Tuumateadus ja tehnoloogia

Andrei Goronovski

Fermi Energia suvekool “Fermion”

06.08.2025

Minust

<u>Haridus</u>

- TalTech – Bakalaurusekraad Jõuelektroonikas
- KTH – Magistrikraad Tuumaenergeetikas
- UT – PhD, Füüsika Instituut (jätkub)

<u>Töö</u>

- KTH – Teadusinsener
- UT – Teadur
- Ericsson – Metroloogia insener
- ABB – R&D insener
- Fermi Energia – Tuumainsener

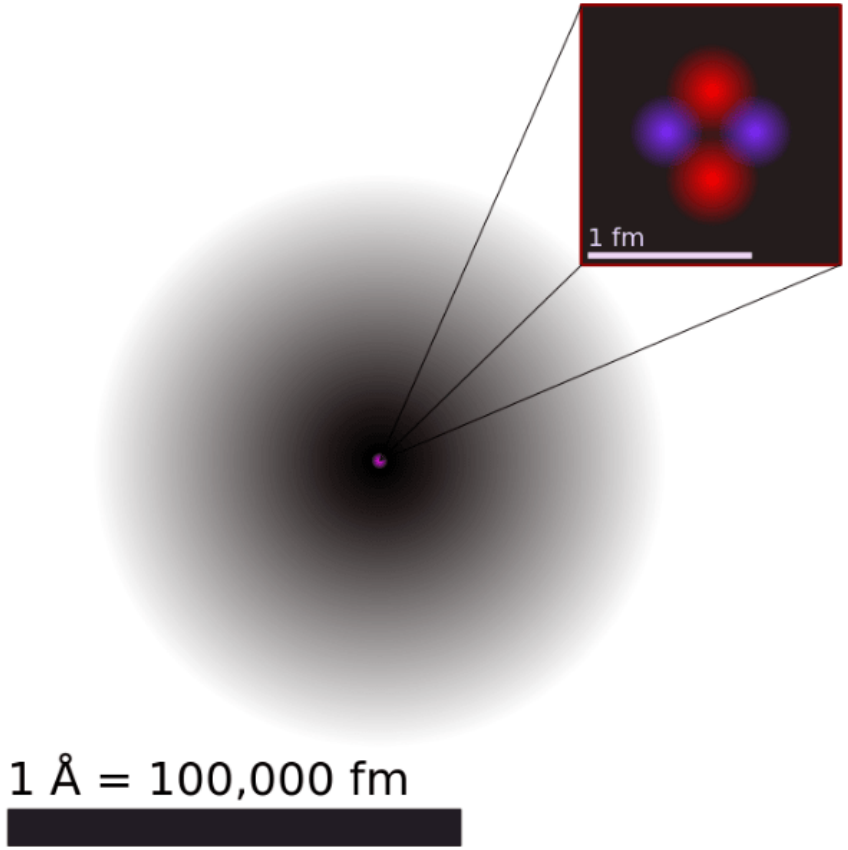
Sisukord

- Reaktorifüüsika
  - Aatomi ja tuuma kirjeldus
  - Tuumareaktsioonid
  - Ahelreaktsioonid
  - Neutronite energiast, aeglustamisest
- Reaktorite ajalugu ja areng
- Reaktoritehnoloogiad
  - Reaktorite ehitus ja tööpõhimõtted
  - Erinevate reaktorite tüübid
  - Väikesed moodulreaktorid
- Tuumkütus ja tuumajäätmed
- IV põlvkonna tuumareaktorid
  - Kirjeldus
  - 6 tehnoloogiat

Mis on tuumaeneergia

Aatomi ehitus

- Aatom koosneb aatomituumast ja seda ümbritsevast elektronpilvest
- Tuum on väga väike, positiivselt laetud ja moodustab enamus (>99.95%) aatomi massist.

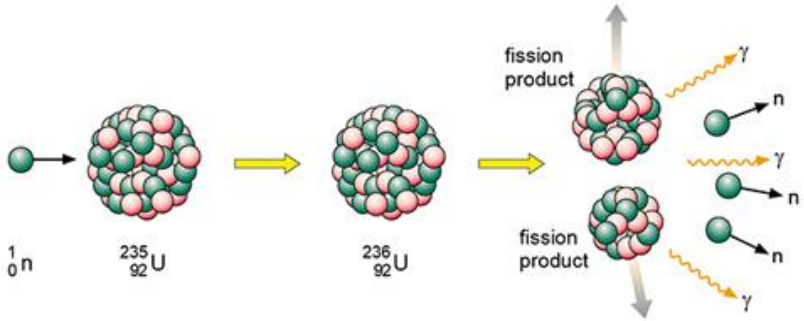


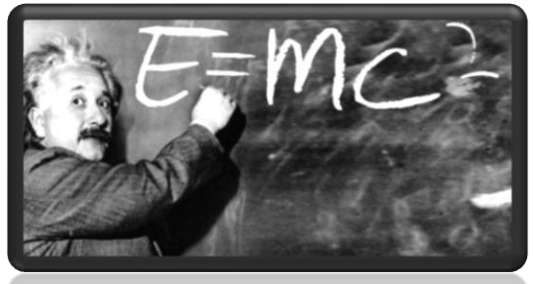
Heelium-4 aatomi illustratsioon

Energia vabaneb tuumareaktsioonides

Tuumade lõhustumine

- Rasked tuumad jagunevad kaheks tänu neutronitega “pommitamisele”
- Tekkivate tuumade masside summa on väiksem kui esialgse tuuma mass





Tuumade ühinemine

- Kerged tuumad ühinevad tänu kui neid kiire hooga kokku “pommitada”
- Tekkiva tuuma mass on väiksem kui tema koostisosade masside summa

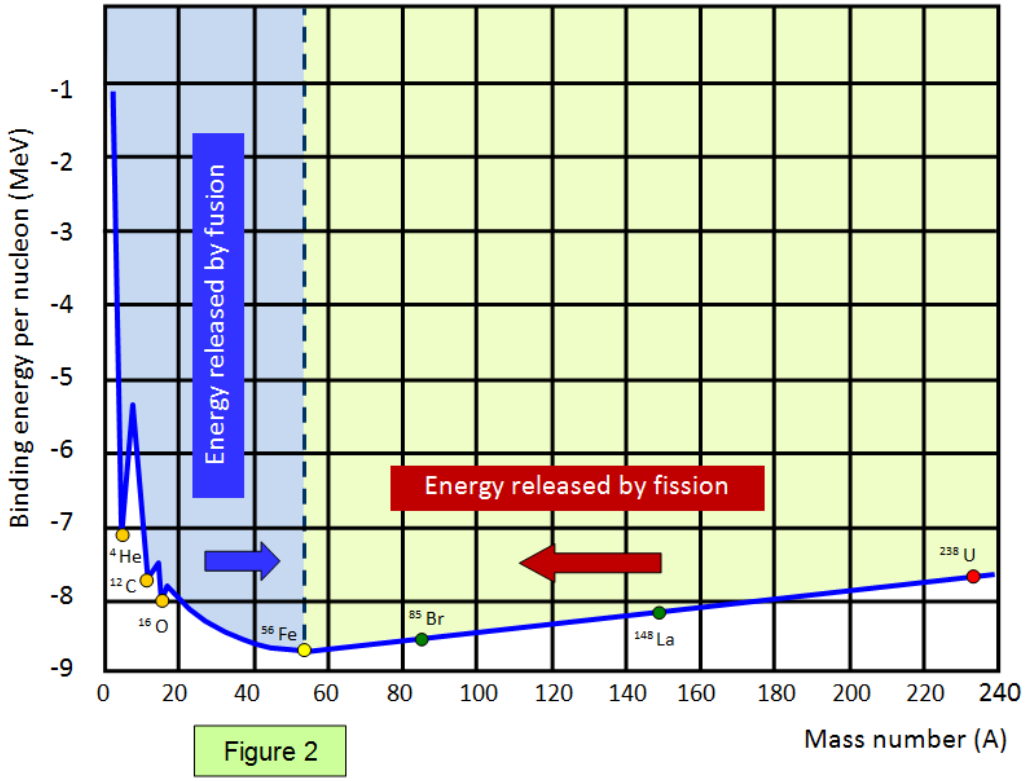
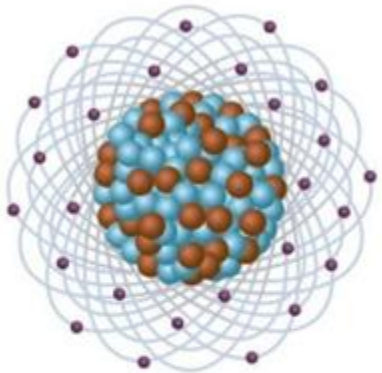


Figure 2

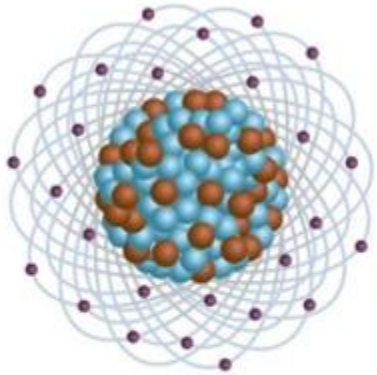
Isotoobid

Uraan 238



92 prootonit 146 neutronit

Uraan 235



92 prootonit 143 neutronit

~0.7% looduslikust uraanist

Massi defekt

$$^{235}_{92}\mathrm{U}$$

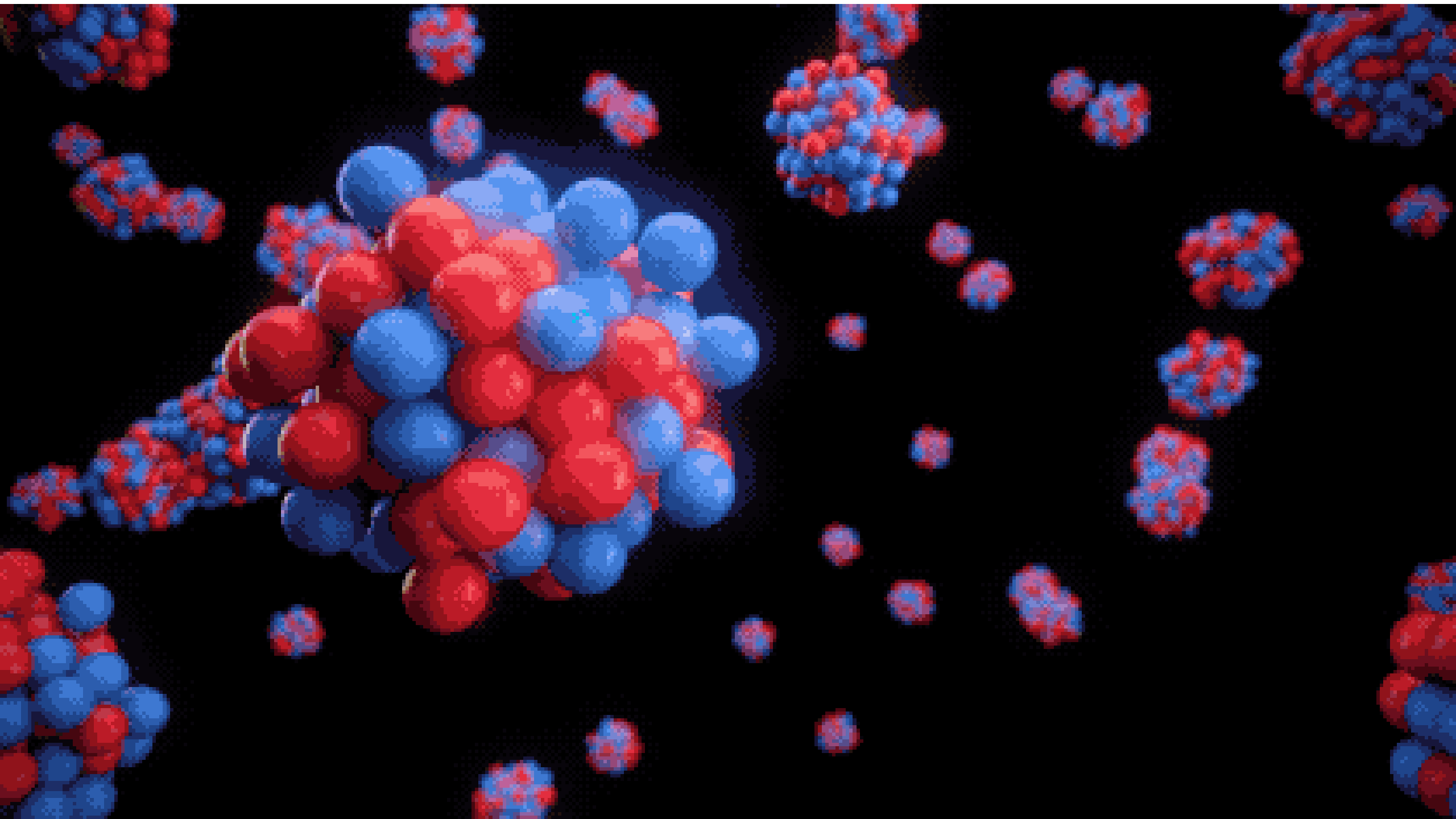
- Prootoni mass = 1.007276466621 u
- Neutroni mass = 1.00866491588 u

- Eeldatud mass = 236.9085179 u
- Mõõdetud mass = 235.0439299 u

- Massi defekt (puudus) = 1.864588 u
- Defekt nukleoni kohta= 0.007934417 u

- 1 u on ekvivalentne 931.5 MeV

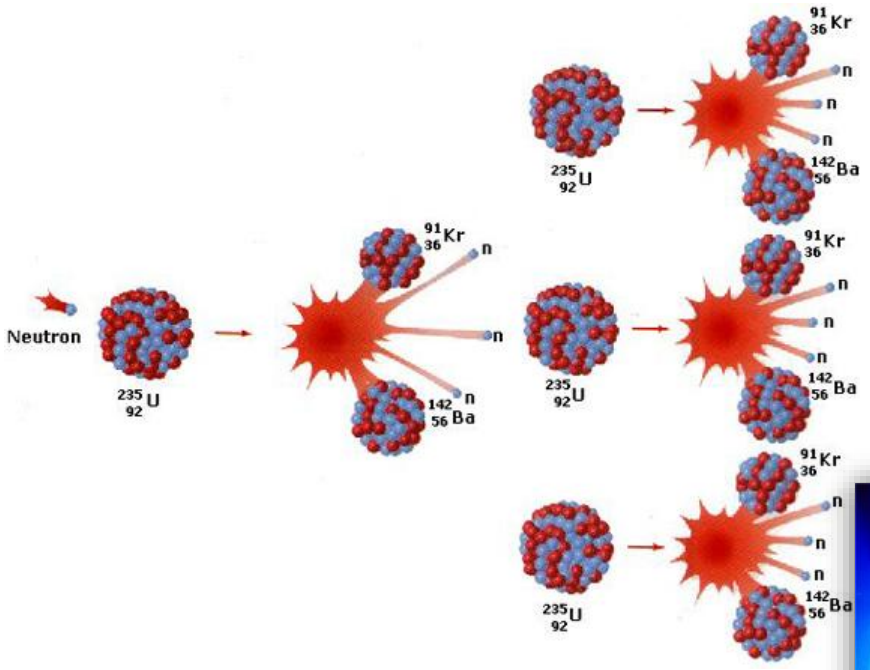
- Massi defekt tuleneb sidumisenergiast, mis on tuuma stabiilsuse mõõt.
- Lõhustumine vabastab sellest palju.
- U-235 puhul võime oodata ligikaudu ~ 0.234 u
  - **0.234 u = 218 MeV**
- Võrdluseks annab C + O2 reaktsioon **4.1 eV**



