



# Neljännän sukupolven reaktorit ja mallinnuksen haasteet

Jaakko Leppänen

ATS Jäsentilaisuus 13.6.2007

# Sisältö

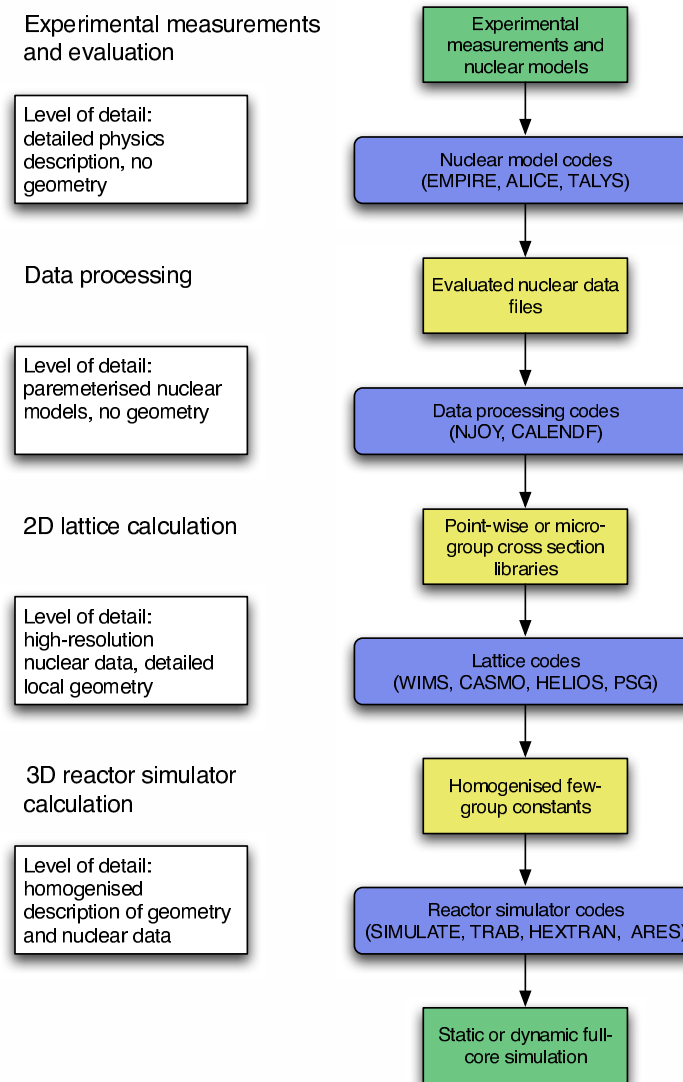
- \* Ydinreaktoreiden fysikaalinen mallinnus:
  - Ydinreaktoreiden fysiikan erityispiirteitä.
  - Reaktorifysiikan mallinnus.
  
- \* Neljännen sukupolven reaktoritekniikkaa.
  
- \* Reaktorityypit:
  - SCWR
  - VHTR
  - SFR
  - LFR
  - GFR
  - MSR

# Ydinreaktoreiden fysikaalinen mallinnus

- \* Ydinreaktoreiden fysiikan erityispiirteitä:
  - Neutronivuorovaikutusten monimutkainen energia-, paikka- ja kulmariippuvuus.
  - Neutroniikan ja termohydrauliikan välinen voimakas kytkentä.
  - Käyttöjakson aikaiset muutokset polttoaineen isotooppikoostumuksessa ja mekaanisissa ominaisuuksissa.
  - Polttoaineen radioaktiivisuus.
  - Turvallisuusnäkökohtien korostuminen.
  - Käytetyn ydinpolttoaineen ongelmat.
- \* Ydinreaktorin mallinnusta ei käytännössä voi toteuttaa jakamatta ongelmaa pienempiin osiin.

# Ydinreaktoreiden fysikaalinen mallinnus

- \* Mallinnuksessa lähdetään liikkeelle yksittäisten vuorovaikutusten fysiikasta.
- \* Kuvauksen yksityiskohtaisuutta pyritään vähentämään tarkkuuden kärsimättä.
- \* Ylimmällä tasolla (simulaattorilasku) polttoaine kuvataan homogeenisina alueina ja energiariippuvuus muutamalla energiaryhmällä.
- \* Laskentakoodit on yleensä räätälöity tiettyä reaktorityyppiä varten.



