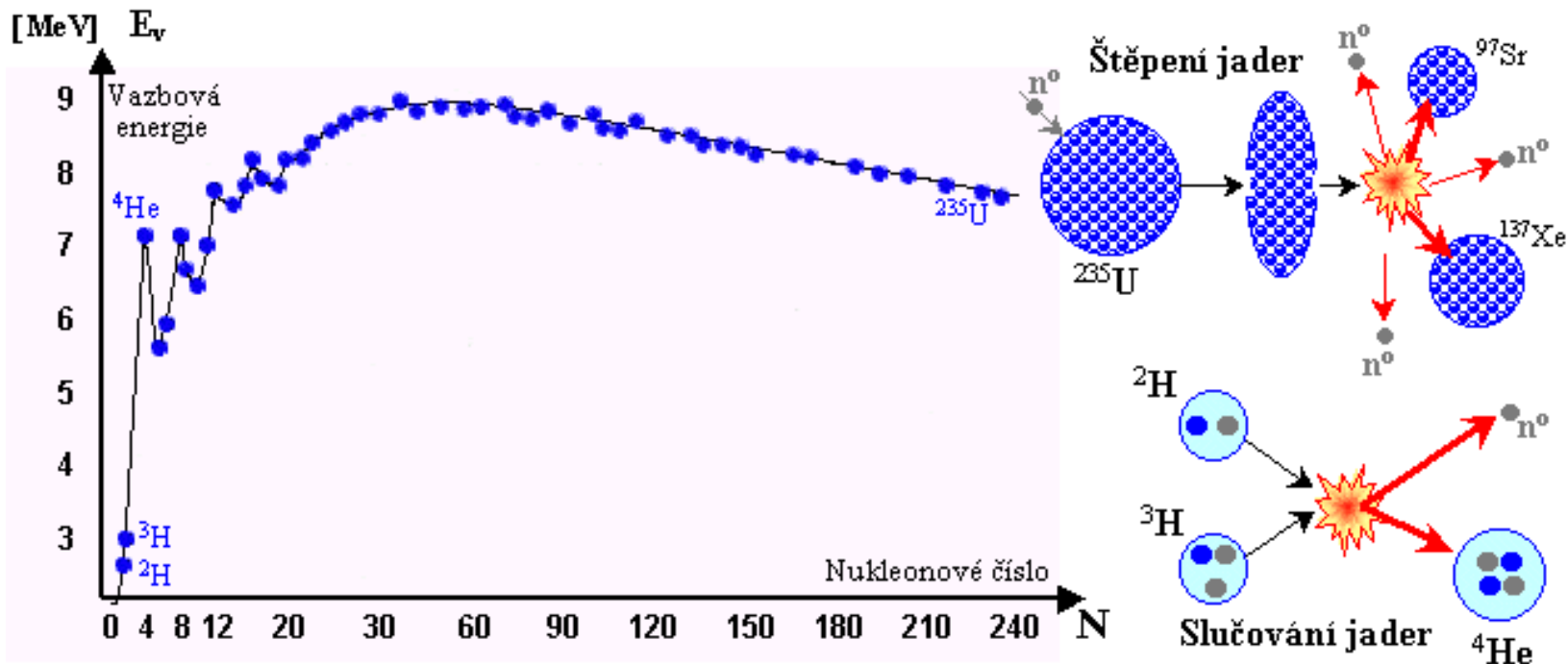


Radiační ochrana 3

Jaderná energie = energie uvolněná při přeměně radioaktivních jader

- nukleony jsou v atomových jádrech silně vázány jadernými silami, s čímž je spojena značná potenciální **vazbová energie** E_v .
- **vazbová energie** E_v je energie potřebná na úplné "rozebrání" jádra na jednotlivé nukleony, nebo obráceně energie která se uvolní při "složení" jádra z těchto nukleonů.
- celková vazbová energie jádra E_v roste s počtem nukleonů, avšak pro stabilitu jádra a energetickou bilanci při transmutacích jader je důležitější **střední vazbová energie připadající na jeden nukleon: E_v/N**
- pro různá atomová jádra je tato vazbová energie na jeden nukleon různá, jak je vidět na následujícím grafu.
- u lehkých prvků tato vazbová energie roste s protonovým číslem (s určitými výkyvy u nejlehčích prvků), pak se růst zpomaluje a maxima se dosahuje pro prvky skupiny železa (chrom, mangan, železo, nikl, měď).
- pro jádra těžší než železo se vazbová energie nukleonu opět zmenšuje; je to způsobeno tím, že pro velká jádra se začíná vedle přitažlivých jaderných sil krátkého dosahu stále více uplatňovat elektrická odpudivá síla mezi protony.

Závislost střední vazbové energie jednoho nukleonu na nukleonovém čísle jádra. V počáteční části grafu je měřítko na vodorovné ose poněkud roztaženo, aby byly lépe vidět rozdíly vazbové energie u nejlehčích jader. V pravé části jsou schematicky znázorněny oba způsoby uvolnění vazbové energie: rozštěpení těžkého jádra a sloučení dvou lehkých jader.



Z tvaru křivky vazbové energie plyne, že jsou dvě možnosti **uvolnění energie** při jaderných přeměnách:

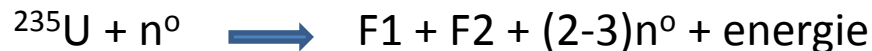
Spojováním, neboli **jadernou syntézou** čili fúzí, nejlehčích jader (vodík, hélium,...) v jádra těžší.

Rozštěpením nejtěžších jader (např. uranu) na jádra lehčí.

V obou těchto procesech mají nukleony ve výsledných jádrech větší vazbovou energii než v jádrech výchozích a rozdíl těchto vazbových energií se uvolní - získáme **jadernou energii**

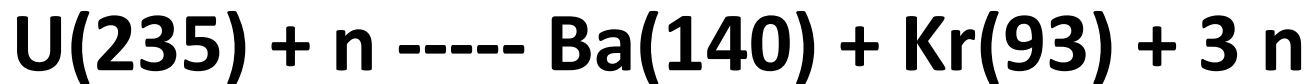
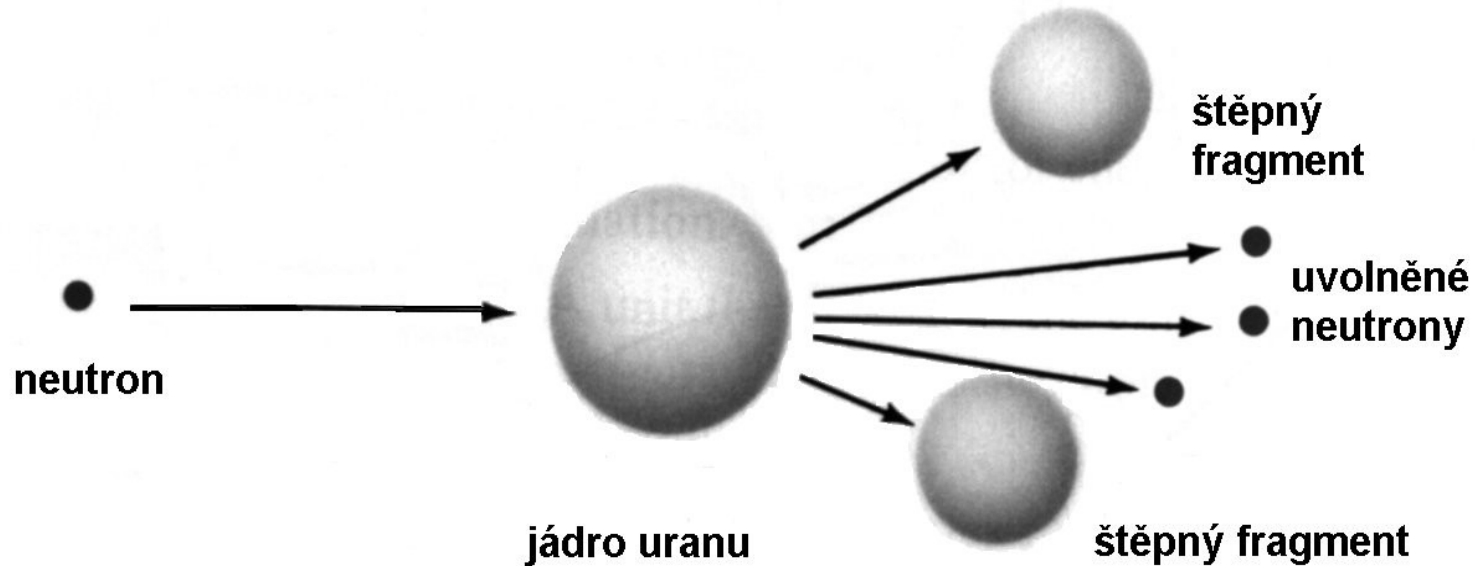
A/ Štěpení atomových jader

- Důležitou vlastností těchto silných interakcí je jejich krátký dosah činící jen $\approx 10^{-13}$ cm. Tato vlastnost způsobuje, že nelze "složit" stabilní jádro o libovolně velkém počtu nukleonů - u velkých jader již silná interakce "nedosáhne" dostatečně z nitra jádra k periferním částem.
- Štěpení atomových jader si ukážeme na typickém příkladu ^{235}U . Vstoupí-li do tohoto jádra pomalý neutron, rozštěpí se jádro uranu na dva středně těžké fragmenty F1 a F2, přičemž se emitují 2 nebo 3 neutrony:



- Neutrony uvolňované ihned při štěpení se nazývají **okamžité neutrony**; je jich asi 99% a jejich energie se pohybuje v širokém rozmezí od 0,025 eV do zhruba 10 MeV.
- Při štěpných reakcích však vznikají i tzv. **opožděné neutrony** v množství asi 1% (o energiích v rozmezí cca 0,2-0,6 MeV). Zpožděné neutrony mají velký význam pro dynamiku a řízení štěpné reakce v jaderných reaktorech, jak bude zmíněno níže.

schéma štěpné reakce



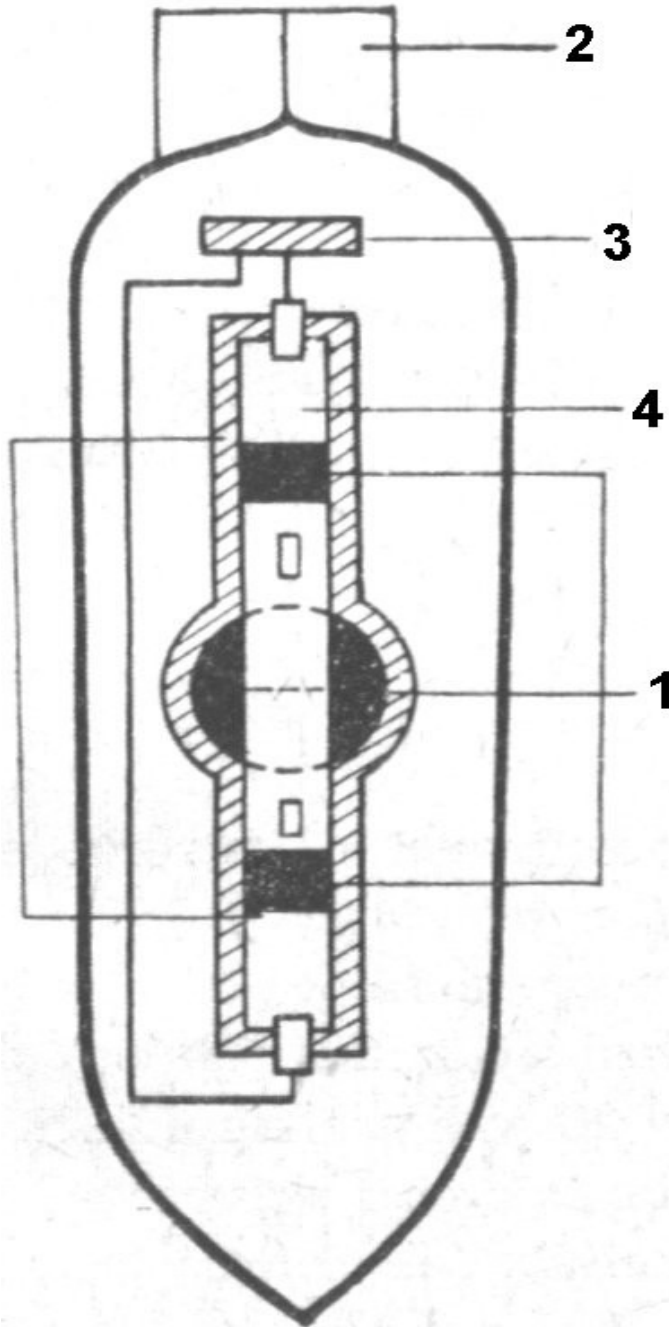
Řetězová štěpná reakce

- Při rozštěpení jádra se sice neutron, jež štěpnou reakci vyvolal, "spotřebuje", avšak během reakce se emitují další dva (nebo tři) neutrony "2.generace", které jsou v principu schopny vyvolat štěpení dalších jader.
- Pokud se tak stane, vyvolají tyto nové neutrony rozštěpení dalších dvou jader za vzniku již celkem 4 neutronů, ty vyvolají další štěpení atd. - počet neutronů v jednotlivých "pokoleních" se rychle násobí geometrickou řadou a rychlost rozvětřující se reakce štěpení jader **lavinovitě roste** - nastává **řetězová jaderná reakce**.
-
- Pro udržení řetězové štěpné reakce je nutné, aby v průměru aspoň jeden neutron, uvolněný při štěpení, v reakčním prostoru "přežil", vstoupil do jádra štěpného materiálu a vyvolal novou štěpnou reakci.
- Pro dynamiku řetězové reakce je důležitý tzv. **multiplikační faktor k** , což je poměr počtu neutronů následujícího pokolení k počtu neutronů v předchozím pokolení
- Jaderným štěpením můžeme získat na jednotku hmoty asi 3 000 000- krát více energie než spalováním fosilních paliv (k výrobě 100 GJ tepelné energie musíme spálit přibližně 3 tuny uhlí, nebo rozštěpit asi 1 gram uranu). Tato **vysoká energetická účinnost** je hlavním důvodem rozvoje jaderné energetiky za použití štěpných jaderných reaktorů.

Neřízená řetězová reakce - jaderný výbuch

- Řetězová jaderná reakce může probíhat buď **řízeně** - **jaderné reaktory** nebo **explozivně** - tak je tomu u zločinného zneužití jaderné energie pro válečné účely v **jaderné bombě**, zvané často též nepřesně "*atomová bomba*".
- Štěpný materiál (uran ^{235}U nebo plutonium ^{239}Pu) je v bombě v klidovém stavu rozdělen do několika částí, z nichž každá má se svým objemu **podkritické** množství.
- Exploze se vyvolá tím, že tyto segmenty se k sobě rychle přiblíží (výbuchem vhodné chemické výbušniny se "vstřelí" do sebe), čímž se vytvoří **nadkritické** množství.
- Při rychlém dosažení kritického množství pak ihned dojde k **jadernému výbuchu**, neboť malé množství neutronů, které je vždy v materiálu přítomno iniciuje lavinovitý rozběh řetězové reakce, při níž se během cca 10^{-6} sekundy rozštěpí téměř všechna jádra a explozivně se uvolní **velké množství energie** (z 1kg uranu se uvolní energie asi $2 \cdot 10^7 \text{kJ}$, což odpovídá výbuchu asi 20 000 tun klasické výbušniny trinitrotoluenu).
- Štěpný materiál je v jaderné bombě obklopen masivním obalem, který slouží jednak jako reflektor neutronů, jednak svou mechanickou pevností udržuje štěpící se materiál co nejdéle pohromadě, aby se naráz stačilo rozštěpit co největší množství materiálu.
- Teplota při výbuchu dosahuje řádově 10^7 °C a výbuch je doprovázen **intenzívním ionizujícím zářením** a **rozsáhlou radioaktivní kontaminací** štěpnými produkty, což násobí ničivé a smrtící účinky vlastní exploze.
- Rychlost narůstání řetězové reakce je neobyčejně vysoká - má charakter **prudké exploze**.

atomová bomba



1 - podkritické množství štěpného materiálu

2 - kormidlo

3 - časový mechanismus

4 - roznětka

Řízená řetězová reakce - jaderné reaktory

- K tomu, aby řetězová jaderná reakce štěpení mohla probíhat **rovnovážným řízeným způsobem**, je třeba zajistit v principu dvě věci:
- a) Shromáždit **nadkritické množství** jaderného štěpného materiálu pro danou konfiguraci.
- b) Zajistit **řízení počtu neutronů** pomocí vhodných absorbátorů či moderátorů tak, aby štěpná reakce probíhala požadovanou intenzitou. Touto regulací neutronové bilance se uskutečňuje řízení výkonu reaktoru.

