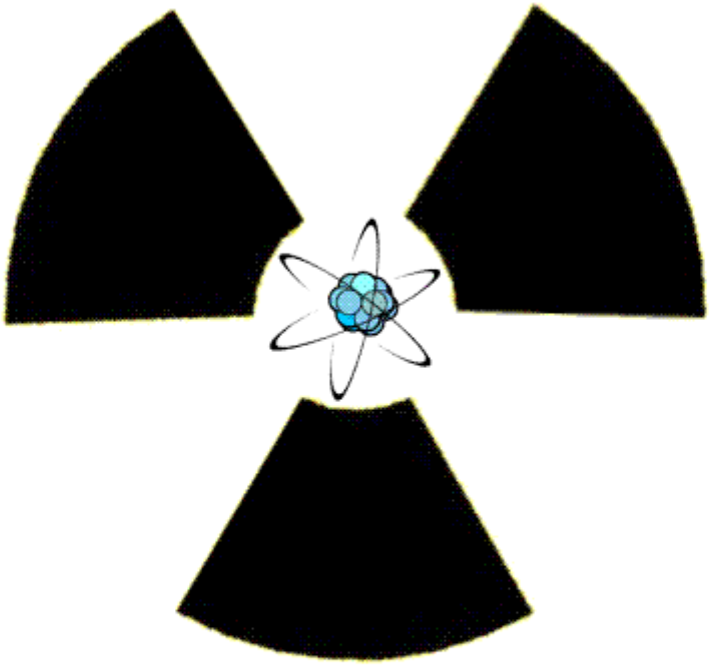
FENOMÉN OKLO



JAK NAHLÍŽET NA JADERNOU ENERGII VE SVĚTLE DLOUHODOBÝCH VLIVŮ NA ŽIVOTNÍ PROSTŘEDÍ ?
PŘÍRODNÍ REAKTOR – OPOMENUTÝ DŮKAZ PŘIROZENOSTI TRANSFORMAČNÍCH PROCESŮ JADERNÉ ENERGIE

Lubomír Mazal

Energie je podstatné jméno popisující fyzikální veličinu, která bývá charakterizována jako schopnost hmoty konat práci. Známe několik druhů energií. Základní rozdělení bychom mohli udělat do dvou kategorií a to na energie podle zdroje energií a energie podle působící síly. Energie podle zdroje energii jsou nejčastěji sluneční energie, vodní energie, větrná energie, geotermální energie, energie mořských vln, ohně, páry, ale třeba i svalů. Z té je odvozena i jedna z prvních základních jednotek energie „koňská síla“. Dělíme-li energie dle druhu působící síly, rozdělíme je na jednotlivé podčásti jako na mechanickou energii, elektrickou energii, magnetickou energii, energii záření a vnitřní energii. A právě o vnitřní energii, respektive o jejich částech tepelné, chemické a zejména jaderné energii bych chtěl v této práci psát.

Vztah člověka k energiím nebyl odjakživa kladný. Z některých špatných zkušeností s nimi vznikla pořekadla jako například to o ohni jako dobrém sluhovi, ale zlém pánovi. Jakmile ale homo sapiens, tvor to zvídavý, pochopil základní principy, kterými tyto energie vznikají, zanikají a popřípadě se transformují, chtěl si je podrobit a využít k účelům zkomfortnění obyvatelnosti planety Země.

Ať už pálíme dříví k přípravě nedělního oběda, uhlí k vytvoření klimatického komfortu ve svém obydlí, naftu v automobilu na dojetí do práce, či na nákup, čerpáme energie z darů matky nás všech, Země.

Jeden z nedávno objevených zdrojů energie, vzato z pohledu historie Země i lidstva samotného, je energie atomu, respektive jádra atomu. Od toho vzniklý název jaderná energie.

Jaderná energie

Onen zmíněný druh energie by se dal také popsat již dříve zmíněným pořekadlem. Ano i jaderná energie může být dobrý sluha, zejména ve výrobě levné elektrické energie, ale i zlý pán a to hlavně jako štěpný materiál k výrobě jaderných bomb. Zde bych hlavně zmínil jména dvou měst Nagasaki a Hirošima a čísla, která si snad ani nezaslouží jednotku **40 000** a **80 000**.

Hirošima 1945

Prudký nárůst výstavby jaderných zařízení byl zaznamenán v 70. letech jakožto odpověď na ropnou krizi.

Bohužel ale i mírumilovné využití atomové energie se nepodařilo vždy zvládnout bez jakýchkoliv následků. Nejdůležitější a nejznámější událostí se v této oblasti stal výbuch reaktoru čtvrtého bloku typu RBMK Černobylské elektrárny, a hlavně následný požár a únik radioaktivity a ionizujícího záření do okolí. Tato událost se bezprostředně dotkla 31 lidí, kteří bezprostředně zemřeli na nemoc z ozáření. Několik tisícovek lidí poznamenala zejména absorpcí radioaktivního jódu, ale jak dokládají poznámky IAEA, přestože černobylská havárie uvolnila tolik radioaktivní kontaminace jako 400 bomb z Hirošimy, byla její celková velikost asi 100× až 1000× menší než kontaminace způsobená atmosférickými testy atomových bomb polovině 20. století. Z pohledu jaderné historie jde ovšem o zcela podstatnou událost, která způsobila všeobecnou paniku a v některých zemích až odpor k jaderné energii jako takové.

Čeho se vlastně ti lidé bojí? K čemu v jaderných elektrárnách dochází?

V jaderné elektrárně se teplo potřebné k výrobě elektřiny získává za pomoci řetězové reakce. Od uhelné elektrárny se jaderná liší například tím, že nemá topeniště a komín. Místo toho má reaktor, v němž je umístěno jaderné palivo. Tento prostor se nazývá aktivní zóna, která obsahuje palivové tyče (zdroj neutronů) a absorpční orgány (regulační kazety) a zejména chladivo, které je také moderátorem a reflektorem. V této aktivní zóně probíhá samotné štěpení.

Štěpení

V u nás provozovaných jaderných elektrárnách se teplo potřebné k výrobě elektřiny získává štěpením ^{235}U tzv. tepelnými neutrony.