# Reaktoriteknikan sukupolvet

- \* Ydinreaktoreiden kehitys voidaan jakaa neljään “sukupolveen”:
  - Generation I: Ensimmäiset prototyyppireaktorit 50-luvulla (MAGNOX, RBMK, FBR, HTR)
  - Generation II: Kevytvesireaktoreiden vallankumous 70-luvulla (PWR, BWR, VVER, CANDU, AGR).
  - Generation III(+): Edellisen sukupolven käyttökokemusten pohjalta rakennettua konventionaalista tekniikkaa, korostettu passiivinen turvallisuus (EPR, ABWR, PBMR).
  - Generation IV: Innovatiiviset reaktorikonseptit, kaupallinen käyttö vuoden 2040 tienoilla, uudet käyttökohteet sähköntuotannon rinnalla, suljettu polttoainekierto (SCWR, VHTR, SFR, LFR, GFR, MSR).
  
- \* Kaikista GenIV-reaktoreista on olemassa enemmän tai vähemmän käytännön kokemusta.

# GenIV-reaktoreiden erityispiirteitä

## \* Neutronispektri:

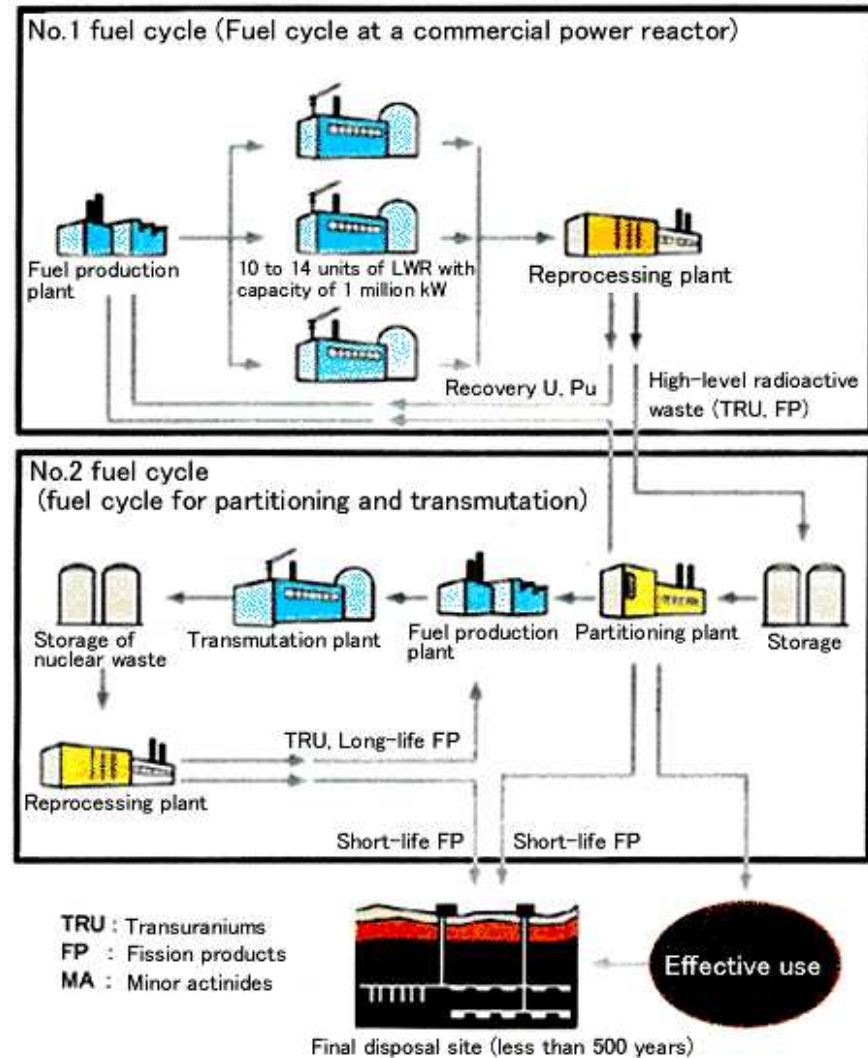
- Terminen: SCWR, VHTR, MSR
- Nopea: SFR, LFR, GFR, (SCWR)
- Nopean neutronispektrin ongelmia: lyhyemmät aikavakiot ja heikommat takaisinkytkentäkertoimet.
- Etuja: uraanivarojen tehokas hyödyntäminen, suljettu polttoainekierto.