O dynamice štěpné reakce rozhoduje **poměr** mezi průměrným počtem nově vzniklých neutronů a počtem neutronů spotřebovaných pro štěpení (neboli poměr mezi počtem neutronů následující generace a počtem neutronů předcházející generace) - tzv. neutronový **multiplikační faktor k** .

- při multiplikačním faktoru k menším než 1 reakce **zaniká**
- při $k = 1$ se **rovnovážně udržuje**
- při k větším než 1 roste počet štěpících se jader **lavinovitě**, pokud se včas nezastaví, reakce nabude **explozivní charakter**.
- **Řízená řetězová reakce** štěpení jader (především ^{235}U) probíhá ve složitém zařízení zvaném **jaderný reaktor**.
- Jaderná energie je velmi výhodná, protože jaderným štěpením můžeme získat na jednotku hmoty asi 3 000 000 krát více energie než spalováním fosilních paliv (k výrobě 100 GJ tepelné energie musíme spálit přibližně 3 tuny uhlí, nebo rozštěpit asi 1 gram uranu). Tato **vysoká energetická účinnost** je hlavním důvodem rozvoje jaderných elektráren.

Jaderná elektrárna

je zařízení, sloužící k přeměně vazebné energie jader těžkých prvků na elektrickou energii.

- Skládá se obvykle z jaderného reaktoru, parní turbíny s elektrickým generátorem a z mnoha dalších pomocných provozů.
- Jaderné elektrárny jsou jednookruhové a dvouokruhové.

a/ u **jednookruhové** jaderné elektrárny se pára vyrobená v jaderném reaktoru přivádí přímo do turbíny,
b/ u **dvouokruhové** se teplo z reaktoru odvádí teplonosnou látkou primárním okruhem do výměníku tepla (parního generátoru), kde vzniká pára, která se sekundárním okruhem přivádí k turbíně pohánějící alternátor.

- V alternátoru se energie vodní páry mění na elektrickou. Poté se pára opět chladí v chladících věžích a celý proces se opakuje.
- Zjednodušeně můžeme říci, že jaderná elektrárna je tepelná elektrárna a od klasické tepelné elektrárny se liší v podstatě jen zdrojem tepla potřebného ke vzniku páry. Teplo nevzniká spalováním fosilního paliva, ale **štěpením uranu ^{235}U v jaderném reaktoru**. Vzniklá pára pohání turbínu a generátor vyrábí elektrickou energii.
- Jaderné elektrárny, pracující dnes v mnoha zemích světa, se liší jak typem reaktorů, tak i různým konstrukčním a stavebním provedením.
- Největším problémem radioaktivních elektráren je odpad, který je radioaktivní ještě stovky až tisíce let po použití v elektrárně. Svět tudíž řeší problém, kde by se měl odpad uskladňovat.

- 1951 - vyrobeno první zařízení na výrobu energie (USA)
- 1954 - první pokusná jaderná elektrárna (Rusko)
- Česká republika: Dukovany (1985), Temelín (2002)

1. Moderace neutronů (lat. *moderari* = mírnit, krotit, zdržovat, zpomalovat)

- Neutrony emitované při štěpení, které mají většinou poměrně vysoké energie (v průměru asi 1,5MeV), se **zpomalují** na "tepelnou" energii cca 2,5eV interakcí s látkami o nízké jaderné hmotnosti - tzv. **moderátory**, aby tyto neutrony zůstaly dostatečně dlouho zachovány v reakčním prostoru pro uskutečnění dalšího štěpení.
- Jako moderátory jsou nejvhodnější látky obsahující **lehká jádra**, neboť podle zákona zachování hybnosti a energie je při pružné srážce neutronu s lehkým jádrem předána největší hybnost a energie.
- Naopak při srážce neutronu s těžkým jádrem dojde k odrazu a kinetická energie neutronu se změní jen málo. Můžeme si to představit v analogii pingpongového míčku jako neutronu, dalšího míčku jako lehkého jádra a kulečnickové koule jako těžkého jádra. Při nárazu letícího míčku do jiného (stojícího) míčku je předána více než polovina energie, zatímco při nárazu do kulečnickové koule se tato sotva pohne z místa a míček se odrazí s téměř původní hodnotou kinetické energie.
- Nejúčinnějším moderátorem je tedy **vodík**, který je bohatě obsažen ve vodě. Dalším požadavkem je, aby tato látka málo absorbovala neutrony. Z těchto hledisek je vhodným moderátorem **voda** či těžká voda, uhlík (grafit), berylium (nikoli ale bór, který neutrony účinně pohlcuje).

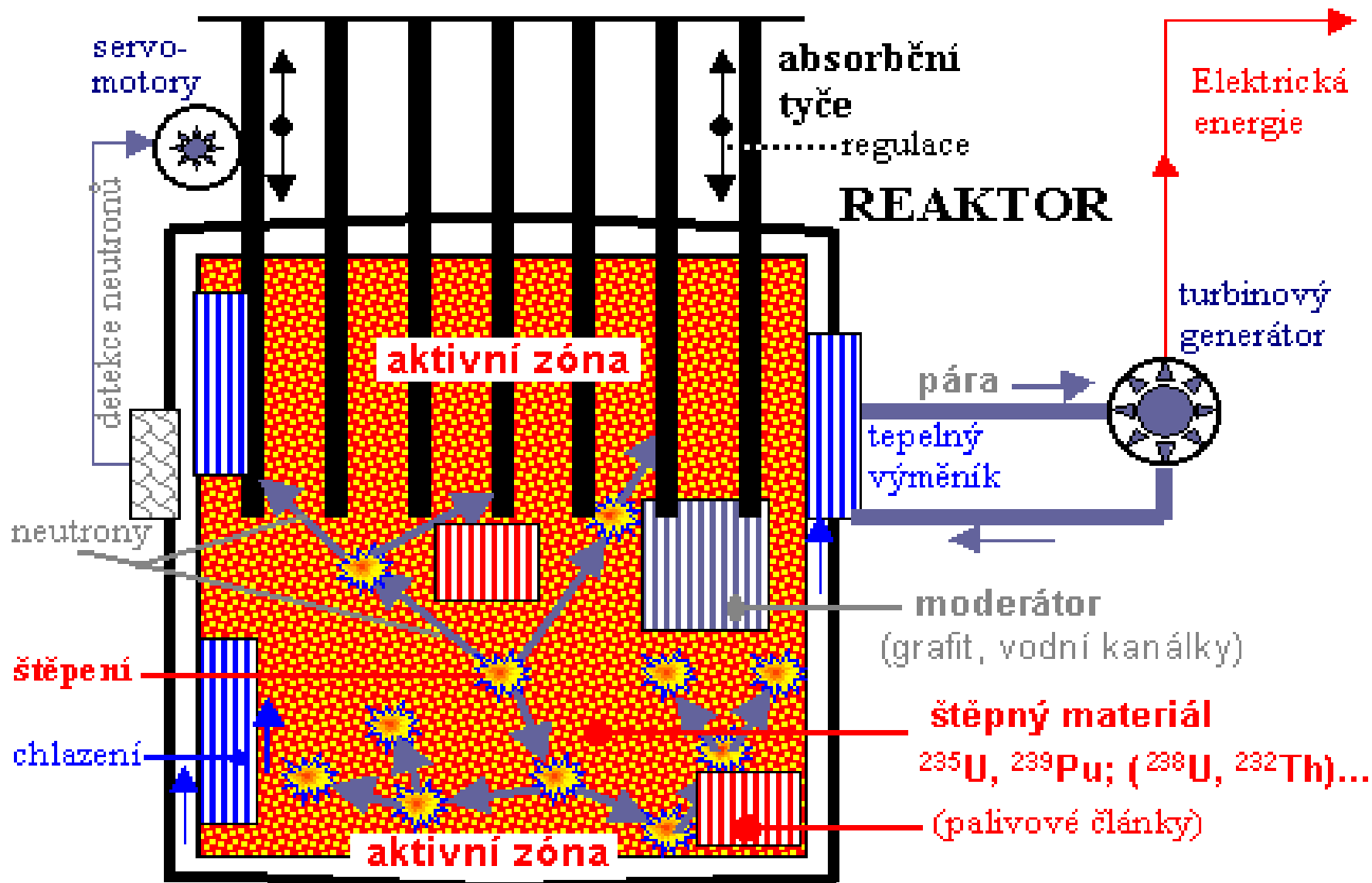
2. Absorpce neutronů

- Pro dosažení hodnoty multiplikačního faktoru $k=1$ je potřeba přebytek neutronů (který by jinak vyvolal lavinovité štěpení a havárii reaktoru) **pohlit** ve vhodném **absorbátoru** - nejčastěji je to **kadmium** nebo **bór** které mají vysoký účinný průřez pro absorpci tepelných neutronů.
- Absorbátory jsou většinou provedeny ve tvaru tyčí, které se do reaktoru zasouvají a tím **řídí rychlost reakce**:

chceme-li zvětšit počet štěpení, tyče mírně vysuneme, pro zpomalení reakce tyče zasuneme.

- V různých místech kolem reaktoru jsou umístěny **detektory neutronů**, dále se monitoruje teplota a tlak v aktivní zóně, jakož i okamžitý tepelný výkon reaktoru.
- Intenzita toku neutronů je citlivým indikátorem intenzity štěpné reakce uvnitř aktivní zóny reaktoru, což umožňuje ve zpětné vazbě elektronicky řídit absorpční tyče a tím běh reaktoru

Zjednodušené principiální schéma štěpného jaderného reaktoru.



- Ta část reaktoru, v níž je umístěn štěpný materiál a ve které probíhá řetězová štěpná reakce, se nazývá **aktivní zóna**.
- Štěpný materiál (což je většinou obohacený uran) je v reaktoru uložen ve formě většího počtu oddělených a samostatných tzv. **palivových článků**, kde je štěpný materiál zapouzdřen v obalu, chráněném vhodnou povrchovou vrstvou.
- Mezi palivovými články je moderátor a mezi ně se též zasouvají **regulační absorpční tyče**.
- Aktivní zóna reaktoru bývá dále obklopena tzv. **reflektorem** - vrstvou vhodného materiálu, který odráží unikající neutrony a vrací je částečně zpět do reakčního objemu reaktoru, což poněkud zvyšuje výtěžnost reakce. V reflektoru se používá v zásadě stejných materiálů jako v moderátoru - grafit, těžká voda.
- Vnitřní část, primární okruh, reaktoru je uložen v pevné železobetonové ochranné obálce s hermetickou ocelovou výstelkou, tzv. *kontejnment*.
- Při řetězové štěpné reakci se uvolňuje **značné množství energie** - jádra-odštěpky, vylétající s velkou kinetickou energií, se rychle **zabrzdí** nárazy na okolní atomy a předávají tak materiálu svou energii ve formě **tepla**.
- Štěpný materiál se tedy zahřívá a je třeba jej **intenzívně chladit** vhodným chladícím materiálem (např. vodou, která může být s výhodou použita současně jako **moderátor i chladivo**) protékajícím přímo kolem palivových článků - to je tzv. **primární chladicí okruh**.
- U dvouokruhových systémů se teplo z primárního chladicího okruhu v **tepelném výměníku** předává vodě **sekundárního chladicího okruhu**; v **jaderné elektrárně** je sekundárním chladícím okruhem **parogenerátor**, jehož pára roztáčí lopatky turbíny pohánějící generátor vyrábějící elektrický proud

Vyhořívání paliva

- Vedle mechanismů okamžité regulace štěpné reakce probíhají v aktivní zóně při delším provozu reaktoru určité **změny dlouhodobějšího charakteru**, ovlivňující (většinou snižující) výtěžnost reakce. Především je jasné, že při štěpení postupně **klesá** počet atomů štěpného materiálu, dochází k "**vyhořívání**" paliva.
- Tím se snižuje multiplikační faktor a pro udržení rovnovážného chodu reakce musí regulační obvody postupně vysunovat absorbatory neutronů - tzv. **kompensační tyče**. Další možností dlouhodobé regulace a kompenzace vyhořívání paliva je změna koncentrace vhodné látky absorbující neutrony, např. *bóru*, rozpuštěné v chladivu. Toho se využívá u některých vodou chlazených reaktorů, kde do chladicí vody se přidá cca 1% kyseliny borité a pak v průběhu provozu a vyhořívání paliva se její koncentrace postupně snižuje až prakticky na nulu před výměnou paliva.

Výměna vyhořelých palivových článků

- Když koncentrace štěpného materiálu poklesne natolik, že štěpná reakce by se již neudržela ani při dostatečně vytažených absorpčních tyčích, je třeba takovéto **vyhořelé palivové články** nahradit novými. Bývá to zpravidla po 12-36 měsících provozu reaktoru, tato doba se nazývá "*reaktorová kampaň*".
- U většiny typů je pro tuto výměnu nutno odstavit reaktor, některé typy však umožňují *kontinuální* postupnou výměnu paliva za provozu. Výměna palivových článků je značně náročná práce.
- Na rozdíl od nových (čerstvých, nepoužitých) palivových článků, jejichž aktivita je poměrně nízká (dlouhý poločas a-rozpadu uranu), jsou vyhořelé palivové články **vysoce radioaktivní** a nikdo se k nim nesmí přiblížit!
- Články se vytahují z aktivní zóny reaktoru pomocí dálkově ovládaných **manipulátorů** a ihned se zasunují do silných stínících kontejnerů.
- Radioaktivní rozpad štěpných produktů ve vyhořelých palivových člancích je zpočátku tak intenzivní, že se uvolňuje teplo a materiál se **zahřívá** - čerstvě vyhořelé palivové články je nutno **chladit**. Nejčastějším způsobem jejich počátečního skladování je umístění ve vodním bazénu u reaktoru; voda zajišťuje nejen chlazení, ale i poměrně účinné stínění před zářením. Dalším způsobem je "suché" chlazení, kde se palivové články umísťují do speciálních kontejnerů naplněných héliem, kontejnery jsou zvenku chlazeny vzduchem.
- Po asi 5 letech, kdy aktivita materiálu dostatečně poklesne, se palivové články umísťují do **meziskladů** a teprve po mnoha letech se ukládají na definitivní **centrální úložiště** (pokud se ovšem nepřikročí k jejich vhodnému dalšímu zpracování).

Jaderné odpady

- Obvyklá "vsádka" paliva do jaderného reaktoru o výkonu 1000 MW je kolem 100 tun uranu obohaceného na cca 3%. Jedna tuna takového paliva obsahuje 967kg uranu-238 a 33kg uranu-235. Po třech letech provozu reaktoru z jedné tuny paliva vyhoří asi 25kg uranu-235 a 24kg uranu-238. Vznikne přitom 35kg štěpných produktů, asi 9kg isotopů plutonia, 4,5kg isotopu uranu-236, 0,5kg neptunia-237, 120g americia-243 a menší množství dalších transuranů. Všechny tyto radionuklidy, obsažené ve vyhořelém jaderném palivu, jsou z hlediska klasického reaktoru **jaderným odpadem**.
- Jedním z hlavních problémů současné jaderné energetiky tedy je **vyhořelé jaderné palivo**, které obsahuje vysoké aktivity řady radioisotopů, často se značně dlouhým poločasem rozpadu. Jejich únik do biosféry je po dlouhou dobu potenciálním rizikem. Vedle poměrně krátkodobých radionuklidů (jako je ^{131}I s $T_{1/2}$ 8dnů) je zde obsaženo velké množství např. ^{137}Cs ($T_{1/2}$ 30roků), ^{90}Sr ($T_{1/2}$ 28,8roků), ^{241}Am ($T_{1/2}$ 458roků), ^{239}Pu ($T_{1/2}$ $2 \cdot 10^4$ roků), ^{240}Pu ($T_{1/2}$ $6 \cdot 10^3$ roků) a řada dalších dlouhodobých radionuklidů.
- Nové (čerstvé, nepoužité) palivové články mají **aktivitu poměrně nízkou** vzhledem k dlouhému poločasu rozpadu uranu (450 miliónů let). Při štěpení uranu však vznikají radionuklidy s podstatně **kratšími poločasy rozpadu** (řádu dnů či roků), takže čerstvě vyhořelé palivové články jsou **vysoce radioaktivní!**

S těmito nebezpečnými radioaktivními odpady je možno po krátkém chladícím období a přechodném uskladnění v meziskladech nakládat v zásadě dvojím způsobem:

1. Ukládání

těchto odpadů na **bezpečné úložiště**, které by mělo zajistit, aby se dlouhodobé radioisotopy obsažené ve vyhořelém palivu nedostaly po dobu několika tisíc let do biosféry. To není nikterak snadné technicky zajistit - jsou kladeny vysoké požadavky na těsnost a odolnost obalů vůči korozi, úložiště musí být vhodné i z geologického hlediska.

