



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ



Financováno
Evropskou unií
NextGenerationEU



NÁRODNÍ
PLÁN
OBNOVY

MŠMT
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ



FAKULTA
CHEMICKÁ



FAKULTA
STAVEBNÍ



FAKULTA
STROJNÍHO
INŽENÝRSTVÍ

Přednáška magisterského studijního programu JADERNÁ ENERGETIKA

Provoz jaderných zařízení a simulátory reaktorových bloků a elektráren

Elektrizační soustava, použití JE v ES

Osnova

- Elektrizační soustava
- Jaderné elektrárny v elektrizační soustavě
- Load factor a ostené factory

Elektrizační soustava

Elektroenergetika

- Proces výroby elektrické energie z různých primárních zdrojů (fosilní paliva, voda, vítr, geotermální, slunečná záření, jaderná energie)
- Kvalitativní přeměna elektrické energie
- Přenos a rozvod elektrické energie
- Konečné užití

Elektrizační soustava

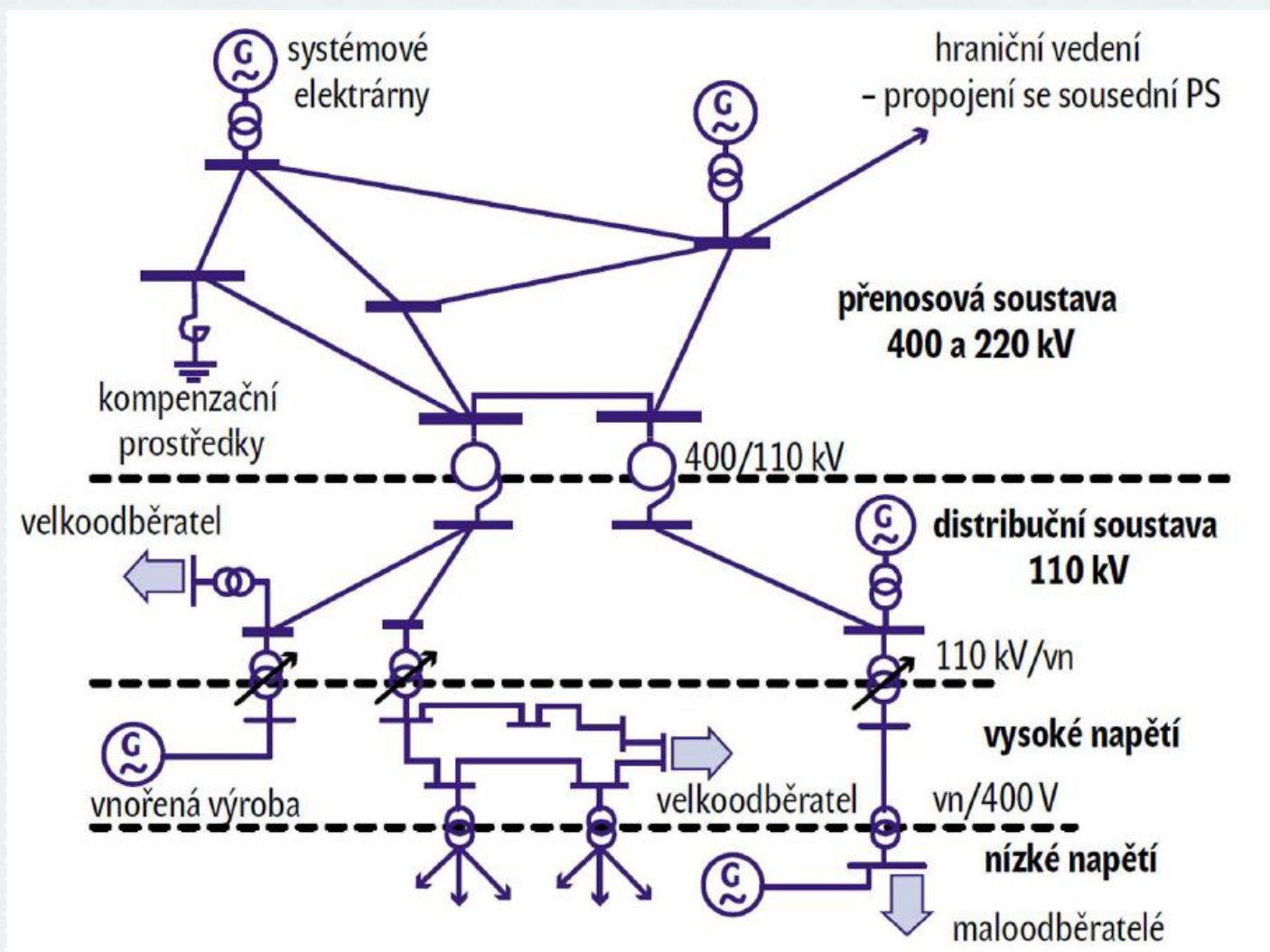
Základní pravidlo

Výroba = spotřeba

Elektrizační soustava

- Vzájemně propojený systém pro výrobu, přenos, transformaci a distribuci elektrické energie
- Výrobní elektrické energie
- Přenosová soustava
- Distribuční soustavy
- Spotřeba elektrické energie
- Pomocné systémy

Elektrizační soustava



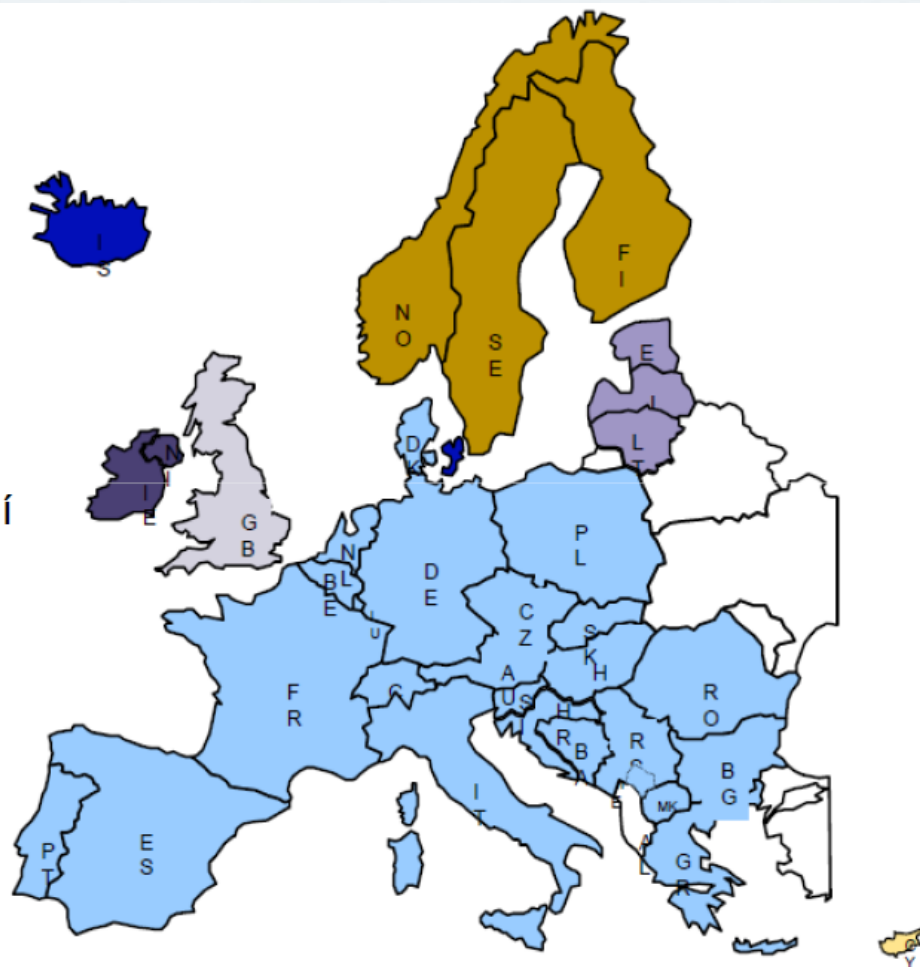
Elektrizační soustava

- **ENTSO-E** – European Network of Transmission System Operators for Electricity
- Synchronně propojený systém integrující Evropi
- Mezinárodní spolupráce – vzájemná výměna elektrické energie, zvyšování stability
- Závazné pravidla pro všechny provozovatele přenosových soustav

Elektrizační soustava

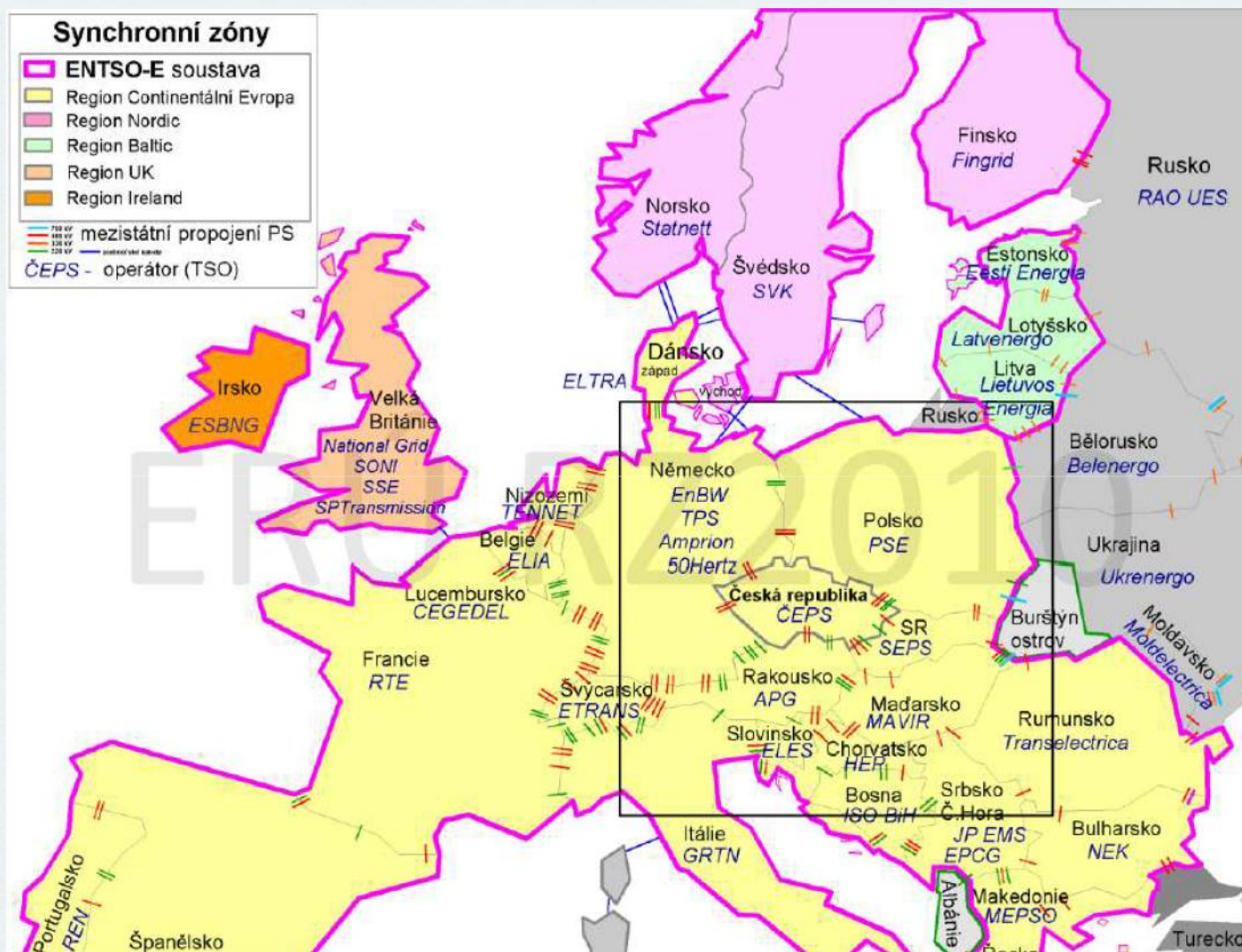
34 států
41 provozovatelů PS (TSOs)
525 mil. obyvatel
828 GW zdrojů
305 tis. km přenosových vedení
3400 TWh/rok poptávka
400TWh/rok výměna

5 synchronních regionů

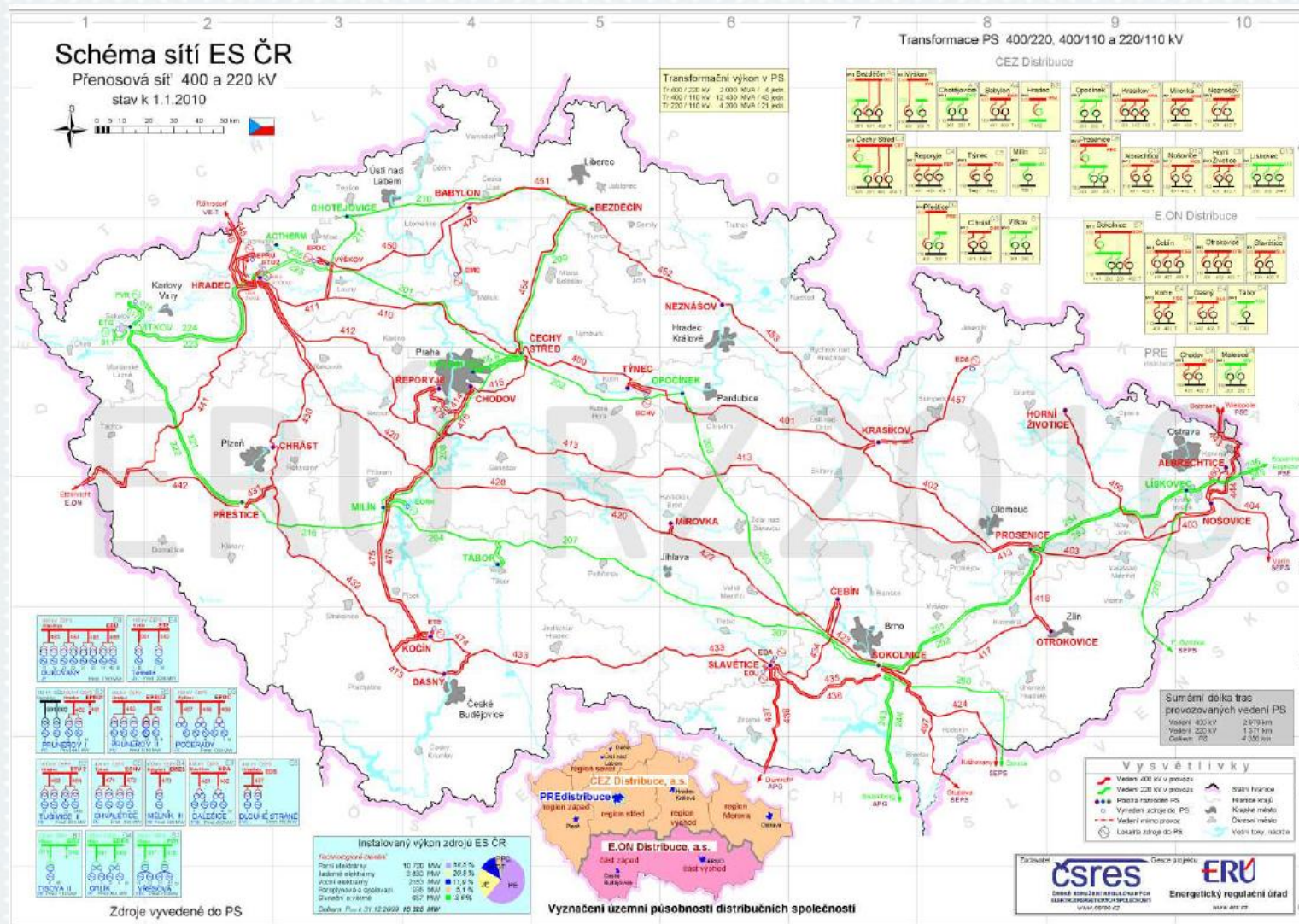


Zdroj: Angelo Ferrante, ENTSO-E R&D Workshop, 16 June 2011, Brussels, **ENTSO-E R&D PLAN, EUROPEAN GRID TOWARDS 2020 CHALLENGES AND BEYOND**

Elektrizační soustava



Elektrizační soustava



Elektrizační soustava

Dispečerské řízení

- Příprava provozu – bilance výroby spotřeby, predikce spotřeby
- Operativní řízení provozu – nepředvídané provozní události
- Zabezpečení provozu – N-1 kritérium
- Hodnocení provozu

Elektrizační soustava

- Regulace kmitočtu a napětí
- Primární regulace – rychlá změna výkonu při změně kmitočtu, akumulovaná energie v technologii, základní stabilizace kmitočtu sítě, stabilizace během několika sekund
- Sekundární regulace – stabilizace sítě během několika minut, sjednané výměny energie mezi ES
- Terciární regulace – řízení výroby pro podporu sekundární regulace, efektivita

Jaderné elektrárny v ES

Unit capability factor UCF

- Poměr elektrické energie, kterou je elektrárna schopna vyrobit v sledovaném časovém rozmezí k referenční výrobě energie, vyjádřeno v %

$$UCF [\%] = \frac{REG - PEL - UEL}{REG} \times 100$$

- REG – reference energy generation –
- PEL – planed energy losses – odstávka, plánovaný zkoušky, výkonový doběh atd.
- UEL – unplaned energy losses – nezahrnují nestability sítě, terciárnou regulaci, dispečerské řízení, přírodní podmínky
 - Neplánované 4 týdny před výpadkem

Operation Factor OF

- Nesprávně se zaměřuje za UCF
- Koeficient provozuschopnosti turbogenerátorů
- Udává poměr možného časového provozu v energetické síti vyjádřený v %

$$OF[\%] = \frac{\text{doba provozu} + \text{doba nařízené zálohy}}{\text{časový fond sledovaného období}} \times 100$$

- Provoz přifázovaného TG

Load Factor LF

- Poměr vyrobené elektrické energie k energii která by mohla být vyrobená – energie snížená o vlastní spotřebu
- Vyjadřuje časovou využitelnost bloku pro potřeby elektrizační soustavy

$$LF [\%] = \frac{E}{E_m} \times 100$$

- E – elektrická energie dodaná do sítě
- E_m – čistá elektrická energie, která by mohla být dodaná do sítě

Unplanned capability loss factor UCLF

- Poměr střední hodnoty neplánovaných snížení výkonu k referenčnímu výkonu
- Podíl maximální možné energie, kterou elektrárna není schopna dodat do sítě v důsledku neplánované ztráty výroby – neplánované odstavení, prodloužení odstávek, neplánované snížení výkonu

$$UCLF[\%] = \frac{UEL}{REG} \times 100$$

- UEL – unplanned energy loss
- REG – reference energy generation

Energy Unavailability Factor EUF

- Zaměňován za UCLF
- Podíl všech ztrát ve výrobě (plánovaných i neplánovaných) a čisté elektrické energie, která by mohla být vyrobena
- Odráží nejenom spolehlivost provozu ale i efektivnost a zručnosti při zvyšování využití bloku, provozovanost a udržování

$$EUF[\%] = \frac{EL}{Em} \times 100$$

- EL – čistá energie, která mohla být dodána do sítě plánovaným i neplánovaným vypadnutým výkonem
- Em čistá elektrická energie, která by mohla být dodána do sítě

Elektrizační soustava

Magisterský studijní program JADERNÁ ENERGETIKA vznikl za přispění



**Financováno
Evropskou unií**
NextGenerationEU



**NÁRODNÍ
PLÁN
OBNOVY**

MSMT
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

NPO_VUT_MSMT-16609_2022



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ



Financováno
Evropskou unií
NextGenerationEU



NÁRODNÍ
PLÁN
OBNOVY

MŠMT
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLGIÍ



FAKULTA
CHEMICKÁ



FAKULTA
STAVEBNÍ



FAKULTA
STROJNÍHO
INŽENÝRSTVÍ

Přednáška magisterského studijního programu JADERNÁ ENERGETIKA

Provoz jaderných zařízení a simulátory reaktorových bloků a elektráren

Popis a funkce primárního okruhu JE

FEKT

Peter Mičian

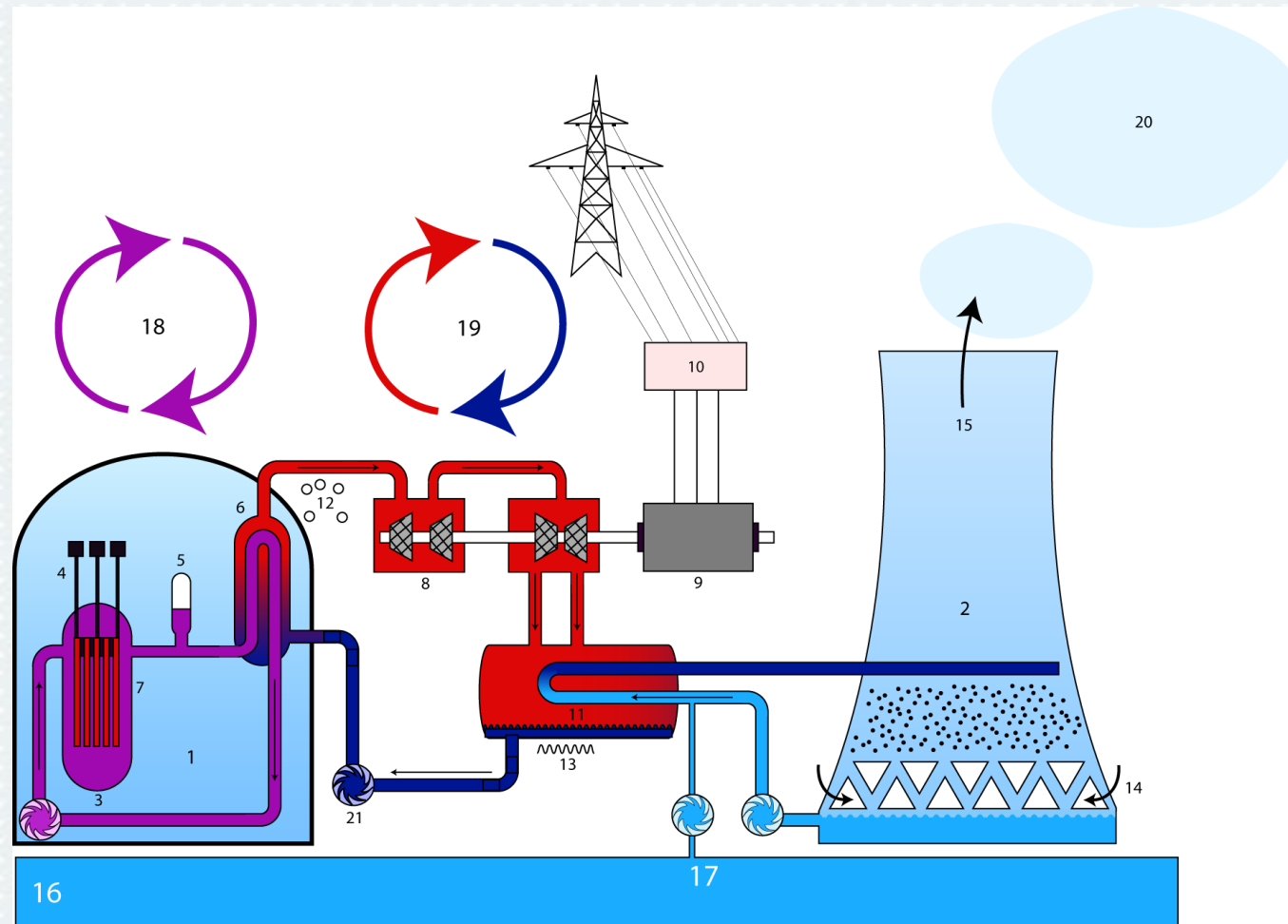
Osnova

- Schéma jaderné elektrárny
- Časti jaderného reaktoru
- Kompenzátor objemu
- Hlavní cirkulační čerpadla
- Parogenerátor

Jaderná elektrárna

- Řetězová štěpná reakce – generace tepla
- Štěpení jader těžších prvků
- Primární strana odlišná od konvenčních elektráren
- Sekundární strana více méně stejná jako u konvenčních elektráren

Schéma jaderné elektrárny



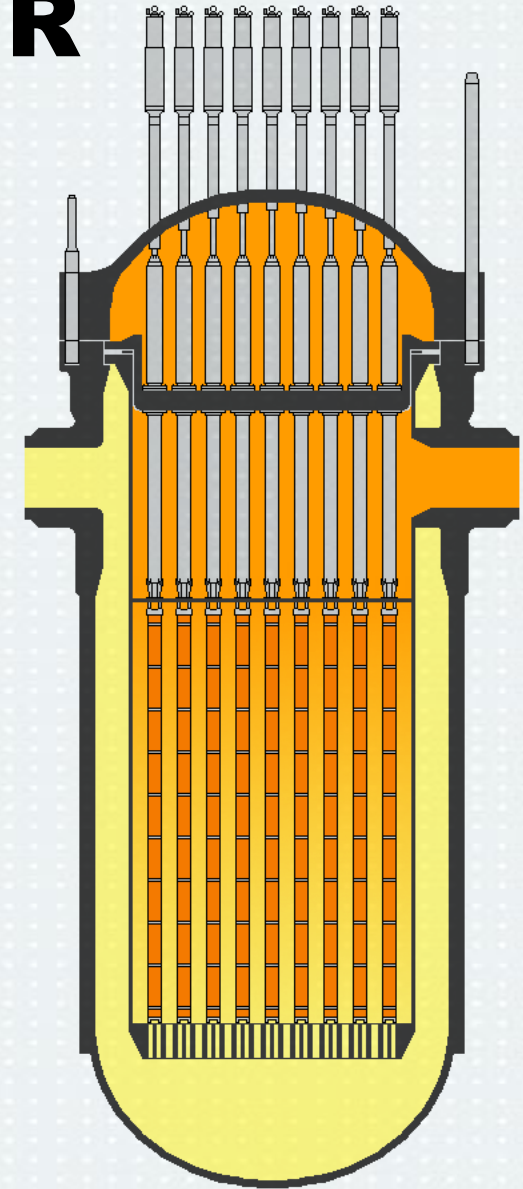
"File:Nuclear power plant-pressurized water reactor-PWR.png" by Steffen Kuntz is licensed under CC BY-SA 2.0.