## \* Jäähdyte:

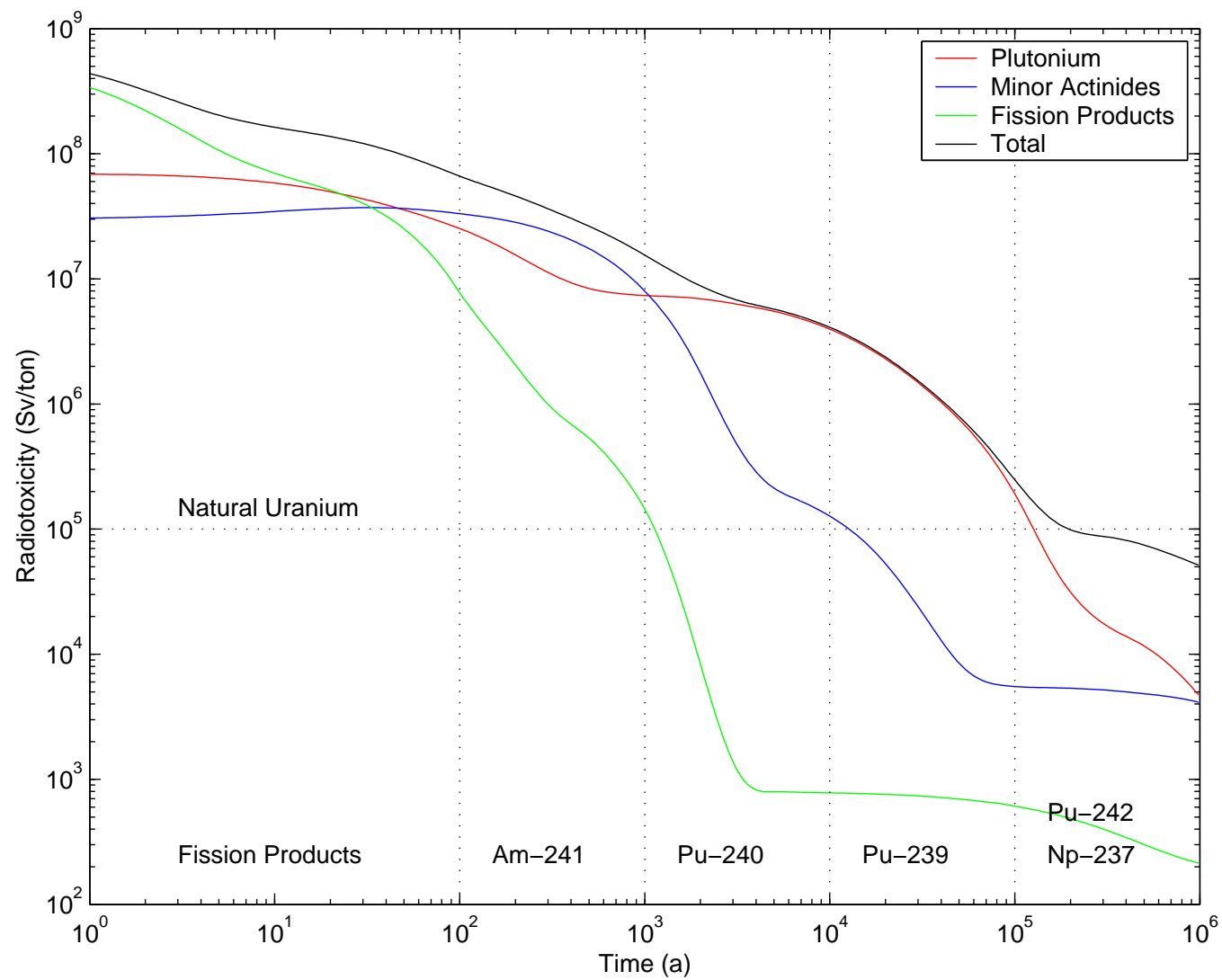
- Vesi: SCWR
- Nestemäinen metalli: SFR, LFR
- Kaasu: VHTR, GFR
- Muu: MSR
- Sekä nestemäisillä että kaasumaisilla jäähdytteillä omat etunsa ja haastensa.

