

Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích
Zdravotně sociální fakulta

**UMĚLÉ ZDROJE IONIZUJÍCÍHO ZÁŘENÍ
(E-LEARNINGOVÝ PROGRAM)**

Bakalářská práce

Vedoucí práce:

Mgr. Renata Havránková, Ph.D.

doc. Dr. rer. nat. Friedo Zölzer

Autor:

Kateřina Vostálová

2011

ABSTRACT

Artificial sources of ionizing radiation (e-learning program)

The topic of my thesis which I have chosen is the Artificial Sources of Ionizing Radiation, the part of which is an e-learning programme containing images and hyperlinks created in the Moodle. The didactic programme is split into nine topics. Part of each topic are files (summary of the subject matter, recommended literature and practice tests), which facilitate to students orientation in the environment of the Moodle and in the topic. The training programme is available on the website <http://moodle.zsf.jcu.cz>.

The work presents the wide range of application in various fields of human activity, which uses artificial sources of ionizing radiation. It comprises the health care, industry, objects of daily use, nuclear energetics, nuclear weapons tests in the atmosphere, building industry and the impact on the environment. The subsequent and very important part of the work deals with the radiation protection, without which it would be impossible to work safely with the sources of radiation. The last part deals with the Chernobyl accident and the current state in the Czech Republic after the disaster.

The aim of this course is to improve the quality of teaching focused on radiation protection radiobiology.

Prohlášení

Prohlašuji, že svoji bakalářskou práci jsem vypracovala samostatně pouze s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu citované literatury.

Prohlašuji, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb. v platném znění souhlasím se zveřejněním své bakalářské práce, a to v nezkrácené podobě elektronickou cestou ve veřejně přístupné části databáze STAG provozované Jihočeskou univerzitou v Českých Budějovicích na jejích internetových stránkách, a to se zachováním mého autorského práva k odevzdanému textu této kvalifikační práce. Souhlasím dále s tím, aby toutéž elektronickou cestou byly v souladu s uvedeným ustanovením zákona č. 111/1998 Sb. zveřejněny posudky školitele a oponentů práce i záznam o průběhu a výsledku obhajoby kvalifikační práce. Rovněž souhlasím s porovnáním textu mé kvalifikační práce s databází kvalifikačních prací Theses.cz provozovanou Národním registrem vysokoškolských kvalifikačních prací a systémem na odhalování plagiátů.

V Českých Budějovicích dne

19.8.2011

.....

Kateřina Vostálová

Poděkování

Touto cestou bych chtěla poděkovat Mgr. Renatě Havránkové, Ph.D. a doc. Dr. rer. nat. Friedovi Zölzerovi, za jejich čas, odborné vedení, pomoc, cenné připomínky a rady při vypracování mé bakalářské práce.

Dále bych chtěla poděkovat své rodině za trpělivost i podporu, a také bych chtěla poděkovat Ing. Richardu Šemberovi za rady při vytváření e-learningového programu.

Kateřina Vostálová

OBSAH:

ÚVOD.....	7
1 SOUČASNÝ STAV.....	8
<i>1.1 Základní pojmy v oblasti ionizujícího záření.....</i>	8
1.1.1 Zdroje ionizujícího záření.....	8
1.1.2 Ionizující záření.....	9
1.1.3 Veličiny a jednotky.....	12
<i>1.2 Radiační ochrana.....</i>	17
1.2.1 Principy, způsoby a cíle radiační ochrany.....	18
1.2.2 Ochrana před ionizujícím zářením.....	19
1.2.3 Typy expoziční situace.....	21
1.2.4 Druhy ozáření.....	22
1.2.5 Monitorování v radiační ochraně.....	26
<i>1.3 Umělé zdroje ionizujícího záření ve zdravotnictví.....</i>	30
1.3.1 Radiodiagnostika.....	31
1.3.2 Radioterapie.....	37
1.3.3 Nukleární medicína.....	49
<i>1.4 Jaderná energetika.....</i>	56
1.4.1 Jaderný reaktor.....	56
1.4.2 Černobyl a radionuklidy z Černobylu.....	61
1.4.3 Situace po černobylské havárii v České republice.....	64
<i>1.5 Zkoušky jaderných zbraní v atmosféře.....</i>	66
1.5.1 Jaderné zbraně.....	66
1.5.2 Zkoušky jaderných zbraní.....	67
<i>1.6 Průmyslové zdroje ionizujícího záření.....</i>	72
1.6.1 Defektoskopie.....	73
1.6.2 Ionizační hlásiče kouře.....	73

1.6.3	Měřidla a indikátory.....	74
1.6.4	Ozařovače.....	74
1.7	<i>Předměty denní potřeby.....</i>	76
1.8	<i>Stavebnictví.....</i>	77
1.8.1	Radioskopie.....	78
1.8.2	Betatronografie.....	78
1.9	<i>Vliv ionizujícího záření na životní prostředí.....</i>	79
2	CÍLE PRÁCE A HYPOTÉZA.....	81
3	METODIKA.....	82
4	VÝSLEDKY.....	83
5	DISKUSE.....	84
6	ZÁVĚR.....	85
7	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ.....	86
8	KLÍČOVÁ SLOVA.....	93
9	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK.....	94

ÚVOD

Nedostatečné množství programů je důvod, který mne vedl k výběru tématu Umělé zdroje ionizujícího záření jako výukového programu. Výukové programy zkvalitňují a doplňují didaktické pomůcky, které usnadňují výuku, podporují samostudium studentů, zlepšují orientaci v daném tématu a především slouží ke komunikaci kantora se studentem za pomoci diskusního fóra a diskusi k danému tématu.

Obsah práce poukazuje na široké uplatnění v různých oblastech lidské činnosti, která využívá umělé zdroje ionizujícího záření, kam spadají zdravotnictví, průmysl, jaderná energetika, zkoušky jaderných zbraní v atmosféře, předměty denní potřeby, stavebnictví, zemědělství a vliv na životní prostředí. Následným bodem je radiační ochrana, bez které by bylo zcela nemožné bezpečně pracovat se zdroji záření. A poslední bod pojednává o černobylské havárii a jejím dopadu na Českou republiku.

Smyslem práce je neustálá modernizace výuky studentů a zlepšování orientace v daném tématu.

Svou práci jsem ucelila za pomoci materiálů použitých z dostupných pramenů týkající se umělých zdrojů ionizujícího záření, které bude sloužit studentům jako doplňující didaktická pomůcka při studiu v oborech Radiologický asistent, Ochrana obyvatelstva se zaměřením na CBRNE, Zdravotnický záchranář a Ochrana veřejného zdraví.

1 SOUČASNÝ STAV

Ionizující záření nachází dnes velmi široké uplatnění ve všech oblastech lidské činnosti. Vedle průmyslových aplikací se jedná hlavně o aplikaci v lékařství. Radionuklidy se užívají v podobě uzavřených a otevřených zářičů. Uzavřené zářiče slouží jako zdroje záření (alfa, beta, gama, rentgenové záření, neutrony). Otevřené zářiče se užívají jako indikátory (stopovače). Radionuklidy se aplikují přímo do soustavy, kterou pozorujeme a slouží k prostorovému a časovému studiu procesů, které v soustavě probíhají.⁽²¹⁾

1.1 Základní pojmy v oblasti ionizujícího záření

1.1.1 Zdroj ionizujícího záření

Zdroj ionizujícího záření je podle atomového zákona látka, přístroj nebo zařízení, které mohou vysílat ionizující záření nebo uvolňovat radioaktivní látky.⁽³⁴⁾

Zdroje podle vzestupného ohrožení zdraví a životního prostředí ionizujícího záření klasifikují jako:⁽⁶⁾

- nevýznamné;
- jednoduché;
- drobné;
- významné a velmi významné.

Mezi nevýznamné zdroje ionizujícího záření patří:⁽⁶⁾

- *elektrické zařízení emitující ionizující záření, neobsahující komponenty pracující s rozdílem napětí převyšující 5 kV;*
- *katodová trubice určená k zobrazení nebo jakékoliv elektrické zařízení pracující při rozdílu potenciálu nepřevyšujícím 30 kV;*
- *uzavřený radionuklidový zářič;* ➤ *radioaktivní látka;*
- *materiál kontaminovaný radionuklidy.*

Drobné zdroje ionizujícího záření jsou např. :

- generátory záření;
- uzavřený zářič.

Jednoduché zdroje ionizujícího záření jsou všechny zdroje, které nejsou nevýznamnými, drobnými, významnými ani velmi významnými. Z jednoduchých zdrojů užívaných ve zdravotnictví to jsou:⁽⁶⁾

- zubní rentgen;
- kabinové rentgenové zařízení;
- kostní denzitometrie;
- otevřené radionuklidové zářiče - ^{99}Mo – $^{99\text{m}}\text{Tc}$.

Významné zdroje ionizujícího záření jsou např.:⁽⁶⁾

- generátor záření;
- urychlovače;
- zařízení obsahující uzavřené radionuklidové zářiče;
- otevřené radionuklidové zářiče - ^{131}I .

Velmi významným zdrojem ionizujícího záření je jaderný reaktor.

Zdroje ionizujícího záření jsou *přirozené* nebo *umělé*. Největší část radioaktivity, které čelíme, pochází z přírodních zdrojů: z vesmíru, skla, vody, půdy a dokonce i z vlastních těl. To vše je tvořeno tzv. přirozenou radioaktivitou, tzv. **přírodní pozadí**.⁽¹⁸⁾ Radioaktivní jádra, vyrobená pomocí jaderné reakce v urychlovačích částic nebo v jaderných reaktorech, tedy uměle, pojmenováváme **uměle radioaktivní**.⁽¹³⁾

1.1.2 Ionizující záření

Ionizující záření je tok hmotných částic nebo fotonů elektromagnetického záření, který má schopnost ionizovat atomy prostředí nebo excitovat jejich jádra. Vzniká jako průvodní jev jaderných procesů (u rentgenového záření procesů odehrávajících se v elektronovém obalu atomů).⁽¹³⁾

Korpuskulární ionizující záření je popisováno elektrickým nábojem, klidovou hmotností a kinetickou energií.⁽¹³⁾

Fotonové ionizující záření má duální charakter (má vlastnosti jak elektromagnetického vlnění, tak i vlastnosti částic o nulové hmotnosti). Rozeznáváme fotonové záření gama a rentgenové záření.⁽¹³⁾

Rentgenové záření – záření X

Rentgenové záření je neviditelné krátkovlnné pronikavé elektromagnetické záření. Uměle lze rentgenové záření získat z rentgenové trubice dopadem urychlených elektronů na anodu rentgenky (primární rentgenové záření). Ozáření látek primárním rentgenovým zářením dochází k vybuzení sekundárního rentgenového záření. Rentgenové záření působí druhotné záření látek v optickém oboru (luminiscence), zčernání fotografické emulze, ovlivňuje živou i neživou hmotu.⁽²⁾

Intenzita záření ubývá se čtvercem vzdálenosti, která je závislá na množství elektronů dopadajících na anodu v rentgence. Zeslabení rentgenového záření závisí především na tloušťce vrstvy, kterou prochází.⁽¹⁹⁾

Záření alfa - α

Radioaktivní přeměna alfa je nejdéle známý a také nejčastější případ spontánní emise těžké částice z jádra. Vyskytuje se pouze u *těžkých přirozených radionuklidů*.⁽¹³⁾

Částice alfa je složena ze dvou protonů a dvou neutronů, jedná se tedy o jádro helia.⁽¹³⁾

Alfa částice nesou dva elektrické náboje, při průchodu prostředím silně ionizují a excitují a velmi rychle ztrácejí svoji energii, proto k ochraně před zářením stačí oděv, papír, tenká fólie z plexiskla apod. Lze je vychylovat elektrickým a magnetickým polem.⁽¹⁸⁾ Mezi alfa zářiče patří např. ^{226}Ra , ^{239}Pu a ^{241}Am .⁽²¹⁾

Záření beta - β

Záření beta je utvořeno rychlými elektrony (β^-) nebo pozitrony (β^+). Vznikají při přeměně mnoha přírodních i uměle připravených radionuklidů. Hodnoty energie beta záření činí řádově desítky keV až jednotky MeV. V porovnání se zářením alfa jsou částice beta mnohem lehčí, pohybují se proto při stejné energii podstatně rychleji a při průchodu prostředím daleko méně ionizují a excitují. Vhodnou ochranou je plexisklo a materiály s nízkým protonovým číslem. V magnetickém poli se vychyluje na opačnou stranu než alfa záření.⁽¹⁸⁾ K nejčastěji používaným beta zářičům patří např. ^{35}S , ^{63}Ni , ^{85}Kr , ^{90}Sr , ^{90}Y a ^{204}Tl .⁽²¹⁾

Záření gama - γ

Ionizující záření gama je příbuzné jak např. rentgenovým paprskům, tak i světlu, ovšem s kratší vlnovou délkou. Vzhledem k velice krátkým vlnovým délkám má záření gama velkou energii a tudíž velkou pronikavost. Vysíláním záření gama se protonové ani hmotnostní číslo prvku nemění. Fotony záření gama mají stejnou fyzikální podstatu jako jiné druhy elektromagnetického záření, a proto je jejich rychlost rovná rychlosti světla.⁽¹³⁾ Energie fotonů záření gama činí řádově desítky keV až jednotky MeV. Nelze jej elektricky ani magneticky vychylovat, protože nenesou náboj.⁽¹⁸⁾

Čistých gama zářičů je velmi málo, záření gama obvykle doprovází alfa nebo beta záření. K nejčastěji používaným zdrojům gama záření patří ^{60}Co a ^{137}Cs .⁽²¹⁾

Energie fotonů gama záření je dána vztahem :

$$E = h \frac{c}{\lambda}$$

h – Planckova konstanta

c – rychlost elektromagnetického záření
ve vakuu

λ - vlnová délka záření

Neutronové záření

Neutrony jsou elektricky neutrální, z čehož je odvozen název. Neutrony, nachází-li se mimo jádro atomu, jsou nestabilní se střední dobou života. Hmotnost neutronu je jen o málo větší než hmotnost protonu. Jádra zbavovaná neutronů se mohou zbavovat přeměny β^- . Uvolní-li se nukleon z jádra, pak je nebo není nositelem náboje.

Neutron je tedy nukleon, který v okamžiku, kdy se uvolnil z jádra, nebyl nositelem elektrického náboje. Neutrony lze získat jedině jadernými reakcemi, a to ve zdrojích rozličného typu, např. neutronové generátory, radionuklidové zdroje aj.⁽¹³⁾

Zákon radioaktivní přeměny

Jaderná přeměna je proces náhodný, který vzniká s určitou pravděpodobností. Nejsme schopni předpovědět, které jádro se v daném okamžiku přemění. Pokud je počet radioaktivních jader dostatečně velký, je možné radioaktivní přeměnu matematicky popsat. Celkový počet N dosud nepřeměněných jader v čase t určíme ze vztahu, kde $N(t)$ udává počet radioaktivních jader v čase t , N_0 je počet radioaktivních jader v čase $t=0$, e je Eulerovo číslo ($e=2,71$). Pravděpodobnost jaderné přeměny, která je pro každé radioaktivní jádro popisována, vyjadřujeme přeměnnou konstantou λ (lambda).⁽¹³⁾

$$N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda t} \quad (13)$$

Radioaktivní přeměna je charakterizována třemi vlastnostmi:⁽¹⁶⁾

- mění chemickou podstatu látky;
- je doprovázena emisí jednoho až tří druhů záření;
- je nezávislá na vnějších podmínkách (tlak, teplota, vlhkost aj.).

1.1.3 Veličiny a jednotky v oblasti ionizujícího záření

Znalost fyzikálních veličin a dobrá orientace v nich je v každé oblasti fyziky a techniky velmi důležitá. V problematice ionizačního záření a radiační ochrany je to o to důležitější, že tyto jednotky a veličiny nejsou obecně příliš známé.⁽²¹⁾

Potřebujeme veličiny, které popisují.⁽²¹⁾

- zdroje záření;
- působení záření na látku;
- pole záření;
- působení záření na člověka.

V následujících odstavcích jsou postupně probrány veličiny a jednotky týkající se zdrojů záření, působení záření na látku a působení záření na člověka.⁽²¹⁾

Veličiny charakterizující zdroj záření

Aktivita

Aktivitou se rozumí poměr dN/dt , kde dN je střední počet samovolných radioaktivních přeměn v určitém množství radioaktivní látky, k nimž dojde za časový interval dt .⁽⁶⁾

$$A = \left| \frac{dN}{dt} \right|$$

Symbol N značí počet radioaktivních atomů, t vyznačuje čas, d označuje nekonečně malý přírůstek uvažované veličiny. Jednodušeji můžeme říci, že *aktivita radioaktivní přeměny je počet radioaktivních přeměn v této látce za jednotku času.*⁽⁶⁾

Jednotkou aktivity je *becquerel* (Bq), jehož rozměr je s^{-1} .⁽²¹⁾

Poločas přeměny

Doba, za kterou se z počátečního počtu atomů daného radionuklidu samovolně přemění právě polovina – *poločas přeměny* $T_{1/2}$. Jednotkou pro poločas přeměny je sekunda. Jednoduchým výpočtem se dostaneme:⁽⁷⁾

$$T_{1/2} \frac{\ln 2}{\lambda} = \tau \ln 2$$

Přeměnová konstanta

Vyjadřuje relativní rychlost rozpadu snižování radionuklidů. Je označována řeckým písmenem lambda (λ).⁽²¹⁾ Pro daný radionuklid v daném stavu ji lze definovat jako podíl pravděpodobnosti dP , že jádro tohoto radionuklidu projde za časový interval dt samovolným jaderným přechodem z příslušného energetického stavu a tohoto časového intervalu:

$$\lambda = \frac{dP}{dt}$$

Jednotkou je sekunda (s^{-1}).⁽⁷⁾

Energie emitovaných částic

Jde o významnou veličinu jednak proto, že energie emitovaných částic je jednoznačnou charakteristikou radionuklidů, které tyto částice emitují a jednak proto, že vlastnosti záření na energii výrazně závisí. Jednotkou energie je joule (J), užívá se v elektronvoltech (eV).⁽²¹⁾

Veličiny charakterizující působení záření na látku

Dávka a dávkový příkon

Absorbovaná dávka D je popisována jako poměr střední energie ionizujícího záření $d\varepsilon$ sdělené velmi malému objemovému elementu ozáření látky a hmotnosti tohoto elementu dm . Jednotkou je joule na kilogram $J.kg^{-1}$, pro který byl zaveden název gray (Gy).⁽⁶⁾

$$D = \frac{d\varepsilon}{dm}$$

Dávkový příkon \dot{D} je přírůstek dávky dD za čas dt a jednotka je $Gy.s^{-1}$ nebo $Gy.h^{-1}$.⁽⁶⁾

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

Kerma

Kerma je součet počátečních kinetických energií dE_k všech nabitých částic uvolněných nenabitými ionizujícími částicemi v určitém objemovém elementu o hmotnosti dm . Jednotkou kermy je J.kg^{-1} (Gy). Kerma se používá v souvislosti s *nepřímo ionizujícím zářením*.⁽⁶⁾

$$\frac{dE_k}{dm}$$

Veličiny charakterizující působení záření na člověka

Ekvivalentní dávka (H_T), radiační váhový faktor (w_R)

Tato veličina označovaná jako H_T , představuje součin radiačního váhového faktoru w_R a střední absorbované dávky D_{TR} v orgánu nebo tkáni T pro ionizující záření typu R . Jednotka je J.kg^{-1} pojmenována Sv (Sievert).⁽⁶⁾

$$H_T = w_R \cdot D_{TR}$$

Radiační váhový faktor w_R je odvozen od *relativního biologického účinku* (RBÚ). RBÚ je poměr dávek dvou druhů záření potřebný k vyvolání téhož biologického účinku. RBÚ se mění s dávkou, dávkovým příkonem, frakcionací a fyziologickými podmínkami (např. přítomnost kyslíku). Radiační váhový faktor jsou v podstatě pevné hodnoty RBÚ pro účely radiační ochrany v oblasti stochastických účinků a nízkých dávek (Tab. 1).⁽⁶⁾

$$T = \frac{1}{\sum w_T \cdot H}$$

Dávkový ekvivalent (H)

Dávkový ekvivalent je součinem absorbované dávky v uvažovaném bodě tkáně nebo vzduchu a bezrozměrného jakostního činitele Q vyjadřujícího rozdílnou biologickou činnost různých druhů záření.⁽⁶⁾

$$H = D \cdot Q$$

Typ záření a příp. energie	Radiační váhový faktor w_R	
	Vyhláška 307/2002 Sb.	Doporučení ICRP 103
Fotony	1	1
Elektrony	1	1
Neutrony s energií < 10 keV do > 20 MeV	2 – 20	vyjádřeno energetickou závislostí
Protony > 2 MeV	5	2
Částice alfa, těžká jádra, štěpné fragmenty	20	20

Tab. 1 Radiační váhové faktory w_R pro různé druhy záření – stávající hodnoty a porovnání s těmi, jež doporučuje ICRP 103 v r. 2007.⁽⁶⁾

Efektivní dávka (E)

Tato veličina označována E je součtem součinů tkáňových váhových faktorů w_R a ekvivalentních dávek H_T v ozářených tkáních a orgánech.⁽⁶⁾ Jednotkou efektivní dávky je sievert (Sv).⁽²¹⁾

$$E = \sum w_R H_T$$

Tkáňový radiační faktor (w_T)

Tkáňový radiační faktor (Tab. 2) nám udává relativní příspěvky tkání nebo orgánů k celkové újmě ze stochastických účinků při rovnoměrném ozáření celého těla. Platí zde, že součet tkáňových váhových faktorů⁽⁶⁾

$$\sum w_T \cdot H_T = 1$$

Tkáň či orgán	w_T ve vyhl. 307/2002 Sb.	w_T v doporučeních ICRP 103
gonády	0,20	0,08
červená krevní dřeň	0,12	0,12
střevo	0,12	0,12
plíce	0,12	0,12
žaludek	0,12	0,12
močový měchýř	0,05	0,04
prs	0,05	0,12
játra	0,05	0,04
jícen	0,05	0,04
štítná žláza	0,05	0,04
kůže	0,01	0,01
povrchy kostí	0,01	0,01
slinná žláza	-	0,01
mozek	-	0,01
zbytek	součet 0,05	součet 0,12

Tab. 2 Tkáňové váhové faktory ve vyhlášce č. 307/2002 Sb. (jsou převzaty z ICRP 60) a doporučeních ICRP 103. Jedná se o průměrné hodnoty získané u jednotlivců z obyvatelstva bez ohledu na pohlaví a věk.⁽⁶⁾

1.2 Radiační ochrana

Cílem radiační ochrany je zabezpečit dostatečnou úroveň ochrany zdraví a umožnit přitom přínos s využitím zdrojů záření a jaderné energie, v souladu s obecnými principy ochrany zdraví před působením faktorů životního prostředí technologického rozvoje.⁽⁷⁾

Současná koncepce radiační ochrany ve světě a v Evropě se opírá zejména o doporučení ICRP 60 z roku 1991 a ICRP 103 z roku 2007, dále o standardy vydané

Mezinárodní atomovou agenturou (IAEA) ve Vídni a legislativu Evropské unie (Directive No. 96/29/Euratom).