Impulsem pro štěpení ^{235}U je srážka neutronu s jádrem atomu (a). Štěpící se jádro se deformuje a protahuje(b) , až se jádro rozštěpí (c). Při štěpení jádra uranu se vždy uvolní dva až tři neutrony (d). Ty pak po zmoderování (zbrzdění lehkou vodou) mohou narazit do dalších jader uranu a vyvolat další štěpení. Vzniká řetězová štěpná reakce jádra (f)

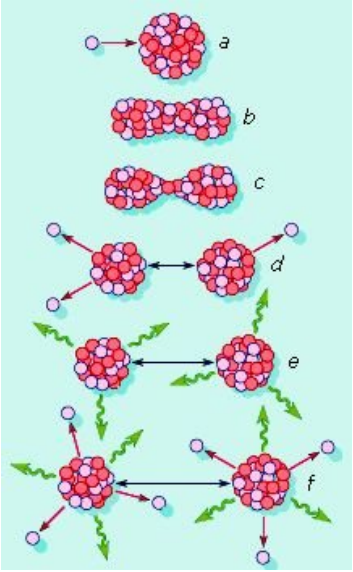


Schéma štěpné reakce

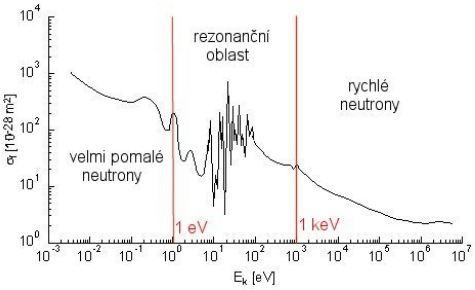
Rozdělení neutronů

Okamžité neutrony

Neutrony uvolňované ihned při štěpení. Je jich cca 99,3 %. Jelikož je jejich střední doba života velmi krátká cca 10^{-4}s, jsou pro řízení štěpné reakce, respektive reaktoru nevhodné.

Zpožděné neutrony (tepelné)

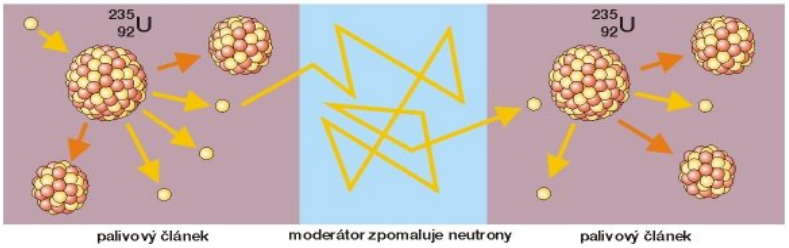
Neutrony, které jsou emitovány ze štěpných trosek se zpožděním až několika sekund. Zpožděných neutronů je cca 0,7 %. Vzhledem ke své střední době života, jež je cca 0,1 s, mají velký význam pro řízení štěpné reakce v jaderných reaktorech.



Energetické spektrum neutronů

Zpomalování neutronů = moderace

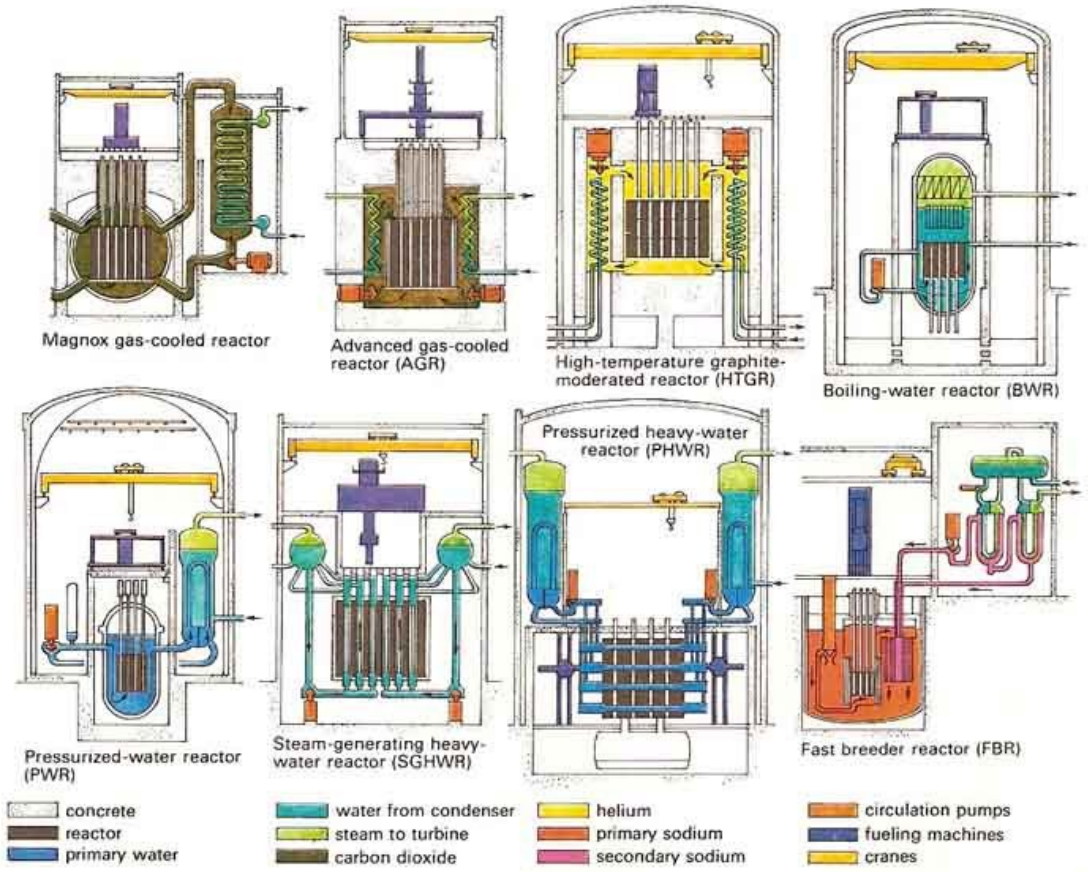
Neutrony, které se uvolňují během štěpení, mají vysokou energii a tudíž malou pravděpodobnost rozštěpit jádro ^{235}U. Pro zvýšení pravděpodobnosti štěpení ^{235}U musíme neutrony zpomalit = zmoderovat. Jako moderátor používá lehká voda.



Vývin a odvod tepla v reaktoru

Jak již bylo řečeno, teplo potřebné k výrobě elektřiny se v aktivní zóně získává štěpením ^{235}U. Zabezpečení spolehlivého odvodu tohoto tepla chladivem je nutnou podmínkou normálního a bezpečného provozu jaderné elektrárny. Použité chladivo musí zajistit vyloučení možnosti tavení paliva a zamezení vzniku krize varu. Jako chladivo a moderátor se používá již zmíněná chemicky upravená lehká voda.

Jaderné reaktory typu VVER 440 či VVER 1000 u nás provozované jsou kampaňovitého charakteru. To znamená, že palivo potřebné k jejich chodu se mění se čtyřletou periodou. Každý rok se vymění 1/4 paliva, které se ještě nechává dochlazovat mimo aktivní zónu nežli se převeze k uskladnění.



