



Tuumateadus ja tehnoloogia



Andrei Goronovski

Fermi Energia suvekool "Fermion"
29.07.2024

Haridus

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

Töö

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





Sisukord

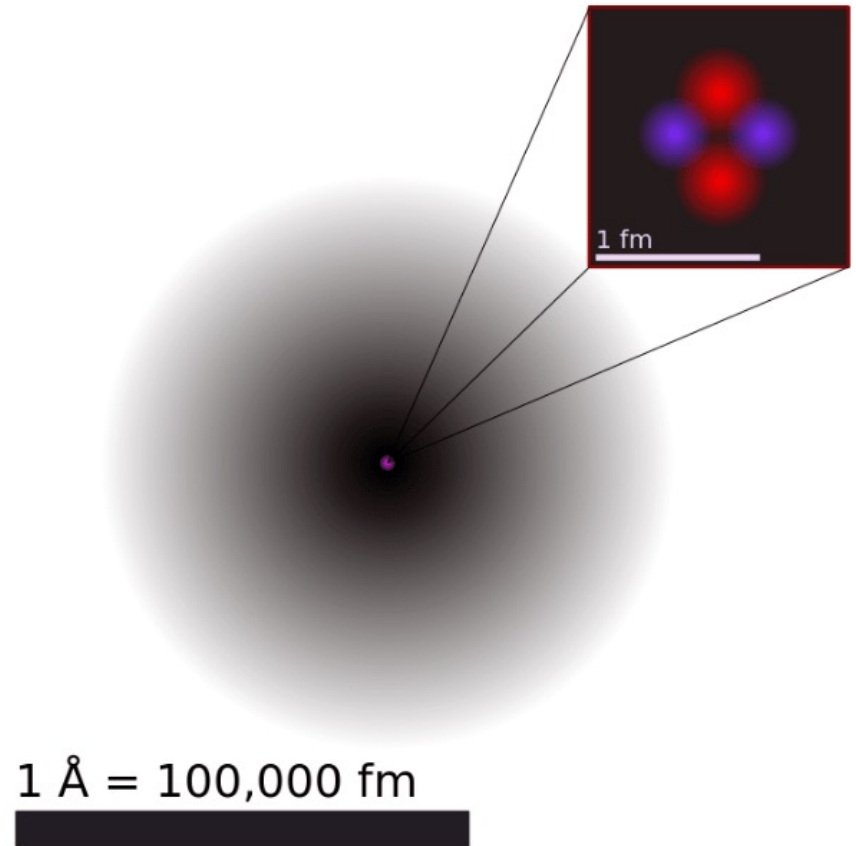
- Reaktorifüüsika
 - Aatomi ja tuuma kirjeldus
 - Tuumareaktsioonid
 - Ahelreaktsioonid
 - Neutronite energiast, aeglustamisest
- Reaktorite ajalugu ja areng
- Reaktoritehnoloogiad
 - Reaktorite ehitus ja tööpõhimõtted
 - Erinevate reaktorite tüübid
 - Väikesed moodulreaktorid
- Tuumkütus ja tuumajäätmed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

A blue-tinted photograph of a nuclear reactor core, showing the intricate structure of fuel rods and support beams. The image is overlaid with the text 'MIS ON TUUMAENERGIA?' in a bold, white, sans-serif font.

MIS ON TUUMAENERGIA?

F. Aatomi ehitus

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



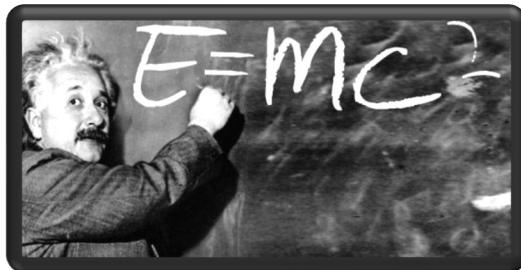
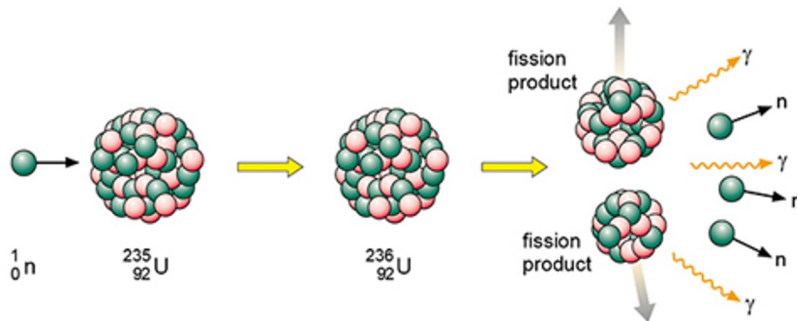
Heelium-4 aatomi illustratsioon



