

# Kernenergie

## Basistechniek van een kerncentrale



Stichting **KernVisie**  
EEN ENERGIEK INITIATIEF

World of Technology & Science 2022

Jan van Cappelle

28 september 2022

# Stichting KernVisie

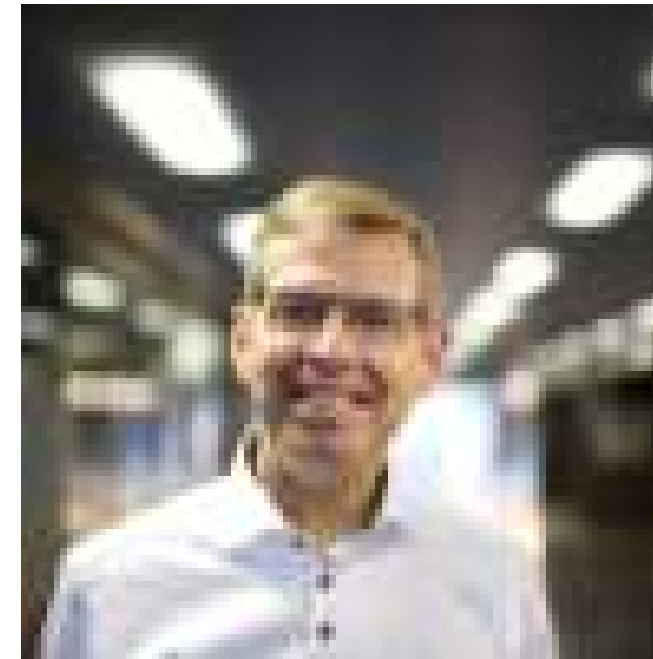
De ANBI-stichting KernVisie zet zich in om gedegen, begrijpelijke en tevens betrouwbare informatie te verstrekken over de toepassing van kerntechniek voor energie, milieu en gezondheid. Nederland speelt internationaal op een aantal gebieden van deze technologie een belangrijke rol. Zo is het 's werelds grootste leverancier van medische isotopen, een belangrijke ontwikkelaar van nieuwe medische isotopen voor de bestrijding van kanker en een bekende producent van brandstof voor kerncentrales.

Meer weten? Kijk op [www.kernvisie.com](http://www.kernvisie.com)

Hier vindt u ook ons tweemaandelijks Magazine Kernvisie

Contact: [info@kernvisie.com](mailto:info@kernvisie.com)

# Jan van Cappelle



Getrouwd, 4 kinderen, 4 kleinkinderen.

Hobby's: zweefvliegen, tennissen, fietsen.

Technische Universiteit Delft, Elektrotechniek in de richting modelvorming en simulatie.

In 1993 begonnen bij de Kerncentrale Borssele. Werkterreinen o.a. conceptueel ontwerp, veiligheidsanalyses, ontwerpbeheer en bedrijfsvoering. Als Hoofd van de Kerncentrale verantwoordelijk geweest voor nucleaire veiligheid en incidentbestrijding. Woordvoerder.

Lid van het bestuur van KernVisie





# Stichting KernVisie

Foundation for Nuclear Technology

- website [www.kernvisie.com](http://www.kernvisie.com)
- wekelijkse nieuwsbrief
- tweemaandelijke magazine KernVisie
- geven van lezingen en gastcolleges
- organiseren van symposia



Vaste thema's:

- Energie
- Geneeskunde
- Milieu
- Innovatie



# KERNENERGIE

## Basistechniek van een kerncentrale

Biedt kernenergie perspectief voor de Nederlandse industrie en kenniscentra?

## WAT ZIT ER VOOR ÒNS IN?



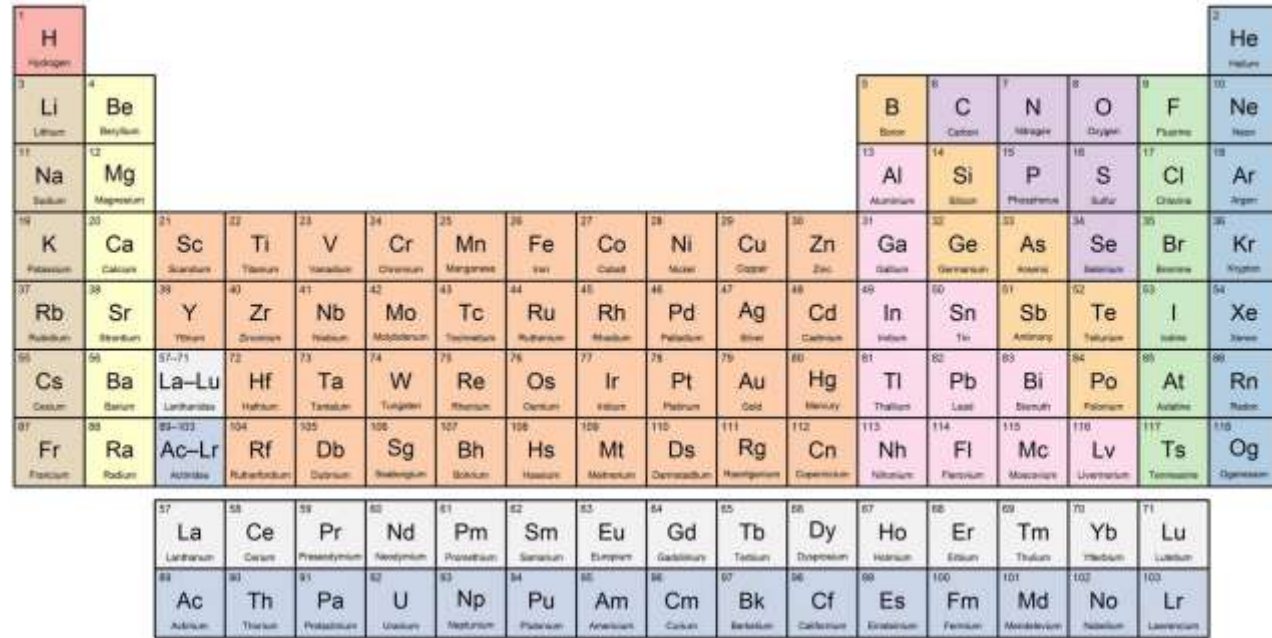


# Nucleaire technologie in Nederland

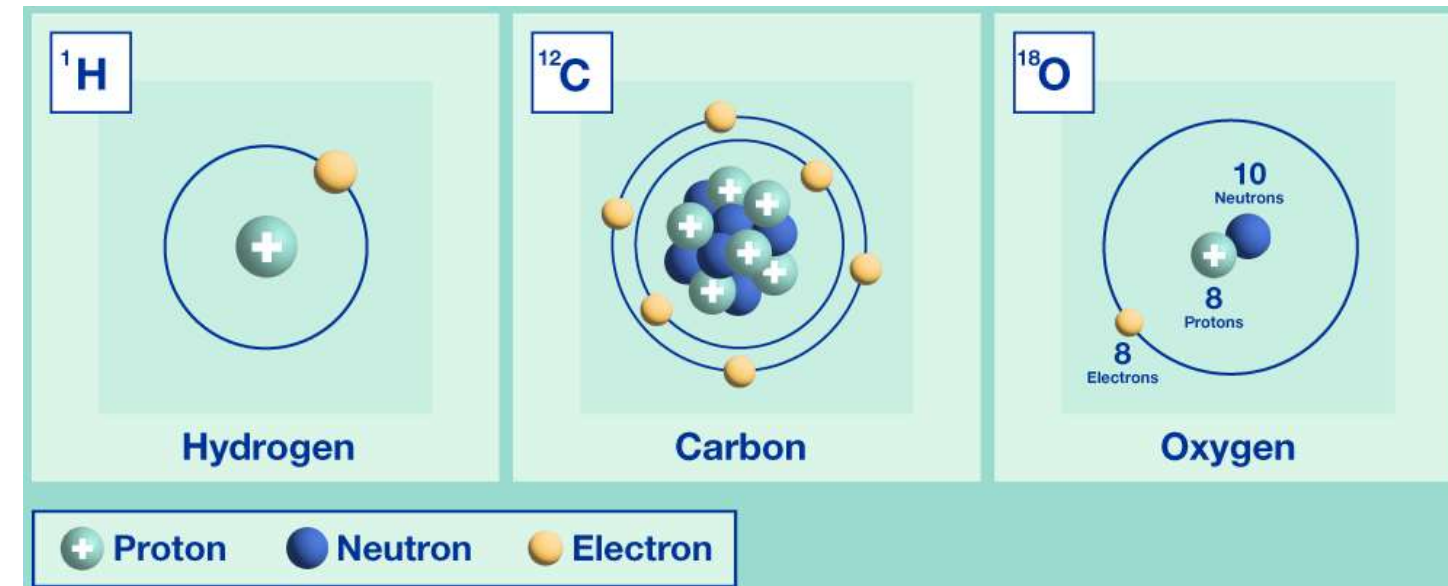


# Werking van een kerncentrale

De basis: elementen, atomen en isotopen



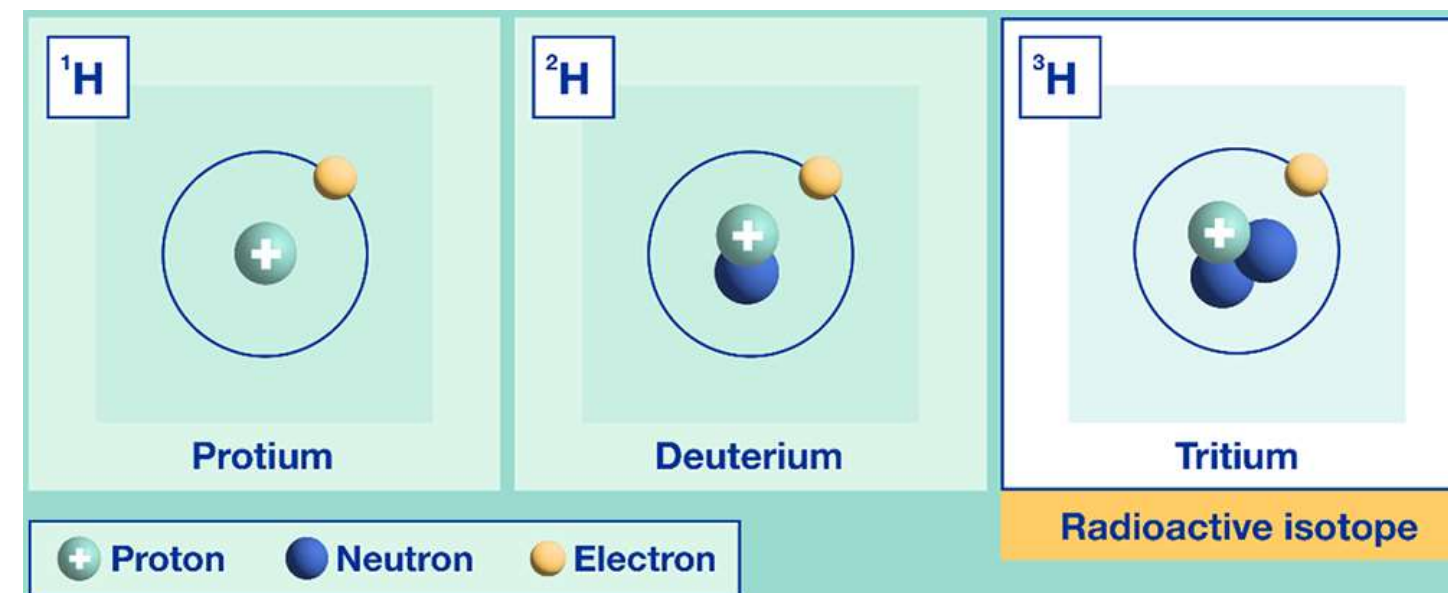
A standard periodic table of elements, color-coded by groups. It includes all elements from Hydrogen (H) to Oganesson (Og).



