VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ
V BRNĚ

Financováno Evropskou unií
NextGenerationEU

NÁRODNÍ PLÁN OBNOVY

MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ, MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FAKULTA CHEMICKÁ

FAKULTA STAVEBNÍ

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

Přednáška magisterského studijního programu JADERNÁ ENERGETIKA

Radioekologie a úvod do jaderných technologií

Chování radionuklidů ve složkách životního prostředí – půda, voda, vzduch, přenos radionuklidů

Fakulta chemická

Ota Fišera

2024

CC BY NC SA

Osnova

Radioekologie

1. Chování radionuklidů ve složkách životního prostředí – půda, voda, vzduch, přenos radionuklidů
2. Biologické účinky a dozimetrie ionizujícího záření – lineární bezprahový model, nemoc z ozáření, dávka IZ, ochrana před IZ
3. Ionizující záření a radioaktivita v přírodě – kosmické záření, přírodní radionuklidy, Rn

Úvod do jaderných technologií

4. Monitorování radiační situace v životním prostředí – síť včasného zjištění, národní monitorovací plán, stanovení radionuklidů
5. Ekologické aspekty palivového cyklu I – těžba a zpracování uranové rudy – haldy, čištění vod, uvolňování do ŽP
6. Ekologické aspekty palivového cyklu II – výroba paliva – principy separace 235-U a výroby paliva, vliv na ŽP

CC BY NC SA

Osnova

Úvod do jaderných technologií – pokračování

7. Ekologické aspekty palivového cyklu III – provoz jaderné elektrárny – plynné a kapalné výpusti, radiační ochrana, monitorování
8. Ekologické aspekty palivového cyklu IV – zpracování vyhořelého jaderného paliva – PUREX proces, ekologie
9. Vliv havárií jaderných zařízení na životní prostředí – Černobyl, Fukušima
10. Ostatní radiační situace – zkoušky jaderných zbraní, vojenské programy, zdroje mimo kontrolu
11. Využití jaderných reakcí a ionizujícího záření – výroba a využití radionuklidů, nukleární medicína, ozařování potravin, radiační chemie polymerů, radioanalytické metody (neutronová aktivační analýza, radioimunoanalýza, metody datování)
12. Izotopové efekty a separace izotopů – izotopové efekty v přírodě a v průmyslu

cc BY NC SA

Doporučená literatura

J. Hála: Radioaktivita, ionizující záření, jaderná energie. Konvoj, 1998.

M. Eisenbud: Environmental Radioactivity. Academic Press, Inc., Orlando, 1997.

G. R. Choppin, J. Rydberg: Nuclear Chemistry. Butterworth-Heinemann, 2002.

Z. Dlouhý: Nakládání s radioaktivním odpadem a vyhořelým jaderným palivem. VUTIUM, 2009.

K. Štamberg: Technologie jaderných paliv I a II. ČVUT, Praha. 2006.

cc BY NC SA

Radioekologie

- **Ekologie** = vztah mezi organismy a jejich prostředím
  → chemie životního prostředí (ŽP) – vliv chemických polutantů
- **Radio** = radioaktivní látky a ionizující záření (IZ) jako polutanty
- Výskyt přírodních radionuklidů (RN) a zdrojů IZ
- Zavádění radionuklidů do ŽP z různých technologií
- Chování RN v ŽP – transport v ekosystému
- Odhad dávky IZ z RN a její vliv na člověka
- Monitorování aktivity a dávek

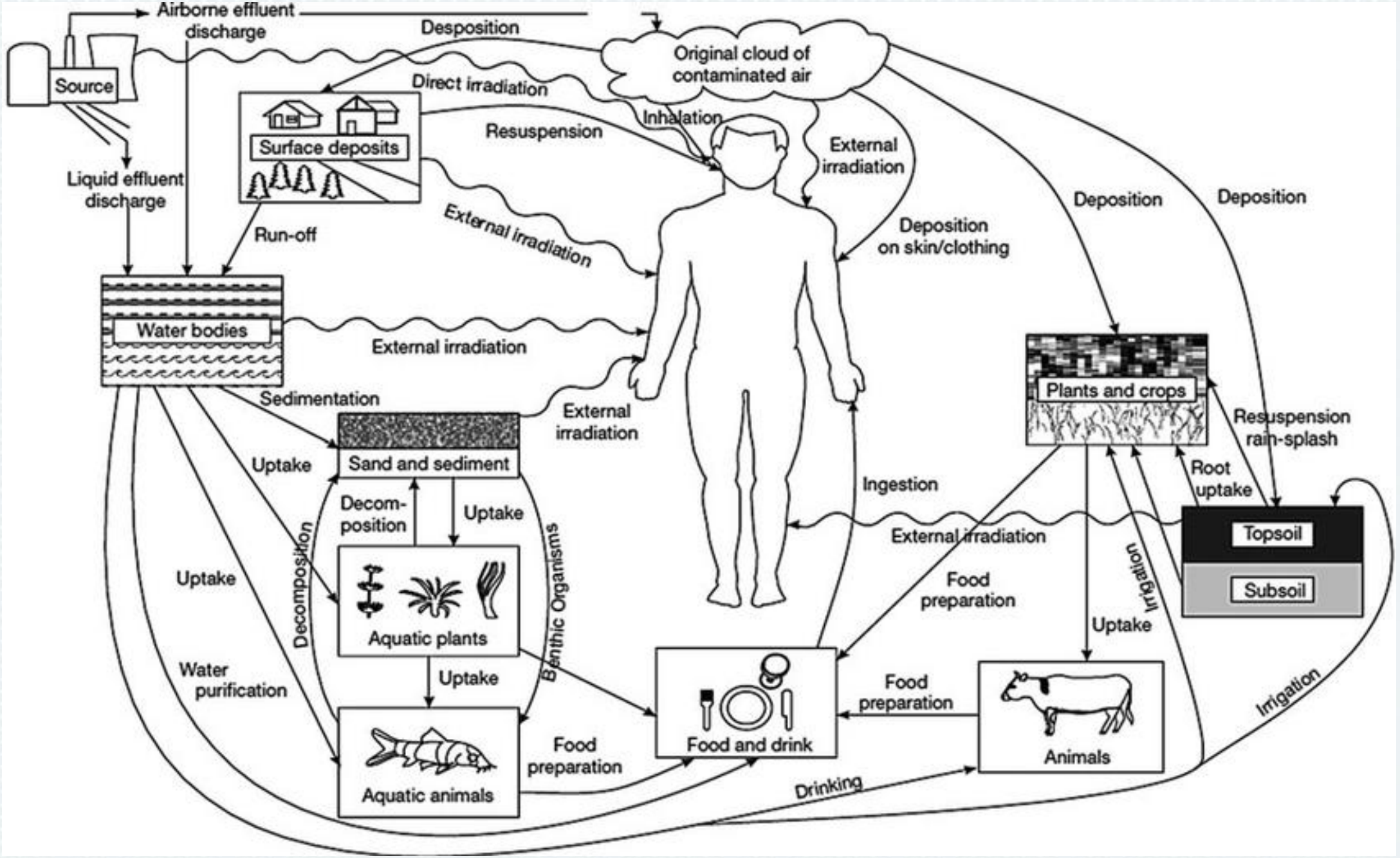
CC BY NC SA

Migrace radionuklidů ve složkách ŽP

- **Složky životního prostředí:**
  - půda
  - voda
  - vzduch

- **Faktory ovlivňující mobilitu radionuklidů:**
  - zadržování
  - uvolňování
  - přenos mezi složkami

cc BY NC SA



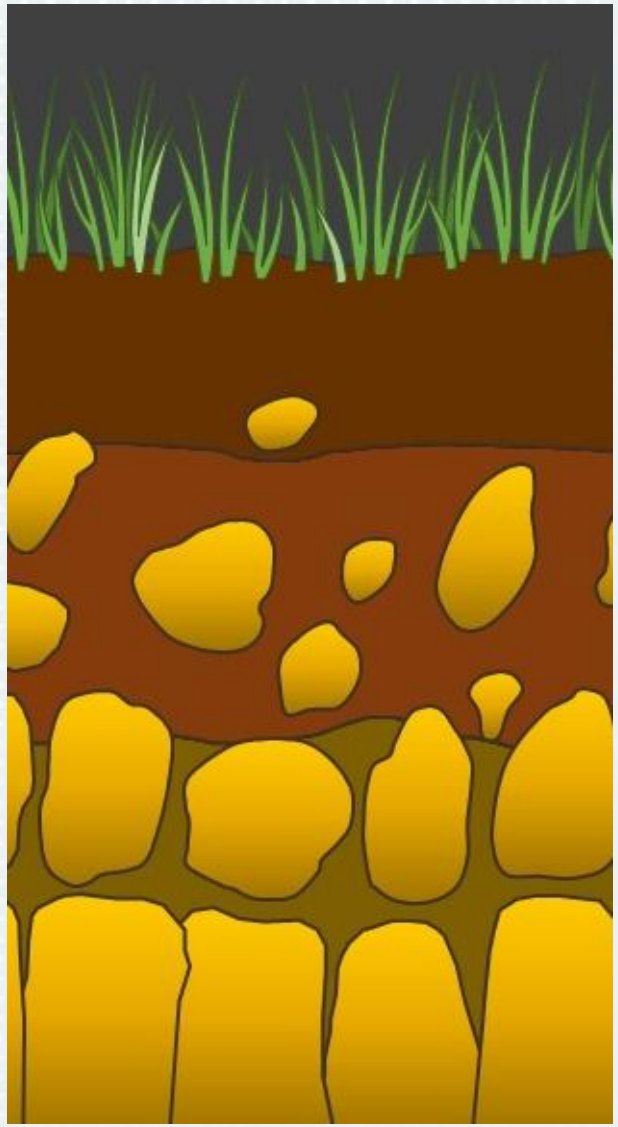
Zdroj: Treatment of radioactive gaseous waste. Vienna : international atomic energy agency, 2014

BY NC SA

Půda

- Vrchní vrstva pevné zemské kůry (do 30–60 cm)

- Většina potravy souvisí s půdou → příjem živin i radionuklidů



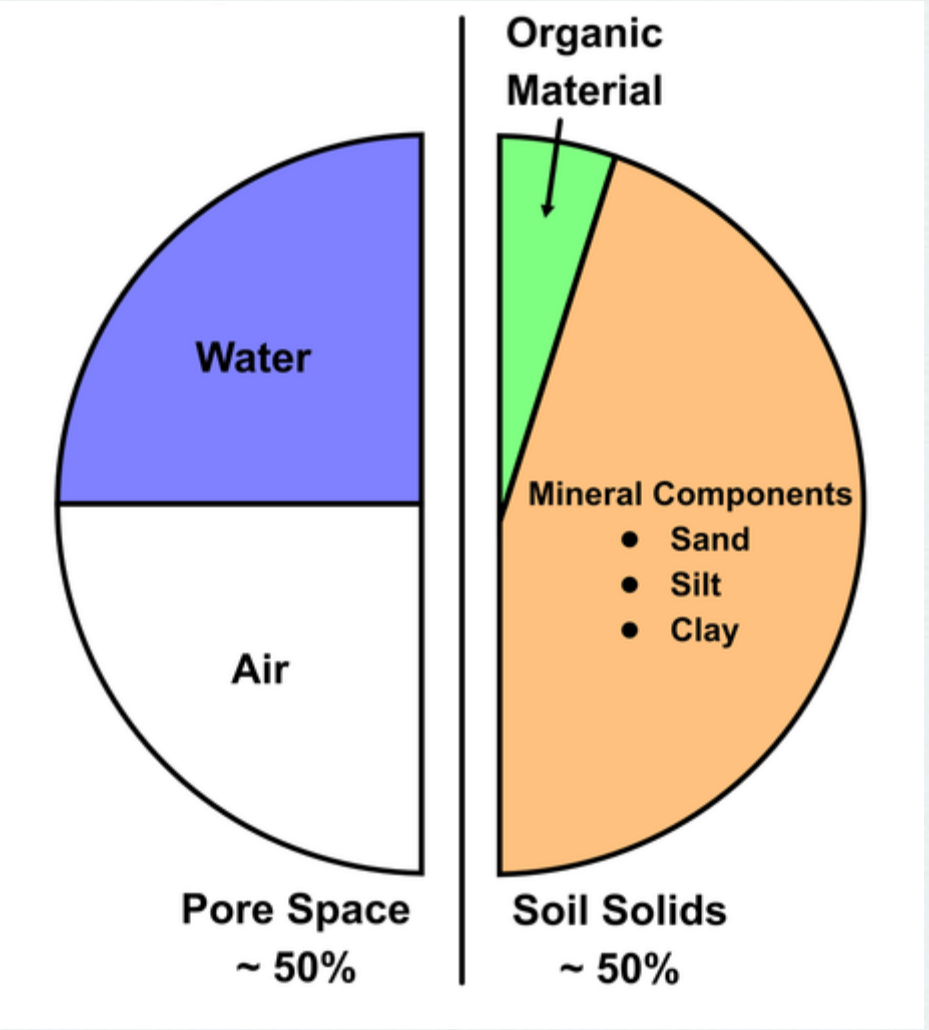
Credit: Antonio Jordán (distributed via imaggeo.egu.eu)

CC BY NC SA

Složky půdy

1. Minerální složka
2. Organická složka
3. Půdní voda/roztok
4. Půdní plyn

+ Mikroorganismy, řasy



Zdroj: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Components_of_Soil_Pie_Chart.png

CC BY NC SA

1. Minerální složka

- **Částice různé velikosti:**
  - Písek – křemen a jiné minerály – >0,05 mm
  - Prach 0,001 – 0,05 mm
  - Mikroskopické částice jílu <0,001 mm
    - koloidy, sandwichové krystaly Al-SiO-
    - Interakce RN s povrchovými skupinami:
      - chemisorpce – hydrolyzované ionty s vyšším nábojem

        $$-Si-OH\ (s) + HO-M^{(z-1)+} \rightarrow -Si-O-M^{(z-1)+}\ (s) + H_2O$$

      - iontová výměna nehydrolyzovaných iontů

        $$-Si-O-Na^{+}\ (s) + {}^{137}Cs^{+} \rightarrow -Si-O-{}^{137}Cs^{+}\ (s) + Na^{+}$$

      - specifické mechanismy

CC BY NC SA

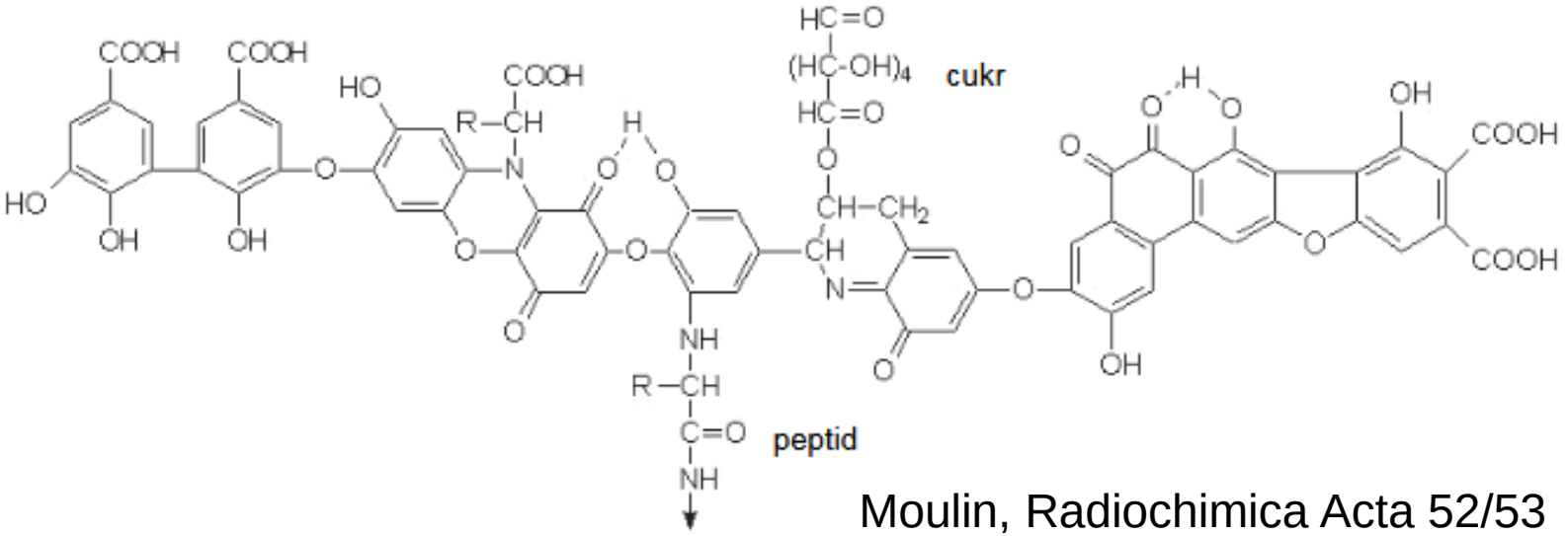
Jílové materiály

	Skupina		
	Kaolinit	**Montmorillonit**	**Hydroslída (illit)**
Struktura	dvojvrstvá	trojvrstvá	trojvrstvá
Vlastnosti		Přijímá vodu – bobtnání	
Kationtová kapacita (mmol/kg)	<250	800 až 1200	450 až 500

BY NC SA

2. Organická složka

- Zbytky rostlinného a živočišného původu
- V různém stádiu rozkladu (vliv řas, hub, bakterií …)
- Syntéza produktů rozkladu → **huminové kyseliny**
  – vysokomolekulární, aromatické, kyselé látky
  – obsahují N a různé funkční skupiny → komplexy RN



Moulin, Radiochimica Acta 52/53

BY NC SA

Vysokomolekulární látky vznikající rozkladem rostlinných a živočišných zbytků

	Huminové kyseliny	Fulvokyseliny	Humin
Vlastnosti	Rozpustné v zás. roztocích, srážejí se kyselinou	Zůstávají v roztocích po vysrážení HK	HK a FK pevně vázané na minerální složku půdy (+ celulóza, lignin)
Barva	Tmavě hnědá až černá	Světlá	
Kationtová kapacita (mmol/kg)	10 000	8 000 až 12 500	

cc BY NC SA

Huminové kyseliny: interakce s radionuklidy

- Vazba RN na koloidní HK na povrchu půdních částic
- Vazba komplexu HK-RN (aq) na půdní částici

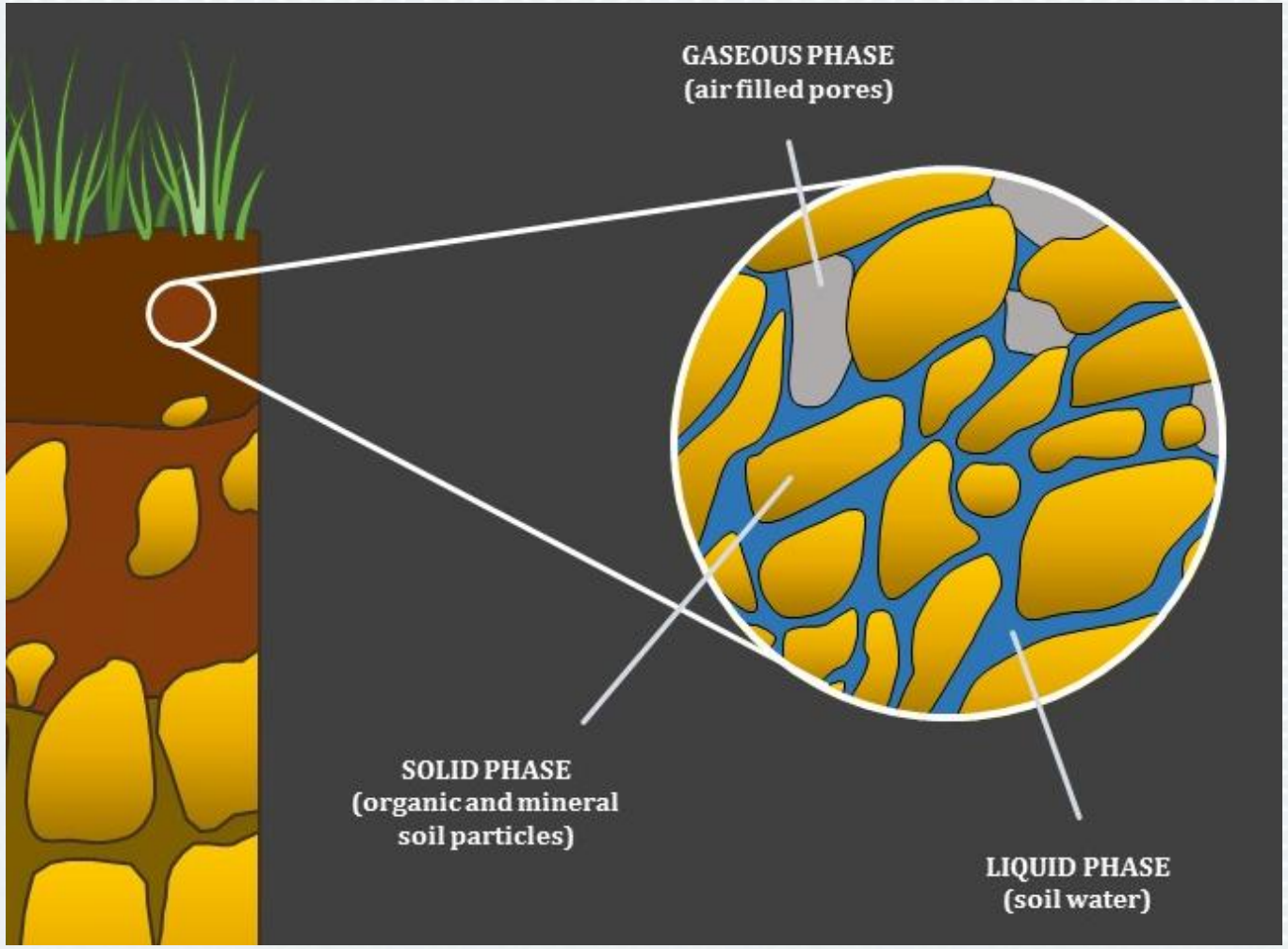
cc BY NC SA

3. Půdní voda/roztok

- RN rozpuštěné v kapalině mezi částicemi nebo v pórech vázané kapilárními silami

4. Půdní plyn

- Oproti vzduchu obohacen o CO_2 (10-500 x) + H_2S, NH_3, CH_4, SO_2



Credit: Antonio Jordán
(distributed via imaggeo.egu.eu)

cc BY NC SA

Mikroorganismy, řasy

Mechanismy interakce:

a) **Biosorpce** – fyz-chem. děje nezávislé na metabolických procesech, na živých i mrtvých organismech – funkční skup. -COOH, $-NH_2$, -OH, -SH, $-PO_3H_2$

b) **Biomineralizace** – srážení RN působením ligandů jako produktů metabolismu – PO_4^{3-}, S^{2-}, CO_3^{2-}, oxaláty

c) **Bioakumulace** – vnitrobuněčný příjem – závislé na metabolismu – typické pro fyziologicky příbuzné RN – $^{137}Cs/K$; ^{90}Sr, $^{226}Ra/Ca$

d) **Enzymatické loužení** – biokatalytické urychlování oxidačních procesů → nerozpustné S^{2-} na rozpustné SO_4^{2-}

cc BY NC SA

Voda

- Chování radionuklidů ve vodách (i v půdním roztoku)

Zdroj: https://picryl.com/media/hydrosphere-water-iceberg-79b779

- RN se vyskytují ve vodě:
  - v extrémně nízkých koncentracích (vyjma U)
    $A = \lambda * N$; $\lambda = \ln(2)/T_{1/2}$; $N = n * N_a$
    → $n = (A * T_{1/2})/(\ln(2) * N_a)$
    ^{137}Cs: 100 Bq/m^3, $T_{1/2}$ = 30 r
    → $2{,}3.10^{-16}$ mol/l
  - jako kationty (anionty – I, Tc)
    → hydratace, hydrolýza, komplexy
    → vliv na mobilitu

cc BY NC SA

Vliv na mobilitu

1. Hydratace
2. Hydrolýza
3. Tvorba komplexů
4. Redoxní potenciál
5. Míšení

BY NC SA

1. Hydratace

- funkce náboje a poloměru iontu
- povrchová hustota náboje

$$M^{z+}\ldots{}^{\delta-}O\text{-}H_2{}^{\delta+}$$

cc BY NC SA

2. Hydrolýza

- funkce povrchové hustoty náboje, pH, koncentrace
- monomery (aq) → polymery → (s) – hydroxidy, hydratované oxidy
  → **snižuje mobilitu** RN

$M^{z+}\ldots{}^{\delta-}O\text{-}H_2{}^{\delta+} \rightarrow M(OH)^{(z-1)+} \rightarrow M(OH)_2{}^{(z-2)+}$
→ -M(OH)-(OH)M- → $M_xO_y.nH_2O$ (s) (např. Th)

- Hydrolýza při nízkých koncentracích
  → **radiokoloidy** (RK)
- RK pravé – v čisté vodě
- RK nepravé – sorpce/vazba RN na koloidní částice – jíl, humin, hydroxidy (Fe, Mn), polymerní kyselina křemičitá

- **Vliv na chování RN**

  – ztráta charakteristických chemických vlastností

  – přechod RN do (s) i při velmi nízkých koncentracích

  → ukládání RN v sedimentech → snižuje mobilitu (ukládání RAO do moře, geolog. úložiště)

cc BY NC SA

3. Tvorba komplexů

- Konkuruje hydrolýze a tvorbě RK vznikem rozpustných forem RN
  → **zvyšuje mobilitu**
  (sediment → voda)

- Ligandy:
  - anorganické – CO_3^{2-}, HPO_4^{2-}
  - organické
    – šťavelan, citran
    – huminové kyseliny
    (vždy koloidní – zvyšuji i snižují mobilitu)

4. Redoxní potenciál

- význam u radionuklidů s více valenčními stavy (U3+ až 6+, Np, Pu)

- vliv rozpuštěného O_2

cc BY NC SA

5. Míšení

- faktory: vrstva vody, reliéf dna, vítr, teplota, hloubka přísunu RN, proudění vody, příliv/odliv
- individuální pro každou řeku, záliv, jezero, moře
- časově proměnné
- význam: zředění → snížení rizika (výpusti z JE)

Vrstvy vody v oceánech

- **Povrchová voda:** 10–200 cm, rychlé promíchávání větrem, vertikální gradient teploty, hustota a koncentrace solí konstantní
- **Přechodová vrstva:** roste koncentrace a hustota, brání míšení horní a spodní vrstvy
- **Spodní vrstva:** 75 %, T = 1 – 4°C

- **Situace v oceánech** (RAO, jaderné testy, Fukušima)
  - zkoušky jaderných zbraní za 40 dní:

    / radioaktivita do vzdálenosti 225 km / zamořená plocha 40 000 km^2

    / zředění $3{,}7.10^{13}$ Bq → 5.10^{-3} Bq/l / malý průnik do hloubky: 30–60 m

cc BY NC SA

Chování radionuklidů ve vodách – shrnutí

- O mobilitě RN ve vodách a tím o dostupnosti pro organismy rozhoduje:
  - Fyzikální vlastnosti RN – náboj, poloměr iontu
  - Forma RN – rozpustná x nerozpustná
  - Vlastnosti prostředí – pH, oxidačně-redukční potenciál
  - Komponenty prostředí – ligandy, koloidy

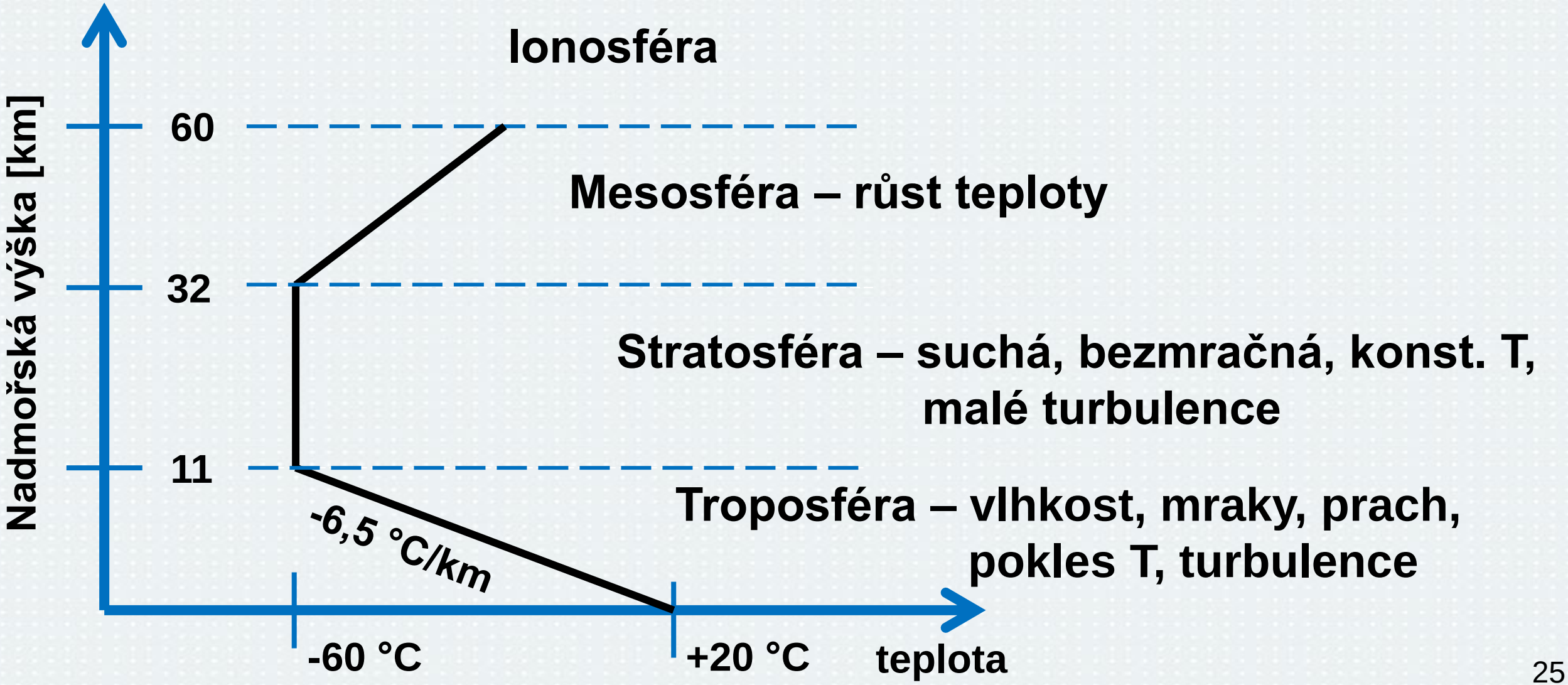
→ **různé formy RN**

ionty, molekuly, komplexy	/	koloidy	/	větší částice
<1 nm		1 nm–0,45 μm		>0,45 μm

- V různých formách se RN chová různě – chemicky i biologicky
  → vliv na přenos RN mezi složkami, dostupnost RN a toxicitu

CC BY NC SA

Atmosféra



cc BY NC SA

Migrace radionuklidů v atmosféře

Troposféra

- rychlé míšení a rozptyl
- faktory:
  - rychlost a směr větru
  - meteorologické podmínky (srážky, inverze)
- zdroje RN: výpusti z jaderných elektráren

Stratosféra

- pomalý rozptyl
- dlouhé setrvání
- zdroje RN: exploze, havárie

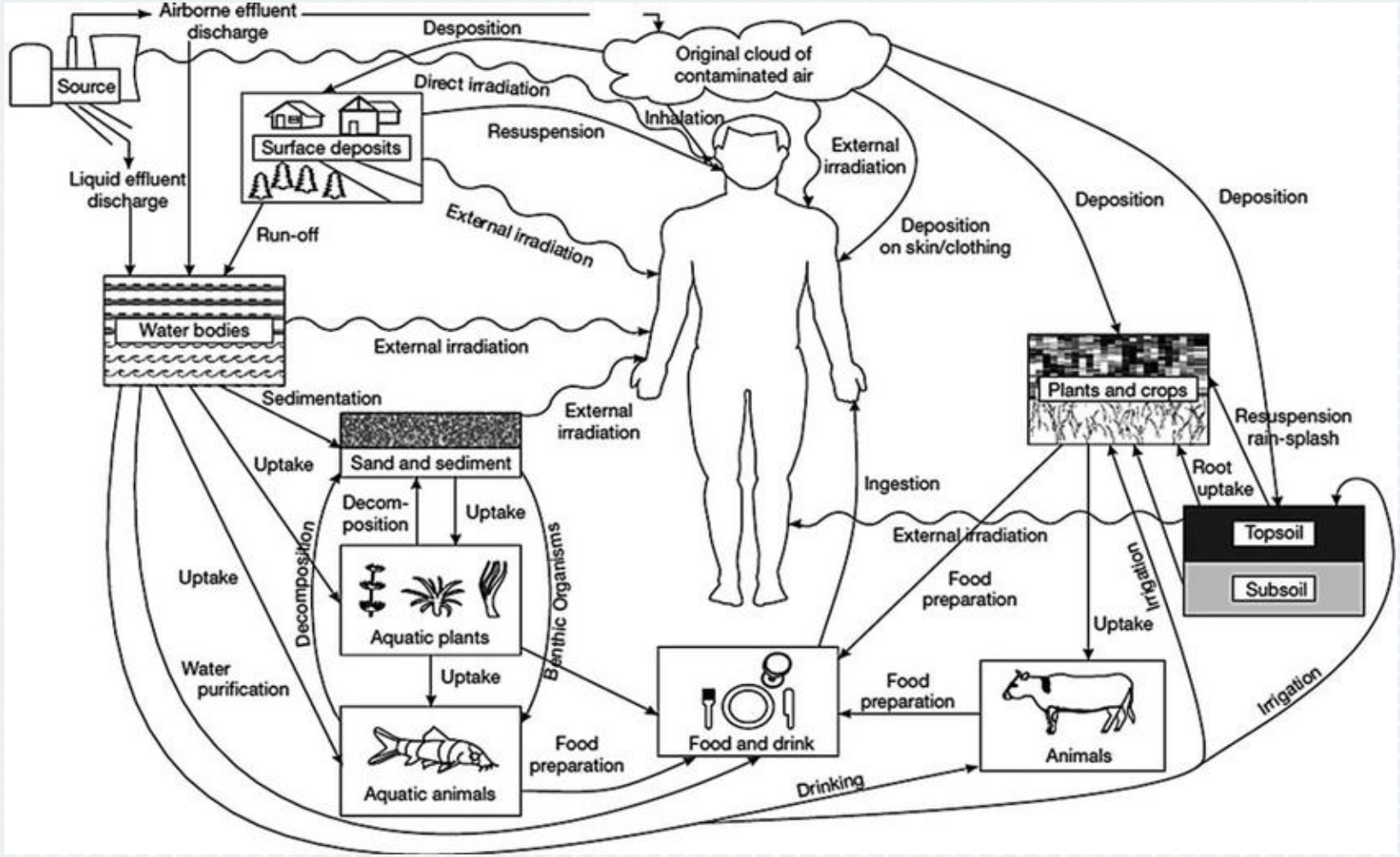
cc BY NC SA

Formy radionuklidů v atmosféře

- **Plyny**: ^{3}H, ^{14}C, ^{131}I (různé formy), izotopy Kr, Xe, Rn
- **Aerosoly**: štěpné produkty, dceřiné produkty Rn
  - **Depozice aerosolů**
    - Suchá – gravitace, náraz na překážku
    - Mokrá – vymývání srážkami (rozdíly po Černobylu)
  - **Faktory pro rychlost depozice aerosolů:**
    - Velikost částic
    - Hustota (teplota) vzduchu
    - Vrstva atmosféry: troposféra – rychlá depozice
      stratosféra – postupná depozice – **globální spad**

cc BY NC SA

Přenos RN mezi složkami ŽP



Zdroj: Treatment of radioactive gaseous waste. Vienna : international atomic energy agency, 2014

BY NC SA

Koeficient přenosu (transfer factor)

- Kvantitativní rozdělení/přechod mezi složkami

  složka A → → → složka B

  (RN na počátku) (přechod RN z A do B)

$$F_t(A \rightarrow B) = A_{m(B)}/A_{m(A)}$$

- Vyjádření afinity RN ke složce B vzhledem k složce A
- Rozměr podle měrných aktivit: (Bq/kg)/(Bq/kg), (Bq/kg)/(Bq/m^3)

CC BY NC SA

Koeficient přenosu – vlivy

- Koeficient přenosu je empirická veličina
- Vlivy:
  - vlastnosti složky (různé vody, půdy), různý rozsah mobilizace/fixace RN
  - speciace RN (aq): UO_2^{2+}, $UO_2(CO_3)_3^{4-}$, koloidy, hydrolýza (podle pH)
  - vlastnosti rostlin: charakter kořenového systému, fyziologie, buněčný příjem
  - přítomnost podobných iontů ($K^+/^{137}Cs^+$)

BY NC SA

Koeficient přenosu – příklady

Koeficienty přenosu ^{90}Sr

přenos	F_T
půdní voda → pevná složka půdy	80 - 150 ml g^{-1}
půda → píce	0,05
půda → ovoce, zelenina	0,3
voda → rostliny	460 dm^3 kg^{-1}
voda → ryby	30 dm^3 kg^{-1}
píce → maso	0,003[a]
píce → mléko	0,002[a]

[a] obsah ^{137}Cs v potravě (Bq kg^{-1}) při příjmu zvířetem Bq/den

BY NC SA

Koeficient přenosu – využití

- **Fytoremediace** – odstranění RN z půd působením rostlin
  - Půda → příjem živin kořeny (např K^+, ale i podobné ionty $^{137}Cs^+$)
    → přechod do nadzemní části rostliny → sklizeň
    → biomasa (+ radionuklidy) → snížení objemu (lisování, spalování – RN (^{137}Cs) v popelu) → RAO
- Žádoucí vysoké F_t, rychlý růst – několik sklizní za rok → velký objem biomasy
- Pokusy: Černobyl, Brookhaven (USA), JE Bradwell (UK)
  - redroot pigweed (rychle rostoucí plevel) / amarant / laskavec / slunečnice / špenát
- Negativní faktory: zdlouhavé, vazba ^{137}Cs na jíl

cc BY NC SA

Magisterský studijní program JADERNÁ ENERGETIKA vznikl za přispění

Financováno Evropskou unií
NextGenerationEU

NÁRODNÍ PLÁN OBNOVY

MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ, MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

NPO_VUT_MSMT-16609_2022

CC BY NC SA

VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ
V BRNĚ

Financováno Evropskou unií
NextGenerationEU

NÁRODNÍ PLÁN OBNOVY

MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ, MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FAKULTA CHEMICKÁ

FAKULTA STAVEBNÍ

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

Přednáška magisterského studijního programu JADERNÁ ENERGETIKA

Radioekologie a úvod do jaderných technologií

Biologické účinky a dozimetrie ionizujícího záření – dávka IZ, ochrana před IZ

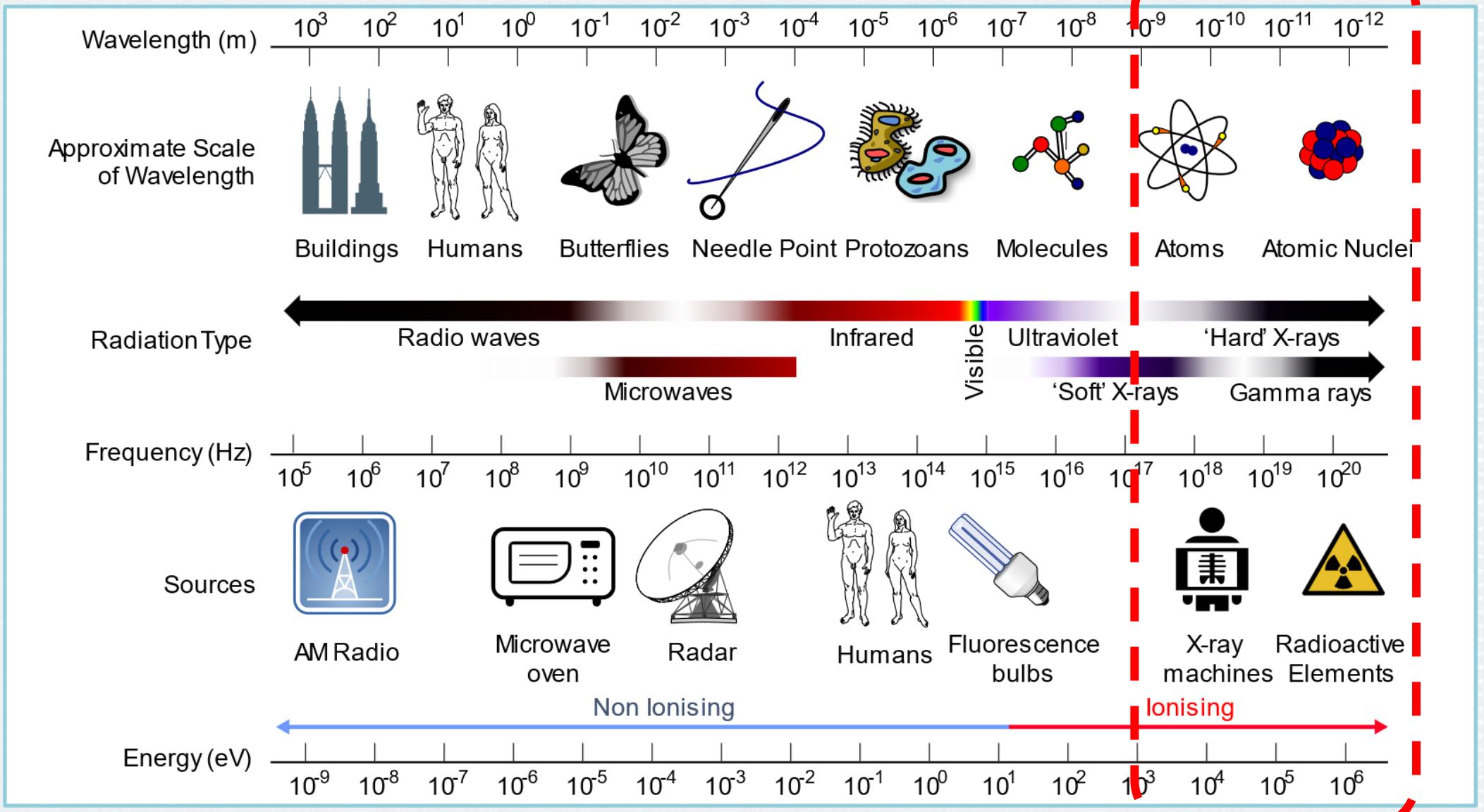
Fakulta chemická

Ota Fišera

2024

CC BY NC SA

Ionizující záření



Zdroj: Dinksbumf, Inductiveload, NASA, CC BY-SA 3.0, via Wikimedia Commons

CC BY NC SA

Ionizující záření

- kvanta záření mající schopnost ionizovat, $E_{ioniz} < 20$ eV
- současně i excitace
- uznávaná (legislativní) hranice E > 5 keV
  - není jednoznačná
  - nelze aplikovat na neutrony (reakce tepelných n^0) a pozitrony (anihilace)

cc BY NC SA

Ionizující záření – dělení

- **Přímo ionizující záření** – nabité částice (p^+, e^-, e^+ atp.)
  - přímá ionizace prostředí coulombickou interakcí
- **Nepřímo ionizující záření** – nenabité částice (n^0, γ)
  - uvolňují sekundární přímo ionizující částice
  - $\gamma \rightarrow e^-$ (elektromagnetická interakce) $\rightarrow$ ionizace
  - $n^0 \rightarrow p^+$ (vodík) nebo jaderná reakce $\rightarrow$ ionizace
- **Korpuskulární záření** – hmotné částice (p^+, n^0, e^-, e^+)
- **Elektromagnetické záření** – fotony (γ, rtg.)

cc BY NC SA

Příjem radionuklidů do lidského organismu

- **Ingesce** – potraviny, voda
- **Inhalace** – plynné radioaktivní látky, aerosoly
  - částice >10 μm – horní cesty dýchací / 1–5 μm – plíce
  - příjem inhalací závisí na frekvenci dýchání, dechovém objemu, době expozice
- **Povrch těla** – kůže, sliznice, poranění

CC BY NC SA

Distribuce radionuklidů v organismu

- **Rovnoměrná** v celém těle (např. ^{137}Cs)

vs

- **Specificky** v určité tkáni/orgánu
  - **Kritický orgán** pro určité RN (kde se nejvíc koncentruje)
  - Vliv – fyziologie – ^{90}Sr, ^{131}I
    – chemická forma a rozpustnost
    (^{239}Pu(rozp.) → kost / PuO_2 → plíce)

cc BY NC SA

Odstraňování radionuklidů z organismu

- Přírodní procesy: fyzikální – přeměna RN…$T_{1/2}$
  biologické – vylučování…T_B
- Obojí snižuje aktivitu a dávku v těle → společný efekt

Efektivní poločas

$$\frac{1}{T_{ef}} = \frac{1}{T_{1/2}} + \frac{1}{T_B}$$

$$T_{ef} = \frac{T_{1/2} * T_B}{T_{1/2} + T_B}$$

cc BY NC SA

Efektivní poločasy a kritické orgány			
Radionuklid	**$T_{1/2}$**	**T_{ef}**	**Kritický orgán**
^{3}H	12,35 r	10-20 dní	celé tělo
^{90}Sr	28,1 r	15 r	kost
^{131}I	8,05 dne	7,5 dne	štítná žláza
^{137}Cs	30 r	70 dní	celé tělo
^{226}Ra	1620 r	45 r	kost
^{239}Pu	24400 r	110 r	kost, plíce

cc BY NC SA

Odstraňování radionuklidů z organismu

- Zvýšené vylučování pomocí chelátotvorných činidel
- Jen při prokázaném příjmu RN při nehodách
- Např.: 1997 – USA, exploze ionexové kolony s ^{241}Am
  2001 – ČR, inhalace rad. prachu ^{241}Am
  při likvidaci výrobních boxů (nedodržení postupu)

cc BY NC SA

Odstraňování radionuklidů z organismu

^{137}Cs

- Hexakyanoželeznatan železitý – $Fe_4[Fe(CN)_6]_3$ (Pruská modř)
- Další opatření – diuretika, zvýšený pitný režim, zvýšené pocení (cvičení)

^{210}Po

- Thioly (merkaptany) – cheláty se skupinou –SH (DMPS, DMSA, BAL)
- Efekt nejen komplexací ^{210}Po ale i antioxidační účinky (radioprotektivní l.)

Th, Pu, Am

- Ca (Zn) sůl kyseliny diethylentriaminpentaoctové (DTPA)

U

- $NaHCO_3$ – zvyšuje pH moči + diuretika

Sr

- $AlPO_4$ – antacid ve formě gelu – adsorbent v zažívacím traktu

BY NC SA

Radiotoxicita

- Riziko radionuklidů pro lidský organismus:
  - α, β z vnitřního ozáření
  - γ z vnějšího ozáření
- **Faktory:**
  - Fyzikální vlastnosti – druh a energie záření, $T_{1/2}$
  - Fyziologické vlastnosti – kritický orgán a jeho radiosensitivita, rychlost vylučování, T_B, T_{ef}

cc BY NC SA

Radiotoxicita

- Srovnání chemické toxicity a radiotoxicity:

  Pb:

  - Limit pro profesní expozici: 50 µg/m^3
  - Limit $A_v(^{210}Pb)$ = 15 Bq/m^3 ~ 5,3.10^{-6} µg Pb/m^3

  U:

  - Mezní hodnoty pro U v pitné vodě: 15 µg/l
  - Mezní hodnota objemové aktivity: 12 Bq/l ~ 900 µg/l

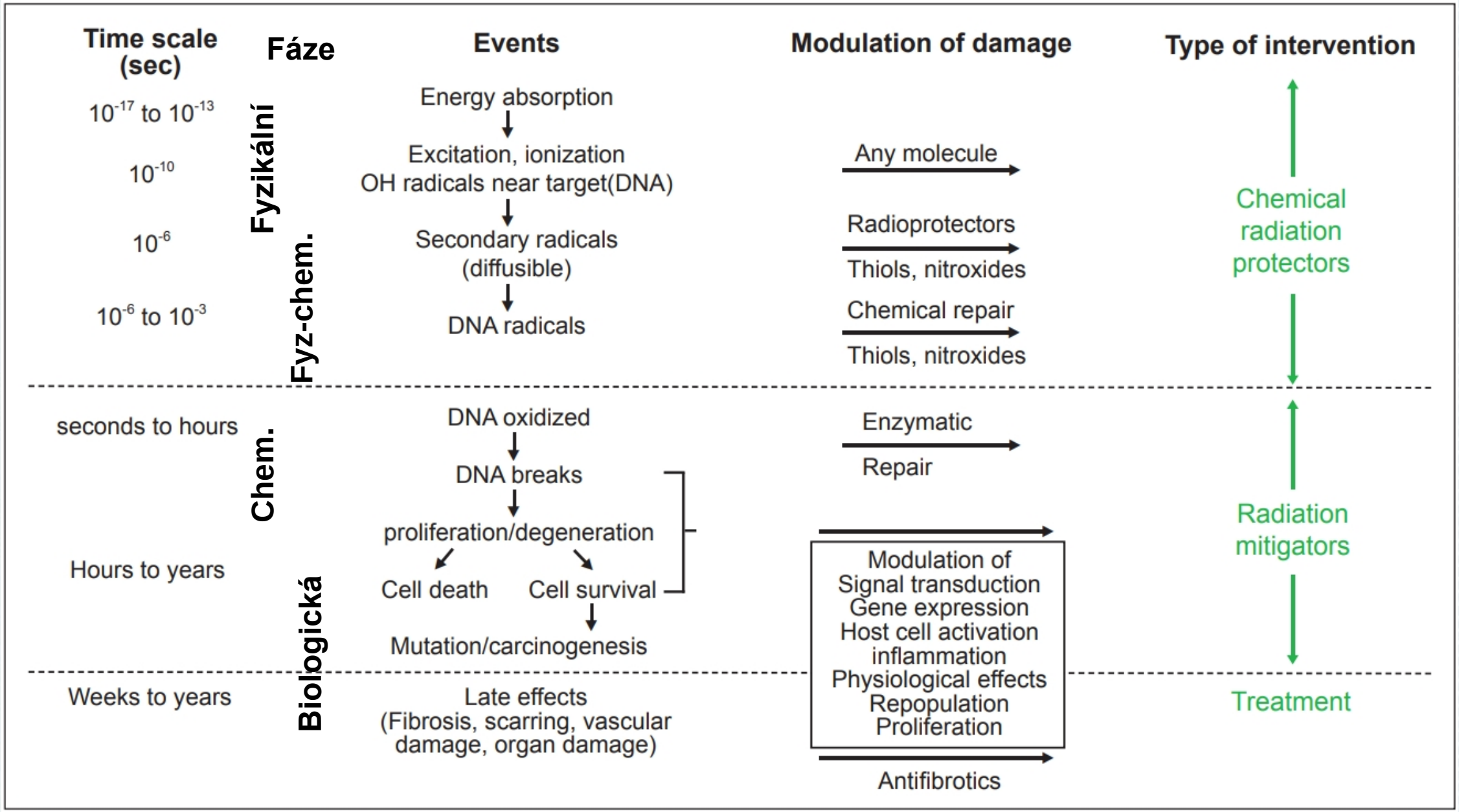
cc BY NC SA

Biologické účinky ionizujícího záření

- **Energie** IZ (α, β, γ) ~ keV, MeV × 1. ionizační potenciál vody 12,6 eV

1. **Fyzikální fáze** – absorpce E → ionizace, excitace (10^{-13} s)
2. **Fyz.-chemická fáze** – mezimolekulární interakce (10^{-6} s)
3. **Biochemická fáze** – tvorba chemických radikálů (10^{-13} s) → chemické změny
4. **Biologická fáze** – reakce radikálů s biologickým materiálem (buňky, tkáně, orgány) → **biologické změny**

cc BY NC SA



Zdroj: DOI: 10.3857/roj.2018.00381

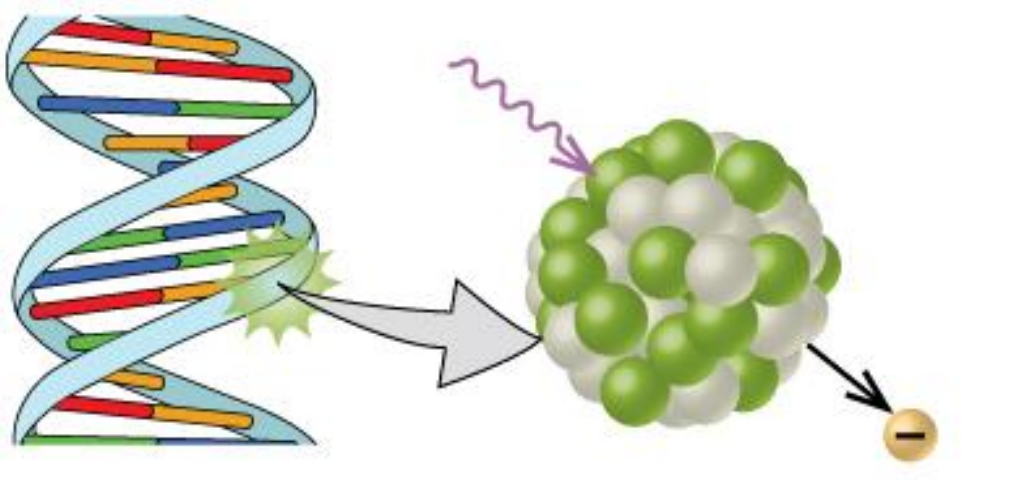
BY NC SA

Biologické účinky ionizujícího záření

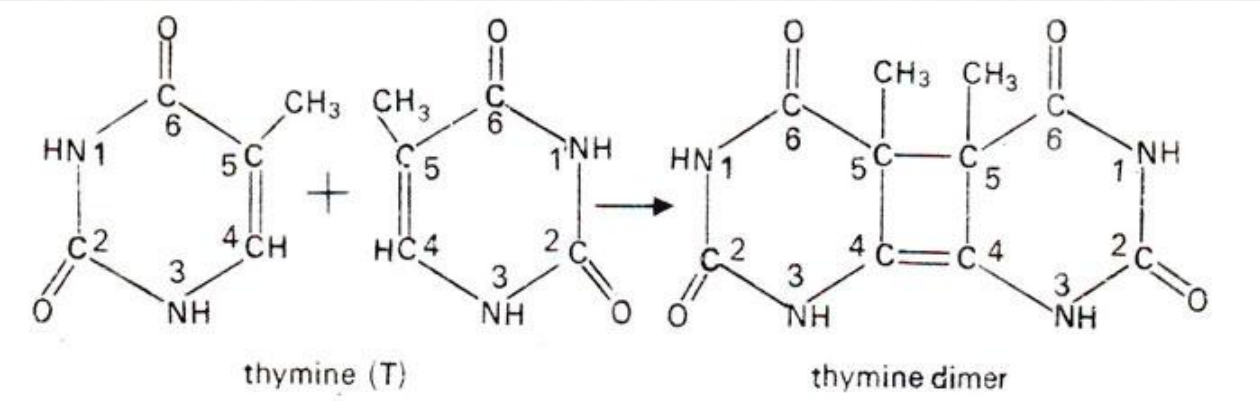
- **Příčiny poškození**: změny v buňkách a tkáních
- **Přímé účinky**: změna biologicky aktivních molekul přímým zásahem IZ – DNA, membrány aj. buněčné komponenty
- **Nepřímé účinky**: chemické účinky radiolýzy vody, kyslíkový efekt
- Nízké D a Ḋ – nepřímý účinek
- Vysoké D a Ḋ – nepřímý i přímý účinek

CC BY NC SA

Přímé účinky

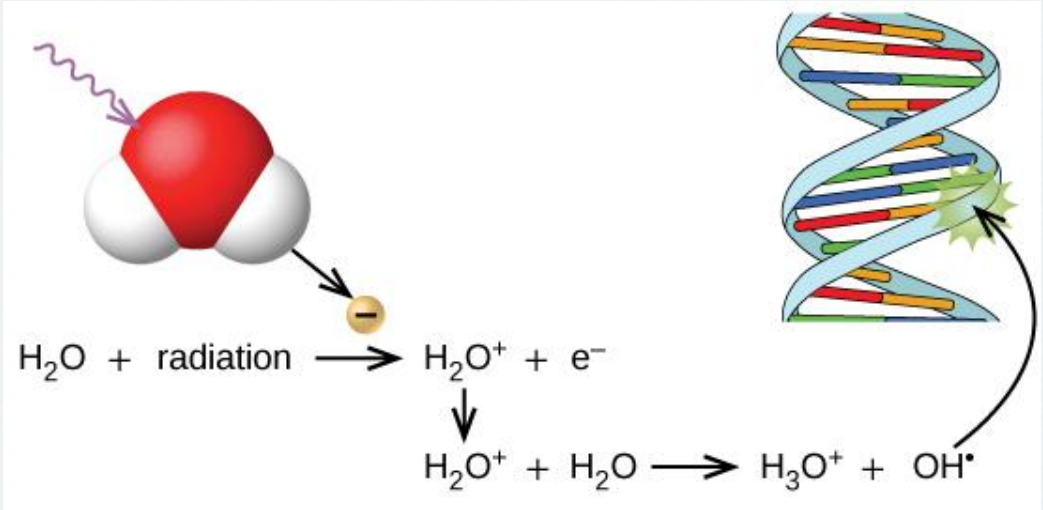


Zdroj: chem.libretexts.org

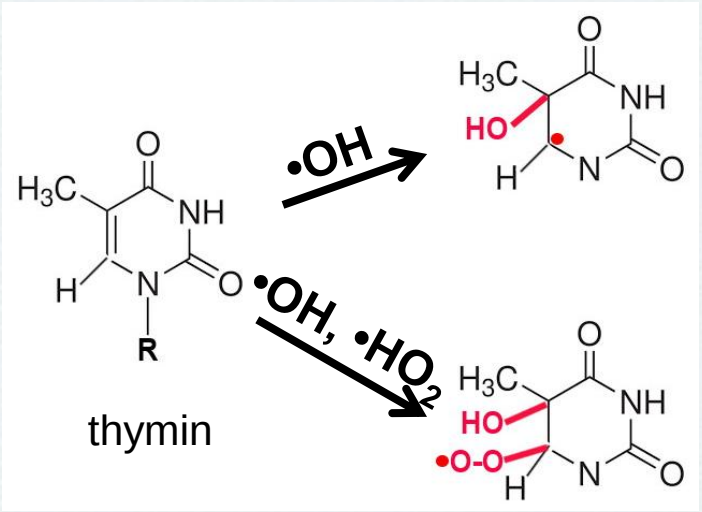


Dimerace pyrimidinových bází

Nepřímé účinky



Zdroj: chem.libretexts.org



cc BY NC SA

Hodnocení biologických účinků

Faktory ovlivňující poškození:

- Energie předaná zářením organismu

  Dávka $D = dE/dm$ $(J \cdot kg^{-1} = Gy = gray)$

- Rychlost deponování energie

  Dávkový příkon $\dot{D} = dD/dt$ $(W \cdot kg^{-1}, Gy \cdot s^{-1})$

- Druh záření – hustota ionizace podél dráhy

  Lineární přenos E $LET = dE/dx$ $(J \cdot m^{-1}, keV \cdot \mu m^{-1})$

- Radiosensitivita orgánů a tkání – různá citlivost vůči IZ → různé reakce na stejnou D

CC BY NC SA

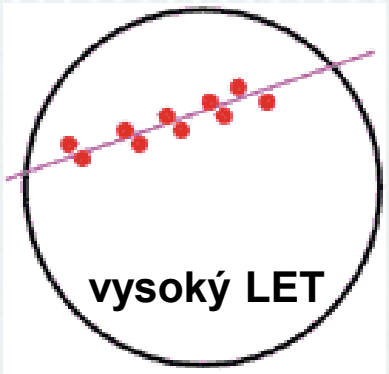
Ekvivalentní dávka

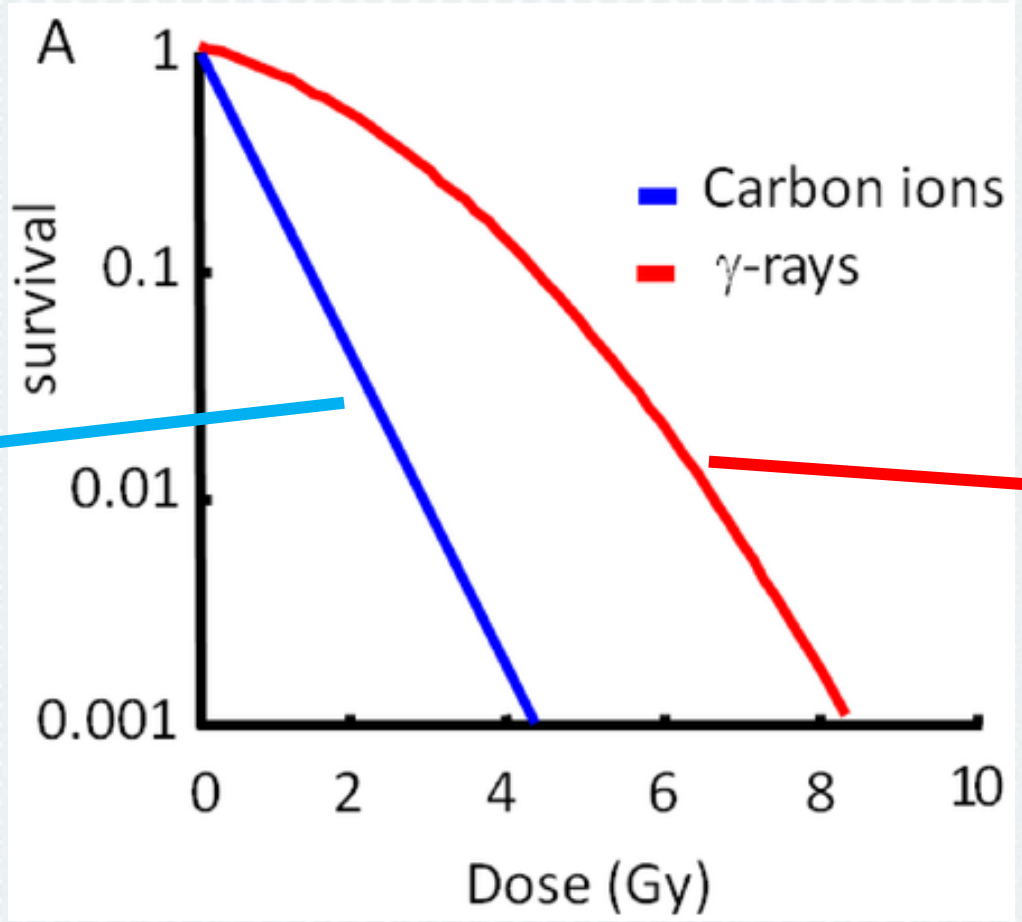
- Různé druhy IZ vyvolávají při stejné D (předané energii) různý biologický účinek

cc BY NC SA

Vliv druhu záření na přežití buněk → vliv LET

Velké lokální poškození
→
velký biologický účinek





Malé lokální poškození
→
malý biologický účinek

BY NC SA

Radiační váhový faktor w_R

– relativní biologické riziko různých druhů IZ vzhledem k fotonovému záření

Druh záření		w_R
Fotony, elektrony, miony (všech energií)		1
Neutrony	E < 10 keV	5
	10 keV < E > 100 keV	10
	100 keV < E > 2 MeV	20
	2 MeV < E > 20 MeV	10
	E > 20 MeV	5
Protony	E = 2 MeV	5
Částice α, štěpné fragmenty, těžká jádra		20

$$w_R = a + b \cdot e^{-\frac{\ln(c \cdot E_n)}{d}}$$

BY NC SA

Ekvivalentní dávka v orgánu/tkáni

$$H_T = w_R \cdot D_T \qquad \text{[sievert, Sv]}$$

- Zohledňuje předanou energii v tkáni (D_T) a druh záření (w_R)

Příkon ekvivalentní dávky

$$\dot{H}_T = dH_T/dt \qquad \text{[Sv·s}^{-1}\text{]}$$

- D z vnitřního ozáření se realizuje v delším časovém období (dokud je RN v těle)

Úvazek ekvivalentní dávky

$$H_T(T) = \int_{t0}^{t0+T} \dot{H}_T(t) \cdot dt \qquad \text{[Sv]}$$

- t0 = příjem, T = 50 let u dospělých, 70 let u dětí

CC BY NC SA

Efektivní dávka

- Vyjadřuje rozdílnou radiosenzitivitu orgánů a tkání z hlediska pravděpodobnosti vzniku stochastických účinků (rakovina, genetické změny)
- Jedna veličina pro radiační zátěž celého těla při nerovnoměrném ozáření (akumulace RN v kritickém orgánu, cílené ozáření ložiska rakoviny …)

BY NC SA

Radiosensitivita orgánů a tkání:

- Doporučené **tkáňové váhové faktory w_T** dle ICRP 103

Tkáň	w_T	Σw_T
kostní dřeň (červená), tlusté střevo, plíce, žaludek, mléčná žláza, zbytek tkání*	0,12	0,72
gonády	0,08	0,08
močový měchýř, jícen, játra, štítná žláza	0,04	0,16
povrch kostí, mozek, slinné žlázy, kůže	0,01	0,04
Celkem		1,00

*zbytek tkání: nadledvinky, horní cesty dýchací, žlučník, srdce, ledviny, svalstvo, sliznice dutiny ústní, slinivka, prostata, tenké střevo, slezina, brzlík, děloha/hrdlo, lymfatické uzliny

cc BY NC SA

Efektivní dávka v orgánu/tkáni

$$E = w_T \cdot H_T \qquad \text{[sievert, Sv]}$$

$$E = \Sigma w_T \cdot H_T$$

- Zohledňuje ozáření orgánu/tkáně (H_T) a citlivost orgánu a jeho vliv na přežití
- Jedna veličina pro porovnání různých radiačních zátěží (přírodní pozadí, rtg vyšetření, nukleární medicína …)

Úvazek efektivní dávky

$$E(T) = \int_{t0}^{t0+\tau} E(t) \cdot dt \qquad \text{[Sv]}$$

- t0 = příjem, T = 50 let u dospělých, 70 let u dětí

cc BY NC SA

Calculation of Equivalent Dose and Effective Dose

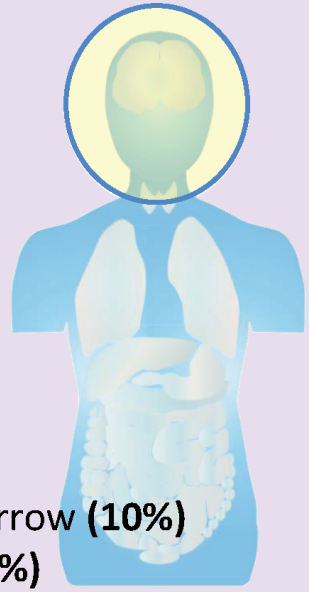
Effective dose (sievert (Sv)) = Σ (Tissue weighting factor × Equivalent dose)

When the whole body is evenly exposed to **1 mGy** of γ-ray irradiation

Effective dose =
0.12 X **1** (mSv): bone marrow
+ **0.12** X **1** (mSv): colon
+ **0.12** X **1** (mSv): lungs
+ **0.12** X **1** (mSv): stomach
:
+ **0.01** X **1** (mSv): skin
= **1.00** X **1** (mSv)

= 1 millisievert (mSv)

When only the head is exposed to **1 mGy** of γ-ray irradiation



Effective dose =
0.04 X **1** (mSv): thyroid
+ **0.01** X **1** (mSv): brain
+ **0.01** X **1** (mSv): salivary gland
+ **0.12** X **1** (mSv) × **0.1**: bone marrow **(10%)**
+ **0.01** X **1** (mSv) × **0.15**: skin **(15%)**
:

= 0.07 millisieverts (mSv)

Zdroj: Calculation of Equivalent Dose and Effective Dose (Japan ministry of the Environment) (https://www.env.go.jp/en/chemi/rhm/basic-info/2021/02-03-06.html)

CC BY NC SA

Stanovení rizika z ozáření

- Pravděpodobnost poškození ~ absorbované energii
  → nutno stanovit D_T, H_T, E
- Podmínky expoziční situace:

  vnitřní × vnější
  plánované × nehodové
- Časový vývoj – zejména u vnitřní kontaminace
  - Stanovení inkorporované aktivity
  - Biokinetický model šíření radionuklidu v těle a jeho vylučování
  - Rozdělení A v orgánech → w_R, w_T + konverzní faktory
    → **odhad E_{ef}**

CC BY NC SA

Vnější ozáření – rtg. a záření γ, pro kůži i záření β

- Depozice energie jen po dobu vystavení IZ
- Měření dozimetry
- Odhad ze změn v krvi (detekce dicentrických chromozomů, …)
- Indukovaná aktivita (neutronová aktivace lidských vlasů prostřednictvím reakce $^{32}S(n,p)^{32}P$)

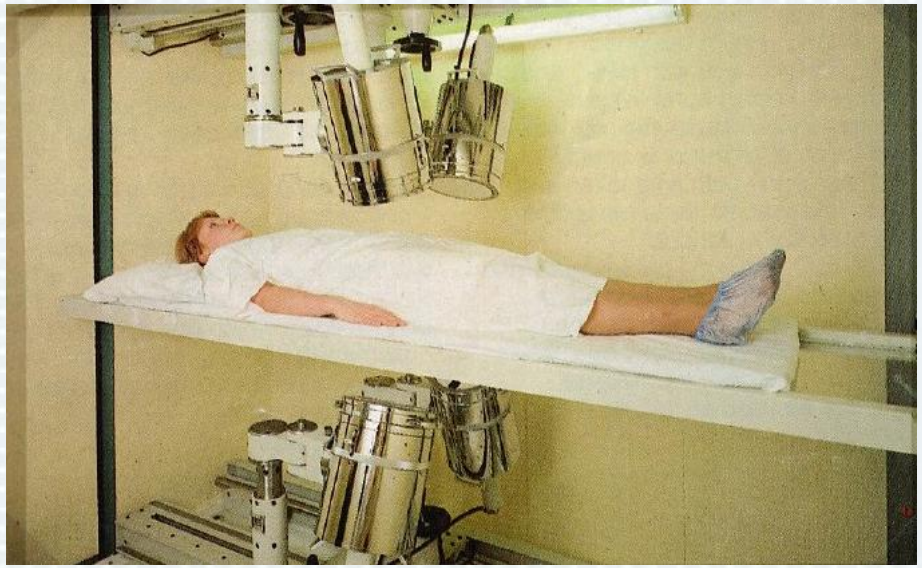
Vnitřní ozáření – D nelze měřit přímo

- Distribuce RN nehomogenní
- Specifické chování RN
- Rozložení dávky v delším období
- Odvozují se z aktivity zadržené v těle

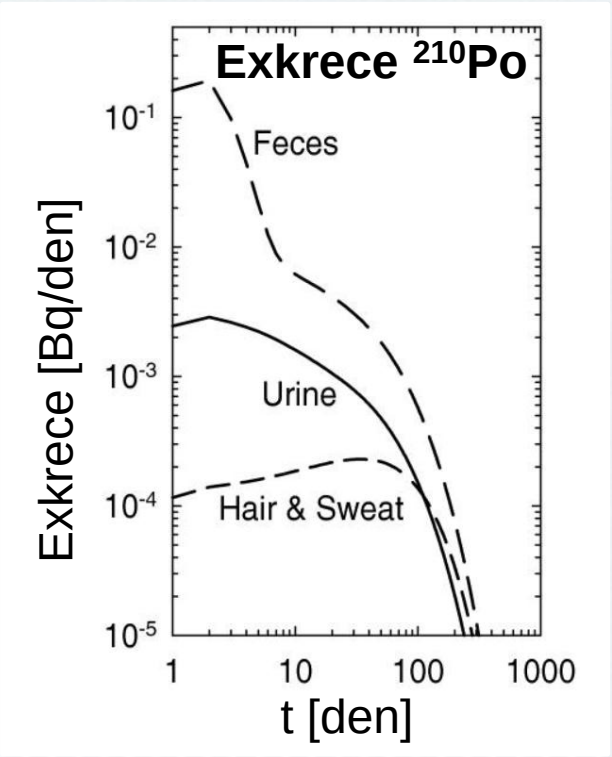
BY NC SA

Inkorporovaná aktivita

- Externí měření
  – RN emitující záření γ
  (celotělové měření)



- Měření v exkrementech (α, β)



→ časová závislost → (zpětně) → **celkový příjem RN**

cc BY NC SA

- **Příjem (radionuklidu)**

  $\mathbf{I = A / m(t)\ [Bq]}$

  A – změřená A (tělo, orgány, exkrety);
  m(t) – retenční nebo exkreční funkce v čase t

- **konverzní faktory h_{ing}, h_{inh}**
  – vztah mezi příjmem RN a úvazkem efektivní dávky
  – odpovídá radiotoxicitě radionuklidu
  – podle typu příjmu – ingesce (h_{ing}), inhalace (h_{inh})

  → $\mathbf{E = I \cdot h_i}$

cc BY NC SA

Konverzní faktory pro ingesci (h_{ing}, Sv Bq^{-1}) pro přepočet příjmu radionuklidů požitím na úvazek efektivní dávky

nuklid	h_{ing} (dítě do 1 roku)	h_{ing} (dospělá osoba)
^{3}H	$6{,}4.10^{-11}$	$1{,}8.10^{-11}$
^{90}Sr	$2{,}3.10^{-7}$	$2{,}8.10^{-8}$
^{131}I	$1{,}8.10^{-7}$	$2{,}2.10^{-8}$
^{137}Cs	$2{,}1.10^{-8}$	$1{,}3.10^{-8}$
^{210}Po	$2{,}6.10^{-5}$	$1{,}2.10^{-6}$
^{226}Ra	$4{,}7.10^{-6}$	$2{,}8.10^{-7}$
^{239}Pu	$4{,}2.10^{-6}$	$2{,}5.10^{-7}$

h

~

E_{ef} pro příjem 1 Bq

Nízká hodnota h

→

nízká radiotoxicita

422/2016 Sb. – Vyhláška o radiační ochraně a zabezpečení radionuklidového zdroje

CC BY NC SA

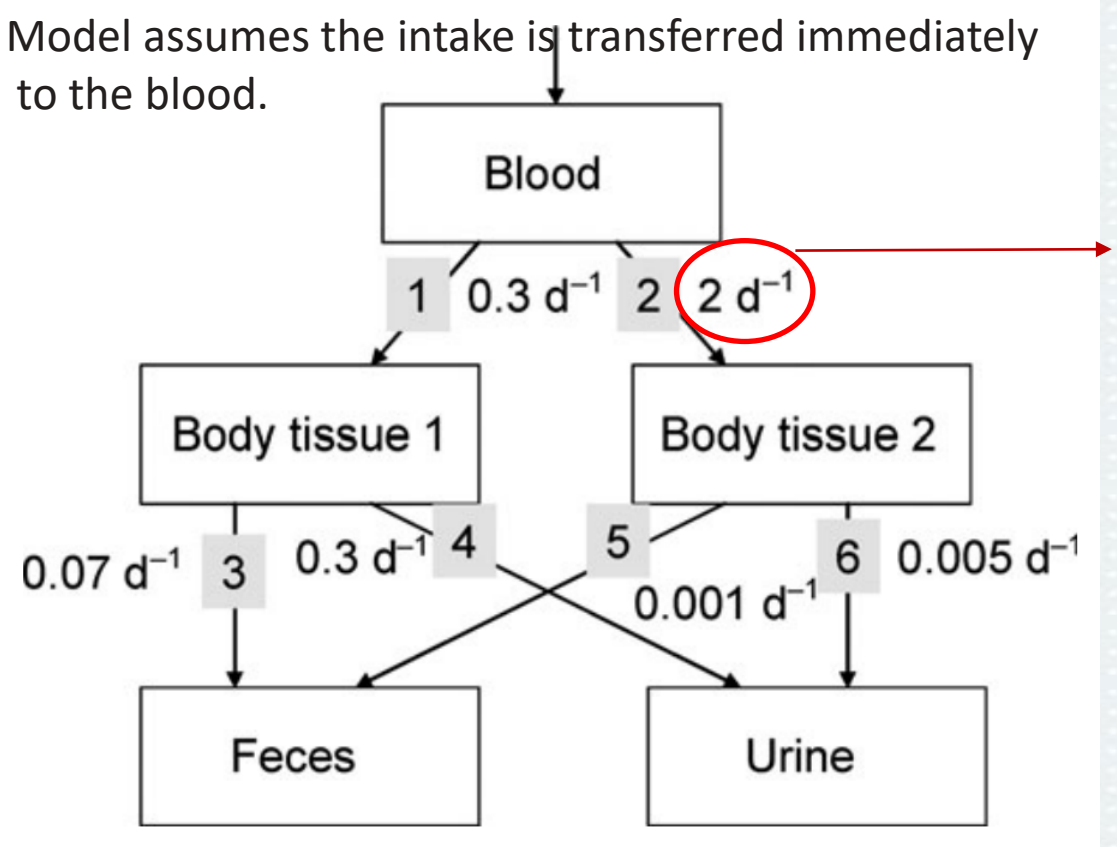
Modelování příjmu aktivity

Některé údaje při modelování šíření radionuklidů v životním prostředí:

- Množství srážek
- Velikost dešťových kapek
- Rozdělení velikosti částic aerosolů
- Povrch půdy s pící
- Rychlost odstraňování spadu z píce povětrnostními vlivy
- Koeficienty přenosu
- Množství RN přijatého zvířaty
- Koeficient přenosu RN ze zažívacího traktu do krve (u zvířat)
- Obsah RN v potravě
- Zkonzumované množství

cc BY NC SA

Zjednodušený biokinetický model pro cesium



Zdroj:DOI:10.1093/rpd/ncn131

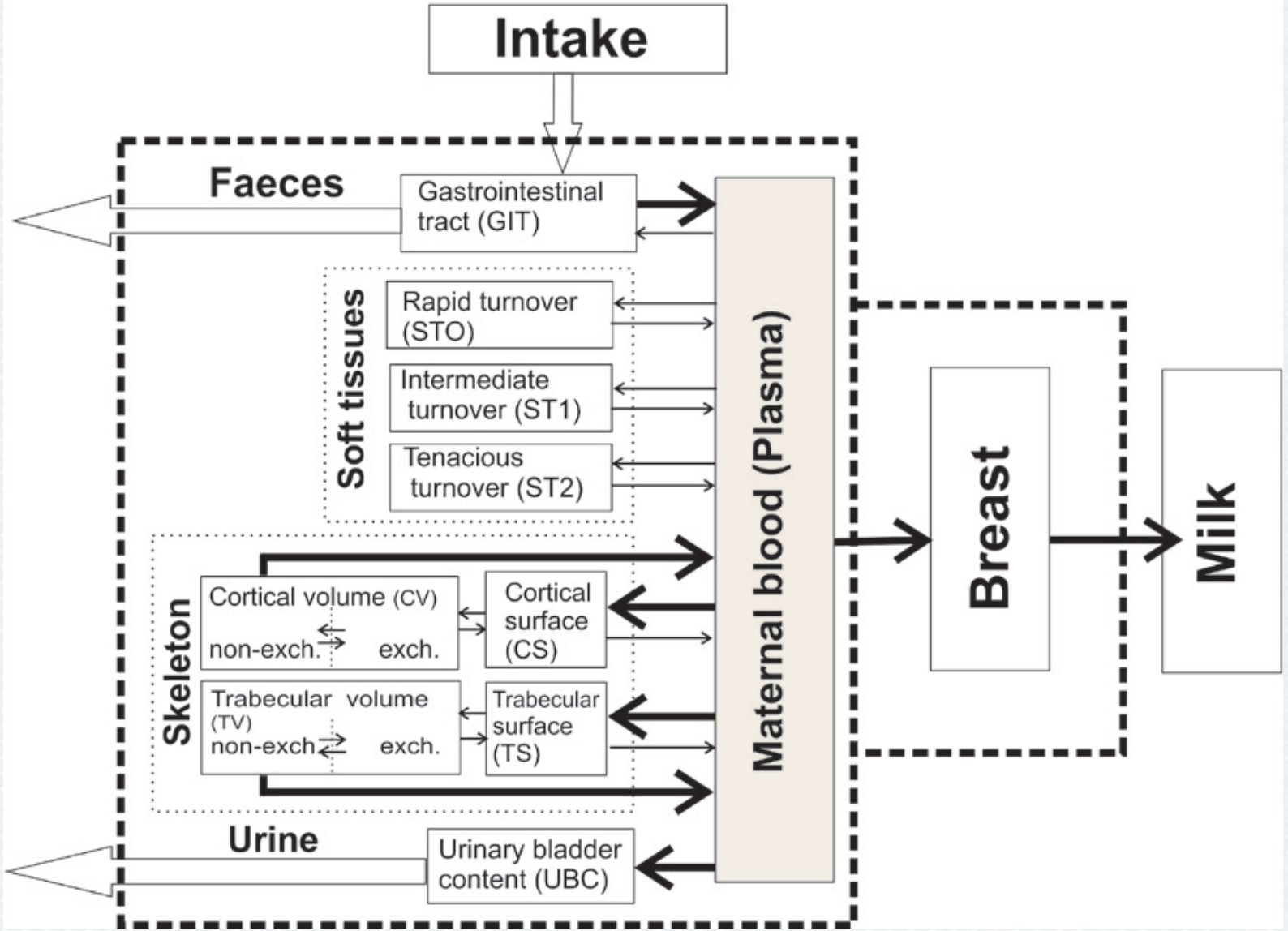
$$\frac{dA}{dt} = \lambda^{*}A$$

Transportní koeficient

Transfer coefficients [d^{-1}]	
Plasma to heart	14.128
Plasma to kidneys	67.108
Plasma to muscle	30.022
Plasma to GIT	52.98
Plasma to stomach	4.516
Plasma to brain	0.424
Plasma to lungs	4.415
Plasma to red blood c.	1.8
Heart to plasma	8.073
Liver to plasma	2.204
Kidneys to urine	1.678
Kidneys to plasma	31.876
Muscle to plasma	0.0751
GIT to plasma	8.191
GIT to liver	0.431

CC BY NC SA

Kinetický model ^{90}Sr kojících matek



Zdroj:DOI:10.1088/0952-4746/35/3/677

BY NC SA

Operační veličiny

- měřitelné veličiny, které aproximují H_T a E, které není možné přímo měřit
- kontrola ozáření pracovníků a monitorování pracoviště

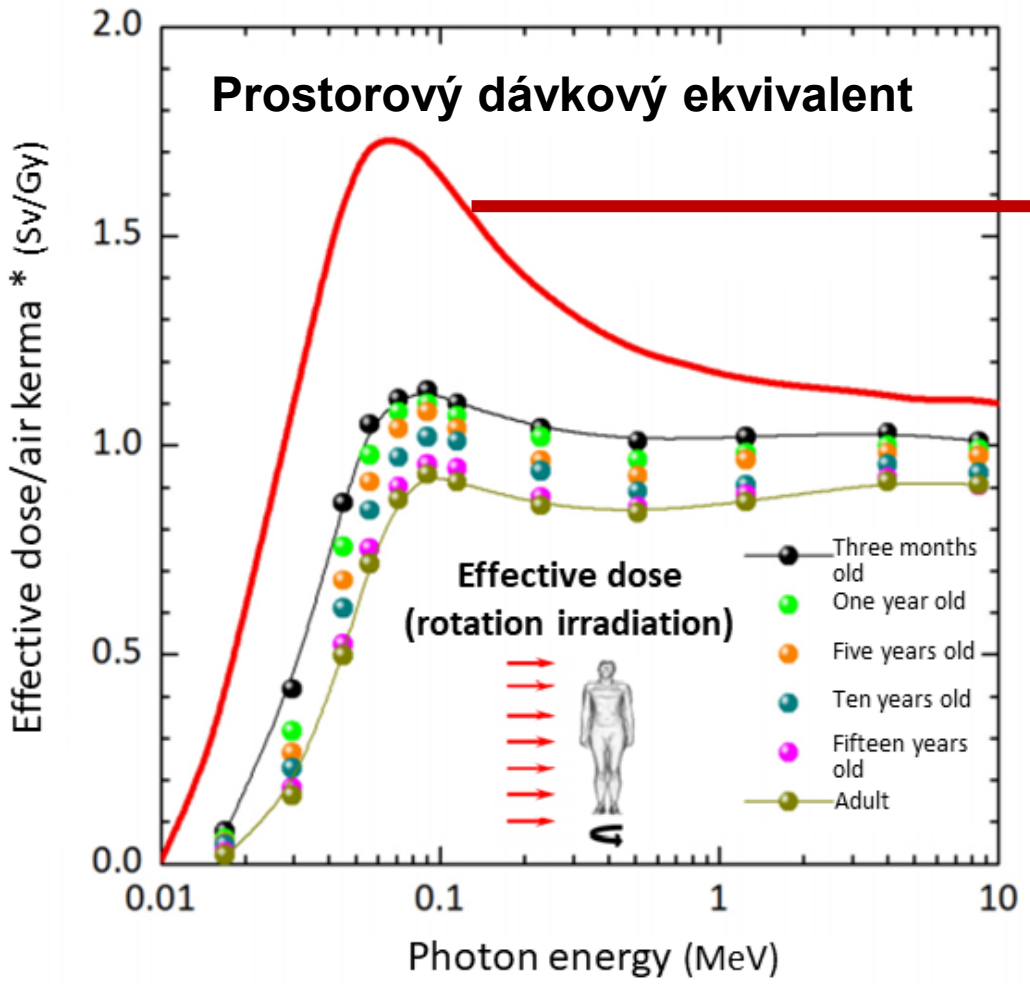
Prostorový dávkový ekvivalent H*(10) – dávkový ekvivalent vytvořený rozšířeným a usměrněným polem záření v hloubce d = 10 mm v kouli ICRU na poloměru směřujícím proti směru uspořádání pole
– konzervativní odhad veličiny efektivní dávka

Směrový dávkový ekvivalent H'(0.07,Ω) v daném bodě v poli záření – dávkový ekvivalent vytvořený rozšířeným polem v hloubce d = 0,07 mm v kouli ICRU na poloměru ve směru Ω
– konzervativní odhad veličiny ekvivalentní dávka pro kůži

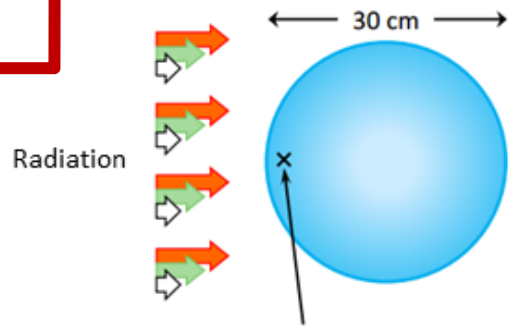
BY NC SA

Difference between Values of Effective Dose and Dose Equivalent

Měření přístroji (H*(10)) je vždy horší než skutečné riziko (E)!



* Air kerma is a unit of physical quantity.



Znázornění rozšířeného a usměrněného pole, do něhož je vložen ICRU sférický fantom (koule o průměru 30 cm tvořená tkáňově ekvivalentní látkou).

