

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

**FAKULTA
BIOMEDICÍNSKÉHO
INŽENÝRSTVÍ**



**BAKALÁŘSKÁ
PRÁCE**

2017

**LUDĚK
SOUDNÝ**



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta biomedicínského inženýrství
Katedra zdravotnických oborů a ochrany obyvatelstva

**Fyzikálně-chemické formy radioaktivního jódu ve výpustech jaderné
elektrárny za normálních i havarijních podmínek**

**Physico-Chemical Forms of Radioactive Iodine in Effluents from
Nuclear Power Plants under Normal and Emergency Conditions**

Bakalářská práce

Studijní program: Ochrana obyvatelstva
Studijní obor: Plánování a řízení krizových situací

Vedoucí práce: Mgr. Josef Kaňkovský

Luděk Soudný

Kladno, květen 2017

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem Fyzikálně-chemické formy radioaktivního jódu ve výpustech jaderné elektrárny za normálních i havarijních podmínek vypracoval samostatně pouze s použitím pramenů, které uvádím v seznamu bibliografických odkazů.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Kladně dne 17.05.2017

.....
podpis

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce panu Mgr. Josefovi Kaňkovskému nejen za věnovaný čas a poskytnuté materiály, ale i za cenné rady a připomínky, jež byly inspirací k vytvoření závěrečné podoby této práce.

Abstrakt

V práci je nahlédnuto do komplikované chemie štěpného produktu jódu v jaderné elektrárně. Jsou v ní popsány některé zákonitosti speciace jódu v primárním chladícím okruhu jaderné elektrárny za normálních podmínek. Dále je v práci popsán vývoj jódu při úniku do životního prostředí v případě havárie s příklady některých těžkých havárií, které se v historii odehrály. Práce se dále věnuje radiologickým rizikům radioaktivního jódu a jejich omezení.

Pro vytvoření práce byly využity převážně výsledky zahraničních výzkumů doplněné tuzemskou literaturou.

Výsledkem práce je shrnutí výsledků zahraničních výzkumů a zhodnocení účinnosti stávajících ochranných opatření.

Klíčová slova

Jaderná elektrárna; jód; radiojód; normální provoz; závažná havárie; radiační ochrana.

Abstract

This bachelor thesis gives an insight into complicated nuclear power plant iodine chemistry. There are descriptions of some iodine chemistry relations in nuclear power plant primary coolant at normal conditions. Further, this work describes the evolution of iodine after leak, due to accident and gives examples of some severe accidents, which have happened in human history. After that there are radioactive iodine radiological risks explained.

Foreign research results supplemented by Czech literature were mostly used to develop this thesis.

The outcome is a summary of foreign research results and Czech literature as well as evaluation of contemporary radiological protection.

Keywords

Nuclear Power plant; iodine; radioiodine; normal condition; severe accident; radiation protection

Obsah

1	Úvod.....	9
2	Současný stav	10
2.1	Jód.....	10
2.1.1	Jód a lidský organizmus.....	10
2.1.2	Radioaktivní jód	11
2.2	Jaderný reaktor.....	14
2.2.1	Typy reaktorů.....	14
2.2.2	Tlakovodní reaktor.....	15
2.2.3	Aktivní zóna.....	15
2.2.4	Palivový element	16
2.2.5	Štěpné produkty	16
2.2.6	Chladicí systém tlakovodního reaktoru.....	17
2.2.7	Výpusti.....	19
2.2.8	Monitorování výpustí JE Temelín.....	20
2.2.9	Provozní podmínky (stavy) JE	22
2.3	Formy jódu za normálního provozu jaderné elektrárny	24
2.3.1	Metallické jódý.....	24
2.3.2	Jódý s nestálým charakterem.....	24
2.3.3	Chemie jódu v chladiu primárního okruhu	25
2.4	Formy jódu za havarijních podmínek jaderné elektrárny	29
2.4.1	Radiační havárie	31
2.4.2	Stopové množství ¹³¹ I v ovzduší v ČR 2017	37
2.5	Radiační ochrana v ČR.....	39

2.5.1	Radiační zátěž	40
2.5.2	Technická opatření k zamezení uniku jódu za normálního provozu 42	
2.5.3	Technická opatření k zamezení úniku jódu při závažné havárii.....	44
2.5.4	Ochranná opatření	48
2.5.5	Jódová profylaxe	49
3	Cíl práce.....	51
4	Metodika	52
5	Výsledky.....	53
6	Diskuze	55
7	Závěr	59
8	Seznam použitých zkratk.....	60
9	Seznam použité literatury.....	61
10	Seznam použitých obrázků	64
11	Seznamu použitých tabulek	65
12	Seznam Příloh	66

1 ÚVOD

Elektrická energie vyprodukovaná v jaderných elektrárnách tvoří významný podíl na celkové vyprodukované a spotřebované elektrické energie. Jaderné elektrárny mají, z hlediska produkce skleníkových plynů a ekologického zatížení životního prostředí čistý provoz. Čistota provozu je však vykoupena přispíváním dávky k radiační zátěži obyvatelstva a rizikem vzniku radiační havárie. Radioaktivní jód je jedním z řady izotopů, které přispívají k radiační zátěži obyvatel za normálního provozu a v případě havárie přináší vážná zdravotní rizika.

Motivací k vypracování této práce byl fakt, že sám žiji s rodinou ve vzdálenosti do 10 km od jaderné elektrárny Temelín, tedy v zóně havarijního plánování, a jsme vybaveni tabletami jodové profylaxe.

2 SOUČASNÝ STAV

2.1 Jód

Jód byl objeven v roce 1811 francouzským chemikem Bernardem Courtoisem. Je to vysoce reaktivní prvek ze skupiny halogenů. „V pevném skupenství tvoří tmavě fialové lístkové krystalky, které za atmosférického tlaku sublimují přímo do plynné fáze.“ [1] Přírodní výskyt je vzácný (cca 0,1-5 mg/kg v zemské kůře, v mořské vodě cca 0,6mg/l). [1,2]

Název	Jód
Značka	I
Chemická skupina	Halogeny
Atomové číslo	53
Bod tání (°C)	113,7
Bod varu (°C)	184,3
Standardní redoxní potenciál	+0,54

2.1.1 Jód a lidský organizmus

Jód je biogenní prvek. Stabilní jód 127 je nezbytná živina pro tvorbu hormonů štítné žlázy. Konkrétně se jedná o hormon trijodtyronin (T_3), který obsahuje tři atomy jódu, a tetrajodthyronin či tyroxin (T_4), který obsahuje čtyři atomy jódu. V případě nedostatku těchto hormonů při vývoji vzniká riziko vadného kosterního růstu a vadného mentálního vývoje. U dospělých jedinců hormony štítné žlázy napomáhají udržovat normální krevní tlak, srdeční pulz, svalové napětí, trávení a rozmnožovací funkce. Nadbytek či nedostatek hormonů T_3 a T_4 může vést k vážným metabolickým onemocněním, jako je hyperthyroidismus a hypothyroidismus. [1,3]

2.1.2 Radioaktivní jód

„Jód je prvek s největším počtem v praxi využívaných radioisotopů.“ [1] Radioizotopy jódu se vykytují v rozmezí ^{108}I - ^{144}I z nichž ^{127}I je jediný stabilní izotop a ^{123}I , ^{124}I , ^{125}I , ^{129}I , ^{131}I jsou využívány v nukleární medicíně - ^{123}I , ^{124}I - značení radiofarmak; ^{129}I - kalibraci detekčních systémů; ^{125}I - in vitro radioimunoanalýza, radioterapie; ^{131}I - diagnostika a terapie. [1]

Radioaktivní jód je díky svému vysokému výtěžku, potenciální nestabilitě a radiobiologickým rizikům, jedním z nejdůležitějších štěpných produktů z pohledu radiační ochrany. Jako nejvýznamnější izotopy, z pohledu radiologických rizik, jsou považovány zejména izotopy ^{129}I a ^{131}I . [4]

2.1.2.1 Jód 129

Jód 129 je izotop s velmi dlouhým poločasem rozpadu (15,7 milionu let). Podléhá radioaktivní přeměně β s maximální energií 0.150 MeV.

Vzniká několika cestami:

- Interakcí kosmického záření s xenonem v atmosféře
- Spontánní reakcí uranu 238 v litosféře a hydrosféře
- Neutronovým štěpením ^{235}U v jaderném reaktoru

V případě neutronového štěpení se jedná o izotop s nejdelším poločasem přeměny. Štěpný výtěžek je ^{129}I je okolo 1% všech štěpných produktů. Z důvodu dlouhého poločasu rozpadu jsou dávky tohoto izotopu jódu, který je vypouštěn do životního prostředí, připisovány do tzv. globální kolektivní dávky. Celkově se na planetě nachází ^{129}I o aktivitě přibližně 326.8 TBq. Z toho pouze přibližně 0.3 TBq byly přidány atmosférickými testy jaderných zbraní. A něco kolem 7 TBq přispěla havárie v Černobylu. [5, 6]

2.1.2.2 Jód 131

Izotop ^{131}I je produkt přeměny metastabilního teluru 131 v jaderném reaktoru $\{^{131\text{m}}\text{Te}(\gamma, T_{1/2} = 30\text{hod.}) \rightarrow ^{131}\text{Te}(\beta, T_{1/2} = 25\text{min.}) \rightarrow ^{131}\text{I}\}$. Podléhá přeměně β^- s maximální energií 606keV. Štěpný výtěžek tohoto izotopu se pohybuje okolo 3%. [1,5]

Během pokusů jaderných zbraní byla do prostředí uvolněna aktivita 700 EBq izotopu jódu ^{131}I . Aktivita uvolněného izotopu jódu ^{131}I je jedním z kritérií hodnocení závažnosti jaderné havárie (stupeň 4-7).

2.1.2.3 Biokinetika radiojódu a jeho rizika

Z pohledu radiologických rizik je nejpodstatnější izotop jódu ^{131}I . Izotop ^{131}I je primárně beta zářiče, proto představují pro člověka riziko spíše cestou vnitřního než vnějšího ozáření. Kritickými orgány jsou plíce, orgány trávicího ústrojí, mléčné žlázy a štítná žláza. Po požití radiojód proniká přes gastrointestinální trakt do krve. Přibližně 30% radiojodů z krve se kumuluje ve štítné žláze, zbylé množství radioaktivního jódu opustí tělo močí. Štítná žláza eliminuje polovinu radiologické aktivity jódu přibližně za 80 dní ve formě jódu vázaného na organické molekuly vytvářené štítnou žlázou. [7,9] „*Předpokládá se, že jód v organické formě se rovnoměrně distribuuje v orgánech měkkých tkání (kromě štítné žlázy) a uniká odtud s biologickým poločasem 12 dní. Dále se předpokládá, že 10 % tohoto organického jódu se vylučuje stolicí, zbylých 90 % se pomalu katabolizuje na organický jód, který se vrací do tělesných tekutin. Uvedené údaje platí pro model referenčního člověka.*“ [7]

Akumulace radiojódu v organismu je do značné míry ovlivněna metabolismem a fyziologickými charakteristikami (příjem, vstřebávání, tkáňová distribuce, záchyt). Např. při hypertyreóze může akumulace radiojódu stoupnout až na 85 %, Biologický poločas vylučování může být zkrácen až na 10 dní. Odbourání jódu ze štítné žlázy je rozdílné od věku: kojenci 11 dní; děti 23 dní; dospělí 80 dní. [6,7, 19, 8]

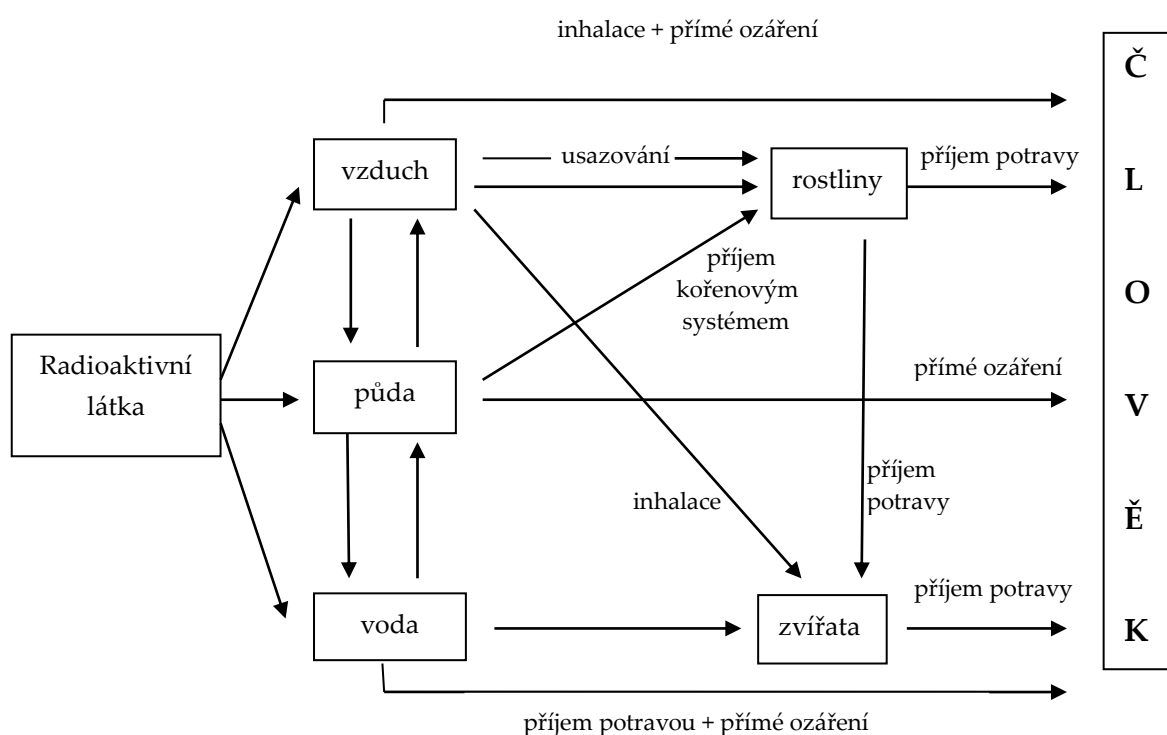
Maximální dolet částic záření β izotopu ^{131}I v tkáni je přibližně 2,5 mm, průměrný střední dolet částic je 0,9mm. [1]

Hlavním rizikem radioaktivního jódu je vyvolání dysfunkce štítné žlázy, případně karcinom štítné žlázy a plic.

2.1.2.4 Brány vstupu radioaktivního jódu

Radioaktivní jód se do lidského organismu může dostat dvěma cestami:

- Inhalací
- Ingescí



Obrázek 1 Cesty možného ozáření člověka [14]

„Při inhalaci se radioaktivní plyny nebo aerosoly dostávají vdechovaným vzduchem do horních cest dýchacích. V závislosti na velikosti se aerosolové částice zachytávají v horních cestách dýchacích nebo plicích. Jejich další šíření v lidském organismu je závislé od dechové frekvence, nádechového objemu, velikosti částic a jejich chemické povaze. Lehce rozpustné látky se můžou dostat přes alveoly do krve a odtud do ostatních orgánů. Část aerosolových

částic se vždy dostává i do zažívacího traktu a část zůstává trvale v plicích, kde největší částice mohou setrvat i několik měsíců až let.“ [8]

V případě ingesce je radioaktivní jód přijímán v kontaminovaných potravinách a vodě. Přitom hlavním zdrojem je čerstvé mléko. Je to proto, že radioaktivní jód uvolněný ze spadu se usazuje na rostlinách, které jsou spásány dobyt看em. [5]

2.2 Jaderný reaktor

Jaderný reaktor je zařízení sloužící k výrobě elektrické energie z jaderné energie pomocí řízené štěpné reakce jaderného paliva.

2.2.1 Typy reaktorů

Tabulka 1 Typy reaktorů [7]

Označení typu	Název (Aj)	Označení	Chladivo	Moderátor	Počet k 21.4. 2017
PWR	Pressurized Light-Water-Moderated and Cooled Reactor	Dvouokruhový tlakovodní lehkovodní reaktor; obohacené palivo na ^{235}U	Lehká voda	Lehká voda	290
BWR	Boiling Light-Water-Cooled and Moderated Reactor	Jednookruhový lehkovodní varný reaktor; obohacené palivo na ^{235}U	Lehká voda	Lehká voda	78
PHWR	Pressurized Heavy-Water-Moderated and Cooled Reactor	Dvouokruhový tlakovodní těžkovodní reaktor; neobohacené palivo	Těžká voda	Těžká voda	49
LWGR/ RBMK	Light-Water-Cooled, Graphite-Moderated Reactor	Jednookruhový reaktor velkého výkonu kanálový; neobohacené nebo málo obohacené palivo na ^{235}U	Lehká voda	Grafit	15

Označení typu	Název (A)	Označení	Chladivo	Moderátor	Počet k 21.4. 2017
GCR	Gas-Cooled, Graphite-Moderated Reactor	Dvouokruhový plynem chlazený reaktor, ve Velké Británii zvaný Magnox, neobohacené nebo málo obohacené palivo na ^{235}U	Oxid uhličitý	Grafit	14
FBR	Fast Breeder Reactor	Rychlý množivý reaktor	Sodík	Nemá	3
celkem					449

2.2.2 Tlakovodní reaktor

Jedná se o nejrozšířenější typ jaderného reaktoru. Z konstrukčního hlediska jsou rozlišovány dva typy [10]:

- reaktor s čtvercovou mřížkou západního typu a
- reaktor s trojúhelníkovou mřížkou východního typu (VVER).