2. Přepřacování

vyhořelého jaderného paliva, při němž je jednak možno některé složky vyhořelého jaderného paliva znovu **využít**, jednak převážnou část dlouho žijících radionuklidů **přeměnit** na jiné isotopy, které by byly buď stabilní, nebo měly podstatně kratší poločasy rozpadu. Vyhořelé jaderné palivo by tak přestalo být obtížným odpadem, ale mohlo by se dokonce stát i důležitou **surovinou**.

Úložiště jaderného odpadu v ČR

Úložiště Richard u Litoměřic

- Úložiště tvoří malá část bývalého důlního komplexu Richard I, II a III, který má více než 40 km chodeb. Ukládají se zde tzv. institucionální radioaktivní odpady z průmyslu, zdravotnictví, výzkumu apod.

Úložiště v jaderné elektrárně Dukovany

- V areálu jaderné elektrárny jsou ukládány odpady ve 200 l pozinkovaných sudech z provozu zařízení

Úložiště Bratrství - Jáchymov

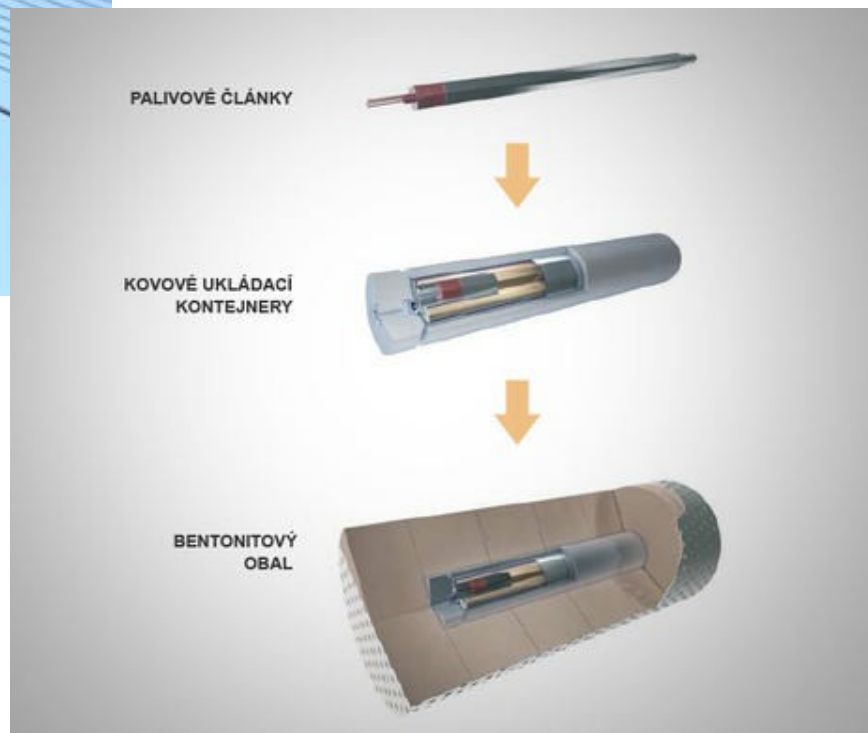
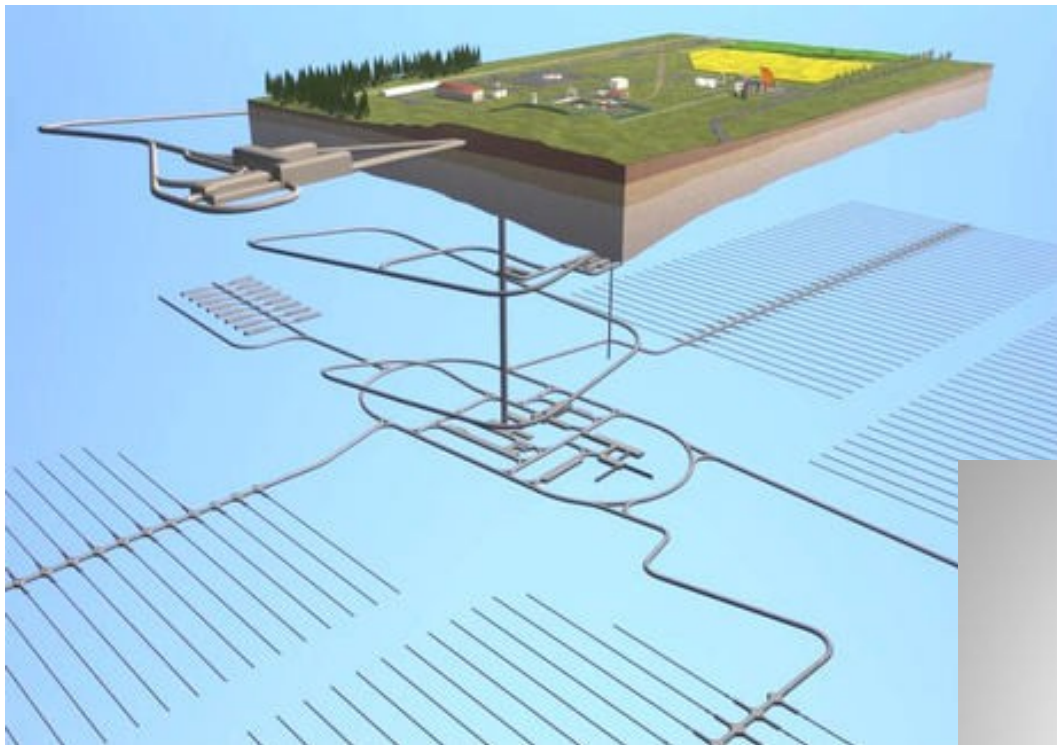
- Úložiště Bratrství v Jáchymově je vybudováno v části opuštěných podzemních prostor bývalého uranového dolu Bratrství. Do tohoto úložiště jsou přijímány pouze odpady, které obsahují přirozené radionuklidy.

Úložiště Hostim-Beroun

- V provozu bylo v letech 1959 až 1964. Nyní je toto úložiště



Schéma připravovaného úložiště jaderného odpadu



- Povrchový areál má přijímat radioaktivní odpady a vyhořelé jaderné palivo.
- Odpad a palivo bude do areálu dopravováno po železnici.
- Po přejímce bude odpad a palivo překládáno do úložných souborů, odtud bude palivo transportováno do podzemí.
- Areál má zabírat plochu 29 hektarů, z toho na 3 hektarech probíhá práce s radioaktivním materiálem; areál zahrnuje technické zázemí, administrativní budovu, informační služby, komunikace atd.
- Úložná podzemní část se předpokládá v hloubce cca 500 až 1000 metrů pod zemí. Podzemí se bude rozkládat na celistvé ploše cca 300 ha.
- Úložné obalové soubory s jaderným odpadem se do podzemí spustí těžním strojem. V podzemí se odpad přepravuje po kolejích na samohybném vozíku. Úložné soubory s palivem se mohou ukládat v chodbách horizontálně - až do vyplnění celého prostoru chodby.
- Sítí ukládacích chodeb se bude razit v žulových horninách. Chodby mohou být vybudovány v jedné či více hloubkových úrovních (patrech). Jednotlivé chodby mohou mít délku až 300 m.
- Palivové články - Tato část obsahuje palivové tablety uzavřené v proutcích. Články slouží k jaderné štěpné reakci v reaktoru.
- Kovové ukládací kontejnery - Vyhořelé palivo v člancích se uzavře do ukládacího kontejneru vyrobeného ze stabilních materiálů - speciální ocel s obsahem niklu, titanu, mědi atd.
- Bentonitový obal - Ukládací kontejner bude v hornině umístěn pomocí jílového materiálu, který ve vlhkém prostředí bobtná. Tím se kontejner v úložné komoře utěsňuje.

Radiační nehody (havárie)

Pod **radiační nehodou** rozumíme neplánovanou událost, která zvýší **ohrožení** osob ionizujícím zářením. Na pracovištích s uzavřenými zářiči se jedná především o nežádoucí **ozáření osob**.

- Na pracovištích s otevřenými zářiči se zejména jedná o nekontrolovaný **únik radioaktivní látky** do pracovního prostředí (např. rozlitím, rozstříknutím, rozbitím lahvičky s radioaktivním roztokem a pod.) s následnou **kontaminací** pracovního prostředí nebo pracovníků. K takovým událostem může dojít při manipulaci s otevřenými zářiči v procesu jejich přípravy, transportu, skladování, aplikaci a likvidaci.
- Pro radiační nehody (zvláště drobnější) se někdy používá i název **mimořádná událost**. Rozsah radiační nehody či mimořádné události se rozlišuje 1.-3.**stupněm závažnosti** :
- **1.stupeň**
Drobná radiační nehoda či mimořádná událost, která má omezený a **lokální dosah**, k jejímu řešení stačí běžné prostředky obsluhujících pracovníků, nedochází k deterministickým účinkům ozáření.
- **2.stupeň**
Jedná se o **závažnější ozáření** nebo **kontaminaci** pracoviště, které však ještě nevyžaduje opatření k ochraně obyvatel a životního prostředí a k jejímu zvládnutí postačí prostředky pracoviště, příp. ve spolupráci s dalšími odbornými pracovníky.
- **3.stupeň**
Jedná se o **závažnou radiační nehodu** spojenou s nebezpečným uvolněním radioaktivních látek do životního prostředí, vyžadující zavedení opatření k **ochraně obyvatel** a životního prostředí. Nejzávažnější radiační nehoda se označuje též jako **radiační havárie**. Při těžkých radiačních haváriích může dojít i k **letálnímu ozáření** osob nacházejících se v místě nehody.

A/ Radioaktivní kontaminace

Při manipulaci s otevřenými radioaktivními látkami může dojít k jejich úniku a následné **kontaminaci** (zamoření) předmětů, pracovního prostředí a osob těmito radioaktivními látkami.

1. Povrchová kontaminace

Nejčastěji dochází k **povrchové kontaminaci** pracovních ploch, pomůcek, oděvů nebo osob.

- Povrchová kontaminace může vést k **vyšším dávkám záření** především na kontaminované oblasti kůže, v některých případech však může vyústit i ve vnitřní kontaminaci.
- K průběžné kontrole povrchové kontaminace během práce a po jejím skončení se používají především **radiometry** s velkoplošnými sondami, které by se měly nacházet na všech exponovaných pracovištích a v hygienických smyčkách.
- Citlivou metodou kontroly kontaminace je i metoda **stěrů**, kdy štětičkou z vaty namočenou ve vhodném rozpouštědle (lihobenzin) setřeme příp. kontaminaci z definované plochy exponovaného místa a pak ji ve zkumavce přeměříme studnovým scintilačním detektorem.

2. Vnitřní kontaminace

Při manipulaci s vyššími aktivitami otevřených zářičů může dojít k nežádoucímu průniku radioaktivních látek dovnitř do organismu - k **vnitřní kontaminaci** a následnému vnitřnímu ozáření.

- Speciálním případem "vnitřní kontaminace" je záměrná **aplikace** radioaktivní látky - **radioindikátoru**, **radiofarmaka** - do organismu za účelem **diagnostiky** nebo **terapie** v nukleární medicíně.
- Po proniknutí do organismu radioaktivní látka vstoupí do metabolismu a může se **distribuovat** v jednotlivých tkáních a orgánech v závislosti na svém chemickém složení - část se může hromadit v tzv. **cílových orgánech**, zbytek se rozloží v celém těle. Většina radioaktivity je posléze metabolizována a po určité době odchází (většinou močí, v menší míře stolicí, někdy i potem) ven z organismu.
- Část radioaktivity však může zůstat **trvale vázána** např. v kostech.

Radioaktivní kontaminace se do organismu může dostat v zásadě čtyřmi způsoby:

- **Ingesce**

Nejčastější příčinou vnitřní kontaminace, zvláště při laboratorní práci, je **požití** (ingesce) radioaktivní látky přes kontaminované ruce či jiné předměty, které přicházejí do styku s ústy.

- **Inhalace**

Při práci s radioaktivními plyny, parami či aerosoly může radioaktivita proniknout při **vdechování** (inhalaci) do plic, a odtud příp. stěnami alveol do krve a dále do organismu.

- **Přes kůži**

Při kontaminaci povrchu těla jsou některé látky schopné difundovat a proniknout do organismu i **neporušenou kůží** (např. plutonium či fosfor), popř. otevřeným **poraněním** na kůži.

- **Cílená aplikace** radiofarmaka - pro diagnostiku nebo terapii v nukleární medicíně

Dekontaminace

Při **kontaminaci pracovního prostředí** je pracovník povinen:

- **zamezit šíření** kontaminace
- **označit** viditelně kontaminovanou plochu
- **nahlásit** tuto příhodu vedoucímu nebo dohlížejícímu pracovníkovi
- pod jeho vedením spolupracovat při **dekontaminaci**.

Při **dekontaminaci** je třeba :

- nejprve filtračním papírem nebo buničinou **odsát** co největší část aktivní tekutiny
- dále kontaminovanou plochu **omývat** a **otírat** vhodným čistícím či dekontaminačním prostředkem
- vzniklé **odpady** je nutno ukládat do igelitových sáčků a kontaminované předměty odmořit nebo je uložit v igelitových sáčcích k vyzáření.

- **Kontaminovanou vodu** je nutno vylévat do odpadu napojeného na vymírací jímky.
- Účinnost dekontaminace se průběžně kontroluje **přeměřováním** radiometrem.
- Nepodaří-li se zcela odstranit aktivitu, je třeba dané místo označit a přikrýt ochranným papírem či fólií; o dalším postupu a opětovném obnovení provozu pak rozhodne vedoucí či dohlížející pracovník.
- Při **kontaminaci osob** musí pracovník svléci kontaminované části oděvu nebo ochranných pomůcek, prověřit kontaminaci povrchu těla a podle potřeby provést **očistu** omýváním nebo osprchováním.
- Dále je nutno prověřit, zda nedošlo k **vnitřní kontaminaci** pracovníka.
- Při podezření na vnitřní kontaminaci a překročení nejvyšší přípustné dávky záření je třeba učinit potřebná **zdravotnická opatření** ve spolupráci s SÚJB a s hygienickými orgány, včetně dočasného vyřazení pracovníka z prostředí s ionizujícím zářením.
- Rozsáhlejší radioaktivní kontaminace je již **radiační havárií**

B/ Radiační nehody s uzavřenými zářiči

I s **uzavřenými zářiči** může dojít k vážným radiačním nehodám, pokud je jejich intenzita záření (dávkový příkon) patřičně vysoká. Potenciálně nebezpečnými zářiči z tohoto hlediska jsou zvláště silné **radioterapeutické ozařovače** či **průmyslové zářiče** např. pro defektoskopii či sterilizaci.

- Při neopatrné manipulaci s takovými nechráněnými zářiči může dojít k **vnějšimu ozáření** organismu vysokými radiačními dávkami buď **celotělově** (nemoc z ozáření - někdy i letální, zvýšený výskyt stochastických účinků), nebo **lokálně** (radiační popáleniny).
- Řada radiačních nehod se stala **přeexponováním pacientů** při radioterapeutickém ozařování v důsledku chybné kalibrace ozařovače či chybě v ozařovacím plánu.
- Je třeba konstatovat, že v současné době k radiačním nehodám dochází poměrně **zřídka**. Oblast aplikací ionizujícího záření je sledována, koordinována a zabezpečena jako snad žádný jiný obor lidské činnosti. Pracují zde většinou odborně fundovaní lidé, dobře obeznámení se zásadami práce s radioaktivitou a ionizujícím zářením i s principy radiační ochrany.

Havárie Goiania – stupeň č. 5

- Goiania v brazilském státě Goiás představuje jadernou nehodu zcela zvláštního druhu.
- Z opuštěného nemocničního zařízení zde byl totiž ukraden zářič, se kterým přišlo následně do styku 245 lidí.
- Čtyři z nich zemřeli, dvacet dalších vykazovalo známky nemoci z ozáření. MAAE označila incident v Goianii stupněm 5.

