

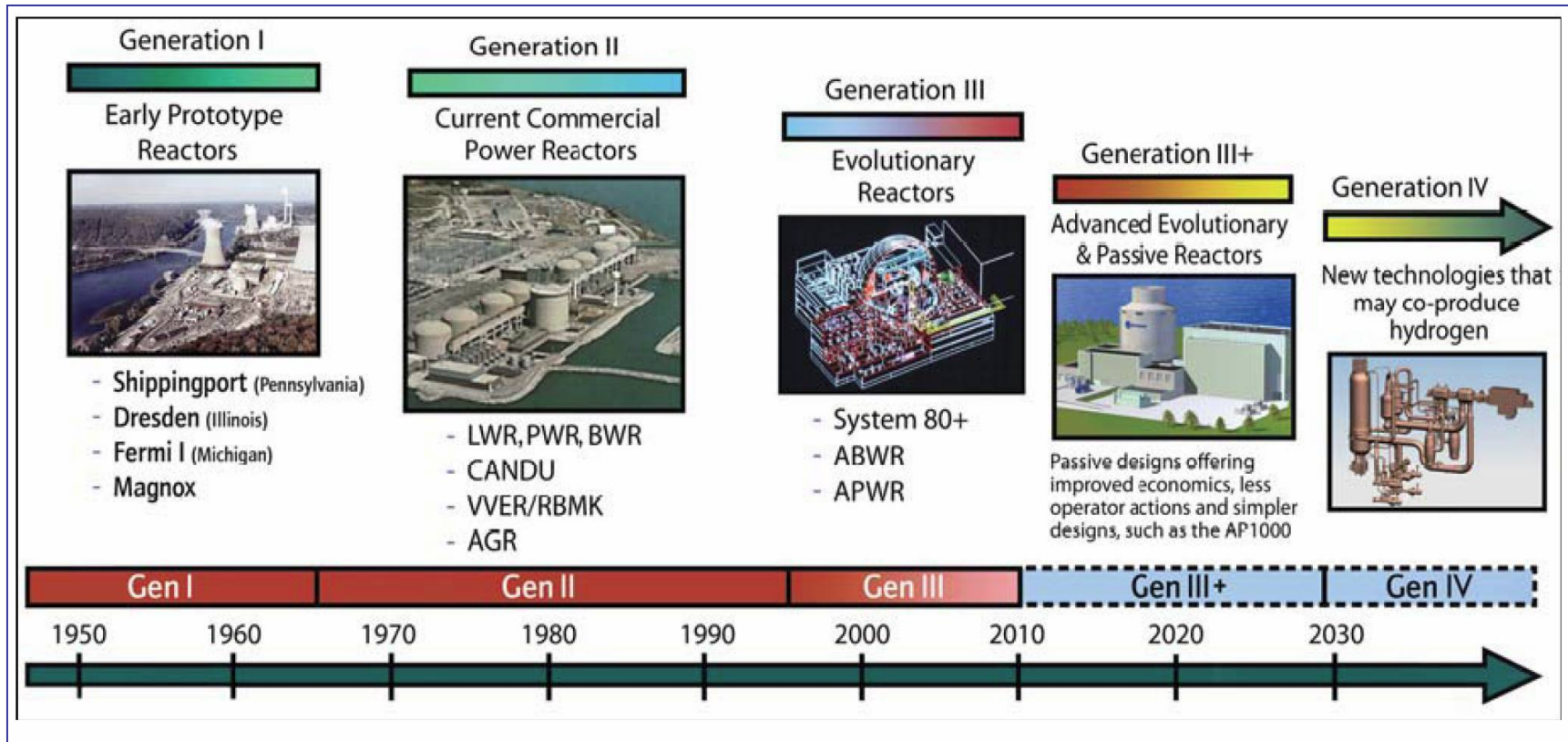
# **Spasí nás nové generace reaktorů?**

Dalibor Stráský

*Praha, 28.4.2009*



# Vývoj jaderné energetiky



**Generation IV** - program US Department of Energy iniciován v r. 1999

# Výběr reaktorových systémů IV. generace

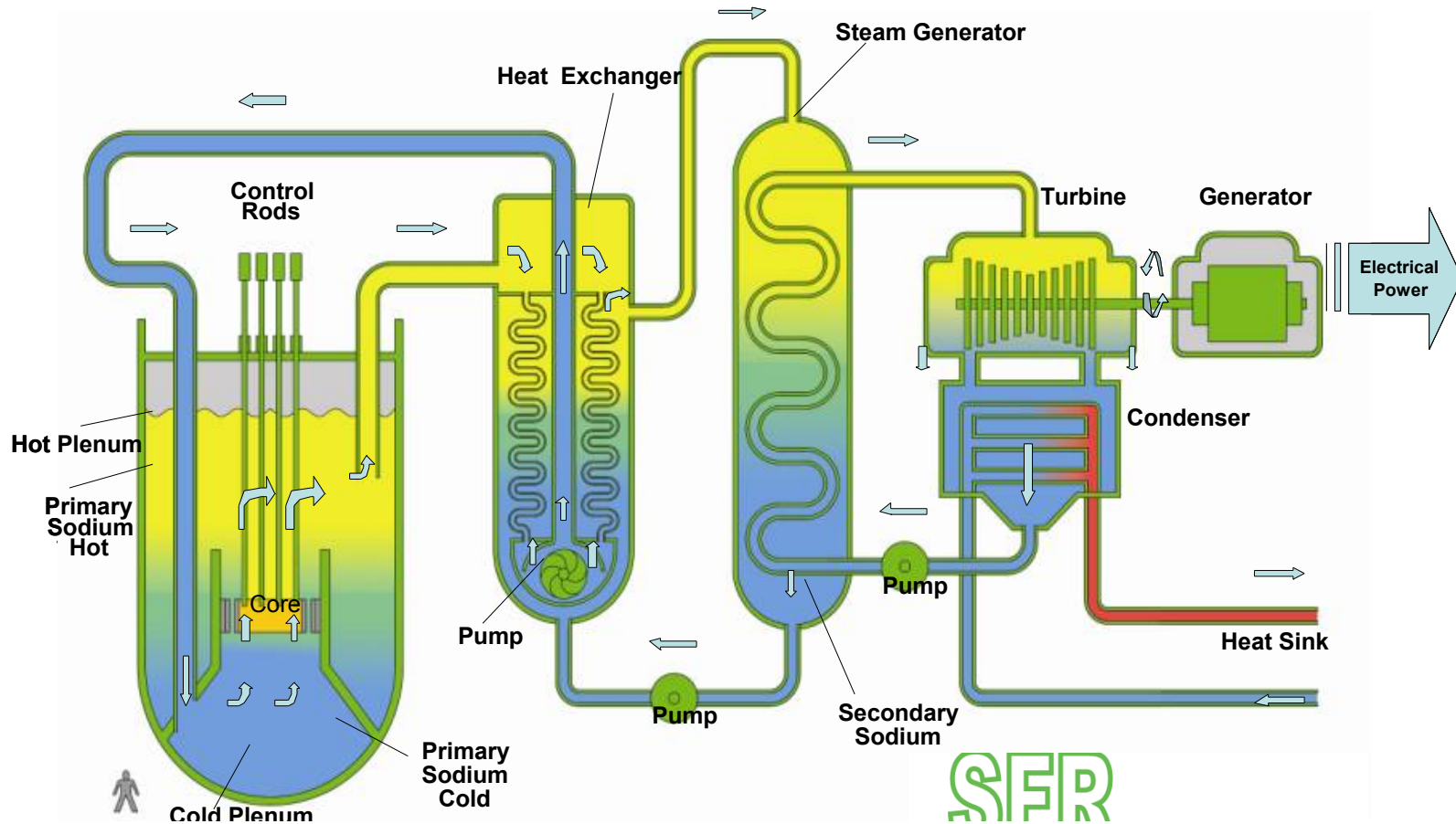
- ✓ Celkem hodnoceny 124 projekty
- ✓ Kritéria :
  1. bezpečnost a spolehlivost,
  2. hospodárnost,
  3. odolnost proti šíření jaderných zbraní,
  4. fyzická ochrana,
  5. udržitelnost.

# Výsledný návrh šesti reaktorových systémů

1. **GFR - Rychlý reaktor chlazený plynem (Gas-Cooled Fast Reactor System)**
2. **LFR - Rychlý reaktor chlazený olovem (Lead-Cooled Fast Reactor System)**
3. **MSR - Reaktor chlazený roztavenou solí (Molten Salt Reactor System)**
4. **SFR - Rychlý reaktor chlazený sodíkem (Sodium-Cooled Fast Reactor System)**
5. **SCWR - Reaktor chlazený vodou s nadkritickým cyklem (Supercritical-Water-Cooled Reactor System)**
6. **VHTR - Reaktor s velmi vysokými teplotami (Very-High-Temperature Reactor System)**