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

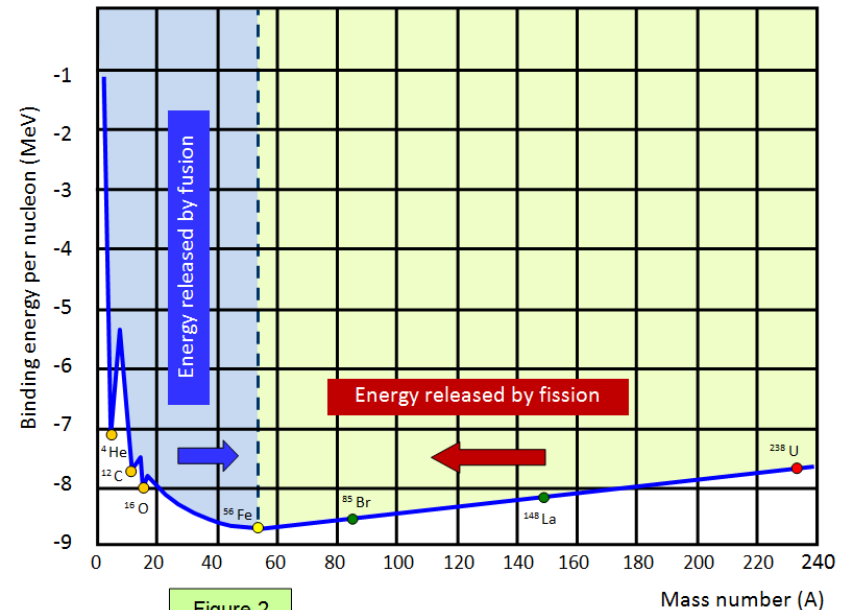
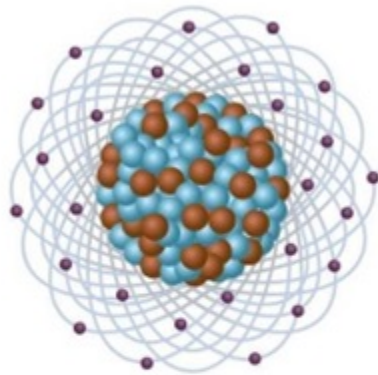


Figure 2



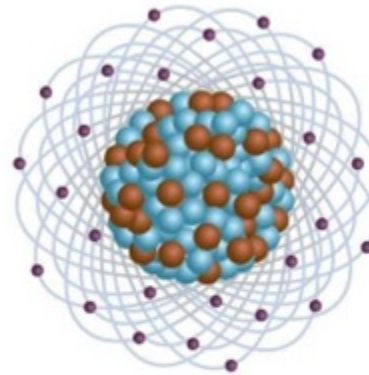
Isotoobid

Uraan 238



● 92 prootonit ● 146 neutronit

Uraan 235

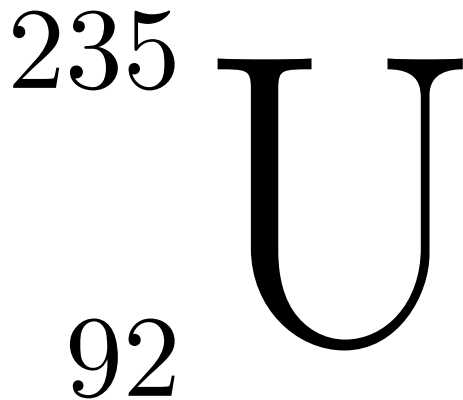


● 92 prootonit ● 143 neutronit

~0.7% looduslikust uraanist



Massi defekt

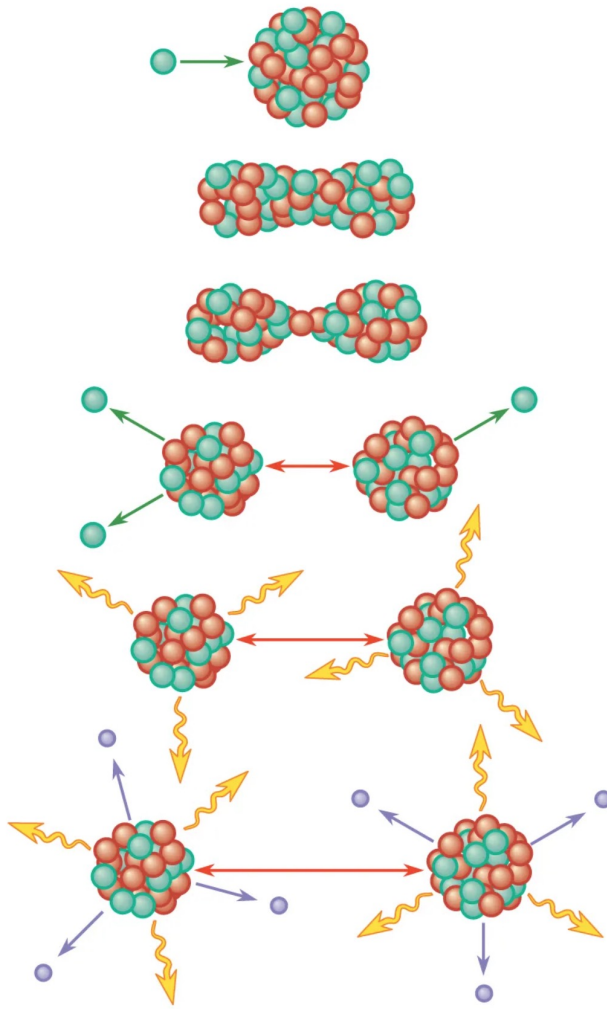


- Prootoni mass = 1.007276466621 u
- Neutroni mass = 1.00866491588 u
- Eeldatud mass = 236.9085179 u
- Mõõdetud mass = 235.0439299 u
- Massi defekt (puudus) = 1.864588 u
- Defekt nukleoni kohta = 0.007934417 u
- 1 u on ekvivalentne 931.5 MeV

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



Tuuma lõhustumine



Neutron lööb vastu tuuma ja on absorbeeritud.

Absorbeeritud neutron põhjustab tuuma deformatsiooni.

10^{-14} sekundi pärast, üks deformatsioonidest on nii tugev, et tuum enam ei saa taastuda.

Tuum lõhustub vabastades energiat ja keskmiselt 2-3 neutronit.

10^{-12} sekundi pärast, lõhustumise fragmendid kaotavad oma kineetilist energiat. Toimib gamma lainede kiirgamine.

Lõhustumisproduktid kaotavad oma energiat kiirguse kaudu, mis võib kesta sekunditest aastateni.