Ahelreaktsioon

k - efektiivne neutronkordaja
(keskmine neutronite arv ühes lõhustumises põhjustamaks järgmist):

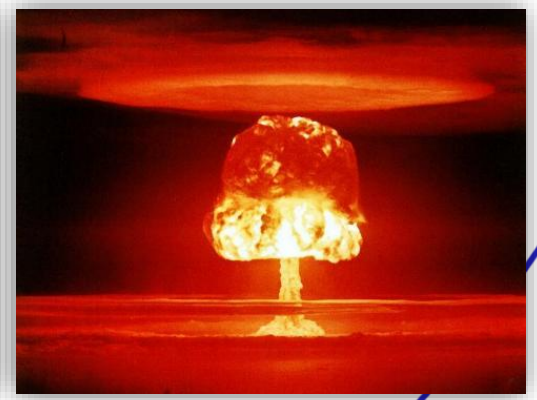
$k < 1$ (subkriitiline): Ahelreaktsioon hääbub,
$k = 1$ (kriitiline): Jätkusuutlik ahelreaktsioon, i.e. reaktoris,
$k > 1$ (ülekriitiline): Iga reaktsioon toodab rohkem neutroneid kui eelmine, i.e. tuumarelvades.



Vähemalt 1 neutron igast lagunemisest põhjustab uue lagunemise

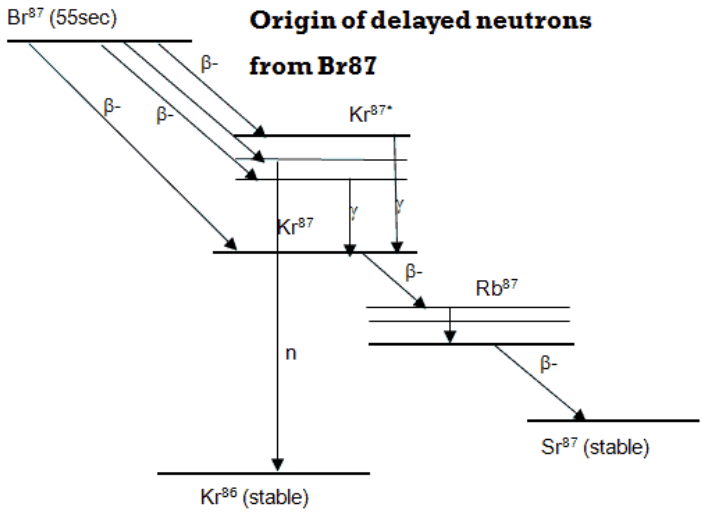
Kontrollitult tuumajaamades

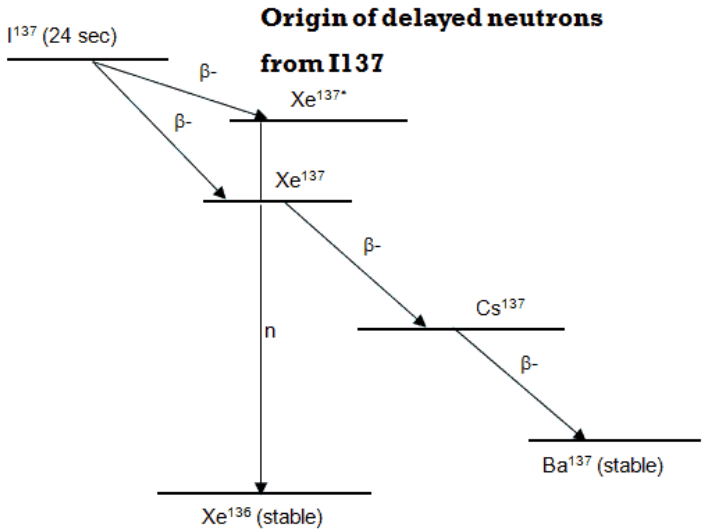
Kontrollimata tuumaplahvatustes



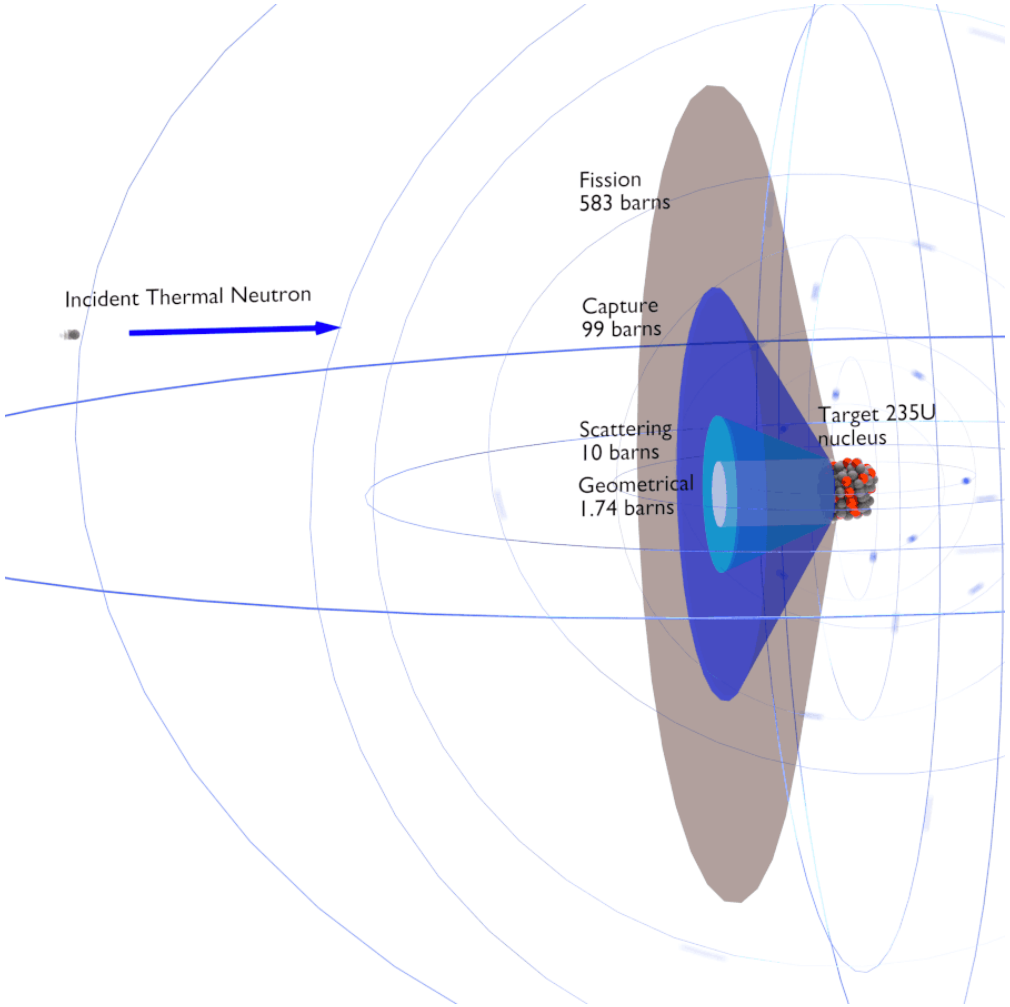
Ahelreaktsiooni kontroll

- Kuidas on aga selline võimsuse juhtimine võimalik?
  - “Hilinenud” neutronid, mis vabanevad teatud laguproduktidest kuni u minut peale primaarset laguprotsessi (β- lagunemise käigus), võimaldavad hoida reaktori kiirete neutronite seisukohast alakriitilisena.
  - Hiljaks jäänud neutroneid tekib:
    - U-235 ~ 0.65%
    - U-238 ~ 1.48%
    - Pu-239 ~ 0.21%
    - U-233 ~ 0.26%



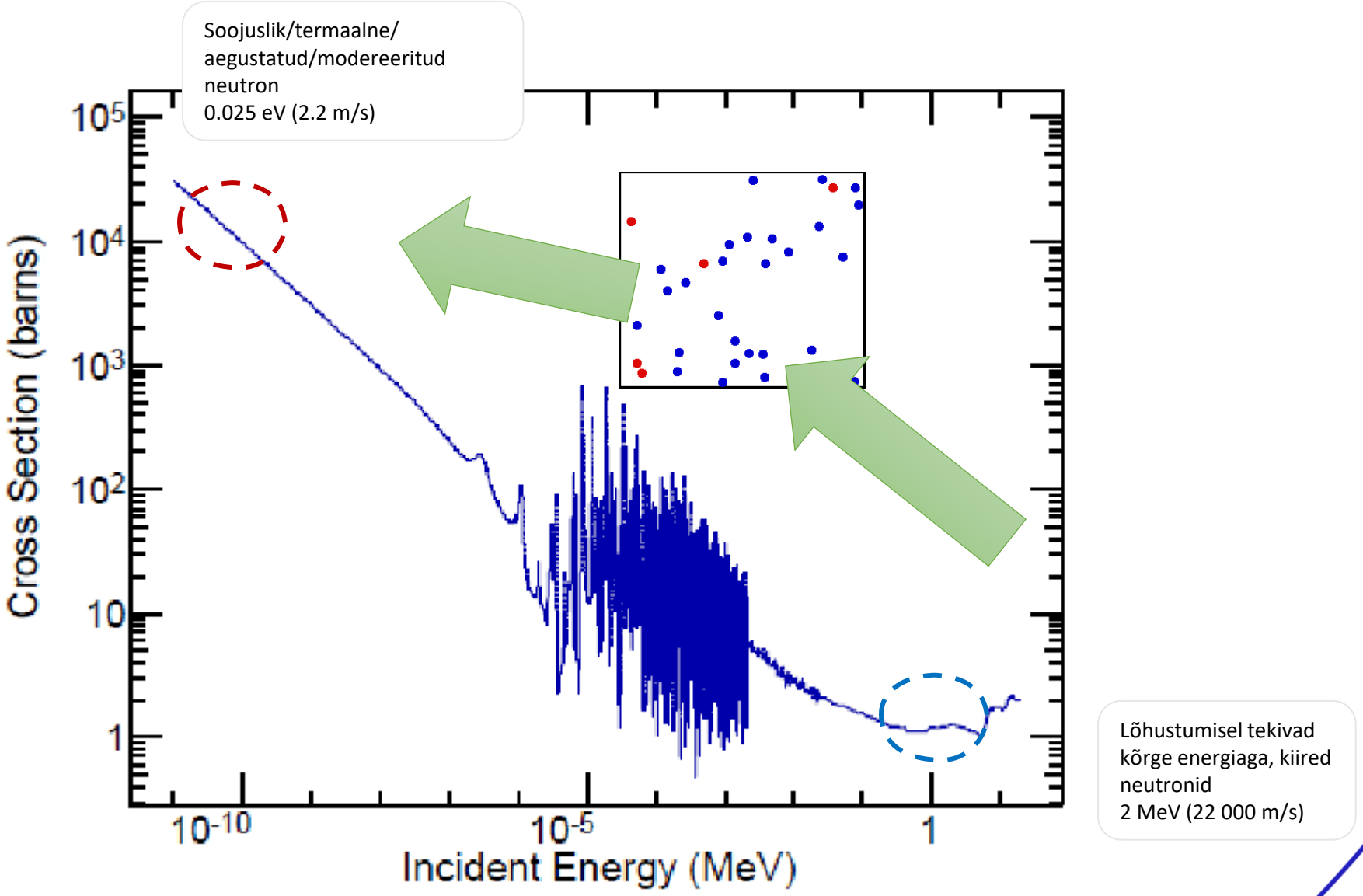


Mikroskoopiline ristlõige σ

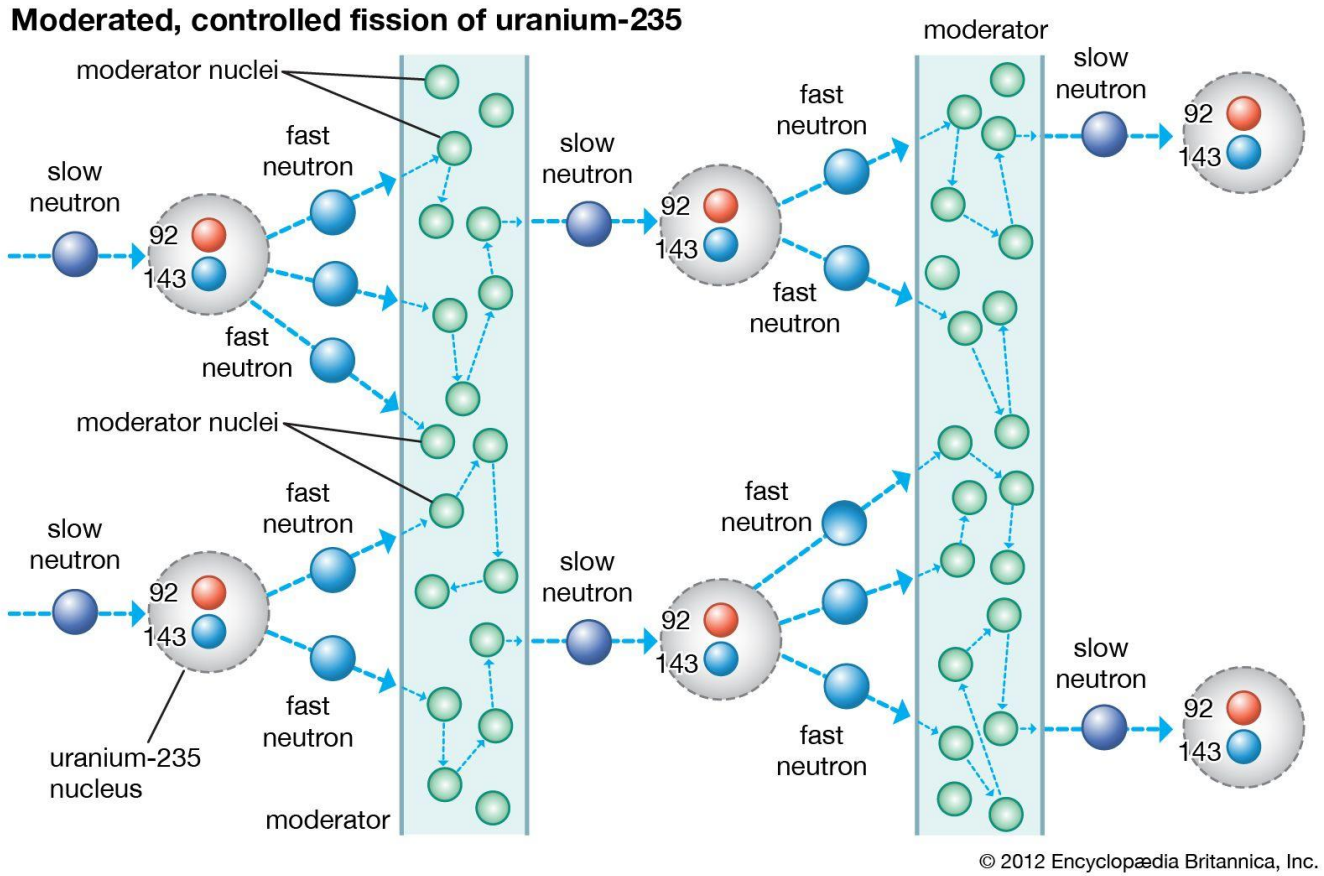


- Barn (b) ühik = 10^{-28} m^2
- Praegusel hetkel on see nagu sihtmärgi tabamise tõenäosuse mõõtmine sõltuvalt pindalast.
- ÜHE nukliidi "interaktsiooni tõenäosus", kuid see on tähenduslik ainult **paljude** nukliididega materjali sees.