C/ Havárie jaderného reaktoru

Závažná porucha funkce jaderného reaktoru, spojená s jeho ireverzibilním poškozením, se označuje jako **havárie**. K takové události může v zásadě dojít buď **technickou poruchou**, nebo **lidským faktorem**, příp. kombinací obojího (nesprávný postup pracovníků při řešení technické poruchy). Z hlediska provozu k takové havárii reaktoru může dojít ve dvou fázích:

1. Havárie ve fázi **probíhající řetězové štěpné reakce** může být způsobena buď nekontrolovaným rozběhnutím reakce (poruchou regulace toku neutronů), nebo poruchou chlazení a odvodu tepelného výkonu reakce. Zde se většinou jedná o velmi těžkou havárii, spojenou s roztavením vnitřní části a zničením reaktoru.

2. Havárie ve fázi **odstaveného reaktoru** může být způsobena nedostatečným chlazením zbytkového tepelného výkonu jakož i některými manipulacemi při výměně palivových článků.

- Jaderný reaktor principiálně **nemůže jaderně vybuchnout** jako atomová bomba, vlivem zvýšené teploty však může dojít k nárůstu tlaku, který může vést k **tlakovému výbuchu**.
- Při enormním zvýšení teploty může docházet k rozkladu vody na vodík a kyslík a následnému **chemickému výbuchu**.
- Pokud teplota palivových článků překročí hodnotu cca 600-1000°C, dochází k **tepelnému poškození** jejich hermetického obalu a může dojít k úniku uvnitř obsažených radionuklidů, především štěpných produktů, do okolního prostředí.



**Mezinárodní stupnice pro hodnocení
závažnosti jaderných událostí INES**

- Při vážnější havárii jaderného reaktoru tedy může dojít i k **úniku radioaktivity** do okolního prostoru a životního prostředí.
- Technická havárie reaktoru tak může být doprovázena **radiační havárií** a **radioaktivní kontaminací**.
- Při havárii jaderného reaktoru s únikem radioaktivity dochází především k úniku štěpných produktů.
- Při přehřátí dochází přednostně k emisi do vzduchu látek s nízkým teplotním bodem varu, které se snadno odpařují; je to především **radiojód ^{131}I** a **cesium ^{137}Cs** . Těžké radionuklidy, jako je uran či plutonium s vysokým bodem varu, se naštěstí uvolňují jen velmi málo. Do vody však při porušení těsnosti palivových článků mohou unikat všechny radionuklidy (primární, nuklidy vzniklé jadernými reakcemi i štěpné produkty, v míře závislé na jejich množství a rozpustnosti).

Havárie jaderné elektrárny Černobyl – 7.stupeň

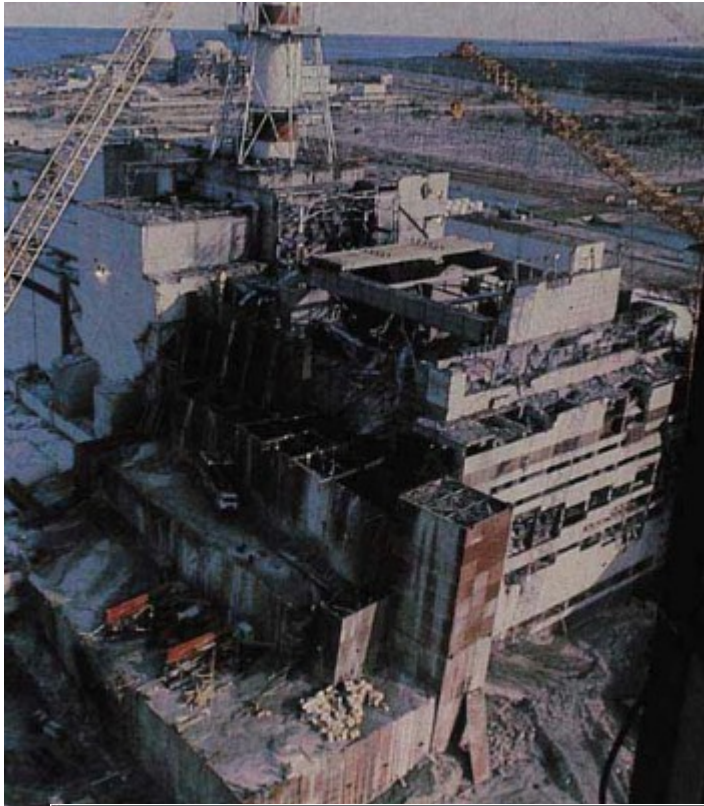
- **Havárie** nenastala v běžném provozu, tedy v režimu standardní výroby elektřiny. Jaderný reaktor byl odstaven z provozu a přitom byl prováděn plánovaný experiment, jehož cílem bylo ověřit, zda **elektrický generátor** je po rychlém uzavření přívodu páry do turbíny schopen při svém setrvačném doběhu ještě nějakou dobu napájet **čerpadla havarijního chlazení** (právě pro případ havárie jaderné elektrárny).
- Kdyby Černobyl v dubnových dnech roku 1986 pracoval v běžném režimu a inkriminovaný experiment se neprováděl, havárie jaderné elektrárny by vůbec nenastala. Navíc, při vyšetřování důvodů k provedení onoho osudného experimentu v Černobylu vyšlo najevo, že systém využití setrvačné energie **měl být funkční ještě před spuštěním bloku** (tedy před udělením souhlasu k zahájení provozu celého bloku). Neměl tedy být vůbec důvod provádět experiment, jehož výsledkem byla osudná havárie jaderné elektrárny, v době standardního provozu reaktoru.
- Jaderný reaktor nedosahoval úrovně současných standardů bezpečného provozu – ať už jde o samotný fyzikální princip fungování, nízkou úroveň automatizační techniky apod. **Černobyl by dnes nemohl být nikde na světě postaven.**
- Jaderná havárie byla také do značné míry způsobena **selháním lidského faktoru** na všech úrovních. Jaderná nehoda v Černobylu byla do značné míry způsobena profesními chybami, kterých se dopustil provozní personál. Ten nerespektoval bezpečnostní omezení a předpisy.
- Samotný experiment, který nakonec přímo způsobil jadernou havárii, byl pojmán jako čistě elektrotechnická záležitost, která neměla mít žádný význam z hlediska jaderné bezpečnosti – řídili jej proto elektrotechnici, nikoliv specialisté na provozní režimy a jadernou bezpečnost.
- Odstavení jaderného reaktoru z provozu a tedy i začátek experimentu musely být neočekávaně odloženy.
- Odklad experimentu způsobil, že jej z hlediska personálu obsluhy elektrárny prováděla jiná směna než ta, která se na jeho realizaci připravovala. V noční směně bylo méně zkušených operátorů, kteří se navíc na experiment nepřipravovali.
- Vinu na jaderné havárii nese i **vedení elektrárny**, opomenout však nelze ani negativní vliv **utajování informací** souvisejících s jadernou energetikou, které však bylo pro tehdejší sovětský režim typické i ve většině jiných oblastí.
- Spekuluje se také o **dalších příčinách jaderné nehody** – některé zdroje uvádějí, že 4. blok reaktoru byl schválen do provozu, přestože některé jeho bezpečnostní testy dopadly špatně. Důvodem byla snaha splnit plán ještě před plánovaným termínem.

- 4.blok byl určen k pravidelné odstávce, která se využívá například k údržbě. Tentokrát se ale odstavení reaktoru mělo využít i k pokusu na systému chlazení reaktoru pro případ výpadku proudu. Šlo o zkoušku úvodní scény scénáře, který se loni v březnu odehrál ve Fukušimě. Inženýři si chtěli vyzkoušet zhruba první minutu výpadku. Během ní měla proud nutný k chlazení elektrárny dodávat už jen setrvačností se točící hlavní turbína.
- Výkon nejprve prudce klesl. Na vině byla hlavně tzv. "otrava" xenonem-135. Xenon-135 vzniká samovolně během štěpení uranu. Z fyzikálního hlediska je neuvěřitelně účinnou brzdou jaderných reakcí. Dokáže dokonale zastavit štěpení v jakémkoliv reaktoru. Za běžného provozu ho však nevzniká příliš mnoho. Obvykle totiž rychle pohltí některý neutron uvolněný z paliva a změní se na neškodný xenon-136. V Černobyli to bylo jiné. U reaktoru se rychle snižoval výkon. S tím se snižovalo množství neutronů. V reaktoru přežívalo stále větší množství xenonu-135, který čím dále více brzdil štěpení paliva.
- V takové situaci je asi nejlepší reaktor odstavit a nechat xenon samovolně rozpadnout, na což stačí několik hodin. Ale v Černobyli spěchali na svůj pokus. Obsluha odstranila z reaktoru téměř všechen materiál, který má zpomalovat reakci, a snažila se maximálně povzbudit štěpení.
- Při tom překročila celou řadu předpisů a vypnula několik automatických systémů. Ke katastrofě přispěla hlavně možnost, že obsluha vůbec mohla vypnout bezpečnostní systémy – a také, že ji to vůbec napadlo udělat.
- Reaktor RBMK s tunami radioaktivních materiálů uvnitř reagoval pomalu a neochotně. Obsluha ho popoháněla o to víc. Nakonec uspěla více, než chtěla. Reaktor přišel o poslední brzdy.
- Pokus totiž neprobíhal dobře. Setrvačností se točící turbína nedodávala do reaktoru dost vody. Teplota stoupala a voda chladící reaktor se ve velké míře měnila v páru. Ta pohlcuje neutrony méně účinně než kapalná voda. Výkon se zvyšoval.
- V reaktoru přibývalo neutronů z rozpadávajícího se paliva. Jak je atomy xenonu "vychytávaly", velká část plynu se rychle proměnila na xenon-136, který řetězové reakci nebrání. Výkon se zvyšoval o to rychleji.

- Poslední ránu pak Černobyli dalo stisknutí jediného tlačítka.
- Ve 1:23:40 stiskla obsluha spínač "nouzového odstavení". Stisknutí vyslalo do reaktoru regulační tyče, které zastaví řetězovou reakci. (Stejně tyče předtím obsluha vysunula, aby reaktor udržela v chodu.) Konce tyčí však nebyly z materiálu, který by štěpnou reakci zastavoval. Ba naopak, byly z grafitu (tedy tuhy čili čistého uhlíku), který ji povzbuzoval. Tento detail sloužil k snazší regulaci výkonu reaktoru za běžného provozu. Pro použití v případě nouze byl katastrofálně špatně zkonstruovaný: než tyče začaly reaktor "brzdit", nejprve jeho provoz na malou chvíli urychlily.
- Konec přišel rychle. Regulační tyče se tak ani nestačily zasunout na místo, což jim mělo trvat asi 18 až 20 sekund. Teplo v reaktoru je rychle zdeformovalo a pak roztavilo. Výkon stoupl na stonásobek běžného (až asi 350 tisíc megawattů). Tlak v reaktoru se zvyšoval, až nadzvedl a otočil tisíc tun těžké víko reaktoru.
- Dovnitř se dostal vzduch. Kyslík a vodík vzniklé rozkladem vody v reaktoru způsobily výbuch, který strhl celou střechu. (Ta byla koneckonců o několik metrů slabší, než vyžadovaly i tehdejší, natož dnešní, mezinárodní předpisy.)
- Z budovy se stal krb. Ve výhni chytil grafit, který v reaktoru fungoval jako "prostředník" usnadňující výměnu neutronů mezi atomy uranu. S dýmem požáru stoupaly do atmosféry i tuny radioaktivních prvků.
- Z rozbitého a rozžhaveného reaktoru 4. bloku elektrárny Černobyl začala unikat radioaktivita, jejímž důsledkem bylo masivní radioaktivní zamoření bezprostředního, ale později i stále vzdálenějšího okolí.
- Prvním krokem likvidace jaderné havárie v elektrárně Černobyl bylo hašení požáru v reaktorové hale a na střeše turbínové haly. Speciálnímu hasičskému útvaru se podařilo tento požár zlikvidovat zhruba po třech hodinách od výbuchu v reaktoru. Uvnitř reaktoru však stále hořel grafit.
- Hasiči, kteří jadernou havárii likvidovali, vůbec neznali příčinu ohně a zalávali nejdříve trosky reaktoru vodou, čímž situaci ještě zhoršovali a docházelo k dalším menším explozím a následné akceleraci radioaktivního zamoření.
- Aby se zabránilo únikům radioaktivity, byl reaktor postupně zasypan celkem pěti tisíci tun sloučenin bóru, dolomitu, písku, hlíny a olova shazovanými z rychle přelétajících vrtulníků. Sypké materiály uhasily požár grafitu a částečně absorbovaly unikající radioaktivní aerosoly. Dva týdny po jaderné havárii rozhodly sovětské úřady zakonzervovat celý havarovaný blok včetně strojovny do tzv. sarkofágu - betonové obálky s vestavěným chladícím systémem.

- Po explozi Černobyly se stalo největším nebezpečím pro okolí radioaktivní zamoření. Podle sovětských zpráv přestala radioaktivita z reaktoru unikat až 6. května 1986. Od 7. května byla aktivní zóna 4. bloku elektrárny Černobyl chlazena tekutým dusíkem a 8. května klesla teplota v aktivní zóně na cca 300 °C.
- Radioaktivní zamoření tedy bylo způsobeno únikem radioaktivity z reaktoru, který trval 10 dnů. Podle zprávy Černobylského fóra (oficiální zpráva reprezentativní skupiny odborníků OSN a dalších institucí) zapříčinila jaderná nehoda únik radioaktivních látek v rozsahu zhruba $14 \cdot 10^{18} \text{Bq}$.
- Radioaktivní zamoření bylo způsobeno celou řadou látek, které z reaktoru jaderné elektrárny Černobyl následkem dvou výbuchů unikly. Jednalo se o radioaktivní vzácné plyny, zejména izotopy xenonu (Xe) a kryptonu (Kr). Dále to byly izotopy jódu (I) v plynné fázi, ve formě aerosolů i ve formě organické. Další těkavé prvky a sloučeniny, telur (Te) a cesium (Cs), se do ovzduší dostaly formou aerosolů nebo s částicemi rozprášeného jaderného paliva. V menším zastoupení šlo o radioizotopy málo těkavých prvků, jako je cer (Ce), zirkonium (Zr), barium (Ba) a stroncium (Sr).
- Tyto netěkavé radionuklidy se vyskytovaly ve formě větších aerosolů, a proto byl jejich dopad omezen převážně na území v bezprostředním okolí elektrárny. V menším množství se však dostaly i do větší vzdálenosti. S rozprášeným palivem unikly do ovzduší i aktinidy. Zpráva Černobylského fóra uvádí také izotopy plutonia (Pu) a americia (Am).
- Výbuch v jaderné elektrárně Černobyl vynesl radioaktivní látky do výše asi 1500 metrů. V této výšce proudil vzduch z jihovýchodu rychlostí 8 až 10 m/s. Vzniklý radioaktivní mrak byl větrem hnán nejdříve nad Skandinávii, kterou přeletěl a obrátil se zpět k místu svého vzniku. Ještě v den havárie však vítr na Ukrajině změnil směr a vál kontaminovanou vzdušnou masu přes Polsko přibližně směrem na tehdejší Československo a na Rakousko. Později se vzdušná vlna odrazila od Alp a vracela se zpět směrem na Polsko. Druhá velká vlna radioaktivního zamoření zasáhla i Bulharsko.
- Radioaktivní jód, jehož únik hrál při nehodě významnou roli, má velmi krátký poločas rozpadu a relativně brzy po nehodě se přirozeným způsobem rozložil na neškodné látky. Při zkoumání dlouhodobějších dopadů tedy dnes již jód nehraje žádnou roli a radioaktivním zamoření se dnes již nepodílí.
- Z hlediska radioaktivního zamoření jsou však horší stroncium a cesium - mají poločas rozpadu 30 let. Obě látky tedy budou hrát roli ještě po několik desetiletí. Izotopy plutonia a americia přetrvávají na zasaženém území pravděpodobně až tisíce let, ale jejich příspěvek k ozáření lidského organismu je zanedbatelně nízký.