Zdroj: Difference between Values of Effective Dose and Dose Equivalent (Japan ministry of the Environment) (https://www.env.go.jp/en/chemi/rhm/basic-info/1st/02-03-09.html)

CC BY NC SA

Účinky ionizujícího záření na člověka

Obecná charakteristika	**Vysoké D a Ḋ** (> 1 Sv, jednorázově)	**Nízké D a Ḋ** (< 0,1-0,2 Sv) Jednorázově/chronicky
Důsledek	Zničení mnoha buněk v krátkém čase, poškození orgánů a tkání	Poškození malého počtu buněk → opravné mechanismy
Kdy se projeví poškození organismu	Brzy po ozáření **(akutní účinky)**	Latence (dlouhá doba) **(pozdní účinky)**
Souvislost poškození s ozářením	Zřejmá	Nemusí být zřejmá (statistické zpracování)
Pravděpodobnost poškození	Vysoká (→ 100 %) **(deterministické účinky)**	Nízká (náhodná) **(stochastické účinky)**
Poškození	Nemoc z ozáření, destrukce kůže a svalů, zákal oční čočky, poškození plodu	Nádorová onemocnění, leukémie, genetické poškození
Existuje prahová dávka	Ano	NE?

cc BY NC SA

Expozice (Sv)	Zdravotní efekt	Čas do nástupu (bez léčby)
0,05–0,10	změny v krvi	—
0,50	nevolnost	hodiny
0,55	únava	—
0,70	zvracení	—
0,750	ztráta vlasů	2–3 týdny
0,9	průjem	—
1	krvácení	—
4	možná smrt	během 2 měsíců
10	destrukce střevní výstelky	—
	vnitřní krvácení	—
	smrt	1–2 týdny
20	poškození centrálního nervového systému	—
	ztráta vědomí	minuty
	smrt	hodiny až dny

cc BY NC SA

Akutní nemoc z ozáření

- Jednorázové ozáření dávkou >1 Gy (celé/většina těla)
- **Krevní typ:** 1. den – nevolnost, skleslost, zvracení → latence 1–2 týdny → sepse, krvácení z dásní z kůže, průjmy, vředy na sliznicích / pokles bílých krvinek, erytrocytů, trombocytů (poškození krvetvorby v kostní dřeni) → smrt po 3 –4 týdnech nebo → uzdravování po 6–8 týdnech (obnova ze zdravých zbytků)
- **Střevní forma:** při vyšších dávkách, projevy postižení GIT rychlejší než vliv na krvetvorbu
- **Nervová forma:** dávka n10 Gy – dezorientace, poruchy koordinace, křeče, bezvědomí → smrt během hodin dní

BY NC SA

Akutní lokální účinky

- **radiační dermatitida**
  - Poškození kůže – místo vstupu IZ do těla
  - D rtg >3 Gy → do 2–3 dnů časný erytém (zarudnutí) → latence 1–2 týdny → pozdní erytém + depilace
  - Při vyšších D – oddělení kůže → puchýře → vředy → infekce
  - Obnova začíná po 2–4 týdnech
- Snížení plodnosti – trvalá sterilita u žen od 3 Gy
- Radiační zánět plic – od 5 Gy

cc BY NC SA

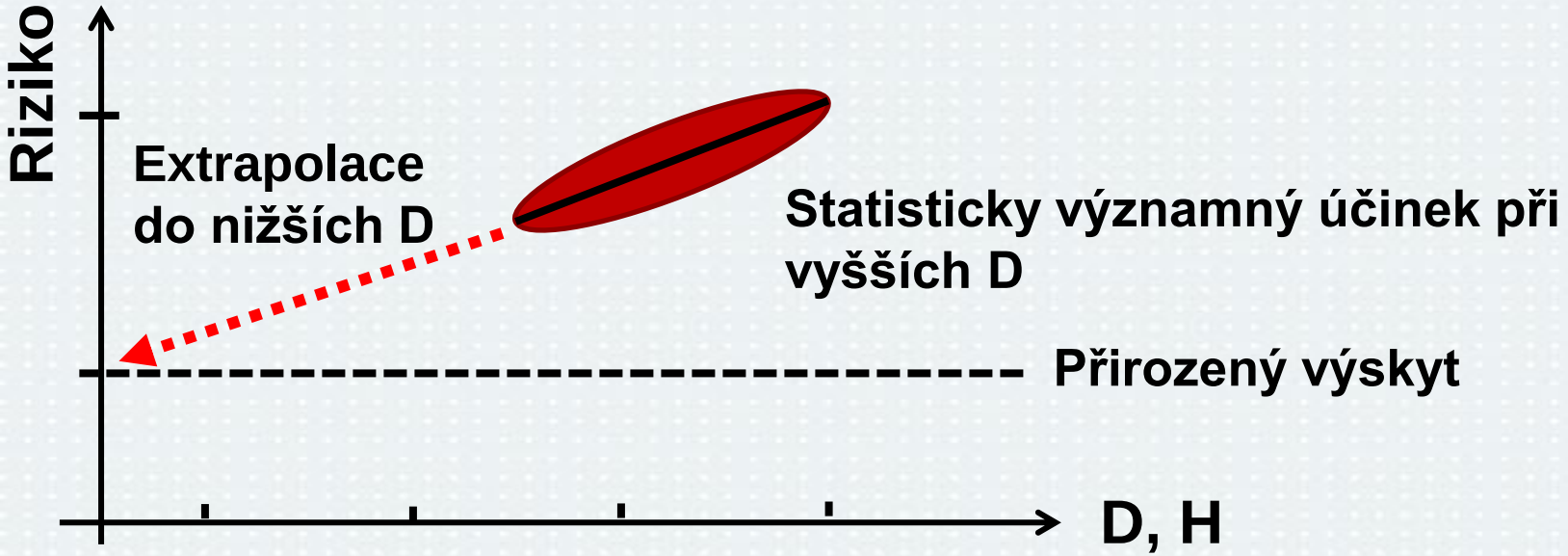
Riziko stochastických účinků IZ

- Pravděpodobnost stochastických účinků jako funkce D, H, E
- Základní problém – při malých dávkách (<< 100 mSv) je výskyt statisticky neprokazatelný tedy nespočitatelný
- Využívají se radiační situace s vyšší expozicí (nehody)
  - Příklad: Japonsko, 6400 os., H = 1,2 Sv
    → během 25 let 11 případů leukémie nad přirozený výskyt
    - velká ozář. populace přesto účinky jen u několika jedinců a náhodně
    - **Absolutní roční riziko**
      př. ARC = 11 leukémií/(6400 ozář. os.* 1,2 Sv * 25 let)
      = $5{,}7 \cdot 10^{-5}$ $Sv^{-1} \cdot rok^{-1}$ → 1 příp. z 17500 za rok

cc BY NC SA

Lineární bezprahový model

- extrapolace závislosti účinku na dávce do oblasti malých dávek



- Důsledek: riziko = 0 jen při D = 0 → není prahová dávka
  → L**ineární bezprahový model** (LBM, angl. LNT)
  - poškození 1 buňky vede ke stochastickým účinkům
  - jakákoliv malá D zvyšuje riziko
  - aditivita účinků malých D

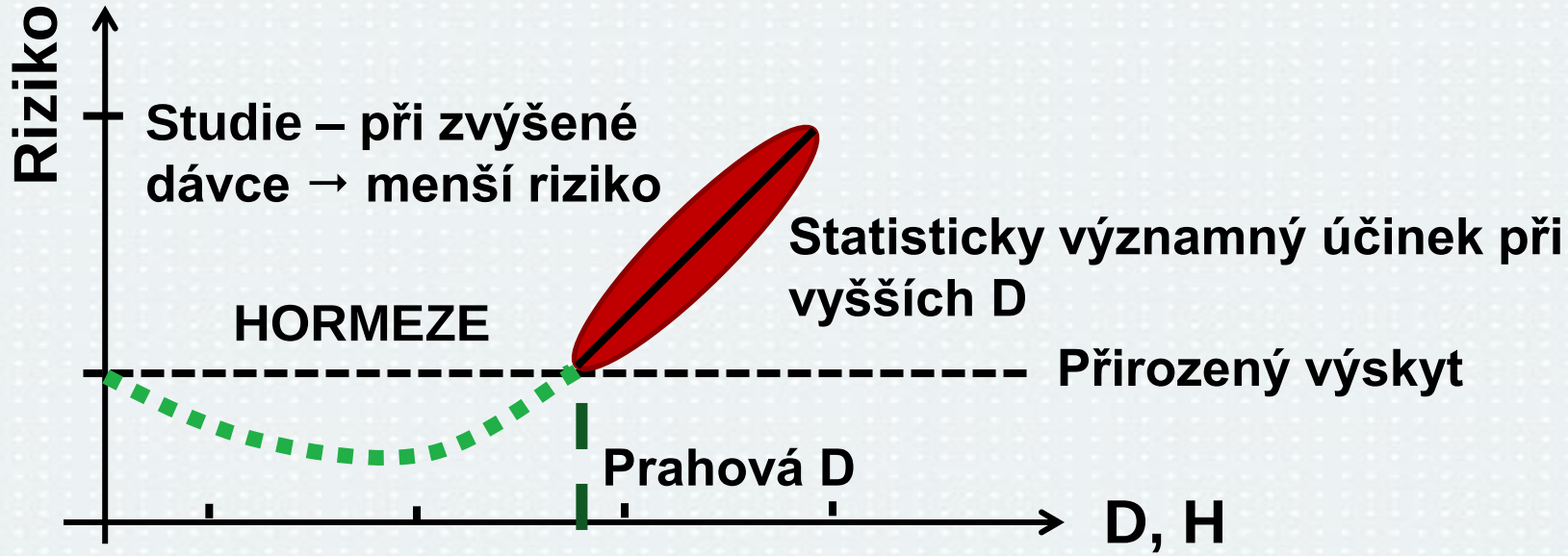
BY NC SA

Pochybnosti o správnosti LBM

1. Opravné buněčné mechanismy

- Oprava poškozené DNA, apoptóza, biochemické procesy snižující kyslíkový efekt (ROS – reactive oxygen species)
- Adaptace – v zamořeném prostředí → zvýšená aktivita opravných enzymů …

→ Hormeze a prahová D pro stochastické účinky



cc BY NC SA

2. Populace s vysokým radiačním pozadím

- Brazílie, Indie 8 – 200 mSv/rok, Irán 400 mSv/rok (světový průměr 2,4 mSv/rok, ČR 3,5 mSv/rok)
- Žádné zvýšení výskytu rakoviny

3. Ekvivalentní dávka <0,1 Sv

- Nebyl potvrzen vyšší výskyt rakoviny při dávkách **<0,1–0,2 Sv**

CC BY NC SA

Radiofobie

- Strach ze záření
- Možný důsledek lineárního bezprahového modelu
- Psychosomatické příznaky nemocí v souvislosti s jadernými nehodami – vyrážka, bolest hlavy, nevolnost
- >10 000 potratů v západní Evropě po havárii v Černobylu
- Odmítání radiačního ošetření potravin → v USA miliony onemocnění ročně → 9 000 úmrtí ročně
- Odpor vůči jaderným elektrárnám a úložištím

cc BY NC SA

Radiační ochrana

- Soubor (legislativních) opatření k ochraně obyvatel a pracovníků s IZ před ozářením z technologických i přírodních zdrojů
- Princip – minimalizace vnitřního i vnějšího ozáření
  → minimalizace rizika stochastických účinků
  → limity ozáření – dávka, kdy je riziko velmi malé
- Základem je stále LBM – jednoduchost; snaha o minimalizaci ozáření je správná
- Model uvažující experimentální poznatky zatím neexistuje

46

BY NC SA

Radiační ochrana – principy

A. **Zdůvodnění** činnosti které mohou vést, nebo vedou k ozáření
   - Zdůvodnit přínos – zdravotnické vyšetření, nukleární medicína, energetické zabezpečení

B. **Optimalizace** ochrany před zářením
   - Princip ALARA („as low as **reasonably** achievable“)
   - Zajistit ozáření osob tak nízké, jak lze rozumně dosáhnout z hospodářských a sociálních hledisek

C. **Limity**
   - Hranice mezi oblastí nepřijatelných dávek a oblastí optimalizace

D. **Zajištění bezpečnosti zdrojů**
   - Vyhl. č. 422/2016 Sb. o radiační ochraně a **zabezpečení radionuklidového zdroje**

CC BY NC SA

Limity ozáření

Limity ozáření	Obyvatelstvo	Pracovníci s IZ
Σ E(zevní) + Σ E(vnitřní)	1 mSv/rok	20 mSv/rok (100 mSv/5 let a 50 mSv/rok)
E v oční čočce	15 mSv/rok	50 mSv/rok a 100 mSv/5 let
H v 1 cm^2 kůže	50 mSv/rok	500 mSv/rok
H na ruce od prstů až po předloktí a na nohy od chodidel až po kotníky	---	500 mSv/rok

Vyhl. č. 422/2016 Sb. o radiační ochraně a zabezpečení radionuklidového zdroje

cc BY NC SA

Složky radiační ochrany obyvatelstva

- Definice kritických skupin obyvatelstva
- Regulace vody jako zdroje přírodních radionuklidů
  - Směrné hodnoty – při překročení je nutno zvážit náklady na snížení obsahu RN, pokud by převyšovaly riziko zdravotní újmy, může se i tak voda distribuovat
  - Limitní hodnoty – při překročení se nesmí distribuovat
- Regulace obsahu RN ve stavebninách, krmivu ….
- Monitorování radiační situace

49

cc BY NC SA

Legislativa radiační ochrany v ČR od 1. 1. 2017

- Zákon č. 263/2016 Sb., atomový zákon
- 422/2016 Sb. – Vyhláška o radiační ochraně a zabezpečení radionuklidového zdroje

+ dalších 16 vyhlášek a nařízení

50

cc BY NC SA

Institucionální zabezpečení

Státní úřad pro jadernou bezpečnost – SÚJB

Státní ústav radiační ochrany, v. v. i. – SÚRO

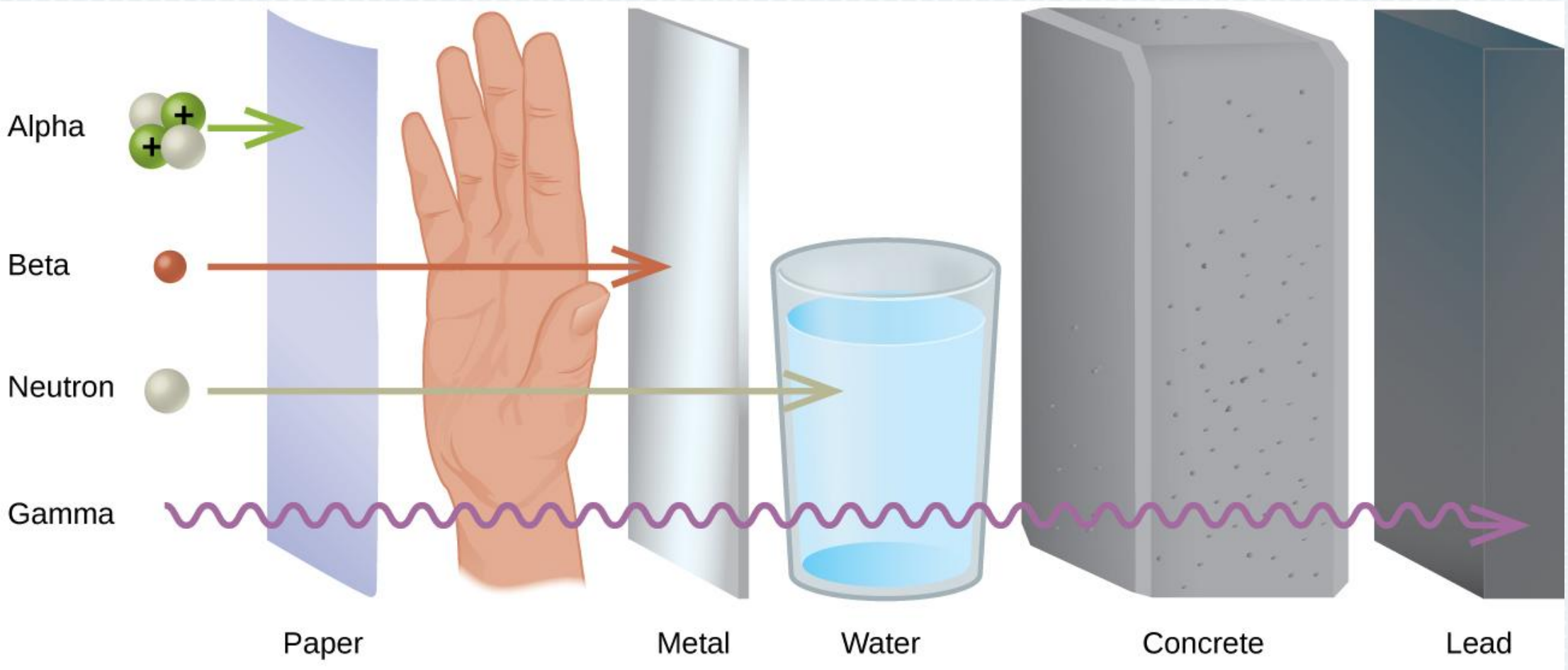
Státní ústav jaderné, chemické a biologické ochrany, v. v. i. – SÚJCHBO

Správa úložišť radioaktivních odpadů – SÚRAO

51

BY NC SA

Ochrana před IZ



Zdroj: https://www.wikiskripta.eu/w/Radioaktivn%C3%AD_rozpad#/media/Soubor:CNX_Chem_21_06_Penetrate.png

BY NC SA

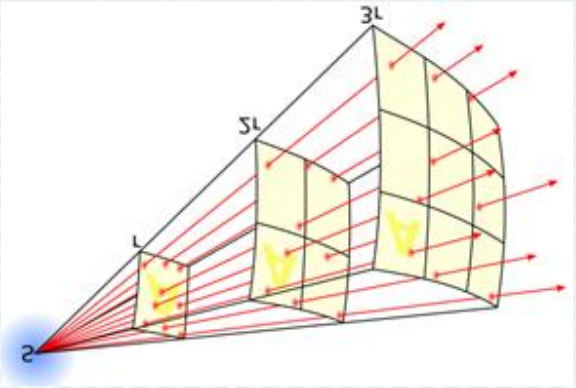
Ochrana před IZ
Čas, vzdálenost, stínění

A. Čas

- Minimalizace doby ozáření
- Organizace činností
- Pracovat rychle, ale bezpečně
- Nevyskytovat se zbytečně v poli IZ

B. Vzdálenost

- Pokles intenzity IZ, a tedy i dávky, se čtvercem vzdálenosti
- Použití manipulátorů, pinzet
- Uložení zdrojů mimo běžné pracoviště (sklad)
- Zdrojům IZ se vyhýbat obloukem



cc BY NC SA

Ochrana před IZ
Čas, vzdálenost, stínění

C. Stínění

- Pokud nestačí čas a vzdálenost
- Horké komory
- Pb cihly (stěny, „domečky“), Pb sklo, Pb zástěry při RTG vyšetření
- Plexisklo proti záření beta

D. Bránění vnitřní a vnější kontaminaci

- Nejíst, nepít, nekouřit
- Ochranné pomůcky – rukavice, overaly, roušky …
- Kontrola těsnosti zdrojů

cc BY NC SA

Ochrana před IZ
Co můžete udělat vy?

- Neopírat se o žulovou zeď
- Nelétat přes oceán a na sever
- Neopalovat se na monazitových píscích
- Nepracovat v dolech
- Nechodit do jeskyní
- Nepoužívat uranové ani kobaltové sklo
- Nepoužívat hodinky po dědečkovy
- Nejíst hlavy krevet, houby, lesní plody, zvěřinu
- Pobyt v přírodě, ale ne na horách
- Hodně větrat
- Spát sám
- Udržovat hladinu radioprotektivních látek
- Antioxidanty – ovoce, zelenina
- Zůstat zdraví (vyhýbat se RTG, CT, PET)

cc BY NC SA

Magisterský studijní program JADERNÁ ENERGETIKA vznikl za přispění

Financováno Evropskou unií
NextGenerationEU

NÁRODNÍ PLÁN OBNOVY

MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ, MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

NPO_VUT_MSMT-16609_2022

CC BY NC SA

VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ
V BRNĚ

Financováno Evropskou unií
NextGenerationEU

NÁRODNÍ PLÁN OBNOVY

MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ, MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FAKULTA CHEMICKÁ

FAKULTA STAVEBNÍ

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

Přednáška magisterského studijního programu JADERNÁ ENERGETIKA

Radioekologie a úvod do jaderných technologií

Ionizující záření a radioaktivita v přírodě – kosmické záření, přírodní radionuklidy, radon

Fakulta chemická

Ota Fišera

2024

CC BY NC SA

Everyone, everywhere, is exposed to radiation all the time.

It is a natural part of the environment in which we live.

(http://icrpaedia.org/Sources_of_Radiation_Exposure)

ICRP = International Commission on Radiological Protection

CC BY NC SA

Zdroje ionizujícího záření (radiační expozice)

Přírodní zdroje

- Kosmické záření (gama, rtg., n, p, e^-, μ)
- Přírodní radionuklidy
  - v půdě (gama)
  - v potravinách (α, β, γ)
  - v lidském těle
  - **radon + PP** – v atmosféře (α, β, γ)
    – **nejvýznamnější**

Umělé zdroje

- Lékařské ozáření – diagnostika (rtg, CT, gama, e^+)
- Nukleární medicína (α, β, γ, p^+)
- Radioaktivní spad po
  – testech jaderných zbraní
  – nehodách jaderných elektráren (Černobyl)
  - Kontaminace půdy → potravin
  - ^{137}Cs (β, γ), ^{90}Sr (β)
- Jaderná energetika (^{137}Cs, ^{90}Sr, ^{3}H, ^{133}Xe, ^{85}Kr)

CC BY NC SA

Zdroje ionizujícího záření (radiační expozice)

Vnější ozáření

- Radionuklidy ve vnějším prostředí
- Zejména záření gama, popřípadě beta
- Kosmické záření (gama, rtg., n, p, e^-, μ)
- Radionuklidy v půdě (gama)
  - přírodní – ^{40}K, ^{238}U + PP
  - umělé (spad) – ^{137}Cs, ^{90}Sr
- Lékařské ozáření – diagnostika (rtg, CT)
- Nukleární medicína (γ, p^+)

Vnitřní ozáření

- Radionuklidy v těle (potrava, dýchání)
- Zejména záření alfa a beta
- Lékařské ozáření – diagnostika (PET – e^+)
- Nukleární medicína (α, β)
- Přírodní a umělé (spad, JE) radionuklidy
  - v potravinách (α, β, γ)
  - v lidském těle
  - **radon + PP** – v atmosféře (α, β, γ) – **nejvýznamnější**

CC BY NC SA

Roční průměrné dávky

Základní dělení:

Přírodní × umělé zdroje

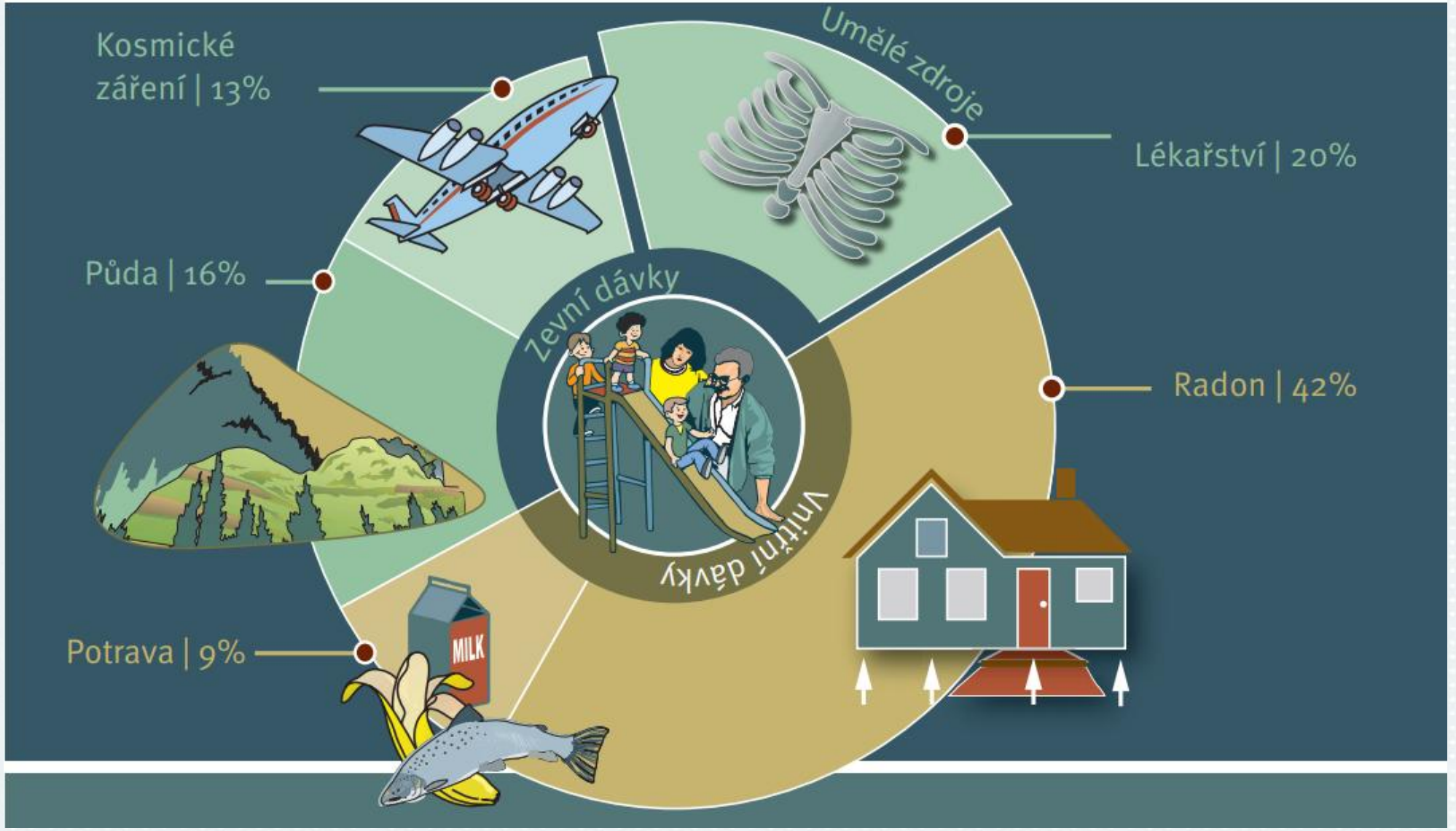
Vnější × vnitřní ozáření

Source or mode	*Annual average dose (worldwide)*	*Typical range of individual doses*	*Comments*
Natural sources of exposure	**[mSv/year]**		
Inhalation (radon gas)	1.26	0.2–10	The dose is much higher in some dwellings.
External terrestrial	0.48	0.3–1	The dose is higher in some locations.
Ingestion	0.29	0.2–1	
Cosmic radiation	0.39	0.3–1	The dose increases with altitude.
Total natural	**2.4**	**1–13**	**Sizeable population groups receive 10-20 millisieverts (mSv).**
Artificial sources of exposure			
Medical diagnosis (not therapy)	0.6	0-several tens	The averages for different levels of health care range from 0.03 to 2.0 mSv; averages for some countries are higher than that due to natural sources; individual doses depend on specific examinations.
Atmospheric nuclear testing	0.005	Some higher doses around test sites still occur.	The average has fallen from a peak of 0.11 mSv in 1963.
Occupational exposure	0.005	~0–20	The average dose to all workers is 0.7 mSv. Most of the average dose and most high exposures are due to natural radiation (specifically radon in mines).
Chernobyl accident	0.002[b]	In 1986, the average dose to more than 300,000 recovery workers was nearly 150 mSv; and more than 350,000 other individuals received doses greater than 10 mSv.	The average in the northern hemisphere has decreased from a maximum of 0.04 mSv in 1986. Thyroid doses were much higher.
Nuclear fuel cycle (public exposure)	0.002[b]	Doses are up to 0.02 mSv for critical groups at 1 km from some nuclear reactor sites.	
Total artificial	**0.6**	**From essentially zero to several tens**	**Individual doses depend primarily on medical treatment, occupational exposure and proximity to test or accident sites.**

Zdroj: http://icrpaedia.org/Sources_of_Radiation_Exposure

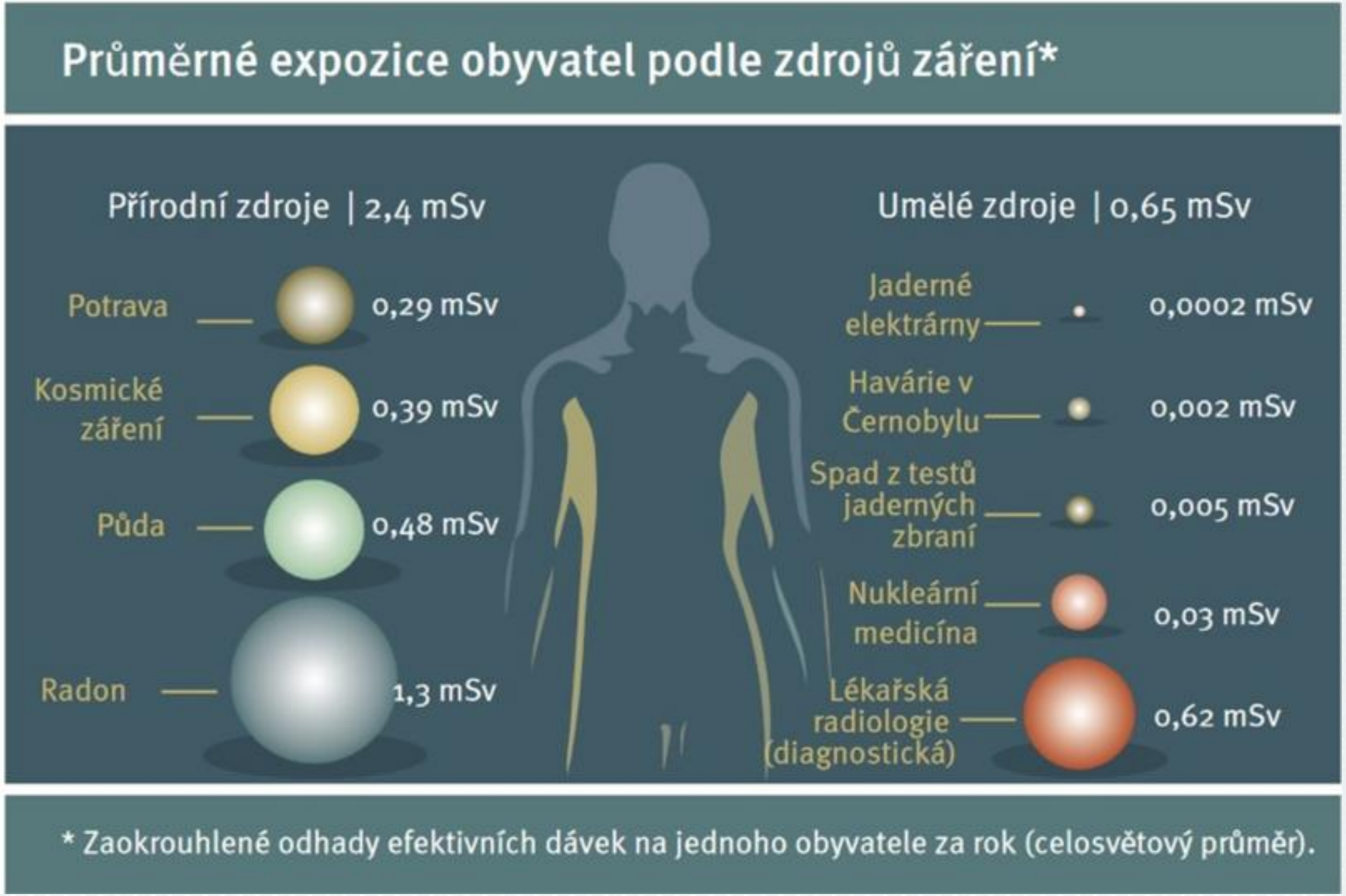
cc BY NC SA

Celosvětové rozdělení radiační expozice



Zdroj: Ionizující záření, UNEP, 2017

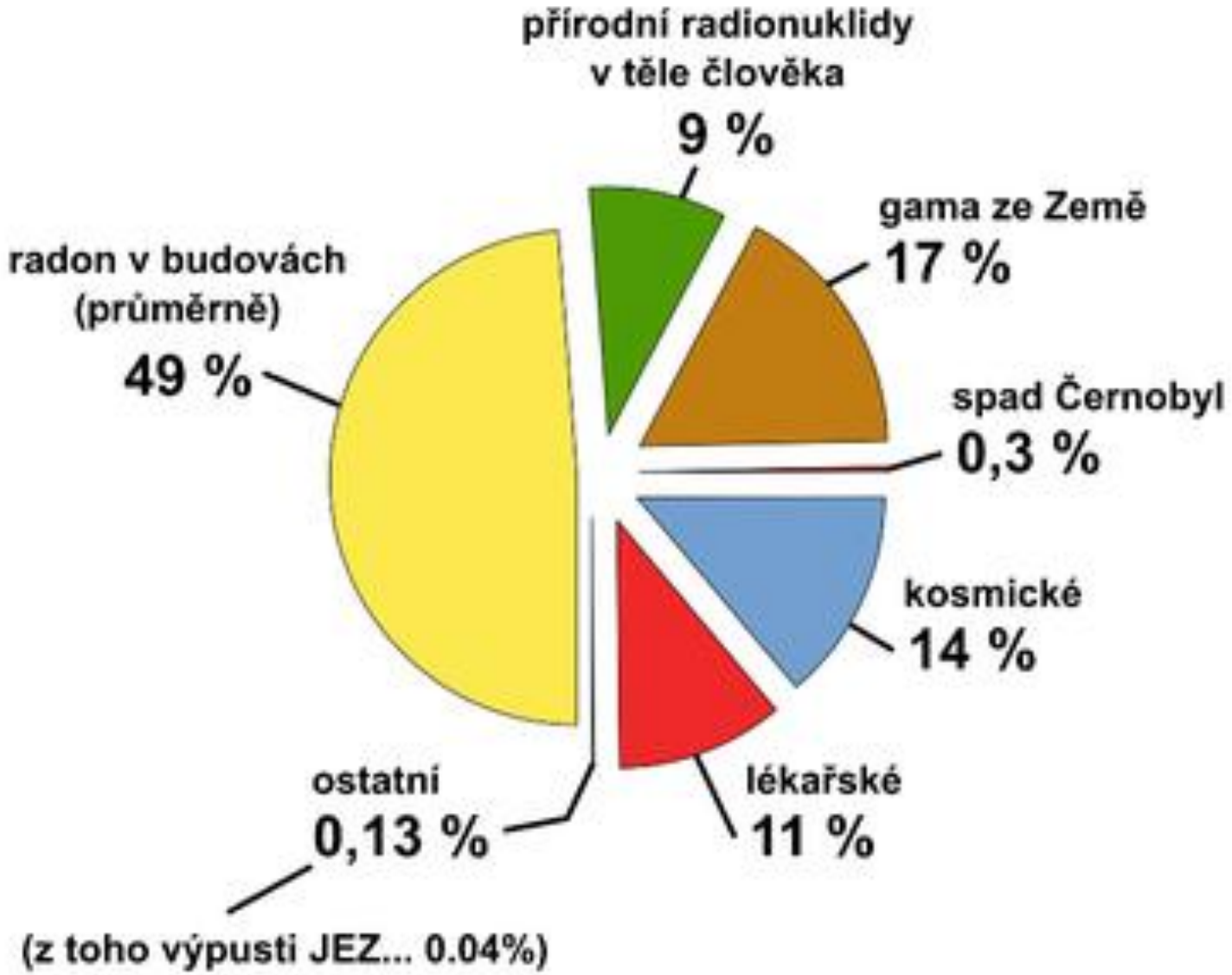
CC BY NC SA



Zdroj: Ionizující záření: účinky a zdroje, UNEP, 2016

BY NC SA

Rozdělení dávek obyvatelstvu



Zdroj: https://www.suro.cz/cz/prirodnioz

cc BY NC SA

Kosmické záření

A. Primární složka

– částice pocházející z vesmíru vstupující do atmosféry
– různé druhy částic, různý původ
– převládá nad hranicí atmosféry

B. Sekundární složka

– produkty jaderných reakcí primární složky a nuklidů v atmosféře
– ionizující záření – rtg., gama, n, p, exotické částice (μ, π)
– kosmogenní radionuklidy

➡ **Vnější ozáření (0,38 mSv)**

➡ **0,39 mSv (13 %)**

➡ **Vnitřní ozáření z kosmogenních RN (0,012 mSv)**

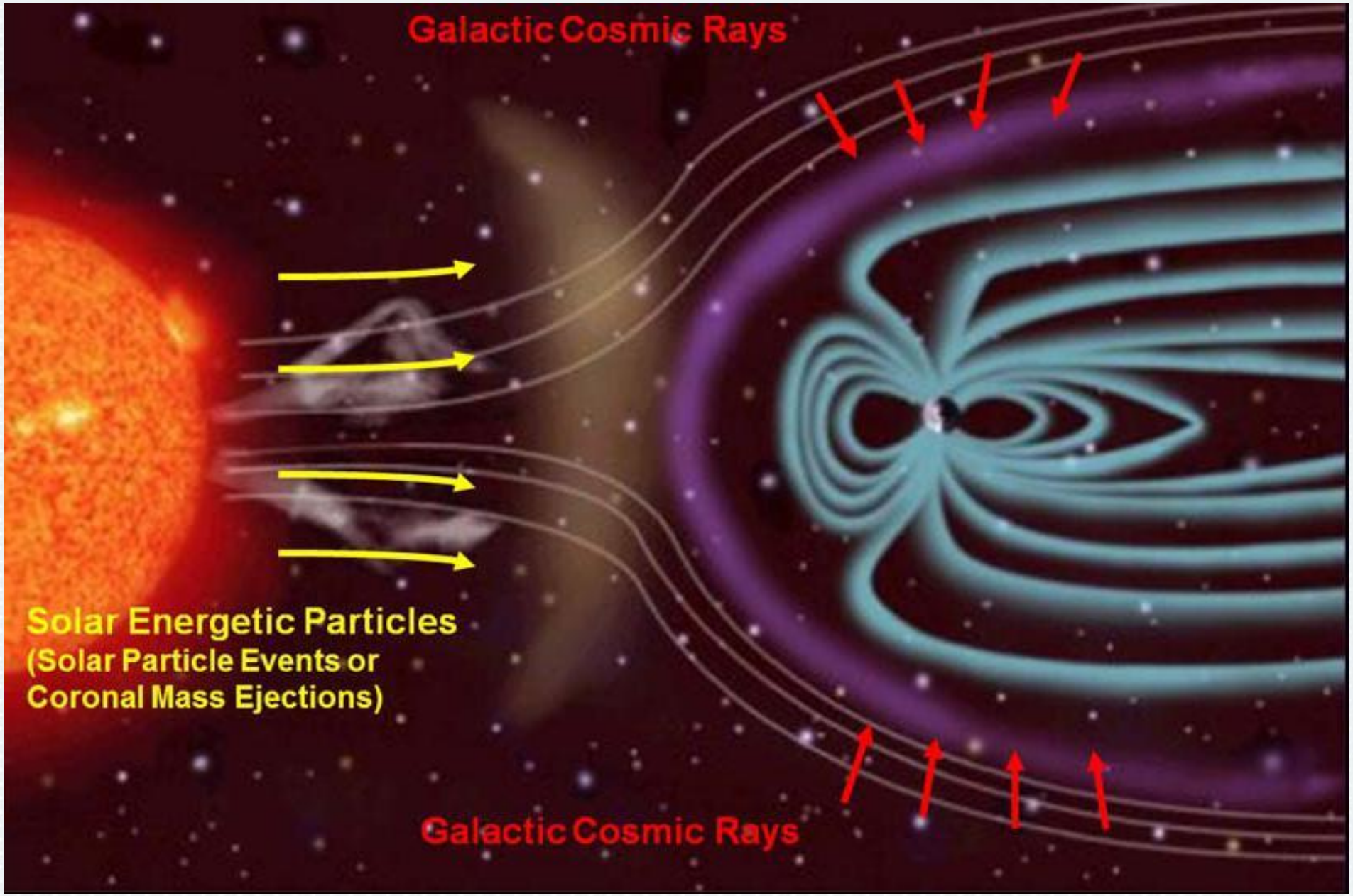
cc BY NC SA

A. **Primární složka** – převládá nad hranicí atmosféry

- **Galaktická složka**
  – z vesmíru
  – izotropní
- **Solární složka**
  – ze Slunce

Protony	85 %	90–95 %
$^{4}He^{2+}$	12 %	5–10 %
Elektrony	1 %	
Těžké ionty (Z = 4–26)	1 %	
Prům. E [eV]	10^{10}	$0{,}5–3{,}5 \cdot 10^{3}$
Max. E [eV]	10^{19}	10^{9} (erupce)

cc BY NC SA

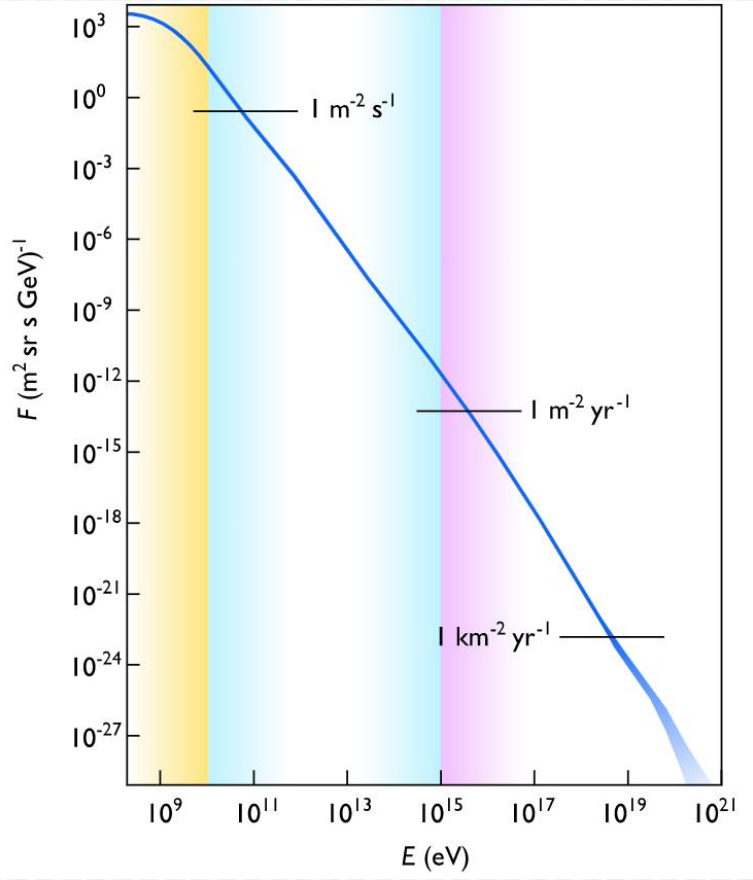


Zdroj: wikipedia.org

cc BY NC SA

Intenzita primární složky kosmického záření

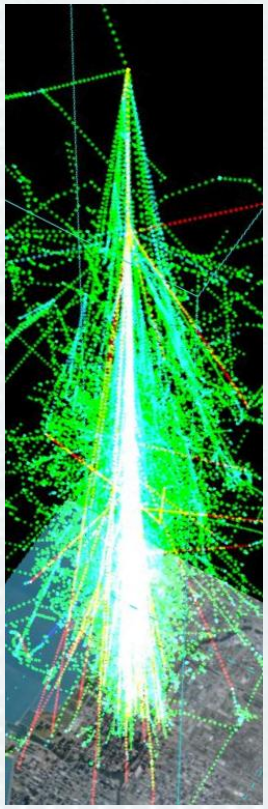
- Intenzita solární složky << než galaktické složky
- $E > 10^3$ MeV – pronikne do atmosféry
- ~2–4 částice $cm^{-2} \cdot s^{-1}$
- Počet částic klesá s rostoucí energií: $N(E) \sim 1/E^3$
  - Hustota částic s E
    - 10^3 MeV: 10^4 $m^2 \cdot s^{-1}$
    - 10^{10} MeV: ~3 $m^2 \cdot rok^{-1}$
    - 10^{13} MeV: ~1 $km^2 \cdot rok^{-1}$

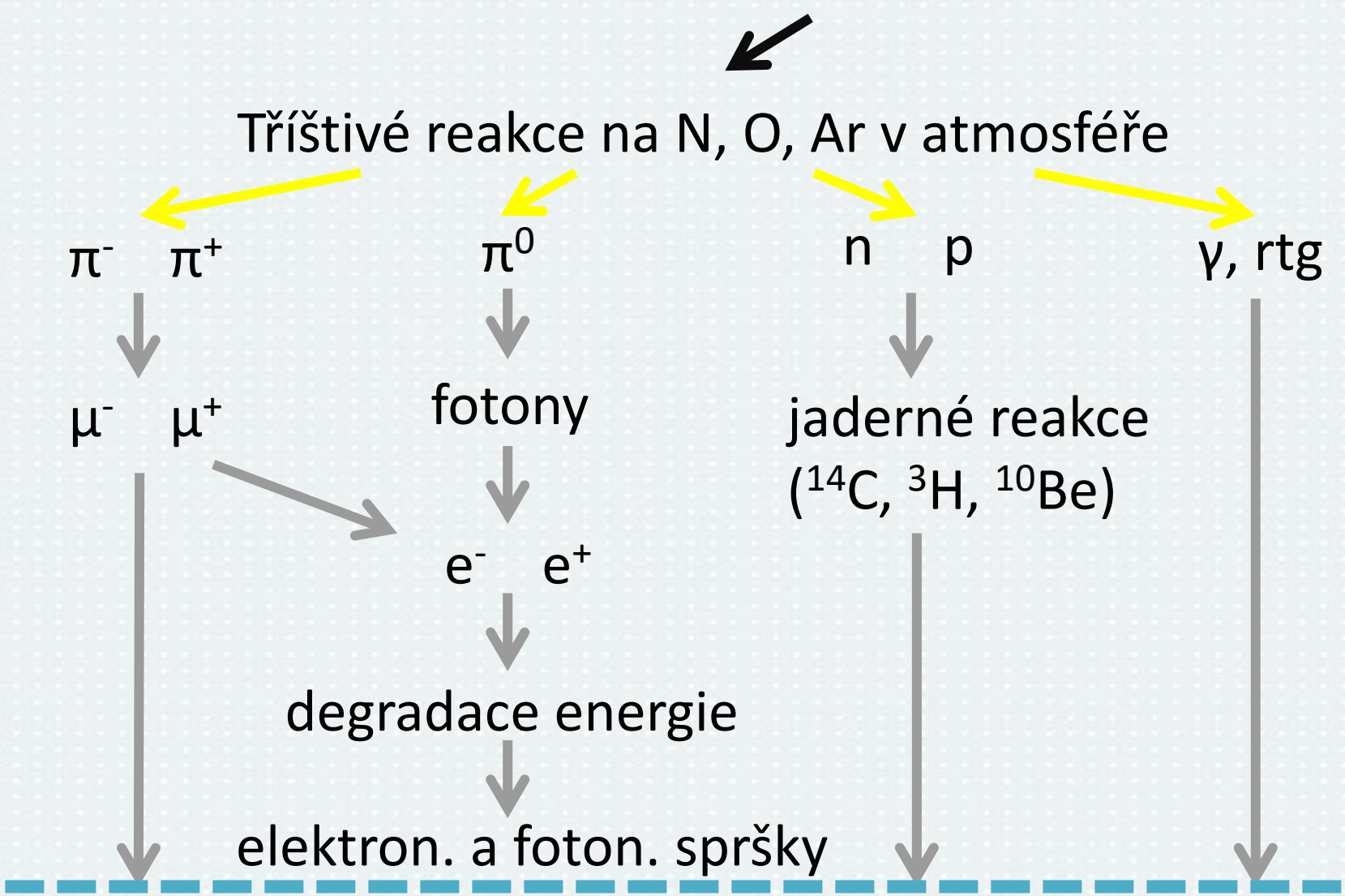


Zdroj: wikipedia.org

cc BY NC SA

B. Sekundární složka





cc BY NC SA

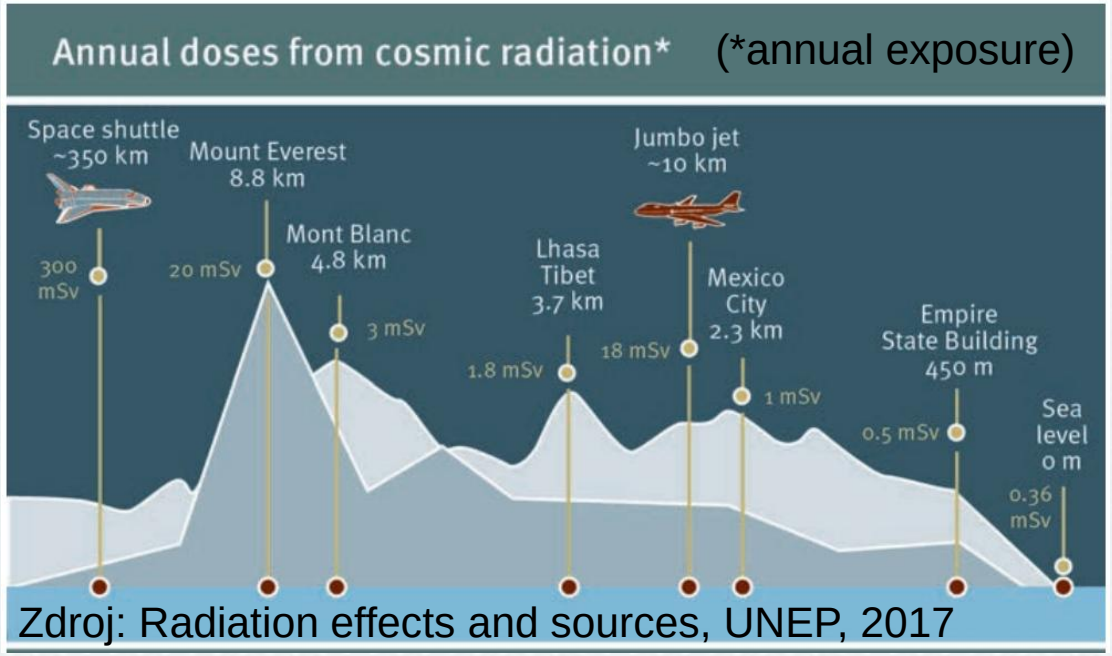
- **Kosmické záření → vnější ozáření – různé typy záření (w_R)**
  → ekvivalentní dávka H a její příkon $\dot{H}$
- Celosvětový průměrný **$\dot{H}$ = 0,39 mSv/rok**
  (rozsah 0,3 – 1 mSv/rok)
- Závisí na:
  - Nadmořské výšce
  - Zeměpisné šířce
  - Sluneční aktivitě

BY NC SA

Ad Nadmořská výška

- Absorbující účinek atmosféry

Místo	m.n.m	Ḣ
Mořská hladina	0	0,3 mSv/rok
La Paz	3900	2,00 mSv/rok



Ad Zeměpisná šířka

- Magnetické pole Země soustřeďuje primární složku KZ k pólům → i sekundární složka je silnější u pólů → polární záře

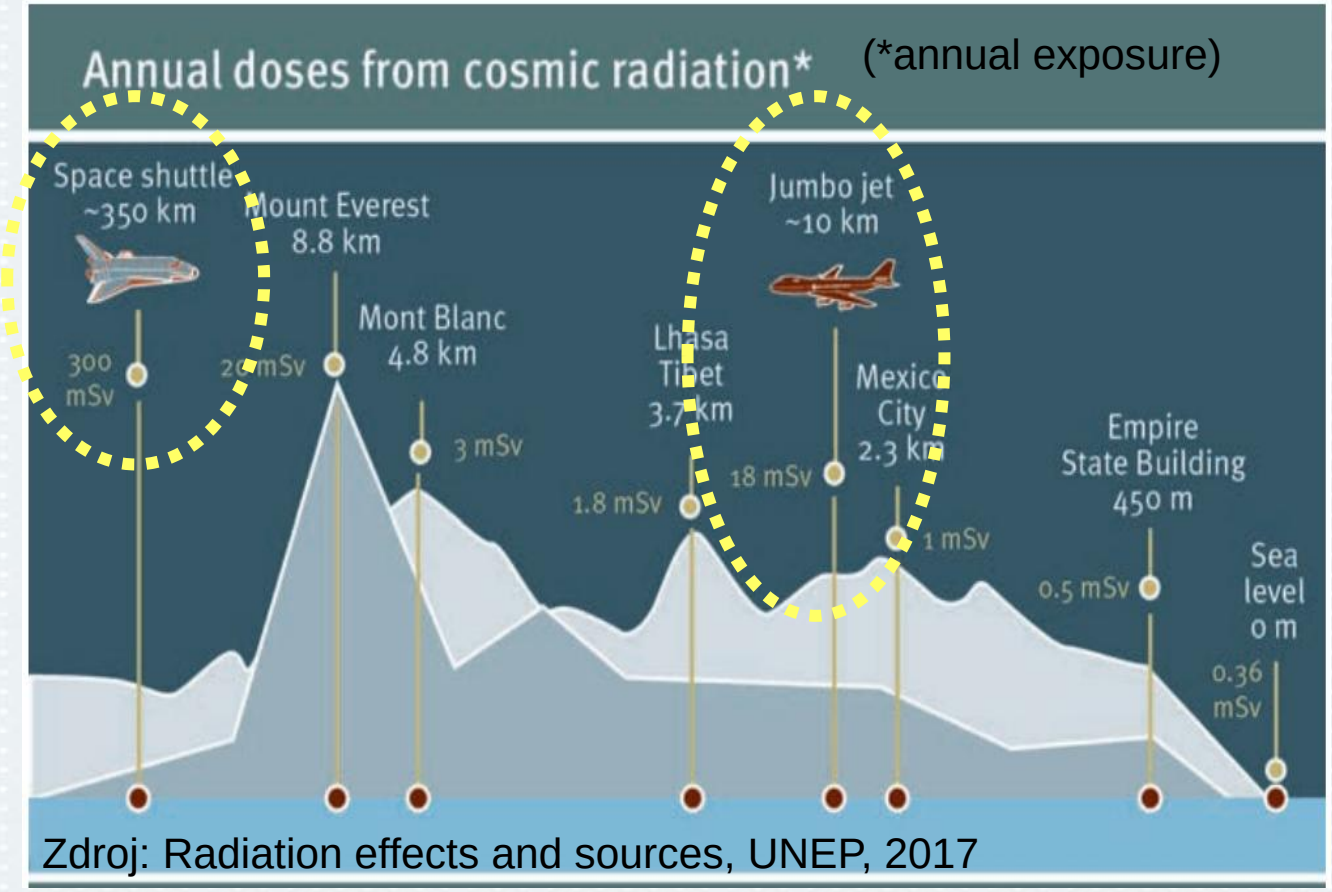
Ad Sluneční aktivita

- Erupce 7176 př. n. l. → 3–6x vyšší produkce kosmogenních RN
- Erupce (únor, 1956) → 1 mSv/hod. v 11 km
- 4. 2. 2022 – pád satelitů Starlink během vypouštění na oběžnou dráhu

BY NC SA

Kritické skupiny osob pro kosmické záření

1. Posádky dopravních letadel
2. Posádky kosmických letů



Zdroj: Radiation effects and sources, UNEP, 2017

BY NC SA

Kritické skupiny osob pro kosmické záření

1. Posádky dopravních letadel

- ve větších zeměpisných šířkách
- dálkové lety
- v 10–12 km převládá sekundární sl. KZ
- uvnitř letadla ozáření γ a sekundární n^0
- měření ČSA (1998–2004, 450 hodin):
  lety po Evropě: E_{ef} = 0,6–2 mSv
  lety do S. Ameriky: E_{ef} = 2–3 mSv
  průměrný E_{ef} (2004) ~2,25 mSv/rok
  (> než průměr pracovníků s IZ)

- Přes malé dávky je letový personál nejexponovanější mezi profesními skupinami → legislativa
- Směrnice EU:
  – nelétat více než 600 h/rok
  – po určité době přeřadit osádku na jižnější linky
  – osobní dozimetry
- ČR, vyhl. 422/2016 Sb.:
  paluby letadel nad 8 km jsou pracoviště s možností zvýšeného ozáření z přírodního zdroje záření

cc BY NC SA

Kritické skupiny osob pro kosmické záření

2. Posádky kosmických letů

- orbitální lety ve výšce 150–500 km
- galaktická složka + vysokoenergetická složka solárního záření
- uvnitř modulu: původní částice po ztrátě energie
  + produkty tříštivých reakcí – n^0, p^+, α
- vysoký LET, silná ionizace + sekundární elektrony

$\dot{D}$ = 0,05–1 mGy/den

- dlouhodobé mise – závažné účinky těžkých iontů
- změny v chromozomech – anomálie v zárodcích krabů, mutace v semenech rostlin, malformace u hmyzu
- ozařování myší ionty ^{56}Fe → zhoršení prostorového učení a paměti → efekt podobný jako stárnutí → mohlo by zhoršit schopnosti kosmonautů vykonávat úkoly
- možné potlačení – strava bohatá na antioxidanty a protizánětlivé preparáty
- stínění těžkých iontů – lehké materiály s obsahem H (např. PE)

CC BY NC SA

Kosmogenní radionuklidy

- Interakcí p^+ a n^0 sekundární složky KZ
  s atomovými jádry prvků v atmosféře (N, O, Ar)

- Z hlediska radiační zátěže jsou nejdůležitější: **^{14}C, ^{3}H**, ^{7}Be a ^{22}Na

CC BY NC SA

Fyzikální vlastnosti kosmogenních radionuklidů v atmosféře

Prvek	Izotop	Poločas rozpadu	Druh rozpadu
vodík	^{3}H	12,33 let	100 % beta
berylium	^{7}Be	53,29 dní	100 % elektronový záchyt
	^{10}Be	$1{,}51.10^{6}$ let	100 % beta
uhlík	^{14}C	5730 let	100 % beta
sodík	^{22}Na	2,602 roku	100 % elektronový záchyt
hliník	^{26}Al	$7{,}4.10^{5}$ let	100 % elektronový záchyt
křemík	^{32}Si	172 let	100 % beta
fosfor	^{32}P	14,26 dní	100 % beta
	^{33}P	25,34 dní	100 % beta
síra	^{35}S	87,51 dní	100 % beta
chlor	^{36}Cl	$3{,}01.10^{5}$ let	98,1 % beta, 1,9 % el. zách.
argon	^{37}Ar	35,04 dní	100 % elektronový záchyt
	^{39}Ar	269 let	100 % beta
krypton	^{81}Kr	$2{,}29.10^{5}$ let	100 % elektronový záchyt

Zdroj: UNSCEAR

cc BY NC SA

Produkce a koncentrace kosmogenních radionuklidů v atmosféře

Radionuklid	Produkce		Množství v atmosféře (PBq)	Objemová aktivita ($mBq.m^{-3}$)
	plošná ($atom.m^{-2}.s^{-1}$)	roční množství (PBq/rok)		
^{3}H	2500	72	1275	1,4
^{7}Be	810	1790	413	12,5
^{10}Be	450	0,000064	230	0,15
^{14}C	25000	1,54	12750	56,3
^{22}Na	0,86	0,12	0,44	0,0021
^{26}Al	1,4	0,000001	0,71	$1,5.10^{-8}$
^{32}Si	1,6	0,00087	0,82	0,000025
^{32}P	8,1	73	4,1	0,27
^{33}P	6,8	35	3,5	0,15
^{35}S	14	21	7,1	0,16
^{36}Cl	11	0,000013	5,6	$9,3.10^{-8}$
^{37}Ar	8,3	31	4,2	0,43
^{39}Ar	56	0,074	28,6	6,5
^{81}Kr	0,01	$1,7.10^{-8}$	0,005	0,0012

Zdroj: UNSCEAR

BY NC SA

Nejvýznamnější kosmogenní radionuklidy

^{14}C

$^{14}N(n, p)^{14}C$

- Následné procesy: → CO_2 → biosféra, oceány, sedimenty
- Aktivita $^{14}CO_2$ v atmosféře dlouhodobě konstantní
- v 60. letech zvýšení o 80 % (jaderné testy), pak plynulý pokles
- Příjem ~ $2 \cdot 10^4$ Bq/rok → ~ 12 μSv/rok
  = celosvětový prům. Ḣ z kosmogenních RN

^{3}H

$^{6}O(n, t)^{14}N$; $^{16}O(p, t)^{14}O$; $^{14}N(p, t)^{12}N$

- Následné procesy: vodní cyklus
- V ČR je A < 2 Bq/l (v místech neovlivněných JE)
- Příjem ~ 500 Bq/rok → ~ 0,01 μSv/rok

cc BY NC SA

Přírodní radionuklidy

(přírodní nuklidy ~ 300, radioaktivních ~ 70)

Primordiální ($T_{1/2} \geq 10^8$ let)

^{232}Th, ^{238}U a ^{235}U

+ ^{40}K + ^{176}Lu, ^{187}Re, ^{87}Rb, ^{147}Sm…

$T_{1/2} < 10^8$ let

Kosmogenní

^{14}C, ^{3}H,

^{7}Be, ^{22}Na…

v radioaktivních řadách

^{230}Th, $^{226+228}Ra$, $^{222+220}Rn$, ^{210}Po, ^{210}Pb…

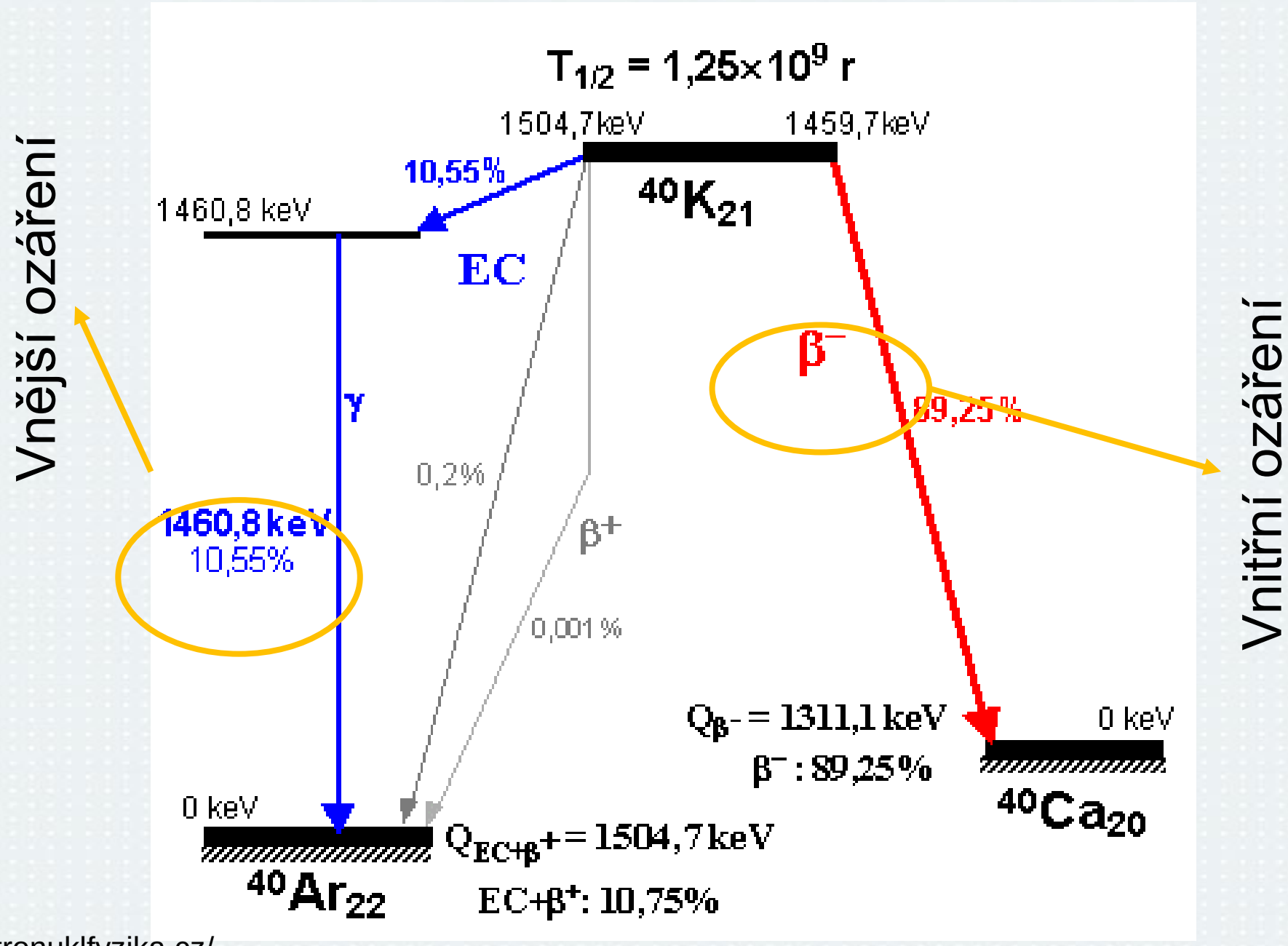
Terestriální radionuklidy

cc BY NC SA

^{40}K ($T_{1/2} = 1{,}3 \cdot 10^9$ r)

- Součást výskytu draslíku
- Zastoupení 0,012 %
- Fyziologicky důležitý prvek:
  – 80 % svaly, 20 % kosti, játra a červené krvinky
  – rovnováha Na^+/K^+ důležitá pro krevní tlak a srdce
- Z přírodních RN nejvíce zastoupen v potravě
  → vnitřní ozáření (kritický orgán – měkká tkáň)
  + vnější ozáření (půda, horniny)

cc BY NC SA



Zdroj: https://astronuklfyzika.cz/

CC BY NC SA

^{40}K

Obsah v půdě	1,6 mg K / 100 g půdy
Denní příjem:	
celosvětový průměr	3,3 g K
rozmezí	1,3–6,5 g K
Průměrný obsah v těle	140 g K
Měrná aktivita ^{40}K	31 Bq / g K
Celková aktivita ^{40}K v těle	4300 Bq
Počet přeměn v těle	$1{,}3 \cdot 10^{11}$ /rok
Příkon ekvivalentní dávky	
měkká tkáň	0,2 mSv/rok
kost	0,15 mSv/rok

cc BY NC SA

Přírodní rozpadové řady

Uran-radiová řada

- Od **^{238}U** ($T_{1/2} = 4{,}5 \cdot 10^9$ r) po ^{206}Pb
- Průměrná koncentrace uranu v zemské kůře 2–4 ppm

Uran-aktiniová řada

- Od **^{235}U** ($T_{1/2} = 7{,}04 \cdot 10^8$ r) po ^{207}Pb

Thoriová řada

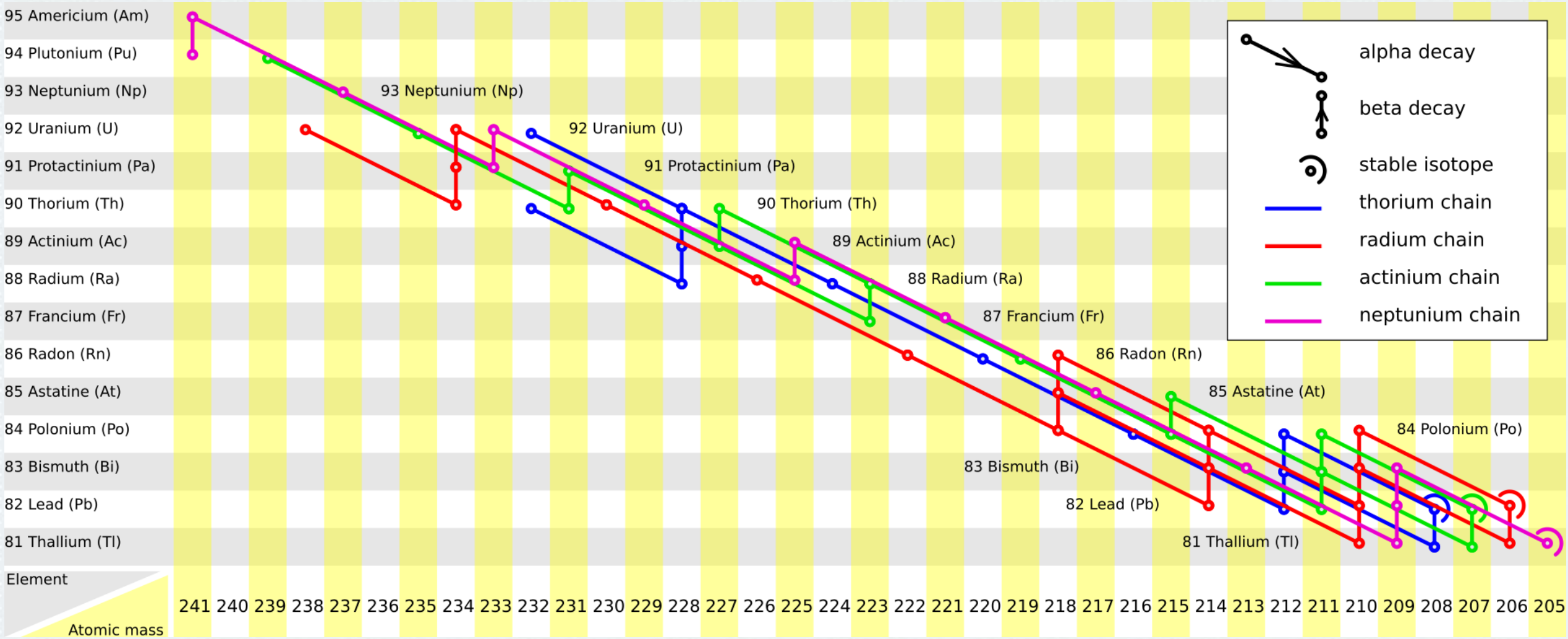
- Od **^{232}Th** ($T_{1/2} = 1{,}4 \cdot 10^{10}$ r) po ^{208}Pb
- Průměrná koncentrace thoria v zemské kůře je 8–12 ppm

- **Nejvýznamnější**

Neptuniová řada (umělá)

- od ^{237}Np ($T_{1/2} = 2{,}14 \cdot 10^6$ r) po ^{205}Tl

cc BY NC SA



Zdroj: wikipedia.org

cc BY NC SA

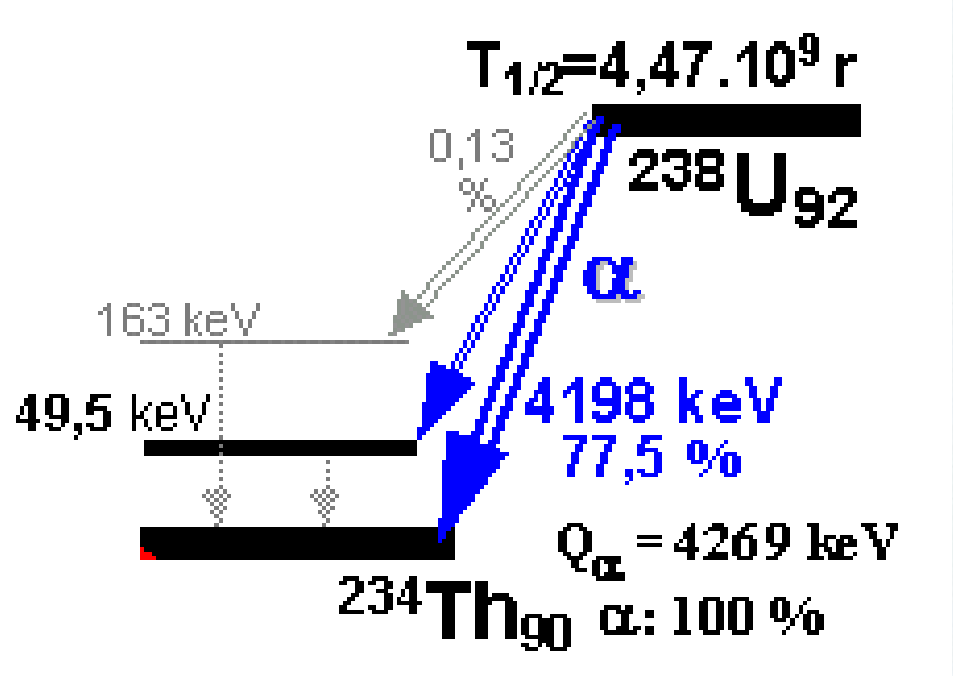
Aktivní deposit

- Každá přírodní rozpadová řada obsahuje izotop Rn (^{222}Rn, ^{220}Rn, ^{219}Rn) jako inertní plyn uniká z matrice (půdy, hornina, rudné ložisko)
  – matrice tzv. **emanuje**
- Dceřiné produkty Rn (tuhé látky, excitované, nabité) → deponují se (usazování, adsorpce) na okolních pevných částicích a površích
  – **aktivní deposit**
- Nejvýznamnější u uranové řady ^{238}U
  - **Krátkodobý deposit** – úsek mezi ^{218}Po a ^{214}Po, nejdelší poločas ^{214}Pb $T_{1/2}$ = 27 min
  - **Dlouhodobý deposit**
    ^{210}Pb ($T_{1/2}$ = 19,4 let) → ^{210}Bi → ^{210}Po

cc BY NC SA

^{238}U ($T_{1/2} = 4{,}5 \cdot 10^9$ r)

- Přírodní složení uranu:
  ^{234}U ($T_{1/2} = 2{,}455 \cdot 10^5$ r) = 0,005 %,
  ^{235}U ($T_{1/2} = 7{,}04 \cdot 10^8$ r) = 0,711 %a
  ^{238}U ($T_{1/2} = 4{,}5 \cdot 10^9$ r) = 99,284 %
- Uran je ve všech půdách a horninách
- ^{238}U (99,3 %) – jediný radioekologický významný
- Minerály v ČR – uraninit UO_2, coffinit $USiO_4$
  - forma U^{IV+} – rozpustný v $O_2 + H_2O \rightarrow UO_2^{2+}$ (U^{VI+})
  - rozp. roste v přítomnosti $CO_2 \rightarrow UO_2(CO_3)_3^{4-}$
- Forma U ve výluhu → podzemní vody
  → povrchové vody → pitná voda (limit 12 Bq/l)



Zdroj: https://astronuklfyzika.cz/

cc BY NC SA

- **Radiotoxicita**
  - velmi nízká vzhledem k nízkým konc. a A_m (velký $T_{1/2}$)
  - nepostižitelná radiační poškození orgánů ani při chronické inhalaci 7 kBq/r
- **Chemická toxicita** – těžký kov
  - Neexistuje důkaz rakoviny vyvolané uranem, při vysokém příjmu U → reversibilní dysfunkce ledvin
  - LD_{50} = 5 g orálně / 1 g inhalačně (návrh)
  - Mezní hodnoty pro U v pitné vodě: z 30 µg/l snížen na 15 µg/l (WHO doporučení 30 µg/l)
    Přepočet radiotoxicity 12 Bq/l ~ 900 µg/l !!!

cc BY NC SA

^{238}U

Obsah	
horniny a půdy	0,03 až jednotky ppm
fosfátové minerály	>20 ppm
fosfáty Florida	120 ppm
povrchové vody	0,5–30 μg/l (0,006 – 0,4 Bq/l)
Příjem z potravin a vody	$5 \cdot 10^6$ Bq/rok
Obsah v těle	až 90 μg (70 μg v kostře)
T_B (ledviny)	6 dní
T_B (kostra)	20 dní až 13,5 roku
Příkon ekvivalentní dávky	3 μSv/rok (kostra)

1 ppm = 1 mg v 1 kg = 12 Bq U

cc BY NC SA

Mezní hodnoty obsahu U ve vodách (ČR)

Veřejné vodovody	12 Bq/l
Kojenecká voda	5 Bq/l
Balená přírodní minerální voda	24 Bq/l

34

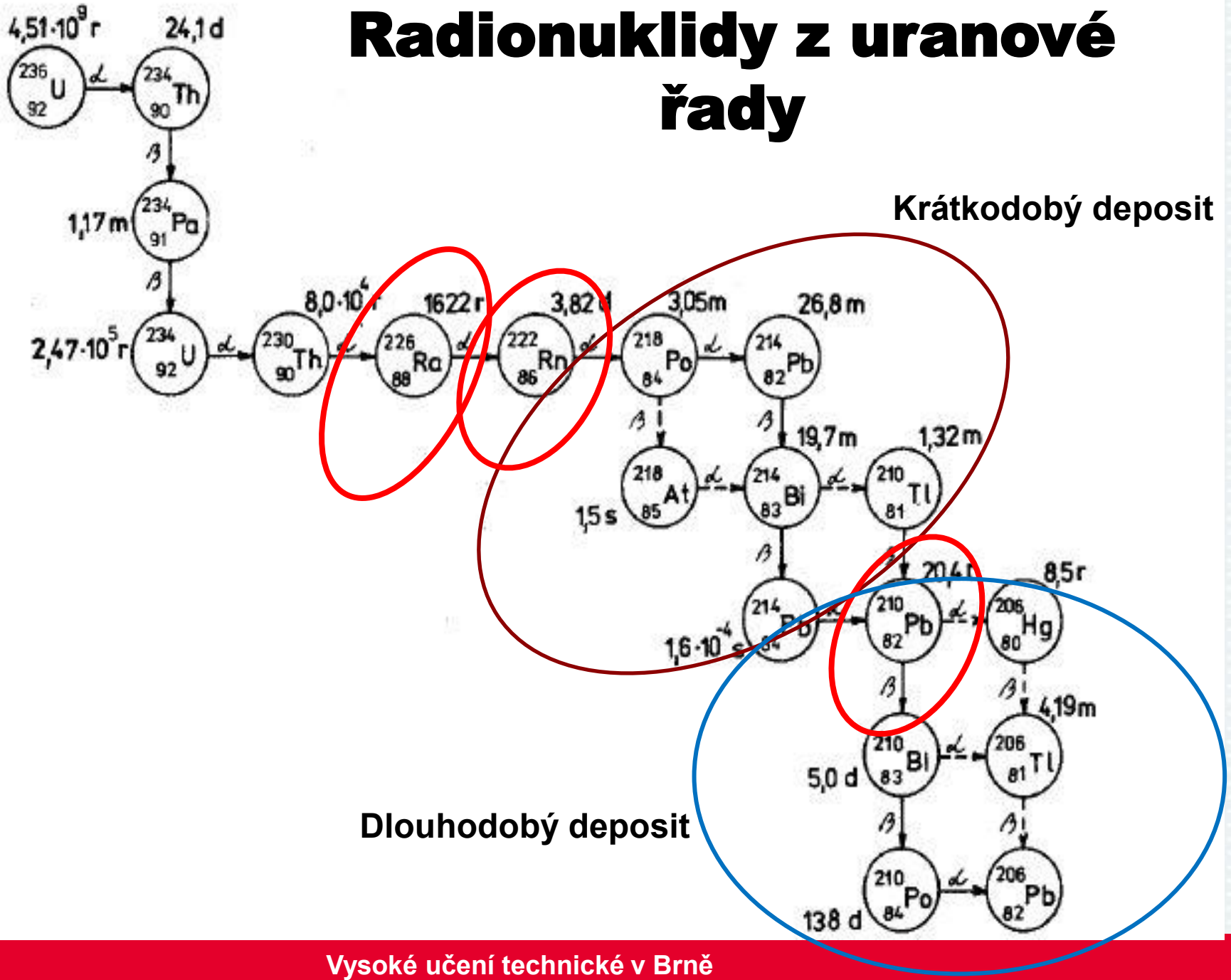
BY NC SA

Obsah ^{238}U v potravinách (SRN)

Potravina	^{238}U (mBq/kg)
Obilí	15
Zelenina	15
Petržel	160
Ovoce	10
Houby	20
Maso	25

cc BY NC SA

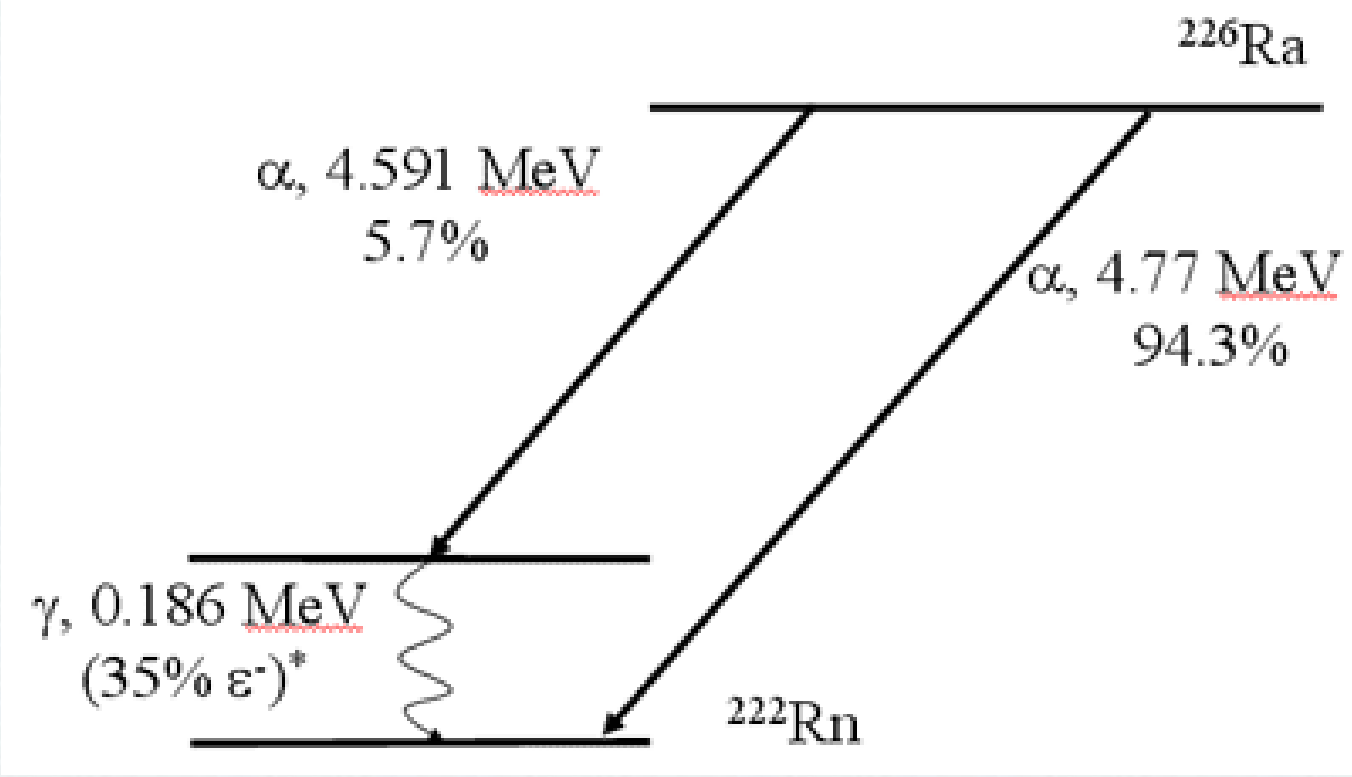
Radionuklidy z uranové řady



CC BY NC SA

^{226}Ra ($T_{1/2}$ = 1600 let)

- Člen U řady → vyskytuje se společně s U v půdách, horninách
- $A_{Ra} = A_U$ ale $N_{Ra}:N_u = 1 : 3 \cdot 10^6$ (viz trvalá rovnováha)



37

cc BY NC SA

- **Chemie Ra** – Ra^{2+} je analog Ba^{2+} → spolusrážení $BaSO_4$
  Ca^{2+} → fyziologie – kosti
- Vyluhování hornin → voda → rostliny → potrava
  - Max. obsah v termálních pramenech v oblastech se zvýšeným obsahem U v zemské kůře (Jáchymov až 18,5 kBq/L)
- Ra^{2+} se dobře sorbuje → sedimenty → nemigruje daleko od místa vzniku
- Pitná voda – nejrizikovější cesta příjmu
- Příjem rostlinami – obsah v potravě je funkcí koncentrace Ra v půdě a Ca ve vodě

BY NC SA

- Kritický orgán – kost (až 80 % Ra v těle)
- T_B = 10–12 let, celotělově 900 dní
- Dávka v kostech E = 0,07 mSv/rok
- Riziko – vliv α záření na krvetvorbu
  - Přímo z ^{226}Ra
  - Z rozpadových produktů $^{222}Rn \rightarrow {}^{210}Po$, ^{210}Pb (70 % Rn se přes krev vydechne)
- **Radium Girls**: malování ciferníků radioluminiscenčními barvami + neinformovanost → ztráta zubů, vlasů, rakovina, smrt → soud 1926 → odškodnění

CC BY NC SA

^{226}Ra

Obsah:	
horniny	150 - 500 (vyvřelé) Bq/kg
povrchové vody	0,04 - 0,2 Bq/l
oceány	0,01 Bq/l
lidská kostra	
Evropa	1,4 ± 0,35 mBq /g Ca
svět	2,2 ± 0,8 mBq /g Ca
obsah celkem	3 - 40 Bq

cc BY NC SA

Obsah ^{226}Ra v potravinách (Bq/100 g)

(maximální pozorované hodnoty)

ovoce	0,04	mouka	5,2
maso	0,2	játra, ledviny	5,5
zelenina	0,25	čaj	15
sýry, vejce	0,33	obiloviny	22
ryby	0,4-0,8	Para ořechy	520

cc BY NC SA

Limitní hodnoty A_v v dodávané vodě

objemová aktivita (Bq/l)	balená kojenecká voda	pitná voda (vodovody)	balená minerální voda
	směrné (mezní)	směrné (mezní)	směrné (mezní)
^{222}Rn	20 (100)	50 (300)	100 (600)
celková α	0,1	0,2	0,5
^{3}H		100	
celková β (bez ^{40}K)	0,1	0,5	1,0

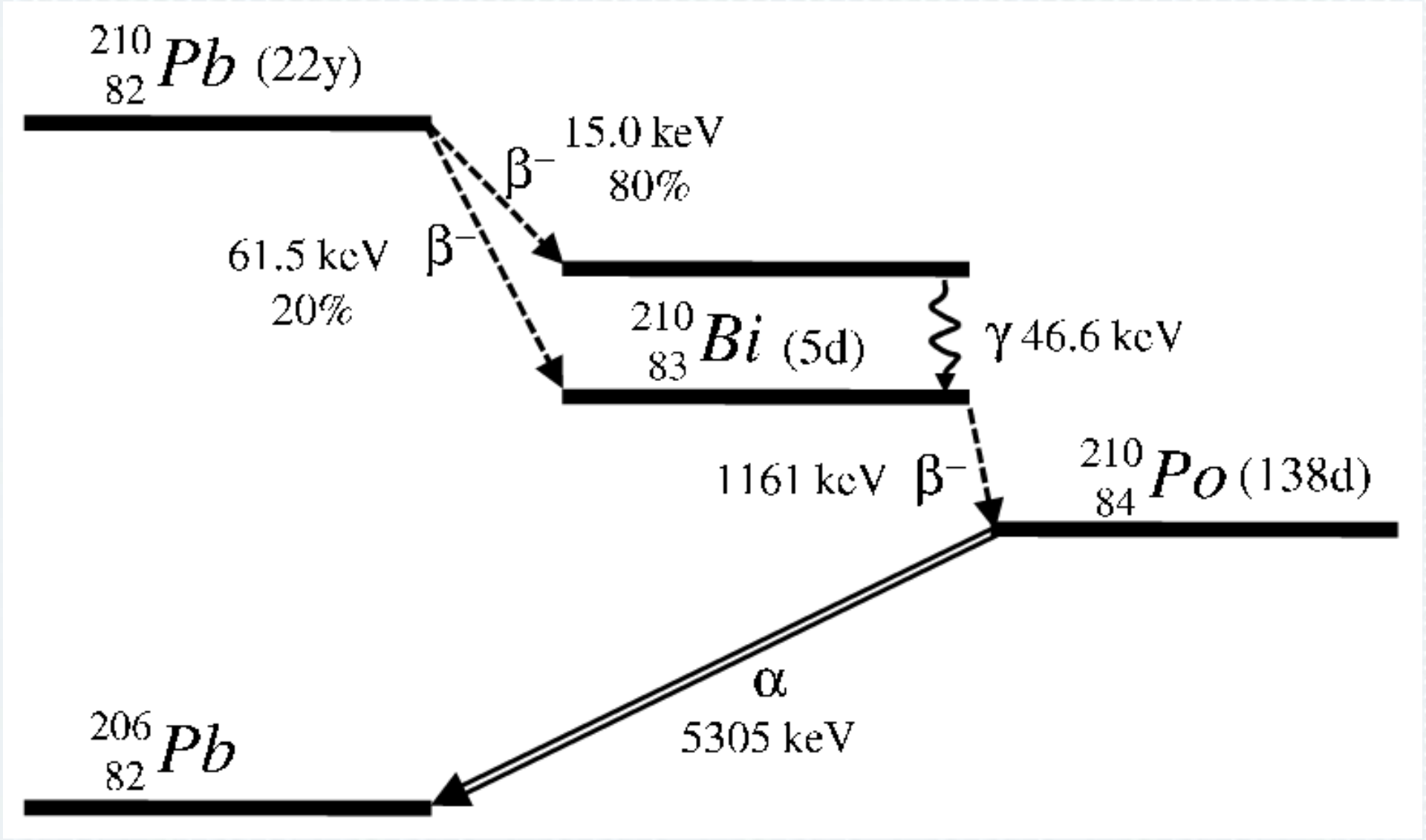
cc BY NC SA

^{210}Pb ($T_{1/2}$ = 22,2 r)

- Po rozpadu Rn se rychle hromadí, ale rozpadá se pomalu
- Kritický orgán – kost (analog Ca^{2+})
- T_B = 2,7 roku
- T_{ef} = 2,4 roku
- Dávka na povrchu kostí (při rovnováze s ^{210}Po)
  $\dot{H}$ = 0,5 mSv/rok

43

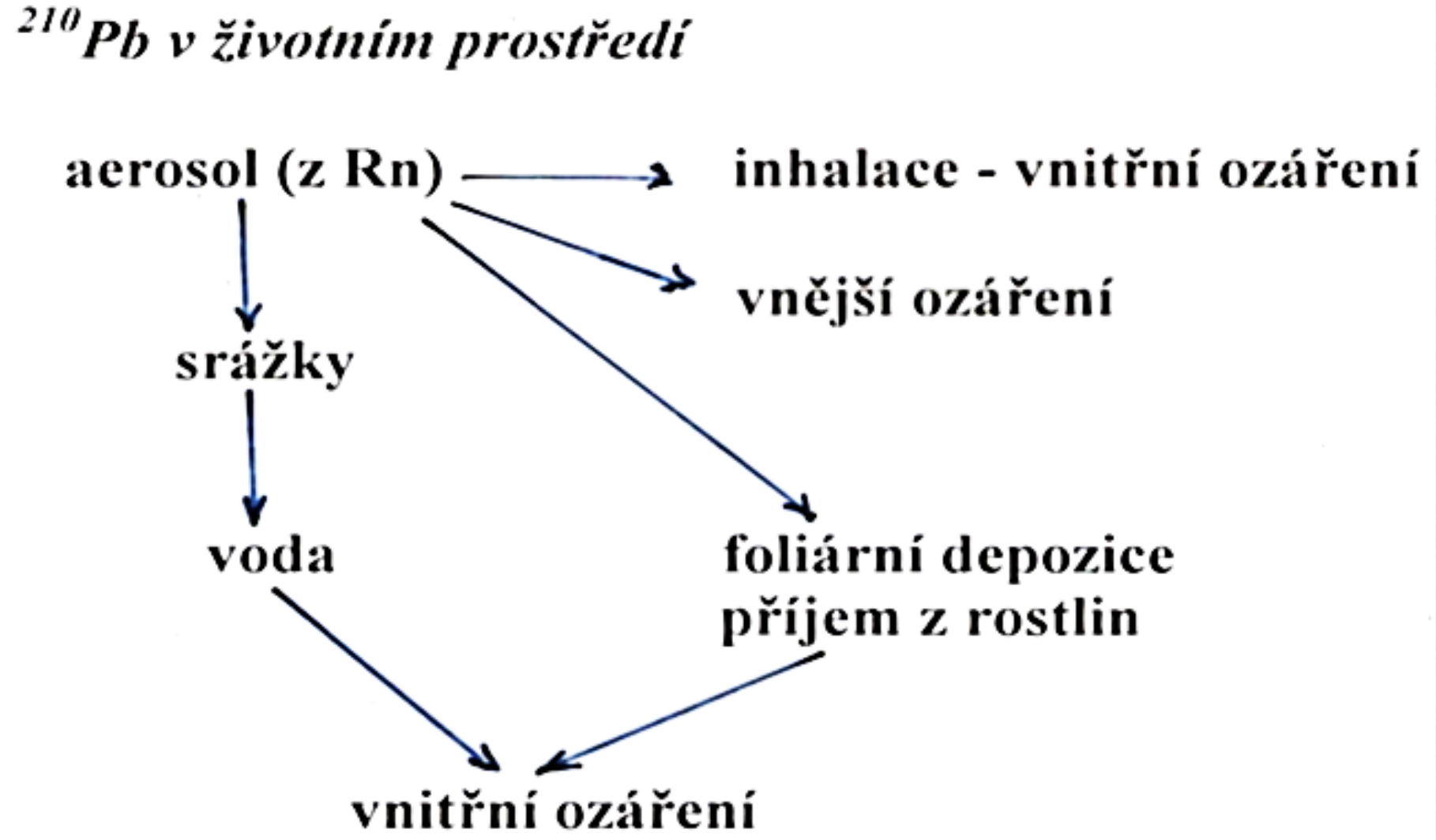
BY NC SA



Zdroj: https://www.researchgate.net/figure/The-decay-chain-210-Pb-210-Bi-210-Po-206-Pb-Within-parentheses-the-half-lives-of_fig1_230904327