Provoz reaktoru běží v kampaňovém provozu s délkou kampaně 12, 18 a až 24 měsíců. Jako palivo se užívá oxid uraničitý ve formě tabletek uložených v palivových elementech složených do palivových souborů. [10]

2.2.3 Aktivní zóna

Jako aktivní zóna se označuje prostor, ve kterém probíhá samotná štěpná reakce. V tomto prostoru dochází k intenzivní přeměně jaderné energie na energii tepelnou. Aktivní zónu tvoří soubor palivových elementů, které jsou sestaveny do palivových souborů. Palivové elementy jsou z mechanického hlediska identické, ale mohou mít různé obohacení paliva [11]

2.2.4 Palivový element

Palivový element je zjednodušeně zapouzdřená trubka ze speciálního, pro neutrony transparentního, materiálu naplněná keramickými tabletami dioxidu uranu (UO_2). V palivovém elementu se nad tabletami nachází volný prostor (plénium), který slouží k akumulaci štěpných produktů mimo jiné izotopů jódu.

Palivový element je potažen speciálním materiálem s vysokou korozní odolností vůči chladivu, palivu i produktům štěpení a vysokou pevností a tažností při provozních teplotách. Tento povlak má zabezpečit hermetické uzavření palivových tablet a štěpných produktů a tím zabránit jejich úniku mimo palivový element. V ideálním případě by štěpné produkty měli zůstat uzavřeny v hermetickém obalu palivového elementu. Hermetické pokrytí však podléhá degradaci a tak se v něm po čase objeví mikroskopické trhlinky, kterými štěpné produkty unikají do chladiva primárního okruhu. [11, 12]

2.2.5 Štěpné produkty

Štěpné produkty jsou souhrnné označení pro štěpné trosky a produkty jejich rozpadů. Během jaderného štěpení vzniká přibližně 60 druhů štěpných trosek, které se dále rozpadají na izotopy kterých je okolo 250. [10] *„Obsah štěpných produktů v reaktoru se nazývá inventář reaktoru a ten je závislý na typu reaktoru, typu paliva, a jeho stupni vyhoření.“* [13]

„Do chladiva primárního okruhu se radionuklidy dostávají různými cestami – aktivací chladiva samého, difúzí štěpných produktů netěsnostmi v palivu a korozí konstrukčního materiálu a pokrytí paliva.“[13]

2.2.5.1 Izotopy jódu v jaderné elektrárně

Štěpením uranu v jaderném reaktoru a následnými reakcemi vznikají v jaderném reaktoru následující izotopy jódu:

Tabulka 2 Izotopy jódu v JE [1, 13]

Izotop	Typ přeměny	Energie gama (keV)	Poločas přeměny	Dceřiný radionuklid
^{129}I	β^-	39,60	$T_{1/2} = 1,6 \times 10^7$ let	^{129}Xe
^{131}I	β/γ	364,50	$T_{1/2} = 8,04$ dní	^{131}Xe
^{132}I	β^-	667,69	$T_{1/2} = 2,3$ hod.	^{132}Xe
^{133}I	β^-	529,87	$T_{1/2} = 21$ hod.	^{133}Xe
^{134}I	β^-	884,90	$T_{1/2} = 53$ min.	^{134}Xe
^{135}I	β^-	1260,41	$T_{1/2} = 6,6$ hod.	^{135}Xe

2.2.6 Chladicí systém tlakovodního reaktoru

Chladicí systém tlakovodního reaktoru je představován dvěma chladíci okruhy. Primární okruh zahrnuje tlakovodní nádobu, kolem aktivní zóny reaktoru, a systém potrubí cirkulačních smyček o průměru 500 až 800mm. Jako celek je primární okruh hermeticky uzavřený systém umístěný v ochranné obálce neboli kontejnmentu. Účelem primárního okruhu je pomocí chladiva, kterým je chemicky upravená demineralizovaná voda, odvádět teplo z aktivní zóny reaktoru a tím jej ochlazovat. Pohyb chladiva v cirkulační smyčce je zajištěn pomocí cirkulačního čerpadla. Chladivo primárního okruhu předává v parogenerátoru část tepla chladivu sekundárního okruhu. Hranicí styku primárního a sekundárního chladicího okruhu je plocha stěn svazku teplosměnných trubek. [13]

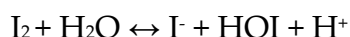
Chladicí voda primárního okruhu má po výstupu z aktivní zóny reaktoru teplotu okolo 300°C. Průchodem chladicí smyčkou teplota chladiva klesne přibližně na hodnotu 270°C. Při takto vysokých provozních teplotách je nutné zamezit varu

chladiwa čehož je docíleno vysokými provozními tlaky chladiwa v primárním okruhu, které odpovídají hodnotám cca 12-15 MPa. [13]

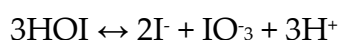
2.2.6.1 Chemie jódu v chladiwu

Chladiwem tlakovodního reaktoru je chemicky upravená demineralizovaná voda. Chemie jódu ve vodě je převážně řízena třemi reakcemi [4];

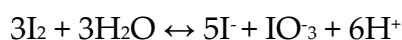
- Hydrolyza molekulárního jódu



- Disproporce kyseliny jodné (HOI)



- Komplexní reakce



Na základě těchto reakcí jsou potenciální formy jódu[4]: (tab. 3)

- Jodidy: I^- a IO_3^- (oxidační stav jódu -1)
- Molekulární jód: I_2 (oxidační stav jódu 0)
- Kyselina jodná HOI a jódnan IO^- (kladný oxidační stav)
- Jodidové ionty: IO_3^- (oxidační stav +5)

Tabulka 3 Druhy jódu v závislosti na oxidačním čísle [4]

Oxidation State	-1	0	+1	+2	+3	+4	+5	+6	+7
Specie	I^-, I_3^-	I_2	HOI	IO	IO_2^-	IO_2	IO_3^-	IO_3	IO_4^-

2.2.7 Výpusti

Aktivita výpustí má zdroj v:

- Odpadních plynech
- Odpadní vodě

V podmínkách jaderné elektrárny s tlakovodním reaktorem mají kapalné výpusti původ převážně v odpadní vodě. Jedná se o vodu z chladicího systému, která je kontaminovaná aktivačními a štěpnými produkty(AaŠP). Jedná se převážně o izotopy těžkých prvků jódu, cesia a vzácných plynů, které do chladicí vody difundují skrz mikroskopické trhlinky v hermetickém povlaku palivového elementu. [14]

Plynné výpusti obsahují štěpné produkty ve formě vzácných plynů, tritium, aktivační produkty v plynné formě, radioizotopy jódu v plynných formách a ve formě aerosolu, další štěpné produkty ve formě aerosolu, aktivační produkty a ve velmi malých aktivitách i transurany. [13]

„Pro aktivitu výpustí jsou v každé elektrárně závazné limity, které nesmí být překročeny. Tyto limity jsou součástí provozních předpisů elektrárny a jsou stanoveny s ohledem na klimatické, geologické a hydrologické skutečnosti, které mají vliv na šíření radioaktivních nuklidů v okolí elektrárny, jejich transport k člověku a případný následný příjem inhalací a ingescí. Jsou stanoveny tak, že pokud nejsou překročeny, nejsou překročeny ani základní limity pro kritickou skupinu obyvatel v okolí elektrárny.“ [14]

Plynné výpusti jsou vedeny přes filtry a zpožďovací linky, které sníží aktivity výpustí o aktivity krátkodobých radionuklidů. Na jaderné elektrárně Temelín se k filtraci používají filtry s impregnovaným aktivním uhlím, které mají až 99% účinnost. [5,14, 11]

Chladicí voda je kontinuálně prováděna skrz soustavu filtrů a iontoměničů, které zachycují pevné částice a většinu radioaktivních nuklidů, které jsou v chladicí vodě přítomny ve formě iontů. Tímto postupem je zajištěno, že i pro kritickou skupinu obyvatel představují výpusti minimální riziko. Ozáření kritické skupiny obyvatel z výpustí činí 0.1-1% celkového ozáření ze všech přírodních i umělých zdrojů. [14]

2.2.8 Monitorování výpustí JE Temelín

Monitorování výpustí je prováděno v rozsahu stanoveném v řídicím dokumentu ČEZ. [11]

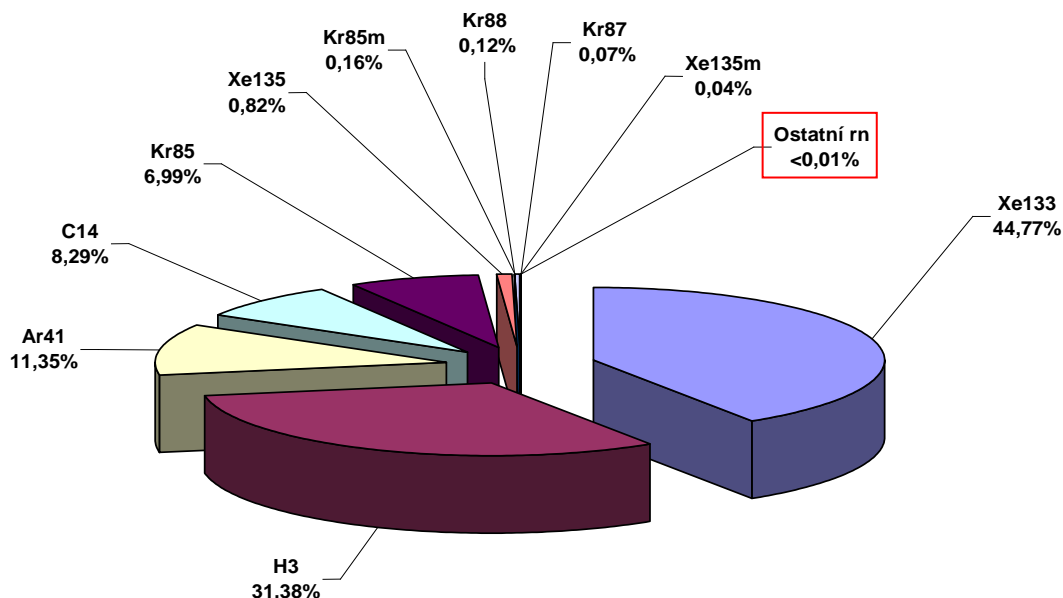
2.2.8.1 Výpusti do ovzduší

Plynné výpusti z hlavních výrobních bloků (HVB) jsou monitorovány pomocí on-line spektrometrického systému, který provádí bilanční měření vzácných plynů. Aktivity jódu, aerosolů, C-14 a tritia jsou měřeny na základě odběrů reprezentativních vzorků.[11]

Ke kontinuálnímu nebilančnímu monitorování plynných výpustí dále slouží PIG monitory – tyto monitory kontinuálně měří objemovou aktivitu aerosolů, jódu a vzácných plynů během všech provozních režimů bloku, tj. během normálního provozu, odstávek a havarijních i pohavarijních situací. Monitor umožňuje spektrometrické laboratorní měření odebraných aerosolových a jódových filtrů. [11]

Měření radioizotopů jódu se provádí na základě proporcionálního odběru vzorku vzdušiny a jejich záchytu na jódový filtr. Odběr vzorku je proporcionální v celém rozsahu průtoku vzdušiny komínem. Vzorek se odebírá a gamaspektrometricky proměřuje po týdenní expozici. [11]

Vzorek se odebírá z vnitřních komínů HVB za všech provozních režimů bloku. Z vnějšího komína HVB je odběr vzorků radioizotopů jódu prováděn pouze při odstávkách. [11]



Obrázek 2 Příspěvek jednotlivých radionuklidů k celkové vypouštěné aktivitě z plynných výpustí JE Temelín za rok 2016 [11]

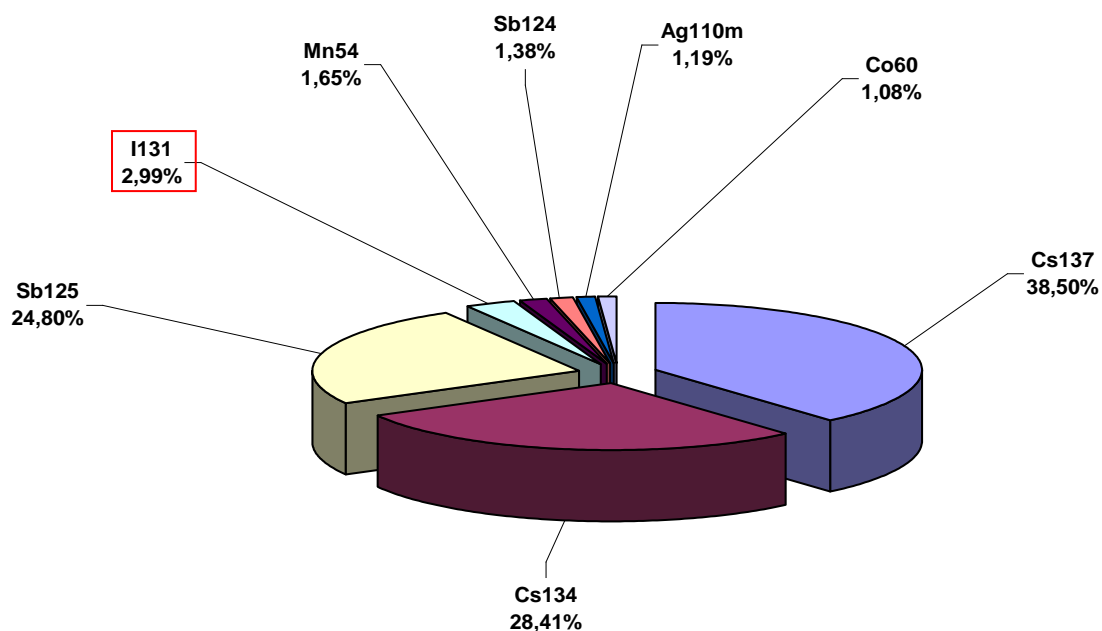
2.2.8.2 Výpusti do vodotečí

„Monitorování kapalných výpustí z JE Temelín je založeno na bilančním měření obsahu jednotlivých radionuklidů v jednotlivých kontrolních nádržích před jejich vypouštěním do sběrné jímky odpadních vod a následně do ponořeného stupně Kořensko“ [11]

„Vypouštění těchto nádrží je možné pouze se souhlasem směnového inženýra a je automaticky kontrolováno měřicími systémy radiační kontroly. Ty umožňují v případě zjištění překročení nastavených referenčních úrovní aktivity kapalných výpustí automatické uzavření příslušných armatur a tím i zastavení jejich vypouštění.“ [11]

„Aktivita vod ve sběrné jínce odpadních vod na odpadním kanálu z Jaderné elektrárny Temelín je kontinuálně monitorována pomocí zařízení, které navíc zabezpečuje získávání

proporcionálně nakapávaného vzorku za účelem provádění následné spektrometrické nebo radiochemické analýzy vypouštěných vod.“ [11]



Obrázek 3 Příspěvek jednotlivých radionuklidů aktivačních a štěpných produktů k jejich celkové vypuštěné aktivitě z kapalných výpustí JE Temelín za rok 2016 [11]

2.2.9 Provozní podmínky (stavy) JE

Celé spektrum provozních podmínek (stavů) elektrárny je rozděleno do čtyř kategorií v souladu s očekávanou četností výskytu a rizikem pro obyvatelstvo[11]:

- Kategorie I - normální provoz
 - jsou hodnoty všech parametrů a charakteristik aktivní zóny v takovém pásmu, že není potřeba ani automatického ani ručního ochranného zásahu.
- Kategorie II - události s mírnou četností
 - jsou zvládnutelné v nejhorsím případě odstavením reaktoru s následnou schopností elektrárny obnovit provoz po provedení nápravných opatření.
 - v palivové části projektu se bere frekvence výskytu událostí Kategorie II jednou za rok.

- Kategorie III - nehody s řídkou četností
 - nesmí způsobit poškození více než malého podílu počtu palivových proutků v reaktoru, ačkoliv by se mohlo vyskytnout takové poškození palivového proutku, které by mohlo bránit okamžitému obnovení provozu.
 - únik radioaktivního materiálu v důsledku událostí Kategorie III by neměl být takový, aby způsobil přerušeni nebo omezení veřejného využívání těch oblastí, které se nacházejí za poloměrem oblasti s vyloučením osídlení.
 - události Kategorie III nesmí samy o sobě generovat nehody Kategorie IV, ani nesmí způsobit následnou ztrátu funkce bariér chladiva nebo ochranné obálky reaktoru
- Kategorie IV - limitující nehody
 - události, u kterých se neočekává, že nastanou, ale jsou definovány jako nehody limitující, pro jejichž zvládnutí musí být zařízení projektováno.
 - nesmí způsobit únik radioaktivního materiálu v rozsahu, který by vedl k nepřijatelnému riziku pro obyvatelstvo a jeho bezpečnost.