- Radioaktivní zamoření zasáhlo nejvíce město Pripjať, ve kterém tehdy žilo zhruba 50 tisíc obyvatel a které leží asi tři kilometry od havarovaného reaktoru jaderné elektrárny Černobyl. Po celou sobotu (v den kdy jaderná nehoda proběhla, tedy 26. 4. 1986) ponechaly úřady ve městě běžet vše normálním životem a neinformovaly ani o tom, že v bezprostřední blízkosti probíhá likvidace následků havárie jaderné elektrárny, ani o tom, že městu hrozí radioaktivní zamoření.
- Jaderná nehoda způsobila, že v Pripjati vzrostla úroveň radiace na tisícinásobek přírodního pozadí. Ve 22:00 hodin bylo rozhodnuto o evakuaci města. Ta proběhla až druhý den, tj. v neděli 27. 4., ve 14.00 hodin.
- Za necelé tři hodiny bylo město prázdné s výjimkou osob, které zde plnily určité povinnosti. Teprve 2. května bylo rozhodnuto evakuovat obyvatelstvo žijící v okruhu 30 km od reaktoru (tedy v tzv. zakázané zóně). Evakuace z celé zóny byla ukončena 6. května 1986.
- Uvádí se, že havárie jaderné elektrárny Černobyl nějakým způsobem zasáhla zhruba 600 tisíc osob. Oficiální dokumenty rozdělují oběti radioaktivního zamoření do více skupin. Jde především o skupinu „likvidátorů“, kam patří pracovníci záchranných a asanačních čet, zaměstnanci elektrárny, hasiči a policisté. Do konce roku 1987 činil počet lidí patřících do této skupiny 200 – 240 tisíc.
- Jinou postiženou skupinou je 116 tisíc osob žijících v oblastech, které kontaminovalo radioaktivní zamoření v širším okolí Černobylu a kteří byli evakuováni relativně krátce po havárii (do poloviny srpna 1986) do nepostižených oblastí. Dalších 220 tisíc osob, žijících na kontaminovaných územích Běloruska, Ukrajiny a Ruska, bylo evakuováno později.
- na kontaminovaných územích žije celkem zhruba 5 milionů obyvatel (Bělorusko, Rusko, Ukrajina).
- Nejvyššími dávkami radioaktivního záření byli zasaženi pracovníci elektrárny, kteří se nacházeli na místě (a blízkém okolí) nehody a záchranáři (zejména hasiči), kteří řešili akutní následky havárie – a to během prvního dne, tedy 26. dubna 1986. Jednalo se celkem o zhruba 1000 osob. V této skupině mohly dávky ozáření dosahovat hodnot v rozmezí 2 – 20 Gy.
- Havárie v Černobylu si vyžádala bezprostředně tři oběti (pracovníky elektrárny), kteří zemřeli ihned v důsledku samotného výbuchu v reaktoru.
- Černobyl se stal dále osudným pro 47 osob (z řad záchranářů či pracovníků elektrárny) s diagnostikovanou Akutní nemocí z ozáření (Akutní radiační syndrom). Dalších 9 osob zemřelo na rakovinu štítné žlázy.
- Havárie v Černobylu dále způsobila smrt zhruba 3 940 osob, které zemřely nebo by v budoucnu mohly zemřít na nemoci v důsledku radiačního ozáření vyvolaného radioaktivním zamořením.



Jaderná havárie Černobyl a nádorová onemocnění

- Za jednoznačně prokázaný pozdní účinek havárie v Černobylu, jehož příčinou je radioaktivní zamoření, je považován zvýšený výskyt **rakoviny štítné žlázy** u jedinců ozářených v dětském věku (tzn. do 18 let věku). Šlo o děti z Běloruska a v menší míře z Ruska a Ukrajiny, které byly zasaženy radioaktivním jódem (I^{131}) jak vdechnutím, tak zejména v důsledku pití mléka od krav, které se pásly na kontaminované travě.
- Jaderná havárie v Černobylu měla své následky – v průběhu let 1992 až 2000 bylo ve zmíněných zemích diagnostikováno přibližně 4000 případů rakoviny štítné žlázy u dětí a mládeže ve věku do 18 let. Z toho celkem 9 pacientů (8 v Bělorusku, 1 v Rusku) zemřelo na rakovinu štítné žlázy. Neexistují data, která by potvrdovala výskyt rakoviny štítné žlázy mezi dospělými.
- Černobyl způsobil ale také psychologické a sociální potíže. Svou roli přitom sehrála evakuace jako následek jaderné havárie, a vytržení z přirozeného prostředí tak velkého množství lidí. Podle některých odborníků bylo 2. kolo evakuace, týkající se 220 tisíc osob, zbytečné, protože z hlediska naměřeného radioaktivního zatížení již nebyl k přesídlení těchto obyvatel žádný důvod.
- Pokud jde o jiné typy nádorových nemocí (než je rakovina štítné žlázy), nebyl mezi širokou veřejností do roku 2004 zaznamenán nárůst (nad přirozenou úroveň) úmrtnosti způsobený leukémií či jinými typy rakoviny (s výjimkou rakoviny štítné žlázy u dětí), který by byl vyvolán radiací v důsledku jaderné havárie v Černobylu.
- Ve skupině **přímých likvidátorů** jaderné havárie (tedy zaměstnanci, hasiči, záchranáři, asanační pracovníci, atd.), kteří byli zasaženi vyšší dávkou radiace (v průměru 107 mSv), byla zaznamenána zvýšená úmrtnost způsobená **leukémií**, jinými **nádorovými nemocemi** či nemocemi oběhového systému vyvolanými radiací v důsledku jaderné havárie. Počet takovýchto úmrtí byl odhadován na zhruba 230.
- Doposud nebyl prokázán žádný vliv radioaktivního záření na výskyt vrozených (dědičných) vad či jiných genetických efektů. Zhruba od poloviny roku 1986 se ve statistikách sice začal objevovat nárůst vrozených vad a to jak v zasažených, tak i nezasažených oblastech Běloruska. Odborníci však tento růst přičítají zlepšené úrovni registrace takových onemocnění. Je známo, že registrace vrozených poruch a malformací byla do té doby (do jaderné havárie v Černobylu) v Sovětském svazu na nízké úrovni.

Bezprostřední následky havárie

- Bezprostřední úmrtí (nehody při likvidaci) 2 (okamžitě)
- Bezprostřední úmrtí (nemoc z ozáření) 28 (během 4 měsíců)
- Pozdní úmrtí – dospělí (důsledky radiace) 20 (údaj ze září 2006)
- Pozdní úmrtí – děti (důsledky radiace) 15 (údaj ze září 2006)
- Klinicky prokázané psychologické následky 5 000

**Veškerá úmrtí spojená s rakovinou štítné žlázy
(celkem evidovaných případů 4 000)**

Odhad akutních dávek záření po havárii v Černobylu

Populace	Počet	Ozáření	Dávka
Likvidátoři			
Na místě v době havárie	400	vnější γ/β + celotělně	ak. nemoc z ozář. 237 lidí
			41 lidí (50 %)
			50 lidí (39 %)
			22 lidí (10 %)
			21 lidí (9%)
		^{131}I – štítná žláza	173 lidí
			7 lidí
			0-1,2 Gy
			11-20 Gy
Hasiči, vojáci, dobrovolníci	400 000 (600 000)	vnější γ/β + celotělně	45 % méně než 100 mSv
			47 % 100-250 mSv
			8 % 250-500 mSv
			0,02% více než 500 mSv
Evakuovaní z 30 km zóny	135 000	vnější γ/β + celotělně	50 – 500 mSv (průměr 120 mSv)
		^{131}I – štítná žláza - děti	0,1 – 2,5 Gy (pr. 0,3 Gy)
Obyvatelé SKZ ($^{137}\text{Cs} > 555 \text{ kBq/m}^2$)	270 000	vnější γ/β + celotělně	4% více než 100 mSv
			0,3% více než 200 mSv
			průměr 60 mSv
		^{131}I – štítná žláza - děti	0,1 – 10 Gy
Evropská část Ruska	75 mil.	střední celotělní dávka	průměr 6-7 mSv

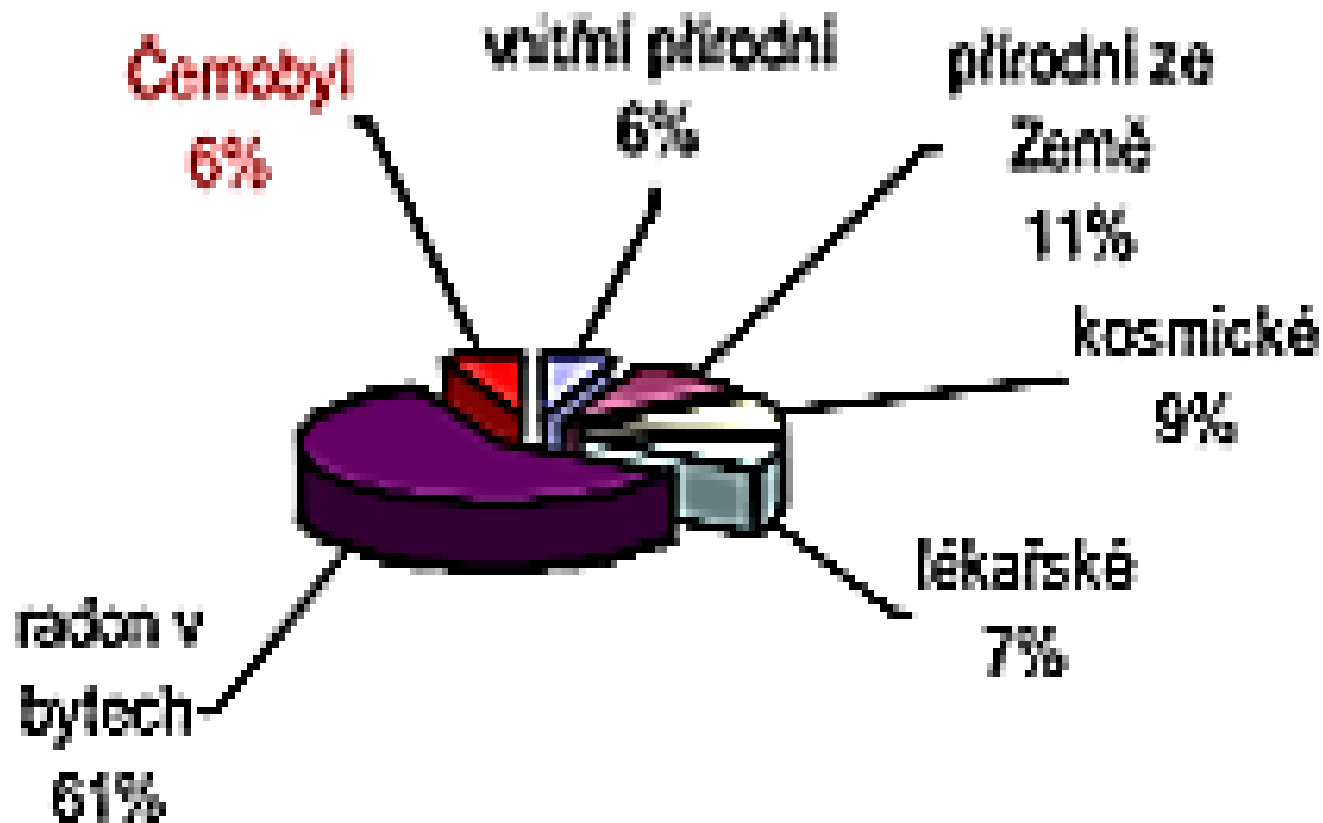
Radionuklidy uniklé po havárii

- radioaktivní vzácné plyny, (izotopy xenonu a kryptonu);
- izotopy jódu;
- těkavé prvky a sloučeniny (telur a cesium);
- radioizotopy málo těkavých prvků (cer, zirkonium, baryum a stroncium);
- s rozprášeným palivem unikly do ovzduší i aktinoidy a také izotopy plutonia a americia.

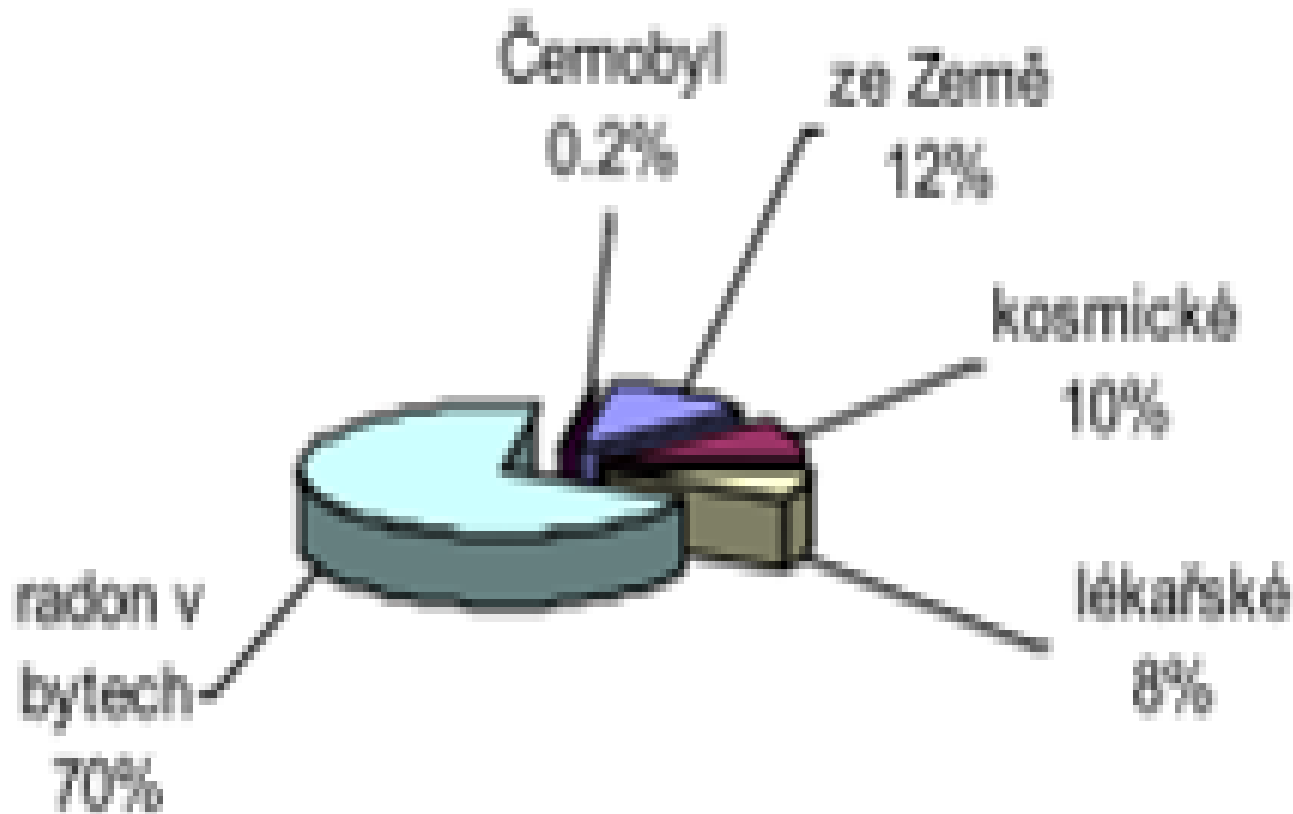
Radioaktivní zamoření u nás

- Radioaktivní zamoření v důsledku havárie jaderné elektrárny Černobyl je stále předmětem zkoumání. Nejnovější odborné studie odhadují průměrnou efektivní dávku obyvatelstvu na našem území v důsledku havárie jaderné elektrárny Černobyl v roce 1986 na 0,26 mSv, což je asi desetina dávky obdržené občanem z přírodního radioaktivního pozadí ročně.
- V dalších letech po havárii jaderné elektrárny Černobyl (tzn. od roku 1987) se roční dávky občanům ČR dále snižovaly. Dá se tedy říci, že průměrný dávkový ekvivalent vyhovoval platným limitům. Radioaktivní zamoření však způsobilo, že překročení limitu v individuálních případech není vyloučeno.
- Československé úřady o jaderné nehodě informovaly nedostatečně a její rozsah bagatelizovaly – havárie jaderné elektrárny Černobyl byla prezentována jako běžná porucha. Občanům byly oficiálně předkládány informace, že žádné radioaktivní zamoření na československém území zjištěno nebylo.
- Již bezprostředně po havárii jaderné elektrárny Černobyl však začalo na území ČSSR intenzivní měření radioaktivity a později byla podniknuta řada opatření v oblasti zdravotní prevence, která jsou i s odstupem 20 let hodnocena jako adekvátní situaci a dostačující.
- UNSCEAR uvádí jako průměrné roční přírodní pozadí radioaktivity dávku 2,4 mSv. Typické rozpětí činí 1– 10 mSv. Pro celoživotní radiační dávku záření, způsobenou přírodním pozadím, uvádí hodnoty kolem 100 – 700 mSv.
- V České republice se přirozené radiační pozadí pohybuje v rozmezí 2,5 – 3 mSv za rok. V některých místech na Zemi je však tato dávka mnohem vyšší – například přírodní radiační pozadí v Guapari (Brazílie) dosahuje 175 mSv ročně; v Ramsaru (Írán) až 400 mSv.
- V listopadu 1986 se poprvé za padesát let narodilo méně chlapců než dívek. Vědci jsou přesvědčeni, že to bylo způsobeno radiací z Černobylu.
- Příčinou poklesu porodnosti chlapců radioaktivita, která působila na ženy v 8.-12. týdnu těhotenství. Mozky plodu jsou v tomto stádiu vývoje citlivější k radioaktivitě a mužské plody jsou náchylnější k potratu.
- Na severní Moravě se podle výpočtů narodilo o 199 chlapců méně (-17%) než je statistický průměr, na jižní Moravě o 161 chlapců méně (-15 %), ve východních Čechách o 47 chlapců méně (-7%) a v Praze o 35 (-6%). V severních a jižních Čechách, kde nepadal radioaktivní déšť, byl poměr mezi narozenými chlapci a dívkami v normě.