U-235 tuumalõhustumise ristlõige

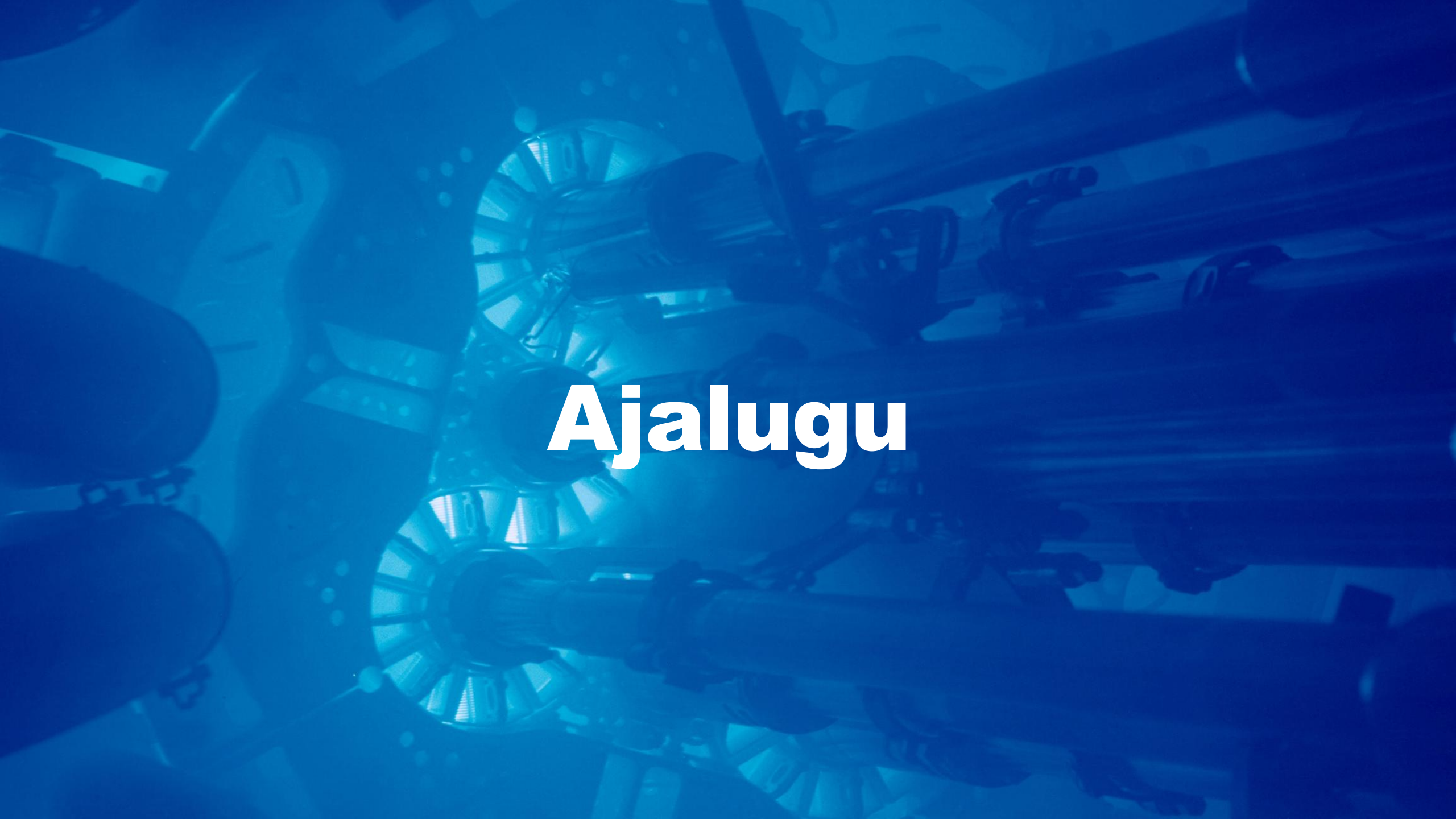


Neutronite modereerimine



Neutronite modereerimine:

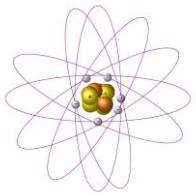
- Neutronite aeglustamine
- Kerge mass
- Madal neutronite neeldumine



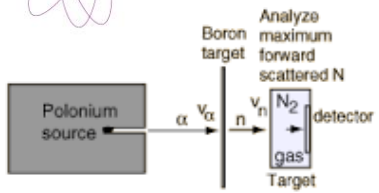
Ajalugu

Ajalugu

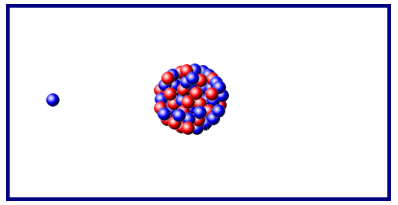
- 1911: Ernest Rutherford avastas aatomituuma



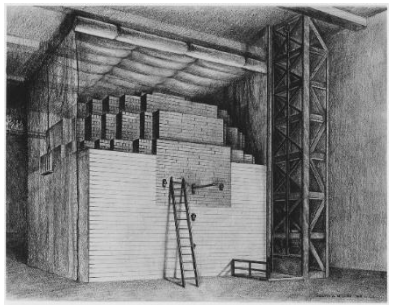
- 1932: James Chadwick avastas neutroni



- 1938: Tuumade lõhustumise avastamine
  - Otto Hahn ja Fritz Strassmann
  - Teoreetiline selgitus Lisa Meitneri ja Otto Robert Frischi poolt 1939



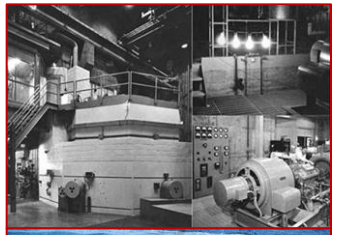
- 1942: Chicago Pile-1 (USA)
  - Maailma esimene ahelreaktsioon
  - Maailma esimene tuumareaktor
  - Enrico Fermi Manhattani projekti raames

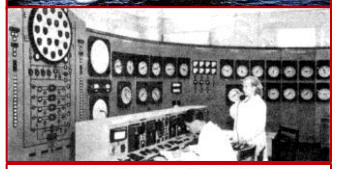


- 1946: Clementine (US)
  - Maailma esimene kiirete neutronitega tuumareaktor
  - Hg jahutusega ja Pu kütusega
  - (Leo Szilard soovis ka sula Pb või PbBi kasutamist)

Ajalugu

- 1951: EBR-1 (Idaho, USA)
  - Kiire neutronspektrum, NaK jahuti, rikastatud U kütus
  - Esimene tuumaelekter, 4 x 200 W
- 1953: USS Nautilus
  - Esimene tuumaallveelaev
- 1954: APS-1 (Obninsk, NL)
  - Esimene tuumaelekter võrku
  - 5 MW, grafiitaeglusti, vesijahutus, (RBMK prototüüp)
- 1955: BORAX-III (Idaho, USA)
  - Maailma esimene reaktor, mis toitis tervet linna elektriga
  - 2 MWe, keevveereaktor
- 1956: Calder Hall (UK)
  - Maailma esimene tuumajaam, mis tootis elektrit tööstuslikul skaalal ent oli loodud eelkõige plutooniumi tootmiseks.
  - 4 X 60 MWe
- 1957: Shippingport (Pennsylvania, USA)
  - Maailma esimene rahumeelsete eemärkidega kommertselektritootmine
  - 60 MWe



