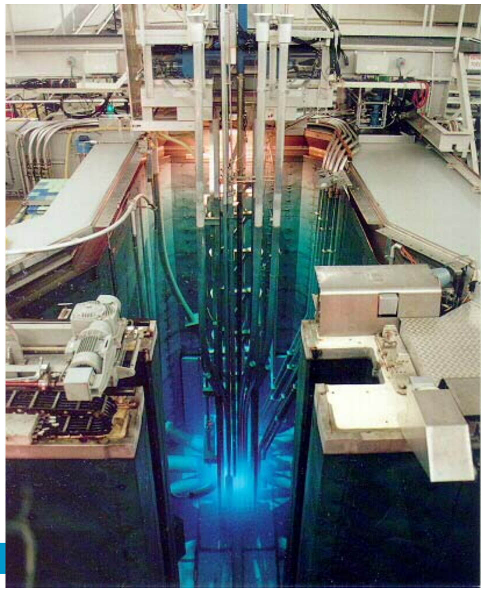
Innovatie in kernenergie

Jan Leen Kloosterman
Technische Universiteit Delft
Physics of Nuclear Reactors
www.janleenkloosterman.nl

Hoger Onderwijs Reactor

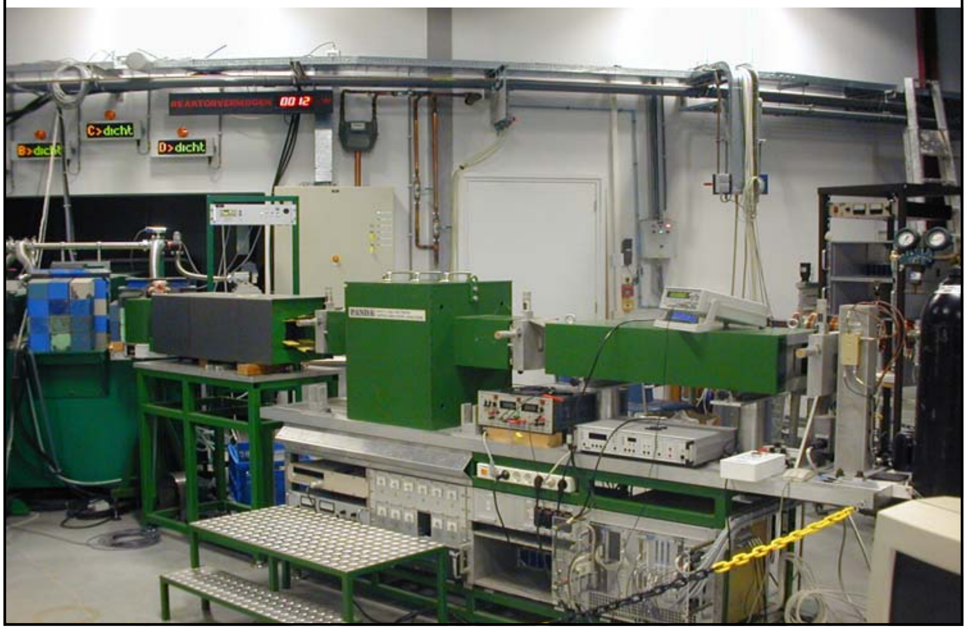


HHS, 12 april 2007 3

Physics of Nuclear Reactors

TU Delft

Experimentele opstellingen

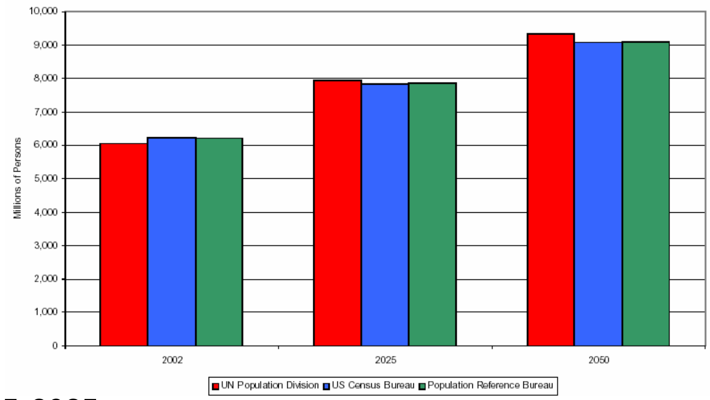


Indeling college

1) Mondiale energievraagstuk
2) Fysica kernsplijting
3) Afvalproductie kernsplijting
4) Werking van kerncentrales
5) Veiligheid van kerncentrales
6) Nieuwe kerncentrales
7) Nieuwe toepassingen

1. Mondiale energievraagstuk

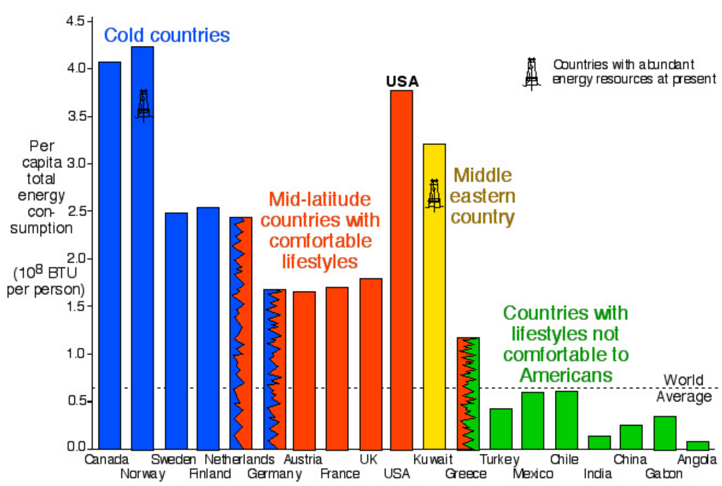
Voorspelling groei wereldbevolking



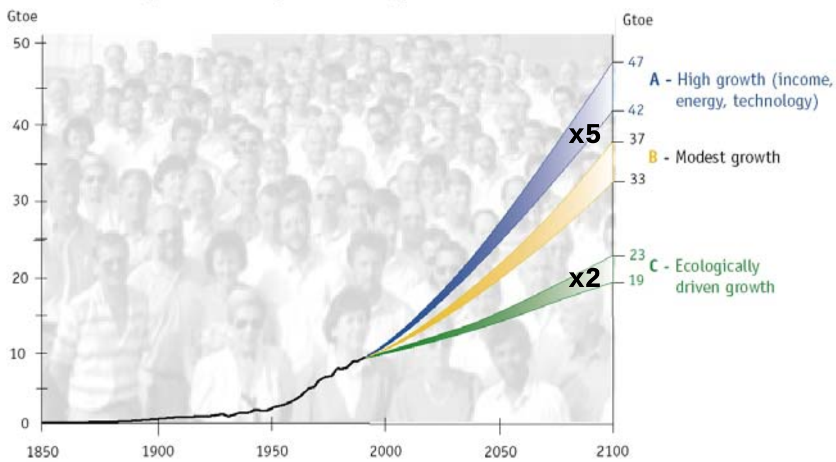
1995-2025:

India +400, China +260, Pakistan +130, Nigeria +130 miljoen inwoners!