Relativní podíl ozáření průměrného občana ČR v r. 1986 po havárii v Černobylu



Relativní podíl celoživotního ozáření průměrného člověka v ČR



Havárie jaderné elektrárny Fukušima - 7.stupeň

- Všechny pracující reaktory byly automaticky odstaveny po začátku zemětřesení.
- Vnější napájení jaderné elektrárny elektrickou energií bylo přerušeno, protože přílivová vlna smetla veškeré linky vysokého napětí.
- Nastartovaly dieselové motory poháněné generátory, které zajišťují náhradní napájení elektrickým proudem a zajišťují tak rovněž energii pro záložní systémy chlazení reaktoru. Tyto systémy pracovaly asi 1 hodinu.
- V tomto okamžiku blok č. 1 jaderné elektrárny Fukušima přišel o veškeré zdroje elektrického proudu včetně náhradních, potřebné ke svému řízení a provozu (úplný black-out).
- Tato situace doposud na žádné jaderné elektrárně nenastala, protože žádná z nich nebyla vystavena působení obrovské přílivové vlny (tsunami měla výšku až 10 m).
- Přetlak uvnitř kontejnmentu (překračující projektovou hodnotu) byl snížen vypuštěním části obsahu kontejnmentu do budovy reaktoru, obklopující kontejnment. Do prostoru budovy reaktoru vně kontejnmentu se dostal i vodík, který vznikl v reaktoru oxidací zirkonia z pokrytí palivových proutků. Do prostoru mimo kontejnment bylo spolu s párou řízeně vypuštěno rovněž určité množství radioaktivních produktů (z poškozených palivových proutků), které se vyskytovaly uvnitř kontejnmentu.
- Vodík uniklý z kontejnmentu způsobil ve směsi se vzduchem výbuch, který poškodil budovu reaktoru.
- Kontejnment však nebyl při výbuchu poškozen.

- Březnové zemětřesení a následné tsunami byla extrémně velká. Taková přicházejí v intervalu několika staletí či více. Přesto jsou v Japonsku evidence, které ukazují, že podobná zemětřesení a cunami v minulých dvou tisíciletích byla.
- Ukázalo to na podcenění extrémně řídkých ale velmi katastrofických přírodních jevů. Stejná podcenění však nastala i u dalších obytných a průmyslových konstrukcí. A i to bylo důvodem tak vysokého počtu obětí při tomto tsunami.
- Zasažené reaktory v elektrárně Fukušima I patřily k těm nejstarším v současné době provozovaným. Jejich projekt pocházel z šedesátých let. I tak přežily zemětřesení větší, než na které byly stavěny. Zničující se pro ně stalo teprve tsunami. Nyní je jasné, že nejen rozmístění a zabezpečení záložních dieselových zdrojů elektřiny mohlo a mělo být řešeno jinak. Je vysoce pravděpodobné, že u novějších typů reaktorů z osmdesátých let by následky nebyly tak dramatické. Jak přesně by se zachovaly, bude možné zhodnotit až po zjištění přesných informací, jak havárie jednotlivých reaktorů ve Fukušimě I přesně probíhala. Reaktory III+ generace mají dostatečnou kapacitu pasivních bezpečnostních systémů, které by zajistily chlazení na dostatečně dlouhou dobu a situaci ve Fukušimě I by s velmi vysokou pravděpodobností ustály. Avšak i tyto projekty se budou posuzovat podle zkušeností z Fukušimy I a budou se hledat cesty, jak jejich bezpečnost ještě zvýšit.
- Všechny další projekty budou posuzovány ještě více nejen z hlediska úspěšného rychlého zastavení řetězové jaderné reakce, ale také z hlediska úspěšného dochlazení i v případě výpadku elektrických zdrojů. Z toho hlediska by se mohly stát velmi perspektivní rychlé reaktory, které nejsou chlazeny vodou, ale plynem nebo tekutým kovem. U nich totiž chladio nemění skupenství a nedochází k dramatickému poklesu jeho schopnosti odvodu tepla. Je také možné, že se díky havárii ve Fukušimě I, která se také vyznačovala vysokou koncentrací velkých reaktorů, bude ještě intenzivněji pracovat na projektech malých reaktorů s velmi dlouhými periodami pro výměnu paliva. Důkladná analýza havárie ve Fukušimě I určitě přispěje k dalšímu zvýšení bezpečnosti



Havárie jaderné elektrárny Three Mile Island – 5.stupeň

- Při havárii odpovídající pátému stupni na škále MAAE se v březnu 1979 částečně roztavil druhý reaktor elektrárny, byla zamořena její provozní budova a došlo k úniku radioaktivity do okolí.
- Úřady nařídily evakuaci tisíců těhotných žen a dětí, své domovy ale hromadně a spontánně opustilo 200 000 lidí.
- Havárie vedla ke značnému omezení rozvoje jaderné energetiky v USA.
- Studie z roku 1984 prokázala, že v okolí elektrárny se výskyt rakoviny zvýšil několikrát.

Havárie jaderné elektrárny Windscale Pile – 5.stupeň

- Největší jaderná havárie v Británii.
- Grafitové jádro reaktoru ve Windscale v hrabství Cumberland začalo hořet a do okolí uniklo značné množství radiace (740 TBq jódu 131, 22 TBq césia 137 a 12 tisíc TBq xenonu 133).
- MAAE označilo událost stupněm 5 - havárie s rizikem vlivu na okolí.

Havárie jaderné elektrárny v Jaslovských Bohunicích – 4.stupeň

- Reaktor A-1 budovaný v Bohunicích od roku 1958 v rámci první atomové elektrárny v někdejším Československu stihlo hned několik nehod.
- Při té první v roce 1976 došlo tlakem plynu k vystřelení palivového článku ven z reaktoru do prostoru reaktorového sálu.
- O rok později došlo k částečnému roztavení aktivní zóny reaktoru a elektrárnu čekala postupná likvidace.
- Později byly postaveny další dva bloky V1 a V2, nyní jsou v provozu pouze dva reaktory druhého z nich.
- Uvažuje se nicméně o stavbě dalších bloků.

Havarijní plány a opatření k ochraně zdraví lidí při radiační havárii v jaderné elektrárně

Vnitřní havarijní plán

Žádná jaderná elektrárna nesmí být uvedena do provozu, dokud pro ni není zpracován **vnitřní havarijní plán** a zabezpečena jeho případná realizace.

- Ve vnitřním havarijním plánu je popsáno **zabezpečení základních povinností** provozovatele JE z hlediska zajištění vnitřní havarijní připravenosti a **zabezpečení ochrany zaměstnanců a** dalších osob v areálu JE v případech velmi vážných mimořádných událostí a zejména v případě vzniku radiační havárie.

Vnější havarijní plán

Vedle havarijního plánu pro vlastní elektrárnu musí být zpracovány i plány na ochranu obyvatelstva, tzv. **vnější havarijní plány**. Tyto plány se zpracovávají pro okolí jaderné elektrárny, ležící v **zóně havarijního plánování**. Prověřuje se minimálně jedenkrát za 3 roky cvičením.

- Všichni občané žijící v zónách havarijního plánování kolem jaderných elektráren pravidelně dostávají instruktážní "Příručku pro ochranu obyvatel v případě radiační havárie".
- V případě jaderné elektrárny v Dukovanech sahá zóna havarijního plánování do vzdálenosti 20 km kolem elektrárny. Pro jadernou elektrárnu Temelín je stanovena zóna o poloměru 13 km, ve které leží i město Týn nad Vltavou.
- Vnější havarijní plány obsahují ve smyslu mezinárodních doporučení zejména následující **opatření k ochraně zdraví obyvatelstva při radiační havárii**: vyrozumění a varování, monitorování radiační situace, ukrytí, jódivou profylaxi, evakuaci, regulaci pohybu osob, dozimetrickou kontrolu a dekontaminaci, regulaci využívání potravin, pitné vody a jejich zdrojů a zdravotní péči.
- Jednotlivé druhy opatření k ochraně zdraví obyvatelstva mají různý význam v různé době po havárii. Proto se některá z nich plánují či uvažují **v časně fázi** radiační havárie (reprezentuje ji den vzniku havárie, popř. několik dní následujících), některá **ve střední fázi** (období více dnů po vzniku radiační havárie) a některá **v pozdní fázi** (období více týdnů po vzniku radiační havárie).

- V jaderné elektrárně, v jejím okolí i po celém území ČR se soustavně provádí a vyhodnocuje měření radioaktivity. Provádí se takzvané **monitorování radiační situace**. V případě radiační havárie umožňuje monitorování účelně rozhodovat o potřebě provádět opatření na ochranu zdraví lidí a životního prostředí.
- **Nejdůležitějšími opatřeními na ochranu zdraví lidí v časně fázi radiační havárie jsou:**

a/ varování obyvatelstva

b/ ukrytí obyvatelstva v budovách

c/ jódová profylaxe

d/ evakuace osob

Varování obyvatelstva

- Obyvatelstvo je v případě radiační havárie upozorněno na vznik havarijního stavu v jaderné elektrárně elektrickými sirénami pomocí signálu "Všeobecná výstraha" (kolísavý tón sirény po dobu 140 sekund).
- Tento signál vyžaduje od osob nacházejících se v zóně havarijního plánování okamžité ukrytí v budovách a zapnutí televizních a rozhlasových přijímačů. Prostřednictvím televizního a rozhlasového vysílání občané obdrží informace o vzniku havarijního stavu na jaderné elektrárně a pokyny pro provedení ochranných opatření, tj. pro ukrytí, jódovou profylaxi, evakuaci a další činnost.

Ukrytí

- Ukrytí obyvatelstva v budovách podstatně snižuje přímé ozáření osob ionizujícím zářením a možnost vdechování radioaktivních látek.
- Ukrytí obyvatelstva se plánuje a při radiační havárii provádí v celé zóně havarijního plánování ihned po varování sirénami.
- Při ochraně obyvatelstva ukrytím má největší význam ukrytí ve vlastních bytech a různých společenských budovách. Obyvatelé musí zůstat ukryti po dobu, která je jim oznámena ve sdělovacích prostředcích.

Jódová profylaxe

- Mezi radioaktivní prvky, které by mohly uniknout z jaderné elektrárny při radiační havárii, patří i radioaktivní izotopy jódu. Vdechovaný jód se usazuje ve štítné žláze osob.
- Usazování radioaktivního jódu lze zabránit tím, že štítnou žlázu nasatíme normálním, neradioaktivním jódem. Proto má každý občan, žijící v zóně havarijního plánování, k dispozici tablety jodidu draselného, které musí po varování o vzniku radiační havárie pozřít v množství uvedeném v televizní a rozhlasové relaci.

Evakuace

- Evakuací rozumíme neprodlené rychlé přemístění osob z ohrožené oblasti do míst ležících mimo zónu havarijního plánování. Evakuace při radiační havárii se plánuje jen z obcí, v nichž by ukrytí a jódová profylaxe nemusely být dostatečně účinným opatřením na ochranu zdraví. Evakuace se plánuje z obcí nacházejících se ve vzdálenosti do 10 km od elektrárny.
- Při radiační havárii se provádí z území do 5 až 10 km od elektrárny. Pokyny pro ukrytí, jódovou profylaxi a evakuaci jsou podrobně uvedeny v "Příručce pro ochranu obyvatel v případě radiační havárie".
- V období střední a pozdní fáze havárie se na základě výsledků monitorování radiační situace evakuovaní buď vrací do svých obcí, anebo se podrobují přesídlení.

Přesídlení obyvatelstva je dlouhodobé opatření, které se předem neplánuje a nepřipravuje. Jeho smyslem je zabránit pobytu obyvatelstva v nepřípustně zamořených oblastech. Podle potřeby může dojít i k přesídlení obyvatelstva, které nebylo v časně fázi havárie evakuováno.

Regulace pohybu osob se plánuje a připravuje pro časnou a střední fázi radiační havárie v územních celcích spadajících do zóny havarijního plánování. Úkolem regulace pohybu osob na ohroženém území je zabránit vstupu osob do ohroženého prostoru, zajistit průjezdnost komunikací pro monitorovací skupiny, pro evakuaci obyvatelstva a přesuny sil a prostředků provádějících záchranné a likvidační práce, snížit ozáření a radioaktivní kontaminaci osob, zabezpečit ochranu majetku a celkově racionálně usměrnit dopravu a přepravu osob v ohrožené oblasti.

- Regulace je organizována jednotkami Policie ČR, které jsou později doplněny i vojenskými jednotkami.
- Na výjezdech ze zóny havarijního plánování se plánují, zajišťují a případně realizují **regulační místa**, kde by se mj. prováděla **dozimetrická kontrola osob**, vozidel a materiálů vyvážených ze zóny havarijního plánování.
- V blízkosti regulačních míst se zřizují místa pro provádění **dekontaminace**. Jde zpravidla o veřejné či podnikové umývárny nebo sprchy a o **místa speciální očisty** budovaná polním způsobem vojenskými záchrannými útvary.

Regulace používání potravin, vody a krmiv se plánuje a připravuje pro územní celky v zóně havarijního plánování.

- V časně fázi radiační havárie se vydává zákaz spotřeby všech potravin a krmiv na ohroženém území s výjimkou vhodně skladovaných a chráněných proti radioaktivní kontaminaci.
- Zákaz požívání vody a jejího používání k potravinářským účelům a k napájení hospodářských zvířat je vydáván pro neupravenou vodu odebranou z nechráněných vodních zdrojů a pro dešťovou vodu.

Podle charakteru vzniklé radiační situace se organizují, zavádějí a odvolávají další odpovídající **zemědělská, vodohospodářská, veterinární a zásobovací opatření.**

- **Relativní význam těchto opatření stoupá s dobou uplynulou od havárie,** tj. tato opatření se zvažují zejména ve střední a popř. pozdní fázi radiační havárie.

Zdravotní péče při radiační havárii spočívá v komplexu léčebně preventivních, hygienických a protiepidemických opatření.

- K jejímu zajištění se zpracovávají územní traumatologické plány.

Traumatologický plán

Traumatologické plány jsou z hlediska zájmu zdravotnictví zásadní částí havarijních plánů k poskytování nezbytné zdravotní péče při výskytu hromadného postižení osob na zdraví v důsledku mimořádné události.

- Zpracování traumatologických plánů jako plánů zdravotnických opatření je možné spojit s agendou krizového řízení na základě souvislosti, kterou je odpovědnost krajů za připravenost k řešení mimořádných událostí na svém správním území a je podmínkou připravenosti krizové. Dokumentační podobou připravenosti na řešení mimořádných událostí jsou havarijní plány (havarijní plán kraje a vnější havarijní plán kraje), jejichž přílohami jsou i traumatologické plány.
- Primární účel je zpracování traumatologických plánů v rámci krizové připravenosti zdravotnictví. Účelem je připravenost na zajištění zdravotnické pomoci při řešení mimořádných událostí. Proto i když je podchycení termínu traumatologický plán v obecně závazných právních předpisech vázáno na havarijní plánování a zvládání mimořádných situací podle zákona č. 239/2001 Sb., o *Integrovaném záchranném systému*, patří zpracování traumatologických plánů do působnosti rezortu zdravotnictví, a tím také do působnosti útvarů zdravotnictví krajských úřadů a jimi spravované části agendy krizového řízení kraje.