# Suljettu polttoainekierto

- \* Yksi GenIV:n perustavoitteista.
- \* Tavoitteet:
  - Uraanivarojen tehokas hyödyntäminen.
  - Pitkäikäisten aktinidien hävittäminen loppusijoitettavasta jätteestä.
- \* Nopean neutronispektrin reaktorit (FR tai ADS) välttämätön osa suljettua polttoainekiertoa.
- \* Paljon eri skenaarioita.



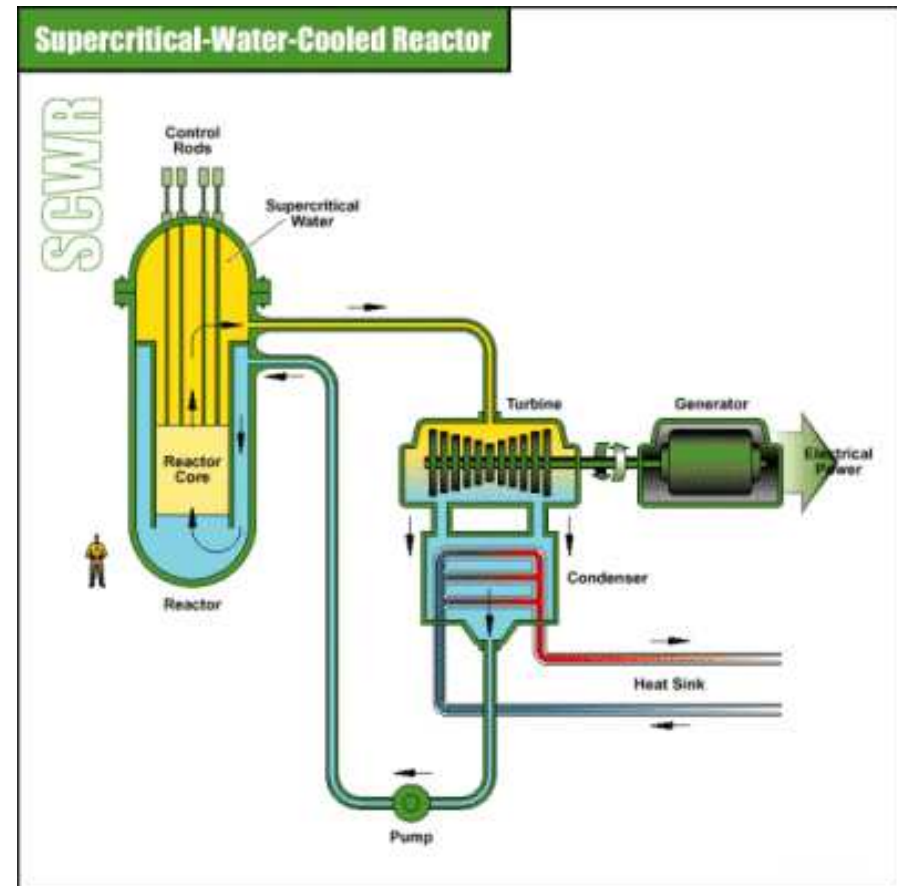
# Suljettu polttoainekierto





# Supercritical-Water-Cooled Reactor (SCWR)

- \* Vesijäähdytetty reaktori, jossa paine on nostettu yli kriittisen pisteen (22,1 MPa).
- \* Voidaan toteuttaa termisenä tai nopeana.
- \* Etuja:
  - Ei todellista faasimuutosta  $\implies$  rakenteen yksinkertaisuus.
  - Korkea toimintalämpötila, korkea hyötysuhde.
  - Vesijäähdytteisistä reaktoreista eniten käytännön kokemusta.



