

# Urychlovačem řízené transmutační systémy (ADS - Accelerator driven systems)

*Miniprojekt, v rámci Fyzikálního týdne na  
Fakultě Jaderné a Fyzikálně inženýrské ČVUT*

## Řešitelé:

David Brychta - *Gymnasium Otokara Březiny Telč*

Josef Fischer - *VOŠ a SPŠE Plzeň*

Jan Kallay - *Gymnasium Ostrov*

## Supervisor:

Ing. Jiří Křepel - KJR - FJFI - ČVUT v Praze

## Použité zdroje informací:

Zdrojem všech následujících informací jsou publikace: Kamil Tuček - "Likvidace radioaktivních odpadů transmutací s použitím urychlovačů částic", Kamil Tuček - "Likvidace jaderných odpadů v jaderných reaktorech řízených urychlovačem", Jiří Křepel - "Reaktorové systémy s roztavenými solemi" a informace z internetových adres:

<http://clio.neutron.kth.se/IAEA/>

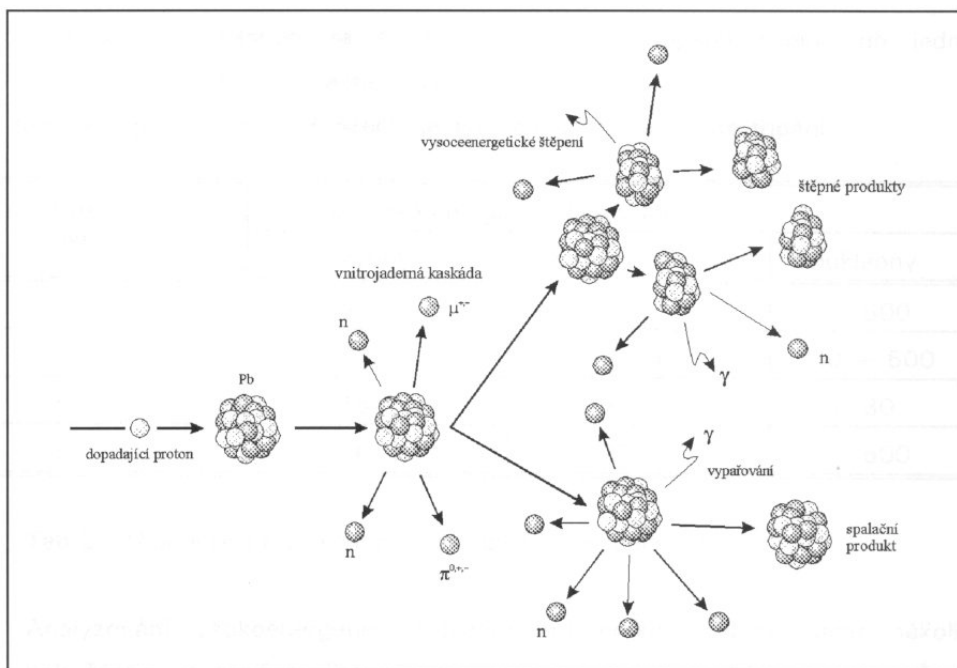
[www.fjfi.cvut.cz](http://www.fjfi.cvut.cz)

[www.eldar.cz](http://www.eldar.cz)

[mujweb.cz/www/pets/addt.html](http://mujweb.cz/www/pets/addt.html)

