

# Simulace provozu JE s reaktory VVER 440 a CANDU 6

**Jakub Tejchman**

[jakub.tejchman@seznam.cz](mailto:jakub.tejchman@seznam.cz)

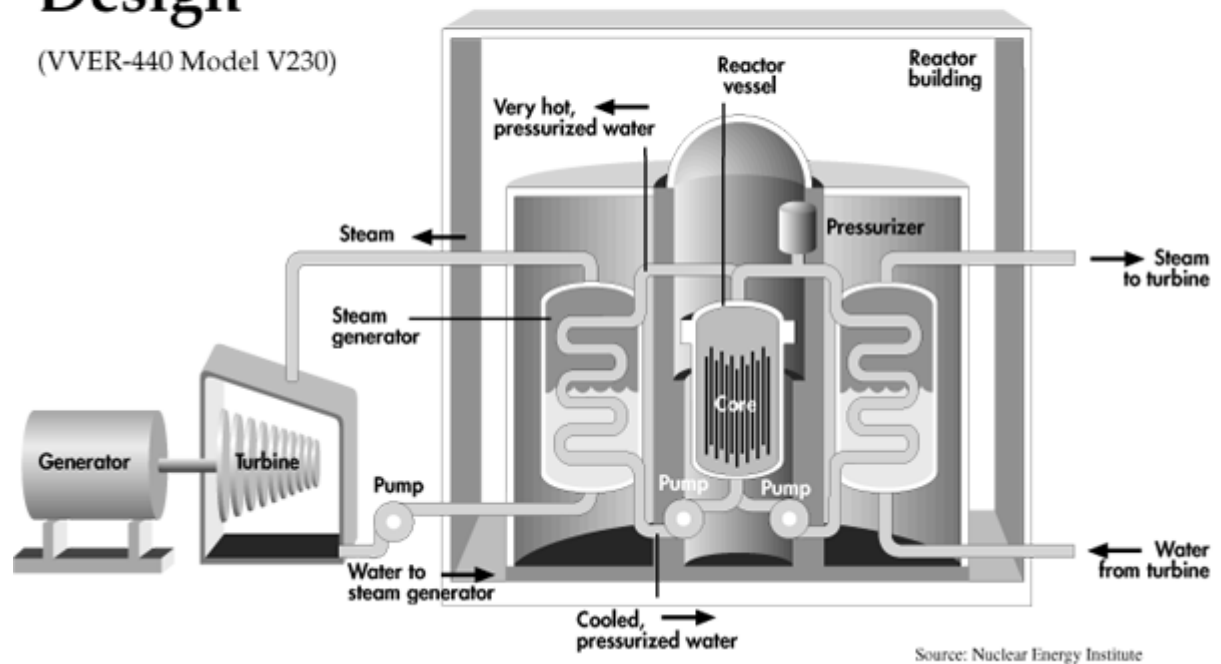
**Martin Veselý**

[martin.veslo@seznam.cz](mailto:martin.veslo@seznam.cz)