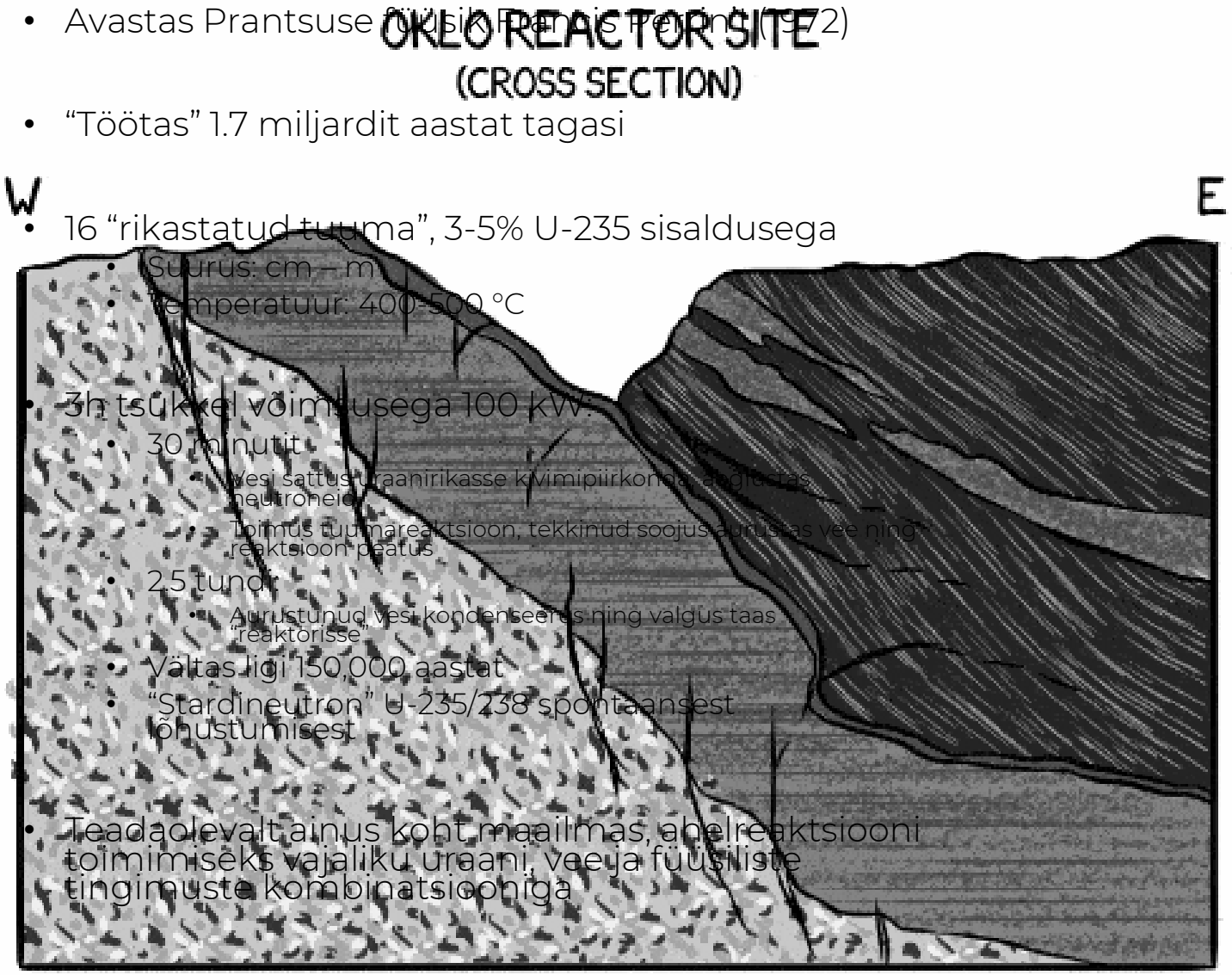


THE ARCO ADVERTISER

Arco First City In United States Lighted By Atomic Power

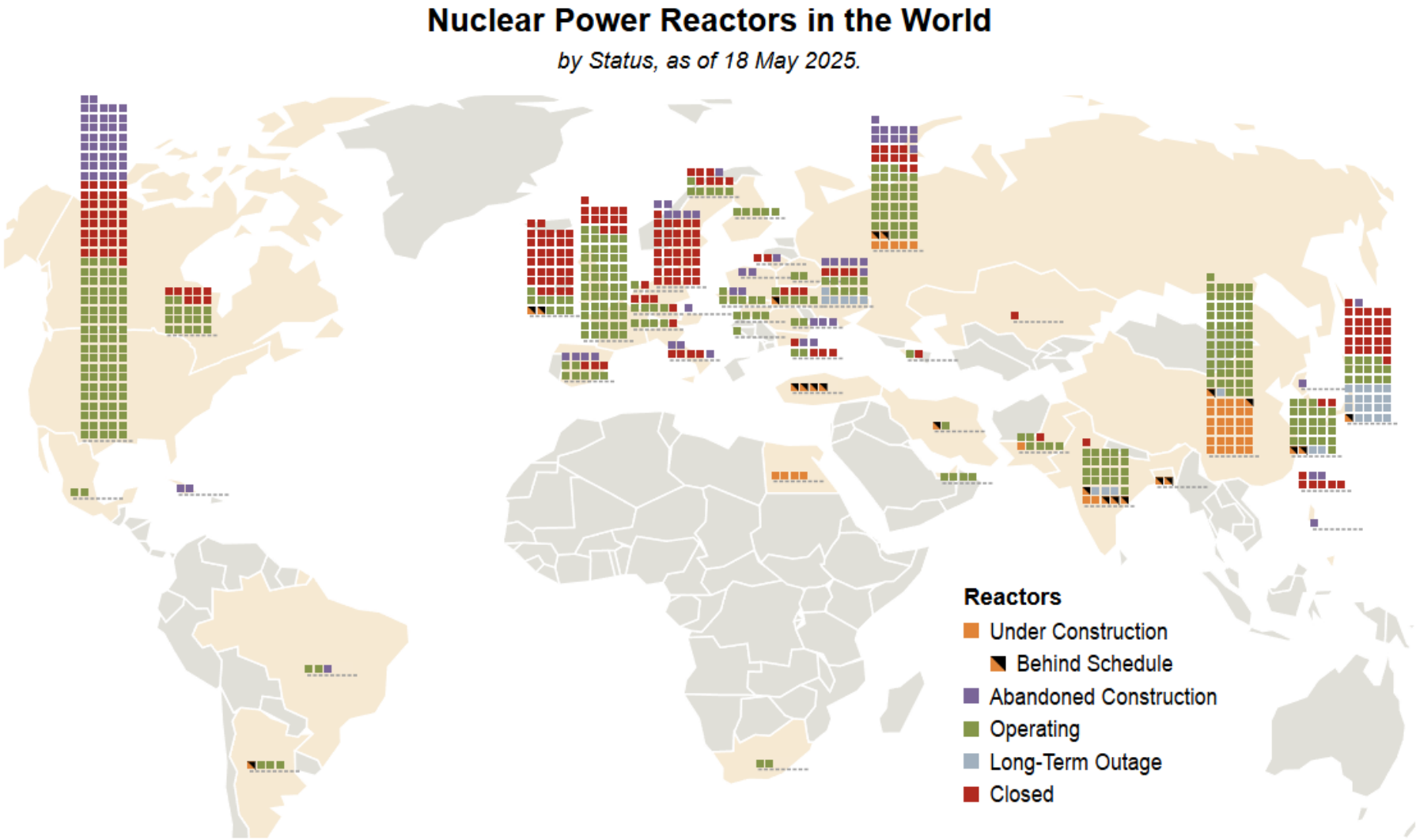
Looduslik tuumareaktor – Oklo, Gabon

- Avastas Prantsuse füüsik François Perrin (1972)
- “Töötas” 1.7 miljardit aastat tagasi
- 16 “rikastatud tuuma”, 3-5% U-235 sisaldusega
  - Suurus: cm – m
  - Temperatuur: 400-500 °C
- 3h tsükkel võimsusega 100 kW:
  - 30 minutit
    - Vesi sattus uraanirikasse kivimipiirkonna, aeglustas neutroneid
    - Toimus tuumareaktsioon, tekkinud soojus aurustas vee ning reaktsioon peatus
  - 2.5 tundi
    - Aurustunud vesi kondenseeris ning valgus taas “reaktorisse”
  - Vältas ligi 150,000 aastat
  - “Stardineutron” U-235/238 spontaansest lõhustumisest
- Teadaolevalt ainus koht maailmas, ahelreaktsiooni toimimiseks vajaliku uraani, veeja füüsiliste tingimuste kombinatsiooniga



- Oklo demonstreeris tuumajäätmete lõppladestuse võimalikkust pinnases

Tuumareaktorid maailmas



408 kommertsreaktorid maailmas
33 pikaajalises katkestuses
63 ehituses
9% maailma elektrienergiast

worldnuclearreport.org

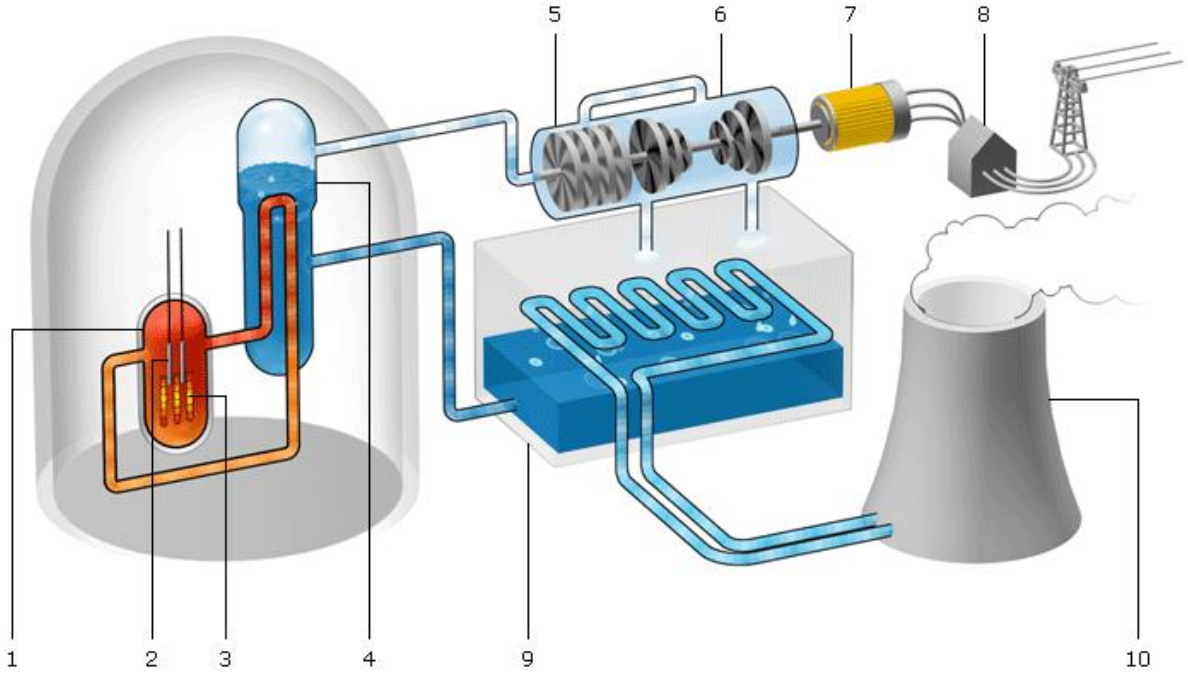
Reaktoritehnoloogiad

Tuumareaktor: „a fancy way to boil water“

- Seade stabiilse ja kontrollitud ahelreaktsiooni säilitamiseks.

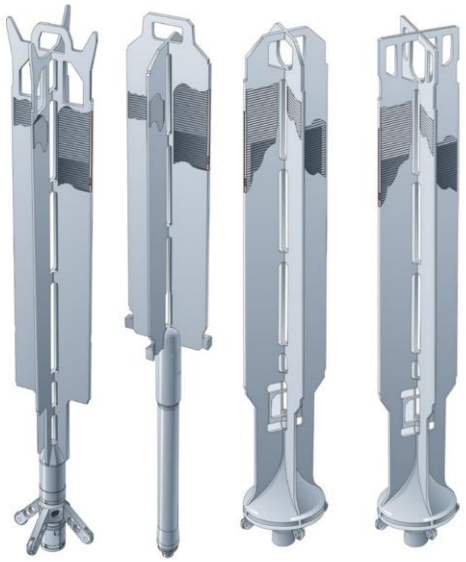
- Tuumareaktsioonide käigus vabanev energia kasutatakse ära jahutusvedeliku abil.

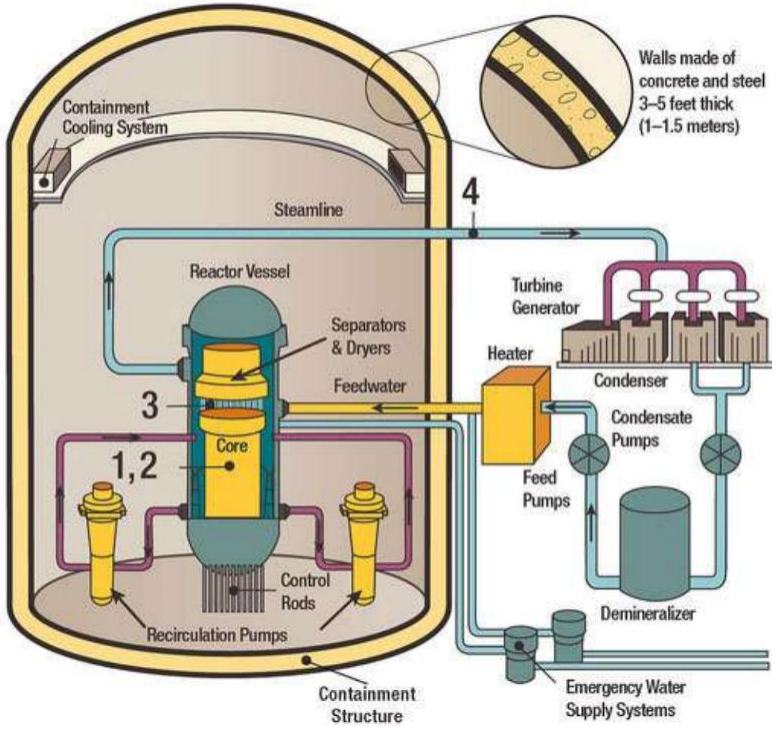
- Kasutatakse näiteks
  - elektri tootmiseks,
  - lennukikandjate ja allveelaevade käitamiseks,
  - isotoopide tootmiseks,
  - materjaliteaduses.



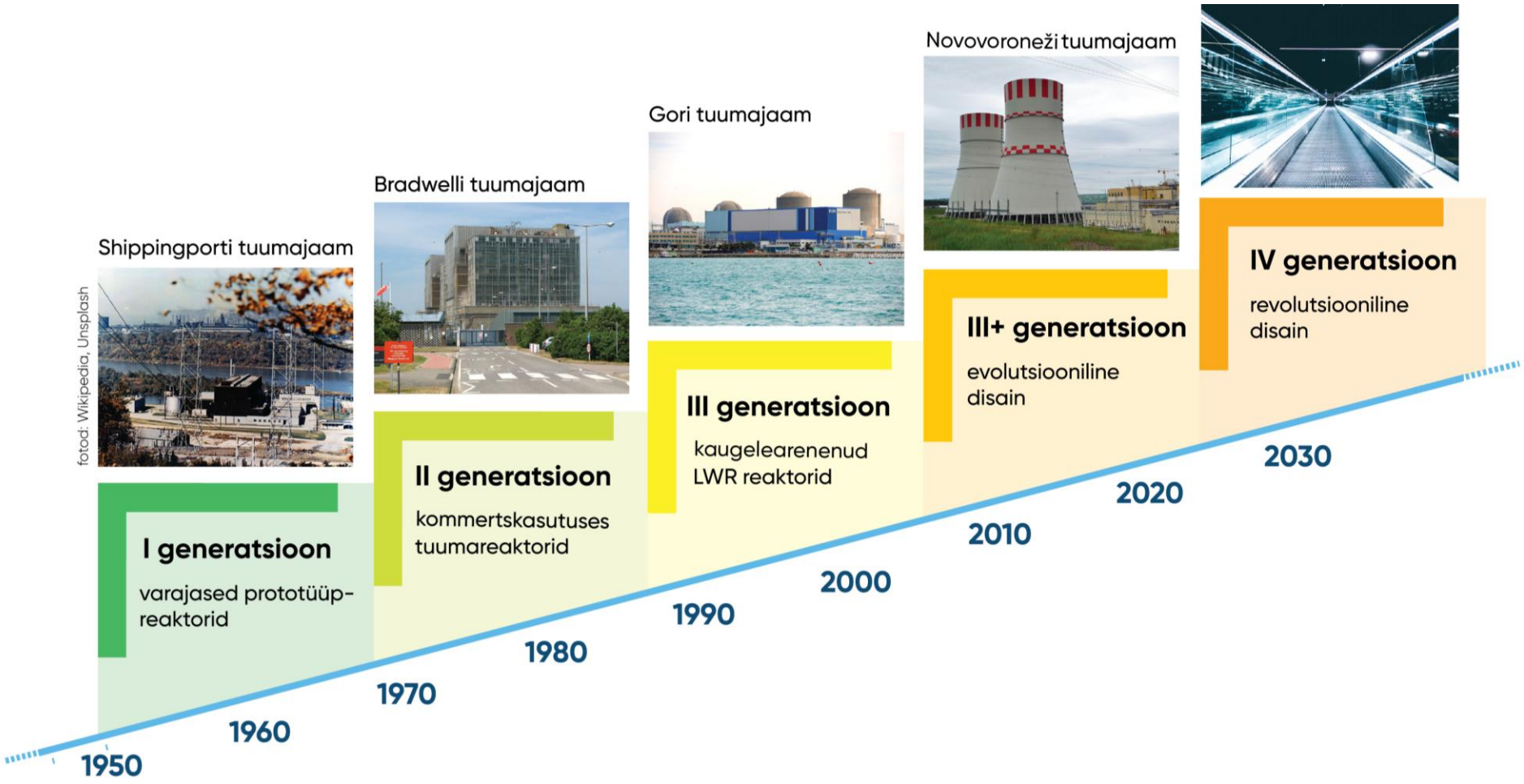
Reaktori võimsuse juhtimine

- Olenevalt tehnoloogiast saab reaktori võimsust juhtida:
  - kontrollvarrastega
  - jahutusvee kiirusega ja temperatuuriga
  - jahutusvees lahustatud boori abil





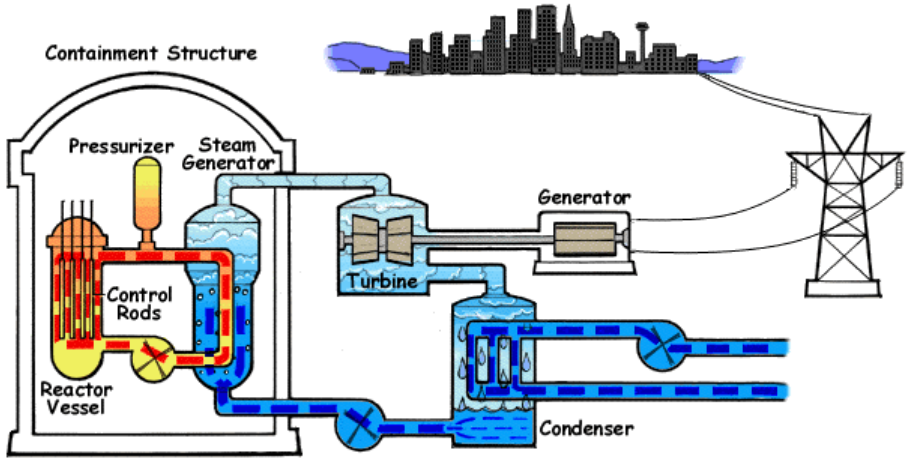
Tuumareaktorite põlvkonnad

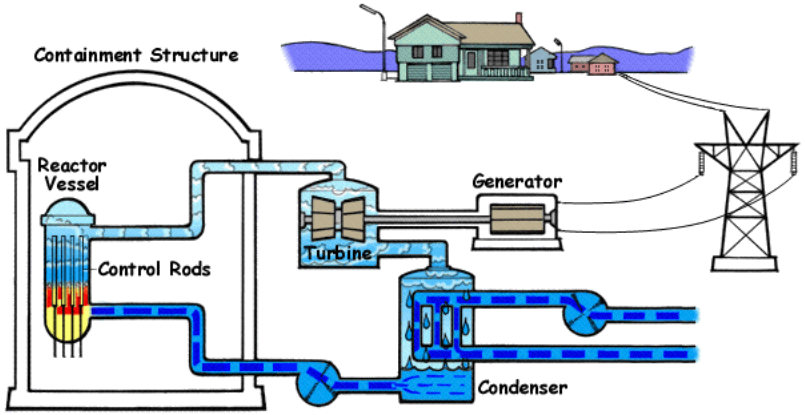


Vesijahutusega reaktorid (enamlevinud)