Neutrons	Protons	Beta particles	Gamma rays
----------	---------	----------------	------------



Ahelreaktsioon

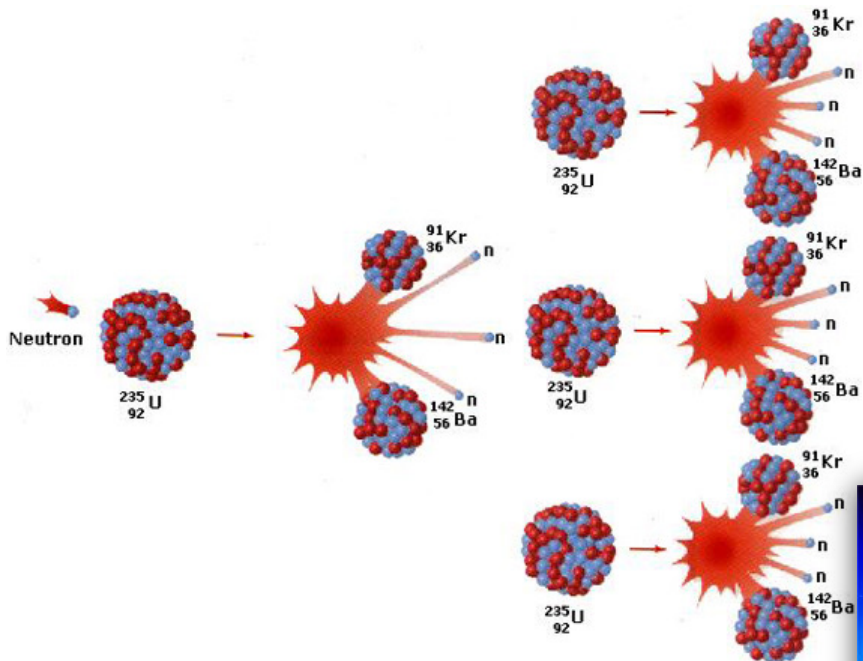
***k* - efektiivne neutronkordaja**

(keskmise neutronite arv ühes lõhustumises põhjustamaks järgmist):

$k < 1$ (alakriitiline): Ahelreaktsioon hääbub,

$k = 1$ (kriitiline): Jätkusuutlik ahelreaktsioon, i.e. reaktoris,

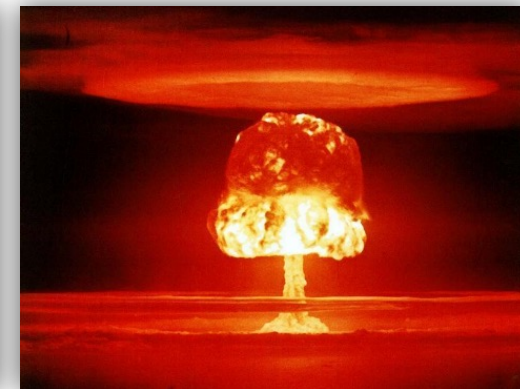
$k > 1$ (ülecriitiline): Iga reaktsioon toodab rohkem neutroneid kui eelmine, i.e. tuumarelvades.



***Kontrollitult
tuumajaamades***



***Kontrollimata
tuumaplahvatustes***

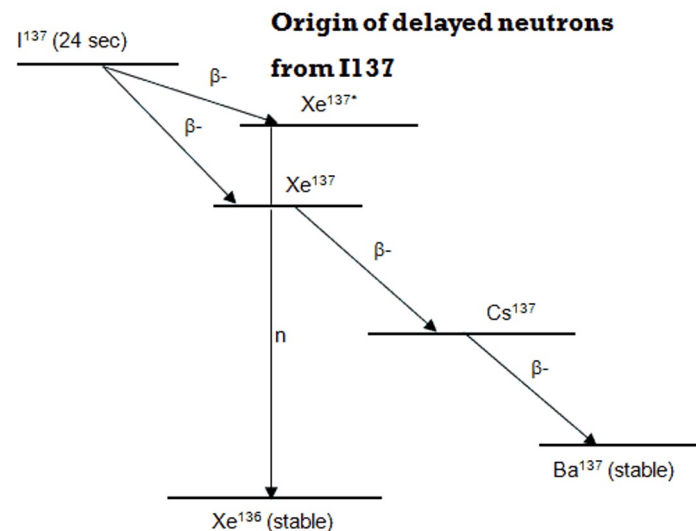
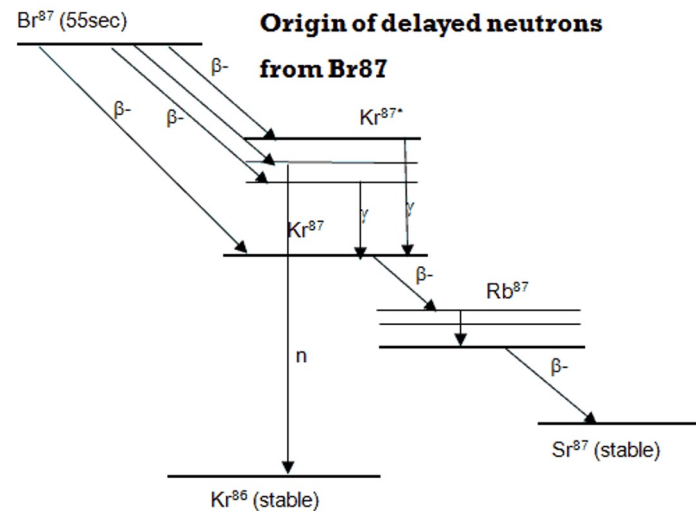