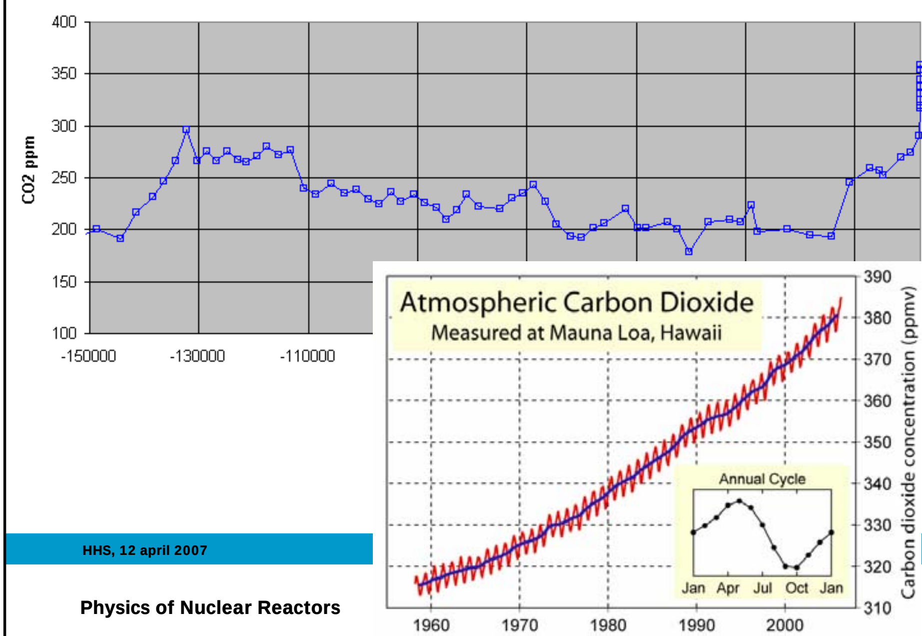
Energieverbruik per inwoner

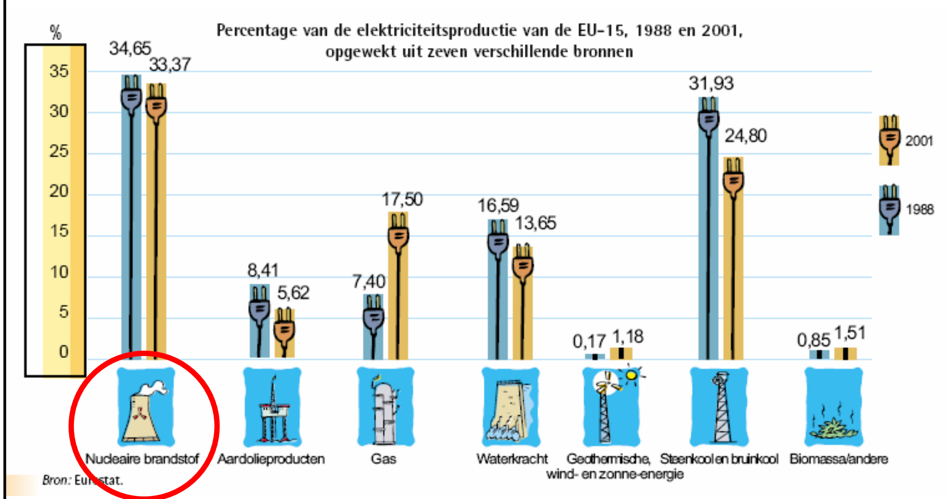


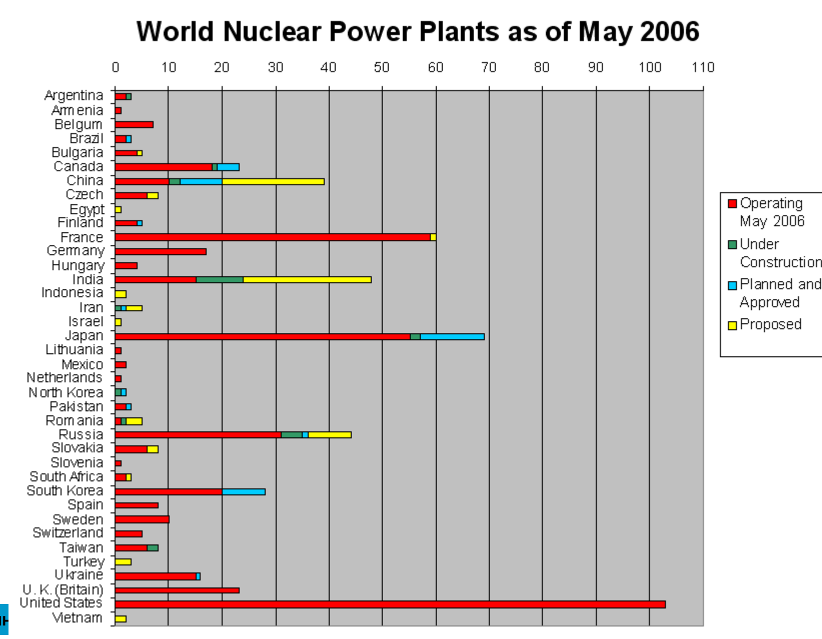
Voorspelling mondiaal energieverbruik



CO_2 concentratie in de atmosfeer





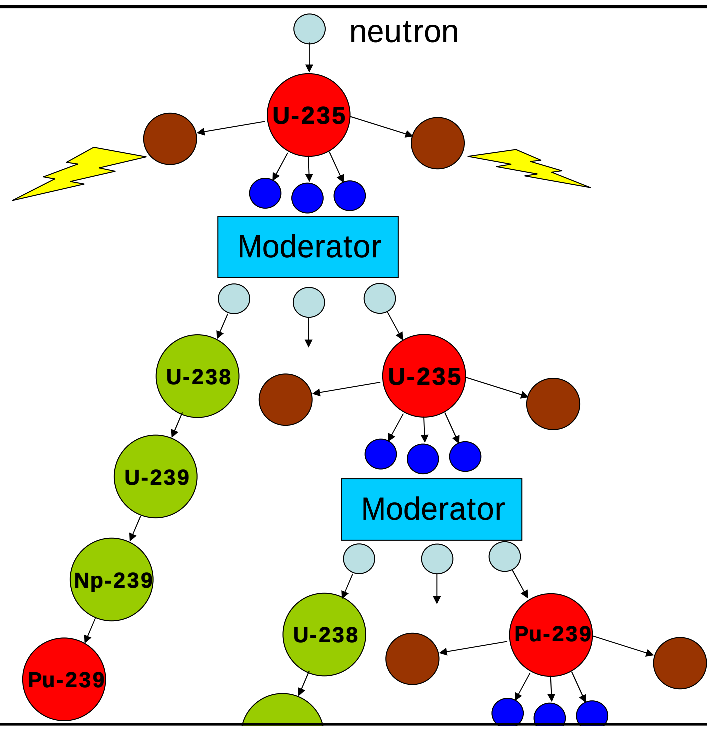


Physics of Nuclear Reactors

Conclusies energievraagstuk

- Mondiale energieverbruik groeit sterk door
  - Groei wereldbevolking
  - Groei energieverbruik per inwoner
- Circa 40% van energieverbruik wordt gedekt door olie.
- Naast zon, wind en waterkracht, vooral meer gas, kolen en kernenergie.
- Kernenergie goed voor 17% van electriciteitsproductie.
- Groei van kernenergie vooral in het Verre Oosten.