Vyhořelé jaderné palivo:

Jedním z hlavních problémů současné jaderné energetiky je vyhořelé jaderné palivo, které vykazuje vysoké aktivity řady radioizotopů, často se značně dlouhým poločasem rozpadu. Vedle poměrně krátkodobých radionuklidů jako je ^{131}J s poločasem rozpadu 8 dnů, je v něm obsaženo velké množství např. ^{137}Cs s pol. rozpadu 30rok), ^{90}Sr s $T_{1/2}$ 28,8roků, ^{241}Am ($T_{1/2}$ 458roků), ^{239}Pu ($T_{1/2}$ 2.10^{4}roků), ^{240}Pu ($T_{1/2}$ 6.10^{3}roků) a řada dalších.

Nakládání s vyhořelým jaderným palivem v ČR:

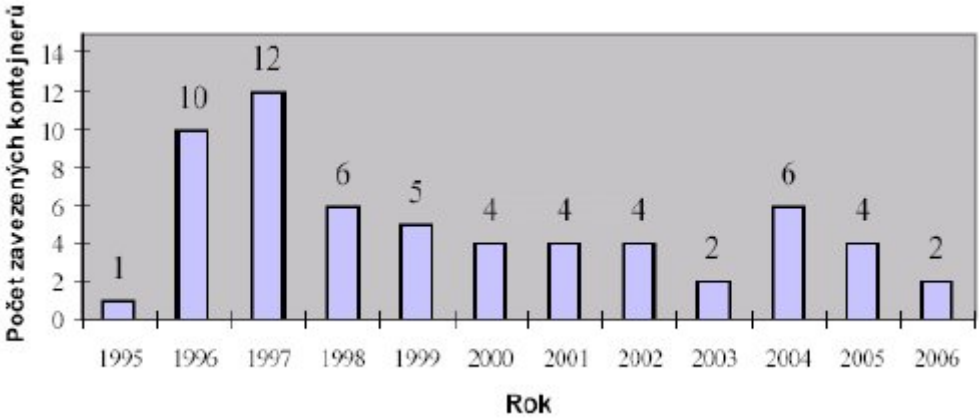
Od spuštění prvního reaktoru na světě, nebo určitě už před tím, si lidstvo nejednou položilo Nerudovskou otázku: **„Kam s ním?“.**

V době budování dukovanské elektrárny v roce 1974 a i v počátcích stavby Temelína se skladování a ukládání vyhořelého jaderného paliva na našem území nepředpokládalo. Tehdejší Československo mělo mezistátní smlouvu se Sovětským svazem o předání a odvezení veškerého vyhořelého paliva na jejich území, k čemuž nás nutily okolnosti minulého režimu a skutečnost, že jsme byli součástí sovětského bloku. Po převratu se tato skutečnost změnila a v roce 1991 Rusko zakázalo skladování a ukládání VJP na jejich území. Tyto okolnosti vedly k uvažování o jiné variantě, kterou se stalo vybudování nejprve meziskladu a po té hlubinného úložiště na území ČR. Výběru vhodné lokality pro vytvoření meziskladu VJP na základě několika kritérií (bezpečnost, ekonomika, logistika…) vyhovovala a byla vybrána lokalita jaderné elektrárny Dukovany, která svou již existující infrastrukturou zaručovala včasné vybudování meziskladu.

Palivová kazeta

Mezisklad, respektive jeho kapacita měla být na celou životnost elektrárny. Tento záměr byl však v roce 1992 změněn a kapacita meziskladu se snížila jen na 600 tun VJP což byly 2/5 původní kapacity). V roce 1997 kdy byl ukončen dvouletý zkušební provoz, mezisklad Dukovany přešel do trvalého provozu. Uskladnilo se zde celkem 5040 vyhořelých palivových souborů v celkovém počtu 60-ti kontejnerů typu CASTOR 440/84 německé firmy GNS NUKEM. Dozor nad meziskladem provádí SÚJB, ale odpovědnost provoz spadá na ČEZ. V roce 2004 byl v areálu Jaderné elektrárny Dukovany vybudován koncepčně identický nový sklad o rozloze 55 000 m3 o kapacitě 1340 tun, tj. 133 kusů obalových kontejnerů Castor 440/84 M, který měl pojmout veškerou produkci vyhořelého paliva až do doby ukončení provozu jaderné elektrárny Dukovany. Mezisklad přešel do trvalého provozu v roce 2008.

Provoz meziskladu VJP (Dukovany)



Paliva se na svou cestu do meziskladu vydává v reaktorové hale. Palivové kazety se po vyjmutí z aktivní zóny reaktoru vloží do bazénu na 4-5 let k vychladnutí. Po té se pod vodou překládají do kontejneru. Ten se vyzvedne z bazénu, vysuší, naplní heliem a přenese na upravený železniční vagón. Kolejemi vedoucí vnitřkem areálu elektrárny je kontejner přepraven do přijímací části meziskladu. Na kontejner se napojeny kabely monitorovacího systému uloží se na patřičné místo a tím je celé uskladňování u konce. Sebemenší změny v meziskladu jsou monitorovány a pod neustálým dohledem.

Kontejner Castor 440/84

Nejdůležitější funkcí kontejneru Castor 440/84 je bezpečně oddělit vyhořelé jaderné palivo od svého okolí a odstínit radioaktivního záření vznikající při přirozeném rozpadu produktů štěpení v palivu. Další funkcí je bezpečně odvést teplo, které se uvolňuje při rozpadu a ochránit palivo před vnějšími vlivy které by vést k poškození paliva. Životnost těchto obalových souborů je zhruba 50 až 60 let, což je předpokládaná životnost jaderné elektrárny Dukovany.

Kontejner odlitý z jednoho kusu speciální tvárné litiny, tlustý 37 cm, je vevnitř pokrytý niklem, který jej chrání proti korozi. Vnitřní prostor kontejneru vyplněný heliem je utěsněn dvěma víky, primárním a sekundárním. Palivové kazety jsou do kontejneru umístěny ve speciálním palivovém koši, vyrobeném z bórovaného hliníku, který brání jejich samovolnému pohybu a vzájemnému dotyku.

Každý kontejner pojme 84 palivových kazet. Naplněný kontejner má hmotnost 120 tun.

Plánovaný mezisklad VJP Temelín

Do konce roku 2013 je v možnostech elektrárny skladovat použité palivové kazety v bazénu vyhořelého paliva vedle reaktoru. Po tomto datu bude potřeba zajistit skladování vyhořelého jaderného paliva v nově vybudovaném skladu v areálu elektrárny.

V prosinci 2002 byla zpracována studie proveditelnosti realizace skladu vyhořelého jaderného paliva v elektrárně Temelín. Na tuto studii navazovala různá projednávání, zkoumání vlivů na životní prostředí. V srpnu roku 2008 SÚJB vydalo rozhodnutí o povolení výstavby. Sklad bude založen na stejném principu jako sklady v jaderné elektrárně Dukovany, tedy suchý způsob skladování v kontejnerech Castor 440/84M.