*(pořadí neodráží prioritu zvolených koncepcí)*

# Rychlý reaktor chlazený sodíkem



Pracovní teplota 550°C

Varianta s výkonem 150 - 600 MW<sub>e</sub> - palivo kovové U, Pu

Varianta s výkonem 500 - 1500 MW<sub>e</sub> - palivo ve formě oxidů U a Pu

# Rychlý reaktor chlazený sodíkem

- průkaz pasivní bezpečnosti
- redukce nákladů
- vývoj pyroprocesu pro větší zařízení a demonstrace zhodnocení aktinidů
- postupy inspekcí a oprav v prostředí s tekutým sodíkem



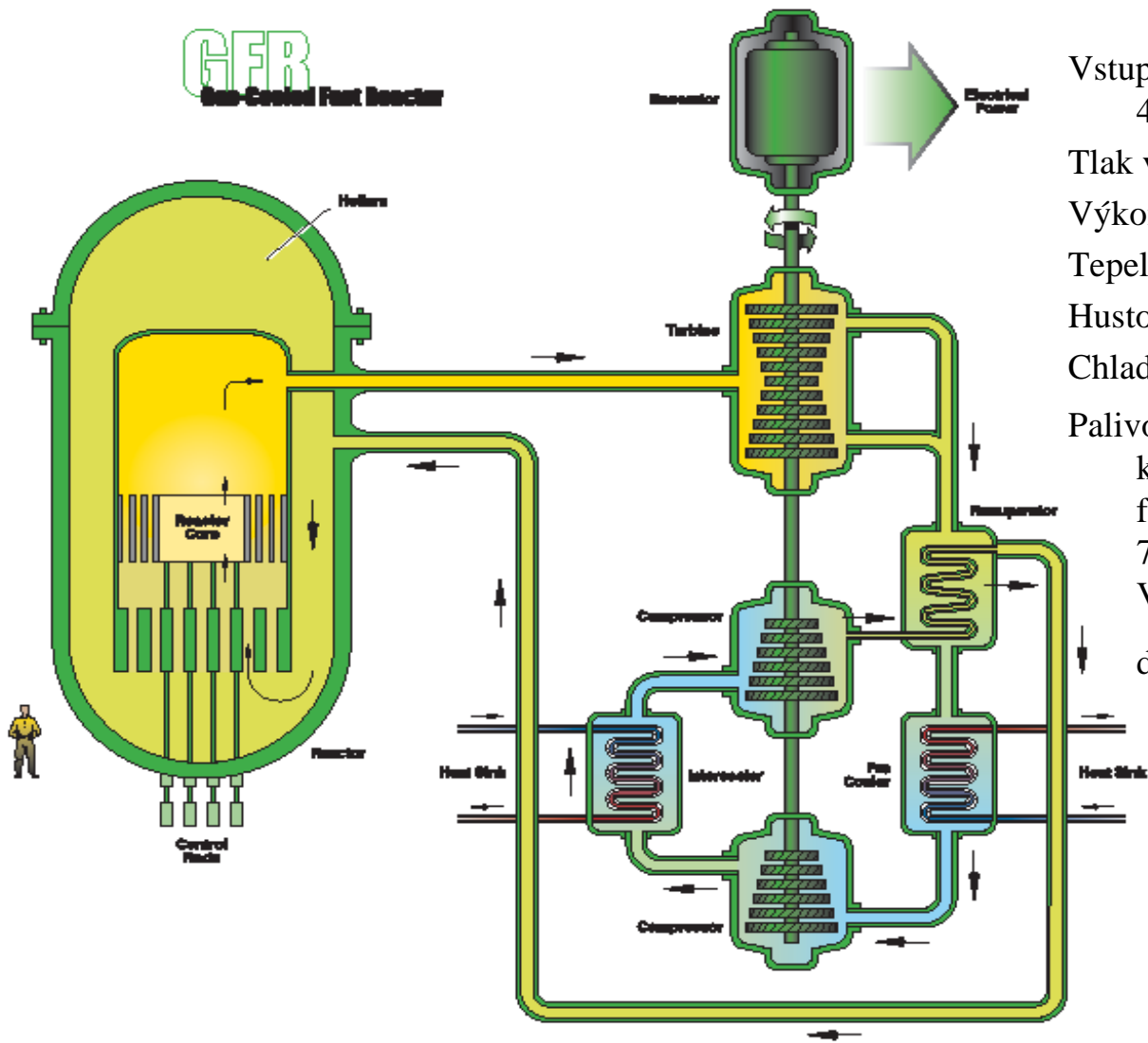


# Rychlý reaktor chlazený olovem

- vyvinutí nitridového paliva, které bude kompatibilní s materiálem pokrytí
- konstrukční materiály odolné vůči vysokým teplotám
- přijatelnost olova pro životní prostředí
- konstrukce a dimenze aktivní zóny
- sekundární okruh s nadkritickým parním oběhem
- hospodárnost, zejména s ohledem na modulární koncepci
- palivový řetězec, zejména výroba paliva při použití transuranů