Isotopen zijn atomen van hetzelfde chemische element, en dus met hetzelfde aantal protonen, waarin de aantallen neutronen in de atoomkern, en daarmee de massa van het atoom, verschillend zijn.

Een chemisch element is een stof wat met scheikundige middelen niet verder kan worden gesplitst. Het wordt gekenmerkt door het aantal protonen in de kern van het element.

Atomen zijn de bouwstenen van een chemisch element, het heeft alle scheikundige eigenschappen van dat element.





# Werking van een kerncentrale

De basis: isotopen, verval, halveringstijd, radioactiviteit en ioniserende straling

Atomen 'neigen' naar een minimale energie-inhoud en willen graag 'overtollige' energie lozen.

**Stabiele isotopen** hebben geen 'overtollige' energie.

**Instabiele isotopen** moeten veranderen om (een deel) van hun 'overtollige' energie kwijt te raken.

**Radioactiviteit** is het natuurlijke proces waarbij **instabiele isotopen** spontaan **vervallen** naar stabiele(re) vormen. Daarbij zenden ze energie uit in de vorm van deeltjes en **ioniserende** ('radioactieve') **straling**.

De **halveringstijd** van een **isotoop** is de tijd waarin nog de helft van het oorspronkelijke aantal van dat isotoop over is..

Enkele **halveringstijden** van in de natuur voorkomende isotopen:

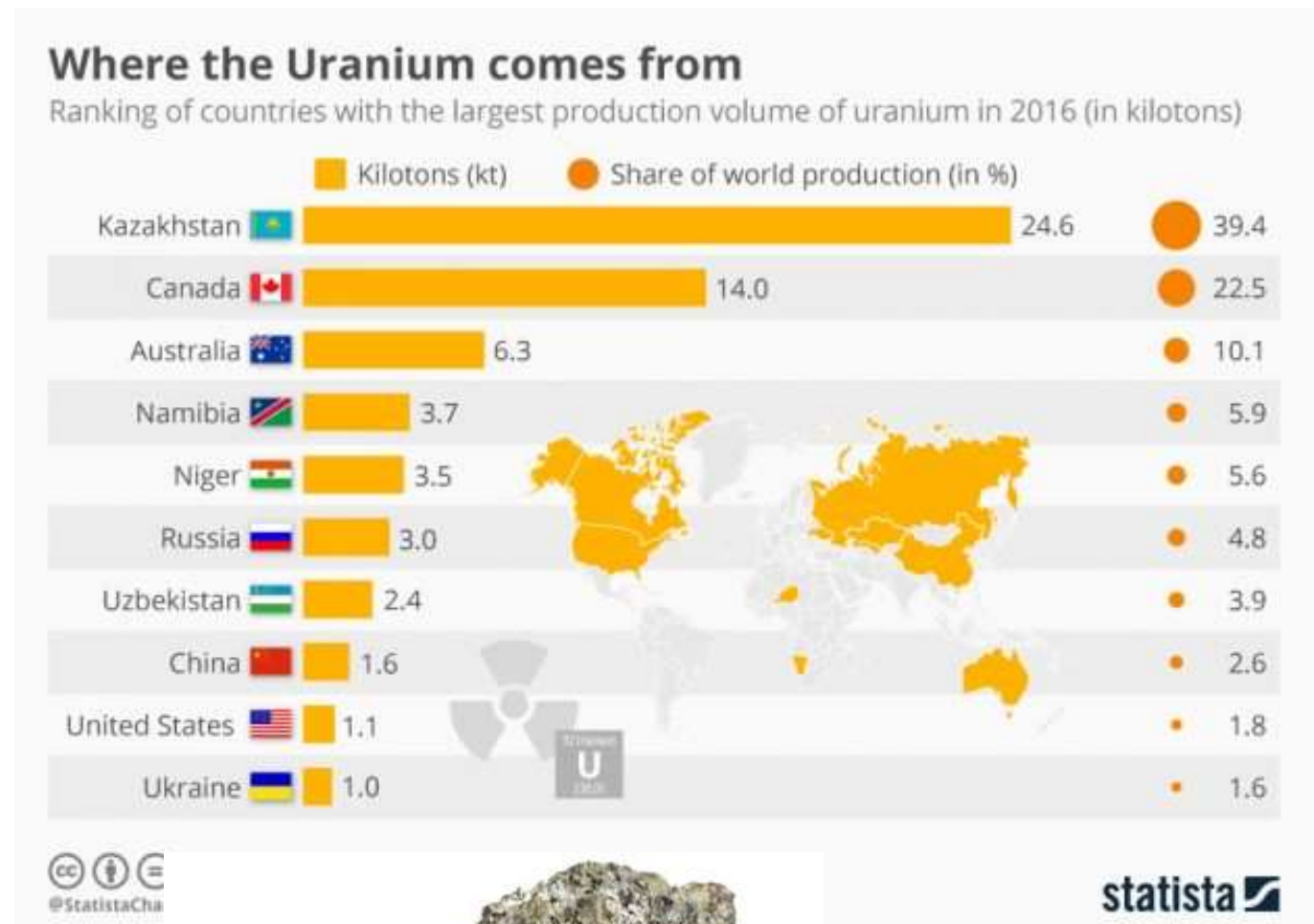
${}^3_2\text{H}$	(tritium)	$\rightarrow {}^2_2\text{He}$	12,26 jaar
${}^{14}_6\text{C}$	(koolstof-14)	$\rightarrow {}^{14}_7\text{N}$	5730 jaar
${}^{239}_{94}\text{Pu}$	(Plutonium-239)	$\rightarrow {}^{234}_{92}\text{U}$	24 duizend jaar
${}^{235}_{92}\text{U}$	(Uranium-235)	$\rightarrow {}^{231}_{90}\text{Th}$	704 miljoen jaar
${}^{238}_{92}\text{U}$	(Uranium-238)	$\rightarrow {}^{234}_{90}\text{Th}$	4,5 miljard jaar



# Werking van een kerncentrale

## Wat feiten over Uranium

- Het is het zwaarste element wat in de natuur voorkomt
- Natuurlijk Uranium bevat ca. 0,72% van het splijtbare U235, de rest is U238. Voor splijtstofelementen wordt het Uranium verrijkt tot 4 à 5% U235 (URENCO). Voor de meeste centrales bevat een splijtstofelement ca. 4% U235 en 96% U238
- U238 is licht radioactief, met een halfwaardetijd van bijna 5.000.000.000 jaar
- De marktprijs bepaalt de 'beschikbare' hoeveelheid winbaar Uranium: een hogere prijs betekent dat het aanboren van moeilijker te winnen Uranium lonend wordt
- De kostprijs van Uranium heeft weinig invloed op de kostprijs van een MWh





# Werking van een kerncentrale

## Kernsplijting: wat is dat?



De totale massa van de splijtingsproducten en de nieuwe neutronen is kleiner dan de totale massa van het U235-atoom en de oude neutron.

Er is dus massa verloren gegaan!

$$E = m \cdot c^2$$

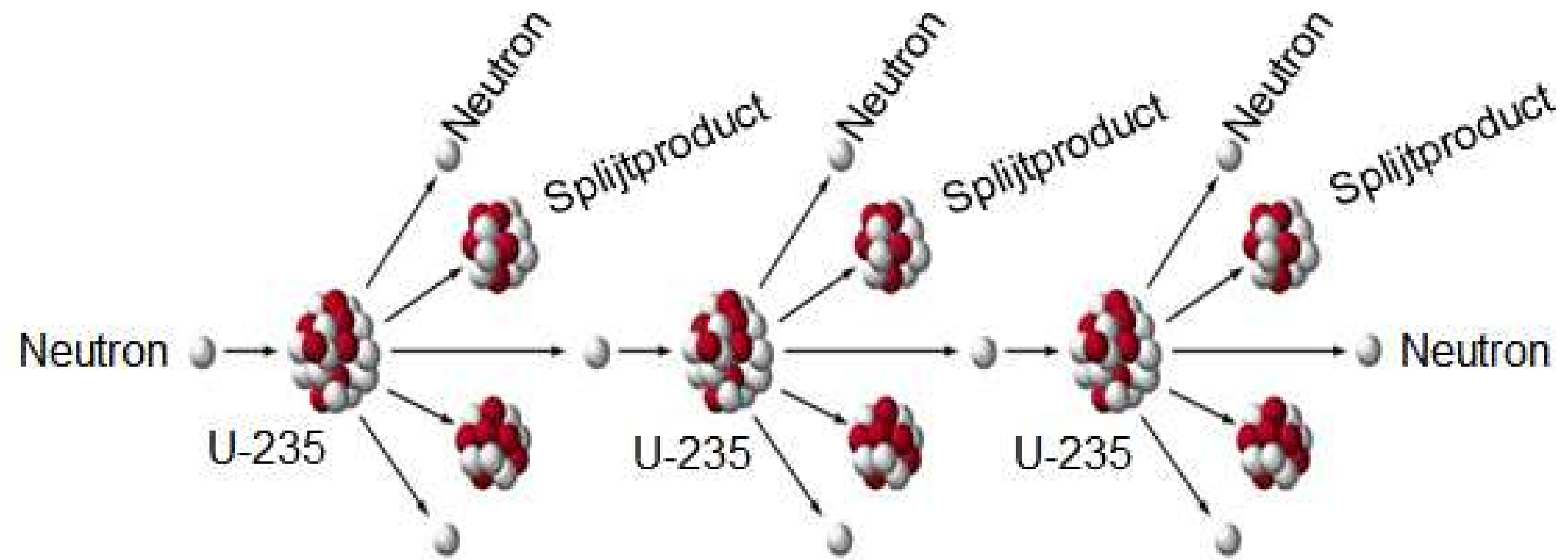
Massa is omgezet naar energie!



# Werking van een kerncentrale

Kernsplijting: wat is dat?