Schéma primárního okruhu

- Podrobný náčrt primárního okruhu s vysvětlením komponent

Tlaková nádoba reaktoru TNR

- Nejvýznamnější komponenta
- Srdce jaderné elektrárny
- Okrajová podmínka pro provoz elektrárny
- Chróm-molybden-vanadová ocel 15Ch2MFA
- Nerezová výstelka
- Hmotnost VVER 440 = 201 tun
- Svařená z eliptického dna, 3 hladké prstence, 2 prstence s hrdlovými nátrubky, zesílené příruby s 60 otvory pro upevňovací šrouby



"EPR pressure vessel" by ChNPP (talk) is licensed under CC BY 3.0. 7

Tlaková nádoba reaktoru TNR



"Tlaková nádoba reaktoru VVER-440 V213" by [Ajrocket1](#) is licensed under [CC BY-SA 4.0](#).



"Tlaková nádoba reaktoru VVER-440 V213 (2)" by [Ajrocket1](#) is licensed under [CC BY-SA 4.0](#).

Koš aktivní zóny (VVER440)

- Určuje polohu palivových článků
- Nerezavějící ocel OCh18N10T
- Hmotnost 21,3 t
- Základová deska, válcový plášť
- Na povrchu koše po obvodu 12 trubek pro ionizační komory

Blok ochranných trubek (VVER440)

- Z vrchu fixuje polohu palivových článků
- Vedení regulačních orgánů
- Upevnění vodících trubek pro termočlánky
- Vyvedení vnitro reaktorového měření
- Austenitická ocel 35,2 t
- Z vrchu jej přitlačí 72 pružinových bloků
- Nerezavějící ocel OCh18N10T
- Hmotnost 21,3 t

Pohony regulačních orgánů

- Pohony palivových tyčí upravují zasunutí paliva do reaktoru, čímž kontrolují štěpnou reakci a výkon reaktoru
- Rychlé zasunutí tyčí může okamžitě zastavit štěpnou reakci v případě nouze.
- Pohony jsou součástí řízení reaktoru a automaticky upravují polohu tyčí pro stabilní provoz.

Kompenzátor objemu

- Lépe z anglického pressurizer
- Udržuje nominální tlak primárního okruhu
- Jediné rozhraní voda – vzduch v primárním okruhu
- Omezuje tlakové změny při přechodových jevech
- Ochrana primárního okruhu proti přetlaku
- Dvěma potrubími připojen na horkou větev
- Sprchový systém – připojen k studené větvi
- Elektrické topné články

Pojistné ventily a barbotážní nádrž

- Ochrana primárního okruhu proti přetlaku
- Záloha

Hlavní cirkulační čerpadlo

- Zajišťuje cirkulaci chladiva v primárním okruhu
- Příkon elektromotoru řádově jednotky MW
- Zabezpečuje nahřívání primárního okruhu při startu bloku

Parogenerátor

- Přenos tepelné energie z primárního do sekundárního okruhu
- Horizontální / vertikální
- Použití U trubek – konce zaústěny do kolektorů – v případě netěsnosti je možno ucpat jednotlivé trubky
- Odlučovací zařízení
- Systém rozdělení napájecí vody
- odlučovače

Parogenerátor



"Atommash steam generator for Bangladesh" by [YuliaTikhonova](#) is licensed under [CC BY-SA 4.0](#).



"Atommash transportation of steam generator for Bangladesh" by [YuliaTikhonova](#) is licensed under [CC BY-SA 4.0](#).

Hlavní uzavírací armatury

- Specialita VVER 440
- Nachází se na studené i horké větvi
- Čas uzavírání 38 sekund

Magisterský studijní program JADERNÁ ENERGETIKA vznikl za přispění



**Financováno
Evropskou unií**
NextGenerationEU



**NÁRODNÍ
PLÁN
OBNOVY**

MSMT
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

NPO_VUT_MSMT-16609_2022



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ



Financováno
Evropskou unií
NextGenerationEU



NÁRODNÍ
PLÁN
OBNOVY

MSMT
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ



FAKULTA
CHEMICKÁ



FAKULTA
STAVEBNÍ



FAKULTA
STROJNÍHO
INŽENÝRSTVÍ

Přednáška magisterského studijního programu JADERNÁ ENERGETIKA

Provoz jaderných zařízení a simulátory reaktorových bloků a elektráren

Popis a funkce sekundárního okruhu JE

FEKT

Peter Mičian

Osnova

Komponenty sekundárního okruhu

- Parogenerátor
- Hlavní parní kolektor
- Turbogenerátor
- Kondenzátor
- Čerpadla
- Napájecí nádrž

Parogenerátor (VVER 440)

Hlavní charakteristiky

- Parní výkon – 452 t/h
- Tlak páry – 4,61 MPa
- Teplota chladiwa PO na vstupu – 298 °C
- Teplota chladiwa PO na výstupu – 268 °C
- Průtok chladiwa - 5270 t/h
- Teplota napájecí vody - 225 °C
- Tlak napájecí vody - 7,5 MPa

Parogenerátor (VVER 440)

Hlavní charakteristiky

- Počet trubek – 5536 ks
- Rozměr trubek – 16x1,4 mm²
- Plocha trubek - 2510 m²
- Rychlost chladiwa v trubkách – 2,57 m/s
- Koeficient přestupu tepla 5255 W/m²K
- Rychlost výstupu páry – 0,325 m/s
- Vlhkost páry – 0,25 %

Parogenerátor (VVER 440)

Kontrolní a pomocné zařízení

- Hladinoměry
- Průtokoměry – napájecí vody, vyrobené páry, odluh
- Tlakoměry – napájecí vody, vyrobené páry
- Teploměry – napájecí vody, vyrobené páry, vstup a výstup PG
- Měření aktivity odluhové vody

Separátor páry

- Tzv. žaluzie – vlnité plechy se sklonem
- Průtok mokré páry – při změně směru, částice vody nejsou schopny sledovat směr průtoku
- Voda se zachytí a steče

Hlavní parní kolektor HPK (VVER 440)

- Pára z PG do sekundárního okruhu
- Nominální tlak – 4,5 MPa
- Snížením tlaku klesne teplota – kladný efekt reaktivity – využíváno na konci kampaně
- Snižuje se na 4,1 MPa
- Při tlaku pod 4,2 MPa už je výkon menší než 100 %
- Ochrany 4 MPa a 3,8 MPa (při teplotním efekte 3,8 a 3,6 MPa)

Turbogenerátor TG

- Přeměna tlakové energie páry na kinetickou energii lopatek
- Výroba elektrické energie v generátoru kde se kinetická energie rotoru mění na energii elektrickou
- Části turbíny:
 - Hřídel
 - Oběžné koleso
 - Oběžné lopatky
 - Rozváděcí lopatky
 - Mezistěny
 - Těsnění
 - Ložiska
 - Spojky

Turbína (VVER 440)

- Tří tělesová kondenzační dvojtlačá turbína s regulovanými odběry ST a dva NT díly
- Teplota páry ST – 256 °C; NT – 216,5 °C
- Tlak páry ST – 4,22 MPa; NT – 0,0363 MPa
- Regulace pomocí regulačních ventilů – změnou hmotnostního průtoku
- Regulace škrcením páry – změna velikosti specifické energie – snížení tlaku a energie vstupující páry
- Pojistní ventil – při překročení otáček o 9 – 11 % - rychlouzávěr – poškození ložisek kvůli poklesu tlaku mazacího oleje

Turbína (VVER 440)

Spuštění

- Spuštění kondenzace a otevření odvodňování
- Spuštění pomocného olejového čerpadla a přetáčení rotora malým průtokem páry
- Zvyšování otáček

Odstavování

- Odlehčení a uzavření přívodu páry
- Spuštění pomocného olejového čerpadla
- Otevření odvodňovacích ventilů

Turbína



"Turbine Philippsburg-1" by Christine und David Schmitt from Vienna, Austria, Austria is licensed under [CC BY 2.0](#).



"File:AKW Zwentendorf inside 3.jpg" by Stefan Just is licensed under [CC BY-SA 3.0](#).



"BalNPP m st" by Александр Ситенький (Alexander Seetenky) is licensed under [CC BY-SA 3.0](#).

Generátor

- 3000 ot/min
- 2 pólový stroj
- Chlazeno vodíkem
- U VVER440 2 turbogenerátory na jeden blok
- $S = 259 \text{ MVA}$; $P = 220 \text{ MW}$

Kondenzátor

- Pro ochlazení a zkondenzování páry která vykonala práci v turbíně – odvod nízkopotenciálního tepla
- Teplosměnné trubky z titánu
- Čistění trubek pomocí kuliček
- Je vytvářený podtlak
- Počet trubek cca 30 000 ks

Kondenzační čerpadla

- Kondenzát z kondenzátoru přes nízkotlakou regeneraci do napájecí nádrže
- Centrifugové, 3 stupňové
- Na každou turbínu 2 pracovní a jedno záložní

Ohřívání a regenerace

- Zlepšení účinnosti cyklu
- Nízkotlaké a vysokotlaké
- Prováděné pomocí odběrům páry z turbíny
- U nízkotlaké s čerpadly, u vysokotlaků bez čerpadel

Napájecí nádrž

- Slouží pro napájení PG napájecí vodou
- Za napájecí nádrží se ještě nachází vysokotlaká regenerace
- Napájecí nádrž má také funkci odplyňování – odstranění O_2 , N_2 , CO a CO_2 které se rozpustili do vody při kontaktu se vzduchem a mohli by způsobovat korozi

Napájecí čerpadla

- Podávání napájecí vody skrze vysokotlakou regeneraci do PG
- Turbonapáječky nebo poháněné elektromotorem
- VVER 440 – 5 hlavních a 2 havarijní
- Super havarijní napáječky

Magisterský studijní program JADERNÁ ENERGETIKA vznikl za přispění



**Financováno
Evropskou unií**
NextGenerationEU



**NÁRODNÍ
PLÁN
OBNOVY**

MSMT
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

NPO_VUT_MSMT-16609_2022



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ



Financováno
Evropskou unií
NextGenerationEU



NÁRODNÍ
PLÁN
OBNOVY

MŠMT
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLGIÍ



FAKULTA
CHEMICKÁ



FAKULTA
STAVEBNÍ



FAKULTA
STROJNÍHO
INŽENÝRSTVÍ

Přednáška magisterského studijního programu JADERNÁ ENERGETIKA

Provoz jaderných zařízení a simulátory reaktorových bloků a elektráren

Palivový cyklus, vyhoření paliva

FEKT

Peter Mičian

Osnova

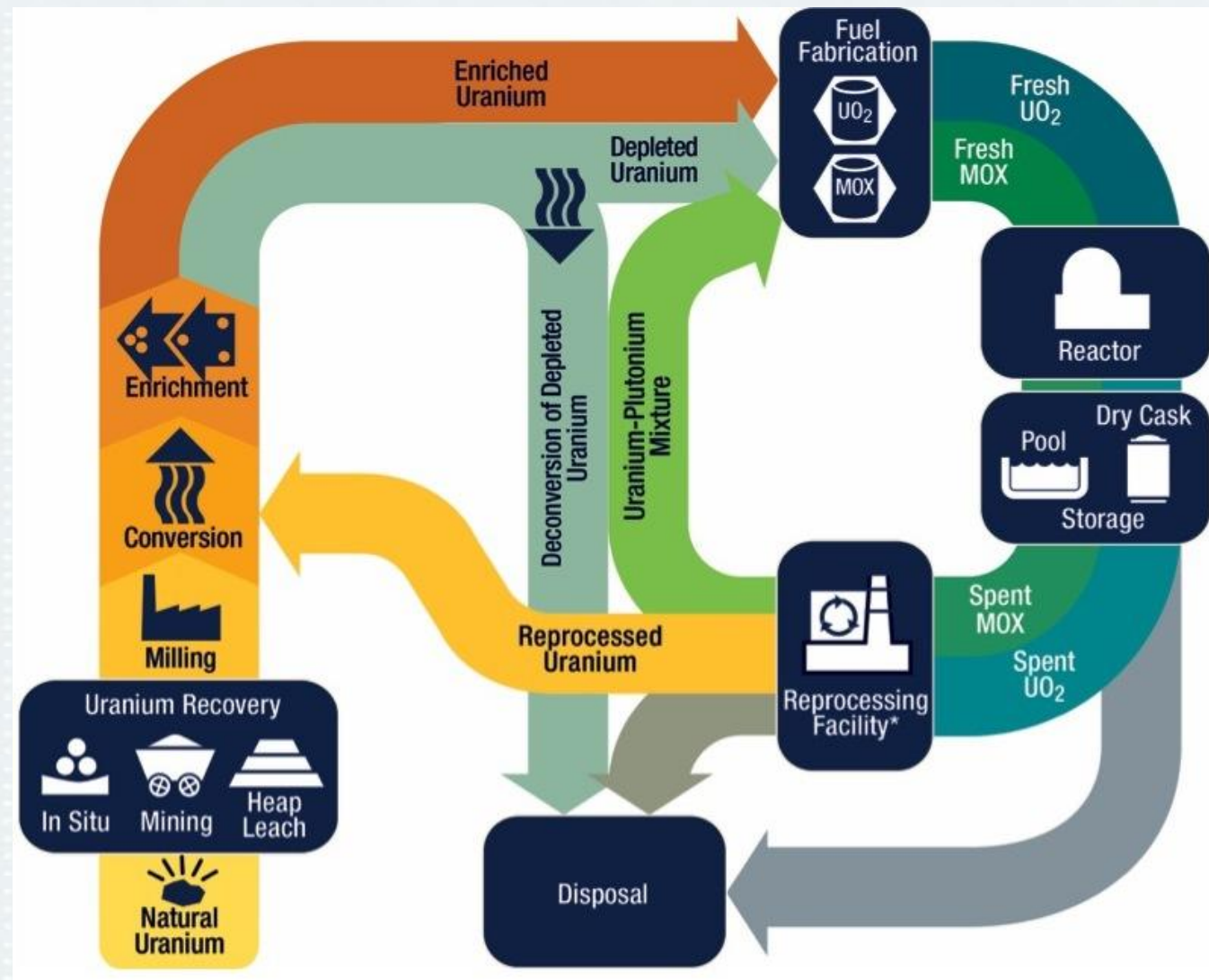
- Jaderný palivový cyklus
- Palivo v přírodě
- Příprava paliva
- Vyhořívání jaderného paliva
- Ukládání vyhořeného paliva

Jaderný palivový cyklus

Dělení:

- Otevřený / uzavřený
- Přední / střední / zadní
- Vnitřní / vnější

Jaderný palivový cyklus



"The Nuclear Fuel Cycle (44021369082) (cropped)" by Nuclear Regulatory Commission from US is licensed under CC BY 2.0.

Palivo v přírodě

Uran

- není vzácný prvek – hojně zastoupený v zemské kůře
- Celkové množství je asi 10^{15} tun
- Uranu je přibližně
 - 1000x více než zlata
 - 30x víc než stříbra
 - Asi tolik jako zinku, olova, bóru, molybdenu, hafnia
- Uran se získává především z uranových rud
- Lze získat také z uranových břidlic, jílu, uhlí, mořské vody (cena)

Palivo v přírodě

- Přírodní uran je směs tří izotopů:
 - 238 – 99,28 %
 - 235 – 0,715 %
 - 234 – <0,005 %
- Zásoby uranu – cca 230 roků (reaktory II.gen)
- Zásoby se odvíjí od ceny na trhu a ceně za zracování

Palivo v přírodě

Thorium

- Principiálně monoizotopický, ale díky rozpadové řadě je v přírodě v směsi izotopů:
 - ^{232}Th > 99,9 %
 - ^{228}Th < 10^{-8} %
- Velká naleziště v Indii, Brazílii, Kanadě, Austrálii ale i USA, Egypt
- Thorium 232 je množivý nuklid – pro přípravu nového jaderného paliva - transmutací

Palivo v přírodě

Thorium

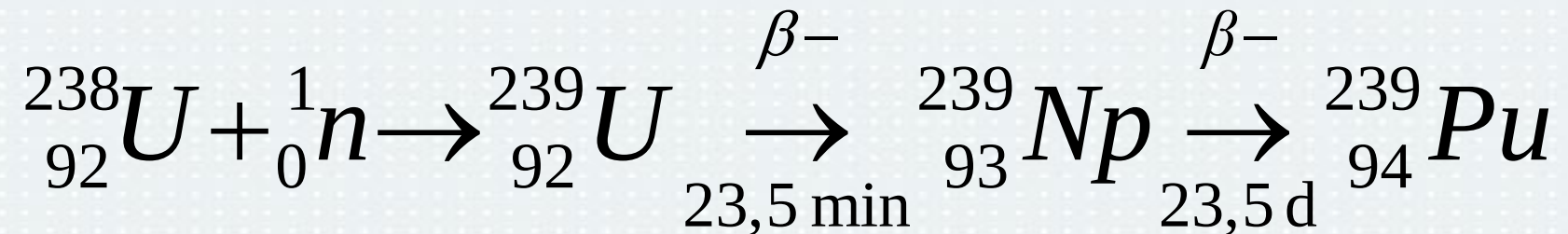
- Principiálně monoizotopický, ale díky rozpadové řadě je v přírodě v směsi izotopů:
 - ^{232}Th > 99,9 %
 - ^{228}Th < 10^{-8} %
- Velká naleziště v Indii, Brazílii, Kanadě, Austrálii ale i USA, Egypt
- Thorium 232 je množivý nuklid – pro přípravu nového jaderného paliva - transmutací

Paliva uměle připravena

- Získané pomocí transmutace
- Výchozí nuklidy pro přípravu nových jaderných paliv
 - U238
 - Th232
- Označovány jako plodivé nebo množivé materiály

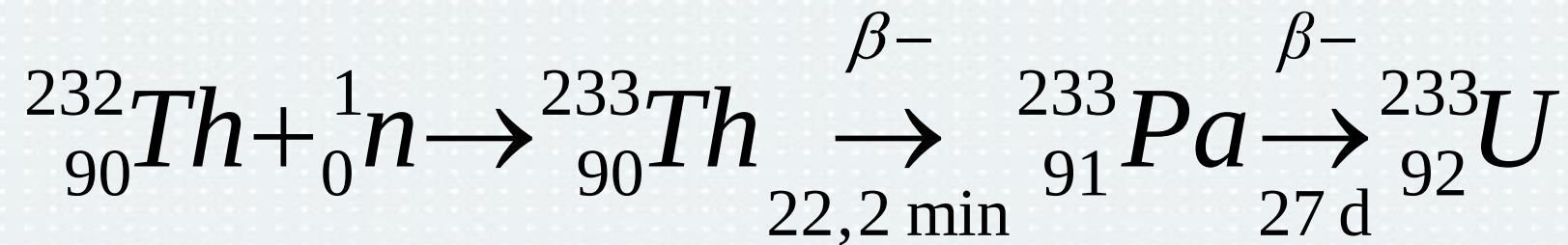
Paliva uměle připravena

- Radiačním zachytem neutronů na jádrech ^{238}U vzniká nový palivový materiál – izotop plutonia ^{239}Pu , který je štěpitelný tepelnými neutrony:



Paliva uměle připravena

- Radiačním zachytem neutronů na jádrech ^{232}Th vzniká nový palivový materiál – izotop uranu ^{233}U , který je štěpitelný tepelnými neutrony:
- Výhoda – vznikají aktivační produkty s výrazně kratšími poločasy přeměny



Příprava uranového paliva

- Těžba – mechanická úprava – chemická úprava
- Získání uranového koncentrátu – obsahuje dusičnan uranylu nebo diuranát amonný (žlutý koláč)
- Obsahuje asi 65% uranu
- Dále se chemicky čistí a mění na fluorid uraničitý UF_4 a fluorid uranový UF_6
- Fluorid uranový je těkavá látka – skupenství může být snadno změněno v závislosti na tlaku a teplotě

Příprava uranového paliva



"A photo of yellow cake uranium, a solid form of uranium" by [NRCgov](#) is licensed under [CC BY 2.0](#).