Poškození paliva (průnik štěpných produktů povlakem palivového proutku) se v průběhu událostí Kategorie I ani Kategorie II neočekává nad rámec velmi malého počtu netěsných palivových proutků, který nelze vyloučit, a které jsou vyvolány vadami v technologii výroby nebo jinými příčinami během provozu. Tento počet odpovídá kapacitě čisticího systému elektrárny a je konzistentní s projektovou koncepcí elektrárny. [11]

2.3 Formy jódu za normálního provozu jaderné elektrárny

„Normální provoz – všechny stavy a operace plánovaného provozu jaderně energetického zařízení, při dosažení provozních limitů a podmínek pro jeho bezpečný provoz. Jsou to zejména spouštění, ustálený provoz a odstavení reaktoru, zvyšování a snižování jeho výkonu, jeho částečné a plné zatížení, údržba, opravy a výměna paliva“ [10]

2.3.1 Metalické jódý

Štěpný produkt jódu v palivových tyčích reaguje s cesiem za vzniku stabilní sloučeniny jodidu cesného (CsI) a v mezerách pláště se ukládá v podobě krystalů CsI. V případě defektu pláště palivové tyče krystaly CsI unikají přes vodní páru do primárního chladicího okruhu. Takto unikající jód může buď zůstat jako sloučenina CsI nebo se může zapojovat do dalších chemických procesů v závislosti na redoxním potenciálu, pH a na koncentraci jódu. [4, 15]

Sloučenina CsI není jediná kovová sloučenina jódu prezentovaná v chladicím systému reaktoru. Mezi další metalické jódý patří sloučeniny jódu a kovy kontrolních tyčí. Jedná se zejména o jodid stříbrný (AgI), jodid indný (InI) a jodid kademnatý (CdI₂). [4]

2.3.2 Jódý s nestálým charakterem

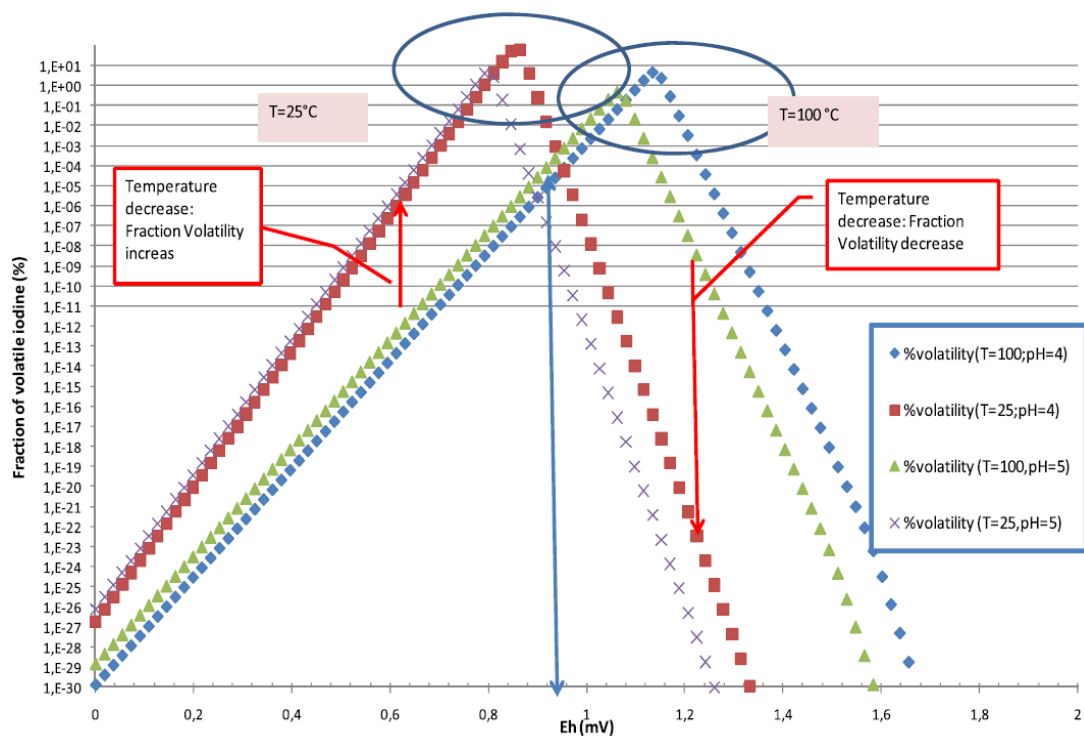
V primárním chladicím okruhu se vyskytují dva druhy jódu s nestálým charakterem (těkavé) tedy s možností existovat v plynném i kapalném stavu. Jsou jimi molekulární jód (I₂) a kyselina jódná (HIO). [1] Nestálý charakter je určen distribučním koeficientem. Vysoké hodnoty distribučního koeficientu značí vysokou koncentraci prvků v kapalném stavu. [4]

Hlavní parametry pro kontrolu nestálého jódu v primárním chladicím systému během odstávky je teplota a/nebo redoxní potenciál. Teplota chladicího

media má vliv na redoxní potenciál a tudíž i na vývoj jodu. Poměr I_2 : HIO závisí na radiolytických reakcích. [4]

2.3.3 Chemie jodu v chladivu primárního okruhu

Chladicí okruhu vytváří přechodný redoxní potenciál, ve kterém mohou existovat jak těkavé formy (I_2 a HIO), tak netěkavé (obr. 4). Evoluci redoxního potenciálu ovlivňuje radiolýza vody, tudíž má radiolýza vliv i na vývoji jodu. Poměr těkavých forem I_2 :HIO závisí na radiolytických reakcích, které zahrnují radiolytické produkty vody OH^\cdot , e^- a H_2O_2 . [4,15]



Obrázek 4 Distribuce těkavých a netěkavých druhů jodu[4]

Při vysoké teplotě, v palivovém elementu, se předpokládá, že velká část jodu zůstane v elementární formě ve svazku. Následně se v horním plénu přemění na hydrogen jodid (HI) a množství metalických jodu (CsI, RbI, AgI). Obecně se předpokládá, že jod reaguje s cesiem za vytvoření stabilní sloučeniny CsI v palivových peletách a následně se ukládá v kapsách pláště jako krystaly CsI. V případě poruchy pláště CsI krystaly unikají do primárního chladiva v podobě

vodní páry. Takto uniklý jod může v okruhu setrvat v podobě CsI nebo vstupovat do rozličných chemických procesů. [4,15]

Cesium vytváří v primárním chladihu sloučeninu hydroxidu cesného (CsOH), která omezuje tvorbu CsI. Ovšem díky reakci CsOH s HI je možné opětovné formování CsI. Kyselina molybdenová (H_2MoO_4), které pohltí značnou část Cs z CsOH a skrz vytvoření molybdenanu cesného (Cs_2MoO_4), nedovoluje formování CsI a zanechává tak velkou část jódu ve formě HI. Formace Cs_2MoO_4 je mnohem pravděpodobnější než CsI díky velmi vysoké těkavosti H_2MoO_4 . Hydrogen jodid následně na to reaguje s jinými prvky jako např. s kadmíem za vytvoření CdI_2 . V případě, že není přítomné žádné Cd, se předpokládá, že část HI bude transformována na SnI_4 , SnI_2 a I_2MoO_2 . [4,15]

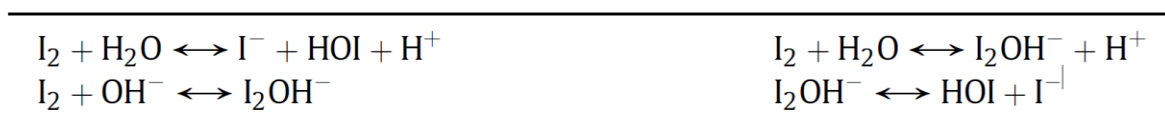
Za předpokladu snížení saturace H_2MoO_4 , kadmium nemůže soutěžit s CsOH a RbOH o HI a tedy prakticky všechen jod je transformován na CsI a RbI. [15]

Na základě kinetické analýzy vychází, že iontová forma jódu (I^-) by měla být nejvíce stabilní formou pro vysoké pH a negativní/slabě pozitivní redoxní potenciál. Protože jodová hydrolyza probíhá velmi rychle, rovnovážného stavu při teplotě $25^\circ C$ je dosažen během 1 vteřiny, předpokládá se, že formy jodového aniontu I^- a jeho rovnováhy je dosaženo okamžitě v době úniku jódu z palivového elementu. Během normální operace (pH~7 a redukční stav, $E_h \approx -0.4 V$) iontový jod I^- by měl být dominantním druhem. Předpokládá se, že během stabilní operace budou štěpné produkty jodu prezentovány v chladihu jako jodidy I^- a zatímco těkavé formy se nepředpokládají. Pokles v pH (kvůli injekci kyseliny borité pro kontrolu štěpné reakce) a vzestup v redoxním potenciálu (spojené s progresivní eliminací vodíku (H_2)) upřednostňuje formování kapalného molekulárního jódu ($I_2(aq)$) a jodičnanového aniontu (IO_3^-). Typické pH během odstávky odpovídá

hodnotě pH = 4 - 6, i přes to se předpokládá že I⁻ zůstane dominantní druhem dokud nenastane oxidační fáze (injekce peroxidu vodíku (H₂O₂)). [4]

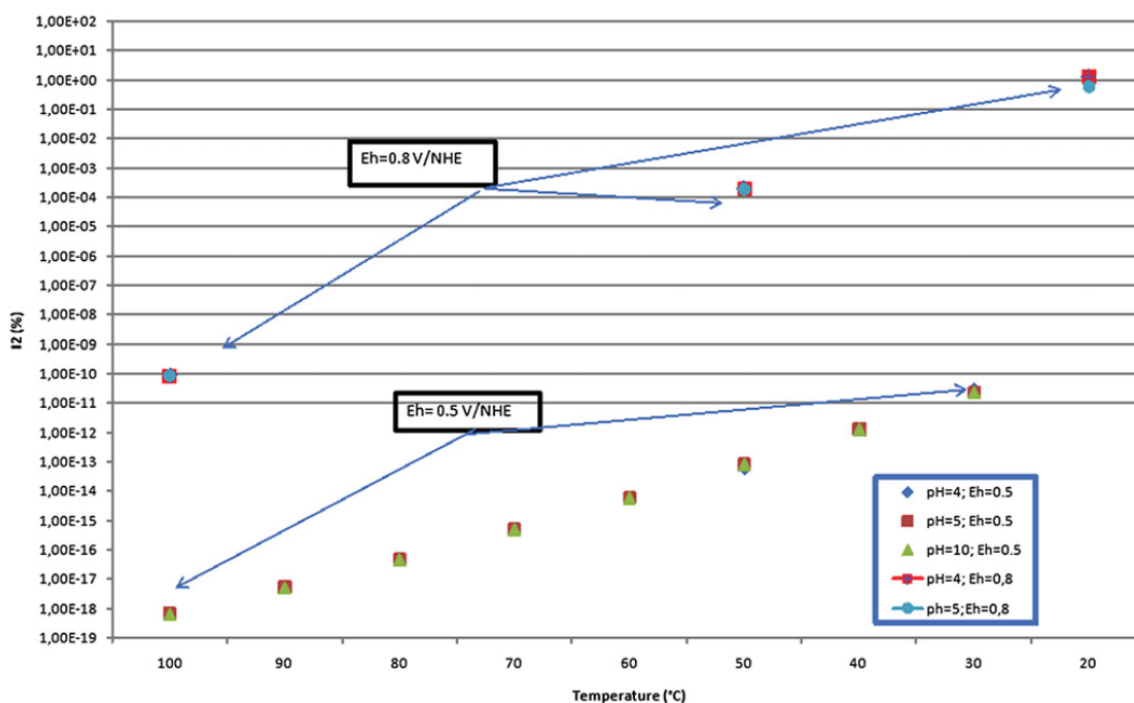
Redoxní potenciál je nejvíce významný parametr dovolující zůstat I⁻ jako I⁻ nebo se transformovat na IO₃⁻. Odhadovaný redoxní potenciál, pro typickou koncentraci kyslíku (<10 mg/kg) a pro typickou teplotu kdy se provádí oxidace (100°C), indikuje jód buď ve formě jodidu I⁻ nebo ve formě jodičnanů IO₃⁻ nebo IO₃(aq) s minoritním podílem těkavých jodu (I₂ a HIO). [4]

Elementární jod (I₂) může být úplně hydrolyzován na I⁻ skrze hydrolytické reakce (obr. 5).



Obrázek 5 Hydrolytické reakce jódu[4]

Elementární jód je velmi senzitivní na redoxní potenciál, teplota a hodnota pH na něj mají jen slabí vliv. Podíl I₂ v rovnovážné směsi při poklesu teploty ze 100°C na 30°C vzroste přibližně o 5 řádů, nezávisle na pH (obr.6).[4]



Obrázek 6 Podíl jódu I_2 závislý od teploty a Eh [4]

Elementární jód je adsorbován vnitřním povrchem primárního chladicího okruhu. Jodidy a jodičnany takto adsorbovány nejsou adsorbovány. Pouze I_2 může být adsorbován až 600 slitinami. V případě slitin zirconolay a nerezové oceli 304 je adsorpce přibližně 2-4 nižší. Adsorpce jodu v povrchu okruhu představuje riziko kontaminace pro pracovníky během přerušení provozu (vypuštění okruhu), kdy dochází k desorpci. [4]

Speciace jódu se liší zařízení od zařízení, z výzkumů však vyplynulo několik obecných závěrů; [4]

- Pro všechna zařízení je během normálních provozních režimů a odstávky majoritní formou jódu iontový jód I^- .
- chladivu varného reaktoru se během odstávky stávají dominantními částicemi IO_3^- ; v chladivu tlakovodních reaktorů zůstává dominantní I^- , IO_3^- se stává dominantní pouze, když je překročen určitý práh Eh. U zařízení, kde je oxigenace prováděna průběžně během redukce teploty,

byl zaznamenán postupný nárůst IO_3^- , ovšem jeho koncentrace vždy zůstala nižší než koncentrace I^-

- Příspěvek těkavého I_2 během normální operace je menší než 2%

Přítomnost dalších komponent v primárním okruhu a jejich interakce s jódem komplikuje chemii jódu. [4]

2.4 Formy jódu za havarijních podmínek jaderné elektrárny

„Havarijní podmínky- všechny události způsobené selháním nebo porušením stavební konstrukcí, technologických souborů a zařízení vnějšími vlivy nebo chybami obsluhy, které negativně ovlivňují bezpečnost provozu jaderně energetického zařízení, vedoucí k porušení provozních limitů a podmínek a mohou způsobit porušení palivových článků.“[10]

Radioaktivní jód má komplexní chování od iniciace úniku z paliva přes transport do nádoby reaktoru a chladicího systému, přes únik do kontejnmentu a případně do životního prostředí. Na chemické vlastnosti jódu a tedy i na jeho transport má silný vliv systém jaderného zařízení.[16]

Jód má v životním prostředí komplikované částicové chování kvůli značné reaktivitě a variabilitě chemických forem. Díky tomu je schopen v prostředí existovat jak v plynné formě, tak v podobě aerosolu, a je schopen vázat se na různé typy půdní vegetace, nebo se ukládat do řek, jezer a oceánů. [16, 17]

Během nehody uniká jód do atmosféry v podobě molekulárního jódu I_2 , jodových solí nebo různých druhů organických jodů. Po úniku je každá z forem subjektem různých procesů. Molekulární a organický jód může existovat ve formě plynů nebo aerosolu. Jodové soli mohou existovat pouze v podobě aerosolu.[16]

V oblastech s vysokou teplotou může jód existovat také v podobě par (CsI , I_2 , HI , CsI_2), ten poté může kondenzovat a vázat se na aerosol nebo utvářet kaluže. Radiační pole přítomné v kaluži kvůli štěpným produktům může snadno ovlivňovat proces jodové hydrolyzy, která má vliv na formace a variace chemické formy jodu ve vodě. V kalužích pak mohou chemické reakce časem produkovat nestálé druhy radiojodu, zahrnující molekulární a organický jód. [16]

Po úniku do ovzduší jód velmi rychle utváří sloučeniny jodmethanu (CH_3I) a jodidu cesného (CsI). [16]

Jódový anion I^- je rozpustný ve vodě a může být transformován do těkavých forem, proto se jód ztrácí z půdního povrchu díky těkavosti nebo odplavováním. [16]

Molekulární jód a organické jodidy primárně existují ve formě atmosférických plynů, které s prostředím reagují skrze chemický proces adsorpce a desorpce. [16]

Organické sloučeniny jodu jsou mnohem více těkavé a méně reaktivní než molekulární jód a proto mají větší sklon zůstat v ovzduší. [16]

Jódový aniontu I^- je rozpustný ve vodě, proto může být radiojód v deštivém prostředí absorbován kapkami deště a transportován tak do půd. V deštích po černobylské havárii bylo nejvíce jodu obsaženo ve formě jódového iontu I^- a IO_3^- . [18]

Rychlost depozice radiojodu je ovlivněna typem povrchu a vegetace, úrovní vlhkosti a velikostí částic. Velké částice jsou deponovány mnohem rychleji než částice submikroskopického rozsahu (tab16). [16]

Tabulka 4 Rychlost depozice jednotlivých forem jódu [16]