Také v ČR byla podle uvedených dokumentů vytvořena legislativa, která určuje zákonné normy a požadavky související s ochranou před ionizujícím zářením.⁽⁶⁾

Předložíme jen dvě nejdůležitější položky:⁽⁶⁾

- **Zákon č. 18/1997 Sb.**, o mírovém využívání jaderné energie a ionizujícího záření a o změně a doplnění některých zákonů, ve znění řady pozdějších předpisů (dále Atomový zákon), a jeho prováděcích vyhlášek.⁽³³⁾
- **Vyhláška Státního úřadu pro jadernou bezpečnost č. 307/2002 Sb.**, o radiační ochraně, nabyla účinnosti ke dni 12.7.2002. Později byla novelizována vyhláškou č. 499/2005 Sb. (dále Vyhláška), která rozpracovává prakticky všechny důležité povinnosti při používání zdrojů ionizujícího záření a způsob jejich naplňování.⁽³²⁾

Státní úřad pro jadernou bezpečnost (SÚJB)

Státní úřad pro jadernou bezpečnost je ústředním orgánem, který je zodpovídající za jadernou bezpečnost, radiační ochranu a havarijní připravenost státní správy ve smyslu úplného znění zákona č. 122/1997 Sb. - §2. V jeho čele stojí předseda, který je jmenován vládou České republiky.^(9, 28)

Státní ústav radiační ochrany (SÚRO)

Státní ústav radiační ochrany je veřejnou výzkumnou institucí zabývající se odbornou činností v oblasti ochrany obyvatelstva před ionizujícím zářením.⁽²⁹⁾

1.2.1 Principy radiační ochrany

Ochrana před ionizujícím zářením vychází z poznámek o biologických účincích ionizujícího záření, jeho vlivu na lidské zdraví, z rozboru podmínek ovlivňujících výši ozáření v různých skupinách obyvatelstva a ze společných principů, organizačních a právních zásad, jimiž je řízena ochrana zdraví ve společnosti.

Hlavní překážkou stanovující principy a přístup radiační ochrany je vztah dávky záření a biologického účinku záření.⁽⁹⁾

Principy radiační ochrany⁽⁶⁾

- princip zdůvodnění;
- princip limitování (tab. 3);
- princip optimalizace;
- princip fyzické bezpečnosti zdrojů.

limitovaná veličina	obecný limit	limit pro radiační pracovníky	limit pro učně a studenty
součet efektivních dávek ze zevního ozáření a úvazků efektivních dávek z vnitřního ozáření	1 mSv/rok	100 mSv/5 roků 50 mSv/rok	6 mSv/rok
ekvivalentní dávka v oční čočce	15 mSv/rok	150 mSv/rok	50 mSv/rok
průměr. ekvivalentní dávka v 1cm ² kůže	50 mSv/rok	500 mSv/rok	150 mSv/rok
ekvivalentní dávka v prstech až předloktí a v chodidlech až po kotníky	-	500 mSv/rok	150 mSv/rok

Tab. 3 Uvádí limitování dávek pro jednotlivé základní limity^(26, 72)

1.2.2 Ochrana před ionizujícím zářením

Povinností všech lidí pracujících s ionizujícím zářením je využití veškerých dostupných prostředků k zabránění nebo alespoň ke snížení nebezpečí před vnějším ozářením a vnitřní kontaminací.⁽⁹⁾

Vlastní principy radiační ochrany lze rozdělit na ochranu před:

- **Zevním ozářením**

Jsou založeny na určitých principech a je zde možnost jejich kombinace:

- **ochrana časem** - kam spadá např. kratší setrvání osob v poli ionizujícího záření, což je dosahováno různými nácviky s cílem minimalizovat dobu pobytu osob v poli ionizujícího záření;
- **ochrana vzdáleností** - význam je patrný z pravidla, že pokles dávky v ozářeném objektu je nepřímo úměrný druhé mocnině jeho vzdálenosti od zdroje;
- **ochrana stíněním** - aplikace je založena na znalostech fyzikálních zákonitostí, na nichž je stínění založeno; stínění je praktikováno za pomoci stínících stěn a závěsů umístěných mezi zdroj ionizujícího záření a osoby, které zde musejí být.⁽¹³⁾

- **Vnitřní kontaminací**

K této kontaminaci dochází při práci s otevřenými zářiči. Vnitřní kontaminací se rozumí situace, kdy je organismus ozařován ionizujícím zářením, vysílaným radionuklidy, které se dostaly do organismu. Patří sem pracoviště I., II. nebo III. kategorie dle vybavení, které je potřebné k manipulaci s otevřenými zdroji ionizujícího záření.⁽⁹⁾

Základem jsou tři principy:

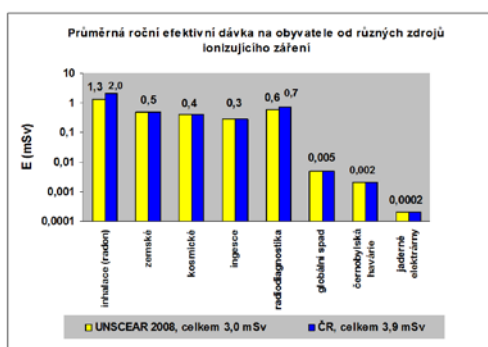
- zpracovávat co nejmenší dostačující aktivitu radioaktivní látky;
- omezovat rozptýl radioaktivního materiálu;
- dodržovat předepsaný režim práce – např. nošení ochranného oděvu.⁽¹¹⁾

1.2.3 Typy expozičních situací (graf 1, tab. 4)

V okolí přírodních a umělých zdrojů ionizujícího záření je spousta jednotlivců exponováno několika typy zdrojů. Každý zdroj nebo skupina zdrojů mohou být často posuzovány samostatně, tudíž je nezbytné zvážit ozáření všech jednotlivců exponovaných touto zdroji nebo skupině zdrojů. Tento typ se jmenuje *posouzení ve vztahu ke zdroji*. Druhý způsob hodnocení začíná u jednotlivce a bere v úvahu všechny zdroje způsobující ozáření tomuto jednotlivci. Toto hodnocení se nazývá *posouzení ve vztahu k jednotlivci*.

Všechny expozice zdrojům ionizujícího záření jsou rozděleny do třech typů expozičních situací:⁽²⁶⁾

- **plánované situace** - každodenní situace zahrnující plánované operace se zdroji včetně jejich likvidace, uložení radioaktivního materiálu a rekultivace dříve zabraného území; provozní činnosti (practices);
- **nehodové situace** - neočekávané situace, které se vyskytnou při provádění činností a které vyžadují bezodkladné opatření; nehodové situace mohou vzniknout při provozních činnostech;
- **existující expoziční situace** - expoziční situace, které už existují, když se rozhoduje o jejich regulaci, včetně ozáření z přírodního pozadí a následků minulých činností.



Graf 1 Průměrná roční dávka na obyvatele z různých zdrojů ionizujícího záření^(5,69,70, 71)

	UNSCEAR 2008	Česká republika (ČR)
Inhalace (Radon)	1,26	2,00
Zemské	0,48	0,50
Kosmické	0,39	0,39
Ingesce	0,29	0,29
Radiodiagnostika	0,60	0,70
Globální spád	0,005	0,005
Černobylská havárie	0,002	0,002
Jaderné elektrárny	0,0002	0,0002
Celkem	3,0	3,9

Tab. 4 Průměrná roční dávka na obyvatele z různých zdrojů ionizujícího záření (5.dále dle zdrojů grafů a tabulek)

1.2.4 Druhy ozáření

Obecně rozlišujeme tři druhy ozáření, které ovlivňují vhodnost použití různých prostředků regulace.

- **ozáření při práci** zahrnuje veškeré ozáření, k němuž došlo při práci a v důsledku práce;
- **ozáření lékařské** - spadá sem ozáření osob v důsledku vyšetřovacích a léčebných postupů; patří sem i ozáření dobrovolníků neprofesionálů při pomoci při vyšetření;
- **ozáření obyvatel (obecné)** - patří sem všechna ostatní ozáření.⁽⁹⁾

Regulace ozáření při práci zahrnuje dva pojmy, a to kontrolované pásmo a sledované pásmo.

- **Kontrolované pásmo** je oblast, kde mohou být zapotřebí zvláštní ochranná a bezpečnostní opatření k usměrnění normálního ozáření či zabránění šíření

se radioaktivní kontaminace nebo k zábraně potencionálního ozáření a nebo jeho ozáření. Toto pásmo se vyznačuje jako ucelená a jednoznačně určená část pracoviště, která je zajištěna tak, aby do ní nemohly vstupovat nepovolané osoby.

- **Sledované pásmo** je na pracovištích, kde dochází k manipulaci s radiační činností za běžného provozu nebo za předvídatelných odchylek od běžného provozu by mohlo ozáření překročit obecné limity. Pásmo se vymezuje na veškerých pracovištích kategorie (I. - IV.), kromě pracovišť s typově schválenými drobnými zdroji. Ve sledování pásma se provádí pouze monitorování pracovišť, pokud není stanoveno jinak.⁽⁹⁾

Usměrňování ozáření obyvatel

Kontakt s prostředím radioaktivních látek nebo polem ionizujícího záření obyvateli, nemůže být prakticky usměrněno. Tudíž všechna dostatečná opatření k ochraně obyvatel musí být provedena přímo u zdrojů různým omezením radiace. Odhad dávek pro obyvatelstvo se provádí pomocí modelů pohybu radioaktivních látek v prostředí.⁽⁹⁾

Usměrňování lékařské expozice

Lékařská expozice představuje nejvýznamnější podíl ozáření člověka ze všech umělých zdrojů záření, kde se na ní podílí jak diagnostika, tak terapie.

Lékařské ozáření je individuální u jednotlivých pacientů dle zdravotního stavu. Ozáření se využívá jak pro preventivní oblast, ale také u jednotlivců, u kterých víme, že výsledek vyšetření přinese odkrytí nemoci.

Optimalizace radiační ochrany při lékařském ozáření se dosahuje zejména zavedením *systému jakosti*.⁽⁹⁾

Cílem optimalizace je:

- v radiodiagnostickém vyšetření se musí správně použít zobrazovací metoda tak, aby dávka ve tkáni byla minimální, aniž by se tím snížilo získání nezbytných informací z vyšetření a typická efektivní dávka při některém ozáření je znázorněna v tabulce číslo 2 a 3 ;
- při radioterapeutických výkonech ozáření cílového objemu, v rozsahu nezbytném k dosažení požadovaného účinku, přičemž ozáření ostatních tkání musí být tak nízké, jak lze rozumně dosáhnout bez omezení léčby;
- při nukleárně medicínském vyšetření aplikujeme pouze nezbytné množství radioaktivní látky, která zaručuje dostatečnou diagnostickou informaci, při co nejnižší zátěži pacienta. Typická efektivní dávka z radiofarmak při různém druhu vyšetření viz tabulka číslo 5 a 6.

Požadavky na vybavení pracoviště a pracovníka stanovuje § 64 - § 66 vyhlášky č. 307/2002 Sb.,⁽⁹⁾ novelizována později vyhláškou č. 499/2005 Sb., která rozpracovává prakticky všechny důležité povinnosti při používání zdrojů ionizujícího záření a způsob jejich naplňování.⁽³²⁾

Druhy vyšetření	Rozmezí průměrných efektivních dávek (mSv)
Klasická radiodiagnostika	0,1 až 10
Výpočetní tomografie	2 až 20
Intervenční radiologie	5 až 70
Nukleární medicína	0,3 až 20

Tab. 5 Rozmezí průměrných efektivních dávek pacienta v radiologii a nukleární medicíně.⁽⁶⁾

Zobrazovací metody	Druh vyšetření	Typické efektivní dávky (mSv)
Skiografie	lebka AP/PA	0,01 – 0,02
	hrudník PA	0,01 – 0,02
	lumbální páteř AP	0,2 – 0,5
	břicho AP	0,3 – 0,5
	pánev	0,3 – 0,5
	IVU (ledviny a moč. měchýř)	2 – 3
Skiaskopie	kontrastní GIT	1 – 2
	kontrastní střevo	1 – 3
	kontrastní žaludek	2 – 5
Koronární angiografie	Diagnostická	3 – 5
Intervenční radiologie	mozek	3 – 8
	játra/ledviny	6 – 20
	dolní končetina	4 – 15
CT	hlava	1,2 – 1,7
	hrudník	5 – 7
	břicho	3 – 7
	břicho a pánev	5 – 8
	hrudník, břicho a pánev	7 – 12
Nukleární medicína	Schillingův test ⁵⁷ Co	0,1
	plíce ventilace ^{99m} Tc –DTPA	0,4
	plíce perfuze ^{99m} Tc	1
	scin. myokardu ^{99m} Tc - tetrofos.	2
	scintigrafie kostí ^{99m} Tc	3
	scinti. štítné žlázy ¹²³ I	4
	scinti. myokardu ²⁰¹ Tl	14
	scinti. nádorů PET ¹⁸ F –FDG	8

Tab. 6 Typické efektivní dávky při radiodiagnostických nukleárně medicínských vyšetřeních dospělých. Efektivní dávky z radiofarmak v nukleární medicíně se vztahují na běžně aplikovanou aktivitu v MBq.⁽⁶⁾

1.2.5 Monitorování v radiační ochraně

Program monitorování

Za pomoci radiačního monitorování se splní požadavky na limitování ozáření osob, prokazuje se optimalizace radiační ochrany, další zajištění požadavků na bezpečný provoz pracovišť se zdroji ionizujícího záření, především zjištění odchylek od normálního provozu. Monitorováním se nejen měří veličiny charakterizující radiační pole a dozimetrické veličiny, ale i interpretace a hodnocení ozáření náležitých veličin, parametrů, které musejí odpovídat rozsahu a způsobu určité praxe.

Program monitorování obsahuje čtyři části: ⁽⁷⁾

- monitorování pracovišť;
- osobní monitorování;
- monitorování výпустí;
- monitorování okolí.

Program monitorování musí obsahovat jak monitorování pro běžný provoz, tak i pro předvídatelné odchylky od běžného provozu, radiační nehody a havárie.

Monitorování se dále dělí podle typu praxe:

- *soustavné (nepřetržité)* - v dané praxi musí potvrzovat, že pracovní podmínky jsou bezpečné, v souladu s požadavky povolení praxe;
- *pravidelné (periodické)* - v určitých termínech se opakuje a jeho cílem je rovněž to samé co u soustavné praxe;
- *operativní* - provádění při určité činnosti s cílem zhodnotit a zajistit přijatelnost této činnosti z hlediska systému limitování a podmínek povolené praxe.

Samozřejmě, že pro volbu daného typu, rozsahu a způsobu monitorování mohou být důvodem i vedlejší přínosy, jako jsou důvody vědecké, epidemiologické studie.⁽⁷⁾

Program monitorování pracovišť

Monitorováním pracovního prostředí se získávají podklady pro posouzení optimalizace radiační ochrany na daném pracovišti a ověřuje se, zda pracovní podmínky i nadále odpovídají podmínkám vydaného povolení k nakládání se zdroji ionizujícího záření, a zda je včas zajištěn vznik provozní odchylky, radiační nehody. Při jakékoliv změně na pracovišti dochází k aktualizaci programu monitorování.⁽⁷⁾

Systém osobního monitorování

Osobní monitorování slouží k určení individuálního zevního i vnitřního ozáření jednotlivých osob, či skupin osob. Rozlišují se zde dvě kategorie pracovníků:

- *kategorie A*
 - jsou pracovníci, kteří nakládají se zdroji ionizujícího záření za takových podmínek, že mohou obdržet efektivní dávku 6 mSv ročně;
 - pracovníci musejí dodržovat pravidelné lékařské kontroly a musí u nich být sledovány osobní dávky;
- *kategorie B*
 - jsou ostatní pracovníci.

Program monitorování výpustí a okolí pracovišť

Program monitorování je nezbytnou součástí všude tam, kde dochází k zneškodňování radioaktivních odpadů jejich řízeným vypouštěním, nebo kde existuje možnost úniku závažného množství radioaktivních látek do okolí. Monitorování výpustí a okolí pracovišť, které slouží ke kontrole dodržování veškerých zásad při vypouštění radioaktivních látek.⁽⁷⁾

Program havarijního monitorování

Havarijní monitorování se využívá v rámci nakládání se zdroji ionizujícího záření či provozu pracoviště a s nimi je třeba posoudit i pravděpodobnost vzniku mimořádných situací a havárií. Pro zdroje, u nichž je vznik radiační nehody nebo havárie možný, předkládá žadatel o povolení havarijní plán.⁽⁷⁾

Osobní monitorování zevního ozáření

Monitorování zevního ozáření se uskutečňuje osobními dozimetry a na základě údajů monitorů pracovního prostředí. V případě radiačních nehod či havárií se dávka od zevního ozáření obyvatel odvozuje od výsledků měření složek radiační monitorovací sítě.⁽⁷⁾

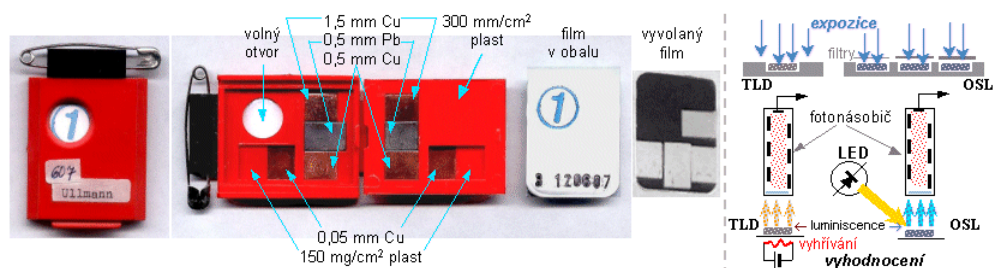
Volba osobních dozimetrů závisí na druhu záření v daném radiačním poli, a také na dozimetrické informaci.