Těžba uránové rudy



"Open pit of the Rio Tinto Rössing uranium mine, Namibia" by [jbdodane](#) is licensed under [CC BY-NC 2.0](#).



"Uranium mine tunnel" by [Drimogemon26](#) is licensed under [CC BY-SA 4.0](#).

Obohacování uranu

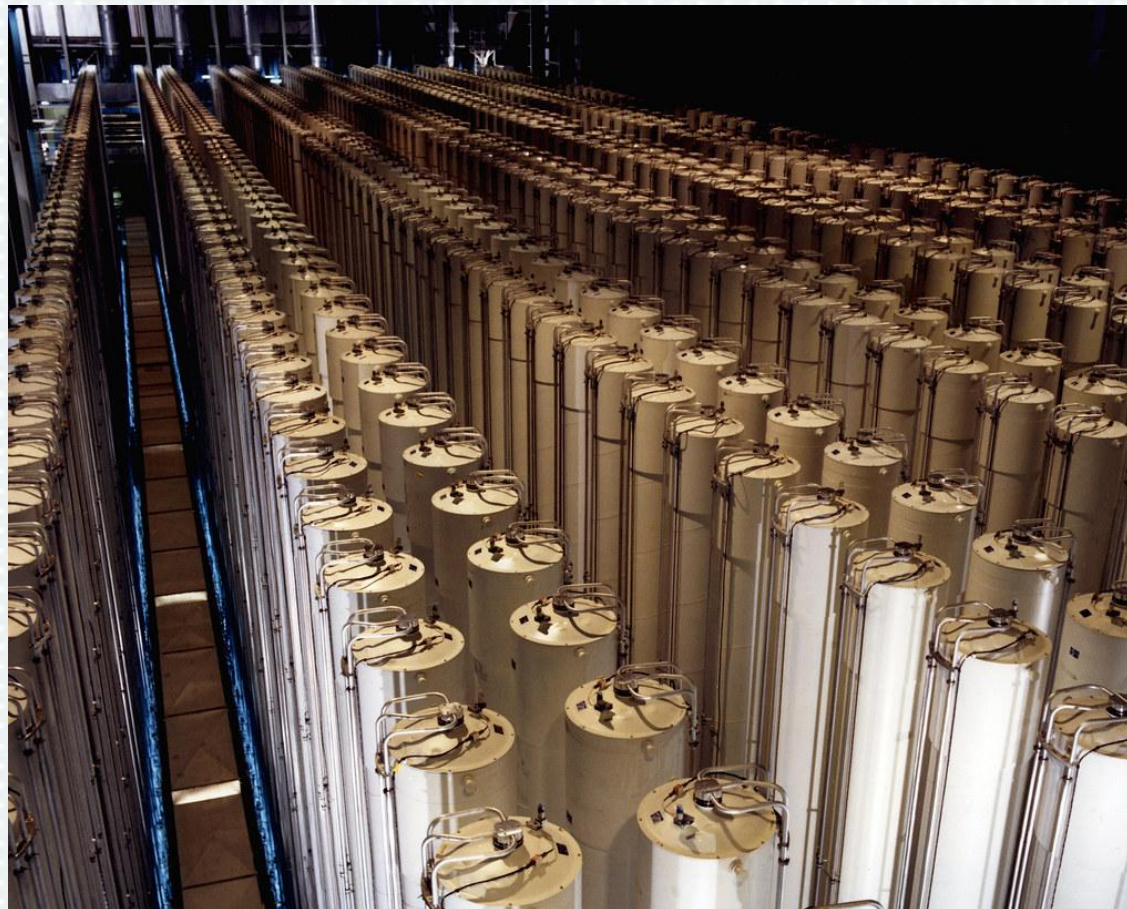
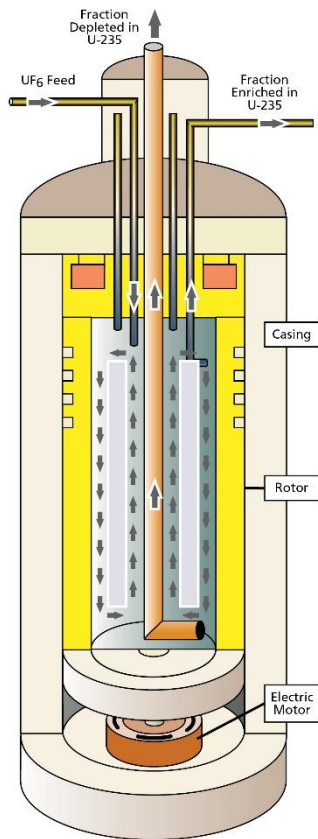
- Metody obohacování
 - Centrifugace
 - Plynná difuze
 - Laserová separace
 - Elektromagnetická separace
 - Tepelná difuze
 - Aerodynamická separace
- Energeticky a technologicky nejnáročnější část výroby paliva

Obohacování uranu

Uranium enrichment process

Gas Centrifuge Process

The gas centrifuge process uses many rotating cylinders that are connected in long lines. Gas is placed in the cylinder, which spins at a high speed, creating a strong centrifugal force. Heavier gas molecules move to the cylinder wall, while lighter molecules collect near the center. The stream, now slightly enriched, is fed into the next cylinder. The depleted stream is recycled back into the previous cylinder.



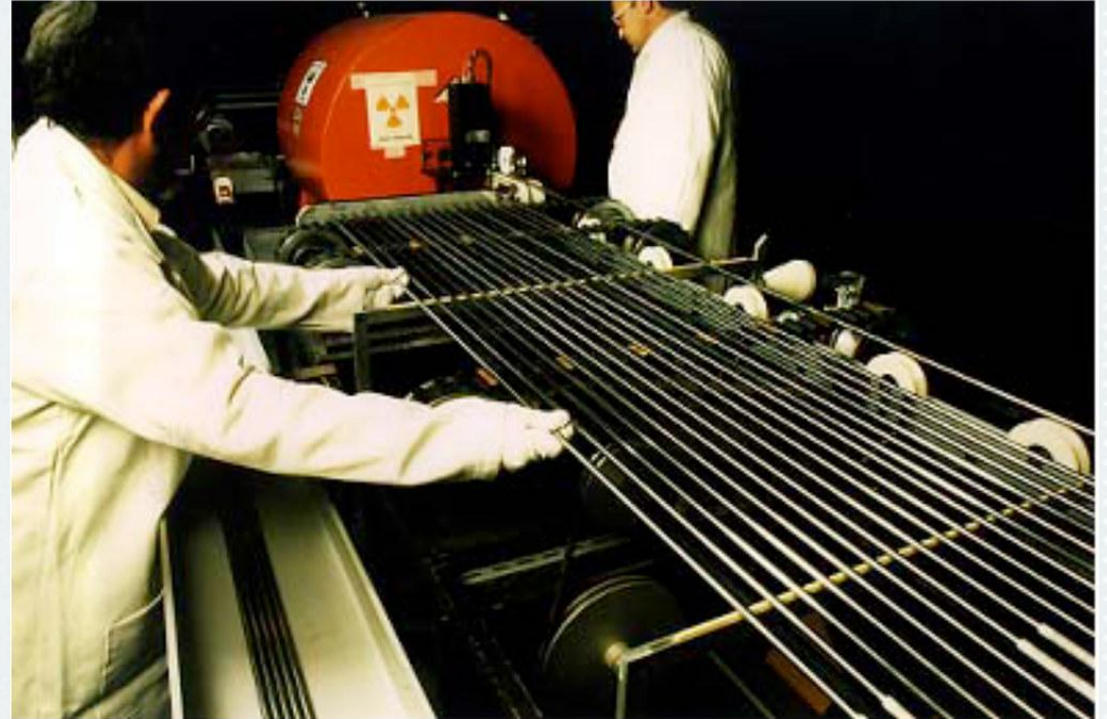
"Uranium Enrichment Process (29275040542)" by Nuclear Regulatory Commission from US is licensed under [CC BY 2.0](#).

"Cascade of gas centrifuges" by NRCgov is licensed under [CC BY 2.0](#).

Fabrikace



"Nuclear Fuel Pellets" by [NRCgov](#) is licensed under [CC BY 2.0](#).



"Nuclear fuel pellets assembled into rods" by [NRCgov](#) is licensed under [CC BY 2.0](#).

Zavážení aktivní zóny

Dva způsoby

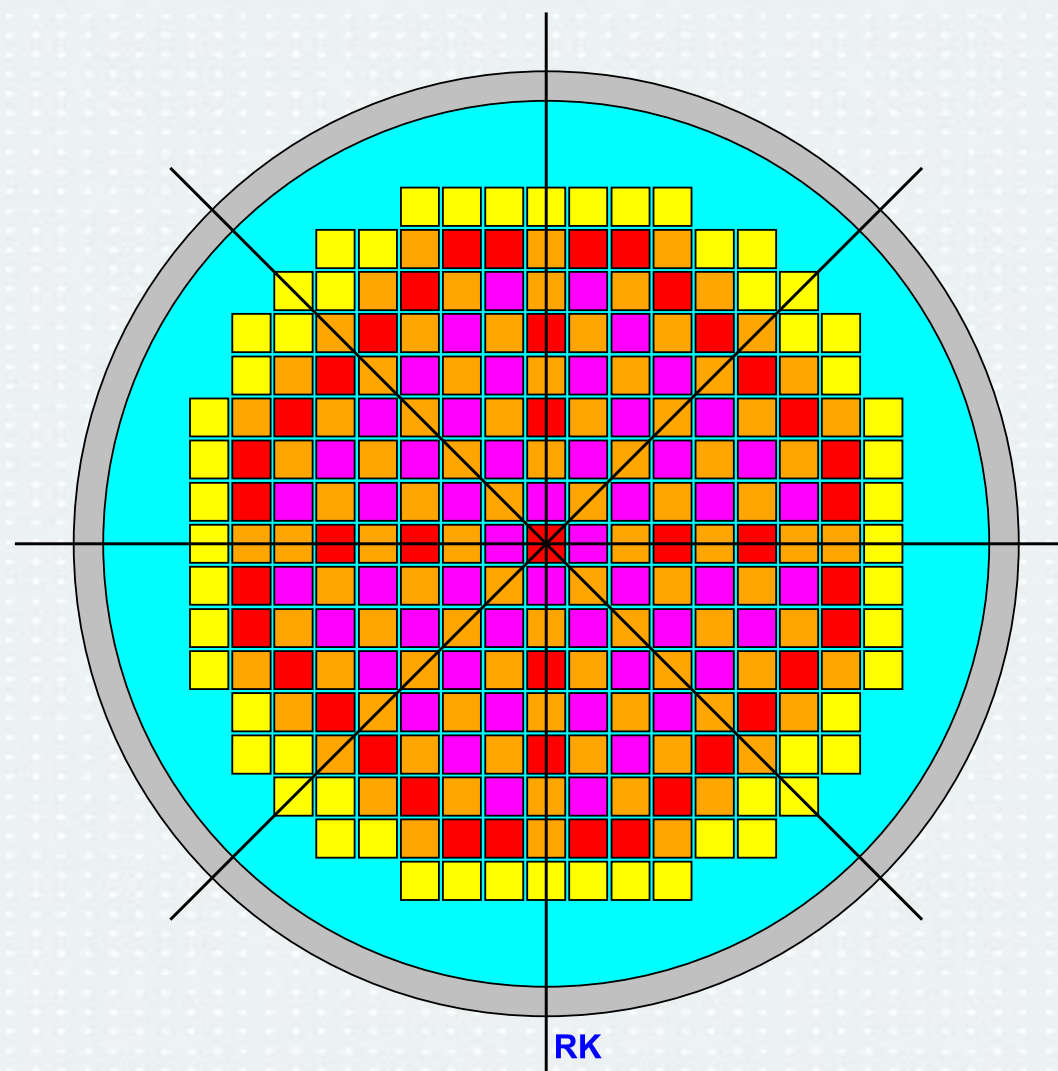
1. Metoda Out – In

- Čerstvé kazety nejprve na okraj AZ, pak přesouvání do středu
- Rovnoměrné rozložení výkonu v AZ

2. Metoda In – Out

- Palivo čerstvé s vyšším výkonem do centra AZ
- Ochrana tlakové nádoby
- Menší únik neutronů
- Vyšší vyhoření
- Potřeba používat vyhořívající absorbátory

Zavážení aktivní zóny



"Corequerschnitt EPR Spiegelsymmetrieachsen RK01" by Roderich Kahn is licensed under [CC BY-SA 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/).

Procesy v průběhu vyhořívání

Vyhoření (burnup - Bu) = energie • čas / hmotnost paliva

- MWd/kgU nebo MWd/kgUO₂ (1t UO₂ je 0.8815 tU)
- Odvozené jednotky jsou GWd/tU....
- Možné i další jednotky (Effective Full Power Day – EFPD; vyhoření v atomárních či hmotnostních %)
- Energií (výkon*čas) se myslí *tepelná* energie

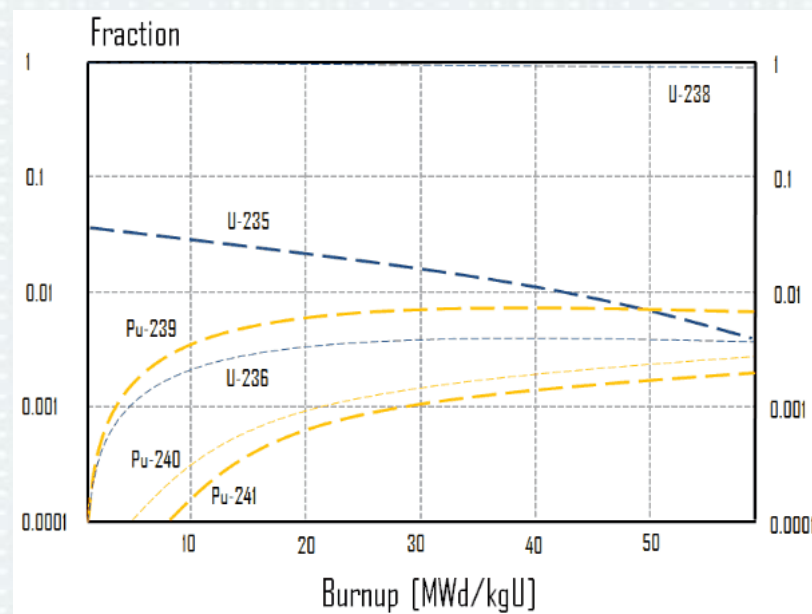
Zatížení proutku se udává v průměrném poproutkovém výkonu ve W/cm či kW/m (Linear Heat Generation Rate)

Procesy v průběhu vyhořívání

- Základem vyhořívání paliva je štěpení uranu, které vede ke vzniku štěpných produktů, které se dále rozpadají.
- Dále dochází k zachytu neutronů na jádrech ^{238}U , čímž dochází ke vzniku plutonia a tzv. *Minoritních aktinoidů* (prvky, které jsou v periodické tabulce za uranem). Vznikají také zachytem na ^{235}U .
- Příčinou následné vysoké radioaktivity vyhořelého paliva je rozpad štěpných produktů a minoritních aktinidů.
- Čerstvé palivo je „minimálně“ radioaktivní (!!!).

Procesy v průběhu vyhořívání

- V průběhu vyhořívání je „spotřebováván“ ^{235}U , ale současně dochází k tvorbě významného množství plutonia, které v pozdějších fázích palivové kampaně významně přispívá k neutronové bilanci.



Procesy v průběhu vyhořívání

Tepelné namáhání pelety

- Palivo zatížené velkým tepelným výkonem
- Nízká tepelná vodivost keramického paliva
- Tepelný gradient v palivové peletě v řádech stovek °C/cm
- Extrémné tepelné i mechanické namáhání
- Riziko tavení – centrální otvor

Procesy v průběhu vyhořívání

Mechanické namáhání

- Nízká tepelná vodivost – střed paliva stalčován a okraj se roztahuje
- Tvar přesýpacích hodin
- Praskání – únik plynných štěpných produktů

Tvorba centrální dutiny

- Čerstvé palivo cca 5 % porozita pro záchyt plynných produktů
- Póry migrují do centra pelety a vytváří centrální dutinu

Procesy v průběhu vyhořívání

Densifikace a napuchání

- Vysoká teplota – na začátku vyhořívání zhutní palivo
- Dále však s vyšším vyhořením palivo napuchá
- Napuchání paliva vede k změně rozměrů pelety a k uzavření mezery mezi palivem a pokrytím

Únik plynných štěpných produktů

- Zejména Xe a Kr unikají k volnému povrchu pelety
- Významná veličina – zvyšuje tlak v proutku

Meziskladování vyhořelého jaderného paliva



"Dry Storage of Spent Nuclear Fuel" by [NRCgov](#) is licensed under [CC BY 2.0](#).



"Spent Fuel Pool of Unit 2 at Brunswick Nuclear Power Plant" by [NRCgov](#) is licensed under [CC BY 2.0](#).

Hlubinné úložiště



"Yukiya Amano (IAEA) visits Onkalo (2012) 05" by IAEA Imagebank is licensed under [CC BY-SA 2.0](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/2.0/).

Magisterský studijní program JADERNÁ ENERGETIKA vznikl za přispění



**Financováno
Evropskou unií**
NextGenerationEU



**NÁRODNÍ
PLÁN
OBNOVY**

MSMT
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

NPO_VUT_MSMT-16609_2022



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ



Financováno
Evropskou unií
NextGenerationEU



NÁRODNÍ
PLÁN
OBNOVY

MŠMT
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ



FAKULTA
CHEMICKÁ



FAKULTA
STAVEBNÍ



FAKULTA
STROJNÍHO
INŽENÝRSTVÍ

Přednáška magisterského studijního programu JADERNÁ ENERGETIKA

Provoz jaderných zařízení a simulátory reaktorových bloků a elektráren

Palivový sobor

FEKT

Peter Mičian

Osnova

- Požadavky na jaderné palivo
- Fabrikace
- Vyhořívající absorbátory
- VVER 440
- VVER 1000
- PWR
- BWR
- CANDU

Požadavky na jaderné palivo

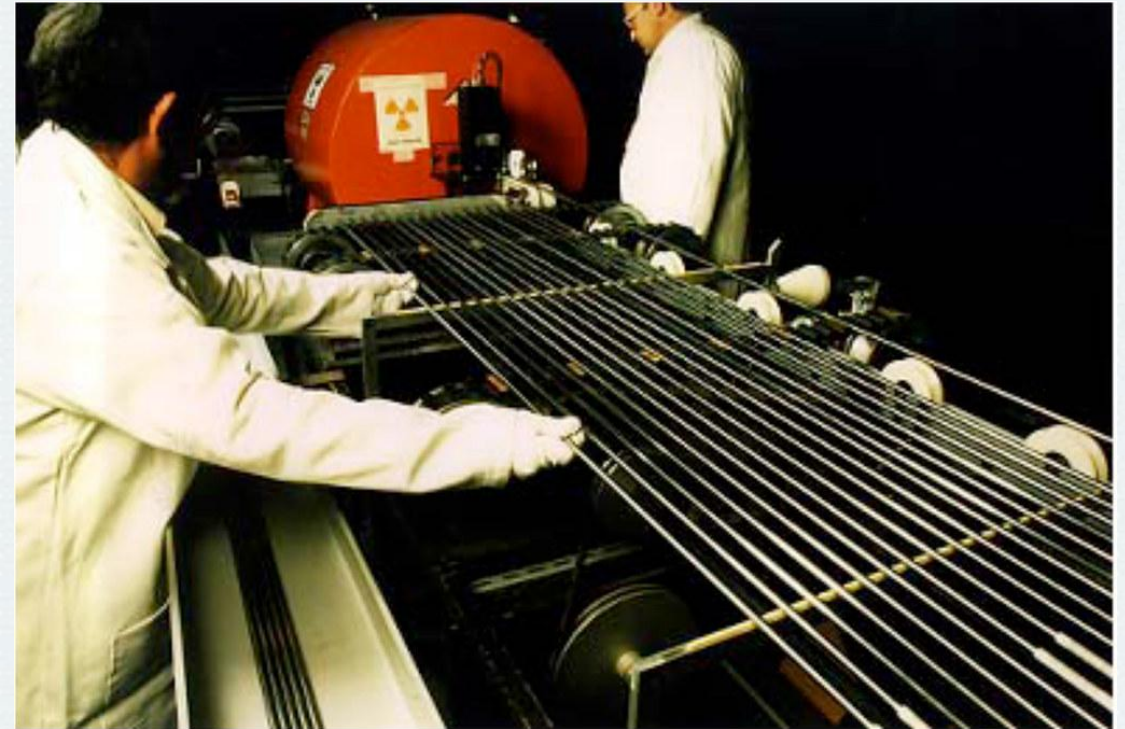
1. Zajistit dosažitelnost zadaného tepelného výkonu reaktoru a vyhoření paliva při spolehlivém a bezpečném provozu
2. Musí být odolné – swelling, creep; v rozsahu teplot malé objemové změny
3. Konstrukční materiály v podmínkách provozu odolné proti korozi, erozi, chemicky stále, pevné a houževnaté, nízká absorpce
4. Konstrukční řešení
 - Upevnění a distancování palivových elementů
 - Průtok chladiwa s nejnižším odporem
 - Konstrukční stálost, jednoduché manipulace
 - Možnost zavézt čidla

Fabrikace

- Poslední část přední části palivového cyklu
- UF_6 konvertováno na UO_2
- UO_2 – vysoký bod tání a další příznivé vlastnosti
- Práškové UO_2 je lisováno a spékáno v peci při vysoké teplotě a řízené atmosféře
- Konstrukční části palivových souborů – zirkonium / inconel
- Zirkonium nízký účinný průřez pro absorpci neutronů
- Hustota pelety $10,4 - 10,7 \text{ g/cm}^3$ a
- Pokrytí zirkonium – inertní plyn He uvnitř palivového proutku

Fabrikace

- Palivový proutek je podroben kontrole těsnosti
- Zasouváním palivových proutku skrz distanční mřížky vzniká palivový soubor



"Nuclear fuel pellets assembled into rods" by [NRCgov](#) is licensed under [CC BY 2.0](#).