Forma jódu	Rychlost depozice
Molekulární jód	$1 \times 10^{-3} \text{ m-s}^{-1} - 20 \times 10^{-3} \text{ m-s}^{-1}$
Elementární jód	$5.1 \times 10^{-3} \text{ m-s}^{-1} - 5.5 \times 10^{-4} \text{ m-s}^{-1}$
submikroskopické radionuklidy vázané na aerosoly	$0.4 \times 10^{-3} \text{ m-s}^{-1} - 5 \times 10^{-3} \text{ m-s}^{-1}$

2.4.1 Radiační havárie

Jako radiační havárie se označuje radiační mimořádná událost, nezvládnutelná silami a prostředky obsluhy nebo pracovníků vykonávající práci v aktuální směně obsluhy, při jejichž činnosti radiační mimořádná událost vznikla, nebo vzniká v důsledku nálezu, zneužití nebo ztráty radionuklidového zdroje, která vyžaduje zavedení neodkladných ochranných opatření pro obyvatelstvo. [19]

Pro stanovení úrovně radiační mimořádné události existuje mezinárodní stupnice pro jaderné a radiační události INES. Nejvyšší 4 stupně definují množství uvolněné aktivity pomocí radiačního ekvivalentu vyjádřeného v TBq ¹³¹I. Radiační ekvivalent – skutečně uniklé hodnoty izotopu vynásobené konverzním koeficientem pro daný izotop

Tabulka 5 Zhodnocení stupně radiační havárie dle aktivity I-131

Stupeň události dle INES	Událost vedoucí k úniku do životního prostředí odpovídajícímu aktivitě radiačně ekvivalentního úniku o velikosti: (TBq ¹³¹ I)
Stupeň 7	Několik desítek tisíc
Stupeň 6	Tisíce až desetitisíce
Stupeň 5	Stovky až tisíce
Stupeň 4	Desítek až stovek

2.4.1.1 Windscale - Velká Británie (INES 5)

Havárie se odehrála 10-11. Října 1957 na severozápadě Anglie ve hrabství Cumbria. Jednalo se zde o grafitový vzduchem chlazený reaktor na výrobu plutonia. Příčinou havárie bylo přehřátí palivových článků. Mimo zařízení uniklo 1800 TBq ¹³¹I. Oblak radioaktivního materiálu putoval na severovýchod předtím, než jej severozápadní vítr nasměroval na jihovýchod. Nikdo nemusel být evakuován, avšak byl zakázán prodej mléčných výrobků pocházejících z oblastí v okruhu do 10 km severně a 20 km jižně od zařízení. [14, 20, 21]

Studie provedená Richardem J. Q. McNallym, Richardem Wakefordem at all. poukazuje na zvýšený výskyt rakoviny štítné žlázy v okolí jaderného zařízení u lidí narozených mezi lety 1939-1958 v souvislosti s havárií ve Windscale. [21]

2.4.1.2 Three Mile Island - USA (INES 5)

Dne 28. března 1978 došlo k poruše chladicího systému reaktoru, jehož výsledkem byl rozsáhlý unik „pouze“ plynného chladiva do atmosféry. Unik radioaktivního plynu trval několik týdnů. Do ovzduší se dostalo přibližně 4×10^{11} Bq ¹³¹I. Jednalo se o první havárii jaderného zařízení, která si vyžádala evakuaci obyvatelstva. Těhotným ženám a předškolním dětem žijící ve vzdálenosti do 8 km od zařízení bylo doporučeno evakuovat se, 2 dny později byl rádius evakuační zóny rozšířen na 16 km a později na 32 km, počet evakuovaných vzrostl z původních 27 000 z 8 km na 700 000 z 32 km. To zahrnovalo také 14 nemocnic a 62 zdravotnických zařízení. Naštěstí byl reaktor dostán pod kontrolu a k evakuaci nemocnic nedošlo. [20]

Havárie nezpůsobila obyvatelstvu zdravotní ujmy ani škody na majetku. Ke kontaminaci potravy nedošlo, protože únik ¹³¹I byl poměrně malý a dobytek v okolí elektrárny byl v té době krmen uskladněnou pící. Mléko z této oblasti mělo jen nízký obsah ¹³¹I, nejvyšší hodnota byla $1,5 \text{ Bq l}^{-1}$. [20]

I přes mírný dopad znamenala havárie významný mezník v jaderné energetice. Vyvolala celosvětové přehodnocení koncepce jaderné bezpečnosti a revizi stavu mnoha reaktorů. Poukázala na výzvy jako je evakuace nemocnic a zdravotnických zařízení. Ale také smutně proslula špatnou organizací monitorovací služby, nepřipraveností úřadů zvládat krizové situace a senzacechtivostí sdělovacích prostředků, což vedlo k panice mezi obyvatelstvem a k dopravnímu kolapsu oblasti při evakuaci. [20]

2.4.1.3 Černobyl - Ukrajina (INES 7)

Je považována za symbol jaderné katastrofy. První havárie úrovně INES 7. K této havárii došlo 26. dubna 1986 a během ní se z reaktoru uvolnilo $(1,3-1,8) \times 10^{18}$ Bq izotopů jodu. Takto rozsáhlá havárie měla za následek závažné zdravotní následky a dlouhodobé dopady na životní prostředí. Mezi 600 pracovníky záchranných operací se u 134 z nich rozvinula akutní nemoc z ozáření s výslednými 28 úmrtími. 220 000 rezidentů muselo být evakuováno. [20]

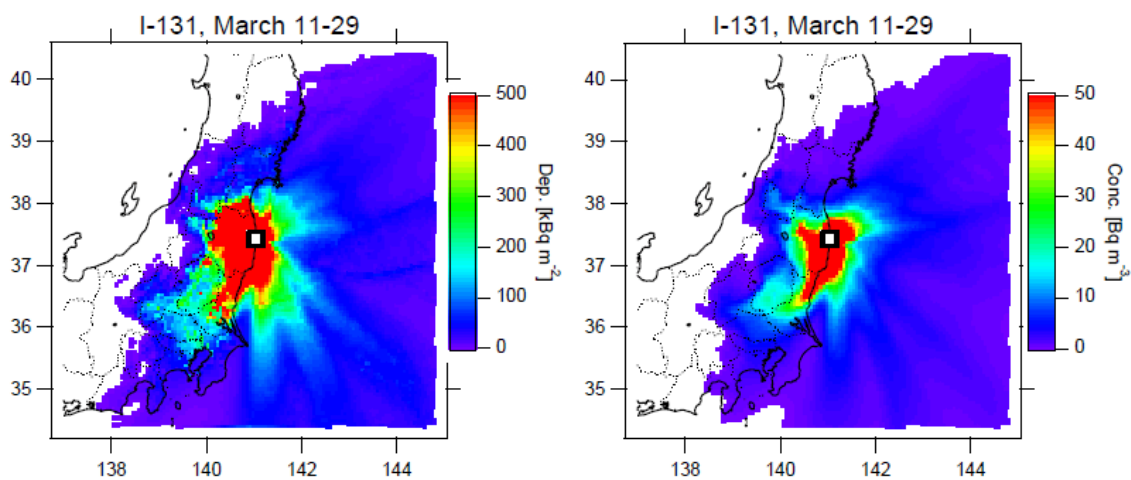
Z dlouhodobého hlediska se za nejzávažnější zdravotní účinek havárie pokládá zvýšený výskyt rakoviny štítné žlázy u dětí, které se narodily v oblastech silně zamořených radioaktivními izotopy jodu v období mezi šesti měsíci před havárií do šesti měsíců po havárii. Příčinou byl vysoký příjem nuklidu ^{131}I inhalací z původního radioaktivního mraku a konzumací kontaminované potravy. Dávka způsobená zářením radioaktivních izotopů jodu ve štítné žláze byla odhadnuta na 0,8-2,4 Sv u dětí a 0,2-0,4 Sv u dospělých. Ke konci roku 1995 bylo mezi dětmi mladšími 15 let zjištěno téměř 800 případů, z nichž tři byly smrtelné. U dětí, které se narodily později je výskyt rakoviny štítné žlázy na úrovni neozářeného obyvatelstva. [20]

V období krátce po havárii bylo v Evropě zlikvidováno velké množství kontaminovaných potravin a zemědělských produktů, aby se u obyvatelstva předešlo zvýšenému příjmu zejména ^{131}I . [20]

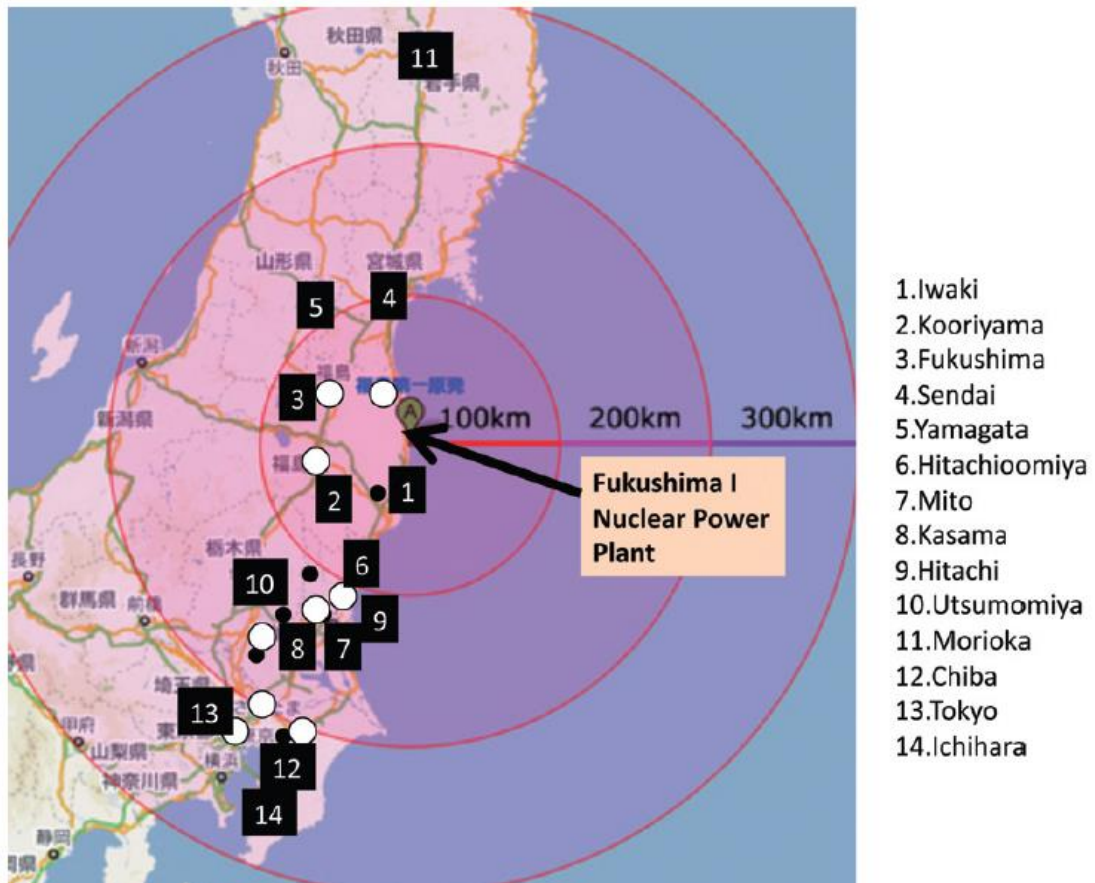
2.4.1.4 Fukushima Daiichi - Japonsko (INES 7)

Jaderná elektrárna Fukushima Daiichi byla 11.března 2011 zasažena vlnou tsunami, která zjednodušeně vyřadila z provozu chladicí systém. Ačkoli probíhaly práce na ochlazení reaktoru vláda vydala nařízení k evakuaci postupně v okruzích 3, 10 a 20 km v rozmezí 11.-13. Března. V jaderné elektrárně v následujících dnech došlo k několika výbuchům nahromaděného vodíku. Dne 15. března ráno unikl z elektrárny velký radioaktivní mrak, který pomocí větrů rozšířil radioaktivní látky včetně ^{131}I do okolí. V tento den byl evakuován okruh ve vzdálenosti 20 km od elektrárny. [20, 22]

Radioaktivní mrak štěpných produktů ^{131}I zasáhl přibližně třetinu japonského ostrova Honshu (obr. 7). Největší měrou bylo zasažen území ve vzdálenosti do 100 km od JE (obr. 8).



Obrázek 7 Depozice a koncentrace radiojódů I-131 v Japonsku po havárii v JE Fukushima Daiichi
zdroj: <http://enformable.com/2011/08/simulation-shows-iodine-and-cesium-may-have-reached-15-prefectures/>

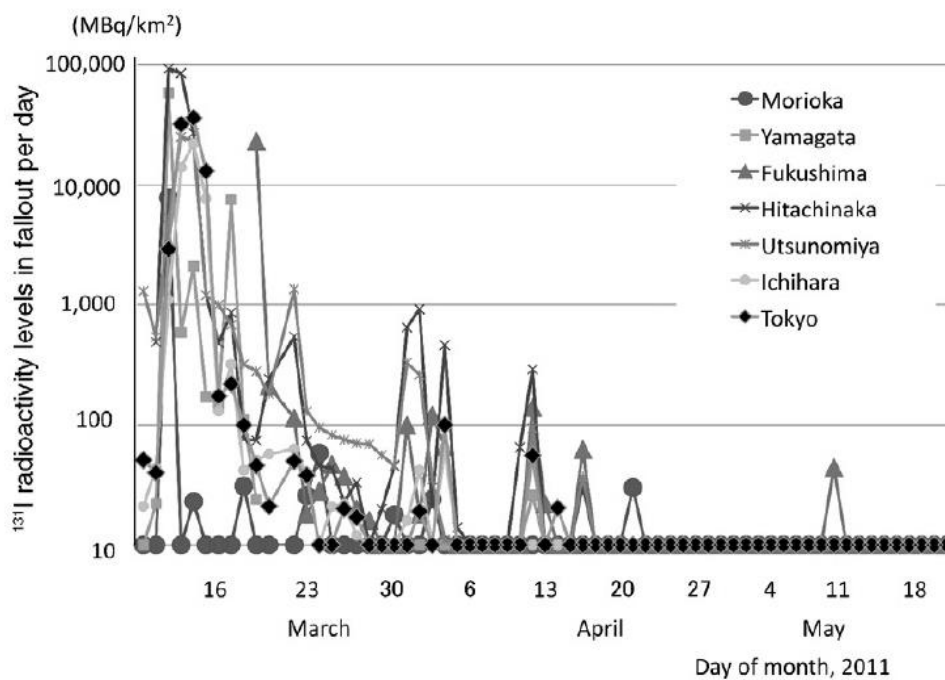


Obrázek 8 Lokace vybraných japonských měst s přibližným znázorněním vzdálenosti od JE Fukushima Daiichi [22]

Množství radioaktivního spadu jodu ^{131}I během jednoho dne dosáhlo vrcholu: [22]

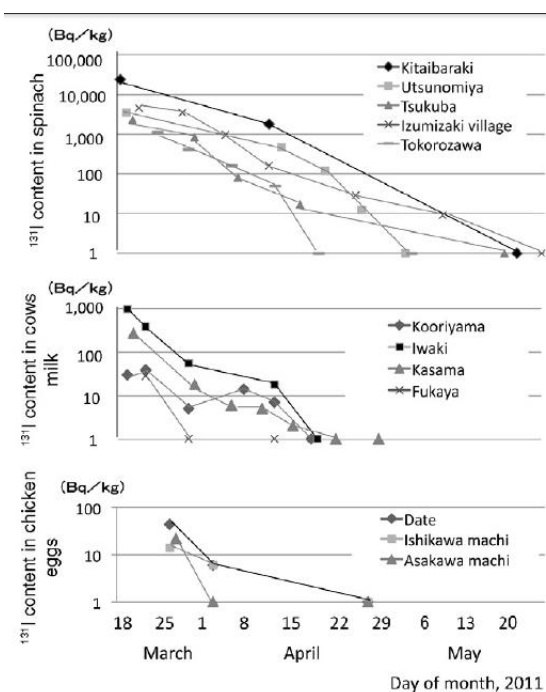
- Hitachinaka; 130km jižně – 20. března (93 000 MBq/km²)
- Tokio; 220km jižně – 22. března (38 000 MBq/km²)

Po úniku radioaktivního jódu ^{131}I 15. března nastal pozvolný pokles aktivit. Po 20. březnu, kdy přišli silné deště, které zapříčinili rychlejší deponování jódu z atmosféry na zemský povrch, byl opět zaznamenán nárůst aktivit. Obdobný nárůst byl zaznamenán ještě po 30. březnu a 10. dubnu (obr. 9). [22]



Obrázek 9 Chronologické změny v aktivitách I131 v různých lokalitách Japonska [22]