Kettingreactie

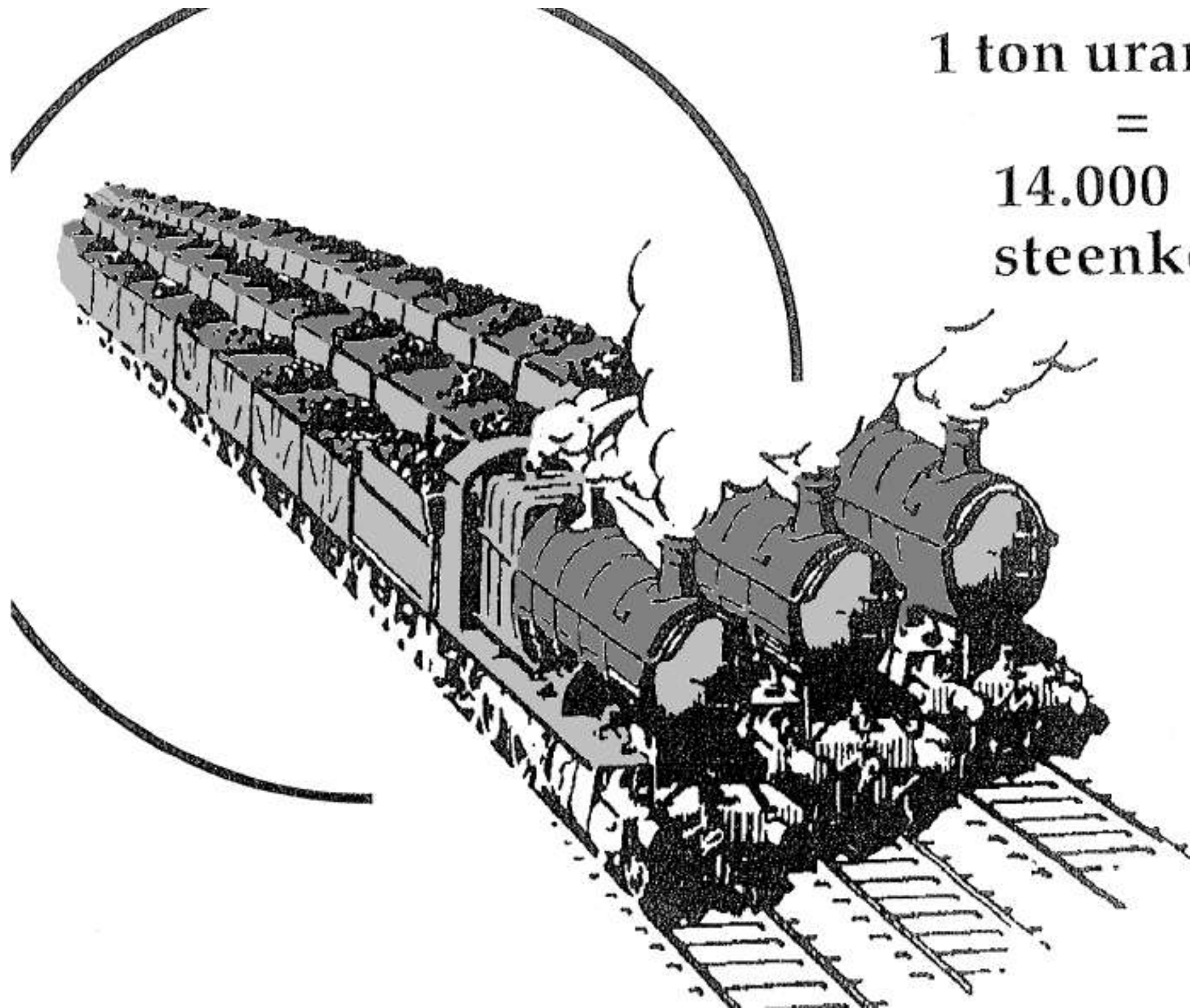


De nieuwe neutronen kunnen een ander U235 atoom activeren: er ontstaat dan een **kettingreactie** van kernsplijtingen.





# Werking van een kerncentrale



1 ton uranium  
=  
14.000 ton  
steenkool

Splijting van 1 U235-atoom levert evenveel energie als het verbranden van 50.000.000 C-atomen.

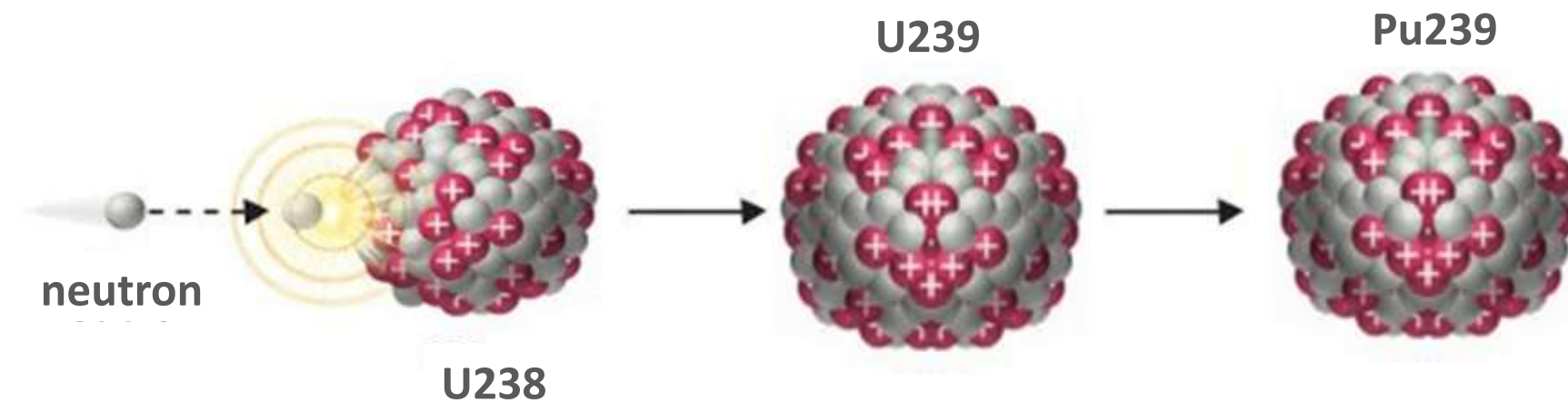
Splijting van 1 gr U235 levert evenveel energie op als het verbranden van 3000 kg kolen.

1 kg 4% verrijkt Uranium (53 ml) levert 1.000.000 MWh energie.



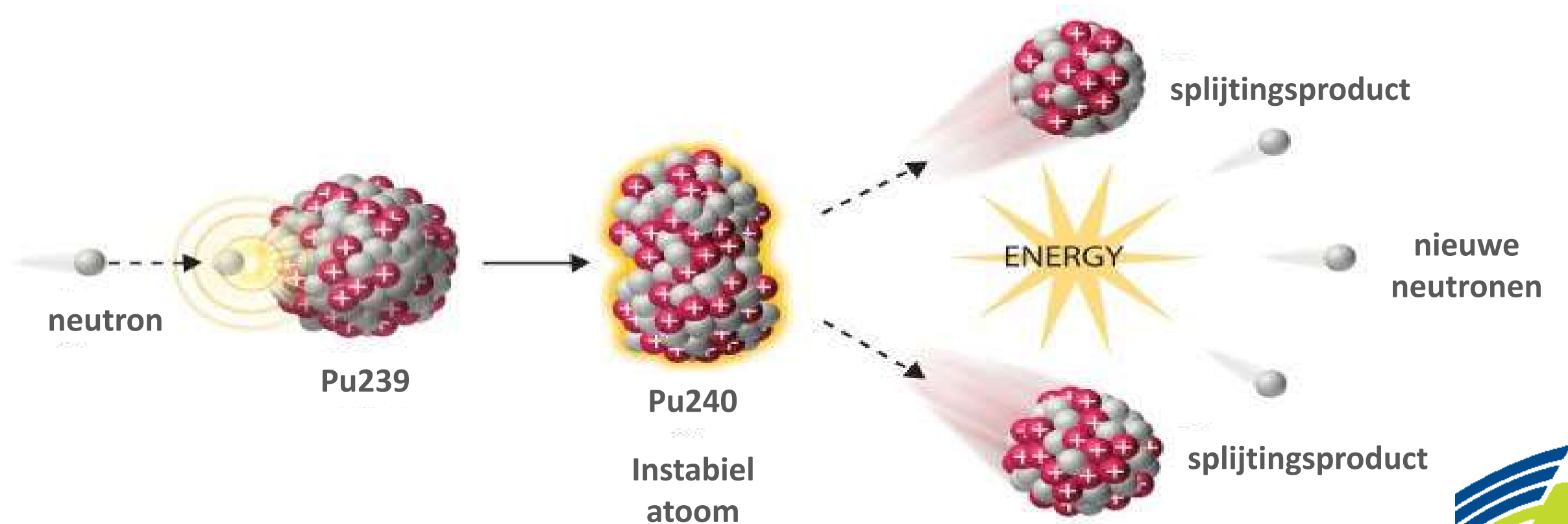
# Werking van een kerncentrale

Maar er gebeurt nog meer!



Soms 'vangt' een U238-atoom een neutron, er ontstaat het wél splitsbare Plutonium Pu239.

Een kerncentrale 'kweekt' dus zelf een deel van zijn eigen splijtstof.