Stejně jako v Dukovanech i zde tento způsob skladování nevylučuje případné přepracování vyhořelého paliva. Kapacita skladu bude 1370 tun, což by mělo stačit na 30 let provozu Temelína.

Konečná fáze nakládání s VJP (backend)

Vznik vyhořelého jaderného paliva je největším problémem jaderné energetiky. V současné době se nabízejí pouze dvě alternativy nakládání s tímto nebezpečným materiálem. Tzv. přímé uložení anebo jeho přepracování a uložení zbytků po přepracování. Česká Republika neodmítá ani jednu z těchto variant. Vzhledem ke stávajícím skladům v Dukovanech a připravovaném skladu v Temelíně, jejichž životnost je zhruba 40 až 50 let, má ČR prozatím dostatek času pro vybrání varianty, kterou bude v budoucnu prosazovat.

Možnosti, které jsou dosud známy a které jsou v lidských silách, jsou známy dvě. Jedna z nich je přepracování vyhořelého paliva a jeho opětné využití v palivovém cyklu. Bohužel i přes dosažené úspěchy při vývoji technologie se ukázalo, že ceny regenerovaného uranu a získaného plutonia nepokryjí náklady na přepracování. Proto si přepracovávání vysoce aktivního odpadu mohou dovolit jen některé státy (Francie, Velká Británie, Rusko). Z jedné tuny vyhořelého paliva tak vzejde jen 115 litrů vysoce aktivního odpadu, který se dále zpracovává vitrifikací.

První závod na vitrifikaci odpadů byl uveden do provozu v roce 1978 ve francouzském Marcoule. Dalším byly Čeljabinsk (1987), francouzský závod Cap de La Hauque (1989) a nakonec Windscale ve Velké Británii (1990). Projekty na vitrifikační závody mají i další země a tento proces byl zvládnut také u nás v ČR v Ústavu jaderného výzkumu v Řeži.

Pro ČR je v dnešní době jediným ekonomicky vhodným způsobem nakládání s VJP, skladování ve zbudovaném hlubinném úložišti.

<u>Plánované hlubinné úložiště VJP</u>

Základní myšlenka, na níž je koncepce, na níž je koncepce zneškodnění VJP postavena, zní: uložit vyhořelé palivo hluboko do země tak, aby se radioaktivní látky v něm obsažené nedostaly zpět na povrch dříve, než za sto tisíc let. Po této době již budou pro lidi a životní prostředí neškodné.

Vybudovat hlubinné úložiště není možné vybudovat kdekoli. Nalezení a prozkoumání geologické podloží, které splní řadu podmínek jako je geologicky dlouhodobá stabilita, neporušenost, minimální výskyt podzemních vod a horninový materiál tvořící přirozenou bariéru proti šíření radioaktivity z odpadů je časově a vývojově náročná činnost.

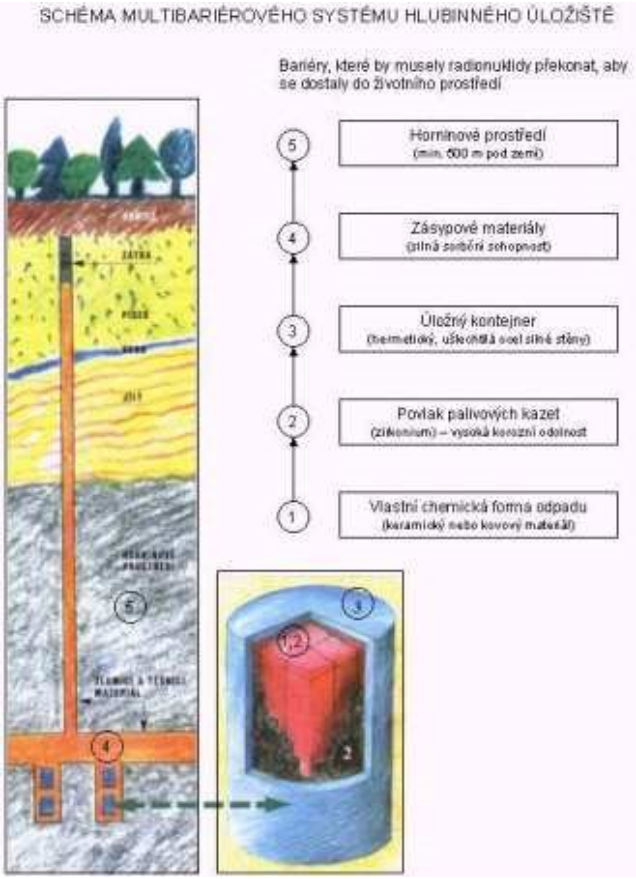
V České Republice bude tyto podmínky pro zbudování hlubinného úložiště splňovat žulový masív v seismicky stabilní oblasti. Vysoce radioaktivní odpad se zde bude ukládat dlouhodobě až na stovky tisíc let. Koncepce úložiště je takové, že se pamatuje i na další generace a nepřipouští se jakýkoliv kontakt obyvatel a životního prostředí uloženým radioaktivním materiálem.

Ukázka prototypu finského měděného úložného kontejneru

Dle „koncepce trvale udržitelného rozvoje“, jednoho z témat summitu v Riu de Janeiru v roce 1992, je nutné uspokojovat potřeby současné generace, aniž bychom ohrozili schopnost budoucích generací uspokojovat jejich potřeby.

V polovině roku 1993 byl zahájen šestiletý Program vývoje hlubinného úložiště. V letech 2003-2005 byly provedeny geologické práce k výběru lokalit vhodné pro hlubinné úložiště. Výsledkem toho bylo určení 6 možných lokalit k vytvoření úložiště (Lubenec-Blatno (Ústecký a Plzeňský kraj), Budišov (Vysočina), Pačejov (Plzeňský kraj), Rohozná (Vysočina), Pluhův Žďár-Lodhéřov (Jihočeský kraj), Božejovice-Vlksice (Jihočeský kraj)). SÚRAO zahájilo v těchto lokalitách jednání o vznik úložiště které s větší či menší intenzitou probíhají doteď. Na roky 2011-2012 je naplánována první etapa průzkumu a to geofyzikální a geochemický průzkum na 6 lokalitách. Během let 2012-2014 by měla probíhat druhá etapa – vrtný průzkum na lokalitách, které vyhověly první etapě. Vyhodnocení lokalit a oznámení hlavní a záložní lokality by se mělo uskutečnit v roce 2015. Po roce 2025 a podrobném průzkumu hlavní lokality pak dojde k potvrzení vhodnosti umístění HÚ, započne samotná fáze výstavby a do aktivního provozu by mělo být HÚ uvedeno v roce 2065.