2. Fysica Kernsplijting



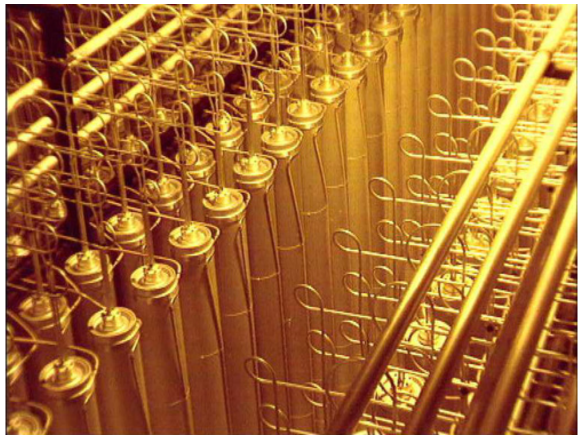
Splijtstofverrijking

96% U-238

4% U-235

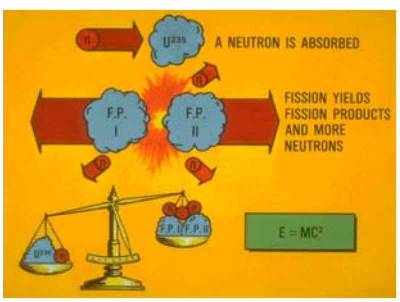
99,3% U-238

0,7% U-235



Ultracentrifuge fabriek in Almelo

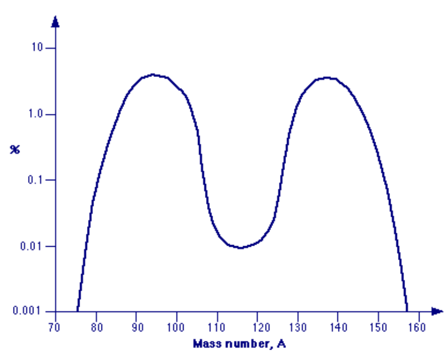
Vorming splijtingsprodukten



Meeste splijtingen produceren twee producten

Honderden splijtingsproducten

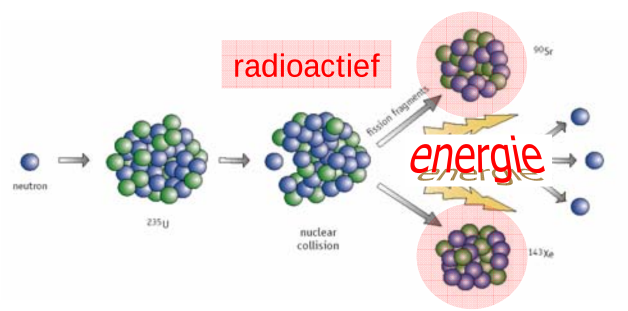
Inititiele snelheid 10,000 km/s



Energieverdeling bij kernsplijting

Energy Distribution (MeV)	
Kinetic energy of fission fragments	~ 165*
Energy of prompt gamma-rays	7*
KE of prompt neutrons	5
KE of beta-rays from fragments	7
E of gamma-rays from fragments	6
E of neutrinos from fragments	10
Total	~ 200

Kernsplijting

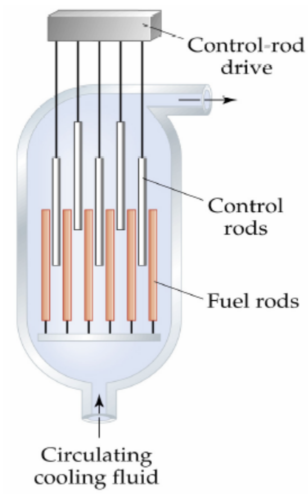


Splijting van 1 gram uranium levert evenveel energie als
het verbranden van 2500 liter benzine
of 3000 kilogram kolen

Wereldgebruik:

- 65.000 ton natuurlijk uranium per jaar (16% van de e-productie)
- 10.000.000 ton olie per dag

Schematische opbouw kerncentrales



Power reactors

Heat produced in the reactor core is removed by a cooling fluid to a steam generator and the steam drives an electric generator

Conclusies fysica kernsplijting

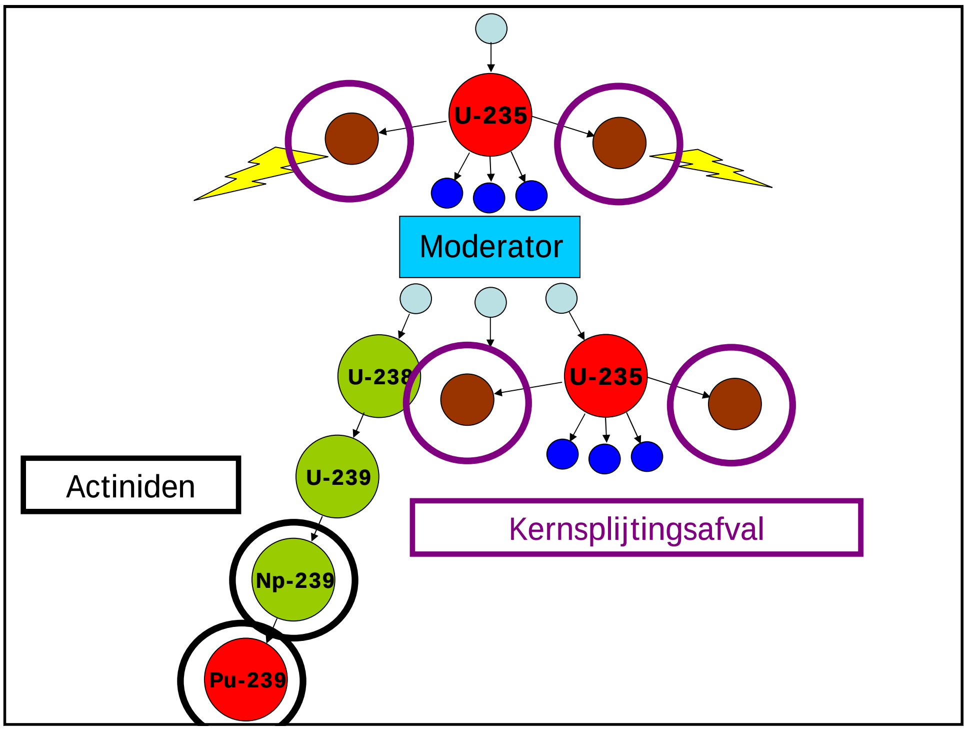
- Kernsplijting werkt het best met langzame neutronen.
- Een kernreactor heeft daarom een moderator nodig.
- Tijdens het kernsplijtingsproces ontstaan:
  - Splijtingsproducten
  - Energie (kinetische energie SP en straling)
  - Actiniden (Plutonium en Americium)
- Het teveel aan neutronen wordt weggevangen in regelstaven.
- Een kerncentrale werkt met licht-verrijkt (<5%) uranium.