Vzhledem k rozdílnosti typu prvků systému k zajištění zdravotnické pomoci je traumatologický plán vnitřně diferencován:

1. Traumatologický plán zdravotnické záchranné služby

- zajištění přednemocniční neodkladné péče v místě mimořádné události s výskytem hromadného postižení osob a předání do cílových zdravotnických zařízení (i mimo region).

MRC – medical rescue capacity

počet osob, který je schopna záchranná služba ošetřit
za jednotku času

MTC – medical transport capacity

počet osob, který je schopna transportní služba převézt
za jednotku času

2. Traumatologický plán zdravotnického zařízení

- zajištění urgentního i neurgentního příjmu postižených osob z prostoru mimořádné události a zajištění následné odborné zdravotní péče podle charakteru postižení zdraví.
- scénář zdravotnického zařízení na situaci, kdy bude sehrávat roli příjmového pracoviště pro hromadná neštěstí.
- důležité je, aby se postižení se svým zraněním dostali do nemocnice, kde jsou na tato postižení připraveni.
- nutné umět transformovat chod zdravotnického zařízení ze standardní činnosti do činnosti méně standardní.
- na vstupu do nemocnice systém třídění 1. – 7. typu poranění.
- první, kdo zpracovává traumatologický plán, je územní záchranná zdravotnická pomoc.
- nutná neustálá aktualizace výběru zdravotnických zařízení a kontrola, jestli dané pracoviště stále funguje.

HTC – hospital therapy capacity

léčebná kapacita dané nemocnice (3% lůžek za hodinu)

Př: kapacita 1300 lůžek = nemocnice musí připravit takovou kapacitu týmů, aby zvládla přísun 39 pacientů za hodinu

3. Traumatologický plán správního úřadu

- organizace využití okamžité kapacity všech dosud nevyužitých zdravotnických zařízení na správním území k zajištění zdravotní péče o ostatní postižené a ukryté či evakuované zdravotně nepostižené obyvatele v součinnosti s ostatními kraji při poskytnutí výpomoci v rámci krizové připravenosti zdravotnictví daného správního celku, v souladu s platnými právními předpisy.

Na plánování a provádění opatření k ochraně obyvatelstva se podílejí orgány státní správy a samosprávy měst a obcí, složky Integrovaného záchranného systému (zejména Hasičského záchranného sboru ČR) a další orgány a organizace.

Důležitým faktorem k zajištění ochrany lidí při radiační havárii je **havarijní připravenost**. Opatření k ochraně obyvatelstva uvedená v havarijních plánech musí být zabezpečena povolányými a odborně zdatnými osobami, materiálem a technikou. Postupy při řešení havarijních situací je nutno pravidelně nacvičovat, procvičovat a prověřovat.

Nejvýznamnějšími orgány podílejícími se na zpracování vnějšího havarijního plánu a na zajištění havarijní připravenosti jaderné elektrárny jsou:

- Státní úřad pro jadernou bezpečnost (SÚJB),
- Koordinační krizové centrum pro radiační havárie,
- Ústředí radiační monitorovací sítě ČR (ÚRMS ČR),
- provozovatel jaderné elektrárny,
- ústřední krizový štáb a krizové štáby ministerstev,
- hejtmani, krajské úřady a pracoviště krizového řízení hasičských záchranných sborů krajů,
- starostové a obecní úřady,
- základní složky Integrovaného záchranného systému:
 - Hasičský záchranný sbor ČR, zdravotnická záchranná služba a Policie ČR
- ostatní složky Integrovaného záchranného systému :
 - vyčleněné síly a prostředky ozbrojených sil
 - ostatní ozbrojené bezpečnostní a záchranné sbory
 - orgány ochrany veřejného zdraví
 - odborná zdravotnická zařízení
 - havarijní, pohotovostní, odborné a jiné služby
 - zařízení civilní ochrany
 - podle možností a potřeb i neziskové organizace a sdružení občanů.

Funkce monitorovací sítě

1. Monitorovací síť zajišťuje **monitorování radiační situace** na území České republiky, včetně přenosu dat a správy informačního systému pro
 - a) **hodnocení radiační situace** pro potřeby sledování a posuzování stavu ozáření,
 - b) **rozhodování o opatřeních** vedoucích ke snížení nebo odvrácení ozáření v případě radiační havárie,
 - c) mezinárodní **výměnu informací** a dat o radiační situaci,
 - d) **zveřejňování a poskytování informací** a dat o radiační situaci na území České republiky.

2. Monitorování je **zajišťováno**:
 - a) **Státním úřadem pro jadernou bezpečnost** v rozsahu a způsobem stanoveným krizovým plánem
 - b) **příslušnými ministerstvy** v rozsahu a způsobem stanovenými smlouvou,
 - c) **držiteli povolení** k provozu jaderného zařízení nebo pracoviště IV. kategorie v rozsahu a způsobem stanovenými zvláštním právním předpisem a programem monitorování a vnitřním havarijním plánem.
 - d) **právníckými a podnikajícími fyzickými osobami** v rozsahu a způsobem určenými ve smlouvě o zajištění plnění úkolů vyplývajících z krizového plánu

Organizace monitorovací sítě

Monitorovací síť tvoří **stálé složky** monitorovací sítě, které pracují nepřetržitě za obvyklé radiační situace a za radiační mimořádné situace, a **pohotovostní složky** monitorovací sítě, které se aktivují při podezření na vznik nebo při vzniku radiační mimořádné situace.

Pohotovostní složky monitorovací sítě nemohou být současně zařazeny mezi stálé složky monitorovací sítě.

1. Stálé složky monitorovací sítě tvoří:

a) **síť včasného zjištění**, kterou tvoří systém měřicích míst provádějících nepřetržitě měření dávkového příkonu na území České republiky a neprodlené informování o případném zvýšení příkonu nad obvyklé hodnoty; součástí sítě včasného zjištění je teledozimetrický systém, kterým jsou prostředky pro soustavné nepřetržitě měření dávek, dávkových příkonů, aktivity radionuklidů a jejich časového integrálu v prostorách jaderného zařízení s cílem při radiační mimořádné situaci nebo podezření na ni zaznamenat a vyhodnotit únik do ovzduší a do vodotečí,

b) **síť termoluminiscenčních dozimetrů**, kterou je systém pro měření dávky záření gama na území České republiky,

c) **měřicí místa kontaminace ovzduší**, kterými jsou prostředky pro měření dávkového příkonu a pro zajištění odběrů vzorků aerosolů a spadů a pro jednoduché stanovení aktivity radionuklidů v těchto vzorcích,

d) **měřicí místa kontaminace potravin**, kterými jsou prostředky pro zajištění odběru vzorků z článků potravních řetězců a pro stanovení aktivity radionuklidů v těchto vzorcích,

e) měřicí místa kontaminace vody, kterými jsou prostředky pro zajištění odběru vzorků vody, říčních sedimentů a ryb a pro stanovení aktivity radionuklidů v těchto vzorcích,

f) měřicí místa na hraničních přechodech, kterými jsou prostředky pro získávání údajů o radionuklidové kontaminaci osob, dopravních prostředků, zboží, předmětů a materiálů na hraničních přechodech,

g) mobilní skupiny, které provádějí monitorování dávek, dávkových příkonů a aktivity radionuklidů v terénu, odběry vzorků složek životního prostředí a rozmístění a výměnu dozimetrů v sítích termoluminiscenčních dozimetrů,

h) letecké skupiny, které provádějí monitorování dávek, dávkových příkonů a aktivity radionuklidů v terénu,

i) laboratorní skupiny, které zajišťují odběry vzorků z životního prostředí, provádějí spektrometrické, popř. radiochemické analýzy vzorků životního prostředí s cílem stanovit v nich aktivity radionuklidů,

j) centrální laboratoř monitorovací sítě, která koordinuje měření vzorků odebraných laboratorními a mobilními skupinami a zajišťuje vybraná měření těchto vzorků a dále zajišťuje hodnocení výsledků těchto měření s cílem poskytnout podklady pro rozhodování o opatřeních vedoucích ke snížení nebo odvrácení ozáření osob a která koordinuje a zajišťuje měření vnitřní kontaminace osob,

k) meteorologická služba, která získává meteorologické údaje nezbytné k tomu, aby bylo možno s použitím modelů šíření uniklých radionuklidů v ovzduší provádět vyhodnocení a prognózu vývoje radiační situace

2. Pohotovostní složky monitorovací sítě tvoří:

- a) **mobilní skupiny**, které provádějí monitorování dávek, dávkových příkonů a aktivity radionuklidů v terénu, odběry vzorků složek životního prostředí a rozmístění a výměnu dozimetrů v sítích termoluminiscenčních dozimetrů,
- b) **laboratorní skupiny**, které zajišťují odběry vzorků z životního prostředí, provádějí spektrometrické, popř. radiochemické analýzy vzorků životního prostředí s cílem stanovit v nich aktivity radionuklidů,
- c) **letecké prostředky** průzkumu pro monitorování dávek, dávkových příkonů a aktivity radionuklidů v terénu,
- d) **měřicí místa kontaminace vody**, kterými jsou prostředky pro stanovení aktivity radionuklidů ve vodě, v říčních sedimentech, ve vodních makrofytech a vzorcích ryb,
- e) **měřicí místa kontaminace potravin**, kterými jsou prostředky pro stanovení aktivity radionuklidů v člancích potravních řetězců,
- f) **měřicí místa na hraničních přechodech**, kterými jsou prostředky pro získávání údajů o dávkových příkonech, radionuklidové kontaminaci osob, dopravních prostředků, zboží, předmětů a materiálů,
- g) **měřicí místa na uzavěrách**, kterými jsou prostředky pro získání údajů o dávkových příkonech a o radionuklidové kontaminaci osob, dopravních prostředků, předmětů a materiálů na hranicích uzavřených oblastí a v okolí místa radiační havárie.

Monitorovací síť pracuje v normálním režimu a v havarijním režimu.

1. Normální režim

- je monitorováním za **obvyklé radiační situace** a podílejí se na něm stálé složky monitorovací sítě. Monitorování je zaměřeno zejména na sledování časové a prostorové distribuce dávek, dávkových příkonů a aktivity radionuklidů ve složkách životního prostředí za účelem stanovení dlouhodobých trendů a včasného zjištění odchylek od nich a slouží zároveň k udržování organizační, technické a personální připravenosti složek monitorovací sítě k monitorování v havarijním režimu
- monitorování provádějí složky monitorovací sítě
- monitorování v normálním režimu v období po radiační havárii slouží též k hodnocení jejích dlouhodobých vlivů.

2. Havarijní režim

- je monitorováním za radiační mimořádné situace **nebo při podezření na její vznik** a podílejí se na něm stálé i pohotovostní složky monitorovací sítě,
- monitorování v havarijním režimu je zaměřeno zejména na:

1. **potvrzení vzniku** radiační mimořádné situace; jedná-li se o radiační mimořádnou situaci vzniklou na území České republiky, i na odhad dalšího vývoje radiační havárie a šíření radionuklidů v okolí jaderného zařízení nebo pracoviště IV. kategorie, na němž k radiační havárii došlo,
2. **identifikaci** a charakterizaci nastalého úniku,
3. **odhad dávek osob**,
4. **hodnocení vzniklé radiační situace** a přípravu podkladů pro rozhodování o opatřeních vedoucích ke snížení nebo k odvrácení ozáření osob, včetně určení území, kde jsou tato opatření z hlediska vzniklé radiační mimořádné situace doporučována,
5. **hodnocení účinnosti realizovaných ochranných opatření**,
6. **předpověď vývoje radiační situace**,

Monitorování v havarijním režimu probíhá ve dvou fázích:

1. první fáze zahrnuje období před únikem radionuklidů do životního prostředí, období, kdy radionuklidy unikají do životního prostředí, a období těsně po ukončení úniku a používají se především **jednodušší metody monitorování**, zejména měření dávkových příkonů a dávek; monitorování je zaměřeno na rychlé získání podkladů pro rozhodování o neodkladných ochranných opatřeních,
2. druhá fáze zahrnuje období po ukončení úniku, a používají se **náročnější a citlivé metody** zaměřené na stanovení aktivit radionuklidů ve složkách životního prostředí, monitorování je zaměřeno na získání podkladů pro rozhodování o následných ochranných opatřeních

Tabulka č. 1 : Monitorování za obvyklé radiační situace

Poř. číslo	Monitorovaná položka	Měřená veličina	Minimální počet míst z území ČR ¹⁾	Složka radiační monitorovací sítě ²⁾	Minimální počet odběrů/měření	Požadované parametry metody	
Zevní ozáření							
1	Zevní ozáření	Příkon dávky (dávka) ³⁾	40	SVZ	10 minutové integrační intervaly, Kontinuální měření	Od 50 nSv/h	
			Po trase cca 50 km (měření z automobilu)	MS	12 ročně (jednou měsíčně) Kontinuální měření po trase		
			150	TLD	4 ročně (tříměsíční průměrná hodnota) Kontinuální expozice		MDD ⁴⁾ < 30 μSv
			40	MS, MMKO	12 ročně (jednou měsíčně) Jednorázová měření		Od 50 nSv/h
Složky životního prostředí							
2	Aerosoly	Objemová ⁵⁾ nebo hmotnostní ⁵⁾ aktivita ⁵⁾ radionuklidů	7	MMKO, LS, CLMS	52 ročně (týdenní průměrná hodnota) Kontinuální odběr	MDA ⁶⁾ < 1x10 ⁻² Bq/m ³ pro ¹³⁷ Cs	
			1		4 ročně (čtvrtletní průměrná hodnota) Kontinuální odběr	MDA < 5x10 ⁻⁷ Bq/m ³ pro ⁹⁰ Sr MDA < 5x10 ⁻⁸ Bq/m ³ pro ²³⁸ Pu a ^{239,240} Pu	
		Celková objemová aktivita beta vyjádřená jako aktivita ⁹⁰ Sr	7		4 ročně (jednou za každé čtvrtletí) Kontinuální týdenní odběr	MDA < 5x10 ⁻³ Bq/m ³	
3	Spad	Plošná aktivita ⁷⁾ radionuklidů	7	MMKO, LS, CLMS	12 ročně (měsíční průměrná hodnota) Kontinuální odběr	MDA < 0,1 Bq/m ² pro ¹³⁷ Cs	

4	Půda a porost	Plošná aktivita radionuklidů (u přírodních radionuklidů hmotnostní aktivita)	7	MS, LS, CLMS	1 ročně Bodový odběr	MDA < 100 Bq/m ² pro ¹³⁷ Cs
4a	Půda (in-situ)	Plošná aktivita radionuklidů	7	MS, CLMS	1 ročně Bodové měření	MDA < 1000 Bq/m ² pro ¹³⁷ Cs
4b	Půda (letecká měření)	Plošná aktivita radionuklidů	1	LeS	2 ročně Jednorázové velkoplošné měření	MDA < 10 kBq/m ² pro ¹³⁷ Cs
5	Povrchová voda	Objemová aktivita radionuklidů		MMKV, LS	4 ročně (jednorázový odběr za každé čtvrtletí)	MDA < 1 Bq/l pro ¹³⁷ Cs MDA < 10 Bq/l pro ³ H
			7		1 ročně (sloučený vzorek ze 4 čtvrtletních jednorázových odběrů)	MDA < 0,06 Bq/l pro ⁹⁰ Sr
5a		Celková objemová aktivita beta po odečtení příspěvku ⁴⁰ K	7	MMKV, LS	4 ročně (jednorázový odběr za každé čtvrtletí)	MDA < 0,6 Bq/l
6	Pitná voda	Objemová aktivita radionuklidů	7	MMKV, LS, CLMS	4 ročně (jednorázový odběr za každé čtvrtletí)	MDA < 0,1 Bq/l pro ¹³⁷ Cs MDA < 10 Bq/l pro ³ H
			5			MDA < 0,06 Bq/l pro ⁹⁰ Sr
7	Vodárenský kal	Hmotnostní aktivita radionuklidů	5	MMKV, LS	1 ročně (jednorázový odběr)	MDA < 1 Bq/kg pro ¹³⁷ Cs
8	Říční sedimenty	Hmotnostní aktivita radionuklidů	5	MMKV, LS	1 ročně (jednorázový odběr)	MDA < 1 Bq/kg pro ¹³⁷ Cs