V praxi se nejčastěji využívají:⁽⁷⁾

- dozimetry fotonů;
- dozimetry beta a gama záření;
- komplexní dozimetry pracující na diskriminačním principu;
- dozimetry neutronů;
- dozimetry extremit.

Při používání stínící zástěry se dozimetr nosí vně zástěry. Osobní dozimetr by měl měřit současně všechny druhy záření, a pokud tuto podmínku nespĺňuje jeden dozimetr, pracovník se vybavuje dalšími dozimetry tak, aby byly podmínky splněny nebo musí být zvolen jiný způsob osobního monitorování.

Základním typem osobního dozimetru v polích záření gama a v kombinaci gama a beta záření je **filmový dozimetr**⁽⁷⁾ (obr. 1). Tento dozimetr slouží k měření absorbované dávky záření beta-, beta+, gama a rentgenového záření.⁽¹³⁾



Obr. 1 Filmový dozimetr ⁽³⁵⁾

Autoradiografie je metoda, pomocí které zjišťujeme přítomnost a rozložení radioaktivní látky. ⁽¹³⁾

Přístroje pro ochrannou dozimetrii se používají také k měření kontaminace povrchu pracovních ploch, ochranných oděvů i pomůcek a zevní kontaminace pracovníků.

Používají se dva základní způsoby: ⁽¹³⁾

- způsoby založené na ionizaci plynu;
- způsoby založené na excitaci či ionizaci pevných, tekutých nebo plastických hmot, které přeměňují energii ionizujícího záření na energii fotonů viditelného světla.

Plynové detektory

Plynové detektory detekují ionizující záření na základě jeho ionizujícího účinku. Principem plynových detektorů je složení ze dvou kovových izolovaných elektrod připojených ke zdroji napětí, mezi nimiž je plynové prostředí. Pokud se mezi elektrodami nachází ionizující záření, jeho interakcí s molekulami plynu dochází ke vzniku částic s elektrickým nábojem, tzv. iontových párů. Ty pak slouží jako nosiče elektrického proudu. ⁽¹³⁾

Patří sem **ionizační komůrka**, která je tvořena dvěma, od sebe i vnějšího prostředí dobře izolovanými, elektrodami, mezi nimiž je plynové prostředí. Rozlišujeme ionizační komůrky statické a impulzní. Detektory tohoto typu se přednostně používají

pro měření vzorků o vysoké radioaktivitě. V nukleární medicíně slouží jako měřiče celkové aktivity měřeného vzoru.

Dalším plynovým detektorem je **Geiger-Müllerova trubice** pracuje na obdobném principu jako ionizační komůrka, ale na elektrody se přivádí takové napětí, které vyvolává lavinovou ionizaci nárazem. Využívá se k monitorování úrovně radiace v pracovním prostředí jako měřiče kontaminace pracovního prostředí a osob.⁽¹³⁾

Havarijní dozimetry fotonů se používají termoluminiscenční a filmové dozimetry, kde je i nadále používán kapesní (tužkový) dozimetr.(obr. 2). Specifickou skupinou osobních havarijních dozimetrických metod tvoří **biologické dozimetry**.⁽⁷⁾



Obr. 2 Kapesní (tužkový) termoluminiscenční dozimetr ⁽³⁶⁾

V **dozimetrech neutronů** se v některých zemích stále používají jaderné emulze, ale začínají je nahrazovat bublinkové dozimetry.

Nejčastěji se používají tři typy detektorů stop v pevných látkách, a to:⁽⁷⁾

- detektory se štěpnými radiátory;
- detektory odražených protonů;
- detektory založené na (neutronové a alfa záření) reakci.

1.3 Umělé zdroje ionizujícího záření ve zdravotnictví

Za posledních 100 let, bylo ionizující záření stále více prosazováno v medicíně a nyní je ustanoveno jako základní nástroj pro diagnostiku a terapii. Hlavní výhodou pro pacienty je široké spektrum výkonů, které se rozšiřují v praxi lékařské radiologie, což

má za následek, že zdravotnické ozáření se stalo důležitou součástí celkového ozáření obyvatelstva.⁽³¹⁾

Kromě diagnostického zobrazení nebo terapie, jsou i některé další aplikace ionizujícího záření na tkáň analýzou v klinickém hodnocení zdraví nebo nemoci, např. vyšetření in vivo.⁽³¹⁾

1.3.1 Radiodiagnostika

Přes sto let se v lékařství využívá rentgenové záření pro diagnostické vyšetření s postupnou propracovaností. Během posledních 20 let zejména v lékařských zobrazovacích metodách došlo k technologické revoluci (tab. 7), a nyní tak umožňuje mnohem lepší zobrazení anatomie, fyziologie a metabolismu. Jistý pokrok v oblasti kvality rentgenových snímků a ochrany pacientů mají zajistit pokrok pro diagnostické rentgenové záření ve zdravotnictví, ačkoli alternativní způsoby pro diagnostiku jsou stále k dispozici, jako je ultrazvuk, endoskopie, a zejména ve vyspělých zemích, MRI.⁽³¹⁾

Technologie v radiodiagnostice

Tradiční rentgenová vyšetření zahrnují statické zobrazení, kde se používají kazety s filmem se zintenzivněním obrazovky (rentgen - skiaskopie), a dynamické zobrazení, které se využívá ve skiaskopii, kde se zobrazí vyšetřovaná část těla na obrazovce za pomoci zesilovače. Kinematografický film je také užíván v radiologické studii srdce. V současné době se stále více zavádí digitální rentgenová technika.

Viditelnost jednotlivých tkání lze zvýšit aplikací kontrastní látky pacientovi, jako je baryum pro gastrointestinální (GI) trakt a jód pro krevní cévy (angiografie), močové cesty (urografie), nebo biliární systém (cholecystografie). Kromě pevné instalace rentgenu v nemocničních zařízeních, lze používat pojízdné rentgeny (obr. 3) pro skiagrafii nebo fluoroskopii umožňující snímkovat na různém oddělení u nemobilních pacientů nebo na operačních sálech.⁽³¹⁾

Rok	Vývoj
1895	Objev X paprsku (Röntgen); první rentgenový snímek
1920	Studie kontrastní látky (barium)
1930	Intravenózní kontrastní látky
1940	Angiografie
1950	Fluoroskopie se zesilovačem; technika katétrů
1960	Počáteční práce na zesílení obrazovek
1970	Výpočetní tomografie (CT)
1980	Magnetická rezonance (MRI); digitální radiologie
1990	Intervenční radiologické metody; archivace snímků a komunikační systém (PACS); teleradiologie

Tab. 7 Chronologické seřazení technických pokroků v radiodiagnostice ⁽³¹⁾



Obr. 3 Pojízdny RTG ⁽³⁷⁾

Digitální metody pro zpracování a zobrazení rentgenových obrazů byly poprvé zavedeny do klinické praxe s příchodem CT v roce 1972. Tato revoluční technologie je schopna poskytovat vysoce kvalitní obrazy s tenkými řezy pacienta pomocí úzkých rotujících rentgenových paprsků, i když s relativně vysokou dávkou pacientovi. Další vývoj spirálního CT vedl k dalšímu testování techniky, jako je CT endoskopie a CT skioskopie. Pokrok v oblasti výpočetní techniky také podpořil celkový rozvoj digitální radiografie, kde jsou obrazy získané v digitální podobě.

Digitální technologie používá pro skladování a přenos snímků v a mezi nemocnicemi digitální síť známé jako komunikační systémy (PACS), které napomáhají k dálkové konzultaci.

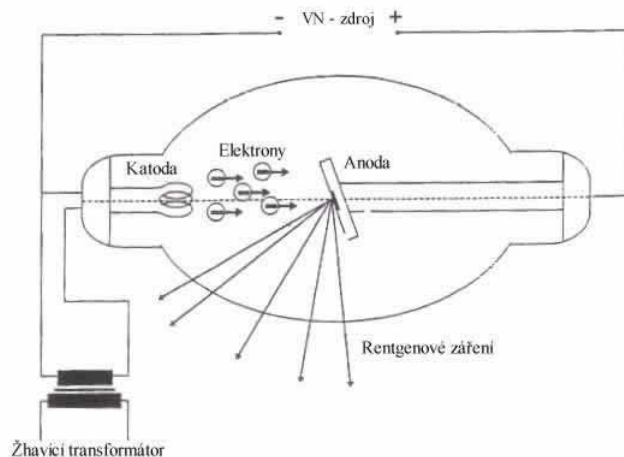
Kromě vyšetření na symptomatických pacientech s konkrétní klinickou indikací jsou diagnostická rentgenová vyšetření rovněž prováděna v souvislosti s masovými screeny. Ty mohou být prováděny pro různé účely jako je např. diagnostika tuberkulózy, rakovina prsu nebo, a to zejména v Japonsku, diagnostika rakoviny žaludku. Kromě toho některé zkoušky jsou prováděny z lékařsko právních důvodů a jiné na dobrovolnících, kteří se účastní lékařského výzkumu.⁽³¹⁾

Rentgenka

Rentgenka (obr. 4) je vakuovaná skleněná trubice tvořena dvěma elektrodami, a to kladnou anodou a zápornou katodou, jejíž hlavní částí je spirála z wolframu. K elektrodám musí být dodáváno velmi vysoké stejnosměrné elektrické napětí.

Vysoká teplota katody umožňuje termoemisi elektronů z jejího povrchu a vzniká tak elektronový mrak. Fokusační misky jej stahují do úzkého svazku, protože elektrony jsou odpuzovány záporným napětím na misce.

Po dodání anodového napětí, které je mezi anodou a katodou, elektrony letí na anodu, kde dojde k prudkému zabrzdění a dochází k přeměně kinetické energie v 1 % rentgenového záření a v 99 % tepla.⁽¹⁹⁾



Obr. 4 Rentgenka ⁽³⁸⁾

Skiografie

Při skiografickém způsobu zobrazování prochází svazek rentgenového záření z rentgenky vyšetřovanou oblastí těla pod jedním zvoleným úhlem. Po průchodu zářením tkání vzniká trvalý obraz neboli snímek, který získáváme v podobě negativu na vyvolaném filmu (obr. 5).^(5, 6)

U přímé digitální radiografie je záření zachyceno maticí detektorů, které jej přímo převedou na elektrický signál a digitálně se registruje v počítači. Výhodou digitalizace proti klasickému snímkování je vyšší kvalita, redukce dávky, možnost následné úpravy, archivace snímků v digitální podobě.⁽¹⁴⁾

Skiaskopie

Skiaskopie (obr. 6) je prosvěcování pacienta rentgenovým zářením při současném vizuálním pozorování vzniklého obrazu na fluorescenčním štítě. Hlavní nevýhodou je mnohem vyšší dávka rentgenového záření než je použita ve skiografii. Naopak výhodou je prostorová představitost při lokalizaci patologického ložiska nebo sledování dynamických dějů, například pohyb žaludku, střev (enteroklýza).



Obr. 5 Rentgenový přístroj ⁽³⁹⁾



Obr. 6 Skiaskopie ⁽⁴⁰⁾

Na stejném principu jsou další stacionární rentgenová zařízení:

- angiografická, pro veškerou vasografii s DSA;
- angiografická, cíleně určená pro vyšetření cév srdečního svalu a jeho dynamiku. ⁽²⁰⁾

Angiografie a intervenční výkony

Obecné označení pro angiografii je zobrazení cév. Provádí se buď neinvazivně za pomoci dopplerovské ultrasonografie, CT angiografie či MR angiografie, a nebo invazivně podáním kontrastní látky do jejich lumina zobrazením rentgenového přístroje.⁽¹²⁾ Angiografii dělíme na arteriografii (zobrazení tepenného systému) a flebografii (zobrazení žilního systému).⁽⁶⁾

Angiografická vyšetření se provádějí na speciálních pracovištích s angiografickým vybavením (obr. 7), kam spadá pohyblivý stůl, monitory, tlaková stříkačka pohyblivé C-rameno, na kterém je uložena rentgenka a zesilovač.^(6, 14)

Při *digitální subtrakční angiografii (DSA)* se pořizuje snímek před a po aplikaci kontrastní látky. Tyto snímky se v digitální formě zaznamenávají do paměti počítače

a následně je provedeno jejich odečtení. Na monitoru počítače se zobrazí pouze cévy naplněné kontrastní látkou.⁽⁶⁾



Obr. 7 Angiografický sál s příslušenstvím⁽⁴¹⁾

Počítačová tomografie (CT-computed tomography) (obr. 8)

První snímek byl vytvořen v roce 1971. Za objev výpočetní tomografie obdržel Geoffrey Newbold Hounsfield Nobelovu cenu, a to v roce 1979.⁽¹⁹⁾

CT je digitální zpracování dat o průchodu rentgenového záření v mnoha průmětech vyšetřovanou vrstvou. Základní princip je založen na zeslabení svazku rentgenového záření při průchodu vyšetřovaným objektem. Jedná se o metodu tomografickou, ale vyšetření má větší množství sousedících vrstev o šířce 1 - 10 mm. Dle potřeby vyšetřujeme nejen nativně, ale i s podáním jodových kontrastních látek.⁽¹⁴⁾

Pacient je fixován na posuvném lůžku, které postupně prochází gantry přístroje. V gantry je z jedné strany rentgenka, která je zdrojem rentgenového záření, a na opačné straně je řada scintilačních detektorů ionizujícího záření. Částečně se tu absorbuje úzký svazek záření procházející tělem pacienta, který má tvar kužele.⁽¹⁸⁾ Míra zeslabení záření v jednotlivých místech je registrována jako denzita v tzv. *Hounsfieldových jednotkách*.⁽¹⁴⁾ Rentgenka a scintilační detektory se po dobu vyšetření pootáčejí a mění

se úhel postavení. Veškeré údaje z vyšetření se ukládají do počítače a výsledný topogram je dán hodnotami absorpčních koeficientů z jednotlivých míst tkání daného řezu.⁽¹⁸⁾

Počítačová tomografie se dle postupu vyšetření dělí na:

- konvenční CT - vyšetření je prováděno v jednotlivých vrstvách, postupně;
- spirální CT – celá vyšetřovaná oblast se zobrazuje tak, že během kontinuální expozice pacient pomalu projíždí otvorem gantry.⁽¹⁴⁾

CT neagresivním způsobem, ale za vysoké dávky rentgenového záření zobrazuje měkké tkáně jako je mozek, slezina, pankreas, ledviny, svalstvo. U CT vyšetření lze zjistit jen takové patologické procesy, které se liší svou denzitou.⁽¹³⁾ Výhodou CT je umožnění zobrazit a rozlišit málo kontrastní měkké tkáně.⁽¹⁹⁾



Obr. 8 Počítačová tomografie ⁽⁴²⁾

Radioterapie

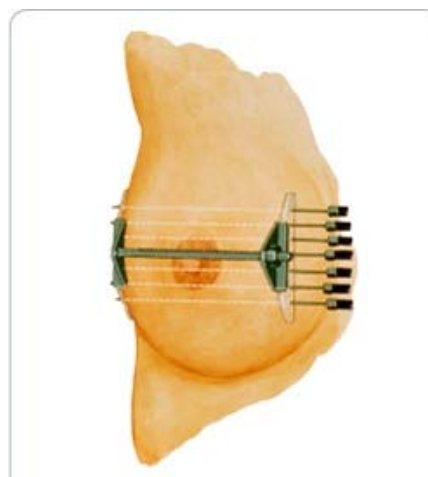
Radioterapie je využívána především při léčbě rakoviny ionizujícím zářením, kde je záměrem dodat smrtící dávku na maligní tkáň do dobře stanoveného cílového objemu, při minimálním ozáření okolních zdravých tkání. Léčby jsou nejčastěji prováděny pomocí generátorů záření a uzavřených radionuklidových zářičů.⁽³⁰⁾

Radioterapie se rozděluje na dvě základní metody:

- **teleradioterapie** (obr. 9), při níž je zdroj záření vzdálen od povrchu těla pacienta. Záření vycházející ze zdroje je vystíněno pomocí clon kolimačního systému a vytváří tzv. svazek. Svazek záření prostupuje do cílového objemu a užívá se k léčbě.
- **brachyterapie** (obr.10) – zdroj záření je zaveden do těsné blízkosti nebo přímo do cílového objemu.⁽⁶⁾ Výhodou těchto postupů je možnost dodat do nádoru vysoké dávky záření bez nebezpečí poškození okolních tkání.⁽¹³⁾



Obr. 9 Teleradioterapie ⁽⁴³⁾



Obr. 10 Brachyterapie – intersticiální aplikace radiových jehel do prsu ⁽⁴⁴⁾

Ionizující záření užívané v radioterapii se rozděluje podle mechanismu vzniku na rentgenové záření, vznikající při zabrzdění urychlených elektronů v lineárním urychlovači a záření γ , generované radioaktivním rozpadem jader radionuklidů a jaderných interakcí (^{60}Co , ^{137}Cs , ^{192}Ir a jiné).⁽¹⁾

Simulátor

Simulátor je nedílnou součástí algoritmu procesu přípravy radioterapie. Využívá se k zakreslení izocentra a ke kontrole léčebného plánu. Simulátor se dělí na konvenční (klasický) a CT simulátor.

Konvenční simulátor (obr. 13) patří k diagnostickým přístrojům pracující na principu skiaskopie, který umožňuje vytvořit RTG snímek. Na simulátoru je možné ověřit většinu ozařovacích podmínek. Umožňuje nám simulaci ozáření.⁽¹⁾



obr. 11 Konvenční simulátor⁽⁴⁵⁾

CT simulátor (obr. 12) používá diagnostické CT. Výhodou je snížení chyb při přenosu orientačních značek pro radiologii z kůže pacienta, dalším kladem je nezávislost pracoviště na diagnostickém oddělení a možnost opětovného provedení CT vyšetření a okamžitou změnu uložení izocentra. Nemožné provedení simulace ozařovacího plánu je nevýhodou tohoto přístroje.⁽¹⁾



Obr. 12 CT simulátor s CT přístrojem ⁽⁴⁶⁾

Zdroje vysokofrekvenčního záření

Kobaltové a cesiové ozařovače

Kobaltové a cesiové ozařovače jsou zdrojem gama záření. Patří mezi zdroje ozařování radioizotopovými zdroji z dálky.

Kobaltové ozařovače (obr. 13) mají velkou aktivitu zdroje a jsou určeny pro *hloubkovou radioterapii*. Radioaktivní kobalt ^{60}Co (fyzikální poločas přeměny je 5,29 roku) emituje dvě kvanta záření gama, která mají velkou pronikavost. ^{60}Co bývá uzavřen ve formě plochých kroužků nebo drobných válečků v hliníkovém nebo ocelovém kontejneru. ⁽¹³⁾

Radionuklid kobaltu ^{60}Co se samovolně přeměňuje na ^{60}Ni (nikl), přeměnou jednoho atomu prochází emise jednoho elektronu a dvou fotonů o blízké energii. Radioaktivní kobalt vyzařuje bichromatické záření gama o energii 1,17 a 1,33 MeV. ⁽¹⁾

Radioaktivní **cesium** ^{137}Cs (fyzikální poločas rozpadu je 30,4 roku) emituje kvantum záření o nižší energii než-li kobalt. Používá se k ozařování patologických ložisek do hloubky maximálně 5 cm. ⁽¹³⁾



Obr. 13 Kobaltový ozařovač ⁽⁴⁷⁾

Urychlovače nabitých částic

Urychlovače jsou zařízení schopná urychlovat elektrické nabité částice, především elektrony, protony, deutrony (jádra těžkého vodíku), částice alfa a také různé těžké ionty. Jsou využívány v mnoha různých provedeních v základním fyzikálním výzkumu, dále pro přípravu některých radioizotopů a v neposlední řadě i pro léčebné ozařování pacientů. Dále bude zmínka o třech typech urychlovačů, s nimiž se nejčastěji setkáváme v lékařské praxi – lineární vysokofrekvenční urychlovače, cyklotrony a betatrony.⁽⁵⁾

Lineární urychlovače

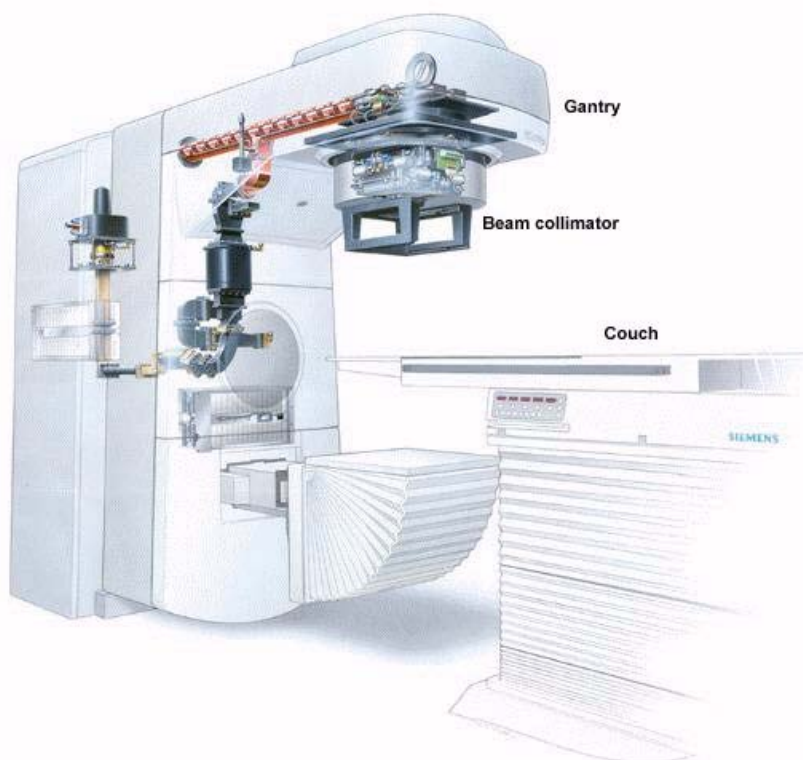
Lineární urychlovače (obr. 14) mají zkrácený název Linac (**L**inear **a**ccelerator). V urychlovačích jsou ionty nebo elektrony zrychlovány elektrickým polem a užívají se buď svazky těchto nabitých částic nebo sekundárních částic vznikajících při interakčních procesech na vhodných terčících. Rozdělujeme je na elektronické (vysokonapěťové) a vysokofrekvenční.