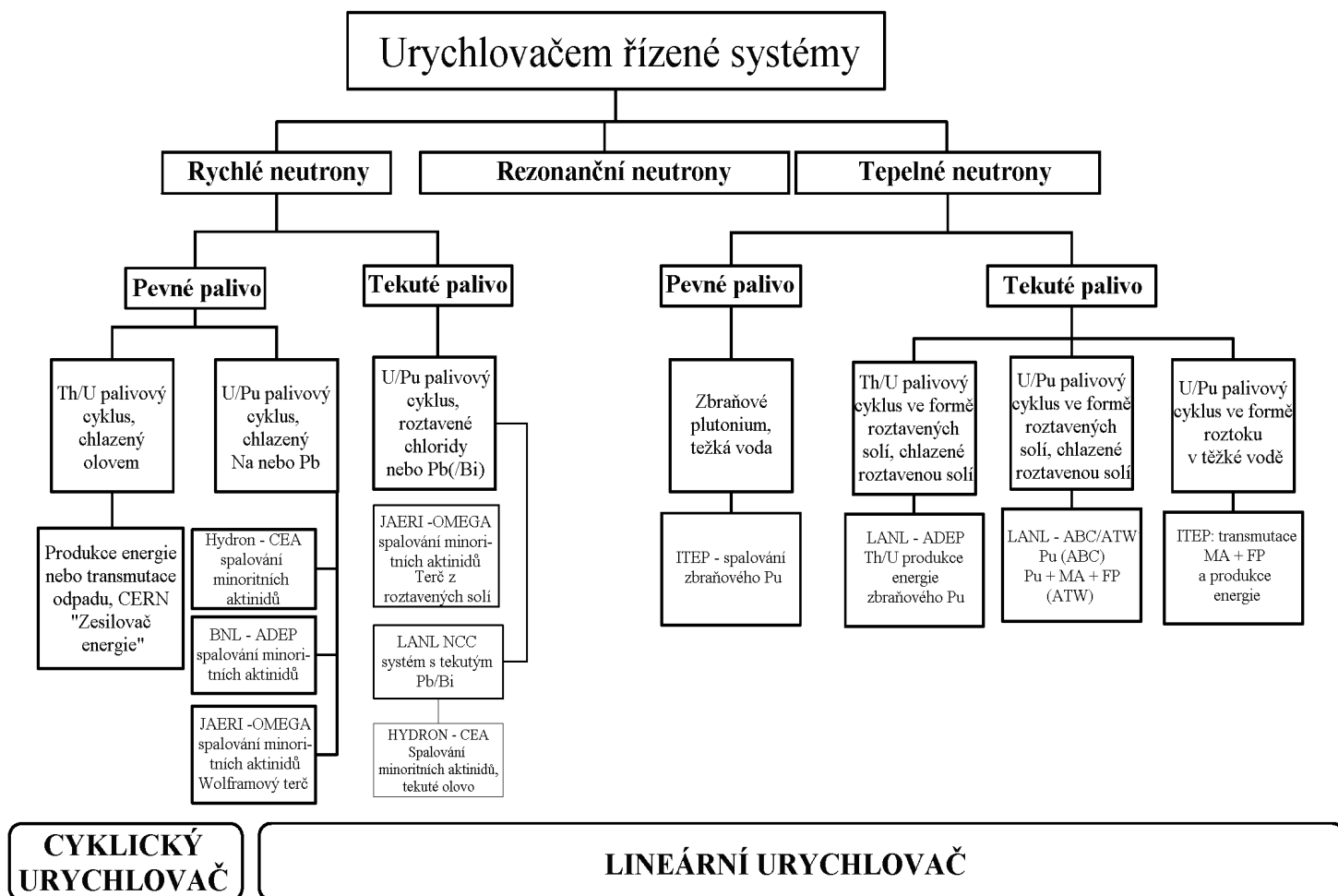
## ADS

Urychlovačem řízený systém (ADS) se od klasických reaktorů liší hlavně přítomností vnějšího neutronového zdroje, tedy urychlovače. Urychlovač sám slouží jen jako zdroj těžkých nabitých částic např. protonů, které nalétávají do terče, kde dochází ke tříštivým neboli spalačným reakcím. Tyto reakce jsou vyvolány srážkou jádra atomu a urychlené částice o kinetické energii  $T > 100 \text{ MeV}$ , při které dochází k takzvanému hlubokému štěpení. Toto je zdrojem velkého počtu neutronů, které se uvolňují z nestabilních odštěpků. Reaktor sám je podkritický a je dotován těmito neutrony. Vzhledem k tomu, že neutronů je nadbytek, lze tyto systémy použít k transmutaci vyhořelého paliva z klasických jaderných elektráren.