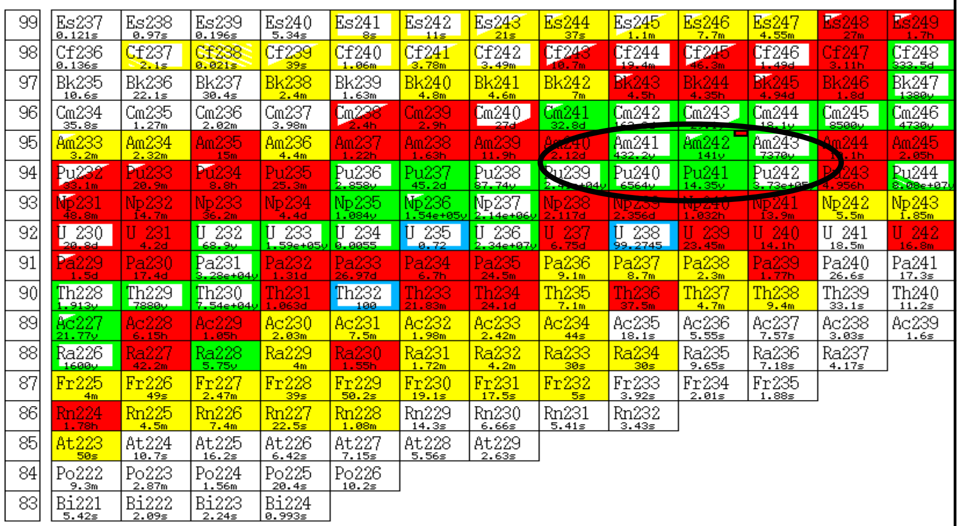
3. Afvalproductie kernsplijting

HHS, 12 april 2007 23

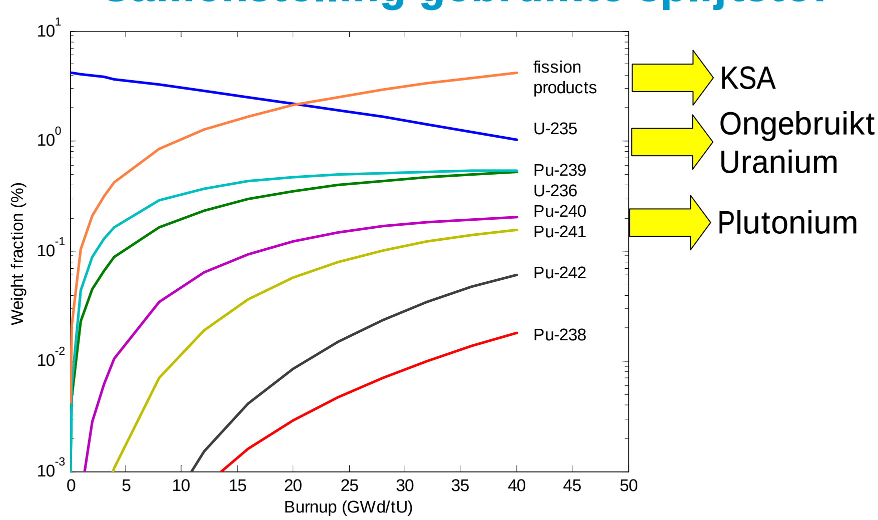
Physics of Nuclear Reactors

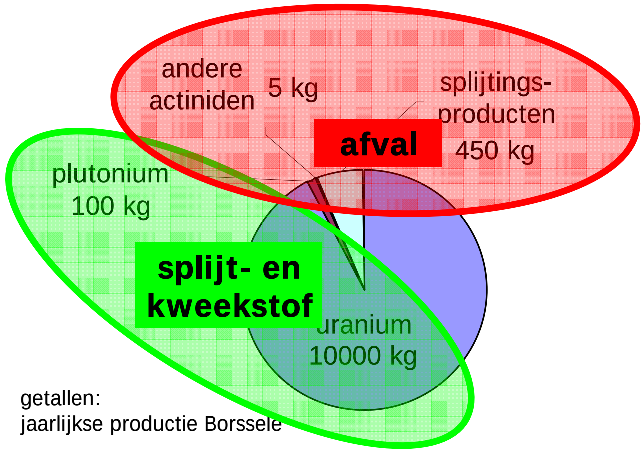
TU Delft



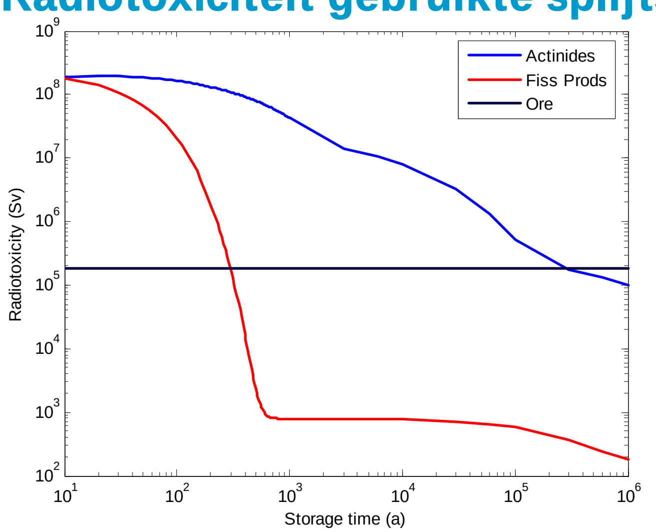


Samenstelling gebruikte splijtstof

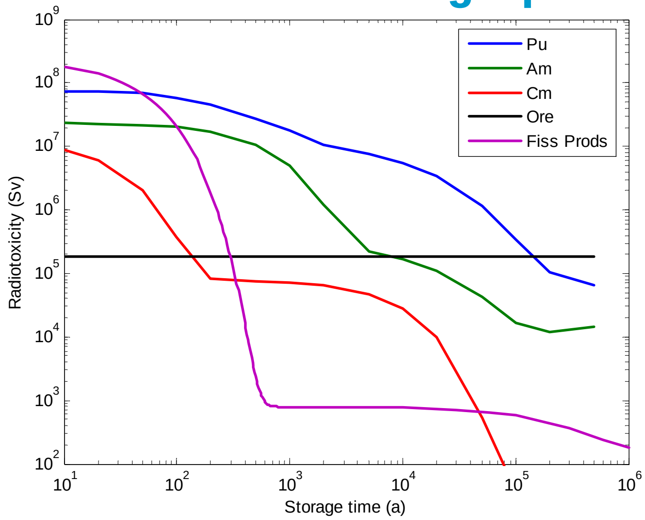




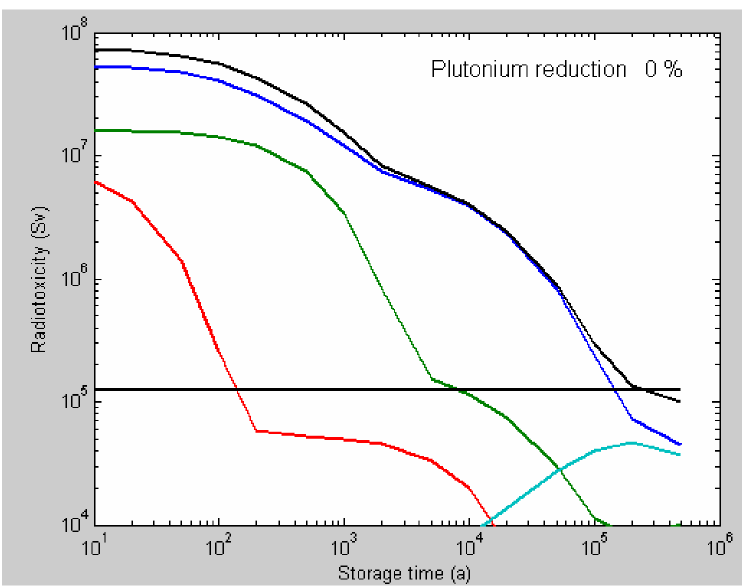
Radiotoxiciteit gebruikte splijtstof



Radiotoxiciteit uitgesplitst

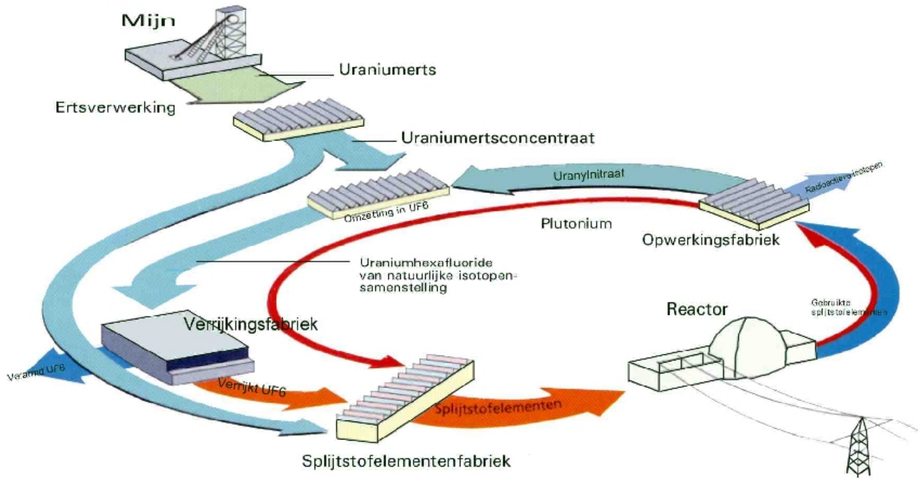


TUDelft



TUDelft

Splijtstofcyclus

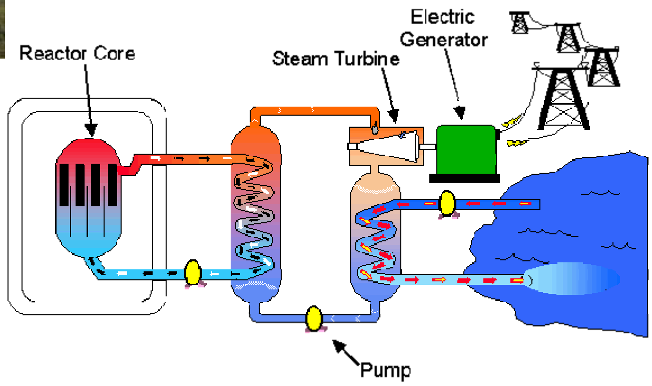


Conclusies afvalproductie

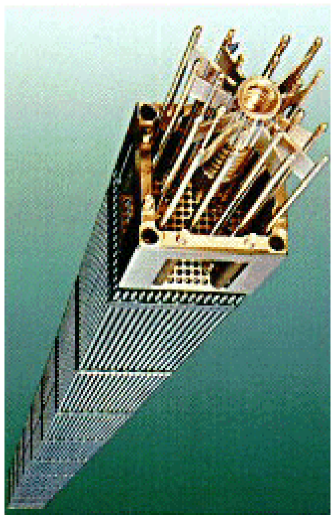
- Gebruikte splijtstof bestaat uit
  - Splijtingsproducten (450 kg)
  - Ongebruikt Uranium (10000 kg)
  - Plutonium en Americium (100+5 kg)
- Splijtingsproducten zijn na 250 jaar onschadelijk.
- Americum is na circa 5000 jaar onschadelijk.
- Plutonium is voornamelijk bruikbare splijtstof.
- ‘Borssele’ genereert 1,3 m^3 hoog-radioactief afval per jaar (verglaasd en al) $\Rightarrow$ 2 cm^3 per inwoner als alle electriciteit met kernenergie zou worden opgewekt.
- Hoe sterker afval straalt, hoe sneller het is uitgewerkt.