Elektronické lineární urychlovače obsahují zdroj vysokého napětí a urychlovací trubice. Trubice je vakuová, kde na jednom konci je katoda se žhavenou spirálou a na druhém konci je anodová s terčíkem z wolframu či ze zlata, kam dopadají urychlené elektrony. Terčík je zdrojem záření X. Mezi katodou a anodou se nachází trubicový systém urychlovacích elektrod.

Elektronové dělo vysílá elektrony do urychlovacího systému. Mezi elektrody je rozdělena celková kapacita získaného vysokonapětového zdroje, což umožňuje rozložit urychlovací proces podél osy trubice, současně dochází k soustředění svazku elektronů.

Do urychlovacích elektrod je dodávané vysoké napětí ze soustavy vhodně zapojených diod a kondenzátorů (elektronická kaskáda násobiče) nebo Van de Graafova generátoru.⁽¹⁾

Ve *vysokofrekvenčním lineárním urychlovači* se užívá k urychlení soustava válcových elektrod. Moderní lineární urychlovače používají k urychlení částic vlnovod, rozčleněný vhodnými diskovými výběžky na řadu rezonančních dutin napájených frekvencí několika GHz z klystronu nebo magnetronu.⁽¹⁾

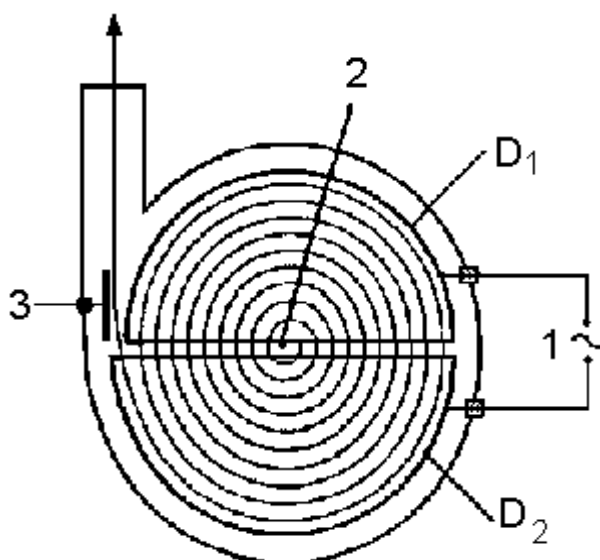


Obr. 14 Lineární urychlovač ⁽⁴⁸⁾

Cyklotron (obr. 15)

Používá se k výrobě umělých radioizotopů, ale i k urychlení klasických částic a následnému užití k léčbě maligních onemocnění, slouží také k výrobě neutronového záření.

Kladné částice jsou v cyklotronech urychlovány ve spirálové dráze. Částice se urychlují mezi duanty, které jsou uloženy mezi póli silného elektromagnetu. Magnetické pole způsobuje zakřivení dráhy částic. Pokud se dostane částice na okraj duantu, je následně přitahována opačně nabitým duantem. K samotnému urychlení částic dojde při přechodu z jednoho duantu do druhého. Urychlené částice se buď odchýlí od obvodu duantů tak, aby odstřelovaly terčík, nebo mohou být vypuštěny okénkem ven z cyklotronu.⁽¹⁾



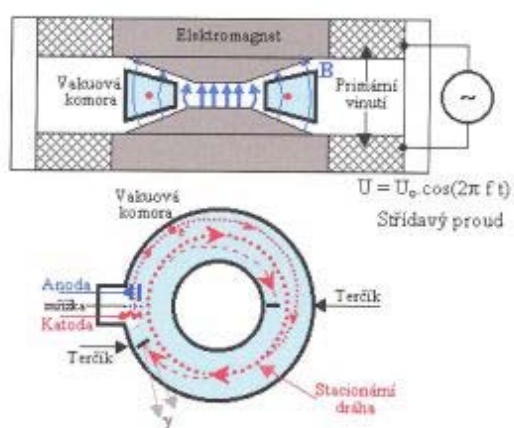
Obr. 15 Schéma principu cyklotronu ⁽⁴⁹⁾:

1-zdroj napětí, 2-zdroj elektronů, 3-defektor na vyvedení částic, D₁, D₂ – duanty

Betatron

Betatron (obr. 16) je kruhový urychlovač elektronů, které se hýbají ve vakuovém prstenci a jsou urychleny silou vzniklou pomocí elektromagnetické indukce.

Betatron funguje na stejném principu jako transformátor, jehož sekundární vinutí je nahrazeno vakuovou trubicí (urychlovací komorou). Elektromagnet je napájen střídavým proudem. Injektorem jsou vpravovány již částečně urychlené elektrony. Jakmile se elektrony dopraví do magnetického pole, jejich dráha se postupně spirálovitě zakřivuje, až elektrony dorazí na kruhovou dráhu, po které se rychlost zvyšuje v závislosti na rostoucím napětí. Jejich dráha se pak stočí na okraj prstence, kde dojde ke srážce s terčíkem a tím vzniká emise záření.⁽¹⁾



Obr. 16 Schéma betatronu ⁽⁵⁰⁾

Rentgenová terapie

Základním kritériem pro rentgenovou terapii (obr. 17) je uložení nádorového ložiska, jeho rozsah a požadovaná výše aplikované dávky. Při některých lokalizacích maligních nádorů můžeme správnou volbou energie záření, filtrací, vzdáleností OK (ohnisko - kůže) a volbou správné ozařovací techniky zajistit dostatečnou dávku v nádorovém ložisku. To vše s maximálním šetřením zdravé okolní tkáně.⁽¹⁾

Rentgenové terapeutické zdroje se od diagnostiky liší především konstrukcí rentgenek. Terapeutické rentgenky mají větší plochu ohniska, robustnější anodu a účinnější chlazení. Větší plocha ohniska umožňuje vyšší radiační výkon.⁽⁵⁾

Podle účelu terapeutického využití se rentgenové terapeutické přístroje vyrábějí ve třech kategoriích.⁽⁵⁾

- **nízkovoltážní** (napětí 40 – 100 kV), využívá se ke kontaktní povrchové terapii především kožních a slizničních nádorů. Záření těchto zdrojů je zcela pohlceno vrstvou 2 – 3 cm měkké tkáně. Příkladem přístroje této kategorie je Chaoulova lampa⁽⁵⁾ (Bucky terapie, kontaktní terapie);⁽¹⁾
- **středovoltážní** (napětí 120 – 150 kV), slouží k brachyterapii. Těchto se užívá k radioterapii nádorů ležících v hloubce do 5 cm;⁽⁵⁾
- **ortovoltážní** (napětí 160 – 400 kV), používá se v teleterapii a to jak ve statické, tak i v pohybové.⁽⁵⁾ Dále se hloubková terapie používá v paliativní indikaci a v nenádorové radioterapii.⁽¹⁾ Nejčastější ohnisková vzdálenost těchto zdrojů se pohybuje kolem 50 cm.⁽⁵⁾



Obr. 17 Rentgenová terapie ⁽⁵¹⁾

Brachyterapie

Jedná se o metodu lokální radioterapie, kde zdroj záření má těsný kontakt s nádorovým ložiskem. Zdroj záření se vpravuje punkcí či implantací buď do nádorového ložiska (intersticiálně), přikládá se na povrch nádoru (muláž), nebo se intrakavitárně zavádí do tělesných dutin postižených nádorovým onemocněním.⁽¹⁾ Zdroj ionizujícího záření pro brachyterapii je charakterizován druhem záření, energií záření, aktivitou, rozměry a filtrací.⁽¹⁵⁾

Zdroje pro brachyterapii (tab. 8)

Radium ^{226}Ra

Jako zdroj záření se dlouho užívalo radium ^{226}Ra , jehož rozpadovými produkty jsou intenzivní gama zářiče. Výhodou byl dlouhý poločas rozpadu (1620 let), tudíž nebylo nutné zdroj měnit. Radium se nahradilo jinými umělými radioizotopy, jako je ^{137}Cs , ^{192}Ir , protože nevýhodou radia byl při jeho rozpadu vznik radonu (zářič), dále nízká intenzita γ záření, což způsobilo prodloužení expoziční dob.

Zářiče (radiofory) pro brachyterapii jsou uzavřené zapouzdřené radioizotopy, jejichž obaly mají tvar jehel, tub, drátů či válečků. Pouzdra musí být pevná, snadno čistitelná a sterilizovatelná. Dále nesmí podléhat korozi a vlivu tělesných tekutin, musí být prodyšně uzavřena, aby se předešlo úniku radioaktivní látky.

Radiofory musí vyhovovat požadavkům na uzavřený zářič. Uzavřený zářič je radioaktivní zářič, jehož úprava zajišťuje zkouškami ověřenou těsnost a stálost, a vylučuje užití poškozeného radiofora únikem radioaktivních látek.⁽¹⁾

Cesium ^{137}Cs

Cesium nahradilo tradiční radioizotopové zdroje radia, které mají podobnou aktivitu a vyrábějí se ve tvaru jehel a tub.^(1, 15) Poločas rozpadu je 30 let.⁽¹⁵⁾

Iridium ^{192}Ir

Nyní nejužívanější radioizotop v náhradě radia, iridiové zdroje pro manuální afterloading se produkují ve formě drátků ze slitiny 25 % iridia a 75 % platiny a jsou opatřeny pláštěm z čisté platiny (absorbují beta záření).^(1, 15)

^{192}Ir je rovněž dostupné ve formě zrn, zrna která jsou aktivována na vysoké aktivity slouží jako zdroj pro automatický afterloading.⁽¹⁾ Poločas rozpadu je 74,37 dne.⁽¹⁵⁾

radionuklid	T1/2	PV mmPb	Energie záření v MeV
^{226}Ra	1620 let	14	0,19; 2,43 efektivní 0,83
^{60}Co	5,26 let	11	1,17 a 1,33
^{137}Cs	30 let	6	Efektivní 1,25 0,661
^{182}Ta	115 dní	10	0,05 – 1,45
^{198}Au (zrna)	2,7 dní	3,3	0,412 – 1,09
^{192}Ir	74,5 dne	3	0,33 – 0,61 Efektivní 0,38
^{125}I (zrna)	60 dní		0,027 – 0,035
^{90}Sr	28,9 let	0,14	E_{β} 0,54; 2,27
^{32}P	14,3 dne	0,1	E_{β} 1,71

Tab. 8 Charakteristika používaných umělých radionuklidů ⁽¹⁾

Afterloading (obr. 18)

Významné zdokonalení techniky brachyterapie představuje afterloading (angl. afterloading – dodatečné zatížení, zavedení). Technika znamená, že se do cílové oblasti či tělesné dutiny nejprve zavede vodič, který se přesně nastaví. Do této trubičky se pak na stanovenou dobu zavede vlastní vodič.

Manuální afterloading

Záříč je uložen v hadičce a zároveň zajištěn proti vypadnutí a posunutí. Následně se manuálně zavádí do dutého aplikátoru a pozice se fixuje. ⁽¹⁾

Automatický afterloading

Automatický afterloading se skládá ze zásobního kontejneru, který vytváří stínění pro jeden nebo více zdrojů.⁽¹⁵⁾ Zdroj vybraný pro aplikaci je vyndán ze zásobního kontejneru do pracovní polohy v aplikátoru, který se po ukončení expozice automaticky vrací zpět do stíněného boxu.^(1, 15) Pro kontrolu funkčnosti a pozice zářiče před ozáření se do vodiče vsunuje nejprve maketa zářiče, která projde celým vodičem, a poté teprve vyjíždí zářič z kontejneru. Tato metoda výrazně snižuje radiační zátěž pracovníka při provádění brachyterapie a také podstatně zpřesňuje terapeutický efekt. Modelové rozložení dávky je založeno na rozdílném časovém intervalu, po který zdroj záření vyčkává v určité pozici (stepping source). Vzdálenost mezi pozicemi lze nastavit.⁽¹⁾



Obr. 18 Zásobní kontejnery pro afterloading v brachyterapii ^(52, 53)

1.3.3 Nukleární medicína

Nukleární medicína je obor zabývající se diagnostikou a terapií pomocí otevřených radioaktivních zářičů podaných do vnitřního prostředí organismu.⁽⁹⁾ Principem terapeutických metod nukleární medicíny je cílené lokální ozáření patologické tkáně v jejím daném objemu.⁽¹⁰⁾

Zobrazovací metody, které užívá nukleární medicína, se nazývají *scintigrafie* (podle scintilačního detektoru tvořícího základ klasické scintilační kamery) a *gamagrafie* (podle záření gama emitovaného radionuklidu využívanými v diagnostice). Při scintigrafii jsou scintilační kamerou snímány obrazy (mapy) prostorového rozložení aplikovaného radiofarmaka ve vyšetřované anatomické oblasti.⁽¹¹⁾

Metody jsou stanoveny na tzv. *indikátorovém* nebo *stopovacím principu* (angl. *tracer principle*). Jeho podstatou je shodné chemické chování izotopů: radioaktivní izotopy reagují chemicky stejně jako stabilní izotopy téhož prvku. Na rozdíl od izotopů jsou však radionuklidy „viditelné“ prostřednictvím záření. Sloučeniny značené radioaktivními prvky lze proto sledovat a jejich množství měřit detektory záření gama.⁽¹¹⁾

Při radionuklidových vyšetřovacích metodách aplikujeme pacientovi radionuklid vázaný na chemickou látku do vnitřního prostředí organismu, kterému říkáme radiofarmakon.^(11, 18)

Radiofarmaka

Radiofarmakum je léčivý přípravek, který má jeden nebo více radionuklidů včleněných pro lékařské účely. Zvláštností radiofarmak je skutečnost, že množství radionuklidu s vlivem radioaktivní přeměny se exponenciálně s časem snižuje. Důležitou charakteristikou radiofarmak je jejich **poločas přeměny** (doba, za kterou klesne jejich aktivita na polovinu), **druh** a **energie ionizujícího záření**. Energie radiofarmak se uvádí v elektronvoltech (eV). Množství radionuklidu se udává v **becquerelech** (Bq).

Radiofarmakum se skládá ze dvou částí:

- *radionuklidu* – tj. atom, jehož jádro podléhá radioaktivní přeměně. Každý radionuklid je charakteristický třemi čísly, a to protonovým, neutronovým a nukleonovým číslem.⁽⁵⁾
- *neaktivního léčiva* - látky, které odpovídají za chování, respektive rozložení výsledného radiofarmaka v organismu.⁽¹⁰⁾

Chemická skladba radiofarmaka určuje pohyb a funkci různých orgánů v těle. Dále jsou různé druhy radiofarmak, u kterých byla vyvinuta různá afinita k ledvinám, játrům, kostem, myokardu a dalším.

Radionuklid je v těle detekován externím sledováním nebo sledováním jeho radioaktivity v biologických tekutinách či exkretech. Pro zevní detekci je nejvhodnějším radiofarmakem čistý zářič gama, jehož pronikání na povrch organismu umožňuje sledovat průběh radiofarmaka v těle.⁽¹⁸⁾

Výroba radiofarmaka

Základem výroby radiofarmak je příprava radionuklidu, jeho převedení do podoby požadované značené sloučeniny a její úpravy, aby byla vhodná pro přípravu lékové formy. Radionuklidy obsažené v radioaktivních přípravcích se produkují v cyklotronech, jaderných reaktorech nebo se připravují jako tzv. dceřinné radionuklidy z radionuklidových generátorů.

K přípravě radiofarmaka se pro lékařské účely užívají jen umělé radionuklidy. Získávají se různými jadernými reakcemi, kde dojde ke změně stavby výchozího atomového jádra za vzniku jiného jádra, radioaktivního.⁽¹¹⁾

Průběh radiofarmaka

Aplikovaný radiofarmakon vstoupí do organismu a rozděluje se v organismu dle své farmakokinetiky. V jiném případě je radionuklid aplikován injekčně do krevního oběhu a sleduje se dynamika jeho průchodu bez metabolické vazby na určitý orgán

či tkáň. Distribuce radiofarmaka odráží konkrétní patologický či fyziologický stav nebo funkci příslušných orgánů a tkání. Nejjednodušším případem je změření intenzity vycházejícího záření z určitého místa např. pro stanovení akumulace u štítné žlázy.

Pro celkovou diagnostiku potřebujeme změřit celou distribuci radiofarmaka včetně lokálních detailů a anomálií. K tomu slouží metoda zvaná *scintigrafie*. Z hlediska prostorového rozlišení je základním druhem planární scintigrafie, což je obraz projekce distribuce radiofarmaka do dvojrozměrné zobrazované roviny. Tomografická scintigrafie poskytuje zobrazení v trojrozměrném prostorovém rozlišení.⁽¹⁸⁾

Fyzikální a chemické metody hodnocení jakosti radiofarmak

Do hodnocení metod spadají: stanovení aktivity, radionuklidová čistota, radiochemická čistota, biologické metody hodnotící jakosti radiofarmak a sterilitu.

Detekce radiofarmaka

V nukleární medicíně se nejvíce uplatňují scintilační detektory, podstatně méně již ionizační komory, Geiger-Müllerovy (GM) detektory a proporcionální detektory.

GM detektory nebo *proporcionální detektory* pro detekci záření beta i gama jsou součástí přístrojů pro ochrannou dozimetrii. Nevýhodou je nízká citlivost při měření záření gama emitovaného z těla pacienta po podání radiofarmaka nebo ze vzorků tělních tekutin.⁽¹¹⁾

Principem diagnostických metod je detekce ionizujícího záření vznikajícího při radioaktivní přeměně radionuklidů pomocí speciálních detekčních zařízení.

Detekce je charakterizována prostorem, časem, a radioaktivitou zdroje záření. Je založena na fyzikálních či chemických změnách, které toto záření při styku s různými látkami vyvolává. K detekci se používají plynové ionizační detektory (ionizační komory) nebo scintilační detektory (spektrometry).⁽¹⁰⁾

Scintigrafie

Základním popisem scintigrafie je zobrazování funkce.

Scintigrafie zobrazuje funkci:

- lokální nahromadění (akumulace) radiofarmaka závislé na funkčním stavu vyšetřované tkáně;
- anatomické znázornění radiodiagnostickými metodami umožňuje vizuálně hodnotit např. zlomeninu kosti;
- funkční scintigrafie umožní znázornit např. hypoxii.