Bezpečnostní bariéry hlubinného úložiště:



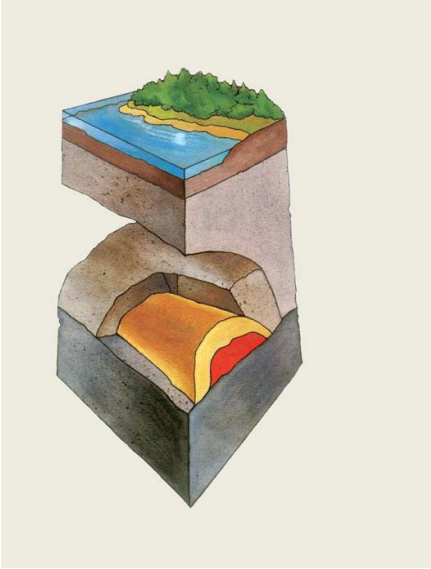
Bezpečnostními bariérami rozumíme ochranné vrstvy, které zabrání pronikání radioaktivity z odpadů do životního prostředí.

5 - Horninové prostředí – bariéra která imobilizuje radionuklidy nacházející se minimálně 500 m pod zemí. V ČR touto horninou byl zvolen žulový masív. (žulové,jílové a solné masivy)

4 – Zásypové materiály – bariéra kterými jsou kontejnery s VJP zasypány. Tyto materiály mají vysoce sorpční vlastnosti (Bentonit…)

3 – Úložný kontejner – silnostěnný obal vyrobený z ušlechtilých materiálů (ocel, měď, zlato, platina)

1,2 – Povlak palivových kazet a struktura VJP – keramická struktura samotného paliva a matrice v nichž jsou radionuklidy chemickou cestou zpevněny (borosilikátové sklo, keramické materiály, asfaltová živice, cementit)



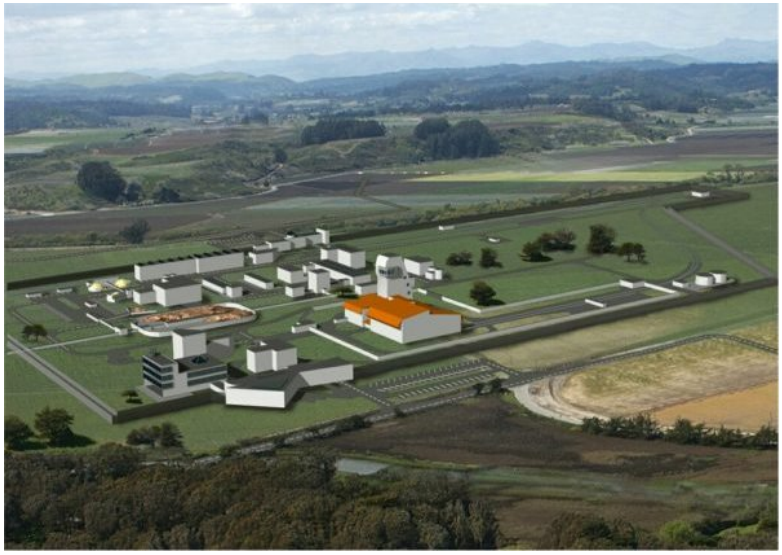
Jeden z nejcennějších příkladů je přírodní úložiště radioaktivních látek pod kanadským jezerem Cigar Lake *(viz. obr)*. ***V hloubce 430 metrů podzemí se zde před 1,3 miliony lety vytvořilo ložisko uranové rudy se 60% uranu. Běžně se těží rudy s obsahem do 2% uranu. Více než milion kubických metrů takto bohaté uranové rudy leží na žulovém masivu a je překryt 5-ti až 30-ti metrovou vrstvou jílu. Podobnost s koncepcí hlubinných úložišť je do očí bijící. A výsledky? Měření prokázala, že k zemskému povrchu žádný uran nepronikl. Jílová vrstva dokázala toto ložisko – úložiště- po celou dobu izolovat.***

Zatímco karosérie auta nám zrezaví za deset let, některé meče nebo brnění jsou i po několik století dlouhém pobytu pod zemí téměř nedotčené. Tyto předměty korodovaly pomalu díky menšímu výskytu volného kyslíku pod zemí. V hloubkách okolo pěti set metrů pod zemí v horninových masivech určených pro hlubinné úložiště by neměl být přítomen volný kyslík žádný, a to ani v podzemních vodách.

Rozhodnutí švédských vědců vyrábět kontejnery pro hlubinné úložiště z mědi bylo ovlivněno jedním z archeologických nálezů. Bronzové dělo švédské válečné lodi Kronan spočívalo v nánosech na dně Baltského moře od roku 1676, kdy byla loď potopena. Za tři sta let nedokázala koroze povrch bronzového děla poškodit. Bronz ze kterého bylo toto dělo odlito, obsahoval 96,3% mědi) Díky tomuto a podobným nálezům a díky mnoha experimentům Švédové prokázali, že jejich měděný kontejner vydrží pod zemí statisíce let, ne-li miliony. *(výběr z člán. Bezpečnost hlubinného úložiště; Hill and Knowlton©)*

<u>Úložiště a jeho části:</u>

I když se ohledně vybudování hlubinného úložiště vedou široké diskuse, tak jednotlivé jeho části jsou již známé. Každé úložiště by se mělo skládat ze čtyř částí: nadzemní areál, přístupové šachty a tunely, prostory pro ukládání jaderného odpadu a samostatné kontejnery