44

CC BY NC SA


^{210}Pb v životním prostředí
aerosol (z Rn)
inhalace - vnitřní ozáření
vnější ozáření
srážky
voda
foliární depozice
příjem z rostlin
vnitřní ozáření

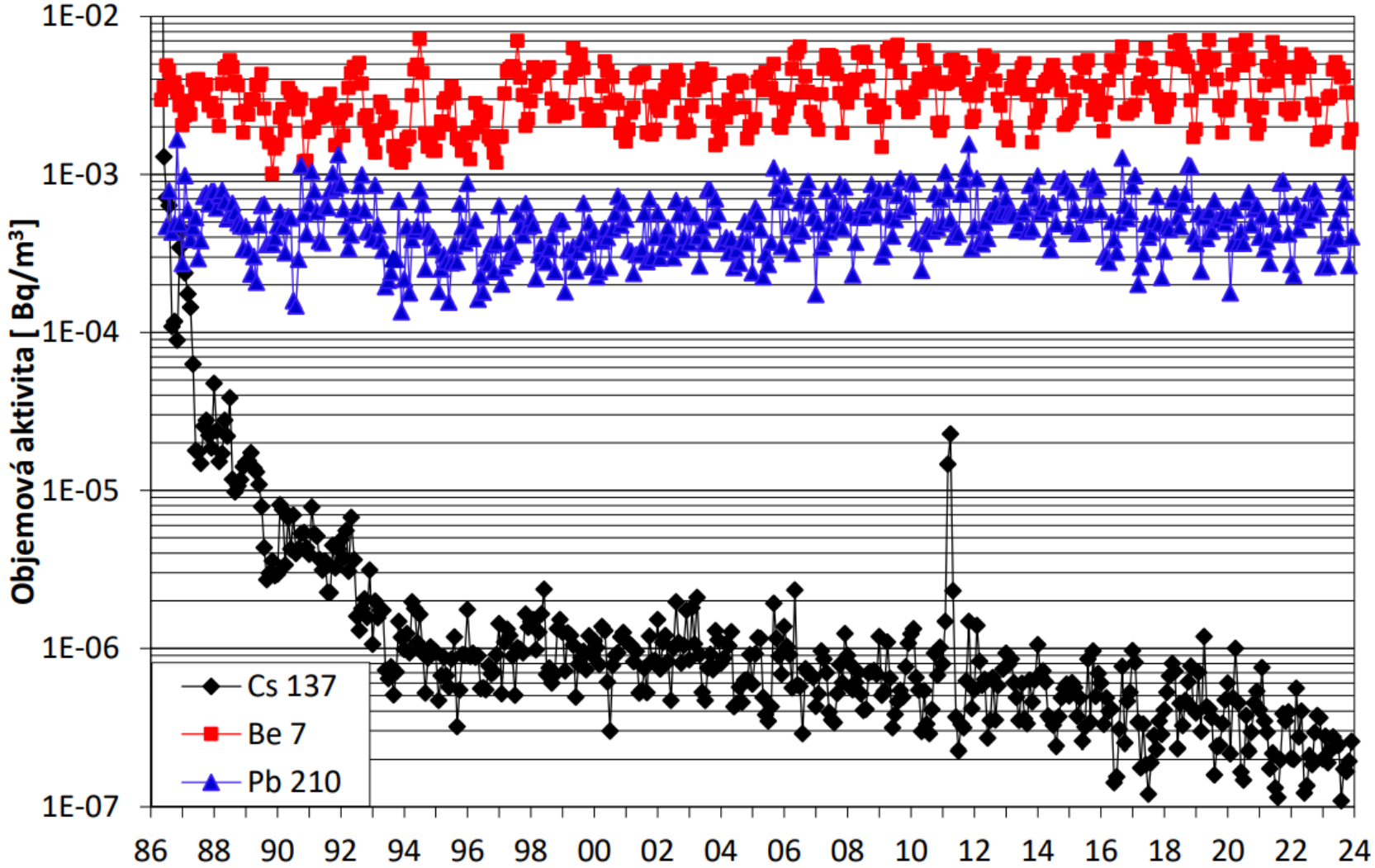
BY NC SA

^{210}Pb

Obsah:	
vzduch	0,002 - 0,01 Bq/m^3
dešťová voda	0,4 - 4 Bq/l
lidská kostra celkem	60 - 400 Bq
Denní příjem potravou	0,4 - 1 Bq

cc BY NC SA

Objemová aktivita vybraných RN v aerosolu v ovzduší, měsíční průměry od roku 1986



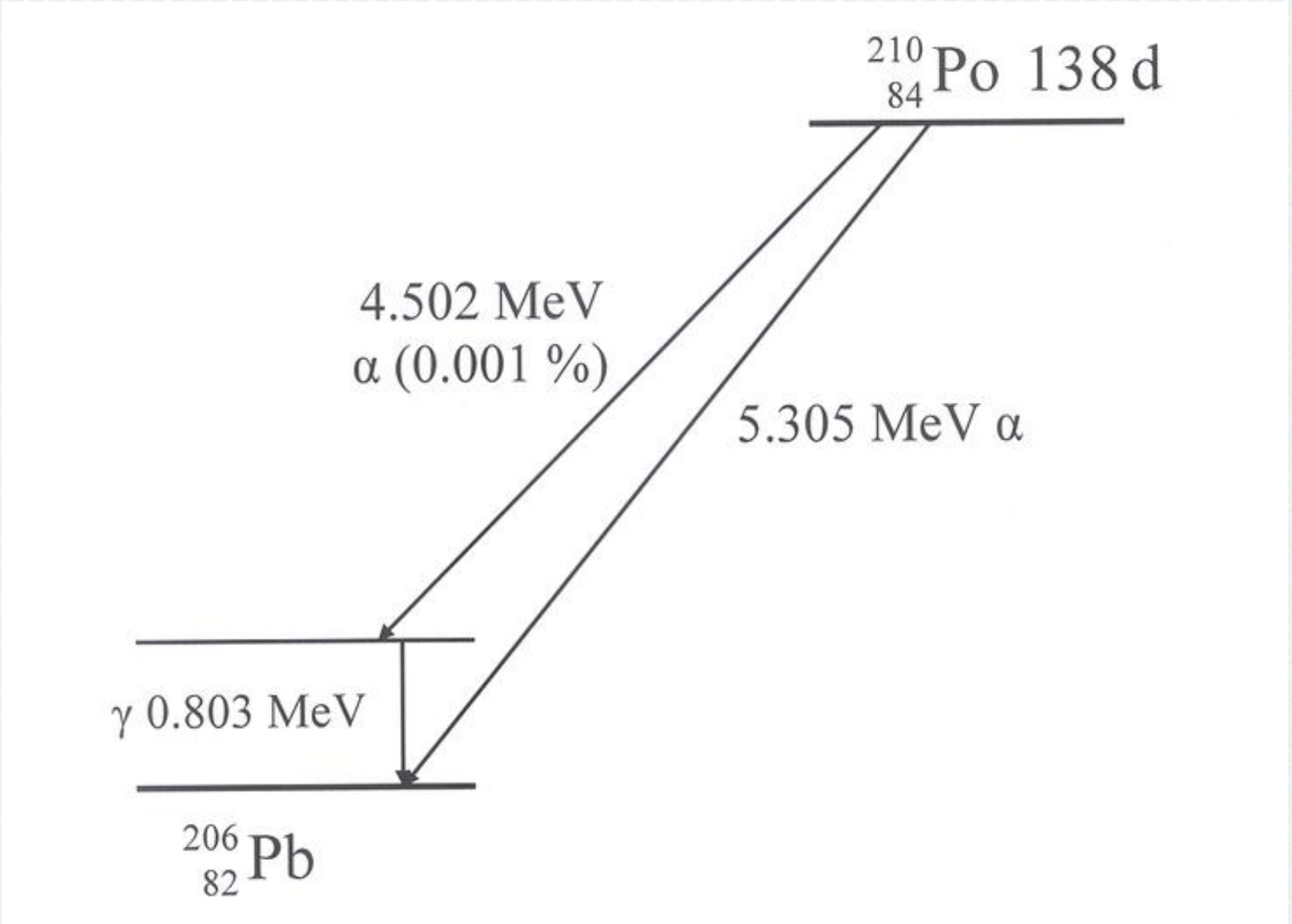
Zdroj: Výroční zpráva SÚJB 2023

cc BY NC SA

^{210}Po ($T_{1/2}$ = 138,4 dne)

- Výjimka mezi těžkými α-RN – ukládá se v měkké tkáni (ledviny, játra, slezina, červené krvinky)
- Ve vodách odlišné chování od Pb – tvorba koloidů, srážení
- Příjem – z vody a potravin
- T_B= 50 dní (celé tělo)
- T_{ef} = 37 dní
- Dávka viz ^{210}Pb

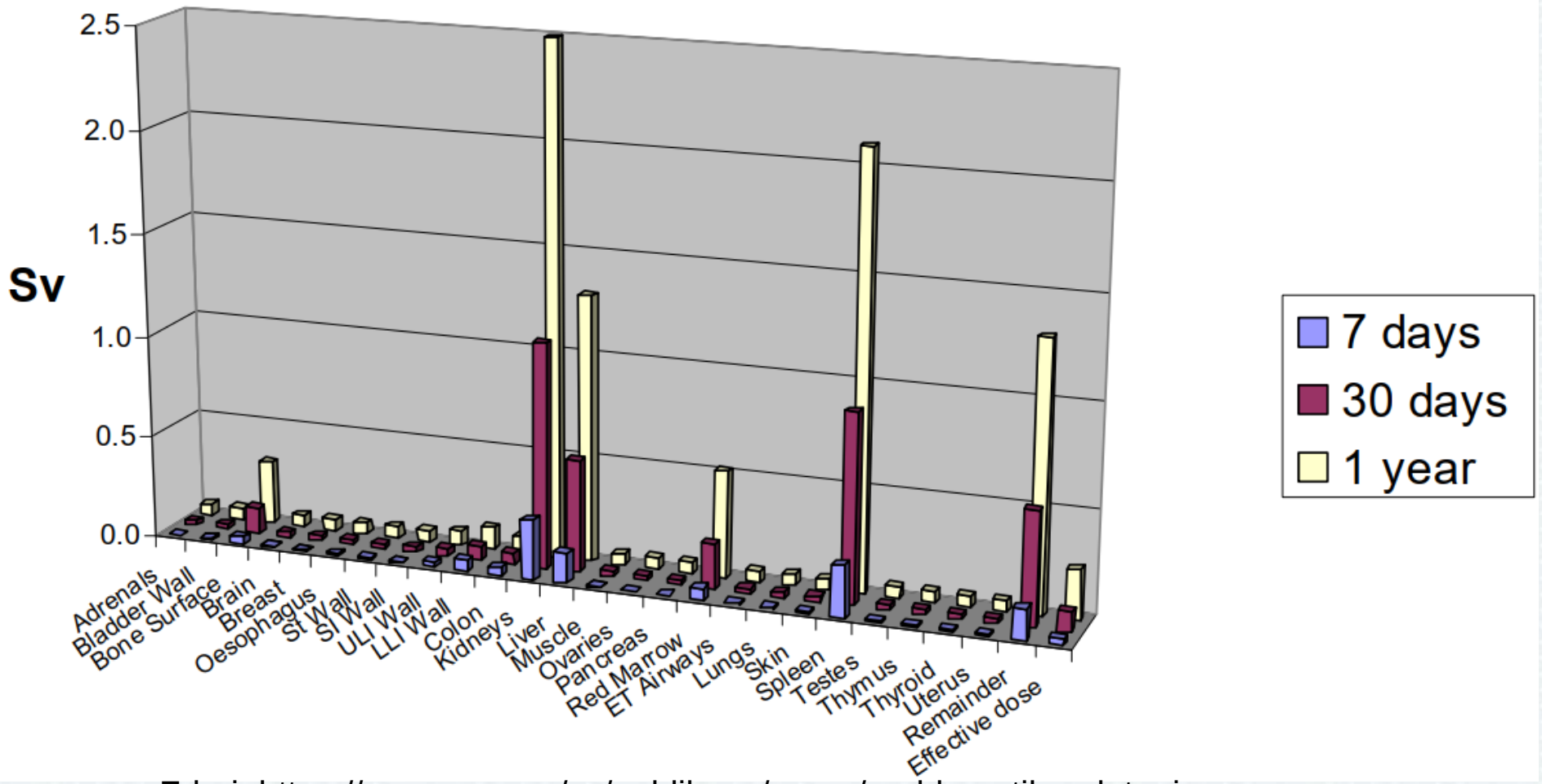
cc BY NC SA



Zdroj: wikipedia.org

cc BY NC SA

Po-210 - vývoj orgánové dávky (Sv)
dospělý , ingesce 1MBq



Zdroj: https://www.suro.cz/cz/publikace/ruzne/problematika-plutonia-210/Nekolik_poznamek_k_problematice_ozareni_poloniem_210.pdf

cc BY NC SA

Charakteristické údaje pro ^{210}Po

obsah Po (mBq kg^{-1})		mezní hodnoty	
mléčné výrobky	60	veřejné vodovody	0,4 Bq/l
masné výrobky	60	kojenecká voda	0,1 Bq/l
listová zelenina	30	balená minerální voda	0,8 Bq/l
ovoce	30		
ryby	2000		
voda	5		
vzduch	0,05		

CC BY NC SA

Kritické skupiny osob

- Kuřáci
- Severní národy (Laponci, Eskymáci)
- Bývalí agenti KGB (FSB)

cc BY NC SA

- **Kuřáci:**
  - Listy tabáku přijímají Po foliární depozicí (nebo kořeny v přítomnosti U v půdě)
  - Hořící cigareta → Po těká → aerosol do plic (7 %)
  - 1 cigareta 5–33 mBq → 20 ks/den → ~150 mBq/den → 55 Bq/rok + $h_{inh} = 3{,}3 \cdot 10^{-6}$ Sv/Bq → $\dot{H}_T = 0{,}2$ mSv/rok
  - U silných kuřáků, kteří zemřeli na rakovinu plic, byl obsah ^{210}Po → 16 Sv
  - Současný názor – spolupůsobí při vzniku rakoviny plic (až 90 % případů rakoviny plic způsobeno kouřením)

CC BY NC SA

- **Laponci, Eskymáci:**
  - Spad aerosolu na lišejník
    → koncentruje těžké kovy, včetně Po
    → sob → člověk

  - Finská studie:

	Laponci	jižní Finsko
Obsah Po (celotělový)	12x víc	
$\dot{H}_T$ v plicích	1,7 mSv	0,15 mSv

cc BY NC SA

Litviněnko

- Bývalý agent KGB a FSB
- 1. 11. 2006 byl otráven ^{210}Po a 23. listopadu na následky otravy zemřel
- $T_{1/2}$ = 138 dní → vysoká $A_m = 1{,}66 \cdot 10^{14}$ Bq/g
- Příklad: 1 mg Po → A = $1{,}66 \cdot 10^{11}$ Bq
  → $H_T = A\ (1{,}66 \cdot 10^{11}) * h_{ing}\ (1{,}2 \cdot 10^{-6}) = 2 \cdot 10^{5}$ Sv
- Při ingesci prochází zažívacím traktem – tenké střevo
- Příznaky nemoci 1. den, vážný stav po 11 dnech, kritický stav po 20 dnech, smrt po 23 dnech

cc BY NC SA

Průměrné hmotnostní aktivity přírodních radionuklidů v běžných potravinách

	Uranová řada					Thoriová řada			
Příjem	**$^{238}U \rightarrow ^{234}U$**	**^{230}Th**	**^{226}Ra**	**^{210}PB**	**^{210}Po**	**^{232}Th**	**^{228}Ra**	**^{228}Th**	**^{235}U**
Mléčné produkty	1	0,5	5	40	60	0,3	5	0,3	0,05
Maso	2	2,0	15	80	60	1,0	10	1,0	0,05
Obiloviny	20	10,0	80	100	100	3	60	3,0	1,0
Listová zelenina	20	20,0	50	30	30	15,0	40	15,0	1,0
Ovoce	3	0,5	30	25	30	0,5	20	0,5	0,1
Ryby	30	-	100	200	2000	-	-	-	-

[mBq/kg]

cc BY NC SA

Průměrný roční příjem aktivity přírodních radionuklidů a odvozený úvazek efektivní dávky

Radionuklid	Roční příjem [Bq]		Úvazek efektivní dávky [μSv]	
	ingesce	inhalace	ingesce	inhalace
U-238	5,7	0,007	0,22	0,056
U-234	5,7	0,007	0,24	0,066
Th-230	3,0	0,0036	0,53	0,050
Ra-226	22,0	0,0036	5,30	0,013
Pb-210	36,0	3,6	22,0	4,0
Po-210	63,0	0,36	66,0	1,2
Th-232	1,7	0,007	0,30	0,18
Ra-228	15,0	0,007	9,0	0,019
Th-228	3,0	0,007	0,09	0,28
U-235	0,2	0,0004	0,009	0,003

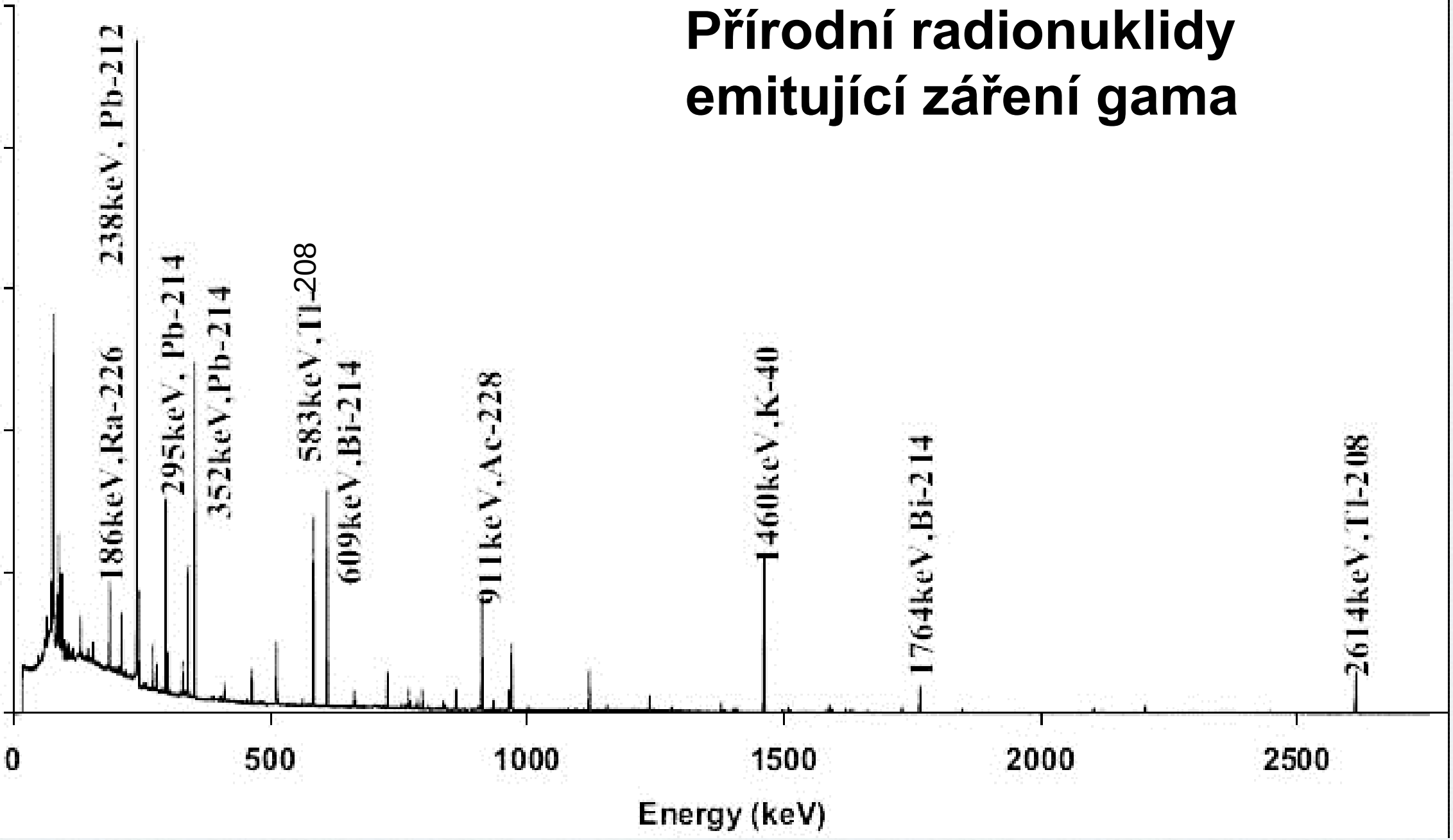
CC BY NC SA

Přírodní radionuklidy jako zdroj vnějšího ozáření

- Ozáření způsobené γ zářením, které vychází z horních vrstev půdy a hornin
- Měří se 1 m nad zemí (proto β není významné)
- Zdroj terestriálního γ záření – nuklidy emitující záření γ s vyšší energií: ^{40}K (1,46 MeV)
  + U řada (^{214}Pb, ^{214}Bi)
  + Th řada (^{212}Pb, ^{228}Ac, ^{208}Tl)
- Celosvětový průměrný $\dot{H}$ = 0,46 mSv/rok

CC BY NC SA

Přírodní radionuklidy emitující záření gama

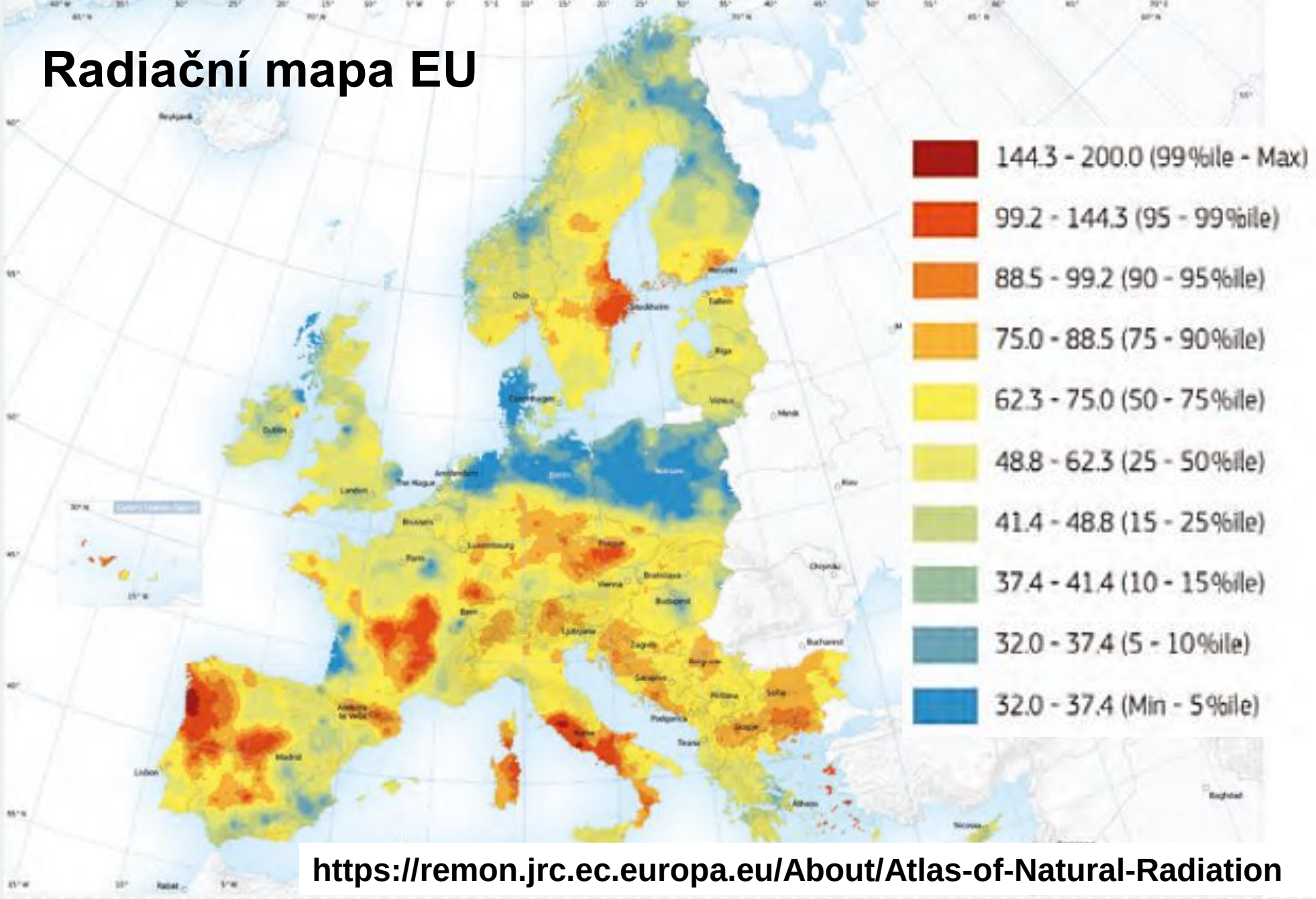


cc BY NC SA

- **Skutečná dávka závisí na**:
  - Typ půdy, horniny (obsah K, U, Th) – lokálně velmi proměnné
  - Vlhkost půdy – vlhkost zeslabuje záření γ + brání úniku Rn → dceř. produkty zůstávají v půdě
  - Doba strávená mimo budovy (v budovách je ozáření větší)
  - Celkové vnější ozáření v SRN 1994:
    $\dot{H}$ = 0,4 mSv/rok = 0,1 (venku, 5 h) + 0,3 (uvnitř, 19 h)

BY NC SA

Radiační mapa EU

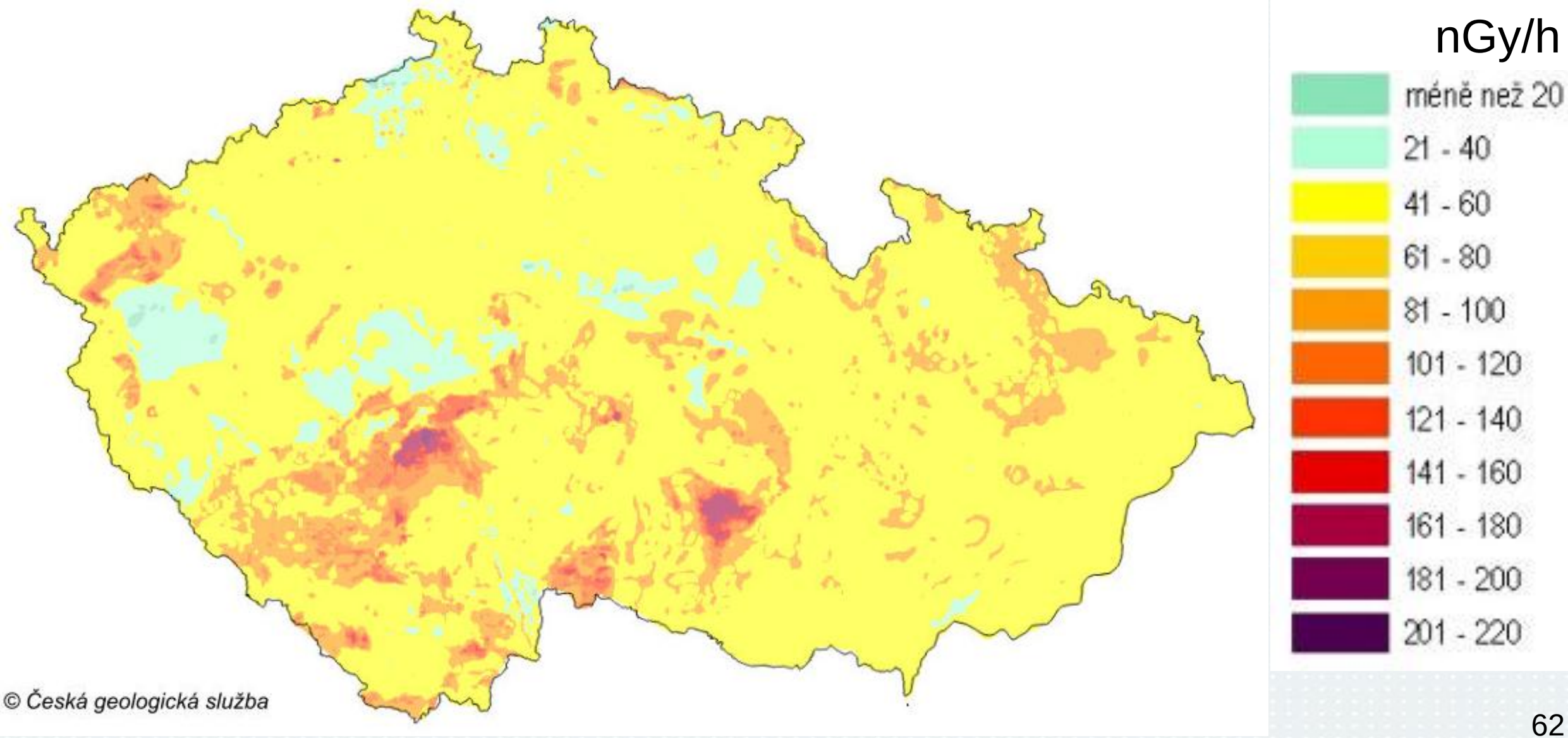


https://remon.jrc.ec.europa.eu/About/Atlas-of-Natural-Radiation

Zdroj: European Commission, Joint Research Centre – Cinelli, G., De Cort, M. & Tollefsen, T. (Eds.), *European Atlas of Natural Radiation*, Publication Office of the European Union, Luxembourg, 2019.

CC BY NC SA

Radiometrická mapa ČR



cc BY NC SA

Oblasti s vyšším terestriálním zářením

- **Brazílie** – monazitové písky – (Ce, La, Nd, **Th**)(PO_4), černé písky na plážích jsou zbarveny ilmenitem ($FeTiO_3$)
  - Pláže jsou inzerovány pro příznivý vliv záření
  - V oblasti žije cca 60 000 obyvatel z nich 1/10 má $\dot{H} > 5$ mSv/rok
- **Indie** (stát Kerala) – velká monazitová ložiska na JZ pobřeží
  - 100 000 obyvatel – průměrný $\dot{H} = 5 – 6$ mSv/rok (izolovaně 33 mSv/rok)
- **Irán** (okres Ramsar) – vyšší výskyt ^{226}Ra v půdě a vodě → až 150 mSv/rok

CC BY NC SA

Země	Lokalita	Charakteristika lokality	Absorbovaná dávka ($nGy.h^{-1}$)
Brazílie	Guarapari	monazitové písky	90 – 90 000
	Mineas Gerais, Goias Pocos de Caldas Araxa	vulkanické vyvřeliny	110 – 1300
Čína	Yangjiang	monazitové částice	průměrně 370
	Quangdong		
Egypt	delta Nilu	monazitové písky	20 – 400
Francie	centrální region	žula, břidlice, pískovec	20 – 400
	jihozápad	uranové minerály	10 – 10000
Indie	Kerala, Madras	monazitové písky	200 – 4000
	delta Gangy		260 – 440
Írán	Ramsar	pramenité vody	70 – 70000
	Mahallat		800 – 4000
Itálie	Lazio	vulkanické půdy	průměrně 180
	Kampánie		průměrně 200
	Orvieto		průměrně 560
	Jižní Toskánsko		150 – 200
ostrov Niue	Pacifický oceán	vulkanické půdy	do 1100
Švýcarsko	Tessin, Alpy, Jura	rula, krasové půdy	100 - 200

Zdroj: wikipedia.org

cc BY NC SA

Vnější ozáření z přírodních radionuklidů zvýšené lidskou činností

- **Stavební materiály**

  a. **Přírodní suroviny** – cihlářská hlína, stavební kámen (žula – vyšší obsah U)

  b. **Odpadní materiál** – elektrárenský popílek, škvára, sádra z výroby H_3PO_4 z fosfátových rud
  – obsahují zakoncentrované RN
  – uhlí obsahuje ^{40}K, U a Th řadu o stejném obsahu jako půdy a horniny

cc BY NC SA

Důsledek

- Zvýšené vnější ozáření v budovách
  → **referenční úroveň** 1 mSv/rok je překročena pokud …
- **Index hmotnostní aktivity I** je > 1
  – sčítá riziko ^{40}K, ^{226}Ra (U řada) a ^{228}Th (Th řada)

$$I = \frac{A_K}{3000} + \frac{A_{Ra}}{300} + \frac{A_{Th}}{200}$$ (A v [Bq/Kg])

  – při překročení se nesmí materiál používat nebo se musí použití odůvodnit
- Kvůli geologii ČR jsou jíly kontaminovány U+PP

CC BY NC SA

Stavební materiál:

- stavby ze škvárobetonu – škvára z elektrárny Rynholec (uhlí z kladenské pánve – U mineralizace)
  – škvára 1000–4000 Bq ^{226}Ra/kg
  – postaveno asi 3 000 domů
- pórobeton z popílku z elektrárny Poříčí u Trutnova – až 900 Bq ^{226}Ra/kg (žacléřsko-svatoňovická uhelná pánev)
  – postaveno asi 30 000 domů
- Jáchymov – kontaminace města po těžbě Ag(U)
  → stavební uzávěra + doporučení přemístit děti z MŠ a ZŠ do jiných měst – odmítnuto

BY NC SA

Radon

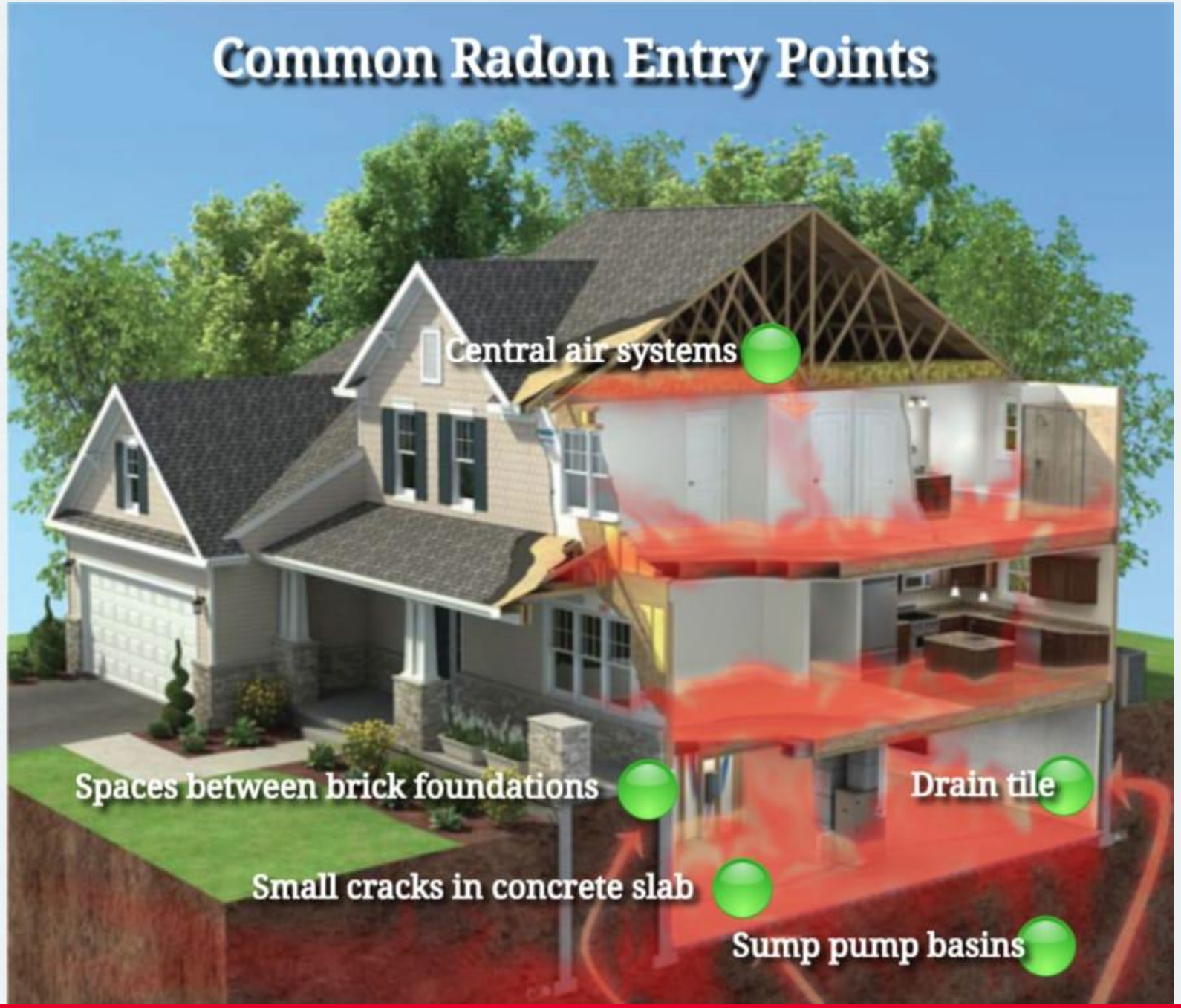
- Produkt přeměny ve všech přírodních rozpadových řadách
  $^{238}U \rightarrow \ldots \rightarrow {}^{222}Rn$ ($T_{1/2}$ = 3,8 dne)
  $^{235}U \rightarrow \ldots \rightarrow {}^{219}Rn$ ($T_{1/2}$ = 4 s) – nevýznamný
  $^{232}Th \rightarrow \ldots \rightarrow {}^{220}Rn$ ($T_{1/2}$ = 55 s) – riziko ≈1 % ^{222}Rn
- Obecný problém: U je všudypřítomný → kde je ve styku se vzduchem, je i Rn → rudy – horníci
  → půdy, stavební materiál – obyvatelstvo
- **Z přírodních radionuklidů radioekologicky nejvýznamnější**
  celkově z přírodních zdrojů 2,4 mSv (v ČR 3,7 mSv)
  z toho Rn 1,3 mSv, 54 % (v ČR 2,5 mSv, 67 %)

cc BY NC SA

Podstata rizika:

- Sám ^{222}Rn není riziko (krátký $T_{1/2}$, vydechování)
- **Riziko Rn = riziko produktů přeměny**
  - PP jsou elektricky nabité (jaderný odraz, ztráta e^-)
    → záchyt na prachových částicích → radioaktivní aerosol
  - Část aerosolu se usazuje v plicích
    → α záření $^{218, 214}Po$ – vysoká lineární ionizace
    → riziko vzniku rakoviny plic

cc BY NC SA



Zdroj: wikipedia.org

cc BY NC SA

Radon ve volném vzduchu

= outdoor Rn

- A_V velmi proměnná – 0,1 až 100 Bq/m^3
- celosvětový průměr 10 Bq/m^3 (UNSCEAR) ($N=A/\lambda=10(s^{-1})/2{,}1\cdot10^{-6}(s^{-1})$ = $4{,}8\cdot10^6$ atomů ^{222}Rn/m^3)

Radon v budovách

= indoor Rn

- $A_V = 10–10^4$ Bq/m^3
- celosvětový průměr 40 Bq/m^3 → 1 mSv/rok

CC BY NC SA

Radonový program

1. **Preventivní opatření pro novou výstavbu**
2. **Zásahy ke snížení ozáření z RN u starších objektů**
3. **Zajištění informovanosti obyvatelstva a státní správy o zdravotním riziku vyšších A_V**

(Od 1. 1. 2020 Národní akční plán pro regulaci ozáření obyvatel z radonu - "RANAP„)

CC BY NC SA

Doporučené hodnoty A_v(Rn) pro provedení zásahu ke snížení ozáření z výskytu Rn+PP

A_v(Rn) (Bq m^{-3})	opatření	Dávkový příkon ve vzduchu [µGy/hod]
200-300	zvýšení přirozeného větrání	1–2
300-600	nucená ventilace, méně nákladné stavební úpravy	2–10
600-2000	zásadní stavební úpravy	
>2000	vyloučení pobytu osob	>10

Celosvětový průměr 40 Bq/m^3

Přírodní pozadí 0,2–0,5 µGy/hod

BY NC SA

Léčebné účinky Rn lázní

- Pobyt v jeskyních s vysokým obsahem Rn (A_V až 150 Bq/m^3)
  - Bronchiální astma, chronická bronchitida, lupénka

- Koupele – resorpce Rn z vody
  - Zánětlivé revmatické nemoci, artritidy, infekce kloubů, chronické bolesti po traumatu
  - **Jáchymovské léčivé prameny**

cc BY NC SA

Magisterský studijní program JADERNÁ ENERGETIKA vznikl za přispění

Financováno Evropskou unií
NextGenerationEU

NÁRODNÍ PLÁN OBNOVY

MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ, MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

NPO_VUT_MSMT-16609_2022

CC BY NC SA

VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ
V BRNĚ

Financováno Evropskou unií
NextGenerationEU

NÁRODNÍ PLÁN OBNOVY

MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ, MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FAKULTA CHEMICKÁ

FAKULTA STAVEBNÍ

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

Přednáška magisterského studijního programu JADERNÁ ENERGETIKA

Radioekologie a úvod do jaderných technologií

Monitorování radiační situace v životním prostředí
– síť včasného zjištění, národní monitorovací plán, stanovení radionuklidů

Fakulta chemická

Ota Fišera

2024

CC BY NC SA

Monitorování radiační situace

- Součást systému radiační ochrany
- Hodnocení radiační situace na celém území ČR
  - Sledování, posuzování, stavu ozáření
- Podklady pro rozhodování o opatřeních vedoucích ke snížení nebo odvrácení ozáření v případě radiační havárie
- Monitorované umělé radionuklidy:

  ^{137}Cs (^{134}Cs), ^{90}Sr, ^{3}H, ^{14}C, ^{85}Kr, ^{131}I, ^{238}Pu, $^{239+240}Pu$

Základem je

Radiační monitorovací síť

cc BY NC SA

Radiační monitorovací síť

- Řízením je pověřen Státní úřad pro jadernou bezpečnost (SÚJB)

- Subjekty zapojené do činnosti RMS:
  - Regionální centra SÚJB
  - Státní ústavu radiační ochrany (SÚRO)
  - držitelé povolení k provozu jaderných zařízení
  - organizace resortů

    Ministerstva financí
    Ministerstva obrany
    Ministerstva vnitra
    Ministerstva zemědělství
    Ministerstva životního prostředí

cc BY NC SA

Radiační monitorovací síť

Legislativní rámec

- Vyhláška č. 360/2016 Sb., o monitorování radiační situace
  – základní funkce a organizace RMS
- Vyhláška 359/2016 Sb., o podrobnostech k zajištění zvládání radiační mimořádné události
- Vyhláška č. 422/2016 Sb., o radiační ochraně a zabezpečení radionuklidového zdroje
  – programy monitorování a rozsah monitorování okolí jaderných zařízení
- **Národní program monitorování**
  - Stanovuje rozsah zajištění monitorování radiační situace a požadavky na předávání dat do datového střediska SÚJB
  - Vydán1. ledna 2019, aktuálně platná verze od 1. 1. 2022
  - Revize každých 5 let
  - Aktuální znění: https://sujb.gov.cz/npm

CC BY NC SA

Radiační monitorovací síť

- Síť včasného zjištění – 169 měřících míst po celé ČR
- Síť termoluminiscenčních dozimetrů
  - Teritoriální síť TLD – 180 míst po celé ČR (127 venku, 53 uvnitř)
  - Lokální sítě TLD – na JE – státní + provozovatel
- Síť pro vnitřní ozáření – obsah RN v ŽP, potravinách, těle
- Teritoriální síť odběru vzorků ŽP – kontinuální monitoring ovzduší (SÚJB, SÚRO a ČHMÚ), aerosoly, spad, potraviny, pitná voda, krmivo apod.
- Lokální sítě odběru vzorků ŽP – na JE
- Síť monitorovacích tras – mobilní skupiny

CC BY NC SA

Síť včasného zjištění

- 169 měřících míst
  - 71 měřících míst umístěných na pracovištích
    - RC SÚJB – 8 měřicích míst
    - SÚRO – 1 měřicí místo
    - ČHMÚ – 38 měřicích míst
    - HZS ČR – 7 měřicích míst
    - AČR – 17 měřicích míst
  - teritoriální SVZ v okolí jaderných elektráren – celkem 98 měřicích míst (doplněna teledozimetrickými systémy)
    - JE Temelín – 24 míst na hranici areálu + 23 míst v sídelních jednotkách v okolí
    - JE Dukovany – 27 míst na hranici areálu + 24 míst v sídelních jednotkách

cc BY NC SA

Síť termoluminiscenčních dozimetrů

- Vícesložkové TL dozimetry – karta obsahující 4 detektory LiF:Mg,Cu,P
  + filtry různého složení pro hrubou energetickou závislost
- Měřící místa umístěna ve volném prostranství ve výšce 1 m nad terénem
- Část doplněna měřícím místem v přilehlých budovách
  → posouzení účinnosti ukrytí obyvatel v případě radiační havárie
- Čtvrtletní interval měření (při normální radiační situaci)
- Měří se prostorový dávkový ekvivalent H*(10) [μSv].
- Za dobu existence (1989) TLD sítě nebylo zaznamenáno žádné překročení vyšetřovací úrovně, tj. hodnoty 500 nSv/h.

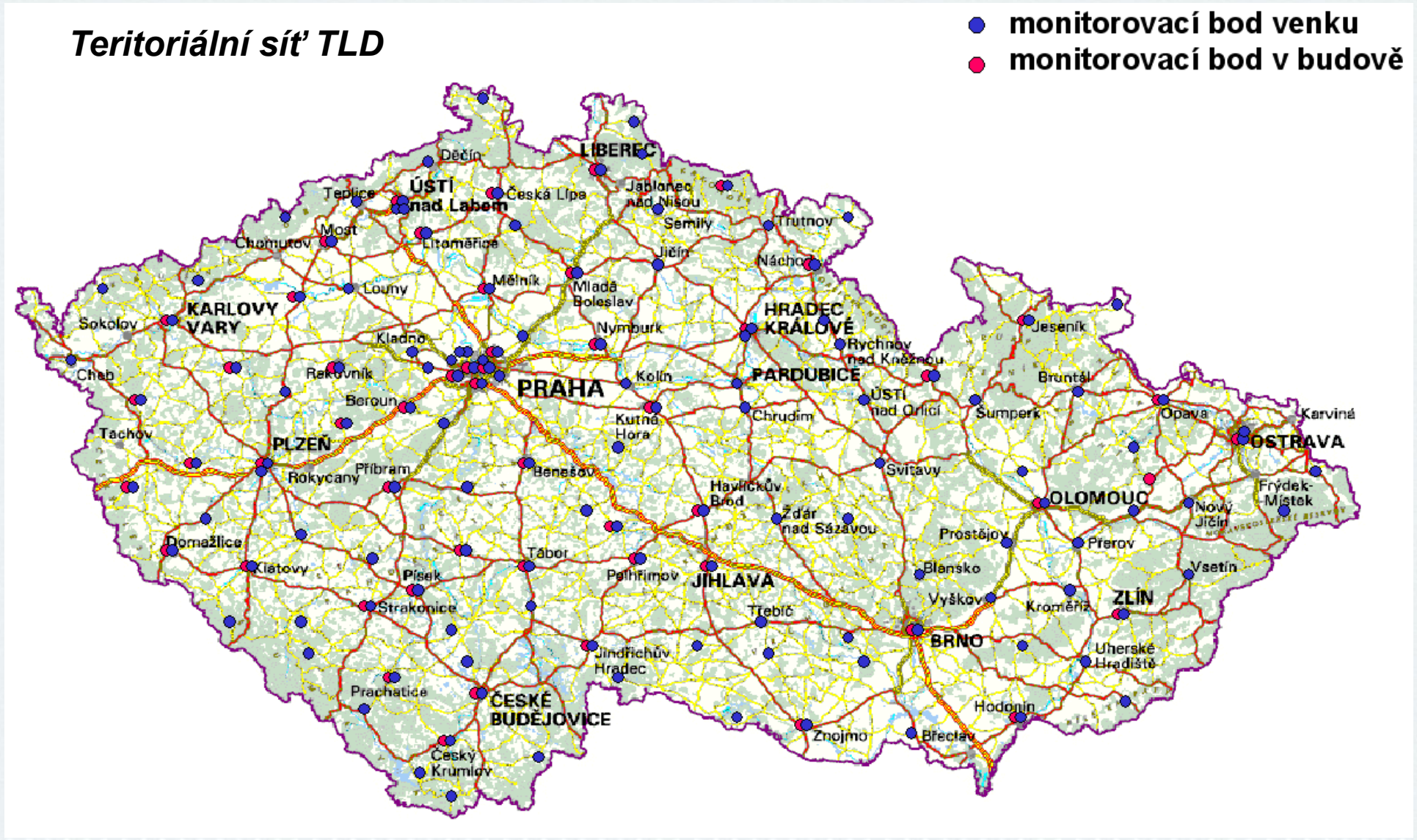
cc BY NC SA

Síť termoluminiscenčních dozimetrů

- **Teritoriální síť TLD** – 180 měřících míst na území ČR
  - 127 venku + 53 v budovách – posouzení účinnosti ukrytí obyvatel v případě radiační havárie
  - provozuje SÚRO a RC SÚJB
- **Lokální sítě TLD** – 26 měřících míst
  - V okolí JE Dukovany 15 měřicích míst + JE Temelín 11 míst
  - provozuje SÚRO a RC SÚJB – institucionální kontrola
- **Lokální sítě TLD** – 97 měřících míst
  - V okolí JE Dukovany 55 měřicích míst + JE Temelín 42 míst
  - Provozují Laboratoře radiační kontroly okolí (LRKO) JE

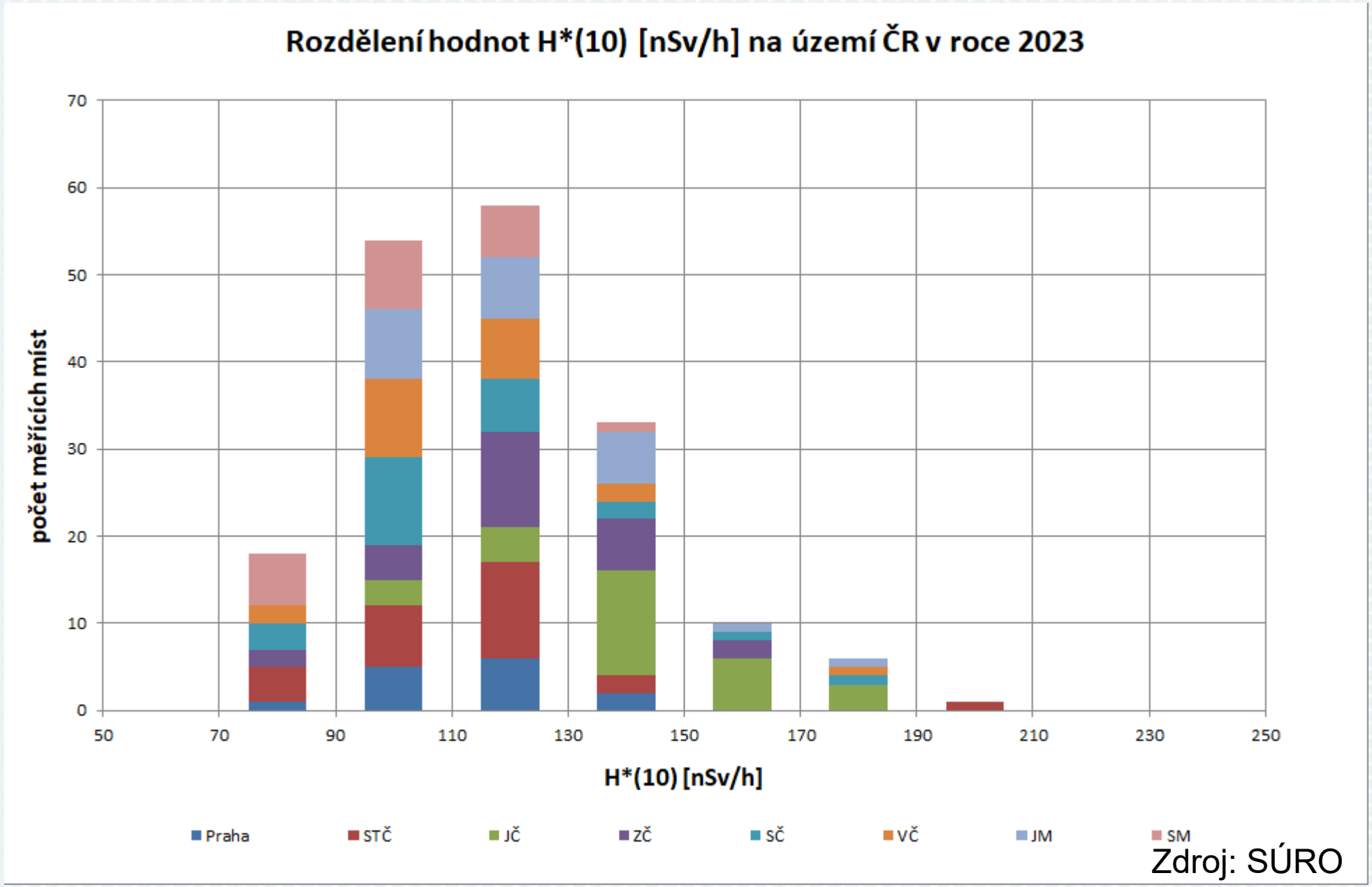
cc BY NC SA

Teritoriální síť TLD



Zdroj: SÚRO

BY NC SA



Zdroj: SÚRO

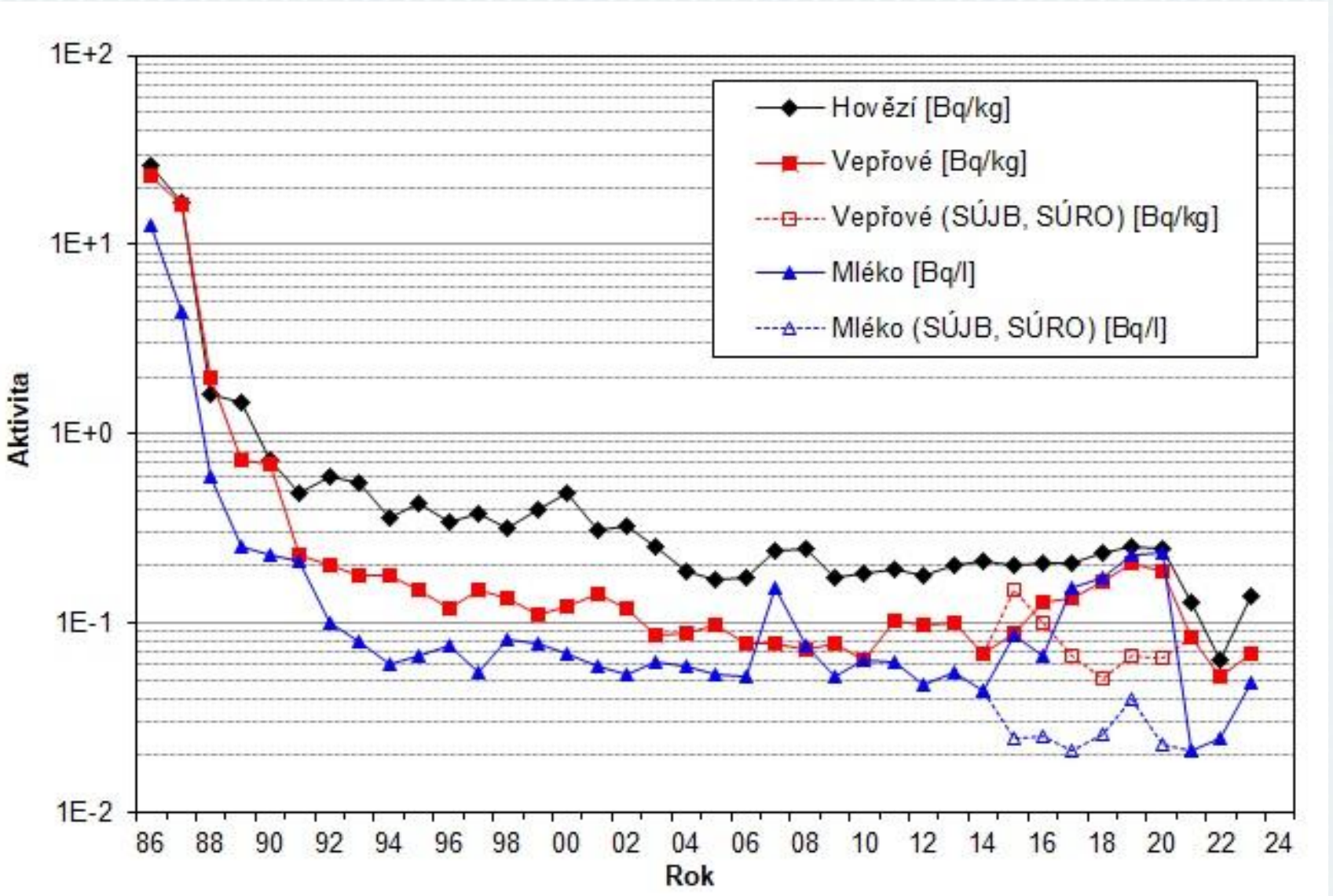
cc BY NC SA

Síť odběru vzorků

- Síť odběru vzorků životního prostředí
  - odhad zevního i vnitřního ozáření
  - vzorky ovzduší / půdy / vody / výpustí JE
- Síť odběru vzorků potravního řetězce
  - odhad vnitřního ozáření
  - mléko / položky smíšené stravy (ryby, ovoce, houby …) / krmivo
- 12 laboratoří (RC SÚJB, SÚRO, LRKO JEDU a JETE, Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. M., Státní veterinární ústav)
- kvalitativní i kvantitativní analýza obsahu RN ve vzorcích
- spektrometrie alfa, beta, gama + radiochemické analýzy

cc BY NC SA

Průměrné roční hmotnostní aktivity ^{137}Cs ve vepřovém a hovězím mase a objemové aktivity ^{137}Cs v mléce



V letech 2015 – 2020 byly vzorky SVÚ mírně nadhodnoceny.
Příčinou byla kontaminace detektoru v důsledku měření velkého počtu vzorků zvěřiny s vyššími aktivitami
(cca stovky až tisíce Bq/kg).

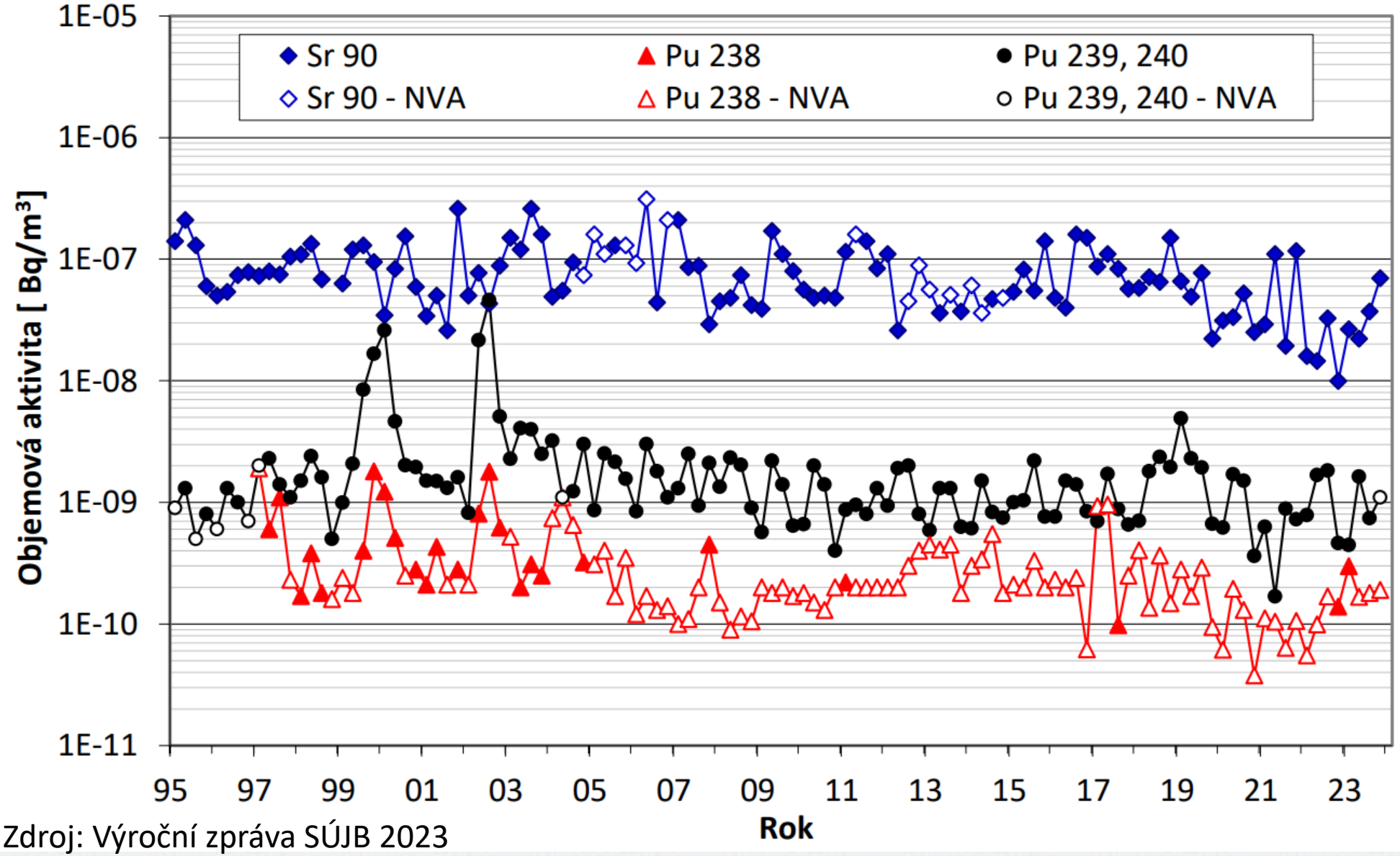
cc BY NC SA

Síť odběru vzorků životního prostředí – kontaminace ovzduší

- Odhad radiační zátěže obyvatelstva z inhalace
- vzorky ovzduší – aerosoly, plynné formy, spad
- Sledování kvalitativních a kvantitativních změn obsahu umělých radionuklidů v atmosféře
- **Teritoriální síť** – 11 měřicích míst (RC SÚJB, SÚRO a ČHMÚ)
- **Lokální sítě** – JE Dukovany (6 míst) + JE Temelín (7 míst)
- Zařízení pro odběr aerosolu s průtoky v rozmezí 40–900 m^3/h
  + čtvrtletní monitorování
  + radiochemická separace pro α/β RN → vysoká citlivost až 10^{-10} Bq/m^3
- Týdenní a čtvrtletní monitorování

CC BY NC SA

Objemová aktivita ^{90}Sr, $^{238/239/240}Pu$ v aerosolu v ovzduší od roku 1995 – OM Praha



Zdroj: Výroční zpráva SÚJB 2023

cc BY NC SA

Odběrová zařízení typu Snow White pro kontinuální odběr aerosolů s průtokem vzdušiny 900 m^3/h

BY NC SA

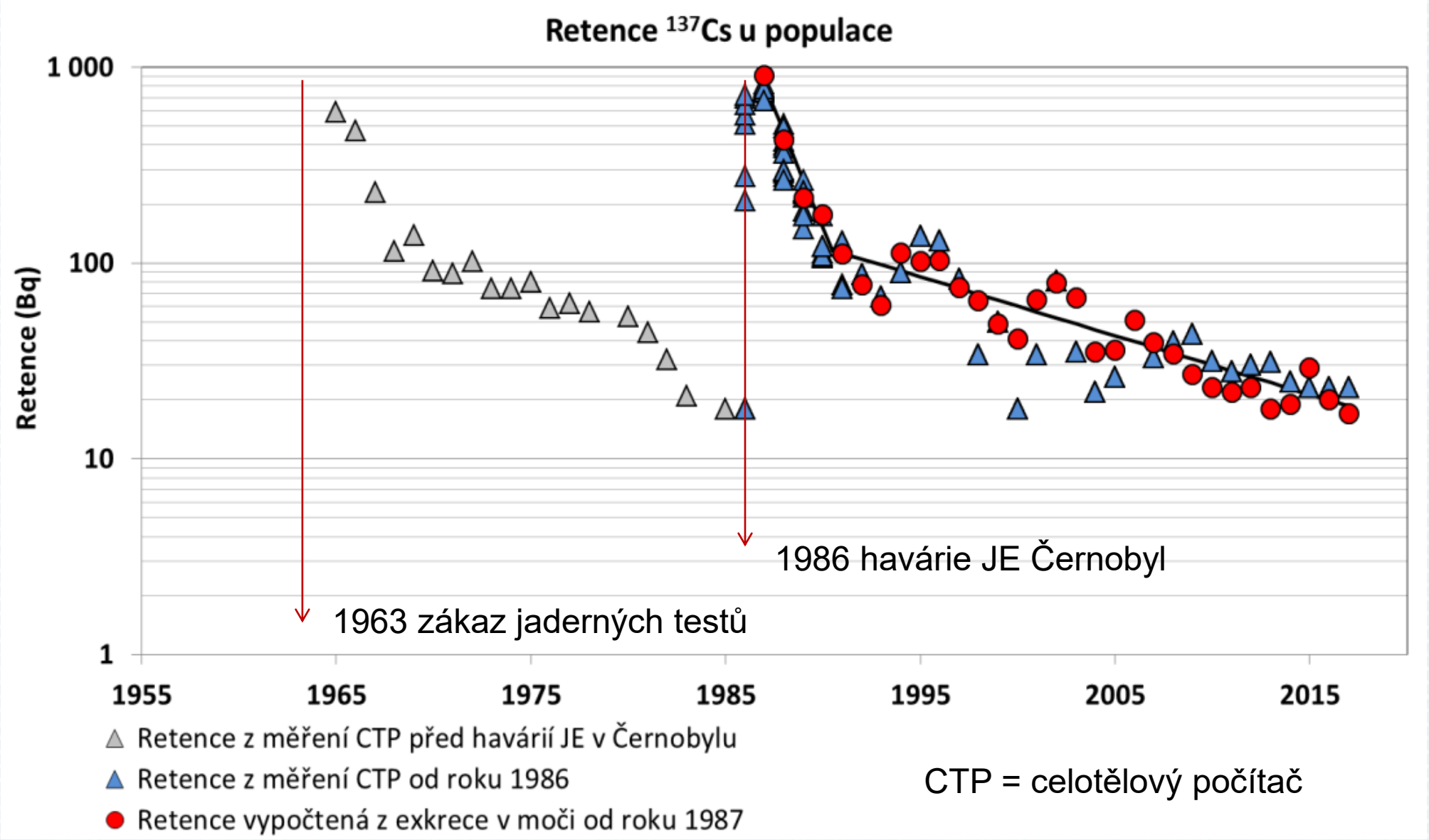
Síť měření lidského těla

- Monitorování vnitřní kontaminace
- Celotělový počítač + stanovení ^{137}Cs v moči
  → celková A(^{137}Cs) → modelování efektivní dávky
- Skupina lidí s běžnými stravovacími návyky
  → roční E = 1,5 μSv (2006)
- Dlouhodobě se sleduje skupina 12 lidí (3 ž., 9 m.) z Jeseníků, kteří ve zvýšené míře konzumují zvěřinu a lesní plody
  → roční E = 100 μSv (2006)

  (průměrná spotřeba zvěřiny v ČR 0,28 kg/rok, sledovaná skupina 11,6 kg/rok, jedinci 35 kg/rok + houby a lesní plody)

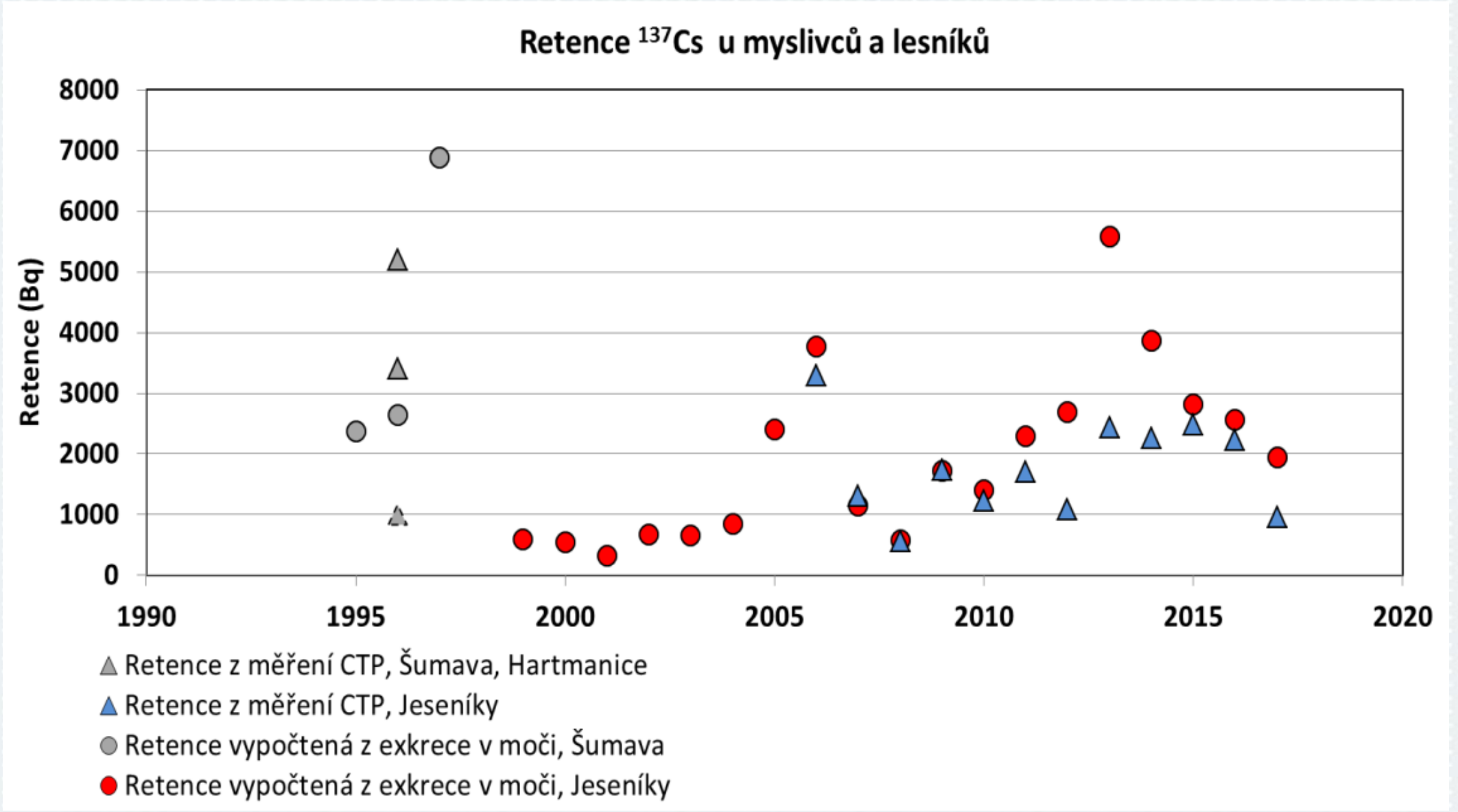
cc BY NC SA

Časová řada retence ^{137}Cs v České Republice



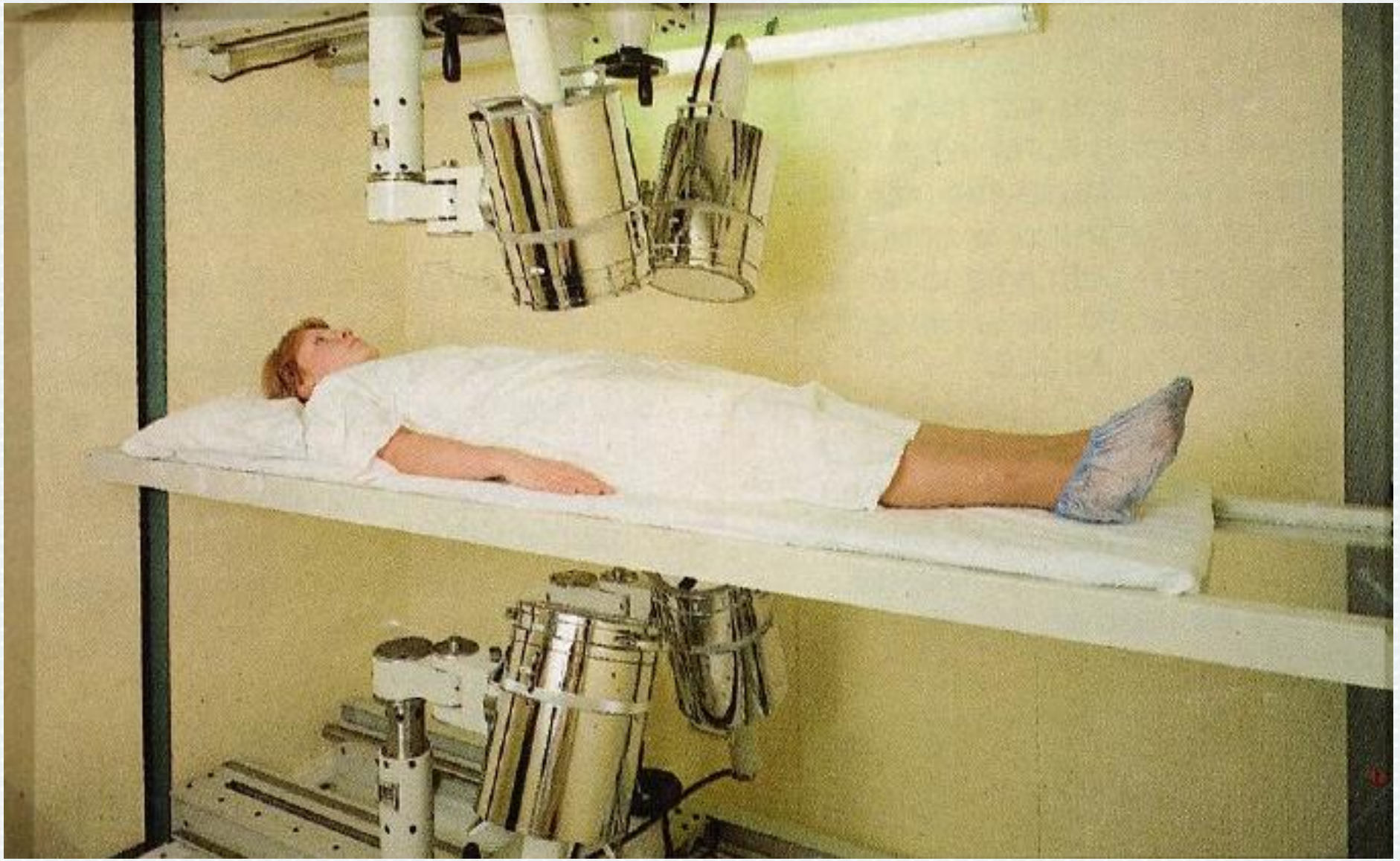
Zdroj: Malátová, DRO, 2018

cc BY NC SA


Retence ^{137}Cs u myslivců a lesníků
Retence (Bq)
8000
7000
6000
5000
4000
3000
2000
1000
0
1990
1995
2000
2005
2010
2015
2020
Retence z měření CTP, Šumava, Hartmanice
Retence z měření CTP, Jeseníky
Retence vypočtená z exkrece v moči, Šumava
Retence vypočtená z exkrece v moči, Jeseníky

cc BY NC SA

Celotělový počítač

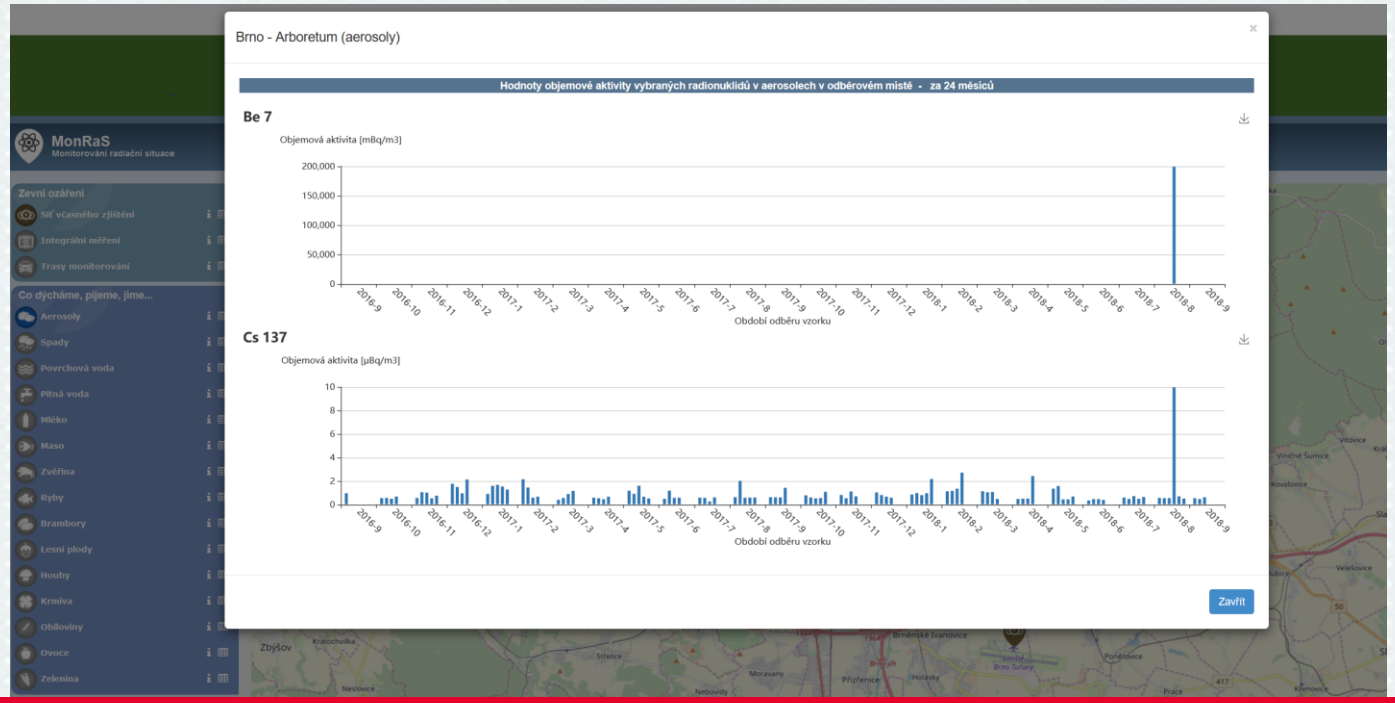


cc BY NC SA

MonRaS (MONitorování RAdiační Situace)

- Ukládání, zpracování a publikování dat Radiační monitorovací sítě
- Veřejně přístupné

https://www.sujb.cz/aplikace/monras/?lng=cs_CZ

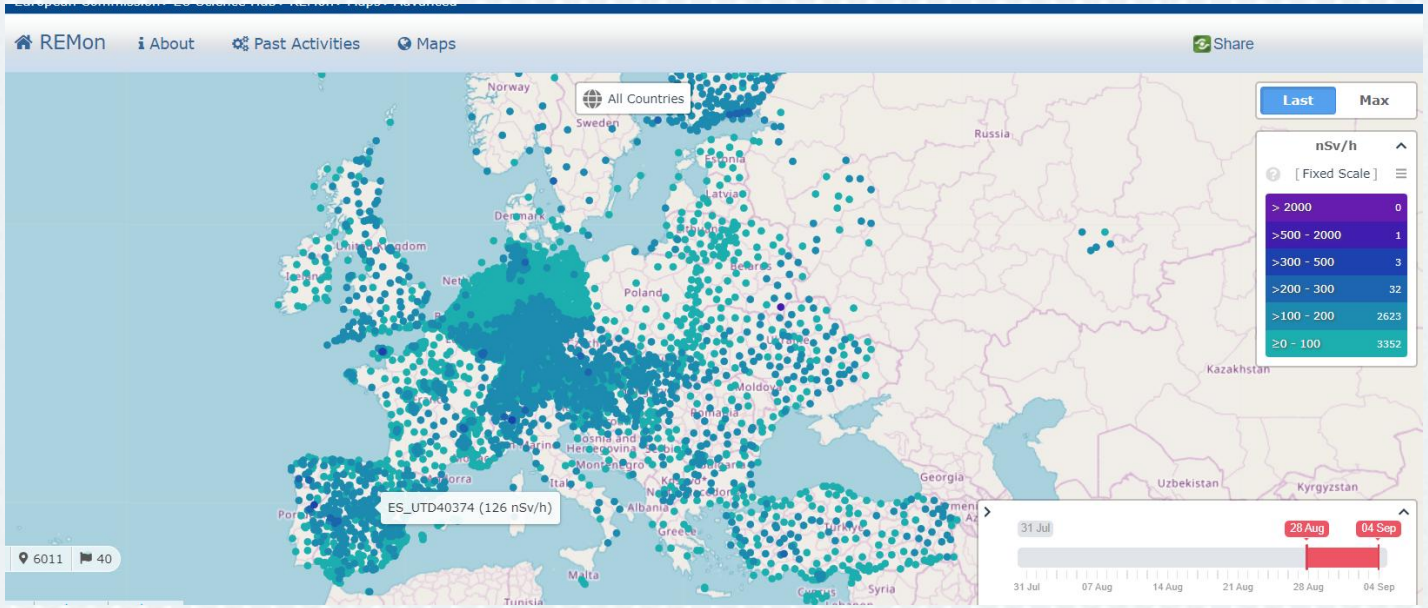


CC BY NC SA

EURDEP
(The EURopean Radiological Data Exchange Platform)

- Zveřejňování dat z radiačního monitorování v rámci Evropy a některých dalších míst světa

https://remap.jrc.ec.europa.eu



BY NC SA

Národní program monitorování

- Vydává SÚJB
- Stanovuje rozsah zajištění monitorování radiační situace a požadavky na předávání dat do datového střediska SÚJB
- Vydán1. ledna 2019, aktuálně platná verze od 1. 1. 2022
- Revize každých 5 let
- Aktuální znění: https://sujb.gov.cz/npm

cc BY NC SA

- Referenční úrovně – Záznamová → Vyšetřovací → Zásahová

Tabulka J_1: MÚ pro SVZ, teritoriální síť, monitorovaná položka; ovzduší

PPDE [mikroSv/h]					
PES			NES		
ZáznÚ	VÚ[2)]	ZÚ	VÚ	1. ZÚ[3)]	2. ZÚ[4)]
0,050	0,19 až 0,25	0,50	0,50	5	10

MÚ: monitorovací úrovně
PPDE/PFDE: příkon prostorového/fotonového dávkového ekvivalentu
SVZ: síť včasného zjištění
PES: plánovaná expoziční situace
NES: nehodová expoziční situace

BY NC SA

Tabulka J_5: MÚ pro síť odběrů vzorků potravního řetězce – PES

Monitorovaná položka	Jednotka	Vyšetřovací úroveň		Zásahová úroveň	
		^{137}Cs	^{90}Sr	^{137}Cs	^{90}Sr
Základní potraviny: maso (mimo zvěřinu), ryby, obiloviny, brambory, chléb, ovoce, zelenina, smíšená strava (podle spotřebního koše)	**Bq/kg**	3	1	30	10
Méně významné potraviny: zvěřina, houby, lesní plody	**Bq/kg**	600	10	6000	100
Mléko, mléčné výrobky; tekuté potraviny	**Bq/l**	3	1	30	10
Mléko - dětská výživa	**Bq/l**	0,50	0,3	5	3
Krmivo	**Bq/kg**	10	1	100	10

cc BY NC SA

Tabulka 9a: Hmotnostní a objemová aktivita ^{137}Cs ve vybraných monitorovaných položkách potravního řetězce v roce 2020 (dodavatel dat SÚRO)

Monitorovaná položka	Jednotka	Nejvyšší hodnota aktivity ^{137}Cs	Počet měření	
			Celkem	> NVA
mléko kravské – konzumní	Bq/l	0,046	18	14
mléko kravské – sušené	Bq/kg	0,781	14	11
maso hovězí	Bq/kg	0,804	4	4
maso vepřové	Bq/kg	0,107	4	4
maso drůbeží	Bq/kg	0,038	4	4
divočák	Bq/kg	1520	5	5
ryby	Bq/kg	0,776	9	4
mouka	Bq/kg	0,120	14	2
vločky ovesné	Bq/kg	0,262	14	3
zelí	Bq/kg	0,033	7	2
rajčata	Bq/kg	0,020	7	1
cibule	Bq/kg	0,007	7	1
mrkev	Bq/kg	0,267	7	3
jablka	Bq/kg	0,026	15	3
lesní plody	Bq/kg	6,37	9	6
houby	Bq/kg	302,0	25	22
obilí	Bq/kg	0,134	46	15
brambory	Bq/kg	0,044	14	3

ZDROJ: Výroční zpráva SÚJB 2020

cc BY NC SA

Monitorování radiační situace v JEDU a JETE a jejich okolí

Systém monitorování:

1. Měření v elektrárně
2. Výpusti do ovzduší a vodotečí
3. Monitorování okolí JE
4. Radiační zátěž obyvatelstva

CC BY NC SA

Ad 1. Měření v elektrárně – I

- Měření aktivity v chladivu v primárním a sekundárním okruhu a ve vzduchotechnických systémech – nárůst by ukazoval na únik ŠP z palivových článků, případně únik chladiva
- Osobní dozimetrie – ochrana personálu, kontrola pracovních podmínek, ukazatel kvality bezpečnosti provozu
- Nejrizikovější činnosti – výměna paliva, generální opravy na primárním okruhu

CC BY NC SA

Ad 1. Měření v elektrárně – II

- **Kolektivní efektivní dávka** – jeden z indikátorů spolehlivého a bezpečného provozu JE
  - – průměr efektivní dávky (E) na blok
  - – JETE mezi 5 nejlepšími na světě (podle WANO aj.)
- JETE: max. roční E u zaměstnance = 3,17 mSv
  dodavatele = 9,51 mSv
  (2007–2010, limit 20 mSv)
  - – Vnitřní kontaminace – ani jednou nepřekročena záznamová úroveň → čistota provozu, chování lidí

(WANO = World Association of Nuclear Operators)

cc BY NC SA

Dosimetrické sledování pracovníků českých jaderných elektráren (2007)

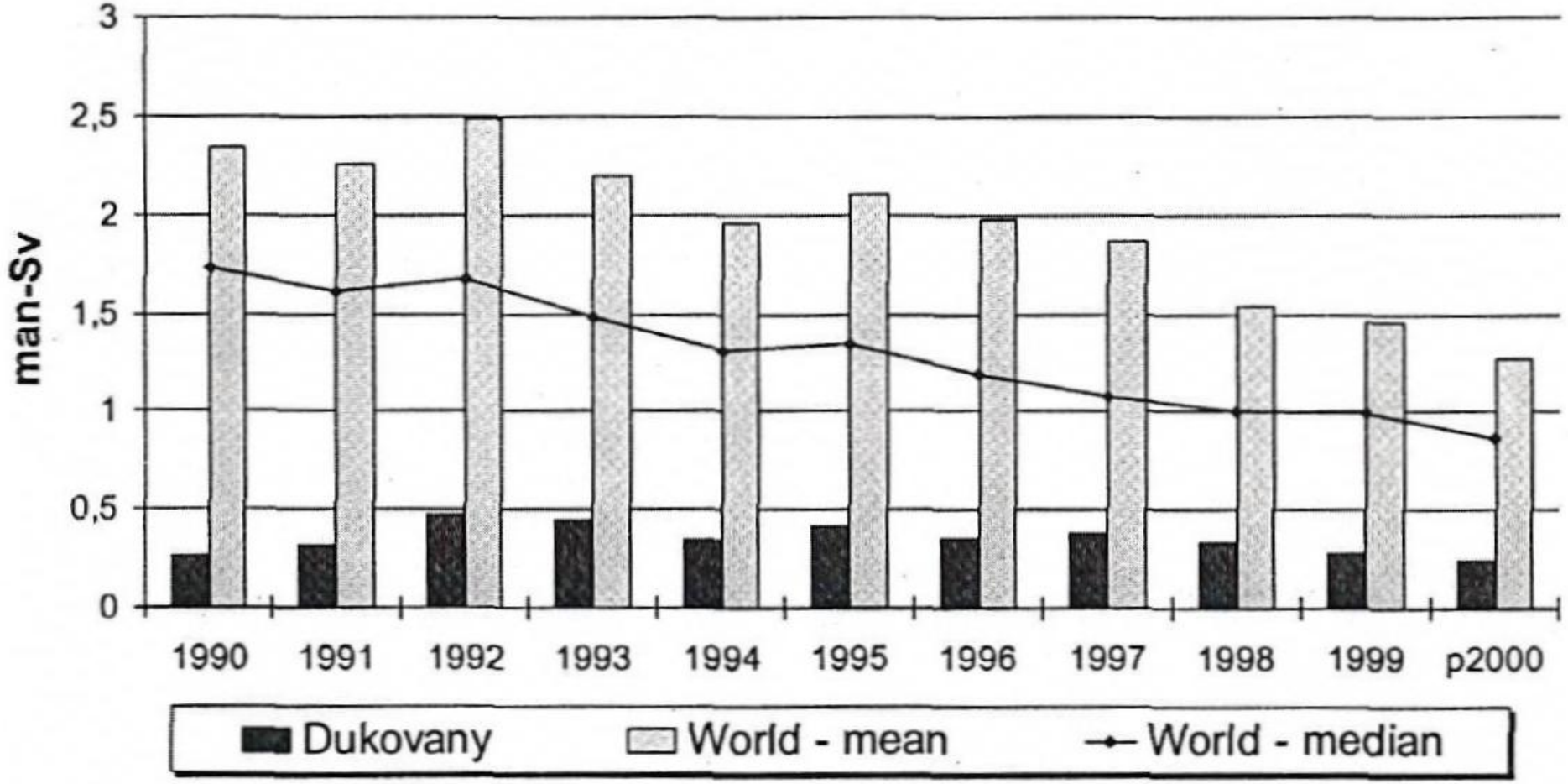
	Dukovany	Temelín
kmenoví pracovníci	572	503
dodavatelské organizace	1229	1018
celkem	1801	1521
průměrná osobní E (mSv)	0,52	0,30
nejvyšší osobní E (mSv)	8,65*	6,38*

*u pracovníka dodavatelské organizace

BY NC SA

WANO Performance Indicators

Collective Radiation Exposure per Unit



BY NC SA

Ad 2. Výpusti do ovzduší a vodotečí – I

- Interní (ČEZ) a institucionální kontrola (Síť odběru vzorků životního prostředí)
- **Autorizované limity výpustí** – stanovuje SÚJB
  - roční E z vnějšího ozáření (mrak, spad) a vnitřního ozáření (inhalace, ingesce) pro jednotlivce z kritické skup. obyvatel (mezikruží 3–5 km od JE)
  - Výpusti do ovzduší = 40 μSv (JEDU i JETE)
  - Výpusti do vodotečí = 6 μSv (JEDU), 3 μSv (JETE)
- **Plynné výpusti:** ^{85}Kr, ^{133}Xe, ^{131}I, ^{3}H, ^{14}C, + ^{137}Cs, ^{90}Sr, ^{60}Co
- **Kapalné výpusti:** ^{3}H, ^{137}Cs, ^{90}Sr, ^{60}Co, ^{110m}Ag

cc BY NC SA

Ad 2. Výpusti do ovzduší a vodotečí – II

- Dodržení limitů se prokazuje výpočtovými programy (modely) – schválení SÚJB, skutečné aktivity RN, reálné meteorologické a hydrologické podmínky
- Modely jsou konzervativní – předpoklad, že všichni pijí vodu ze studní + potraviny z místních zdrojů …

Celkové výpusti z jaderných elektráren Dukovany a Temelín – procenta autorizovaných limitů

	2003		2004		2005	
	plynné	kapalné	plynné	kapalné	plynné	kapalné
Dukovany	1,3	34	0,43	32,78	0,42*	30,7
Temelín	2,3	63	1,99	46,2	2,02	42,6

BY NC SA

Ad 3. Monitorování okolí JE – I

- **Monitorované veličiny:**
  - Příkon ekvivalentní dávky z gama záření
  - Aktivita ^{137}Cs, ^{90}Sr a ^{3}H v aerosolech, spadech, složkách ŽP a poživatinách
- Viz lokální sítě v rámci RMS
- Monitorování se zahajuje 1–2 roky před uvedením do provozu
  – Ověření programu monitorování
  + získání údajů o původním stavu okolí pro srovnání v době provozu

cc BY NC SA

Příkon ekvivalentní dávky z gama záření

Průměrné hodnoty příkonu fotonové dávky (nSv/hod) v okolí jaderných elektráren v r. 2005

okolí JE Temelín		okolí JE Dukovany	
lokalita	nSv/hod	lokalita	nSv/hod
Dívčice	134	Dukovany	107
Mydlovary	142	Mohelno	110
Protivín	143	Mor. Krumlov	117
Týn n. Vltavou	122	Náměšť n. Oslavou	120
Vodňany	133	Rosice	122
Zliv	135	Vladislav	154

cc BY NC SA

Aktivita ^{137}Cs, ^{90}Sr a ^{3}H v aerosolech, spadech, složkách ŽP a poživatinách

- Objemová, plošná nebo hmotnostní aktivita
  → Zpráva o radiační situaci na území ČR (SÚJB)

– Nikdy nedošlo k významnému úniku RN do ŽP

– Na žádném měřícím místě nebylo zaznamenáno překročení zásahových úrovní, které by vyžadovalo opatření na ochranu obyvatel či ŽP

– Nebyly nalezeny rozdíly mezi obsahem RN ve složkách ŽP a potravinách v okolí JEDU či JETE a na ostatním území státu

CC BY NC SA

Tabulka 23: Přehled monitorovaných položek životního prostředí a potravního řetězce v okolí JE Temelín v roce 2020

Monitorovaná položka	Jednotka	Nejvyšší hodnota aktivity	Počet měření	
			Celkem	> NVA
^{137}Cs				
aerosoly [1)]	Bq/m^3	$< 6,0 \times 10^{-6}$	52	0
spady	Bq/m^2	< 0,347	24	0
půda	Bq/kg	28,5	4	4
půda - in situ	Bq/m^2	918	24	24
sedimenty	Bq/kg	7,80	2	2
voda pitná	Bq/l	< 0,018	4	0
voda povrchová	Bq/l	< 0,019	21	0
voda podzemní – vrty	Bq/l	< 0,019	31	0
mléko kravské – surové	Bq/l	< 0,144	26	0
lesní plody	Bq/kg	0,920	1	1
ovoce	Bq/kg	< 0,098	1	0
zemědělské plodiny	Bq/kg	0,410	5	1
ryby	Bq/kg	< 0,090	2	0

ZDROJ: Výroční zpráva SÚJB 2020

BY NC SA

Stanovení ^{137}Cs

^{137}Cs ($T_{1/2}$ = 30,17 r; β^-, $E_{\beta max}$ = 1,17 MeV)

^{134}Cs ($T_{1/2}$ = 2,06 r; β^-, $E_{\beta max}$ = 0,658 MeV)

- ^{137}Cs – jediný RN důležitý z dlouhodobého hlediska
- ^{134}Cs – „čerstvé“ Cs – po nehodách a haváriích
- A(Cs) v kapalných výpustích JE je velmi nízká – čištění;
  u plynných výpustí bezvýznamná – odstraňování aerosolů
- Monitorováno kvůli havárii Černobylu

cc BY NC SA

- **Kritický orgán** – svalová tkáň (80 %)
- T_{ef} = 19±8 dní (děti); 105±25 dní (dospělí)
- **Kritická skupina** – Laponci – 50x vyšší obsah ^{137}Cs kvůli koncentrování ^{137}Cs v lišejnících

- ^{137}Cs je jediný RN/ŠP pozůstávající z havárie v Černobylu, proto:
  1. **Monitorování vnitřní kontaminace (SÚRO)**
  2. **Limity kontaminace krmiva pro případ jaderné nehody**

cc BY NC SA

- **Stanovení Cs:**
  - Zkoncentrování srážením nebo srážecí chromatografií pomocí zeolitů, $Fe(CN_6)^{4-}$ nebo heteropolywolframanů
    → rozpuštění/eluce
    → gama-spektrometrie ^{137}Cs i ^{134}Cs
  - U ^{137}Cs je nutno čekat na ustanovení rovnováhy se ^{137m}Ba (cca 30 min.)

