde se ukládají produkty metabolismu.**



Receptorové studie:

Zjišťuje se, ve kterých tkáních a buňkách se nacházejí **receptory biochemicky a fyziologicky účinných látek**. Tyto látky se ve značené formě podávají organismu a jejich lokalizace ve tkáních nebo buňkách se provádí **autoradiograficky**.



Autoradiogram řezu ledvinou krysy, ukazující lokalizaci receptorů endothelinu

Indikátory v biologii:

- **rozsah a směr migrace drobnějších živočichů** (část jedinců se označí a po určité době se z počtu označených jedinců určuje rozsah a směr migrace)
- studium **pohybu a hromadění bakterií** v živočišném organismu
- **pohyb a přenos potravy a živin** (přenášení potravy uvnitř hmyzího společenství), u rostlin se autoradiograficky stanovuje rozložení přijatých živin v rostlinném těle
- v molekulární biologii bylo **pomocí značené DNA a RNA** prokázáno že **DNA slouží jako matrice pro vznik RNA**
- v současnosti je jednou z častých aplikací **sekvenování**

Studium samodifúze – sledování pohybu částic v čisté látce vlivem tepelného pohybu (např. pohyb molekul vody ve vodě, používá se $^3\text{H}_2\text{O}$)

Studium výměnných reakcí – sledování výměny identických částí mezi jednotlivými molekulami $\text{AX} + \text{BX} \rightarrow \text{AX} + \text{BX}$, kde dochází k výměně identických částic X.

Další použití izotopových indikátorů:

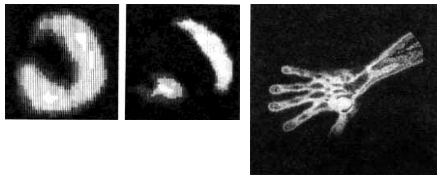
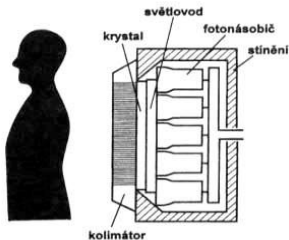
- stanovení **rozpuštěnosti málo rozpustných látek** (ve vodě, v jiných rozpouštědlech, kovů v roztavených solích, plynů v kapalinách apod.)
- stanovení **tenzí par**, málo těkavých látek (vysokovroucí kapaliny, roztavené kovy)
- stanovení **velikosti povrchu sorbentu** (sleduje se množství naadsorbovaného radioaktivního plynu)
- rychlost **vylučování kovů na elektrodách** a sledování následných elektrodoých dějů
- **zadržování aktivních komponent pracích prášků** na vláknech tkaniny atd.

Indikátory v lékařské diagnostice:

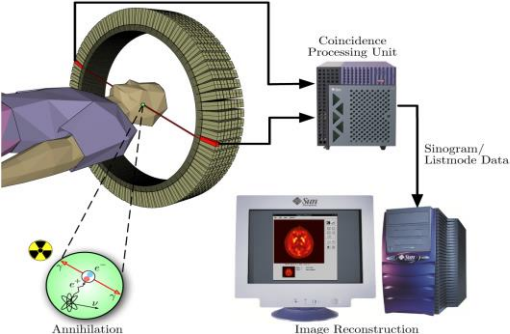
Značené sloučeniny užívané v lékařství se nazývají **radiofarmaka**.

Radiofarmaka – diagnostická a terapeutická – jedná se o kovy v komplexech, chelátech. Pokud se hromadí v příslušné tkáni, fungují přímo jako radiofarmaka.