Vyhořívající absorbátory

- Nejčastěji používaný – gadolinium Gd_2O_3
- Rozptýlený v peletách UO_2
- Umožňuje víceleté kampaně
- Nevýhody – snížení teploty tání UO_2 , vliv na poréznost a velikost zrn UO_2 ,
- nevznikají žádné produkty s vysokou absorpcí
- Teplota tavení je $T_{\text{tav}} = 2840 - 0,56 \times \text{Bu}$ (Bu vyhoření MWd/kgU)
- Při obsahu Gd_2O_3 3,35 % $T_{\text{tav}} = 2550$

Poškození pokrytí

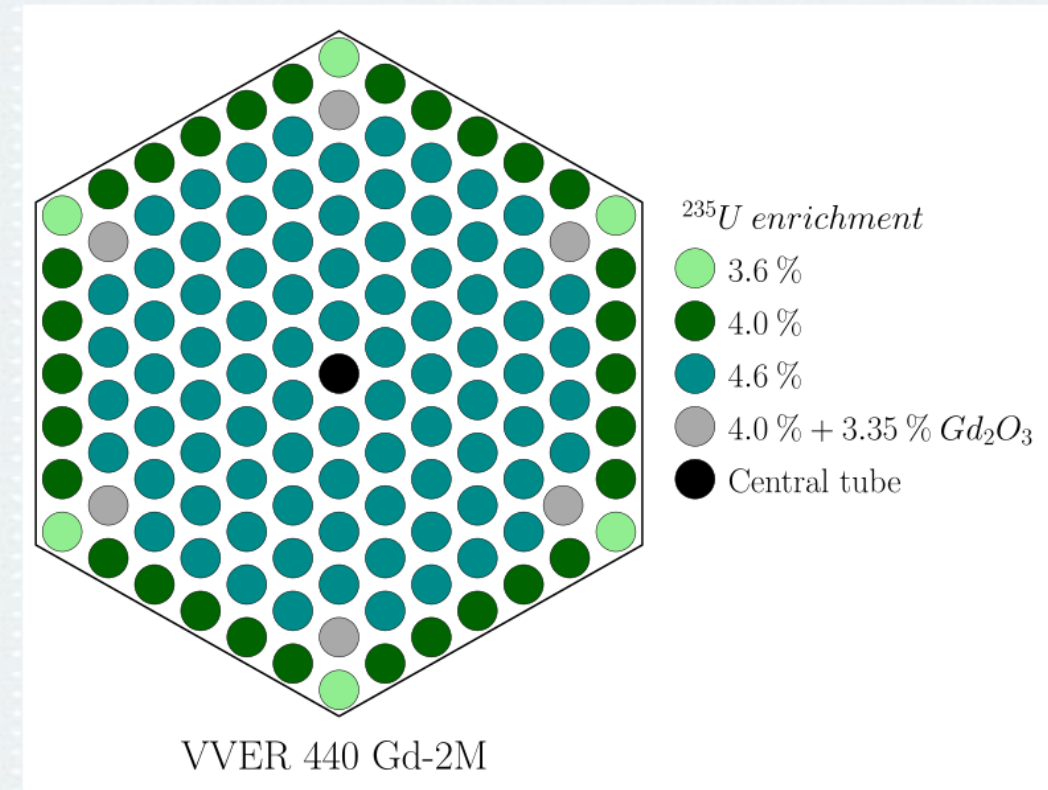
- Pravděpodobnost 10^{-5} – jednou ze 100 000 proutků
- Důvod vysoké spolehlivosti – identifikované opakující se příčiny a eliminované
- Hlavní příčiny
- Koroze a usazeniny na povrchu
 - Hydratace
 - Mechanické poškození – fretting
 - Interakce mezi peletkou a pokrytím – PCI
 - Překročený kritický tepelný tok
 - Zlá manipulace

VVER

- Oxid uraničitý (UO_2)
- Výhody: vysoká teplota tání ($2860\text{ }^\circ\text{C}$), dostatečnou odolnost vůči radiaci, kompatibilitu s materiálem pokrytí palivových prutů a chemickou stabilitu vůči vodě při provozních teplotách chladiwa
- Nevýhody: nízká tepelná vodivost a relativně nízká hustota
- Ve formě palivových tablet o průměru 7,55–7,60 mm, výšce 15 mm a hustotě $10,56\text{ g/cm}^3$
- tablety se vkládají do trubek ze slitiny zirkonia - plní se heliem natlakovaným na 0,4 MPa a hermeticky svařují

VVER 440

- Každý proutek obsahuje 1,06 kg UO₂ tj. 0,93 kg U
- Přetlak hélia 300 – 700 kPa
- pokrytí zirkoniová slitina s 1 % niobu
- Hmotnost kazety 220 kg
- Tandemové řízení – absorpční část z bórové oceli
- obálka



"VVER 440 nuclear fuel assembly" by Vilem Hron is licensed under [CC BY-SA 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/).

Tepelný výkon reaktoru (MW)	1375	3000
Hrubý elektrický výkon (MWe)	440	1000
Čistý elektrický výkon (MWe)	410	953
Účinnost jaderné elektrárny (brutto) (%)	31,5	33,3
Aktivní zóna		
průměr palivové tablety (mm)	7,55	7,55
průměr palivové tyče (mm)	9,1	9,1
tloušťka povlakové trubky (mm)	0,65	0,67
hmotnost uranu v palivové tyči (kg)	0,95	
lineární výkon palivové tyče (kW/m)	13,1	17,6
rozteč mříže palivových tyčí (mm)	12,2	12,6
počet tyčí v palivovém článku (kazetě)	126	317
počet článků (kazet) v aktivní zóně	349	151
účinný průměr aktivní zóny (mm)	2880	3120
účinná výška aktivní zóny (mm)	2500	3500
palivové vsázka (t)	42	66
průměrné obohaceni paliva (%)	3,5	3,3-4,4
měrný výkon aktivní zóny (MW/m ³)	83	111
měrný výkon paliva (kW/kg)	32,7	45,5
průměrné vyhoření paliva (MWd/kg)	28,6	30-40
efektivní kampaň reaktoru (h)	7000	7000
objemový průtok vody reaktorem (m ³ /s)	10,8	21,1
maximální rychlost vody v AZ (m/s)	5,7	
průměrné ohřátí vody v AZ (°C)	31	35
počáteční zásoba reaktivity při 20 °C (%)	18	22,5
počet regulačních orgánů	37	109
efektivita regulačních orgánů při 20°C (%)	10	6,2

VVER 1000

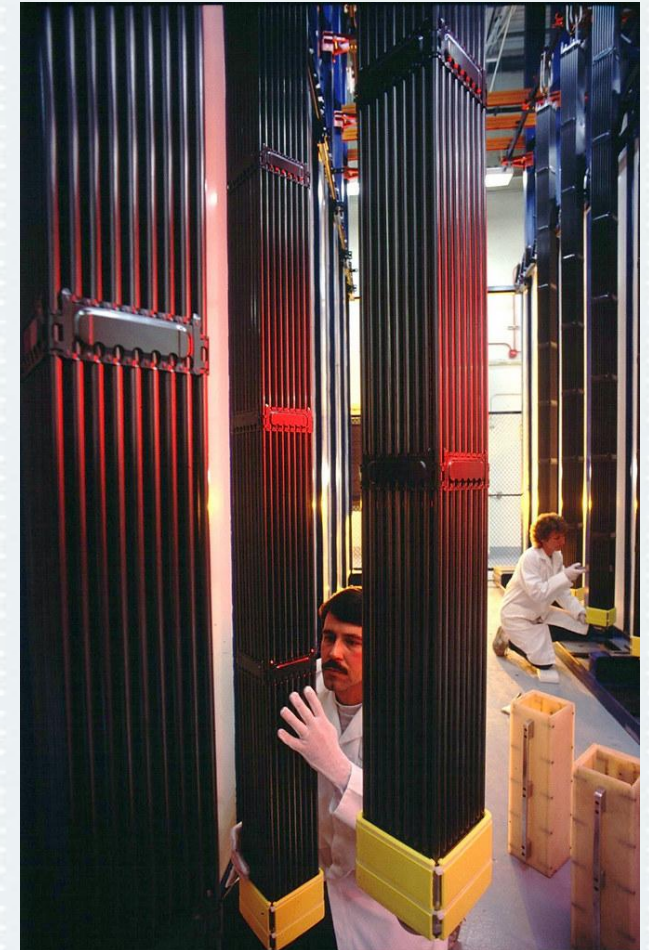
- Proutky stejné jako 440 kromě délky – 3,55 m
- Počet palivových proutků na soubor je 317
- 18 trubiček – klastrová regulace (35 kg)
- Počet souborů 151 – zkrácení času pro výměnu paliva
- bezobálkový



"File:RIAN archive 132603 Nuclear power reactor fuel assembly.jpg" by Ruslan Krivobok / Руслан Кривобок is licensed under [CC BY-SA 3.0](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/).

PWR

- Čtvercová mříž 17x17
- Bezobálkové
- Vodící trubky pro klastrovou regulaci



"Reactor Fuel Assembly Unit" by [NRCgov](#) is licensed under [CC BY-NC-ND 2.0](#). "Reactor Fuel Assembly Unit" by [NRCgov](#) is licensed under [CC BY-NC-ND 2.0](#).

BWR

- Soubor - 7x7 proutků
- Mezi 4 soubory umístěna absorpční tyč tvaru kříže
- Dálka 4 m
- Regulace kombinace: elektrická - pomalá, hydraulická – rychlé odstavení

CANDU

- Přírodní uran
- Dobrá neutronová bilance – chlazené a moderované těžkou vodou
- Výměna paliva za plného provozu
- Horizontální umístění paliva



"Tatjana Jevremovic (04010068)" by IAEA Imagebank is licensed under [CC BY 2.0](#).

Magisterský studijní program JADERNÁ ENERGETIKA vznikl za přispění



**Financováno
Evropskou unií**
NextGenerationEU



**NÁRODNÍ
PLÁN
OBNOVY**

MSMT
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

NPO_VUT_MSMT-16609_2022



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ



Financováno
Evropskou unií
NextGenerationEU



NÁRODNÍ
PLÁN
OBNOVY

MŠMT
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ



FAKULTA
CHEMICKÁ



FAKULTA
STAVEBNÍ



FAKULTA
STROJNÍHO
INŽENÝRSTVÍ

Přednáška magisterského studijního programu JADERNÁ ENERGETIKA

Provoz jaderných zařízení a simulátory reaktorových bloků a elektráren

Meření a regulace v JE

FEKT

Peter Mičian

Osnova

- Regulační systémy
- Systém regulace reaktoru
- Regulační systém VVER 440
- Systém pro kontrolu neutronového toku
- In-core monitoring
- Systém regulace reaktoru

Regulační systémy JE

- Základní funkce všech regulačních systémů – udržování parametrů na zadaných hodnotách a v rozmezí povolených hodnot
 - Tlaky, teploty, hladiny, průtoky, výkony...
- Pracují autonomně
- Regulace výkonu
 - Soulad mezi primární a sekundární stranou
 - Při požadavku ze sítě, řídí a reguluje celý blok

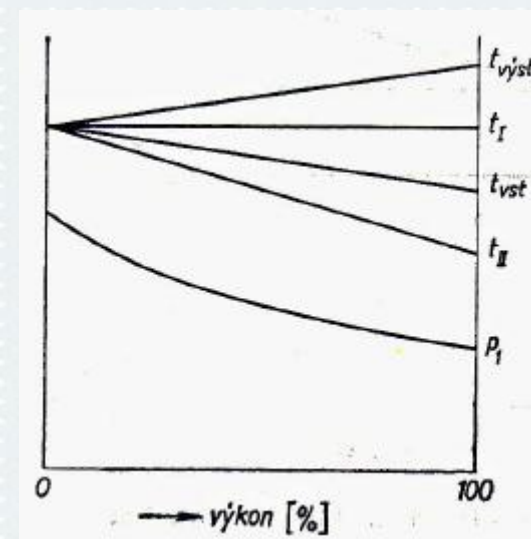
Regulační programy

- Řídí závislosti parametrů od změny výkonu JE
- Programy jsou určeny a nahrány už při projektování celého zařízení a liší se dle typu a požadovaného parametru (výkon, chlazení, účel)
- Regulace
 - Na konst. střední teplotu chladiwa
 - Na konst. tlak páry
 - Kompromisní řešení
 - Měnitelný průtok chladiwa

Na konst. střední teplotu chladiva

$t_r = \text{konst}$, $Q_r = \text{konst}$

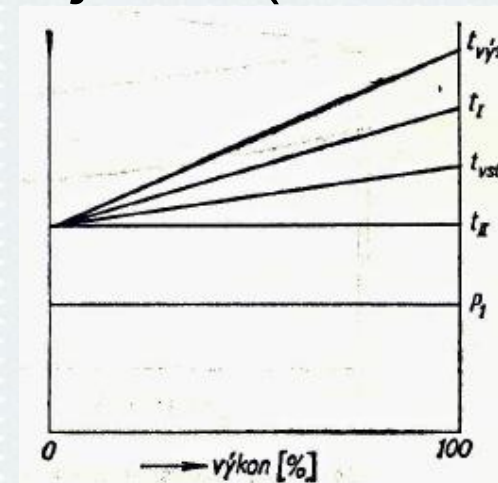
- Pro reaktor s dostatečným záporným teplotním koeficientem reaktivity (PWR) – při změně výstupního výkonu minimální pohyb řídících tyčí (jenom kvůli vyhořívání a otravám)
 - Změna výkonu – změna odebraného tepla z PG – změna teploty chladiva – záporná zpětná vazba
 - Reaktor se sám ustálí
 - Nevýhoda – velká změna tlaku páry
- Tlak páry stoupá s klesající zátěží



Na konst. tlak páry

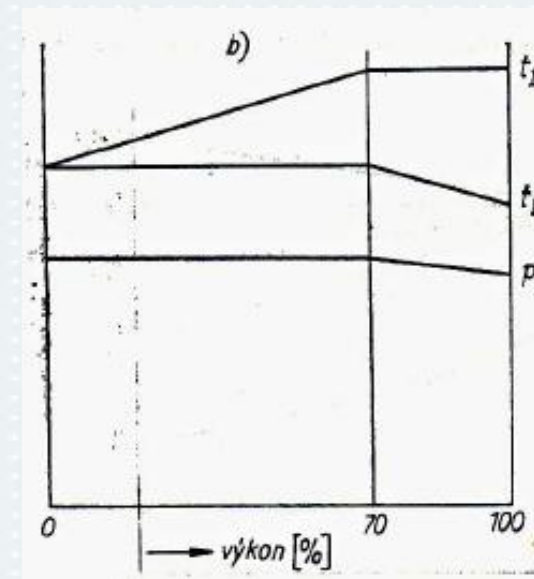
$p = \text{konst.}$ nebo $t_{II} = \text{konst.}$ při $Q_r = \text{konst}$

- Udržuje konstatní tlak páry v HPK nezávisle na výkoně, dovoluje se vzrůst teploty chladiwa
- Vyšší účinnost . Optimální dimenzování PG a sekundární strany
- Využívá se u většiny PWR
- Při změně zatížení dochází k velké změně objemu (až o 7,5 %) – KO velké rozměry
- Značné posuvy regulační tyčí



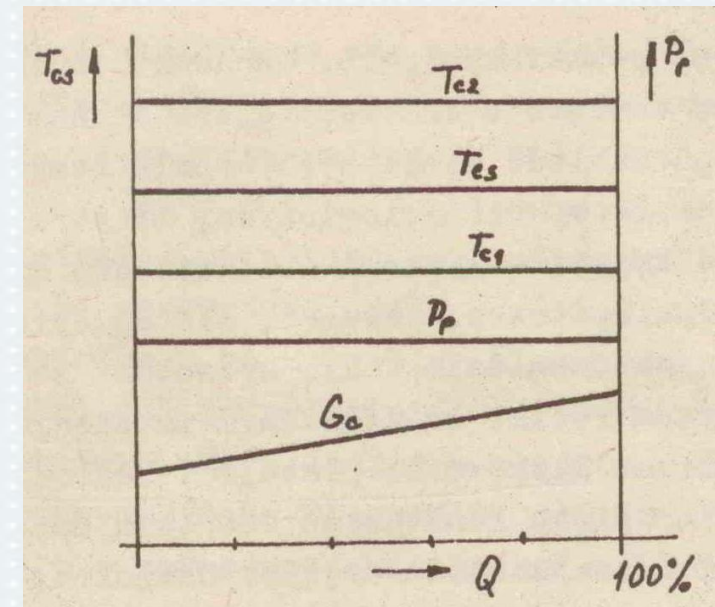
Kompromisní řešení

- Kombinace předešlých
 - Na konst. teplotu – výhodný pro primární okruh
 - Na konst. tlak – výhodné pro sekundární okruh
- Využívá se výhody obou
- Ve vyšších výkonech (50(70)-100 %) – reg na teplotu
- V nižších výkonech (0-50(70) %) – reg na tlak



Měnitelný průtok chladiva

- Při reaktorech s velkým teplotním spádem na AZ – chlazené plynem
- Regulace natáčením lopatek nebo změnou otáček
- Lepší účinnost při nižších zátěžích



Systém regulace reaktoru

- Účel – regulace výkonu reaktoru a jeho udržování
- Reguluje podle
 - Neutronového toku (režim N – konst neutronový výkon)
 - Tlaku páry v HPK (režim T – konst tlak HPK, S - kombinace)
- Působí na pohony regulačních tyčí
- Regulátor je odpojený při ručním ovládání regulačních tyčí
- Ve všech režimech automatické regulace při překročení hladiny 101 % nominálního výkonu k regulaci neutronového výkonu reaktoru

Systém regulace reaktoru

- Výkonová hladina do 10 % N_{nom} - ruční ovládání regulačních tyčí
- Výkonová hladina 10 – 100 % N_{nom} - automatická regulace
- Automatický regulátor pracuje v logice 2 z 3
- Zákaz vysouvání reg tyčí
 - Tlak primáru více jak 13 MPa
 - Blokování HRL
 - Výkon reaktoru je vyšší 100 %
 - Výkon reaktoru je vyšší od dovolené hodnoty
 - Perioda reaktoru je méně než 80 vteřin
- Zákaz zasouvání reg tyčí – tlak primáru méně než 11,8 MPa

Regulační systém VVER 440

- Regulace na konstantní tlak páry
- Změna se šíří od turbíny k reaktoru
- Regulační systém hlavního technologického zařízení:
 1. Regulátor neutronového toku
 2. Regulátor tlaku páry v sekundárním okruhu
 3. Regulátor hladiny v KO
 4. Regulátor turbíny TVER
 5. Regulátor propouštěcích stanic
 6. Regulátor napájení PG

Regulační systém VVER 440

Regulátor neutronového toku

- Reg výkon reaktoru při změnách neutronového toku a při odchylkách tlaku páry
- Výstup – pohony regulačních tyčí
- Vstup – hodnota neutronového toku (ionizační komory)
 - tlak páry
- Regulátor neutronového toku a tlaku páry pracují v kaskádním zapojení

Regulační systém VVER 440

Regulátor tlaku páry

- Reguluje tlak páry
- Pracuje v kaskádním zapojení s regulátorem neutronového toku

Regulátor hladiny KO

- Reguluje hladinu vody v KO
- Působí na ventil doplňování do primárního okruhu

Regulační systém VVER 440

Regulátor tlaku chladiva v primárním okruhu

- Pomocou zmeny tlaku v KO
- Působí na elektrické ohřívačky v KO – nárůst tlaku
- Působí na sprchu v KO – pokles tlaku
- Způsobené přítokem nebo odvodem chladiva nebo změnou střední teploty chladiva

Regulační systém VVER 440

Regulátor zatížení turbíny TVER

- Regulace dvou turbín jednoho bloku
- Dva regulátory výkonu turbíny
 - Reg výkonu
 - Reg tlaku páry – skrz reg ventily turbíny
- Dva regulátory propouštěcích stanic
- Dva automaty otáčecího zařízení
- Měření a vyhodnocování otáček

Regulační systém VVER 440

Regulátor propouštěcích stanic

- Při odlehčení turíny kompenzovat nárůst tlaku
- Režim společný kolektor nebo rozdělený kolektor

Regulátor napájení PG

- Udržovat hladinu vody v PG
- Vstup – hladina, průtok napájecí vody
- Výstup – regulační ventil napájecí vody

Systém pro kontrolu neutronového toku

- Zajišťuje kontrolu toku tepelných neutronů ve všech režimech a ve všech výkonových hladinách od 5×10^{-10} do 125 % N_{nom}
- tři nezávislé redundance
- 27 detektorů – v biologickém stínění
- Kontrola výkonu, periody a reaktivity

In-core monitoring

- Monitoruje parametry v aktivní zóně
- Založený na simulacích aktivní zóny
- Signál ze senzoru putují do simulace a vypočteně výstupy pak na blokovou dozornu
- Senzory
 - 210 z 349 termo článků pro měření výstupných teplot z palivových článků
 - 6 termo článků v horním plénu TNR
 - 24 termo článků v smyčkách
 - 36 samo napájecích detektorů pro měření radiální rozložení výkonu - z toho 7 pro axiální rozložení

Magisterský studijní program JADERNÁ ENERGETIKA vznikl za přispění



**Financováno
Evropskou unií**
NextGenerationEU



**NÁRODNÍ
PLÁN
OBNOVY**

MSMT
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

NPO_VUT_MSMT-16609_2022



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ



Financováno
Evropskou unií
NextGenerationEU



NÁRODNÍ
PLÁN
OBNOVY

MŠMT
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ



FAKULTA
CHEMICKÁ



FAKULTA
STAVEBNÍ



FAKULTA
STROJNÍHO
INŽENÝRSTVÍ

Přednáška magisterského studijního programu JADERNÁ ENERGETIKA

Provoz jaderných zařízení a simulátory reaktorových bloků a elektráren

Dynamika jaderného reaktoru

FEKT

Peter Mičian

Osnova

- Multiplikační koeficient
- Reaktivita
- Perioda reaktoru
- Zpožděné neutrony
- Koeficienty a efekty reaktivity
- Podkritický reaktor
- Dosahování kritičnosti

Multiplikační koeficient

$$k = \frac{n_k}{n_{k-1}}$$

- k , také koeficient násobení
- Poměr počtu neutronů dvou po sobě následujících generací
- Multiplikační koeficient pro nekonečné prostředí – zanedbán únik neutronů

$$k_{\infty} = \frac{n \cdot \eta \cdot \varepsilon \cdot p \cdot f}{n} = \eta \cdot \varepsilon \cdot p \cdot f$$

Multiplikační koeficient

$$k_{\infty} = \frac{n \cdot \eta \cdot \varepsilon \cdot p \cdot f}{n} = \eta \cdot \varepsilon \cdot p \cdot f$$

η - regenerační činitel

ε – multiplikační činitel rychlých neutronů

p – pravděpodobnost úniku (rezonanční záchyt)

f – činitel využití tepelných neutronů

Multiplikační koeficient

η - regenerační činitel

$$\eta = \nu \frac{\Sigma_f}{\Sigma_a}$$

ν – počet uvolněných neutronů štěpením na každé rozštěpené jádro

Σ – *makroskopický účinný průřez pro štěpení f resp. záchyt a*

ε – multiplikační činitel rychlých neutronů

- Poměr středního počtu rychlých neutronů, uvolněných při štěpení účinkem neutronů všech energií v nekonečném prostředí, ke střednímu počtu neutronů uvolněných při štěpení pouze účinkem tepelných neutronů*

Multiplikační koeficient

p – pravděpodobnost úniku (rezonanční záchyt)