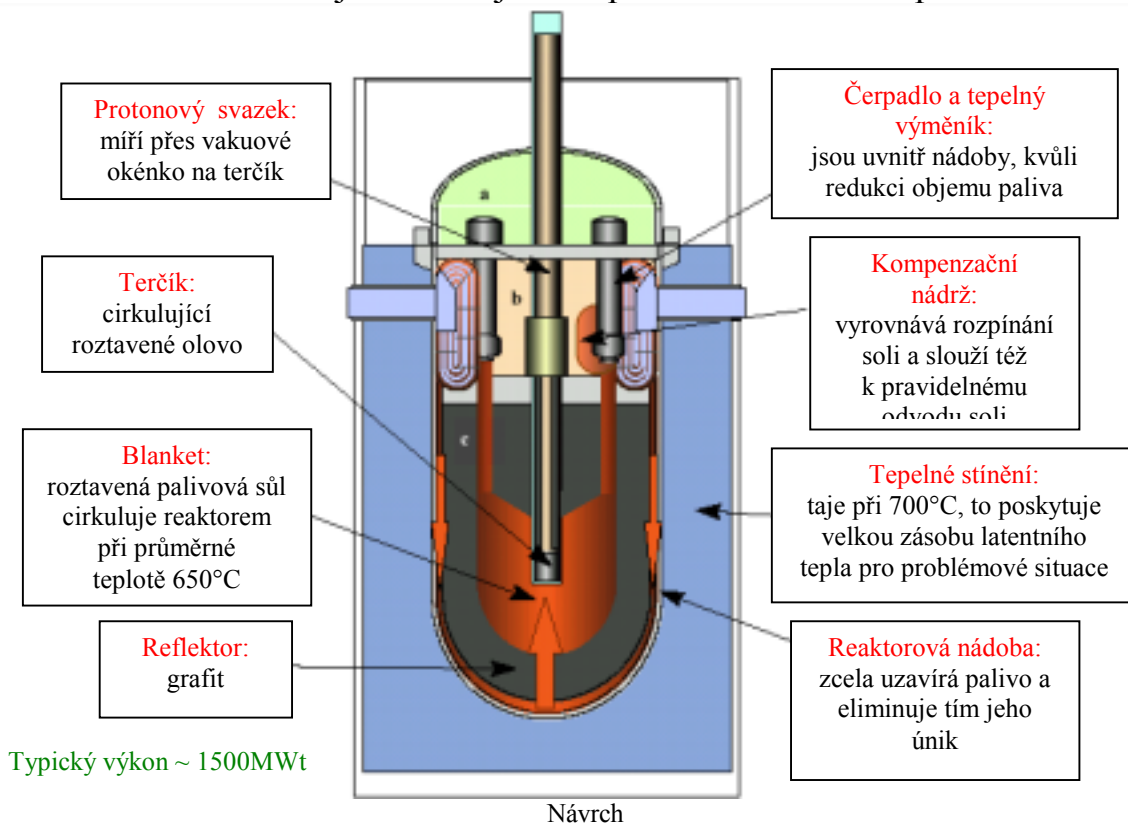


*Schéma spalační reakce.*

Urychlovačem řízené systémy můžeme rozdělit podle skupenství paliva, použitého urychlovače, nebo energie neutronů. Toto dělení je zobrazeno na následujícím schématu:

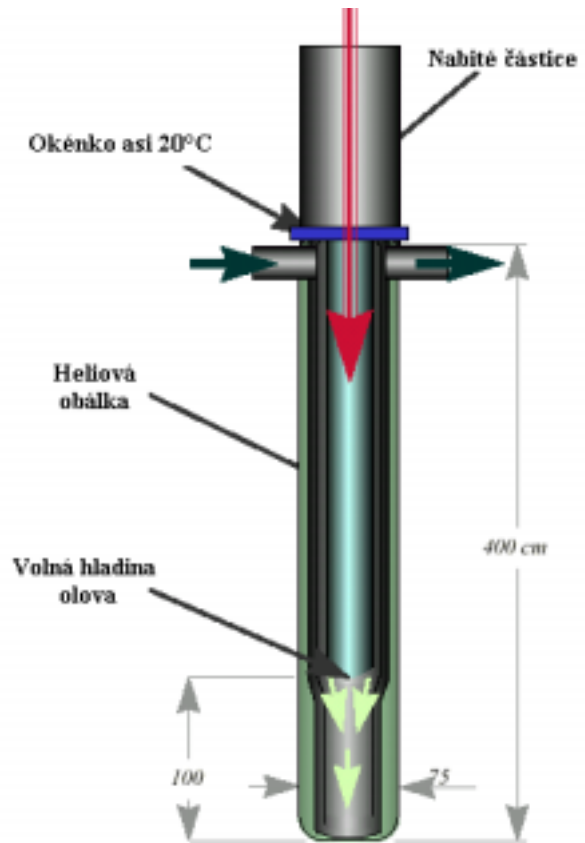


Jako jeden z příkladů projektů urychlovačem řízené transmutace vyhořelého paliva, kterým se budeme jako vhodným příkladem dále zabývat, je americký projekt ATW. Projekt vznikl v LANL a jeho palivem mají být fluoridy aktinidů rozpuštěné v  ${}^7\text{LiF} - \text{BeF}_2$  v poměru 0,67:0,33. Bod tání této směsi je  $450^\circ\text{C}$  a navrhované provozní teploty jsou od  $600^\circ\text{C}$  do  $700^\circ\text{C}$ . Bod varu je  $1700^\circ\text{C}$ . Dílčí tlak par při  $700^\circ\text{C}$  je nižší než 1,33Pa. Pro snížení absorpce neutronu by obsah izotopu  ${}^6\text{Li}$  měl být co nejnižší. Všechny složky palivové směsi mohou být rozpuštěné na fluoridy v adekvátním množství nosné soli, která je na vzduchu inertní. Nevýhodou je ale vysoký bod tání a přítomnost lithia, která vede k produkci tritia. Použití jiné soli třeba NaF ke snížení tohoto není vyloučené a může být praktické. Teplosměnné médium v sekundárním okruhu by mohla být směs NaF –  $\text{NaBF}_2$ , která byla zvolena proto, že je kompatibilní se slitinou Hastelloy a je levnější v porovnání s ostatními solemi slučitelnými s lithiem. Má také přiměřené hodnoty bodu tání, viskozity, tepelné kapacity, tepelné vodivosti a je také schopna absorbovat unikající tritium. Vhodné vlastnosti této směsi byly experimentálně ověřeny během předchozích experimentů. Při vysokých teplotách a kontaktu s palivovou solí se fluoroboritan rozpadá na  $\text{BF}_3$ . Tato směs má také omezenou slučitelnost s vodou a přítomnost vlhkosti tedy způsobuje korozi. Můžeme samozřejmě volit i jinou teplosměnnou látku např. olovo.

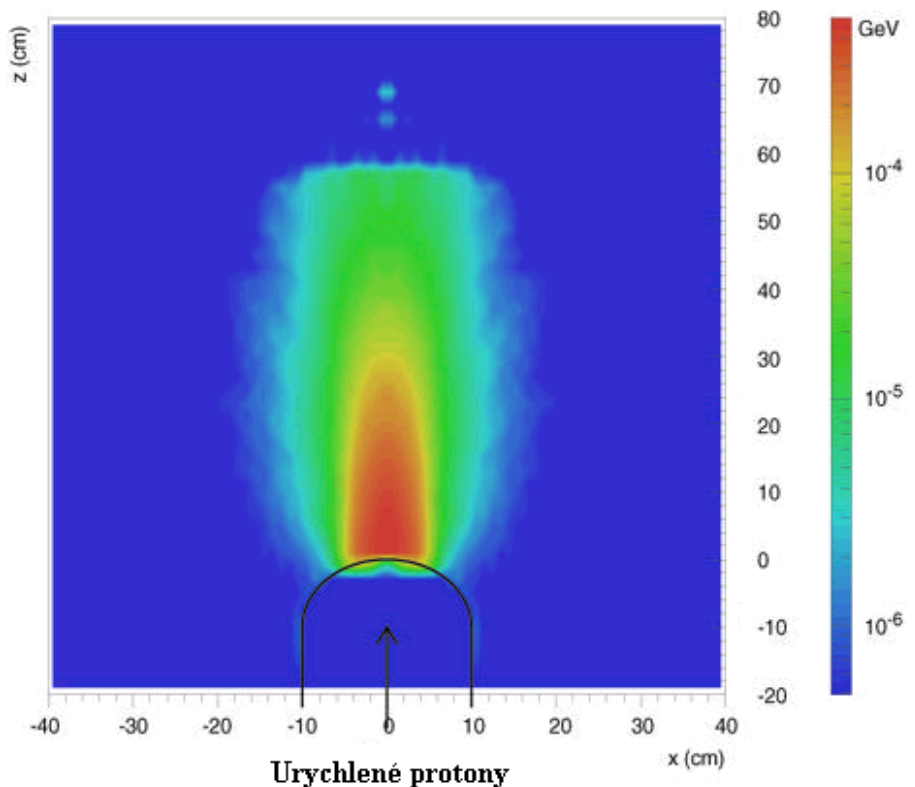


Aby byl minimalizován objem vysoce radioaktivní palivové soli v primárním okruhu, vychází návrhy ATW z bazénové koncepce. To znamená, že tepelné výměníky a čerpadla jsou uvnitř reaktorové nádoby, která tedy uzavírá celý primární okruh, což zvyšuje bezpečnost celého systému.