Vähemalt 1 neutron igast lagunemisest põhjustab uue lagunemise



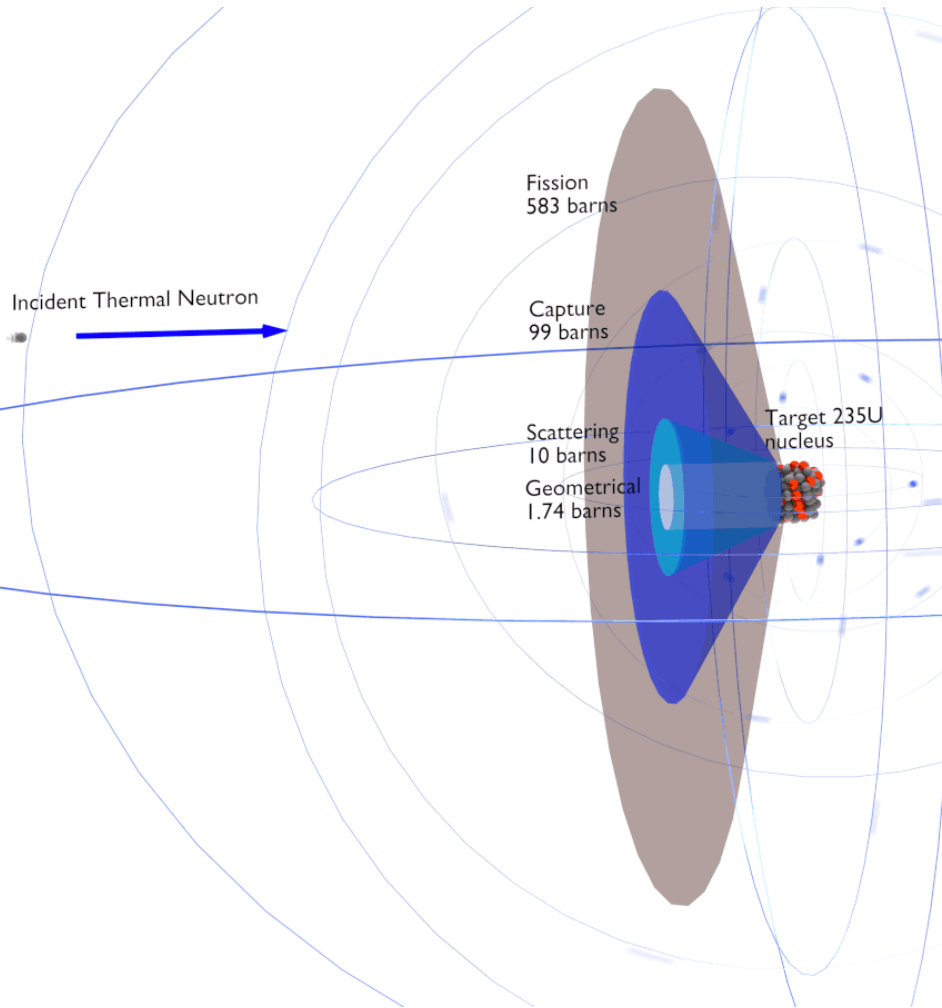
Ahelreaktsiooni kontroll

- 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%





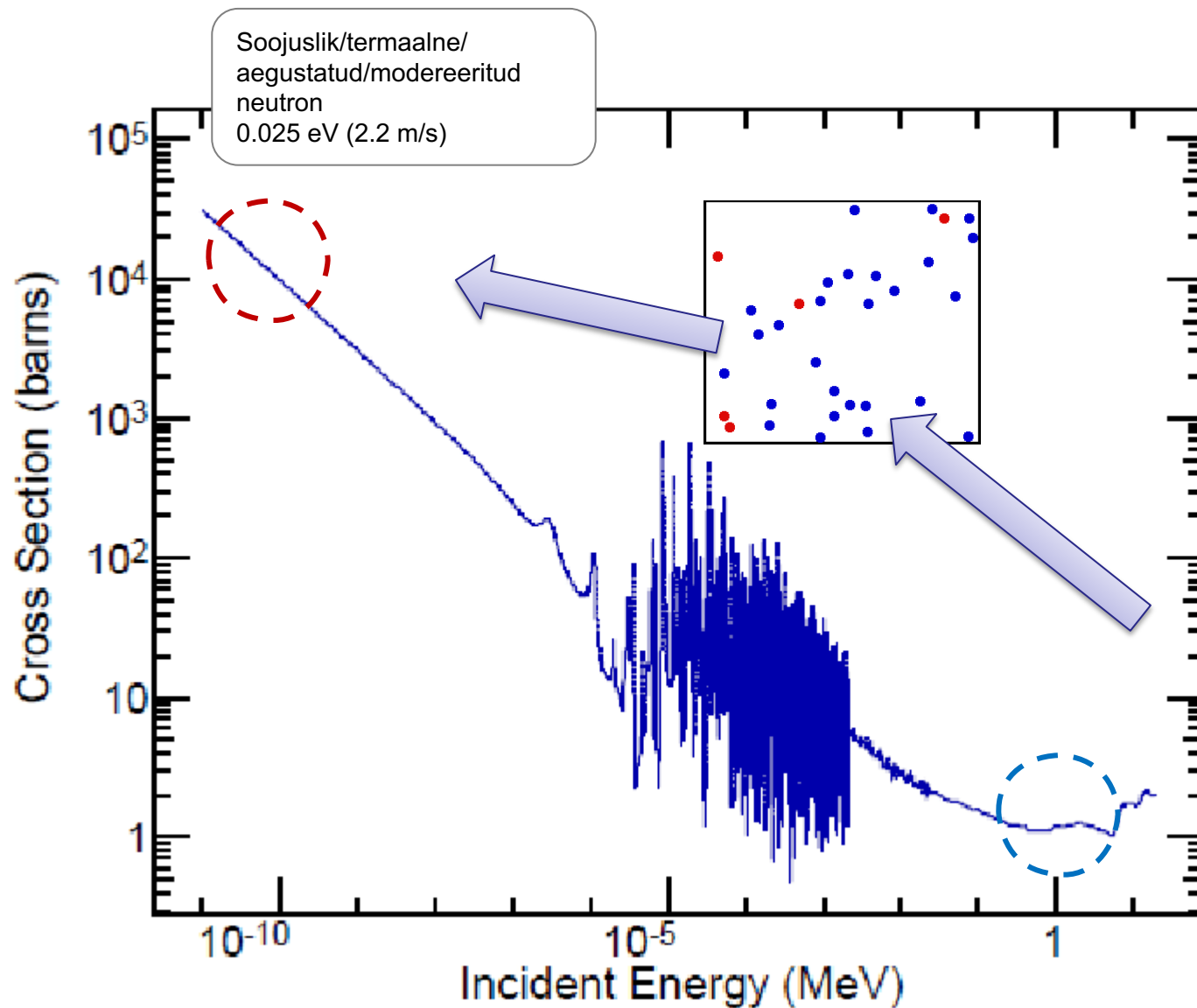
Mikroskoopiline ristlõige σ



- 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

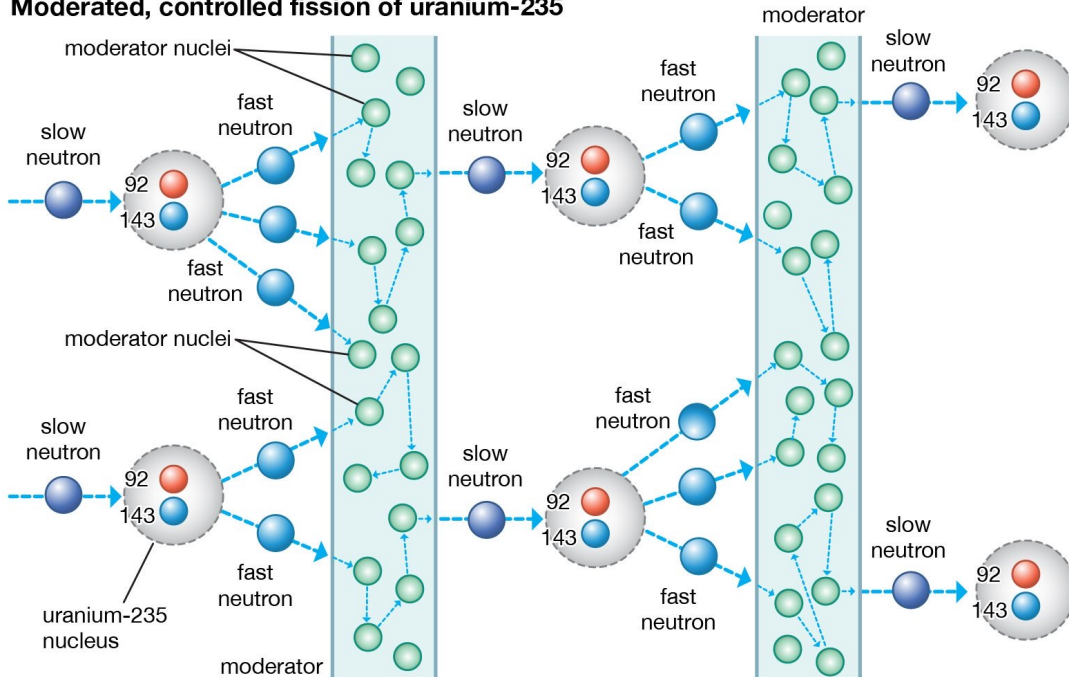


Lõhustumisel tekivad
kõrge energiaga,
kiired neutronid
2 MeV (22 000 m/s)



Neutronite modereerimine

Moderated, controlled fission of uranium-235



© 2012 Encyclopædia Britannica, Inc.

Neutronite modereerimine:

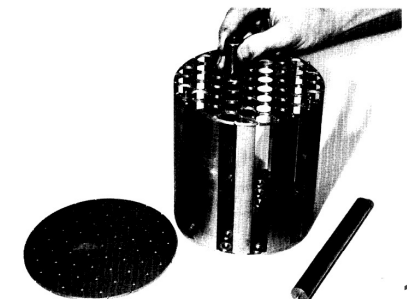
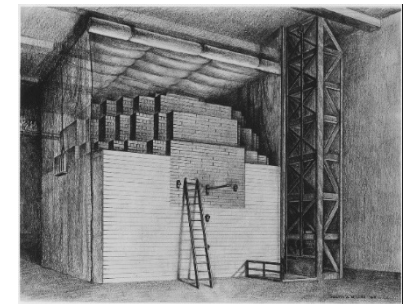
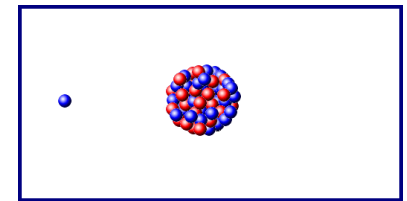
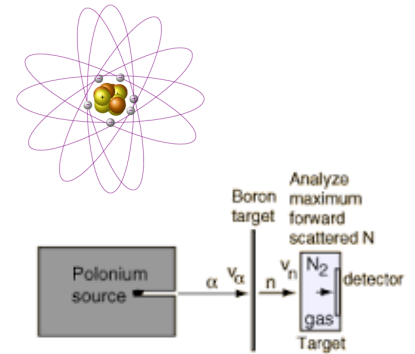
- Neutronite aeglustamine
- Kerge mass
- Madal neutronite neeldumine

The image shows a surgical team in an operating room, viewed from above. The scene is heavily tinted with a blue color. The text 'Tuuma ajaloo' is prominently displayed in the center in a bold, white, sans-serif font. The background shows the silhouettes of surgeons and their hands positioned around a patient, with various surgical instruments and lights visible.