- Poměr počtu rychlých neutronů, které při zpomalování nevyly zachyceny, k celkovému počtu rychlých neutronů

f – činitel využití tepelných neutronů

- Poměr tepelných neutronů zachycených uranem v nekonečném prostředí k celkovému počtu zachycených tepelných neutronů v palive

$$f = \frac{\Sigma_a U}{\Sigma_a}$$

Reaktivita

$$\rho = \frac{k_{eff} - 1}{k_{eff}}$$

- vyjadřuje relativní odchylku efektivního multiplikačního koeficientu k_{eff} od 1-ty
- Často se užívá místo multiplikačního koeficientu
- Platí že
 - Jeli $\rho < 0$, je reaktor podkritický
 - Jeli $\rho = 0$, je reaktor kritický
 - Jeli $\rho > 0$, je reaktor nadkritický

Perioda reaktoru

- Čas za který se výkon reaktoru změní e-krát

$$n = n_0 e^{\frac{(k_{eff}-1) \cdot t}{l}}$$

$$\frac{k_{eff}-1}{l} \cdot T = 1 \rightarrow T = \frac{l}{k_{eff}-1}$$

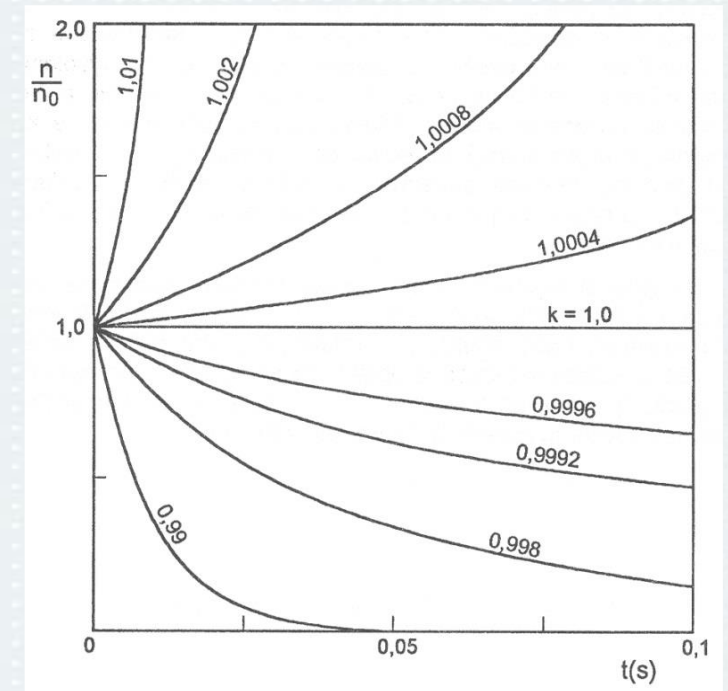
- l – doba života jedné neutronové generace

Zpožděné neutrony

- Změna výkonu reaktoru v závislosti na čase

$$P = P_0 e^{\frac{\rho}{\rho - 1} \cdot \frac{t}{l}} = P_0 e^{\frac{k_{eff} - 1}{1} \cdot \frac{t}{l}}$$

- l střední doba života neutronů je v řadu maximálně 10^{-4} s
- Tato rovnice platí pouze když v reaktoru jsou přítomny pouze tzv. okamžité neutrony
- Okamžité neutrony vznikají okamžitě při reakci v důsledku štěpení



Zpožděné neutrony

- V reaktoru existuje malá část tzv. zpožděných neutronů
- Vznikají rozpadem štěpných produktů
- Od okamžitých se významně liší střední dobou života
- Jejich podíl se označuje β a tvoří asi 0,7 % všech neutronů
- Mají zásadní význam pro řízení reaktoru
- Tato malá část zpožděných neutronů prodlužuje celkovou střední dobu života všech neutronů a tak činí řetězovou štěpnou reakci kontrolovatelnou

Zpožděné neutrony

- Zpožděné neutrony se dělí do šesti skupin (někdy jedné, dvou, osmi) dle rozpadové konstanty jádra atomu, ze kterého vznikly.
- Pro ^{235}U platí, že střední doba života zpožděného neutronu ($1/\lambda$) se pohybuje v řádu 0.258 - 78.8 s.
- Zpožděné neutrony tedy významně prodlužují střední dobu života neutronů, a tím umožňují regulaci reaktoru.

U^{235}			
Group	Decay constant λ_i (sec^{-1})	Yield (neutrons per fission)	Fraction β_i
1	0.0124	0.00052	0.000215
2	0.0305	0.00346	0.001424
3	0.111	0.00310	0.001274
4	0.301	0.00624	0.002568
5	1.14	0.00182	0.000748
6	3.01	0.00066	0.000273
Total yield: 0.0158			
Total delayed fraction (β):			0.0065
Pu^{239}			
Group	Decay constant λ_i (sec^{-1})	Yield (neutrons per fission)	Fraction β_i
1	0.0128	0.00021	0.000073
2	0.0301	0.00182	0.000626
3	0.124	0.00129	0.000443
4	0.325	0.00199	0.000685
5	1.12	0.00052	0.000181
6	2.69	0.00027	0.000092
Total yield: 0.0061			
Total delayed fraction (β):			0.0021
U^{233}			
Group	Decay constant λ_i (sec^{-1})	Yield (neutrons per fission)	Fraction β_i
1	0.0126	0.00057	0.000224
2	0.0337	0.00197	0.000777
3	0.139	0.00166	0.000655
4	0.325	0.00184	0.000723
5	1.13	0.00034	0.000133
6	2.50	0.00022	0.000088
Total yield: 0.0066			
Total delayed fraction (β):			0.0026

Zpožděné neutrony

- Základní podmínkou bezpečného řízení reaktoru je: $\rho < \beta$
- Nesplnění této podmínky vede k tomu, že reaktor je kritický na okamžitých neutronech, nepotřebuje ke svému provozu zpožděné neutrony, řídí se podle střední doby života okamžitých neutronů a vymyká se kontrole!
- Reaktory tedy vlastně provozujeme jako podkritické s proměnným a závislým externím zdrojem neutronů v podobě zpožděných neutronů.
 - Okamžité (99.3%, $\ell \sim 10^{-5}\text{s}$, $E \sim 2\text{ MeV}$),
 - Zpožděné (0.7%, $\ell \sim$ do desítek vteřin, $E \sim 500\text{ keV}$).

Koeficienty reaktivity

- Kromě jiných mají vliv na reaktivitu mají také teploty a tlaky chladiva a paliva
- Parciální derivace reaktivity v závislosti na daném parametru
 - Koeficient reaktivity od teploty chladiva $\delta\rho/\delta T_m$
 - Výkonový koeficient reaktivity $\delta\rho/\delta N$
 - Tlakový koeficient reaktivity $\delta\rho/\delta p$
 - Koeficient reaktivity kyseliny borité $\delta\rho/\delta c_B$
- Jejich vlivy na reaktivitu zjednodušeně uvažujeme jako nezávislé:

$$\Delta\rho = \sum_{k=0}^n \frac{\delta\rho}{\delta x_k} \Delta x_k$$

Koeficient reaktivity od teploty chladiva

$\delta\rho/\delta T_m$

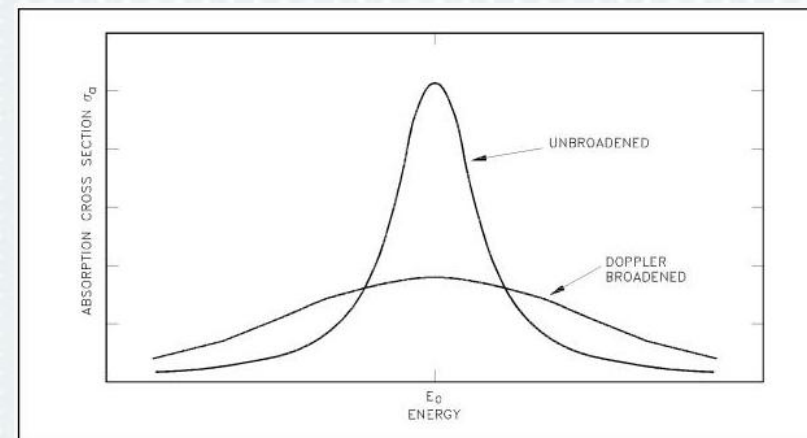
- Zvýšení teploty chladiva má za následek:
 - Zmenšení hustoty molekul H_2O v jednotce objemu -> snížení počtu srážek (-)
 - Vyšší rychlost neutronů i jader -> snížení pravděpodobnosti jejich srážek (-)
 - Snížení počtu atomů absorbátoru v chladivu -> nižší záchyt neutronů (+)

(*Vliv jednotlivých jevů na reaktivitu je zobrazen znaménkem +/-)
- Součet výše uvedených jevů je téměř vždy záporný, kromě podmínek, kdy je reaktor na nulovém výkonu a je právě spouštěn po výměně paliva. Stavům s kladným efektem je potřeba se vyhnout.

Výkonový koeficient reaktivity $\delta\rho/\delta N$

- Tento koeficient je odvislý od přítomnosti rezonanční oblasti ^{238}U (někdy je uváděn jako teplotní koeficient paliva)
- Rezonance podléhají při vyšších teplotách paliva Dopplerově efektu, tj. rezonance se „zplošťují“ a efektivněji absorbují neutrony
- Za vyšších teplot absorpce neutronů na těchto rezonancích významně roste (-)

$$\sigma = \sigma_0 \left(\frac{T_0}{T} \right)^n$$



Tlakový koeficient reaktivity $\delta\rho/\delta p$

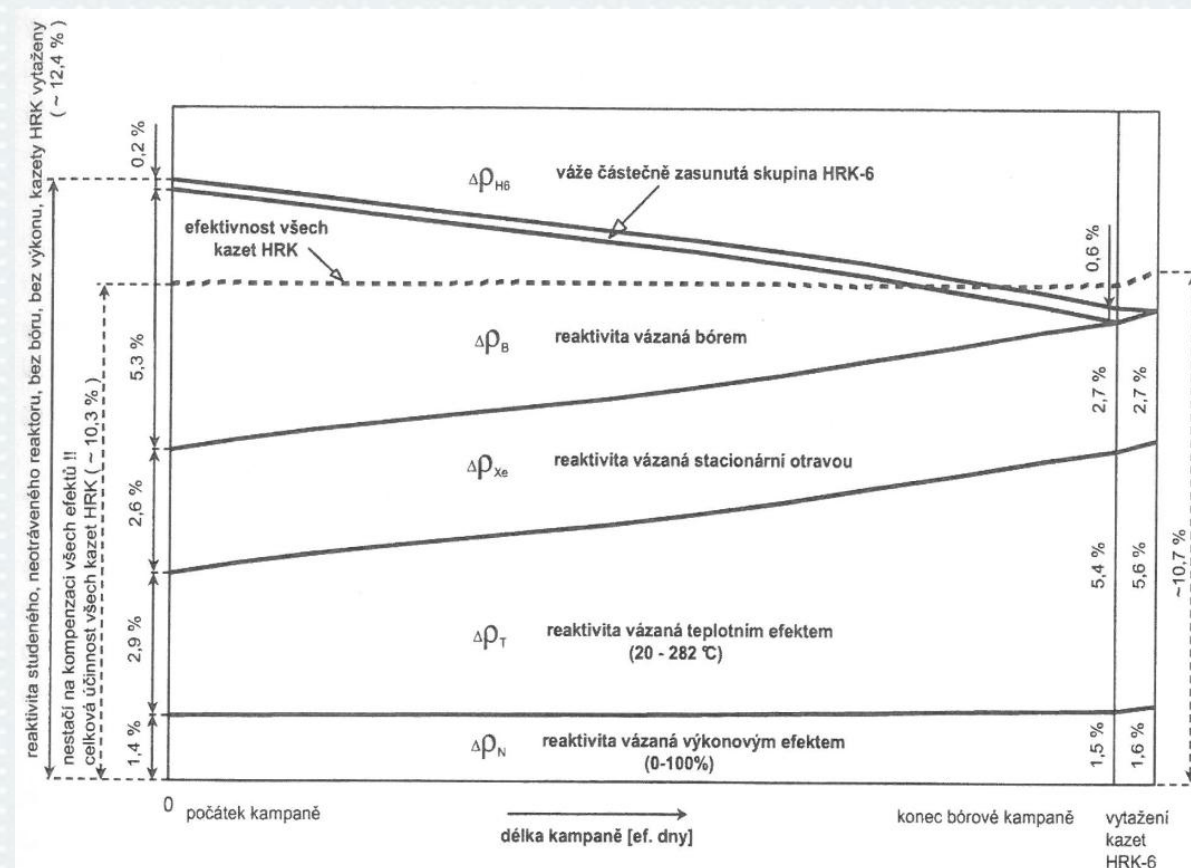
- Tento koeficient je kladný, ale velmi malý (+). Může být ovšem i záporný (reaktor na nul. výkonu, velká koncentrace bóru).
- Působí opačně jako teplotní koeficient moderátoru, tj. se zvýšením tlaku moderátoru roste hustota počtu molekul H_2O ...

Koeficient reaktivity kyseliny borité $\delta\rho/\delta c_B$

- Je odvozen od regulace pomocí bóru rozpuštěného v moderátoru.
- Se zvyšující se koncentrací bóru reaktivita klesá (-)
- Při vysoké koncentraci bóru (při hodnotách nad $8 \text{ gH}_3\text{BO}_3/\text{kgH}_2\text{O}$) může teplotní koeficient způsobit, že počet jader bóru klesne a tím dosáhneme kladného teplotního koeficientu! – nutno kompenzovat vyhořívajícími absorbátory!

Efekty reaktivity

- Změna reaktivity od koeficientu reaktivity se nazývá *efekt reaktivity*

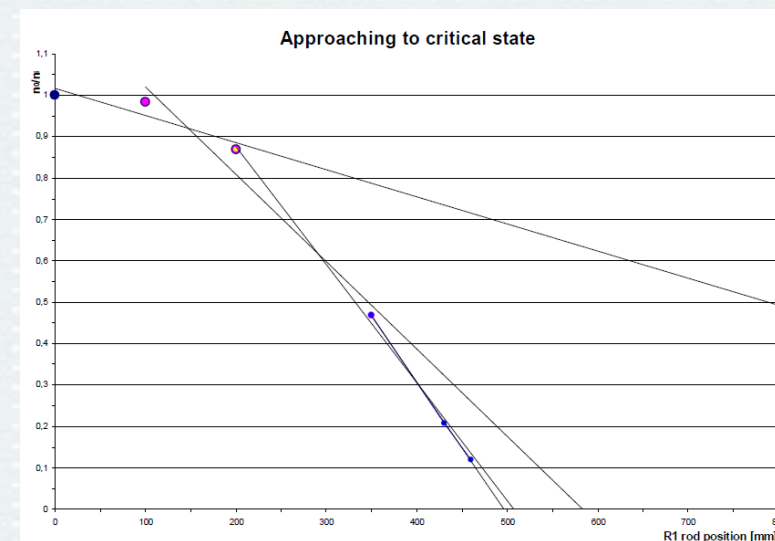


Podkritický reaktor

- Zdroj neutronů v podkritickém reaktoru
 - Neutrony z rozpadu štěpných produktů
 - Vznik neutronu při interakci s gama zářením – fotoneutrony
 - Kosmické záření a jeho interakce s jádry
 - Transurany vyhořené paliva
 - Spontánní štěpení uranu
- V podkritickém reaktoru – rozmnožování neutronů v podkritickém násobení, když je přítomen zdroj neutronů

Dosahování kritičnosti

- Pomocí metody inverzní četnosti
- Kromě závislosti od polohy regulačních orgánů, můžeme poměr N_0/N pozor v závislosti od množství paliva
- V elektrárně se dosahuje tzv. Minimální Kontrolovaný Výkon MKV – správně zvolit citlivost ionizačních komor pro kontrolování – vysoký práh citlivosti pro registraci, zároveň nízký kvůli zachytu kosmického záření a spontánního štěpení



Magisterský studijní program JADERNÁ ENERGETIKA vznikl za přispění



**Financováno
Evropskou unií**
NextGenerationEU



**NÁRODNÍ
PLÁN
OBNOVY**

MSMT
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

NPO_VUT_MSMT-16609_2022



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ



Financováno
Evropskou unií
NextGenerationEU



NÁRODNÍ
PLÁN
OBNOVY

MŠMT
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ



FAKULTA
CHEMICKÁ



FAKULTA
STAVEBNÍ



FAKULTA
STROJNÍHO
INŽENÝRSTVÍ

Přednáška magisterského studijního programu JADERNÁ ENERGETIKA

Provoz jaderných zařízení a simulátory reaktorových bloků a elektráren

Základní, abnormální a havarijní režimy v JE

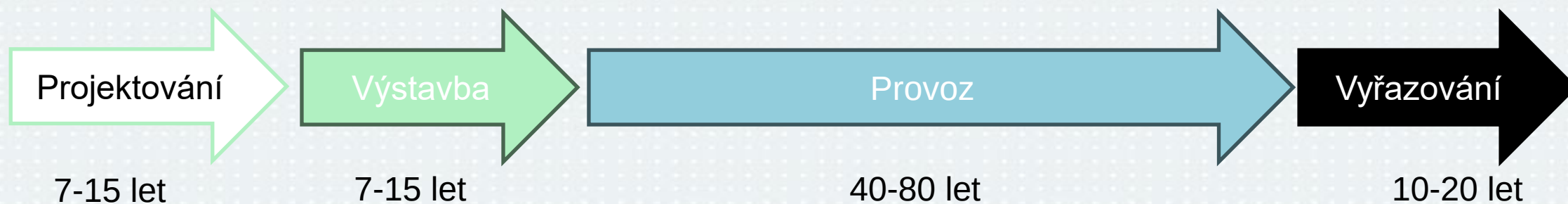
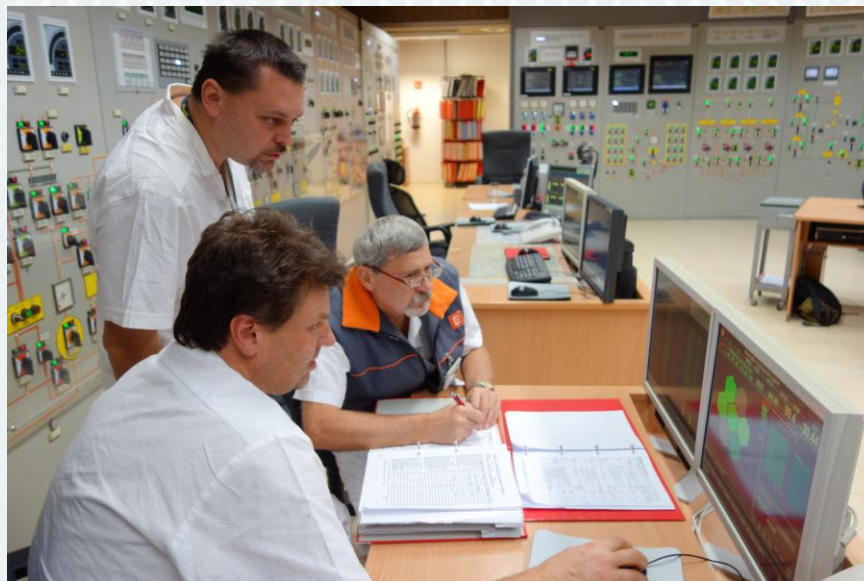
FEKT

Peter Mičian

Osnova

- Základní režimy
- Abnormální režimy
- Havarijní režimy

Životní cyklus JE



Provoz JE

- Definice: Jsou činnosti vykonávané v jaderném zařízení k dosažení účelu, ke kterému bylo jaderné zařízení vybudováno (definice podle atomového zákona)
- účel JE: výroba elektrické energie, příp. tepla zahrnuje činnosti v období od uvedení jaderného zařízení do provozu až po jeho konečné vyřazení z provozu včetně provozních odstavení, údržby, výměny paliva, zkoušek, prohlídek a pod.

Rozdělení stavů

Provoz

Normální provoz



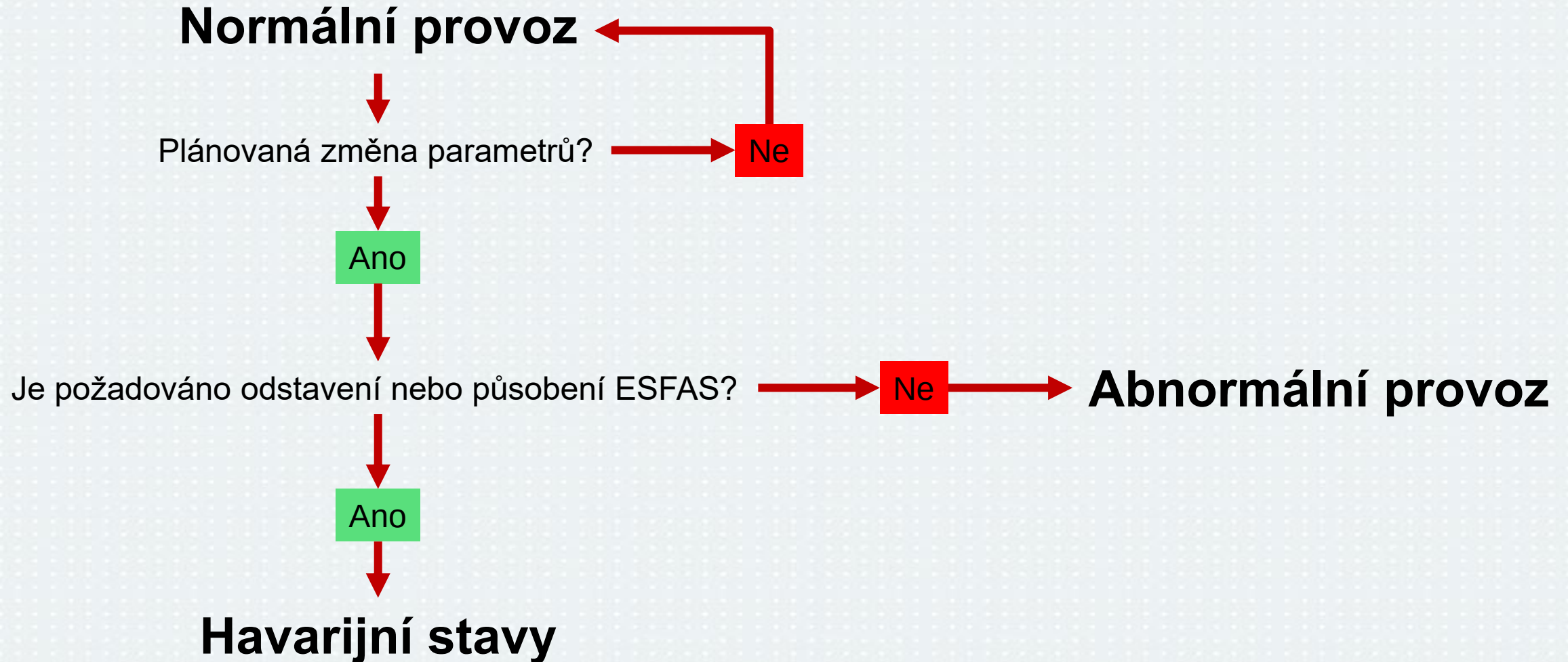
Abnormální provoz



Havárijní stavy



Diagram provozních stavů



Normální provoz

- provoz v rámci stanovených provozních Limit a Podmínek
- Limity a podmínky bezpečného provozu = dokument, který obsahuje přípustné hodnoty parametrů JZ a definuje jeho provozní režimy.