# JE s reaktorem VVER 440

## VVER Reactor Design

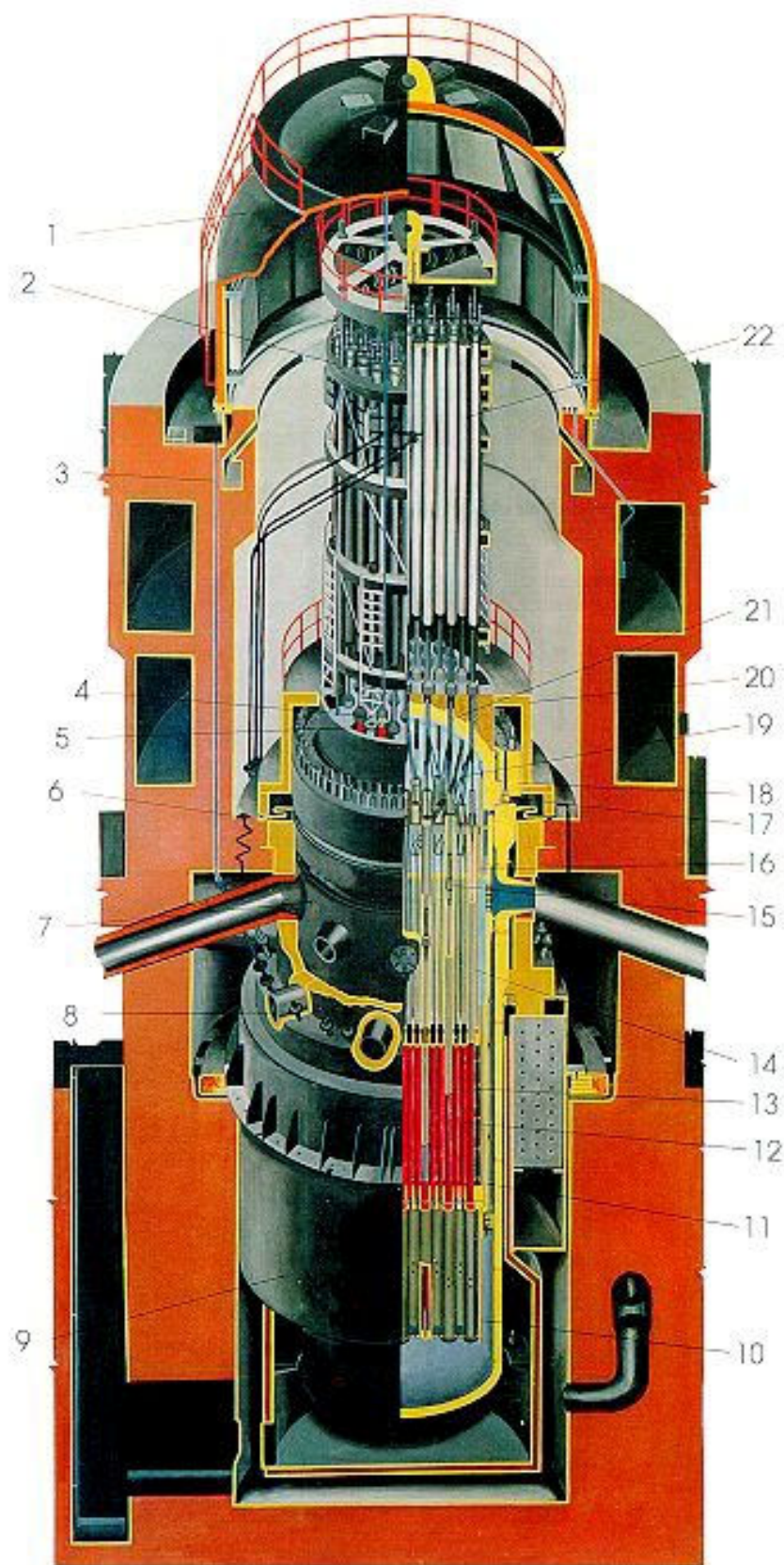
(VVER-440 Model V230)



VVER = PWR (anglický ekvivalent)

- tlakovodní reaktor, chlazený i moderovaných lehkou vodou
- tlak v primárním okruhu je 12,25 MPa
- teplota chladiva je 267 °C - 297 °C
- elektrický výkon tohoto reaktoru 440 MW (tepelný výkon je 1375 MW)
- palivo: obohacený uran (2 - 4%  $^{235}\text{U}$ ) ve formě oxidu uraničitého.
- regulace: regulační kazety obsahující bórovou ocel a kyselina boritá (přidává se do moderátoru)
- přirozená regulace: zápornou teplotní zpětnou vazbu
- úplný únik vody z reaktoru vede k zastavení reakce.
- kompenzátor objemu – slouží ke stabilizaci tlaku a objemu vody v primáru
- v ČR je tento reaktor instalován v JE Dukovany (4 bloky).