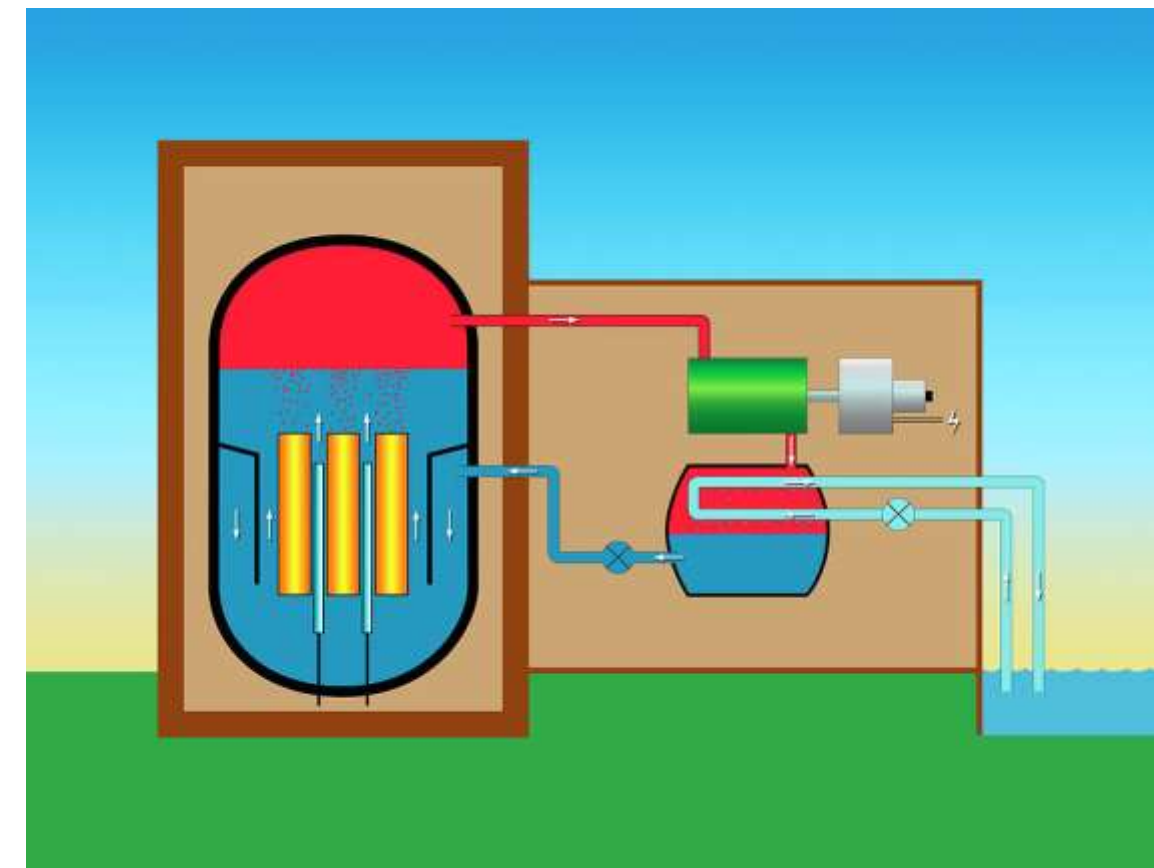
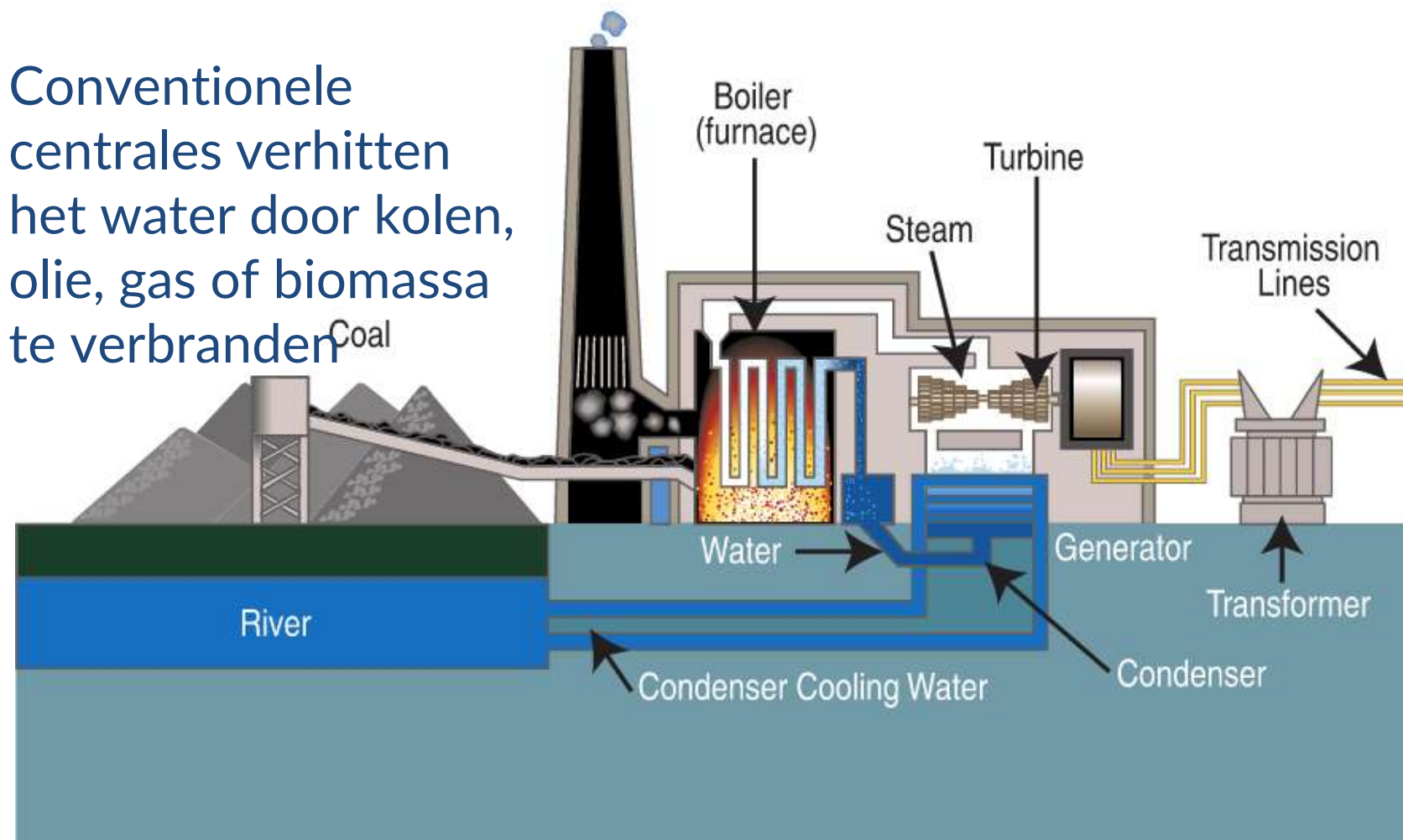


# Werking van een kerncentrale

Grote elektriciteitscentrales gebruiken een water-stoom-cyclus:

- in een ketel wordt water tot stoom verhit
- de stoom drijft een turbine-generator-set aan
- stoom wordt in condensor verder gekoeld en wordt weer water
- het water gaat de ketel weer in: de cirkel is rond

Conventionele centrales verhitten het water door kolen, olie, gas of biomassa te verbranden

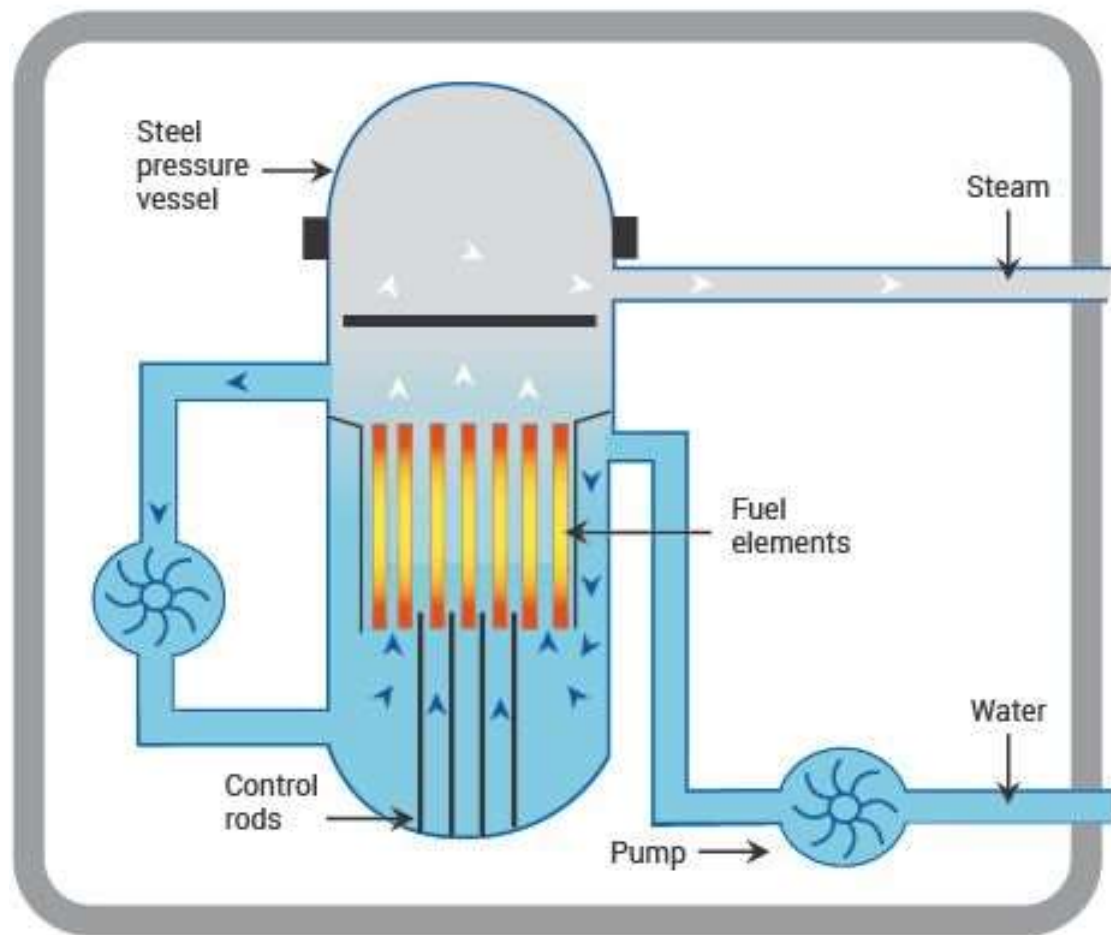


Kerncentrales verhitten het water door kernsplijting



# Werking van een kerncentrale

A Boiling Water Reactor (BWR)