Nadzemní areál

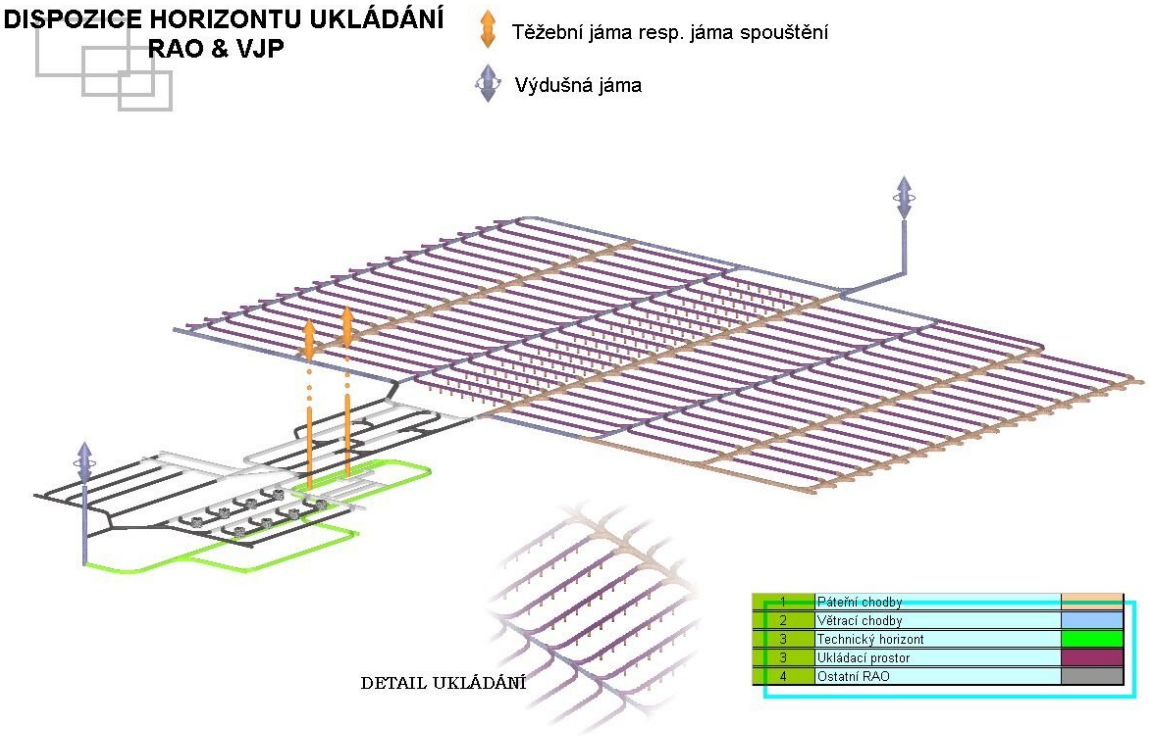
Nejprve bude nadzemní areál představovat zázemí pro vybudování podzemní části úložiště a potom bude zajišťovat provoz hlubinného úložiště. Vedle správních a sociálních budov, skladů atd. zde bude vyčleněna část areálu, kde bude přijímán a upravován vysoce radioaktivní odpad. Bude nutno vyjmout ho z kontejnerů, ve kterých byl k hlubinnému úložišti přepraven, překontrolovat a přeložit do kontejnerů určených ke konečnému uložení.

Přístupové šachty a tunely

Předpokládaná hloubka těchto šachet a tunelů je od 300 km do 1 km. Tyto

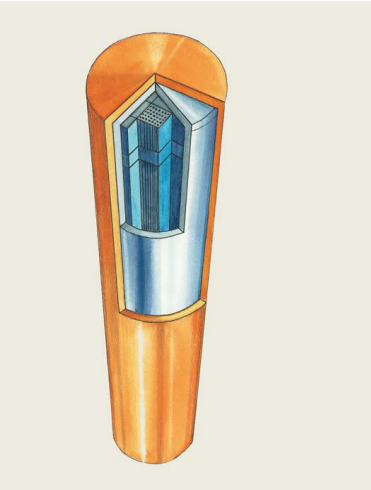
prostory představují propojení mezi nadzemním areálem a ukládacími prostory. Jak šachty, tak tunely budou sloužit pro ventilaci a dopravu osob, materiálu i kontejnerů s nebezpečným odpadem. Rozměry a sklon tunelu by měl být takový, aby se kontejnery mohly přepravovat nákladními auty.

Ukládací prostory



V těchto rozsáhlých sítích chodeb budou definitivně uloženy kontejnery s vysoce radioaktivním odpadem. Jejich umístění by mělo být pod podlahou tunelů a chodeb. Tyto prostory by měly pojmout přibližně 10 000 m^3 odpadu.

Kontejnery pro radioaktivní odpad



Význam kontejnerů spočívá především v tom, že bude radioaktivní odpad prvních tisíc let izolovat od okolí a vlhkosti. Zabrání proniknout radioaktivitě do podzemních vod a ovlivnit tak životní prostředí a člověka. Materiál, ze kterého by měly být zhotoveny, musí být mechanicky odolný proti ozařování radioaktivním odpadem zevnitř. Jako nejvhodnější se v současné době jeví tři materiály: ocel vysoce legovaná niklem, uhlíkatá ocel a zlato, platina, titan nebo měď. Výplňovým a tlumícím materiálem, jímž bude kontejner v šachtě obklopen, by měl být bentonit.

Bentonitem se rozumí reziduální, nepřemístěná jílovitá hornina s mohutnou sorpční schopností, vysokou hodnotou výměny kationtů, bobtnáním a plastičností. Nositeli těchto vlastností jsou jílové minerály (nacházející se i v oblastech Oklo), především montmorillonit, případně beidelit. Přesné chemické i minerální složení bentonitu však nelze vyjádřit. Právě pro své specifické vlastnosti mají bentonity široké spektrum využití (např. pojivo, těsnění, sorbent, pohlcovač vzdušné vlhkosti atd.) a předpokládá se jejich využití jako účinné bezpečnostní bariéry při hlubinném ukládání radioaktivních odpadů. Hlavním producentem bentonitu jsou Spojené státy americké. těžištěm těžby bentonitu u nás je ložisko Rokle u Kadaně, které vyprodukuje asi 70 tisíc tun.

Uzanční limit pro rozlišení mezi podpovrchovým a hlubinným úložištěm je 200 m pod zemským povrchem. Pod touto hranicí již nedochází k narušení hornin zvětrávacími a erozivními procesy.

Hlubinné úložiště v ČR prozatím neexistuje, ale v budoucnu by mělo být vybudováno v hloubce 500 m pod povrchem země. Bezpečná izolace radionuklidů od životního prostředí by měla být založena na neprostupnosti přírodního prostředí, inženýrských bariérách a výplňových materiálech, které by měly sanovat přírodní pukliny a poruchy způsobené budováním úložiště. Po zaplnění budou všechny přístupové cesty k radioaktivním odpadům utěsněny.

A v této části se již dostáváme k podobnosti a důkazovému materiálu v podobě přírodního reaktoru Oklo v Gabunu.

Přírodní reaktory v Gabunu - Oklo

V předešlé části jsme si popsali vztah člověka k energii jako takové, objev energie schovaný v jádře atomu, využití této energie (zejména k mírovým účelům), popsali jsme si principy využití jaderného materiálu v JE a nastínili si problematiku ukládání RAO a VJP. Jak již víme je v lidských silách bezpečně zpracovat, popřípadě uložit RAO či VJP bez vlivu na životní prostředí a interakci s biosférou. Problémem nadále zůstává odpor obyvatel vhodně zvolených lokalit k vybudování hlubinného úložiště v blízkosti jejich obydlí, v některých případech doslova pod jejich domy. Tento odpor je často způsoben nedostatečnou znalostí problému, neinformovaností, manipulací za stran různých občanských sdružení (ať už české nebo zahraniční) a v neposlední řadě osobním přesvědčením.