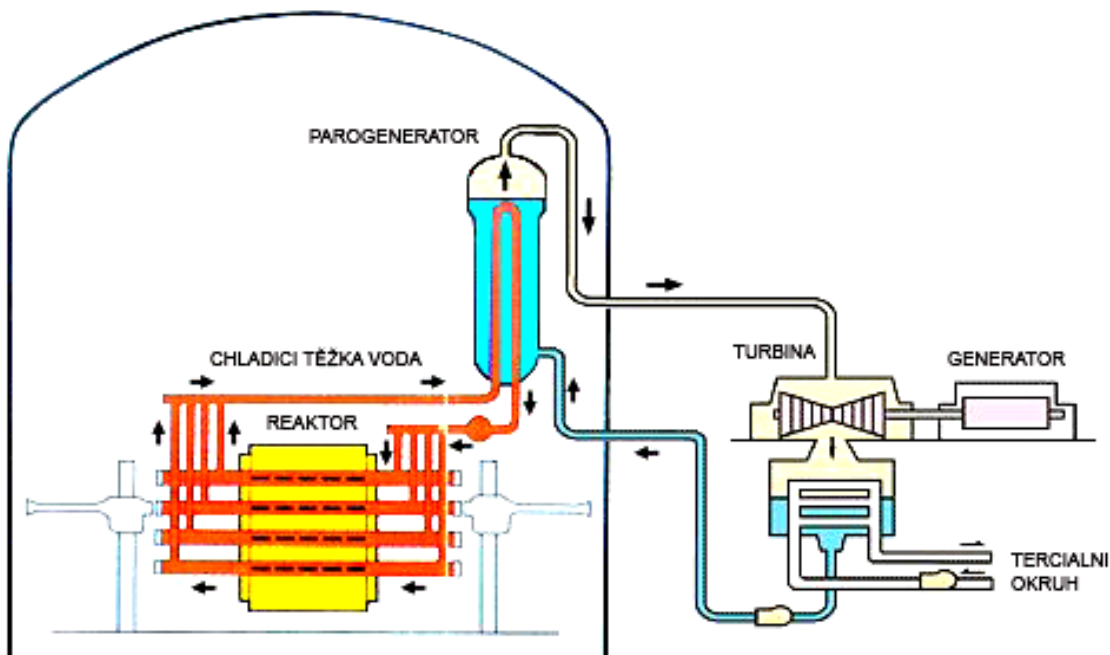
# Řez reaktorem VVER 440



# Velín JE s reaktorem VVER 440



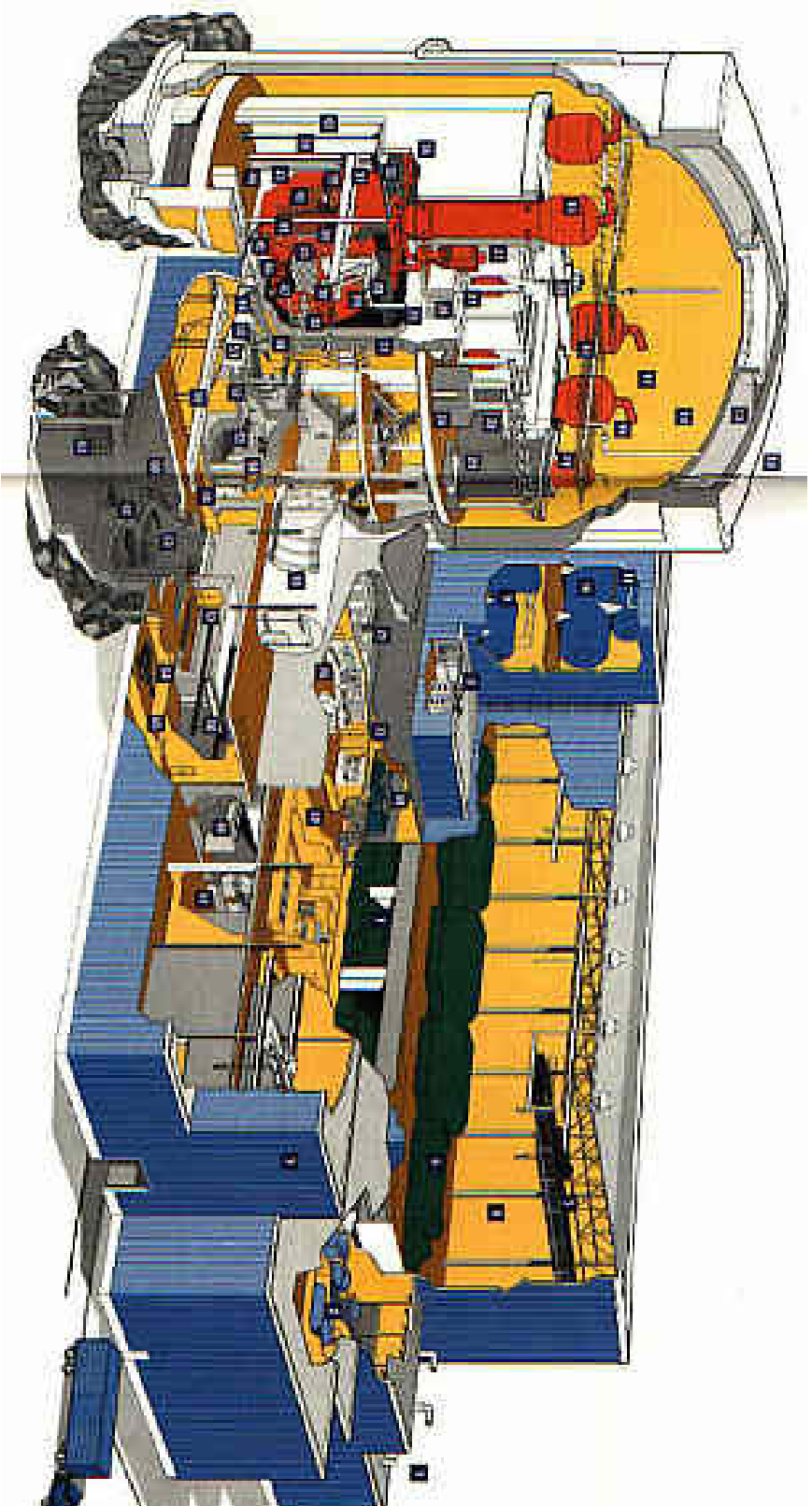
# JE s reaktorem CANDU 6



CANDU = CANada Deuterium Uranium

- moderován i chlazen těžkou vodou
- tlak chladicí vody: 9,3 MPa
- teplota chladicí vody na výstupu: 305 °C
- elektrický výkon: 900 MW
- základem reaktoru je horizontální válcová nádoba, tzv. Calandria
- palivo ve formě kovového přírodního uranu
- uplatňuje se záporná teplotní zpětná vazba
- další regulace: nádoby s lehkou vodou v moderátoru pro absorpci neutronů
- v ČR se nepoužívá

# Řez elektrárnou s reaktorem CANDU 6



# Simulátory

- speciální program pro PC, který co nejdříveji napodobuje chování elektrárny
- využívá metod numerického modelování tepelných a jaderných dějů
- program pro simulaci provozu JE s bloky VVER 440 je určen pro obsluhu dvěma osobami (primár a sekundár)
- simulátor reaktoru CANDU 6 je obsluhován pouze jednou osobou
- umožňuje kontrolu stavu jednotlivých elektrárny
- a samozřejmě i řízení JE

# Simulace JE s VVER 440

## Regulace výkonu

- snižování výkonu na 75 % nominální hodnoty a následně opět zvýšit
- regulace výkonu se provádí změnou výšky regulačních kazet
- čím více jsou kazety zasunuty, tím více neutronů absorbují a snižují tak výkon
- regulátor primárního okruhu pracoval v manuálním režimu
- 1. turbogenerátor v režimu N – udržoval konstantní výkon
- 2. turbogenerátor v režimu P – udržuje tlak v hl. přívodu páry z parogenerátoru (tudíž má menší výkon, protože s klesajícím výkonem reaktoru klesá tlak páry, ale do druhého generátoru je přiváděno stále stejné množství páry)

## Výpadek cirkulačních čerpadel primáru

- při výpadku všech čerpadel došlo k automatické odstávce reaktoru díky zasunutí regulačních kazet
- zároveň odstaveny obě turbíny
- přes zastavení štěpné reakce teplota klesá pozvolněji díky zbytkovému výkonu, který je způsoben rozpadem štěpných produktů
- v primáru klesl tlak díky poklesu teploty
- v sekundáru naopak tlak vzroste, protože pára nepředává energii turbíně