## Supercritical-Water-Cooled Reactor (SCWR)

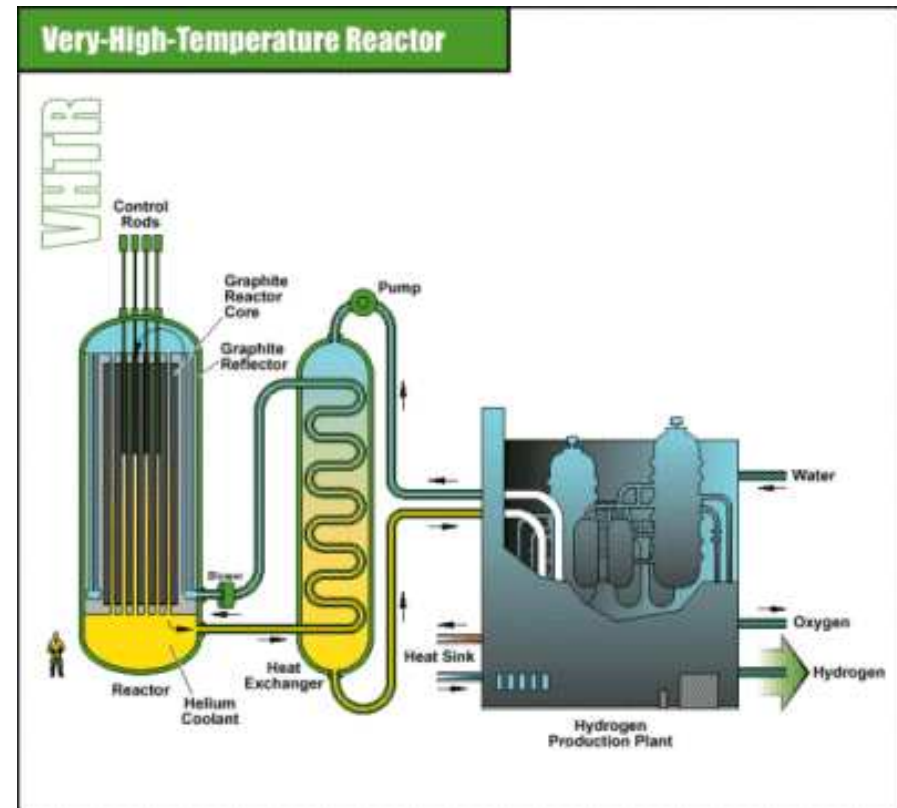
\* Ongelmia:

- Yksinkertaisesta perusideasta huolimatta monimutkainen rakenne.
- Polttoaineen geometrian mallinnus ei välttämättä onnistu nykyisillä deterministisillä LWR-transportkoodeilla.
- Termohydrauliikan mallinnuksessa omat vaikeutensa.
- Vesikemia oleellisesti erilaista perinteisiin reaktoreihin verrattuna.
- Korkean lämpötilan mukanaan tuomat materiaaliongelmät.
- Avoimia kysymyksiä: neutronien sironnan fysiikka superkriittisellä alueella?

\* VTT:llä tutkimuspanos EU:n HPLWR-projekteissa.

## Very-High Temperature Reactor (VHTR)

- \* Terminen neutronispektri, grafiittimoderaattori, heliumjäähdytys.
- \* “Pebble-bed” tai “prismatic” -tyyppinen.
- \* Etuja:
  - Korkea lämpötila, korkea hyötysuhde.
  - Termokemialliset sovellukset.
  - Passiivinen turvallisuus.
  - Uraani-, torium- tai plutoniumpohjainen polttoaine.