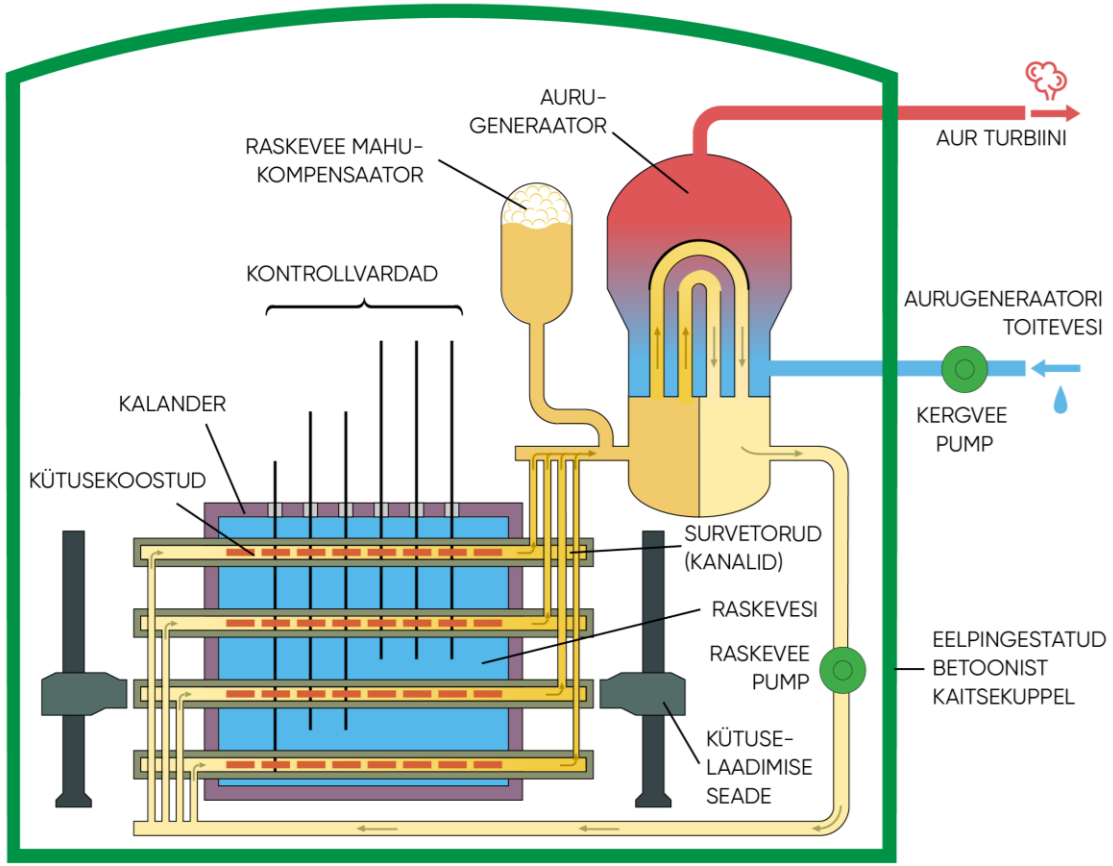
Surveveereaktor
~70% maailma reaktoritest

Keevaveereaktor
~15% maailma reaktoritest



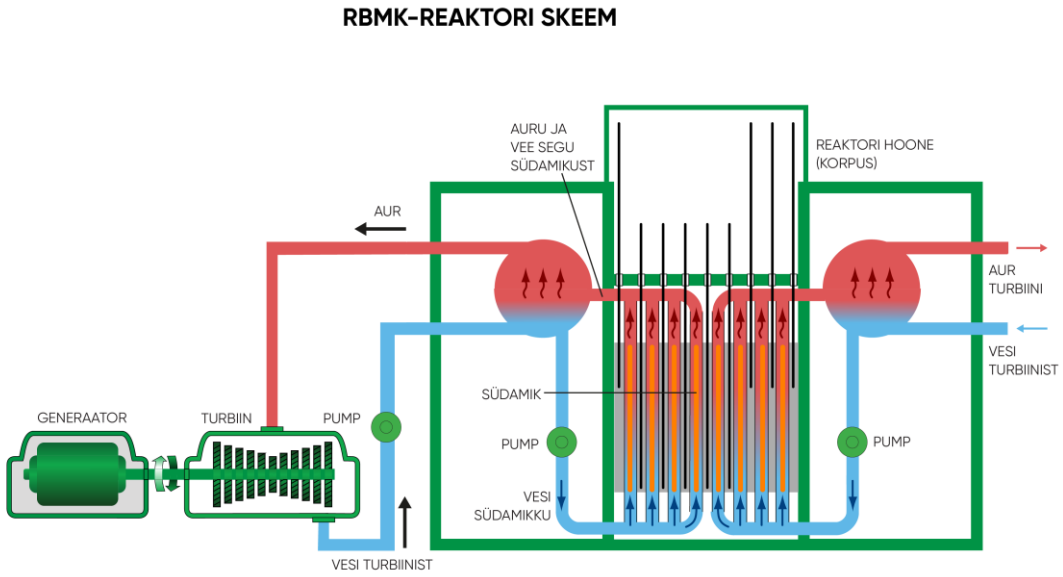


CANDU (CANada Deuterium Uranium)

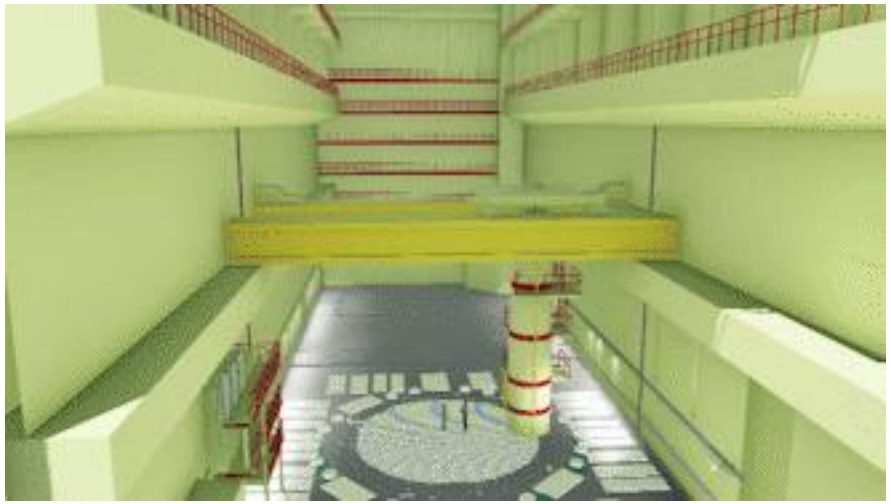


RBMK (Tšornoböl, Ignalina, Leningrad jne)