Tuuma ajaloo

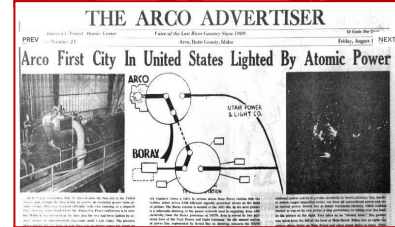
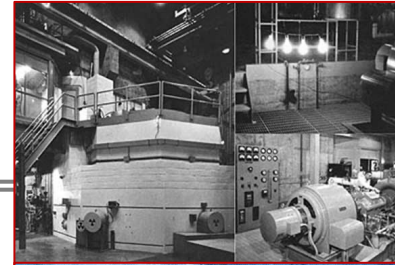
F. Ajalugu

- 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)



F. Ajalugu

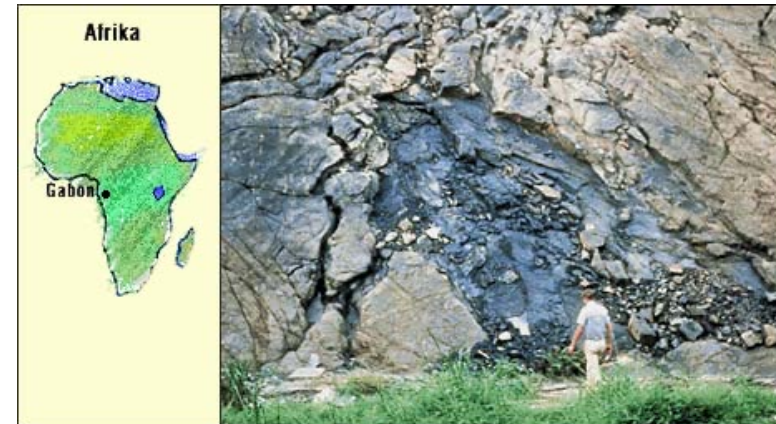
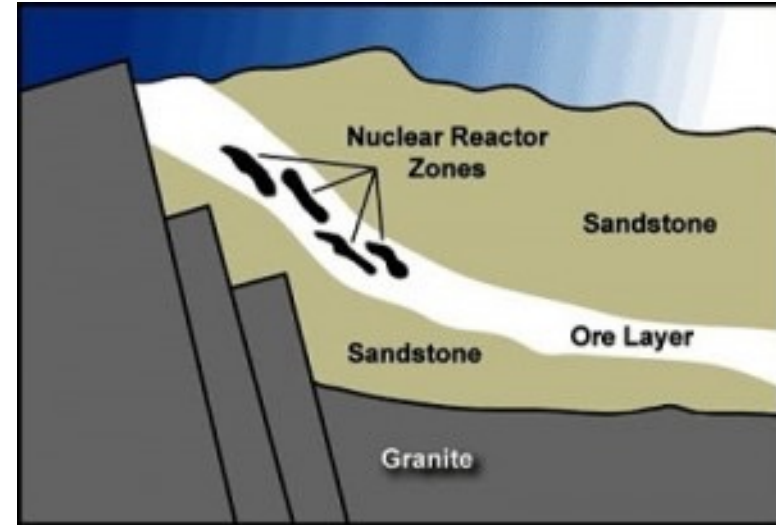
- 1951: EBR-1 (Idaho, USA)
 - Kiire neutronspektrum, NaK jahuti, rikastatud U kütus
 - Esimene tuumaelekter, 4 x 200 W
- 1953: USS Nautilus
 - Esimene tuumaallveelaev
- 1954: APS-1 (Obninsk, NL)
 - Esimene tuumaelekter võrku
 - 5 MW, grafiitaeglusti, vesijahutus, (RBMK prototüüp)
- 1955: BORAX-III (Idaho, 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