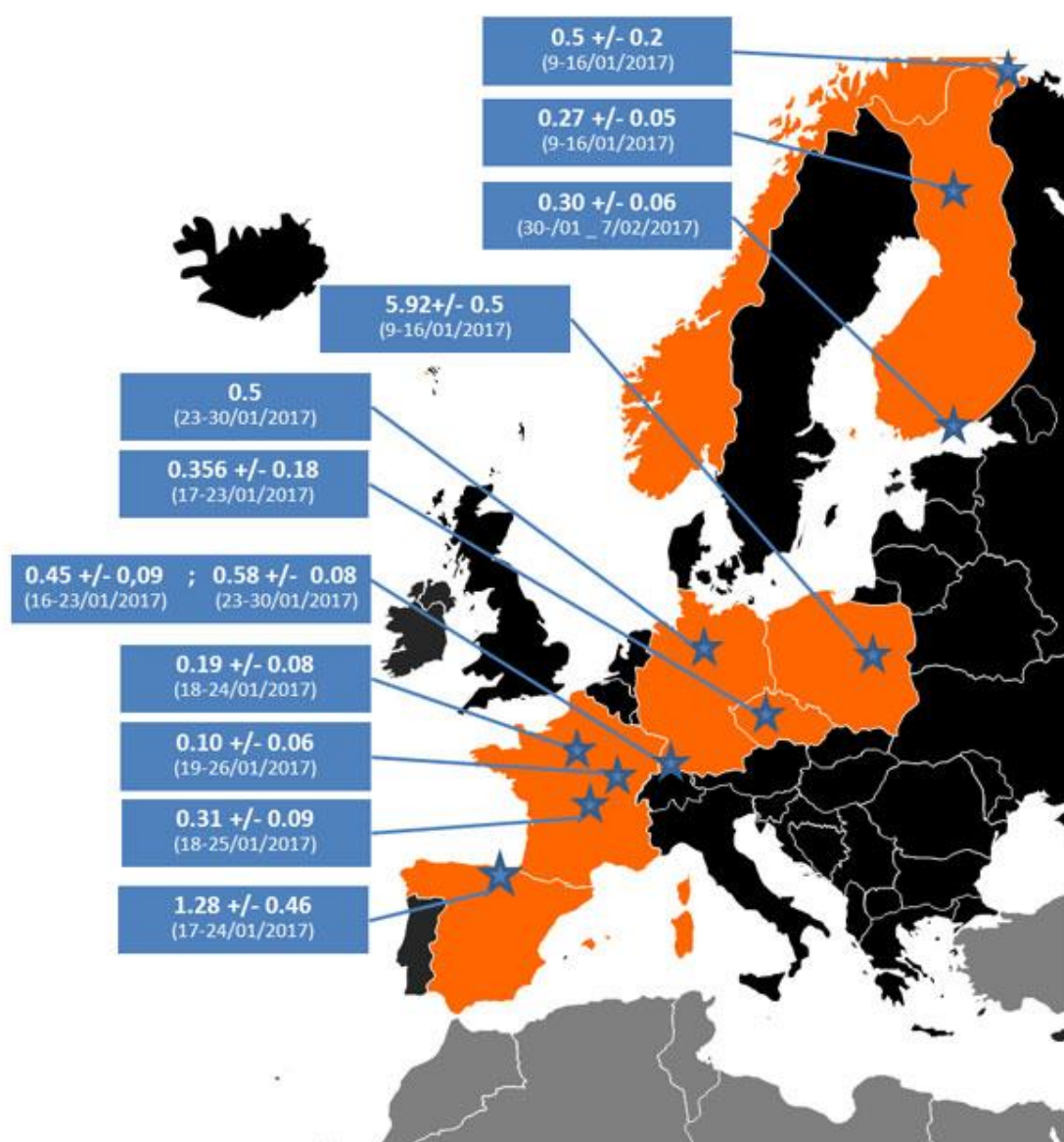
Obyvatelé Japonska byli vystaveni nejen kontaminovanému ovzduší a půdnímu povrchu, ale i kontaminované potravě. Největší dávky ^{131}I byly naměřeny v kravském mléce, drůbežích vajíčkách a špenátu (obr. 10). [22]



Obrázek 10 Potraviny s nejvyšší naměřenou koncentrací ^{131}I (špenát, kravské mléko, vajíčka) [22]

2.4.2 Stopové množství ^{131}I v ovzduší v ČR 2017

Izotop ^{131}I byl detekován v malém množství v nízkých hladinách atmosféry napříč Evropou. Jód 131 má poměrně krátký poločas rozpadu, detekce značí jeho nedávné uvolnění do životního prostředí. Poprvé byly zvýšené hodnoty zaznamenány během 2. týdnu v lednu na severu Norska. Dalšími státy, ve kterých byly detekovány zvýšené hodnoty, jsou Finsko, Polsko, Česká republika, Německo, Francie a Španělsko. [19, 23]



Obrázek 11 Mapa naměřených hodnot ^{131}I v Evropě ($\mu\text{Bq}/\text{m}^3$) [23]

V České republice byly aktivity ^{131}I detekovány jen na aerosolových filtrech. „Aktivita plynné formy ^{131}I vzhledem k řádově menšímu průtoku vzdušiny sorbentem plynných forem jódu je detekovatelná s mnohem menší citlivostí, takže v podobných případech leží pod mezí detekce.“ [19]

Tabulka 6 Naměřená aktivita ^{131}I v ČR

[<https://www.suro.cz/cz/publikace/aktuality/podrobnejsi-informace-ke-stopove-mnozstvi-i-131-v-ovzdusi-v-lednu-a-unoru-2017>]

Odběrové místo	Rok 2017	Pod MVA	Aktivita (MVA)	Nejistota
	Odběr od – do		Bq/m ³	Bq/m ³
Praha	17.1. - 23.1.		3,6E-7	1,8E-7
	23.1. - 31.1.	<	(4,2E-7)	
	31.1. - 7.2.	<	(1,9E-7)	
	7.2. - 14.2.		7,41E-7	1,9E-7
	14.2. - 21.2.	<	(2,0E-7)	
	21.2. - 28.2.	<	(2,5E-7)	
České Budějovice	21.2. - 28.2.		2,04E-6	5,9E-7
Praha	28.2. - 7.3.	<	(2,2E-7)	
	7.3. - 14.3.	<	(2,6E-7)	

Poznámky:

- MVA = minimální významná aktivita.
- Výraz $1E-x$ znamená 10^{-x} (tj. např. $1E-3$ je 10^{-3} , tj. **0,001**)
- Na dalších odběrových místech nebyly pozitivní hodnoty naměřeny

Odhad dávky, kterou obyvatelé ČR obdrželi na základě příjmu jódu ^{131}I , činí přibližně $1 \mu\text{Bq/m}^3$ ve formě aerosolu a $5 \text{ } 1 \mu\text{Bq/m}^3$ v plynné formě po dobu 2 měsíců.[19]

Francouzský Institut pro ochranu před radiací a nukleární bezpečnost (IRSN) vydal 11. 4. 2017 zprávu ve, které uvádí, že zdrojem zvýšených aktivit ^{131}I byl

nehoda z 24. října 2016 na varném reaktoru v norském Haldenu. Během údržby byla provedena manipulace s poškozenou zkušební palivovou sestavou, při které unikly větší dávky ^{131}I do budovy reaktoru a následně do životního prostředí. Podle norských úřadů během incidentu unikly dávky v hodnotě přibližně 5% roční povolené dávky plyných výpustí ^{131}I pro dané zařízení. Jednalo se o dávku 160 MBq ^{131}I . [23]

2.5 Radiační ochrana v ČR

Požadavky na zajištění radiační ochrany při uvádění radionuklidů do životního prostředí jsou stanoveny vyhláškou SÚJB č. 422/2016 Sb. v platném znění o radiační ochraně §56.

Radiační ochranou se dle §2 odst. g zákona č. 263/2016 Sb. (Atomový zákon) rozumí systém technických a organizačních opatření k omezení ozáření fyzické osoby a k ochraně životního prostředí před účinky ionizujícího záření.

V případě optimalizace ozáření z výpustí je závazným dokumentem program monitorování výpustí. *„Monitorování výpustí do ovzduší a vodotečí zahrnuje jak soustavné bilanční měření všech radionuklidů, které závažně přispívají k ozáření obyvatelstva, tak i nepřetržité monitorování reprezentativních radionuklidů, umožňující rychle signalizovat odchylky od normálního provozu.“* [7]

Řízené vypouštění radionuklidů do životního prostředí je možné pouze za splnění podmínky, že u příslušné kritické skupiny obyvatel nepřekročí roční efektivní dávky v důsledku plyných výpustí do ovzduší hodnotu 200 μSv za rok a v případě kapalných výpustí do hydrosféry hodnotu 50 μSv za rok. [21]
„V Limitách a podmínkách bezpečného provozu a monitorovacích programech jsou však stanoveny podstatně nižší hodnoty, tzv. autorizované limity, které byly na základě modelování na kritické skupiny stanoveny orgánem státního dozoru takto:“ [7]

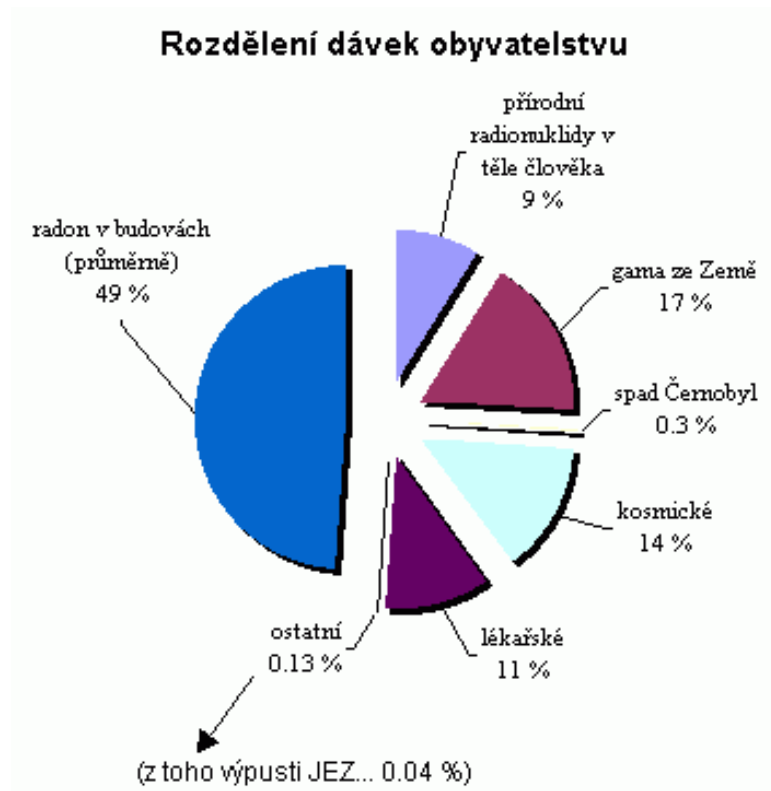
Tabulka 7 Autorizované limity pro JE [7]

JE	kapalné výpusti	plynné výpusti
Dukovany	6 $\mu\text{Sv/rok}$	40 $\mu\text{Sv/rok}$
Temelín	3 $\mu\text{Sv/rok}$	40 $\mu\text{Sv/rok}$

Aktivity radionuklidů v ovzduší se zjišťují pomocí sítě měřících míst kontaminace ovzduší. Tato síť je sloučením teritoriální sítě, která se skládá z 10 měřících míst spravovaných Státním úřadem pro jadernou bezpečnost (SÚJB), Státním ústavem radiační ochrany (SÚRO) a Českým hydrometeorologickým ústavem (ČHMÚ), a z lokální sítě kterou tvoří dvě sítě v okolí jaderných elektráren Temelín (7 měřících míst) a Dukovany (6 měřících míst). Účelem těchto sítí je spolu se sítí včasného zjištění monitorovat i malé kvalitativní a kvantitativní změny obsahu umělých radionuklidů v atmosféře a sledovat dlouhodobé časové průběhy, na jejichž základě lze odhadnout radiační zátěž obyvatelstva z inhalace. Například v březnu-květnu 2011 byl naměřen ^{131}I po jaderné havárii v Japonské Fukušimě. [19]

2.5.1 Radiační zátěž

Člověk je neustále vystaven malým dávkám záření z přírodních zdrojů. Uměle vytvořené radionuklidy produkované v jaderných elektrárnách a vypouštěné do životního prostředí nepatrně přispívají k celkovému ozáření člověka.



Obrázek 12 Radiační zátěž obyvatel [19]

2.5.1.1 Příspěvek JE Temelín

Příspěvek provozu Jaderné elektrárny Temelín k radiační zátěži obyvatelstva v okolí ČEZ-ETE nelze přímým měřením stanovit.

Prakticky jediný možný způsob stanovení příspěvku radiační zátěže obyvatelstva v okolí z provozu ČEZ-ETE je stanovení bilancí (aktivit) plyných a kapalných výpustí a stanovení individuálních efektivních dávek (součtu efektivní dávky ze zevního ozáření a úvazků efektivní dávky z vnitřního ozáření) jedince kritické skupiny obyvatelstva autorizovaným postupem.[11]

„Výpusti radioaktivních látek do ovzduší z ČEZ-ETE způsobily nejvyšší úvazek individuální efektivní dávky (IED) za rok 2016 v osídlené zóně ve vzdálenosti 3 - 5 km východně od Jaderné elektrárny Temelín a to hodnotou IED: 1,435E-08 Sv.“ [11]

Tabulka 8 Příspěvek I-131 k úvazku efektivní dávky z plyných výpustí za rok 2016 [11]

Radionuklid	A [GBq]	Čerpání E(50) v Sv	Příspěvek k E(50) za rok 2016
¹³¹ I	0,02820	3,3555E-11	0,03%

„Výpusti radioaktivních látek do vodotečí z ČEZ-ETE způsobily nejvyšší úvazek individuální efektivní dávky v osídlené zóně ve vzdálenosti 5 - 7 km severně od Jaderné elektrárny Temelín a to hodnotou IED: $6,470E-07$ Sv.“ [11]

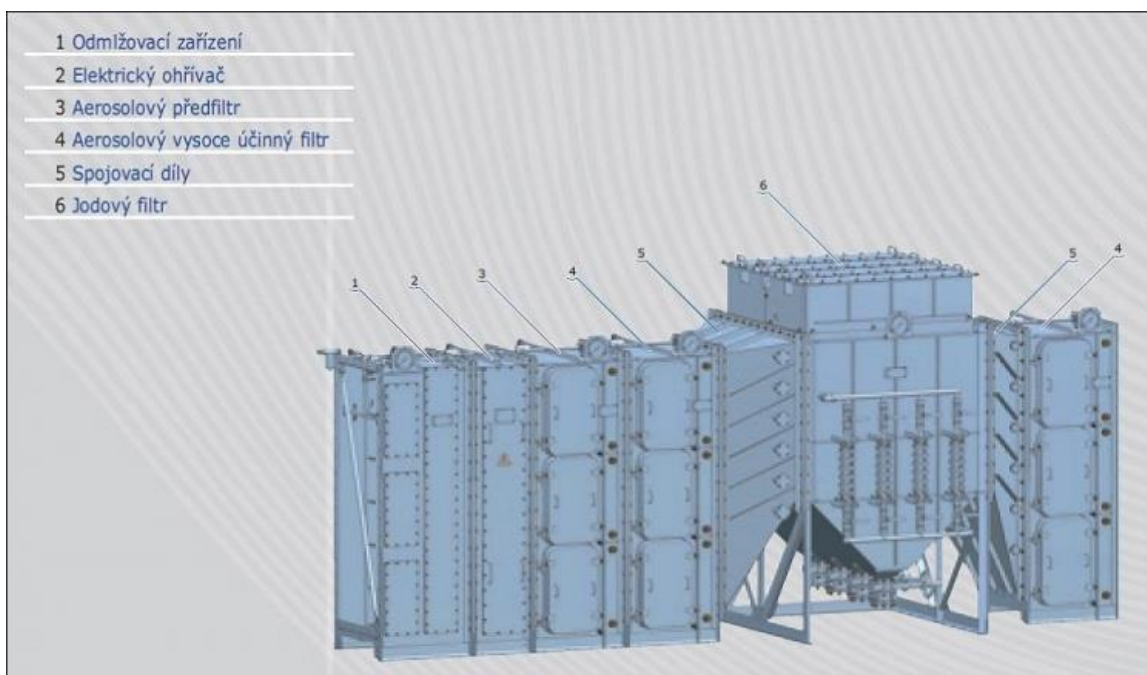
Tabulka 9 Příspěvek I-131 k úvazku efektivní dávky z kapalných výpustí za rok 2016 [11]

Radionuklid	A [MBq]	Čerpání E(50) v Sv	Příspěvek k E(50) za rok 2016
¹³¹ I	1,4678502	1,17722E-10	6,17%

2.5.2 Technická opatření k zamezení uniku jódu za normálního provozu

Za normálního provozu jsou aktivity vypouštěného radiojódu do životního prostředí redukovány pomocí filtračních zařízení určených k zachytávání aerosolů a jódu ve ventilačních systémech jaderné elektrárny. Filtrační zařízení se buduje ve formě stavebnice, což umožňuje kombinovat jednotlivé sestavné části podle požadavků na kvalitu filtrace a podle druhu a koncentrace vzduchem unášených nečistot a příměsí. [11, 24]

Základní sestava filtračního zařízení se skládá z vysoce účinných filtrů k zachytávání pevných popřípadě i kapalných aerosolů, jodových filtrů k zachytávání radioaktivního jódu a jeho sloučenin, odmlžovacích filtrů k zachytávání vodní mlhy a kapek a elektrických ohříváčů vzduchu pro ohřev filtrovaného vzduchu za účelem snížení jeho relativní vlhkosti. [11, 24]



Obrázek 13 Ukázka filtrační sestavy [24]

Účinnost zachytávání radioaktivních aerosolů je min. 99,95 %. Účinnost zachytávání organických sloučenin je radioaktivního jódu je min. 99 % na počátku životnosti filtru a 90% na konci.[11, 24]

Filtrační zařízení je vyprojektováno tak aby bylo schopno plnit svou funkci i v průběhu havárie. Filtrační jednotky umístěné v hermetických prostorách jaderné elektrárny odolávají trvale teplotám 100°C a po dobu minimálně 10 hodin teplotám do 150°C včetně. Filtrační jednotky určené do ostatních prostor jaderné elektrárny vykazují trvalou odolnost teplotě 80°C a proti 100% relativní vlhkosti vzduchu.[11, 24]

Za normálního provozu by zařízení mělo vydržet v provozu na jednu sadu filtračních elementů nejméně 10 000 hodin. Celková životnost zařízení je 30 let s výjimkou výměnných funkčních elementů, jejichž životnost závisí na provozních podmínkách.[11, 24]

2.5.3 Technická opatření k zamezení úniku jódu při závažné havárii

V případě havárie s porušením tlakové nádoby reaktoru, tedy narušením hermetičnosti systému, uniká do okolního prostoru velké množství štěpných produktů jódu v podobě par, plynů a aerosolu. Snížení uniku štěpných produktů lze docílit pomocí „vymývání“ štěpných produktů jódu z atmosféry pomocí rozprašování vody.