4. Werking van kerncentrales

Werking van een drukwaterreactor (PWR)



Splijtstofelement van een PWR

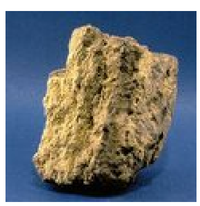


HHS, 12 april 2007 35

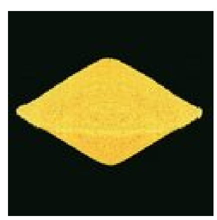
Physics of Nuclear Reactors

TUDelft

Splijtstoffabricage



Uranium erts



'Yellow cake'

UF6 gas

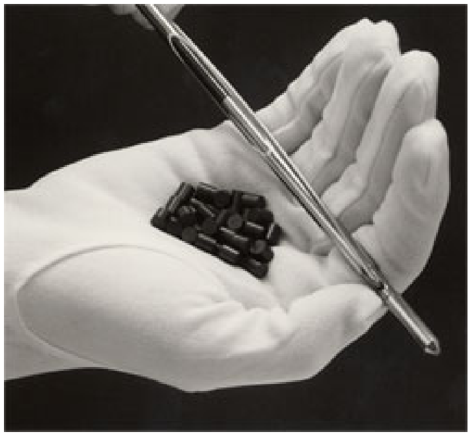
UO2 tabletten

HHS, 12 april 2007 36

Physics of Nuclear Reactors

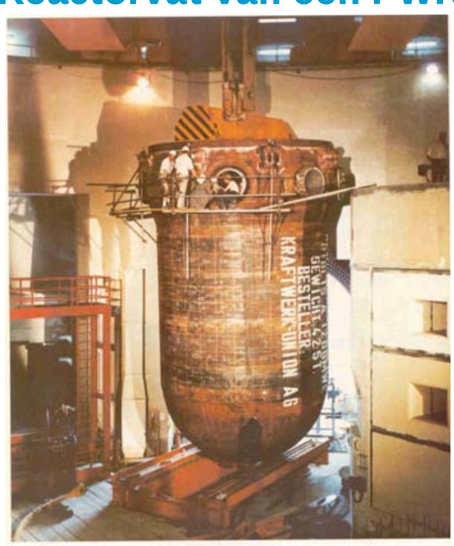
TUDelft

Splijtstoftabletten

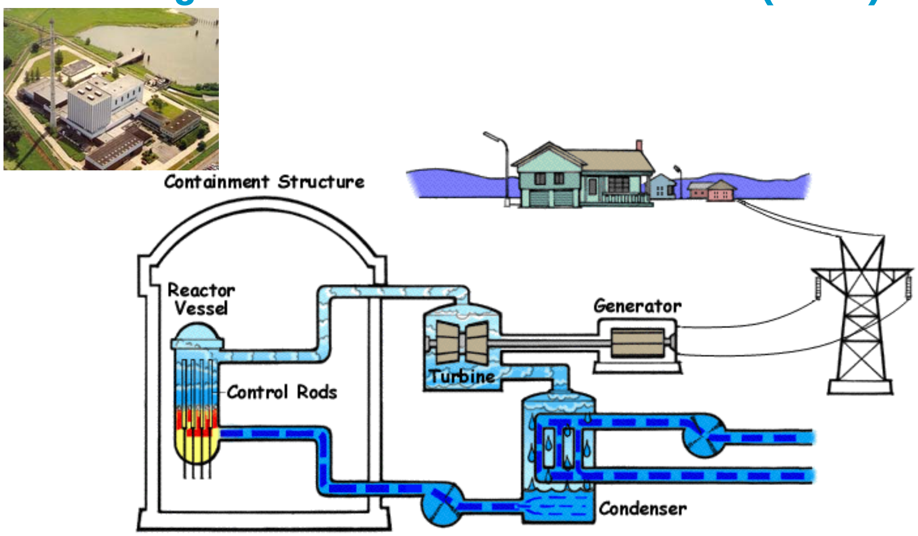


twee tabletten genoeg voor alle electriciteit per gezin gedurende een jaar!

Reactorvat van een PWR



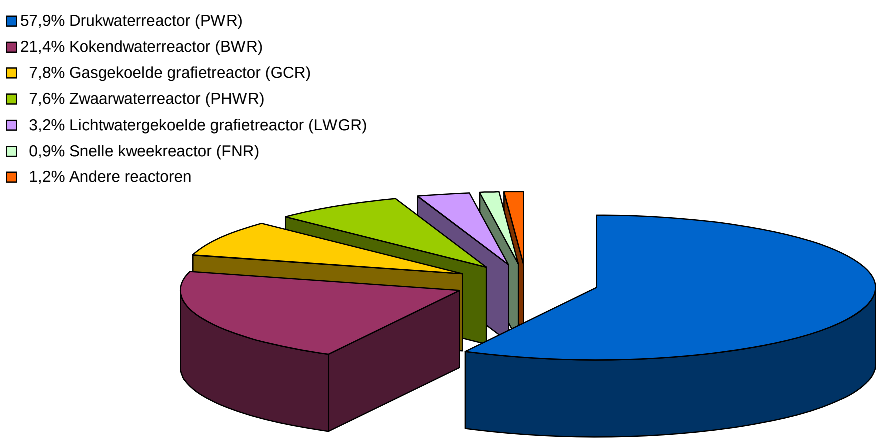
Werking van een kokendwaterreactor (BWR)



In bedrijf zijnde commerciële vermogensreactoren in 2000

(bron: Nuclear Engineering International Handbook 2000)

Totaal vermogen: 364 GWe

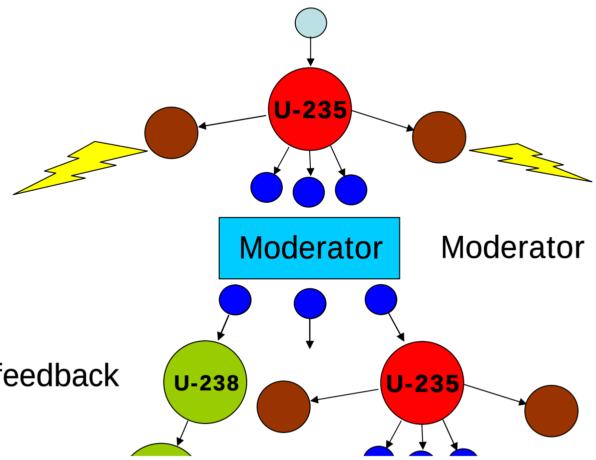


Conclusies werking kerncentrales

- De reactorkern levert warmte die wordt omgezet in stoom.
- Deze stoom drijft een turbine aan die is gekoppeld aan een generator.
- Het nucleaire deel is slechts een klein deel van een centrale. Het grootste deel is conventioneel.
- Het rendement van een kerncentrale is circa 35%.