40

CC BY NC SA

Stanovení ^{90}Sr

^{90}Sr ($T_{1/2}$ = 28,8 r; β^-, $E_{\beta max}$ = 0,546 MeV)

^{89}Sr ($T_{1/2}$ = 50,6 d; β^-, $E_{\beta max}$ = 1,501 MeV)

- **Monitorování:**
  - Velmi nízké aktivity → nutné zkoncentrování
  - Nejspolehlivější metoda: izolace $Sr(NO_3)_2$ z koncentrované HNO_3
  - Moderní metoda: extrakční chromatografie – crown ether
  - Měření: kapalinová scintilační spektrometrie (+ Čerenkovovo záření)
  - U ^{90}Sr je možné čekat na ustanovení rovnováhy s ^{90}Y (cca 27 dní) → extrakce Y do tributylfosfátu (TBP) → měření ^{90}Y

41

CC BY NC SA

Radiochemické stanovení ^{90}Sr v biologických vzorcích

vzorek + HNO_3 + Sr^{2+}(nosič) + $^{85}Sr^{2+}$(indikátor výtěžku) + Y^{3+}(zadržující nosič)

↓ (filtrace) bílkoviny

roztok $^{90+85}Sr^{2+}$ + Y^{3+}

↓ + HPO_4^{2-}

sraženina fosforečnanů Sr a Y

↓ + dýmavá HNO_3

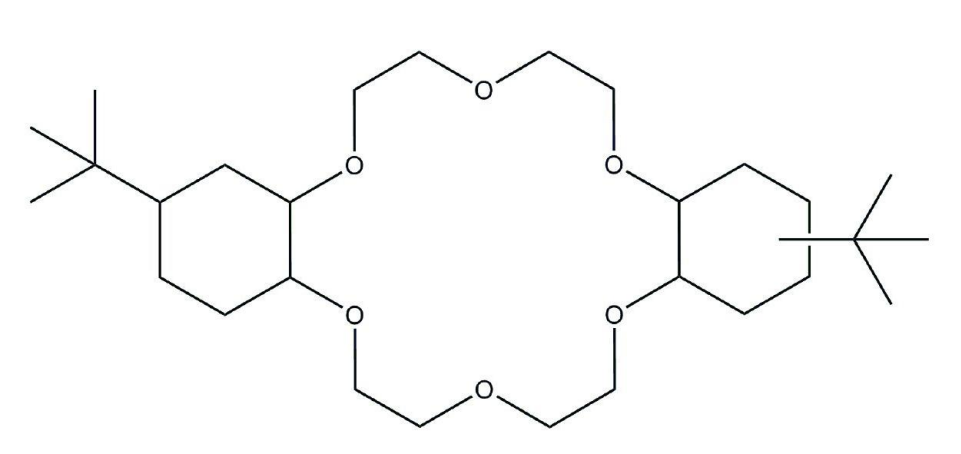
nerozpustný $^{90+85}Sr(NO_3)_2$

↓

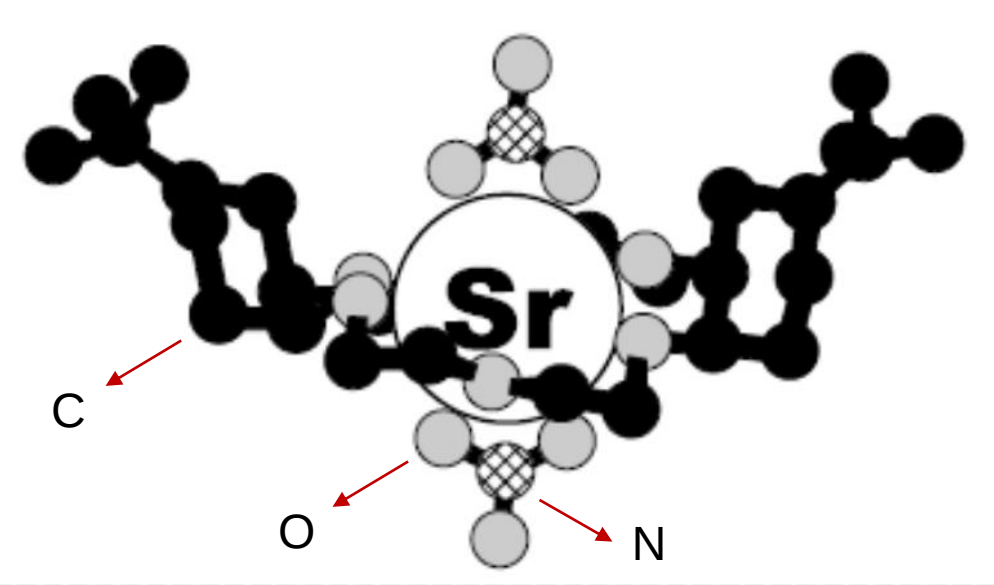
měření kapalnou scintilací

BY NC SA

Sr Resin (Eichrom, Triskem)
Crown ether
4,4’(5’)-di-t-butylcyclohexano-18-crown-6



$Sr(NO_3)_2(DtBuCH18C6)$



43

BY NC SA

Stanovení ^{14}C

- $T_{1/2}$ = 5730 r; β^-, $E_{\beta max}$ = 0,158 MeV
- **Monitorování:**
  - V blízkém okolí JE a ve vzdálenějších místech pro srovnání s kosmogenním původem (mimo zdroje spalování fosilních paliv)
- **Měření:**
  - **Rostlinný materiál** – měřená forma $^{14}C_6H_6$ – LSC
  - Spálit v O_2 → záchyt $^{14}CO_2$ (vymražení $N_{2(l)}$) → reakce s Li (800 °C) → Li_2C_2 s H_2O → $H_2{}^{14}C_2$ → $^{14}C_6H_6$ (katal. Cr_2O_3)
  - **Vzduch:** odběr do tlakových lahví → selektivní absorpce $^{14}CO_2$ v aminech (odstranění Kr, N_2) → LSC

cc BY NC SA

Stanovení ^{3}H

- $T_{1/2}$ = 12,3 r; β^-, $E_{\beta max}$ = 0,015 MeV
- **Monitorování:**
  - **Vzduch** v blízkosti JE – průtokový scintilační detektor
  - **Voda** – zkoncentrování elektrolýzou – THO se elektrolyzuje obtížněji, vzorek 1 500 ml → 20 ml, nízká proudová hustota, výtěžek ~80 % → 10 ml se destiluje pro LSC
  - **Biologický materiál** – spálení → THO → LSC

CC BY NC SA

Magisterský studijní program JADERNÁ ENERGETIKA vznikl za přispění

Financováno Evropskou unií
NextGenerationEU

NÁRODNÍ PLÁN OBNOVY

MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ, MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

NPO_VUT_MSMT-16609_2022

CC BY NC SA

VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ
V BRNĚ

Financováno Evropskou unií
NextGenerationEU

NÁRODNÍ PLÁN OBNOVY

MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ, MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FAKULTA CHEMICKÁ

FAKULTA STAVEBNÍ

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

Přednáška magisterského studijního programu JADERNÁ ENERGETIKA

Radioekologie a úvod do jaderných technologií

Ekologické aspekty palivového cyklu I
– těžba a zpracování uranové rudy – haldy, čištění vod, uvolňování do životního prostředí

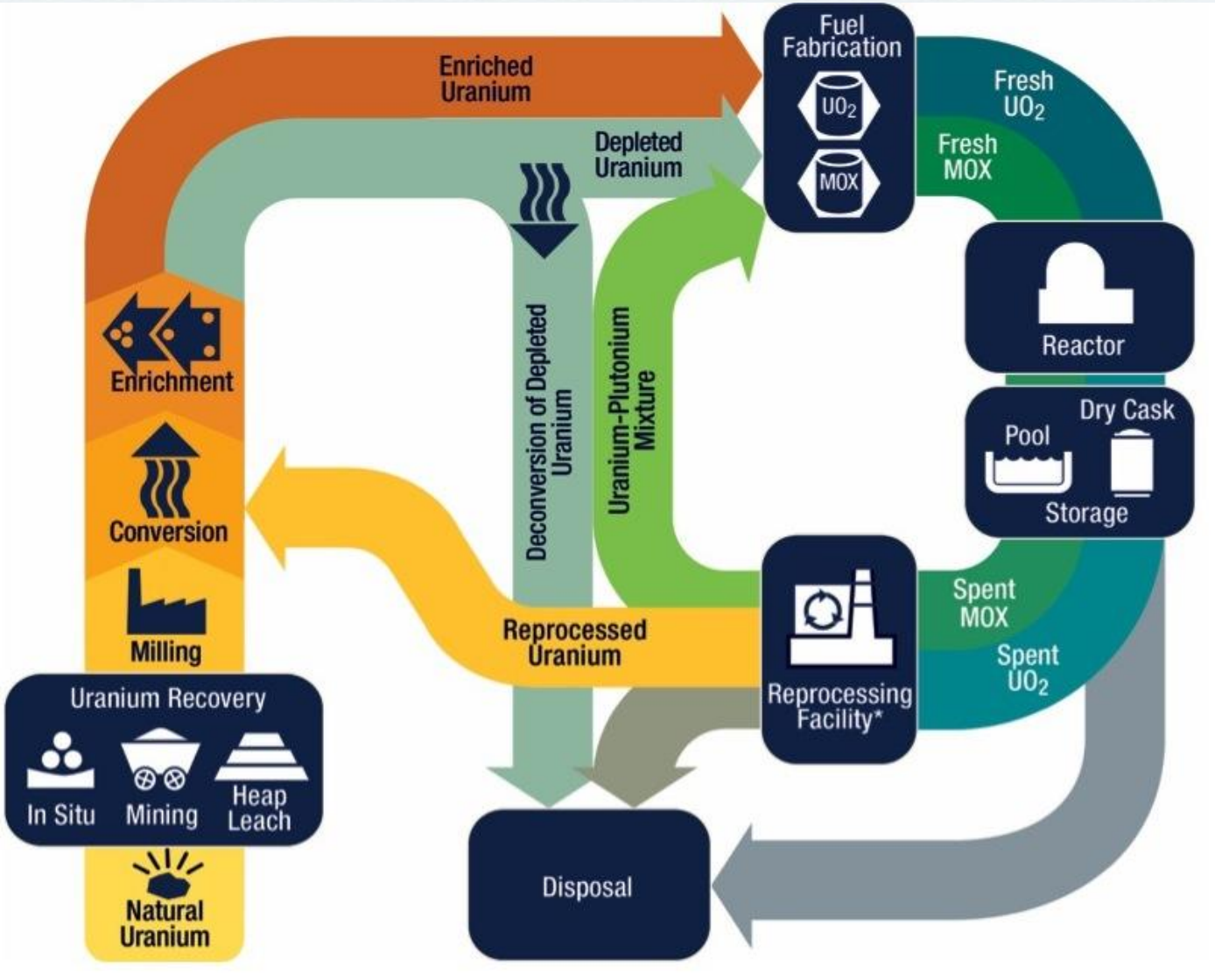
Fakulta chemická

Ota Fišera

2024

CC BY NC SA

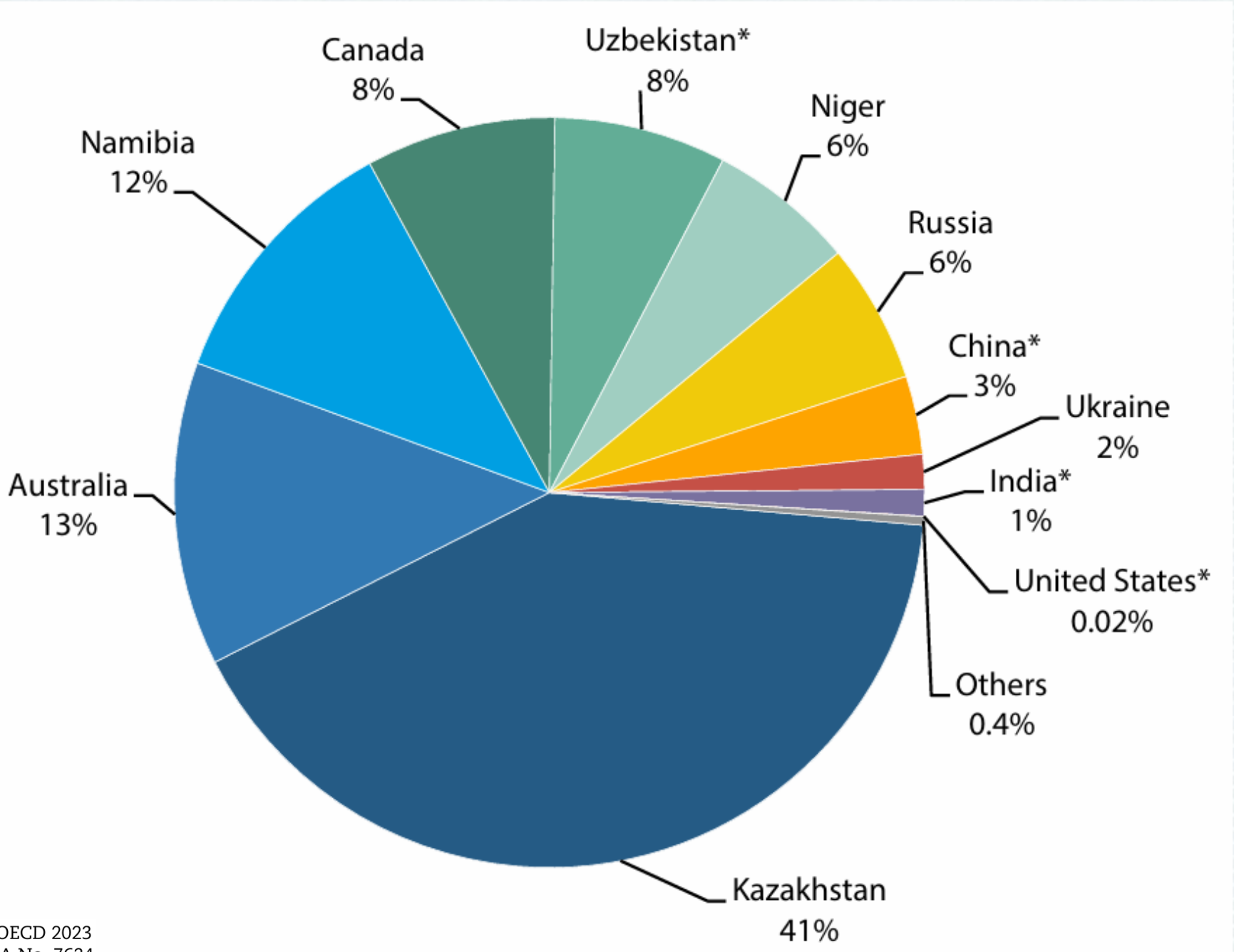
Schéma palivového cyklu



Zdroj: wikipedia.org

CC BY NC SA

Produkce U v roce 2020



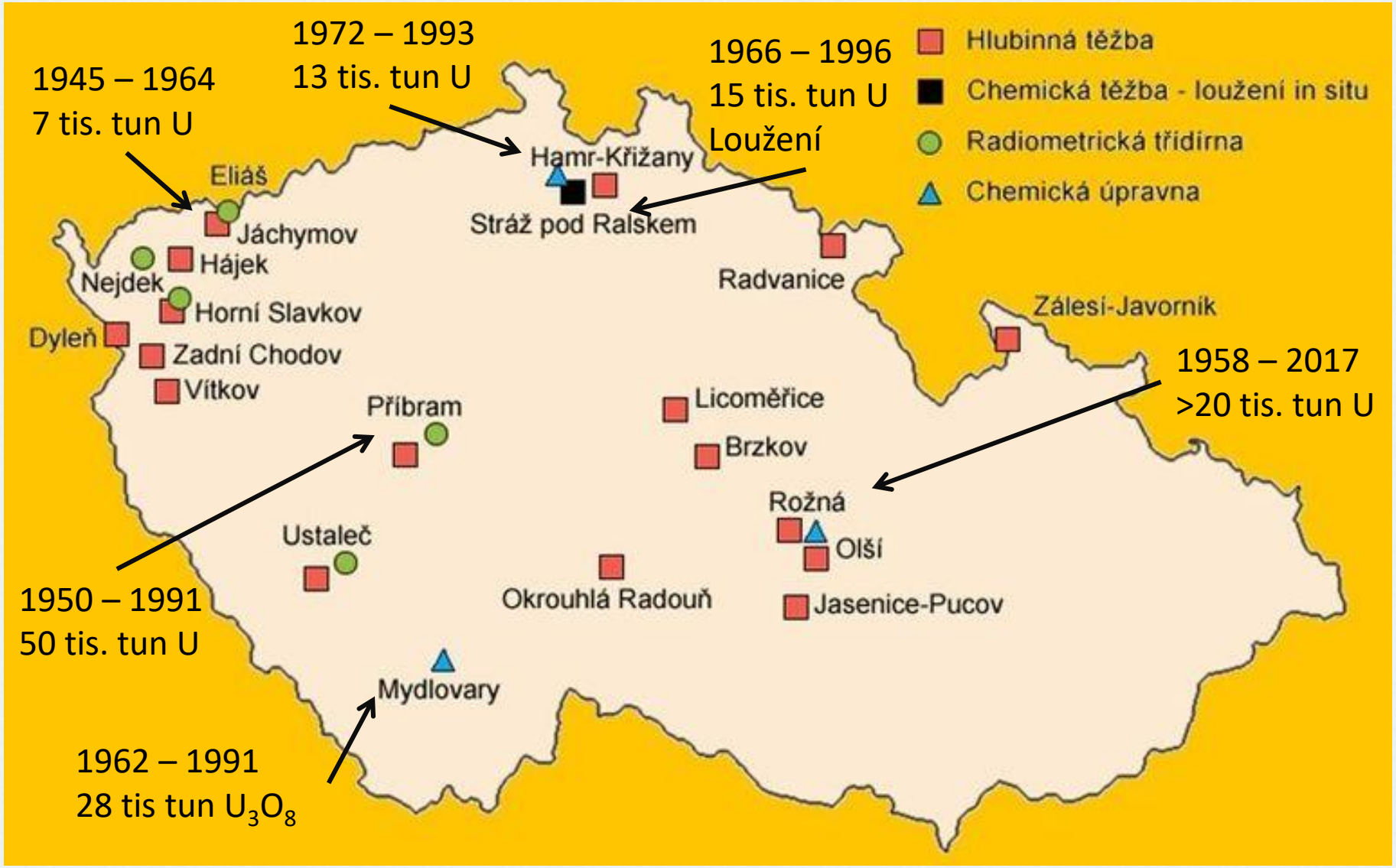
© OECD 2023
NEA No. 7634

CC BY NC SA

Způsob těžby uranu v roce 2016

Způsob těžby	Podíl [%]
Loužení in situ	50 %
Hlubinné a povrchové doly	46 %
Vedlejší produkt	4 %

cc BY NC SA



Zdroj: http://energetika.tzb-info.cz

BY NC SA

Hlubinná těžba uranu

- Poslední hlubinný důl (Rožná) v ČR i ve střední Evropě byl uzavřen 27. 4. 2017
- Uranonosné žíly mocné několik metrů, místy 25–30 m, délka 10–15 km
- Těžba v hloubce 1000–1200 m
- **Ruda:** ruly – hydrotermální původ U (Rožná, Jáchymov, Příbram)
  pískovce (Hamr)
  Au-U konglomeráty aj.

BY NC SA

Minerály

- uraninit UO_2
- coffinit $U[SiO_4,(OH)_4]$
- autinit/torbenit $Ca/Cu(UO_2)_2(PO_4)_2 \cdot 10\text{-}12\ H_2O$
- carnotit/ťujamunit $K/Ca(UO_2)_2(VO_4)_2 \cdot 3\text{-}8\ H_2O$
- zrna v základní hornině

Obsah U v rudě

- 1997–2004
  0,22–0,28 % U (2 kg U/t rudy)
- 2010 – 0,17 %
  vytěženo 184 375 t rudy
  (850 vozů denně)
- 2012 – 0,15 %
  vytěženo 140 000 t rudy

cc BY NC SA

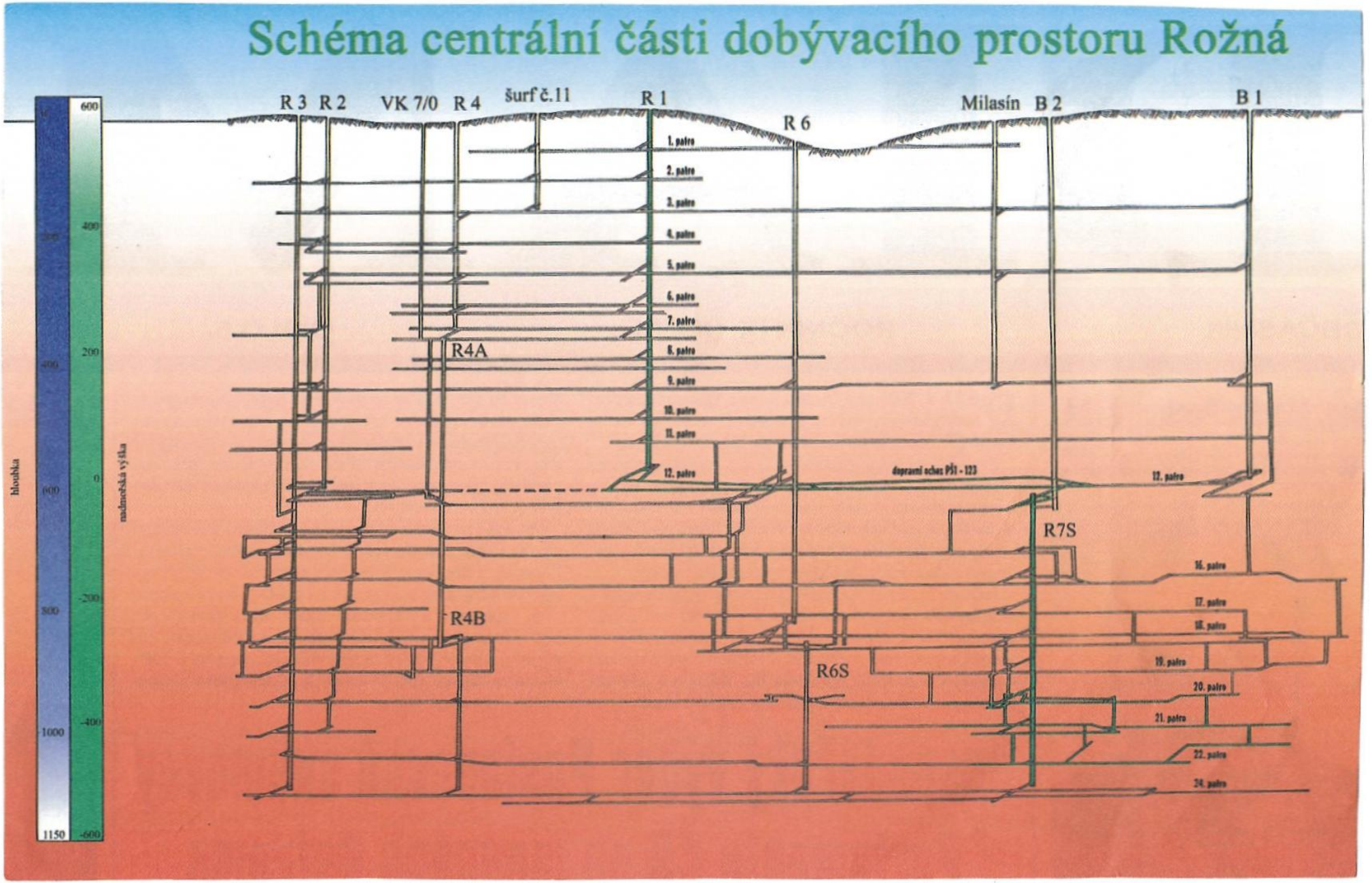


Schéma centrální části dobývacího prostoru Rožná
R 3
R 2
VK 7/0
R 4
šurf č.11
R 1
R 6
Milasín
B 2
B 1
R4A
R4B
R6S
R7S
1. patro
2. patro
3. patro
4. patro
5. patro
6. patro
7. patro
8. patro
9. patro
10. patro
11. patro
12. patro
dopravní ochoz PŠ1 - 123
16. patro
17. patro
18. patro
19. patro
20. patro
21. patro
22. patro
24. patro
hloubka
nadmořská výška
600
400
200
0
-200
-400
-600
1150

CC BY NC SA

BY NC SA

Ochrana horníků

- **Větrání** – pokles potenciální E(α) 10x
  – čerstvý vzduch se přivádí několika jámami, celkem 220 m^3/s
- **Kropení** rozpojené rudy
  – snížení konc. pevných částic ve vzduchu
- **Dozimetrie:** horníci – kategorie pracovníků se zdroji IZ
  - limit 50 mSv/rok (100 mSv/5 let)
  - max. 2100 směn (omezení ministerstva zdravotnictví)
  - měsíční limity dolu – při překročení přeložení na pracoviště s menší intenzitou

cc BY NC SA

Radiační ochrana horníků – Dolní Rožínka

Rok	Počet horníků	Roční E (mSv) Průměrná	MAX.
2012	442	7,9	**26,9**
2011	450	7,5	**25,6**
2010	450	7,7	**29,4**
2009	438	7,2	**28,7**
2008	421	8,03	**34,8**
Limit		**50**	

cc BY NC SA

Vliv hlubinné těžby na ŽP

- **Hlušina** – vyváží se na povrch → haldy
  - Částečné využití – zavážka, naplňování vytěžených prostor proti propadům
  - Obsahuje víc RN než půda, na které se skladuje ≤ 1 mg U/g; ≤ 25 Bq ^{226}Ra/g
  - Může překračovat hodnoty povolené pro uvádění RN do ŽP (A_m/uvol. úr. ≤ 1, pro ^{226}Ra = 0,3 Bq/g; vyhl. 499/2016)

CC BY NC SA

Vliv hald hlušiny na ŽP:

- Rozprašování – eroze, vítr
- Emanace Rn, zvýšený obsah Rn ve vzduchu
- Emise Rn z hlušiny je trvalá
  $^{234}U \rightarrow {}^{230}Th$, $T_{1/2} = 7{,}7 \cdot 10^4$ r $\rightarrow$ Ra, Rn
- Zvýšení obsahu U, Ra ve vodotečích – vyluhování srážkovou vodou – intenzivnější za přítomnosti pyritu – oxidace hlušiny $\rightarrow Fe^{3+}$ a H_2SO_4

$$4\ FeS_2 + 15\ O_2 + 2\ H_2O \rightarrow 2\ Fe_2(SO_4)_3 + 2\ H_2SO_4$$

cc BY NC SA

- Vliv na vyluhování U podle valence v hlušině

  $U^{4+}O_2(s) + 2\ Fe^{3+} \rightarrow\ U^{6+}O_2^{2+}(aq.) + 2\ Fe^{2+}$

  $U^{6+}O_3(s) + 2\ H^+ + 3\ SO_4^{2-} \rightarrow UO_2(SO_4)_3^{4-} + H_2O$

- Oxidace pyritu se zvyšuje v přítomnosti bakterií
  thiobacillus ferrooxidans (oxiduje Fe^{2+})
  t. thiooxidans (oxiduje S)
- Rostou i při pH = 0,5 a využívají CO_2 jako jediný zdroj C

cc BY NC SA

Nápravná opatření

- Stabilizace proti zhroucení/sesuvu a proti erozi vodou
- Proti úniku Rn – **povrchová bariéra** – vrstvy jílu, štěrku, písku
  + fólie + půda + zalesnění
  = **rekultivace**
- Rekultivace odkaliště III. MAPE Mydlovary: vrstvy v tomto pořadí – popílek, pneumatiky, komunální odpad, jíl a kompost
  → zatravnění
  + monitorovací vrty pro kontrolu kvality vody

cc BY NC SA

Rekultivovaný odval Drahonín uranového dolu Olší

Zdroj: DIAMO, s. p.

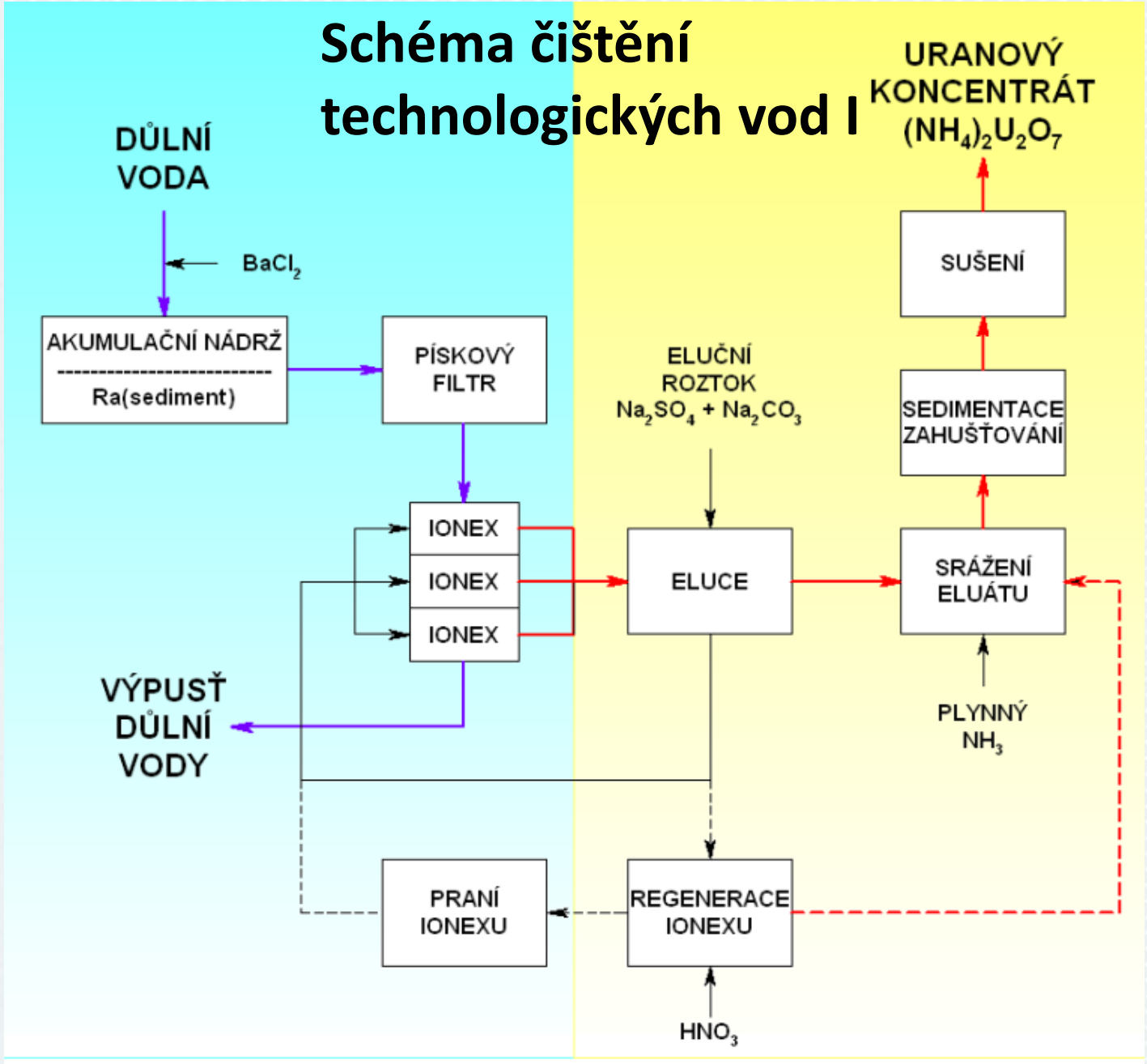
cc BY NC SA

Čištění vod (průsakové, důlní)

- Regulace toku, sběr a čištění srážkové (průsakové) vody
- Odstranění U, Ra, Fe aj. kovů
- Metody:
  srážení, ionexy, odpařování, reversní osmóza, elektrodialýza
- Vypouštění vyčištěných vod:
  zákon č. 150/2010 Sb. o vodách
  NV 401/2015 Sb.
  – povolené limity pro GEAM – 0,3 mg U/l, 400 mBq ^{226}Ra/l

CC BY NC SA

Schéma čištění technologických vod I

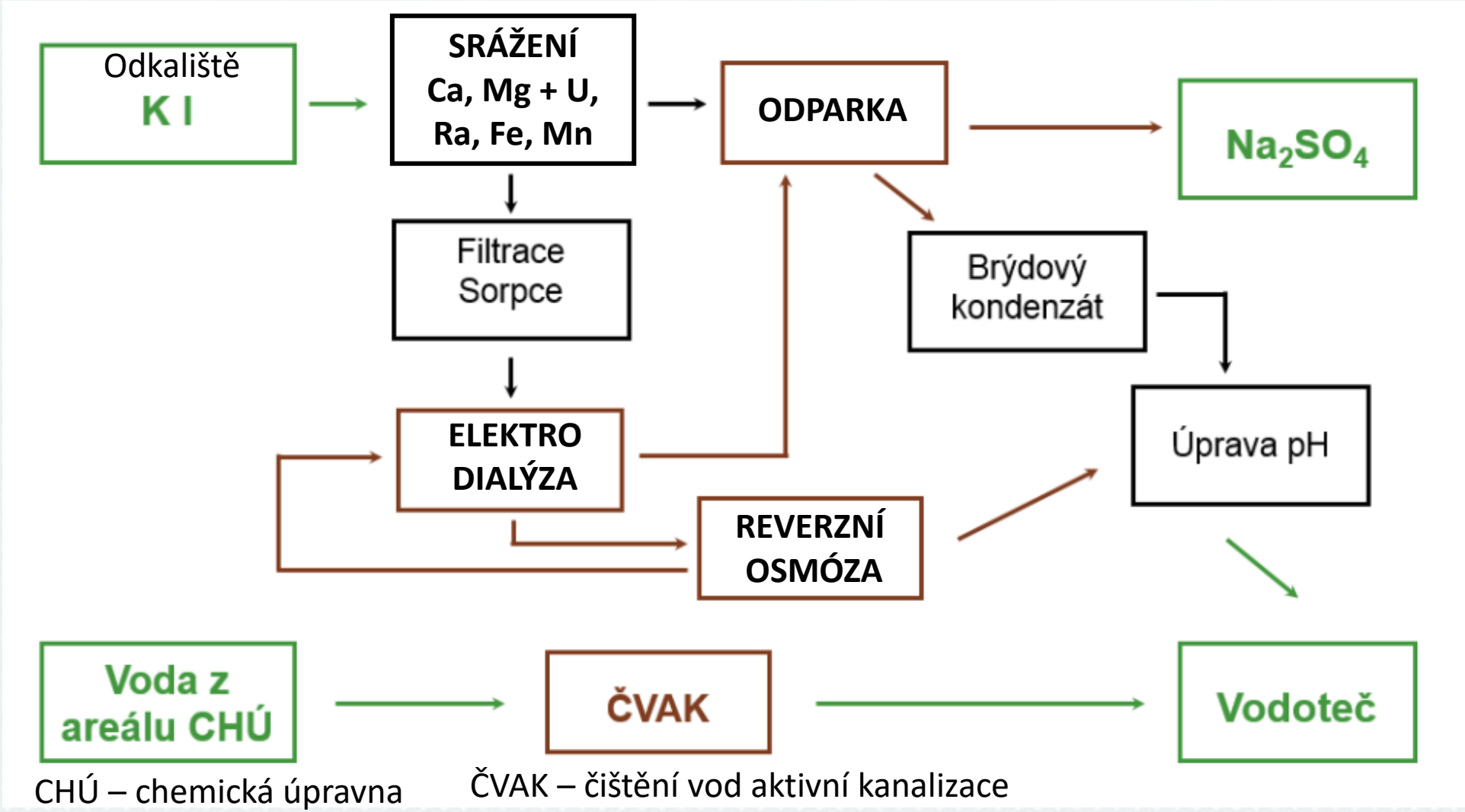


Zdroj: Michálek, Acta Montanistica Slovaca. 2007

cc BY NC SA

Schéma čištění technologických vod II

(Nevýznamný obsah U - do 0,5 mg/l)



CHÚ – chemická úpravna

ČVAK – čištění vod aktivní kanalizace

Zdroj: DIAMO

BY NC SA

Složení důlní vody z dolu Olší

	před zatopením dolu	po zatopení
rozpustné látky (mg/l)	–	3090
SO_4^{2-} (mg/l)	126 – 1388	1625
^{226}Ra (mBq/l)	0 – 1150	1990
nerozpustné látky (mg/l)	–	7,3
pH	6,5 – 6,9	7,3
U (mg/l)	0 – 4,5	11,2
Fe (mg/l)	0,2 – 4,8	30,2
Mn (mg/l)	–	5,6

Obsah uranu a radia ve vodách v okolí podniku GEAM, Dolní Rožínka

	U (mg/*l*)	Ra (mBq/*l*)
limity pro vypouštění do vodotečí	0,2	200
povrchové vody v širším okolí závodu	0,002 - 0,02	20 - 28
podzemní vody (studny v okolí úpravny a ložisek)	0,002*	≤ 20*

*na úrovni detekčních limitů

CC BY NC SA

Dekontaminační stanice Příbram

cc BY NC SA

Kontaminovaná půda

- Přírodní dekontaminace působením srážek
  + vertikální migrace + příjem rostlinami }– velmi pomalé
- Chemická dekontaminace – nepoužitelná
  – cena, malá účinnost
- Mezinárodní limity nejsou stanoveny
  → každá země řeší individuálně
- Reálné postupy
  - Odstranění a náhrada horní vrstvy – odstraněná zamořená půd → zavážka do opuštěných dolů, odkaliště nebo zvláštní místo
  - Překrytí nezamořenou půdou
  - Hluboká orba

BY NC SA

Těžba podzemním loužením

- Vhodné pro podzemní ložiska uranonosných pískovců
- Loužicí roztok: H_2SO_4 + HNO_3 + HF
- Roztok se vtlačí do U vrstvy
  → nechá se působit 2–20 let
  → výluh se čerpá – výtěžek 60–80 %
- Uran se izoluje na ionexech
- Loužicí roztok se regeneruje a znovu použije

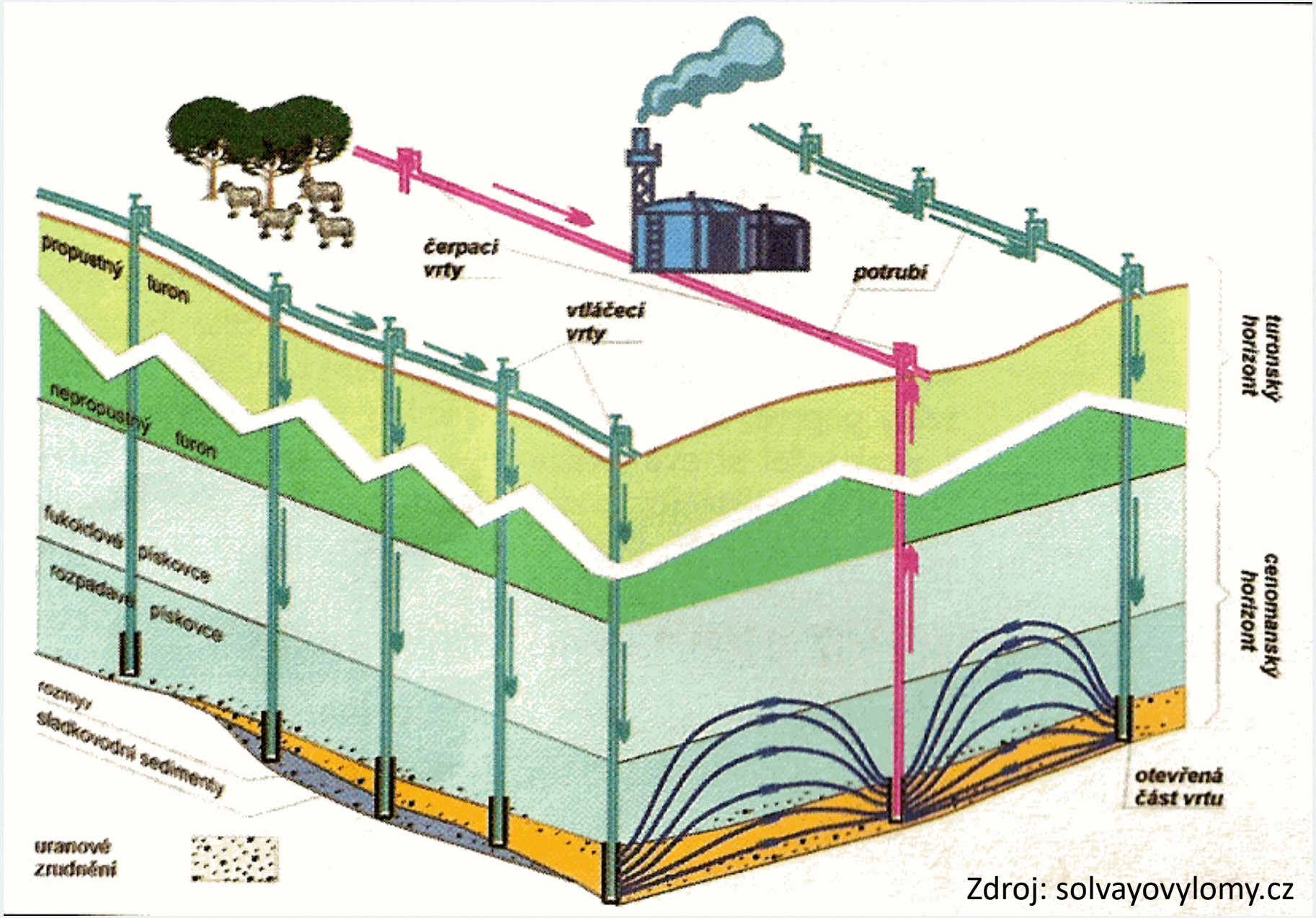
cc BY NC SA

- V ČR – Stráž pod Ralskem
- těžba loužením od r. 1967, ukončeno 1996,
  → přechod do sanačního režimu
  (kamenec + U jako vedlejší produkt)
- 2 210 průzkumných a 7 684 těžebních vrtů
- Vytěženo 15 562 t U (prachovito-písčité sedimenty 200 m pod povrchem)
  + 11 700 t U hlubinnou těžbou

cc BY NC SA

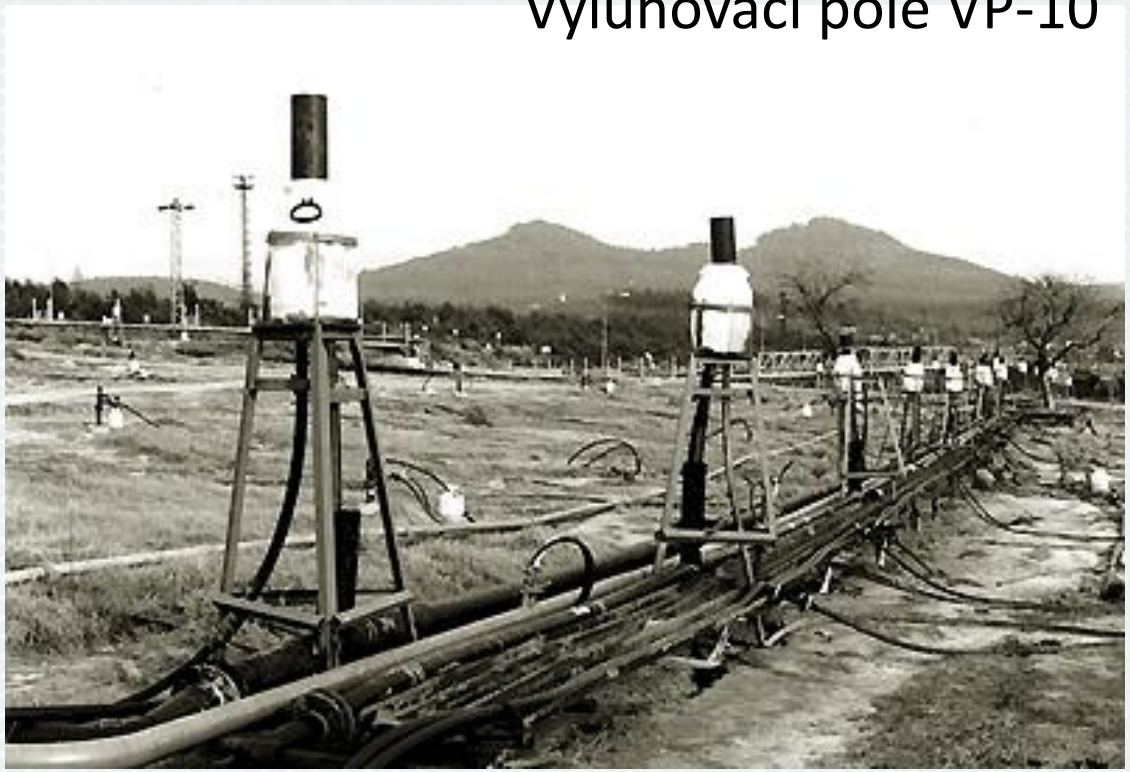
Chemická úpravna
Důl chemické těžby
STRÁŽ pod Ralskem
Nový Luhov
Noviny pod Ralskem
Hamr na Jezeře
Útěchovice
Pod Špičákem
Děvín, Ostrý a Schachtstein
Stohanek
Vranovské skály
Vranov
Srní Potok
Ralsko
Malý Jelení vrch
Velký Jelení vrch
Černá Novina
Divadlo
Široký kámen
VP-1
VP-2
VP-3
VP-4
VP-5
VP-6

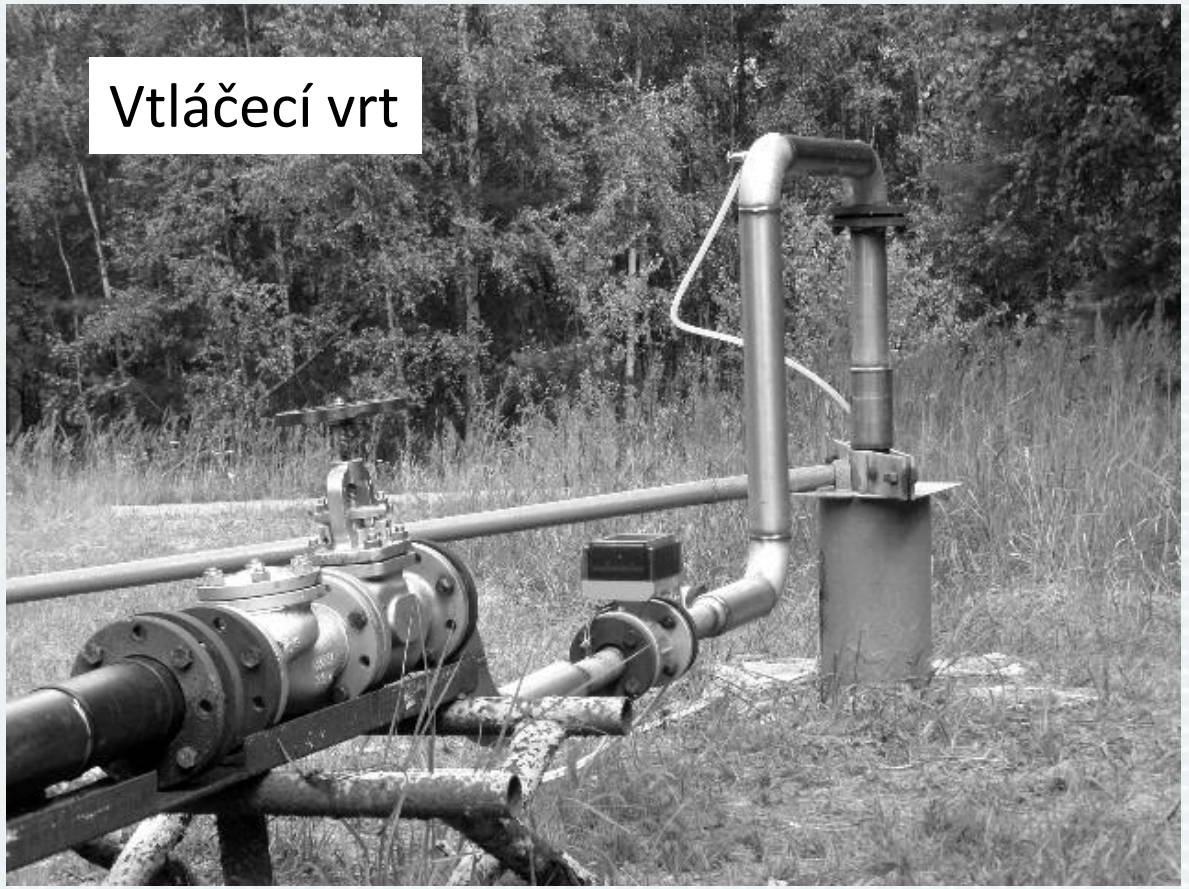
BY NC SA



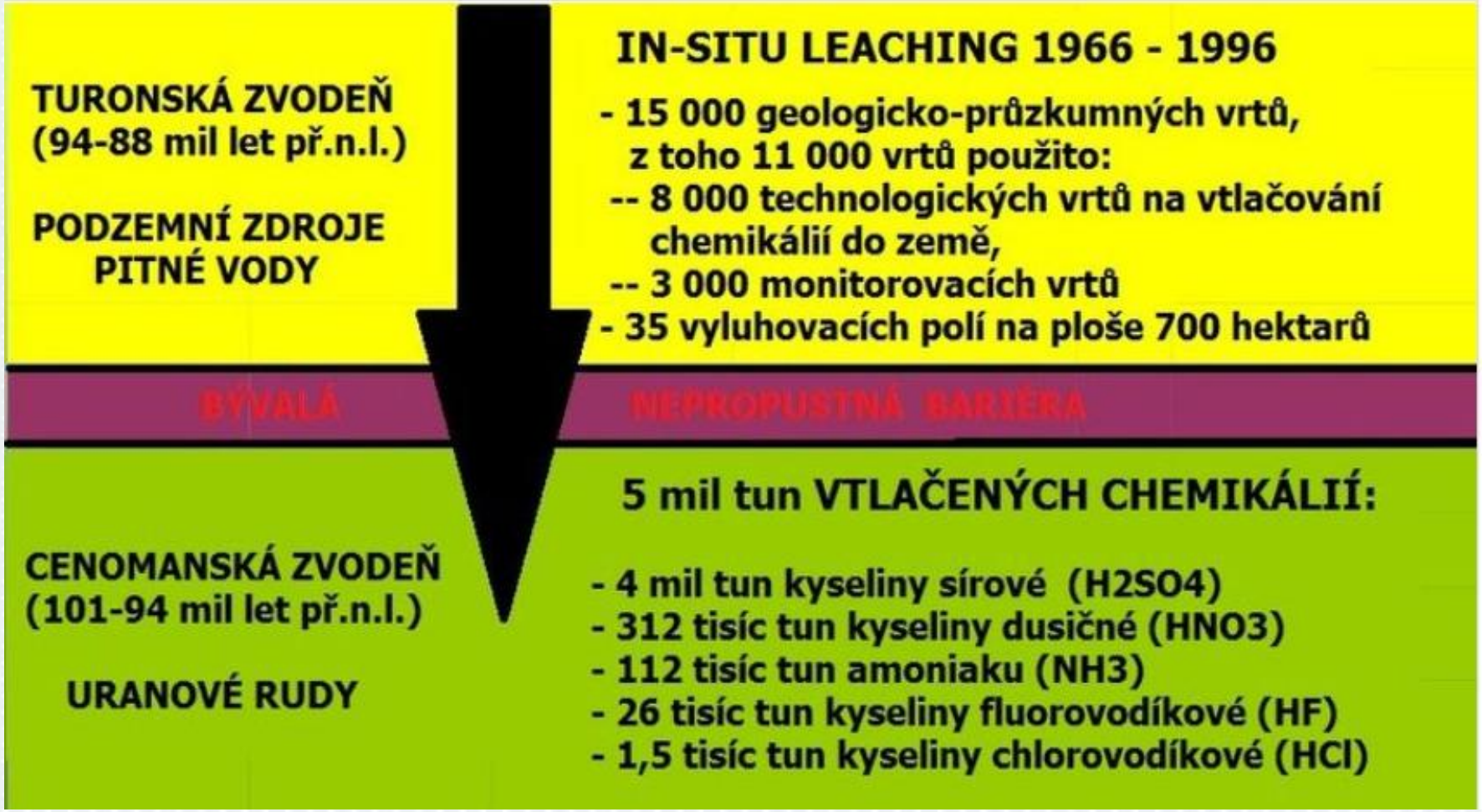
Zdroj: solvayovylomy.cz

Vyluhovací pole VP-10





cc BY NC SA



Zdroj: Kališová. Těžba uranu v České republice. TZB-info. 2017

- V horninovém prostředí zůstalo zbytkových technologických roztoků cca 186 mil. m^3 cenomanských
  80 mil. m^3 turonských

cc BY NC SA

Vliv na životní prostředí

- Ohrožení podzemních zdrojů pitné vody
  – kontaminace chemikáliemi
- Izolační vrstva $CaCO_3$ narušena – tisíce vrtů – netěsnosti
  → chemická kontaminace spodních vod turonu
  (2,5 km od vyluhovacích polí je vrt pitné vody pro Mimoň)
- Cenoman – ovlivněno 370 miliónů m^3 na ploše 27 km^2
  – rozpuštěné látky SO_4^{2-}, NH_3, Al, Fe, U, Th;
  méně významné NO_3^-, F^-, As, Be, V, Cr

cc BY NC SA

Cíle sanace

- Čerpání kontaminovaných vod z cenomanu, aby se kontaminace nešířila do turonu
- Dekontaminace vyčerpaných vod
- Čerpání kontaminovaných vod z turonu
  + dekontaminace (25 %) nebo vtláčení do cenomanu (75 %)

- Ukončení 2030–2040, celk. náklady 40 mld. Kč

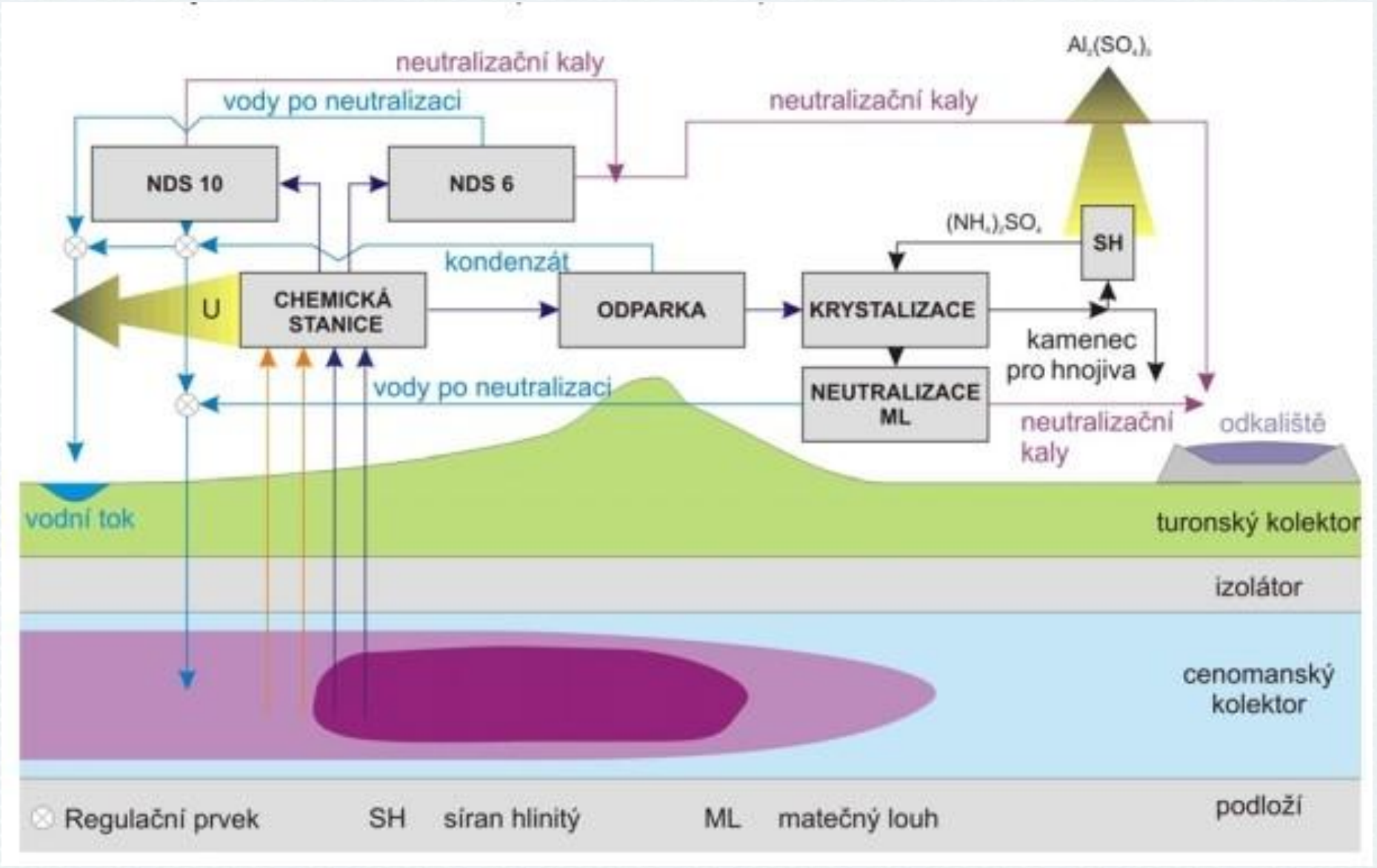
CC BY NC SA

Dekontaminace

- Dekontaminace spojená se získáváním U a s výrobou průmyslově využitelných produktů:
  - $Al_2(SO_4)_3$ – koagulační čištění vod a výroba papíru
  - Al_2O_3 – žáruvzdorné keramické hmoty
  - $(NH_4)_2SO_4$ a kamenec $NH_4Al(SO_4)_2$ – hnojivo

cc BY NC SA

Celkové schéma dekontaminace



cc BY NC SA

Provozní údaje DIAMO/Stráž pod Ralskem za rok 2010

vyvedené kontaminanty	83 000 t z Cenomanu
	1 586 t z Turonu
objem zpracovávaného roztoku	4,7 m^3/minutu
množství filtračního koláče (odpad)	77 000 m^3
na vyluhovacích polích vyčerpáno roztoku	2 817 000 m^3
množství separovaného uranu	13 t
vyrobeno kamence	16 000 t
vyrobeno čisté vody (destilátu)	810 000 t

cc BY NC SA

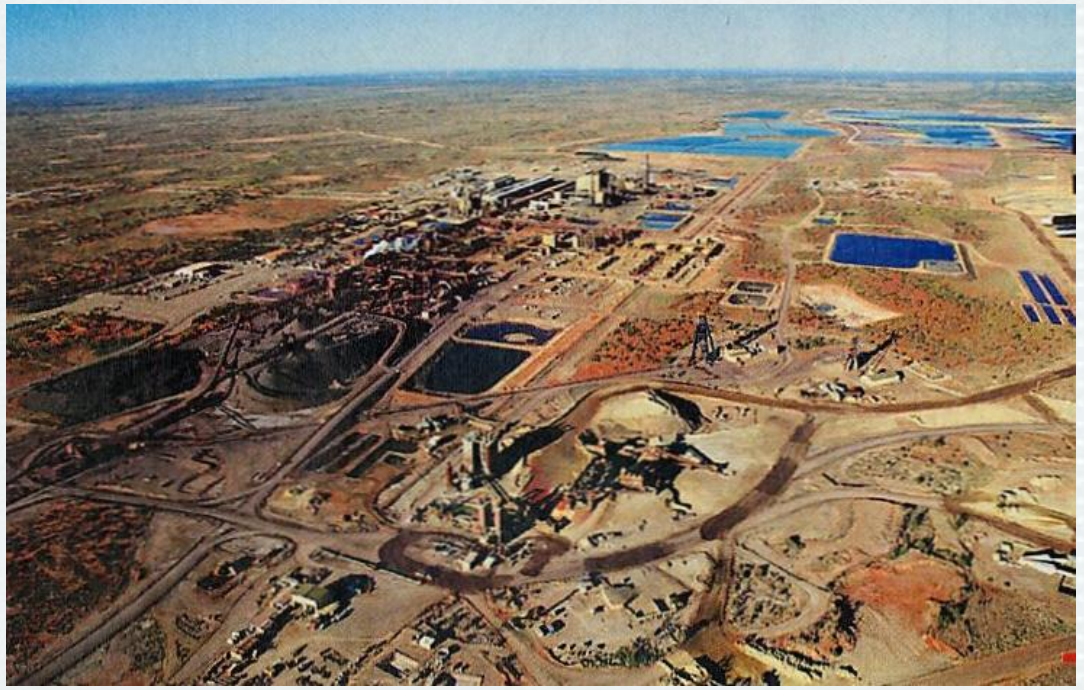
Povrchová těžba

- Brazílie, Afrika
- Dobývání buldozery a bagry po odkrytí zeminy
- **Vliv na ŽP:**
  - Zničení krajiny a flóry
  - Přemístění velkého množství půdy
  - Eroze a vyluhování
  - Většinou pouštní oblasti → málo údajů o vlivu na ŽP

cc BY NC SA

Uranový důl Usama Osomi, Brazílie

Uranový důl Uchkouduk, Kazachstán



Důl Olympic Dam (U, Cu, Au, Ag) Austrálie

36

cc BY NC SA

Zpracování uranové rudy

Specifické loužení U z rudy

- **Kyselé**

  $H_2SO_4 \rightarrow UO_2(SO_4)_3^{4-}$

  (převažující technologie)

- **Alkalické**

  $Na_2CO_3 \rightarrow UO_2(CO_3)_3^{4-}$

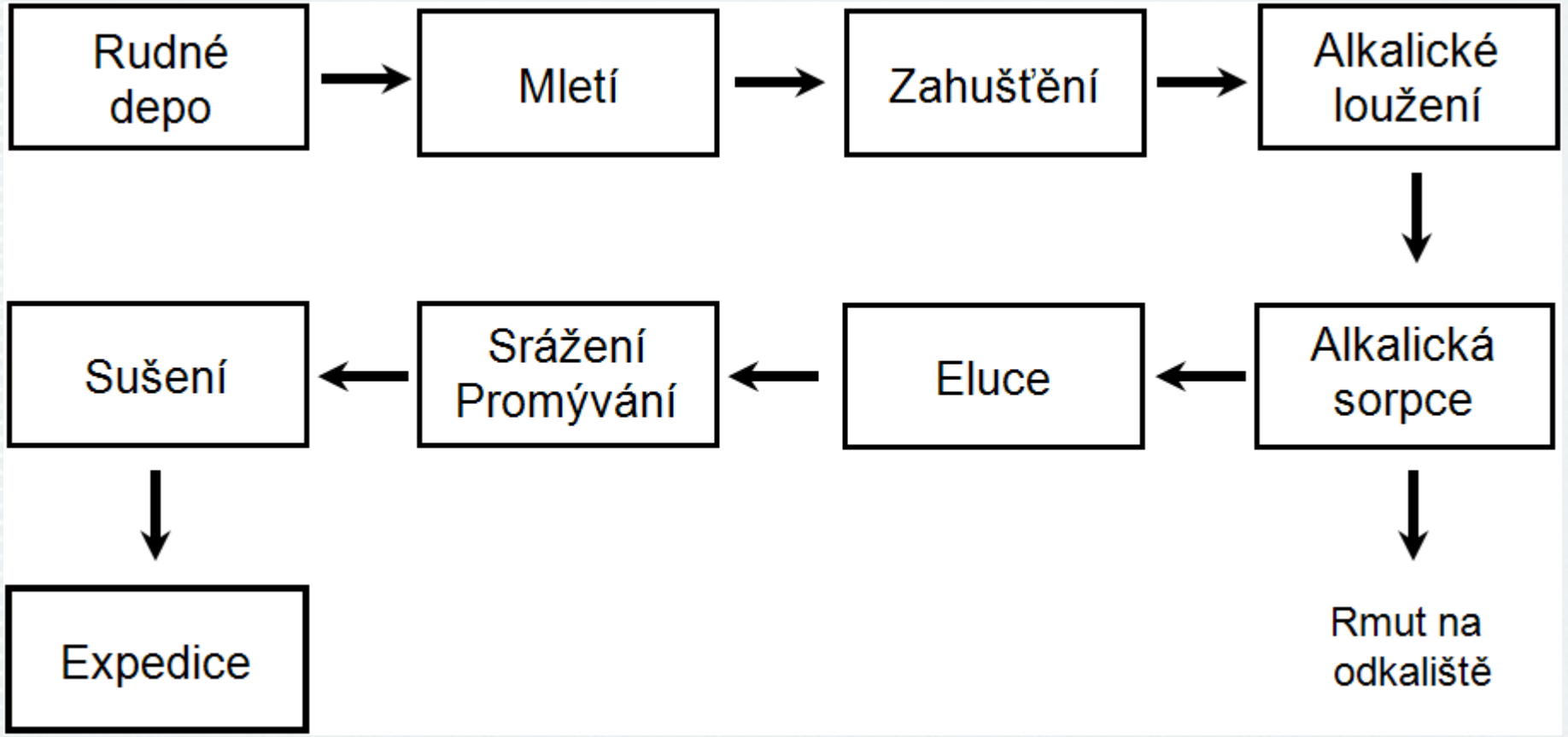
  (v ČR)

Chemické úpravny

- funkční u dolu Rožná
  (Dolní Rožínka)
- bývalé Mydlovary
  Stráž pod Ralskem

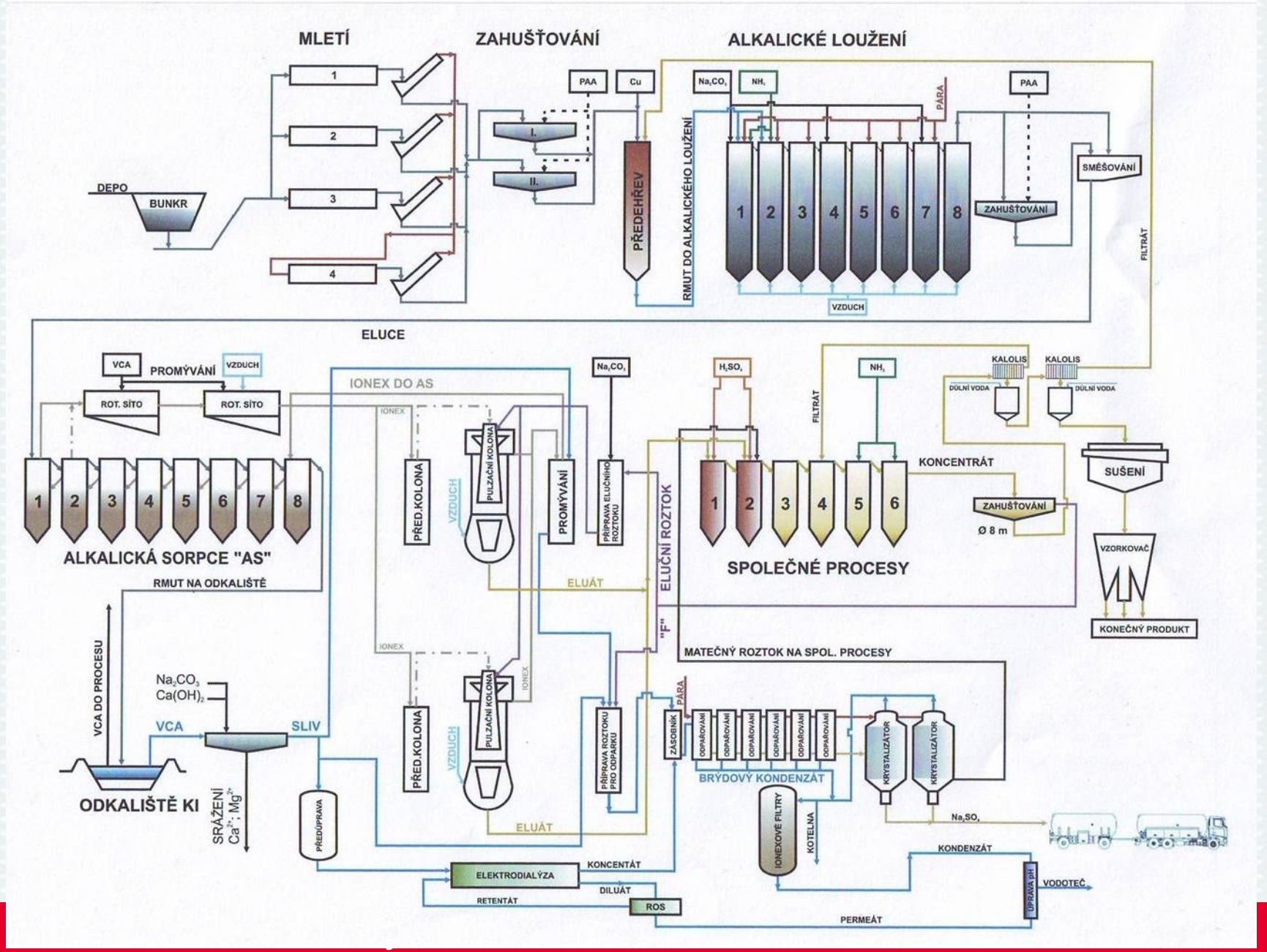
cc BY NC SA

Výroba chemického koncentrátu uranu



BY NC SA

Schéma chemické úpravny uranu, GEAM Dolní Rožínka



Zdroj: http://hgf10.vsb.cz/546/Chemproc/odkazy/chemicka_uprava_uranu.htm

CC BY NC SA

- Drcení a mletí za mokra: <0,5 mm, kulové mlýny
- Zahuštění: poměr pevná fáze/voda z 1:6 na 1:1
- **Alkalické loužení U:**
  Na_2CO_3 + katalyzátor $Cu(NH_3)_4^{2+}$ (Cu^{2+}+NH_3)
  → promíchávání vzduchem → oxidace U^{4+}
  → $UO_2(CO_3)_3^{4-}$ (80 °C)
- 6 kolon, ~600 m^3, účinnost 89–92 %
- Sorpce komplexu na anexu: protiproudné dávkování anexu a rmutu, promíchávání vzduchem

cc BY NC SA

Zpracování anexu

- Oddělení anexu s U od rmutu na rotačních sítech
- Eluce Na_2SO_4 v pulsačních kolonách
- Srážení $NH_3 \rightarrow (NH_4)_2U_2O_7$ = žlutý koláč
  diuranát amonný
- Přečištění, sušení, export
  (kvalita odpovídá normám UK nebo FRA)

- Kapacita úpravny: $300–500 \cdot 10^3$ t/rok
  reálně $200 \cdot 10^3$ t/rok

cc BY NC SA

Vyloužená ruda

- Nízký obsah U → odpad (kal + chemikálie)
  – obsahuje téměř celou hmotnost původní rudy a většinu radioaktivity (93 % ^{226}Ra, 50 % ^{230}Th)
- Ukládání kalu – **odkaliště**
  – Přírodní nebo umělá nádrž upravená hrázemi
  – Kal sedimentuje
  – Udržování vodní bilance – roční přírůstek 300 000 m^3 vod (srážky+technologické)
  – Přebytek vody – částečné přirozené odpařování, většina odsolování a čištění na odparkách a elektrodialýze
- Roční výkon 275 000 m^3 vod, za 20 let vyčištěno a vypuštěno 3,7 mil. m^3
- Tuhý zbytek z odparek se vrací na odkaliště

cc BY NC SA

Vliv úpravny na ŽP

- **Prosakování vody z odkaliště do spodních vod**
  - – výhoda alkalického loužení – fixace RN
  - **Opatření**
    - – konstrukce na jílovém podloží, nebo dno pokrýt
    - – drenážní systém na záchyt průsakových vod
      → buď zpět do odkaliště nebo čistící stanice
    - – občasné průsaky mimo drenážní systém – kontaminace některých úseků podzemních vod
      → budování dalších jímek

cc BY NC SA

- **Eroze**
  - rozprašování RN a emanace Rn ze suchých pláží odkališť
  - Monitoruje se prach a obsah U a Ra v prachu
    (prach 1,3–42 $g \cdot m^{-2} \cdot 30d^{-1}$ obsahuje U 0,2 (limit 1,5) $mg \cdot m^{-2} \cdot 30d^{-1}$)
  - V oblasti je 3x větší spad než průměr, ale <1/6 limitu
    → lokální význam (do 1 km)
  - **Opatření**
    - Rozprašování polymerních látek na suché pláže
    - Pokrytí jílem, kamenivem, půdou

cc BY NC SA

- **Radiační zátěž obyvatelstva** (důl a úpravna Rožná)
  - **U kritické skupiny obyvatelstva se sleduje:**
    - intenzita záření γ
    - A_V(RN) – odkaliště, skládka rudy v úpravně, hlušina
  - Nedochází k šíření kontaminace, podlimitní hodnoty
    → žádná zátěž pro ŽP a obyvatelstvo
  - Zemědělské plodiny (brambory, obilí) v roce 2014:

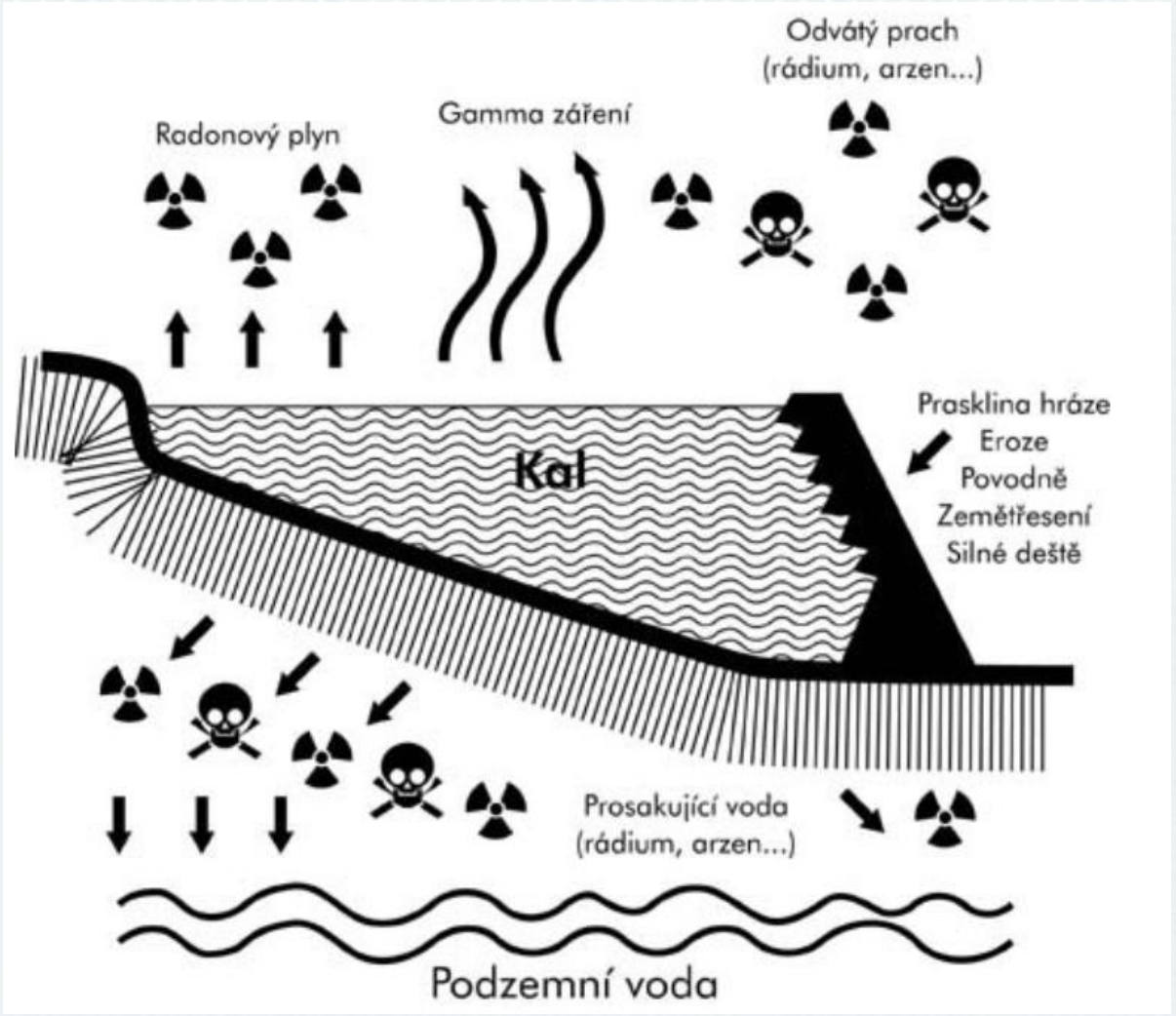
    $A_m(^{238}U)$ <1,2 Bq/kg (zásahová hodnota = 47 Bq/kg)

    $A_m(^{226}Ra)$ <0,2 Bq/kg

    → modelově 0,1–0,2 mSv/rok
  - Situace dobrá, postupné zlepšování

cc BY NC SA

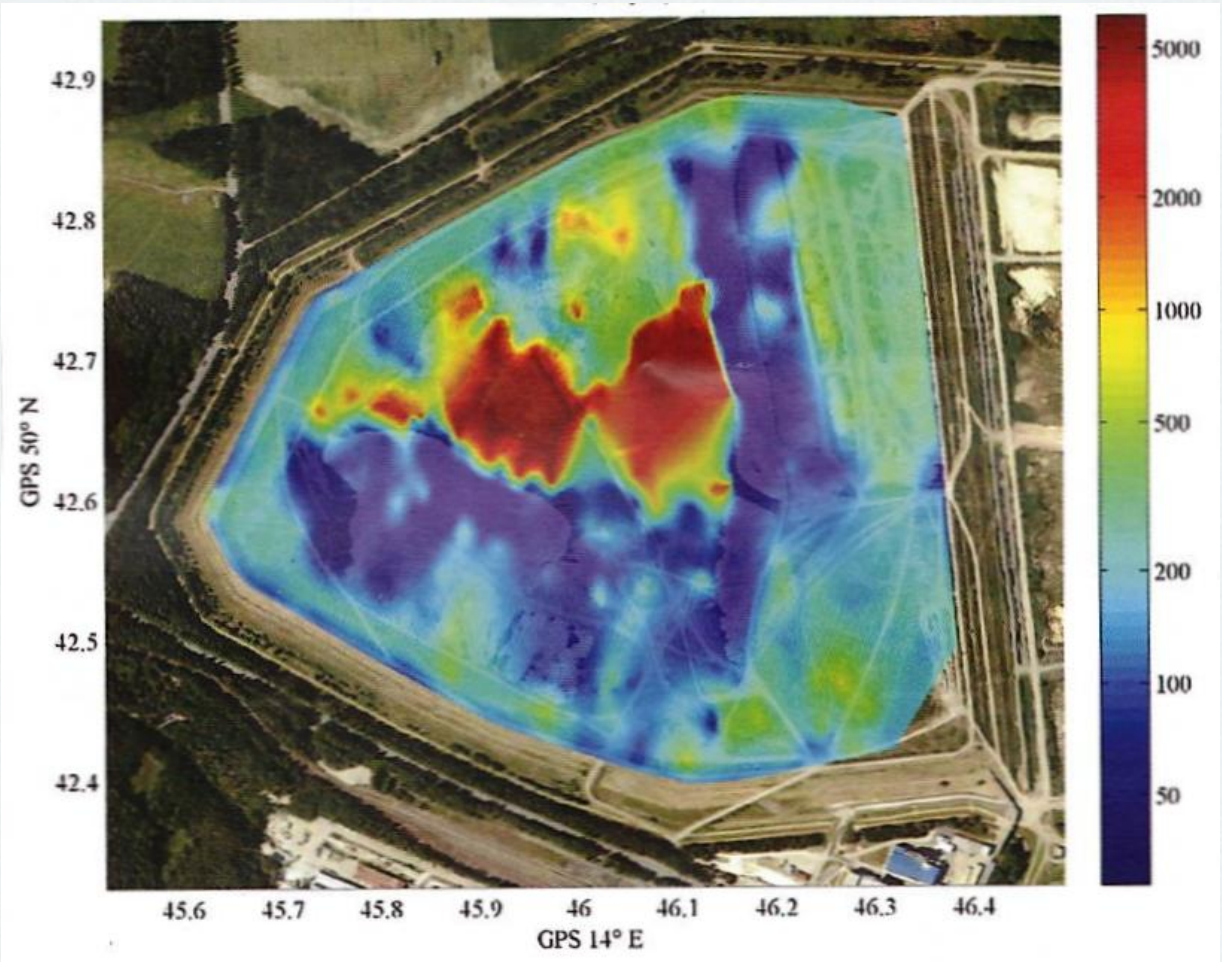
Odkaliště



Zdroj: Sequens, Hlasová a kol. Ekonomické a ekologické důsledky těžby uranu v České republice. 1999