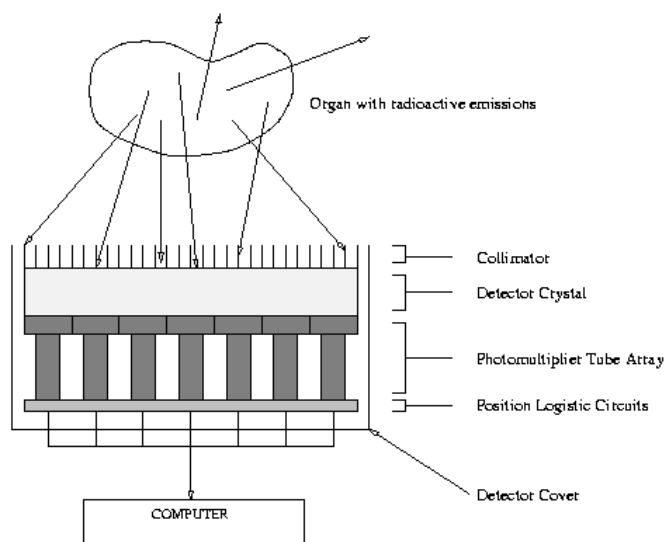
Scintigrafie, oproti ostatním zobrazovacím metodám, umí jediná zobrazit pouze živou tkáň. Tato metoda je založena na známé farmakokinetice radiofarmaka v organismu. Distribuci radiofarmaka znázorní za pomoci scintilační kamery.

Z hlediska časového je základním vyšetřením *statická* scintigrafie, kde jde o vytvoření scintigrafických obrazů vyšetřované oblasti bez ohledu na čas. Pokud sledujeme děj měnící se s časem a zajímá nás jeho dynamika, provádíme *dynamickou scintigrafii*. Dynamická scintigrafie je série několika statických snímků vyšetřované oblasti postupně v různých časech. ⁽¹⁸⁾

Scintilační kamera

Scintilační kamera, také jinak nazývána gamakamerou (obr. 19) je zařízení, které detekuje distribuci fotonů záření gama z celého zorného pole, převádí je na elektronické impulsy a pomocí nich pak na displeji vytváří scintilační obraz distribuce radiofarmaka v tomto zorném poli. ⁽¹⁸⁾

Detektor scintilační kamery se skládá z *scintilačního krystalu* (obdélníkový tvar a tvoří ho jodid sodný), *souboru fotonásobičů* (umístěny nad krystalem, kdy foton záření gama vyvolá v krystalu scintilaci na fotokatody jednotlivých fotonásobičů) a *kolimátoru*.



Obr. 19 Schéma scintilační kamery (gammakamery) ⁽⁵⁴⁾

Planární scintigrafie

V planární scintigrafii je zobrazený objekt (léze) charakterizován velikostí zobrazovaného okrsku tkáně, velikostí a hloubkou uložení léze.

Záření gama vyzařující z objektu přenáší informaci, na jejímž základě je vznik obrazu. Tento proces může být ovlivněn několika faktory. Důsledkem toho je, že kontrast obrazu je vždy menší než kontrast objektu.⁽¹¹⁾

Důležité pojmy pro scintigrafické zobrazení jsou:

- *šum* - v případě planárního obrazu se jedná o statistický šum daný druhou odmocninou z počtu impulzů mimo lézi;
- *signál* – označován, jako veličina užitečná pro složení obrazu;
- *poměr signálu a šumu* – počítá v úvahu i se statistickou chybou a je spolu s kontrastem uvažován při hodnocení kvality obrazu.⁽¹¹⁾

Tomografová scintigrafie

Tomografie je znázornění řezů. Cílem tomografie je zobrazit rovinný řez, ve kterém lze hodnotit prostorové vztahy zobrazených struktur bez projekčního zkreslení. Tomografické znázornění se v nukleární medicíně značí jako emisní tomografie.

V emisní tomografii se užívají dvě emisní výpočetní tomografie:⁽¹¹⁾

- jednofotonová emisní počítačová tomografie (SPECT);
- pozitronová emisní tomografie (PET).

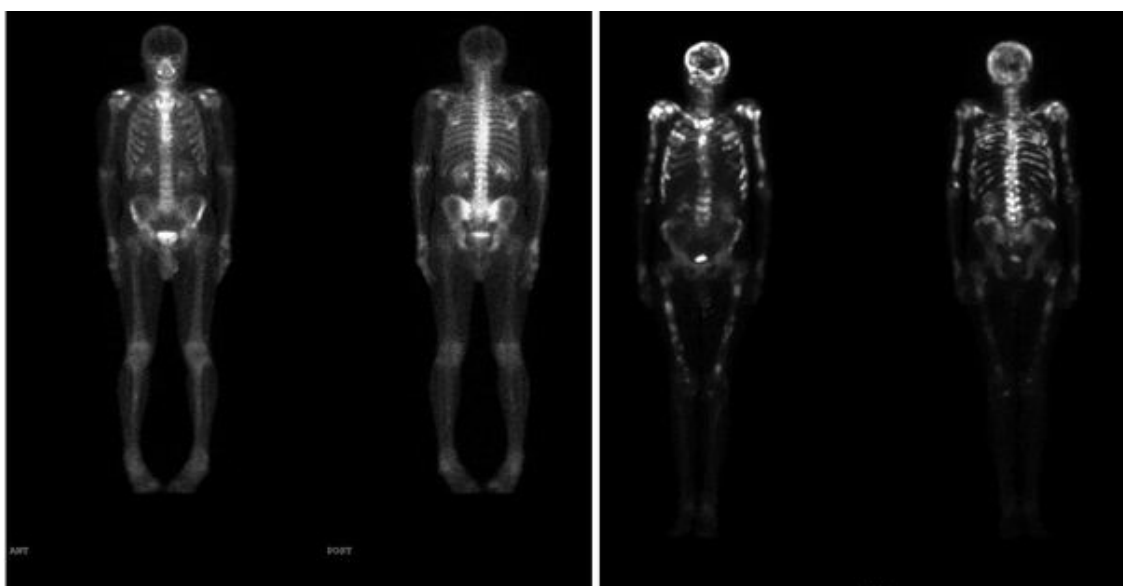
Obě metody se od sebe rozlišují používanými radionuklidy, přístrojovým vybavením, zpracováním výsledků a klinickými aplikacemi.

Jednofotonová emisní výpočetní tomografie (SPECT – single emission computed tomography)

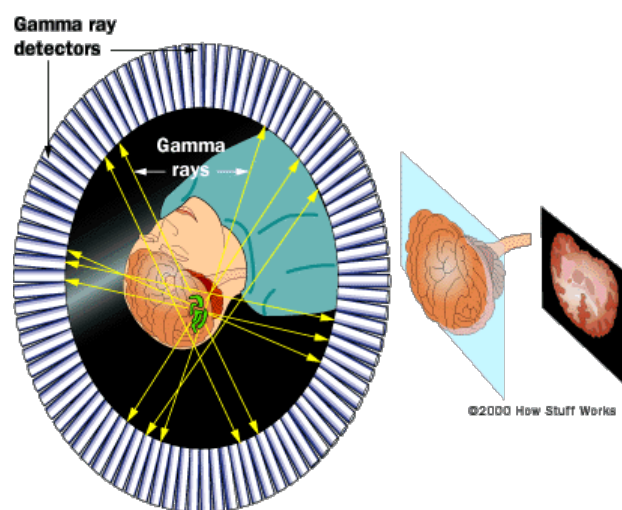
SPECT (obr. 20) je běžnou variantou planární scintigrafie. U *SPECTU* jsou nejčastěji používané tzv. rotační scintilační kamery s detekčními hlavami, které během vyšetření rotují kolem dlouhé osy pacientova těla z různého úhlu. Prostorové rozlišení má 5 - 20 mm a vyšetření trvá několik minut.⁽¹¹⁾

Pozitronová emisní tomografie (PET- pozitron emission tomography)

PET (obr. 21) je metoda pro zobrazování funkčních dějů s vysokým diagnostickým potenciálem. Nejčastěji užívá multidetektorové systémy seřazené do jednoho či více prstenců.⁽¹¹⁾



Obr. 20 Vyšetření za pomoci SPECT ⁽⁵⁵⁾



Obr. 21 Schéma principu pozitronové emisní tomografie (PET) ⁽⁵⁶⁾

Hybridní systémy

Termín *hybridní systémy* je v dnešní době užíván pro kombinované přístroje *SPECT/CT* a *PET/CT*, které nám dávají možnost anatomického a funkčního zobrazení. U těchto přístrojů odpadá složitá geometrická úprava obrazů. ⁽¹¹⁾

1.4 Jaderná energetika

1.4.1 Jaderné reaktory

Za počátek éry jaderné energetiky se považuje rok 1954. V tomto roce byly v Sovětském svazu v Obninsku u Moskvy spuštěny první průmyslové jaderné elektrárny na světě.⁽¹⁷⁾ První československá jaderná elektrárna A-1 v Jaslovských Bohunicích, zprovozněna v roce 1972 a odstavená po havárii roku 1978, představovala prototyp reaktoru s přírodním uranem, moderovaným těžkou vodou a chlazeným kyslíčkem uhličitým.⁽⁷⁾

Při výrobě energie jaderným reaktorem (obr. 22) se uvolňují radionuklidy, štěpením v palivu se vytvářejí **štěpné produkty**, aktivací neutronů vznikají **aktivační produkty** v palivu samém, v krytí paliva, v konstrukčním materiálu i v chladiči primárního okruhu.⁽⁷⁾ V obou našich jaderných elektrárnách (Temelín i Dukovany obr. 23) je instalován tlakovodní reaktor (VVER).⁽¹⁷⁾

Do chladiči primárního okruhu se dostávají radionuklidy různými cestami - aktivací paliva, difusí štěpných produktů netěsnostmi v palivu a korozi konstrukčního materiálu a pokrytí článků. Všechny reaktory mají systémy pro záchyt radionuklidů v plynné nebo kapalné formě. Obsah radionuklidů v primárním okruhu se souvisle či nesouvisle měří a je jedním z ukazatelů vystaveným kontrole. Složení radionuklidů v primárním okruhu vypovídá zejména o možných netěsnostech paliva, netěsnosti jsou signalizovány převážně radioizotopy jódu. Radionuklidy v primárním okruhu jsou zdrojem externího a potenciálně i vnitřního ozáření pracovníků a prostřednictvím výpustí jsou zdrojem ozáření obyvatelstva.⁽⁷⁾

Obsah radionuklidů - štěpných produktů v reaktoru je označován jako **inventář reaktoru**, ten je závislý na typu reaktoru, typu paliva a jeho stupni vyhoření. Inventář kteréhokoliv ze štěpných produktů lze pro daný typ paliva a reaktoru spočítat pro jakýkoliv čas, po němž reaktor pracuje (stupeň vyhoření paliva). Ve vyhořelém palivu, chlazeném nejdříve v bazénu vyhořelého paliva, se pak stávají dominantní dlouhodobé radionuklidy. K celkovému inventáři aktivity radionuklidů vedou i aktivační produkty, jejichž aktivita i složení závisí na složení konstrukčního materiálu a chladičím média v primárním okruhu. Inventář štěpných produktů je samozřejmě vyšší než

inventář aktivačních produktů, ovšem s přihlédnutím k původu vzniku aktivačních produktů tyto produkty v kapalných i vzdušných výpustech obvykle převažují. Do aerosolových výpustí se dostávají v důsledku netěsností a následných odpadů z primárního okruhu nebo při mechanických údržbářských a opravářských pracích.

Obecně jsou do ovzduší vypouštěny štěpné produkty ve formě vzácných plynů (izotopy kryptonu a xenonu), dále některé aktivační produkty ve formě vzácných plynů (uhlík ^{14}C , dusík ^{16}N , síra ^{35}S , argon ^{41}Ar , selen ^{75}Se aj.), tritium, dioizotopy jódu v plynných formách a ve formě aerosolu, v aerosolových formách štěpné a aktivační produkty a ve velmi malých aktivitách (relativně k ostatním aerosolovým výpustem) i transurany. Při běžném dělení vypouštěných radionuklidů na aktivační a štěpné je třeba vzít v potaz i takové radionuklidy, které jsou produktem obou procesů.

Do hydrosféry je vypouštěno zejména tritium, dále pak aktivační a případně i štěpné produkty.⁽⁷⁾

Radionuklidy vypouštěné do ovzduší

Mezi **radionuklidy vypouštěné do ovzduší** patří především **radioaktivní vzácné plyny** vzniklé štěpením. Většina radionuklidů xenonu a kryptonu má krátký poločas přeměny (sekundy až minuty) a stačí se rozpadnout dříve, než mohou proniknout z paliva ven. Část radioaktivních vzácných plynů se difusí vpraví mezi palivo a jeho pokrytí, kde tvoří tlak. Pokud se v palivu objeví netěsnost, vzácné plyny se dostávají do chladiwa primárního okruhu. Uvolňování plynů z primárního okruhu u tlakovodních reaktorů (PWR – *Pressurized water reactor*) probíhá souvisle, kvůli kontrole chemického složení a čištění vody. Tyto plynné výpusti jsou pak vedeny přes filtry a zpořďovací linky, takže aktivity výpustí ve ventilačním komíně se značně sníží o aktivitu krátkodobých radionuklidů. U reaktorů BWR (varný reaktor – *boiling water reactor*) jsou tyto procesy jiné, u starších typů reaktorů jsou výpusti vzácných plynů vyšší.

Významnou část plynných výpustí u některých typů jaderných elektráren tvoří **argon ^{41}Ar** , který vzniká reakcí (neutronového a gama záření) na stabilním ^{40}Ar , který je obsažen normálně ve vzduchu. Do primárního okruhu se dostane jako nečistota dusíku, užívaného pro tlakování vody. Reakcí (neutronu a protonu) vzniká

dusík ^{16}N (poločas přeměny 7 sekund), který je významný z hlediska externího ozáření pracovníků přímo v jaderné elektrárně.⁽⁷⁾

Tritium (^3H) se vytváří ternárním štěpením jaderného paliva a neutronovou aktivací boru v primárním okruhu, v některých typech jaderných elektráren také aktivací lithia. U reaktorů HWR (reaktory používající jako moderátory i chladiva těžkou vodu) vzniká tritium aktivací deuteria a výpusti tritia do životního prostředí jsou, na rozdíl od ostatních typů reaktorů, vážným problémem.

Radioizotop uhlíku ^{14}C vzniká u lehkovodných i těžkovodných reaktorů reakcí (neutronového a alfa záření) na jádrech kyslíku ^{17}O přítomného v oxidech v palivu a na jádrech kyslíku ^{17}O přítomného v moderátoru. Dále se vytváří reakcí (neutronu a protonu) na jádrech dusíku ^{14}N , která jsou obsažena v palivu jako nečistota a nachází se také v primárním okruhu. Dalším zdrojem je ternární štěpení.

Radioizotopy jódu vznikají v procesu štěpení.

Z hlediska ochrany před zářením jsou významné:

- ^{129}I , ($T_{1/2} = 1,6 \cdot 10^7$ let);
- ^{131}I , ($T_{1/2} = 8,4$ dne);
- ^{132}I , ($T_{1/2} = 2,3$ hodiny);
- ^{133}I , ($T_{1/2} = 21$ hodin);
- ^{134}I , ($T_{1/2} = 53$ minut);
- ^{135}I , ($T_{1/2} = 6,6$ hodiny).

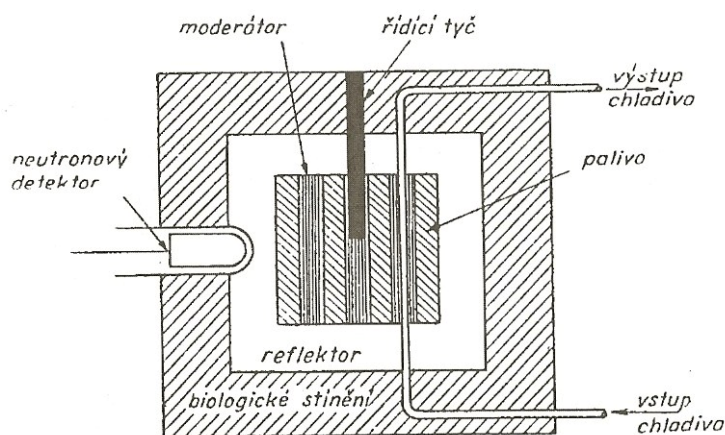
Tyto izotopy se ve výpustích nacházejí v plynných formách (elementární jód, organický jód) a ve formě aerosolu. Kromě jódu ^{129}I mají všechny radioizotopy relativně krátké poločasy přeměny, jejich aktivita ve výpustích je závislá na počtu netěsností v palivových člancích a na rychlosti úniku chladiva z primárního okruhu a jsou proto významné z hlediska ozáření personálu jaderné elektrárny. Pro ozáření obyvatelstva v okolí je významný zejména jód ^{131}I , protože při případném úniku se může proniknout do potravinového řetězce. Jód ^{129}I je vypouštěn ve velmi malých množstvích a přispívá do tzv. globální kolektivní dávky.

Ve formě aerosolů se vyskytují radionuklidy, které se vytvořily přímo jako produkt štěpení, nebo rozpadem vzácných plynů vzniklých štěpením. Další radionuklidy vznikají aktivací materiálů přítomných v primárním okruhu buď jako příměs nebo uvolněním koroze konstrukčních materiálů. Aerosoly se vytváří při únicích netěsnosti

primárního okruhu nebo při údržbě a opravách aktivovaných částí primárního okruhu. Vzduch, odváděný ventilačními systémy z prostor, kde se radioaktivní aerosoly vytvoří, je kontinuálně čištěn mocnými filtračními systémy, v nichž je velká část aerosolů, zejména o větších rozměrech zachycena. Výpusti aerosolů jsou obecně velmi nízké a radionuklidové složení je unikátní pro každou elektrárnu.

V jaderných elektrárnách typu VVER se vyskytuje obvykle následující spektrum radionuklidů:

- ^{51}Cr , ^{54}Mn , ^{59}Fe , ^{57}Co , ^{58}Co , ^{60}Co , ^{65}Zn , ^{76}As , ^{89}Sr , ^{90}Sr , ^{95}Zr , ^{95}Nb , ^{103}Ru , ^{106}Ru , $^{110\text{m}}\text{Ag}$, ^{124}Sb , ^{125}Sb , ^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{140}Ba , ^{140}La , ^{141}Ce , ^{144}Ce , ^{181}Hf , ^{182}Ta . (7)



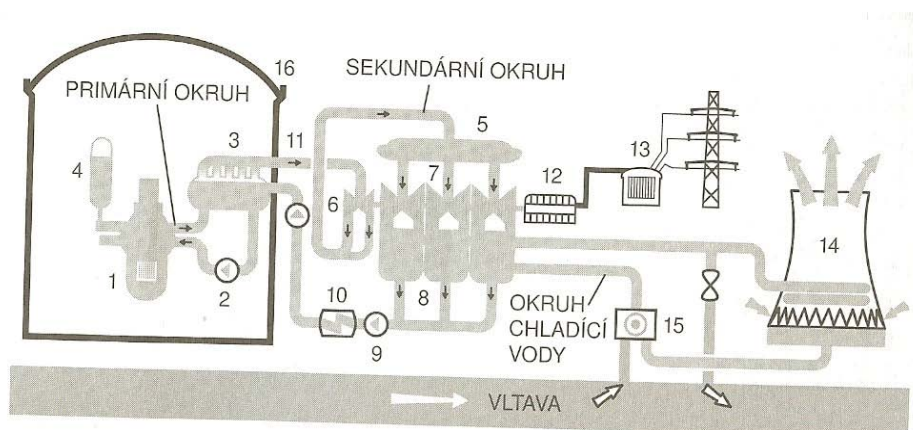
Obr. 22 Schéma jaderného reaktoru (17)

Hlavní části jaderného reaktoru jsou: (obr. 24)

- palivový článek;
- moderátor; (17)
- chladiva; (13)
- systém řízení reaktoru
- reflektor
- stínění reaktoru; (17)
- reprodukční zóna; (17)
- reaktorová nádoba; (17)
- systém výměny paliva; (17)
- ochranná obálka. (17)



Obr. 23 Temelín ⁽⁵⁷⁾



Obr. 24 Schéma jaderné elektrárny Temelín ⁽¹³⁾

1. reaktor (VVER) aktivní zóna, celkem 92t UO₂ s obohaceným uranem (max.5 %),
2. hlavní cirkulační čerpadlo, 3. parogenerátor, 4. kompenzátor objemu, 5. separátor,
6. vysokotlaká část turbíny, 7. nízkotlaká část turbíny, 8. kondenzátor, 9. čerpadlo kondenzátoru,
10. regenerace, 11. napájecí čerpadlo, 12. elektrický generátor, 13. transformátor, 14. chladicí věž, 15. čerpací stanice, 16. ochranná obálka. ⁽¹³⁾

Jaderný odpad

Ve všech odvětvích, kde se pracuje s radioaktivními látkami, vzniká radioaktivní odpad. Radioaktivní odpad (obr. 25) je nejvíce radioaktivní ve vyhořelém palivu jaderných reaktorů. Radioaktivní odpady, které nevznikají v jaderné energetice, se nazývají institucionální. V ČR je kolem 700 různých původců institucionálního radioaktivního odpadu.