Terč je specifická část těchto systémů. Vytváří zdroj neutronů pomocí urychleného svazku nabitých částic, které způsobují tříštivé reakce atomů výplně. Předpokládá se, že výplní by mohlo být olovo nebo jeho slitina, která má ze všech slitin Pb+Bi nejnižší bod tání směs s bizmutem, která má bod tání 125°C (o 200°C nižší než samotné olovo) a bod varu obou látek je větší než 1600°C. Se směsí Bi-Pb je jistá zkušenost z reaktorových systémů a významným problémem je u ní tvorba plutonia. V čistém olovu je tvorba plutonia nižší, ale experimentální zkušenosti jsou podstatně menší. Výhoda roztavených kovů v terči je, že mohou cirkulovat do vnějšího tepelného výměníku a výkon terče pak může být vyšší. V LANL byla měřena produkce neutronů ve velkém olověném terči a výsledky ukázaly zisk 22 neutronů na jeden proton o energii 800MeV. Tento výtěžek byl značně vyšší než u jiných materiálů.



*Na tomto obrázku je názorně vidět rozložení energie protonů  $E=1\text{GeV}$  v olověném terči. Je to grafické zpracování výsledků výpočtu, který metodou monte carlo provedli v rámci projektu Energy Amplifier v Cernu. Tento systém se svou koncepcí sice liší od ATW, ale tento výsledek je prakticky stejný pro oba systémy.*



# Zhodnocení a shrnutí

## Výhody:

1. ADS umožňuje výrobu jaderné energie bez dlouhodobého, vysoce radioaktivního odpadu, transmutaci štěpných produktů i aktinidů z jaderného odpadu.
2. Aktinidy - jedna z nejnebezpečnějších složek odpadů - se stanou palivem, pro jaderné elektrárny s podkritickým reaktorovým systémem.
3. Na rozdíl od reaktorů, kde jsou štěpné produkty spalovány v důsledku napjaté neutronové bilance a nízkých hustot neutronových toků. Použitím urychlovače lze v podkritických systémech dosáhnout relativně krátké doby spalování (dny-měsíce).
4. Provoz podkritického systému lze řídit pomocí urychlovače.
5. Nemůže dojít k nekontrolovatelnému rozvoji štěpné reakce, z čehož vyplývá zvýšení jaderné bezpečnosti.

## Nevýhody:

1. Velké náklady na stavbu energetické jednotky (až 2,3 mld. \$).
2. Potřebují se velké proudy  $p^+$ , a posléze zabezpečit spolehlivost a bezporuchový provoz urychlovače.
3. V okolí terče dochází k zvýšenému toku energie tepelné a radiační zátěže.
4. Nedořešený zůstává problém kontinuálního chemického a izotopického čištění paliva, při kterém se jedná o operace s vysokými aktivitami.

## Závěr

Málokdo z nás si dnes dovede představit život bez elektřiny, ústředního topení nebo automobilu, každý si na využívání přírodních zdrojů energie již dokonale zvykl a tato společnost je na těchto zdrojích již dokonale závislá. Jakýkoli další vývoj je podmíněn dostatkem energie. Stojíme před věčným úkolem hledání jejích zdrojů. V dnešní době je také prioritní, aby zdroj energie byl šetrný k životnímu prostředí. Je otázkou, jestli se nám povede najít levný a ještě k tomu dostatečně šetrný zdroj energie. Pravděpodobně asi ne, a pokud ano, asi nebude levný. Jedním z těchto zdrojů by mohla být i jaderná energie. Pokud by se navrhované systémy na likvidaci vyhořelého jaderného paliva osvědčily, stala by se velice čistým zdrojem energie.