Plynný jod se vstřebává do kapaliny na základě procesu prosté difuze. Aerosolové částice jódu se díky silnému radičnímu poli dekomponují na plynný nestálý jod I₂. Navíc jsou aerosolové částice snáze rozpouštěny do roztoku než plynné nestálé formy jodu. Proto je možné díky rozprašování vody zachytit jodové částice jak v plynné formě, tak ve formě aerosolu. V případě užití čisté vody (pH 7) je jod zachytáván převážně v elementární formě I₂ a jen v malé míře, navíc je možné že se jod z vody uvolní zpět do atmosféry v plynné formě. [25]

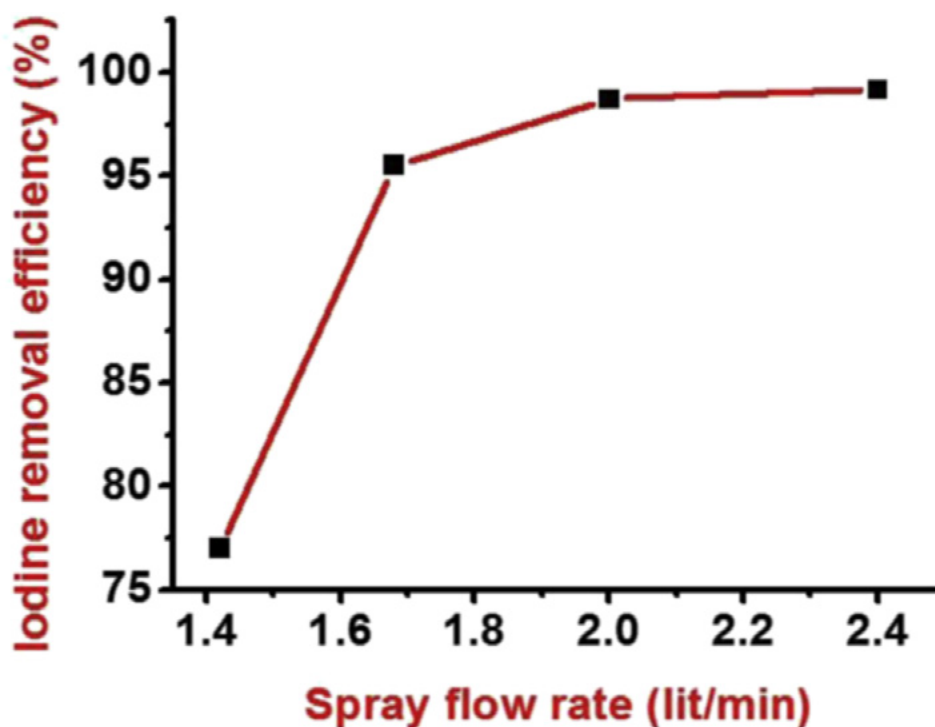
Pro zvýšení zachytu jódových částic do kopek vody a pro budoucí uskladnění, musí být těkavé částice jodu konvertovány do stabilní netěkavé formy I⁻. Pro konverzi zachyceného jodu I₂ na stabilní I⁻ se do roztoku používají různá chemická aditiva jako třeba hydroxid sodný (NaOH); [25]



Vhodně přidaný thiosíran sodný (Na₂S₂O₃) do základního roztoku vody a hydroxidu sodného konvertuje všechny jod na stabilní jodid I⁻ a zjednodušuje tak chemii vody. Touto cestou je významně zlepšena prevence re-volitalizace zachyceného jodu z roztoku. [25]



Další významným způsobem zvýšení efektivity systému rozprašování je zvýšení průtoku roztoku v systému. V případě experimentu provedeného pány Irfanem Younusenem a Man-Sung Yimem bylo dokázáno, že účinnost „vymývání“ jódu stoupla ze 77 % při průtoku 1,42 l/min na 99,15% při průtoku 2,4 l/min. (obr. 13) [25]



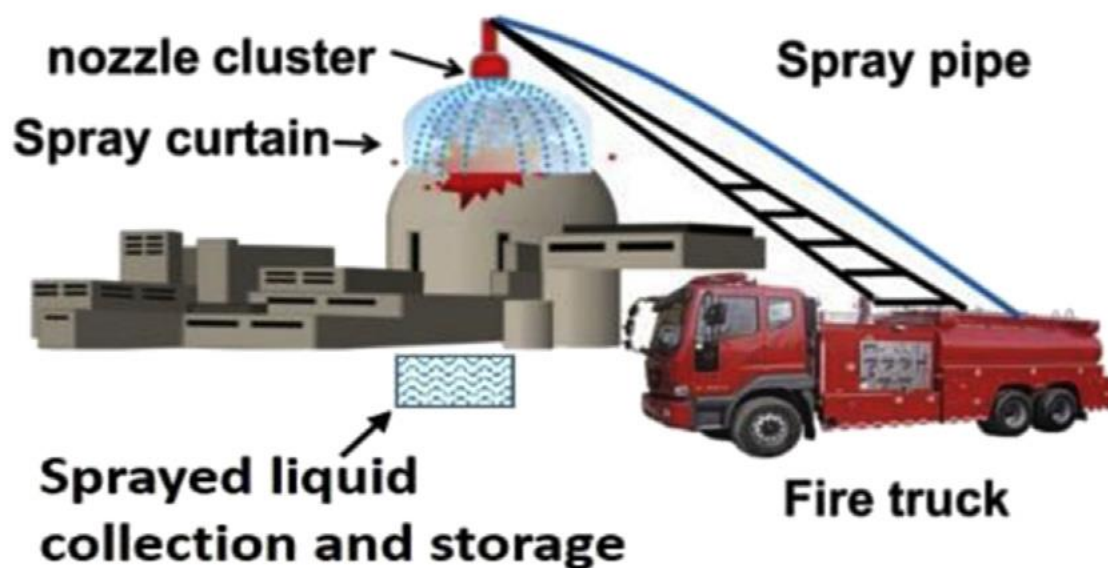
Obrázek 14 Účinnost rozprašovače v závislosti na průtoku roztoku [25]

Účinnost „vymývání“ stoupá se vzrůstajícím pH. Vyšší pH znamená vyšší koncentraci NaOH. Také znamená významnější redukci jódu na stabilní jodid. [25]

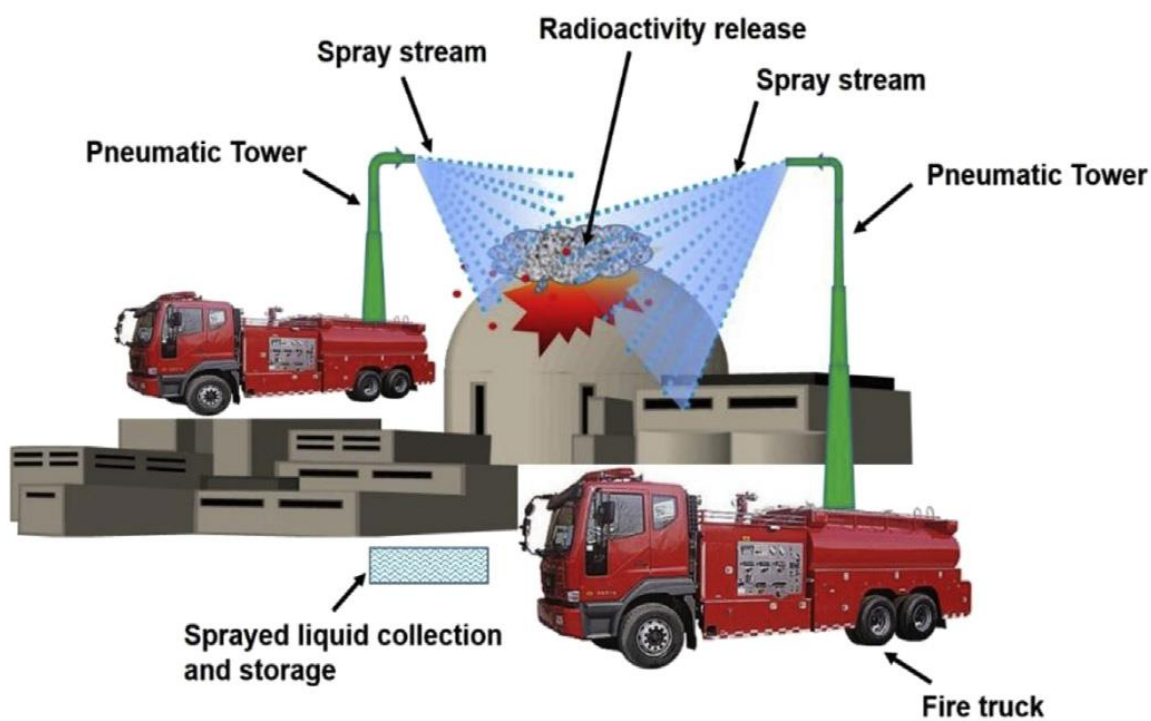
Systém rozprašování roztoku může být vybudován přímo v kontejnmentu reaktoru pro případ, že při havárii nedojde k poruše ochranné obálky. V případě že dojde k poruše ochranné obálky a štěpné produkty jódu unikají mimo kontejnment, existuje několik možností jak dopravit roztok nad místo unikajícího oblaku štěpných produktů. [25]

První možností je vybavit hasičský záchranný sbor podniku speciálně upravenými automobily pro tuto eventualitu. Může se jednat o automobilový jeřáb

s rozprašovací hlavicí(obr.15), nebo o speciálně upravenou cisternovou automobilovou stříkačku (CAS) (obr.16). [25]

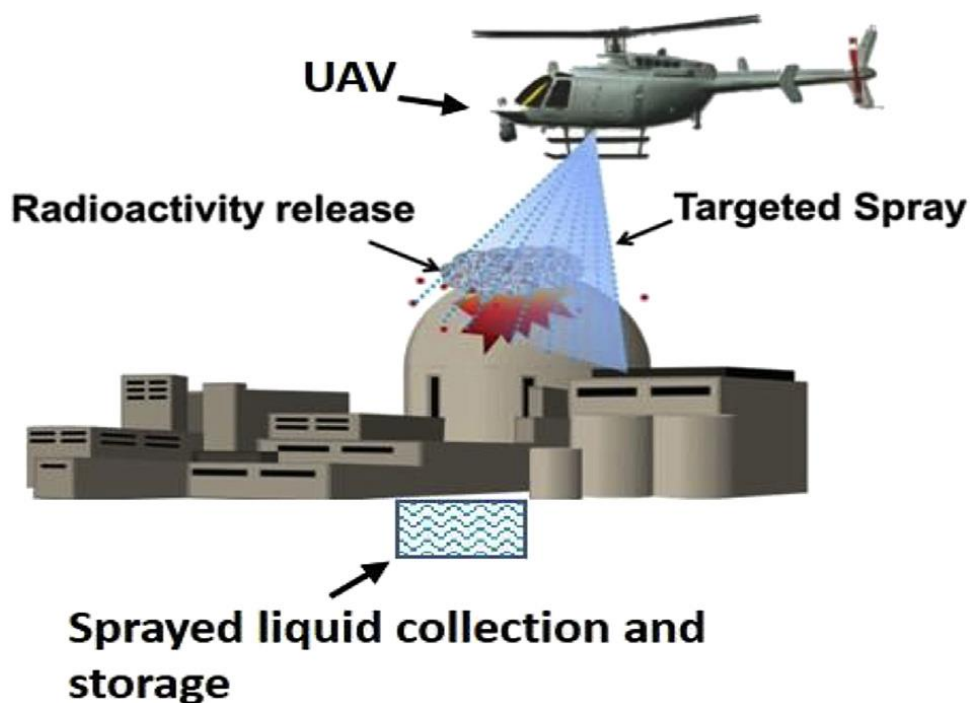


Obrázek 15 Příklad hasičského automobilu s rozprašovací hlavicí [25]



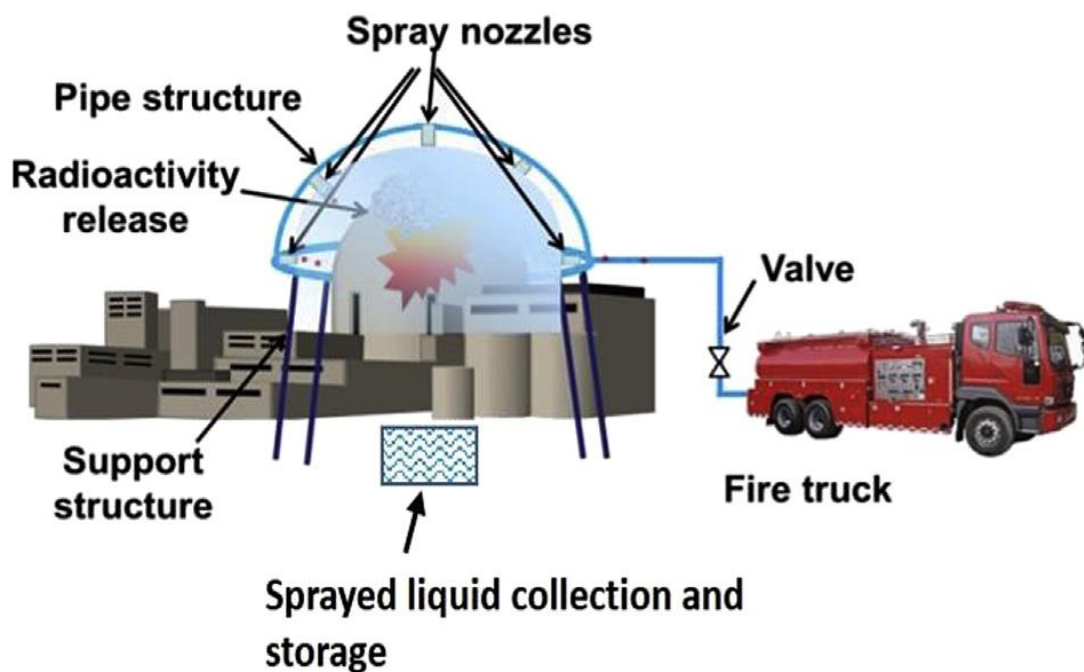
Obrázek 16 Příklad speciálně upravené CAS [25]

Při využívání hasičských automobilů k rozprašování roztoku je nezbytné, aby technika byla obsluhována přímo na místě zásahu, tudíž vzniká riziko nadměrného ozáření zasahujících hasičů. Proto dalším způsobem rozprašování je využití bezpilotních prostředků (dronů, balónů), jako nosných prostředků pro rozprašovací hlavici, které je možné ovládat z větší vzdálenosti, nebo naprogramovat na samostatnou činnost (obr a 17). [25]



Obrázek 17 Příklad použití bezpilotního prostředku [25]

Třetí možností je vybudování stacionárního systému potrubí a trysek kolem ochranné obálky. Tento systém může být uzpůsoben na připojení k hasičskému automobilu, který by do systému vháněl roztok (obr.18). Případně může být systém napojen na nádrž s roztokem a vybaven čidly, které by v případě havárie sami spustili rozprašování roztoku. [25]



Obrázek 18 Stacionární systém rozprašování napojený na CAS

2.5.4 Ochranná opatření

Jedná se o opatření na ochranu zdraví osob. Jejich účelem je vyloučit ozáření, které by způsobilo deterministické účinky záření, a na přijatelnou mez snížit riziko pozdních účinků záření.

Na ochranná opatření zavedená v České republice pamatuje v §104 zákona č. 263/2016. Sb. Atomový zákon. Ochranná opatření dělí z hlediska naléhavosti na neodkladná a následná (tab. 10).