Abnormální provoz

- provozní stav odchyľující se od normálního provozu
- výskyt se předpokládá nejméně **jednou za životnost** zařízení
- s ohledem na odpovídající projektová opatření nezpůsobí významné poškození komponent důležitých pro jadernou bezpečnost ani nepovede k havarijním podmínkám.

Příklady:

- výpadky systémů I.O (1 ÷ 3 HCČ)
- výpadky systémů II.O (1 ÷ 3 ENČ / 1TG)
- kompenzovatelné úniky chladiva
- elektrické poruchy (zregulování pro vlastní spotřebu)

Abnormální provoz

- Nastává provozní událost
- Různá závažnost události – běžné odchylky až po stavy končící havárií
- Nutno **lokalizovat** událost pro vyloučení dalšího rozvoje a **stabilizace**

Havarijní stavy

- odchylky od normálního provozu
- závažnější než abnormální provoz
- zahrnující projektové havárie a havárie v podmínkách rozšířeného projektu (DBA + DEC)
- např. nekompenzovatelné úniky chladiva I.O LOCA, úplná ztráta napájení vlastní spotřeby SBO atd.)

V blokové dozorní se řídí podle předpisů pro nouzové stavy vždy po zapůsobení automatického odstavení nebo SIS/ESFAS.

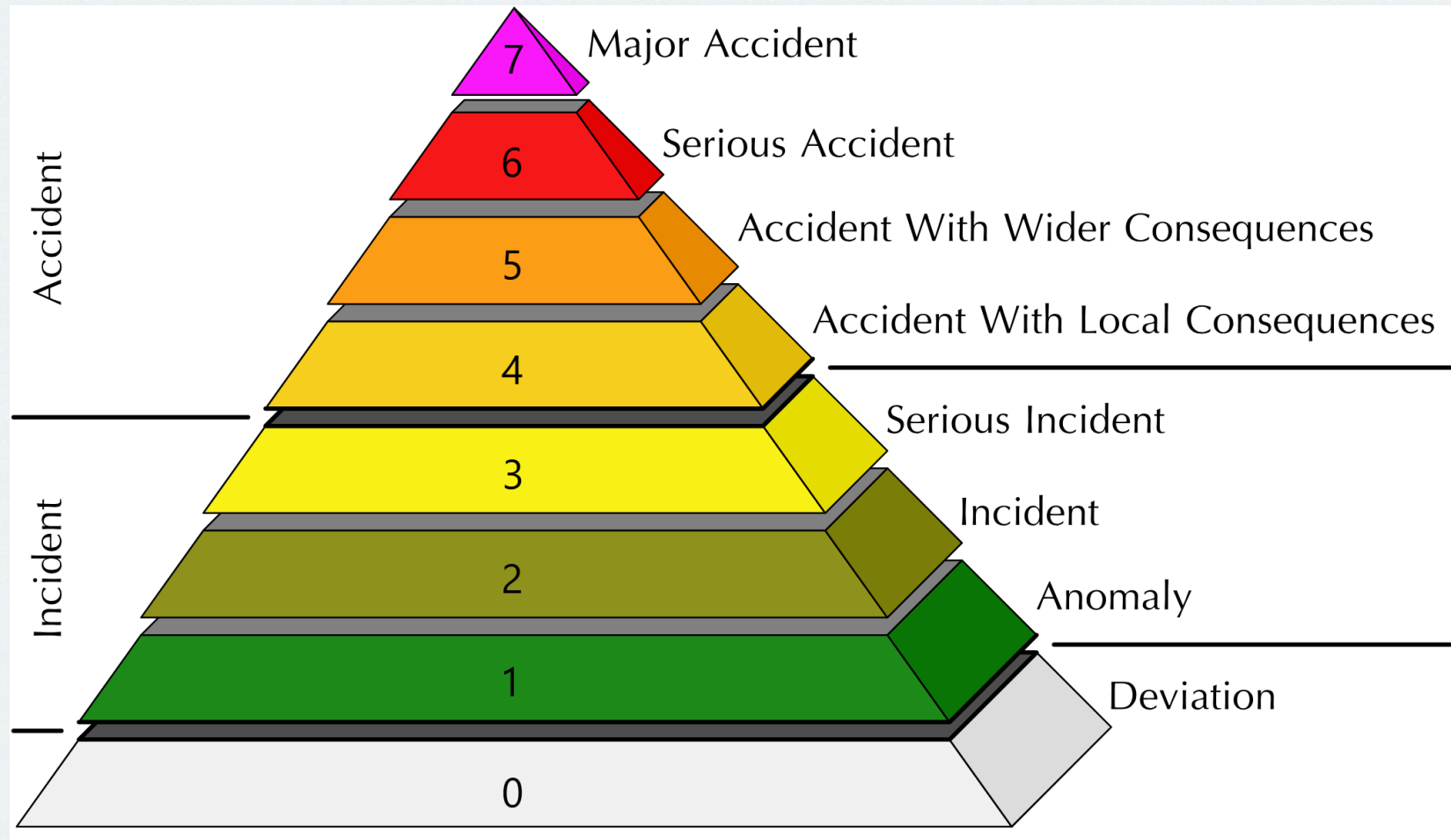
Havarijní stavy

Cíle obslužního personálu:

- zajistit celistvost bariér, které brání pronikání radioaktivních látek do okolí
- zajistit návrat bloku do bezpečného stavu (zajištěn dlouhodobý odvod zbytkového tepla z AZ reaktoru, je možné provést opravu zařízení)

Řešení má za cíl dovést reaktorový blok do stabilního a bezpečného stavu (bez požadavku na opětovný náběh bloku).

INES International Nuclear Event Scale



INES

1. Úroveň – Anomálie: Menší problémy s bezpečnostními bariérami; žádné významné riziko.
2. Úroveň – Incident: Ozáření nad limity pro pracovníky; menší šíření kontaminace.
3. Úroveň – Vážný incident: Závažná kontaminace v zařízení; nízká úroveň ozáření veřejnosti.

INES

4. Úroveň – Havárie s místními důsledky: Menší únik radiace mimo areál; významné poškození bezpečnostních bariér.
5. Úroveň – Havárie s širšími důsledky: Omezený únik radiace; ozáření veřejnosti v rámci bezpečnostních limitů.
6. Úroveň – Závažná havárie: Významný únik radioaktivního materiálu; nutná okamžitá ochranná opatření.
7. Úroveň – Velká havárie: Velkoplošný únik radiace s vážnými zdravotními a environmentálními důsledky (např. Černobyl, Fukušima).

INES příklady

- Úroveň 4: Požár v elektrárně Windscale (1957, Velká Británie).
- Úroveň 5: Havárie na Three Mile Island (1979, USA).
- Úroveň 7: Černobyl (1986, SSSR), Fukušima Daiči (2011, Japonsko).



Provozní režimy

	Režim	Nre [%Nnom]	T [°C]	kef
1	Provoz na výkonu	≥ 2	-	$\geq 0,99$
2	Dosahování kritického stavu a kritický stav	≤ 2	-	$\geq 0,99$
3	Horký stav	-	≥ 140	$< 0,99$
4	Polohorký stav	-	< 140 a $T_{tn} > T$ k.l.	$< 0,99$
5	Odstavení s dochlazováním	-	$T_{tn} < T$ k.l.	$< 0,99$
6	Odstavení s roztěsněním	-	-	$< 0,98$
7	Vyvezení paliva	-	-	-

Magisterský studijní program JADERNÁ ENERGETIKA vznikl za přispění



**Financováno
Evropskou unií**
NextGenerationEU



**NÁRODNÍ
PLÁN
OBNOVY**

MSMT
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

NPO_VUT_MSMT-16609_2022



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ



Financováno
Evropskou unií
NextGenerationEU



NÁRODNÍ
PLÁN
OBNOVY

MSMT
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ



FAKULTA
CHEMICKÁ



FAKULTA
STAVEBNÍ



FAKULTA
STROJNÍHO
INŽENÝRSTVÍ

Přednáška magisterského studijního programu JADERNÁ ENERGETIKA

Provoz jaderných zařízení a simulátory reaktorových bloků a elektráren

Průběh kampaně a regulace bloku

FEKT

Peter Mičian

Osnova

- Průběh kampaně
- Nominální provoz
- Regulace bloku

Průběh kampaně

- Zavážení čerstvého paliva do reaktoru
- Náběh bloku – zkoušky
- Provoz na ustáleném nominálním výkonu – vyhořívání paliva
- Na konci kampaně využívání výkonového a teplotního efektu
- Odstavení, dochlazení a roztěsnění reaktoru
- Výměna části paliva
- Předepsaná kontrola a údržba zařízení

Průběh kampaně

- Náčrt schématu a vysvětlení jednotlivých částí
- Podrobnější popis v přednášce Fyzikální a energetické spouštění reaktorového bloku, odstavování.

Ustálený provoz reaktorového bloku

- Ustálený provoz RB = provoz RB na ustálené výkonové hladine.
 1. Provoz RB na nominálním výkonu (N_{nom}) – provoz reaktoru na 100 % výkonu se všemi smyčkami primárního okruhu a turbogenerátorů bez omezení podle stavu zařízení a LaP
 2. Provoz RB na sníženém výkonu
 1. Vynuceno požadavkem elektrické sítě – primární, sekundární, terciární regulace
 2. Vynuceno stavem technologického zařízení (napr. Provoz s jedním TG u VVER 440)

Provoz na nominální výkonové hladině

Primární okruh (VVER 440)

- Výkon reaktora $N_R = 100 \% \pm 2 \% N_{\text{nom}}$
- Střední teplota primárního okruhu $T_{\text{POstr}} = 283 \text{ }^{\circ}\text{C}$
- Tlak primárního okruhu $p_{\text{PO}} = 12,26 \text{ MPa}$

Provoz na nominální výkonové hladině

Primární okruh (VVER 440)

- V provozu:
 - 6 cirkulačních smyček (všechny HUA jsou naplno otevřené)
 - 6 HCČ společně s jejich pomocnými systémy
 - 6 parogenerátorů, parný výkon jednoho PG je 470 až 490 t/h
- V provozu jsou pomocné systémy primárního okruhu
- Všechny havarijní systémy musí být provozuschopné, v stavu pohotovosti

Provoz na nominální výkonové hladině

Primární okruh (VVER 440)

- Náčrt schématu primárního okruhu a zobrazení všech výše uvedených parametrů v schématu

Provoz na nominální výkonové hladině

Sekundární okruh (VVER 440)

- Hlavní regulátory bloku udržují tlak v hlavním parním kolektoru (HPK) na hodnotě 4,5 MPa
- Výkon TG je v rozmezí 235÷253 MW – regulovaný pomocí regulátoru TVER/EHS v režimu N

Provoz na nominální výkonové hladině

Sekundární okruh (VVER 440)

- V provozu:
 - Dva páry KČ, třetí dvojice je v rezervě
 - 5 NT ohříváčů
 - 2 napájecí nádrže (teplota vody v NN 164 °C)
 - 4 elektro napájecí čerpadla (ENČ), páté v rezervě
 - Oboje větve VT regenerace, teplota NV na vstupu do PG 222 °C
- Havarijní a super havarijní čerpadla (HNČ a SHNČ) jsou provozuschopné v pohotovosti

Provoz na nominální výkonové hladině

Sekundární okruh (VVER 440)

- Náčrt schématu sekundárního okruhu a zobrazení všech výše uvedených parametrů v schématu

Provoz na nominální výkonové hladině

- Provoz na nominální výkonové hladině NENÍ možné:
- Pokud RB se zúčastňuje na regulaci sítě
 - Se zapnutými korektorem frekvence (primární regulace)
 - Dálková regulace činného výkonu (sekundární regulace)
 - Administrativní řízení výkonu (terciální regulace)

Provoz na nominální výkonové hladině

- Při poruše
 - Poruchy zařízení PO (neúplný počet HCČ)
 - Poruchy zařízení SO (neúplný počet ENČ, KČ, porucha TG atd.)
 - Poruchy SKŘ (porucha v ovládaní kazet HRK apod.)
- Jestli takýto provoz není povolen v zmysle Limit a Podmínek (LaP) nebo Provozních Předpisů (PP)

Regulace bloku

- Okamžitá/rychlá/havarijní regulace bloku pomocí zasouvání nebo vysouvání **kazet HRK/klastrů**
 - Regulace s vnosem velké záporné reaktivity v řádu vteřin při pádu regulačních orgánu do aktivní zóny
 - Vnos nerovnoměrnosti neutronového toku do aktivní zóny



"File:RIAN archive 132603 Nuclear power reactor fuel assembly.jpg" by Ruslan Krivobok / Руслан Кривобок is licensed under [CC BY-SA 3.0](#). "File:RIAN archive 132602 Fuel assembly final inspection.jpg" by Ruslan Krivobok / Руслан Кривобок is licensed under [CC BY-SA 3.0](#).

Regulace bloku

- Překompenzace 6. skupiny HRK (VVER 440)

Ustálený stav: $N_R = \text{konšt.}$, $\rho = 0$

Vyhořívání paliva – vnos záporné reaktivity

Vytahování 6. skupiny HRK – vnos kladné reaktivity

Regulace bloku

- Polohy skupin HRK 1-5 při nominálním provozu jsou v horní koncový poloze
- 6. skupina HRK se pohybuje v dovolené oblasti poloh

Překompenzace 6. skupiny HRK (VVER 440)

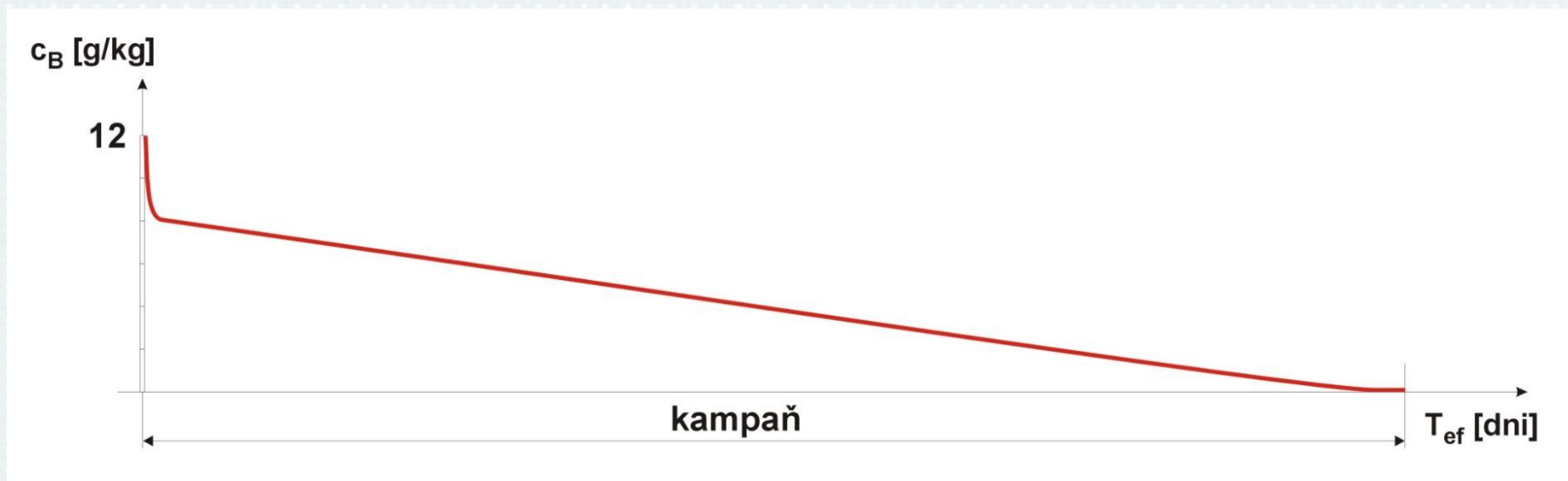
1. Reaktor pracuje na ustáleném výkonu ($N_R = \text{konst.}$, $\rho = 0$)
 - Palivo vyhořívá ($-\rho$)
 - 6. skupina HRK se vytahuje ($+\rho$)
 - $c_B = \text{konst.}$
2. Jestli 6. skupina dosáhne maximální horní povolenou polohu, nastává překompenzace
 - $N_R = \text{konst.}$
 - Čistý kondenzát do primárního okruhu = snížení koncentrace kys. boritej ($+\rho$)
 - 6. skupina HRK se zasouvá ($-\rho$)
3. Po dosažení dolní povolené polohy, tak se postup opakuje

Regulace bloku

- Pomalá regulace bloku pomocí změny **koncentrace kyseliny borité** H_3BO_3
 - Pomalejší změna reaktivity oproti změně polohy regulačních orgánů
 - Rovnoměrné působení na neutronový tok do v aktivní zóně
 - Při regulaci vznikají kapalné radioaktivní odpady
 - Vplyv na chemii primárního okruhu
 - Zabezpečení hluboké podkritičnosti při výměně paliva

Regulace bloku

- Změna koncentrace H_3BO_3 v primárním okruhu v průběhu kampaně



Magisterský studijní program JADERNÁ ENERGETIKA vznikl za přispění



**Financováno
Evropskou unií**
NextGenerationEU



**NÁRODNÍ
PLÁN
OBNOVY**

MSMT
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

NPO_VUT_MSMT-16609_2022



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ



Financováno
Evropskou unií
NextGenerationEU



NÁRODNÍ
PLÁN
OBNOVY

MŠMT
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ



FAKULTA
CHEMICKÁ



FAKULTA
STAVEBNÍ



FAKULTA
STROJNÍHO
INŽENÝRSTVÍ

Přednáška magisterského studijního programu JADERNÁ ENERGETIKA

Provoz jaderných zařízení a simulátory reaktorových bloků a elektráren

Fyzikální a energetické spouštění reaktorového bloku, odstavování

FEKT

Peter Mičian

Osnova

- Fáze odstavování reaktorového bloku
- Přirozená cirkulace
- Výměna paliva
- Spouštění reaktorového bloku (Fyzikální a Energetické)

Plynulé odstavení reaktorového bloku

- Normální / plynulé odstavení RB – odstavení bloku bez činnosti automatických ochran
- Plynule odstavení
 - Bez vychlazením RB (R2, R3)
 - S vychlazením RB (R4, R5)
 - S roztěsněním primárního okruhu (R6, R7)

Plynulé odstavení reaktorového bloku

- Provozní režimy

	Režim	Nre [%Nnom]	T [°C]	kef
1	Provoz na výkonu	≥ 2	-	$\geq 0,99$
2	Dosahování kritického stavu a kritický stav	≤ 2	-	$\geq 0,99$
3	Horký stav	-	≥ 140	$< 0,99$
4	Polohorký stav	-	< 140 a $T_{tn} > T$ k.l.	$< 0,99$
5	Odstavení s dochlazováním	-	$T_{tn} < T$ k.l.	$< 0,99$
6	Odstavení s roztěsněním	-	-	$< 0,98$
7	Vyvezení paliva	-	-	-

Plynulé odstavení reaktorového bloku

- Odstavení RB s vychlazením primárního okruhu se vykonává v etapách
 1. **Snižování elektrického výkonu** – odstavení TG
 2. Vytvoření **odstavné koncentrace kyseliny** borité v primárním okruhu – odstavení reaktoru
 3. **Vychlazení** primárního okruhu – v parovodním režime a dochlazení ve vodo-vodním režime

Plynulé odstavení reaktorového bloku

1. Snižování elektrického výkonu bloku

- Plánované změny výkonu se uskutečňují pomocí sekundárního okruhu – změna výkonu reaktoru je vyvolána změnou výkonu TG – hlavní parametr je tlak v HPK (vazba mezi N_{TG} a N_R)
- Plánované snižování výkonu je provedeno pomocí automatik – spolupráce hlavních regulátorů bloku (reaktora a TG)
- Trend snižování výkonu závisí na type reaktoru (VVER 440 – $0,5\% N_{nom}/min$ po dobu 20 minut s následnou 10ti minutovou stabilizací – opakující se cyklus

Plynulé odstavení reaktorového bloku

2. Dosažení odstavné koncentrace H_3BO_3

- Zabezpečit dostatečnou rezervu podkritičnosti aby nedošlo k nekontrolované štěpné řetězové reakci
- Pro VVER 440 je odstavní koncentrace 12 g H_3BO_3 /kg H_2O
 - Přidáváním roztoku 40 g H_3BO_3 /kg H_2O
- Odstavený reaktor je po dosažení odstavné koncentrace a všechny regulační orgány jsou na dolní koncové poloze

Plynulé odstavení reaktorového bloku

- Náčrt schémat tras pro bórový systém

Plynulé odstavení reaktorového bloku

3. Vychlazení primárního okruhu

- Pro VVER 440 teplota v primárním okruhu pod 57 °C dle LaP (15°C/h)
- Etapy:
 1. Paro – vodné dochlazování
 2. Vodo – vodné dochlazování
 3. Dlouhodobý odvod zbytkového tepla z aktivní zóny

Plynulé odstavení reaktorového bloku

3. Vychlazení primárního okruhu

- Náčrt schémat tras pro jednotlivé dochlazování
 - Paro – vodné: PG – HPK – RSD – TK – ZNK a NN – HNČ – PG
 - Vodo – vodné: PG – HPK – RSD – TK – DČ – PG
- Koneční stav odstaveného reaktoru
 - odstavná koncentrace H_3BO_3 v celém objemu primárního okruhu
 - Vychlazený a odtlakovaný primární okruh
 - Zajištěn odvod zbytkového tepla z aktivní zóny

Přirozená cirkulace

- V primárním okruhu funguje díky
 - Výškovému rozdílu mezi aktivní zónou a teplosměnné plochy PG
 - Různé měrné hmotnosti chladiva v závislosti na jeho teplotě
- Náčrt výškového uspořádání a schéma pro přirozenou cirkulaci mezi aktivní zónou a PAG doplněnou o výpočet vztlaku

Přirozená cirkulace

- Přirozenou cirkulaci u VVER 440 lze použít pro odvod tepla v různých provozních režimech R3 až R6, standardně se používá jenom v R6 (odstavení s roztesněním primárního okruhu)
- Nareušení přirozené cirkulace
 - Přerušení vodního sloupce
 - Neodnímáním tepla na sekundární straně PG

Výměna paliva

- Uskutečňuje se v režime R6, začíná a končí manipulací s palivem v aktivní zóně
- Parametry při výměně:
 - $N_R = 0 \% N_{nom}$ (bez Q_{ZV})
 - Střední teplota chladiva $T_{POstr} < 57\text{ }^{\circ}\text{C}$
 - Tlak $p_{PO} = \text{atmosferický}$
 - Odstavní koncentrace kyseliny borité
- Počas odstávky probíhají i generální opravy RB (typová každoročně a rozšířená každých 8 let)



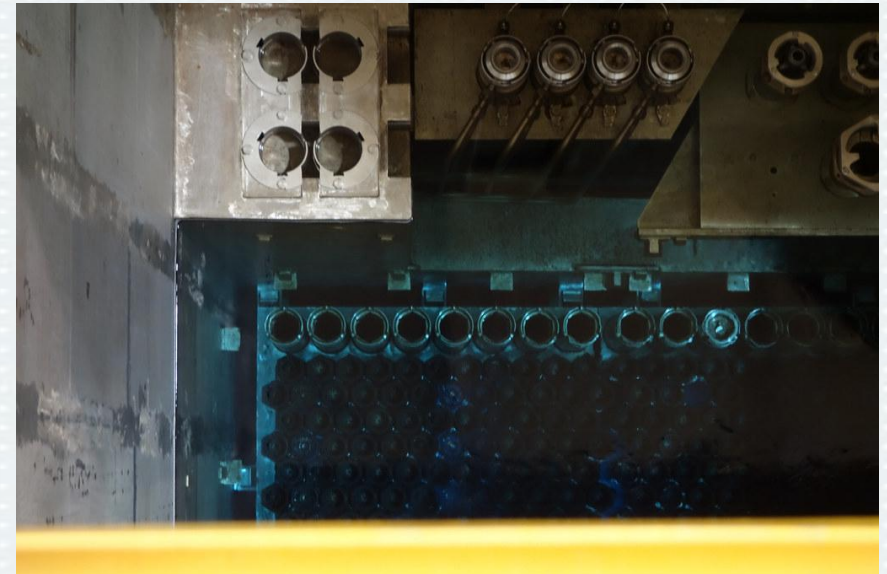
"Safeguards Inspectors Verification Training Exercise (03210024)" by IAEA Imagebank is licensed under CC BY-SA 2.0.