Kurski jaama juhtpaneel



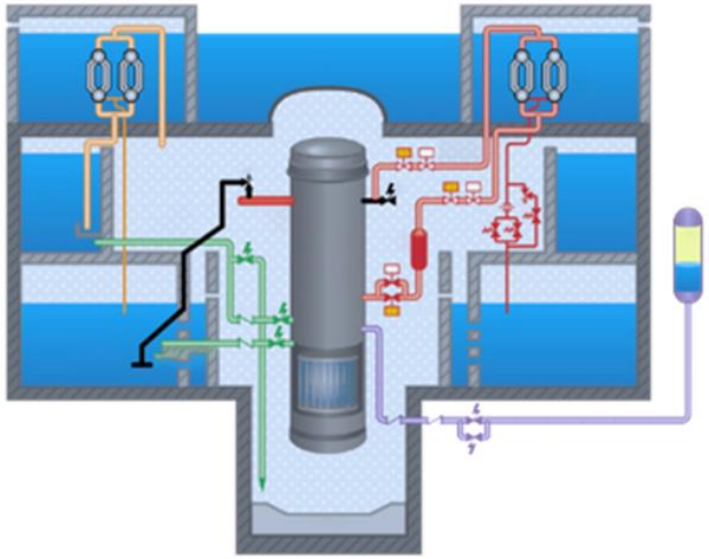
Reaktorihall, anum ja torustikud



Ignalina reaktori pealtvaade

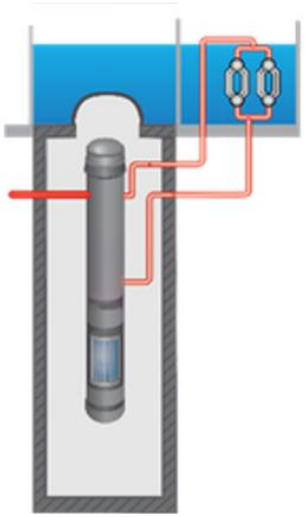
Suure keevaveereaktor VMR versioon

SUURE REAKTORI SÜSTEEMID



ESBWR

VÄIKE REAKTORI SÜSTEEMID

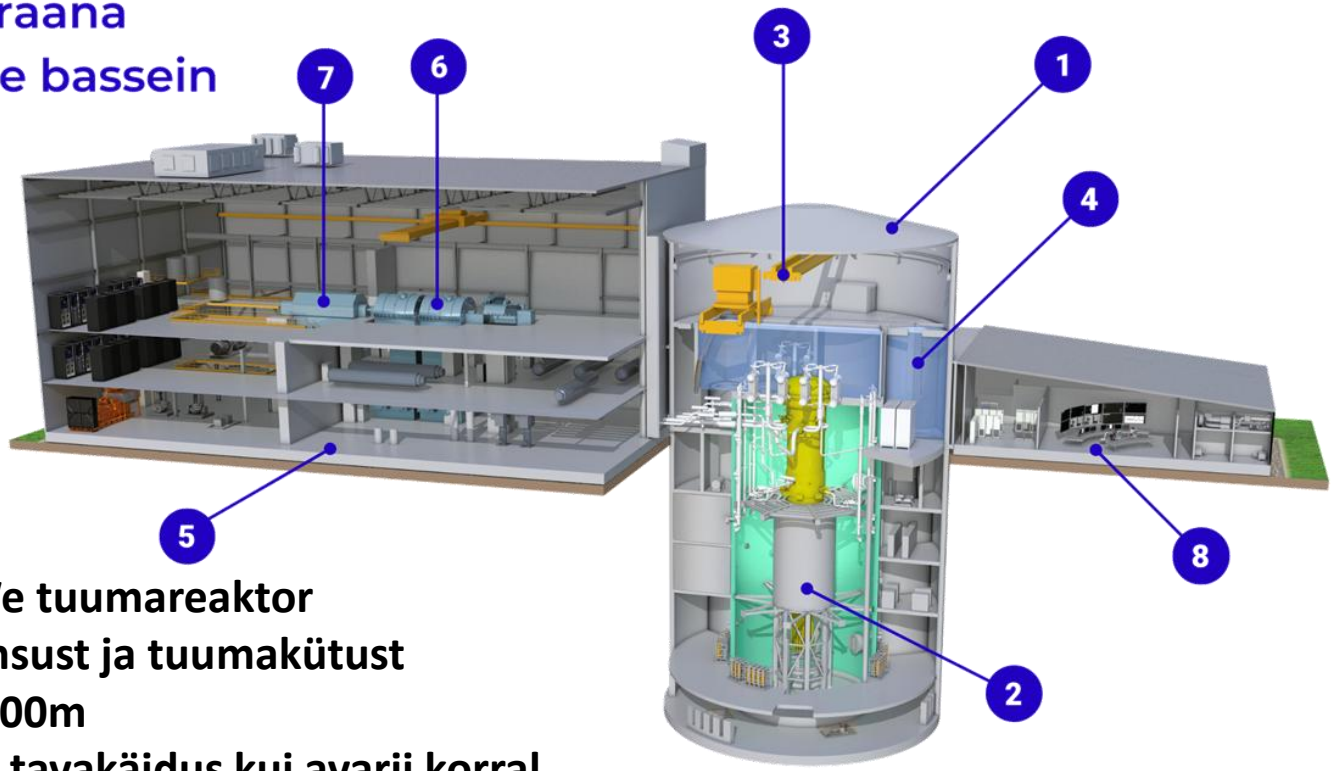


BWRX300

- Vähem betooni
- Vähem süsteeme
- Väiksem

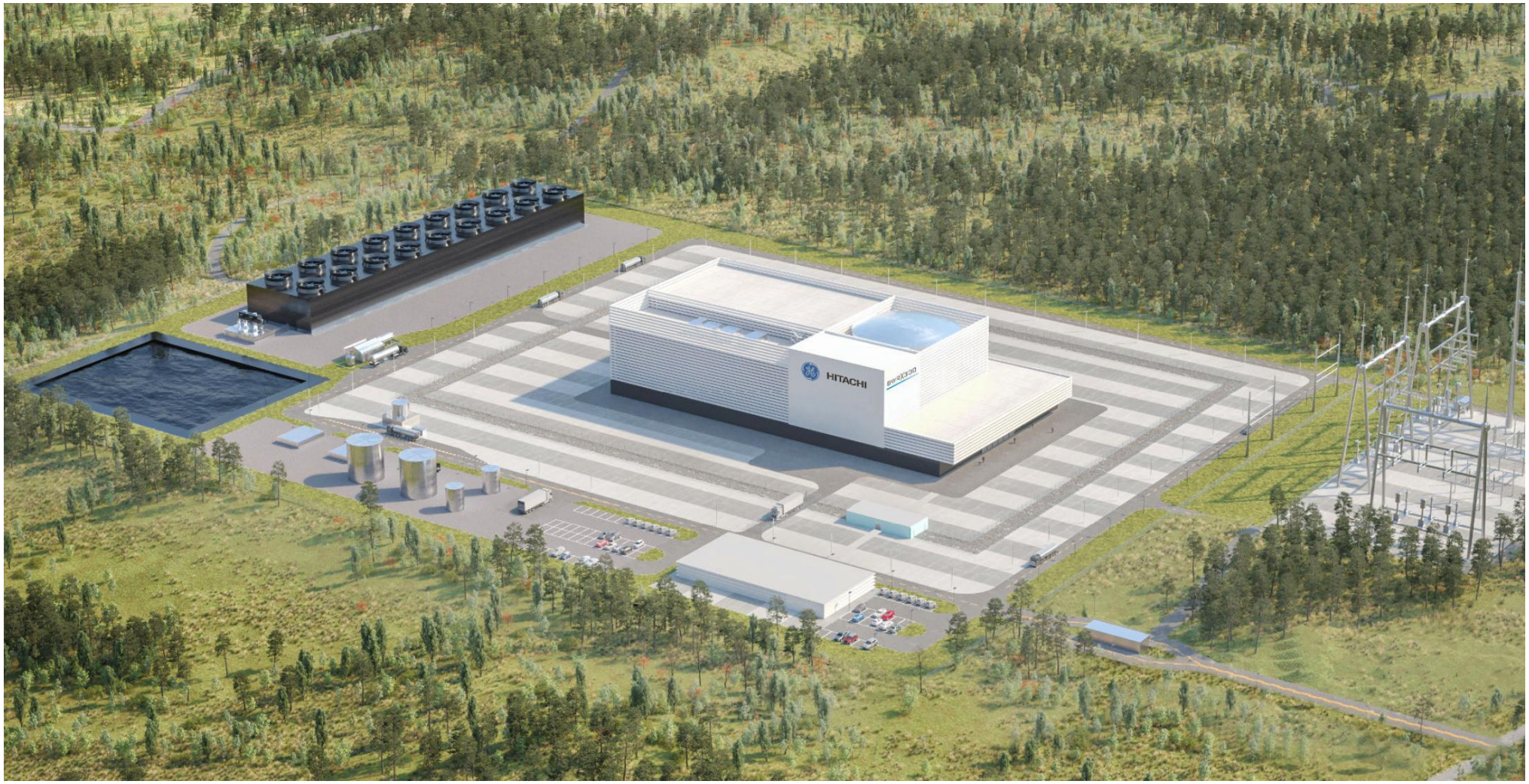
BWRX-300 – General Electric Hitachi

1 - Reaktorihoone
2 - Reaktor
3 - Reaktorihoone kraana
4 - Kasutatud kütuse bassein
5 - Turbiinihoone
6 - Turbiin
7 - Generaator
8 - Kontrollruum



- **Vesijahutusega 300 MWe tuumareaktor**
- **5x väiksem, vähem võimsust ja tuumakütust**
- **Jaama pindala 200m x 300m**
- **Passiivsed süsteemid nii tavakäidus kui avarii korral**
  - **Ei vaja pumpasid, kasutab loomulikku ringlust**
  - **Maa-alune paigutus lisab kaitset**
- **Pikaaegne BWR kogemus Soomes, Rootsis**

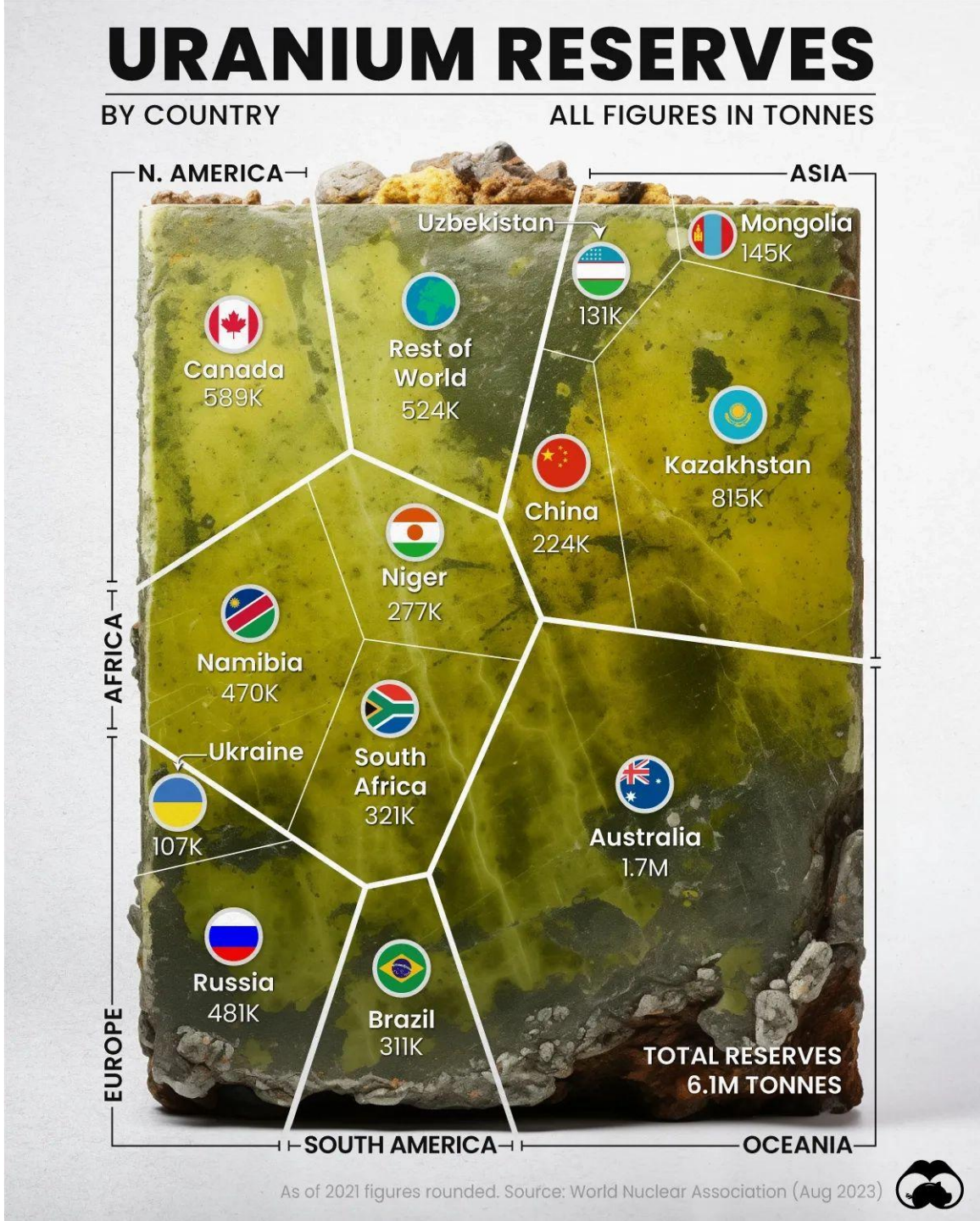
GEH BWRX-300 (300 MWe/870 MWth)



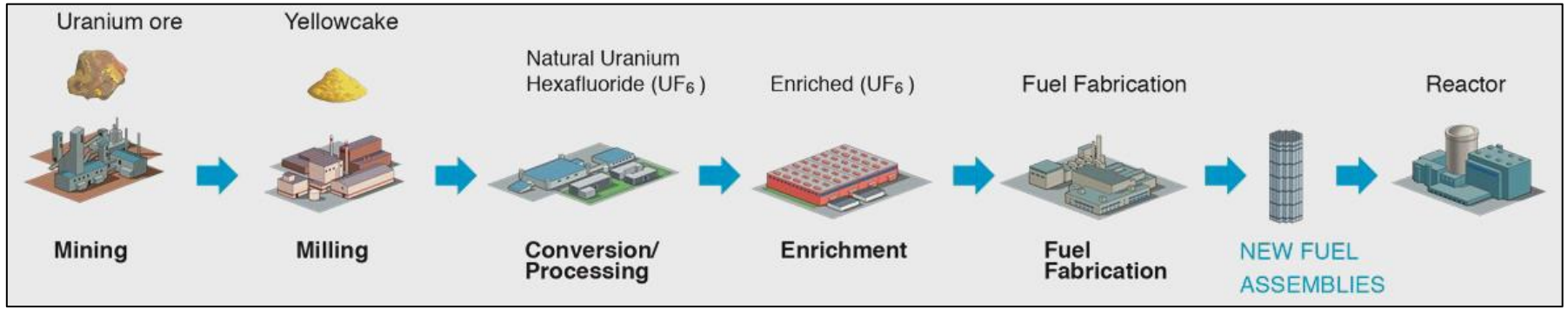
Tuumkütus ja tuumajäätmed

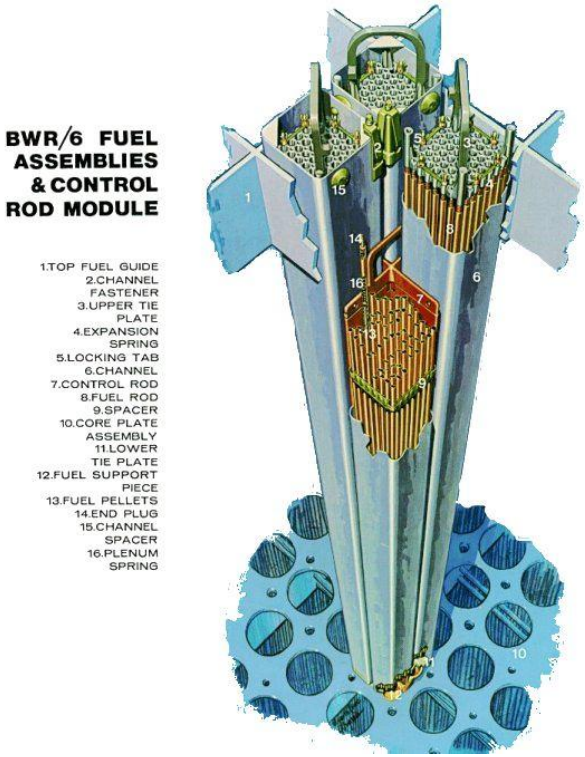
Uraani päritolu

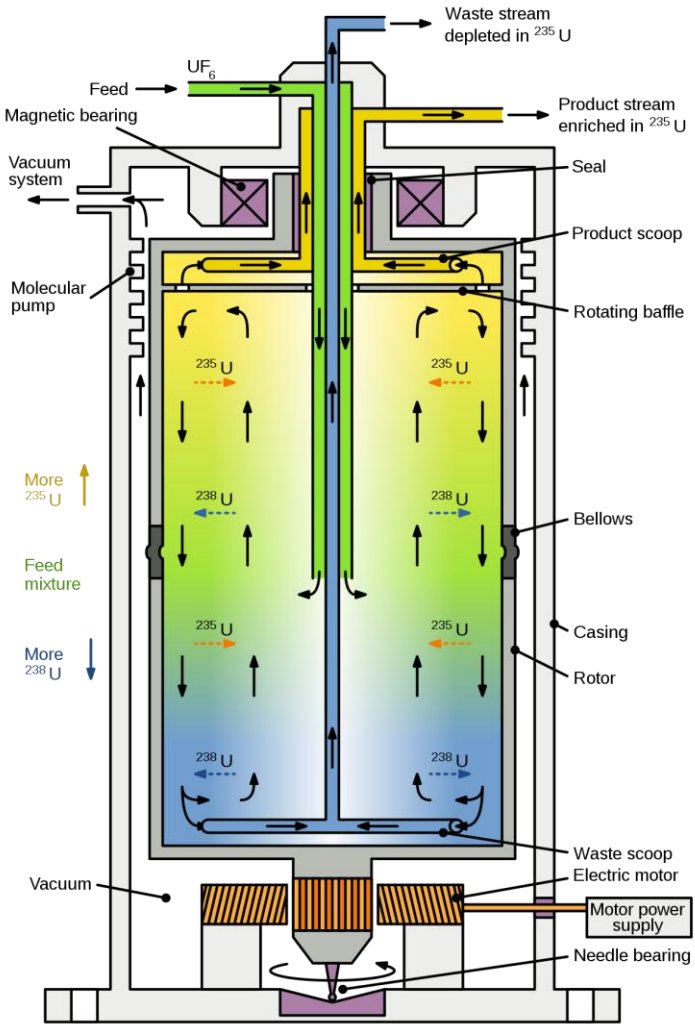
- Esimene NSV Liidus toodetud uraan pärines 1940. aastatel Eestist, Sillamäelt.
- Hiljem loobuti sellest tootmisest madalale kontsentratsioonile, madalale kaevandatavusele ja rikaste uraanimaakide avastamisele teistes riigi osades.