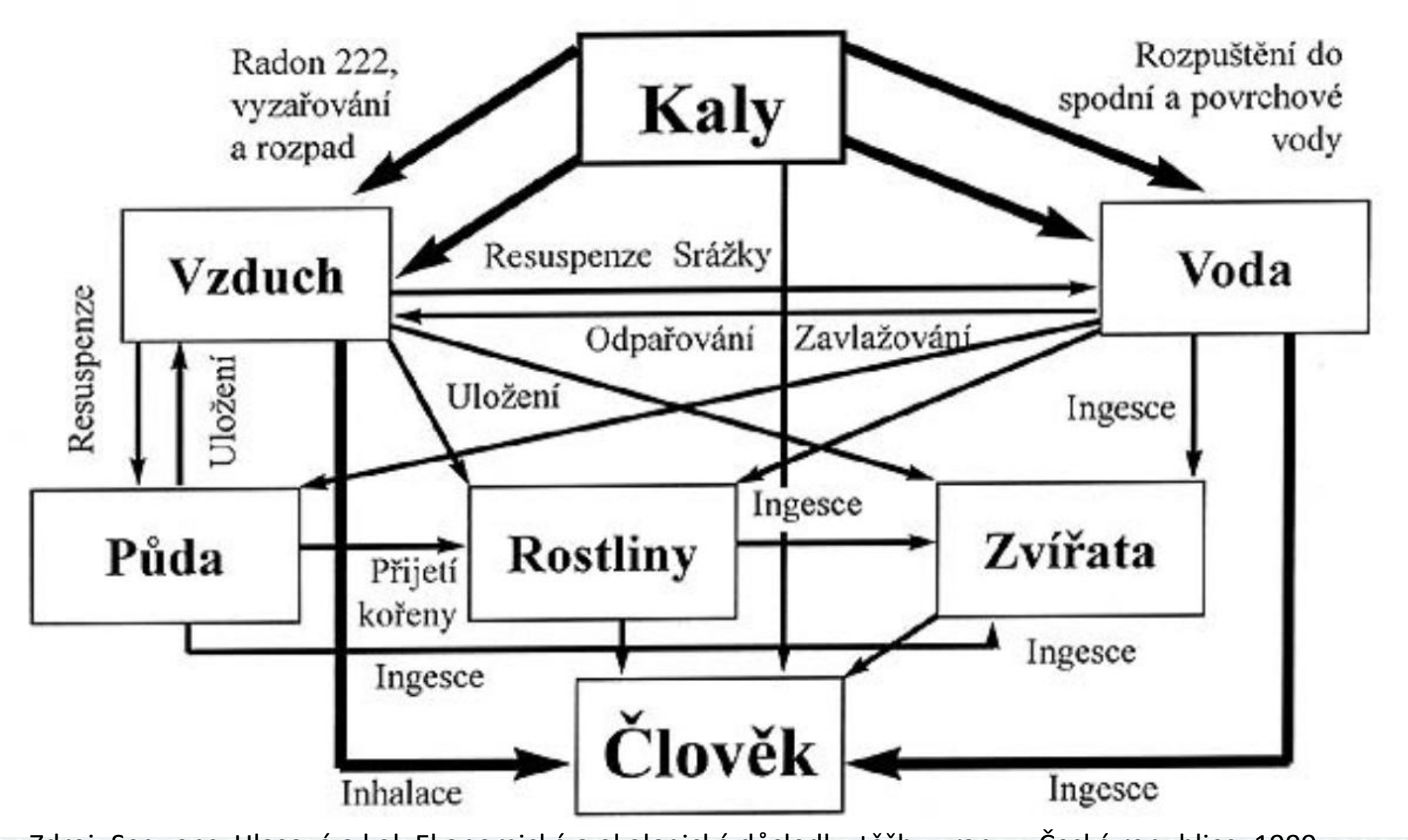
BY NC SA

Monitorování odkaliště



BY NC SA

Nejdůležitější cesty zatížení kalem směrem k člověku



Zdroj: Sequens, Hlasová a kol. Ekonomické a ekologické důsledky těžby uranu v České republice. 1999

BY NC SA

Vztah těžby U a jaderné energetiky

- Renesance JE → výstavba, plány → růst poptávky + nedostatečná těžba → růst cen
- Růst produkce – otevírání dolů
  – investice do průzkumu
  – Kazachstán zdvojnásobil produkci od r. 2009
- V ČR – zásoby ve starých dolech –

  Rožná – větší hloubky
  Hamr – 11 500 t zásob – odpor ekologických aktivistů
  Brzkov

cc BY NC SA

Světové zásoby uranu

- Kritéria: roční spotřeba + cena
  - Příklad: cena <40 USD/kg U + „jisté“ zásoby 1,7 Mt U + roční spotřeba 68 000 t U → 25 let

Světové zásoby uranu (Mt)

USD/kg U	Reasonably assured resources	Estimated additional resources
< 40	1,7	0,8
40 - 80	0,8	0,3
80 - 130	0,7	0,3
celkem	3,2	1,4
	4,6	

CC BY NC SA

Budoucnost JE

- Další zdroje uranu:
  - odhad na základě zkušeností a předběžného průzkumu → 200 let
  - U jako vedlejší produkt výr. fosfátů → + 300 let
  - mořská voda odhad 4 mld. t U (nejasné využití)
- Úspory v obohacování:
  - běžné ochuzení 0,3 %, tj. 50 % ^{235}U nevyužito
    - – čím víc ^{235}U se získá, tím víc paliva je možné vyrobit z přírodního U
    - – snížení ochuzení na 0,27 % sníží spotřebu U o 5 %
- Pu z přepracovaného paliva
- U a Pu ze zbraní
- Množivé reaktory (rychlé) – Th cyklus

cc BY NC SA

Magisterský studijní program JADERNÁ ENERGETIKA vznikl za přispění

Financováno Evropskou unií
NextGenerationEU

NÁRODNÍ PLÁN OBNOVY

MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ, MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

NPO_VUT_MSMT-16609_2022

CC BY NC SA

VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ
V BRNĚ

Financováno Evropskou unií
NextGenerationEU

NÁRODNÍ PLÁN OBNOVY

MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ, MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FAKULTA CHEMICKÁ

FAKULTA STAVEBNÍ

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

Přednáška magisterského studijního programu JADERNÁ ENERGETIKA

Radioekologie a úvod do jaderných technologií

Ekologické aspekty palivového cyklu II
– výroba paliva – principy separace 235-U a výroby paliva, vliv na životní prostředí

Fakulta chemická

Ota Fišera

2024

CC BY NC SA

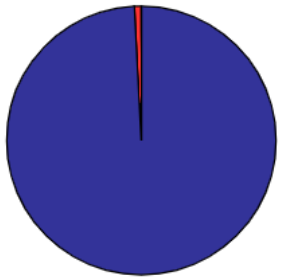
Obohacování uranu

- Úprava izotopického složení přírodního uranu
- Zejména pro využití v lehkovodních reaktorech
- Přírodní izotopové složení uranu: 99,275 % ^{238}U, 0,72 % ^{235}U, 0,005 % ^{234}U
- **Obohacený uran** = uran s vyšším obsahem ^{235}U (štěpitelný izotop)
- **Ochuzený uran** – vedlejší produkt obohacení
  - frakce s nižším obsahem ^{235}U – běžné ochuzení na 0,3 %
  - využití jako – stínicí materiál (hustota = 19 $g \cdot cm^{-3}$)
    – vyrovnávací závaží (Boeingu 747, Formule 1, …)
    – vojenská munice (hustota, pyroforický)

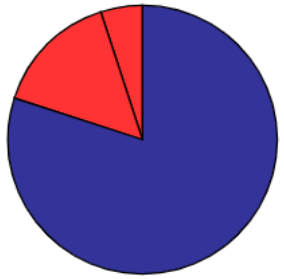
3

CC BY NC SA

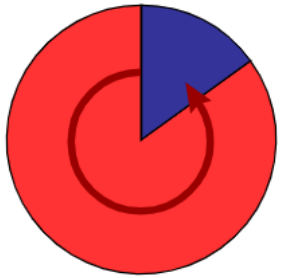
Obohacený uran



Natural uranium (NU)
>99.2% U-238
≤0.72% U-235



Low-enriched uranium (LEU)
(reactor grade)
<20% U-235
(typically 3-5% U-235)



Highly enriched uranium (HEU)
(weapons grade)
20-85% U-235
(≥85% U-235)

Zdroj: wikipedia.org

Nízko obohacený uran (Low-enriched uranium, LEU)

- < 20 % ^{235}U
- Nejčastěji 3 až 5 % ^{235}U
  (JEDU 4,38 %, JETE při první zavážce 1,3 – 3,8 %)
- Mírně obohacený uran (Slightly enriched uranium, SEU) < 2 % ^{235}U
- Nízko obohacený uran s vyšší úrovní obohacení (High-assay LEU, HALEU)
  – 5 až < 20 % ^{235}U
  – výzkumné reaktory (12–19,75 %), malé modulární reaktory

Vysoce obohacený uran (Highly enriched uranium, HEU)

- ≥ 20 % ^{235}U
- Rychlé reaktory, ponorky (50 až 90 % ^{235}U)
- Použitelný v jaderných zbraních, běžně ale > 80 % ^{235}U (weapon-grade)

CC BY NC SA

Izotopový efekt

- Izotopické molekuly $^{1}H_2{}^{18}O$, $^{2}H_2{}^{16}O$ / $^{235}UF_6$, $^{238}UF_6$
  - mají stejné kvalitativní chemické vlastnosti
  - různé fyzikální nebo fyzikálně-chemické vlastnosti

    → **izotopové efekty** – využit k prostorové nebo fázové změně izotopového poměru

cc BY NC SA

Konverze uranu

- Přeměna uranového koncentrátu po zpracování rudy na hexafluorid uranu (UF_6)
- Výhody:
  - Fluor má pouze jeden přírodní izotop
    $\rightarrow$ nevzniká více izotopických molekul
  - Sublimace při 56,5 °C
    $\rightarrow$ plynný při obohacování při nízkých teplotách

cc BY NC SA

Metody obohacování

- Elektromagnetická separace
- Plynová centrifugace
- Plynná difúze
- Tepelná difúze
- Ionizace laserem
- Chemická separace
- Aerodynamická separace
- Přeměna uranu pro jaderné zbraně
- Zpětné obohacení ochuzeného uranu

- Od roku 2013 převažuje centrifugace, výjimkou je plynná difúze v Argentině
- Celková separační kapacita (2020): > 60 MSWU/rok
  (cca 50 % v Rusku, ± 10 % Francie, Čína, USA)

7

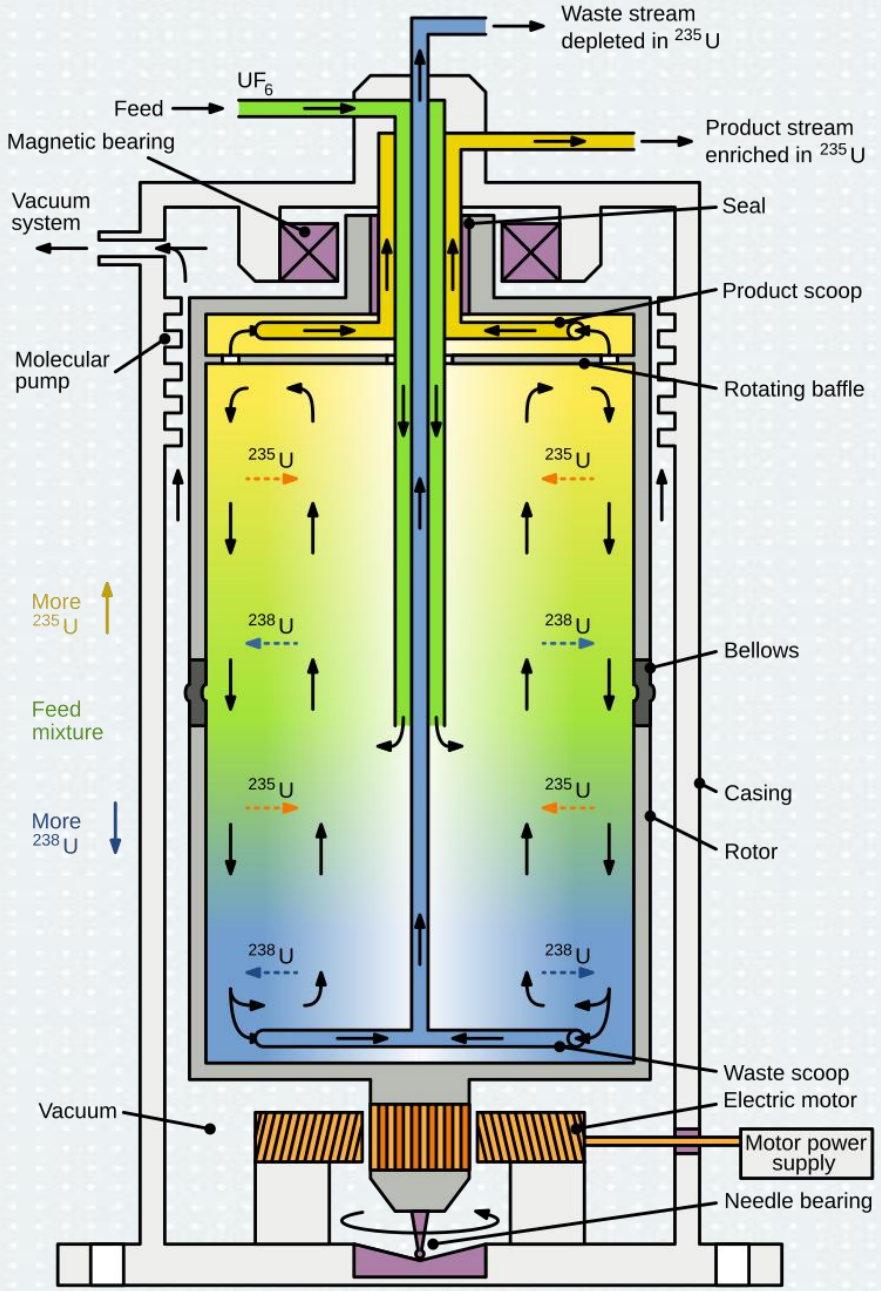
cc BY NC SA

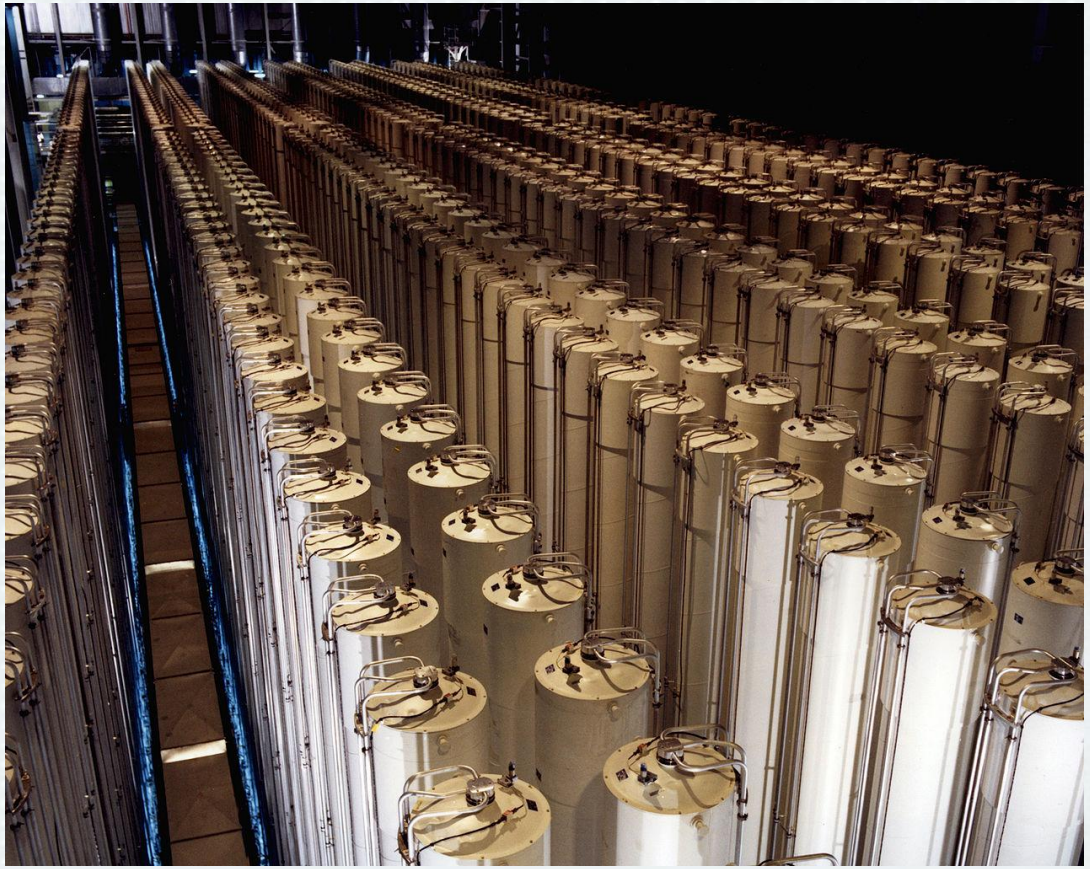
Plynová centrifugace

- Princip: rozdílný moment hybnosti
- Účinnost je závislá především na rychlosti otáčení centrifugy
- Otáčky: $50 \cdot 10^3$ rpm (lopatky z uhlíkových vláken $\rightarrow$ rychlost 600 m/s)
- Teplota: 60 °C
- Pracovní médium: UF_6
- Energeticky méně náročné než difúze (až 50x)
- Pro obohacení na 4 % je potřeba desítky tisíc jednotek
- Separační faktor:

$$\alpha = \frac{R_{238,obvod}}{R_{238,střed}} = e^{(M_{238}-M_{235})\omega^2 r^2/2RT}$$

cc BY NC SA





Kaskáda centrifug (Piketon, USA, 1984)
12 m vysoké
(v současnosti se používá výška 3–4 m, průměr 15 cm)

Zdroj oba: wikipedia.org

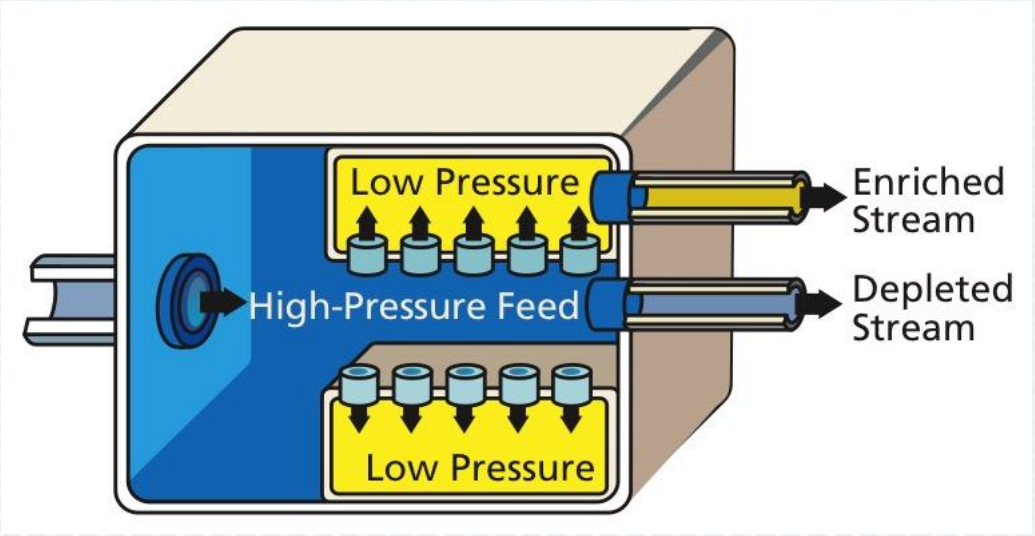
cc BY NC SA

Difúze

- **Princip:** lehčí molekuly mají vyšší rychlost → nárazy na membránu → rychlejší difúze

  Rychlost molekul: $v = \sqrt{8kT/\pi m} \rightarrow \frac{v_1}{v_2} = \sqrt{\frac{m_2}{m_1}}$

- Rozdíl difuzních koeficientů v plynu i kapalině
- Plynná difúze převládala před nástupem centrifugace
- Velká energetická náročnost kvůli vysokým teplotám



Zdroj: nrc.gov

cc BY NC SA

Tepelná difúze

- **Princip:** Soretův efekt – lehké molekuly migrují do teplejších oblastí, těžší molekuly migrují do chladnějších míst
- Experimentální metoda za II. světové války
- Obohacený uran pro jadernou bombu Little boy (Hirošima)

Zdroj: nrc.gov

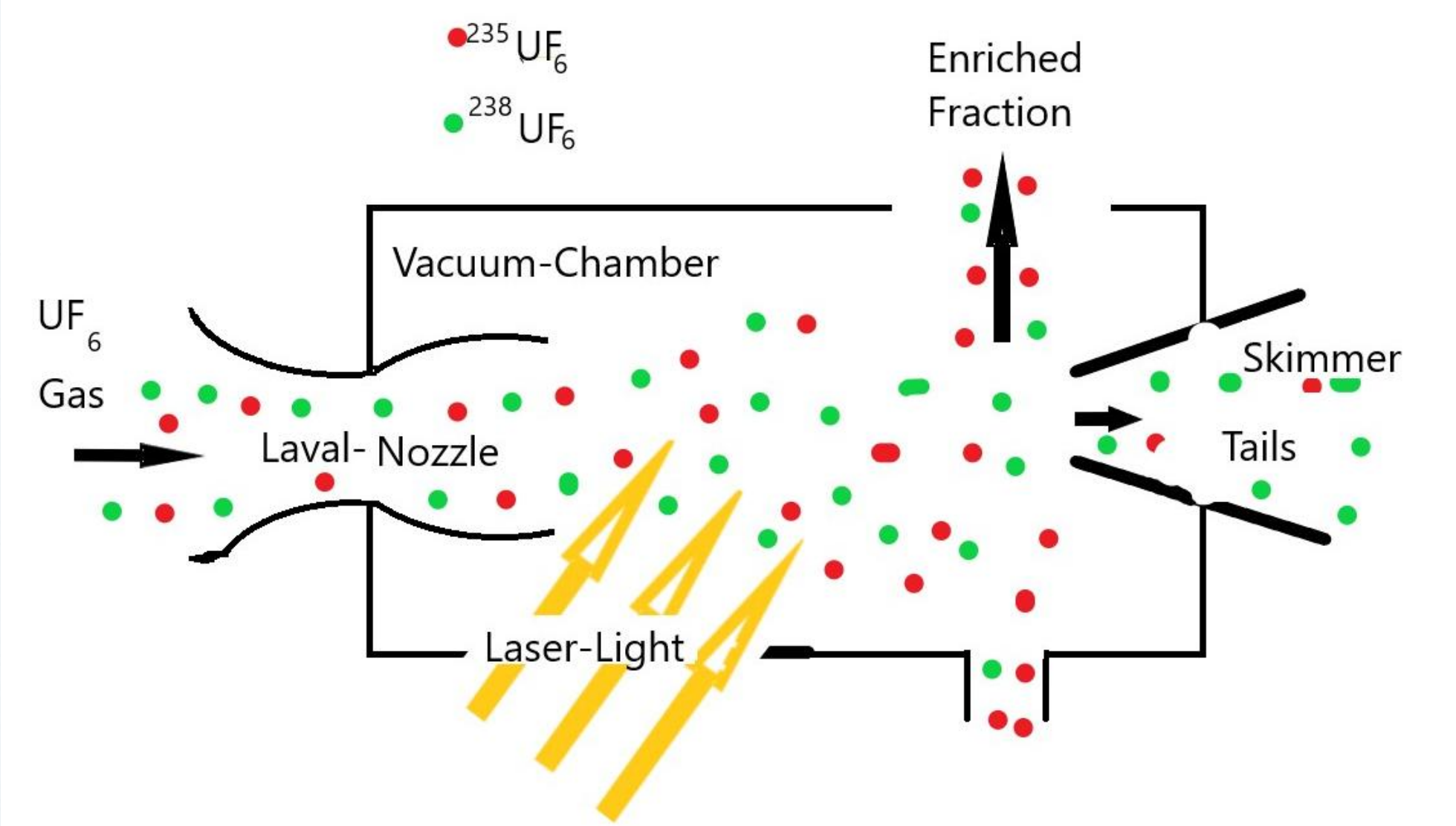
cc BY NC SA

Ionizace laserem

- **Princip:** excitace atomů vybraného izotopu laserem
- Oddělení iontů elektromagneticky nebo chemicky (reakce s látkou)
- Nižší energetická náročnost
- AVLIS – Atomic Vapor Laser Isotope Separation – kovový U (Ufe)
  $\rightarrow$ evaporace $\rightarrow$ ionizace laserem $\rightarrow$ elektromagnetická separace
- MLIS – Molecular Laser Isotope Separation – UF_6 za nízkého tlaku a teploty (-180 °C) $\rightarrow$ excitace a ionizace molekul $UF_6 \rightarrow {}^{235}UF_5$ kondenzace (s)
- SILEX – Separation of Isotopes by Laser Excitation – adiabatické zchlazení UF_6 na 80 K $\rightarrow$ klastry molekul UF_6 a nosného plynu (Ar, N_2)
  $\rightarrow$ excitace ${}^{235}UF_6$ (628,3 cm^{-1} rozbije klastry $\rightarrow {}^{235}UF_6$ snadněji opouští hlavní tok plynu

cc BY NC SA

Princip metody SILEX



Zdroj: wikipedia.org

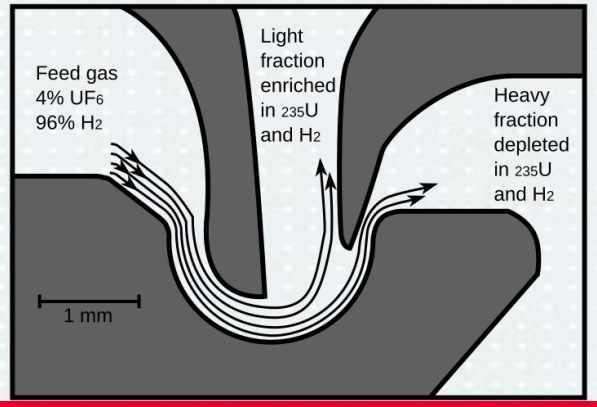
cc BY NC SA

Aerodynamická separace

- Využívá mechaniku proudění plynů

Trysková metoda

- $UF_6 + H_2$ urychlena až na rychlost zvuku
  → z trysky proudí na vydutou stěnu
  → zakřivení dráhy – ^{238}U zakřiven méně (vyšší hybnost)
- Analog elektromagnetické separace
- Malá technologická náročnost
- Vysoká spotřeba energie



Vírová metoda

- směs plynů je ze strany vstřikována do vírové trubice → vířivé proudění
  → separace na základě odstředivých sil (analogie s centrifugací)
- Metoda byla vyvinuta v Jihoafrické republice
- Vojenský jaderný program (1969–1990)

Zdroj oba: wikipedia.org

BY NC SA

Elektromagnetická separace

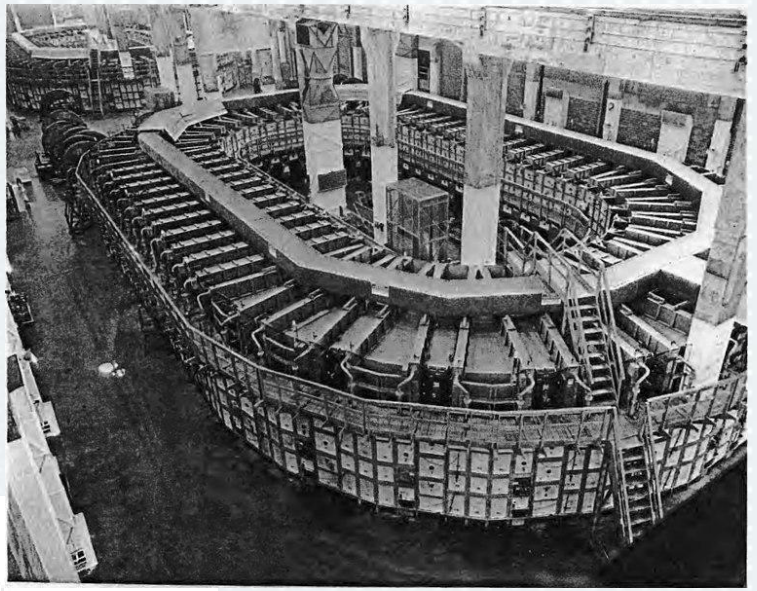
- **Princip:** zakřivení drah iontů v magnetickém poli
  - iontový zdroj: kov, oxid, halogenid + vysokofrekvenční ohřev → ionizovaný plyn
  - urychlení iontů elektrickým polem: $E_{kin} = 1/2 \cdot mv^2 = zV$
  - ohyb iontů v kolmém magnetickém poli (B)
    odstředivá $F = mv^2/r = Bzv = F$ dostředivá $\rightarrow r = 1/B \cdot \sqrt{2mV/ze}$
- Vynikající separační schopnost
- Velké ztráty → praktická náročnost vyšší s méně účinnými metodami
- Příprava menších množství čistých nebo vysoce obohacených frakci

15

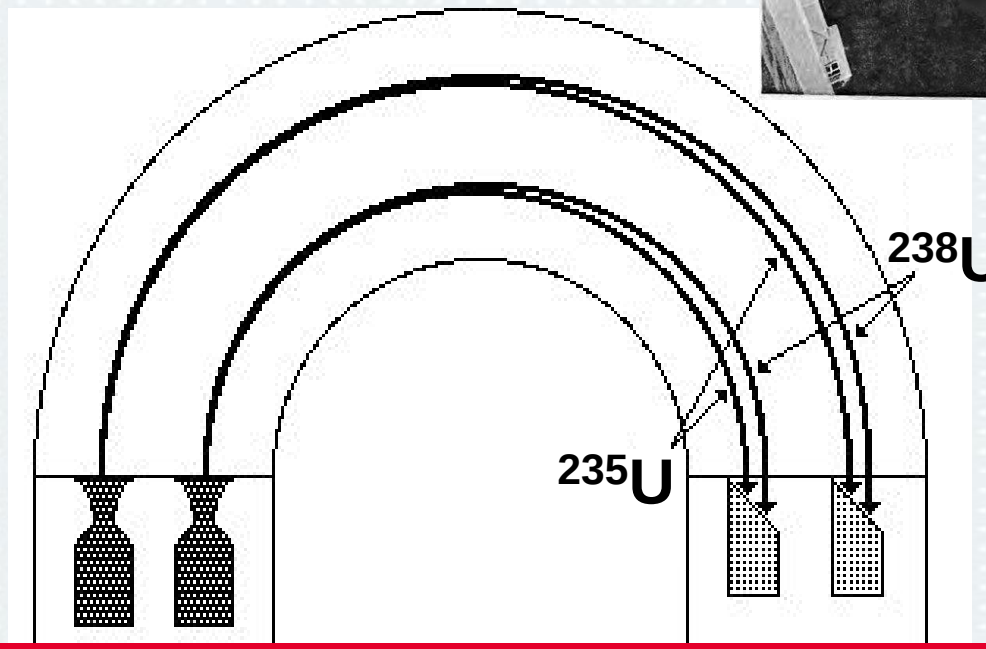
cc BY NC SA

Schéma elektromagnetické separace

- **Kalutron** – separace ^{235}U pro projekt Manhattan
  - vyšší iontové proudy
  - hmotnost separovaného izotopu za čas:
    $m\ (\mu g) = 0{,}0373 \cdot I(\mu A) \cdot M \cdot a_i \cdot t$
    (a_i = zastoupení)
    $1\ \mu A = 6{,}24 \cdot 10^{12}/z$ částic/s



Zdroj: wikipedia.org



cc BY NC SA

Chemická separace

- **Princip:** Rovnovážný izotopový efekt – rozdíl v kvantitativních chemických vlastnostech → posun reakční rovnováhy
- CHEMEX – kapalinová extrakce U(IV+) a U(III+)
  - organická fáze – roztok tributylfosfátu (TBP) a xylenu
  - vodná fáze – roztok HCl
  - analogie v procesem PUREX
  - separační faktor 1.0027 (srovnatelný s difuzí)
  - riziko kritičnosti uvnitř roztoku – nelze použít pro výrobu vysoce obohaceného uranu.
- Česká stopa (80. léta, FJFI ČVUT a ÚJP)
  - koncentrační kinetický izotopový jev iontově výměnných reakcí $^{235}U(IV+)$ a $^{238}U(VI+)$
  - separační faktor > 1.01

cc BY NC SA

Separace izotopů:
Metody s využitím rozdílné rychlosti

- **Difúze**
  - Lehčí molekuly mají vyšší rychlost → nárazy na membránu → rychlejší difúze
  - Rychlost molekul: $v = \sqrt{8kT/\pi m} \rightarrow \frac{v_1}{v_2} = \sqrt{\frac{m_2}{m_1}}$
  - Obohacení uranu:
    - 1400 článků → obohacení na 3–4 %

CC BY NC SA

Separační práce

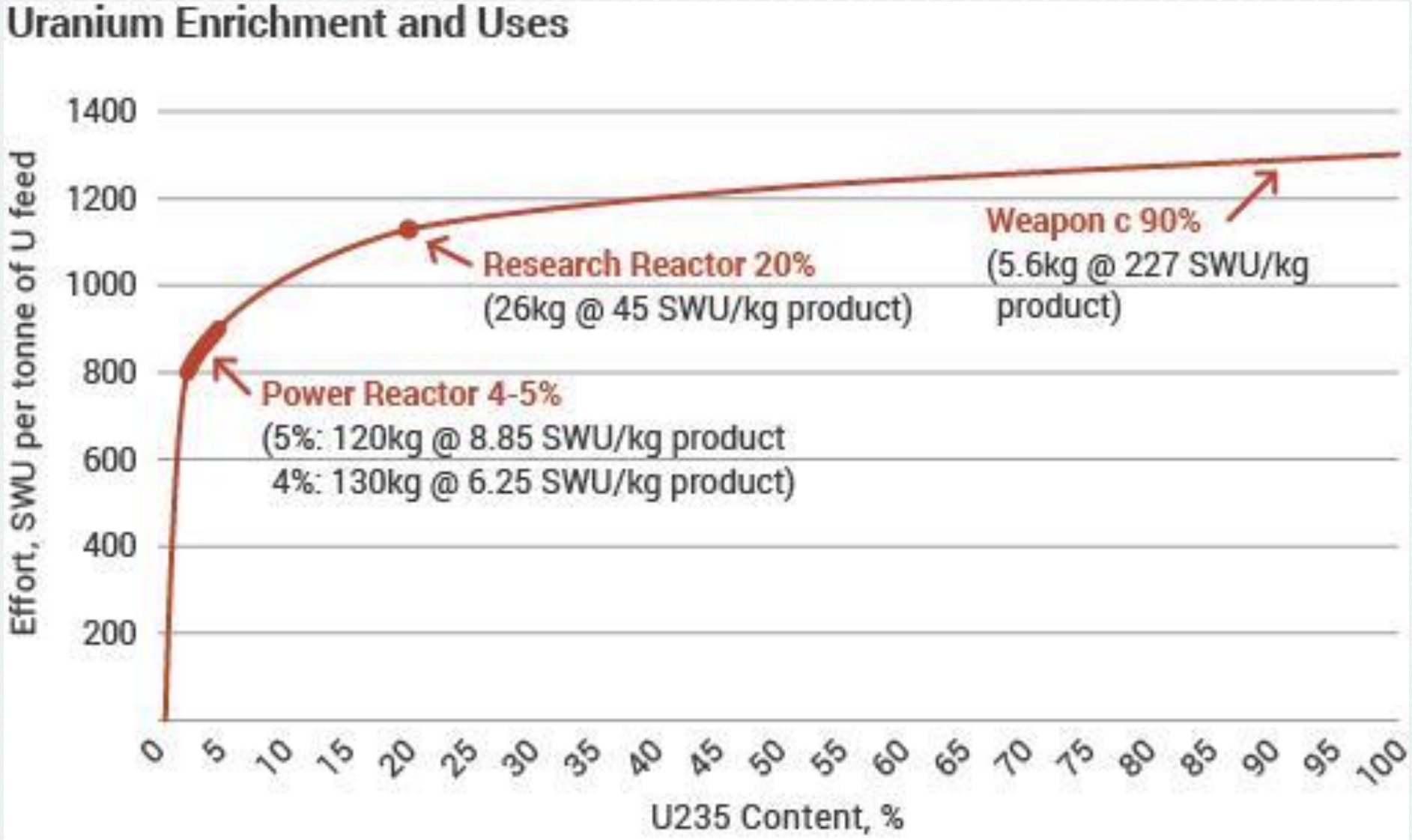
- **Jednotka separační práce** (separation work unit, SWU)
  - Množství práce potřebné s separaci izotopu během obohacování
  - Závisí na: zastoupení izotopů na vstupu, výsledném obohacení i ochuzení, celkovém množství produktu
  - Udává náklady na spotřebu energie a čas a tím na výrobu jaderného paliva
  - Závisí na konkrétním způsobu obohacování
  - Zkratka SWU na 1 kg obohaceného materiálu

  - Ukázka výpočtu – https://cs.wikipedia.org/wiki/Jednotka_separační_práce

19

cc BY NC SA

Separační práce a množství produktu při zpracování 1 tuny přírodního uranu



Zdroj: https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/conversion-enrichment-and-fabrication/uranium-enrichment

CC BY NC SA

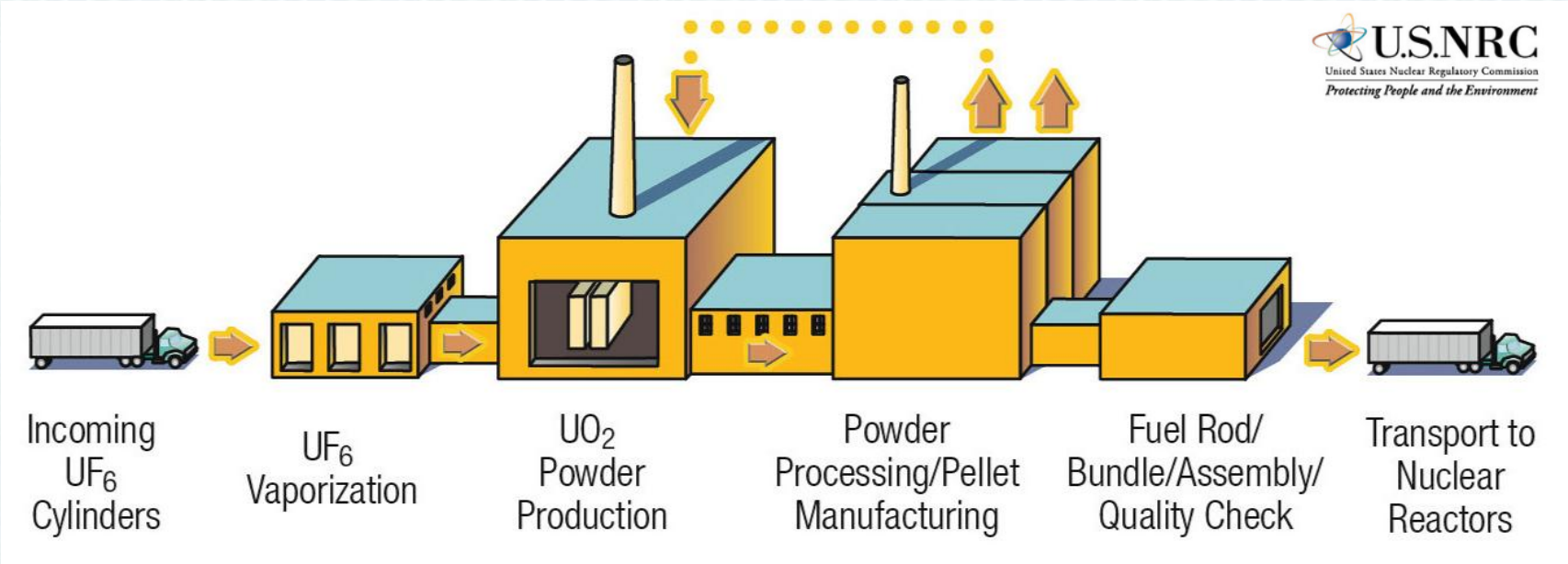
Ekologické aspekty

- Obohacování se týká přírodního uranu (výjimka přepracovaný uran)
  → přírodní = nízká radioaktivita
- Netvoří se štěpné produkty nebo ozařování materiálů jako v reaktoru
- Obohacený i ochuzený U jsou skladovány ve formě kapal. UF_6, popř. U_3O_8
- Největší problém – chemická toxicita uranu a zejména ve formě UF_6
  → ochranná opatření analogická chemickým provozům pracujícím s F
- Úniky jsou nežádoucí – radioaktivita, korozivita → monitorují a čistí se všechny výstupy
- Opatření:
  - tlak plynu UF_6 udržován pod atmosférickým tlakem → netěsnostmi nebude plyn unikat ale bude nasáván
  - vysokotlaké části – dvojitá izolace

CC BY NC SA

Výroba paliva

- Obohacený UF_6 (kapalný) → zařízení na výrobu paliva → zahřátí do plynné formy → chemická konverze na UO_2 (prášek)
  → lisování pelet → slinutí při vysoké teplotě (> 1400 °C)
- Pelety → palivová tyč → palivový soubor → reaktor



Zdroj: www.nrc.gov/.

cc BY NC SA

Výroba paliva

- Rozměry palivových pelet a dalších součástí palivového souboru jsou přesně kontrolovány, aby byla zajištěna konzistence charakteristik paliva.
- Palivové soubory jsou individuální podle typy reaktorů
- Kontrola rozměrů pelet a dalších částí souboru
- Zabránění kritičnosti – vhodný tvar a omezená velikost nádob
    - Důležité zejména pro větší obohacení

cc BY NC SA

Dělení jaderného paliva

- Podle obohacení, viz výše

Skupenství

- pevné – drtivá většina paliva v této formě
- kapalné – tekuté soli (experimentální)

Chemická forma

- kovová – vyšší součinitel tepelné vodivosti
  – nízká teplota tání
  – historická forma
- oxidy – UO_2, MOX (mixed oxide fuel), PU_2
  – vyšší teplota tání ale nižší součinitel
  – převažující forma tepelné vodivosti
- nitridy – experimentální
- karbidy – experimentální
- různé slitiny – např. s Al (výzkumné r.)

cc BY NC SA

Příprava UO_2 – rekonverze UF_6

- První krok přípravy paliva je konverze obohaceného UF_6 na UO_2
- Práškový UO_2 je základ pro výrobu paliva

Suchá cesta

- Vaporizace UF_6 + pára
  $\rightarrow$ uranyl fluorid (UO_2F_2)
  – pevná látka, U(VI+)
  + H_2 (v páře) $\rightarrow$ odstranění F
  a redukce U na **UO_2** – čistý
  mikrokrystalický prášek, U(IV+)

Mokrá cesta

- Plynný UF_6 + voda (l) $\rightarrow$ uranyl fluorid (UO_2F_2)
  – směs prášku ve vodě (rmut)
  + NH_3 (nebo $(NH_3)_2CO_3$) $\rightarrow$ diuranát amonný $NH_3)_2U_2O_7$
  nebo karbonát uranylo amonný $UO_2CO_3.(NH_3)_2CO_3$
- Rmut je zfiltrován, vysušen a za vysokých teplot v redukční atmosféře (H_2O + H_2, 500 °C) $\rightarrow$ **UO_2**

cc BY NC SA

Příprava UO_2 – rekonverze UO_3

- Neobohacený U nebo U po přepracování jsou ve formě UO_3
- Redukce vodíkem

$$UO_3 + H_2 = UO_2 + H_2O$$

- Při teplotách > 500 °C – brání srážení oxidů ostatních kovů (Fe, …)
- Alternativní způsoby – redukce MnO_2 nebo bakteriálními enzymy

BY NC SA

Peletky - příprava

- Úprava vlastností vstupního UO_2
- Zajištění uniformních vlastností, popř. přídavek příměsí

Homogenizace

- Zajistit vhodnou – velikost částic
  – specifický povrch

Aditiva

- U_3O_8 – zlepšení mikrostruktury a hustoty
- Maziva
- Látky tvořící póry.
- Spalitelné absorbéry (např. gadolinium)
  - Oxidy prvků s vysokým absorpčním účinným průřezem (Gd_2O_3)
  - Snižují reaktivitu vybraných tyčí
    → umožňují vyšší obohacení
    → prodlužují životnost paliva

cc BY NC SA

Peletky - příprava

- **Lisování**
  - Forma odpovídajících rozměrů
  - Biaxiálně
  - Stovky Mpa
- **Sintrování** (slinutí, spékání)
  - Zahřátí na 1750 °C
  - Redukční atmosféra (Ar+ H_2)
- **Opracování**
  - Na přesné rozměry
  - Recyklace šrotu
  - Redukční atmosféra (Ar+ H_2)
  - Přísná kontrola kvality
- **(Externí vrstva absorbéru)**
  - Borid zirkoničitý ZrB_2
  - Analog Gd
  - Stabilnější vyhořívání, bez zbytků

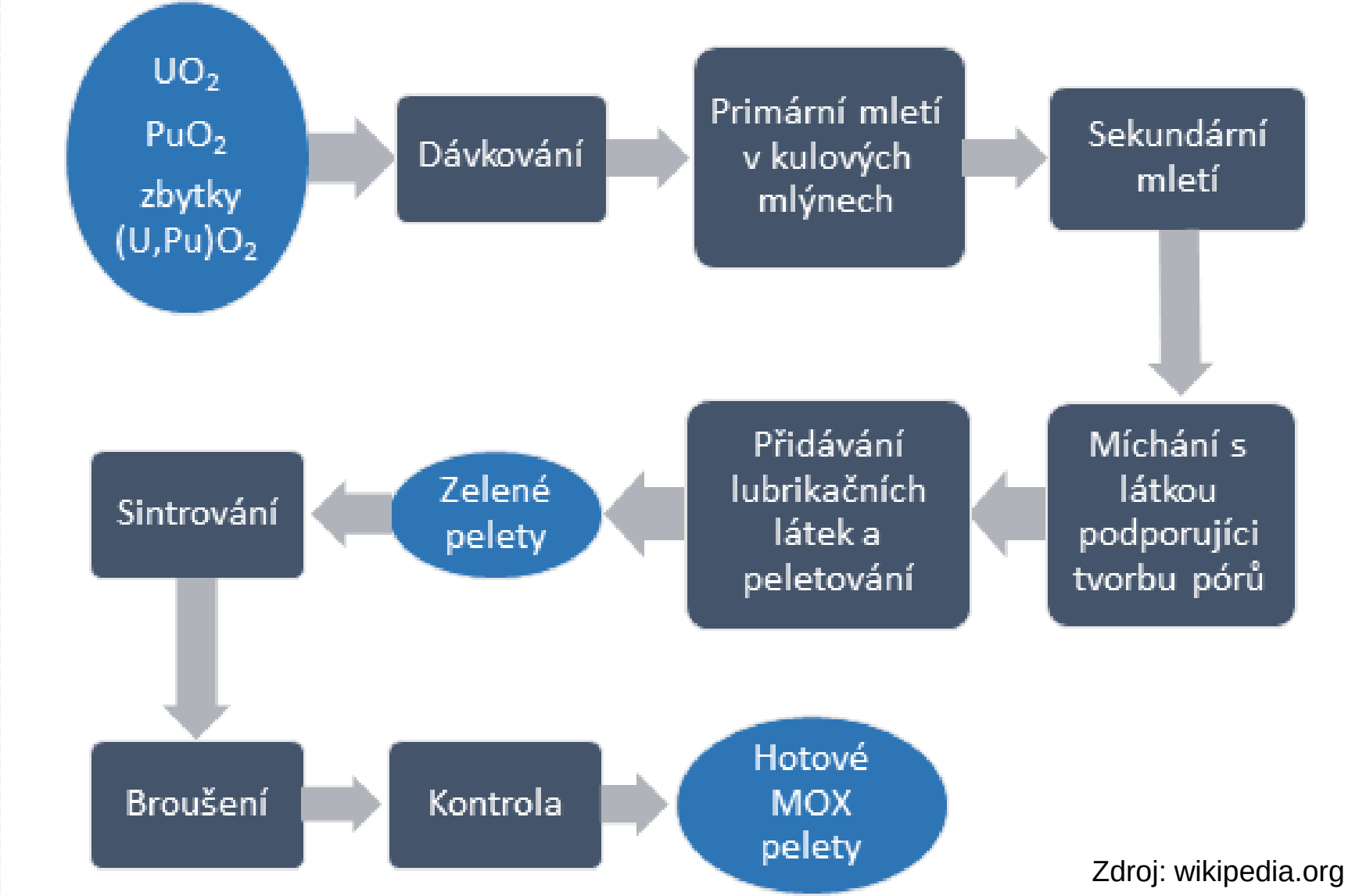
cc BY NC SA

MOX palivo

- MOX = Mixed OXides = UO_2 + PuO_2
- U – ochuzený
- Pu – z přepracování paliva – reaktorová kvalita (1/3 neštěpitelných izotopů)
  - příměs 7 % Pu ≈ obohacenému U
  - plastové stínění proti neutronům ze spontánního štěpení Pu-240
- Používá se cca ve 30 reaktorech v Evropě a v 10 reaktorech v Asii
- Vibropacked MOX (VMOX) – ruský způsob výroby MOX paliva
  - smíšené prášky $(U,Pu)O_2$ se přímo nasypou do palivových tyčí
    → sintrace in situ → odpadá geometrická tolerance, broušení a šrot
  - snadnější recyklace

cc BY NC SA

Zjednodušené schéma výroby paliva (nejen) typu MOX



Zdroj: wikipedia.org

cc BY NC SA

Peletky

- Peletky – válec o výšce 10–15 mm, průměr 8–15 mm

Západní koncepce

- Drobné důlky v podstavách peletek
  → hromadění plynných produktů štěpení
- V reaktorech západní konstrukce
  (USA, FRA)

Východní koncepce

- Centrální válcový otvor pro hromadění
  štěpných produktů

cc BY NC SA

Palivový soubor

Palivová tyč

- Pelety vloženy do palivových tyčí → proplach He → natlakování He (n MPa) → konce tyčí utěsněny svařováním
- Na koncích tyčí ponechán „přetlakový“ prostor pro tepelnou expanzi pelet a plynné produkty
- Pružina brání pohybu pelet.
- Palivové tyče vloženy do prefabrikovaných rámových konstrukcí, které drží tyče v přesně definovaném mřížkovém uspořádání → **palivový soubor**

Palivový soubor

- Přesné fyzické uspořádání tyčí a jejich vztah k dalším prvkům – vodní kanály, řídicí tyče atd.
- Pevná kostra z oceli a zirkonia + mřížkové podpěry, které drží tyče v přesné poloze
- Minimalizovat riziko otěru způsobeného vibracemi na plášťové trubce – tzv. „fretting“ opotřebení

cc BY NC SA

Palivový soubor

- Materiál palivových tyčí a souboru musí být odolný proti chemické korozi, vysokým teplotám, velkému statickému zatížení, stálým vibracím, tekutinám a mechanickým vlivům.
- Zároveň musí být neutronově transparentní, jak je to jen možné.
- Plášť palivových tyčí – **slitiny zirkonia** (zircaloy)
  - Příměs cínu, niobu, železa, chrómu a niklu → pevnost, korozivzdornost
  - Hafnium (společný výskyt se Zr) se odstraňuje kvůli jeho vysokému účinnému průřezu absorpce neutronů.
  - Oxidace na vzduchu a vodě → zoxidovaná vrstva → bez narušení funkce

CC BY NC SA

Magisterský studijní program JADERNÁ ENERGETIKA vznikl za přispění

Financováno Evropskou unií
NextGenerationEU

NÁRODNÍ PLÁN OBNOVY

MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ, MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

NPO_VUT_MSMT-16609_2022

CC BY NC SA

VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ
V BRNĚ

Financováno Evropskou unií
NextGenerationEU

NÁRODNÍ PLÁN OBNOVY

MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ, MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FAKULTA CHEMICKÁ

FAKULTA STAVEBNÍ

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

Přednáška magisterského studijního programu JADERNÁ ENERGETIKA

Radioekologie a úvod do jaderných technologií

Ekologické aspekty palivového cyklu III
– provoz jaderné elektrárny – plynné a kapalné výpusti, radiační ochrana, monitorování

Fakulta chemická

Ota Fišera

2024

CC BY NC SA

Jaderná elektrárna

Primární okruh

- Reaktor, cirkulační smyčky (čerpadla, parogenerátory, potrubí), zařízení pro příjem, skladování a výměnu paliva, systémy pro lokalizaci a likvidaci mimořádných událostí (mokrá kondenzace, kontejnment), čistící stanice radioaktivních médií, systém vzduchotechniky

Sekundární okruh

- Turbosoustrojí, strojovna, kondenzační okruh, systém zásobování JE teplem a chladící vodou

cc BY NC SA

Provoz jaderné elektrárny

- Příprava projektu → umístění → výstavba → spuštění → zkušební provoz → řádný provoz → (dlouhodobý provoz) → vyřazování a likvidace
- Řádný provoz – projektovaná životnost 20–40 let
- Prodlužování o 10–20 let – podle stavu technologií, hl. reaktorová nádoba – radiační stárnutí (křehnutí) – svědečné vzorky od spuštění
  (JEDU – životnost 30 let, prodloužena o 10 let, předpoklad o dalších 10–20)
- Výměna paliva – výměna části palivových souborů, výměna ukončena za období tzv. palivové kampaně (při čtyřleté kampani se vymění asi 1/4 souborů)
- Periodické kontroly provozovatelem i s účastí různých mezinárodních organizací

cc BY NC SA

Hlavní zdroj RL

- **Chladivo** – za provozu se stává vysoce radioaktivní (viz dále)
- Úniky **štěpných produktů** (ŠP) z palivových proutků netěsnostmi, mikrotrhlinami
  - Převážně izotopy vzácných plynů a těkavých prvků
    - Kr, Xe, I, Ru (RuO_4)
  - Méně netěkavé prvky – Sr, Cs, Zr+Nb, Ce, Hf, As, Sb, Se; aktinoidy
- **Aktivace** konstrukčních mat. a koroze – ^{51}Cr, ^{54}Mn, $^{58, 60}Co$

cc BY NC SA

Ad aktivace chladiva

- **Ekologicky nejvýznamnější**: ^{3}H a ^{14}C

$^{10}B(n, 2\alpha)^{3}H$ $^{2}H(n, \gamma)^{3}H$

$^{14}N(n, p)^{14}C$ $^{17}O(n, \alpha)^{14}C$ $^{16}O(n, {}_{3}He)^{14}C$

- **Kyslíková aktivita** → dávka IZ v okolí reaktoru

$^{16,17}O(n, p) \rightarrow$	^{16}N	^{17}N	^{19}O	
$T_{1/2}$	7 s	4 s	27 s	
$E_{\beta max}$ ($E_{\beta str}$)	4,3 +10,4 (2,75)	3,3+4,1+8,7	1,4+2,1 (1,75)	[MeV]
E_{γ}	6,1	0,9	1,35	[MeV]

cc BY NC SA

Zdroje radioaktivních látek do životního protředí

Vypařování

- Do provozních prostor primárního okruhu
- **Odpadní provozní plyny** – těkavé RN a jejich sloučeniny, aerosoly netěkavých RN
- → odvětrávání → čištění odpadních plynů před vypouštěním → **plynné výpusti** (ventilační komín)

  → **radioaktivní odpad**

Odpadní vody

- Z regenerace filtrů a ionexů
  - Obsahují ^{3}H (H_2O) a netěkavé RN
  - Čištění před vypouštěním

    → **kapalné výpusti** (vodoteče, moře)

    → **radioaktivní odpad**

CC BY NC SA

Čištění provozních plynů

a) Radioaktivní plyny

- Účinnost 99–99,9 %
- **Vymírací nádrže** – ^{133}Xe ($T_{1/2}$ = 5,3 d),
  výjimka ^{85}Kr ($T_{1/2}$ = 10,7 r) → výpusti
- **Chlazené filtry s aktivním uhlím** – zadržují Kr, Xe a aerosoly
  + produkty jejich rozpadu
  (^{89}Kr → → ^{89}Sr, ^{137}Xe → ^{137}Cs)
- **Jódový filtr** – porézní materiál impregnovaný $AgNO_3$ – izotopy I
  → skladování → vymírání
  (^{131}I: 8,1 dne → $^{131}Xe_{stab.}$; ^{133}I: 21 hod. → ^{133}Xe → $^{133}Cs_{stab.}$)

cc BY NC SA

b) Aerosoly

- Suché odlučovače
- Mokrá cesta – propírání vodou
- Filtry: azbest, celulóza, skleněná a keramická vlákna
- Rutheniový filtr: sorbent + katalyzátor

  = silikagel s povrchovou vrstvou Fe_2O_3:

  $^{103}RuO_4 \rightarrow {}^{103}RuO_{2(s)} + O_2$

CC BY NC SA

Čištění provozní vody

- Sběrné nádrže – obsahují ^{3}H, ŠP, korozní produkty
- **Čištění**:
  - Srážení iontů a koloidů:
    - vápno + soda $\rightarrow$ polusrážení Ba, Sr, Y, Zr + lanthanoidů, aktinoidů
    - fosfát $\rightarrow$ ^{90}Sr
    - $Fe(CN)_6^{4-}$ $\rightarrow$ Cs } $\rightarrow$ mokrý pevný RAO
  - Ionexy – dočišťování
- **Kapalné výpusti** – obsahují ^{3}H, ostatní RN ve stopách

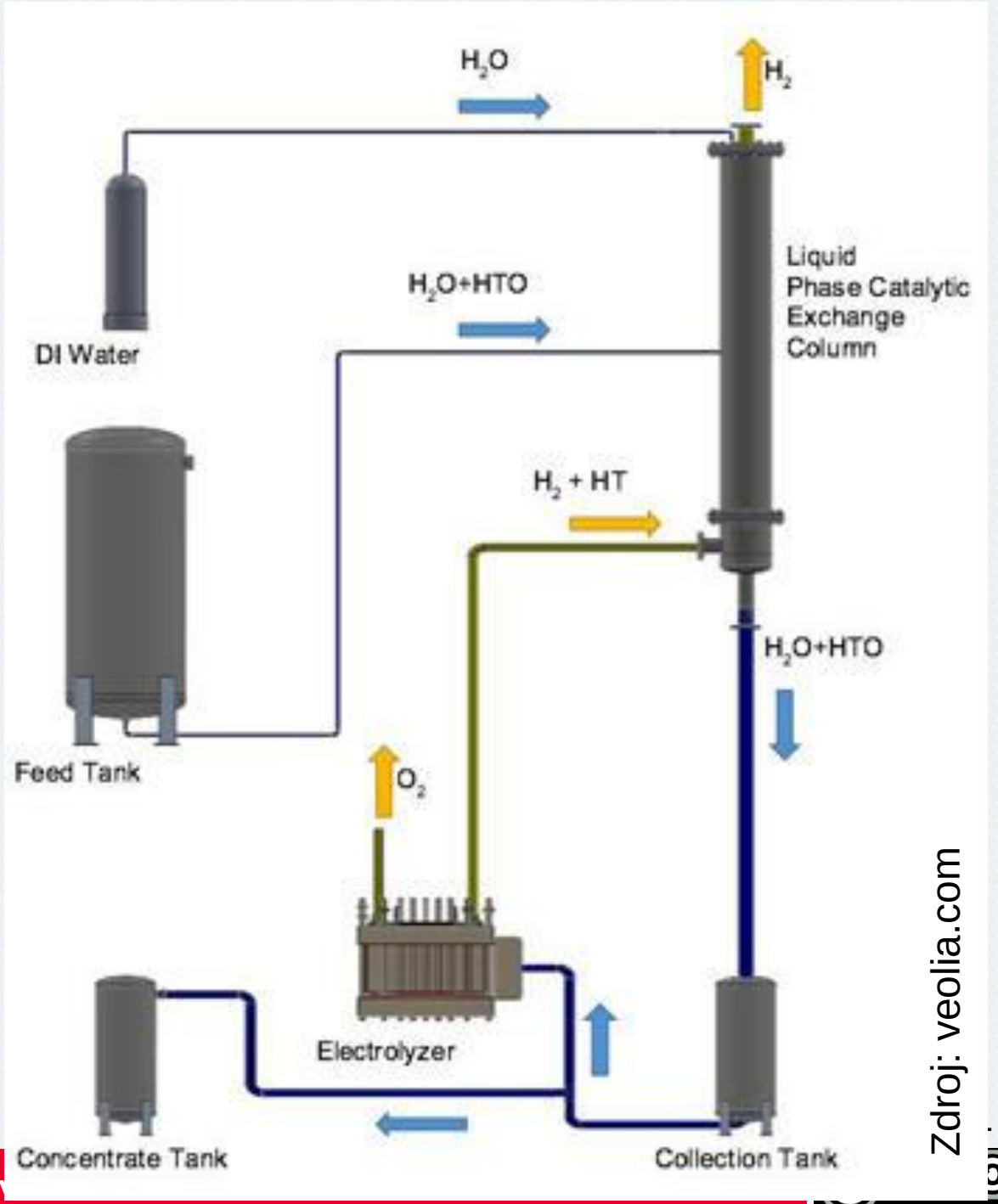
cc BY NC SA

Odstraňování ^3H z výpusti

- Experimentální odstraňování ^3H z výpusti izotopovou výměnou

$$^3H_{2(g)} + {}^3HHO \rightarrow {}^3HH + H_2O$$

  - PtC katalyzátor hydrofobizovaný teflonem
  - Pojivo TiO_2, ZrO_2 (RAO se lisuje s teflonem a pojivem do pelet)



Zdroj: veolia.com

Ekologicky významné RN z výpustí

Radionuklidy sledované ve složkách životního prostředí a potravinách

Složka ŽP/ potravina	Radionuklidy
vzduch	^{3}H ^{85}Kr ^{131}I $^{134+137}Cs$
voda	^{3}H $^{89+90}Sr$ ^{131}I $^{134+137}Cs$
mléko	$^{89+90}Sr$ ^{131}I $^{134+137}Cs$
maso	$^{134+137}Cs$
jiné potraviny	$^{89+90}Sr$ $^{134+137}Cs$
rostliny	$^{89+90}Sr$ ^{131}I $^{95}Zr+^{95}Nb$ $^{103+106}Ru$ $^{141+144}Ce$
půda	^{90}Sr $^{134+137}Cs$ $^{238+239+240}Pu$ ^{241}Am ^{242}Cm

cc BY NC SA

^{85}Kr ($T_{1/2}$ = 10,74 r; β^-, $E_{\beta max}$ = 0,67 MeV)

- A_v = 1–2 Bq/m^3 (zdvojnásobení za 20 let)
- 98 % atmosférického ^{85}Kr pochází z přepracovaného paliva
- Inertní, malá rozpustnost ve vodě, neúčastní se metabolických procesů
- Malé riziko z vnějšího ozáření ~0,1 μSv/rok na kůži

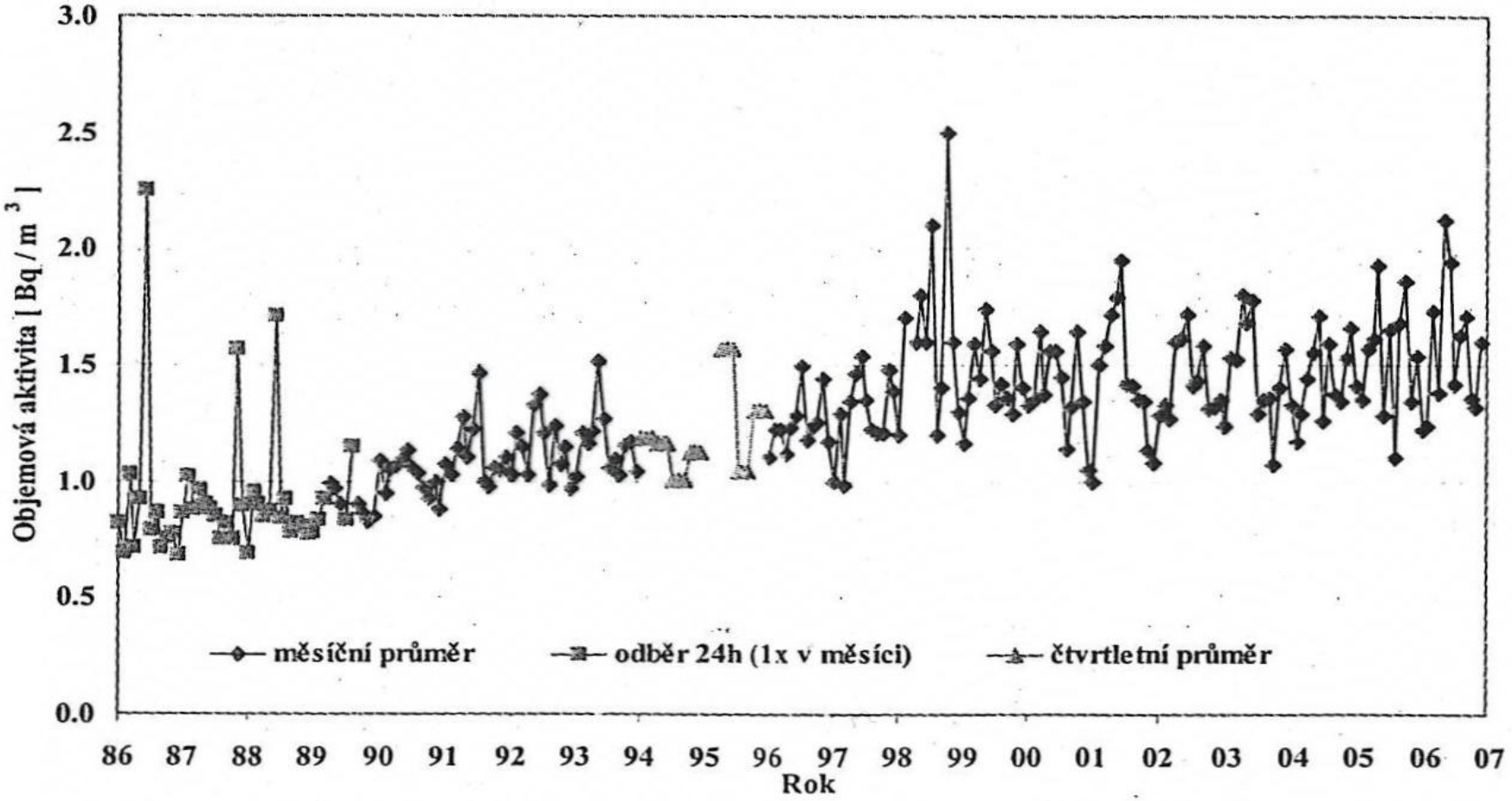
cc BY NC SA

Ad ^{85}Kr

- **Monitorování:**
  - Odběr vzduchu do tlakových lahví → vakuová linka
    → adsorpce na aktivním uhlí (chlazení $N_{2(l)}$)
    → desorpce a čištění od O_2, N_2, Rn, Ar, CH_4
- **Měření:**
  - Desorpce CH_4 + ^{85}Kr do plyn. detektorů
  - K sorbentu se přidá LSC koktejl → Kr se rozpustí v toluenu
  - Bypass větracího komína → tlaková Marinelliho nádoba

cc BY NC SA

Objemová aktivita ^{85}Kr v ovzduší Prahy v období 1986 - 2007



cc BY NC SA

^{14}C ($T_{1/2}$ = 5730 r; β^-, $E_{\beta max}$ = 0,158 MeV)

- Chemické formy v chladivu PWR:
  5–20 % CO_2, 70–95 % CH_4, C_2H_2 aj. – reakce ^{14}C s ^{3}H
- Neodstraňuje se (velmi nákladné)
- Vliv na organismus – nejvýznamnější z hlediska vnitřního ozáření z inhalace – i přes nízkou energii β
- Dukovany 2006 – celkové plynné výpusti RN 0,395 % ročního limitu, z toho 0,359 % ^{14}C, 0,03 % vzácné plyny (Temelín – 2,69 % ročního limitu)

cc BY NC SA

Ad ^{14}C

- **Monitorování:**
  - V blízkém okolí JE a ve vzdálenějších místech pro srovnání s kosmogenním původem (mimo zdroje spalování fosil. paliv)

- **Měření:**
  - **Rostlinný materiál** – měřená forma $^{14}C_6H_6$ – LSC
  - Spálit v O_2 → záchyt $^{14}CO_2$ (vymražení $N_{2(l)}$)
    → reakce s Li (800 °C) → Li_2C_2 s H_2O → $H_2{}^{14}C_2$
    → $^{14}C_6H_6$ (katal. Cr_2O_3)
  - **Vzduch:** odběr do tlakových lahví → selekt. absorpce $^{14}CO_2$ v aminech (odstranění Kr, N_2) → LSC

cc BY NC SA

Průměrné hodnoty $A_v(^{14}C)$ v plynných výpustích za období 2002-2006

uhlovodíky

elektrárna	^{14}C spalitelný (Bq m^{-3})	$^{14}CO_2$ (Bq m^{-3})	$^{14}CO_2$ (%)
Temelín, blok 1	224	15,7	6,6
Temelín, blok 2	109	4,2	3,7
Dukovany	17,9	3,4	16

Světový inventář ^{14}C (UNSCEAR, 2000)

zdroj ^{14}C	A (PBq)[a]	%
kosmogenní	12750	98,34
jaderné zkoušky	213	1,64
jaderná energetika[b]	2,8	0,022

[a] peta, 10^{15}

[b] jaderné elektrárny a přepracovatelské závody

CC BY NC SA

^{3}H ($T_{1/2}$ = 12,3 r; β^-, $E_{\beta max}$ = 0,015 MeV)

- Významný pro LWR (lehkovodní reaktory)
- Aktivita závisí na výkonu reaktoru
- **Kapalné výpusti** – jediný významný RN
  - JEDU: 18–20 TBq/rok
  - Chemická forma $^{3}H_2O$ → vodní cyklus → podzemní voda, pitná voda, → biomasa
- **Plynné výpusti** – ^{3}HH, $^{3}H_2O$, $^{3}H_4C$ → biomasa, voda
  - JEDU: 0,4 TBq/rok

cc BY NC SA

Ad ^{3}H

- Hlavní zdroj příjmu – pitná voda (méně potraviny)
- T_{ef} = 10–20 dnů ve formě vody (pro organicky vázaný H je delší)
- E (okolí JE) = < 2 μSv/rok z vody

- Z výpustí se neodstraňuje – velmi drahé
  → nastaveny vypouštěcí limity

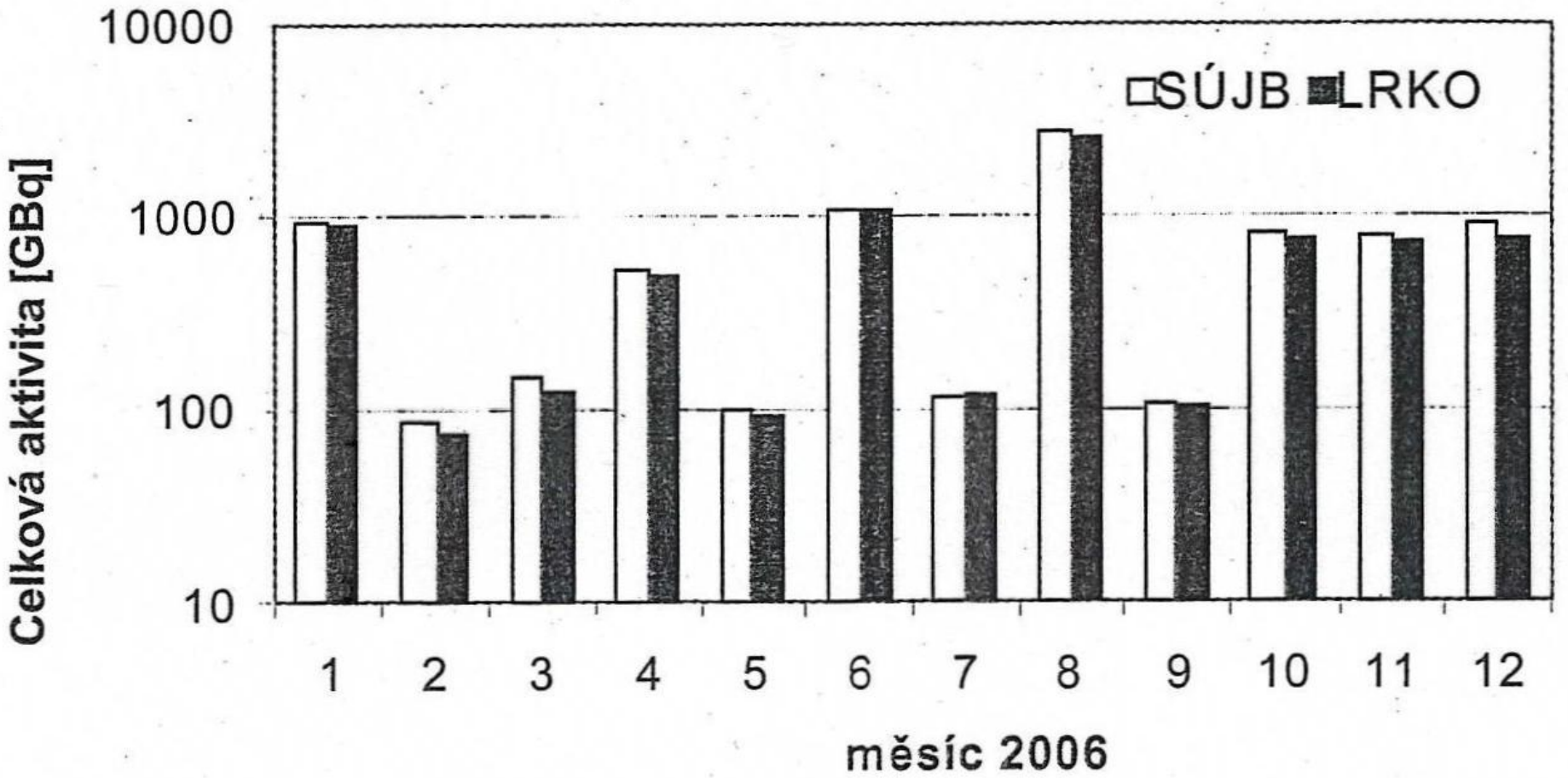
cc BY NC SA

Ad ^{3}H

- **Monitorování:**
  - **Vzduch** v blízkosti JE – průtokový scintilační detektor
  - **Voda** – zkoncentrování elektrolýzou – THO se elektrolyzuje obtížněji, vzorek 1 500 ml → 20 ml, nízká proudová hustota, výtěžek ~80 % → 10 ml se destiluje pro LSC
  - **Biologický materiál** – spálení → THO → LSC

cc BY NC SA

Celková aktivita ^{3}H vypouštěná z JE Dukovany v roce 2006



cc BY NC SA

Obsah ^{3}H ve vodě z alpských ledovců ve Švýcarsku

Období	A_v (Bq l^{-1})
1952	1
1963	740
1975	10
1975-1998	1,5-5,5

BY NC SA

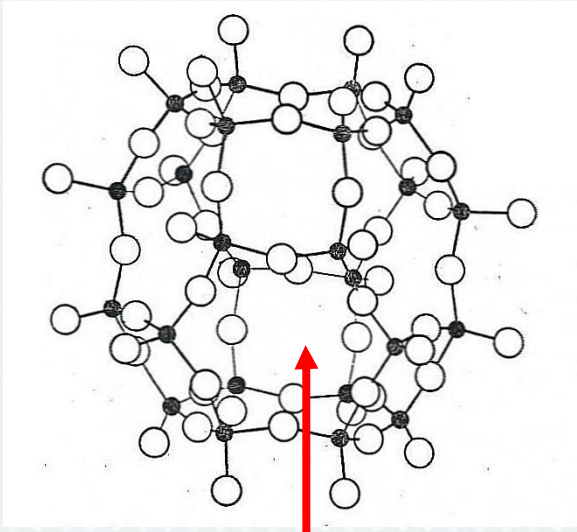
^{137}Cs ($T_{1/2}$ = 30,17 r; β^-, $E_{\beta max}$ = 1,17 MeV)

^{134}Cs ($T_{1/2}$ = 2,06 r; β^-, $E_{\beta max}$ = 0,658 MeV)

- ^{137}Cs – jediný RN důležitý z dlouhodobého hlediska
- ^{134}Cs – „čerstvé“ Cs – po nehodách a haváriích
- A(Cs) v kapalných výpustích JE je velmi nízká – čištění;
  u plynných výpustí bezvýznamná – odstraňování aerosolů
- Zařazeno kvůli havárii Černobylu

CC BY NC SA

- Chemické vlastnosti:
  - rozpustné sloučeniny
  - pH a redox. pot. nemá vliv
  - nízká povrchová hustota náboje → netvoří komplexy



- Vysoká sorpční kapacita jílových částic
  - v půdě, sedimentech, suspendované částice a koloidy ve vodě
  - iontová výměna kombinovaná s dutinovým efektem
  - významná výměna Na^+/Cs^+

$$1/n\ M^{n+}(jíl) + {}^{137}Cs^+(aq) \leftrightarrow {}^{137}Cs^+(jíl) + 1/n\ M^{n+}(aq)$$

CC BY NC SA

- Rozdělovací K ~ 2000 i při nízkých konc. Cs → silná fixace Cs^+ v horních vrstvách půdy → velmi pomalé vyplavování (v jílovitých půdách 18 let po testech jad. zbraní je ^{137}Cs v horních 5 cm, při orbě 25 cm půdy)

- Volné ionty $^{137}Cs^+$ se v půdní vodě ani v povrchových vodách téměř nevyskytuje – díky nízkým výpustem (I i g) a sorpci na jílu

- Organické složky půdy (huminové kyseliny) se vážou na jíl
  → blokují přístup Cs → zvyšují mobilitu Cs

- Současný nepatrný obsah v ŽP (půda, rostliny, potraviny) je pozůstatek jaderných testů a Černobylu

Monitorování ^{137}Cs v okolí JE Dukovany a JE Temelín (2005)*

složka	JE Temelín A_m (Bq/m^3, m^2, kg)	JE Dukovany A_m (Bq/m^3, m^2, kg)
aerosoly	$9.10^{-7} - 1{,}4.10^{-6}$	$< 3.10^{-6}$
půda	5,1 – 190	0,27 – 810
voda povrchová	< 0,013	< 0,014
voda pitná	< 0,013	< 0,014

*u mnoha vzorků pod mezí detekovatelnosti

Hmotnostní aktivita ^{137}Cs (Bq kg^{-1} sušiny) ve vodárenském kalu a říčním sedimentu (2005)

povodí	vodárenský kal	říční sediment
Odra – Kružberk	9	3
Ohře – Fláje	26	84
Labe – Křižanovice	11	8
Svratka – Vír	10	44
Vltava - Římov	8	116

Místa mimo oblast JEDU a JETE

BY NC SA

^{90}Sr ($T_{1/2}$ = 28,8 r; β^-, $E_{\beta max}$ = 0,546 MeV)

^{89}Sr ($T_{1/2}$ = 50,6 d; β^-, $E_{\beta max}$ = 1,501 MeV)

- Úniky z JE bezvýznamné (díky čištění výpustí + malá těkavost)
- Význam při nehodách s únikem do ŽP
- Dnes pouze ^{90}Sr – v extrémně nízkých koncentracích – testy jaderných zbraní a Černobyl
- Čerstvá depozice na povrchu půdy rychle mizí – migrace do hlubších vrstev + příjem rostlinami

cc BY NC SA

- Chemické vlastnosti + fyziologie: analog Ca^{2+}

Koeficienty přenosu ^{90}Sr

přenos	F_T
půdní voda → pevná složka půdy	80 - 150 ml g^{-1}
půda → píce	0,05
půda → ovoce, zelenina	0,3
voda → rostliny	460 dm^3 kg^{-1}
voda → ryby	30 dm^3 kg^{-1}
píce → maso	0,003[a]
píce → mléko	0,002[a]

[a] obsah ^{137}Cs v potravě (Bq kg^{-1}) při příjmu zvířetem Bq/den

- Skot působí jako dekontaminační činitel
  → 85 % Sr z trávy se nedostane do mléka

cc BY NC SA

- Vstup do organismu potravou
- Kritický orgán: kost T_{ef} = 15 roků

Objemová aktivita ^{90}Sr v mléce (SÚRO, 2005)

dodavatel	A_v (Bq l^{-1})
mlékárny SČ kraje	0,017 – 0,051
obchodní síť SM kraje	0,024 – 0,049
obchodní síť OL kraje	0,030 – 0,083
mlékárna Kunín	0,018 – 0,077
mlékárna Olomouc	0,024 – 0,073
mlékárna Val. Meziříčí	0,020 – 0,073
mlékárna Zábřeh	0,015 – 0,061

cc BY NC SA

^{131}I ($T_{1/2}$ = 8 dní; β^-, $E_{\beta max}$ = 0,807 MeV)

- Úniky z JE při provozu bezvýznamné (díky čištění výpustí)
- Význam z krátkodobého hlediska při nehodách s únikem do ŽP
- **Chemická forma:**
  - V plynných výpustích: I_2, HIO, CH_3I
  - V hydrosféře: I^-
  - V půdě: I^- = silné zadržování na částicích s org. původem a v mikroorganismech (nejasný mechanismus – patrně jodace)

cc BY NC SA

- Příjem rostlinami – **foliární depozice**; kořenový systém bezvýznamný (pomalý děj oproti $T_{1/2}$)
- **Vstup do organismu** – velmi rychle řetězcem tráva – dobytek – mléko; případně přímo ze zeleniny
- **Kritický orgán** – štítná žláza; riziko je větší u dětí (konzumace mléka)
- Blokování příjmu ^{131}I: tablety 50–200 mg KI – výhradně v případě prokázaného většího úniku ^{131}I, po doporučení hygienických orgánů

BY NC SA

Provoz JE z hlediska radiační ochrany obyvatelstva

- Radiační situace v JEDU a JETE a jejich okolí
- Výpočet z modelů šíření radionuklidů životním prostředím
- WANO: JEDU patří mezi 20 % nejlépe provozovaných JE
  JEDU je jedna z nejlepších, které kdy navštívili (2009)

cc BY NC SA

Aktivita výpustí do ovzduší a kapalných výpustí

JE Temelín

Radionuklid	výpusti do ovzduší A [Bq]		
	Rok		
	2014	2015	2016
vzácné plyny	$9{,}86.10^{12}$	$1{,}32.10^{13}$	$4{,}04.10^{12}$
aerosoly	$2{,}36.10^{6}$	$3{,}63.10^{8}$	$3{,}2.10^{6}$
jódy	$7{,}79.10^{7}$	$7{,}62.10^{7}$	$3{,}06.10^{7}$
^{14}C	$7{,}30.10^{11}$	$5{,}84.10^{11}$	$5{,}56.10^{11}$
^{3}H	$1{,}58.10^{12}$	$1{,}78.10^{12}$	$2{,}10.10^{12}$
celkem E (Sv)	$1{,}87.10^{-7}$	$2{,}22.10^{-7}$	$1{,}12.10^{-7}$
čerpání L (%)	0,47	0,56	0,28

Radionuklid	kapalné výpusti A [Bq]		
	2014	2015	2016
^{3}H	$5{,}27.10^{13}$	$5{,}11.10^{13}$	$4{,}48.10^{13}$
štěpné produkty	$4{,}43.10^{7}$	$6{,}48.10^{8}$	$4{,}91.10^{7}$
celkem E (Sv)	$2{,}20.10^{-6}$	$2{,}18.10^{-6}$	$1{,}87.10^{-6}$
čerpání L (%)	73,2	72,6	62,4

JE Dukovany

výpusti do ovzduší A [Bq]		
Rok		
2014	2015	2016
$3{,}43.10^{12}$	$3{,}05.10^{12}$	$2{,}30.10^{12}$
$2{,}31.10^{7}$	$1{,}94.10^{7}$	$1{,}56.10^{7}$
$1{,}7.10^{6}$	$1{,}3.10^{6}$	$1{,}3.10^{6}$
$6{,}86.10^{11}$	$7{,}38.10^{11}$	$5{,}77.10^{11}$
$9{,}45.10^{11}$	$7{,}73.10^{11}$	$8{,}64.10^{11}$
$1{,}40.10^{-7}$	$1{,}49.10^{-7}$	$1{,}17.10^{-7}$
0,35	0,37	0,29

kapalné výpusti A [Bq]		
2014	2015	2016
$2{,}04.10^{13}$	$1{,}78.10^{13}$	$1{,}04.10^{13}$
$7{,}6.10^{7}$	$9{,}0.10^{6}$	$1{,}03.10^{7}$
$2{,}55.10^{-6}$	$2{,}23.10^{-6}$	$1{,}34.10^{-6}$
42,5	37,3	22,3

Zdroj: Národní zpráva České republiky pro účely Společné úmluvy o bezpečnosti při nakládání s vyhořelým palivem a o bezpečnosti při nakládání s radioaktivními odpady. SUJB. 2018

CC BY NC SA

- Epidemiologické studie zdravotního stavu obyvatelstva v okolí JE
- Studie MU a SZÚ Praha, 1996 – Zdravotní stav obyvatel v okolí JEDU – úmrtnost mužů, nádorová onemocnění, porodní váha dětí
- Malé odchylky od celostátního průměru nejasné
  → multifaktoriální problém (skladby výživy, kouření, nízká pohyblivost, kvalita ŽP,…) + psychologické vlivy (stres, sociální prostředí, zdravotní a kulturní tradice, zaměstnanost)
- **Je však zřejmé, že provoz JE nemá negativní vliv**

cc BY NC SA

Úmrtnost mužů v okolí jaderné elektrárny Dukovany a v kontrolních skupinách*

Lokalita	Úmrtnost celkem	Úmrtnost na srdeční a cévní choroby	Úmrtnost na nádorová onemocnění
pásmo do 5 km od EDU	97,33	96,28	94,43
pásmo 5-10 km	92,33	99,17	74,71
pásmo do 10 km	94,08	98,18	81,72
Kontrolní skupiny:			
západ od EDU	107,07	114,54	108,44
jihozápad	107,06	110,70	100,25
jih	106,7	100,25	105,8
Znojmo	93,97	97,33	97,25
Třebíč	79,33	84,22	81,53

*z výzkumné zprávy „Zdravotní stav obyvatelstva v oblasti energetické soustavy Dalešice – Dukovany“ – MU Brno, SZÚ Praha, 1996 (100 = celostátní průměr)

cc BY NC SA

Obecný vztah JE k životnímu protředí

- **Emise CO_2** – nepatrné, z jiných fází palivového cyklu (těžba a úprava rudy, stavba JE); významné pro skleníkový efekt
  - Úspory nevyprodukovaného CO_2 obrovské – JE v USA v letech 1973–1996 zabránili emisi 3,4 mld. t CO_2 = spálení 2 mld. t uhlí
  - JEDU 1985–2005: 240 292 GWh → úspora 190 mil. t uhlí = 240 mil. t CO_2
  - Úspora fosilních paliv pro budoucnost a jiné využití
  - Úspora O_2 – nespalují se fosilní paliva

cc BY NC SA

Roční spotřeba paliva pro 1300 MW(e) elektrárnu (SRN)

Jaderná elektrárna	*Uhelná elektrárna*
26 t obohaceného uranu	4 milióny t černého uhlí
136 t přírodního uranu	12 miliónů t hnědého uhlí
(12000 t uranové rudy)	

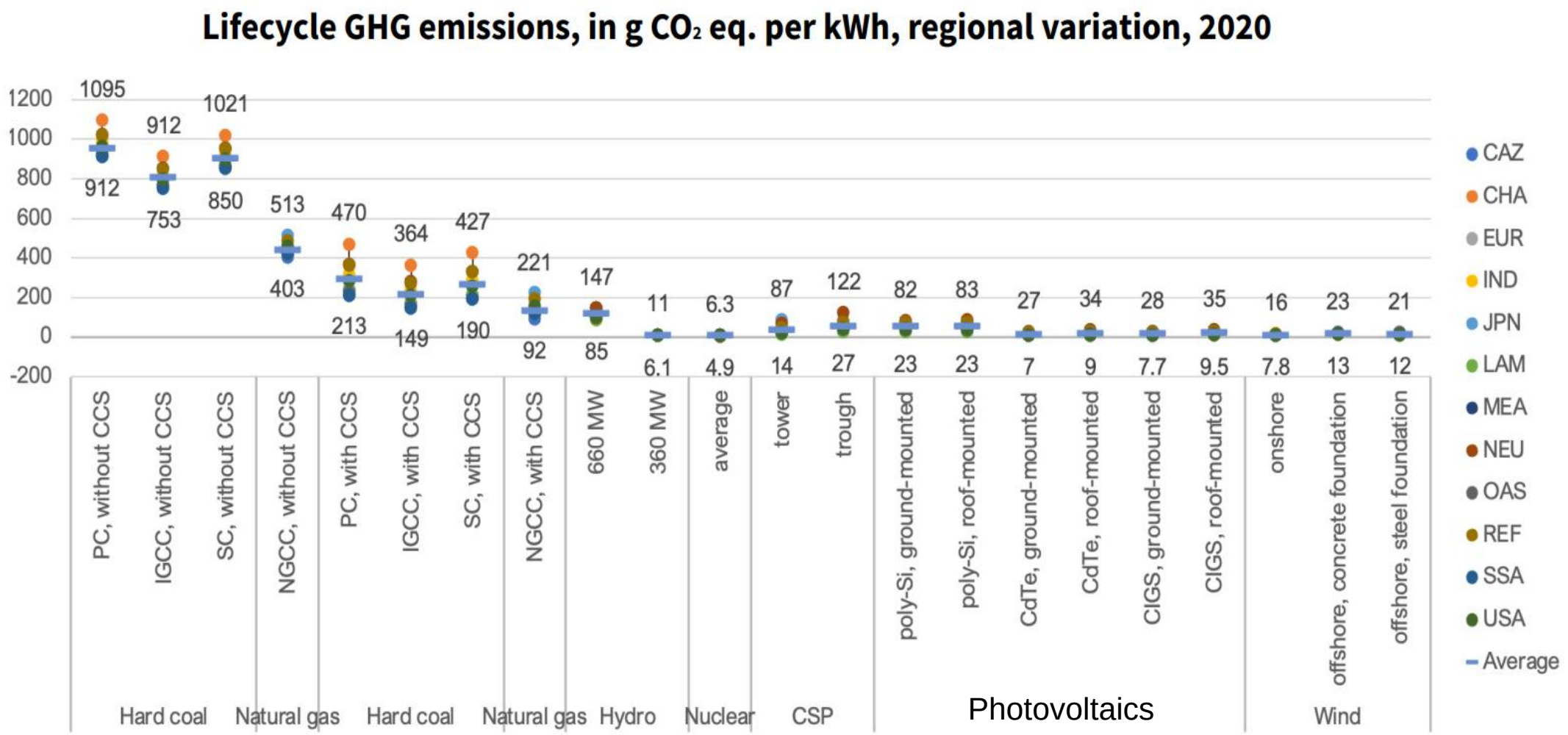
cc BY NC SA

- **Emise SO_2 a NO_x** – žádné
  – emise + prachové částice ze spalování fosilních paliv (1/2 v energetice) mají zřejmé zdravotní účinky

- **Další výhody JE:**
  – Odlehčení dopravy a úspora energie (fosil. paliv) při dopravě
  – Malý objem odpadů (ale radioaktivních)
  – Nejnižší úmrtnost v souvislosti s výrobou energie z energetických technologií
  – Dostupnost a jistota dodávek palivových surovin – význam pro světovou ekonomiku – ropa a zemní plyn z Blízkého východu, nezávislost na krizích v těžebním průmyslu (stávky horníků v Anglii, OPEC – ropná krize)

cc BY NC SA

Figure 37 Lifecycle greenhouse gas emissions' regional variations for year 2020. Variability is explained by several factors: electricity mix (all regions), methane leakage rates (fossil fuels), load factors (renewables). Nuclear power is modelled as a global average except for back-end.