kokend water reactor

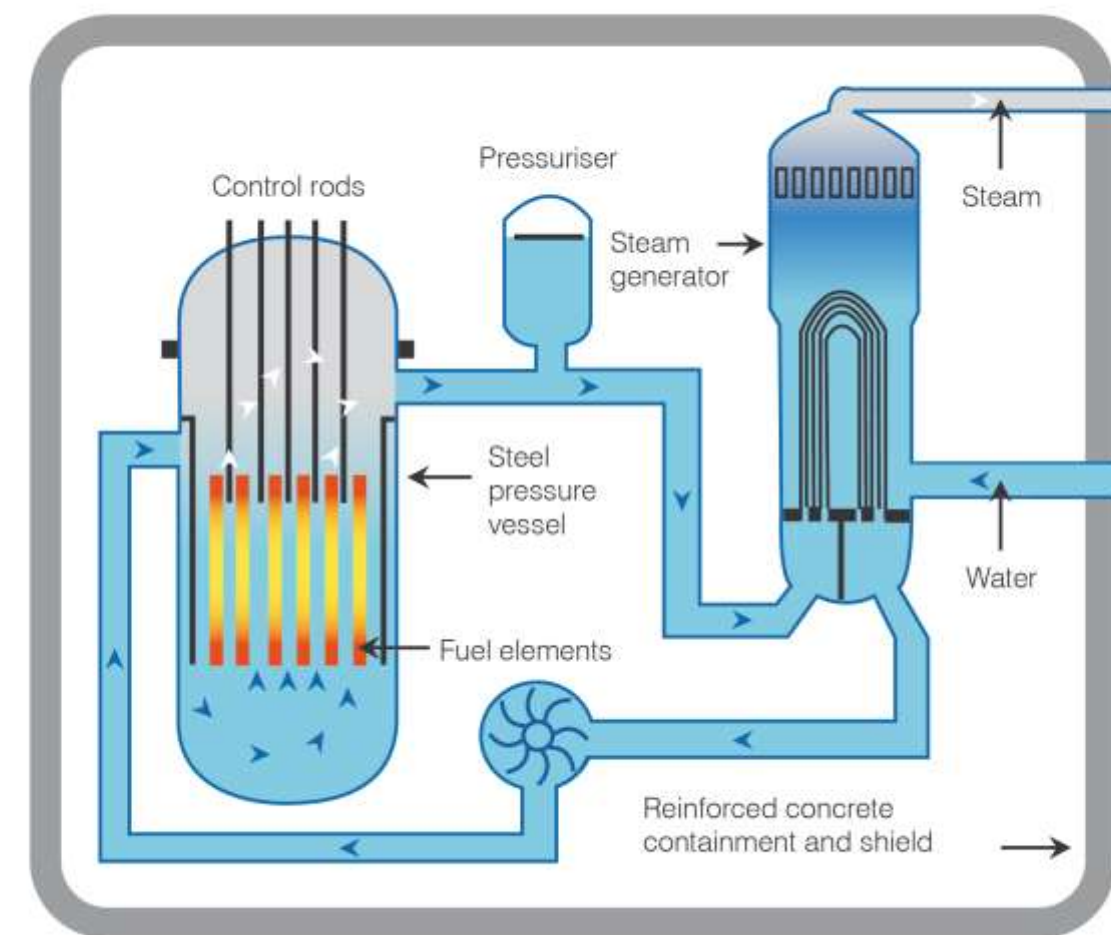
Splijfstof in het water-stoom-circuit

Radioactieve stoom gaat naar de stoomturbine

Stoombel bepaalt mede de kernsplijting

WORLD NUCLEAR ASSOCIATION

A Pressurized Water Reactor (PWR)



drukwater reactor

Water-stoom-circuit gescheiden van het koelcircuit met de splijfstof

Compact (scheepsvoortstuwing)

De 2 meest voorkomende type kernenergiereactoren:

- kokend water reactor maakt stoom in het reactorvat
- drukwaterreactor maakt stoom in een warmtewisselaar

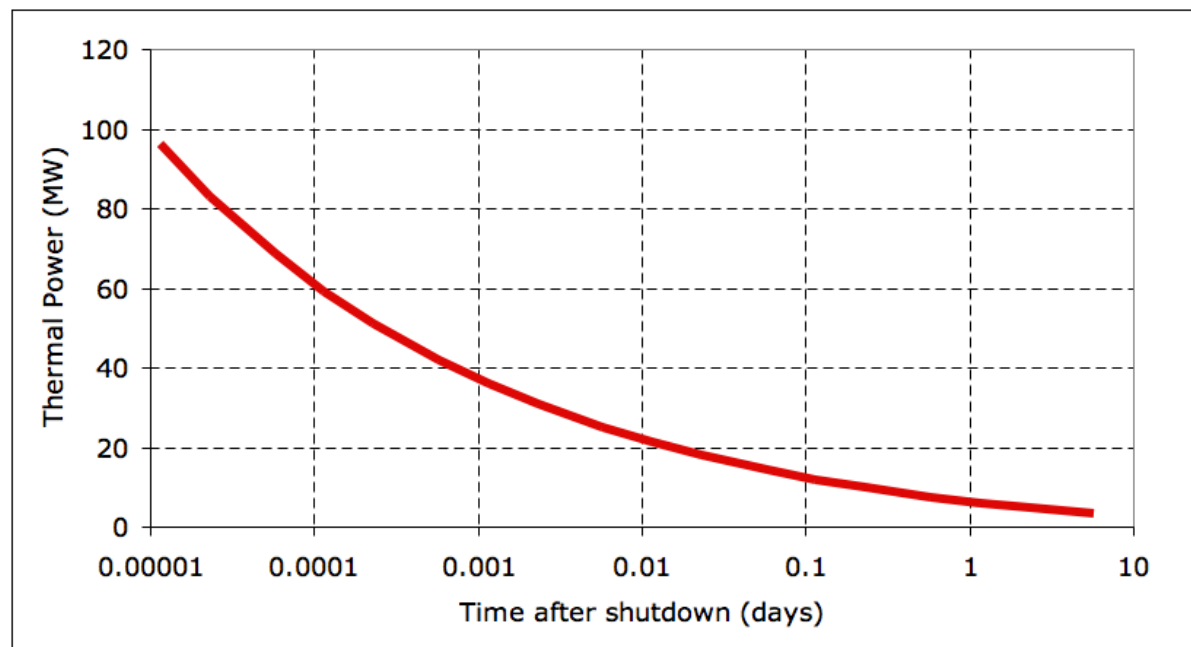




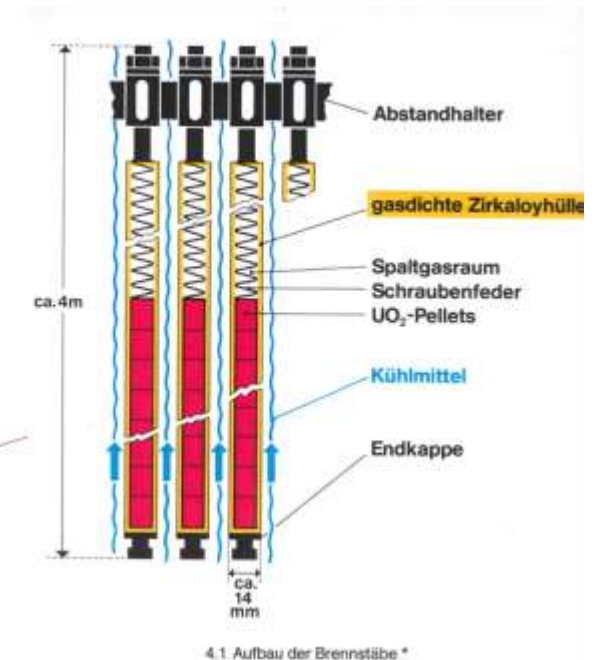
# Werking van een kerncentrale

- In een ruimte ter grootte van een flinke zeecontainer zit voldoende energie om heel Nederland twee maanden van elektriciteit te voorzien!

*Veiligheid vereist de **kettingreactie** altijd te kunnen stoppen en gestopt te houden.*



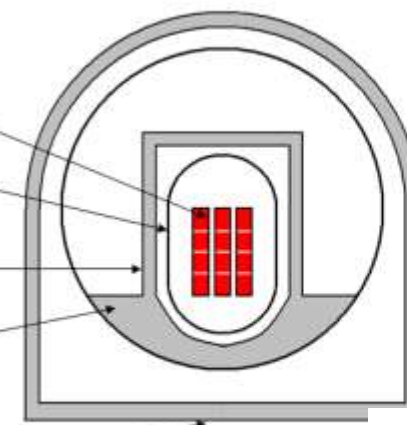
- Als de reactor is uitgezet levert deze nog steeds veel energie!  
*Veiligheid vereist na uitzetten reactor de **vervalwarmte gecontroleerd afvoeren**.*



- In de reactor zit een grote hoeveelheid materiaal wat schadelijk is voor mens en milieu!