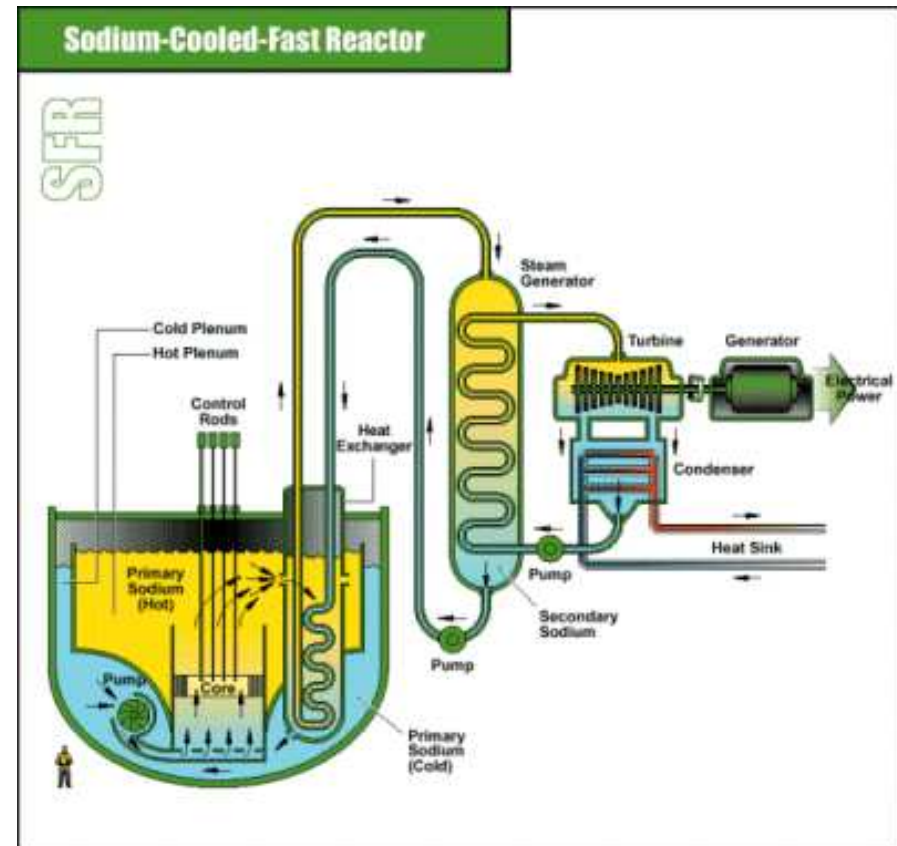


## Very-High Temperature Reactor (VHTR)

- \* VHTR:n reaktoritekniikka lähellä nykyisiä HTR-reaktoreita.
- \* Ongelmia ja haasteita:
  - Kevytvesireaktoreiden laskentakoodit eivät sovellu mallinnukseen.
  - Termodynamiikan erot kaasu- ja vesijäähdytyksen välillä.
  - Toisenlaiset onnettomuusskenaariot.
  - “Partikkelipolttoaineen” reaktorifysikaalinen mallinnus.
  - Pebble-bed -tyyppisissä reaktoreissa polttoaineen jatkuva syöttö.
  - Turbiiniteknologia heliumjäähdytteellä.

## Sodium-cooled Fast Reactor (SFR)

- \* Nopea neutronispektri, jäähdytteenä sula natrium.
- \* Nopeat reaktorit välttämätön osa suljettua polttoainekiertoa.
- \* Uraanivarojen tehokas hyödyntäminen.
- \* Reaktoritekiikka tuo mukanaan polttoaineen jälleenkäsittelyn.
- \* Teknologiasta paljon myös käytännön kokemusta.