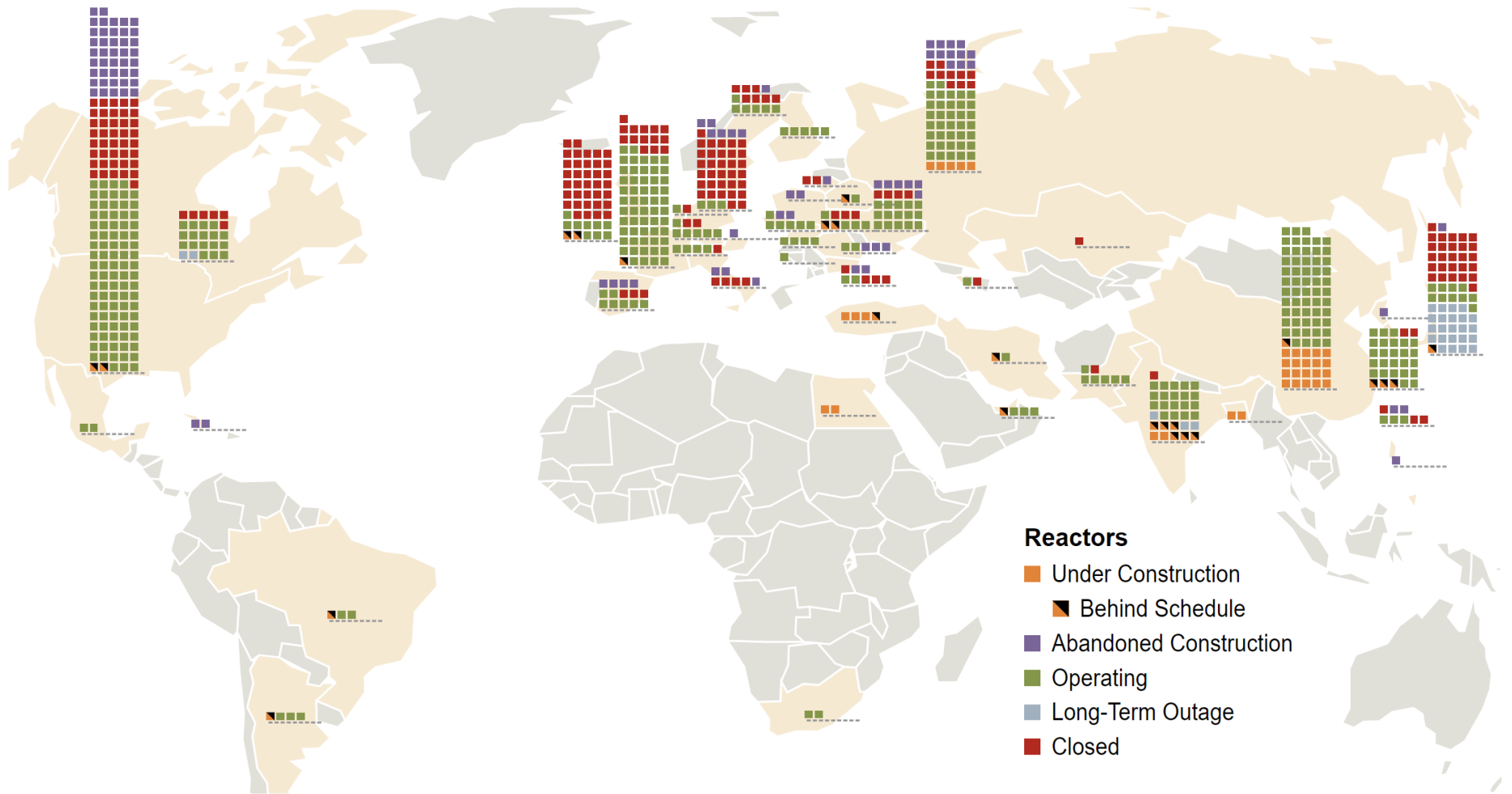
Looduslik tuumareaktor – Oklo, Gabon

- Avastas Prantsuse füüsik Francis Perrin'i (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 kivimipiirkonda, aeglustas neutroneid
 - Toimus tuumareaktsioon, tekkinud soojus aurustas vee ning reaktsioon peatus
 - 2.5 tundi:
 - Aurustunud vesi kondenseerus ning valgus taas "reaktorisse"
 - Vältas ligi 150,000 aastat
 - "Stardineutron" U-235/238 spontaanselt lõhustumisest
- Teadaolevalt ainus koht maailmas, ahelreaktsiooni toimimiseks vajaliku uraani, vee ja füüsiliste tingimuste kombinatsiooniga
- **Oklo demonstreeris tuumajäätmete lõppladestuse võimalikkust pinnases**





Tuumareaktorid maailmas



Last updated on 10 January 2023.

worldnuclearreport.org

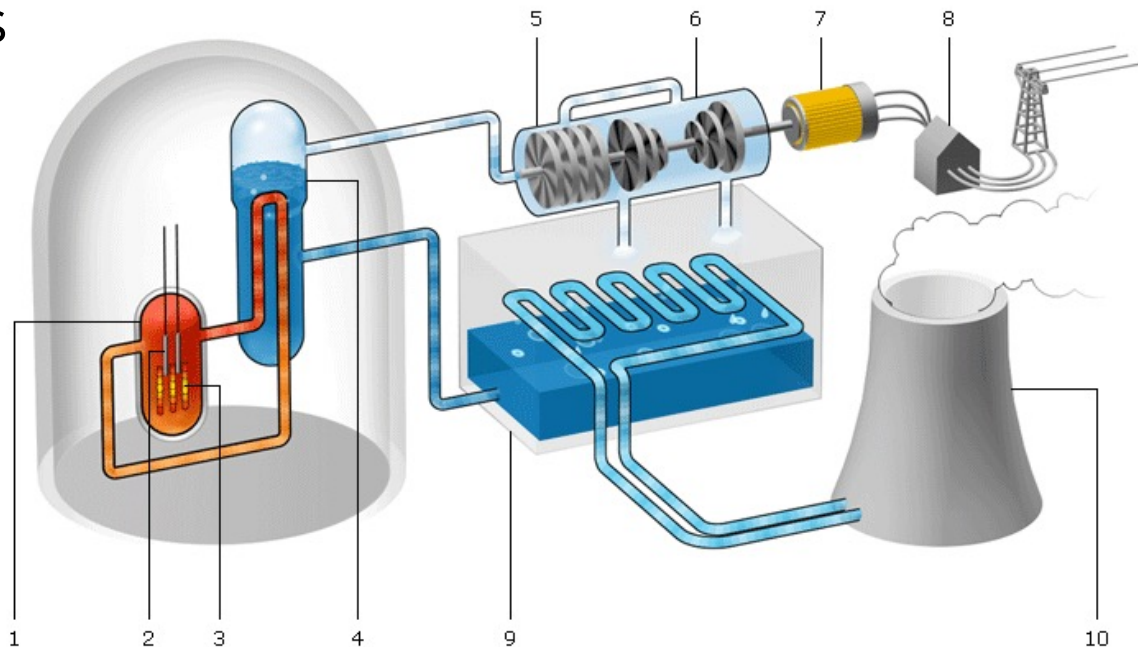
A blue-tinted photograph of a nuclear reactor core, showing the intricate structure of fuel rods and support beams. The image is used as a background for a title slide.