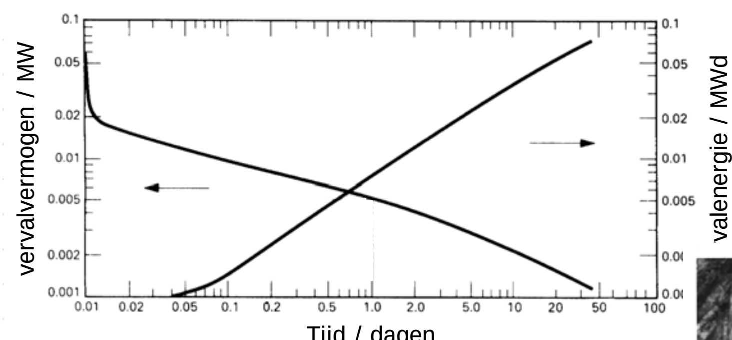
5. Veiligheid van kerncentrales

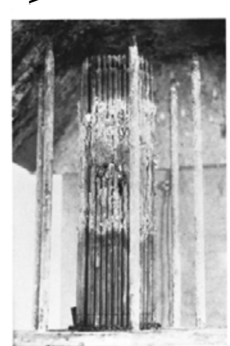
Inherent veilige terugkoppeleffecten



1) stabiel systeem (zelfregeling)
2) verlies van koelcapaciteit schakelt de reactor af
3) verlies van moderatie schakelt de reactor af

Vervalwarmte productie

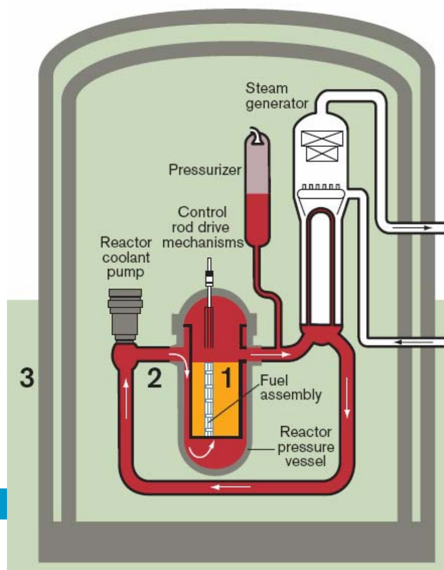


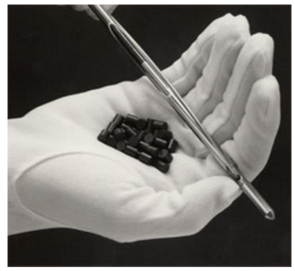


koeling noodzakelijk na afschakeling

Veiligheid van kerncentrales

meerdere barrières om radioactief materiaal binnen te houden





1 Splijtstof (tablet en bekleding)
2 Primair systeem (staal)
3 Veiligheidsomhulling (2x beton + staal)

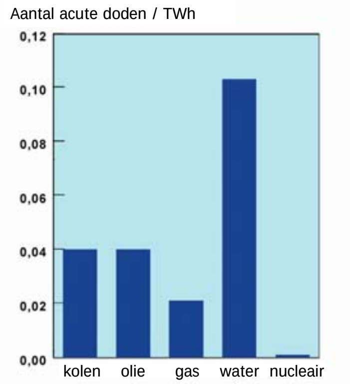
TU Delft

Kerncentrale

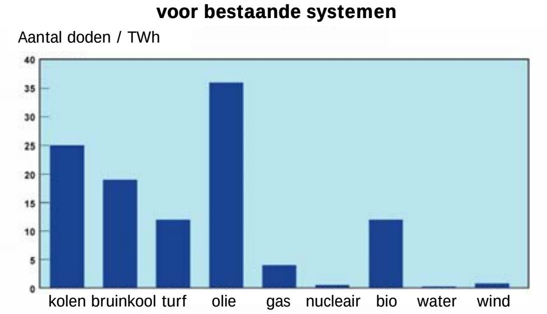
TU Delft

Groepsrisico's energievoorziening

30 jaar mondiale historie



EU: totaal aantal doden (schatting) voor bestaande systemen



Nederland: 100 TWh_e / jaar

wereld: 16.000 TWh_e / jaar

Conclusies veiligheid kerncentrales

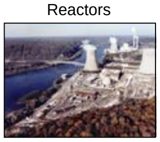
- Alle Westerse kerncentrales zijn ontworpen met inherent veilige vermogensterugkoppeling.
- De reactorkern van een centrale moet altijd worden gekoeld, ook als de kettingreactie is gestopt.
- Moderne kerncentrales bevatten minder actieve componenten en zeer ruime veiligheidsmarges.
- Het aantal slachtoffers t.g.v. kernenergie is verwaarloosbaar klein.
- Het risico van kerncentrales is veel kleiner dan alledaagse activiteiten als autorijden, vliegen, etc.

6. Nieuwe kerncentrales

Generaties kerncentrales

Generation I

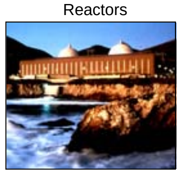
Early Prototype Reactors



- Shippingport
- Dresden, Fermi I
- Magnox

Generation II

Commercial Power Reactors



- LWR-PWR, BWR
- CANDU
- VVER/RBMK

Generation III

Advanced LWRs

- ABWR
- System 80+
- AP600
- EPR

Evolutionary Designs Offering Improved Economics

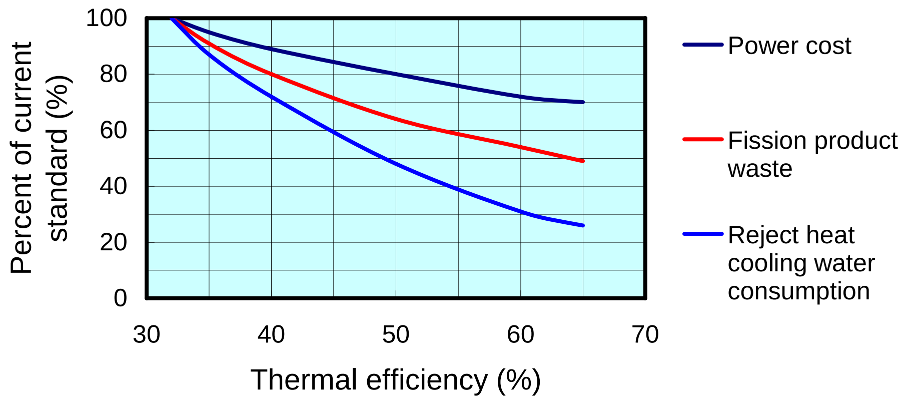
Generation IV

- Highly Economical
- Enhanced Safety
- Minimal Waste
- Proliferation Resistant

Gen I | Gen II | Gen III | Gen IV

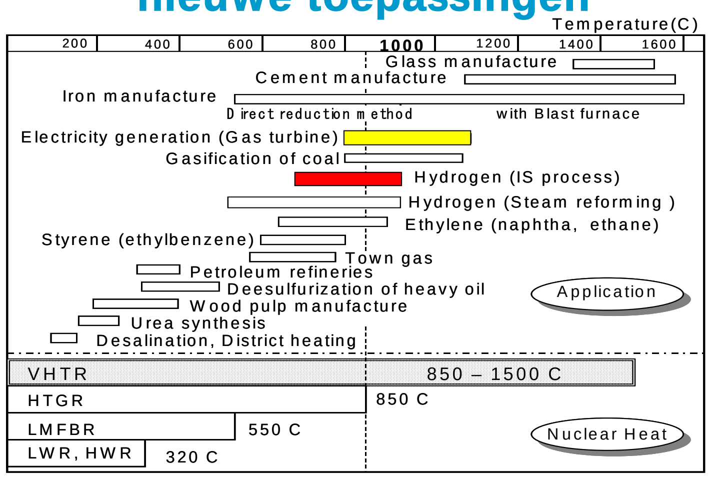
1950 1960 1970 1980 1990 2000 2010 2020 2030