Výměna paliva

- Přípravné práce před výměnou paliva
 1. Zamezení vpádu cizích předmětů
 2. Demontáž částí reaktoru
 3. Zaplnění bazénu skladování a výměny odstavnou koncentrací kyseliny borité a propojení šachty a bazénu
- VVER 440 – minimálně 2 smyčky musí být provozuschopné (pracovní a rezerva) pro zabezpečení odvodu zbytkového tepla

Výměna paliva

- Vykonává se zavážecím strojem podle přesně schváleného programu pro výměnu paliva
- Použité palivo se ukládá do bazénu skladování vyhořelého jaderného paliva
- Při výměně paliva jsou kontrolovány:
 - Neutronový výkon
 - Odvod tepla (teplota chladiva)
 - Koncentrace kyseliny borité
 - ZAVCIP



"03210495" by IAEA Imagebank is licensed under [CC BY-SA 2.0](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/2.0/).

Příprava k náběhu reaktorového bloku

- Před náběhem je nutno prověřit a pro státní úřad dokladovat:
 - **Těsnost bariér**
 - I. Bariéra - pokrytí palivových článků (při výměny paliva)
 - II. Bariéra – tlakové rozhraní primárního okruhu (při náběhu)
 - III. Bariéry – hermetická zóna (před, při a po výměně paliva)
 - **Tlakové zkoušky primárního okruhu (VVER440 – pnom 12,25 MPa)**
 1. Doplnění, odvzdušnění primárního okruhu a kontrola těsnosti při tlaku 0,5 MPa
 2. Tlaková zkouška na $2,4 \pm 0,5$ MPa / 3,4 MPa
 3. Těsnostní zkouška na 13,7 MPa
 4. Pevnostní zkouška na 16,8 MPa

Příprava k náběhu reaktorového bloku

- **Zkoušky hermetických zón**
 - Na přetlak – těsnostní , pevnostn
 - Na podtla
- Zkoušky hermetické zóny se dělají
 - V etapě odstavování
 - V průběhu odstávky
 - V průběhu spoštění
- Netěsnost se hledají
 - Vizuálně
 - Sluchem
 - Mýdlovou vodou

Příprava k náběhu reaktorového bloku

- Náhřev primárního okruhu na parametry které umožňují dosažení kritického stavu
- LaP VVER 440 pro dosažení kritického stavu $T_{POstr} \geq 200 \text{ }^{\circ}\text{C}$
- Zdroj tepla v primárním okruhu:
 - Zbytkový výkon
 - Práce HCČ
 - Elektro ohříváky kompenzátoru objemu
- Maximální trend nárastu teploty T_{POstr} je **15 °C/hod**
- Se zvyšující teplotou primárního okruhu se zvyšuje i teplota v komenzátoru objemu a tlak

Dosahování kritického stavu

- **Kritický stav** reaktoru – nulová reaktivita aktivní zóny $\rho_{AZ} = 0$ ($k_{ef} = 1$, resp. $T = \infty$)
- Dosahování kritického stavu se uskutečňuje pod vedením VRB a kontrolou změnového inženýra
- Dosahování kritického stavu:
 - Snižováním **koncentrace** H_3BO_3 vodo výměnou – po výměně paliva
 - Vysouváním **regulačních orgánů** – po automatickém odstavení

Dosažení kritického stavu po výměně paliva

Snižováním koncentrace kyseliny borité H_3BO_3 vodo výměnou

- Vodo výměna – přiváděním čistého kondenzátu do primárního okruh

Postup

1. Vysouvání regulačních orgánů
2. Nasycování filtrů ŠOV-1
3. Snížování koncentrace H_3BO_3
4. Stabilizace reaktoru na kritickém stavu

Fyzikální a energetické spouštění

Fyzikální spouštění

- Cíl – experimentálně (praktické) ověření vypočtených hodnot neutronovo-fyzikálních charakteristik aktivní zóny pro danou zaviážku paliva
- Skládá se s jednotlivých experimentů (testů) –př. měření doby pádu regulačních orgánů

Energetické spouštění

- Postupné zvyšování výkonu RB – zkoušky na předepsaných výkonových hladinách –př. Zkoušky hlavních regulátorů bloku
- ES následuje po úspěšném FS

Fyzikální spouštění

Etapový program fyzikálního spouštění – stanovuje rozsah a posloupnost realizace testů

- Zavezení paliva do aktivní zóny
- Dosažení prvního kritického stavu
- Ověření neutronově-fyzikálních charakteristik AZ a vybraných bezpečnostních funkcí, které jsou závislé od neutronově-fyzikálních charakteristik

Testy se realizují na výkonové hladině do 2 % N_{nom}

Fyzikální spouštění

Dělí se na dvě podetapy:

1. Zavezení jaderného paliva do AZ jaderného reaktoru

- Kontrola připravenosti bloku a paliva k zavážení
- Zavážení a kontrola správnosti zavážení
- Montáž reaktorových částí a utěsnění
- Kontrola těsnosti při tlaku 0,5 MPa a 3,5 MPa
- Těsnostná zkouška při tlaku 13,7 MPa
- Tlaková pevnostní zkouška při tlaku 16,8 MPa
- Příprava zařízení bloku pro dosažení kritického stavu
- Ohřev chladiva primárního okruhu na $200 \div 205$ °C

Fyzikální spouštění

2. Testy fyzikálního spouštění

Doba realizace (EMO3)

- Vlastní zavážení paliva do reaktoru – 6 dnů
- Montáž, utěsnění a příprava k uvádění reaktoru do kritického stavu – 35 dnů
- Doba realizace zkoušek 2. podetapy FS – 12 dnů
- Celková doba FS 53 dnů. (Odhad EMO3)

Energetické spouštění

- Probíhá dle etapového programu ES a harmonogramu
- Etapy jsou dané výkonovými hladinami, kde se postupně realizují zkoušky
- Poslední dvě zkoušky Esrealizované na 100 % N_{nom} jsou:
 - Zkouška **průkazného 144 hodinového chodu**
 - Zkouška **ověření výkonu bloku** stabilizovaného na výkonové hladině

Energetické spouštění

- V průběhu **144 hodinového průkazného chodu** se nevykonávají činnosti za účelem odzkoušení zařízení a systémů, ale sleduje se spolehlivý a bezporuchový provoz celého bloku v souladu s projektovými požadavky
- V rámci **ověření výkonu bloku** se ověřují dosahované výkonové parametry bloku při nominálním zatížení

Zvyšování výkonu reaktorového bloku

Postup po výměně paliva (VVER 440)

1. Náběh reaktoru na kritický stav + FS
2. Příprava TG1 k náběhu, náběh na otáčky, zkoušky TG
3. Přifázování TG1 k síti a automatické zvyšování výkonu RB na $N_R = 53 \% N_{nom}$
4. Stabilizace parametrů RB na výkone
5. Přifázování TG2 a automatické zvýšení výkonu na 100 %

Operátor při zvyšování výkonu udržuje 6tou skupinu HRK v pracovní oblasti dávkováním čistého kondenzátu do primárního okruhu.

Magisterský studijní program JADERNÁ ENERGETIKA vznikl za přispění



**Financováno
Evropskou unií**
NextGenerationEU



**NÁRODNÍ
PLÁN
OBNOVY**

MSMT
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

NPO_VUT_MSMT-16609_2022



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ



Financováno
Evropskou unií
NextGenerationEU



NÁRODNÍ
PLÁN
OBNOVY

MŠMT
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ



FAKULTA
CHEMICKÁ



FAKULTA
STAVEBNÍ



FAKULTA
STROJNÍHO
INŽENÝRSTVÍ

Přednáška magisterského studijního programu JADERNÁ ENERGETIKA

Provoz jaderných zařízení a simulátory reaktorových bloků a elektráren

Zastruskování a otravy reaktoru, vliv xenonu a samaria na provoz

FEKT

Peter Mičian

Osnova

- Zastruskování
- Otravy reaktoru
- Xe otrava reaktoru
- Xe oscilace
- Sm otrava reaktoru

Zastruskování reaktoru

- Stabilné a dlouhodobě žijící štěpné produkty
- Dle velikosti mikroskopických účinných průřezů je možno rozdělit do tří skupin v porovnání s mikroskopickým účinným průřezem pro absorpci na izotopu uránu 235
 - $\sigma_i \gg \sigma_{a235}$ ^{89}Sr , ^{133}Cd , ^{149}Sm , ^{155}Eu , ^{157}Gd
 - $\sigma_i \sim \sigma_{a235}$ ^{83}Kr , ^{99}Tc , ^{103}Rh , ^{131}Xe , ^{143}Nd , ^{152}Sm
 - $\sigma_i < \sigma_{a235}$ ^{95}Mo , ^{133}Cs , ^{144}Nd , ^{139}La

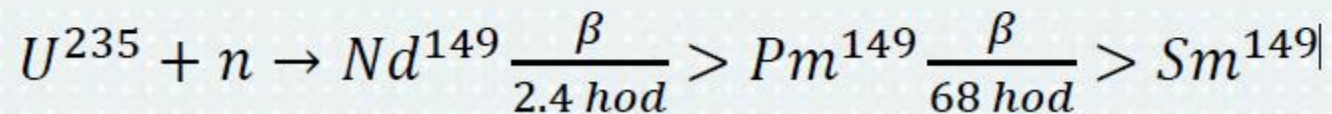
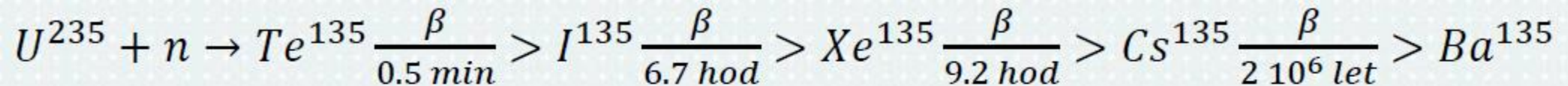
Zastruskování je poměr absorpce neutronů v troskách k absorpci na palivě.

Zastruskování reaktoru

- V závislosti od stupně vyhoření paliva může být struska absorbující neutrony
 - Silně
 - Průměrně
 - Slabo
- Pro určení zastruskování reaktoru je nutno znát procentuální výtěžky všech štěpných produktů a jejich účinné průřezy
- Ze sumární koncentrace trosek je možno určit vyhoření jaderného paliva.

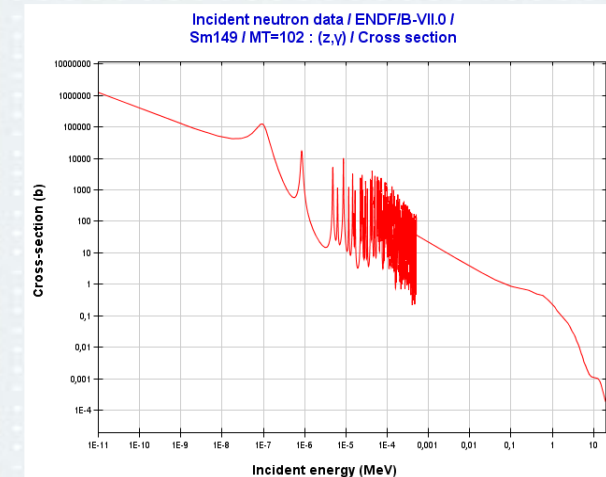
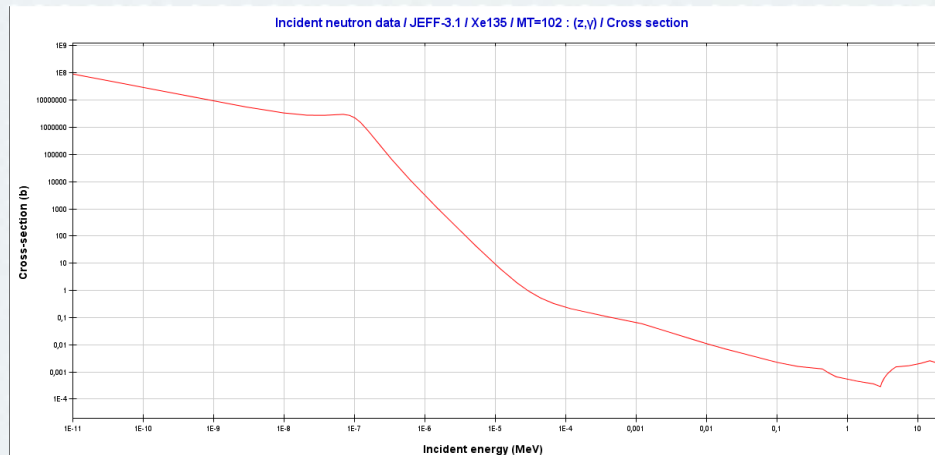
Otravy reaktoru

- Při štěpení uranového paliv vznikají různé izotopy štěpných produktů
- Tyto dále podléhají radioaktivní přeměně a dále interagují s neutrony čím mají vliv na provoz reaktoru
- Z hlediska provozu jsou obzvláště významné tyto reakce:



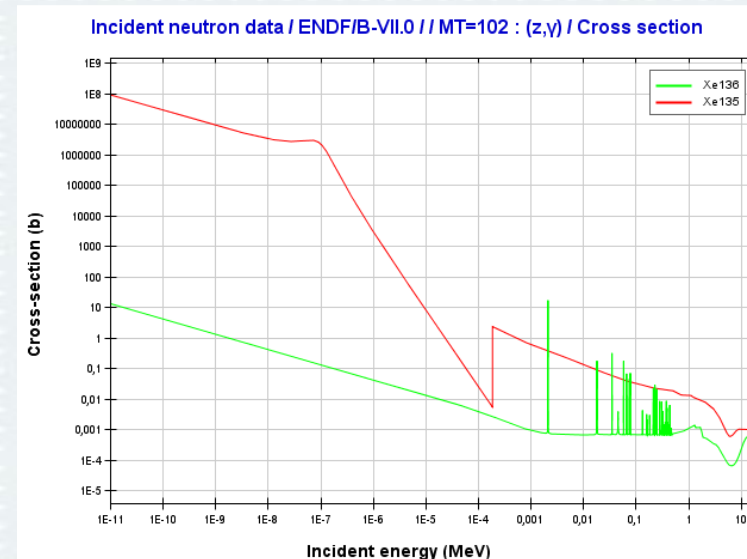
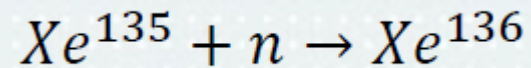
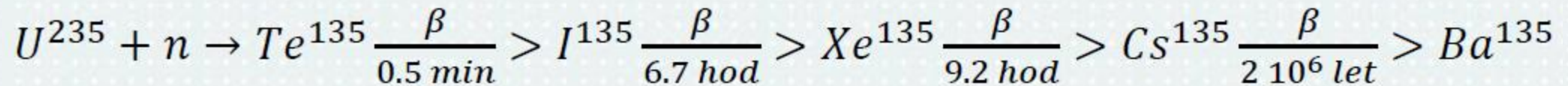
Otravy reaktoru

- Xe a Sm mají velký účinný průřez pro záchyt tepelných neutronů
- Xe je nestabilní a dále se radioaktivně proměňuje
- Sm je stabilní izotop
- Tyhle izotopy vedou k tzv. xenonové a samariové otravě reaktoru



Xe otrava reaktoru

- ^{135}Xe silně absorbuje neutrony a prochází přeměnou na stabilní ^{136}Xe s velmi malým účinným průřezem pro záchyt



Xe otrava reaktoru

- Vznik a zánik jader jódu a xenonu je možno vyjádřit:

$$\frac{dN_J}{dt} = \gamma_J \cdot \sigma_f \cdot N_u \cdot \Phi - \lambda_J \cdot N_J$$

(změna koncentrace = vznik ^{135}I – rozpad ^{135}I)

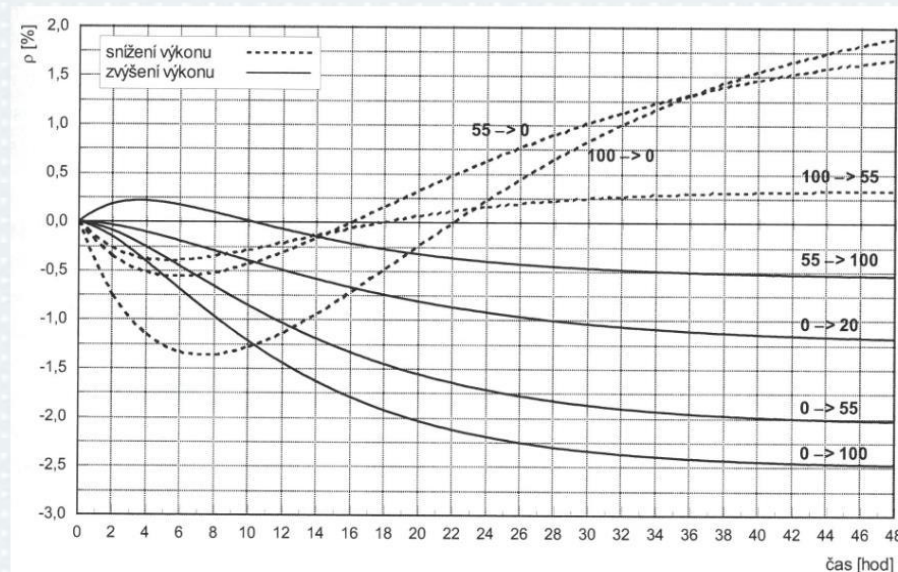
$$\frac{dN_{Xe}}{dt} = \gamma_{Xe} \cdot \sigma_f \cdot N_u \cdot \Phi + \lambda_J \cdot N_J - \lambda_{Xe} \cdot N_{Xe} - \sigma_{Xe} \cdot N_{Xe} \cdot \Phi$$

(změna koncentrace = vznik ^{135}Xe + rozpad ^{135}I - rozpad ^{135}Xe - zánik ^{135}Xe)

- | | |
|---------------------------|--|
| N_U, N_J, N_{Xe} | - koncentrace jader U^{235} , I^{135} a Xe^{135} v jednotce objemu [$1/\text{cm}^3$] |
| Y_J, Y_{Xe} | - výtěžek I^{135} , Xe^{135} , počet atomů vznikajících ze štěpení jádra U^{235} [-] |
| λ_J, λ_{Xe} | - rozpadová konstanta I, Xe |
| Φ | - neutronový tok [$1/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$] |
| σ_f | - mikroskopický účinný průřez štěpení atomu U^{235} [cm^2] |
| σ_{Xe} | - mikroskopický účinný průřez absorpci na atomu Xe^{135} [cm^2] |

Stacionární Xe otrava reaktoru

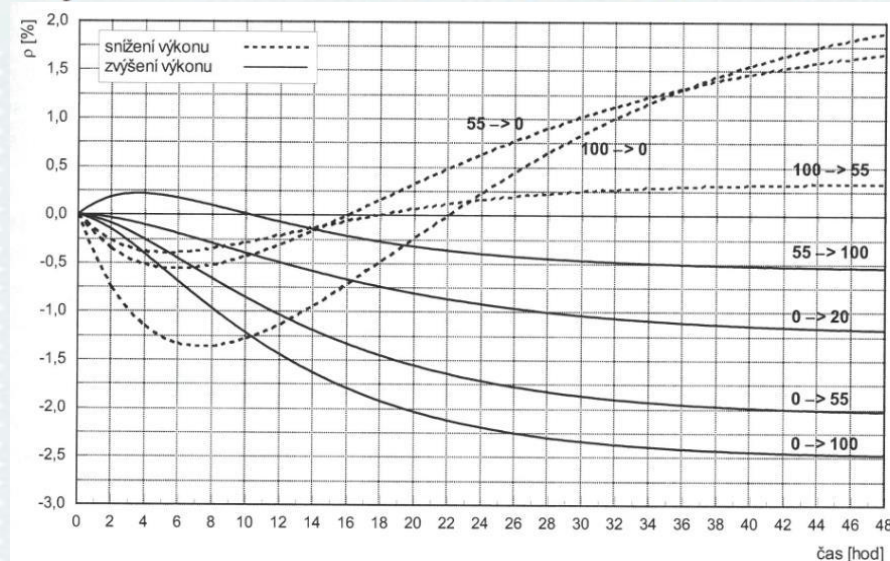
- Neotrávený reaktor, který je pomalu uváděn na 100 % nominálního výkonu:
 - Mnoha hodinový proces, při kterém se utváří stacionární otrava
 - Stacionární hodnota se ustálí na konstantní hodnotě



Nestacionární Xe otrava reaktoru

- Specifický případ je Jódová jáma
- Po snížení výkonu narůstá nestacionární otrava, která asi po 9 hodinách začíná klesat

$$\frac{dN_{Xe}}{dt} = \gamma_{Xe} \cdot \sigma_f \cdot N_u \cdot \Phi + \lambda_J \cdot N_J - \lambda_{Xe} \cdot N_{Xe} - \sigma_{Xe} \cdot N_{Xe} \cdot \Phi$$



Nestacionární Xe otrava reaktoru

- U některých typů reaktorů platí, že pokud je reaktor provozován na nízkém výkonu po delší dobu, jodová jáma může způsobit, že reaktor není možné po jistou dobu uvést na vyšší výkon
- Po rychlém odstavení reaktoru není možné uvést reaktor zpět na nominální výkon i přes vytažení regulačních tyčí – je nutno setrvat na dosaženém výkonu než Xe vyhoří