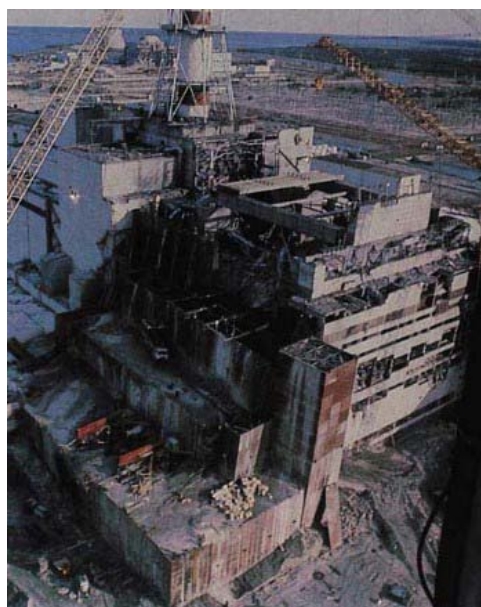
Dle aktivity a z toho vyplývající míry ohrožení okolí se radioaktivní odpad dělí na nízkoaktivní, středně aktivní a vysoce aktivní.⁽²³⁾



Obr. 25 Vyhořelá paliva z JE ve speciálních kontejnerech ⁽⁵⁸⁾

1.4.2 Černobyl a radionuklidy z Černobylu

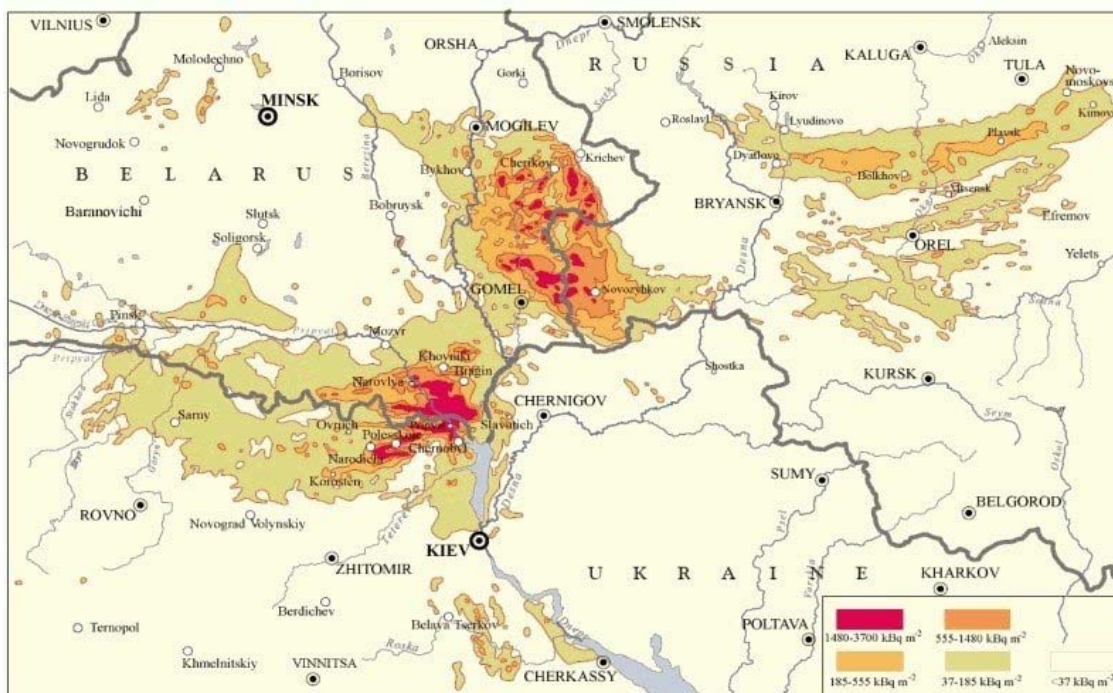
Exploze, která roztrhla nádobu černobylského reaktoru (obr. 26), a následný požár, který započal 26. dubna 1986 a trval 10 dnů, měly za následek bezprecedentní únik radioaktivních materiálů do životního prostředí. IAEA (International Atomic Energy Agency) popisovala tuto událost jako „největší jadernou katastrofu v lidské historii“.⁽²⁴⁾



Obr. 26 Černobyl ⁽⁵⁹⁾

Oblak z hořícího reaktoru se rozplynul nad celou částí Evropy v četném množství radioaktivních materiálů, především radionuklidů jódu a cesia. K největším koncentracím došlo v rozsáhlých oblastech Sovětského svazu kolem elektrárny, kde nyní leží Bělorusko, Ruská federace a Ukrajina (obr. 27).

Asi pět miliónů lidí žije v oblastech Běloruska, Ruska a Ukrajiny, které jsou kontaminovány radionuklidy po černobylské havárii (více než $37 \text{ kBq m}^{-2} \text{ }^{137}\text{Cs}$). Z nich asi 400 000 lidí žilo ve více kontaminovaných oblastech – klasifikovaných sovětskými úřady jako oblasti se zpřísněnou kontrolou (více než $555 \text{ kBq m}^{-2} \text{ }^{137}\text{Cs}$). Z tohoto počtu obyvatel bylo na jaře a v létě roku 1986 evakuováno 116 000 lidí z oblasti kolem černobylské jaderné elektrárny (značené jako „uzavřené pásmo“) do nekontaminovaných oblastí.⁽²⁴⁾



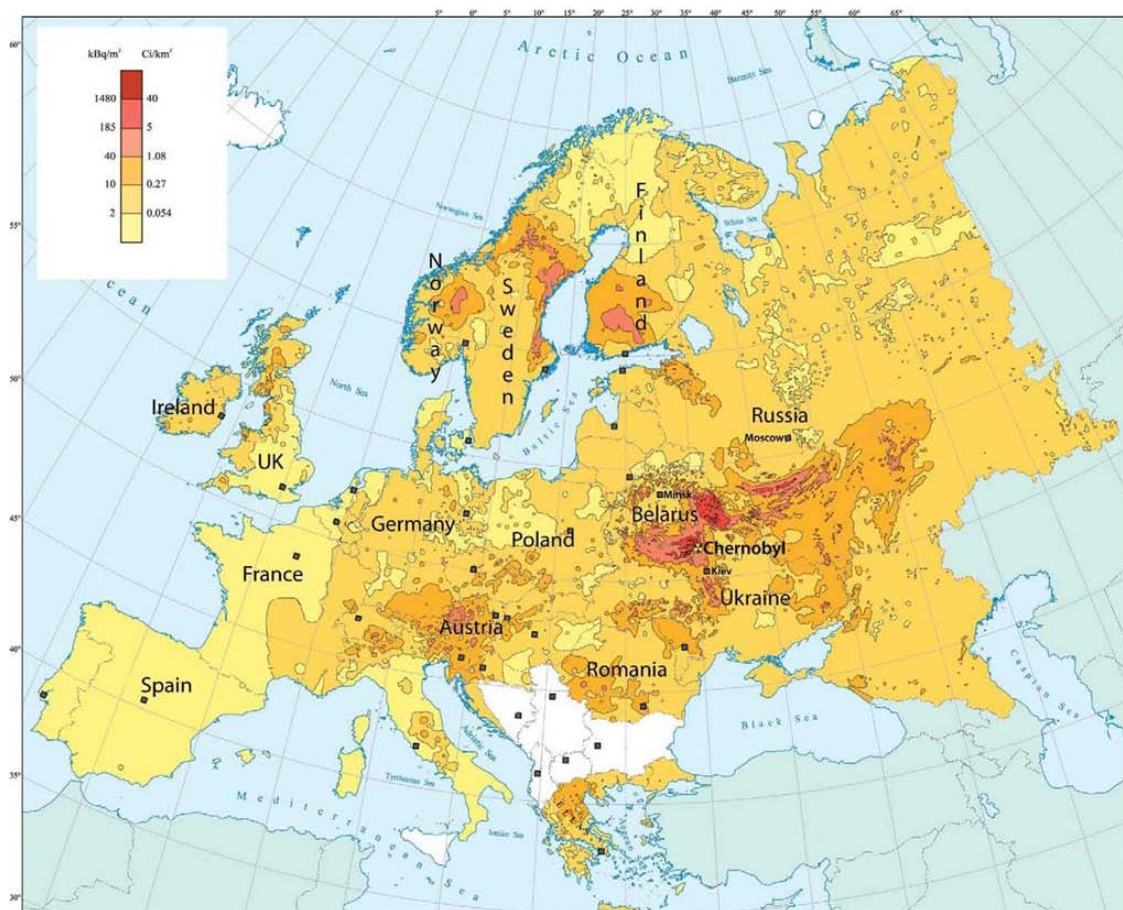
Obr. 27 Schématické znázornění rozsahu radioaktivního cesia (^{137}Cs) kolem JE Černobyl ⁽⁶⁰⁾

Únik a usazování radioaktivního materiálu

Úniky z černobylské havárie obsahovaly radioaktivní plyny, kondenzované aerosoly a velké množství částic paliva. Celkový únik radioaktivních látek byl kolem 14 EBq^4 včetně $1,8 \text{ EBq } ^{131}\text{I}$, $0,085 \text{ EBq } ^{137}\text{Cs}$, $0,01 \text{ EBq } ^{90}\text{Sr}$ a $0,003 \text{ EBq}$ radioizotopů plutonia. Vzácné plyny činily asi 50 % celkových úniků.

Řada z nejvýznamnějších radionuklidů má krátký poločas rozpadu. Z toho vyplývá, že se již rozpadla většina radionuklidů, které unikly při havárii. Bezprostředně po havárii způsobily velkou obavu úniky radioaktivního jódu. Radioaktivní jód (^{131}I), který nejvíce zasahuje štítnou žlázu, má krátký poločas rozpadu (8 dnů) a z větší části se rozpadl během několika týdnů po havárii. V následujících desetiletí bude mít prvořadou důležitost kontaminace ^{137}Cs (obr. 28). Radioaktivní cesium (^{137}Cs), které vede jak k vnějším tak vnitřním dávkám, má mnohem delší poločas rozpadu (30 let) a v mnoha

částech Evropy je stále měřitelné v půdě a některých potravinách. Druhotně se bude sledovat stroncium ^{90}Sr . Z dlouhodobého hlediska (stovky až tisíce let) se očekává, že největší význam bude mít kontaminace radionuklidy obsahující izotopy plutonia a americia ^{241}Am .⁽²⁴⁾



Obr. 28 Kontaminace Evropy radionuklidem ^{137}Cs po havárii v Černobylu⁽⁶¹⁾

1.4.3 Situace po černobylské havárii v České republice

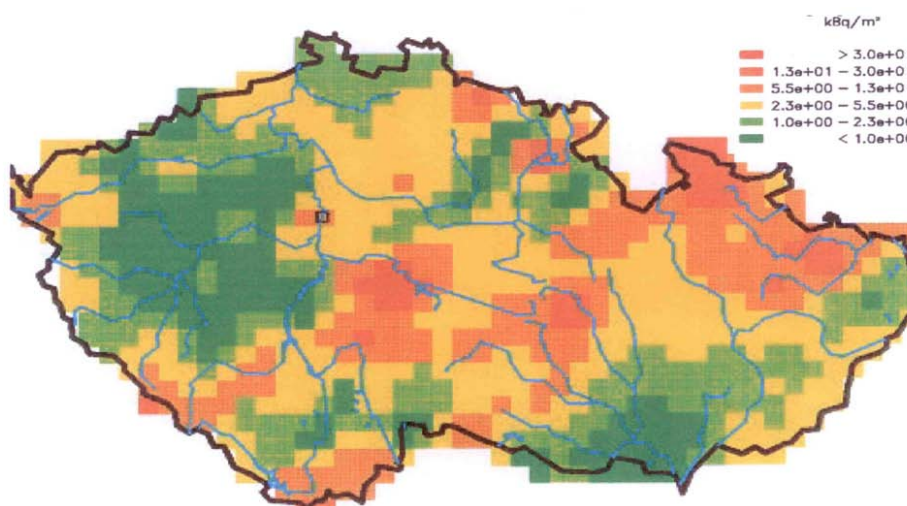
První signál o průchodu vzdušných kontaminovaných mas na našem území (Československa) zachytily v průběhu noci z 29. na 30. dubna 1986, stejně jako v jiných zemích, jaderné elektrárny v rámci prováděných kontrolních měření. V ranních hodinách začalo měření i na některých odborech hygieny se sběrem a vyhodnocováním dat o radiační situaci.⁽²⁵⁾

Na základě měření aktivity radionuklidů v ovzduší a ve spadu a měření dálkových příkonů byly nejdříve provedeny odhady dávek obyvatelstvu. V ovzduší bylo identifikováno až 20 různých radionuklidů, přitom typické hodnoty z hlediska expozice významných radionuklidů (jod ^{131}I , tellur ^{132}Te , izotopy cesia ^{137}Cs , ^{134}Cs , ruthenium ^{103}Ru) se pohybovaly v řádu jednotek až desítek Bq/m^3 . Dávky se pohybovaly hluboko pod hodnotami, pro něž byla v citovaných mezinárodních i československých dokumentech doporučována protiopatření.

Stále větší pozornost byla věnována omezením průniku radioaktivních látek do potravin. Nejvýznamnějším zdrojem příjmu byly jod ^{131}I , izotopy cesia ^{137}Cs a ^{134}Cs pro potravinový řetězec. Tato expoziční cesta se považovala za významnější než inhalační příjem. Proto bylo navrženo několik preventivních opatření, např. dle WHO se mělo vyřadit mléko s objemovou aktivitou nad 2 000 Bq/l .⁽²⁵⁾

Nahromadění obsahu radiocesia v potravinách se očekávalo později a podle předpokladů se mělo projevit kromě mléka především v mase. Výsledky měření předpoklady plně potvrdily, proto byla provedena regulace spotřeby zvěřiny. Další vývoj radiační situace bylo možno sledovat na průzkumu kontaminace půd, provedeném v polovině června roku 1986. Na území dnešní České republiky bylo odebráno celkem 800 vzorků a na základě stanovení plošné aktivity radionuklidů v nich byly odhadnuty prostorové distribuce a celkové aktivity radionuklidů, které se z černobylského havarovaného reaktoru prostřednictvím vzdušných kontaminovaných mas dostaly na naše území. (obr. 29)

Obecně lze přijatá opatření hodnotit jako přiměřená, protože při nízké úrovni ozáření obyvatelstva u nás nebylo třeba přijímat opatření, která by zasahovala do běžného způsobu života lidí. Z hlediska vlastní ochrany zdraví byla u nás podniknuta včas nejspíše všechna rozumná opatření. Toto hodnocení bylo schváleno i v mezinárodních odborných kruzích. Nepochybně však nebyla u nás podniknuta odborníky doporučená dostatečná opatření k omezení vzniku obav obyvatelstva, zejména opatření k jeho včasnému, dostatečnému a srozumitelnému informování.⁽²⁵⁾



Obr. 29 Distribuce ^{137}Cs v České republice ⁽⁶²⁾

1.5 Zkoušky jaderných zbraní v atmosféře

1.5.1 Jaderné zbraně

Pod pojmem jaderné zbraně rozumíme různé typy a druhy jaderné munice a jaderné nálože, a také její dopravy na cíl.⁽¹²⁾

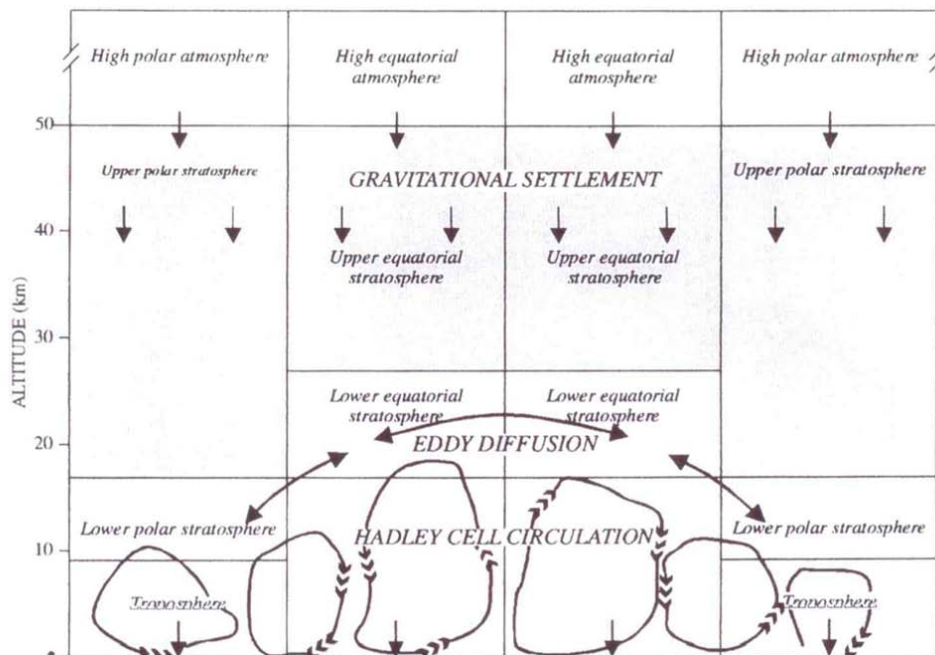
Jednotlivé účinky jaderného výbuchu se liší dle jejich místa ve vztahu k zemskému povrchu na:

- vysoký výbuch;
- nízký vzdušný;
- pozemní;
- hladinový;
- podzemní;
- podhladinový.

testu, jeho jméno nebo název, umístění, typ, účel a celkový výbušný výnos. Největší test (50 Mt – megatuna; výnos), vedený bývalým Sovětským svazem v roce 1961, byl ohlášen štěpeným výnosem ve výši 3 % a fúzní výnos činil 97 %.⁽³¹⁾

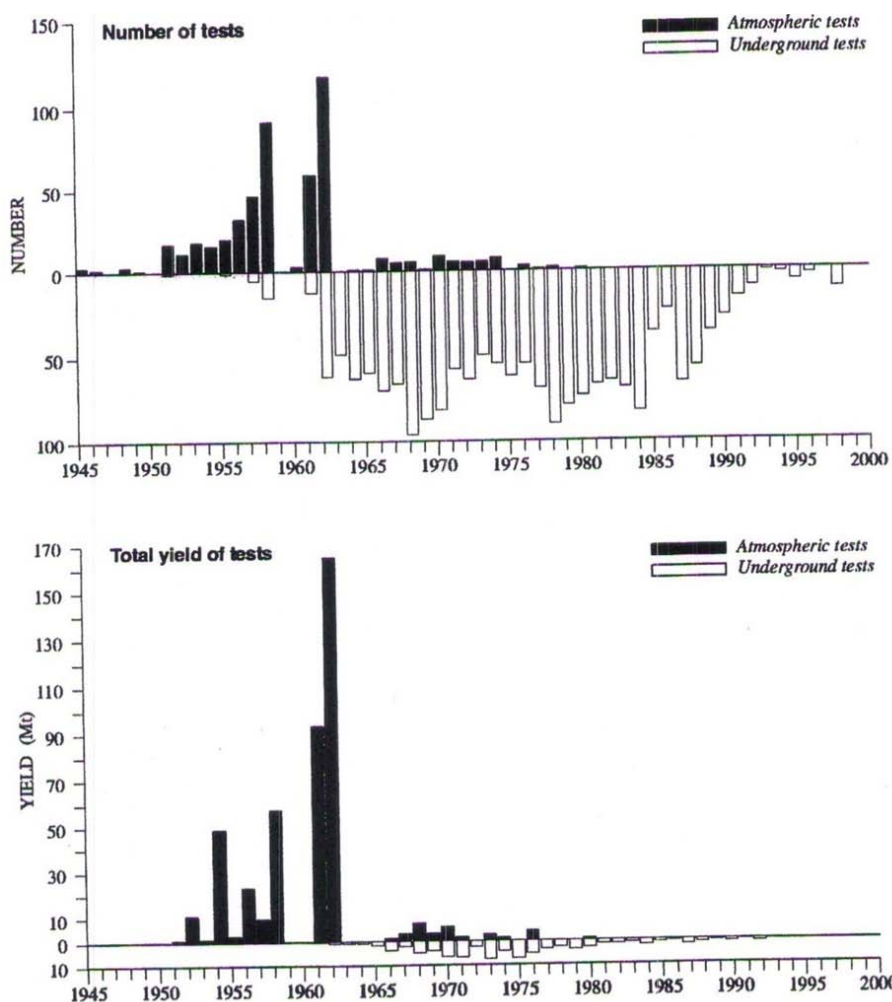
Zkoušky jaderných zbraní byly prováděny na různých místech, a to nad zemským povrchem, včetně uchycení na věžích, umístění na člunu, na povrchu oceánu, suspenzi z balónů aj. V závislosti na umístění exploze (nadmořská výška a šířka) radioaktivního materiálu vstoupila radiace na místní, regionální nebo globální životní prostředí. Pro zkoušky prováděné na zemském povrchu, část radioaktivního materiálu je uložena v místě zkoušky (místní radioaktivní spad) a regionálně se radioaktivní spad rozšíří až několik tisíc km pomocí větru (středně radioaktivní spad). Tato frakce se liší od zkoušky ke zkoušce v závislosti na meteorologických podmínkách, výšce testu, typu povrchu a okolního materiálu (voda, půda, věž, balón, atd.). U odolných radionuklidů, jako je zirkonium ^{95}Zr a cer ^{144}Ce se předpokládá, že 50 % z trosk bude uloženo lokálně v bezprostřední blízkosti zkušebního místa a dalších 25 % je uloženo regionálně. Pro těkavé radionuklidy, jako jsou stroncium ^{90}Sr , cesium ^{137}Cs a jod ^{131}I , se předpokládá místní a regionální uložení z štěpného výnosu. Zbytek trosk a všechny nečistoty ze vzdušných výbuchů jsou široce rozptýleny v atmosféře. Vzdušné výbuchy jsou definovány jako testy vyskytující se nad výškou v metrech od 55 Y (yard) do 0,4 Y, kde Y je celkový výnos v kt (kilotuna).⁽³¹⁾