Hogere temperaturen: hogere efficiency



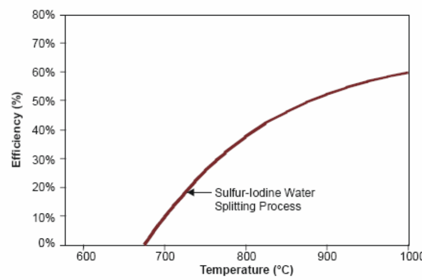
TU Delft

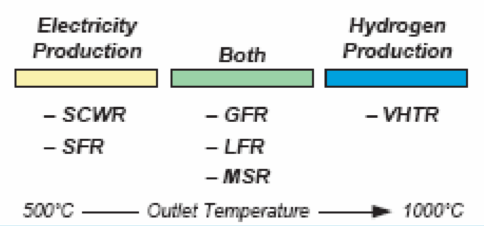
Hogere temperaturen: nieuwe toepassingen



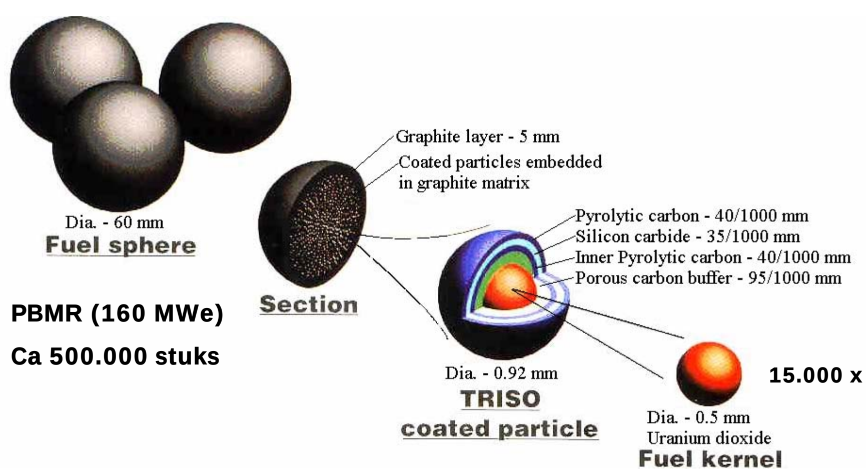
TU Delft

Hogere temperaturen: waterstofproduktie





HTR Splijtstofbollen

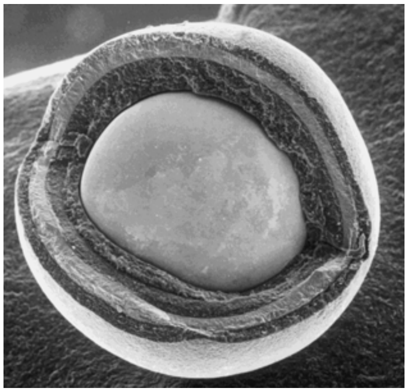


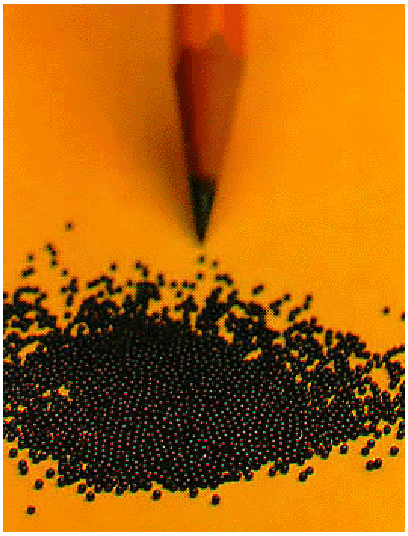
PBMR (160 MWe)