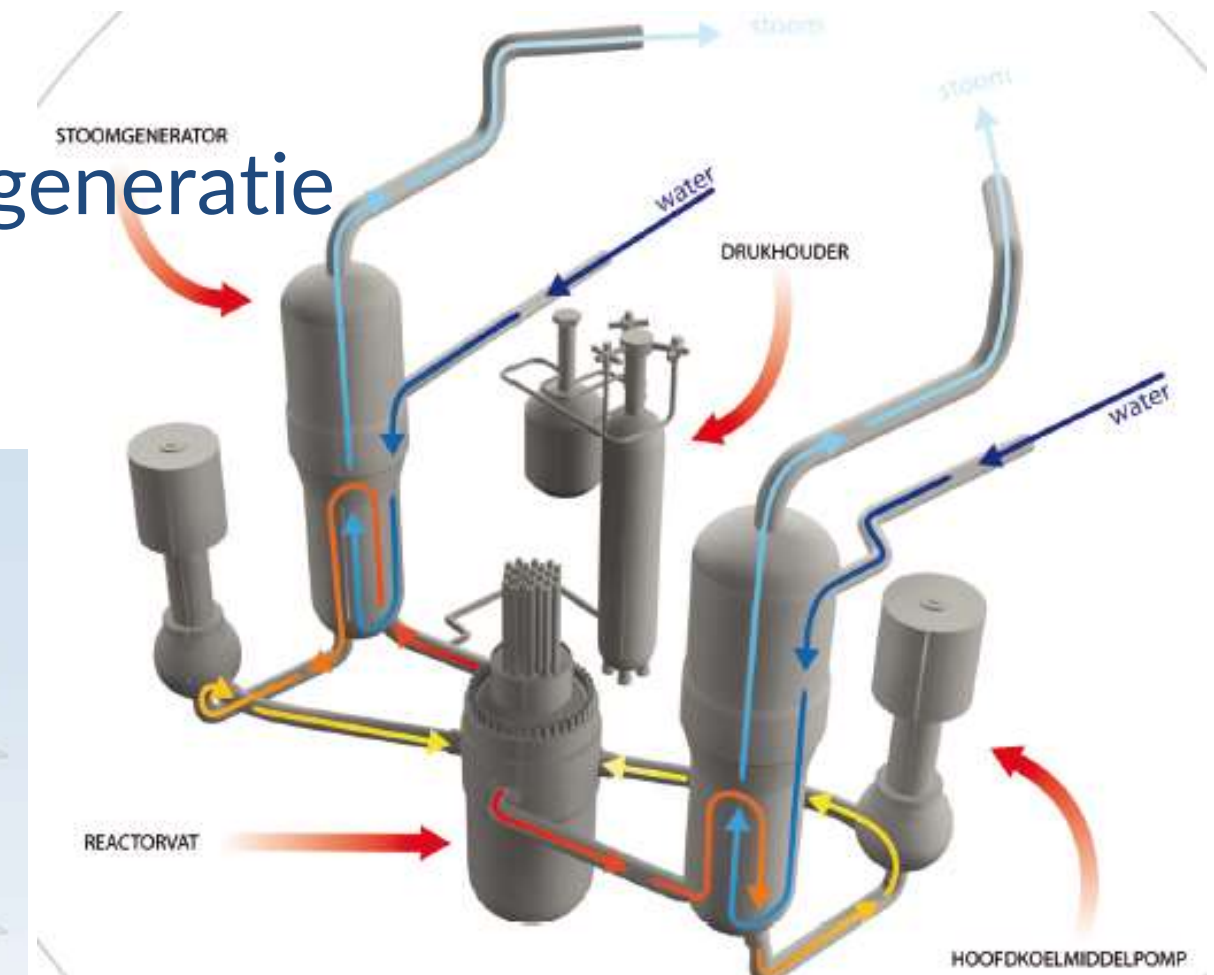
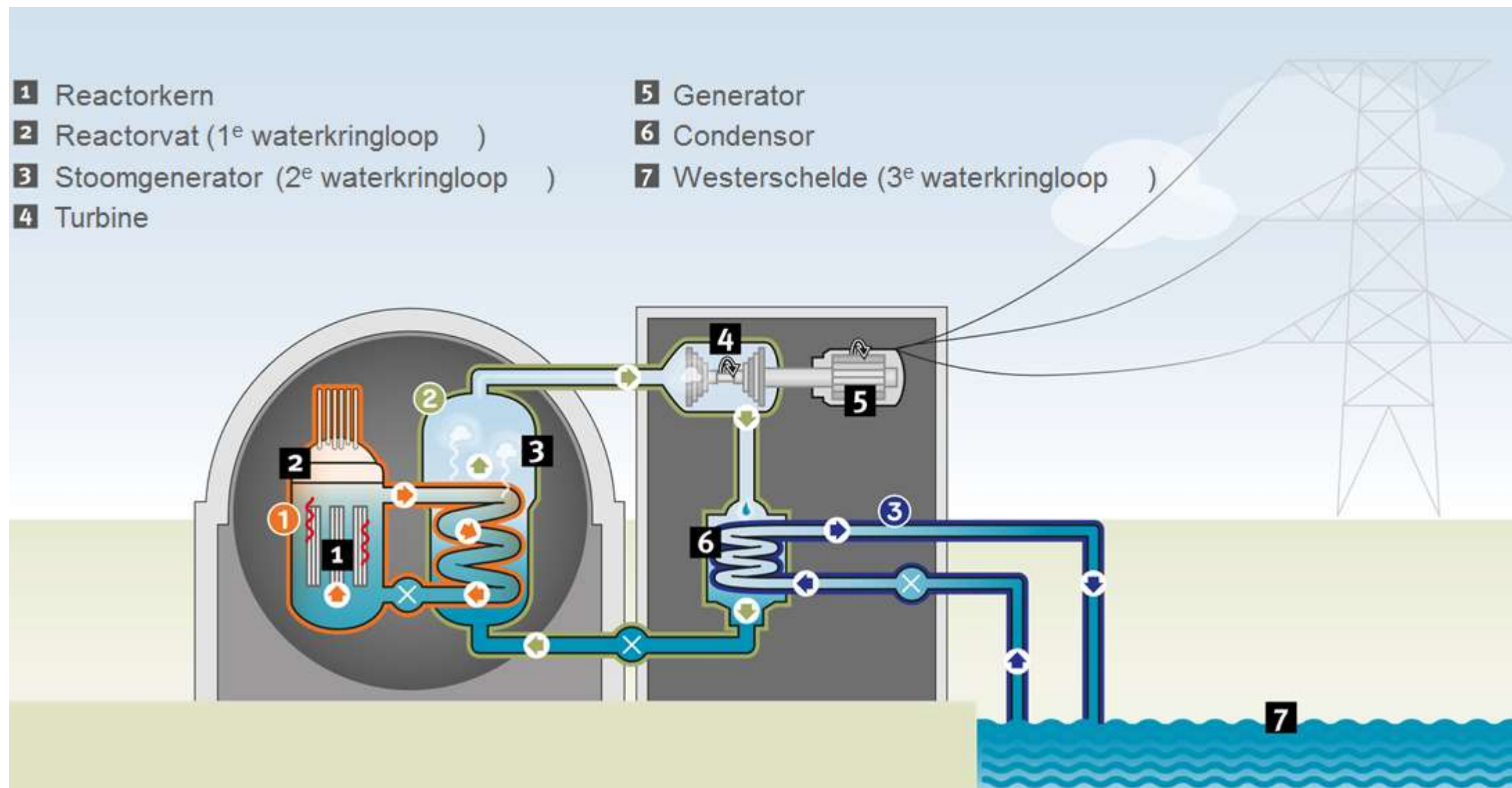
*Veiligheid betekent de **radioactieve stoffen insluiten**.*

- Uraniumtabletten in stalenomhulling
- Stalen reactorvat
- Betonnen omhulling
- Stalen veiligheidsbol
- Betonnen koepel



# Werking van een kerncentrale

Kerncentrale Borssele is een drukwaterreactor van de 2<sup>e</sup> generatie



## Drukwater reactor (PWR)

- Splijtstof verwarmt water onder hoge druk (320 °C, 155 bar) in gesloten circuit
- Warmtewisselaar verwarmt water tot stoom voor de stoomturbine
- Koelwater koelt stoom tot water



# Werking van een kerncentrale

Gebruikte splijtstof: grondstof of afval?

► 2 opties



**Direct opslaan**

“behandel als radioactief afval”  
Dit is de keus van USA,  
Duitsland, Zweden ....



**Recyclen**

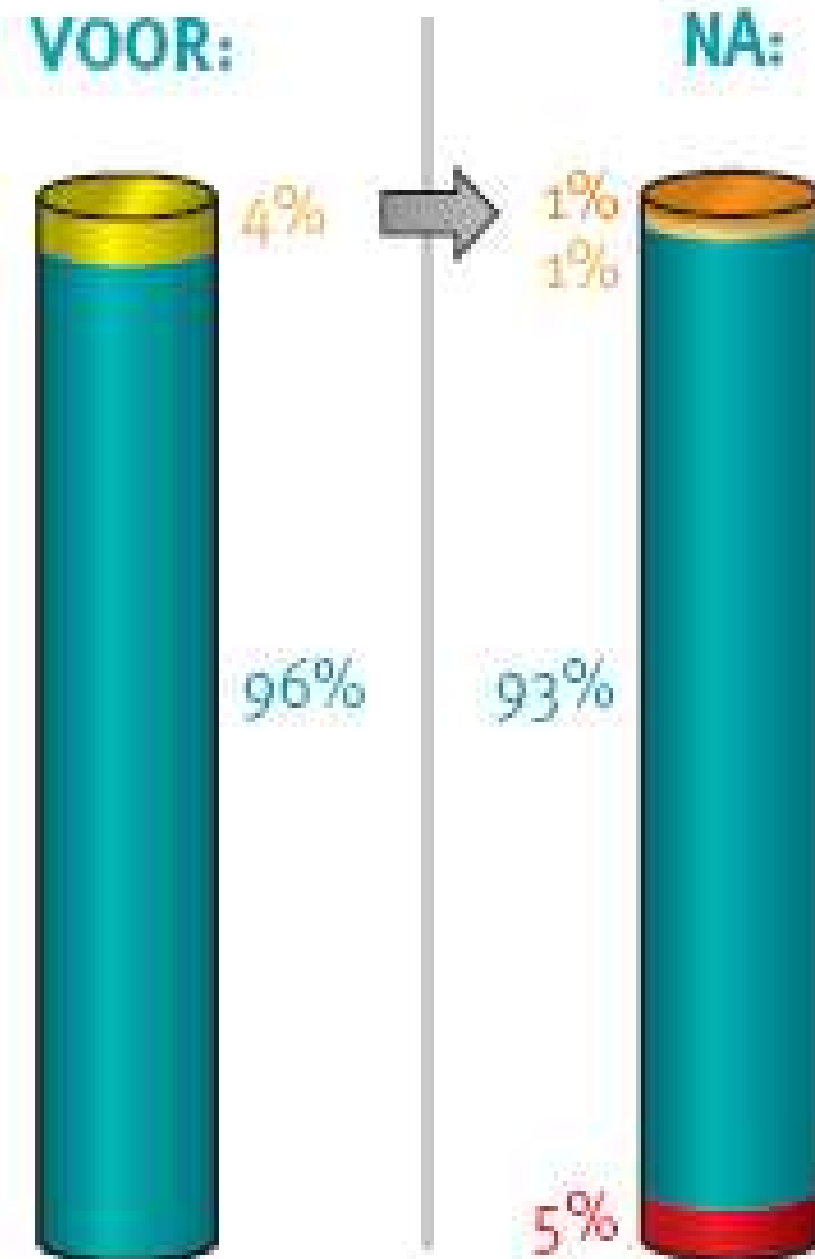
“behandel als grondstof”  
Dit is de keus van Frankrijk, Japan,  
Rusland, Nederland ....





# Werking van een kerncentrale

Gebruikte splijtstof: grondstof of afval?



- Uranium 235
- Uranium 238
- Plutonium
- Afval

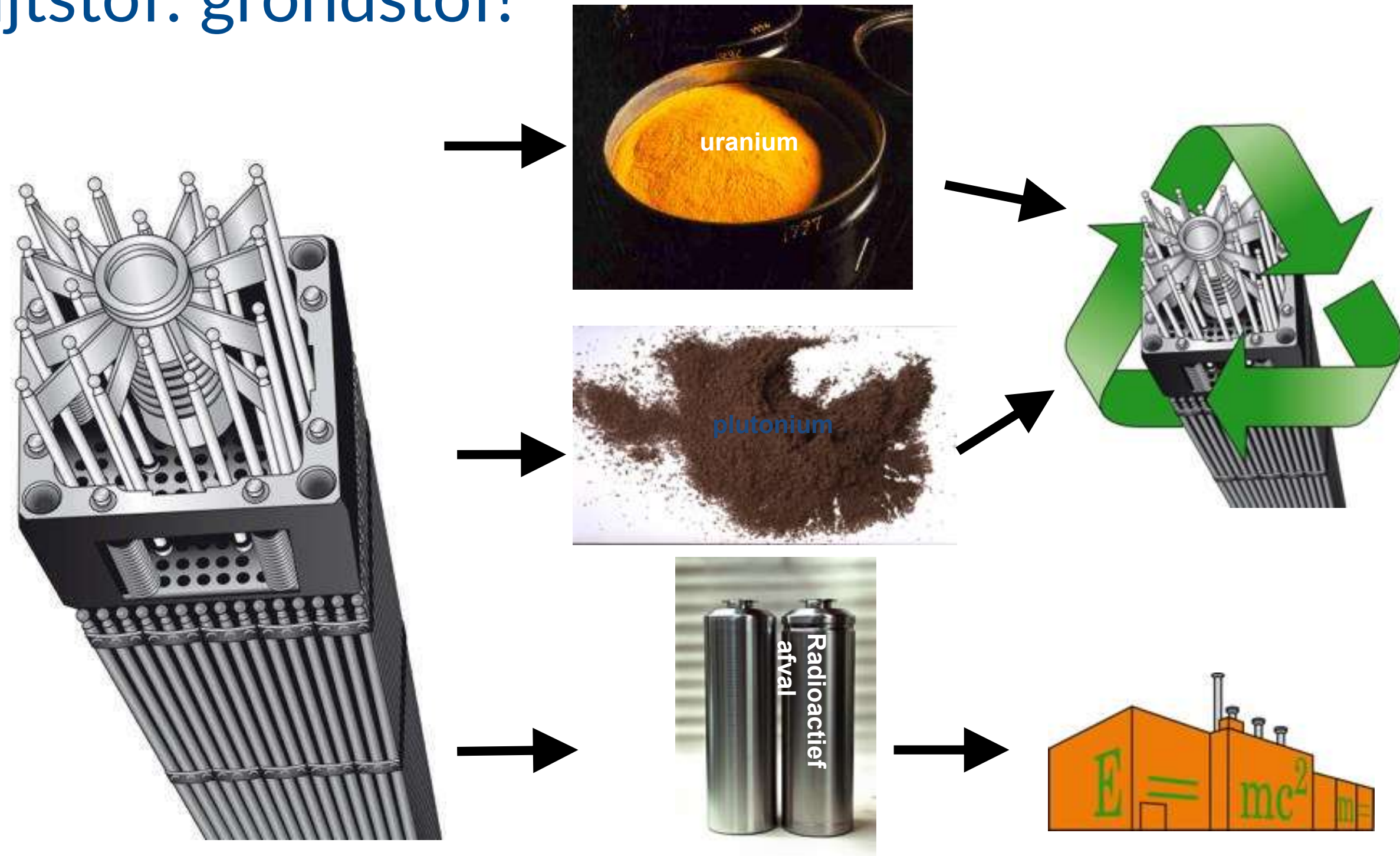
Splijtbaar uranium-235  
wordt 4-5 jaar lang  
verbruikt