Tuumkütuse elutsükkel





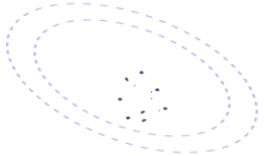


Paagutatud pelletid peavad läbima kvaliteedikontrolli

~3 000 000 tonni
kivisütt aastas

Kivisütt põletav elektrijaam
elektrilise võimsusega 1000 MW

~ 7 000 000 tonni
jäätmeid aastas, põhiliselt gaasid CO_2 ja SO_2



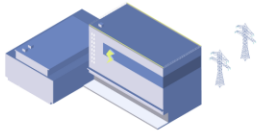
150 000 kuni **200 000 tonni** lendtuhka

Tuhk tuhaväljal

Mõlema jaama aastane elektritoodang oleks ~8 TWh

~ 25 tonni
uraani UO_2 aastas

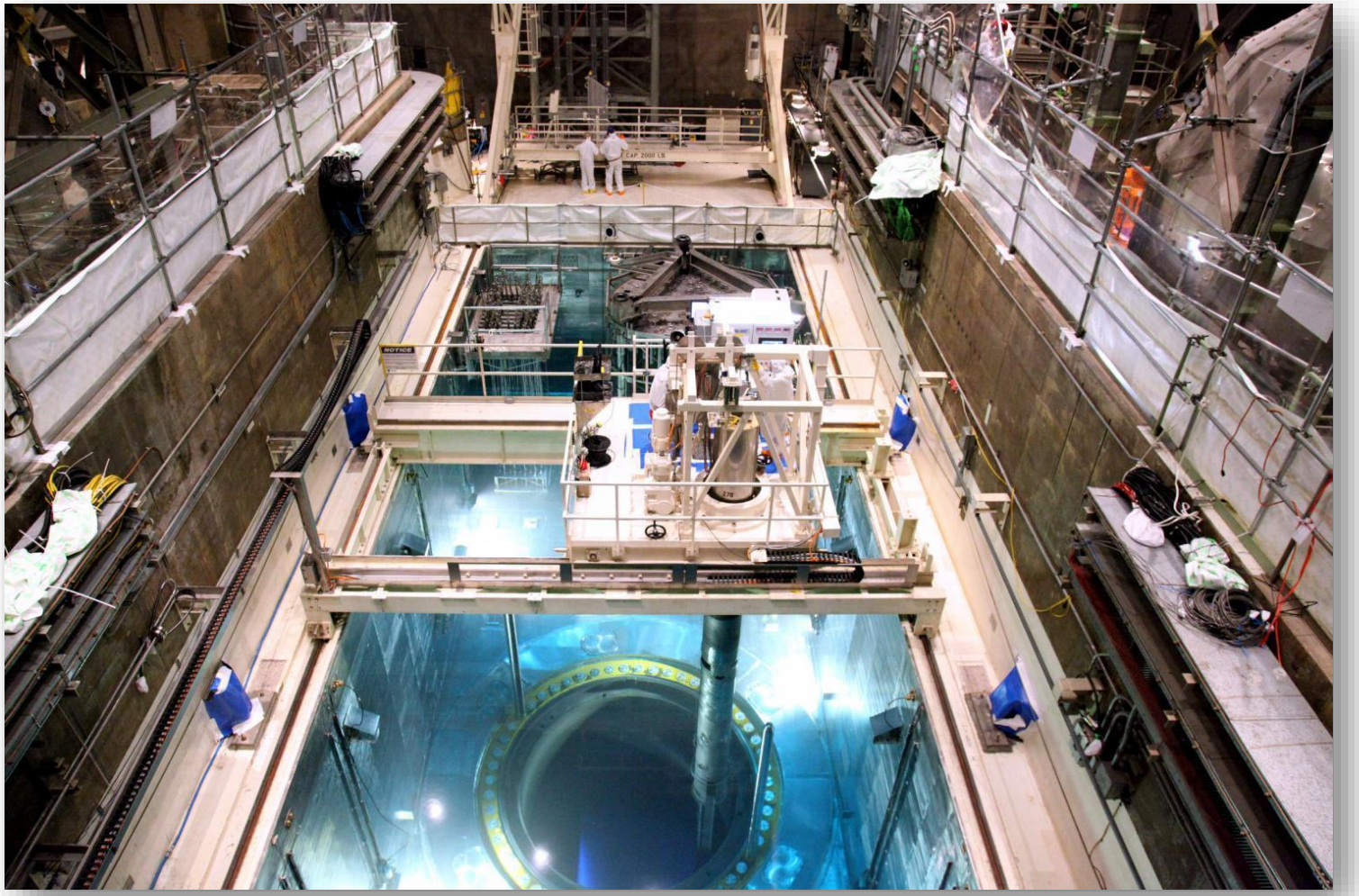
Tuumaeletrijaam
elektrilise võimsusega 1000 MW



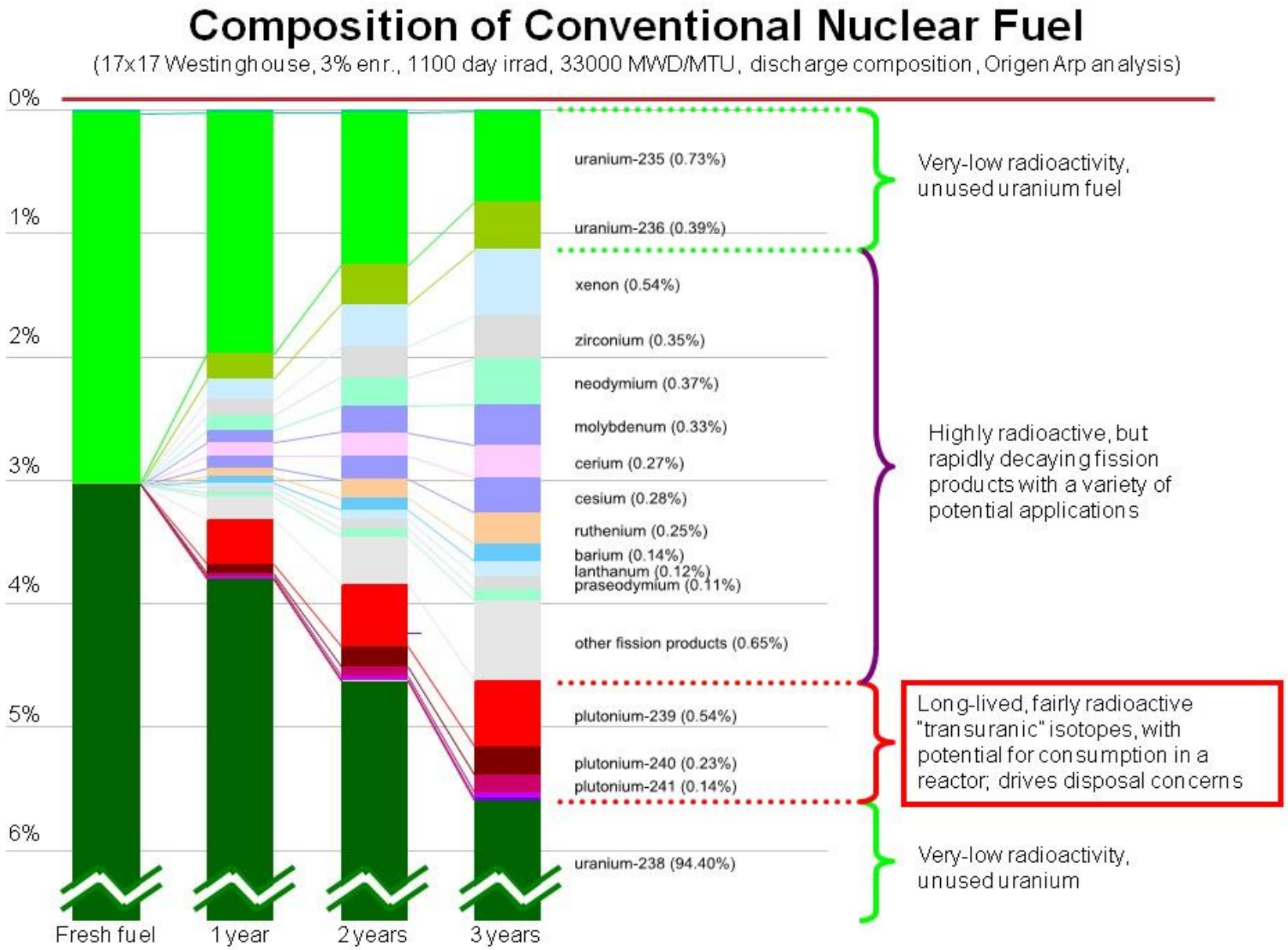
25 tonni kõrgradioaktiivset jäädet, mida saab turvaliselt geoloogiliselt ladustada

https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/introduction/energy-for-the-world-why-uranium.aspx

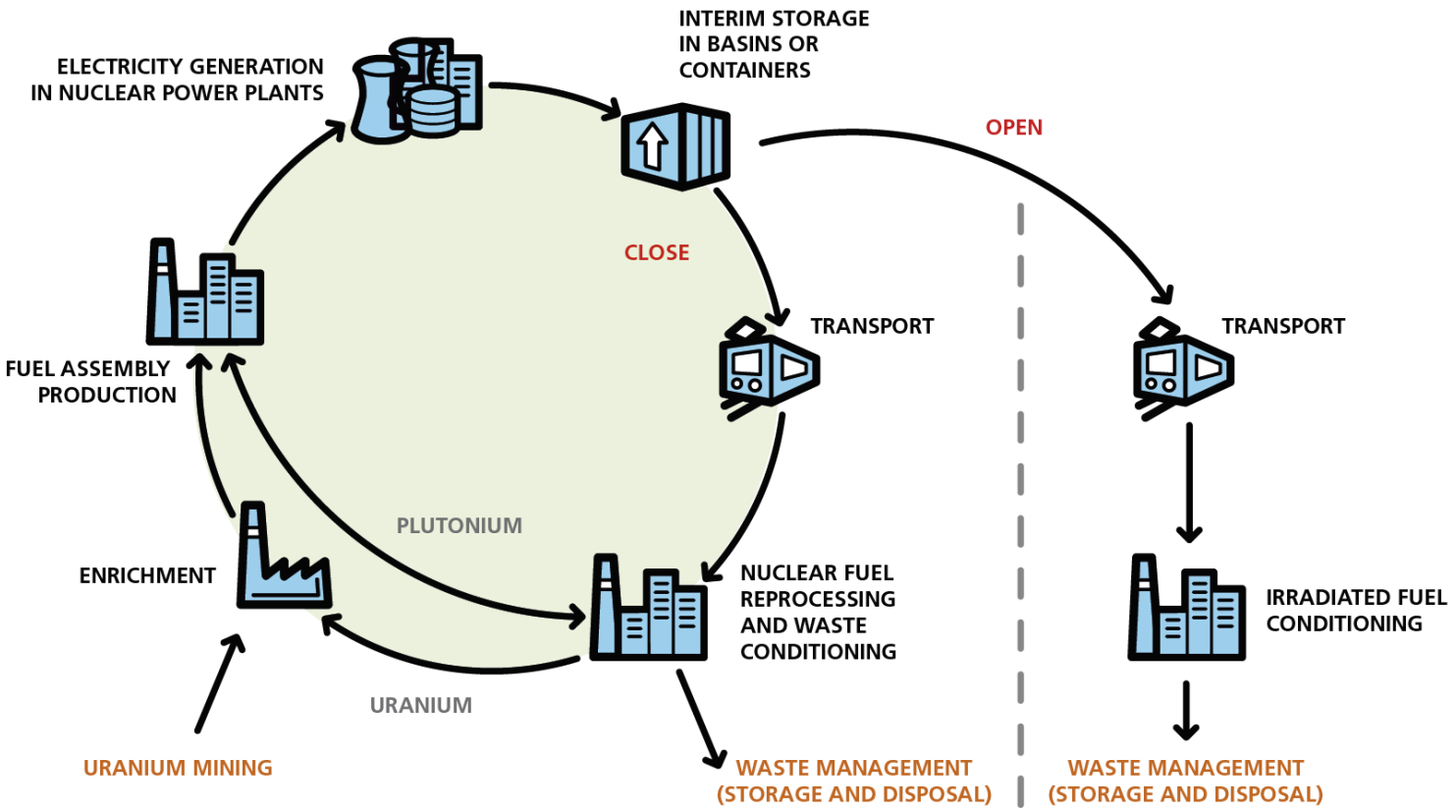
Tuumkütuse vahetus



Kasutatud tuumkütus



Tuumakütuse tsükli sulgemine

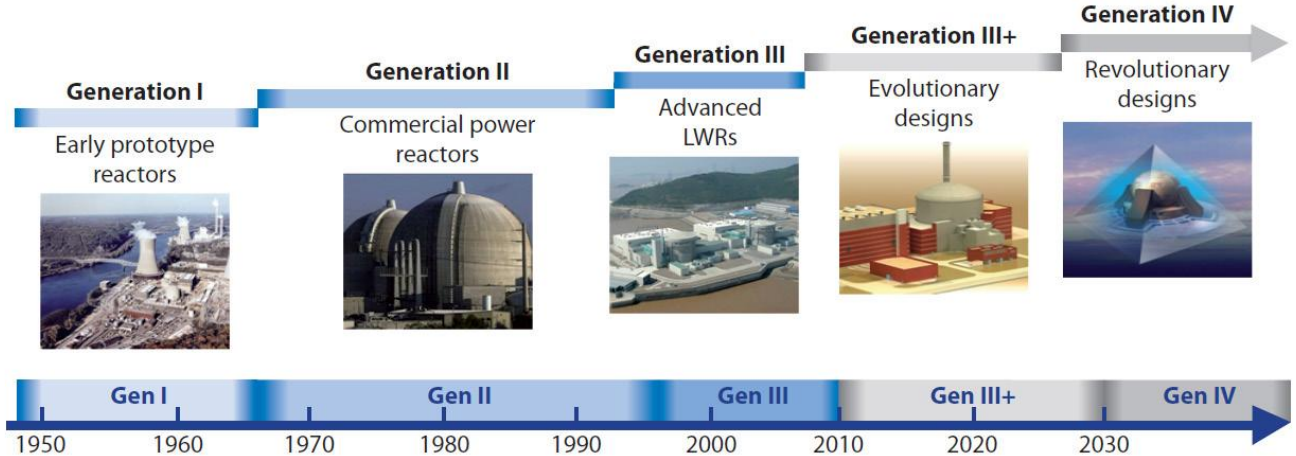


IV põlvkonna reaktorid

Tuumaenergeetika IV põlvkond

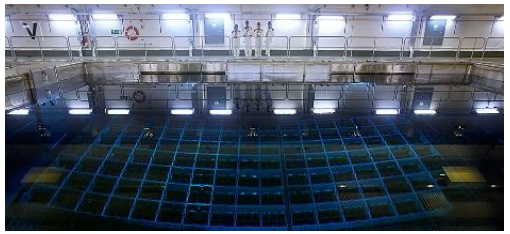
Eesmärgid

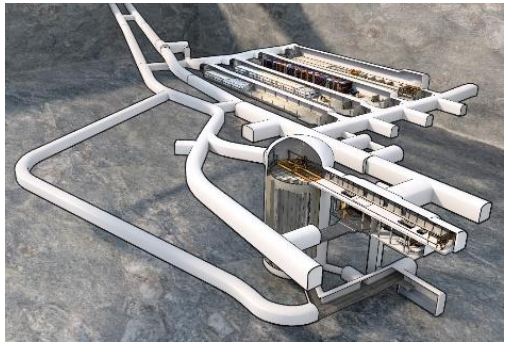
- Jätkusuutlikkus
  - Efektiivsem kütusekasutus (i.e. breeding)
  - Jäätmete hulga ja radioaktiivsuse vähendamine (transmutation of minor actinides)
- Turvalisus
  - Kütus terroristide jaoks mitteatraktiivsel kujul
  - Minimaalne tuumarelva materjali leviku oht
- Ohutus
  - Parendatud töökindlus ja ohutus
  - Veelgi madalam tuuma sulamise tõenäosus
  - Minimaalsed mõjud väliskeskkonnale (abi, evakuatsioon, reostus)
- Majanduslik tasuvus ja konkurentsivõime
  - Moodullahendused ja tehasetootmine