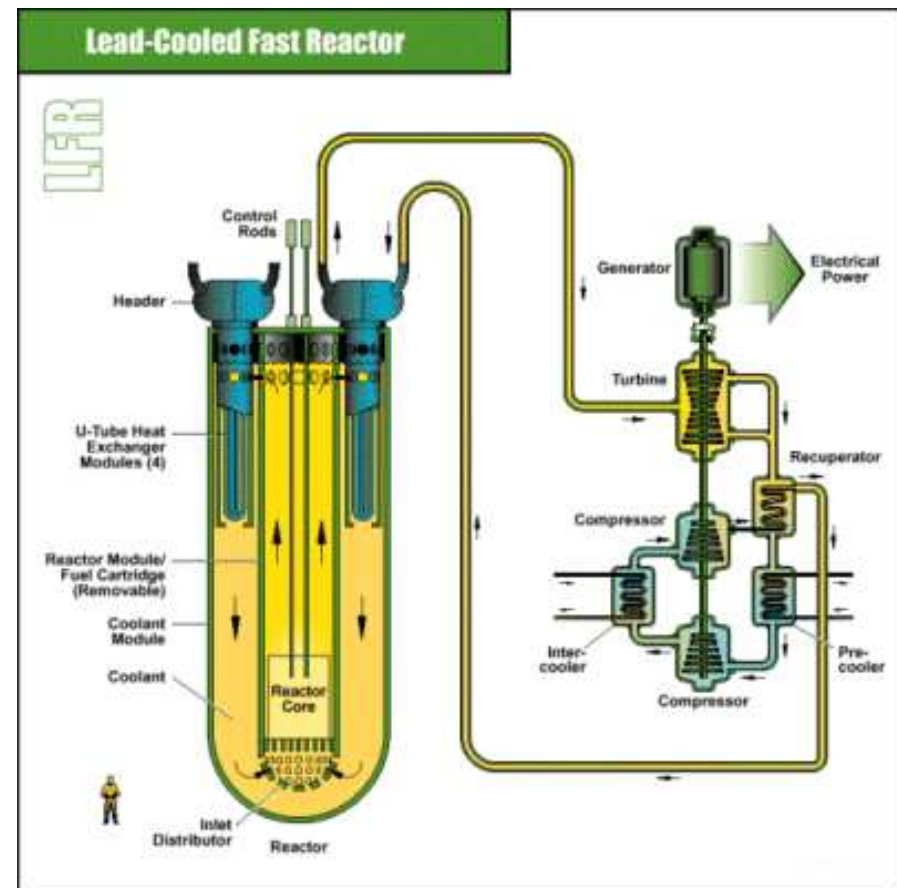


## Sodium-cooled Fast Reactor (SFR)

- \* Nopeille reaktoreille kokonaan omat laskentakoodinsa.
- \* Suljetun polttoainekierron mallinnuksessa omat haasteensa.
- \* Ongelmia:
  - Nopeiden reaktoreiden reaktorifysiikka ongelmallisempaa (kriittisyysturvallisuus, aikavakiot, takaisinkytkentäkertoimet).
  - Natriumjäähdytteen kemiallinen reaktiivisuus.
  - Nopeiden reaktoreiden teknologiasta lyhyempi matka ydinaseiden kehittämiseen?
- \* Oleellisesti kalliimpaa LWR-teknologiaan verrattuna.

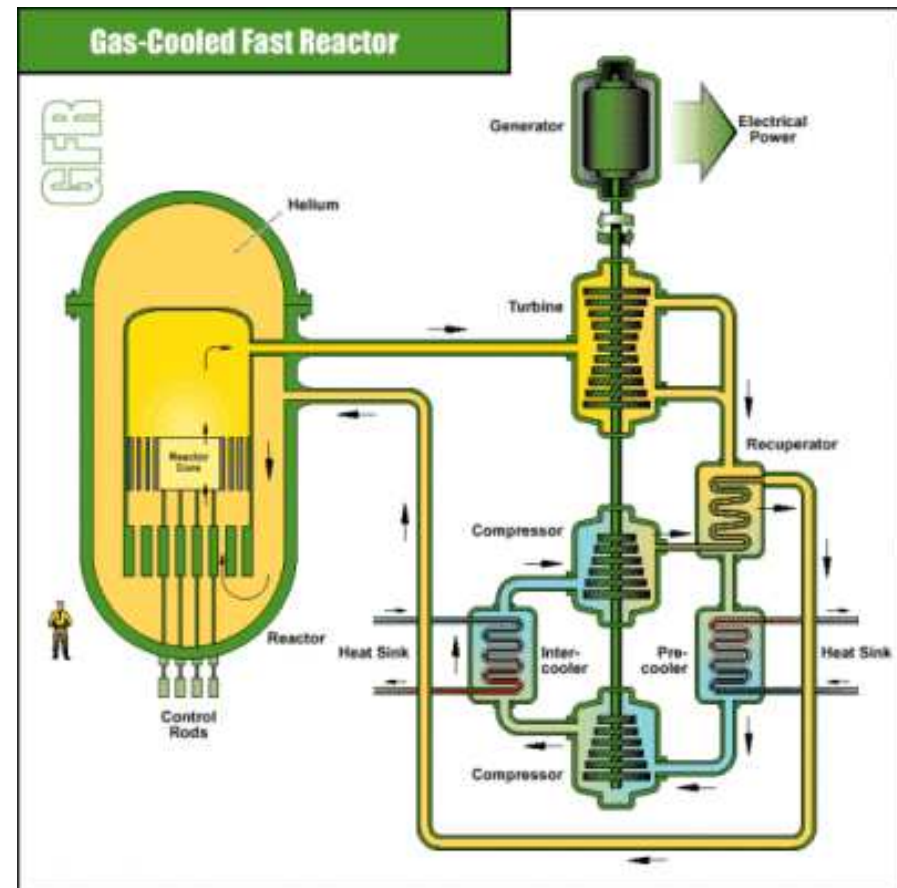
## Lead-cooled Fast Reactor (LFR)

- \* Nopea neutronispektri, Pb- tai PbBi-jäähdytys.
- \* Reaktorifysiikan ongelmat periaatteessa samoja kuin SFR-reaktorilla.
- \* Vähemmän käytännön kokemusta.
- \* Lyijyjäähdytteen aiheuttama korroosio.
- \* Lyijyn isotooppien vaikutusaloissa epävarmuuksia.