Er ontstaat intussen  
splijtbaar plutonium  
→ meer energieproductie



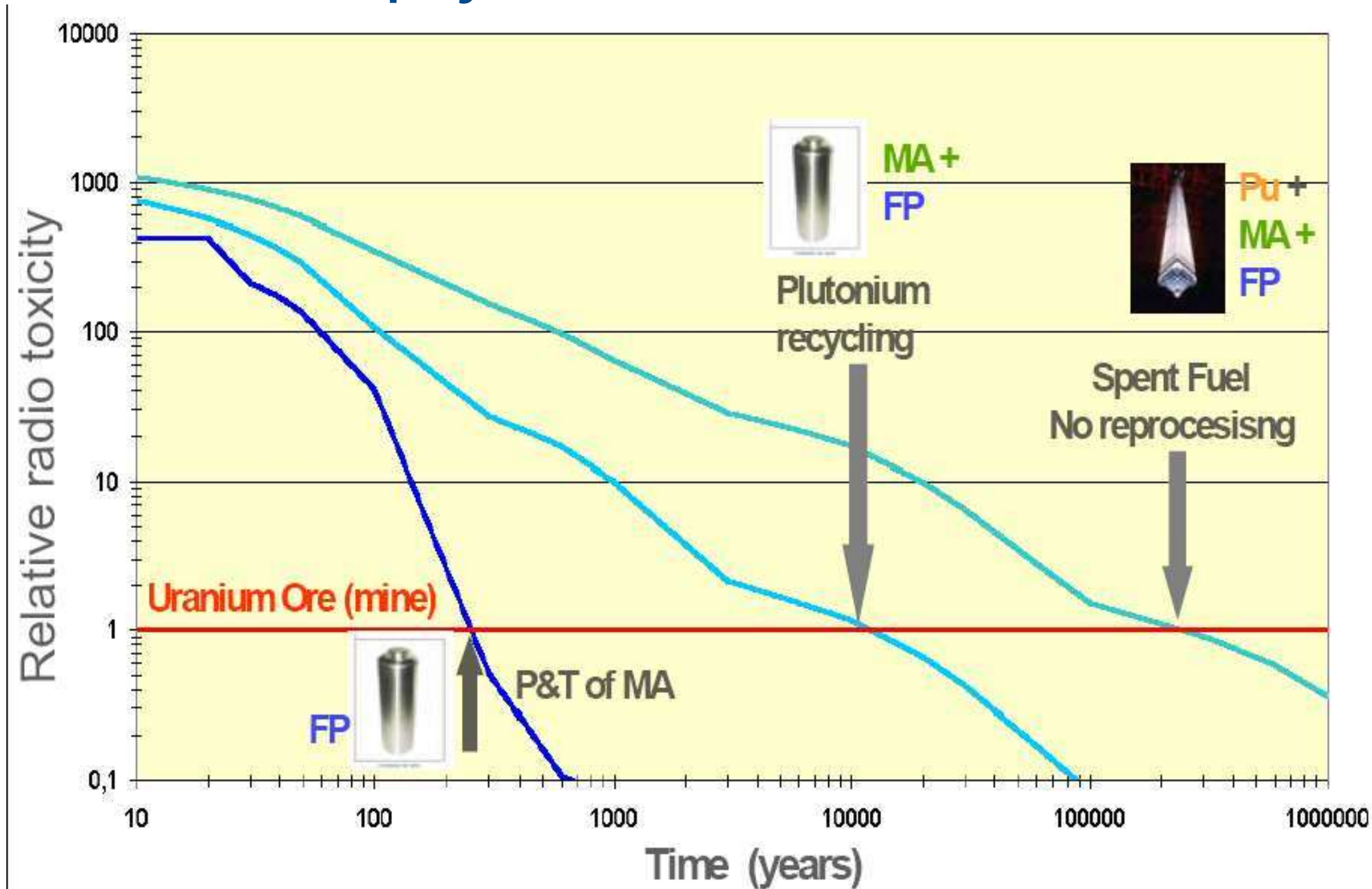
# Werking van een kerncentrale

Gebruikte splijtstof: grondstof!



# Werking van een kerncentrale

## Gebruikte splijtstof: afval!



Ook bij recycling is langdurige, veilig opslag noodzakelijk.  
Bestaande hoog-radioactief afval maakt langdurige, veilige opslag noodzakelijk.

Eindberging in geologisch stabiele aardlagen.

Tijdelijke opslag (in Nederland):

- Voorlopig onvoldoende afval om de kosten van eindberging te dragen
- Reductie vervalwarmte





# Ontwikkelingen kerncentrales

## Generatie III/III+ doorontwikkelen bewezen concepten

- schaalvergroting ( $\rightarrow$  1700 MWe)
- Small Modular Reactors ( $<$  300 MWe)
- micro reactors  $<$  50 MWe)
- actieve  $\rightarrow$  passieve veiligheidsvoorzieningen (walk-away safety)
- seriebouw

## Generatie IV

### innovatie

- sluiten van de splijtstofcyclus (U238, 'afvalbranders')
- (zeer) hoge temperaturen (hoog rendement, waterstofproductie door 'kraken' van water)
- inherent veiligheidsaspect: afvoeren vervalwarmte

Zowel grote als kleine reactoren in ontwikkeling.



# Ontwikkelingen Wereldwijd

**Bedrijfsduurverlenging:** wereldwijd ca. 50% vergund, vaak van 40 jr naar 60 jr  
in de USA 2<sup>e</sup> verlenging aangevraagd/vergund

Aantonen dat de centrale tot einde bedrijfsduur veilig kan worden bedreven:

- ‘onvervangbare componenten’ tot einde voldoen aan veiligheidseisen (reactorvat, stalen containment, betonnen structuren)
- componenten tot einde bestand zijn tegen (ongevals)condities (stralingsniveau, temperatuur, relatieve vochtigheid)
- verouderingsbeheersing (fenomenen, in-service inspecties, analoge regeltechniek, transistoren)

**Kennisgebieden:** materiaalkunde, civiele techniek, meet- en regeltechniek, informatica, cyber security, inspectietechnieken (NDO), ...



# Ontwikkelingen Wereldwijd

**Nieuwbouw:** vooral in het verre oosten (China, Pakistan, Zuid-Korea, Japan)  
Europa (Finland, Frankrijk, Belarus, Turkije) en elders (USA, Egypte)

**Doorontwikkelingen:** grote kernenergiecentrales (300-1700 MWe)  
Small Modular Reactors (< 300 MWe)  
Micro reactors < 50 MWe)

Type	Operationeel	In aanbouw	Landen
ABWR	4	2	Japan
EPR	3	3	Finland, Frankrijk, China
AP1000	4	2	China, USA
VVER1000/1200	ca. 40	ca. 11	Rusland, Belarus, China, ...
APR1400	5	7	Zuid-Korea, UAE
Hualong One (HPR1000)	4	11	China, Pakistan

**Kansen Nederland:** zwaar transport/hijzen, civiele werken, weg- en waterbouw, rondverzet, materiaalonderzoek (bestralingsprogramma, NDO), ...





# Ontwikkelingen Wereldwijd

Beeldmateriaal van lopende en recent gereedgekomen nieuwbouwprojecten:

<https://duckduckgo.com/?q=taishan+EPR+construction&t=chromentp&iar=images&iax=images>

<https://duckduckgo.com/?q=Olkiluoto+EPR+construction&t=chromentp&iar=images&iax=images&ia=images>

<https://duckduckgo.com/?q=flamanville+EPR+construction&t=chromentp&iar=images&iax=images&ia=images>

<https://duckduckgo.com/?q=vogtle+AP1000+construction&t=chromentp&iar=images&iax=images&ia=images>

<https://duckduckgo.com/?q=China+AP1000+construction&t=chromentp&iar=images&iax=images&ia=images>

<https://duckduckgo.com/?q=Korea+APR1400+construction&t=chromentp&iar=images&iax=images&ia=images>

<https://duckduckgo.com/?q=Barakah+APR1400+construction&t=chromentp&iar=images&iax=images&ia=images>

<https://duckduckgo.com/?q=Belarus+VVER+construction&t=chromentp&iar=images&iax=images&ia=images>