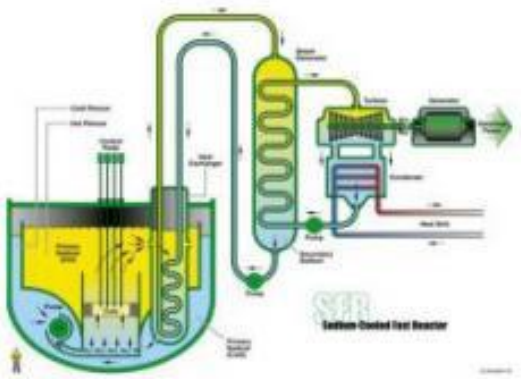
Reaktoritüübid

- Ülikõrgtemperatuuri reaktor (VHTR)
- Gaasjahutusega reaktor (GFR)
- Sulasoolareaktor (MSR)
- Ülekriitilise vee reaktor (SCWR)
- Naatriumjahutusega reaktor (SFR)
- Pliijahutusega reaktor (LFR)

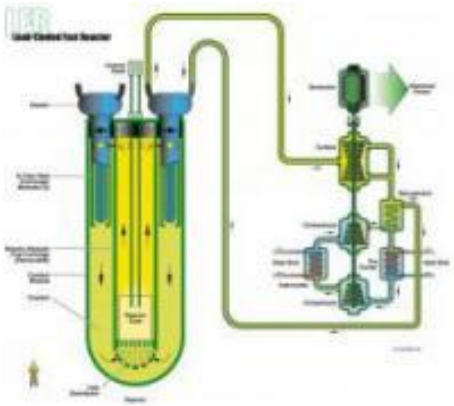




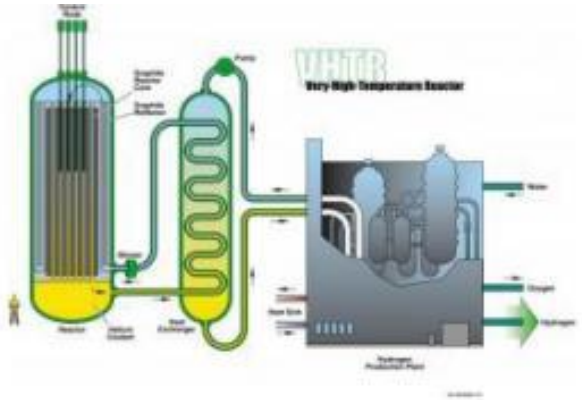
IV põlvkond 6 tehnoloogiat



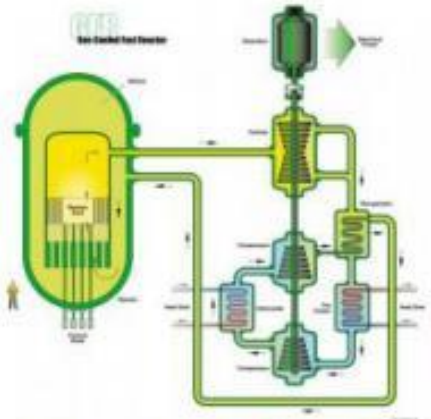
Sodium Fast Reactor



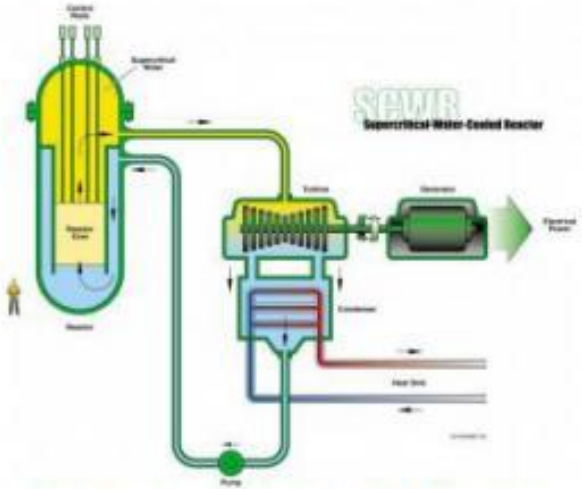
Lead Fast Reactor



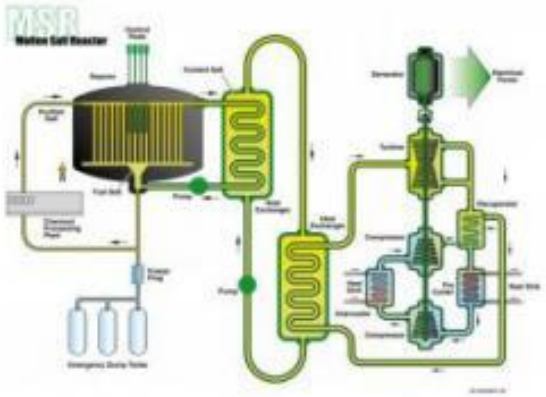
Very High Temperature Reactor



Gas Cooled Fast Reactor

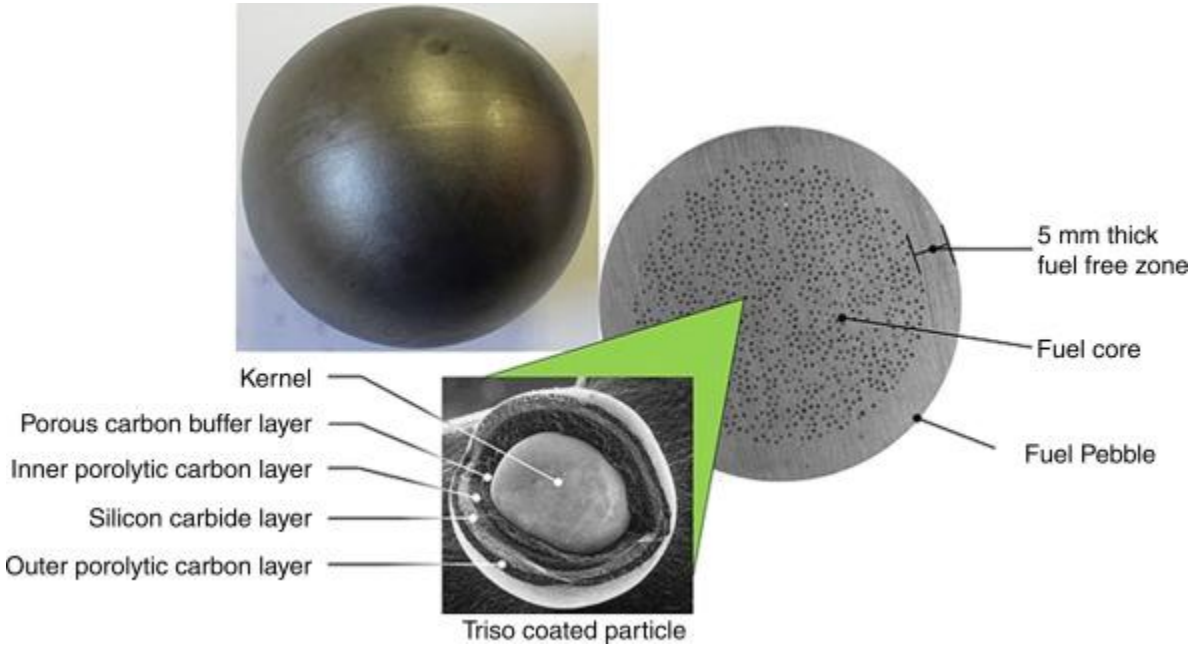


Supercritical Water Cooled Reactor

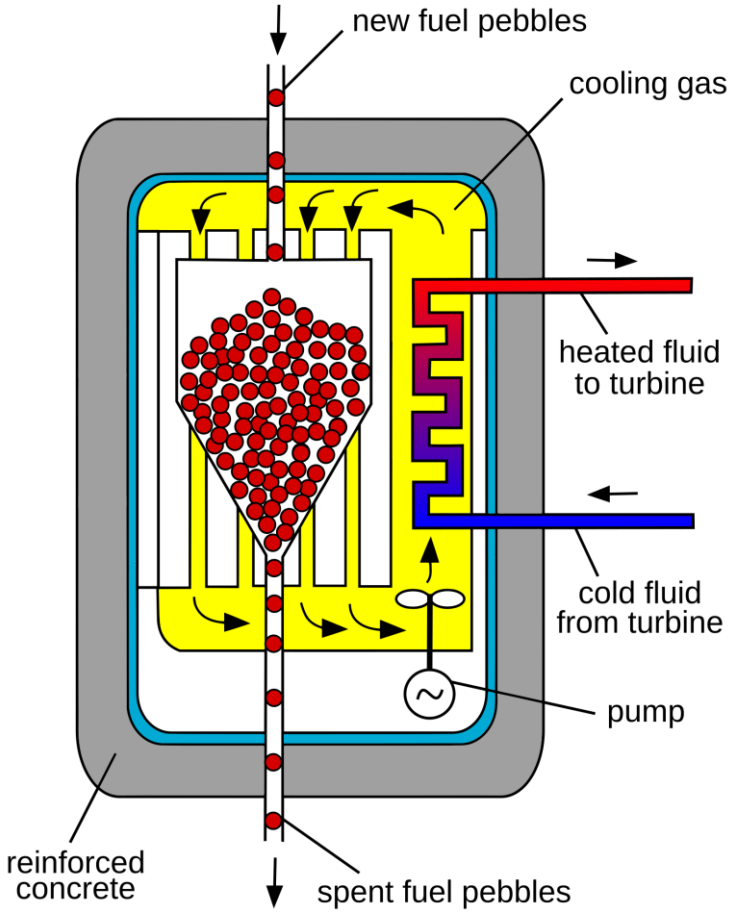


Molten Salt Cooled Reactor

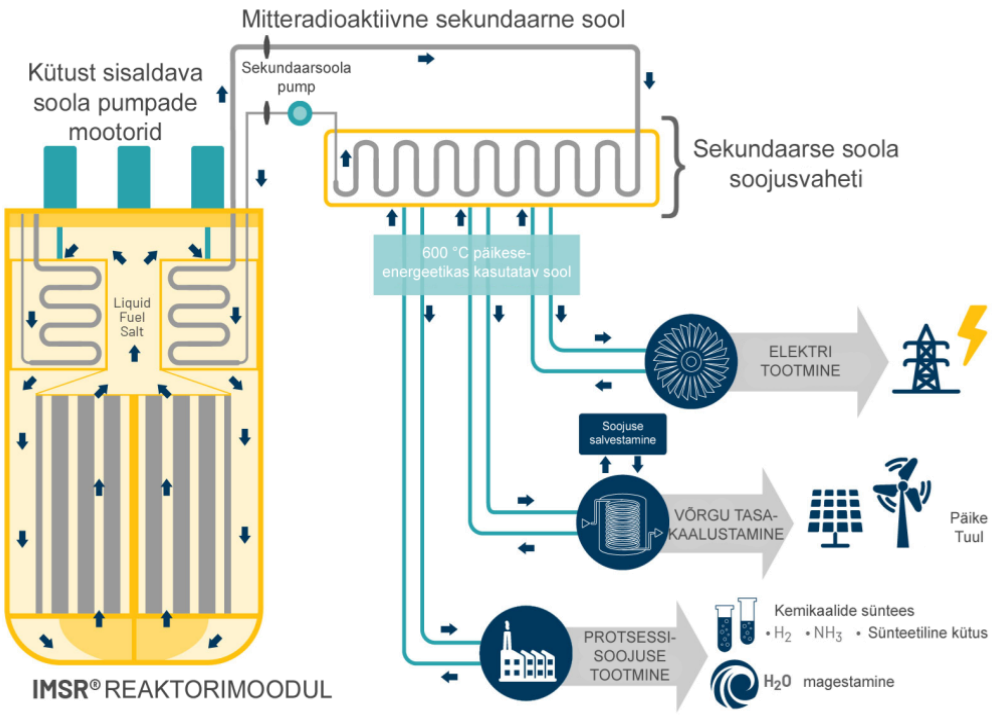
Ülikõrgtemperatuuri reaktor (VHTR)

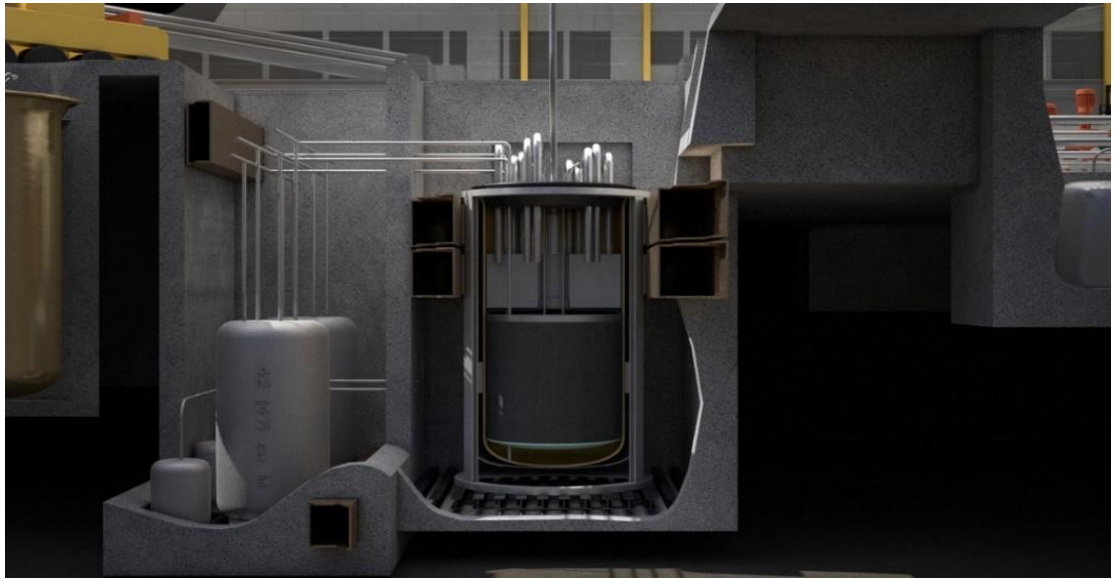


Pebble bed reactor scheme



Sulasoolareaktor





- Integral Molten Salt Reactor (IMSR)
- Elektriline võimsus 200 MW
- Kütuseväl p 7 aastat

Kokkuvõte

- Kliima soojeneb, Eesti varustuskindlus langeb ja enamus maailma energiast toodetakse jätkuvalt fossiilsetest kütustest
- Tuumajaamad toodavad täna suure osa süsinikvabast elektrist ja on võimelised seda tegema tulevikus
- Tuumaenergeetika eeliseid ja puuduseid tuleks kaaluda tõsiselt ja läbimõeldult (püüdes vältida emotsiooni)
- Vesijahutusega reaktorid on kõige tuttavamad ning nende tarneahelad on kõige arenenumad
- Neljanda põlvkonna reaktoritel on kindlasti oluline roll tulevikus, eelkõige kütusetsükli tõhustamisel
- Reaktorid on ohutud tänu väga detailsele projekteerimisele ja järjepidevale ohutusanalüüsile ning üha lisanduvatele passiivsetele kaitsemehhanismidele

FERMI.