## Gas-cooled Fast Reactor (GFR)

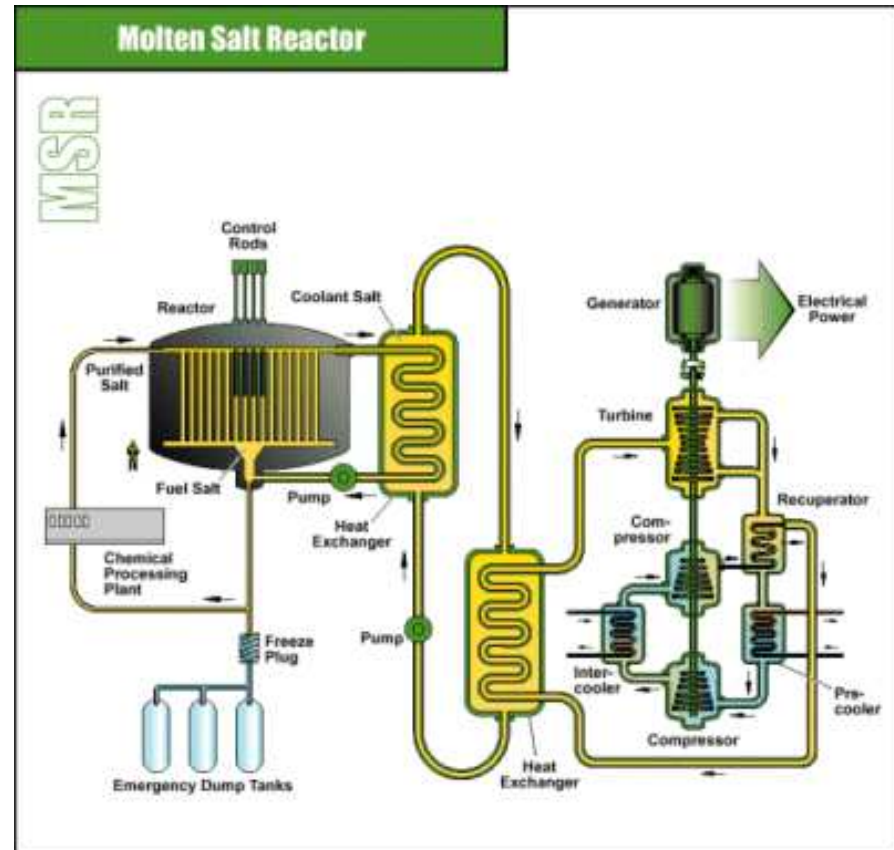
- \* Nopea neutronispektri, kaasujäähdytys.
- \* Korkean lämpötilan sovellukset.





## Molten Salt Reactor (MSR)

- \* Terminen neutronispektri, nestemäinen polttoaine.
- \* Eksoottisin kaikista GEN4-reaktorikonsepteista.
- \* Täysin erilaiset onnettomuuskenaariot.
- \* Mallinnuksen erityispiirteinä polttoaineen homogeenisuus ja jatkuva virtaus.



## Yhteenveto

- \* Neljännen sukupolven reaktoritekniikka poikkeaa oleellisesti nykyisestä LWR teknologiasta:
  - Kaasu- ja sulametallijäähdytteiset reaktorit
  - Suljettu polttoainekierto
  - Uudet sovelluskohteet
- \* Uusien reaktoryyppien mallinnukseen liittyy monia haasteita:
  - Esim. VTT:n nykyiset laskentakoodit soveltuvat lähinnä kevytvesireaktoreiden mallinnukseen. Muista reaktoryypeistä melko vähän kokemusta.
  - Monte Carlo -koodit soveltuvat periaatteessa myös Gen4-reaktoryyppien laskentaan. Käyttökohteet rajallisia.
  - Suljettu polttoainekierto tuo omat haasteensa reaktorifysiikan mallinnukseen.

**Kiitos mielenkiinnosta!**

Jaakko.Leppanen@vtt.fi