Složky potravních řetězců						
9	Mléko	Objemová aktivita radionuklidů	5	MMKP, LS, CLMS	4 ročně (jednorázový odběr za každé čtvrtletí)	MDA < 0,5 Bq/l pro ¹³⁷ Cs MDA < 0,2 Bq/l pro ⁹⁰ Sr
10	Smíšená strava ⁸⁾	Hmotnostní aktivita radionuklidů	Dle komodity ⁹⁾	MMKP, LS, CLMS	4, případně 1 ročně ⁹⁾ (směsné vorky z bodových odběrů pro jednotlivé komodity)	MDA < 0,1 Bq/kg pro ¹³⁷ Cs MDA < 0,05 Bq/kg pro ⁹⁰ Sr
11	Krmiva	Hmotnostní aktivita radionuklidů	5	LS. MMKP	1 ročně (jednorázový odběr)	MDA < 1 Bq/kg pro ¹³⁷ Cs
Vnitřní kontaminace osob						
12	Celé tělo	Aktivita radionuklidů	20 osob	CLMS	1 ročně (jednorázová měření)	MDA < 50 Bq pro ¹³⁷ Cs
13	Moč	Aktivita radionuklidů	50	CLMS	1 ročně (jednorázový odběr 24 hodinového vzorku moči)	MDA < 0,05 Bq/den pro ¹³⁷ Cs
Meteorologické údaje						
14	Ovzduší - aktuální situace	¹⁰⁾	40	MeS	Kontinuálně	Nejsou stanoveny speciální požadavky

Složka radiační monitorovací sítě: SVZ - síť včasného zjišťování, MS- mobilní skupiny, LeS - letecké skupiny, LPP - letecké prostředky průzkumu, TLD - síť termoluminiscenčních dozimetrů, MMHP - měřící místa na hraničních přechodech, MMU - měřící místa na uzávěrách, LS - laboratorní skupiny, MMKO - měřící místa kontaminace ovzduší, MMKV - měřící místo kontaminace vody, MMKP - měřící místo kontaminace potravin, CLMS - centrální laboratoř monitorovací sítě, MeS - meteorologická služba

Tabulka č. 2 : Monitorování za radiální mimořádné situace						
Poř. číslo	Monitorovaná položka	Měřená veličina	Minimální počet míst z území ČR ¹⁾	Složka radiální monitorovací sítě ²⁾	Minimální počet odběrů/měření	Požadované parametry metody
Zevní ozáření						
1	Zevní ozáření	Příkon dávky (dávka) ³⁾	40	SVZ	Kontinuálně (10 minutové integrační intervaly nebo hodinové průměry)	Do 1 Sv/h Do 10 Sv/h pro LPP
			Po Úřadem stanovené trase	MS LeS, LPP	Kontinuální měření	
			150 a dále podle pokynů Úřadu	TLD	Bude stanoveno Úřadem podle situace Průměrná hodnota za dané období	MDD ⁴⁾ < 30 μSv
			Podle pokynů Úřadu na hraničních přechodech	MMHP	Bude stanoveno Úřadem podle situace Bodová měření	Do 1 Sv/h
			Podle pokynů Úřadu na uzávěrách	MMU	Bude stanoveno Úřadem podle situace Bodová měření	
			40 a dále podle pokynů Úřadu	MS, MMKO	Bude stanoveno Úřadem podle situace Jednorázová měření	
Složky životního prostředí						
2	Ovzduší, půda	Kvalitativní radionuklidové složení směsi	Po Úřadem stanovené trase	MS	Bude stanoveno Úřadem podle situace Jednorázová měření	V závislosti na radiální mimořádné situaci
3	Aerosoly	Objemová ⁵⁾ nebo hmotnostní ⁵⁾ aktivita ⁵⁾ radionuklidů	7 a dále podle pokynů Úřadu	MS, MMKO, LS, CLMS	Minimálně denně, pokud nebude stanoveno Úřadem jinak Kontinuální odběr	MDA ⁶⁾ < 0,1 Bq/m ³ ¹³⁷ Cs ⁷⁾ MDA < 0,1 Bq/m ³ ¹³¹ I ⁷⁾
		Celková objemová aktivita beta vyjádření jako aktivita ⁹⁰ Sr		MMKO, LS, CLMS		MDA < 5x10 ⁻³ Bq/m ³

4	Plynné formy jódu	Objemová aktivita ^{131}I	7 a dále podle pokynů Úřadu	MS, MMKO, LS, CLMS	Minimálně denně, pokud nebude stanoveno Úřadem jinak Kontinuální odběr	MDA < 0,1 Bq/m ³ ^{131}I ⁷⁾
5	Spad včetně dešťové vody a sněhu	Plošná ⁸⁾ a objemová aktivita radionuklidů	7 a dále podle pokynů Úřadu	MMKO, LS, CLMS	Minimálně týdně, pokud nebude stanoveno Úřadem jinak Kontinuální odběr	V závislosti na radiační mimořádné situaci
6	Půda a porost	Plošná aktivita radionuklidů	7 a dále podle pokynů Úřadu	MS, LS, CLMS	Bude stanoveno Úřadem podle situace Bodový odběr	V závislosti na radiační mimořádné situaci
7	Porost, sníh	Plošná aktivita radionuklidů	7 a dále podle pokynů Úřadu	MS, LS, CLMS	Minimálně týdně, pokud nebude stanoveno Úřadem jinak Bodový odběr	V závislosti na radiační mimořádné situaci
8	Půda (in-situ)	Plošná aktivita radionuklidů	Podle pokynů Úřadu	MS, CLMS	Bude stanoveno Úřadem podle situace Jednorázová měření	V závislosti na radiační mimořádné situaci
8a	Půda (letecká měření)	Plošná aktivita radionuklidů	Podle pokynů Úřadu	LeS	Bude stanoveno Úřadem podle situace Jednorázová velkoplošná měření	V závislosti na radiační mimořádné situaci
9	Povrchová voda ⁹⁾	Objemová aktivita radionuklidů	7 a dále podle pokynů Úřadu	MS, MMKV, LS, CLMS	Minimálně týdně, pokud nebude stanoveno Úřadem jinak Bodový odběr	V souladu s vyhláškou č. 307/2002 Sb. ¹⁰⁾
10	Pitná voda ⁹⁾	Objemová aktivita radionuklidů	7 a dále podle pokynů Úřadu	MS, MMKV, LS, CLMS	Minimálně týdně, pokud nebude stanoveno Úřadem jinak Bodový odběr	V souladu s vyhláškou č. 307/2002 Sb. ¹⁰⁾

Kontaminace osob a materiálu

11	Povrchová kontaminace	Plošná aktivita	Podle pokynů Úřadu	MMHP MMU	Bude stanoveno Úřadem podle situace Jednorázová měření	10 Bq/cm ²
----	-----------------------	-----------------	---------------------------	---------------------	--	-----------------------

Složky potravních řetězců¹¹⁾

12	Mléko	Objemová aktivita radionuklidů	15 a dále podle pokynů Úřadu	MMKP, LS, CLMS	Minimálně denně, pokud nebude stanoveno Úřadem jinak Bodový odběr ¹¹⁾	V souladu s vyhláškou č. 307/2002 Sb.¹⁰⁾
13	Smišená strava	Hmotnostní aktivita radionuklidů	15 a dále podle pokynů Úřadu¹²⁾	MMKP, LS, CLMS	Minimálně denně, pokud nebude stanoveno Úřadem jinak Bodové odběry pro jednotlivé komodity ¹¹⁾	V souladu s vyhláškou č. 307/2002 Sb.¹⁰⁾

Vnitřní kontaminace osob

14	Celé tělo	Aktivita radionuklidů	Podle pokynů Úřadu	CLMS	Bude stanoveno Úřadem podle situace	MDA < 500 Bq ¹³⁷ Cs
15	Štítná žláza	Aktivita ¹³¹ I	Podle pokynů Úřadu	CLMS	Bude stanoveno Úřadem podle situace	MDA < 500 Bq ¹³¹ I

Meteorologické údaje

16	Ovzduší - aktuální situace	¹³⁾	40	MeS	Kontinuálně	Nejsou stanoveny speciální požadavky
17	Ovzduší - prognóza situace	¹⁴⁾	14)	MeS	Bude stanoveno Úřadem podle situace	Podle možností modelů šíření radionuklidů v ovzduší

MDA má význam minimální detekovatelné aktivity

Plošnou aktivitou se rozumí podíl aktivity a plochy, ze které byl vzorek odebírán

B/ Slučování atomových jader. Termojaderné reakce.

Druhou cestou, jak získat energii při jaderných reakcích, je **syntéza** (spojování, fúze) **jader lehkých prvků** na prvky těžší.

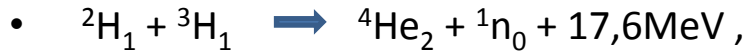
Uvolňuje se přitom velké množství vazbové energie, neboť středně těžká jádra mají mnohem vyšší vazbovou energii nukleonů než jádra lehká.

Energeticky nejúčinnější a zároveň nejsnadněji uskutečnitelné jsou fúze lehkých jader ^1H , ^2H , ^3H , ^3He , ^6Li , při kterých vzniká většinou jádro hélia ^4He , které má mezi lehkými jádry obzvlášť vysokou vazbovou energii.

Existuje několik reakcí syntézy nejlehčích jader:



Pro energetické využití je z nich nejzajímavější reakce mezi deuteriem a tritiem:



která probíhá ze všech nejsnadněji a uvolňuje se při ní značné množství energie; uvolněnou energii odnášejí ve formě své kinetické energie neutron (14,1MeV) a jádro hélia (3,5MeV).

Oproti štěpení jader má jaderná syntéza velké **principiální výhody**:

1. Podstatně **vyšší energetická účinnost** - ve vztahu na hmotností jednotku paliva je zhruba 10-krát vyšší než u štěpných reakcí.
2. **Čistota** - nedochází k ohrožení radioaktivitou, produkty vznikající při jaderné syntéze v zásadě nejsou radioaktivní (výsledným "odpadem" je neškodné hélium). Radioaktivní tritium ${}^3\text{H}$ lze v budoucím reaktoru vyrábět i spotřebovávat v **uzavřeném cyklu**.
3. **Bezpečnost provozu** - zatímco štěpný reaktor má uvnitř uloženo nadkritické množství štěpného paliva na celou dobu provozu palivových článků a hrozí nebezpečí nekontrolovatelné jaderné reakce, přehřátí reaktoru a pod., do termojaderného reaktoru bude palivo přiváděno postupně v malých množstvích, přičemž jakákoli porucha funkce naruší optimální podmínky pro průběh fúze a **reakce se samovolně zastaví**.

Termojaderné reakce

Jak slučování jader uskutečnit? K tomu, aby se dvě jádra mohla sloučit, musí se vzájemně **přiblížit** k sobě na vzdálenost $\gg 10^{-13}$ cm, kde začnou působit přitažlivé jaderné síly.

- Přitom musí překonat Coulombovské elektrické odpuzivé síly působící mezi souhlasně kladně nabitými jádry, což mohou udělat jedině urychlením na velké kinetické energie - dodáním **vysoké aktivační energie**.
- Pro realizaci jaderné syntézy v makroskopickém měřítku existuje jediná cesta dosažení potřebné aktivační energie: provést reakci při **velmi vysoké teplotě** - odtud název **termonukleární reakce**.
- Reagující deuterium a tritium je pro uskutečnění jaderné syntézy třeba zahřát na teplotu min. $\gg 10^7$ stupňů. Při takové teplotě se každá látka nachází ve stavu plně ionizované **plazmy** - všechny atomy jsou rozloženy na volné elektrony a holá jádra; tato jádra se pak mohou prudce srážet a vzájemně slučovat.

Explozivní termonukleární reakce

Podobně jako štěpné jaderné reakce, mohou i termonukleární jaderné reakce probíhat **neřízeně** (explozivně), nebo **řízeně** (ustáleně).

- Neřízená termonukleární reakce je podstatou zneužití jaderné fúze v tzv. "**vodíkové bombě**": směs tritia a deuteria, popř. sloučenina lithia a deuteria LiD, se **jadernou roznětkou** (např. explozivní štěpnou reakcí ^{235}U či ^{239}Pu - vlastně výbuchem menší "atomové bomby") prudce zahřeje na teplotu kolem 100miliónů stupňů, čímž dojde k **explozivní termonukleární reakci** za uvolnění mnohonásobně větší energie než u štěpné "atomové bomby".
- Speciální variantou termonukleární zbraně je tzv. **neutronová bomba**, která využívá pronikavé neutronové záření, vznikající explozí malé termonukleární nálože. Příklad berylia vede k intenzivní produkci neutronů. Byla navržena jako taktická radiační zbraň proti "živé síle", s potlačeným destruktivním účinkem.

Na rozdíl od štěpení těžkých jader, při termojaderném slučování **nedochází k řetězové reakci**, neboť vyprodukované teplo a tlak nejsou dostačující pro spuštění další fúze.

- Podmínky pro probíhání jaderné fúze musejí být zajištěny **zvenčí** - vysoká teplota a tlak + udržení vysokoteplotní plasmy po dostatečně dlouhou dobu - buď inerciálně explozí, nebo silným magnetickým polem, popř. gravitací ve hvězdách.

vodíková bomba

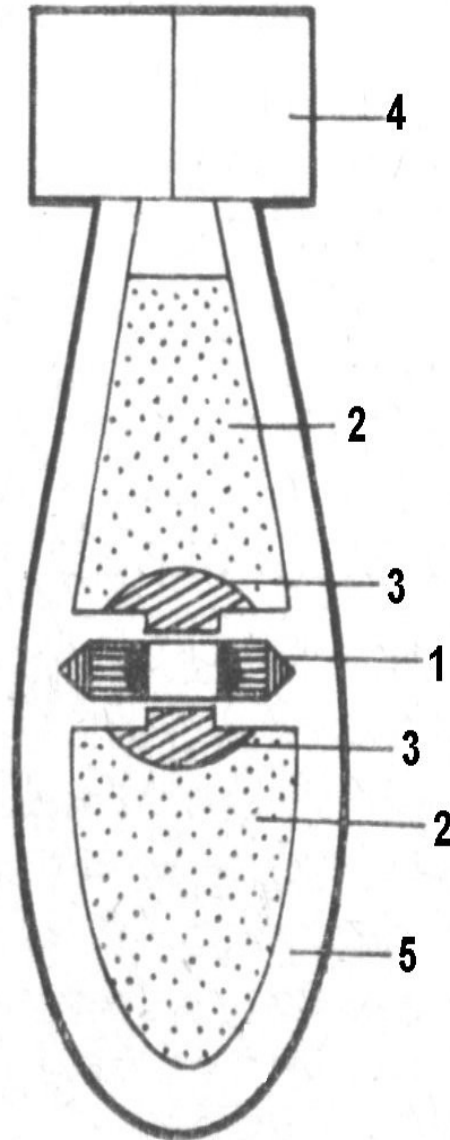
1 - malá atomová
bomba

2 - deuterium

3 - tritium

4 - kormidlo

5 - kobaltový obal



vysokých teplot, při kterých je látka zcela ionizována na jádra a elektrony za vzniku tzv.

plazmatu, je možné dosáhnout jen při atomových explozích.

Toho bylo využito při konstrukci vodíkové bomby

Řízená termonukleární reakce

Mírové využití termonukleární energie je možné jen tehdy, podaří-li se uskutečnit **řízenou termonukleární reakci** - zkonstruovat **termonukleární reaktor**. Aby taková termonukleární reakce mohla proběhnout, je potřeba zajistit dvě základní podmínky:

- 1. Vytvořit vysokoteplotní plasmu** z jaderného paliva (směsi D a T).
- 2. Udržet koncentraci** této plasmy po dobu potřebnou k proběhnutí fúze, než se stačí tepelným pohybem rozletět.
 - Potřebná doba udržení závisí na koncentraci plasmy. Při vysokých hustotách řádu $\sim 10^{25}$ iontů/cm³ stačí desítky pikosekund (explozivní fúze), při nízkých hustotách $\sim 10^{14}$ iontů/cm³ jsou to řádově sekundy (fúze probíhá plynule).

TOKAMAK

komora naplněná plynem (deuterium, tritium) jako **sekundární cívka** velkého **transformátoru**.

- Vybitím mohutné kondenzátorové baterie do **primární cívky** se v sekundární cívce indukuje silné elektrické pole – dojde k průrazu plynu – teče **velký proud** ($10^6 - 10^7$ A), který:
- **zahřívá** plazma
- **vytvoří** vlastní magnetické pole, stlačuje plazma k podélné ose komory a tím ho **dále zahřívá** a **izoluje** od stěn komory.
- další **pomocné cívky** vytvářejí **přídavné magnetické pole** ve směru osy pro **zmenšení úniku částic** z plazmatu a zajišťují jeho **stabilizaci**