Rozprostření trosk v atmosféře závisí na stabilizaci výšky a formulaci mraků po výbuchu. V závislosti na podmínkách zkoušky, mohou být radioaktivní trosky zpočátku rozděleny do různých oblastí atmosféry. Základní schéma prostoru představuje atmosférické regiony a převládající atmosférické transportní procesy, které jsou znázorněny na obrázku 30.⁽³¹⁾



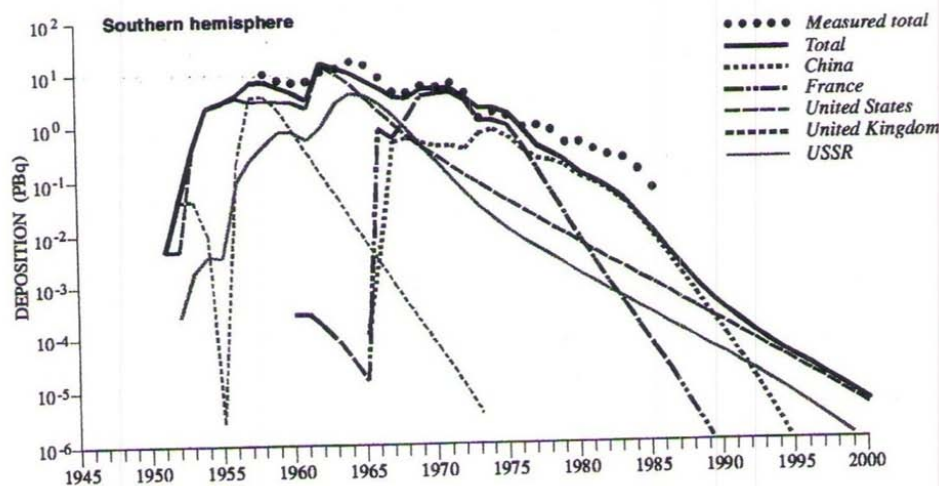
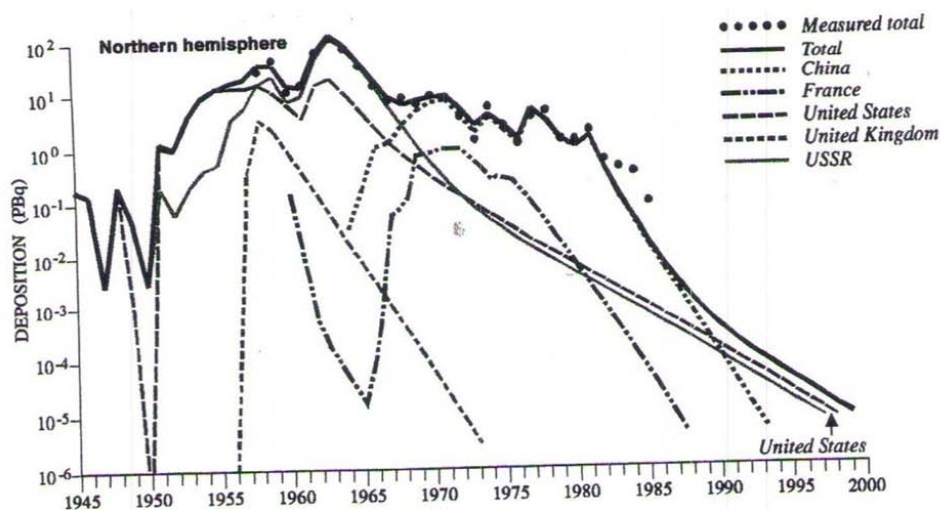
Obr. 30 Atmosférické regiony a převládající atmosférické přepravní procesy ⁽³¹⁾

Nejvíce testů proběhlo (obr. 31) z hlediska celkového výbušného výnosu v letech 1961, 1962, 1954 a 1958. Celkový počet jaderných testů ve všech zemích od roku 1945 do roku 1980 činí 543 a celkový štěpný výnos byl 440 Mt. V současné době se atmosférické testy odhadují na štěpný výnos 189 Mt. ⁽³¹⁾



Obr. 31 Znárodnění počtu jaderných testů v časovém období ⁽³¹⁾

Pomocí atmosférického modelu a s odhadem štěpného výnosu z jednotlivých testů, nám umožňuje rozlišit příspěvky testovacích programů jednotlivých zemí na roční depozice stroncia (⁹⁰Sr), což je znázorněno na obrázku číslo 32. ⁽³¹⁾



Obr. 32 Depozice prvku stroncia (^{90}Sr) v zemích s testovacím programem jaderných zbraní ⁽³¹⁾

Na severní polokouli před rokem 1958 dominují s testovacím programem Spojené státy americké. Od roku 1959 do roku 1967 nejvíce přispěl Sovětský svaz s počtem jaderných testů a v dalším období od roku 1968 až do let 1988 byla s vysokou depozicí stroncia (^{90}Sr) Čína. ⁽³¹⁾

Na jižní polokouli se nejvíce podílela Organizace spojených národů na roční depozici stroncia s výjimkou období 1957 – 1958, kdy jaderné testy provádělo Spojené království. Následnou zemí, která nejvíce přispěla k depozici byl Sovětský svaz v letech

1965 – 1967. Další zemí byla Francie, a to v období 1968 až 1976. V letech 1977 až 1988 byla největším přispěvatelem depozice stroncia Čína.⁽³¹⁾

1.6 Průmyslové zdroje ionizujícího záření

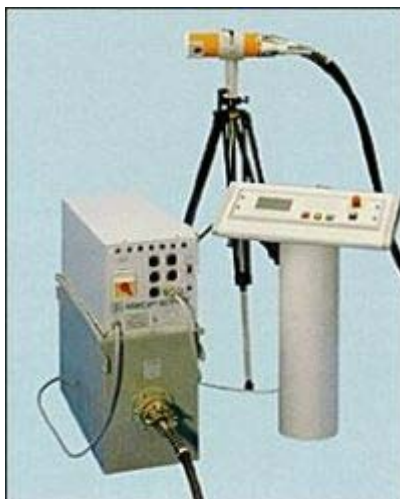
Průmyslové aplikace zdrojů ionizujícího záření jsou velmi rozšířené. Používají se jak generátory záření vyzařující rentgenové záření, elektronové a neutronové svazky, tak záření gama, beta, alfa a jím produkované neutrony vytvářející se při rozpadech radionuklidů.⁽⁷⁾

Mezi nejdůležitější průmyslové aplikace patří:⁽⁷⁾

- *defektoskopie* – nedestruktivní testování materiálu používající převážně rentgenové a gama záření;
- měřidla a indikátory (gauging devices) – jako jsou *hustoměry, tloušťkoměry, vlhkoměry, hladinoměry* či jiné analyzátoary, používající hlavně záření gama, beta a neutronů;
- karotážní práce ve vrtech pro geologické účely, používající záření gama, alfa a neutronové záření;
- analyzátoary pro zkoumání složení materiálu, jeho krystalické struktury, pomocí rentgenového nebo gama záření;
- rentgenové fluorescence a její spektrální analýza a metody aktivační, užívá se rentgenové záření, gama a neutrony;
- průmyslové ozařovače používající nejčastěji gama záření respektive elektronové svazky;
- iontové generátory, mezi které patří ionizační hlásiče požáru, eliminátory statické elektřiny, chromatografy používající hlavně alfa záření, méně často i záření beta a rentgenové.

1.6.1 Defektoskopie

Defektoskopie (obr. 33) je nedestruktivní zkušební metoda, pomocí které se kontrolují různé vlastnosti materiálů či výrobků. Používá se vlastností záření gama, rentgenového nebo brzdného, které snadno prostupuje různými materiály, aniž by je poškodilo a při průchodu je zeslabeno a rozptýlováno v závislosti na absorpčních koeficientech a struktuře materiálu. Výsledný obraz se zobrazí na radiologickém filmu či obrazovce. Jako zdroj záření se nejvíce využívá **iridium** ^{192}Ir , **kobalt** ^{60}Co aj.⁽⁷⁾



Obr. 33 Přenosná defektoskopická souprava ⁽⁶³⁾

1.6.2 Ionizační hlásič kouře (obr. 34)

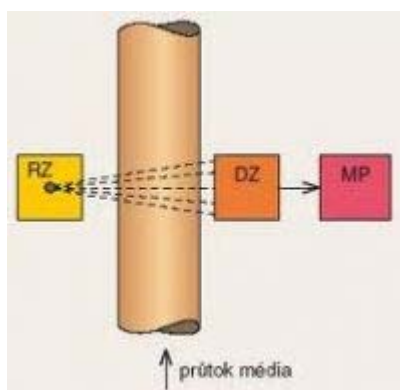
Ionizační hlásiče požáru používají ionizaci vzduchu radioaktivním zdrojem, lokalizovaný mezi dvěma elektrodami o stálém konstantním potenciálu. Ionizace vzduchu je vyvolána alfa částicemi produkovanými většinou americiem ^{241}Am o aktivitě 37 kBq. Pokud se do prostoru mezi oběma elektrodami dostanou částice kouře, dojde k poklesu proudu a tento stav je signalizován.⁽⁷⁾



Obr. 34 Bezdrátový ionizační hlásič kouře ⁽⁶⁴⁾

1.6.3 Měřidla a indikátory

Jde o kontrolní a měřicí přístroje používající ionizující záření, emitované z jednoho nebo více uzavřených radionuklidových zářičů. Měřidla provádějí nedestruktivní ověřování některých vlastností materiálu. Obecně se užívají pro stanovení a kontrolu tloušťek materiálu, jeho hustoty, úrovně hladiny, pro kontrolu dvou vrstev, unikání látek aj. Využívají se zdroje záření beta, gama, neutrony a rentgenové záření a běžnými radionuklidy jsou americium ^{241}Am , cesium ^{137}Cs , krypton ^{85}Kr a kobalt ^{60}Co . Dle druhu aplikace se přístroje dělí na hladinoměry, vlhkoměry, hustoměry (obr. 35) aj.⁽⁷⁾



Obr. 35 Schéma hustoměru s radioaktivním zářičem. ⁽⁶⁵⁾

RZ - radioaktivní zářič, DZ - detektor záření, MP - měřicí převodník.

1.6.4 Ozařovače

Radiační ozařovače nacházejí široké uplatnění pro potřebu zdravotnictví, průmyslu a výzkumu. Jako zdroje záření se pro tyto účely nejčastěji užívají zdroje

záření gama nebo urychlovače elektronů. Obvyklými aplikacemi jsou sterilizace zdravotnických výrobků a léčiv, ošetřování potravinářských produktů, polymerace a modifikace plastů a hubení škodlivého hmyzu.

Radionuklidové ozařovače kategorie I a III

Tyto ozařovače se užívají zejména pro vědecké a výzkumné účely. Typickými aplikacemi (tab. 9) kromě výzkumu jsou sterilizace potravin, sterilizace zdravotních výrobků a léčiv, polymerace a síťování plastů, sterilizace hmyzu a krve určené pro transfuzi nebo k výrobě krevních derivátů. Používají se pro kalibraci dozimetrů pro panoramatické ozařovače.

Užívají se zdroje záření o vysokých dávkových příkonech, především radionuklidy ^{60}Co o aktivitách 50 TBq (terabecquerel) a ^{137}Cs až 750 TBq.⁽⁷⁾

Radionuklidové ozařovače kategorie II a IV

Ozařovače těchto kategorií se využívají k ozáření rozměrných předmětů, rozsáhlého objemu produkce. Podle způsobu ozáření se jmenují *paranormatické ozařovače*. Ozařováním se prodlužuje trvanlivost potravin, provádí se sterilizace zdravotnického materiálu v průmyslovém měřítku, hubení škodlivého hmyzu při dovozu a vývozu ovoce a zeleniny.⁽⁷⁾

Nejčastěji využívané zdroje záření jsou ^{60}Co a ^{137}Cs o aktivitách 10 až 200 PBq.

Elektronové ozařovače kategorie 1 a 2

Urychlovače elektronů se užívají k ozařování vodičů s plastovou izolací a balících fólií. Proces polymerace zušlechťuje užitný plast, který tak získá lepší mechanické vlastnosti, vodiče a kabely pak získávají větší elektrickou pevnost a teplotní odolnost. Proces zasíťování fólií a obalů, určený zejména k balení potravin ve výrobě, při prodeji a v domácnosti, vede ke zvýšení odolnosti v tahu a snížení odolnosti přetržení.⁽⁷⁾

Produkt	Typické hodnoty dávek (kGy)	Požadovaný efekt
maso, drůbež, ryby, ústřice, některá zelenina, pečené výrobky, polotovary	20 - 70	sterilizace, produkty lze po ozáření uchovávat při pokojové teplotě
zelenina, ovoce	0,05 - 30	hubení mikroorganismů. Hmyzu, prodloužení doby trvanlivosti, snížení klíčivosti
lékařské potřeby, biologická příprava, některá léčiva	15 - 25	sterilizace, materiál pro jednorázové použití
Plasty	0,2 - 250	polymerace, síťování polymerů, řetězení a roubování polymerů
Hmyz	0,001 – 0,1	sterilizace samčích kulek hmyzu před vypuštěním (usměrňování hmyzí populace)
krvní deriváty	0,015 – 0,05	bezpečná transfuze pro imunodeficitní pacienty

Tab. 9 Příklady aplikací a užitých dávek pro ozařovače ⁽⁷⁾

1.7 Předměty denní potřeby

Letištní kontroly (obr. 36)

Od roku 2006 jsou na letištích zavedeny nové detekční přístroje „backscatter“, které jsou schopny za pomoci slabého rentgenového záření ukázat předměty nejen z kovu, ale i z jakéhokoliv materiálu, jakou je plastická trhavina, která je současně největší starostí na letištích.

Problémem přístroje bylo, že kontrolované „svlékal“ do naha, a proto se snížila kvalita obrazu až na úroveň siluety, ale zachovala míru, aby bylo možné zjistit ukryté předměty. Společnost, která vyrábí tyto přístroje, učinila tak kompromis mezi úrovní detekce a soukromím, ale dále už snížit schopnost přístroje nelze, jelikož by nedokázal odhalit plastické trhavinu. Intimní části těla by měly být zastřeny, snímky nebudou moci uchovávat ani tisknout a nikdo kromě pracovníka by neměl vidět údaje na monitoru.⁽²²⁾



Obr. 36 Schéma letištní kontroly ^(66, 67, 68)

1.8 Stavebnictví

Vývoj techniky ve stavebnictví zákonitě směřuje k účinnějšímu použití materiálu všeho druhu, vede k tomu, že dřívější robustní stavby jsou nahrazovány subtilními stavbami z oceli, betonu a plastu. Tento vývoj byl podmiňován zvyšováním kvality užitého materiálu, ale zároveň také jistotu, že užití materiálu předpokládá vlastnosti, na

kterých je založena spolehlivost, funkce a především bezpečnost budovaných moderních objektů. Nástroj pro účinnou a spolehlivou kontrolu dodržování těchto požadavků poskytuje radiografie užívaná již dlouhá léta nejčastěji na zjišťování betonářského profilu a polohy, respektive předpínací výztuže ve stavebních konstrukcích.⁽⁴⁾

Dle použitého zdroje ionizujícího záření děle členíme na:

- radiografii;
 - gamagrafie;
 - rentgenografie;
- betatronografii, která se v 70. letech 20. století stala nejvýkonnějším zdrojem ionizujícího záření.

1.8.1 Radiografie

Radiografie kvalitativně představuje vyšší stupeň v rozvoji radiační defektoskopie. U radioskopie se používá buď přímého převodu záření na viditelné světlo, které je snímáno televizní kamerou, anebo obraz je přímo zaznamenáván polovodičovými detektory a převáděn na zpracování do počítače.⁽⁴⁾

1.8.2 Betatronografie

Betatrony jsou jako rentgeny s dočasnou emisí záření, ovšem s tím odlišením, že elektrony emitované z katody u nich nejsou urychlovány vysokým elektrostatickým polem. Toto umožňuje dosáhnout o několik řádků vyšší energii záření než se dosahuje u rentgenů.

Při betatronografických zkouškách na stavbách velmi záleží na správné volbě expoziční doby. Tyto zkoušky jsou velmi náročné na přípravu a mnohdy jsou neopakovatelné. Expoziční dobu musíme znát přesně. Proto v rámci získaných výsledků byla sestavena obecná rovnice pro výpočty doby expozice, která obsahuje všechny parametry vyskytující se při snímání.

$$t = \frac{f \cdot a}{I \cdot V} \cdot \exp(D \cdot b + 0,00292 \cdot p \cdot d)$$

Především objemová hmotnost zkoumaného materiálu p , tloušťka tohoto materiálu d , ohnisková vzdálenost f , expoziční rychlost přímého svazku záření I , konstanty filmů a , b a zesilovací faktor fólií V .

Konečnou fází betatronografické kontroly a výchozím podkladem pro určení stavu kontrolovaných staveb je vyhodnocení betatronogramů. Betatronogramy byly stejně jako radiogramy vyhodnocovány nejčastěji na negatoskopu. Rozeznatelnost zachycených nehomogenit je při tomto způsobu ovlivněna nejen jakostí betatronogramu, ale také podmínkami vyhodnocování, zejména osvětlením snímků, absolutní velikostí pozorovatelného pole a adaptací oka.⁽⁴⁾

1.9 Vliv ionizujícího záření na životní prostředí

Ekologické souvislosti a vztah záření k životnímu prostředí bývají mnohdy velmi složité. Oběh radioaktivních látek v biosféře je pozorovatelný na všech stupních ekologické pyramidy a u většiny radionuklidů bez ohledu na to, zda jde o nuklidy přirozené či umělé.⁽³⁾

Zdroje záření můžeme v životním prostředí rozdělit na *přirozené a umělé*.

Mezi přirozené zdroje patří:

- *původní radionuklidy*, které vznikly při počáteční syntéze prvků na Zemi;
- *radionuklidy s atomovým (protonovým) číslem $Z > 83$* ;
- *kosmogenní radionuklidy*.

Přirozené radiační pozadí vytváří expozici pro všechny obyvatele. Velikost dávky závisí na tom, v jaké části Země žijeme, nebo se pohybujeme. Pobyt na úrovni hladiny moře je hodnocen celotělovou dávkou asi 0,4 mSv za rok. Vyšší dávku obdrží organismus ve vysokých nadmořských dávkách a na některých místech na Zemi s vysokou radioaktivitou půd a hornin.

Mezi **uměle** vytvářené zdroje patří:

- *využití ionizujícího záření v medicíně;*
- *jaderné výbuchy;*
- *těžba a zpracování uranu;*
- *jaderná energetika* – z hlediska životního prostředí jsou jaderné elektrárny pro své okolí přijatelnější než elektrárny spalující uhlí nebo topný olej. Nezamožují atmosféru škodlivými plynnými a pevnými exhalacemi. Radioaktivita okolí jaderných elektráren při dodržení všech bezpečnostních opatření bývá pravidelně nižší než v okolí elektrárny tepelné.
- *radioaktivní odpad* – výrobou energie v jaderných reaktorech, rozvojem využití radionuklidů ve vědě, technice i lékařství se neustále zvyšuje množství radioaktivního odpadu, které není možné odstranit běžnými způsoby. Ochrana životního prostředí před účinky ionizujícího záření proto závisí na vyřešení především problému úpravy a uložení radioaktivních odpadů.