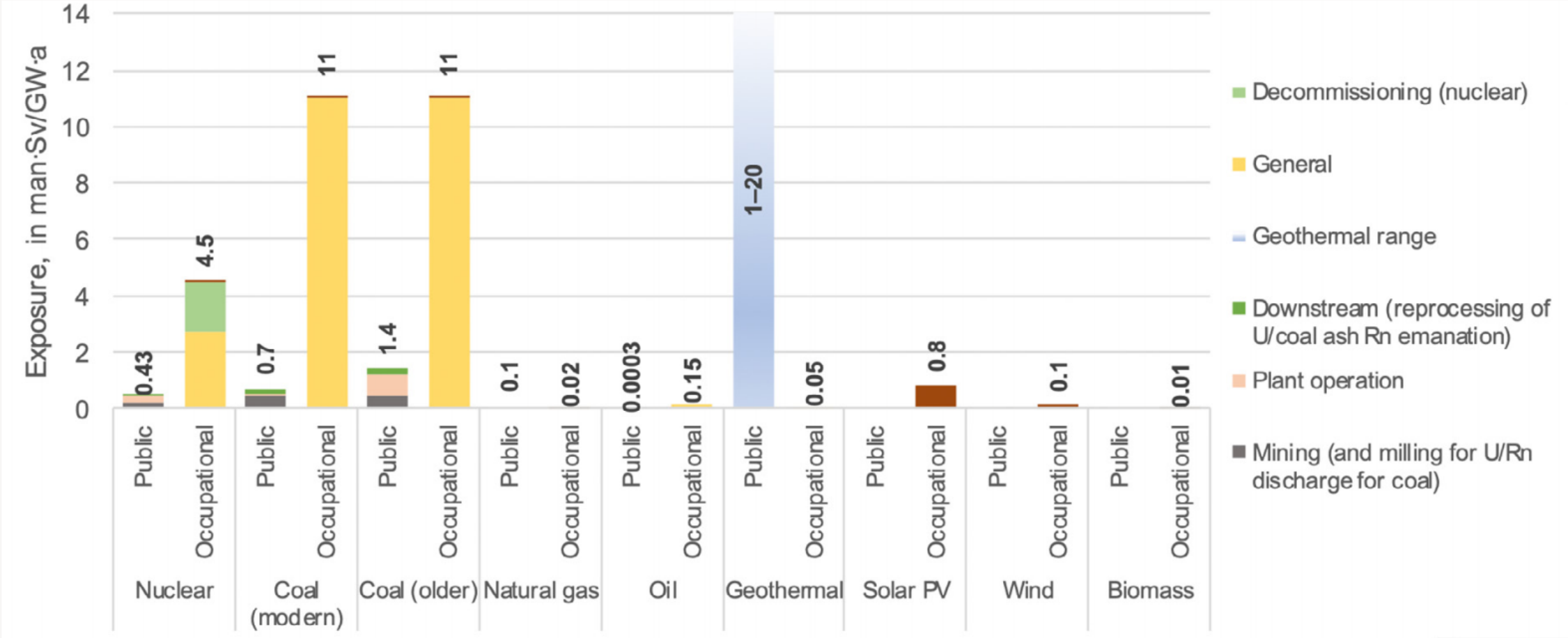


Zdroj: Life Cycle Assessment of Electricity Generation Options; UNECE; 2022

CC BY NC SA

Všechny zdroje energie mají za následek určitou úroveň vystavení pracovníků a veřejnosti radionuklidům.

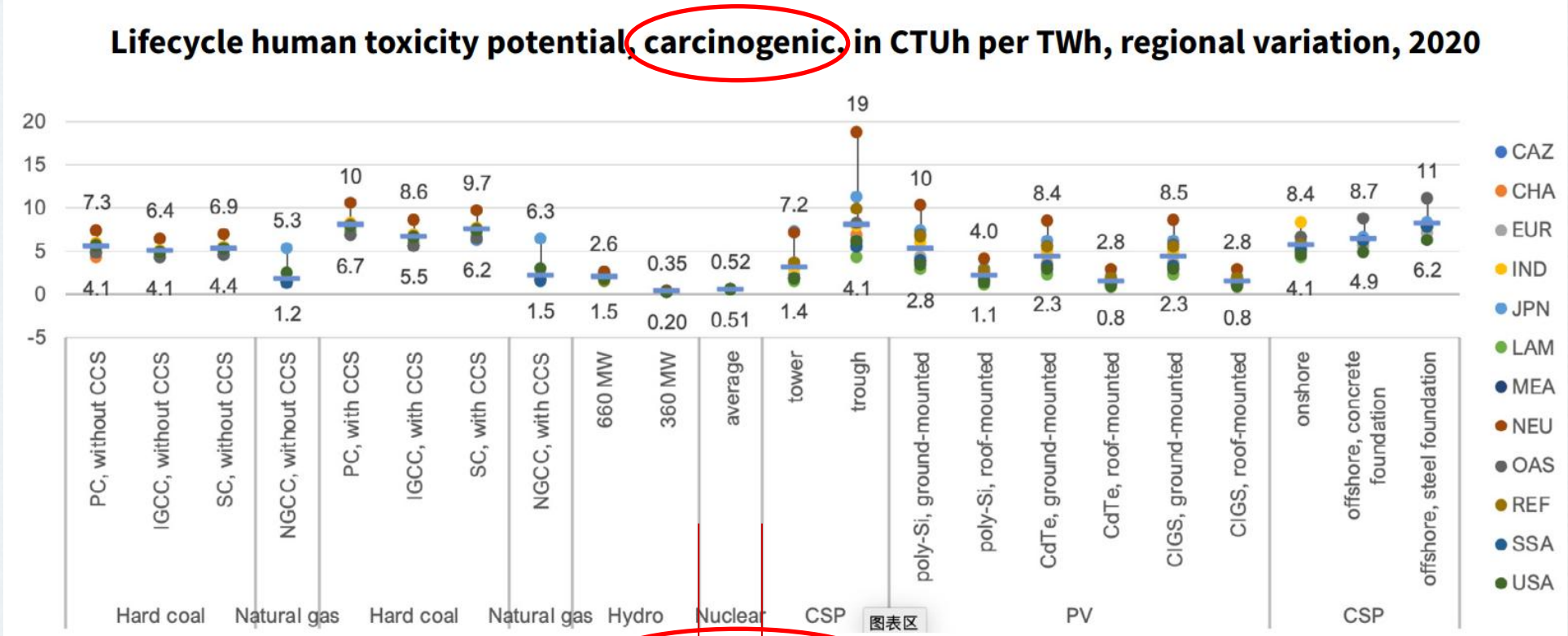
Figure 40 **Public and occupational exposures from electricity generation, normalized to electricity generated, in man-Sievert per GW-annum (8760 GWh).**

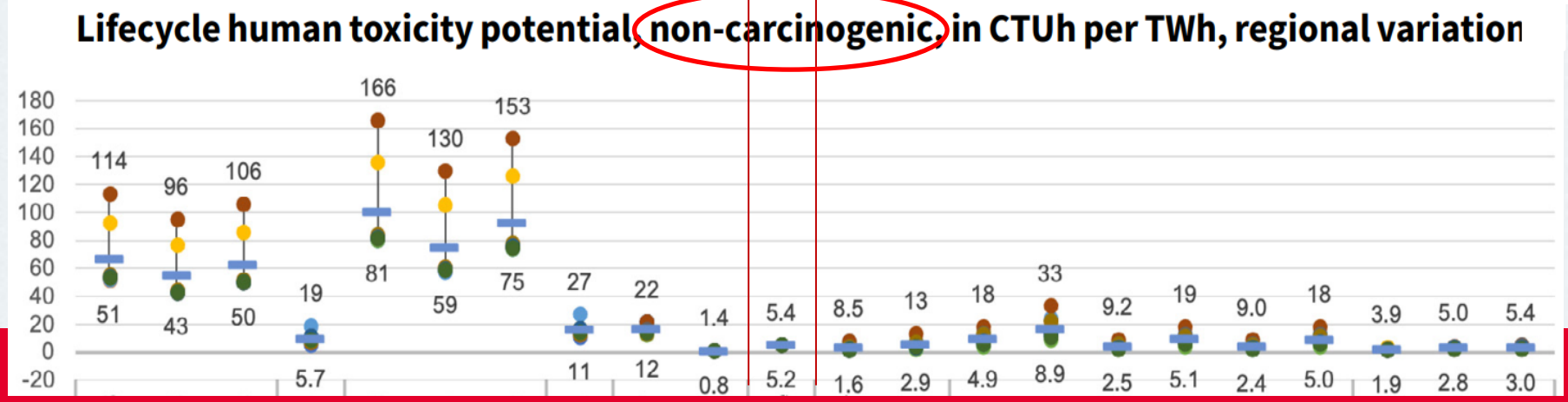


41

CC BY NC SA

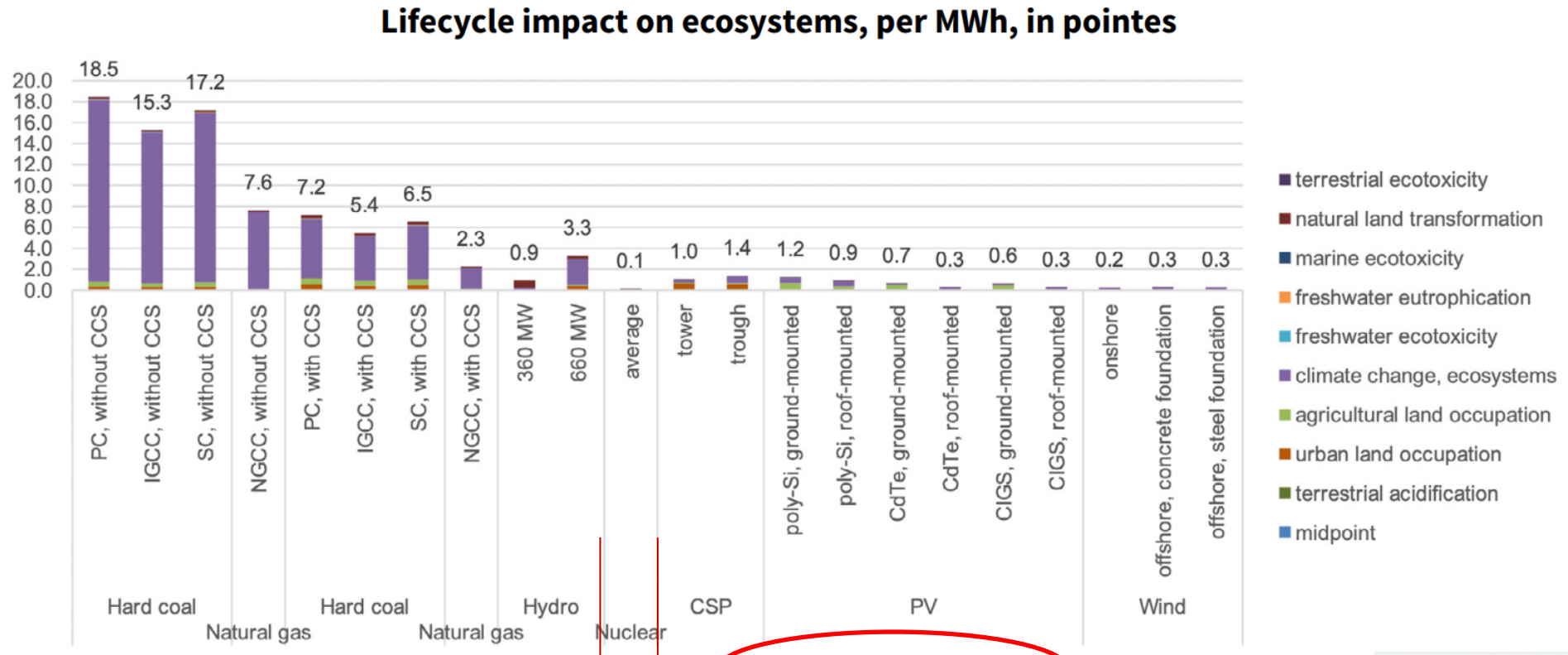
Figure 42 Lifecycle human toxicity (carcinogenic)' regional variations for year 2020. Variability is explained by several factors: electricity mix (all regions), region of extraction (fossil fuels), load factors (renewables). Nuclear power is modelled as a global average except for front-end.

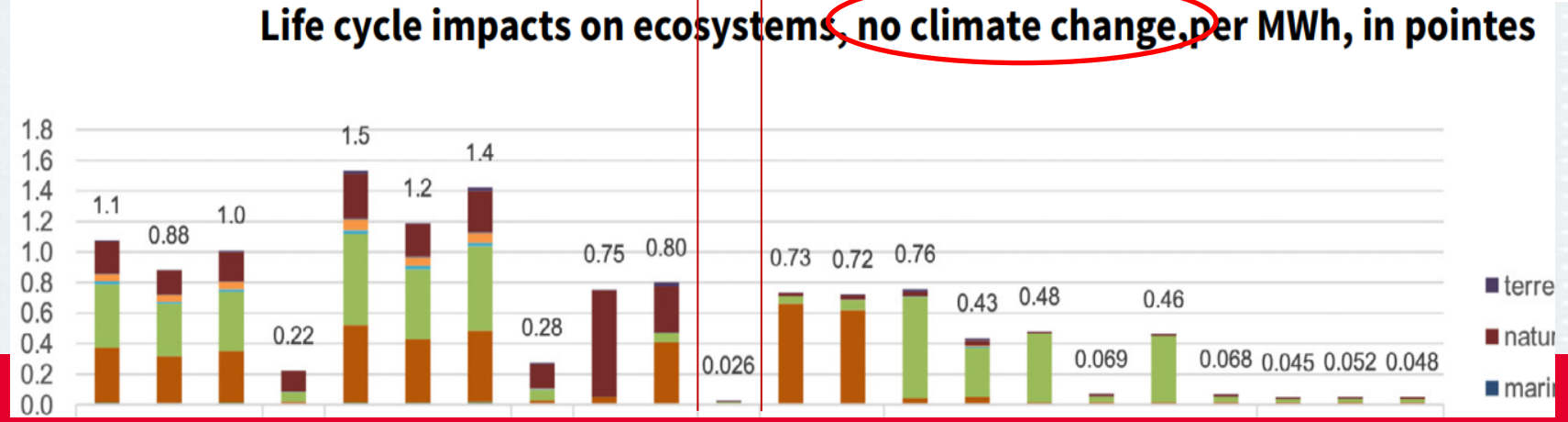




CC BY NC SA

Figure 48 **Lifecycle impacts on ecosystems, in points, including climate change.**
Note on unit: 1 point is equivalent to the impacts (in species-year) of 1 person (globally) over one year.





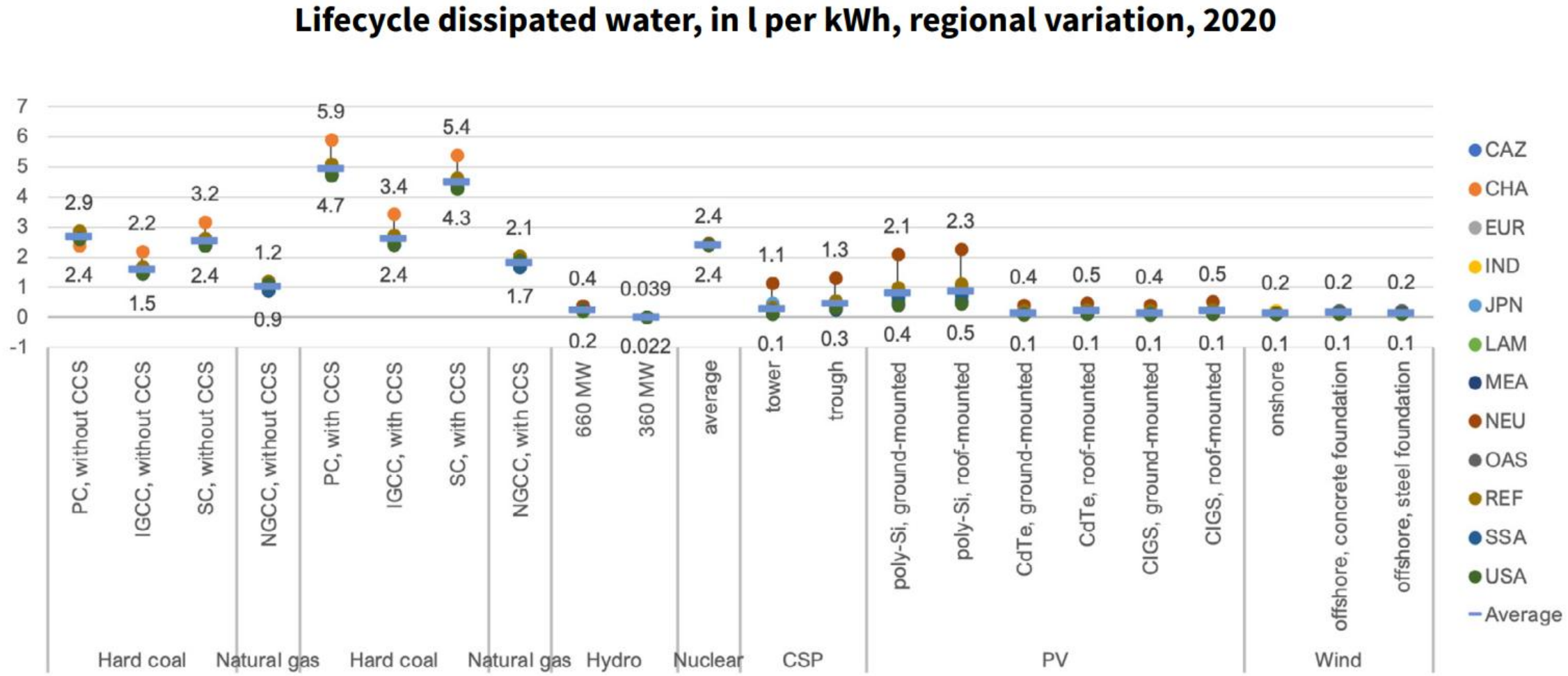
CC BY NC SA

Nevýhody JE vůči životnímu prostředí

- Radioaktivita paliva → výpusti
- Radioaktivní odpad, nutnost uchovávat vyhořelé palivo
- Vysoké investiční náklady, dlouhá doba výstavby
- Tepelné znečištění + H_2O je skleníkový plyn

cc BY NC SA

Figure 44 Lifecycle water requirement regional variations for year 2020. Variability is explained by several factors: electricity mix (all regions), methane leakage rates (fossil fuels), load factors (renewables). Nuclear power is modelled as a global average except for back-end.



CC BY NC SA

Magisterský studijní program JADERNÁ ENERGETIKA vznikl za přispění

Financováno Evropskou unií
NextGenerationEU

NÁRODNÍ PLÁN OBNOVY

MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ, MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

NPO_VUT_MSMT-16609_2022

CC BY NC SA

VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ
V BRNĚ

Financováno Evropskou unií
NextGenerationEU

NÁRODNÍ PLÁN OBNOVY

MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ, MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FAKULTA CHEMICKÁ

FAKULTA STAVEBNÍ

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

Přednáška magisterského studijního programu JADERNÁ ENERGETIKA

Radioekologie a úvod do jaderných technologií

Ekologické aspekty palivového cyklu IV
zpracování vyhořelého jaderného paliva – PUREX proces, ekologie

Fakulta chemická

Ota Fišera

2024

CC BY NC SA

Vyhořelé jaderné palivo

- Zákon č. 263/2016 Sb., atomový zákon, § 3, odst. 2, písm d
  Vyhořelé jaderné palivo = ozářené jaderné palivo, které bylo trvale vyjmuto z aktivní zóny jaderného reaktoru

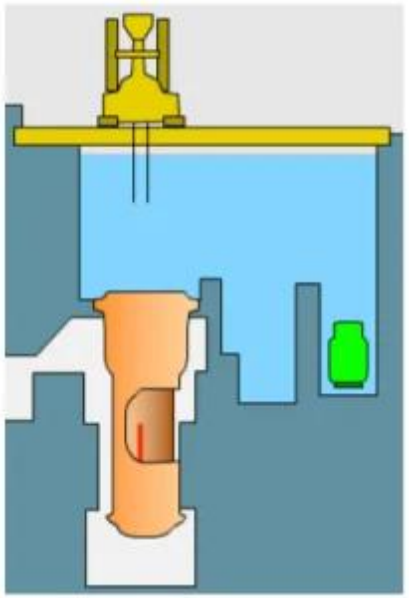
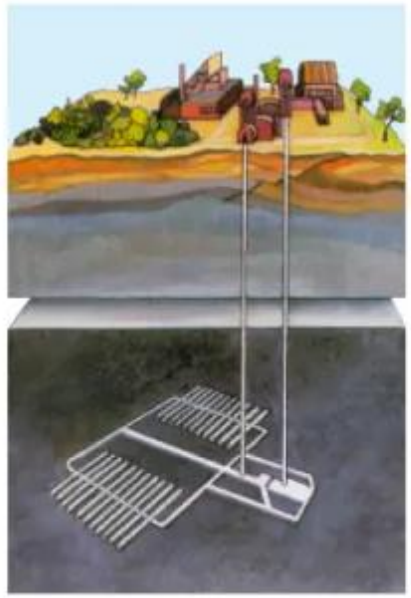
Jeho cesta začíná při **výměně paliva.**

- Výměna části paliva při zastaveném reaktoru zpravidla jednou za 1–1,5 roku
- Náhrada části palivových kazet (1/6 až 1/3)
- Použité palivové soubory se pod hladinou vody kanálem převezou do bazénu vyhořelého paliva

→ **Použité („vyhořelé“) jaderné palivo**

CC BY NC SA

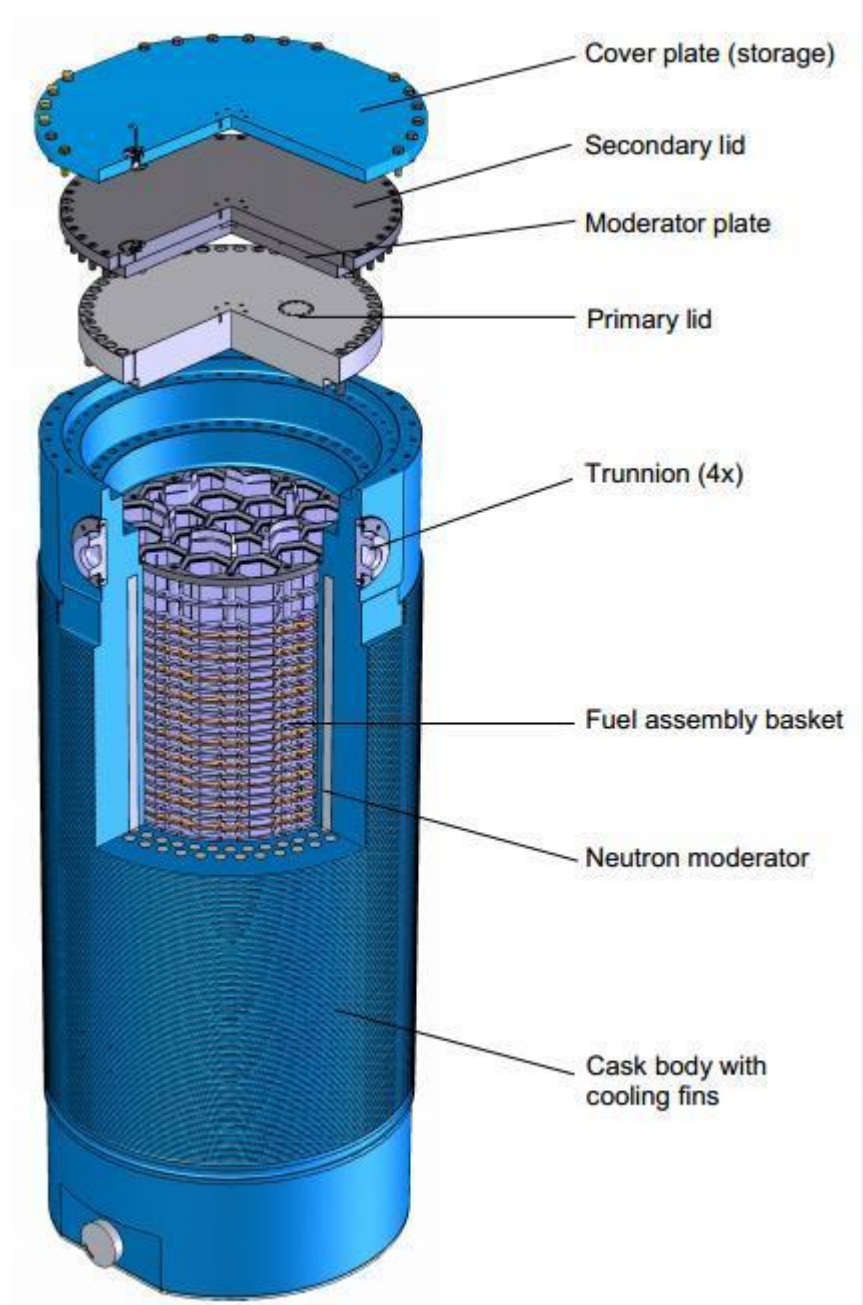
Cesta paliva

1 až 2 roky	4 roky	5 až 10 let	50 až 60 let	stovky až tisíce let
				
Sklad čerstvého paliva →	Reaktor →	Bazén skladování →	Mezisklad →	Hlubinné úložiště

cc BY NC SA

Obalový soubor pro přepravu a skladování CASTOR

- tlustostěnná ocelová nádoba
- hermetická víka
- žebrované stěny



Zdroj: https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/40/048/40048126.pdf

CC BY NC SA

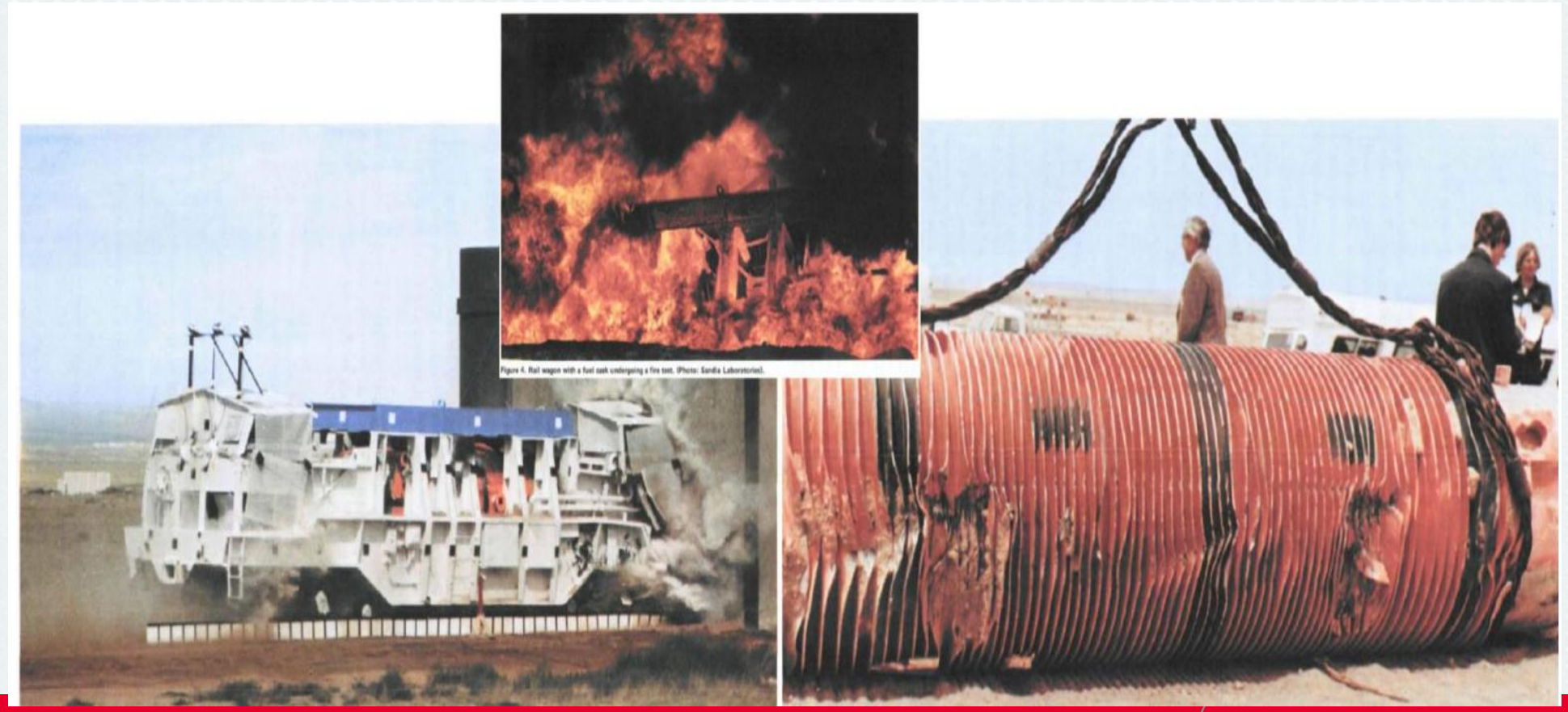
JE	TEMELÍN	DUKOVANY
Typ	**CASTOR 1000/19**	**CASTOR 440/84(M)**
Vnější prům. (tl. stěny 37 cm)	2.3 m	2.66 m
Výška	5.5 m	4.2 m
Hmotnost (prázdný)	97.8 t	93.7 t
Hmotnost (plný)	115.5 t	112 t
Počet palivových souborů	19 ks	84 ks
Materiál	Ocel	Železo
Materiál vnitřní vrstvy	Borovaná ocel	Borovaný hliník
Materiál neutronového stínění	polyethylen	polyethylen
Vnitřní výplň	helium	helium
Max zbytkový tepelný výkon	17.5 kW_t	
Tlak He mezi víky	0.6 MPa	

cc BY NC SA

Testování obalových souborů

- 800 °C po dobu 30 minut
- 15 m pod vodou 8 hodin
- 200 m pod vodou 1 hodinu
- hermetičnost a těsnost

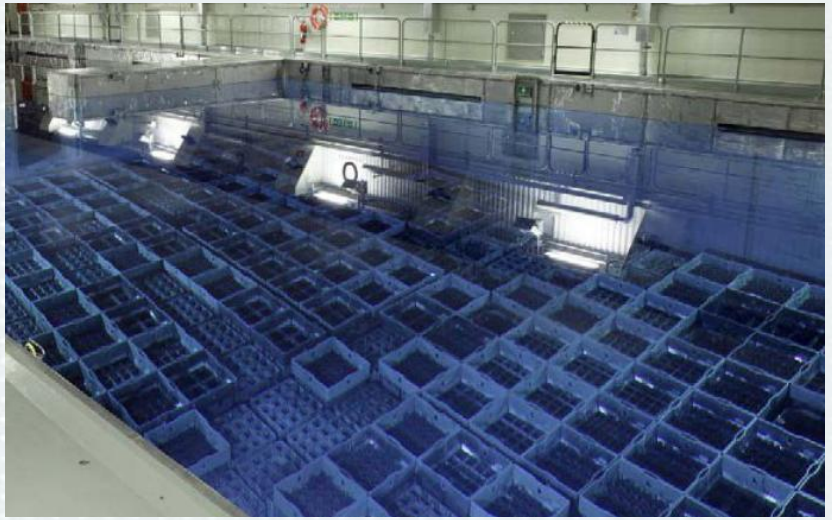
- Pád z výšky 9 m na pevnou podložku
- Pád na trn (20 cm, prům, 15 cm) z výšky 1 m
- Pád tělesa 500 kg na OS z výšky 9 m



cc BY NC SA

Suché skladování VJP

- Mezisklad vyhořelého paliva
  = přízemní hala
- Přímo v areálu JE
- Skladovací část
  – stínicí betonová stěna
    vysoká 5 m
    tloušťka 50 cm



- Mokré skladování = bazén

Zdroj: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/P1799_web.pdf

8

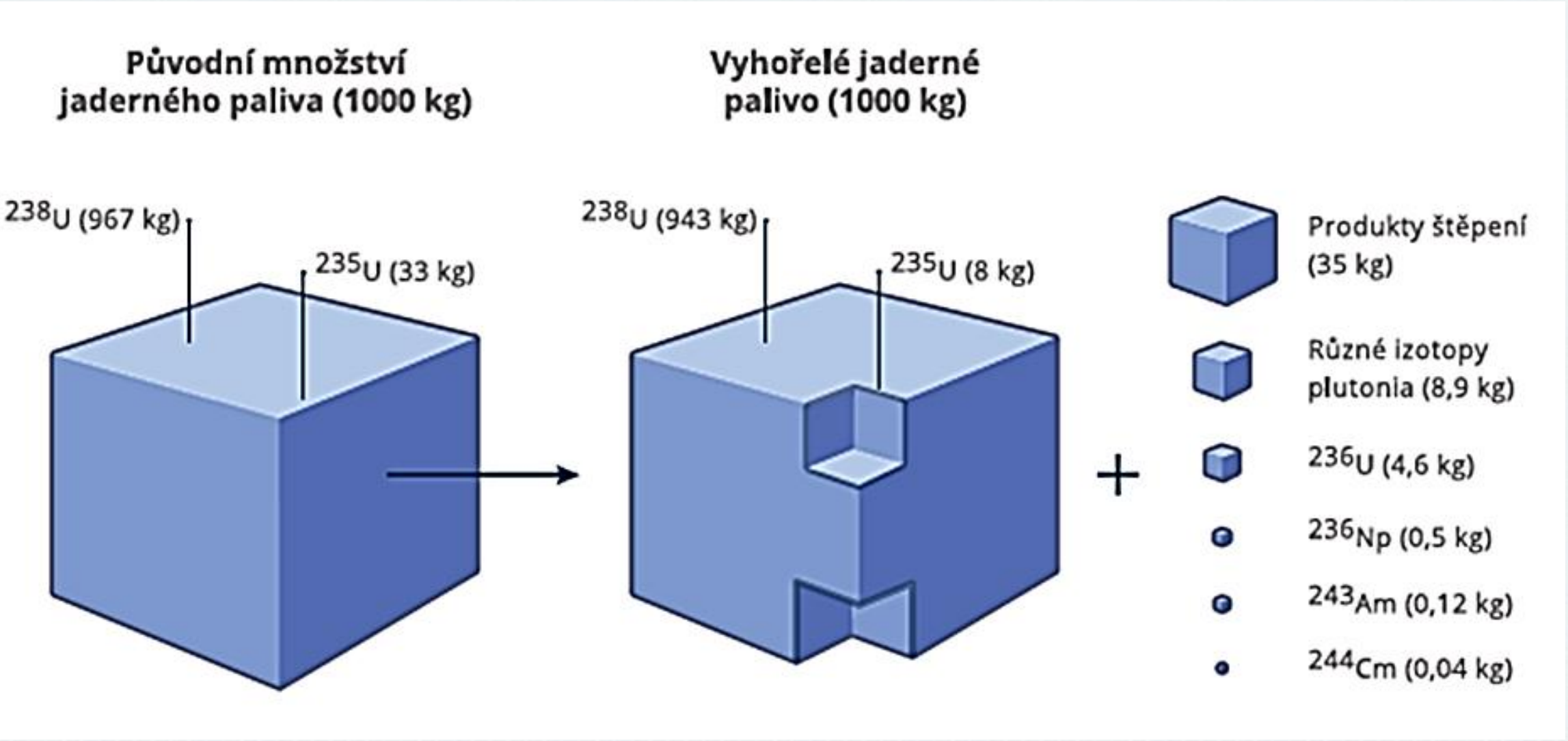
CC BY NC SA

Vyhořelé jaderné palivo

- < 1 % objemu všech jaderných odpadů
- > 90 % veškeré radioaktivity
- produkce ročně cca 30 tun (1000 MW reaktor)
  ≈ 1,5 m^3

9

cc BY NC SA


Původní množství jaderného paliva (1000 kg)
238U (967 kg)
235U (33 kg)
Vyhořelé jaderné palivo (1000 kg)
238U (943 kg)
235U (8 kg)
Produkty štěpení (35 kg)
Různé izotopy plutonia (8,9 kg)
236U (4,6 kg)
236Np (0,5 kg)
243Am (0,12 kg)
244Cm (0,04 kg)

Zdroj: cez.cz

Nejvýznamnější radionuklidy ve vyhořelém palivu VVER-400 a VVER-1000 pro období 0–9 let po vyvezení z reaktoru

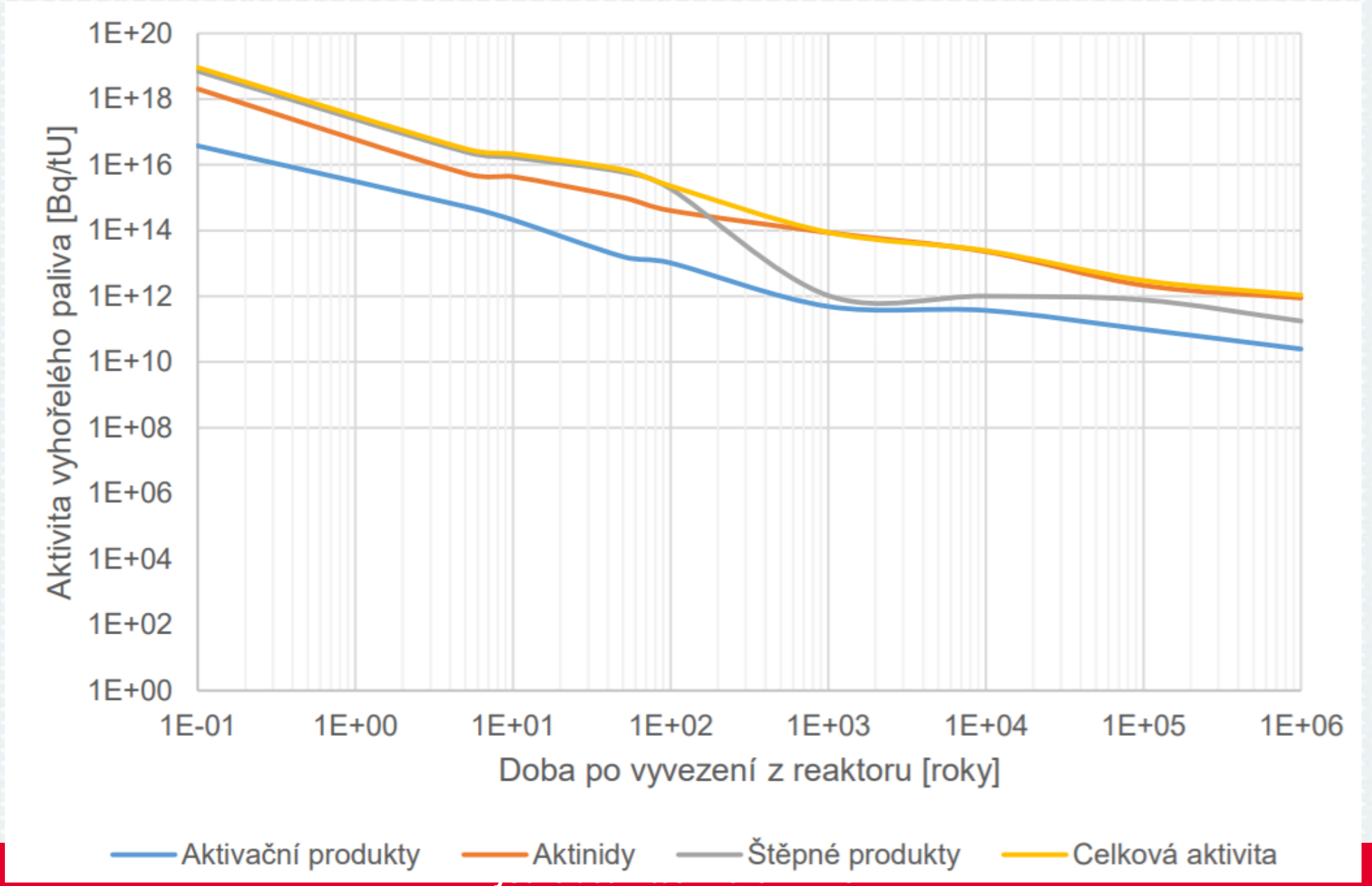
Štěpné produkty	Poločas rozpadu	Aktinidy a dceřiné produkty	Poločas rozpadu	Aktivační produkty	Poločas rozpadu
^{90}Sr	28,70 roků	^{239}U	23,45 min	^{51}Cr	27,70 dne
^{90}Y	64,10 hod	^{239}Np	2,36 dne	^{56}Mn	2,59 hod
^{106}Ru	372,60 dne	^{238}Pu	87,70 roků	^{55}Fe	2,75 roků
^{106}Rh	29,92 s	^{239}Pu	$2{,}41 \cdot 10^4$ roků	^{60}Co	5,27 roků
^{134}Cs	20,60 roků	^{241}Pu	14,35 roků	^{63}Ni	100,10 roků
^{137}Cs	30,00 roků	^{242}Cm	162,94 dne	^{95}Zr	64,09 dne
^{137m}Ba	2,55 min			^{97}Zr	16,91 hod
^{144}Ce	284,45 dne			^{95}Nb	35,00 dne
^{144}Pr	17,28 min			^{97}Nb	72,10 min
^{147}Pm	2,62 roků			^{97m}Nb	52,70 s

Zdroj: Matějková – Využití vyhořelého jaderného paliva, 2018

11

cc BY NC SA

Závislost aktivity VJP z VVER-100 na čase, vyhoření 50 000 MWd/tU



Zdroj: Matějková – Využití vyhořelého jaderného paliva, 2018

CC BY NC SA

Přepracování vyhořelého paliva

Plusy

+ Snižuje nutnost těžby uranových rud
+ Získání izotopů pro lékařské, průmyslové a jiné využití
+ Snižuje množství vysokoaktivního odpadu na 1/20 původního objemu paliva

Mínusy

− Ekonomicky náročné
− Přepracovává se 20 % vyhořelého paliva
− Produkovaný VRAO i tak trvale uložit do hlubinných úložišť

cc BY NC SA

Přepracování vyhořelého paliva

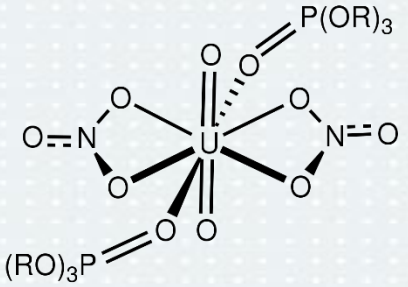
- PUREX– Plutonium and Uranium Recovery by Extraction
- Kapalinová extrakce do tributylfosfátu
- Hydrometalurgický proces
- Extrakce až 99,8 % uranu a plutonia z VJP
- Přepracovávat ve 3 až 4 cyklech

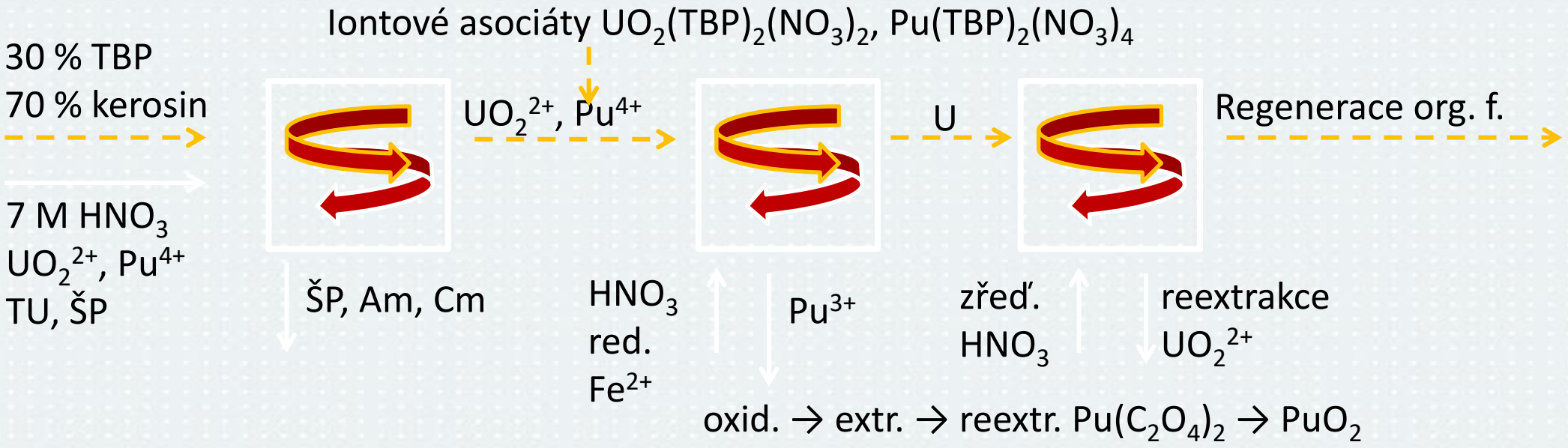
14

BY NC SA

PUREX – Plutonium and Uranium Recovery by EXtraction

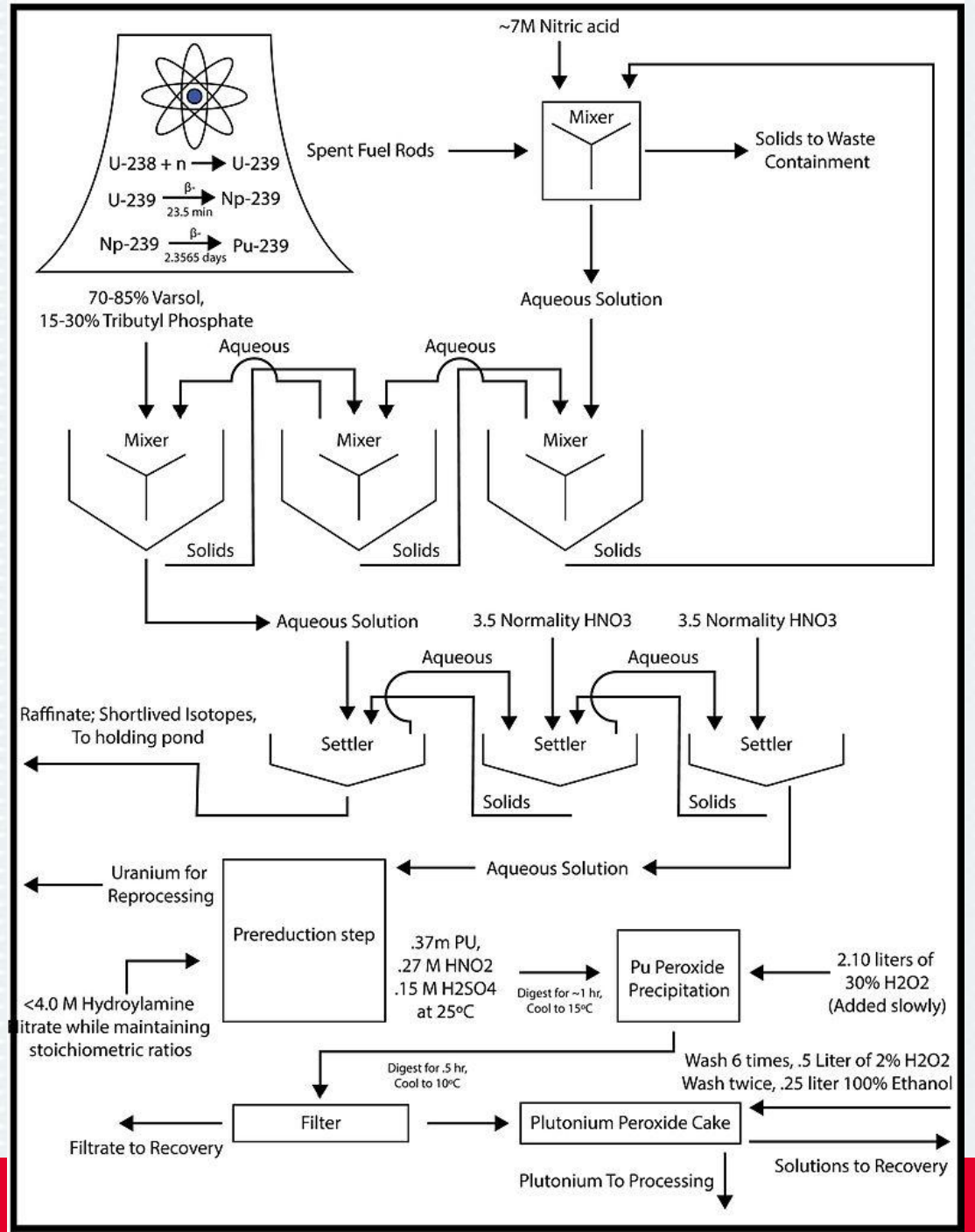
- Rozebrat palivový soubor → rozsekat / rozemlít → rozpuštění vyhořelého paliva → extrakce
- TBP = tributylfosfát = $(CH_3CH_2CH_2CH_2O)_3PO$





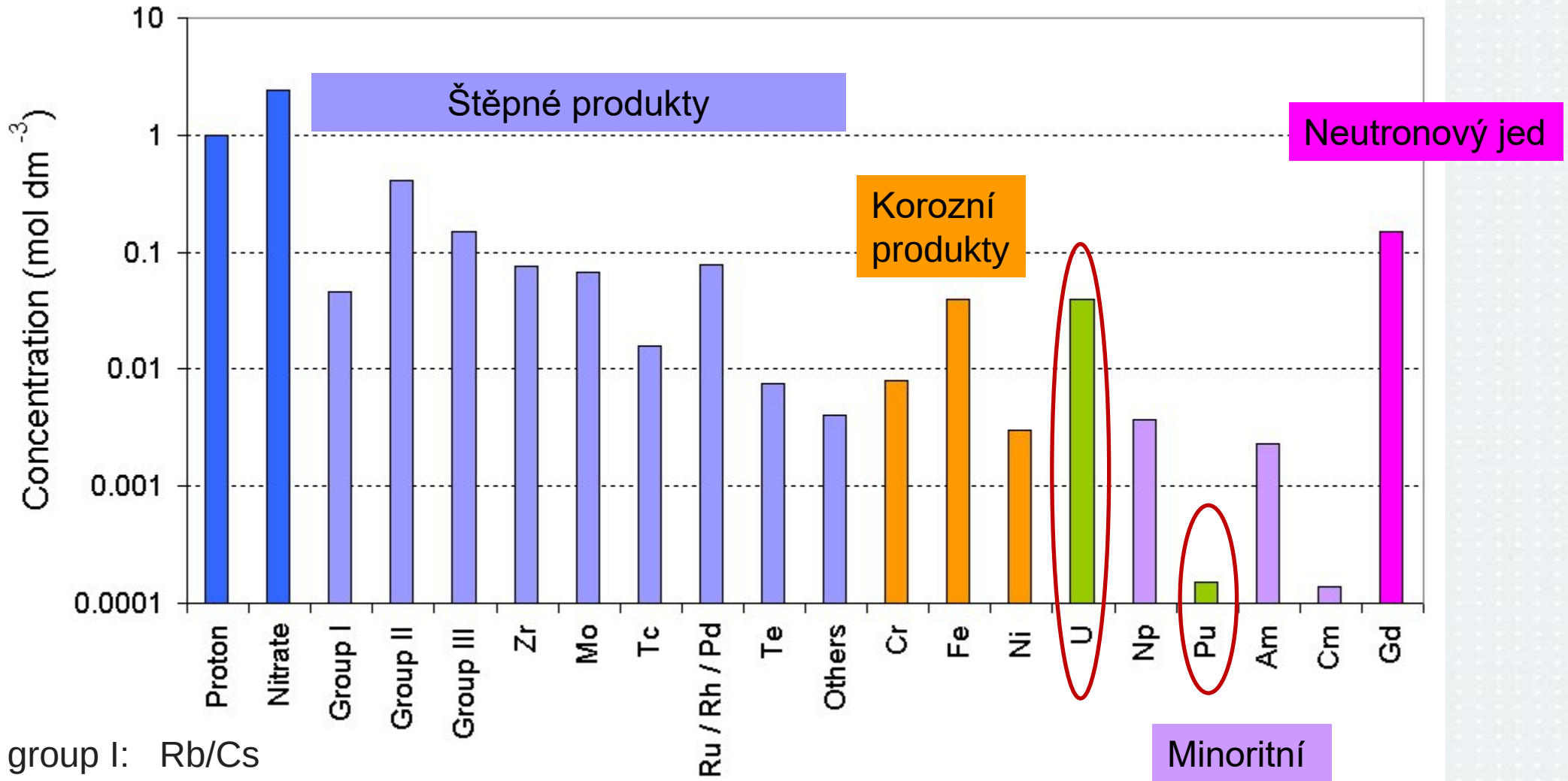
cc BY NC SA

Plutonium and other Trans-Uranics.



BY NC SA

Složení typického rafinátu prvního cyklu PUREX



group I: Rb/Cs
group II: Sr/Ba
group III: Y a lanthanoidy

cc BY NC SA

Přepracování vyhořelého paliva

- **VRAO z přepracování paliva:**
  - Velké objemy kapalných odpadů vznikají při procesu PUREX apod.
  - Roztoky NO_3^-, organické sloučeniny
  - Částečné odpaření a skladování v ocelových nádržích
  - Před konečným uložením → imobilizace odpadu
    – cementace, bitumenace nepoužitelné pro vysoké A
    → **vitrifikace** – imobilizace do skla, keramiky
- 98 % atmosférického ^{85}Kr pochází z přepracovaného paliva

18

cc BY NC SA

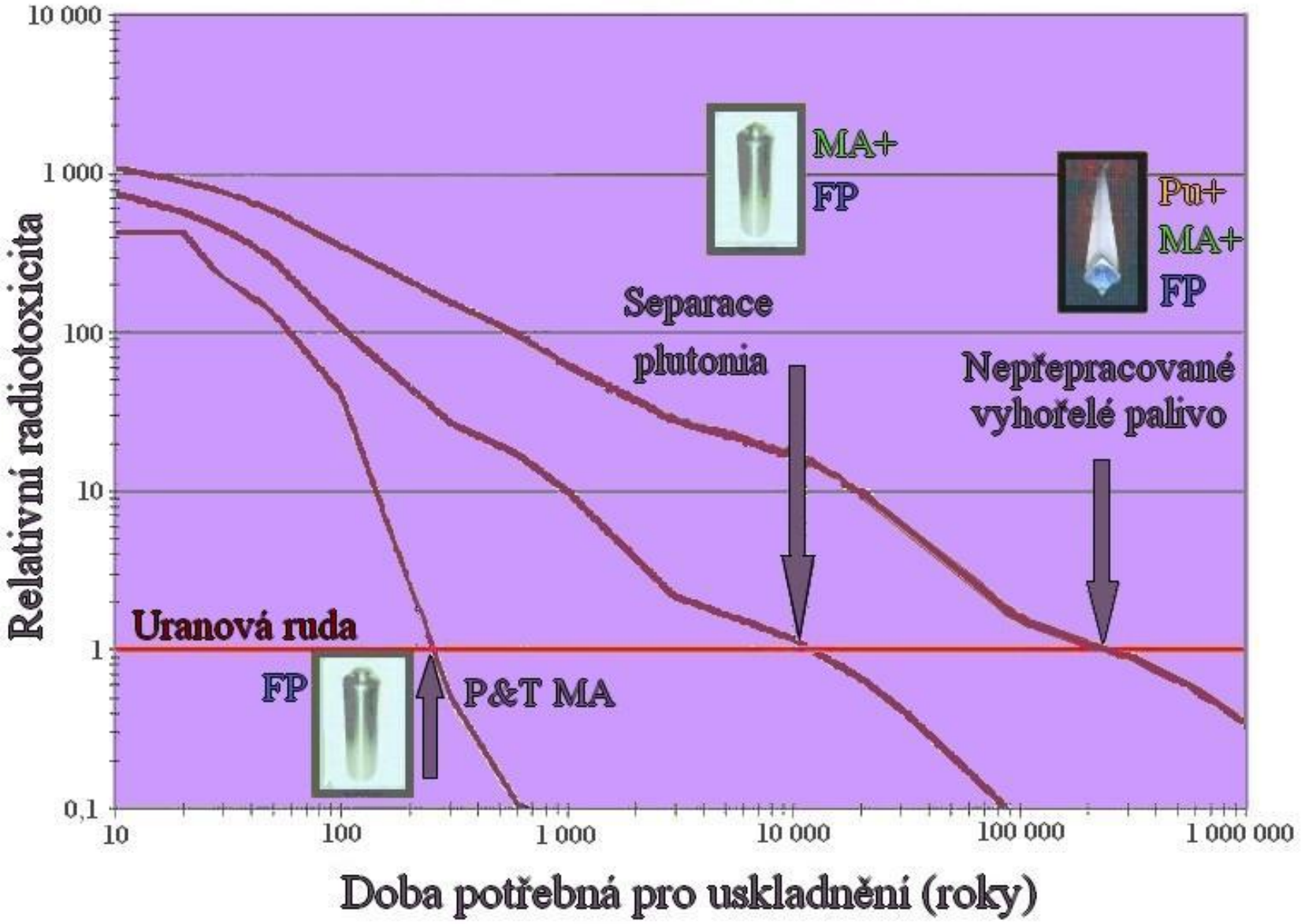
Separace & Transmutace
(Partitioning & Transmutation = P&T)

- Další možnost uzavření palivového cyklu
- Cílem je snížit úroveň radiotoxicity
- Separace izotopů štěpných produktů s dlouhým poločasem rozpadu (I, Sm, Zr), lanthanoidů, transuranů (Pu) a minoritních aktinoidů (Am, Cm, Np) s velkou radioaktivní toxicitou
- Následná transmutace zejména minoritních aktinoidů → přeměna na krátkodobé nebo i stabilní isotopy
- Pro některé transmutační technologie by se VJP nemuselo složitě upravovat

19

cc BY NC SA

Hlavní cíl P&T



cc BY NC SA

Transmutační technologie v běžném reaktoru

- Příměs odpadu jako oxidického paliva
  → transmutace + generování energie

^{237}Np (2,14·10^6 r) (n, γ) ^{238}Np (2,1 dne, β^-)
→ (n, γ) ^{239}Np (2,4 d, β^-,) → ^{239}Pu → štěpení

- Kromě aktinoidů i dlouhodobé štěpné produkty

  ^{129}I (1,57·10^7 r) (n, γ) ^{130}I (12 h, β^-) → ^{130}Xe (stab.)

  ^{99}Tc (2,1·10^5 r) (n, γ) ^{100}Tc (15 s, β^-) → ^{100}Ru (stab.)

  (oba RN jsou těkavé → velká mobilita)

- Nevýhoda – izotopy se sudým A (^{240}Pu, ^{244}Cm) se štěpí jen rychlými neutrony

21

BY NC SA

Urychlovačem řízená transmutační technologie

= ADTT (Accelerator Driven Transmutation Technology)

- Podkritický reaktor
- Palivo – roztavené fluoridy (PuF_4 – eutektika)
- Celkové množství paliva je podkritické → řetězová reakce se sama neudrží
  → udržuje se pomocí neutronů generovaných urychlenými protony v terči těžkého kovu (W, $Pb_{(l)}$)
  (E_p = 800–1000 MeV → tok 10^{20} s^{-1} velmi rychlých ^0n)
- Terč obklopen aktivní zónou + grafitová mříž → ^0n se zpomalují
  → zmnožují štěpení paliva

22

CC BY NC SA

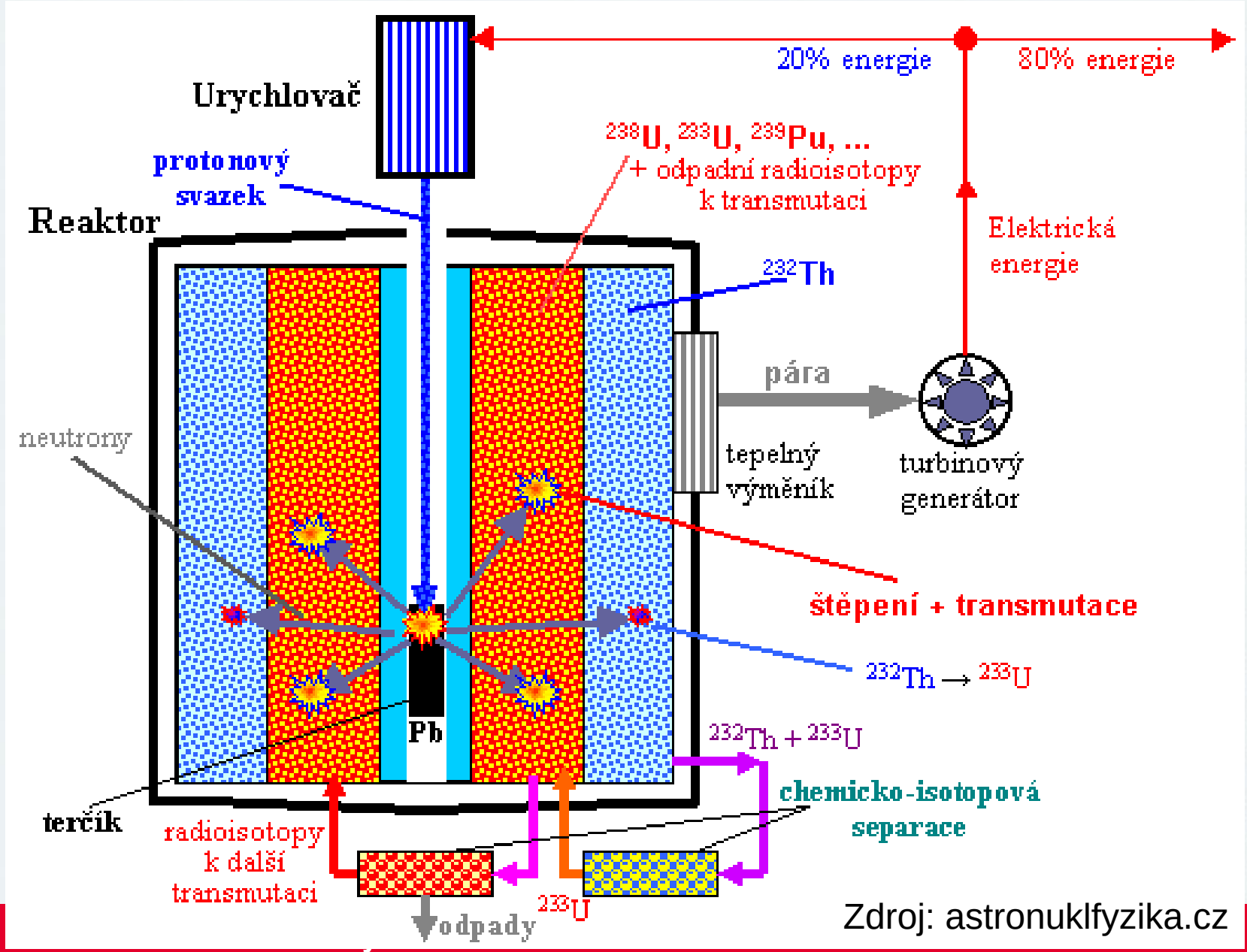
Urychlovačem řízená transmutační technologie

- nižší účinnost, cca 20 % energie na vlastní provoz
- složitost konstrukce
- kontinuální separace „výsledných“ izotopů s krátkým poločasem rozpadu a stabilní izotopy

23

BY NC SA

ADTT = urychlovačem řízená transmutační technologie



Zdroj: astronuklfyzika.cz

cc BY NC SA

Magisterský studijní program JADERNÁ ENERGETIKA vznikl za přispění

Financováno Evropskou unií
NextGenerationEU

NÁRODNÍ PLÁN OBNOVY

MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ, MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

NPO_VUT_MSMT-16609_2022

CC BY NC SA

VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ
V BRNĚ

Financováno Evropskou unií
NextGenerationEU

NÁRODNÍ PLÁN OBNOVY

MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ, MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FAKULTA CHEMICKÁ

FAKULTA STAVEBNÍ

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

Přednáška magisterského studijního programu JADERNÁ ENERGETIKA

Radioekologie a úvod do jaderných technologií

Vliv havárií jaderných zařízení na životní prostředí – Černobyl, Fukushima

Fakulta chemická

Ota Fišera

2024

CC BY NC SA

HAVÁRIE JADERNÝCH ELEKTRÁREN

- Stupnice INES
- Srovnání s ostatními způsoby výroby energie
- Havárie JE Černobyl
- Havárie JE Fukushima

cc BY NC SA

Havárie

- Žádná technologie nemůže být absolutně bez poruch a různých událostí s vlivem na zařízení a okolí

- Jejich význam/dopad pro/na zařízení a okolí se velmi různí

→ **Mezinárodní stupnice INES**

(International nuclear events scale)

- Rozšířeno i na radiační nehody – všechna pracoviště s IZ

BY NC SA

Havárie
Nehody
7
Velmi těžká havárie
6
Těžká havárie
5
Havárie s rizikem vlivu na okolí
4
Havárie bez vážnějšího vlivu na okolí
3
Vážná nehoda
2
Nehoda
1
Anomálie
0
Odchylka

cc BY NC SA

Examples of INES ratings

Below Scale/ Level 0:	• Discovery of damaged fuel rods during core unloading and fuel inspections, NPP Krsko, Slovenia, 2013 • Discovery of consumer goods contaminated with ^{60}Co, Colombo, Sri Lanka, 2012
Level 1 (anomaly):	• Fast stop of the main circulation pumps and simultaneous loss of their fly wheel systems during reactor scram, NPP Olkiluoto-1 Finland, 2008 • Exposure of two workers in the nuclear power plant beyond the dose constraints, NPP Rajasthan-5, India, 2012
Level 5 (accident with wider consequences):	• Severe damage to the reactor core, NPP Three Mile Island, USA, 1979 • Four people died after being overexposed from an abandoned and ruptured high activity source, Goiania, Brazil, 1987

Source: iaea.org/downloads/iec/ines_flyer.pdf

cc BY NC SA

Stav jaderné bezpečnosti v ČR

Počet hodnocených událostí a automatických rychlých odstavení na JE Dukovany

stupeň události	počet událostí v roce											
	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007
INES 0	72	58	33	27	21	17	12	13	12	19	13	19
INES 1	4	2	3	1	0	1	2	1	0	0	1	1
rychlé odstavení					1	0	0	1	0	1	0	2

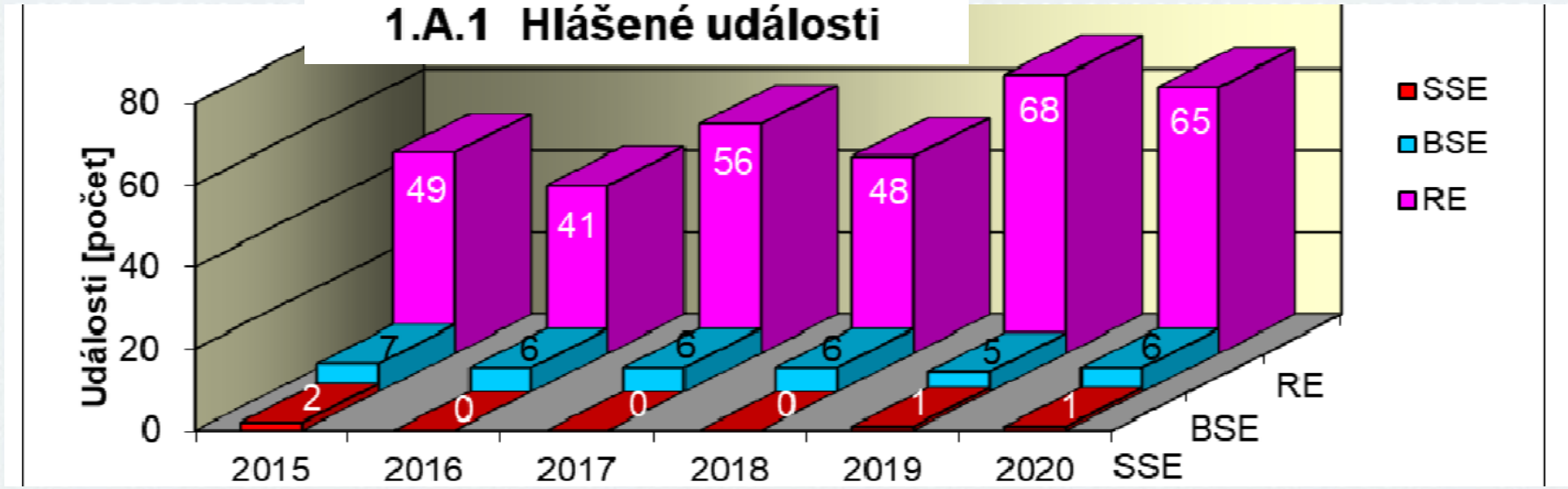
Počet hodnocených událostí a automatických rychlých odstavení na JE Temelín

stupeň události	počet událostí v roce							
	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007
INES 0	20	10	26	36	41	43	28	24
INES 1	1	2	2	2	3	5	4	2
rychlé odstavení	3	3	2	2	2	0	0	2

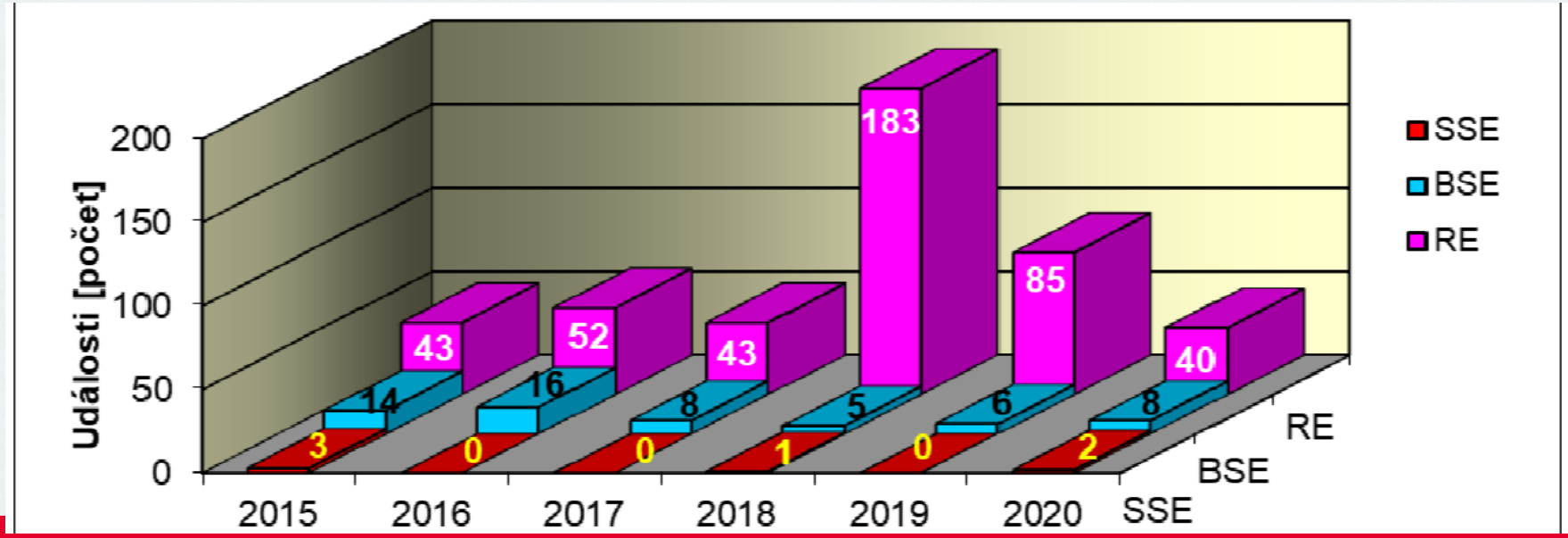
cc BY NC SA

Graf ukazatele 1.A.1 sleduje vývoj počtu hlášených událostí (RE) včetně jejich rozdělení podle hodnocení INES na události významné (SSE, INES > 0) a události pod stupnicí (BSE, INES 0).

JEDU



JETE

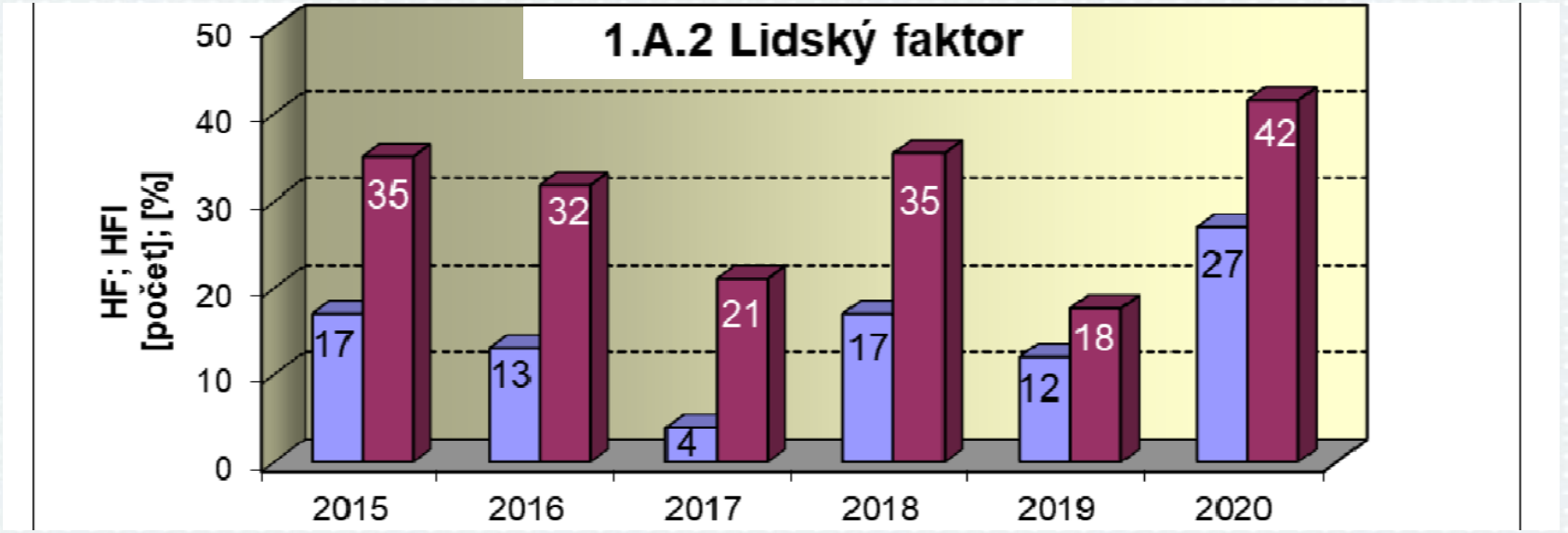


Zdroj: Hodnocení souboru provozně-bezpečnostních ukazatelů za rok 2020, SUJB

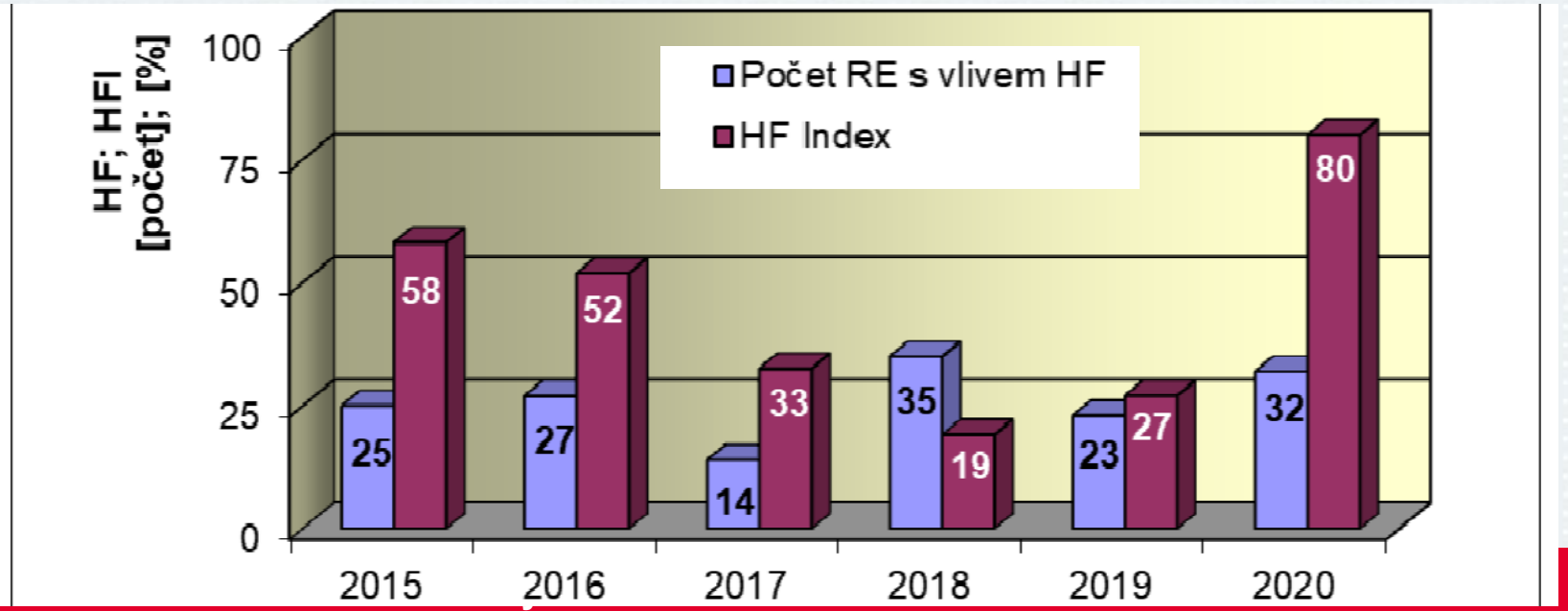
CC BY NC SA

Graf 1.A.2 hodnotí vliv lidského činitele na vzniku hlášených událostí. Do roku 2002 se počet hlášených událostí shoduje s počtem událostí podle INES. Ukazatel je vyjádřen počtem událostí s vlivem lidského činitele (HF) a jeho procentním podílem (HFI).