# Výsledky simulace JE s VVER 440

| Výkon reaktoru (%) | Tlak v primáru (MPa) | Výška reg. kazet (cm) | Ohřívač nebo sprcha v KO | Výkon TG v režimu P (MW) | Tlak v sekundáru (MPa) | Výška vody v PG (cm) |
|--------------------|----------------------|-----------------------|--------------------------|--------------------------|------------------------|----------------------|
| 100                | 12,2                 | 175                   | nic                      | 220                      | 4,61                   | 190                  |
| 95                 | 12,1                 | 166                   | nic                      | 200                      | 4,59                   | 190                  |
| 90                 | 12,1                 | 158                   | ohřívač                  | 181                      | 4,57                   | 191                  |
| 80                 | 12                   | 141                   | ohřívač                  | 139                      | 4,54                   | 191                  |
| 75                 | 12                   | 133                   | 2x ohřívač               | 114                      | 4,53                   | 191,5                |
| 80                 | 12,2                 | 140                   | ohřívač                  | 131                      | 4,56                   | 191                  |
| 90                 | 12,5                 | 157                   | nic                      | 175                      | 4,59                   | 190                  |
| 100                | 12,5                 | 175                   | sprchy                   | 216                      | 4,62                   | 190                  |

*KO – kompenzátor objemu, TG – turbogenerátor, PG - parogenerátor*

# Simulace JE s CANDU 6

## Regulace výkonu

- výkon byl snížen zasunutím absorpčních tyčí, čím více byly zasunuty, tím více klesal výkon
- po určité době se reakce úplně zastavila, protože byly absorbovány všechny neutrony schopné štěpení

| Neutronový výkon (%) | Tepelný výkon (%) | Výkon generátoru (%) | Tlak v sekundáru (MPa) | Absorpční tyč 1 (%) | Absorpční tyč 2 (%) |
|----------------------|-------------------|----------------------|------------------------|---------------------|---------------------|
| 75                   | 75                | 80                   | 4,066                  | 50                  | 0                   |
| 41                   | 50                | 59                   | 3,8                    | 100                 | 0                   |
| 9                    | 10                | 0                    | 3,7                    | 100                 | 50                  |

*V případě výkonů se jedná o procenta z nominální hodnoty. V případě tyčí jde o procenta z celkové délky tyče*