# Rychlý reaktor chlazený plynem

**CFR**  
Gas-Cooled Fast Reactor



Vstupní\výstupní teplota chladiva  
490°C\ 870°C

Tlak v primárním okruhu 9 MPa

Výkon 600 MW (variantně 1100 MWe)

Tepelná účinnost až 50%

Hustota výkonu 100 MW/m

Chladivo - helium

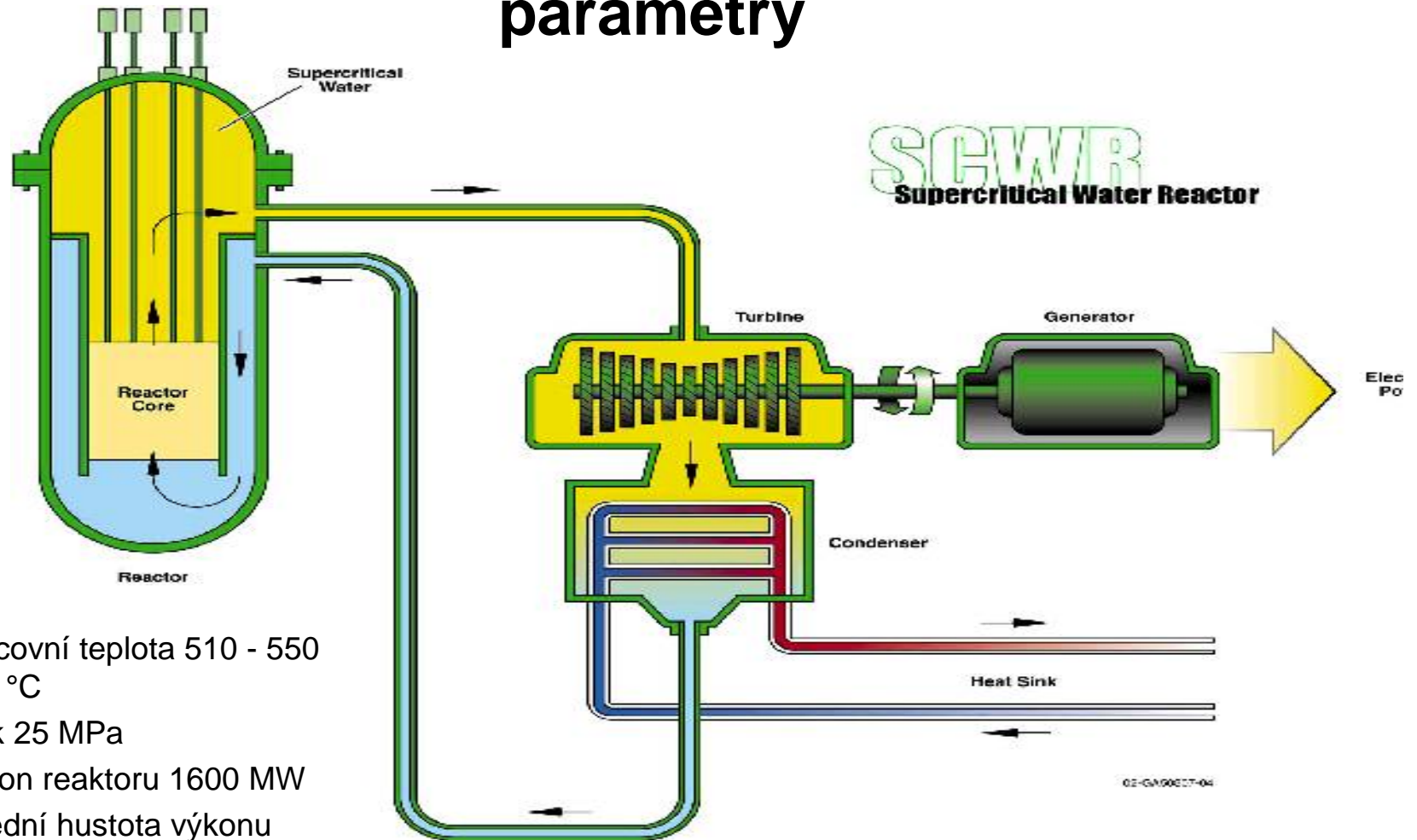
Palivo - keramické mikročástice a keramické kompozity z U a Pu ve formě kuliček (UPuC/SiC – 70%/30% s podílem Pu asi 20%). Variantně směs karbidů a dusíkatých sloučenin aktinidů.