JEDU



JETE



Zdroj: Hodnocení souboru provozně-bezpečnostních ukazatelů za rok 2020, SUJB

CC BY NC SA

- **<u>Příklad INES 1</u>:** netěsnost v odvzdušňovací trubičce o průměru 1 cm. Radioaktivita se dostala do cirkulujícího chladícího oběhu druhého bloku a část odtamtud do kanalizace s dešťovou vodou. V záchytné nádrži v areálu elektrárny byla naměřena A = 272 Bq/l. Tato hodnota se během několika dní snížila pod hraniční hodnotu pitné vody 100 Bq/l

cc BY NC SA

Smrtelné nehody při výrobě energie

Těžké havárie podle přeměny energie v období 1969 až 2000

	OECD		EU 25		non-OECD		World total	
Energy chain	Acc	Fat	Acc	Fat	Acc	Fat	Acc	Fat
Coal	75	2259	32	697	102	4831	1221	25107
(Coal China 1969–2000 underestimated)					1044	18,017		
(Coal China 1994–1999)					(819)[a]	(11,334)[a]		
Oil	165	3713	60	1185	232	16,505	397	20218
Natural gas	90	1043	28	276	45	1000	135	2043
LPG	59	1905	20	564	46	2016	105	3921
Hydro	1	14	0	0	10	29,924[b]	11	29938
Nuclear	0	0	0	0	1	31[c]	1	31
Total	390	8934	140	2722	1480	72324	1870	81258

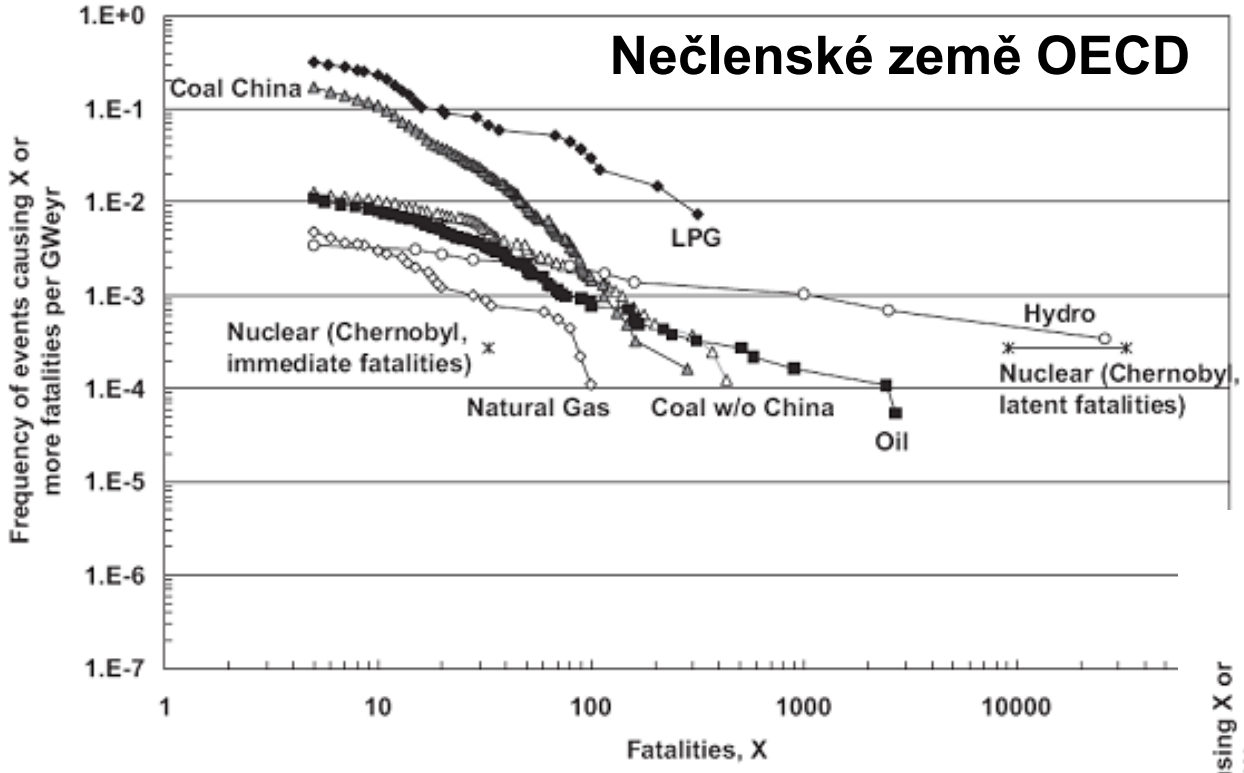
w/o China

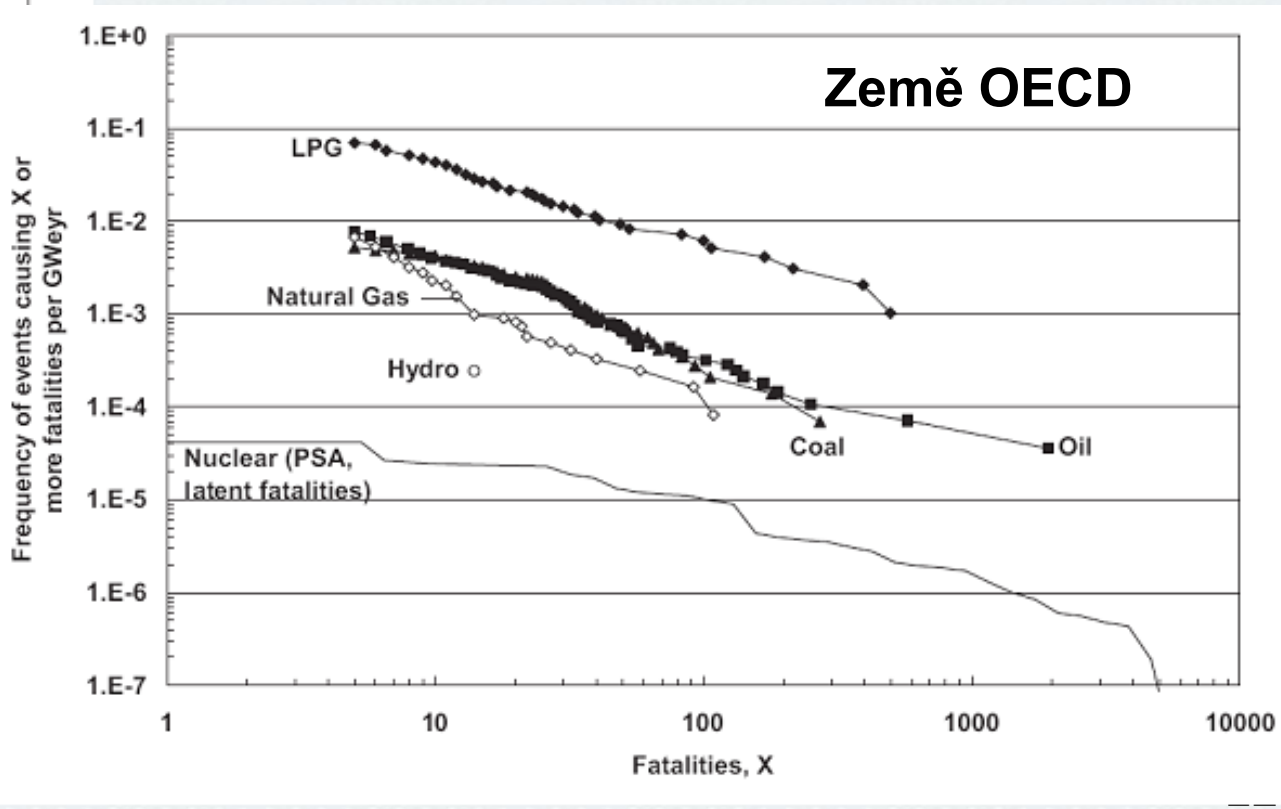
Acc = number of accidents with at least 5 immediate fatalities, Fat = number of fatalities.
b Banqiao/Shimantan dam failures together caused 26,000 fatalities.
c Only immediate fatalities + 28 during decontamination + 19 death to 2004 + latent fatalities range to about 33,000 for the whole northern hemisphere in the next 70 years

Zdroj: https://nejedly.blog.idnes.cz/blog.aspx?c=80077

BY NC SA

Frekvence výskytu příslušné události vztažená na množství vyrobené elektřiny (GWe/rok) v závislosti na počtu mrtvých





Zdroj: https://nejedly.blog.idnes.cz/blog.aspx?c=80077

CC BY NC SA

Snížení očekávané délky života u dobrovolných/nedobrovolných rizik (ve dnech)

Kouření u mužů	2590
Autonehody	207
Všechny nehody	366
Radon v domech	29
Požáry, popáleniny	20
Bydlení v blízkosti jaderné elektrárny	0,4
Jaderná energetika	0,05

Kniha : Waltar, A.E. - America the Powerless, 1995

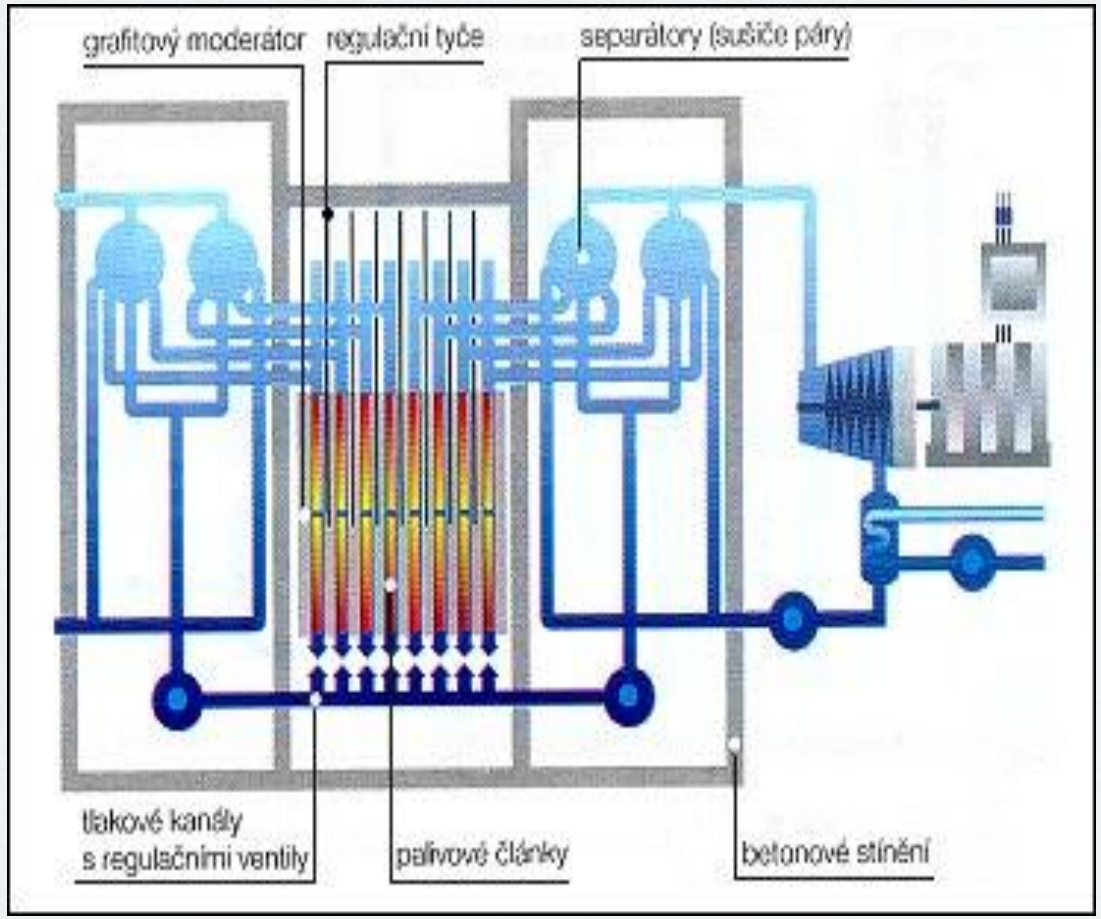
cc BY NC SA

HAVÁRIE JE

- Černobyl (26. 4. 1986)
- Fukushima (11. 3. 2011)

cc BY NC SA

Havárie JE Černobyl



Reaktor RBMK 1000

- Obohacený U 1,8 %
- Aktivní zóna: 11,8 m průměr
  7 m výška
- Chladivo: H_20, 6,9 MPa
- Teplota na výstupu 284°C
- Palivo: 190 t UO_2
  (v kanálech kudy proudí chladící voda)
- 1693 kanálů
- Moderátor: grafit

cc BY NC SA

JE Černobyl	Zahájení stavby	Připojení k síti	Stav	Čistý výkon (MW)	Hrubý výkon (MW)
Černobyl-1	1970	1977	uzavřeno v roce 1996	740	800
Černobyl-2	1973	1978	po požáru v roce 1991 uzavřeno	925	1000
Černobyl-3	1976	1981	uzavřeno v roce 2000	925	1000
Černobyl-4	1979	1983	zničeno v roce 1986 - Černobylská havárie	925	1000
Černobyl-5	1981	-	výstavba zrušena v roce 1988	950	1000
Černobyl-6	1983	-	výstavba zrušena v roce 1988	950	1000

- **Vlastnosti reaktoru RBMK**
  - Varný reaktor – voda jako chladivo + absorpce n^0
  - Moderátor grafit

  Kladná zpětná vazba reaktivity

  = reaktor může samovolně zvyšovat svůj výkon
  (pára pohlcuje méně n^0, ale grafit moderuje stejně)

- Naopak PWR reaktor – záporná zpětná vazba
  = inherentní bezpečnost

cc BY NC SA

Důsledky havárie JE Černobyl

- Exploze vážně poškodila reaktorové budovy, zcela zničila reaktor 4. bloku a vymrštila trosky s částmi paliva do blízkého okolí
- Následný požár aktivní zóny → uvolnění velkého množství RL mimo elektrárnu
- Zamoření rozsáhlého území (> 37 kBq (1 μCi)/m^2)
  - Ukrajina, Rusko, Bělorusko – 140 000 km^2; > 5 mil. obyv.
  - Nejbližší zóna: 3 000 km^2; zamoření 50–100 x větší
- Meteorologická situace → vysoké aktivity nad velkými částmi Evropy až do vzdálenosti 1000 km

CC BY NC SA

Aktivita radionuklidů uvolněných při černobylské havárii

radionuklid	T	A (PBq; P:10^{15})	radionuklid	T	A (PBq; P:10^{15})
^{85}Kr	10,72 r	33	^{89}Sr	50,5 d	~ 115
^{133}Xe	5,25 d	6500	^{90}Sr	29,12 r	~ 10
			^{103}Ru	39,3 d	> 168
^{131}I	8,04 d	~ 1760	^{106}Ru	368 d	> 73
^{133}I	20,8 h	2500	^{140}Ba	12,7 d	240
^{134}Cs	2,06 r	~ 47			
^{137}Cs	30 r	~ 85	^{238}Pu	87,74 r	0,015
			^{239}Pu	24065 r	0,013
			^{240}Pu	6537 r	0,018
			^{241}Pu	14,4 r	~ 2,6

J. Environmental Radioactivity **96,** 13 (2007)

cc BY NC SA

Území zamořená nuklidem ^{137}Cs o aktivitě > 37 kBq m^{-2}

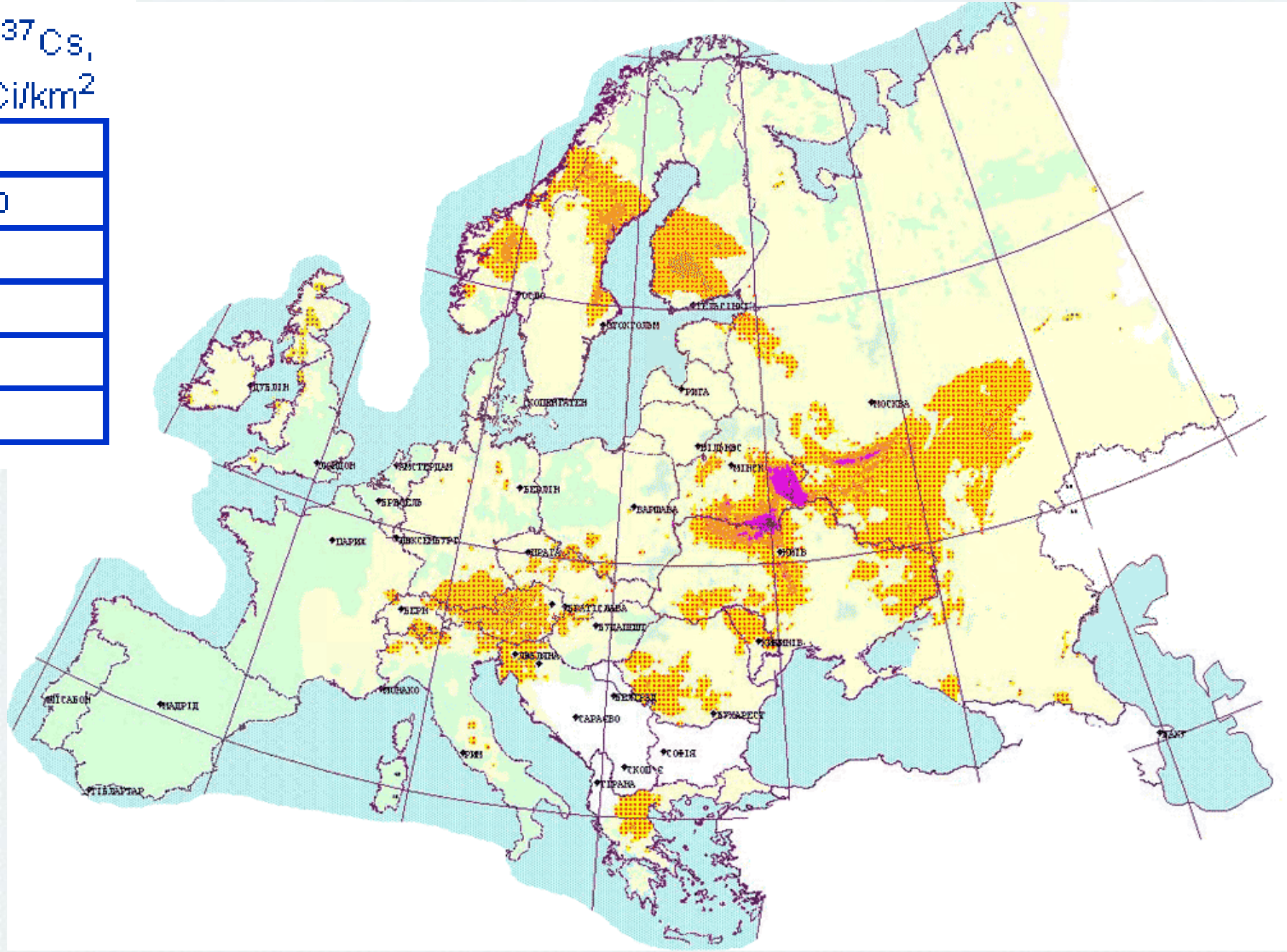
Země	*Plocha (km^2)*	
Rusko	57900	
Bělorusko	46500	~20 %
Ukrajina	41900	~7 %
Švédsko	12000	
Finsko	11500	
Rakousko	8600	~10 %
Norsko	5200	
Bulharsko	4800	
Švýcarsko	1300	
Řecko	1200	
Slovinsko	300	
Itálie	300	

IAEA 2006

cc BY NC SA

Contamination levels with ^{137}Cs, Ci/km^2

	>1480
	185-1480
	40-185
	10-40
	2-10
	<2



cc BY NC SA

- **Chernobyl Forum:**
  - ustanoveno 1993
  - IAEA, WHO, FAO, UNSCEAR a zástupci vlád
  - Hodnocení vlivu havárie na ŽP
  - Hodnocení zdravotních následků – viz dále

22

BY NC SA

Zdravotní následky havárie JE Černobyl

- **Úmrtí:**
  - Okamžitě nasazení likvidátoři – 134
    - 3 při explozi
    - 25 úmrtí do 4 měsíců – H až 16 Sv
    - 13 úmrtí – H = 5,6–13 Sv
    - **Akutní radiační syndrom** – popáleniny (až 100 %), plicní a imunologické komplikace, transplantace kostní dřeně – neúspěšné
  - Dalších 114 500 likvidátorů nasazených v následujících letech – ozáření > 100 mSv během prvních 2 let
  - 1987–2004 – 19 úmrtí (4 z ozáření, H = 1,3–5,6 Sv, ostatní – různé příčiny)

CC BY NC SA

- **Ozáření obyvatelstva:**
  - **Štítná žláza** – jediné prokázané riziko
    - asi 100 000 dětí a mladistvých – H > 300 mSv
    - 46 700 – H ~ 700 mSv
    - Mléko kontaminované ^{131}I – opožděná a nedostatečná opatření (blokace příjmu)
    - Od r. 1990 prudký nárůst rakoviny štítné žlázy – 4590 případů, 9 úmrtí
    - Prognóza dobrá při včasné diagnóze
    - Neočekávaně krátká doba latence 4–5 let
      (max. riziko u jedinců mladších než 4 roky v době havárie; větší riziko v oblastech s deficitem jódu
    - Riziko velmi nízké nebo žádné u os. ozářených starších 20 r.

cc BY NC SA

- **Ozáření obyvatelstva:**
  - **Jiné orgány**
    - Celková E = 10–20 mSv za r. 1986–2005 v obl. > 37 kBq/m^2
    - 5,2 mil. osob
    - 1 % dávku až 100 mSv
  - U žádné věkové skupiny nebyly zjištěny jiné zdravotní následky (nádory, leukémie)
  - Je možné, že by se úmrtnost u nejvíce zasažených skupin zvýšila o několik % – nezjistitelné studiemi

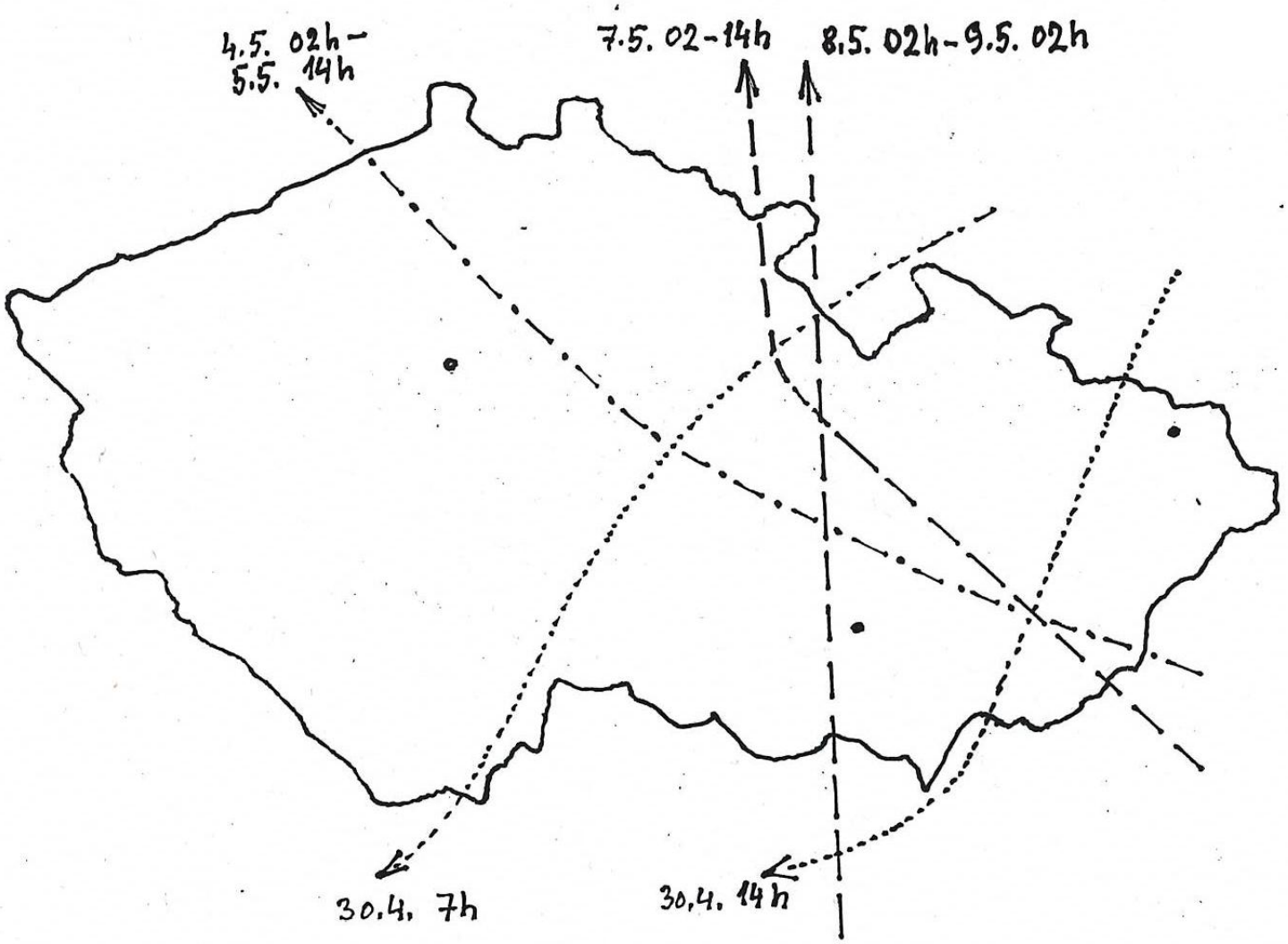
cc BY NC SA

Vliv havárie na ČR

- 3 průchody kontaminovaného vzduchu
- Převažující RN: ^{131}I, ^{132}Te, $^{134+137}Cs$, ^{103}Ru
  A_v = 1–10 Bq/m^3, po 10. květnu klesla na 10^{-7}–10^{-5}
- Kontaminace území (radioakt. spad) – nehomogenní, podle srážek, max. S a SV Morava (až 30 kBq/m^2), místy na Vysočině a oblast pod Prahou 5–10 kBq/m^2

BY NC SA

Přechod kontaminovaných vzdušných mas přes území ČR
(30. 4. – 9. 5. 1986)



BY NC SA

Přijatá opatření:

- Krmení dobytka starší, uskladněnou pící
- Denní monitorování čerstvého mléka ve všech mlékárnách – zákaz konzumace při ≥ 1 kBq $^{131}I/l$
- Pro kojeneckou výživu jen nekontaminované mléko
- Monitorování různých potravin a listové zeleniny

CC BY NC SA

Ozáření obyvatelstva:

Zevní – ze spadu (z mraku zanedbatelné < 1 μSv)

Vnitřní – potrava – zpočátku významný ^{131}I, později ^{137}Cs (nepatrně dodnes)

Ozáření velmi nízké, výpočet dávky z modelů
E(roční 1986) = 0,2 mSv ~10 % E z přírodního pozadí
E celoživotní = 0,4 %

Časový vývoj kumulované efektivní dávky u obyvatelstva ČR z ozáření způsobeného havárií černobylského reaktoru

v roce	E (mSv) zevní ozáření	E (mSv) vnitřní ozáření	E (mSv) celková
1986	0,05	0,15	0,20
2008	0,22	0,25	0,47
2056	0,28	0,25	0,53

cc BY NC SA

→ **Zdravotní následky neprokazatelné**
(pokud vůbec nějaké)

- Potvrzeno i v jiných evropských zemích
  – Rakousko (spad 60–80 kBq/m^2) – úmrtnost novorozenců soustavně klesá (a ne naopak), přesto zbytečné vyžádané potraty v Z Evropě

cc BY NC SA

Havárie JE Fukušima

Veškerá pozornost se soustřeďuje na elektrárnu Fukušima 1 (Daiiči). Ostatní jaderné elektrárny jsou v provozu nebo bezpečně odstavené.

Oblast postižená zemětřesením a tsunami

Předpokládané natavení paliva
Poškození bez tavení paliva
Bezpečně odstavené
Bezpečné, nepostižené zemětřesením

Zdroj: ČEZ

BY NC SA

Zemětřesení

- 11. března 2011 ve 14:46 japonského času (5:46 UTC)
- Magnitudo: MW = 9,0
- **Největší** zaznamenané v Japonsku (5. na světě)
- **JE Fukušima připravená na MW = 8,2** (6x menší)
- Výška vlny ve Fukušimě (TEPCO): 14 m
- Zabezpečení Fukušimy I: 5.7 m
- Výška reaktoru a strojovny nad mořem: 10 až 13 m
- Zabezpečení JE Onagawa: 25 m

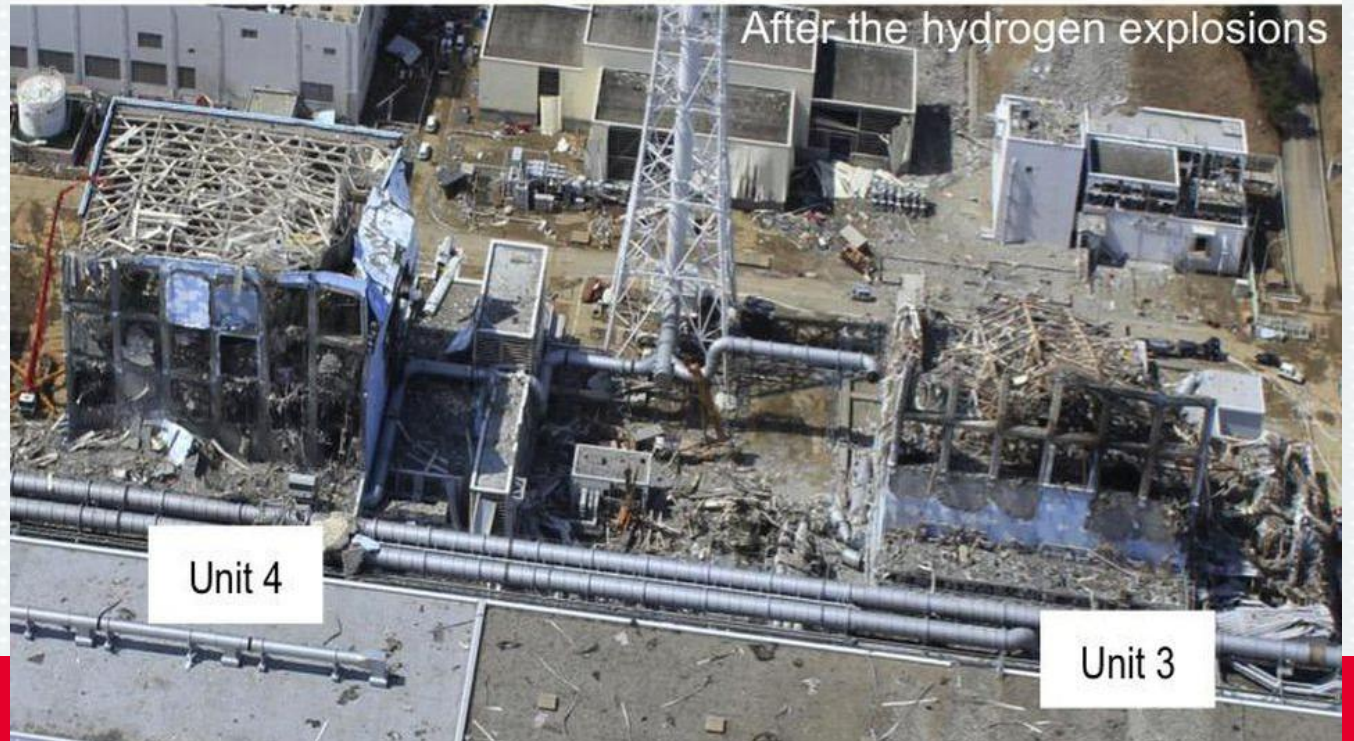
cc BY NC SA

- Po zemětřesení se automaticky odstavila většina plynových a uhelných elektráren
  a všechny jaderné (14 bloků = 41 GW) na SV pobřeží.
- **JE Onagawa + JE Tokai**
- **JE Fukušima 2/Dai-ini –** tsunami poškodila havarijní chladící systémy → INES 3
- Všechny dosáhly stavu studeného odstavení do 15. 3.

- **Fukušima 1/Dai-ichi – viz dále**

cc BY NC SA

Unit 4
Unit 3
Unit 2
Unit 1


After the hydrogen explosions
Unit 4
Unit 3

34

BY NC SA

- V okamžiku zemětřesní byly reaktory 1–3 v provozu a reaktory 4–6 v plánované odstávce
- Automatické odstavení → havarijní chlazení → tsunami ničí dieselagregáty a čerpadla na mořskou vodu → nouzové systémy – baterie, havarijní kondenzátor, havarijní chlazení poháněné párou z turbíny
- Postupné selhávání → nedostatek chlazení → vaří se voda → roste tlak → přepouštění páry do sekundárního kontejnmentu
- Při nedoplňování vody do reaktoru → částečné obnažení palivových článků → reakcí vodní páry se zirkoniem vzniká vodík → výbuch → poškození kontejnmentu
- Předpokládá se tavení aktivní zóny

cc BY NC SA

- Analogické problémy s bazény pro vyhořelé palivo (1.–4. blok) – nouzové chlazení, var vody, výbuch vodíku

- Dosažení stavu „studeného odstavení“ poničených reaktorů až 16. 12. 2011

Únik RL

- Ve dnech 12.–22. 3., max. 14. 3.
- Převážně těkavé štěpné produkty (Xe, Kr, I, Cs, Te)
- z poškozených palivových článků
- Únik společně s vodíkem a vodní párou, po výbuchu a poškození kontejnmentu únik do ŽP
- Do atmosféry uniklo:

  18 PBq ^{134}Cs; 15 PBq ^{137}Cs; 160 PBq ^{131}I
- Plyny a částice po středních zem. šířkách po celé S polokouli
- Do oceánu bylo vypuštěno cca 10–27 PBq

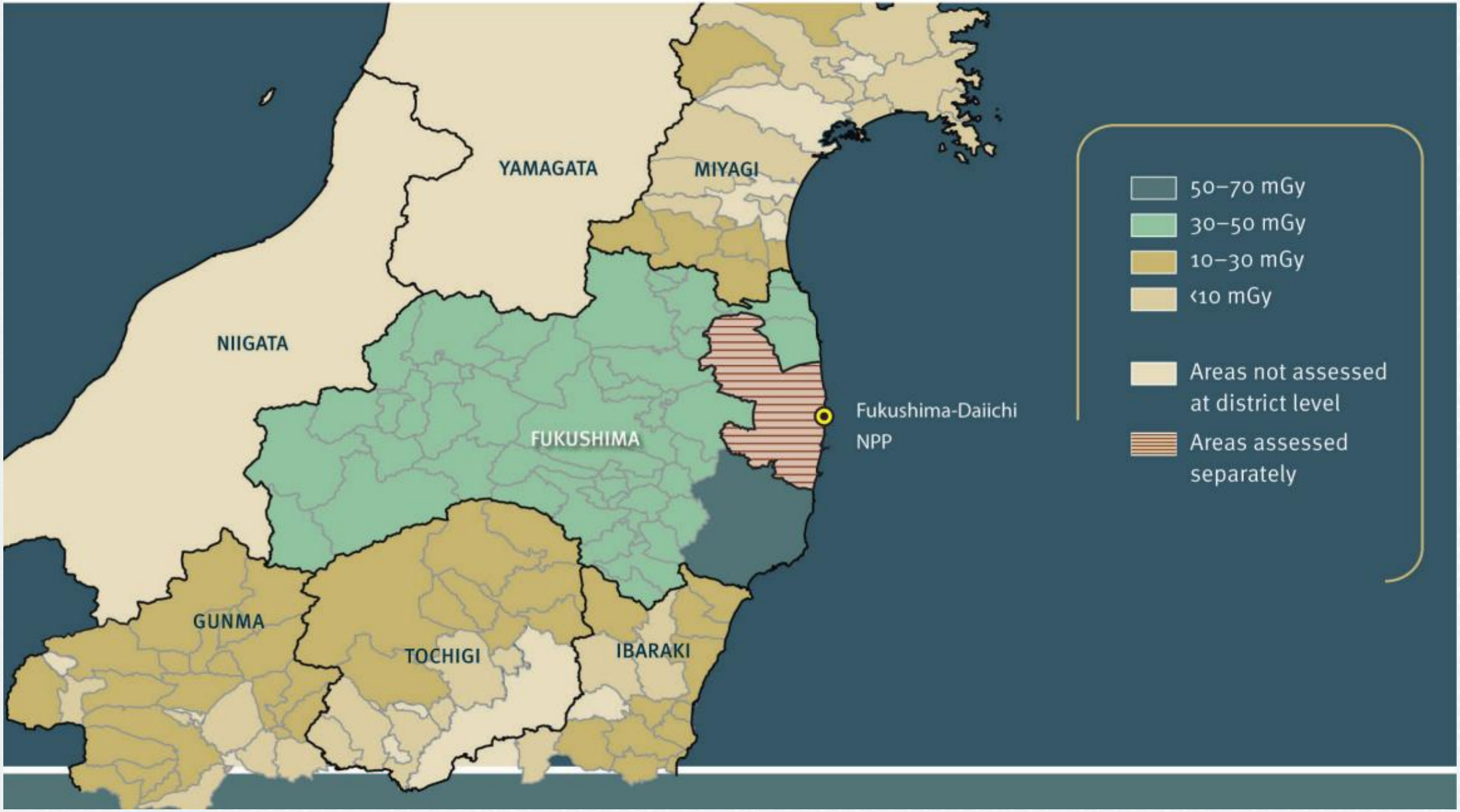
cc BY NC SA

Zamoření Jap¨4onska

- 25–45 km od JE dávka ~20 µSv/h
- 220 km od JE dávka ~0,5 µSv/h
- Radioizotopy I a Cs zjištěny ve vzduchu, vodě, mléku, potravinách – velmi nízké úrovně (bez rizika)

cc BY NC SA

Average thyroid doses after the Fukushima-Daiichi nuclear power station accident



cc BY NC SA

Vliv v ČR

- Zvýšená aktivita vzduchu od 23. 3., max. 28. 3.–1. 4.
- A_v ~ jednotky mBq/m^3,
  A_{max} ^{131}I = 13 mBq/m^3, A_{max} ^{137}Cs = 0,72 mBq/m^3
  (méně než 1/1000 z Černobylu)
- Cs+I vdechováním → $3{,}6 \cdot 10^{-5}$ mSv (88 % z I)
- Kontaminace atmosféry ^{131}I ve dnech 14. 10.–18. 11. 2011, 13. 1.–10. 2. 2012, A_{max} = 550 mBq/m^3
  – původce Institut of Isotopes, Budapešť

cc BY NC SA

Magisterský studijní program JADERNÁ ENERGETIKA vznikl za přispění

Financováno Evropskou unií
NextGenerationEU

NÁRODNÍ PLÁN OBNOVY

MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ, MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

NPO_VUT_MSMT-16609_2022

CC BY NC SA

VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ
V BRNĚ

Financováno Evropskou unií
NextGenerationEU

NÁRODNÍ PLÁN OBNOVY

MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ, MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FAKULTA CHEMICKÁ

FAKULTA STAVEBNÍ

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

Přednáška magisterského studijního programu JADERNÁ ENERGETIKA

Radioekologie a úvod do jaderných technologií

Ostatní radiační situace - zkoušky jaderných zbraní, vojenské programy, zdroje mimo kontrolu

Fakulta chemická

Ota Fišera

2024

CC BY NC SA

Ostatní radiační situace -

- Zkoušky jaderných zbraní
- Vojenské programy
- Zdroje mimo kontrolu

cc BY NC SA

Zkoušky jaderných zbraní

- **Zbraně hromadného ničení** – chemické, biologické, jaderné
- **Jaderné (nukleární) zbraně** – založené na jaderných reakcích:
  - štěpení – **štěpná zbraň** (^{235}U, ^{239}Pu)
  - slučování – **termonukleární zbraň** ($^{3}H+^{2}H$)
- IAEA: 2408 testů JZ, z toho 541 atmosférických (zákaz 1963), 1867 podzemních
- **Smlouva o úplném zákazu jaderných zkoušek** – z roku 1996, dosud neratifikována

CC BY NC SA

- **Princip jaderné zbraně** (JZ) – spojení 2 podkritických množství → nadkritické během 0,1 ms → multiplikační faktor $k > 1$ → extrémně rychlé množení ^{0}n → uvolnění E během μs → exploze

- Při explozi: materiál bomby → (g), vysoký tlak, T ~10^{8} °C → ohnivá koule do tropo(strato-)sféry → mrak vynáší velké množství materiálu – U (Pu), ŠP, aktivovaný materiál bomby, zemina (nasávána se studeným vzduchem), aktivace vzduchu – ^{3}H, ^{14}C

cc BY NC SA

- **Aktivita vzniklá štěpením**:
  1 kt TNT … 56 g U (Pu) → A (ŠP) = $5{,}55 \cdot 10^{23}$ Bq
  (většina RN je krátkodobých)
  – celková A s časem klesá

Zastoupení ^{131}I a ^{137}Cs v produktech jaderné exploze v závislosti na čase

^{131}I			^{137}Cs	
doba od výbuchu	zastoupení (%)		doba od výbuchu	zastoupení (%)
3 dny	2		1 rok	1,5
1 týden	6		10 roků	18
11 dní	7 (maximum)		30 roků	25
2 měsíce	< 1			

6

cc BY NC SA

Vliv na životní prostředí

- Dlouhodobé zamoření atmosféry, zemského povrchu, oceánů
- Radioaktivní materiál vynesen do výšky – plyny, aerosoly, hrubší fragmenty → **spad**
- Trvání procesu spadu → význam dlouhodobých RN

cc BY NC SA

SPAD

Okamžitý/místní
větší kusy materiálu,
rychlá depozice,
0,4–4 μm částice oxidů Fe a Al
se zachycenými ŠP, Pu

Globální
šíří se z místa exploze
po S polokouli

Troposférický
menší ráže (kt)
spad během 2–3 měsíců

Stratosférický
větší ráže,
spad měsíce
(~roky)

cc BY NC SA

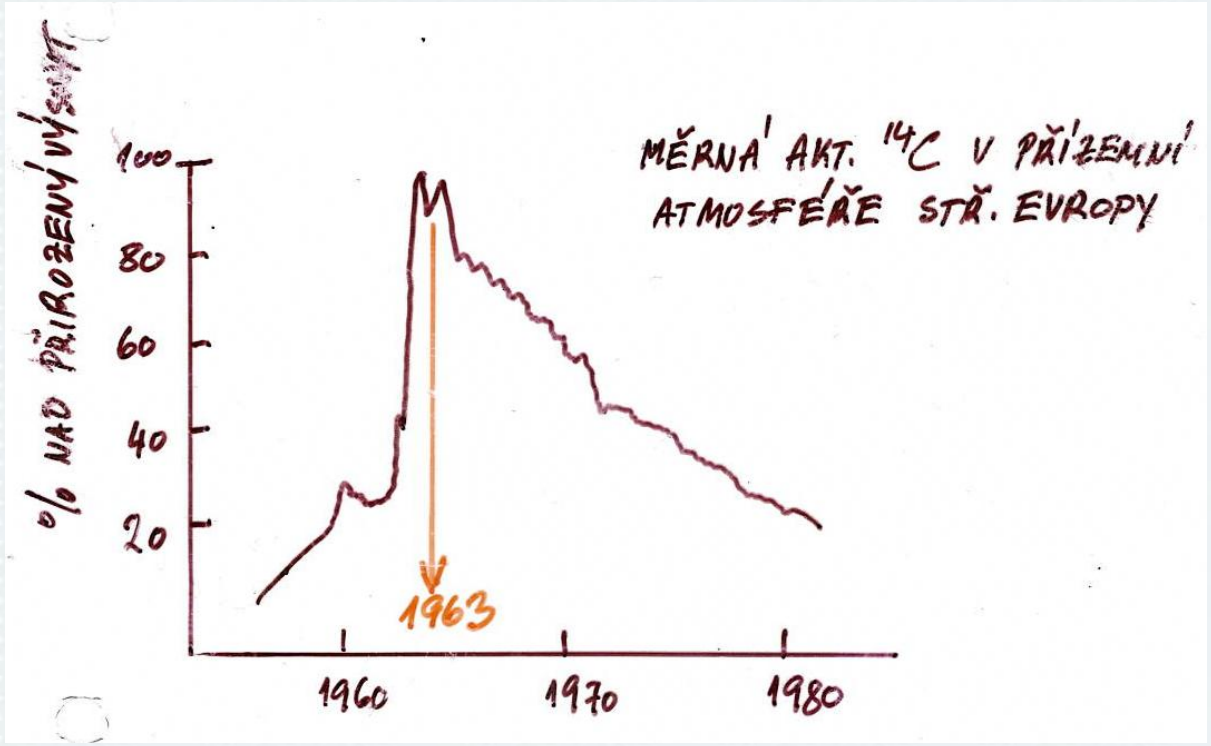
- **Důležité radionuklidy:**
  - ^{85}Kr, ^{90}Sr, ^{137}Cs, ^{106}Ru ($T_{1/2}$ = 372 dní), ^{144}Ce ($T_{1/2}$ = 285 dní), ^{14}C, Pu
  - Krátkodobé – foliární depozice ^{131}I (+ 13 izotopů), ^{89}Sr vnější ozáření, vnitřní ozáření (ing., inh., aerosoly – plíce)
  - Horké částice – kůže, dýchací cesty
  - SÚRO 2008 – Pu ve vzdušném aerosolu

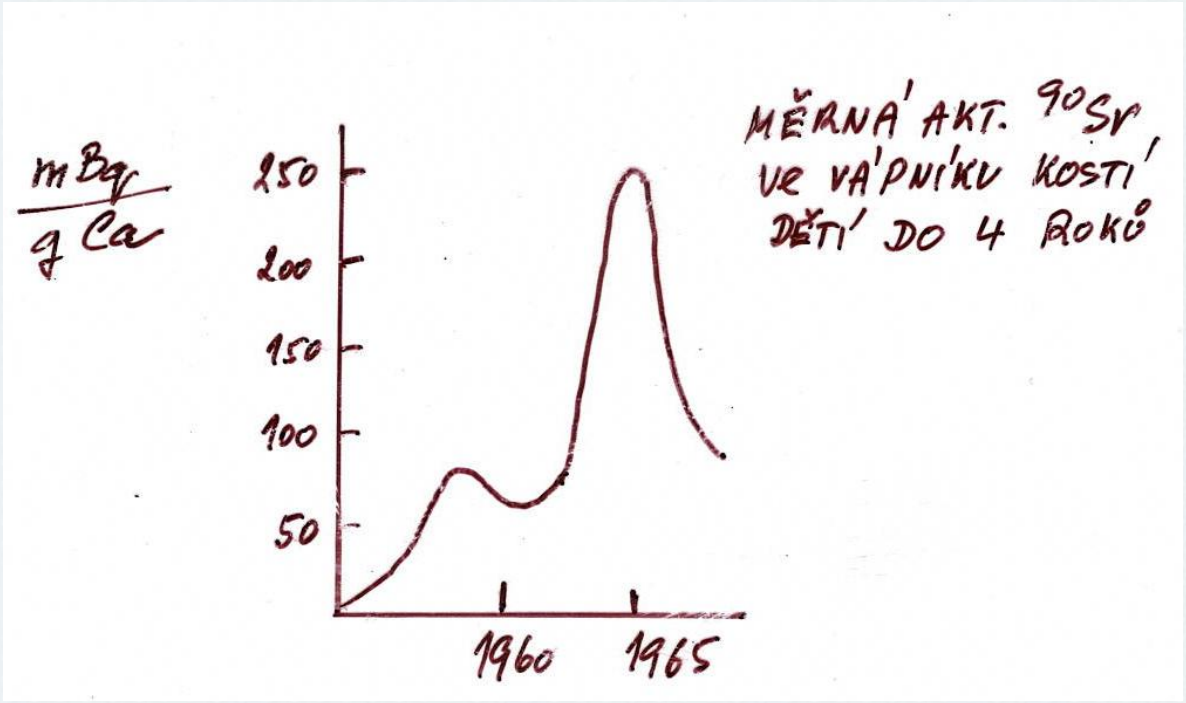
$^{239+240}Pu$ $9{,}1 \cdot 10^{-10}$ – $2{,}3 \cdot 10^{-9}$ Bq/m^3

^{238}Pu $< 3 \cdot 10^{-10}$ Bq/m^3

cc BY NC SA

Kontaminace životního prostředí





Odráží situaci – maximum v 60. letech – pozitivní vliv zákazu atmosférických zkoušek 1963,
– poslední test 1980

- **Globální vliv:**
  - Značné zředění
  - Globální výskyt RN a z toho plynoucí ozáření je malé
  - Model UNSCEAR – s ohledem na vliv polohy (max. spadu 40–50° zem. š., na S polokouli) → úvazek E z vnitřního i vnějšího ozáření do r. 1993 = 4,4 mSv na S polokouli – další roční příspěvky se stále zmenšují

cc BY NC SA

Případy lokálního ozáření:

– **Nevada Test Site** – 928 testů do r. 1992 → 11 EBq,
z toho 5,5 EBq ^{131}I → spad až 200 km po větru, kontaminace spodních vod (37 kBq/l) → ^{3}H v podzemních vodách obydlené oblasti, ^{131}I ve štítné žláze dobytka a v mléku, 2600 dětí obdržely D ~0,3–4,4 Gy → zvýšený výskyt rakoviny
– pěstování zeleniny a chov dobytka → transportní koeficient

– **Marshallovy ostrovy** – termonukleární exploze v r. 1954 → 267 osob vystaveno čerstvému spadu → kromě ^{131}I též $^{132\text{-}135}$I → D ve štítné žláze 2,2–4,5 Gy u dospělých, u dětí vyšší, 7 případů rakoviny ŠŽ

CC BY NC SA

Přepracování jaderného paliva

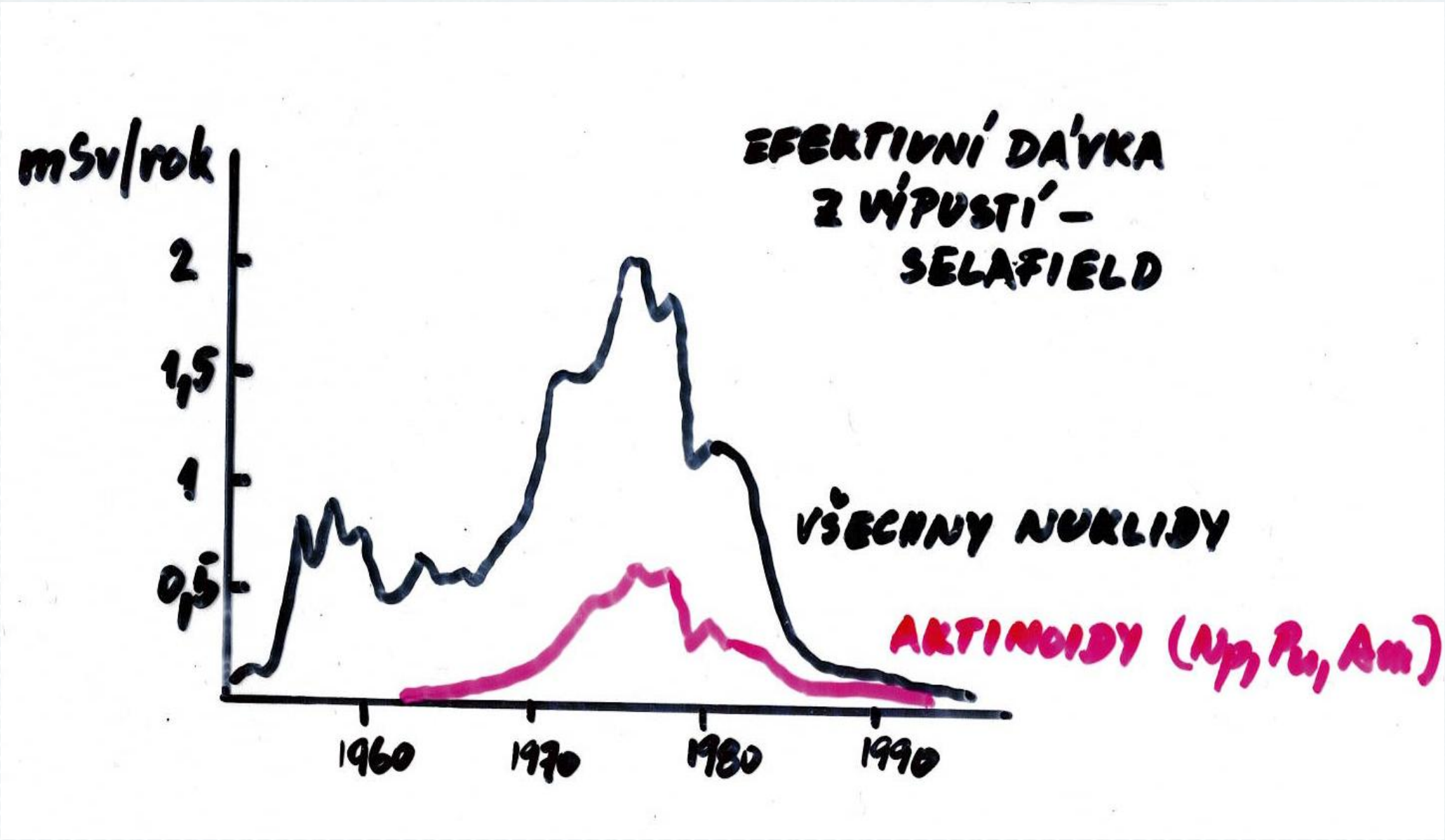
- **Závody:** Belgie, Francie, Velká Británie, Japonsko, Rusko, USA;
- Složení RN a kontrola výpustí za normálních podmínek
  ~ jaderným elektrárnám
- Rozdíl ve vyšších A plynných výpustí – uvolnění všech RN(g) při rozpouštění paliva
  zpracování 1500 t VJP/rok → 10^{16} Bq ^{85}Kr, 10^{15} Bq ^{3}H
  → současný obsah v atmosféře
- **Vliv na ŽP** – za norm. okolností nepatrný – velké ředění
  – v minulosti slabá ochrana ŽP → případy většího zamoření …

cc BY NC SA

Sellafield (Windscale, UK)

- Vypouštění nečištěných odpadních vod (ŠP, aktinoidy) do Irského moře
- Max. výpustí v ½ 70. let – ročně $5 \cdot 10^{15}$ Bq ^{137}Cs, 10^{15} Bq aktinoidů
  → zamoření ryb, měkkýšů, řas (lokální potravina laverbread)
  → zvýšené vnitřní ozáření, modely beroucí v úvahu stravovací návyky
- Dávka max. ~2 mSv/rok = ½ tehdejšího limitu (5 mSv/rok); 30 % způsobeno aktinoidy, zbytek ^{137}Cs, ^{90}Sr, ^{106}Ru

CC BY NC SA


mSv/rok
2
1,5
1
0,5
1960
1970
1980
1990
EFEKTIVNÍ DÁVKA
Z VÝPUSTÍ –
SELAFIELD
VŠECHNY NUKLIDY
AKTINOIDY (Np, Pu, Am)

BY NC SA

Zdravotní následky

- 1983 zpráva o zvýšeném výskytu leukémií u dětí v okolí – Seascale (nejbližší obec, 5 km) – 4 případy u dětí do 15 let v letech 1963–1983 oproti předpokládatelným 0,25
- Podobně v okolí do 25 km od JE Dounreay (Sev. Skotsko)
  – v letech 1968–1984 u lidí do 25 let 6 případů oproti 3
- Argumenty proti – nebyl nalezen vztah mezi výskytem nemoci a vzdáleností od JE,
  – ani mezi výskytem a dávkami – dávky z výpustí 100x menší než D pro zvýšení leukemie u přeživších explozí v JAP (0,5– 1 Gy)
  – nic podobného v okolí JE ve Francii, USA, Černobyl

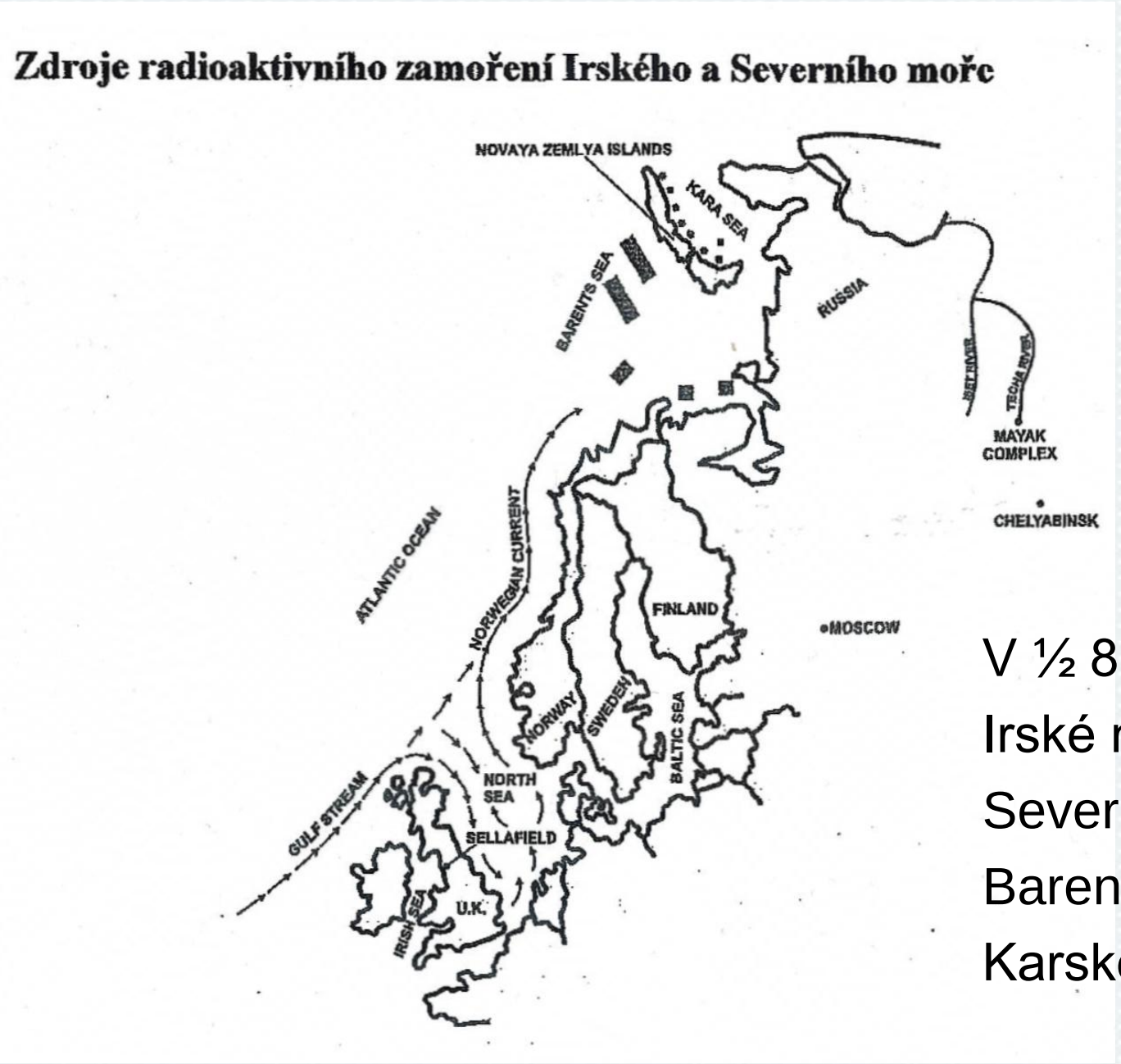
cc BY NC SA

Vysvětlení

a) Z Německa, Kanady, USA jsou známy případy „ostrovů“ se zvýšeným přirozeným výskytem leukémie i v místech, kde není jaderné zařízení

b) Virová teorie předpokládá virus způsobující leukémii, izolované obyvatelstvo nemá resistenci → rozšíření viru při migraci lidí, např. při stavbě JE → zvýšený výskyt

cc BY NC SA



Sellafield + La Hague (FRA)
→ mořské proudy
→ zamoření Barenstova a Karského moře

V ½ 80. let obsah ^{137}Csv povrchových vodách:

Irské moře	> 1 kBq/m^3
Severní moře u Skotska	~ 185 Bq/l
Barentsovo moře	~ 10–100 Bq/l
Karské moře	~ 10–

BY NC SA

Odpady z vojenských programů

- Vážné ekologické problémy

Majak

- Nejvážnější situace z ruských jaderných komplexů
- 70 km S od Čeljabinsku, východně od Uralu
- Středisko výroby Pu (několik reaktorů, přepracování, odpady, likvidace jaderných hlavic)
- Komplex v ploché krajině, mezi jezery, močály, záplavové území

cc BY NC SA

Ad Majak

- Zpočátku VRAO(I) přímo do jezera Kyzyltaš → Teča → močály → floodplain → vysoké zamoření
- Též přímo do bezodtokového jezera Karačaj – 50. léta $4 \cdot 10^{18}$ Bq ^{137}Cs, $7 \cdot 10^{17}$ Bq ^{90}Sr → kontaminace spodních vod, později 5 nádrží s hrázemi na řece pro zadržení radioaktivity
- Svedení řeky kanálem kolem jezera do dolního toku ve snaze omezit přítok do močálů
- Většina vypuštěné radioaktivity v řece Teča – sorpce v naplaveninách na březích
- $1 \cdot 10^{15}$ Bq ^{137}Cs až do řeky Ob a Karského moře (2000 km)

cc BY NC SA

- **Následky pro obyvatelstvo:**
  - Vyšší ozáření u 124 000 podél řeky Teča, nejvíce obec Metlino
  - V 50. letech průměrná E z vnějšího záření γ = 1,7 Sv,
  - H kostní dřeně u jednotlivců 3–4 Sv
  - Několik případů radiačního syndromu
  - 1 200 obyv. evakuováno, dalších 6 000 později z dalších vesnic
  - Přesto na konci 90. let žádné zvýšení úmrtnosti na rakovinu u potomků ozářených osob

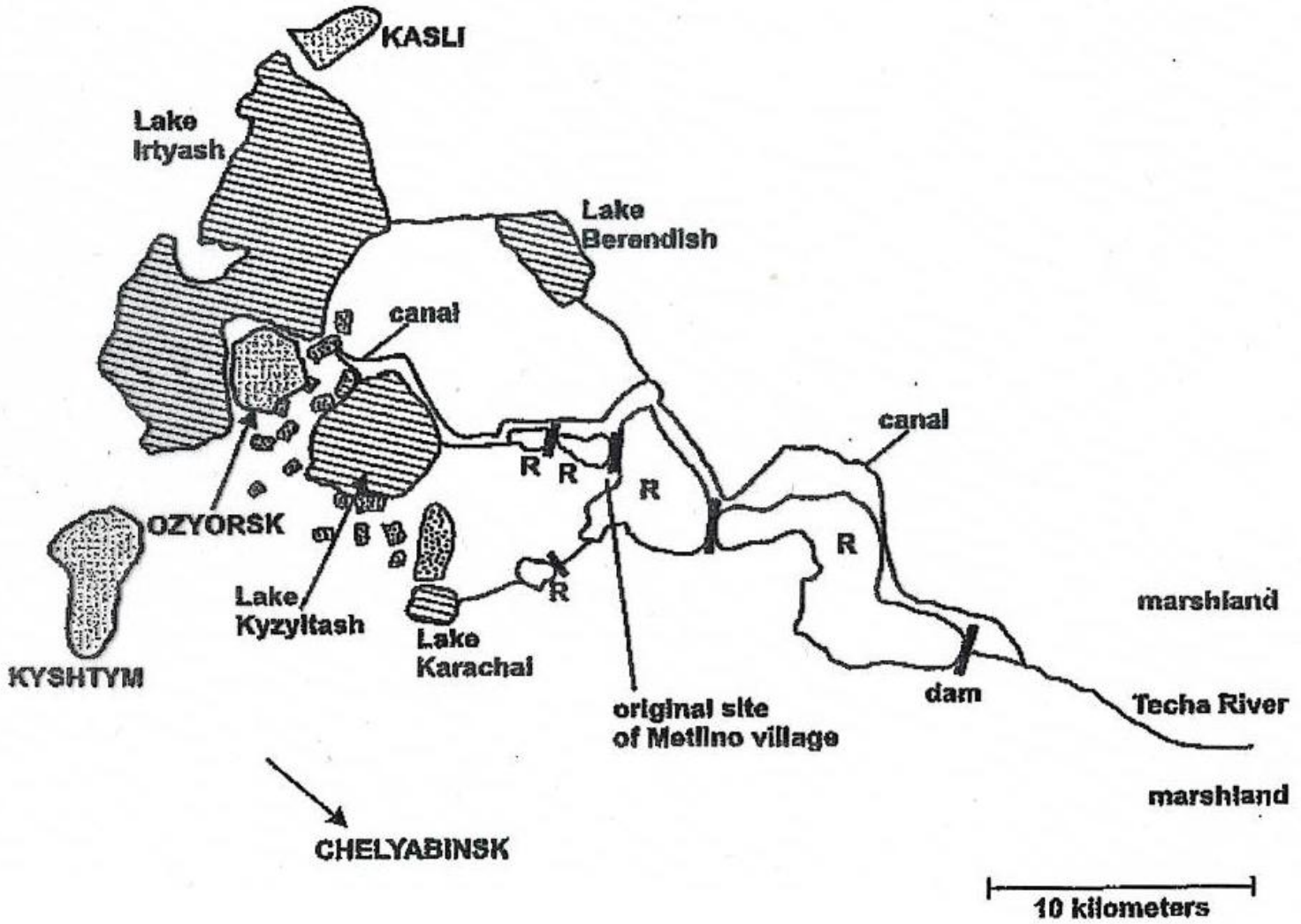
cc BY NC SA

Nehoda Majak 1957

- VRAO(l) z přepracování skladován v nerezových nádržích 300 m^3 v betonových jímkách, pláště chlazeny, odpady obsahovaly NO_3^- a acetát
- Porucha chlazení jedné nádrže → odpaření na 70 m^3 → teplota 350 °C + jiskra od spínače kontrolního zařízení → exploze – obsah $7 \cdot 10^{17}$ Bq vymrštěn (až 1 km) → spad na komplex a okolí, zamořeno několik set km^2, z mraku ozářeno asi 5 000 obyv. v okolí → H = 0,03–1,2 Sv → akutní poškození kůže, žaludku
- Evakuace asi 30 vesnic
- Úřady tajily: v 80. letech zveřejněno špionážní snímkování – odhalilo evakuaci (zmizely vesnice) + ruské ekologické studie s absurdně vysokými aktivitami v ŽP 10^8–10^9 Bq ^{90}Sr / m^2

CC BY NC SA

Ruský jaderný komplex MAJAK



cc BY NC SA

Problémy jaderných komplexů a střelnic obecně

- Zamoření spodních vod → čerpání + čištění
- Rozsáhlé zamoření půdy
- **Remediace půdy:**
  - Vysoká A, velký objem – odstranění povrchové vrstvy → uložení jako RAO
  - Vysoká A, malé objemy (lokální) – vitrifikace, cementace, bitumenace → RAO
  - Fytoremediace – odstranění RN z půd působením rostlin – fytoextrakcí – rostliny berou z půdy živiny (K^+), ale ne úplně selektivně, berou i podobné ionty ($^{137}Cs^+$)

cc BY NC SA

Ad fytoremediace

- **^{137}Cs**
  - Půda → příjem kořeny → přechod do nadzemní části rostliny → sklizeň → biomasa (+ ^{137}Cs) → snížení objemu (lisování, spalování – ^{137}Cs v popelu) → RAO

- Obecně: žádoucí vysoké F_t, rychlý růst – několik sklizní za rok → velký objem biomasy

CC BY NC SA

Ad fytoremediace

- **Polní pokusy**:
  - Černobyl, Brookhaven (USA) – ze zkoušených rostlin je nejlepší redroot pigweed (rychle rostoucí plevel) / amarant / laskavec
  - JE Bradwell (UK) – půda zamořená po poruše potrubí s kapalným RAO – slunečnice, špenát
- Překážkou je vazba Cs na jíl → úprava půdy před fytoextrakcí – přídavek NH_4^+ (vytěsnění Cs z jílu), ruší nitrifikační bakterie oxidací $NH_4^+ \rightarrow NO_3^-$ – přidává se dikyandiamid – inhibitor oxidace
- **Současná situace** – ve stadiu laboratorních a polních pokusů
  – pro reálné použití vadí dlouhá doba remediace

cc BY NC SA

Zdroje IZ mimo kontrolu

- Ztráta kontroly na radionuklidovými zdroji IZ ve zdravotnictví a průmyslu v důsledku nedostatků v:
  evidenci, dodržování předpisů a organizaci likvidace
- ^{60}Co, ^{137}Cs, ^{192}Ir, ^{226}Ra, ostatní méně časté
- Riziko vysokého ozáření osob při náhodných nálezech, příp. většího počtu osob při manipulaci + zamoření budov a vnějších prostor

CC BY NC SA

Zdroje IZ mimo kontrolu

- Ztráta kontroly na radionuklidovými zdroji IZ ve zdravotnictví a průmyslu v důsledku nedostatků v:
  evidenci, dodržování předpisů a organizaci likvidace

- ^{60}Co, ^{137}Cs, ^{192}Ir, ^{226}Ra, ostatní méně časté

- Riziko vysokého ozáření osob při náhodných nálezech, příp. většího počtu osob při manipulaci + zamoření budov a vnějších prostor

cc BY NC SA

Zdroje IZ mimo kontrolu

1. Likvidace pracovišť, zapomenuté zdroje
2. Nevědomé odložení zdroje do kovového odpadu
3. Zdroje IZ v komunálních odpadech
4. Krádeže a nezákonná přeprava

CC BY NC SA

Zdroje radioaktivních látek

- Čidla ionizačních hlásičů požáru – ^{241}Am
  - instalace již zakázána
- Průmyslová měřidla (vlhkoměry, hladinoměry, hustoměry aj.)
  - doly, sklárny, stáčecí linky, výroba textilu, dopravníkové pásy
  - ^{60}Co, ^{85}Kr, ^{137}Cs, ^{241}Am
- Defektoskopické přístroje – ^{60}Co, ^{75}Se a ^{192}Ir
- Lékařské ozařovače a zdroje – ^{99m}Tc a ^{123}I
- Přepravní obalové soubory – ochuzený uran
- Chemické látky a radioaktivní barvy – U, Th, ^{226}Ra, ^{3}H

CC BY NC SA

Ad 1. Likvidace pracovišť, zapomenuté zdroje

- Tammiku (Estonsko, 1994):
  - Nedostatečně zajištěné úložiště RAO, 3 bratři odnesli kontejner s ^{137}Cs, při manipulaci vypadl kovový váleček velikosti propisky, jeden z mužů si ho dal do kapsy a odnesl domů, kontejner do šrotu
  - Už na úložišti se muž necítil dobře, po několika hodinách začal zvracet
  - Přijat do nemocnice s vážným poraněním kyčle a nohy
  - Po 12 dnech zemřel
  - Zdroj nalezen v domě, 200–300 Gy/hod na povrchu

cc BY NC SA

- **Yanango** (Peru, 1999):
  - Z radiografické zařízení pro kontrolu svárů vypadl zdroj ^{192}Ir
  - D = 9966 Gy na kůži, D = 2508 → 190 Gy měkká tkáň (2–7 cm)
  - Stařec zastrčil zdroj do kapsy, kde byl několik hodin
    → amputace nohy

cc BY NC SA

- **Goiania** (Brazílie, 1985):
  - Jedna z nejvážnějších radiačních nehod vůbec
  - Při stěhování nemocnice je v původní budově nechán bez dozoru a upozornění teleterapeutický zdroj ^{137}Cs (93 g CsCl, $A = 5 \cdot 10^{13}$ Bq) → $\dot{D}$ = 4,5 Gy/h v 1 metru
  - Krádež ozařovače, doma se ho snažili rozmontovat při tom praskl vlastní zdroj s práškovým CsCl uvnitř → disperzace
  - Ve sběrně kovů v noci modře světélkuje → show pro přátele → rozebrání materiálu
  - Po pár dnech zažívací potíže, 4 úmrtí po obdržení D = 4,5–6 Gy
  - 249 osob příznaky nemoci z ozáření
  - Monitorování 60 km^2 a 12 000 osob, 85 budov kontaminovaných → 7 zbouráno, 41 evakuováno (200 os.)
  - Čištění, demolice, odstranění půdy → 3 500 m^3 RAO

CC BY NC SA

Ad 2. Nevědomé odložení zdroje do kovového odpadu

- → recyklace → radioaktivity nových produktů → ozáření osob
- Historicky první případy jsou recyklace zlata – od r. 1910 Au kapsle s Rn pro brachyterapii (dlouhodobé dceřiné produkty ^{210}Pb, ^{210}Bi, ^{210}Po)
- Nemocnice, co nepotřebovali, prodaly do výroby Au → tavení → radioaktivní šperky
- Ve státě New York v r. 1981 kontrola 160 000 šperků → nalezeno 133 radioaktivních, 22 bylo odmítnuto odevzdat

CC BY NC SA

- V moderní době převážně roztavení zdrojů ^{60}Co nebo ^{137}Cs v ocelárnách
- Co přechází do oceli → radioaktivní produkty → ozáření osob
- Cs těká → odpadní prach → zamořené zařízení
- Protiopatření – portálové detektory při vjezdu do šrotišť a oceláren, kontrola aut a vagónů – předchází se finančním ztrátám při kontaminaci ocelárny
- Časté případy: USA a Kanada, 1983–1997 → 2357 událostí → roztavení jen ve 29 případech

cc BY NC SA

Závažnější případy tavení zdrojů ionizujícího záření

zdroj	A (GBq)	lokalita/rok
^{60}Co	15000	Mexiko, 1983
^{137}Cs	1000	Itálie, 1989
^{60}Co	930	Auburn Steel, NY, 1983
^{60}Co	740	Taiwan, 1983
^{60}Co	87	Švédsko, 1996
^{137}Cs	56	TAMCO, Ca, 1985
^{137}Cs	37	Auburn Steel, NY, 1993
^{137}Cs	37	Itálie, 1997
^{137}Cs	19	Bayou Steel, LA, 1989
^{137}Cs	12	Neport Steel, KY, 1992

cc BY NC SA

- ČR, 2002 – ve šrotu zachycen zdroj ^{137}Cs, 6,1 GBq;
  – nalezen vlastník cukrovar Modřany (hladinoměr)
  – příčina – zdroj přehlédnut při rekonstrukci objektu, po privatizaci zdroj nebyl likvidován podle předpisů

Mimořádné události (záchyt zdrojů mimo kontrolu)

	2002	2003	2004	2005	2006	2007
celkem	82	97	90	52	82	59
záchyty železničních vagónů a nákladních automobilů s kovovým šrotem	41	37	38	19	23	30
vozy s komunálním odpadem	20	46	30	18	12	19
jiné*	21	14	32	15	47	10

* předměty v zavazadlech na letišti a hraničních přechodech (radioaktivní minerály), radioaktivní preparáty v nepovolených skladištích chemikálií, nálezy podezřelých předmětů, při domovních prohlídkách

cc BY NC SA

- Taiwan (1982):
  - Roztaven zdroj ^{60}Co → pruty do železobetonu → 120 domů
  - Zjištěno v r. 1992
  - 114 obyv. vystaveno H = 0,5 až 270 µSv/h,
    celková H od mSv po 2,36 Sv/10 let
- Takové případy se dodatečně hodnotí z hlediska vlivu IZ na výskyt rakoviny a leukémie
- ORNL – jediné licencované zařízení na tavení kontaminovaných kovů – 10 tunové bloky pro stínění urychlovačů – velká úspora materiálu, vyrobeno 60 000 t stínění, úspora 900 USD/t, celkem asi 50 mil. USD + značné snížení objemu RAO

cc BY NC SA

Ad 3. Zdroje IZ v komunálních odpadech

- Zdroje s menší aktivitou
- Nukleární medicína, výzkumné ústavy, školy – nepozornost – odložení předmětů, které překračují uvolňovací úroveň, do běžného odpadu
- Náhodně z domácností – staré léčebné preparáty s ^{226}Ra, ciferníky, radioaktivní minerály
- Spalovny vybaveny citlivými detektory pro kontrolu sběrných vozů – SAKO Brno plastické scintilátory 18 dm^3
- Ukládání popela ze spaloven se řídí uvol. úrovněmi a podmínkou, že musí být uložen tak, aby 1 m od povrchu skládky byl H <0,4 μSv/h

cc BY NC SA

Ad 4. Krádeže a nezákonná přeprava

- Radionuklidové zdroje IZ, jaderný materiál (U, Pu)
- Databáze IAEA, 1993–2004 – přes 650 případů, z toho 30 % jaderných materiálů, zbytek uzavřené zářiče ^{137}Cs, ^{90}Sr, ^{241}Am, ^{60}Co, ^{192}Ir
- Cca polovina případů spojená s kriminální činností – krádeže, ilegální vlastnění, pašování, ilegální prodej
- Riziko – terorismus – „špinavá bomba“ – rozptýlení radioaktivního materiálu chemickou výbušninou – destabilizace společnosti + panika, radiofobie; centrum exploze dlouhodobě zamořené (není možná účinná dekontaminace)

cc BY NC SA

Přeprava jaderných materiálů a zdrojů ionizujícího záření

	2004	2005	2006	2007
přeprav celkem	50	45	40	48*
z toho:				
čerstvé jaderné palivo z Ruska do Dukovan/letecky+silnice	5	5	6	3
čerstvé jaderné palivo z USA do Temelína/námořní+železnice	1	2	2	3
čerstvé jaderné palivo z Ruska do Řeže, vyhořelé palivo z Řeže do Ruska/silnice+železnice	2	2	1	1
uranový koncentrát z DIAMO do zahraničí	10	9	7	5
vysoce aktivní zdroje ionizujícího záření ze zahraničí			3	2
oxidy uranu z ÚJP Praha do skláren v ČR	14	12	7	19

* + 33 přeprav radioaktivního odpadu z Temelína do Dukovan

cc BY NC SA

cc BY NC SA

cc BY NC SA

cc BY NC SA

cc BY NC SA

cc BY NC SA

cc BY NC SA

cc BY NC SA

Magisterský studijní program JADERNÁ ENERGETIKA vznikl za přispění

Financováno Evropskou unií
NextGenerationEU

NÁRODNÍ PLÁN OBNOVY

MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ, MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

NPO_VUT_MSMT-16609_2022

CC BY NC SA

VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ
V BRNĚ

Financováno Evropskou unií
NextGenerationEU

NÁRODNÍ PLÁN OBNOVY

MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ, MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FAKULTA CHEMICKÁ

FAKULTA STAVEBNÍ

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

Přednáška magisterského studijního programu JADERNÁ ENERGETIKA

Radioekologie a úvod do jaderných technologií

Využití jaderných reakcí a ionizujícího záření – výroba a využití radionuklidů, nukleární medicína, ozařování potravin, radiační chemie polymerů, radioanalytické metody (neutronová aktivační analýza, radioimunoanalýza, metody datování)

Fakulta chemická

Ota Fišera

2024

CC BY NC SA

Využití jaderných reakcí a ionizujícího záření

- Výroba a využití radionuklidů
- Nukleární medicína
- Ozařování potravin
- Radiační chemie polymerů
- Radioanalytické metody
  - neutronová aktivační analýza
  - radioimunoanalýza
  - metody datování

cc BY NC SA

Výroba radionuklidů

- Jednoduché jaderné reakce

  Terčové jádro + střela ⟶ jádro + 1 částice

$$^{14}_{7}N + ^{1}_{0}n \rightarrow ^{14}_{6}C + ^{1}_{1}p$$

- **Využití jaderných reakcí**
  - Výroba radioaktivních izotopů:
    - zdroje záření – ^{60}Co, ^{192}Ir, ^{241}Am
    - nukleární medicína – ^{99m}Tc, ^{18}F, ^{131}I
    - izotopů nejtěžších prvků (Z > 100)
    - výzkum
  - Chemická analýza – neutronová aktivační analýza
  - Jaderné štěpení – izotopy Pu

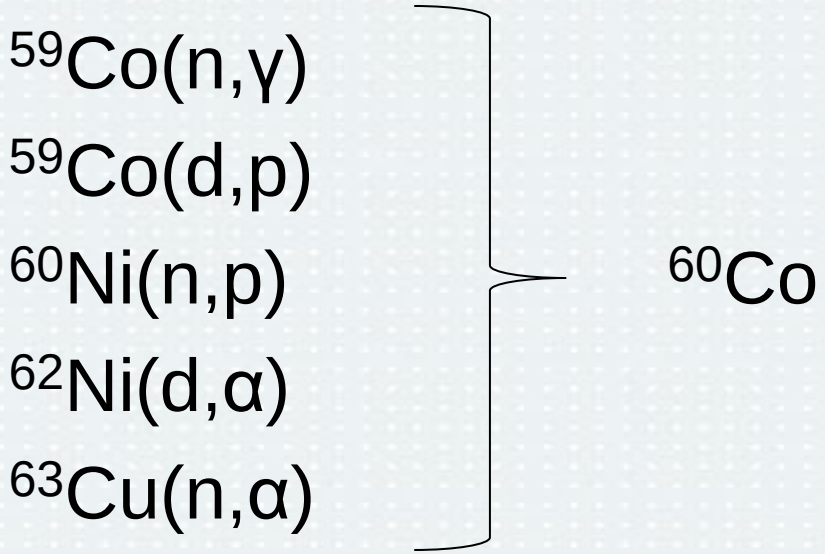
cc BY NC SA

Provedení jaderných reakcí

- **Volba jaderné reakce:**
  - nosičový x beznosičový preparát
  - účinný průřez
  - dostupný zdroj částic – reaktor (n^0), urychlovače (d, p, He)
  - izotopové složení – souběžné reakce, obohacování
  - chemická forma – jednoduchá, tepelně stálá
  - skupenství – ideálně (s), (g) – tlak, (l) – radiolýza
- **Zpracování ozářeného terče:**
  - zapouzdření – uzavřený zdroj záření
  - chemické zpracování – rozpuštění, separace, čištění, syntézy
  - ochrana – horké komory, dálkové manipulátory, stínění

cc BY NC SA

Provedení jaderných reakcí



BY NC SA

Provedení jaderných reakcí

Reakce neutronů

- Zdroj neutronů – neenergetický jaderný reaktor, tzv. ozařovací kanály
  $\varphi \approx 10^{12}\ cm^{-2} \cdot s^{-1}$
- Terčový materiál – l, g, s;
  - izotopové složení, sloučenina
  - obal z hliníku nebo SiO_2
- X(n,γ)Y – nejčastější reakce
  - vysoké výtěžky pro pomalé n0
  - nadbytek neutronů → přeměna β-

Reakce kladných částic

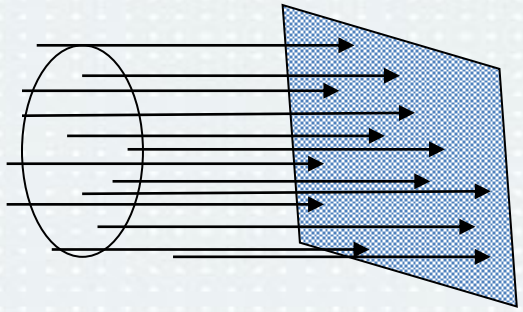
- Střely – p, d, t, α, těžká jádra
  - urychlené částice – překonání coulomb. bariéry a případné prahové energie u endoergických r.
  - nižší výtěžky, vyšší u (d,p) – strhávací r.
- Zdroje střel: lineární urychlovač, cyklotron
  - tok částic φ → proud I
    $1\ mA = 3{,}8 \cdot 10^{15}/z\ \ s^{-1}$
  - tok i terč ve vakuu, chlazení

CC BY NC SA

Výtěžek radioaktivního produktu jaderné reakce

$X + x \rightarrow Y(\text{radioaktivní}) + \ldots \quad A(Y) = f(t_{ozař})$

Tok částic, ϕ [$m^{-2} \cdot s^{-1}$]



Tenký terč, N_T, S

přírůstek úbytek

$$dN_Y / dt = \sigma \varphi N_T - \lambda_Y N_Y$$

σ [m^2] – účinný průřez reakce

Vedlejší jednotka: 1 barn = 10^{-28} m^2

(≈ geom. průřez jádra uranu)

$$N_Y = \sigma \varphi N_T / \lambda_Y \cdot (1 - e^{-\lambda_Y t_{ozař}})$$

$$A_Y = \sigma \varphi N_T \cdot (1 - e^{-\lambda_Y t_{ozař}})$$

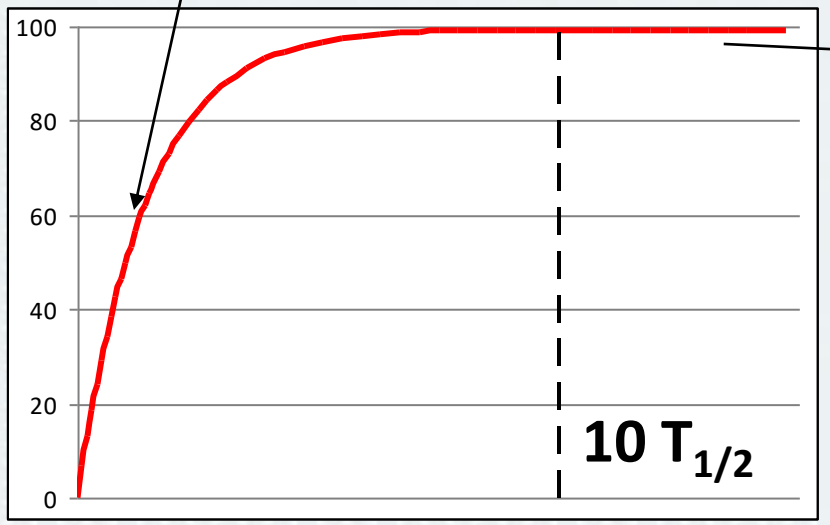
CC BY NC SA

Výtěžek radioaktivního produktu jaderné reakce

- Limitní případy:
  - $t_{ozař} << T_{1/2}$

$$e^{-\lambda_Y t_{ozař}} \approx 1 - \lambda_Y t_{ozař}$$

$$A_Y = \lambda_Y \sigma \varphi N_T t_{ozař}$$



  - $t_{ozař} >> T_{1/2}$

$$e^{-\lambda_Y t_{ozař}} \approx 0$$

$$A_Y = \sigma \varphi N_T$$

Saturační aktivita

- Teoretické maximum $N_Y = \phi S$
- Výtěžek $w = \Delta N / \phi S = \sigma N_T / S$

cc BY NC SA

Výtěžek radioaktivního produktu jaderné reakce

- Příklad:

  $^{55}Mn(n,\gamma)^{56}Mn$, $T_{1/2}$ = 2,56 h, $\lambda = 7{,}52 \cdot 10^{-5}\ s^{-1}$

  – terč 1 g Mn, $N = 1{,}11 \cdot 10^{22}$

  – pomalé neutrony, $\sigma = 1{,}3 \cdot 10^{-27}\ m^2$

  – jaderný reaktor, $\varphi = 1 \cdot 10^{16}\ m^{-2} \cdot s^{-1}$

  – $t_{ozař}$ = 1 hodina

$$A_Y = \sigma\varphi N \cdot (1 - e^{-\lambda t_{ozař}})$$ → A = $3{,}4 \cdot 10^{10}$ Bq

$A_{sat} = 1{,}43 \cdot 10^{11}$ Bq → $N_{sat} = 2 \cdot 10^{15}$ → porovnat s N

cc BY NC SA

Reakce neutronů

- $^{59}Co(n,\gamma)^{60}Co$, β^-, $T_{1/2}$ = 5,27 let
  - ozařování ve formě slitiny s Ni
  - lze přímo použít jako uzavřený radionuklidový zářič
  - nebo rozpustit, chemicky separovat Co → ^{60}Co sloučeniny
  - nelze separovat izotopy→ produkt obsahuje tzv. **nosič** (stab. Co)

- $^{31}P(n,\gamma)^{32}P$, β^-, $T_{1/2}$ = 14,3,
  d: 0,35 g, A = 75 GBq, A_s = 7 GBq/mol
  - terč P_2O_5 → rozpuštění v HNO_3 → $H_3{}^{32}PO_4$ → [^{32}P]ATP
  - čištění na iontoměničích
  - **Alternativa:**
  - $^{32}S(n,p)^{32}P$: 250 g S, A = 150 GBq, A_s = 200 TBq/mmol
  - konkurenční reakce $^{33}S(n,p)^{33}P$ $^{34}S(n,\gamma)^{35}S$)

CC BY NC SA

Výsledný produkt jako produkt přeměny produktu jaderné reakce

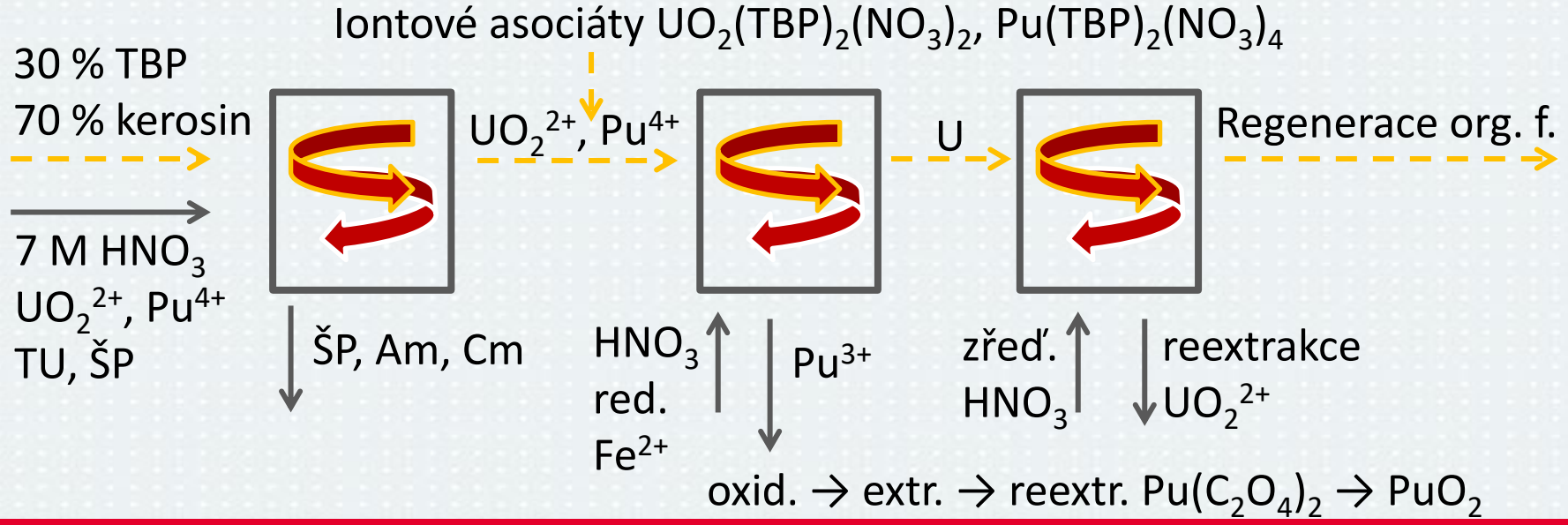
- $^{130}Te(n,\gamma)^{131}Te$ (β^-, $T_{1/2}$ = 25 min) $\longrightarrow$ ^{131}I β^-, $T_{1/2}$ = 8 dní
  - ^{130}I není přírodní a je radioaktivní
  - terapie nádorů štítné žlázy, A ≈ GBq

- $^{209}Bi(n,\gamma)^{210}Bi$ (β^-, $T_{1/2}$ = 5 dní) $\longrightarrow$ ^{210}Po α, $T_{1/2}$ = 138 dní
  - Po nemá stabilní izotopy, v přírodě pouze jako produkt U řady
  - separace vakuovou destilací
  - využití: medicína, textilní průmysl, termočlánky
  - stopové množství v cigaretách

CC BY NC SA

Výsledný produkt jako produkt přeměny produktu jaderné reakce

- Výroba plutonia: $^{238}U(n,\gamma)^{239}U$ (β^-, $T_{1/2}$ = 23,45 min) → ^{239}Np (β^-, $T_{1/2}$ = 2,36 dne) → ^{239}Pu, α, $T_{1/2}$ = 24110 let
  - výroba jaderného paliva, výroba vyšších transuranů
  - separace – zpracování vyhořelého paliva PUREX proces
    - TBP = tributylfosfát, $(CH_3CH_2CH_2CH_2O)_3PO$



cc BY NC SA

Reakce kladných částic

- $^{18}O(p,n)^{18}F$, β^+, $T_{1/2}$ = 109,77 min (= $^{20}Ne(d,\alpha)^{18}F$)
  - terč H_2O (obohac.^{18}O) → $^{18}F^-$ → fluorodeoxyglukoza [^{18}F]FDG → vyšetření PET
- $^{9}Be(\alpha,n)^{12}C$ (stab.)
  - zdroj neutronů
  - zdrojem α je ^{241}Am nebo Pu
  - $^{239}PuBe$: $\varphi = 2{,}7 \cdot 10^7\ s^{-1}$, střední E(n) = 4,4 MeV
- $^{3}H(d,n)^{4}He$ (stab.)
  - terč $^3H_2$ (Ti, Zr) → zdroj neutronů
  - termojaderná reakce

CC BY NC SA

Využití radionuklidů

1. **Uzavřený radionuklidový zdroj** – přímo po ozáření izolace v pevném hermetickém pouzdře → vnější ozařování
   - ^{137}Cs, ^{60}Co, ^{152}Ir …
   - Defektoskopie, Leksellův gama nůž
2. **Sloučeniny značené radioaktivními izotopy:**
   - často nelze ozařovat požadovanou sloučeninu
     - RI nelze připravit z izotopu ve sloučenině – neexistuje chemický analog terčového izotopu (^{7}Li – ^{3}H, ^{14}N – ^{14}C)
     - radiační rozklad, např. [^{32}P]ATP, vedlejší reakce…
   - Příprava značených sloučenin z jednoduchých prekurzorů

CC BY NC SA

Metoda radioaktivních indikátorů

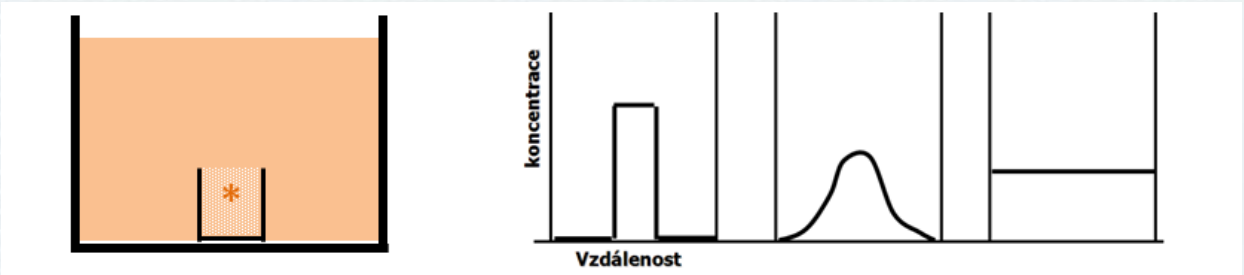
- Využití radionuklidů ke sledování procesů pomocí izotopicky modifikovaných sloučenin

- Důvody:
  - Nelze studovat probíhající děje se sloučeninami s přírodním izotopovým složením
  - Alternativa k jiným metodám (např. rozpustnost, tenze par)

cc BY NC SA

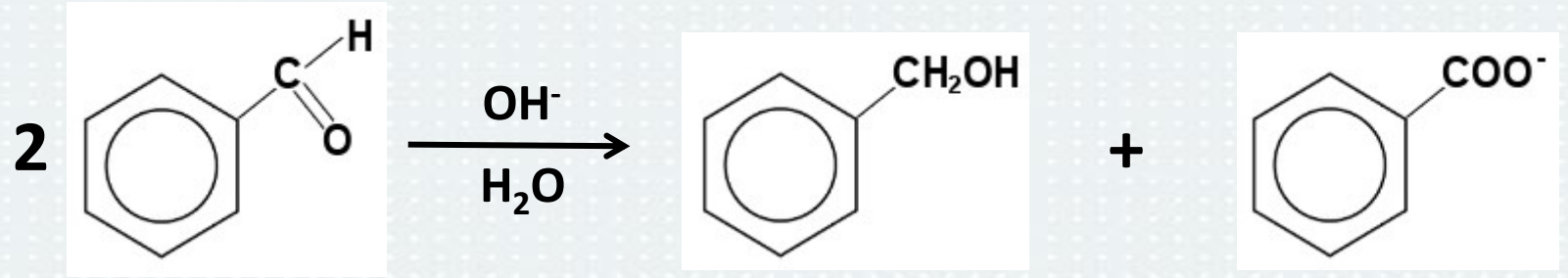
Metoda radioaktivních indikátorů

- **Samodifúze** – stanovení koeficientů samodifůze v plynech, kapalinách i pevných látkách (kovech)



- **Reakční mechanizmy** – rozlišení mezi dvěma možnými mechanismy reakce

– původ H v methylové skupině benzylalkoholu z benzylaldehydu nebo z H2O?

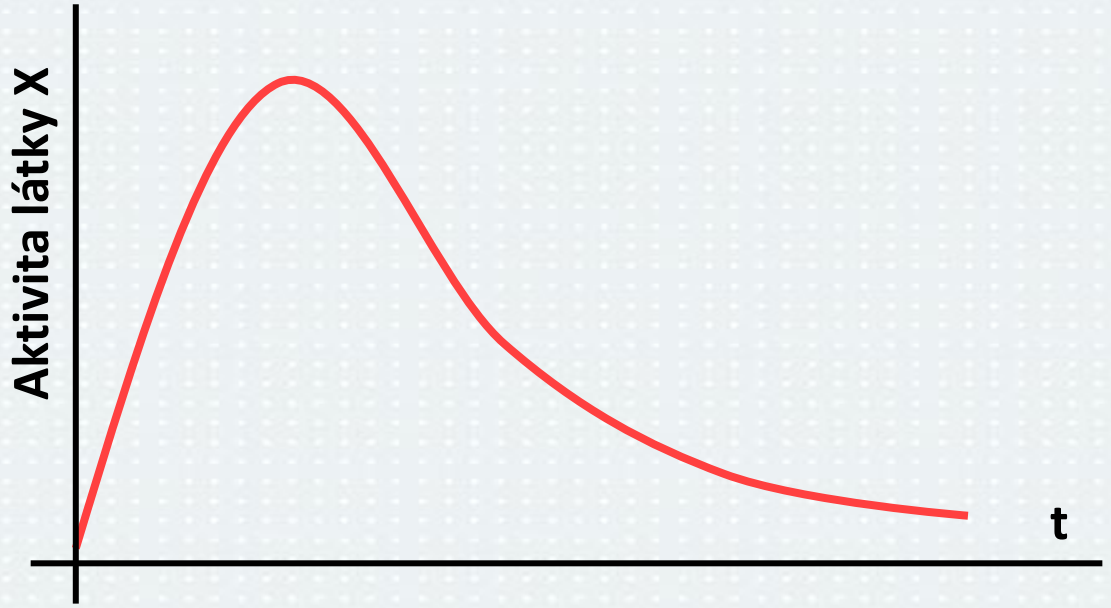


Při použití $^{3}H_2O$ neobsahuje benzylalkohol ^{3}H → H má původ v benzylalkoholu.