Tabulka 10 Ochranná opatření dle zákona č. 263/2016. Sb. Atomový zákon

<p>Neodkladná opatření (dle §104 z.č. 263/2016 sb.)</p>	<p>Zejména</p> <ul style="list-style-type: none"> - Ukrytí, - Použití jódové profylaxe, - Evakuace.
---	--

<p>Následná opatření (dle §104 z.č. 263/2016 sb.)</p>	<p>Zejména</p> <ul style="list-style-type: none"> - přesídlení obyvatel, - omezení používání radionuklidem kontaminovaných potravin a vody, - omezení používání radionuklidem kontaminovaných krmiv.
---	---

2.5.5 Jódová profylaxe

Jodová profylaxe je nejvíce účinné preventivní opatření proti působení radioaktivního jodu. Jedná se o podání tablet stabilního jodidu draselného, který blokuje ukládání radiojodu do štítné žlázy. K podání stabilního jodu se přistoupí primárně v případě, kdy hlavní cestou kontaminace organismu bude inhalace. V případě ingesce je lepší, pokud možno, zajistit zdroje nekontaminované potravy, případně regulovat dávku radioaktivního izotopu jodu omezením konzumace kontaminovaných potravin. [9, 13]



Obrázek 19 balení jodové profylaxe pro jednu osobu; zdroj: vlastní

„Podání 50-300 mg stabilního jodu ve vhodné formě, např. tablet jodidu draselného (KI), poskytuje téměř 100% ochranu, uskuteční li se 1 až 6 hodin před očekávanou dobou příjmu. Podá-li se KI až po příjmu radioaktivního jodu, účinnost se snižuje s prodlužováním intervalu a dosáhne méně než 50 % při podání profylaktické dávky až 6 hodin po příjmu kontaminantu.“ [13]

Tabulka 11 Dávka jódové profylaxe dle věku [13]

Věková kategorie	Dávka I v mg	Počet 65 mg tablet
Novorozenci do 1 měsíce	16 mg	¼ tablety
Děti v rozmezí 1 měsíc až 3 roky	32 mg	½ tablety
Děti ve věku 3-12 let	65 mg	1 tableta
Dospělí do 45 let Včetně těhotných žen a kojících matek	130 mg	2 tablety
Dospělí nad 45 let ¹⁾	X	X

¹⁾ v případě této věkové kategorie se opatření v případě prokázání přecitlivělosti na jódové přípravky neprovede

Mimo kategorii dospělých nad 45 let věku se jódová profylaxe nebude aplikovat u lidí s prokázanou přecitlivělostí na jódové přípravky a s poruchou štítné žlázy. Podrobné informace jsou uvedeny v příbalové informaci (viz. Příloha 1 a 2).

Novorozenci, kteří podstoupili jódovou profylaxi, by měli po určité době podstoupit lékařské vyšetření štítné žlázy z důvodu vyloučení možné hyperfunkce štítné žlázy. Stejně tak by na toto vyšetření měli jít novorozenci, kteří se narodili po tom, co jejich matky aplikovali jódovou profylaxi v období třetího trimestru gravidity. [13]

3 CÍL PRÁCE

Cílem práce bylo nahlédnout do složité chemie radioaktivního jódu v jaderné elektrárně. Popsat fyzikálně-chemické vlastnosti různých forem radioaktivního jódu ve výpustech jaderné elektrárny. Analyzovat jejich chování při šíření atmosférou a zhodnotit v úvahu připadající expoziční cesty ve vztahu k humánním radiologickým rizikům. Dále bylo cílem popsat ochranná opatření ve vztahu k radioaktivnímu jódu a analyzovat jejich dostatečnost.

4 METODIKA

Základem práce byla literární rešerše. K vypracování této práce byly využity převážně informace čerpané ze zahraničních výzkumů na poli radioaktivního jódu, dále pak knižní zdroje od tuzemských autorů, aktuální platná legislativa České republiky, konkrétně zákon č. 263/2016. Sb. Atomový zákon, a v neposlední řadě interní dokumenty JE Temelín, webové stránky Státního úřadu pro jadernou bezpečnost Státního ústavu radiační ochrany, v.v.i., a další.

5 VÝSLEDKY

Za normálního stavu se jód v jaderném zařízení vyskytuje v mnoha formách, které se mění v závislosti na teplotě, stupni pH a redoxním potenciálu. V průběhu veškerých operací je majoritní formou jódoví aniont I⁻. Další významnou formou jódu jsou jodičnany (IO₃⁻), jejichž koncentrace narůstá postupně během redukce teploty v průběhu odstávky, když je překročena určitá prahová hodnota redoxního potenciálu Eh. Dalšími formami jódu v chladicím systému jsou metalické jódové soli CsI, AgI, InI, CdI₂, molekulární jód a kyselina jódová. Podíly různých sloučenin závisí na aktuálním provozním stavu jaderného zařízení. Formy jódu, které projdou přes systém vysoce účinných jodových filtrů do výpustí, se nepodařilo dohledat, lze však předpokládat že po opuštění chladicího okruhu, jód, v životním prostředí, začne utvářet obdobné vazby jako při úniku z důvodu havárie.

Během havárie uniká jód do atmosféry v podobě molekulárního jódu I₂, jodových solí nebo různých druhů organických jodů. Organické jódové soli a molekulární jód mohou existovat ve formě plynů nebo aerosolů, jódové soli mohou existovat pouze ve formě aerosolu. Po úniku do atmosféry radioaktivní jód velmi rychle utváří sloučeniny jodmethanu (CH₃I) a jodidu cesného (CsI).

Z atmosféry se jód dostává na povrch ve formě spadu nebo díky vazbě na vodní kapky deště. Díky vysoké těkavosti některých forem jódu (I₂, HIO) se jód deponovaný ve vodě může opět dostat do atmosféry. Stejně tak jód usazený na půdním povrchu může být díky zemědělské či stavební činnosti opět rozprášen do atmosféry.

Vlastnost jódu vázat se na vodu lze využít při redukci unikajícího jódu z havarovaného reaktoru pomocí rozprašování vody. Pro zvýšení účinnosti zachytu jodových částic je vhodné do roztoku přidat chemická aditiva v podobě hydroxidu sodného (NaOH) a thiosíranu sodného (Na₂S₂O₃). Tato aditiva navíc zabraňují opětovnému těkání jódu z kapaliny a tak umožňují její skladování, aniž by docházelo ke kontaminaci životního prostředí.

Hlavními cestami kontaminace lidského organismu radiojódem jsou inhalace jódu z kontaminovaného ovzduší, a ingesce jódu obsaženého v kontaminované vodě a potravinách (hlavně kravské mléko). Po vstupu do organismu je radiojód vstřebáván do krve, kterou je transportován po těle. Cílovým orgánem radiojodu je štítná žláza u které může vyvolat dysfunkci případně karcinom štítné žlázy. Zdravotní dopady závisí od přijaté dávky a schopností metabolismu organismu.

Cíleným ochranným opatřením před nežádoucími účinky radiojodu je jódová profylaxe, která může mít při včasné podání až 100% účinnost. Dalšími ochrannými opatřeními jsou zákaz či omezení konzumace kontaminovaných potravin, ukrytí, evakuace či přesídlení.

6 DISKUZE

V jaderné elektrárně vznikají mnohé izotopy jódu, z nichž dva mohou mít významnější vliv na zdraví lidí. Jsou jimi izotopy ^{129}I a ^{131}I . Jód 129 je izotop s dlouhým poločasem přeměny, tak dlouhým že se bude rozkládat ještě dlouho po tom, co jaderná elektrárna dojde konce své životnosti. Izotop ^{129}I je přirozeně se vyskytující izotop. Jaderné elektrárny k dávce přirozeně se vyskytujícího izotopu ^{129}I přispívá jen nepatrně, tudíž není třeba mít z tohoto izotopu nějak zvlášť velké obavy. Navíc i přes svůj dlouhý poločas rozpadu našel uplatnění v medicíně, například ke kalibraci detekčních systémů.

Druhý významný izotop, jód 131, je považován za jeden z nejvýznamnějších izotopů z pohledu radiační ochrany v jaderných elektrárnách. I tento však není pouze strašákem v oblasti zdravotních rizik. Izotop jódu ^{131}I , je využívám jako radiofarmakum v medicíně k vyšetření štítné žlázy nebo jako látka ke značení albuminu pro vyšetření mozku či značení hippuranu k vyšetření ledvin.

Izotopem ^{123}I se značí radiofarmaka pro scintigrafii štítné žlázy nebo receptorových systému v mozku.

Lidský organizmus je schopen se surčitými dávkami z těchto izotopů vypořádat bez závažných zdravotních následků.

V rámci provozu jaderných elektráren by mělo být jedním z hlavních cílů omezení vypouštění radioaktivního izotopu jódu pod mez maximální přijatelné dávky jodu pro organizmus. Systém omezování uvolněných aktivit funguje na principu optimalizace radiační ochrany a vede k dosažení a udržení takové úrovně radiační ochrany, aby ozáření fyzické osoby a životního prostředí bylo tak nízké, jak jen lze rozumně dosáhnout při uvážení všech hospodářských a společenských hledisek (§3 písm.c zák.č. 263/2016 sb.). Tohoto je docíleno zejména díky filtračním systémům s účinností zachytu jodových částic od 99 % na začátku životnosti filtrů do 95 % účinnosti na konci životnosti.

Plynné výpusti z JE Temelín po filtraci stále obsahují nepatrné množství radioaktivního jódu, jeho podíl je však v řádu setin procent z celkové aktivity vypouštěných radionuklidů. Z čehož vyplývá, že filtrační systémy jódu jsou na vysoké úrovni a štěpné produkty jódu tak k radiační zátěži obyvatelstva přispívají v zanedbatelných dávkách.

V případě že bychom se chtěli v podmínkách normálního provozu zbavit i těchto zanedbatelných dávek, tak bychom museli ještě více omezit únik štěpných produktů jódu nebo úniku úplně zamezit.

K omezení úniku štěpných produktů jódu do životního prostředí by bylo třeba buď to přijít na ještě účinnější systém filtrace, nebo omezit samotný únik jódu z palivového elementu. To přichází v úvahu jen za předpoklad, že lidstvo dokáže přijít na výrobu slitiny, která bude mít lepší vlastnosti pro podmínky reaktoru než má, v současné době užívaná, slitina zircolay. Přestože je tento materiál navržený pro odolávání náročným podmínkám aktivní zóny reaktoru, i u něj po čase dochází k degradaci. V důsledku degradace materiálu v něm vznikají mikrotrhlíky, kterými se štěpné produkty jódu dostávají ven do primárního chladicího okruhu. Kdyby se podařilo vytvořit slitinu kovů s lepšími vlastnostmi, tedy s vyšší teplotní a korozní odolností, než má slitina zircolay, mohl by se snížit podíl unikajících štěpných produktů jódu mimo palivový element. V případě že by nová slitina vydržela neporušená po celou dobu kampaně, mohlo by to znamenat úplně zamezení úniku štěpných produktů z palivového elementu do chladiva primárního chladicího okruhu, a tím zastavení vypouštění jódu do životního prostředí.

Kapalné výpusti z JE Temelín se, i po průchodu filtrací, nějaký čas zdržují v kontrolních nádržích. V těchto nádržích jsou kapalné výpusti zdržovány až do prokázání toho, že aktivity přítomných radionuklidů jsou na přijatelné úrovni. Poté jsou vypuštěny do sběrné jímky odpadních vod, odkud se vypouští do životního prostředí.

Celková dávka aktivity, kterou obyvatelstvo přijme za rok, není ani z jedné desetiny procenta tvořena výpustěmi z jaderných elektráren. A z tohoto nepatrného množství není ani 10 % tvořeno dávkou radioaktivního jodu.

Pro případ havárie reaktoru jsou reaktor i s primárním chladícím okruhem a dalšími komponentami hermeticky uzavřeny v ochranné obálce, kontejnmentu. V kontejnmentu se budují systémy rozprašovačů, které v případě havárie mají za úkol rozprašovat v prostoru kontejnmentu kapalinu, a tak chladit vzniklou paroplynnou směs a zároveň vymývat unikající štěpné produkty z atmosféry kontejnmentu.

Rozprašování kapaliny pro vymývání štěpných produktů z atmosféry lze využít i v případě že došlo k narušení hermetičnosti kontejnmentu a štěpné produkty unikají do okolního prostředí. Pro tento případ je možné vybudovat statický systém rozprašovačů vně kontejnmentu, nebo vybavit jednotku hasičů předurčených pro zásah na jaderné elektrárně, technikou, která statický systém nahradí.

V případě že dojde k úniku většího množství radioaktivního jódu do životního prostředí, je nutné zvážit vhodná ochranná opatření. Primárním ochranným opatřením je zabránit kontaminaci organismu radioaktivním jódem. Kontaminaci lze zabránit několika cestami. Cestou evakuace, kdy obyvatelé žijící v okolí jaderného zařízení opustí své domovy a tak zabrání inhalaci radioaktivního jódu z kontaminovaného vzduchu. Cestou zákazu nebo omezení konzumace vybraných potravin, které vykazují zvýšené aktivity radioaktivního jódu (kravské mléko, vejčeka,..). Nebo cestou jódové profylaxe, jejíž principem není zabránit kontaktu s radioaktivním jódem, ale zamezit jeho akumulaci v organismu.

Jódová profylaxe spočívá v obsazení volného místa v organismu stabilním jódem tak že pro radioaktivní jód už volná místa nezbydou a tak jej tělo vyloučí.

Jako profylaktická látka se používá jodid draselný v podobě tablet. Jeho podání by mělo probíhat na výzvu odpovědných orgánů a podle pravidel jódové profylaxe pro danou věkovou skupinu.

Jako vhodné se jeví připravit zdravotnická zařízení v okolí jaderné elektrárny pro případ příjmu velkého počtu osob zasažených jadernou havárií. Přitom je ovšem nutno poučit se z havárie JE Fukušima. Zde mělo Japonsko vytvořeno propracovaný systém zdravotnických zařízení připravených na eventualitu jaderné havárie v elektrárně Fukušima, bohužel v oblasti, která musela být v roce 2011 evakuována.

Kromě vhodného umístění zdravotnických zařízení přinesla jaderná havárie ve Fukušimě ještě jeden zajímavý poznatek. Nobuya Unno, Hisanori Minakami, Takahiko Kubo a kol. provedli výzkum na vliv jaderné havárie Fukušima na obsah radiojodu ^{131}I v lidském mateřském mléce, který uveřejnili v květnu 2012 v *The Journal of Obstetrics and Gynecology Research* pod názvem *Effect of the Fukushima nuclear power plant accident on radioiodine (^{131}I) content in human breast milk*. V tomto výzkumu uvádějí, že není překvapením, že se u žen vyskytly relativně malé koncentrace ^{131}I v mateřském mléce neboť japonská strava obsahuje velké množství jódu. Na základě tohoto poznatku lze lidem žijícím v blízkém okolí jaderné elektrárny doporučit zvýšení příjmu stabilního jódu v potravě.

7 ZÁVĚR

Fyzikální podmínky primárního okruhu JE se v závislosti na provozních stavech různě mění. Teplota, pH, redoxní potenciál a další parametry ovlivňující chemii jódu v průběhu času kolísají a taky ovlivňují formy radioaktivního jódu. Radioaktivní jód proto může být v primárním okruhu přítomen jak v elementární formě, tak ve formě mnoha sloučenin. Nejčastější sloučeniny jódu vznikají s kovovými prvky cesia, rubidia nebo kadmia.

Do životního prostředí jód uniká v podobě elementárního jódu, jódových solí a organických jódu. V životním prostředí takřka okamžitě vstupuje do množství nových interakcí za vzniku nových sloučenin.

Za normálního provozu jaderně-energetického zařízení není třeba mít obavy z kontaminace prostředí nadměrnými hodnotami radioaktivního jódu. V případě nehody nebo havárie je nezbytné dbát pokynů odpovědných orgánů, obzvláště co se týče pokynu k požití jodové profylaxe, neboť její včasné užití může úplně zamezit případným zdravotním komplikacím.

V rámci zásahu na havárii jaderně-energetického zařízení, při kterém unikají štěpné produkty jódu mimo objekt ochranné obálky, je vodné unikající oblak štěpných produktů zkrápět vodou s přidanými aditivy hydroxidu sodného a thiosíranu sodného a tak rapidně snížit koncentraci uniklého jódu mimo objekt elektrárny.