# Rychlý reaktor chlazený plynem

Největší technické výzvy představuje palivo, palivový řetězec a bezpečnostní systémy. K nejdůležitějším cílům vývoje patří :

- forma paliva pro spektrum rychlých neutronů
- design aktivní zóny se spektrem neutronů pro vysoký koeficient konverze, avšak bez separátních množivých zón
- bezpečnostní systémy včetně systému odvodu zbytkového tepla při zohlednění výrazně vyšší hustoty výkonu (100 MW/m<sup>2</sup>) a zmenšené tepelné setrvačnosti
- palivový řetězec s kompaktním přepracováním na místě
- vyvinutí materiálů odolných vůči vysoce energetickému toku neutronů za podmínek vysoké teploty
- vyvinutí vysoce výkonné heliové turbíny pro efektivní výrobu elektřiny
- vyvinutí technologií pro vyvedení technologického tepla při využití jaderného vysokopotenciálního tepla

# Reaktor chlazený vodou s nadkritickými parametry



Pracovní teplota 510 - 550 °C

Tlak 25 MPa

Výkon reaktoru 1600 MW

Střední hustota výkonu

100 MW/m

Tepelná účinnost 44,8 %

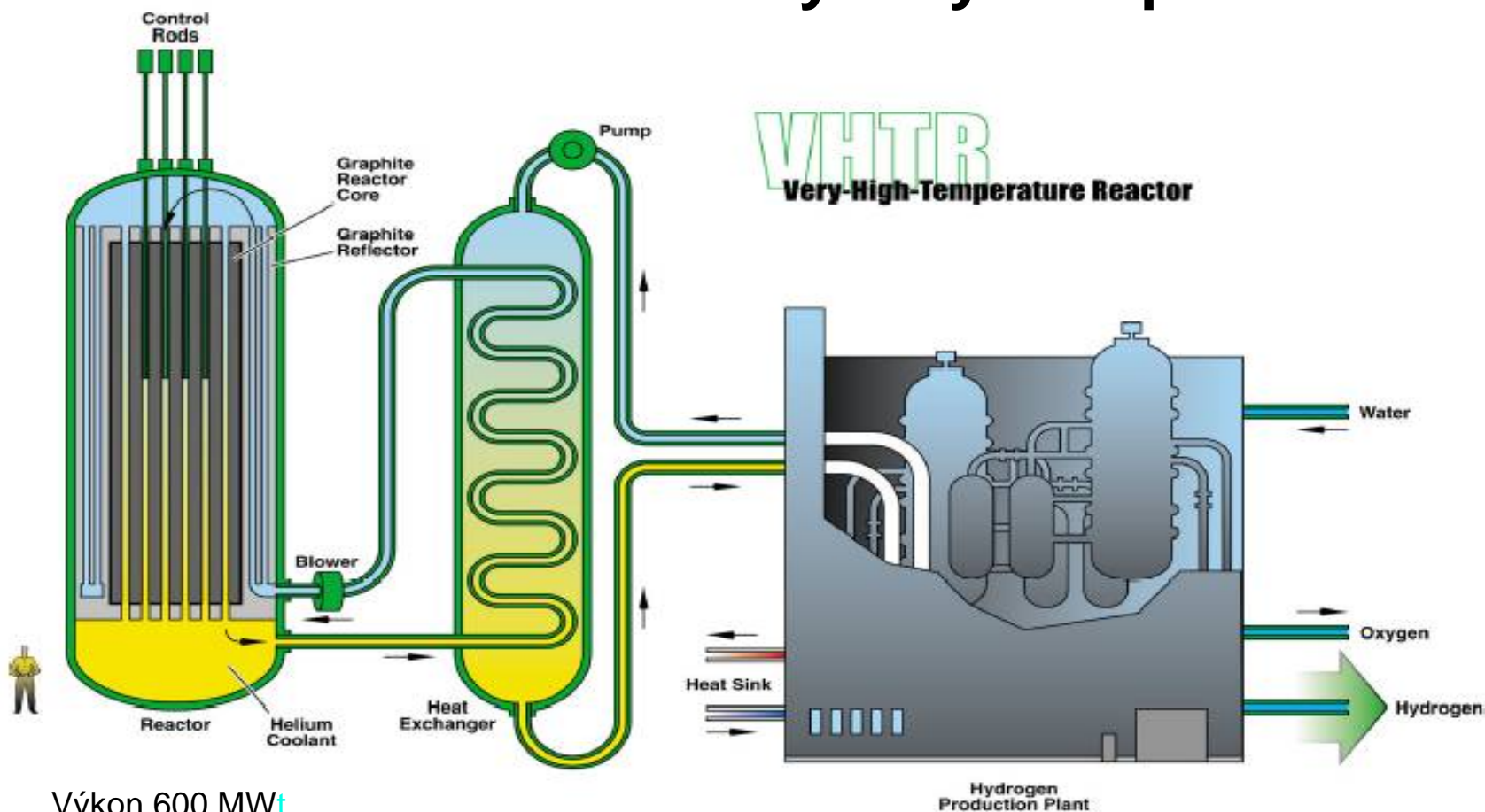
02-GA90037-04

# Reaktor chlazený vodou s nadkritickými parametry

Problémové okruhy:

- materiály, zejména materiál pokrytí paliva, s ohledem na korozi, korozní praskání pod napětím, mez kluzu a křehnutí,
- bezpečnost při poruchách, zejména s ohledem na menší inventář vody ve srovnání s konvenčními lehkovodními reaktory,
- konstrukční realizovatelnost koncepce.

# Reaktor s velmi vysokými teplotami



Výkon 600 MW<sub>t</sub>

Hustota výkonu 6 – 10 MW/m

Pracovní teplota 1000°C

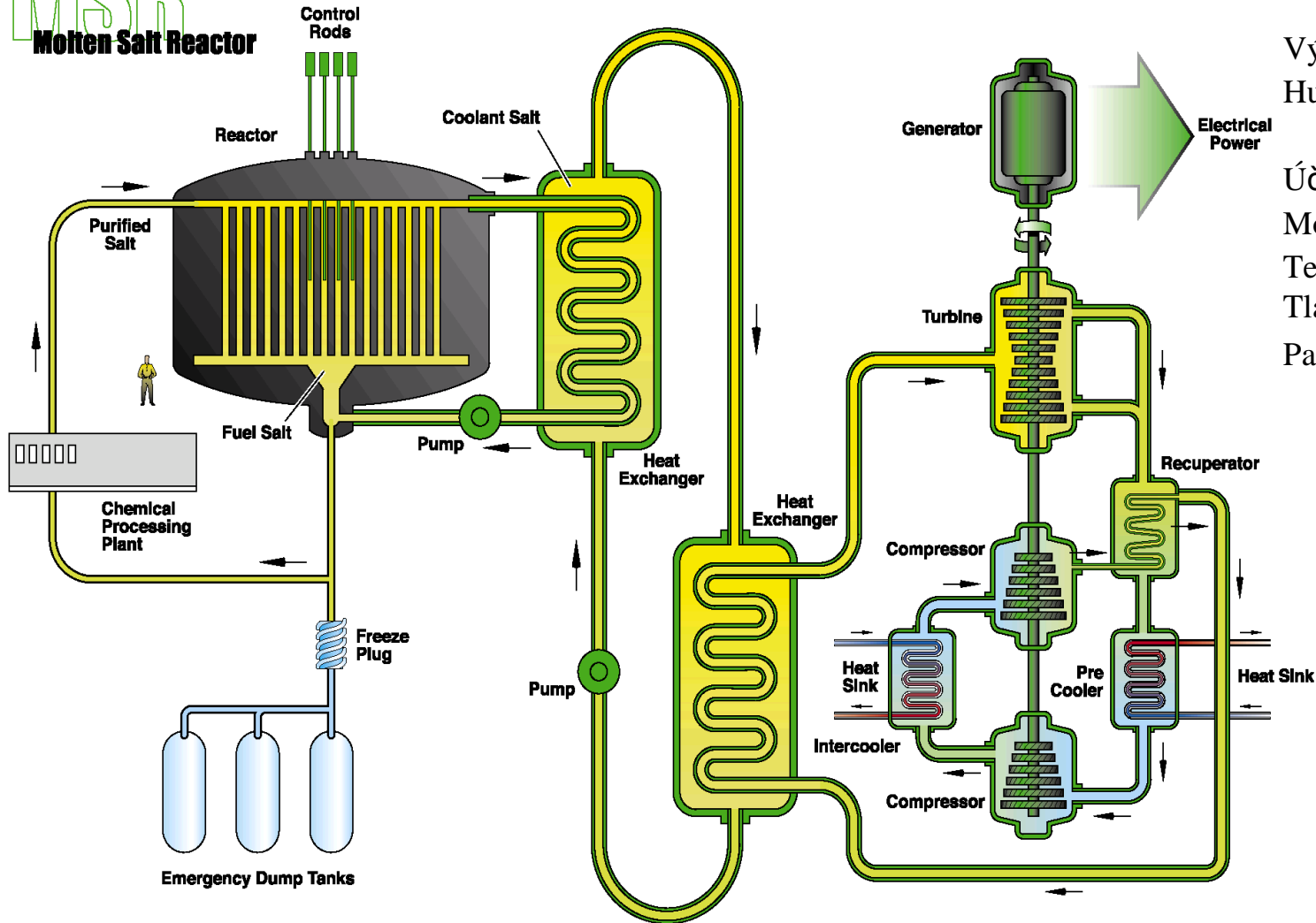
Palivo ve formě potahovaných (ZrC) částic umístěných v loži