BY NC SA

Metoda radioaktivních indikátorů

- **Metabolický obrat**
  - V organismu je koncentrace látky X rovnovážná, stále vzniká z prekurzoru a stále je odbourávána (např. červené krvinky)
  - Studium pomocí značeného prekurzoru



BY NC SA

Nukleární medicína

- **Diagnostická radiofarmaka**
  - Látka značená radioizotopem pro diagnostiku v nukleární medicíně
  - Pokud možno, volí se látka, která se specificky ukládá nebo zadržuje ve vyšetřovaném orgánu
  - Podání: injekčně, per os, vdechováním
  - Účel:
    - funkce orgánů – srdce, plíce, trávicí trakt
    - abnormality – nádory, infarkt

cc BY NC SA

Nukleární medicína

- **Radioizotopy:**
  - β^+ → emise anihilačních fotonů
    → PET – pozitronová emisní tomografie (3D obraz)
  - β^- s emisí záření γ, E_γ = 80 – 400 keV
    → SPECT – Single Photon Emission Computed Tomography (3D obraz), scintigrafie (2D obraz)
  - Stejná detekce záření pomocí tzv. gama kamery
  - Krátké poločasy – snižují ozáření po vyšetření

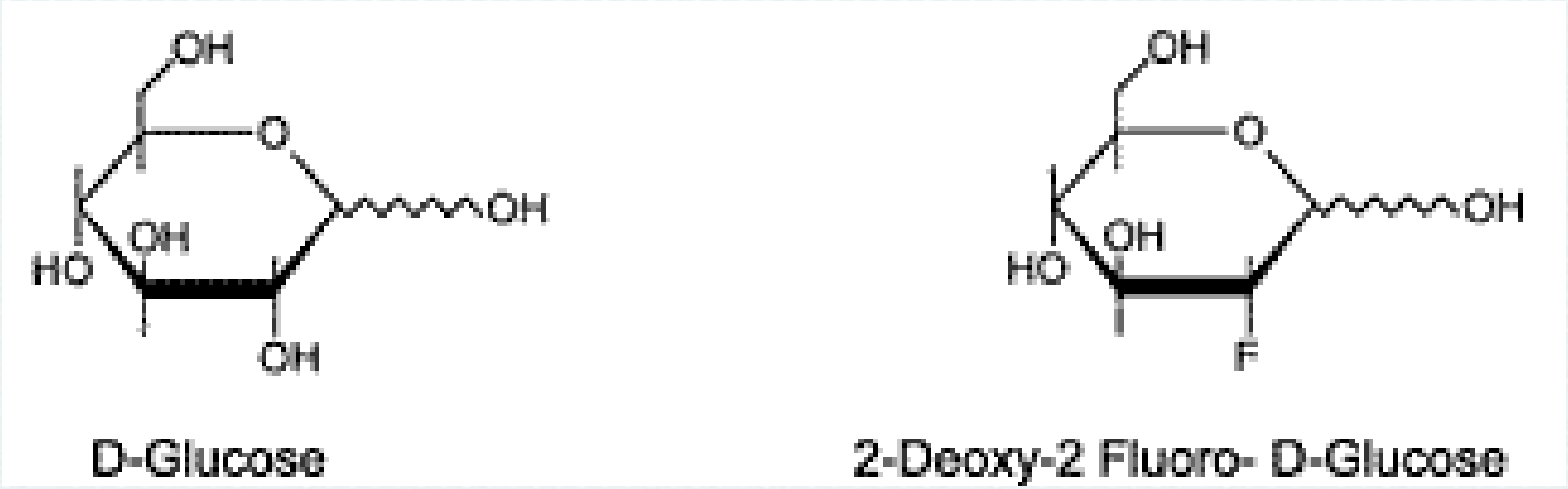
cc BY NC SA

Nukleární medicína

- **Radiofarmaka:**
  - Ionty: $^{124}I^-$ – štítná žláza ($T_{1/2}$ = 4,176 d)
    $^{201}Tl^+$ (analog K) – srdeční sval ($T_{1/2}$ = 3 d)
    $^{18}F^-$ – kosti
  - Molekuly: ^{18}F-fluorodeoxyglukóza – nádory
    ^{11}C-octan, $^{13}NH_3$, $^{15}O_2$, $C^{15}O_2$, $H_2{}^{15}O$,
  - Komplexy, cheláty: pro RI kovů, cheláty ^{99m}Tc, EDTA, DTPA

cc BY NC SA

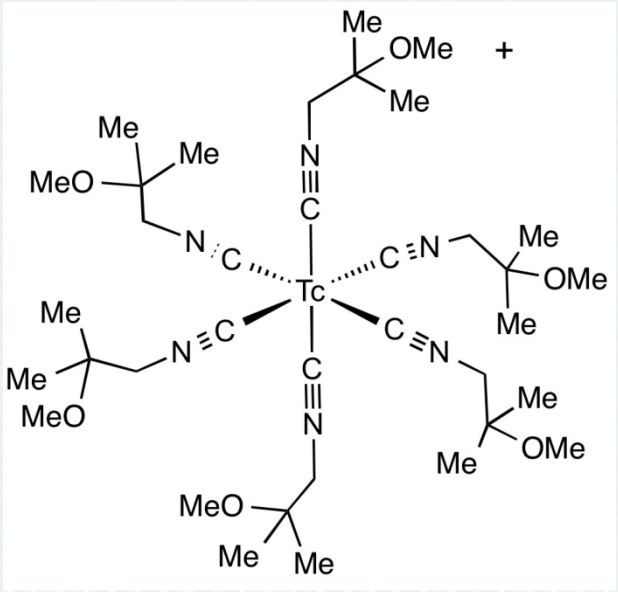
Nukleární medicína



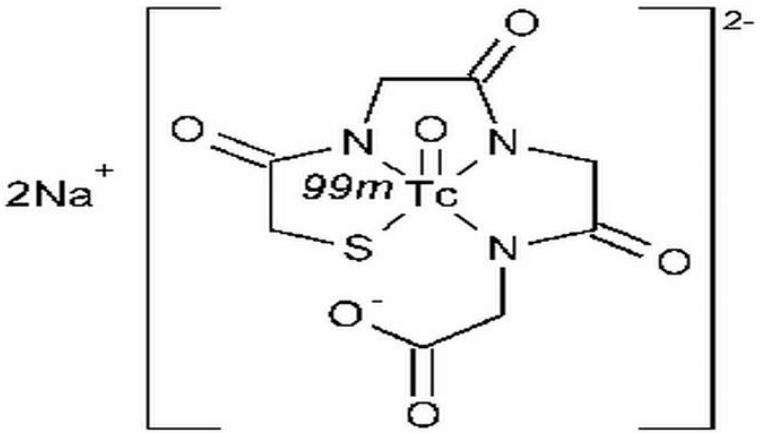
BY NC SA

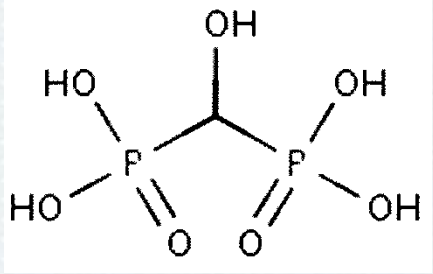
Nukleární medicína

^{99m}Tc sestamibi – srdeční sval
Hexakis(2-methoxy-2-methylpropylisonitril)



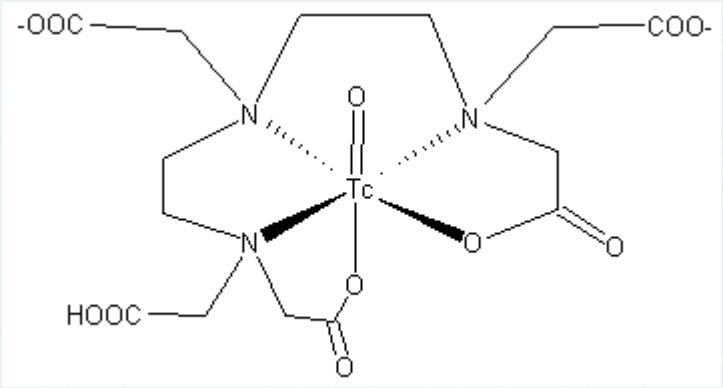
^{99m}Tc-MAG3 – ledviny
(merkaptoacetyltriglycin)





^{99m}Tc-HDP – kosti
(hydroxymetylendifosfonát
= oxidronát)

^{99m}Tc-DTPA – ledviny, mozek, plíce
(kyselina dietylentriaminopentaoctová)



BY NC SA

Nukleární medicína

- **Terapeutická radiofarmaka**
  - Alternativa k externímu ozařování (^{60}Co, hadronová terapie)
- **Radioimunoterapie:**
  - Značené protilátky selektivní pro receptory nádorových buněk – transport RI přímo k nádoru
  - Označení protilátky nesmí změnit její imunologické vlastnosti
  - Radionuklidy: β^- s vyšší E, bez záření γ, ^{90}Y, ^{67}Cu
    - vhodný poločas – trvání ozařování
    - aktivita podle potřebné dávky ≈ GBq
    - vazba ve formě chelátů na protilátky

cc BY NC SA

Nukleární medicína

- **Terapeutická radiofarmaka**
  - Štítná žláza: ^{131}I
  - Paliativní medicína: zlepšení/udržení kvality života → převážně tlumení bolesti u kostních metastáz

    $^{89}SrCl2$, ^{90}Y-citrát, ^{177}Lu-EDTMP, ^{186}Re, ^{153}Sm
  - Synovektomie: léčba kloubní mukózy

    ^{90}Y-citrát, ^{169}Er-citrát, $^{188}Re_2S_7$
  - Oční aplikátory
  - Brachyterapie – uzavřené zdroje záření,

    ^{137}Cs, ^{60}Co, ^{90}Y, ^{90}Sr, ^{252}Cf

CC BY NC SA

Chemické účinky ionizujícího záření

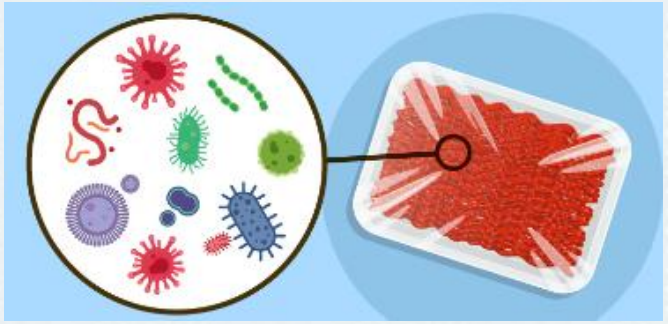
- Chemické změny v ozářené látce – **radiolýza**
- Obor **radiační chemie** – analogie k fotochemii

- **Praktické využití:**
  - **Ozařování potravin**
  - **Ionizující záření v technologii polymerů**

26

26
BY NC SA

Ozařování potravin



Zdroj:cdc.gov (oba)

- Odstraňování bakterií a plísní (poškození DNA)
- Oddálení zrání ovoce a zastavení klíčení zeleniny
- **Důvod:** zdravotní nezávadnost, skladovatelnost
- Schváleno WHO (1980) – levná a účinná technologie bezpečná pro lidské zdraví
- **Zdroj IZ:** záření gama (^{60}Co), rtg. (do 5 MeV)
  e^- (urychlovače do 10 MeV)
- **Dávka:** 10 – 10 000 Gy (odolnost bakterií)
- **Využití:** koření, brambory (klíčivost), cibule, česnek, ovoce, maso a ryby; potraviny pro astronauty
- Právo volby – označování ozářených potravin
- Potraviny se ozářením nestávají radioaktivními

BY NC SA

Ozařování potravin

- Radiolýza hlavních komponent
- D < 10 kGy – žádné změny hlavních komponent
  – ztráta vitamínů jako při tepelném zpracování
- D > 10 kGy – v mase → alkany, alkeny, aceton, alkoholy
- Masné výrobky – nevyhovující barva (zelená, hnědá) – změny hemo- a myoglobulinu, komplexy Fe^{2+}, Fe^{3+}, oxidace působením •OH
  – pachy -SH → CH_3-S-S-CH_3 (Dimethyldisulfid)
- **Potlačení:** – ozařování při -20 °C
  – ozařování vakuovaných balení (vyloučení O_2 a vznik O_3)
  – přídavek antioxidantů k mletému masu

cc BY NC SA

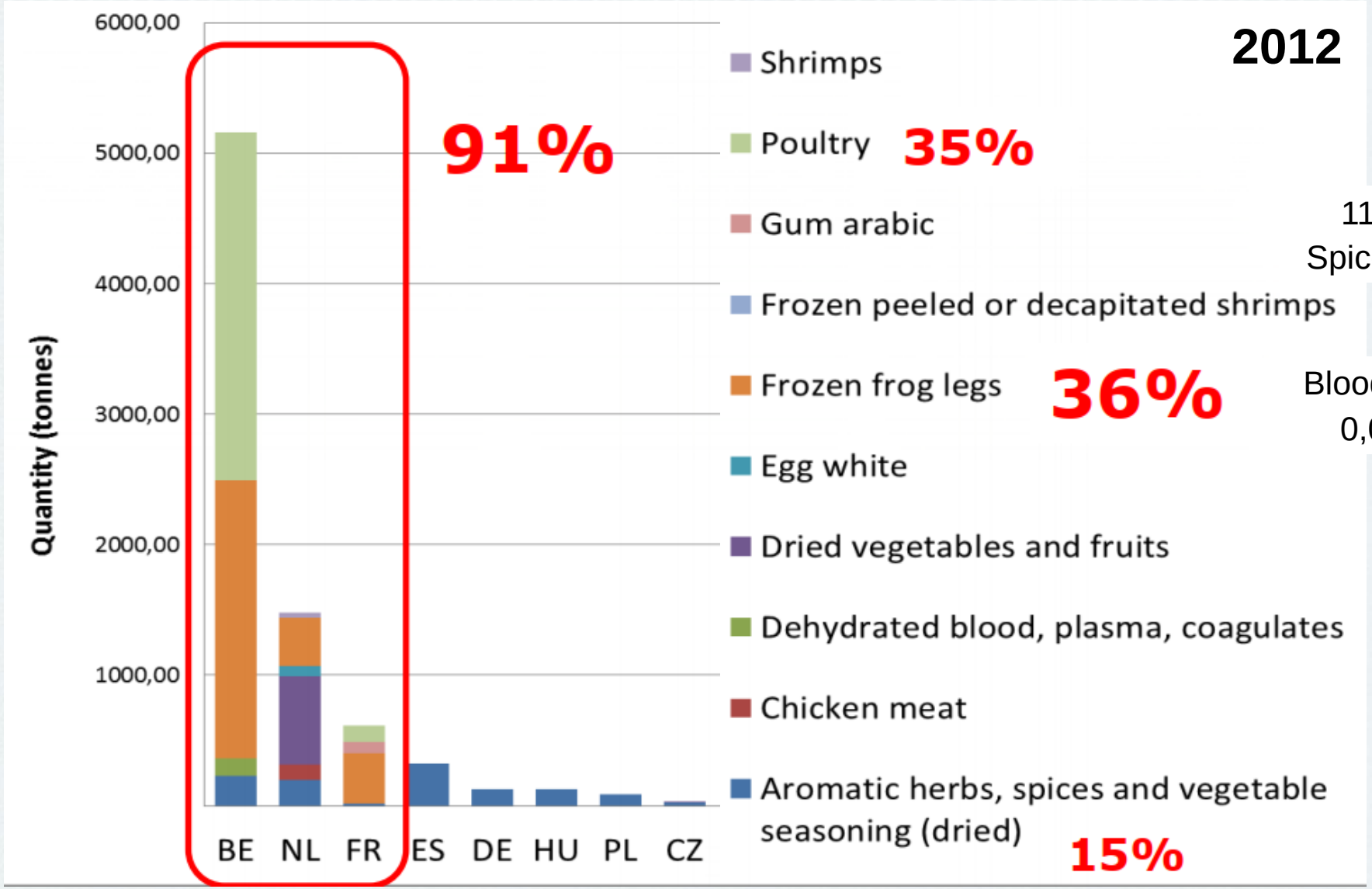
Ozařování potravin

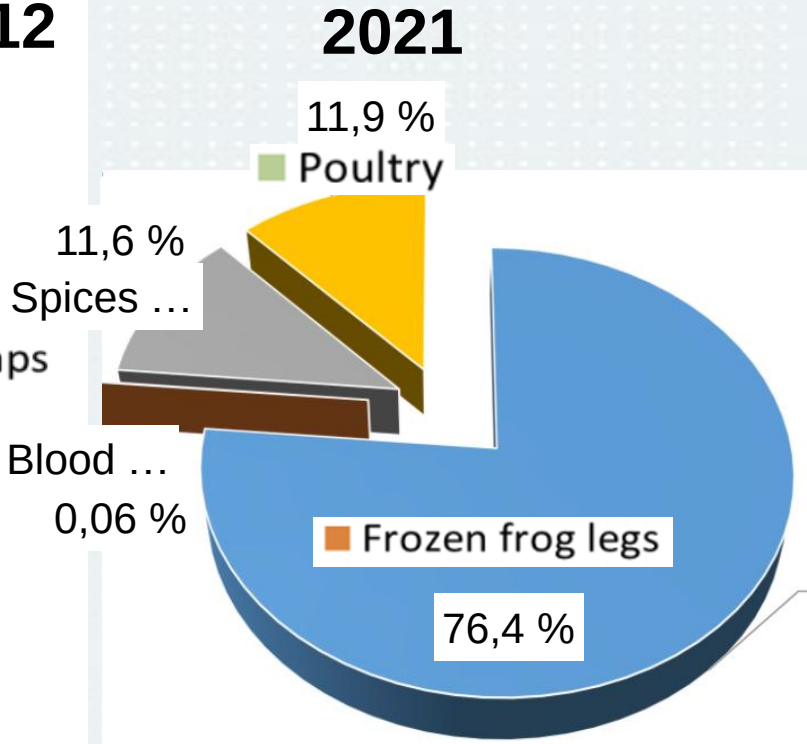
Produkt	Nejvyšší povolená D (kGy)
Hluboce zmrazené aromatické byliny	10
Brambory	0,2
Ovoce (včetně hub, rajčat)	2
Sušená zelenina a ovoce	1
Obiloviny	1
Obilné vločky a klíčky pro mléčné výrobky	10
Obilné vločky	1
Kuřecí maso	7
Zmrazená žabí stehýnka	5
Ryby a mušle	3

cc BY NC SA

Ozařování potravin

Celkové množství: 7,972 t (2012) → 1664,7 t (2021)





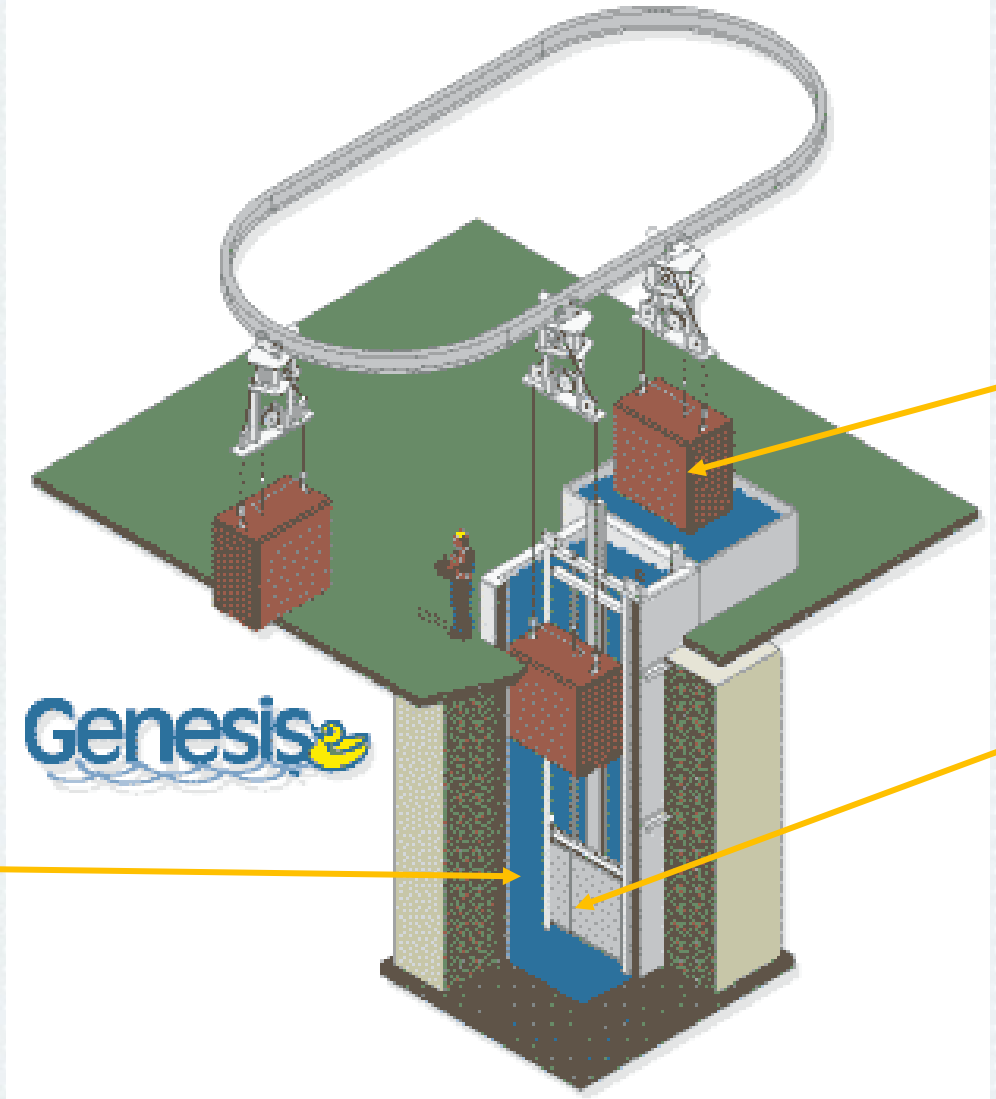
Zdroj:https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52023DC0676

Zdroj: 3-10-IAEA-CN-222-207-Coulon-EC

CC BY NC SA

Ozařování potravin

- **Kapacita** – 90 tun/den
- **Pronikavost záření gama** – až 60 cm tloušťky kontejneru



Zdroj: graystarinc.com/genesis.html

Objem kontejneru
900 litrů

Zdroj IZ
^{60}Co; max $3{,}7\times10^{16}$ Bq
$T_{1/2}$ = 5,3 r
Komora plněná He

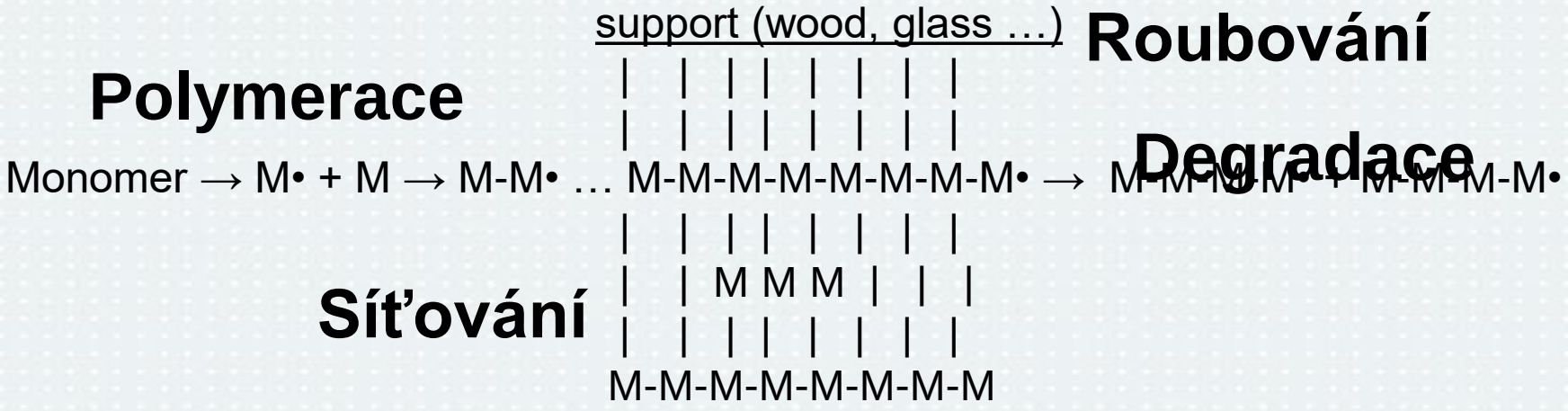
Bazén – rozměry
2,1 x 2,4 x 6,7 m
(5,6 m pod zemí)

Stínění IZ
Min hloubka nad zdrojem 3,8 m

BY NC SA

Ionizující záření v technologii polymerů

- **Radiační chemie:**
  - **radiolýza** → Chemické změny v ozářené látce
    → Excitace + ionizace + volné radikály
    → Disociace, substituce, adice



Ionizující záření v technologii polymerů

- **Radiační polymerace:**
  - Ošetřování archeologických nálezů a uměleckých předmětů – kámen, papír, dřevo, kosti
  - Kompozitní materiály – dřevo, kámen, cihly
    → odolnost vůči vodě a otěru, tvrdost, barvitelnost
  - Impregnace monomerem methylmetakrylátu
    → radiační polymerace

CC BY NC SA

Ionizující záření v technologii polymerů

- **Povrchové radiační roubování:**
  - Vytvoření polymerní vrstvy spojené s podkladem (polymer, sklo, kov, keramika)
  - Barvitelnost, nehořlavost, chemická a mechanická odolnost …
  - Laky – automobilový průmysl, nábytek
  - Hydrofobní materiály – celulóza + vinylové polymery
  - Absorpce vody (pleny) – materiál na bázi škrobu + akrylonitril/amid
  - Léky s postupným uvolňováním, léčba popálenin

cc BY NC SA

Ionizující záření v technologii polymerů

- **Radiační síťování:**
  - Částečné poškození polymerního řetězce → reakční místa → vzájemná polymerace řetězců do 3D sítě
  - Mechanická, tepelná, chemická odolnost
  - PVC, PE, kaučuk, silikonový kaučuk, polyamidy
  - Izolace kabelů – izolační a tepelná odolnost
  - Potrubí – zesíťované PVC, odolné do 180 °C
  - Tepelně smrštitelné obaly v potravinářství

CC BY NC SA

Ionizující záření v technologii polymerů

- **Radiační degradace:**
  - Náhodné štěpení polymerních řetězců
  - Z polymeru vznikají produkty s menší molekulovou hmotností – pastovité a olejovité produkty
  - Menší mechanická a chemická odolnost
  - Teflon → nízkomolekulární fluorované uhlovodíky → mazivo
  - Celulóza → biodegradabilní prášek pro hojení ran
    → částečná degradace → krmivo, ethanol
  - Plastový odpad → částečná degradace → spalování

cc BY NC SA

Radioanalytické metody

– Analytické metody využívající radionuklidů nebo ionizujícího záření pro stanovení stabilních prvků, látek apod.

– **Neutronová aktivační analýza**

– **Radioimunoanalýza**

– **Metody datování**

cc BY NC SA

Aktivační analýza

- Analýza prvků
- Ozařování vzorku – n^0, kladné částice
  → z izotopů prvku vznikají radioizotopy
  → kvalitativní analýza – spektrum záření gama
  kvantitativní analýza – stanovení aktivity
  – výtěžek pomocí standardu $m_x = m_{st} A_x/A_{st}$

- Analýza stopových množství (ppm, ppb)
- Současné stanovení více prvků

38

BY NC SA

Aktivační analýza

- **Provedení:**
  - Příprava vzorku a standardu do dané geometrie ozařování
  - Aktivace
  - **Destruktivní** analýza – chemická úprava vzorku – rozklad, separace
  - **Nedestruktivní** analýza – přímé měření spektra gama
  - Vyhodnocení – identifikace vzniklých radionuklidů pomocí energie záření gama, určení jejich aktivity

cc BY NC SA

Aktivační analýza

- **NAA – neutronová aktivační analýza**
  - Běžná metoda, pro mnoho prvků
  - Pro některé prvky (Sb, Ag, Au) nejcitlivější metoda 10^{-10} %
  - INAA – Instrumentalní NAA – nedestruktivní
  - RNAA – Radiochemická NAA – destruktivní
- **CPAA – aktivační analýza nabitými částicemi**
  - p, d, t, α, ^{3}He, $\phi = 10^{12} – 10^{14}$ s^{-1}, E(p) = 10 – 15 MeV
  - $^{18}O(p,n)^{18}F$ – ppb O v hliníku
  - $^{10}B(d,n)^{11}C$ – ppb B v křemíku – oba jsou $\beta^+ \rightarrow$ anihil. fotony
- **HIAA – aktivační analýza těžkými ionty**
  - $^{1}H(^{7}Li,n)^{7}Be$ – citlivost 0,1 ppm
  - $^{7}Li(^{12}C,n)^{18}F$

cc BY NC SA

Aktivační analýza

- Aktivační analýza s okamžitými částicemi = **promptní**
- X(x,y)Y – analyzuje se y místo Y,
- Měření během ozařování
- Typ a energie produkované částice jsou známé z předpokládané jaderné reakce

- $^{14}N(n,\gamma)\,^{15}N$ – biologický materiál, výbušniny
- $^{2}H(\gamma,n)\,^{1}H$
- $^{10}B(n,\alpha)\,^{7}LI$

cc BY NC SA

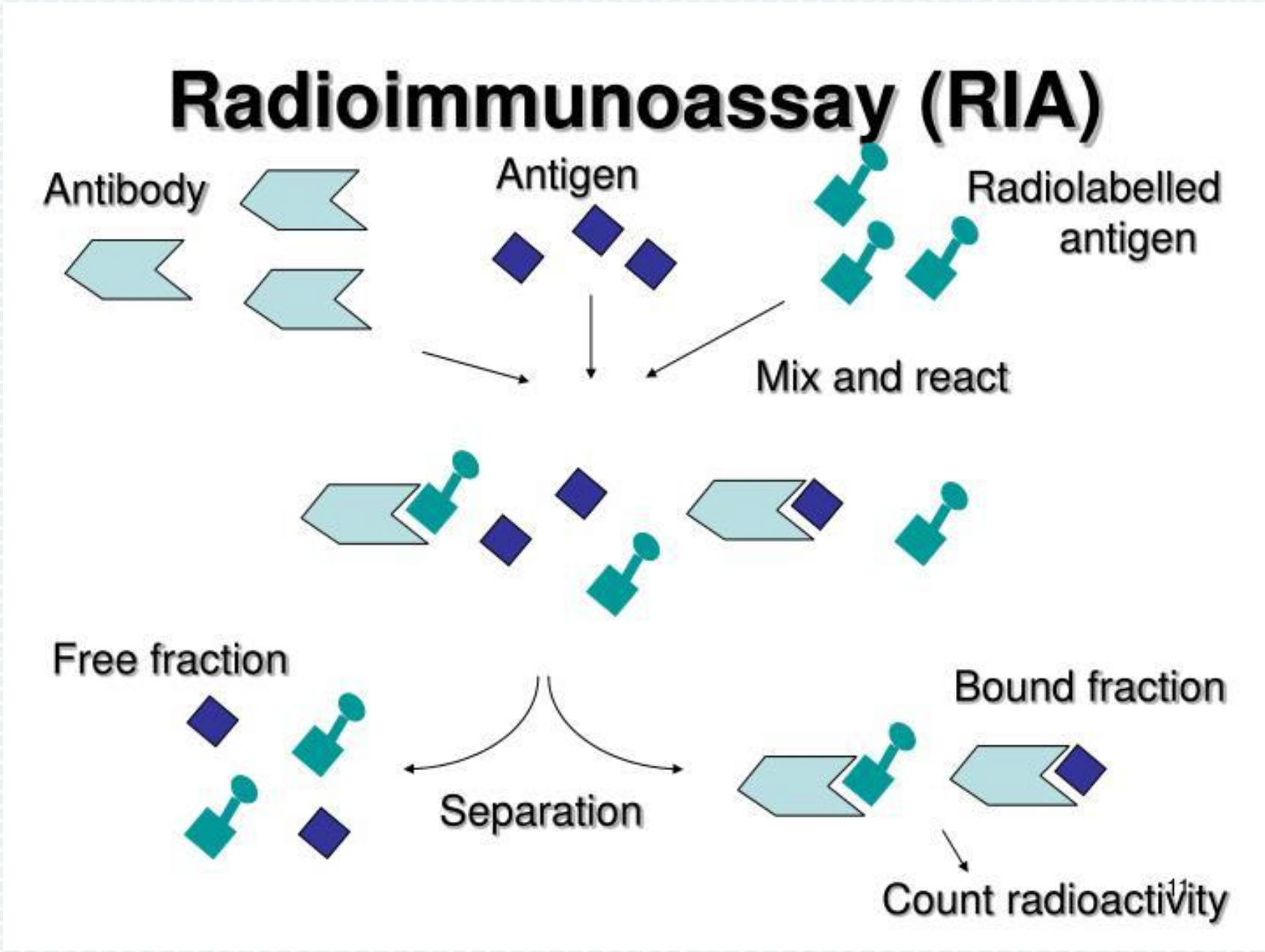
Radioimunoanalýza (RIA)

- Kompetitivní imunochemická reakce antigenu se specifickou protilátkou (Ab)
- Část antigenu radioaktivně označena (^{131}I, ^{14}C, ^{3}H) → vysoce citlivá kvantifikace

- Zkumavky potaženy specifickou protilátkou + sada standardů + sada vzorků
  → + radioindikátor → reakční směs se odsaje
  → měří se aktivita volná ve směsi a vázaná na protilátku
  (kompetice → koncentrovaný vzorek znamená nízkou „vázanou“ aktivitu)

- **Využití** – hladiny hormonů v krvi
  – toxikologie: průkaz přítomnosti drog
  – krevní transfuze: přítomnost antigenu hepatitidy B (HBsAg) v darované krvi

cc BY NC SA



Zdroj: biosciencenotes.com

Radiokarbonová metoda datování

^{14}C (opakování)

- Nejvýznamnější kosmogenní radionuklid
- Aktivita $^{14}CO_2$ v atmosféře dlouhodobě konstantní
- v 60. letech zvýšení o 80 % (jaderné testy), pak plynulý pokles
- Příjem ~ $2 \cdot 10^4$ Bq/rok → ~ 12 μSv/rok
  = celosvětový průměrný Ḣ
  z kosmogenních RN

$$^{14}N(n,p)^{14}C\ (\beta_-, T_{1/2} = 5700\ \text{let})$$

Radiokarbonová metoda datování

- Následné procesy:
  vznik ^{14}C → atmosférický CO_2 → fotosyntéza
  → organická hmota – konst. obsah $^{14}C = A_0$
  (ve skutečnosti kolísá → korekce)
  → po ukončení příjmu (života) → přeměna ^{14}C → současnost = A → stáří t
- Úbytek radioaktivních atomů za čas:

$$A = A_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t}$$

- Stáří:
  - > 100–200 let
  - < 75 000 let (rozpad 99,8 %)

cc BY NC SA

Radiokarbonová metoda datování

Nízká aktivita + nízká energie β (156 keV) → citlivé měření

Kapalinová scintilační spektrometrie

- vzorek spálen na CO_2 → reakce s $Li_{(l)}$ na Li_2C_2 → hydrolýza na acetylen → katalytická trimerizace na benzen + kapalný scintilátor → fotonásobič → A

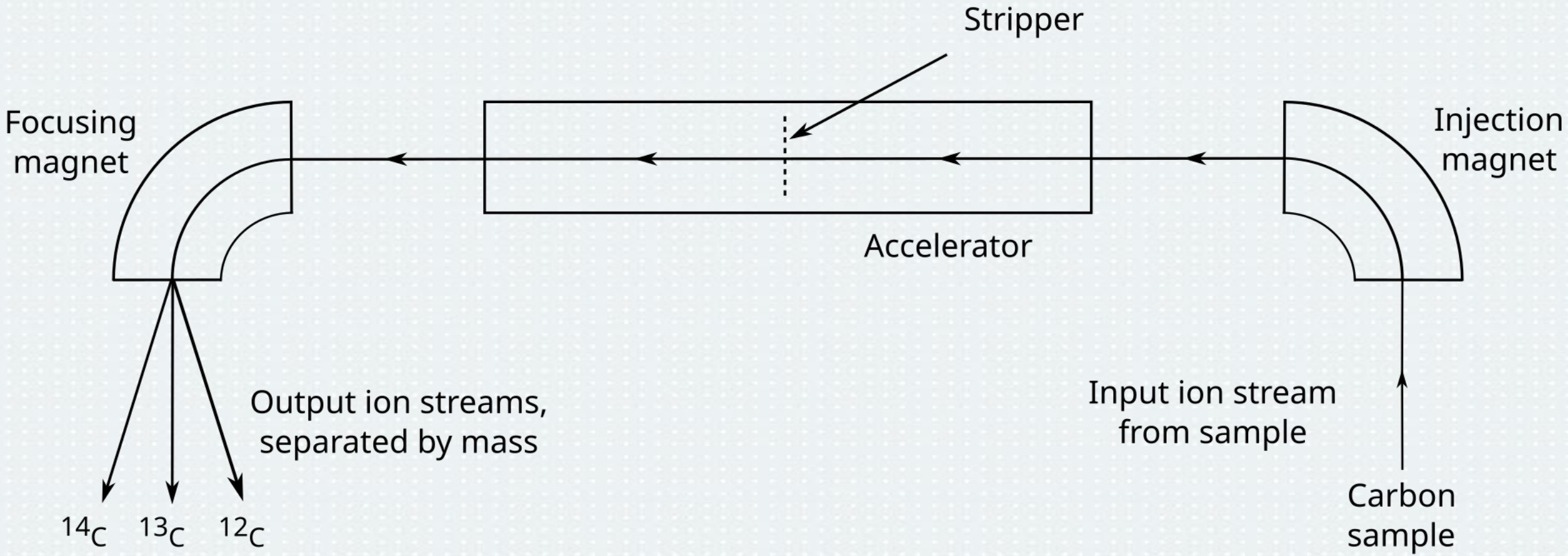
Urychlovačová hmotnostní spektrometrie (AMS)

- ultracitlivá analytická metoda
- měření dlouhožijících radionuklid (^{14}C, ^{10}Be, ^{26}Al, ^{41}Ca, ^{129}I a ^{236}U)
- detekce izotopových poměrů až 10^{-16}
- Vzorek ve formě grafitu → iontový zdroj C^- → urychlovač → striper → C^+ až C^{4+} → hmotnostní spektrometrie

Měří se N/(5700 let v sekundách). ← $A = \lambda \cdot N$ → Měří se celé N.

CC BY NC SA

Schéma urychlovačové hmotnostní spektrometrie



Zdroj: wikipedia.org

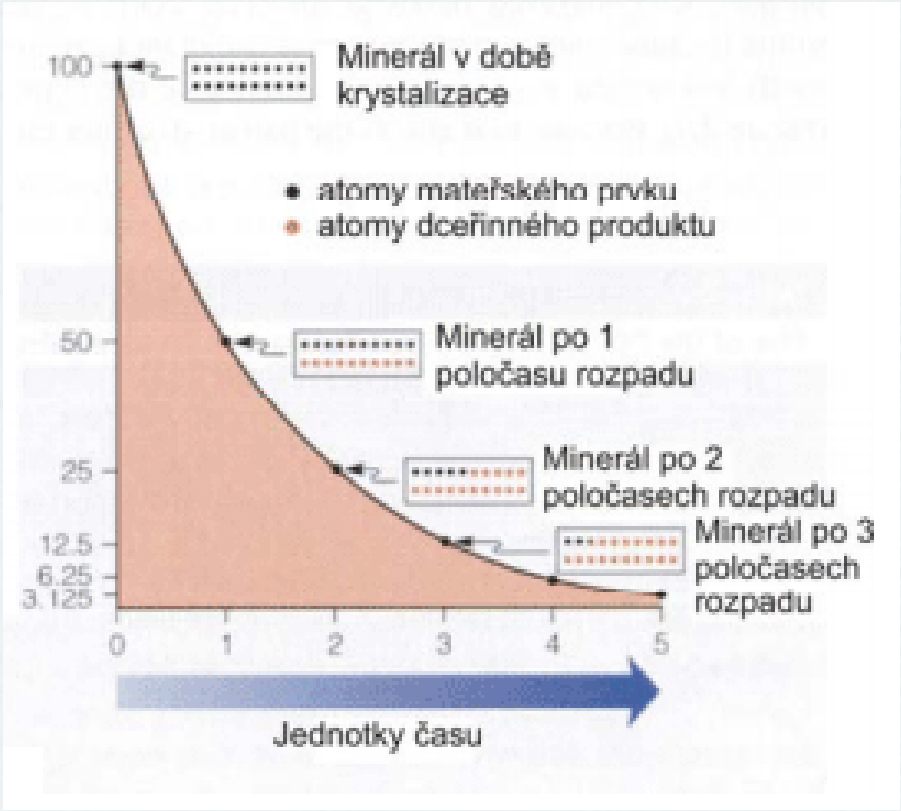
BY NC SA

Jaderná geochronologie

Kinetika tvorby stabilního produktu radioaktivní přeměny:

$$X^{rad.} \xrightarrow[\lambda]{} Y^{stab.} \qquad N_Y = N_X\,(e^{\lambda \cdot t} - 1) \qquad \rightarrow t = f(N_X, N_Y)$$

- Určuje se stáří hornin, minerálů
- Minerál s obsahem radionuklidu s dlouhým $T_{1/2}$
- Stanovení A_X, nebo N_X a N_Y jinou metodou (např. MS)
- $^{40}K \rightarrow {}^{40}Ar$, $T_{1/2} = 1{,}25 \cdot 10^9$ let (mladé vulkanické horniny)
- $^{87}Rb \rightarrow {}^{87}Sr$, $T_{1/2} = 4{,}81 \cdot 10^9$ let
- $^{147}Sm \rightarrow {}^{143}Nd$, $T_{1/2} = 1{,}06 \cdot 10^{11}$ let



Zdroj: wikipedia.org

BY NC SA

Magisterský studijní program JADERNÁ ENERGETIKA vznikl za přispění

Financováno Evropskou unií
NextGenerationEU

NÁRODNÍ PLÁN OBNOVY

MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ, MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

NPO_VUT_MSMT-16609_2022

CC BY NC SA

VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ
V BRNĚ

Financováno Evropskou unií
NextGenerationEU

NÁRODNÍ PLÁN OBNOVY

MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ, MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FAKULTA CHEMICKÁ

FAKULTA STAVEBNÍ

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

Přednáška magisterského studijního programu JADERNÁ ENERGETIKA

Radioekologie a úvod do jaderných technologií

Izotopové efekty a separace izotopů - izotopové efekty v přírodě a v průmyslu

Fakulta chemická

Ota Fišera

2024

CC BY NC SA

Izotopové efekty

- Izotopové efekty
- Izotopová výměnná reakce
- Separace izotopů

cc BY NC SA

Izotopy

- Většina prvků má 2 a více přírodních izotopů
- 26 monoizotopických prvků (1 **stabilní** přírodní izotop):
  ^{9}Be, ^{19}F, ^{23}Na, ^{27}Al, ^{31}P, ^{59}Co, ^{127}I, ^{197}Au,
  + Sc, Mn, As, Y, Nb, Rh, Cs, ...Bi?
- 7 z nich má další radioaktivní izotop
  (^{50}V, ^{87}Rb, ^{115}In, ^{138}La, ^{151}Eu, ^{176}Lu, ^{180m}Ta)
- 26 – 7 = 19: mononuklidické prvky
  +3 primordiální radioaktivní prvky (^{209}Bi, ^{232}Th, ^{231}Pa)

CC BY NC SA

Izotopy

H	1 99,985 %	2 0,015 %	3* 10^{-17} %	* – radioaktivní izotop	
C	12 98,9 %	13 1,1 %	14* 10^{-10} %		
O	16 99,757 %	17 0,038 %	18 0,205 %		
Sn	112 0,97 %	116 14,54 %	118 24,22 %	120 32,59 %	122 4,63 %
U	234* 0,004 %	235* 0,718 %	238* 99,276 %		

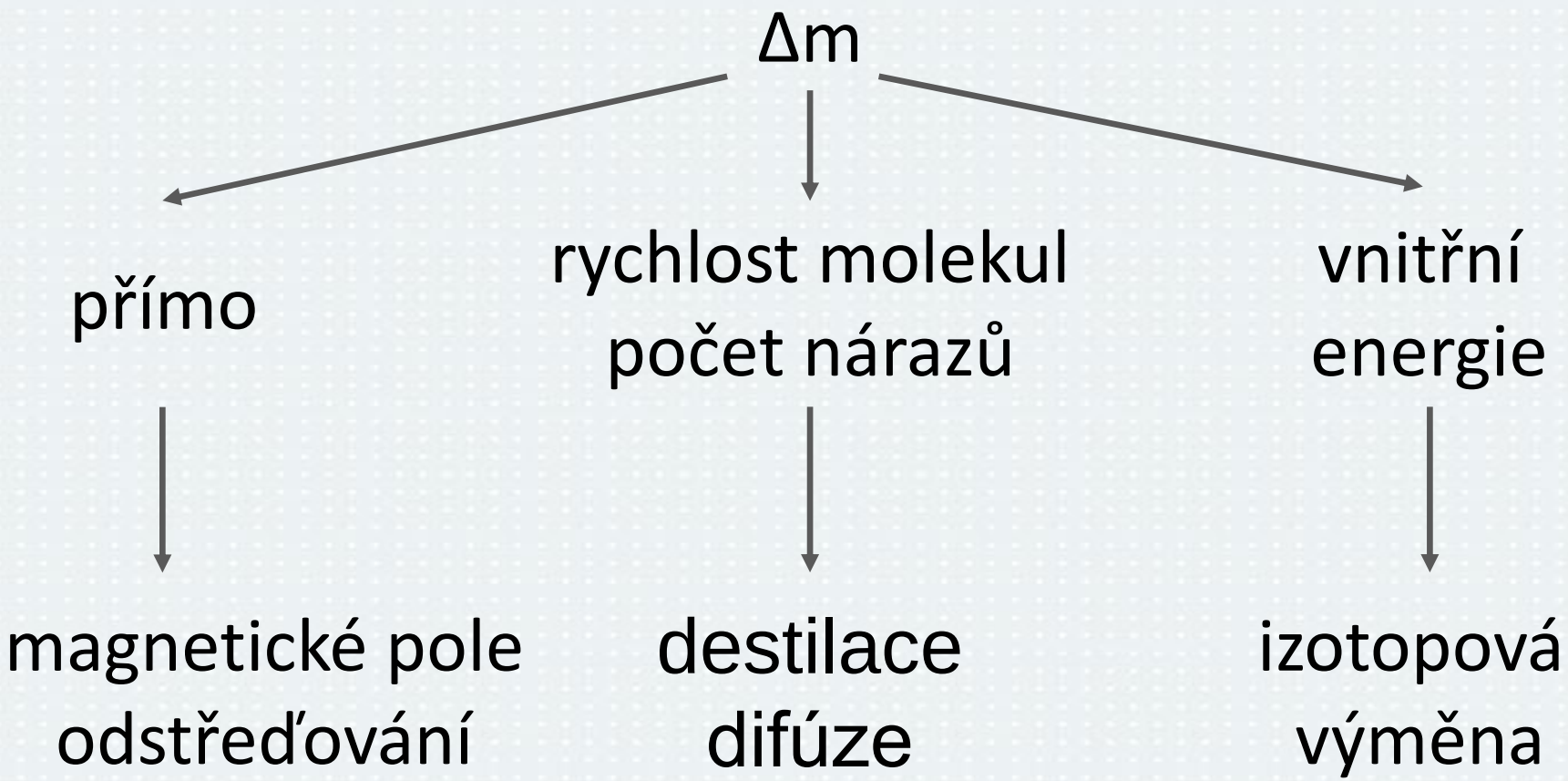
cc BY NC SA

Izotopové efekty

- **Izotopické ionty**:
  $^{19}F^-$, $^{18}F^-$, $^{23}Na^+$, $^{22}Na^+$
- **Izotopické molekuly**:
  $^{1}H_2{}^{18}O$, $^{2}H_2{}^{16}O$, $^{1}H^{3}H^{18}O$ / $^{235}UF_6$, $^{238}UF_6$
- Izotopické ionty/molekuly mají stejné kvalitativní chemické vlastnosti
- Různé fyzikální nebo fyzikálně-chemické vlastnosti – některé jsou závislé na hmotnosti izotopu
  → **izotopové efekty**

cc BY NC SA

Izotopové efekty



BY NC SA

Izotopové efekty

Kinetický izotopový efekt

- rozdíly v kinetice molekul
- nepřímé, ireverzibilními procesy (evaporace, difúze)

Rovnovážný izotopový efekt

- vliv hmotnosti na termodynamické vlastnosti molekul – pevnost vazeb

cc BY NC SA

Kinetický izotopový efekt

- Srážková teorie reakčních rychlostí

$$\mathrm{k} = P\sigma N_1 N_2 \sqrt{\frac{8\pi RT}{\mu}} \cdot e^{-E_a^*/RT},$$

$$\mu = \frac{M_1 \cdot M_2}{M_1 + M_2}$$

Redukovaná hmotnost

$$\frac{k}{k^*} = \sqrt{\frac{\mu^*}{\mu}} \cdot e^{-(E_a - E_a^*)/RT}$$

- Poměr redukovaných hmotností je pro většinu prvků nevýznamný, hlavní vliv má aktivační E
- Težší molekuly reagují pomaleji

$D_2 + Br_2 \leftrightarrow 2DBr$ $\quad k/k^* = 5{,}4$ (T = 850 °C)

cc BY NC SA

Kinetický izotopový efekt

- Stanovení reakčního mechanismu

  $2\ CH_3–CH_2–O–H + Br_2 \rightarrow 2\ CH_3–CH=O + 2\ HBr$

  Reakční centrum je $–CH_2–$ nebo –OH?

  $$\frac{k(CH_3CH_2OH)}{k(CH_3CT_2OH)} = 1{,}74\ (37\ °C)$$

- Izotopová substituce tritia ve skupině $–CH_2–$ ovlivňuje rychlostní konstantu reakce

  $\rightarrow$ reakční centrum

CC BY NC SA

Rovnovážný izotopový efekt

- Vliv izotopie na reakční rovnováhu reakce

  – rozdíly v energiích nulového bodu

  (E_{vibr} při teplotách blízkých absolutní nule)

$$\Delta E_0 = E_0^* - E_0 = \frac{1}{2} \cdot hc\omega_0 \left(\sqrt{\frac{\mu}{\mu^*}} - 1 \right)$$

- Molekula s těžším izotopem má menší energii nulového bodu.

BY NC SA

Rovnovážný izotopový efekt

- Vazby s těžšími izotopy jsou „pevnější”
- Molekuly obsahující lehčí izotopy reagují při chemických reakcích „rychleji”

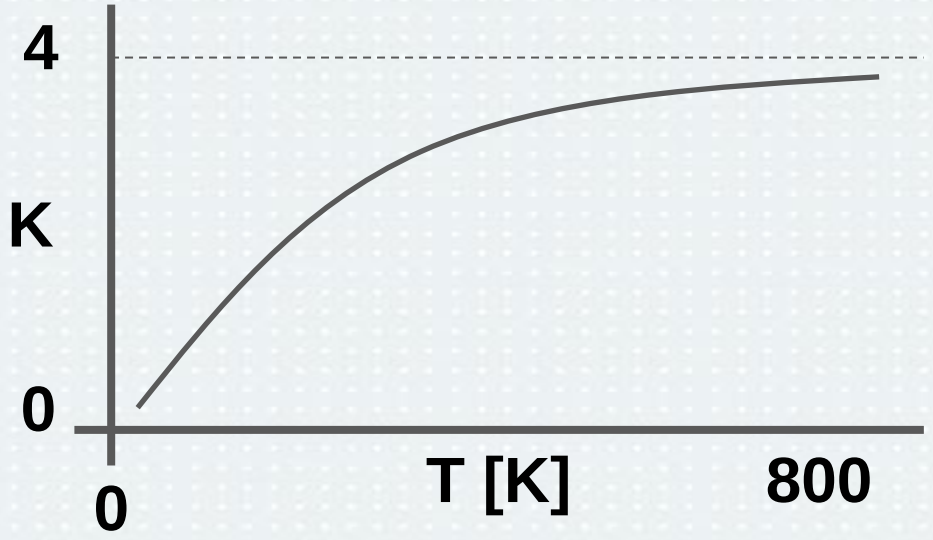
cc BY NC SA

Rovnovážný izotopový efekt

- Při schodě chemických vlastností H a D:

$H_2 + D_2 \rightarrow 2\ HD$ $\qquad K = \frac{[HD]^2}{[H_2][D_2]} = 4,\ \neq f(T)$

- Ve skutečnosti K = 3,28 (25 °C), je závislá na T



BY NC SA

Izotopové efekty

- **Izotopová frakcionace** – různé izotopové složení v důsledku izotopových efektů

  kinetická x rovnovážná

- Izotopový poměr: $R_{^{13}C} = {}^{^{13}C}\!/_{^{12}C}$
- Relativní izotopový poměr v ‰: $\delta = \frac{R_{vz} - R_{st}}{R_{st}} \cdot 1000$
- Koeficient frakcionace (separační faktor): $\alpha = \frac{R_a}{R_b}$
- Frakcionace: $\Delta = \frac{R_a - R_b}{R_b} \cdot 1000 = (\alpha - 1) \cdot 1000$

cc BY NC SA

Izotopové efekty v přírodě

- Uplatňuje se převážně kinetický izotopový efekt
- U lehkých prvků H, B, C, N, O, S, ale i Sr nebo Pb
- Využití: geochemie – hydro(geo)logie/geotermie
  klimatologie – paleoklimatologie
  oceánografie, biologie, medicína apod.

cc BY NC SA

Izotopové efekty v přírodě

- **Frakcionace sirných sloučenin** $R(^{32}S/^{34}S)$

SO_4 minerály	21,42
biogenní	22,55
$A_r(S)$	22,35 (= 95/4,25)

- Nejvýznamnější příčina frakcionace S je redukce bakterií Desulfovibrio desulfuricans
- Metabolit H_2S má δ_{32} až 50 ‰ (v laboratoři jde jen 27 ‰)

cc BY NC SA

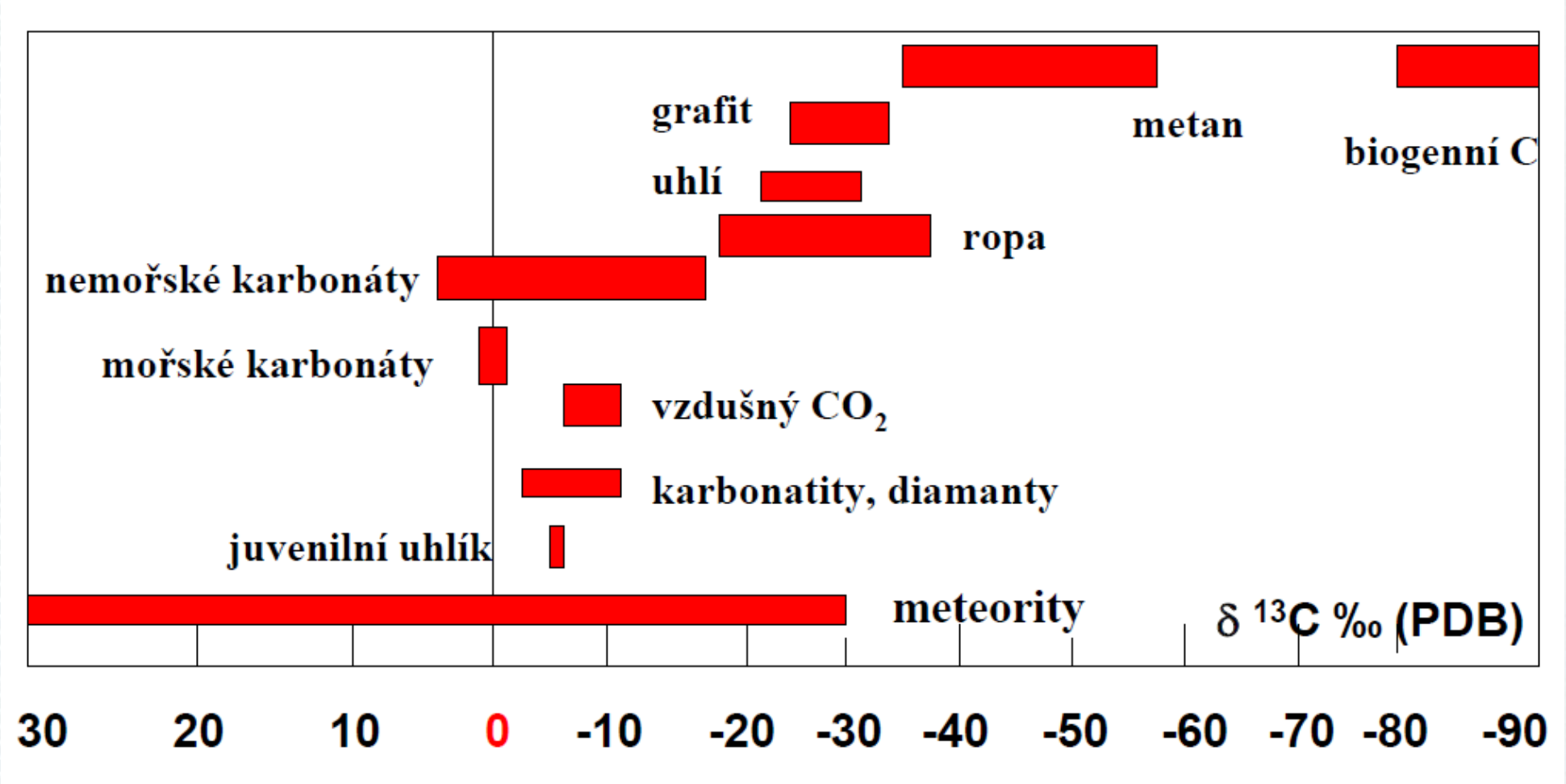
Izotopové efekty v přírodě

- **Frakcionace C** při fotosyntéze $\Delta_{13} \approx -26$ ‰
  $\rightarrow$ obohacování atmosféry ^{13}C

- Difuze CO_2 ve vzduchu: -4,4 ‰
- Rozpustnost CO_2 ve vodě: -1,1 ‰
- Karboxylace RuBP: -28 ‰
  (ribulóza-1,5-bisfosfát; fotosyntéza)

BY NC SA

Izotopové efekty v přírodě

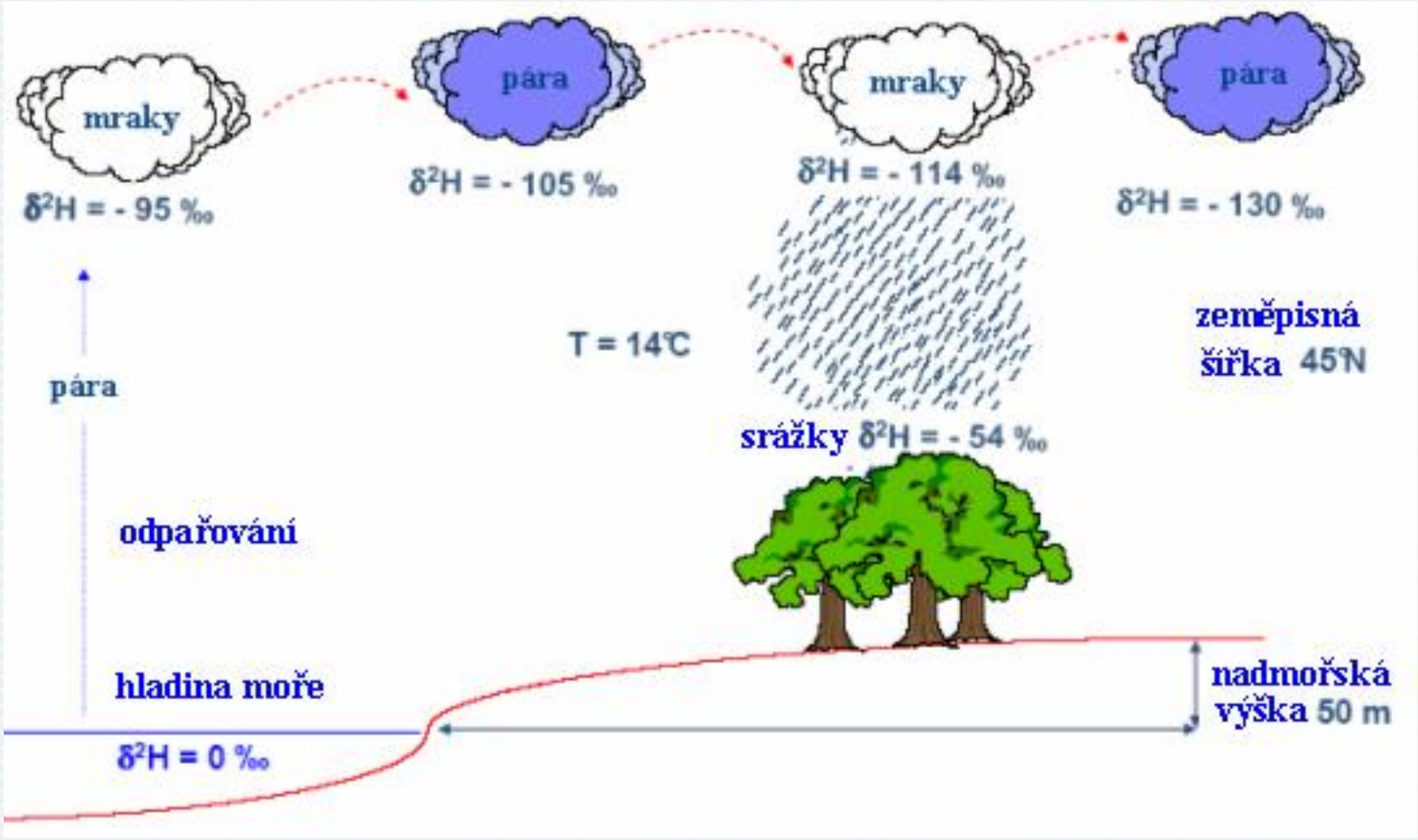


Zdroj: Geochemie úvod. PřF UK

PDB = standard = R pro schránky druhu hlavonožců (rostrum Belemnitella americana)

cc BY NC SA

Izotopové efekty v přírodě



Vyčítalová: Izotopové složení některých ovocných džusů - autenticita z hlediska zastoupení deuteria pomocí SNIF-NMR. VUT v Brně, 2009.

BY NC SA

Izotopové efekty v přírodě

Izotop	Frakcionace	Informace
$^{2}H/^{1}H$	evaporace, kondenzace, srážení	geografická
$^{13}C/^{12}C$	fotosyntéza C3 a C4 rostlin	strava
$^{15}N/^{14}N$	rostliny, zemědělství	strava
$^{18}O/^{16}O$	evaporace, kondenzace, srážení	geografická
$^{34}S/^{32}S$	bakterie	geografická (oceán)

Komodita	Izotopy
Hovězí	$^{2}H/^{1}H$, $^{13}C/^{12}C$, $^{15}N/^{14}N$, $^{18}O/^{16}O$, $^{34}S/^{32}S$
Jehněčí	$^{13}C/^{12}C$, $^{15}N/^{14}N$
Mléko	$^{13}C/^{12}C$, $^{15}N/^{14}N$, $^{18}O/^{16}O$
Máslo	$^{13}C/^{12}C$, $^{15}N/^{14}N$, $^{18}O/^{16}O$, $^{34}S/^{32}S$
Sýr	$^{2}H/^{1}H$, $^{13}C/^{12}C$, $^{15}N/^{14}N$, $^{34}S/^{32}S$

CC BY NC SA

Izotopové efekty v přírodě

	H_2O	D_2O	$H_2{}^{18}O$
Hustota [g/cm³] (20 °C)	0,9979	1,1015	1,1106
Bod tání [°C]	0	3,81	0,28
Bod varu [°C]	100	101,42	100,14
Tlak par [kPa] (25 °C)	3,17	2,74	
Disociační konstanta	$1 \cdot 10^{-14}$	$1,95 \cdot 10^{-15}$	

CC BY NC SA

Separace izotopů

Izotopy ^{A1}X a ^{A2}X, zastoupení $a_{1,0}$, $a_{2,0}$,
v izotopových sloučeninách ^{A1}XY a ^{A2}XY

Separační jednotka:
využití izotopového jevu
→ prostorová nebo fázová změna izotopového poměru

Frakce XY	Frakce XY
$\mathbf{a_1 > a_{1,0}}$	$a_1 < a_{1,0}$
$a_2 < a_{2,0}$	$\mathbf{a_2 > a_{2,0}}$

cc BY NC SA

Separace izotopů

- Malý rozdíl hmotností izotopických sloučenin
  $\rightarrow$ malá účinnost separace v jednom kroku

- Série separačních jednotek – mnohonásobné opakování
  - úplná separace: 2 frakce, a1 = 100 %, a2 = 100 %
  - částečná separace – obohacování – frakce s $a_i > a_{i,0}$
    (^{2}H, ^{13}C, ^{235}U)

cc BY NC SA

Metody s přímým využitím rozdílu hmotnosti

1. **Pohyb iontů v magnetickém poli**
   - **Hmotnostní magnetický spektrometr**
     - Příprava menších množství čistých nebo vysoce obohacených frakci izotopů

Viz Obohacování uranu

2. **Pohyb iontů v tíhovém poli**
   - **Plynová centrifuga**

Viz Obohacování uranux

cc BY NC SA

Metody s využitím rozdílné rychlosti

- **Difúze**
  - Lehčí molekuly mají vyšší rychlost → nárazy na membránu → rychlejší difúze

Viz Obohacování uranu

- **Destilace**
  - Vypařování → nárazy molekul na fázové rozhraní → závislost na rychlosti molekul → nižší hmotnost → nižší teplota varu
  - Separace izotopů lehkých prvků frakční destilací
    - obohacení ^{18}O: H_2O, 0,2 % → 90 %
    - ^{13}C: CO(l), -210 °C
    - ^{15}N: NO(l), -160 °C
    - Předobohacená $^{2}H_2O$: až 100 % ^{2}H

cc BY NC SA

Metody s využitím vnitřní energie

- **Izotopová výměnná reakce** – proces vyvolávající změnu izotopového složení v interagujících látkách bez chemické změny

  - izotopy prvku ^{A}X a ^{B}X ve sloučeninách s prvky Y a Z $\rightarrow$ ^{A}XY a ^{B}XZ

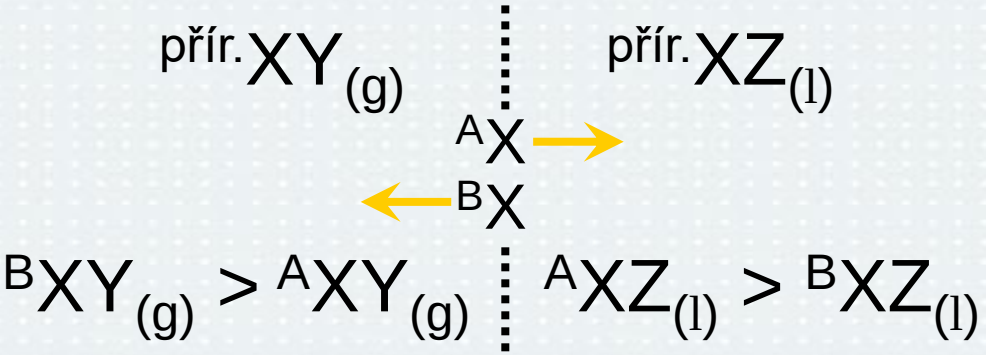
$$^{A}XY + {}^{B}XZ \leftrightarrow {}^{A}XZ + {}^{B}XY$$

  - aktivovaný komplex se rozpadne jinak než vznikl,
  - vliv: ΔE_{rot} a ΔE_{vibr}, E = f(1/μ), $\mu = \frac{M_1 \cdot M_2}{M_1 + M_2}$
  - těžší molekuly mají menší rotační a vibrační E

CC BY NC SA

Metody s využitím vnitřní energie

- Separace izotopů lehkých prvků heterogenní izotopovou výměnou v dvoufázové soustavě
  - Látky $XY_{(g)}$ a $XZ_{(l)}$ s přírodním izotopovým složením při kontaktu fází mění své izotopové složení



  - Rovnovážná konstanta – malé odchylky od 1

cc BY NC SA

Metody s využitím vnitřní energie

- **Výroba těžké vody**

$$H_2O_{(l)} + D_2S_{(g)} \leftrightarrow D_2O_{(l)} + H_2S_{(g)}$$

$$K = 2{,}34\ (25\ °C);\ 1{,}92\ (100\ °C)$$

  - Dvouteplotní proces – H_2S se ochuzuje při nižší T o ^2H, při vyšší teplotě ^2H přijímá zpět
  - Obohacení z 0,015 % na 90 % (dál destilací)
  - Využití D_2O: jaderná energetika, termonukleární reakce, deuterované sloučeniny

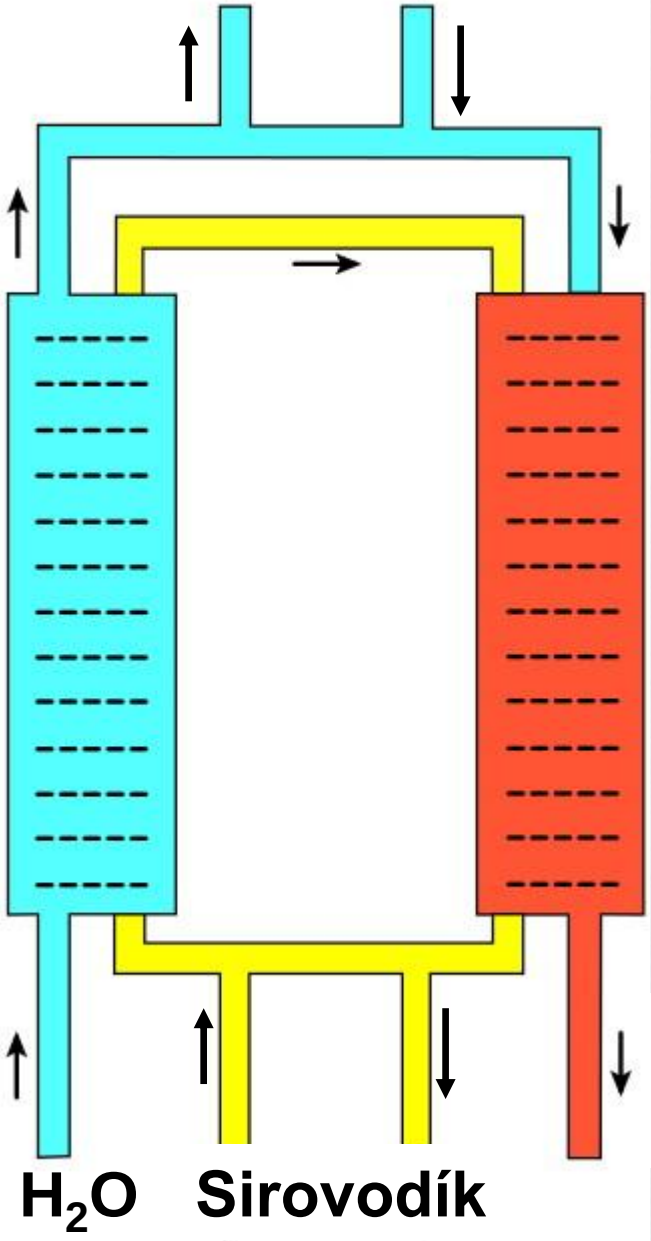
cc BY NC SA

Voda obohacená deuteriem (část se vrací)

Nízkoteplotní stupeň:

- voda se obohacuje D

  K = 2,34 (25 °C)



Vysokoteplotní stupeň:

- část vody se ochuzuje o D

  K = 1,92 (100 °C)

H_2O Sirovodík

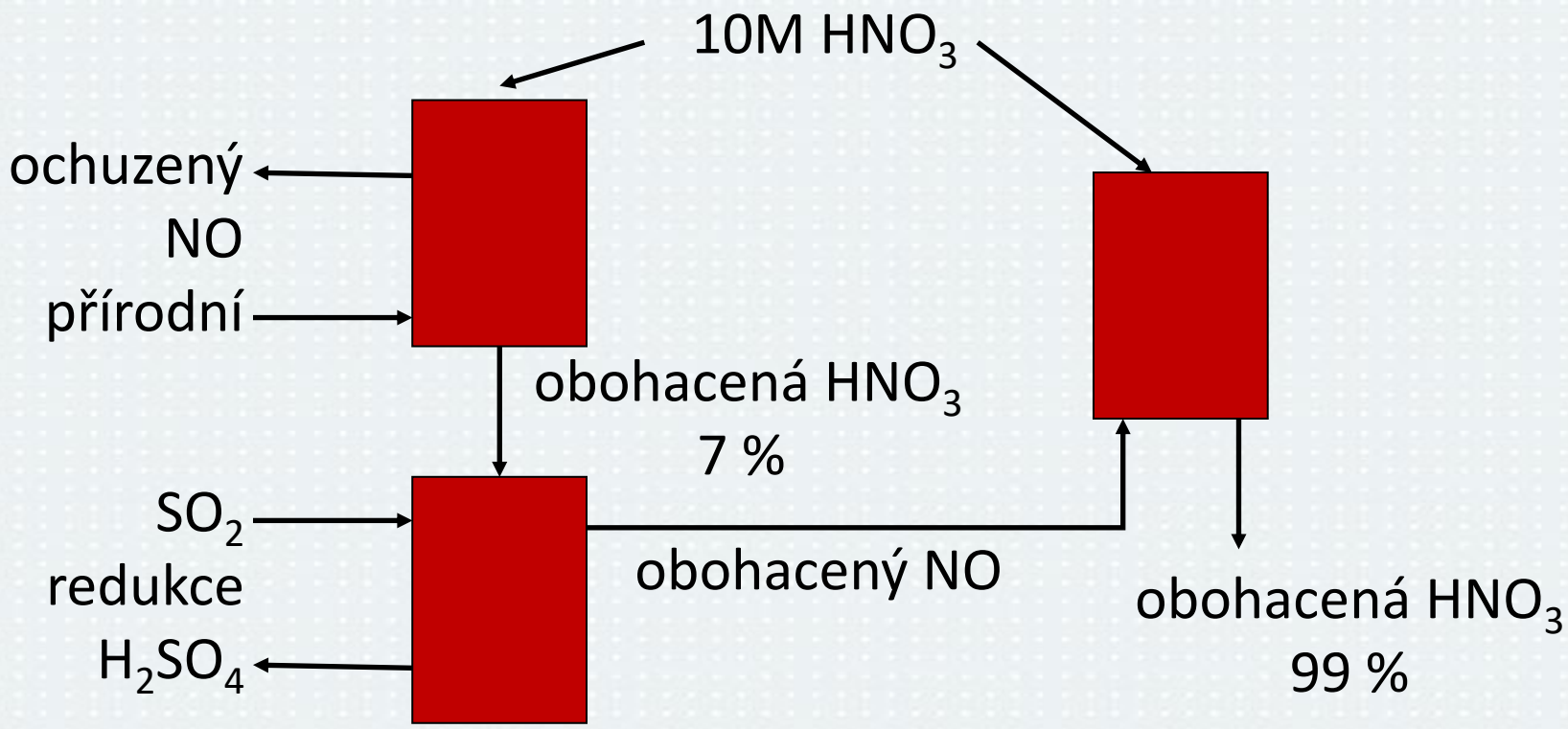
Voda ochuzená o deuterium

cc BY NC SA

Metody s využitím vnitřní energie

- **Separace izotopů dusíku**

$$H^{14}NO_{3\,(l)} + {}^{15}NO_{(g)} \leftrightarrow H^{15}NO_{3\,(l)} + {}^{14}NO_{(g)}$$



cc BY NC SA

Metody s využitím vnitřní energie

- Odstraňování tritia z odpadních vod lehkovodních reaktorů

$$HTO_{(l)} + H_{2(g)} \leftrightarrow H_2O_{(l)} + HT_{(g)}$$ (katalyzátor Pt neo Pt/C na PTFE podkladu)

- Další příklady

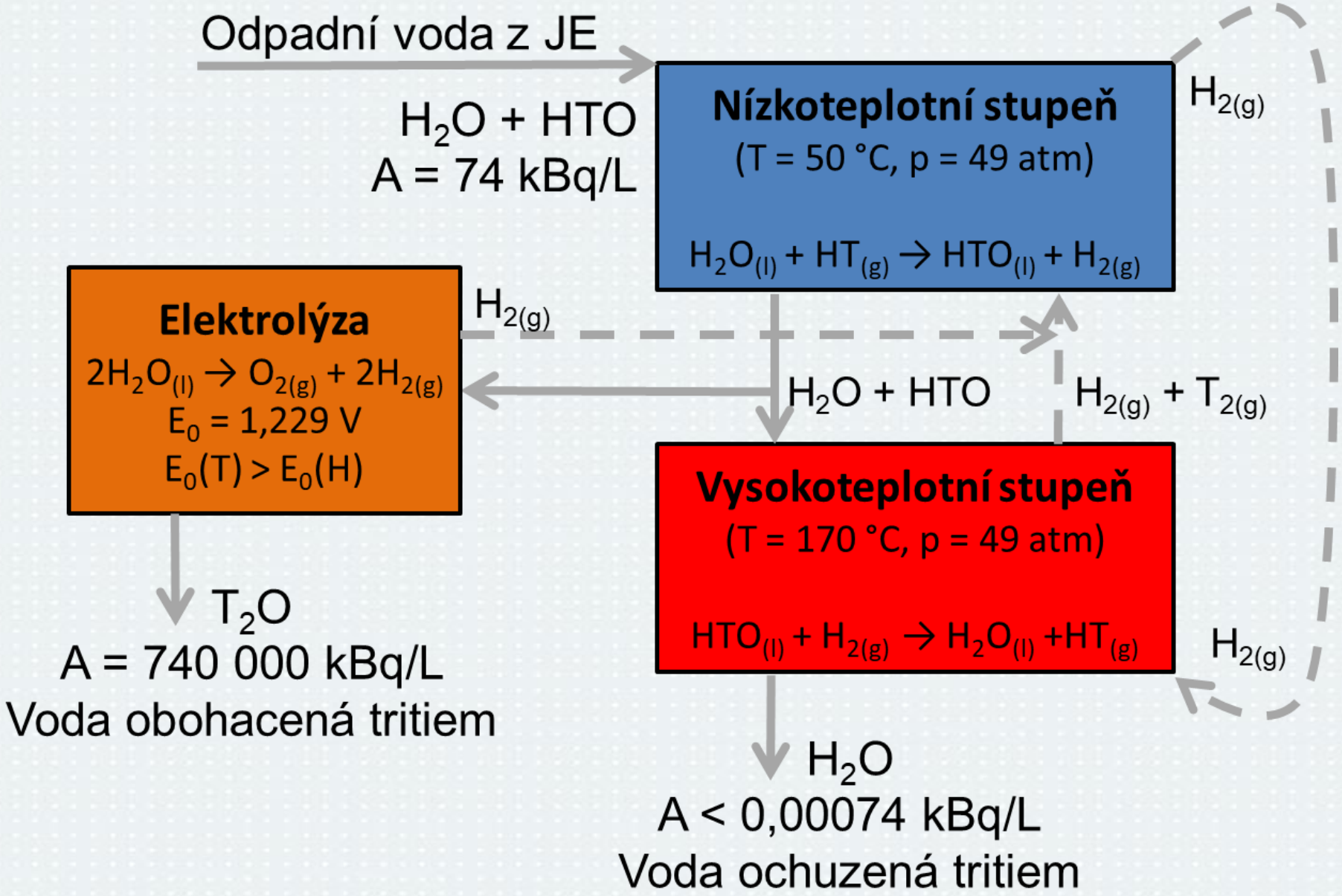
$$^{12}CN^-_{(l)} + H^{13}CN_{(g)} \leftrightarrow {}^{13}CN^-_{(l)} + H^{12}CN_{(g)}$$

$$H^{32}SO_3^-{}_{(l)} + {}^{34}SO_{2(g)} \leftrightarrow H^{34}SO_3^-{}_{(l)} + {}^{32}SO_{2(g)}$$

$$H_2{}^{16}O_{(l)} + C^{18}O_{2(g)} \leftrightarrow H_2{}^{18}O_{(l)} + C^{16}O_{2(g)}$$

$$^{11}BF_3 \cdot (C_2H_5)_2O_{(l)} + {}^{10}BF_{3(g)} \leftrightarrow {}^{10}BF_3 \cdot (C_2H_5)_2O_{(l)} + {}^{11}BF_{3(g)}$$

cc BY NC SA


Odpadní voda z JE
H_2O + HTO
A = 74 kBq/L
Nízkoteplotní stupeň
(T = 50 °C, p = 49 atm)
$H_2O_{(l)} + HT_{(g)} \rightarrow HTO_{(l)} + H_{2(g)}$
$H_{2(g)}$
Elektrolýza
$2H_2O_{(l)} \rightarrow O_{2(g)} + 2H_{2(g)}$
E_0 = 1,229 V
$E_0(T) > E_0(H)$
$H_{2(g)}$
H_2O + HTO
$H_{2(g)} + T_{2(g)}$
Vysokoteplotní stupeň
(T = 170 °C, p = 49 atm)
$HTO_{(l)} + H_{2(g)} \rightarrow H_2O_{(l)} + HT_{(g)}$
$H_{2(g)}$
T_2O
A = 740 000 kBq/L
Voda obohacená tritiem
H_2O
A < 0,00074 kBq/L
Voda ochuzená tritiem

BY NC SA

Značené sloučeniny

- **Izotopicky modifikované sloučeniny**
  - Izotopicky **substituované** – v dané poloze obsahují pouze zvolený radioaktivní/stabilní izotop

    $^{15}NH_3$ (^{15}N)amoniak, $^{14}CH_3COOH$ (2-^{14}C)octová kys.
  - Izotopicky **značené** – pouze částečná izotopická substituce v dané poloze

    $^{14}CH_3COOH + CH_3COOH \rightarrow [^{14}C]H_3COOH$ [2-^{14}C]octová k.
    - Specificky / selektivně / neselektivně / uniformě

… Izotopology/izotopomery

cc BY NC SA

Značené sloučeniny

- **Izotopicky modifikované sloučeniny**
  - **Izotopology** – liší se pouze izotopovým složením (mohou, ale nemusí mít stejnou hmotnost)
    $^{12}C^{16}O$, $^{13}C^{16}O$, $^{13}C^{17}O$,
  - **Izotopomery**: izotopické izomery – molekuly mající stejný počet izotopů v různých polohách

    CH_3CHDCH_3 x $CH_3CH_2CH_2D$ / $^{18}O^{16}O^{16}O$ x $^{16}O^{18}O^{16}O$

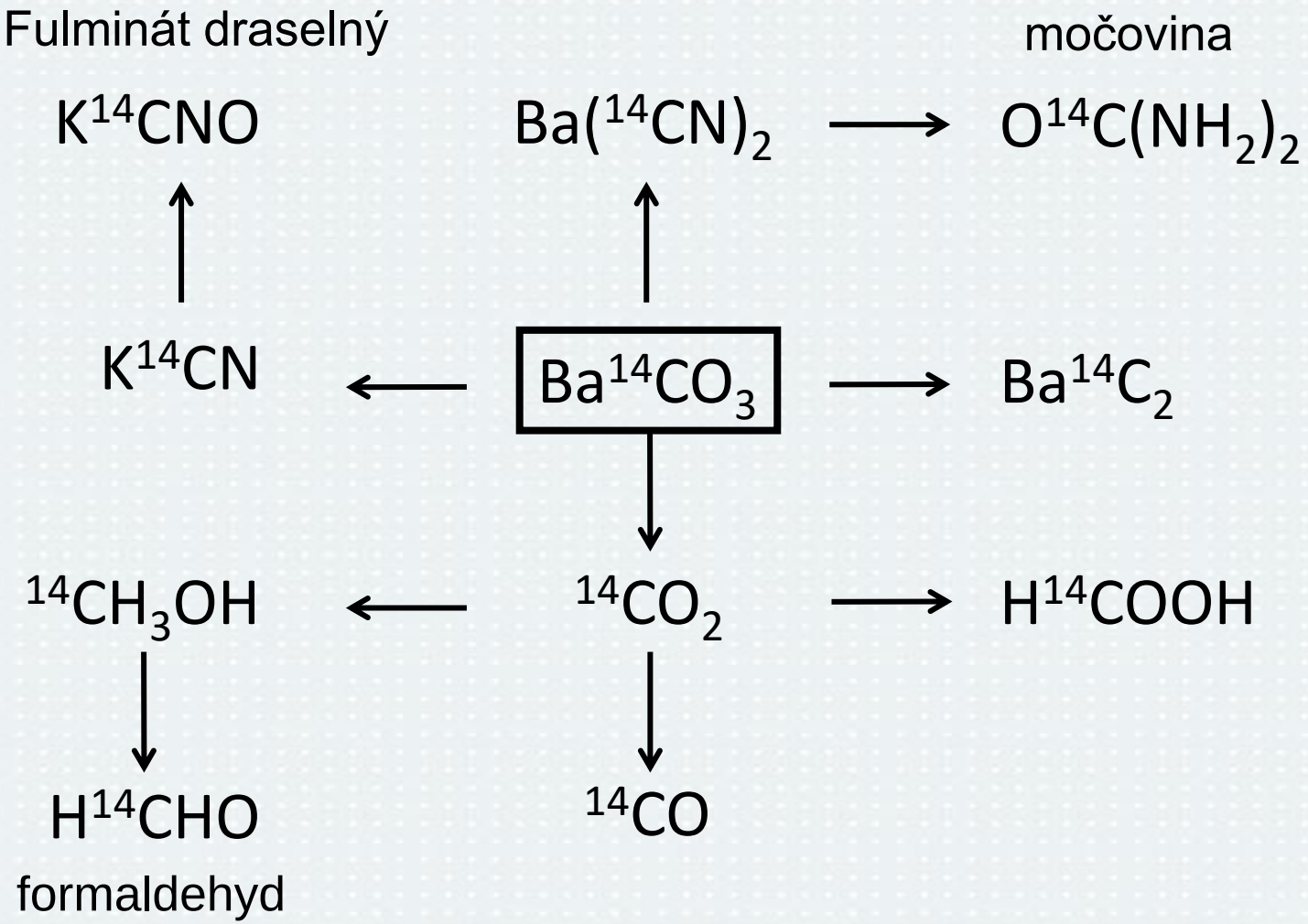
cc BY NC SA

Příprava značených sloučenin

- Příprava radioizotopu jadernou reakcí v **jednoduché** formě (P_2O_5, Be_3N_2)
  → jednoduchá značená sloučenina ($H_3{}^{32}PO_4$, $^{14}CO_2$)
  → syntéza složitých sloučenin
- ^{14}C: $^{14}N(n,p)^{14}C$, terč Be_3N_2 nebo AlN → rozpuštění ve směsi H_2O_2 a H_2SO_4 → směs ^{14}CO, $^{14}CO_2$, $^{14}CH_4$, $H^{14}CN$) → oxidace na $^{14}CO_2$ a pohlcení v roztoku $Ba(OH)_2$ → $Ba^{14}CO_3$ – výchozí produkt k syntézám
- ^{11}C: $^{14}N(p,\alpha)^{11}C$, β^+, $T_{1/2}$ = 20 min; $N_2(g)$ + 2 % O_2 → $^{11}CO_2$
  – on-line automatizovaný systém syntézy a aplikace
- ^{18}F: $^{18}O(p,n)^{18}F$, terč H_2O obohacená ^{18}O → F^- ve vodném roztoku
  – pro nukleofilní substituce
- ^{18}F: $^{20}Ne(d,\alpha)^{18}F$, terč Ne(g)
  – pro elektrofilní substituce

CC BY NC SA

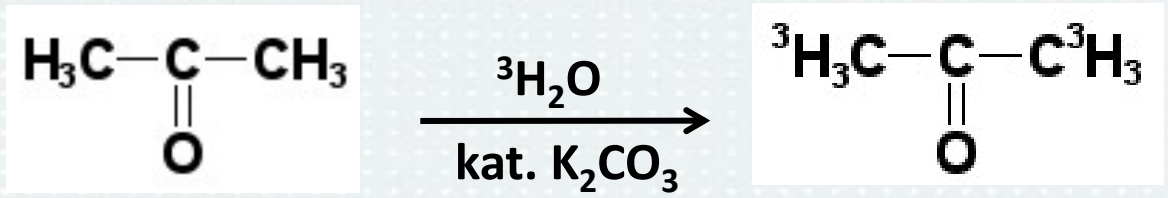
Příprava značených sloučenin

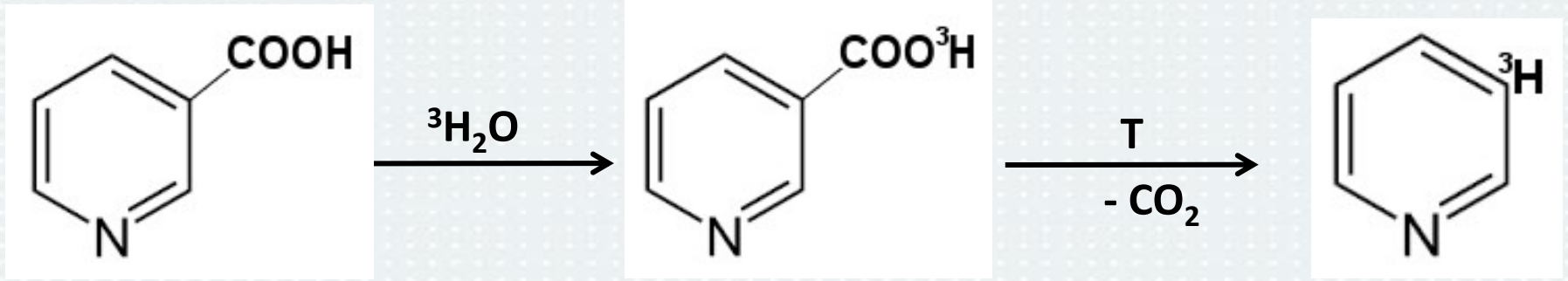


cc BY NC SA

Příprava sloučenin značených ^3H

Izotopová výměna





Nikotinová kys.

[^{3}H]pyridin

cc BY NC SA

Příprava značených sloučenin

- **Biosyntetické metody**
  - Jednoduché prekurzory: $^{14}CO_2$, $^{3}H_2O$, $H^{32}PO_4^{2-}$, $^{35}SO_4^{2-}$
    → nespecifické značení mnoha sloučenin
  - Specifické prekurzory: ^{3}H-thymidin → ^{3}H-DNA

cc BY NC SA

cc BY NC SA

cc BY NC SA

cc BY NC SA

Magisterský studijní program JADERNÁ ENERGETIKA vznikl za přispění

Financováno Evropskou unií
NextGenerationEU

NÁRODNÍ PLÁN OBNOVY

MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ, MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

NPO_VUT_MSMT-16609_2022

CC BY NC SA