Některá z těchto dogmat by bylo možné vyvrátit pomocí fenoménu přírodního reaktoru v Oklo v Gabunu.

Popis fenoménu Oklo:

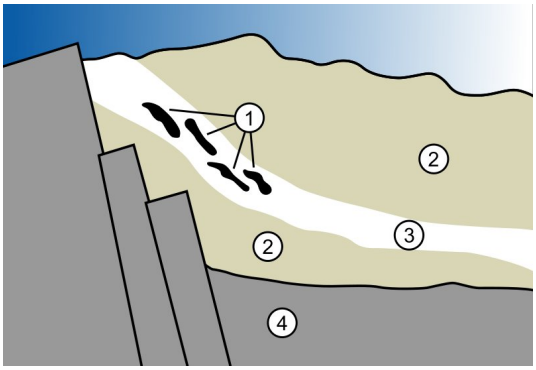
Když v roce 1942 v podzemních částech města Chicago pan Enrico Fermi se svými spolupracovníky poprvé na světě spustili jaderný reaktor ještě netušili, že už je někdo předběhl. Naštěstí to nebyli inženýři nacistického Německa nýbrž matka příroda a to o celé 2 miliardy let.

Uran obsažený v rudách po celém světě má stálý poměr izotopů a to: ^{238}U - 99,284%, ^{235}U - 0,711% a ^{234}U - 0,005%. Pro štěpné reakce je však přímo využitelný jen ^{235}U, tj. méně jak 1 %uranu

(před i po chemické úpravě). Zbytek je odpad, i když z izotopu ^{238}U lze v množivých reaktorech transmutací připravit štěpný izotop plutonia ^{239}Pu, které lze dále využít. Protože množství 0,7 % štěpného izotopu 235U není dostatečné pro nastartování a udržení štěpné reakce a tudíž pro jaderné využití, musí se jeho množství dále zvýšit na 3%.

Po pochopení vzniku prvků ve vesmíru a jejich poločase rozpadu bylo ve druhé polovině 20. století jasné, že obsah izotopů uranu v rudách musí být na všech místech Zeměkoule stejný. O to více byli překvapeni pracovníci závodu na zpracování uranu ve Francii, když v květnu roku 1972 při rutinní kontrole zjistili, že obsah Uranu 235 v těžené rudě z oblasti Oklo v Gabunu dosahuje hodnot pouze 0,440%. Kvůli obavám z neautorizované manipulace zkoumaného vzorku rudy byl zahájen výzkum, který tyto obavy vyvrátil a zjistilo se, že v ložisku z oblasti Okla se nachází a do této doby bylo nalezeno 16 přírodních reaktorů. Tzn. místa, kde se samovolně rozběhla štěpná reakce. (pokr. str. 13)

Dispoziční a geologické uspořádání



Reaktory jsou 10 až 20 m dlouhé i široké a necelý metr vysoké pískovcové a břidličnaté útvary, obsahující 20-60% uranu ve formě uraninitu (UO_2). Reaktory obsahují jíly, zejména jílové minerály illit a chlorit, a jedenáct z nich obsahuje ve značném množství pevný bitumen. *(1 – reaktorové zóny, 2 – pískovec, 3 – uranová ruda (smolinec), 4 – žulový masív)*

Izolace Uranu a štěpných produktů Bitumenem

V současné době je jednou z metod nakládání s nízko a středně aktivními RAO právě **bitumenace.** Tato metoda spočívá ve smíchání kapalného odpadu s bitumenem za současného odpaření vody. Po odpaření vody je směs bitumenu a radioaktivního koncentrátu nalita do ocelového sudu, kde po vychladnutí ztuhne. Výhodou je objemová redukce, odolnost proti vyluhovatelnosti do vody, chemická odolnost a radiační stálost (do 10^7 Gy)

Bitumen vznikal v kapalném stavu v období kritičnosti reaktoru působením horké vody na starší pevné organické látky (zbytky bakterií a modrozelených řas) obsažené v sedimentech, ze kterých vznikaly horniny. Kapalný bitumen byl rychle solidifikován působením tepla a radiace.

Kapalný bitumen inkorporoval malé krystalky uraninitu, což znemožnilo migraci a únik UO_2 z bitumenu během jeho solidifikace; ta vedla nakonec k úplné imobilizaci UO_2. Některé z těchto krystalů vznikly přímo redukcí vodných roztoků solí U(VI) vznikajícím kapalným bitumenem.

Redukce U(VI) na U(IV) vedla ke srážení uraninitu do jehož krystalů byly zachyceny a inkorporovány štěpné reakce v pevném stavu.

Uraninit s konzervovaným izotopovým složením produktů vzniklých štěpením, zachycený v dostatečně velkých objemech hydrofobního bitumenu byl nejenom znehybněn, ale rovněž chráněn před vyluhováním do vodných roztoků při jejich pohybu uranonosnými horninami. V přírodních reaktorech s nízkým obsahem bitumenu, kde byl uraninit adsorbován zejména na jílech a nebyl dostatečně obalen, a tudíž chráněn pevným bitumenem, nebyla vůbec nalezena řada izotopů vzniklých štěpením – např. Sr, Cs, Rb a Ba. Naopak v bitumenem bohatých reaktorech se těchto izotopů zachovalo podstatně více.

Ani závažné geologické události, ke které v okolí reaktorů došlo asi 1,2 miliardy let po jejich kritičnosti, nedošlo k významnému úniku radionuklidů. Jednalo se o vniknutí roztavených hornin do čerstvých zlomů. I v tomto případě byla v reaktorech zachována část původně přítomného U 235 a štěpných produktů.

<u>Izolace Uranu a štěpných produktů jílem</u>

Zadržování radionuklidů jíly je dobře prostudováno. Bylo zjištěno, že tento proces je způsoben iontovou výměnou radionuklidů, jejich substitucí v krystalové mřížce jílu, či příbuznými procesy. Účinnost těchto sorpčních procesů se liší v souvislosti na typu jílu, iontových částic, pH atd. Desorpce radioonuklidů při průsaku vodných roztoků (hlavně NaCl) horninou probíhá s různou účinností v závislosti na několika parametrech.

V Oklo se jíly zdají být méně efektivními sorbenty radionuklidů než pevný bitumen.

Již nyní se zdá, že grafitický bitumen či hydrofobní organické polymery, nehořlavé a s indukovanou plasticitou, mohou být zajímavou alternativou při úvahách o izolaci zpracovaných jaderných odpadů ve vhodném prostředí.