# Reaktor s velmi vysokými teplotami

- Musejí být vyvinuty nové materiály a palivo tak, aby
  - byl realizovatelný nárůst teploty vystupující z aktivní zóny na 850 – 1000°C nebo ještě výše,
  - se počítalo s tím, že maximální teplota paliva při poruchách může dosáhnout 1800°C
  - maximální vyhoření dosáhlo hodnoty 150 – 200 GWd/tU
  - se odstranily výkonové a teplotní špičky v aktivní zóně, podobně horké oblasti v hélíu.
- K výrobě vodíku je zapotřebí vyvinutí vysoce legovaných a povrchových materiálů pro vysoké teploty, které odolávají korozivním plynům jako je vodík, CO a metan.
- Výzvou je též modulové provedení reaktoru a systém vyvedení tepla.
- Vyvinuta musí být i vysokoteplotní heliová turbína.

# Reaktor chlazený roztavenou solí

**MSR**  
Molten Salt Reactor



Výkon 1000 MW

Hustota výkonu

22 MW/m

Účinnost 44 – 50%

Moderátor - grafit

Teplota 700 – 800°C

Tlak < 0,5 MPa

Palivo v keramické formě v grafitové matici. Variantně obsaženo v solích ve formě UF<sub>4</sub> nebo ThF<sub>4</sub>



# Reaktor chlazený roztavenou solí

- chemie taveniny solí,
- rozpustnost lanthanidů v palivu,
- snášlivost ozářené taveniny solí s konstrukčními materiály a grafitem,
- hromadění kovů ve výměnících tepla
- vývoj paliva, určení účinných průřezů (neutronová fyzika) a kvalifikaci vhodných tavenin solí,
- výzkum korozního chování použitých materiálů a jejich křehnutí,
- vyvinutí technologie k separaci tritia,
- regulace složení směsi solí a její čištění,
- zlepšení a testování stability grafitu,
- konstrukce

# Bezpečnost a spolehlivost

Protože ani u IV. generace reaktorů **nebude možné vyloučit možnost havárií**, zkoumá se bezpečnost ve třech skupinách:

- události, které se mohou vyskytnout více méně často a které se musejí zvažovat kvůli bezpečnosti provozního personálu a spolehlivosti a dostupnosti zařízení,
- události, které lze očekávat vzácně, které ale mohou vést k velkým škodám na zařízení a k uvolnění radionuklidů do kontejnmentu,
- události s velmi nízkou pravděpodobností výskytu, které mohou vést ke zničení aktivní zóny reaktoru a kvůli kterým se musejí uvažovat ochranná opatření mimo areál zařízení.

Zkoumání **prvních dvou skupin je při dnešním stavu vývoje možné jen sotva**. Výzkum se proto omezuje na sestavení vhodné metodiky, která by umožnila získat porovnatelné výsledky pro bezpečnost jednotlivých systémů. Např. ohledně **posouzení pasivních bezpečnostních systémů dnes neexistuje žádný konsensus**.

- Některé systémy IV. generace mají být vybaveny zásadně jiným bezpečnostním systémem. Následkem toho se musejí podstatně odlišovat od dnešního stavu i postupy schvalovacího řízení. Je proto třeba vypracovat postup schvalování těchto systémů.