Mateřský nuklid	Dceřinný nuklid	Separace
⁴⁴ Ti (47 r)	⁴⁴ Sc (3,92 h)	Dowex-1/ HCl, šřav. k.
⁵² Fe (8,3 h)	^{52m} Mn (21 min)	Dowex-1/ 8 M HCl,
⁶² Zn (9,2 h)	⁶² Cu (9,8 min)	Dowex-1/ 0,1M HCl/NaCl,
⁶⁸ Ge (288 d)	⁶⁸ Ga (68 min)	Al ₂ O ₃ /roztok EDTA
⁷² Se (8,4 d)	⁷² As (26 h)	Dowex-50/H ₂ O
⁸² Sr (25 d)	⁸² Rb (1,25 min)	Al ₂ O ₃ /1,8 M NaCl
⁸¹ Rb (4,6 h)	^{81m} Kr (13 s)	profouknutí vzduchem
⁸⁷ Y (80,3 h)	⁸⁷ Sr (2,8 h)	Dowex-1/0,01M (NH ₄) ₂ CO ₃
⁹⁰ Sr (28,8 r)	⁹⁰ Y (64,1 h)	Katex/různé eluenty
⁹⁹ Mo (66 h)	^{99m} Tc (6 h)	Al ₂ O ₃ / fysiол. roztok
¹¹³ Sn (115 d)	^{113m} In (99,5 min)	Al ₂ O ₃ / fysiол. roztok
¹¹⁵ Cd (53,4 h)	^{115m} In (4,5 h)	Al ₂ O ₃ / fysiол. roztok
¹²² Xe (20,1 h)	¹²² I (3,6 min)	cirkulace Xe rozt. NaHCO ₃
¹³² Te (3,2 d)	¹³² I (2,3 h)	sublimace
¹³⁴ Ce (76 h)	¹³⁴ La (6,7 min)	anex
¹⁸⁸ W (69 d)	¹⁸⁸ Re (17 h)	Al ₂ O ₃ , pak anex
¹⁹⁴ Os (6 r)	¹⁹⁴ Ir (19,2 h)	G. Therm. Chrom
²⁰² Pb (3.10 ⁵ r)	²⁰² Tl (12,2 d)	extrakce



Scintigram zdravého srdce (vlevo) a srdce po infarktu myokardu (uprostřed); kontrola prokrvení ruky přišité pacientovi po úrazu (vpravo)



Indikátory v průmyslu a výzkumu:

- měření **průtoku kapalin**, sledování **transportu surovin** v technologickém zařízení, průběh procesů mísení apod. (průtok a doba setrvání odpadních vod **v čistících stanicích** a odkalovacích nádržích, pohyb roztaveného železa a strusky **ve vysoké peci**, průchod **plynů vysokou pecí**, netěsnosti **v potrubí ropovodu**, netěsnosti **v potrubí plynovodu** atd.)
- **Defektoskopie** – pomocí gama záření se prozařuje materiál (sváry, potrubí, nádrže) a vhodným zobrazovacím zařízením se detekuje.
- **RTG fluorescenční analýza** – hmota se ionizuje pomocí RTG, gama či beta, dochází k vyražení elektronů z K či L slupek a při následném zaplnění orbitalů dochází k emisi charakteristického RTG. To se měří nejlépe polovodičovými detektory.

Indikátory v hydrologii:

- pohyb vody **v různých přírodních systémech**
- pohyb dešťové vody a vody z tajícího sněhu **v podzemních vodách**
- rychlost průtoků ve **vodních tocích**, **pronikání vody z jezer, nádrží a kanálů**
- studium **podzemních vod** (stáří, vztah mezi povrchovými a podzemními vodami)
- **vztahy mezi vodonosnými vrstvami**

Používá se ^{58}Co , ^{60}Co , ^{51}Cr . Tritium vzniklé při nadzemních pokusech jaderných a termionukleárních zbraní bylo pojato jako **pulsní označení hydrosféry tritiem** a bylo využito pro studium pohybu a výměny vod zejména v podzemních rezervoárech. Například nepřítomnost tritia v rozsáhlém podzemním rezervoáru pod Saharou ukázala, že **v současnosti nedochází k jeho doplňování z vnějších zdrojů.**

Legislativa

Všechny informace naleznete na: <https://www.sujb.cz/>

Vše vychází z tzv. atomového zákona [263/2016](#) Sb.

Na něj navazují příslušné vyhlášky. Nejdůležitější je vyhláška o radiační ochraně a zabezpečení radionuklidového zdroje [422/2016](#) Sb.