Xe oscilace

- Nestacionární otrava vyvolaná změnou polohy regulačních orgánů a tím pádem změnami v rozložení otravy – v radiálním či axiálním směru
- Radiální oscilace - vyvolány posunem některé regulační tyče - reaktory VVER jsou v tomto ohledu stabilní
- Axiální oscilace – vyvolány změnou polohy skupin regulačních orgánů – projevuje se v rozdílu výkonu mezi horní a dolní částí aktivní zóny
- Celkový výkon zůstává stejný

Xe oscilace

- Reaktoru musí být dostatečně velký
- Zvlášť problematický je reaktor RBMK
- AZ VVER 440 je krátká, u VVER 1000 je potenciál pro vznik

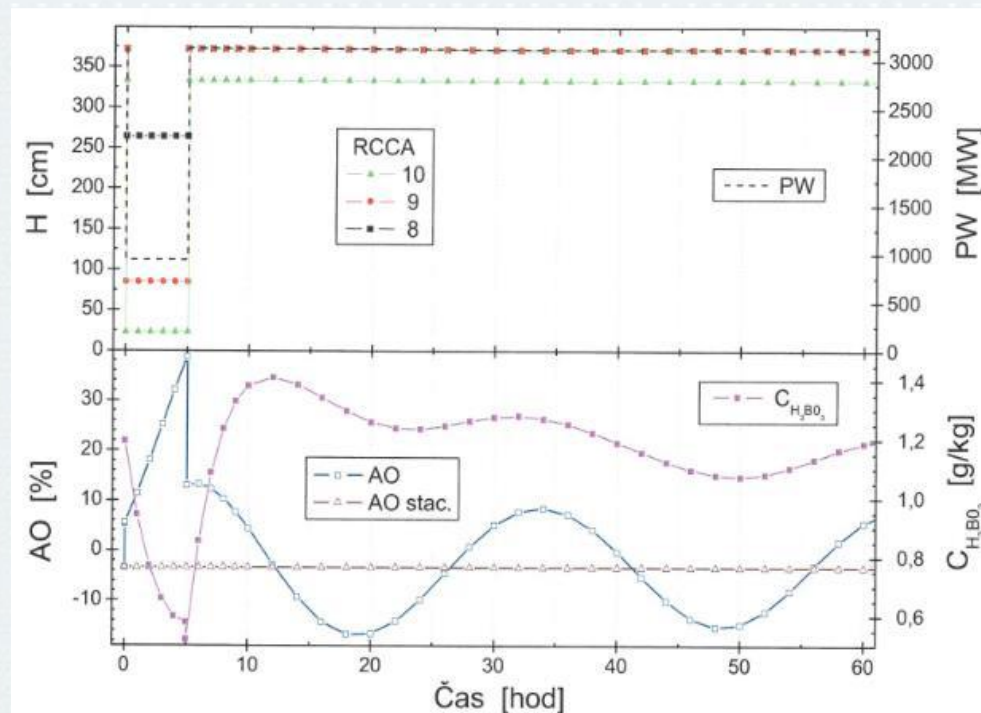
Xe oscilace

- Axiální offset
- Hypotetický případ

$$AO = (N_T - N_B) / (N_T + N_B),$$

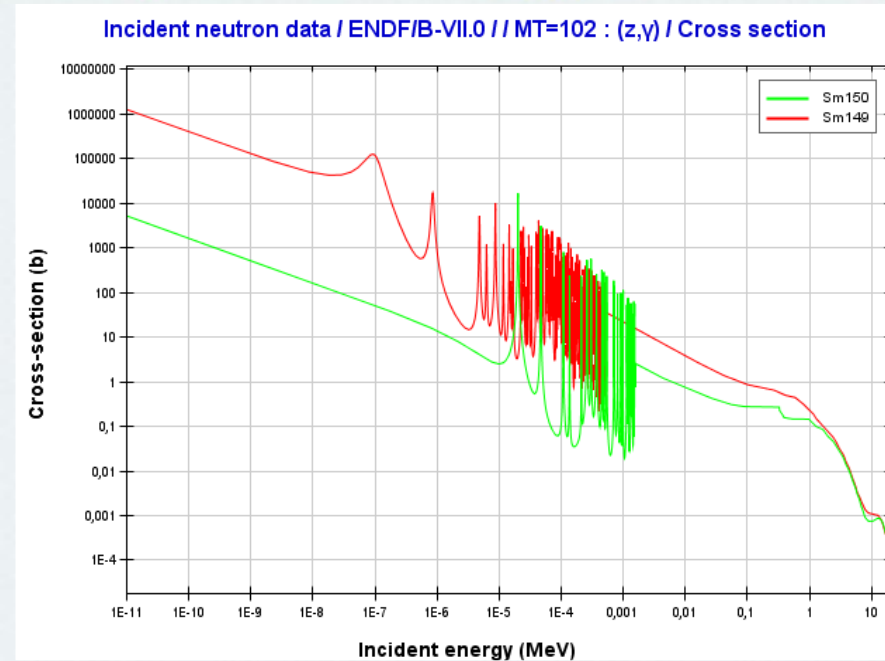
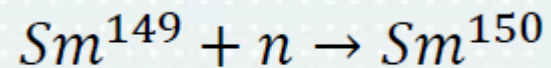
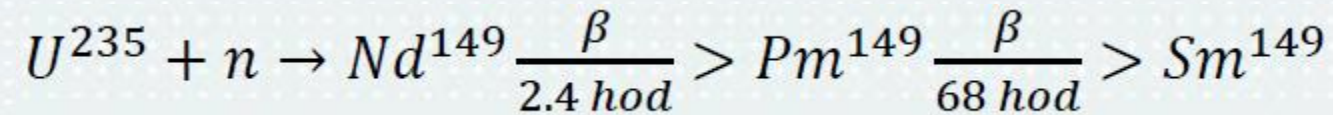
N_T - výkon horní („top“) poloviny aktivní zóny,

N_B - výkon dolní („bottom“) poloviny aktivní zóny.



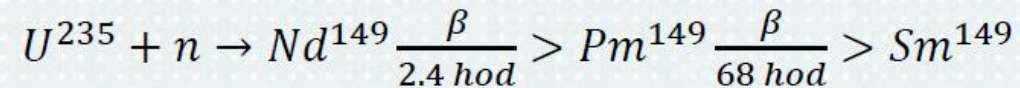
Sm otrava reaktoru

- Stejně jako ^{135}Xe , ^{149}Sm silně absorbuje neutrony a prochází přeměnou na stabilní ^{150}Sm . Je ale sám stabilní.



Sm otrava reaktoru

- Vznik a zánik jader samária a xenonu je možno vyjádřit:



$$\frac{dN_{Pm}}{dt} = \gamma_{Pm} \cdot \sigma_f \cdot N_u \cdot \Phi - \lambda_{Pm} \cdot N_{Pm}$$

$$\frac{dN_{Sm}}{dt} = \lambda_{Pm} \cdot N_{Pm} - \sigma_{Sm} \cdot N_{Sm} \cdot \Phi$$

N_U, N_{Pm}, N_{Sm} - koncentrace jader U^{235} , Pm^{149} a Sm^{149} v jednotce objemu [$1/\text{cm}^3$]

γ_{Pm} - výtěžek Pm^{149} , počet atomů vznikajících ze štěpení jádra U^{235} [-]

λ_{Pm} - rozpadová konstanta Pm^{149}

Φ - neutronový tok [$1/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$]

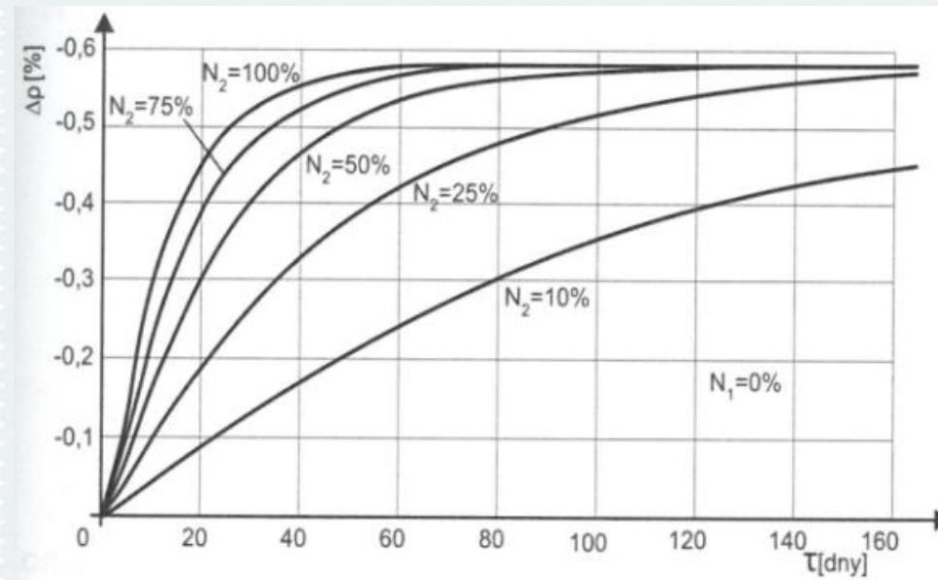
σ_f - mikroskopický účinný průřez štěpení atomu U^{235} [cm^2]

σ_{Sm} - mikroskopický účinný průřez absorpci na atomu Sm^{149} [cm^2]

Není zde závislost na neutronovém toku.

Sm otrava reaktoru

- Ustálení Sm otravy trvá cca 30 dní na nominálním výkonu
- Orpoti Xe otravě doprovází Sm otravu nižší záporná reaktivita
- U dlouhodobě odstaveného reaktoru je záporná vložená reaktivita asi 2x větší v důsledku prométeové jámy



Sm otrava reaktoru

- Sm vyhoří po najetí na výkon rychleji než Xe, ale xenonové procesy jsou rychlejší (v řádu hodin), jelikož xenonová otrava mizí v řádech hodin, ale samariová otrava trvá v řádech dnů a narůstá.
- Problematická je po odstávce, kdy máme při novém najíždění více Sm než při odstavování

Magisterský studijní program JADERNÁ ENERGETIKA vznikl za přispění



**Financováno
Evropskou unií**
NextGenerationEU



**NÁRODNÍ
PLÁN
OBNOVY**

MSMT
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

NPO_VUT_MSMT-16609_2022



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ



Financováno
Evropskou unií
NextGenerationEU



NÁRODNÍ
PLÁN
OBNOVY

MSMT
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ



FAKULTA
CHEMICKÁ



FAKULTA
STAVEBNÍ



FAKULTA
STROJNÍHO
INŽENÝRSTVÍ

Přednáška magisterského studijního programu JADERNÁ ENERGETIKA

Provoz jaderných zařízení a simulátory reaktorových bloků a elektráren

Bezpečnostní a havarijní systémy

FEKT

Peter Mičian

Osnova

- ESFAS
- ECCS
 - Aktivní
 - Pasivní
- Snižování tlaku v kontejmentu
- Barbotážní věž
- Core catcher
- In-vessel melt retention

Bezpečnostní systémy

- JE projektována v souladu s národními i mezinárodními předpisy pro zajištění obecná bezpečnostní kritéria
- 3 základní obecná bezpečnostní kritéria
 1. Bezpečně odstavit reaktor a udržet jej v bezpečném odstavení (kontrola reaktivity)
 2. Odvádět zbytkové teplo z AZ (havarijní chlazení AZ)
 3. Omezit únik radioaktivních látek (kontrola radioaktivního materiálu)

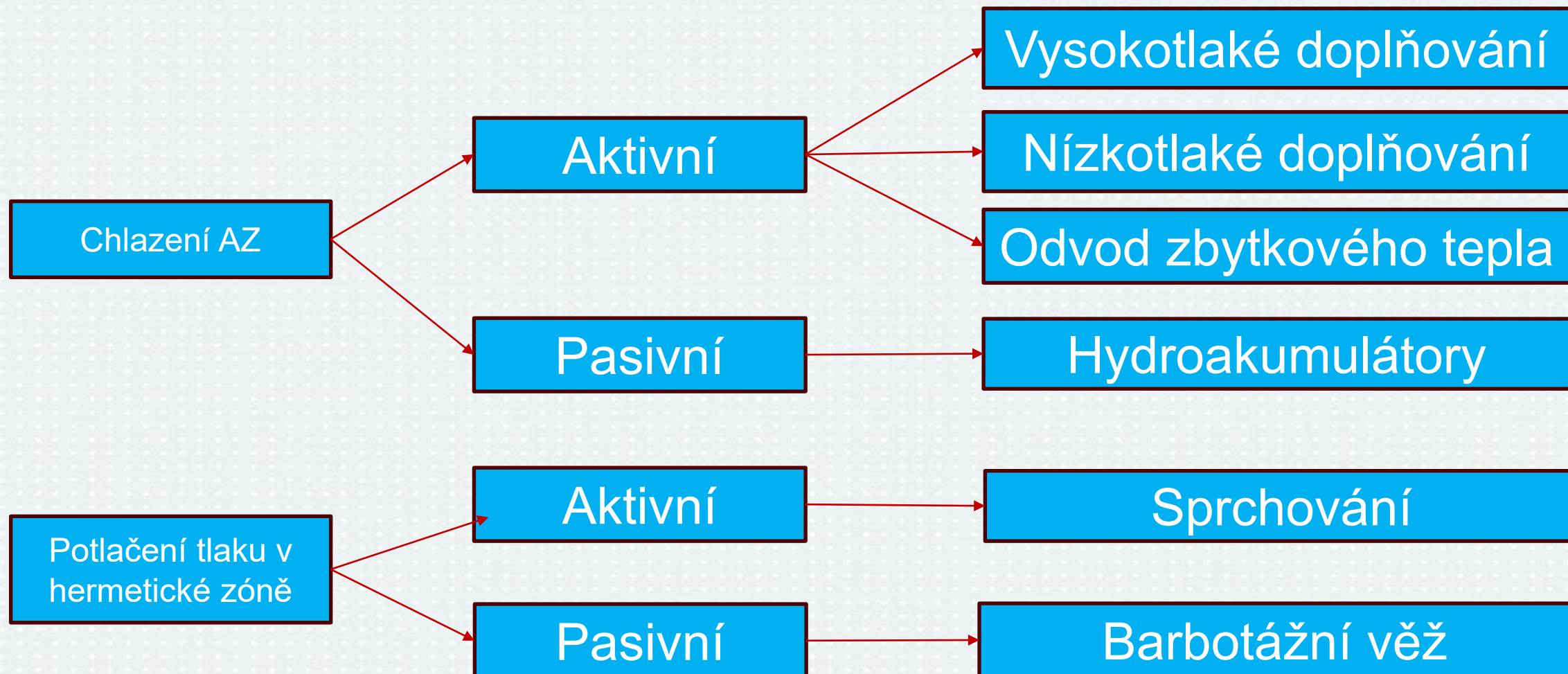
Engineered Safety Features Actuation System ESFAS

- Jeden z nejvýznamnějších systémů JE
- Určen k zamezení následků předpokládaných nehod, především souvisejícím s únikem chladiva primárního okruhu
- Rozdělují se do vícero nezávislých systémů a každý zahrnuje vícero nezávislých podsystémů
 - Každý systém má vlastní senzory, odděleny logiky pro aktivaci které využívají systém 2 ze 3
- Vysoká míra spolehlivosti je dosažena rozdělením ESFAS do 3 systémů kde každý je napájený nezávislým zdrojem

ESFAS

- Vysoký tlak v kontejmentu/hermetických prostorách – 10kPa, 2z3
- LOCA – tlak klesne pod 8,3 MPa a teplota chladiwa stoupne nad 245 °C; 2z3
- Střední LOCA – tlak pod 10,8 MPa a hladina KO klesne pod 1,02m a teplota chladiwa stoupne nad 180 °C; 2z3
- Malá LOCA – hladina KO klesne pod 0,52 m a teplota chladiwa stoupne nad 180 °C; 2z3
- Prasknutí HPK – trend poklesu tlaku páry dosáhne 0,036 MPa/s; 2z3
- Ztráta napájecí vody – hladina PG klesne pod 1,42 m 2z6 a teplota chladiwa stoupne nad 180 °C

ESFAS



Vysokotlaké doplňování (VVER440)

- Aktivní systém
- Kompenzace ztráty chladiva při nevelkém úniku
- 2 nezávislé skupiny vysokotlakých čerpadel, ve skupině 2 čerpadla
- Spojeno se zásobní nádrží nebo s jímkou ochranné obálky nezávislým potrubím
- Z nádrže voda s kyselinou boritou 12 g/litr
- Ústí do studených větví

Hydroakumulátory

- Pasivní systém
- Tlakové nádrže s vodou a kyselinou boritou
- Nad hladinou je stlačený dusík
- Při poklesu tlaku v primárním okruhu pod hodnotu tlaku dusíku, otevře se zpětný ventil a voda proudí do AZ
- DVI – direct vessel injection – přímo do reaktorové nádoby
 - 2 nad AZ a 2 do downcommeru (ze spodu AZ)

Nízkotlaké doplňování

- Aktivní systém
- Kompenzace ztráty chladiva při velkém úniku
- Schopna dodávat velké objemy
- Na trase jsou výměníky pro odvádění zbytkové tepla
- Vysoko i nízkotlaká čerpadla pracují i při blackoutu, energii dodávají dieselové generátory

Sprchování hermetických boxů

- Aktivní systém
- Pro snížení tlaku v hermetických boxech – případně kontejmentu
- Kondenzací páry
- Záchyt radioaktivních látek

Barbotážní systém VVER 440

- Využití hlavně při LOCA
- Směs vody, páry a vzduchu je vedena přes tunel do vakuo-barbotážní věže kde dále prochází přes vodní kondenzátory
- Vzduch a nezkondenzované plyny jsou vedeny přes zpětné ventily do čtyř jímek
- Schopen omezit důsledky maximální projektové havárie snížením tlaku v hermetických prostorech
- Velké rozměry – 12 podlaží s kondenzátory

Core catcher

- Lapač aktivní zóny
- Pod reaktorovou nádobou
- Zařízení pro záchyt roztavené aktivní zóny která se protavila skrz tlakovou nádobu reaktoru
- Korium se rozleje – jednodušší chlazení
- Může být chlazeno pasívně nebo aktivně
- Speciálně odolné betony

In-vessel melt retention

- Chlazení roztavené aktivní zóny skrze reaktorovou nádobu
- Tlaková nádoba je z vnější strany chlazena vodou která proudí v prostoru mezi šachtou reaktoru a reaktorem
- „opozitní“ přístup ku core catcher
- Musí být na to uzpůsobená šachta reaktoru
- VVER 440 ano; VVER 1000 ne

Magisterský studijní program JADERNÁ ENERGETIKA vznikl za přispění



**Financováno
Evropskou unií**
NextGenerationEU



**NÁRODNÍ
PLÁN
OBNOVY**

MSMT
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

NPO_VUT_MSMT-16609_2022



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ



Financováno
Evropskou unií
NextGenerationEU



NÁRODNÍ
PLÁN
OBNOVY

MSMT
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ



FAKULTA
CHEMICKÁ



FAKULTA
STAVEBNÍ



FAKULTA
STROJNÍHO
INŽENÝRSTVÍ

Přednáška magisterského studijního programu JADERNÁ ENERGETIKA

Provoz jaderných zařízení a simulátory reaktorových bloků a elektráren

Optimalizace a zvyšování výkonu

FEKT

Peter Mičian



Vysoké učení technické v Brně



Osnova

- Zvyšování výkonu
- Optimalizace provozu VVER 440
- Zvyšování výkonu VVER 440

Zvyšování výkonu

- Zvyšování tepelného výkonu reaktoru
- Zvyšování tepelné účinnosti bloku
- Modernizace sekundární části
- Modernizace elektrické části

Zvyšování výkonu

- Palivo s vyšším obohacením – zvýšení tepelného výkonu reaktoru
- Od velikosti navýšení může být spjaté rozsáhlejší nebo méně rozsáhlé úpravy zařízení – výměna komponent jako turbína nebo generátor, potrubí, transformátory
- Je nutné zanalyzovat a určit jestli dané komponenty je potřebné vyměnit nebo stávající zařízení zvládnou vyšší nápor a je možné prokázat že změny jsou bezpečné

Zvyšování výkonu

- Může se jednat o využití projektových rezerv a proto není za potřebí větší modifikace zařízení
- Obvykle se jedná o zvýšení o 2 až 7 %
- Dále rozšířené zvyšování už zahrnuje specifické zásahy do technologie a výměny nebo modifikace komponent
- V takom případě se dosahuje zvýšení až do 20 % a modifikace technologie je především na sekundární straně

Optimalizace provozu VVER 440

- Modernizací zařízení
- Nové technologie
- Optimalizace procesů spjaté s vyšší spolehlivostí

Optimalizace provozu VVER 440

- Prodlužování palivových kapek – 12 – 18 měsíční palivové cykly
- Zvyšování vyhoření paliva a doby paliva v reaktore
- Využívání profilovaného jaderného paliva
- Využívání vyhořívajících absorbátorů
- Zlepšení monitorovacích systémů paliva pro přesnější určení parametrů paliva
- Využití výkonových rezerv plynoucích z konzervativního přístupu při projektování JE

Optimalizace provozu VVER 440

- Modernizace a inovace technologií – výměna turbín s vyšším výkonem a účinností
- Zavedení programu řízení stárnutí komponent – lépe poznat stav zařízení a jejich změny v čase, co umožní lépe hodnotit jejich stav a životnost
- Vyšší možnosti diagnostiky komponent a systémů – předcházení neplánovaných odstávkám a umožňuje zkracování odstávek

Zvyšování účinnosti VVER 440 (EMO)

- Zvýšení na 252 MW elektrických celkového činného výkonu na jednom TG
- Tepelný výkon reaktoru 107 %
- Tlak na výstupu z PG 47,3 bar
- Nominální přetlak HPK 44,6 bar
- Teplota chladicí vody na vstupu do kondenzátoru 20 °C

Zvyšování účinnosti VVER 440 (EMO)

Řešení

- Modifikace turbíny, generátoru, transformátoru
- Modifikace souvisejících nastavení regulací a ochran – regulátor TG, ochrany, chlazení, snížení ztrát na parním potrubí
- Dopady na chlazení generátoru – výkon chlazení, vložený okruh chlazení
- Dopady na SKŘ – rozsahy měření, regulační obvody
- Dopady na dimenzování elektrických zařízení – vyvedení výkonu a vlastní spotřeba

Zvyšování účinnosti VVER 440 (EMO)

- Dopady na vhodnost nastavení elektrických ochran
- Dopady na dynamickou stabilitu přenosové sítě a ostrovní provoz

Magisterský studijní program JADERNÁ ENERGETIKA vznikl za přispění



**Financováno
Evropskou unií**
NextGenerationEU



**NÁRODNÍ
PLÁN
OBNOVY**

MSMT
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

NPO_VUT_MSMT-16609_2022