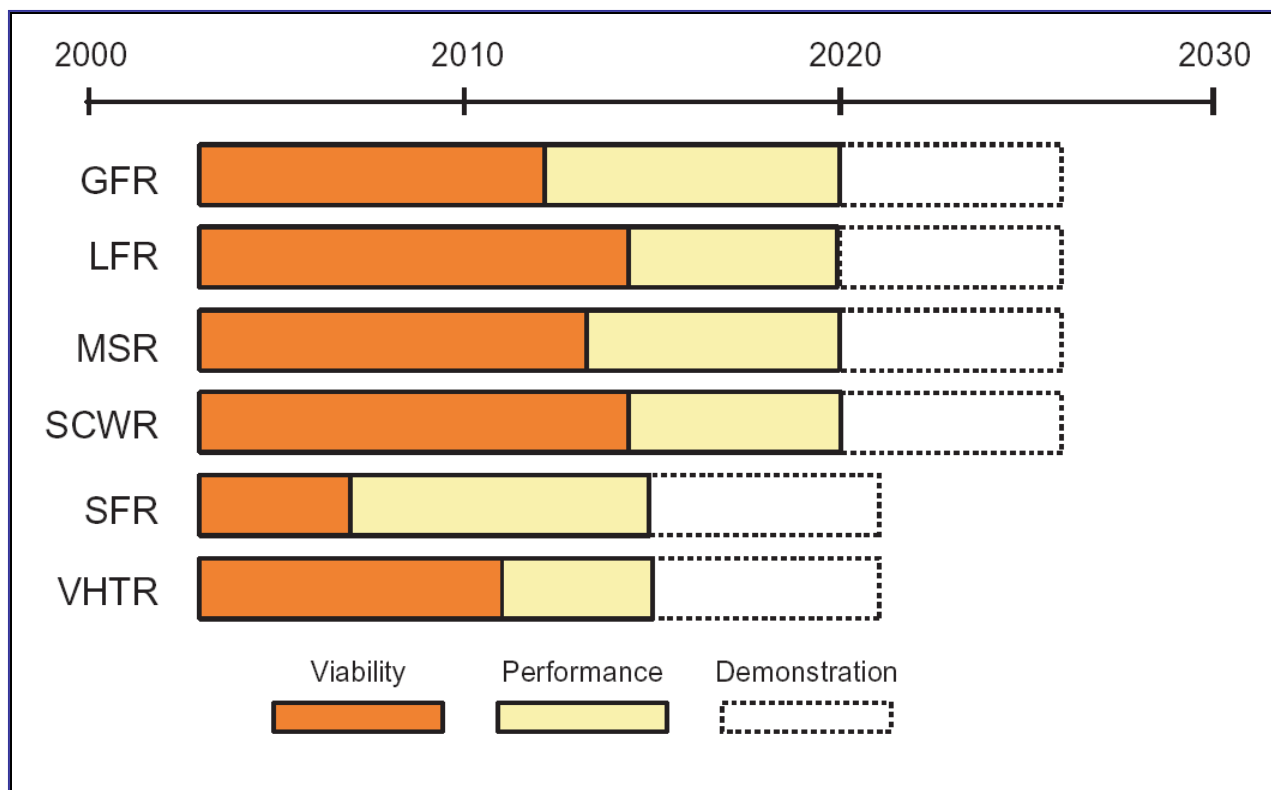
# Hospodárnost

Inovativní systémy vyžadují zvláštní postupy pro posouzení jejich hospodárnosti, neboť jejich komponenty se podstatně odlišují od komponent dnešních reaktorových systémů, takže nelze používat údaje získané zkušenostmi.

Protože v úvahu přicházejí i nekonvenční jaderná paliva, je třeba zahrnout vedle nákladů na stavbu zařízení i náklady celého palivového řetězce.

Vyvinout je proto třeba příslušné výpočetní metody.

# Časový horizont realizace



(Žežula, L.: Výzkum a vývoj nových jaderných technologií, ÚJVŘež, Praha, prosinec 2008)

## VERSUS

Nasazení reaktorů IV. generace - záležitost přelomu století

(Heřmanský, B. in verb, referát Vývojové trendy v jaderné energetice, Senát Parlamentu České republiky, 20.5.2008)

# Závěrečné poznámky

- přes poměrně dlouhou dobu výzkumu (např. MSR již od 60. let) případně přes jisté pokusy s komerčním využitím (rychlé reaktory) není dosud k dispozici ani ujasněná představa o konkrétním provedení. Šest typů reaktorů vybraných pro další sledování tak představuje spíše šest okruhů různých plánů
- Tato neurčitost má za následek nemožnost otevřít k řešení další okruhy otázek (např. bezpečnost a ekonomiku). Lze očekávat, že ty přinesou nutnost přehodnocení některých přístupů.