## Okamžité odstavení reaktoru

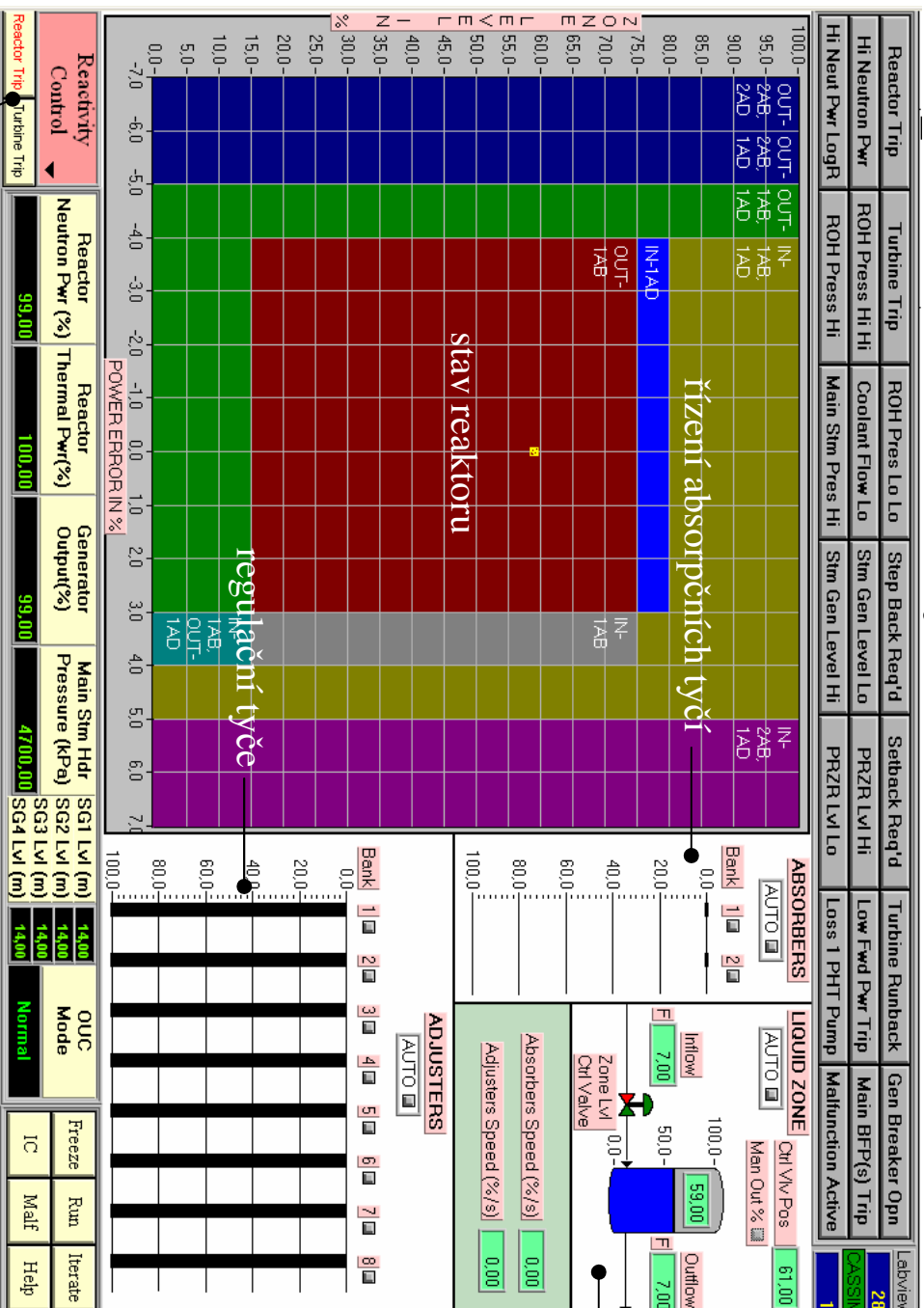
- po příkazu došlo během několika sekund k zasunutí absorpčních tyčí a snížení neutronového toku na nulu
- turbína se nějakou dobu otáčela setrvačností

## Náhlé zastavení turbíny

- po výpadku turbíny začne v reaktoru stoupat teplota i tlak
- teplota roste, protože reaktoru není odebíráno teplo pro vytvoření páry pro turbínu
- tlak roste díky snížení hustoty chladicí vody v důsledku ohřevu
- automatický systém začne zasouvat absorpční tyče a stabilizuje teplotu a tlak na normálních hodnotách

# Prostředí simulátoru JE s reaktorem CANDU 6

havarijní hlášení



řízení nádrží s lehkou vodou

zastavení turbíny nebo reaktoru

stav elektrárny

# Závěr

## VVER vs. Černobyl

Simulace nás přesvědčila, že jaderná elektrárna je velmi bezpečné zařízení, protože jakékoliv „destruktivní“ zásahy do důležitých systémů elektrárny vedly k odstavení reaktoru, případně snížení jeho výkonu. V žádném případě nelze dnes používané jaderné elektrárny srovnávat s Černobylskou JE s reaktorem RBMK!



*JE Dukovany*

# Poděkování

Tímto chceme poděkovat Ing. Dušanu Kobylkovi za umožnění realizace našeho projektu a odborné vedení. Dále děkujeme Fakultě jaderné a fyzikálně inženýrské ČVUT a jejím partnerům za organizaci Fyzikálního týdne.

# Reference

[1] <http://proatom.luksoft.cz/jaderneelektrarny/>

[2] [www.cez.cz](http://www.cez.cz)

[3] RNDR. AUGUSTA, P.: *Jaderná energie ČEZ 2003*, 12-16