Distribuce a složení jílu i ostatních materiálů, stejně jako textura organické hmoty i horniny v reaktorech, jsou heterogenní. Studium vzorků o rozměru několika centimetrů tedy neodhalí parametry kontejmentu celého přírodního reaktoru, a některé z nich zcela pomine. Je nezbytné provést interdisciplinární podrobné studie nejlépe několika stovek vzorků z jediného přírodního reaktoru. Pouze takováto komplexní informace bude užitečná pro plánování moderní strategie izolace jaderného odpadu.(výběr z člán. Gabon's natural reactors – Nature shows how to contain radioactive waste - B. Nagy)

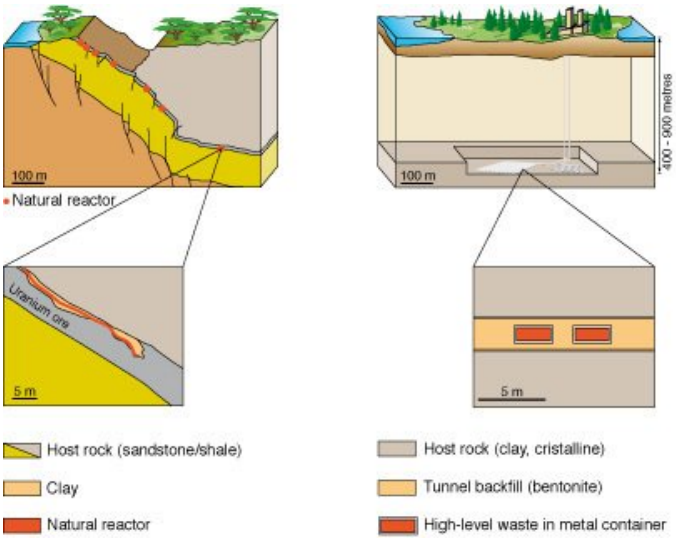
(pokračování ze str. 12) Senzační objev okamžitě vyvolal celou řadu otázek. Jak mohlo dojít k samovolné iniciaci štěpného procesu? Podmanění jaderné energie člověkem v průběhu 40. a 50. let 20. století bylo z vědeckého a technologického hlediska dosti náročným procesem, takže není úplně snadné smířit se s tím, že to může jít také úplně samo. A dále: jak je možné, že jaderná reakce probíhající v gabonských uranových nalezištích nepřerostla v nekontrolovanou produkci energie, vedoucí k roztavení ložisek nebo dokonce k neřiditelné štěpné řetězové reakci a z toho vyplívající jaderné explozi?

Podle obsahu štěpných produktů v reaktorech a okolních horninách se došlo k závěru, že ona štěpná reakce zde probíhala před 2 miliardami let, tedy v době kdy ložiska uranu splňovala jedno z kritérií vzniku štěpné reakce. Obsahovala ^{235}U 3 a více procent.

Stáří příslušných hornin určené rubidio-stronciovou metodou je okolo 2 miliard let.

Tato skutečnost sama osobě nestačila a k rozběhnutí štěpné reakce musela být přítomná voda, která zde působila jako moderátor, která v některých obdobích zalévala uranová ložiska. Reaktor tak běžel s přestávkami desítky až stovky tisíc let, vždy když zaplavení rud vodou vytvořilo potřebné podmínky. Přirozené odpařování vody totiž zase na druhou stranu štěpnou reakci zastavovalo. Reakce za teplot 300-400°C a tlaků okolo 15-16 MPa zde probíhaly po dobu asi 150 000 let a při průměrném výkonu 100 kW se během nich spálilo 5 až 6 tun ^{235}U. Jelikož U235 má větší afinitu k záchytu a štěpení jádra než U238, štěpila a tím pádem i spotřebovávala se pouze tato jádra. Přírodní reaktor byl tedy odhalen díky již zmíněnému nižšímu obsahu U235 ve vytěžené hornině. Finální důkaz však poskytla až přítomnost některých lehčích prvků (s menším nukleonovým číslem), které by se v této lokaci za normálních okolností nemohly vyskytovat.

Přírodní reaktory v Oklo, připomínající koláče o průměru a výšce dvou metrů, dnes studují vědci z celého světa a zjišťují, že za dva miliony let se produkty jaderného štěpení a plutonium výrazněji nepohnuly z místa, kde vznikly. Způsob a rychlost, jakými radioaktivní látky pronikají horninami, mohou vědci studovat také v Brazílii v místě zvaném Pocos de Caldas, v povrchových dolech velmi bohatých na uran. Barevné pásy hornin zde dokumentují, jak uranové ionty více než milion let pronikaly skalním masivem. Pozorování v Pocos de Caldas jsou cenná také z toho důvodu, že hornina s radionuklidy zde byla vystavena intenzivnímu působení jak podzemních tak dešťových vod. *(výběr z článku Bezpečnost hlubinného úložiště; Hill and Knowlton©)*



Obr. *Srovnávací řezy přírodním reaktorem (vlevo) a hlubinným úložištěm. Legenda: levý sloupec (hornina – pískovec, jílovitá břidlice; jíl; přírodní reaktor); pravý sloupec (jíl, žula; výplň tunelu – bentonit, vysoce radioaktivní palivo v kovových kontejnerech.*

Podobné přírodní reaktory bylo možné podle stejných indicií pozorovat i v jiných částech naší planety. Jelikož jsou přírodní reaktory v Oklo snadno přístupné, slouží dnes jako přírodní laboratoř zkoumající vliv štěpné rekce na okolí, rozpad štěpných produktů (radioizotopů) a zejména jejich migrace okolními horninami. Tyto skutečnosti mohou posloužit jako důkazové materiály pro odborníky i laickou veřejnost pro podporu výstavby a provozování hlubinných úložišť.

Pokud bych měl odpovědět na základní otázku konference NERS 2009, **„stane se jaderná energie obnovitelným zdrojem?;** musím odpovědět, že z principu fyzikálních zákonů je toto nemožné, ale tomuto stavu se dá výrazně přiblížit přepracováváním paliva a uzavřením palivového cyklu. Namísto využití zlomku suroviny jaderného paliva, v dnešní době u nás provozovaných jaderných elektrárnách, bychom využili téměř celého jeho potenciálu. To už je ale hudba budoucnosti, nesoucí s sebou značná rizika a tak bych si na závěr dovolil vypůjčit slova jednoho známého francouzského spisovatele, podle kterých bychom se měli řídit nejen v jaderné energetice.

"Nedědíme Zemi od svých předků, ale půjčujeme si ji od svých dětí."

Antoine de Saint Exupéry

Zdroje:

www.surao.cz

www.cez.cz

přednášky: prof. Ing. Oldřich Matal, CSc. – Jadrená zařízení a jejich bezpečnost, Ing. Hugo Šen – Jaderná energetika;

Kateřina Neumannová - Hodnoceni vlivu úložišť RAO a VJP na ŽP

B. Nagy – Gabon’s natural reactors – Nature shows how to contain radioactive waste

Hill and Knowlton - Bezpečnost hlubinného úložiště

Konference NERS 2009