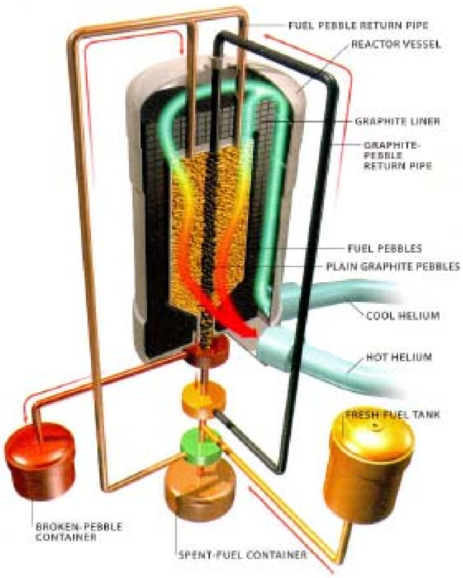
Ca 500.000 stuks

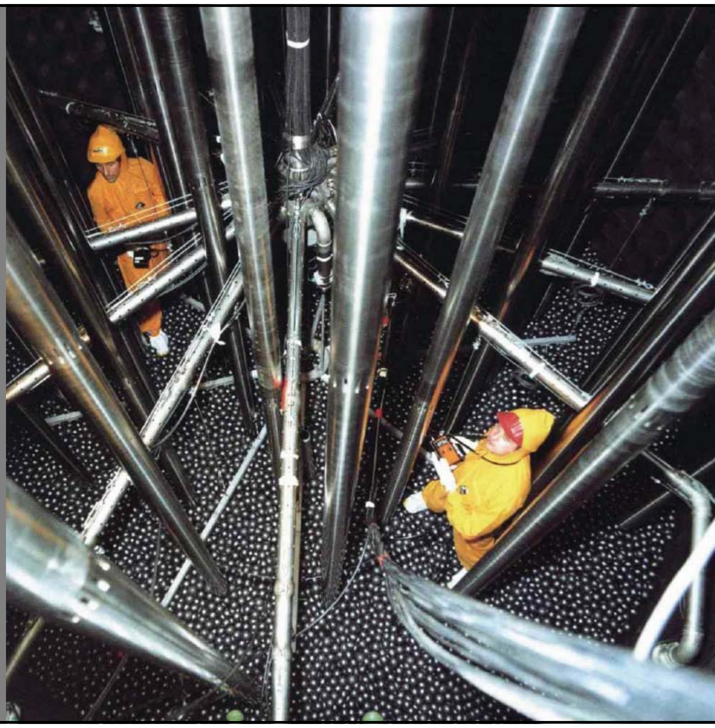
15.000 x

Splijtstof van een HTR







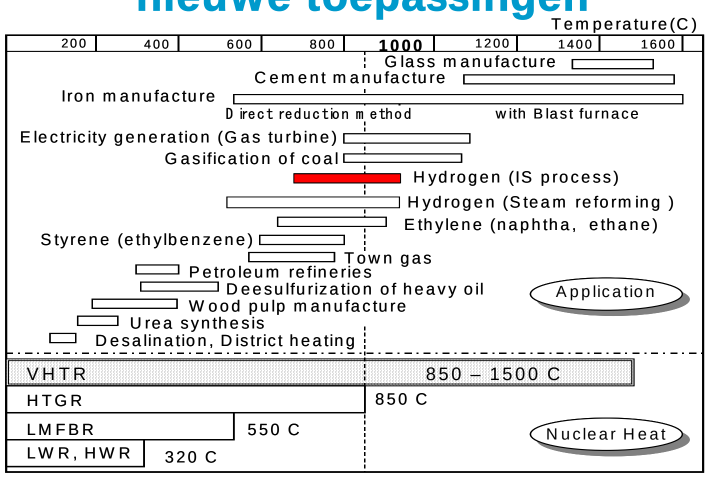


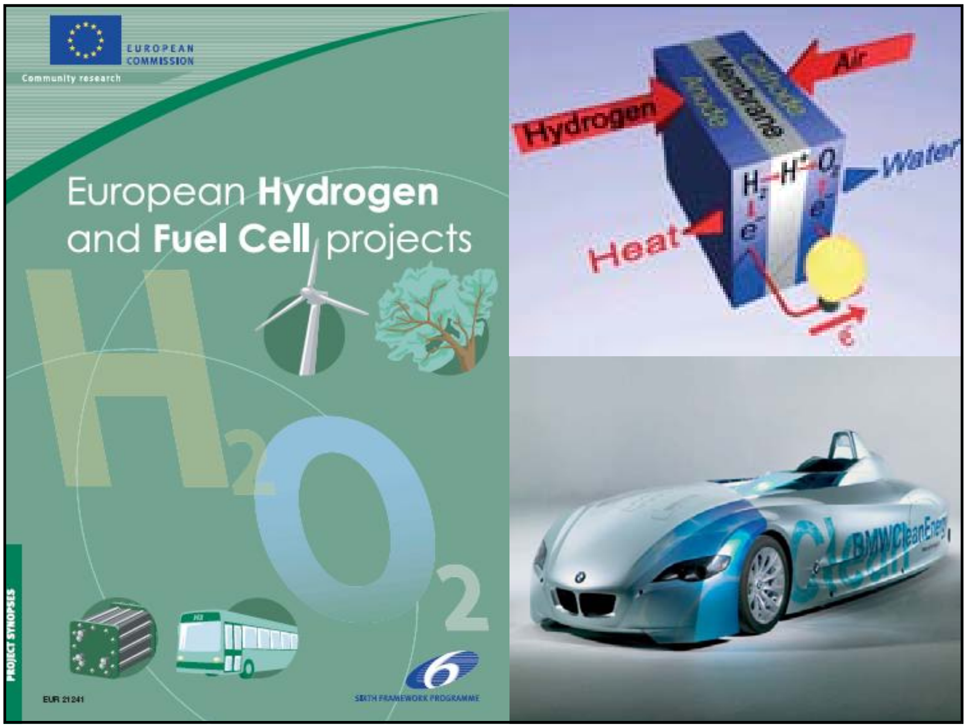
Conclusies nieuwe kerncentrales

- Onderzoek wordt gedaan naar nieuwe kerncentrales die uitblinken op het gebied van veiligheid, economie, duurzaamheid en non-proliferatie.
- Hogere koelmiddeltemperatuur leidt tot meer efficiency, minder afvalproductie, lagere kosten en nieuwe toepassingen.
- Een veelbelovende centrale is de VHTR, die zowel electriciteit als waterstof kan produceren.

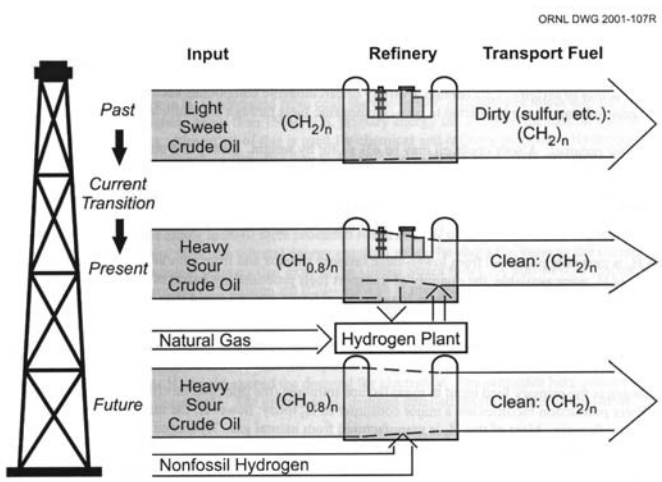
7. Nieuwe toepassingen

Hogere temperaturen: nieuwe toepassingen

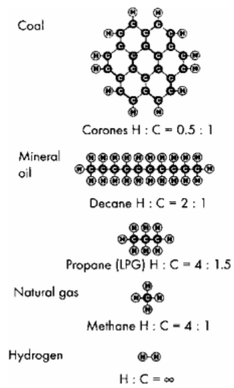


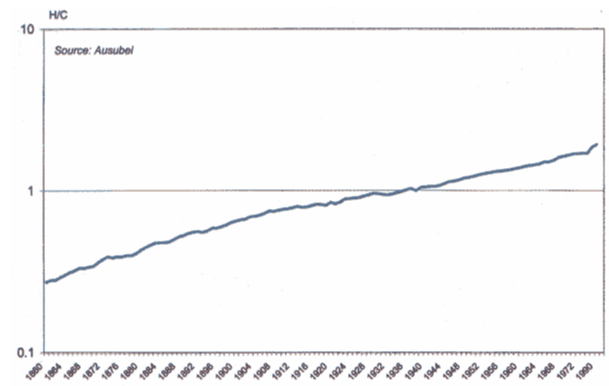


Waterstof-koolstof verhouding fossiel



Waterstof-koolstof verhouding fossiel



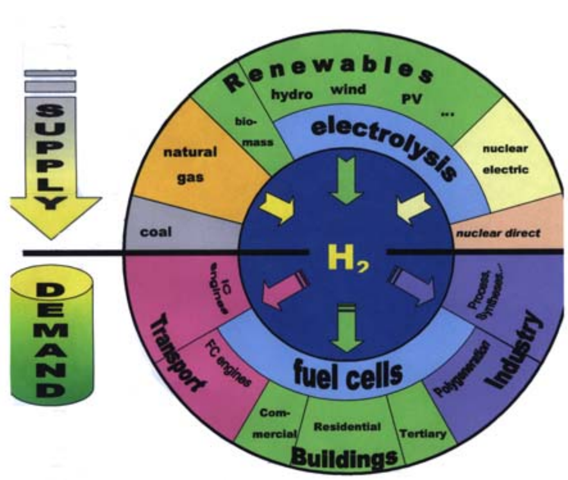


HHS, 12 april 2007 63

Physics of Nuclear Reactors / Reactor Instituut

TU Delft

Waterstof: productie en gebruik



HHS, 12 april 2007 64

Physics of Nuclear Reactors / Reactor Instituut

TU Delft

Thermo-chemische watersplitsing

$$H_2O + X \rightarrow XO + H_2$$

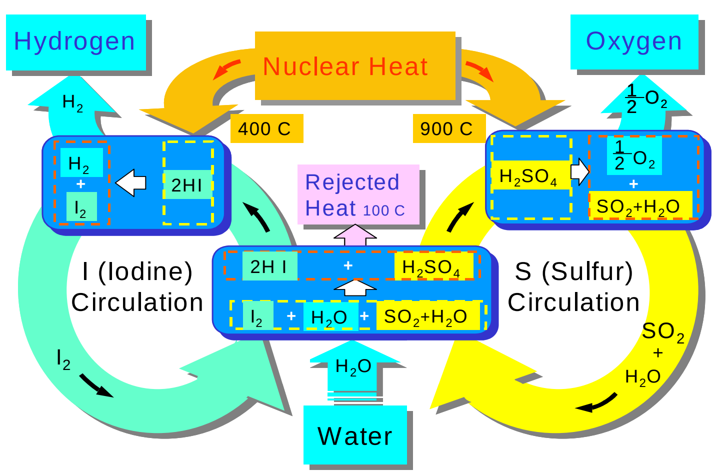
$$2XO \rightarrow 2X + O_2$$

HHS, 12 april 2007 65

Physics of Nuclear Reactors

TU Delft

S-I thermo-chemisch proces



HHS, 12 april 2007 66

Physics of Nuclear Reactors

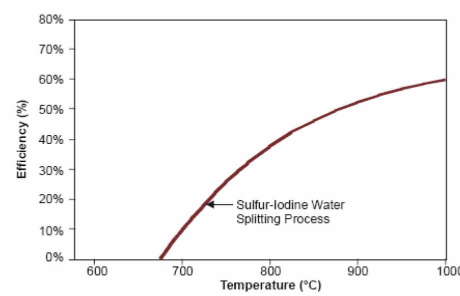
TU Delft

S-I thermochemisch proces

$$2H_2O + SO_2 + I_2 \rightarrow H_2SO_4 + HI$$

$$H_2SO_4 \rightarrow H_2O + SO_2 + O_2$$

$$2HI \rightarrow H_2 + I_2$$



It's there...

Conclusies nieuwe toepassingen

- Mogen jullie onderzoeken!
- Meer informatie: www.janleenkloosterman.nl

Vragen:

- Welke transportscenarios zijn mogelijk (waterstof, methanol, electriciteit, etc)?
- Hoeveel waterstof is nodig voor elk scenario?
- Welke manieren zijn er om waterstof te produceren?
- Wat zijn de produktiekosten?
- Wat is de resulterende prijs per km?
- ...