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

AaŠP – Aktivační a štěpné produkty

CAS – Cisternová automobilová stříkačka

JE – Jaderná elektrárna

9 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] <http://www.astronuklfyzika.cz/JadRadFyzika4.htm>
- [2] Housecroft, C.E., Sharpe, A.G., *Inorganic chemistry* [third edition], 2008
Harlow, Pearson Education Limited, ISBN 978-0-13-175553-6
- [3] Campbell, N.A., Reece, J.B., *Biologie*, 2008, Brno, Computer Press, a.s., ISBN
80-251-1178-4
- [4] Tigeras, A., Bachet, M., Catalette, H. & Simoni, E. 2011, "PWR iodine
*speciation and behaviour under normal primary coolant conditions: An analysis of
thermodynamic calculations, sensibility evaluations and NPP feedback*", Progress
in Nuclear Energy, vol. 53, no. 5, pp. 504-515.
- [5] HÁLA, J. *Radioaktivní izotopy*, 2013, Tišnov: Sursum, , ISBN 978-80-7323-
248-1
- [6] Ojovan, M.I. & Lee, W.E. 2014;2013;, *An Introduction to Nuclear Waste
Immobilisation*, Second;2;2nd; edn, Elsevier, GB.
- [7] [https://www.sujb.cz/jaderna-bezpecnost/informace-o-typech-
reaktoru/typy-reaktoru/](https://www.sujb.cz/jaderna-bezpecnost/informace-o-typech-reaktoru/typy-reaktoru/)
- [8] Matějka, K. *Vyhořelé jaderné palivo* [svazek 5], 1996, Praha : Ministerstvo
životního prostředí ČR, ISBN 80-7078-352-4
- [9] Dreger, S., Pfinder, M., Christianson, L., Lhachimi, S.K. & Zeeb, H. 2015,
*"The effects of iodine blocking following nuclear accidents on thyroid cancer,
hypothyroidism, and benign thyroid nodules: design of a systematic review"*,
Systematic reviews, vol. 4, no. 1, pp. 126.
- [10] SKLANKA, L. HERALTOVÁ, L. *Provozní reaktorová fyzika*. 2016, Praha:
Česká technika – nakladatelství ČVUT, ISBN 978-80-01-05901-2
- [11] Interní dokumenty JE Temelín
- [12] Kaňkovský, J. *Návrh kritérií plynové netěsnosti pokrytí jaderného paliva*,
Bakalářská práce. 2005 České Budějovice,

- [13] KLENER, V. *Principy a praxe radiační ochrany*. [1. vyd.]. 2000, Praha: Azin CZ. ISBN 80-238-3703-6.
- [14] HÁLA, Jiří. *Radioaktivita, ionizující záření, jaderná energie*. 1998, Brno: Konvoj. ISBN 80-85615-56-8.
- [15] Girault, N., Fiche, C., Bujan, A. & Dienstbier, J. 2009, "*Towards a better understanding of iodine chemistry in RCS of nuclear reactors*", Nuclear Engineering and Design, vol. 239, no. 6, pp. 1162-1170.
- [16] Lebel, L.S., Dickson, R.S. & Glowa, G.A. 2016, "*Radioiodine in the atmosphere after the Fukushima Dai-ichi nuclear accident*", Journal of environmental radioactivity, vol. 151 Pt 1, pp. 82-93.
- [17] Yang, W. & Guo, L. 2012, "*Depositional fluxes and residence time of atmospheric radioiodine (131I) from the Fukushima accident*", Journal of environmental radioactivity, vol. 113, pp. 32-36.
- [18] Yamaguchi, N., Eguchi, S., Fujiwara, H., Hayashi, K. & Tsukada, H. 2012, "*Radiocesium and radioiodine in soil particles agitated by agricultural practices: field observation after the Fukushima nuclear accident*", The Science of the total environment, vol. 425, pp. 128.
- [19] <https://www.suro.cz/cz/rms/ovzdusi>
- [20] Hasegawa, A., Tanigawa, K., Ohtsuru, A., Yabe, H., Maeda, M., Shigemura, J., Ohira, T., Tominaga, T., Akashi, M., Hirohashi, N., Ishikawa, T., Kamiya, K., Shibuya, K., Yamashita, S. & Chhem, R .K. 2015, "*Health effects of radiation and other health problems in the aftermath of nuclear accidents, with an emphasis on Fukushima*", The Lancet, vol. 386, no. 9992, pp. 479-488.
- [21] J Q McNally, R., Wakeford, R., W James, P., O Basta, N., D Alston, R., S Pearce, M., T Elliott, A., 2016 „*A geographical study of thyroid cancer incidence in north-west England following the Windscale nuclear reactor fire of 1957*“, Journal of Radiological Protection, vol. 36, no. 4
- [22] Unno, N., Minakami, H., Kubo, T., Fujimori, K., Ishiwata, I., Terada, H., Saito, S., Yamaguchi, I., Kunugita, N., Nakai, A. & Yoshimura, Y. 2012,

"Effect of the Fukushima nuclear power plant accident on radioiodine (131I) content in human breast milk", Journal of Obstetrics and Gynaecology Research, vol. 38, no. 5, pp. 772-779.

- [23] http://www.irsn.fr/EN/newsroom/News/Pages/20170411_Radioactive-iodine-detected-early-2017-in-Europe-not-related-to-incident-of-October-2016-in-Halden-Norway.aspx
- [24] <http://www.zvvz.cz/zvvz-enven/produkty/filtracni-stanice.html>
- [25] Younus, I. & Yim, M. 2015, "*Out-containment mitigation of gaseous iodine by alkaline spray in severe accident situation*", Progress in Nuclear Energy, vol. 83, pp. 167-176.

10 SEZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKŮ

Obrázek 1 Cesty možného ozáření člověka [14].....	13
Obrázek 2 Příspěvek jednotlivých radionuklidů k celkové vypouštěné aktivitě z plyných výpustí JE Temelín za rok 2016 [11].....	21
Obrázek 3 Příspěvek jednotlivých radionuklidů aktivačních a štěpných produktů k jejich celkové vypouštěné aktivitě z kapalných výpustí JE Temelín za rok 2016 [11].....	22
Obrázek 4 Distribuce těkavých a netěkavých druhů jódu[4]	25
Obrázek 5 Hydrolytické reakce jódu[4]	27
Obrázek 6 Podíl jódu I2 závislý od teploty a Eh [4]	28
Obrázek 7 Depozice a koncentrace radiojódů I-131 v Japonsku po havárii v JE Fukushima Daiichi zdroj: http://enformable.com/2011/08/simulation-shows-iodine-and-caesium-may-have-reached-15-prefectures/	34
Obrázek 8 Lokace vybraných japonských měst s přibližným znázorněním vzdálenosti od JE Fukushima Daiichi [22]	35
Obrázek 9 Chronologické změny v aktivitách I131 v různých lokalitách Japonska [22].....	36
Obrázek 10 Potraviny s nejvyšší naměřenou koncentrací 131I (špenát, kravské mléko, vajíčka) [22]	36
Obrázek 11 Mapa naměřených hodnot 131I v Evropě ($\mu\text{Bq}/\text{m}^3$) [23]	37
Obrázek 12 Radiační zátěž obyvatel [19]	41
Obrázek 13 Ukázka filtrační sestavy [24].....	43
Obrázek 14 Účinnost rozprašovače v závislosti na průtoku roztoku [25]	45
Obrázek 15 Příklad hasičského automobilu s rozprašovací hlavicí [25].....	46
Obrázek 16 Příklad speciálně upravené CAS [25]	46
Obrázek 17 Příklad použití bezpilotního prostředku [25]	47
Obrázek 18 Stacionární systém rozprašování napojený na CAS	48
Obrázek 19 balení jodové profylaxe pro jednu osobu; zdroj: vlastní	49

11 SEZNAMU POUŽITÝCH TABULEK

Tabulka 1 Typy reaktorů [7].....	14
Tabulka 2 Izotopy jódu v JE [1, 13]	17
Tabulka 3 Druhy jódu v závislosti na oxidačním čísle [4].....	18
Tabulka 4 Rychlost depozice jednotlivých forem jódu [16]	31
Tabulka 5 Zhodnocení stupně radiační havárie dle aktivity I-131.....	31
Tabulka 6 Naměřená aktivita ¹³¹ I v ČR	38
Tabulka 7 Autorizované limity pro JE [7]	40
Tabulka 8 Příspěvek I-131 k úvazku efektivní dávky z plyných výpustí za rok 2016 [11].....	41
Tabulka 9 Příspěvek I-131 k úvazku efektivní dávky z kapalných výpustí za rok 2016 [11].....	42
Tabulka 10 Ochranná opatření dle zákona č. 263/2016. Sb. Atomový zákon	48
Tabulka 11 Dávka jódomové profylaxe dle věku [13]	50

12 SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 – Příbalová informace jodové profylaxe strana A ; zdroj: vlastní

Příbalová informace: informace pro uživatele

**JODID DRASELNÝ 65 mg
hameln
(Kalii iodidum)
tablety**

Přečtěte si pozorně tuto příbalovou informaci dříve, než začnete tento přípravek užívat, protože obsahuje pro Vás důležité údaje.

Vždy užívejte tento přípravek přesně v souladu s příbalovou informací nebo podle pokynů svého lékaře nebo lékárníka.

- Ponechte si příbalovou informaci pro případ, že si ji budete potřebovat přečíst znovu.
- Požádejte svého lékaře nebo lékárníka, pokud potřebujete další informace nebo radu.
- Pokud se u Vás vyskytne kterýkoli z nežádoucích účinků, sdělte to svému lékaři nebo lékárníkovi. Stejně postupujte v případě jakýchkoli nežádoucích účinků, které nejsou uvedeny v této příbalové informaci.

Co naleznete v této příbalové informaci

1. Co je Jodid draselný 65 mg hameln a k čemu se používá
2. Čemu musíte věnovat pozornost, než začnete Jodid draselný 65 mg hameln užívat
3. Jak se Jodid draselný 65 mg hameln užívá
4. Možné nežádoucí účinky
5. Jak Jodid draselný 65 mg hameln uchovávat
6. Obsah balení a další informace

1. Co je Jodid draselný 65 mg hameln a k čemu se používá

Jodid draselný chrání štítnou žlázu. Podává se po radiační havárii k zabránění vychytávání radioaktivního jódu štítnou žlázou.

V případě vystavení radioaktivnímu jodu může jodid draselný zabránit poškození štítné žlázy tím, že se štítná žláza nasytí neradioaktivním jodem. Tím se zabrání příjmu radioaktivního jódu z kontaminovaného vzduchu, vody, mléka nebo potravy.

2. Čemu musíte věnovat pozornost, než začnete Jodid draselný 65 mg hameln užívat

Neužívejte Jodid draselný 65 mg hameln

- jestliže jste alergický(á) na jodid draselný nebo na kteroukoli další složku tohoto přípravku (uvedenou v bodě 6).
- jestliže trpíte nadměrnou činností štítné žlázy, která tvoří příliš velké množství hormonů štítné žlázy (hypertyreóza).
- jestliže máte určitou poruchu stěny krevních cév (vaskulitida spojená s nedostatečnou funkcí komplementu).
- jestliže máte autoimunitní onemocnění se svěděním a tvorbou puchýřů na kůži (Dühringova herpetiformní dermatitida).

Upozornění a opatření

Před užitím jodidu draselného se poraďte se svým lékařem, jestliže:

- máte problémy se štítnou žlázou
- máte zúžení dýchacích cest (způsobující dýchací obtíže). Užití přípravku Jodid draselný 65 mg hameln může tento stav zhoršit
- máte problémy s ledvinami
- máte problémy nebo se léčíte kvůli potížím s nadledvinami
- trpíte dehydratací (nedostatek vody v organismu) nebo křečemi v důsledku extrémního horka
- užíváte jakýkoliv léčivý přípravek uvedený v bodu „Další léčivé přípravky a Jodid draselný 65 mg hameln“

Děti

S dětmi ve věku několika týdnů je třeba co nejdříve po užití přípravku Jodid draselný 65 mg hameln navštívit lékaře, neboť je třeba pečlivě sledovat funkci jejich štítné žlázy.

Další léčivé přípravky a Jodid draselný 65 mg hameln

Informujte svého lékaře nebo lékárníka o všech lécích, které užíváte, které jste v nedávné době užíval(a) nebo které možná budete užívat. Zejména informujte lékaře, pokud užíváte:

- přípravky, které tlumí funkci štítné žlázy
- přípravky s obsahem chinidinu, kaptoprilu nebo enalaprilu
- kalium-šetřící diuretika (léky na odvodnění) jako amilorid nebo triamterén.

Užívání přípravku Jodid draselný 65 mg hameln může ovlivnit léčbu radioaktivním jodem a výsledky testů štítné žlázy.

Těhotenství a kojení

Jodová profylaxe (ochrana) se v případě radiační havárie s únikem radioaktivního jódu vykonává u všech osob včetně těhotných a kojících žen, nacházejících se v ohrožené oblasti. V případě, že jste těhotná nebo kojíte, můžete užít dvě dávky tohoto přípravku.

Ženy, které užily v posledních 3 měsících těhotenství tento přípravek, mají o tom informovat svého lékaře. U novorozence by se potom měla zkontrolovat funkce štítné žlázy.

Řízení dopravních prostředků a obsluha strojů

Jodid draselný 65 mg hameln nemá žádný nebo má zanedbatelný vliv na schopnost řídit nebo obsluhovat stroje.

3. Jak se Jodid draselný 65 mg hameln užívá

Tablety jódu se mohou užít pouze v případě jaderné havárie a po výzvě určenou autoritou např. z rádia nebo televize.

Tablety neužívejte na základě svého vlastního úsudku.

Vždy užívejte tento přípravek přesně v souladu s příbalovou informací nebo podle pokynů svého lékaře nebo lékárníka.

Příloha 2 - Příbalová informace jodové profylaxe strana B; zdroj: vlastní

Pokud si nejste jistý(á), poraďte se se svým lékařem nebo lékárníkem.

Doporučená dávka přípravku je:

Věk	Dávka	Množství jodidu draselného
novorozenci do 1 měsíce věku	čtvrtina tablety	16 mg
děti od 1 měsíce do 3 let	polovina tablety	32 mg
děti od 3 let do 12 let	1 tableta	65 mg
děti od 12 let a dospělí	2 tablety	130 mg

Tabletu lze rozdělit na stejné dávky.

Pro nejlepší možnou ochranu je nezbytné užít tablety co nejdříve po oznámení úniku radioaktivního jódu. Pozdější užití může mít za následek snížení účinnosti přípravku.

V případě delšího vystavení úniku radioaktivního jódu je nutné opakované podání.

Těhotné a kojící ženy mohou užít maximálně 2 dávky (tj. 2 krát 2 tablety). Poraďte se se svým lékařem, protože jodid draselný může ovlivnit funkci štítné žlázy Vašeho dítěte, což může vyžadovat vyšetření, popřípadě stanovení vhodné léčby.

Užívání tablet jódu se obvykle nedoporučuje osobám starším 40 let, jelikož v tomto věku již není zvýšené riziko rakoviny štítné žlázy způsobené expozicí radioaktivnímu jódu.

Použití u dětí

Před podáním dítětem se tableta může rozdrtit a smíchat s mlékem, vodou nebo džusem.

Děti do věku jednoho měsíce dostanou jenom jednu dávku a lékař by jim měl zkontrolovat funkci štítné žlázy.

Děti do 3 měsíců věku po užití jodidu draselného mají co nejdříve navštívit lékaře, aby bylo možné sledovat funkci jejich štítné žlázy.

Jestliže jste užil(a) více Jodidu draselného 65 mg hameln, než jste měl(a)

Užití vyšších dávek jodidu draselného, nezvyšuje ochranný účinek.

Jestliže jste Vy (nebo někdo jiný) užil(a) více tablet najednou, nebo si myslíte, že dítě náhodně spolko některou z tablet, okamžitě navštivte nejbližší nemocnici nebo lékaře.

4. Možné nežádoucí účinky

Podobně jako všechny léky, může mít i tento přípravek nežádoucí účinky, které se ale nemusí vyskytnout u každého.

Vzácné (mohou se vyskytnout u 1 z 1 000 osob):

- Přechodná kožní vyrážka.

Není známo (četnost nelze z dostupných údajů určit):

- Nadměrná činnost štítné žlázy (charakterizovaná ztrátou tělesné hmotnosti, zvýšením chuti k jídlu,

nesnášenlivost tepla a zvýšené pocení).

- Zvětšení štítné žlázy s nebo bez rozvoje myxedému (stav, u kterého se vyskytuje ztlustění kůže a tělních tkání, nejzřetelněji v obličejí).
- Může se vyskytnout hypersenzitivní reakce jako je otok slinných žláz, bolest hlavy, sípání nebo kašel a žaludeční nevolnost.

Dlouhodobé užívání může vést k depresi, nervozitě, nespavosti nebo impotenci.

Pokud se u Vás vyskytne kterýkoli z nežádoucích účinků, sdělte to svému lékaři nebo lékárníkovi. Stejně postupujte v případě jakýchkoli nežádoucích účinků, které nejsou uvedeny v této příbalové informaci.

5. Jak Jodid draselný 65 mg hameln uchovávat

Uchovávejte při teplotě do 25 °C. Uchovávejte blistry v krabičce, aby byl přípravek chráněn před světlem.

Uchovávejte tento přípravek mimo dohled a dosah dětí.

Nepoužívejte tento přípravek po uplynutí doby použitelnosti uvedené na obale. Doba použitelnosti se vztahuje k poslednímu dni uvedeného měsíce.

Nevyhazujte žádné léčivé přípravky do odpadních vod nebo domácího odpadu. Zeptejte se svého lékárníka, jak naložit s přípravky, které již nepoužíváte. Tato opatření pomáhají chránit životní prostředí.

6. Obsah balení a další informace

Co Jodid draselný 65 mg hameln obsahuje

Léčivou látkou je kalium jodidum 65 mg v jedné tabletě.

Pomocnými látkami jsou: mikrokrytalická celulóza, mastek, makrogol 6 000, koloidní bezvodý oxid křemičitý.

Jak Jodid draselný 65 mg hameln vypadá a co obsahuje toto balení

V přípravku: bílé až nažloutlé neobalené tablety, mírně mramorované, hladkého neporušeného povrchu s průměrem 12 mm, s křížovou dělicí rýhou na jedné straně.

Tabletu lze rozdělit na stejné dávky.

Tablety jsou baleny v bílém neprůhledném PVC/PVDC/Al blistru a v krabičce.

Balení obsahuje 4 tablety.

Držitel rozhodnutí o registraci a výrobce:

hameln rds a.s., Horná 36, Modra, Slovenská republika

Tato příbalová informace byla naposledy revidována

13.2.2013

56428