Zdroj: síť X
<https://twitter.com/DrabovaDana/photo>

§ 9

Povolení

- (1) Povolení Úřadu je nutné k vykonávání těchto činností souvisejících s využíváním jaderné energie:
- umístění jaderného zařízení,
 - výstavba jaderného zařízení,
 - první fyzikální spouštění jaderného zařízení s jaderným reaktorem,
 - první energetické spouštění jaderného zařízení s jaderným reaktorem,
 - uvádění do provozu jaderného zařízení bez jaderného reaktoru,
 - provoz jaderného zařízení,
 - jednotlivé etapy vyřazování z provozu jaderného zařízení a
- (2) Povolení Úřadu je nutné k vykonávání těchto činností v rámci expozičních situací:
- výstavba pracoviště IV. kategorie kromě pracoviště s jaderným zařízením,
 - provoz pracoviště III. kategorie nebo pracoviště IV. kategorie,
 - provedení rekonstrukce nebo jiných změn ovlivňujících radiační ochranu, monitorování radiační situace a zvládnutí radiační mimořádné události pracoviště III. kategorie a pracoviště IV. kategorie; prováděcí právní předpis stanoví výčet změn ovlivňujících radiační ochranu, monitorování radiační situace a zvládnutí radiační mimořádné události pracoviště III. kategorie a pracoviště IV. kategorie,
 - jednotlivé etapy vyřazování z provozu pracoviště III. kategorie a pracoviště IV. kategorie,
 - uvolňování radioaktivní látky z pracoviště, nestanoví-li tento zákon jinak,
 - nakládání se zdrojem ionizujícího záření,
 - přidávání radioaktivní látky do spotřebního výrobku při jeho výrobě nebo přípravě nebo k dovozu a vývozu takového spotřebního výrobku,
 - vykonávání služeb významných z hlediska radiační ochrany

...atd.

§ 63

Limity ozáření

- (1) Limitem ozáření je kvantitativní ukazatel pro omezení celkového ozáření fyzické osoby z činností v rámci plánovaných expozičních situací.
- (2) Limity ozáření jsou
 - a) obecné limity pro obyvatele,
 - b) limity pro radiační pracovníky,
 - c) limity pro žáky a studenty.

§ 66

Optimalizace radiační ochrany

- (1) Každý, kdo vykonává činnosti v rámci expozičních situací, je povinen při optimalizaci radiační ochrany zohlednit rozsah ozáření, jeho pravděpodobnost a počet fyzických osob vystavených ozáření.

§ 67

Zproštění

- (1) Každý může vykonávat radiační činnost bez ohlášení, registrace nebo povolení, pokud je tato činnost odůvodněna a vykonávána se zdrojem ionizujícího záření, který
 - a) je radioaktivní látkou, jejíž aktivita je nižší než hodnota zprošťovací úrovně, nebo zařízením takovou látku obsahujícím nebo uvolňujícím,
 - b) je generátorem záření emitujícím ionizující záření s energií nepřevyšující 5 keV,
 - c) je katodovou trubicí určenou k zobrazování nebo jiným elektrickým zařízením pracujícím při rozdílu elektrických potenciálů nepřevyšujícím 30 kV, u něhož je příkon dávkového ekvivalentu na kterémkoli přístupném místě ve vzdálenosti 0,1 m od povrchu zařízení menší než 0,001 mSv/h, nebo
 - d) byl uvolněn z pracoviště v souladu s tímto zákonem.

Vyhláška 422/2016 Sb.

§ 3

Obecné limity pro obyvatele (K § 63 odst. 6 atomového zákona)

Obecnými limity pro obyvatele z ozáření ze všech povolených nebo registrovaných činností za jeden kalendářní rok jsou

- a) pro součet efektivních dávek ze zevního ozáření a úvazků efektivních dávek z vnitřního ozáření 1 mSv,
- b) pro ekvivalentní dávku v oční čočce 15 mSv a
- c) pro průměrnou ekvivalentní dávku na každý 1 cm² kůže 50 mSv bez ohledu na velikost ozářené plochy.

§ 4

Limity pro radiačního pracovníka (K § 63 odst. 6 atomového zákona)

(1) Limity pro radiačního pracovníka musí být použity pro omezení profesního ozáření a jsou

- a) pro součet efektivních dávek ze zevního ozáření a úvazků efektivních dávek z vnitřního ozáření 20 mSv za kalendářní rok nebo hodnota schválena Úřadem podle § 63 odst. 4 atomového zákona, nejvýše však 100 mSv za 5 po sobě jdoucích kalendářních let a současně 50 mSv za jeden kalendářní rok,
- b) pro ekvivalentní dávku v oční čočce 100 mSv za 5 po sobě jdoucích kalendářních let a současně 50 mSv v jednom kalendářním roce,
- c) pro průměrnou ekvivalentní dávku na každý 1 cm² kůže 500 mSv za kalendářní rok bez ohledu na velikost ozářené plochy a
- d) pro ekvivalentní dávku na ruce od prstů až po předloktí a na nohy od chodidel až po kotníky 500 mSv za jeden kalendářní rok.

A na závěr motto:

Mírná radioaktivita nikdy neškodí.

prof. Jiří Příhoda