Uměle vytvářené radiační pozadí reprezentuje roční dávku asi 0,8 mGy. Je závislé na druhu a způsobu lidské činnosti v dané lokalitě a je tvořeno výkony v jaderné energetice a výzkumu, lékařství, zemědělství, dopravě, spotřebním průmyslu.⁽³⁾

2 CÍLE PRÁCE A HYPOTÉZA

Cílem práce je vytvořit e-learningový výukový program zaměřený na umělé zdroje ionizujícího záření na základě dostupných informací a literatury.

Hypotéza: Vytvořením edukačního materiálu využívajícího moderní výukové techniky dojde ke zkvalitnění výuky zaměřené na radiační ochranu a radiobiologii.

3 METODIKA

Pro vypracování kurzu Umělých zdrojů ionizujícího záření, jako edukačního materiálu bylo použito dostupných materiálů, literatury a webových stránek, které se týkají dané problematiky. Tištěná verze práce je napsána v programu Microsoft Word a samotný výukový program v prostředí Moodle.

4 VÝSLEDKY

E-learningový program

Na základě teoretické části, uvedené v této bakalářské práci byl vytvořen e-learningový program v prostředí Moodle s obrázky a hypertextovými odkazy.

Výukový program se jmenuje Umělé zdroje ionizujícího záření.

Dostupný je na webových stránkách <http://moodle.zsf.jcu.cz>.

Didaktický program je rozdělen do devíti témat.

Struktura výukového programu:

Téma 1: Základní pojmy v oblasti ionizujícího záření,

Téma 2: Radiační ochrana,

Téma 3: Umělé zdroje ionizujícího záření ve zdravotnictví,

Téma 4: Jaderná energetika,

Téma 5: Průmyslové zdroje ionizujícího záření,

Téma 6: Zkoušky jaderných zbraní v atmosféře,

Téma 7: Předměty denní potřeby,

Téma 8: Stavebnictví,

Téma 9: Vliv ionizujícího záření na životní prostředí.

Součástí každého tématu je:

- soubor pro shrnutí látky, který obsahuje teoretickou část s obrázky a hypertextovými odkazy,
- doporučená literatura,
- procvičovací test.

5 DISKUSE

Didaktický program je vytvořen za pomoci dostupných materiálů, jak z literatury, tak i z internetových stránek týkající se daného tématu do prostředí Moodle. Dále nabízí i souhrnnou teoretickou část s obrázky a hypertextovými odkazy, které napomáhají studentům se lépe orientovat. Nedílnou součástí ke každé kapitole je test ve formě otázek s doporučenou literaturou.

E-learningový program má i své kladné a záporné stránky.

Negativní pohled je pouze z mé strany, jelikož problémem bylo upravování textu po jeho nahrání do kapitoly. Při úpravě docházelo k samovolnému vymazávání nahrané látky, a tudíž jsem musela text nahrávat a opravovat opakovaně.

Kladnou stránkou kurzu je diskusní fórum, kde si může student vyměňovat názory a domlouvat se s kantorem ohledně daného tématu. Myslím si, že spousta studentů o tomto neví. Mě samotnou tato možnost velmi zaujala, jelikož do doby než jsem začala vytvářet kurs, jsem netušila, že tento způsob komunikace tu je.

Srovnat dva e-learningové programy stejného tématu „umělé zdroje ionizujícího záření“ je nemožné, protože dva shodné didaktické programy jsem nenašla. V databázi Moodle jsem našla kurzy, jako je Radiační ochrana, Přístrojová technika používaná v radiodiagnostice, Vývoj přístrojové techniky v radioterapii, které popisují jednotlivé kapitoly v mé bakalářské práci. Tudíž je zcela nemožné srovnat obecný výukový program se speciálně zaměřenými kurzy, které jsou daleko více obsáhlé. Dostatečné informace poskytují především zahraniční internetové zdroje, publikace zaměřené na určitá odvětví, ve kterém zdroj ionizujícího záření hledáme. Dále jsou to knihy o radiační ochraně.

6 ZÁVĚR

Cílem práce bylo vytvořit e-learningový program zaměřený na umělé zdroje ionizujícího záření na základě dostupných informací a literatury, který bude sloužit jako výukový materiál pro studijní obory Radiologický asistent, Ochrana obyvatelstva se zaměřením na CBRNE, Zdravotnický záchranář a Ochrana veřejného zdraví na Jihočeské univerzitě v Českých Budějovicích.

Cíl práce byl splněn. Didaktický program byl vytvořen v programu Microsoft Word a v e-learningovém prostředí Moodle.

Hypotéza byla zadána: vytvořením edukačního materiálu využívajícího moderní výukové techniky dojde ke zkvalitnění výuky zaměřené na radiační ochranu a radiobiologii.

Přestože kvalita výukových programů roste, ráda bych, ale nemohu potvrdit hypotézu, jelikož můj e-learningový program nebyl ještě použit. Pro potvrzení hypotézy, bych musela po roce využívání kurzu studenty, zhotovit dotazník, na který by napsali, jak jim program pomohl ve výuce.

7 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

Seznam literatury:

1. BINAROVÁ, Andrea. *Radioterapie*. Ostrava: Ostravská univerzita v Ostravě, Fakulta zdravotních studií, 2010. 251 s. ISBN 978-80-7368-701-4.
2. FUKÁTKO, Tomáš. *Detekce a měření různých druhů záření*. 1. Praha: BEN-technická literatura, 2007. 192 s. ISBN 978-80-7300-193-3.
3. HERČÍK, Miroslav. *111 otázek a odpovědí o životním prostředí*. Ostrava: MONTANEX, a.s., 2004. Ionizující záření, 134 – 141 s. ISBN 80-7225-123-6.
4. HOBST, Leonard. *Využití ionizujícího záření ve stavebnictví a rozbor možností dalšího rozvoje radiačních metod*. Brno: VUTIUM, 2004. 31 s. ISBN 80-214-2755-8.
5. HRAZDIRA, Ivo; MORNSTEIN, Vojtěch; ŠKORPÍKOVÁ, Jiřina. *Základy biofyziky a zdravotnické techniky*. Brno: Neptun, 2006. 293 s. ISBN 80-86850-01-3.
6. HUŠÁK, Václav, et al. *Radiační ochrana pro radiologické asistenty*. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2009. 138 s. ISBN 978-80-244-2350-0.
7. KOLEKTIV AUTORŮ: *Principy a praxe radiační ochrany*. Praha: Azin CZ, SÚJB, 619 s, ISBN 80-238-3703-6.
8. KONEČNÝ, Jiří. *Radiační fyzika*. České Budějovice: Jihočeská universita v Českých Budějovicích, Zdravotně sociální fakulta, 2006. 109 s. ISBN 80-7040-843-X.
9. KUNA, Pavel, et al. *Klinická radiobiologie*. Praha: Manus, 2005. 222 s. ISBN 80-86571-09-2.
10. KUNA, Pavel. *Stručný přehled farmakologie pro radiologické asistenty*. České Budějovice: Zdravotně sociální fakulta, 2007. 101 s. ISBN 978-80-7040-967-1.
11. KUPKA, Karel, et al. *Nukleární medicína*. Příbram: P3K, 2007. 185 s. ISBN 978-80-903584-9-2.

12. MATOUŠEK, Jiří; ÖSTERRIECHER, Jan; LINHART, Petr. *CBRN. Jaderné zbraně a radiologické materiály*. 1. Ostrava: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, 2007. 216 s. ISBN 978-80-7385-029-6.
13. NAVRÁTIL, Leoš, et al. *Medicínská biofyzika: ochrana před ionizujícím zářením*. Praha : Grada, 2005. 524 s. ISBN 80-247-1152-4.
14. NEKULA, Josef, et al. *Radiologie*. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2001. 205 s. ISBN 80-244-0259-9.
15. PETERA, Jiří. *Moderní radioterapeutické metody: Brachyterapie*. Brno: Institut pro další vzdělávání pracovníků ve zdravotnictví v Brně, 1998. 33 s. ISBN 80-7013-266-3.
16. PROUZA, Zdeněk; ŠVEC, Jiří. *Zásahy při radiační mimořádné události*. Ostrava: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, 2008. 125 s. ISBN 978-80-7385-046-3.
17. RAČEK, Jiří. *Energetická zařízení : Stroje a zařízení jaderných elektráren*. Druhé vydání. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2008. 233 s. ISBN 978-80-214-3726-5.
18. ROSINA, Josef; KOLÁŘOVÁ, Hana; STANEK, Jiří. *Biofyzika pro studenty zdravotnických oborů*. 1. Praha: Grada, 2006. 232 s. ISBN 80-247-1383-7.
19. STOCHOROVÁ, Hana. *Základy biofyziky pro bakalářské studium*. Druhé vydání. Ostrava: Ostravská univerzita v Ostravě, Zdravotně sociální fakulta, 2007. 92 s. ISBN 978-80-7368-466-2.
20. ŠMORANC, Pavel. *Rentgenová technika v lékařství*. Pardubi : Střední průmyslová škola elektrotechnická a Vyšší odborná škola, 2004. 261 s. ISBN 80-85438-19-4.
21. ŠVEC, Jiří. *Radioaktivita a ionizující záření : doplňující učební text pro předměty Bakalářská fyzika, Aplikovaná fyzika, Ochrana před zářením*. První vydání. Ostrava: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, 2005. 36 s. ISBN 80-86634-62-0.

22. S jakými výbušninami pracují teroristé? : svlékáme se na letišti. *21. století extra*. 2009, léto, s. 86. ISSN 1214-1097.
23. *Jsou radioaktivní odpady neřešitelný problém?*. Řež u Prahy: Koordinační pracoviště Programu vývoje hlubinného úložiště vyhořelého paliva a vysoce aktivních odpadů v České republice, 2006. 11 s. ISBN 80-254-7340-6(v knize neuvedeno:brož.).

Seznam internetových zdrojů:

24. KINLEY III, D. Chernobyl's Legacy: Health, Environmental and Socio-economic Impacts and Recommendations to the Governments of Belarus, the Russian Federation and Ukraine [online]. Austria : IAEA in Austria, April 2006 [cit. 2011-04-09]. Chernobyl's Legacy: Health, Environmental and Socio-Economic Impacts, 10,11,22 s. Dostupné z WWW: <<http://www.iaea.org/Publications/Booklets/Chernobyl/chernobyl.pdf>>.
25. MALÁTOVÁ, Irena; HŮLKA, Jiří. *Situace po černobylské havárii v České republice* [online]. Praha: SÚJB, 2006 [cit. 2011-04-19]. Dostupné z WWW: <http://www.suro.cz/cz/publikace/cernobyl/radiacni_situace_v_cr_po_cernobylu.pdf>.
26. MATZNER, Jan. *Radiační ochrana*. [online]. České Budějovice: Jihočeská universita v Českých Budějovicích, Zdravotně sociální fakulta, 2007 [cit. 2011-04-06]. Dostupné z WWW: <http://www.zsf.jcu.cz/struktura/katedry/radio/informace-pro-studenty/ucebni_texty/studijni-obor-radiologicky-asistent>.
27. O SÚJB: Úvod. In *Státní ústav pro jadernou bezpečnost* [online]. Praha: [cit. 2011-06-01]. Dostupné z WWW: <http://www.sujb.cz/?c_id=116>
28. PETROVÁ, Karla Státní úřad pro jadernou bezpečnost: Radiační ochrana. In *Zabezpečení osobního monitorování při činnostech vedoucích k ozáření* [online].

- Praha: SÚJB, 2005 [cit. 2011-02-06]. Dostupné z WWW: <http://www.sujb.cz/docs/Zabezpeceni_os_monit_pri_ozareni.pdf>.
29. SÚRO [online]. 2000 - [cit. 2011-07-03]. Státní ústav radiální ochrany, v.v.i. Dostupné z WWW: <<http://www.suro.cz/cz/index.html>>.
30. *Sources and effects of ionizing radiation : UNSCEAR 2000 Report to the General Assembly, with scientific annexes* [online]. vol. I. Austria: UNSCEAR, 2000, updated Tuesday, 16 December 2008 [cit. 2011-04-19]. Exposures from man-made sources of radiation, s. 134. Dostupné z WWW: <<http://www.unscear.org/docs/reports/annexc.pdf>>.
31. *Sources and effects of ionizing radiation : UNSCEAR 2000 Report to the General Assembly, with scientific annexes* [online]. vol. I. Austria: UNSCEAR, 2000, Tuesday, 16 December 2008 [cit. 2011-04-10]. [Medical radiation exposures](#), s. 203. Dostupné z WWW: <<http://www.unscear.org/docs/reports/annexc.pdf>>.
32. *Vyhláška č. 499/2005 Sb.*, Státního úřadu pro jadernou bezpečnost, [online], [cit. 2011-04-16]. Dostupné z <http://www.sujb.cz>.
33. *Zákon č. 18/1997 o mírovém využívání jaderné energie a ionizujícího záření (atomový zákon) a o změně a doplnění některých zákonů, v platném znění.* Státní úřad pro jadernou bezpečnost, [online], [cit. 2010-04-15]. Dostupné z <http://www.sujb.cz>

Citace obrázků:

35. <http://astronuklfyzika.sweb.cz/DetekceSpektrometrie.htm> 3.6.2011 14:11 (Filmový dozimetr)
36. <http://www.blue-panther.cz/kapesni-dozimetr-s-primym-ctenim> 3.6. 14:58 (kapesní dozimetr)
37. <http://radiodiagnostika.fomei.com/digitalni-technika/mobilni-dr-systemy.html> 4.6. 13:26 (pojízdný rtg)
38. http://www.gymhol.cz/projekt/fyzika/11_elmag/11_elmag.htm (rentgenka) 4.6. 13:29

39. <http://www.vmk-rtg.cz/rentgeny-veterinarni-sedecal-digitalni.htm> (rtg přístroj) 4.6.11
40. http://www.nempt.cz/pracoviste/rdo_rtg.php (skiaskopie) 4.6. 2011
41. <http://www.revolutionhealth.com/articles/angiogram/zm5008> (angio) 4.6.2011
42. <http://nch.mnul.cz/galerie-zazemi.asp> (CT) 4.6.2011
43. <http://radiotherapysideeffects.info/radiotherapy-side-effects.html> (teleradioterapie) 4.6.2011
44. <http://www.aboutbrachytherapy.com/en-us/patients/cancers/breast-cancer/Pages/brachytherapy-treatment.aspx> (brachy) 4.6.11
45. <http://www.denikreferendum.cz/clanek/8865-brnensti-onkologove-nejsme-vybaveni-na-peci-o-akutni-pacienty-jinych-nemocnic> (simulátor) 4.6. 11
46. <http://www.stylemagazine.com/advanced-technology-enhances-radiation-oncology-for-veterans/> (CT simulátor) 4.6. 11
47. <http://www.ujp.cz/?section=vyroby-a-sluzby&lang=cz&subsection=radioterapeuticke-systemy&part=1> (kobaltový ozařovač) 6.6.2011
48. http://www.cerebromente.org.br/n02/tecnologia/radiocirurg_i.htm (lineární urychlovač) 6.6.2011
49. http://www.leifiphysik.de/web_ph12/zusatzaufgaben/02magfeld/zyklotron93/zyklotron93.htm (cyklotron) 6.6.2011
50. <http://fbmi.sirdik.org/obsah/234.html> (betatron) 18.6. 2011
51. <http://www.lfhk.cuni.cz/onkol/NEW/ozarovny.html> (RTG terapie) 9.6. 2011
52. <http://www.strahlentherapie-berlin.de/ausstattung.html> (afterloading) 9.6. 2011
53. <http://www.onconet.cz/onkologie.fnmotol/index.php?pg=koc-fn-praha-motol--brachyterapie> (afterloading) 9.6.2011
54. http://lem.ch.unito.it/didattica/infochimica/2007_Tecnezio/radiodiagnostica.html (scinti kamera) 10.6. 20:56
55. <http://unm.lf1.cuni.cz/vysetreni/29.html> (Spect) 10.6.2011

56. <http://health.howstuffworks.com/medicine/modern/nuclear-medicine1.htm> (PET) 10.6.2011
57. <http://www.blesk.cz/clanek/zpravy-novinky-domaci/114901/v-jaderne-elektrarne-temelin-doslo-k-nehode.html> (Temelín) 11.6.2011
58. <http://atominfo.cz/2010/12/kam-s-vyhorelym-jadernym-palivem/> (jaderný odpad) 11.6.2011
59. <http://atominfo.cz/2010/07/beloruska-jaderna-elektrarna-stane-se-realitou/> (chernobyl) 12.6.2011
60. <http://www.unscear.org/docs/reports/annexj.pdf> (mapa šíření radioaktivity kolem černobylu) 12.6.2011
61. <http://arthurzbygniew.blogspot.com/2011/03/radioactivityone-million-times-natural.html> (mapa evropy - černobyl) 12.6. 2011
62. http://www.suro.cz/cz/publikace/cernobyl/situace_po_cernobylske_havarii_v_ceske_republice.pdf (depozice ČR a černobylu) 12.6. 2011
63. <http://www.cez.cz/edee/content/microsites/rtg/k32.htm> (defektoskopie) 17.6. 2011
64. <http://www.elsys-cz.com/ja-60sr-bezdratovy-ionizacni-hlasic-koure/> (ionizační hlásič kouře)
65. <http://www.automatizace.cz/article.php?a=689> (hustoměr)
66. http://www.lidovky.cz/skener-nebo-osobni-prohlidka-davaji-na-vyber-francouzi-p18-/ln_zahranici.asp?c=A100209_201313_ln_zahranici_tes (letištní kontrola)
67. <http://www.airways.cz/clanek/2006-09-26/novy-terminal-na-brnenskem-letisti> (letištní kontrola)
68. <http://www.liveportal.cz/ze-sveta/letistni-kontrola-vec-verejna> (letištní kontrola)

Citace grafů a tabulek:

69. Hůlka J., Thomas J., Přehled expozice obyvatelstva přírodnímu záření, Bezpečnost jaderné energie, ročník 15(53), 3/4 2007 (tabulka č. 4 a graf č. 1)
70. *Sources and Effects of Ionizing Radiation : Volume I: Sources - Report to the General Assembly Scientific Annexes A and B* [online]. UNSCEAR 2008 Report.

United Nations Office at Vienna : United Nations, 2008 [cit. 2011-06-11]. Dostupné z WWW: <http://www.unscear.org/unscear/en/publications/2008_1.html>. ISBN 9789211422740. (tabulka č. 4, graf č. 1)

71. *Sources and Effects of Ionizing Radiation : Scientific Annexes C, D and E* [online]. Volume II: EFFECTS. United Nations Office at Vienna : United Nations, 2008 [cit. 2011-06-11]. Dostupné z WWW: <http://www.unscear.org/unscear/en/publications/2008_2.html>. (tabulka č. 4, graf č. 1)

72. http://www.zsf.jcu.cz/structure/departments/kra/informace-pro-studenty/ucebni_texty/studijni-obor-radiologicky-asistent/ (tabulka č.3) 11.6.2011

8 KLÍČOVÁ SLOVA

- černobylská havárie;
- ionizující záření;
- jaderná elektrárna;
- urychlovače částic;
- radiační ochrana;
- radionuklid;
- zdroje ionizujícího záření.

9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

ICRP	International Commission on Radiological Protection;
IAEA	International Atomic Energy Agency
UNSCEAR	United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation
mSv	mili Sievert
AG	angiografie
CT	počítačová tomografie
aj.	a jiné
tzv.	tak zvaný
keV	kiloelektronvolt
kV	kilovolt
mA	miliampérmetr
CT	computed tomography – počítačová tomografie
Gy	gray
cm	centimetr
mm	milimetr
RTG	rentgen
DVS	dose volume histogram = dávka v objemových %, maximální dávka
MR	magnetická resonance
EPID	electronic portal image device

A	ampér
DF	faktor vyhasínání biologického účinku, kterým se násobí dávka záření
Kg	kilogram
LET	lineární přenos energie a vyjádřen v keV na dráze 1 μm .
GHz	giga hertz
Resp.	respektive
ČR	Česká republika
s	sekunda
h	hodina
EBq	10^{18} Bq
γ	gama
α	alfa
β	beta
angl.	anglicky
scin.	Scintigrafie
scinti.	scintigrafie
moč.měchýř	močový měchýř