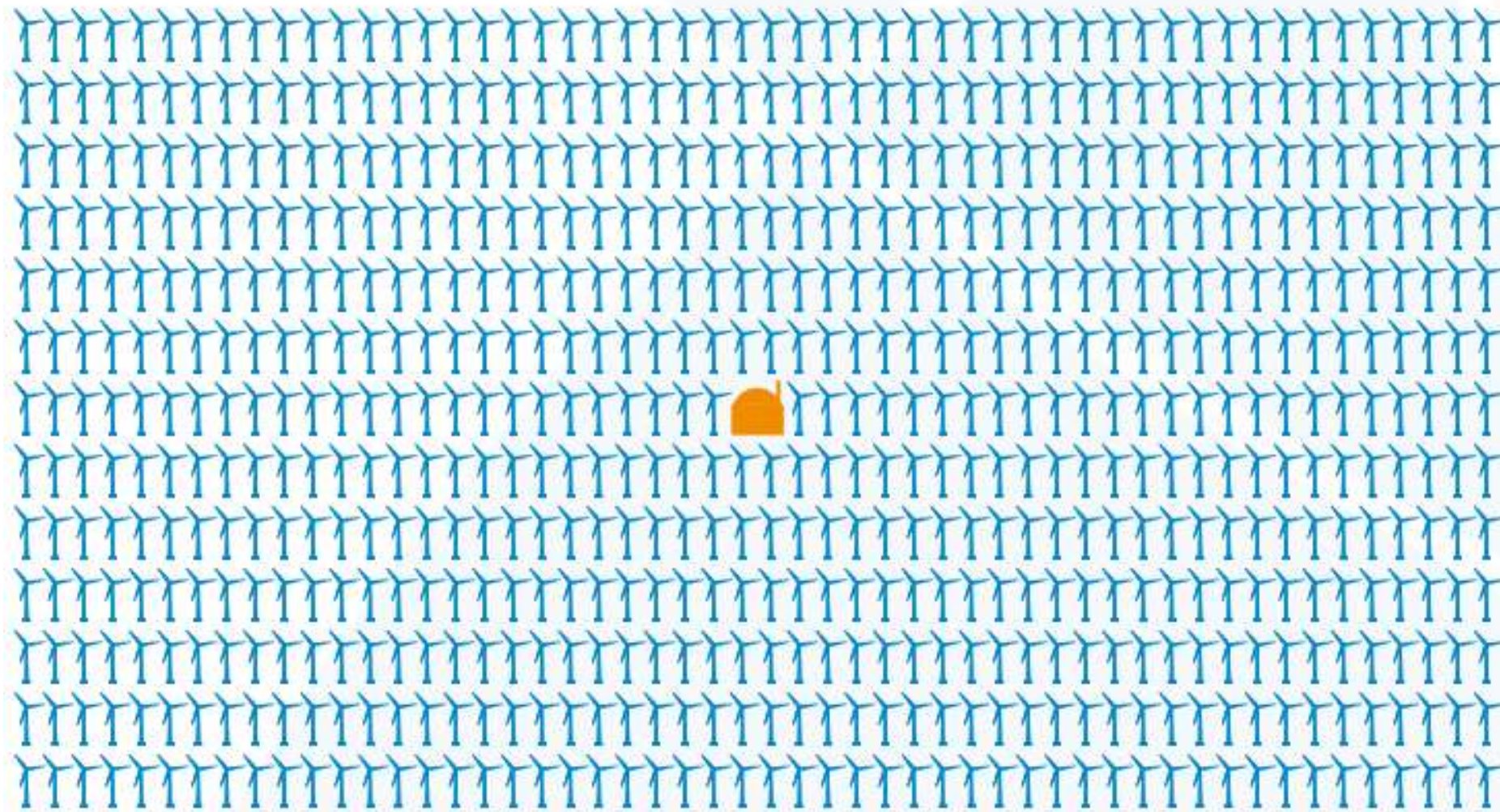
<https://duckduckgo.com/?q=Hualong+construction&t=chromentp&iar=images&iax=images&ia=images>



# Ontwikkelingen in Nederland

## Kerncentrales in de Nederlandse energiemix

De Kerncentrale in Borssele levert net zoveel stroom als ruim 600 grote windturbines.



### Vrijkomen CO2:

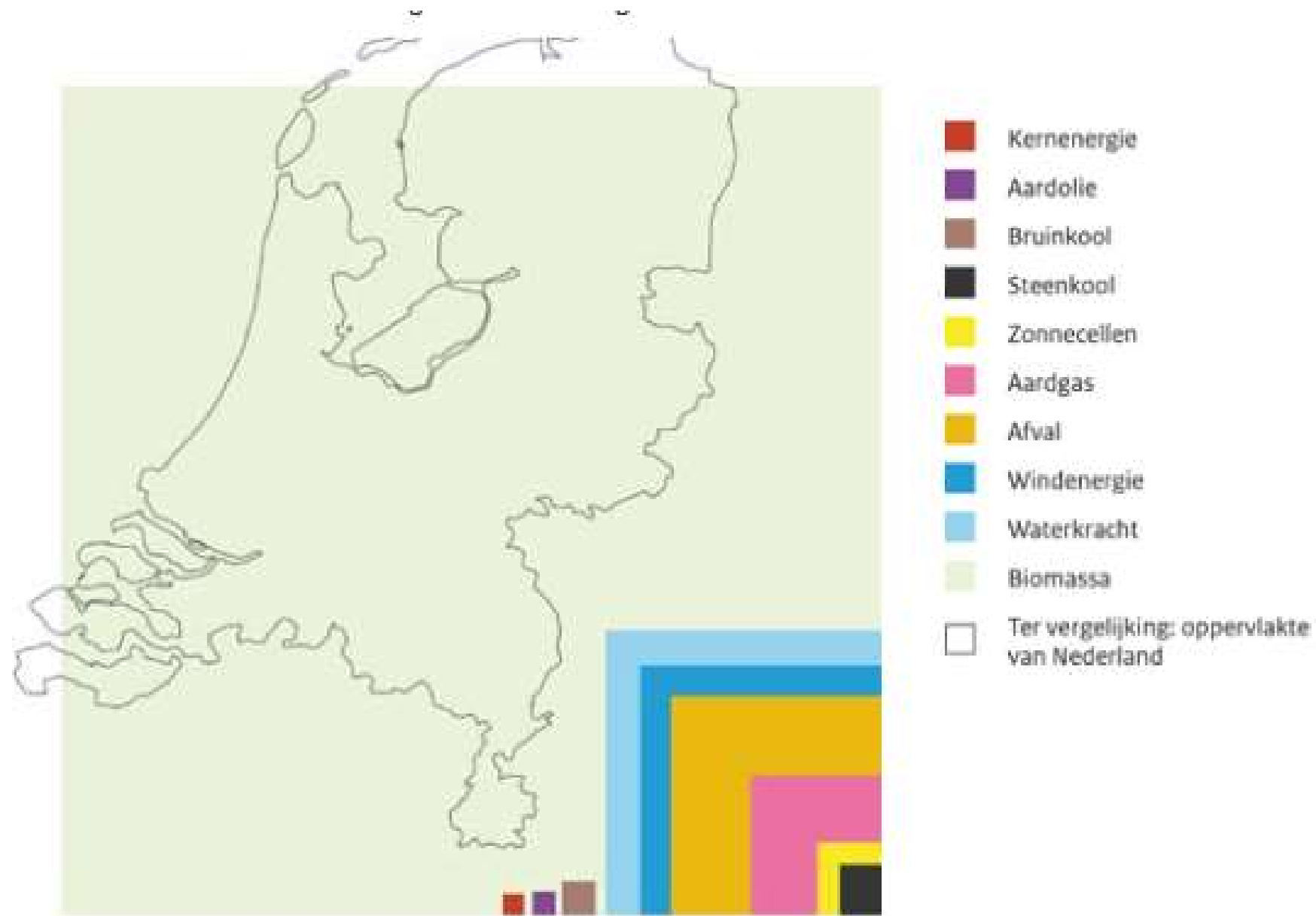
- Bruinkool 1180-1350 gr CO2/kWh
- Steenkool 980-1180 gr CO2/kWh
- Olie 710-900 gr CO2/kWh
- Aardgas 450-800 gr CO2/kWh
- Zon PV 70-240 gr CO2/kWh
- Biomassa 40-180 gr CO2/kWh
- Wind 25-80 gr CO2/kWh
- Water 5-50 gr CO2/kWh
- Uranium 6-25 gr CO2/kWh





# Ontwikkelingen in Nederland

## Kerncentrales in de Nederlandse energiemix



Klimaatneutrale energievoorziening is meer dan vermijding broeikasgassen:

- Beschikbaarheid energie als deze nodig is
- (On)afhankelijkheid grondstoffen
- Gebruik/verbruik grondstoffen in de keten
- Afvalstromen
- Betaalbaarheid
- Verdeling schaarse ruimte
- Tijdigheid
- ...





# Ontwikkelingen in Nederland

Bedrijfsduurverlenging kerncentrale Borssele

- Overheid: wijziging Kernenergiewet (MER)
- EPZ: aantonen veilige bedrijfsvoering, investeringsplan (10 jaar, 20 jaar?)
- Aandeelhouders: investering verantwoord/aantrekkelijk?

Nieuwbouw:

- Idee: 1 à 2 grote centrales met SMR's
- Locatiekeuze(s)
- Financiering (financieringskosten, zekerheid/garanties)

Vakgebieden: operationele techniek, bouwkunde, elektrotechniek, werktuigbouw, reactorfysica, stralingsbescherming, (radio)chemie, meet- en regeltechniek/instrumentatie, cyber security, beveiliging, milieutechniek, communicatie, stralingsbescherming, ...



# KERNENERGIE

Biedt kernenergie perspectief voor de Nederlandse industrie en kenniscentra?

# JA!

## WAT ZIT ER VOOR ONS IN?

- Kansen wereldwijd, bijv. voor de Nederlandse 'zware industrie'
- Veel nationale en regionale werkgelegenheid in nieuwbouwprojecten als Nederland nucleaire energieopwekking meeneemt in de weg naar een klimaatneutrale, betrouwbare en betaalbare energieopwekking
- Decennialange nationale en regionale werkgelegenheid in, voor en rondom kerncentrales
- ... en vult u maar aan!

*Maar kansen moet je creëren en grijpen: de nucleaire infrastructuur (kennis en ervaring) in Nederland heeft een boost nodig!*





# Bedankt voor uw aandacht!

[www.kernvisie.com](http://www.kernvisie.com)

[www.nucleairnederland.com](http://www.nucleairnederland.com)

[www.autoriteitnvs.nl](http://www.autoriteitnvs.nl)

[www.iaea.org/topics/nuclear-technology-and-applications](http://www.iaea.org/topics/nuclear-technology-and-applications)

[www.iaea.org/newscenter/nuclear-explained](http://www.iaea.org/newscenter/nuclear-explained)

[www.world-nuclear.org](http://www.world-nuclear.org)

[www.tudelft.nl/tnw/zakelijk/faciliteiten/reactor-instituut-delft](http://www.tudelft.nl/tnw/zakelijk/faciliteiten/reactor-instituut-delft)

[www.nrg.eu](http://www.nrg.eu)

[www.urengo.com/global-operations/urengo-nederland](http://www.urengo.com/global-operations/urengo-nederland)

[www.epz.nl](http://www.epz.nl)

[www.covra.nl](http://www.covra.nl)

---

De gebruikte afbeeldingen komen van de Stichting KernVisie, de vereniging Nucleair Nederland, EPZ en op meerdere web sites te vinden afbeeldingen. Eventuele rechthebbenden konden niet altijd worden getraceerd. Deze presentatie heeft geen commerciële achtergrond en de gebruikte afbeeldingen dienen verduidelijking of verlichting van deze presentatie.