Reaktoritehnoloogiad



Tuumareaktor: „a fancy way to boil water“

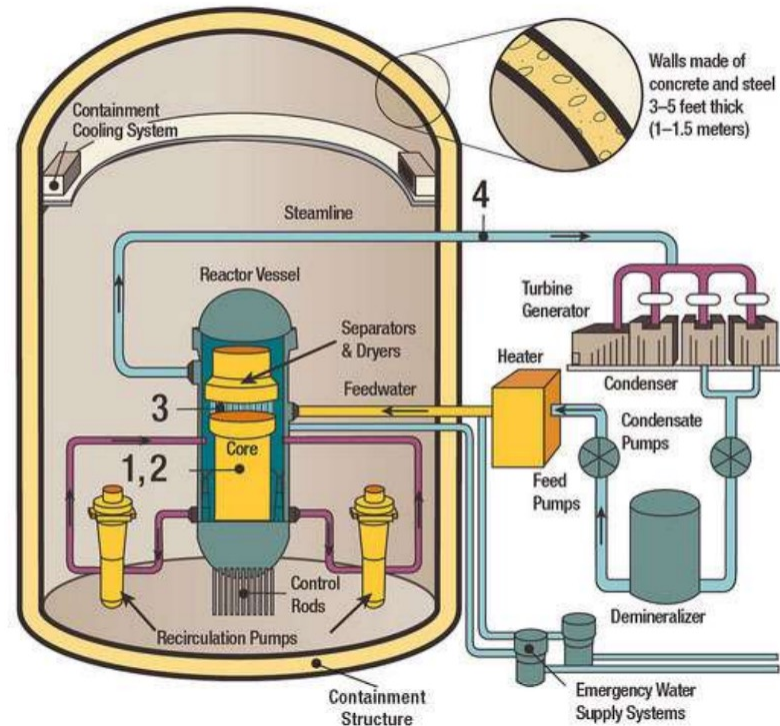
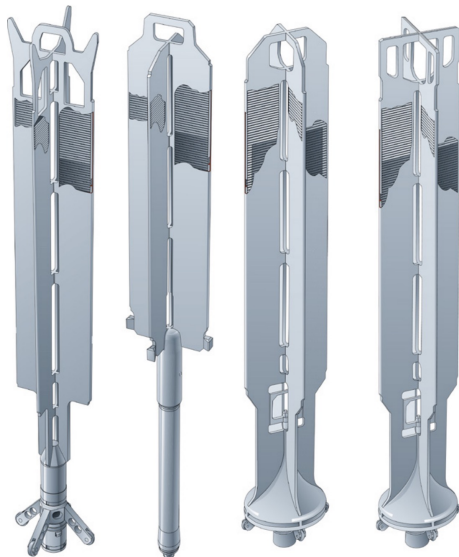
- Seade stabiilse ja kontrollitud ahelreaktsiooni säilitamiseks.
- Tuumareaktsioonide käigus vabanev energia kasutatakse ära jahutusvedeliku abil.
- Kasutatakse näiteks
 - elektri tootmiseks,
 - lennukikandjate ja allveelaevade käitamiseks,
 - isotoopide tootmiseks,
 - materjaliteaduses.





Reaktori võimsuse juhtimine

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





Tuumareaktorite põlvkonnad

foto: Wikipedia, Unsplash

Shippingporti tuumajaam



Bradwelli tuumajaam



Gori tuumajaam



Novovoroneži tuumajaam



I generatsioon

varajased prototüüp-reaktorid

II generatsioon

kommertskasutuses tuumareaktorid

III generatsioon

kaugelearenenud LWR reaktorid

III+ generatsioon

evolutsiooniline disain

IV generatsioon

revolutsiooniline disain

1950

1960

1970

1980

1990

2000

2010

2020

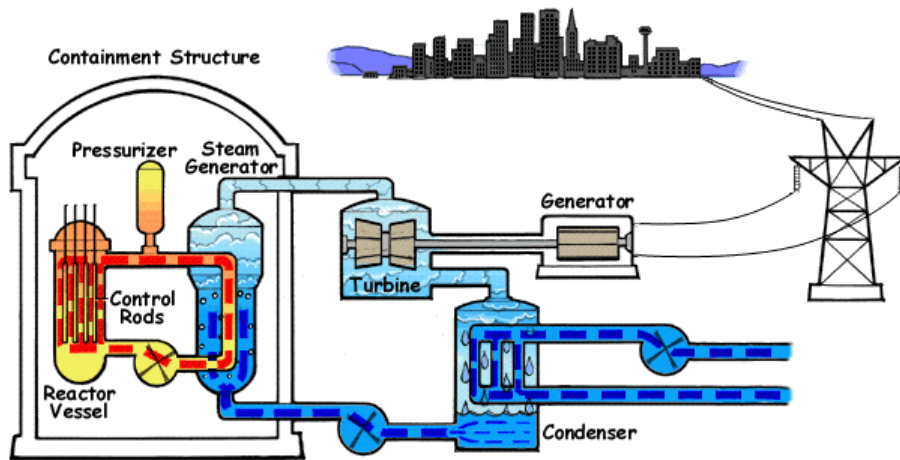
2030



Vesijahutusega reaktorid (enamlevinud)

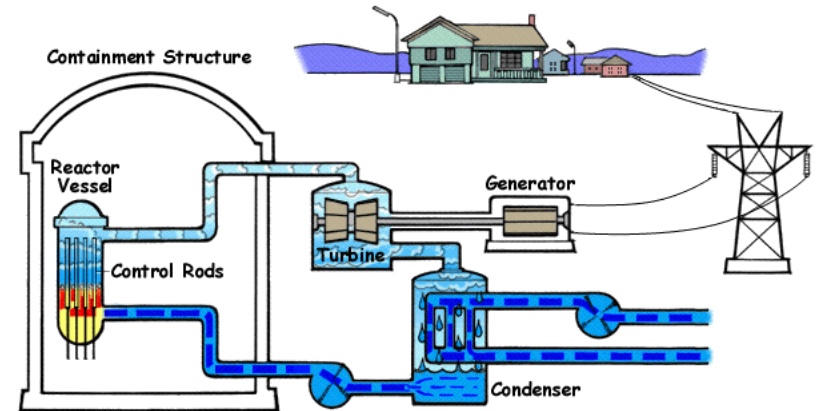
Surveveereaktor

~70% maailma reaktoritest



Keevaveereaktor

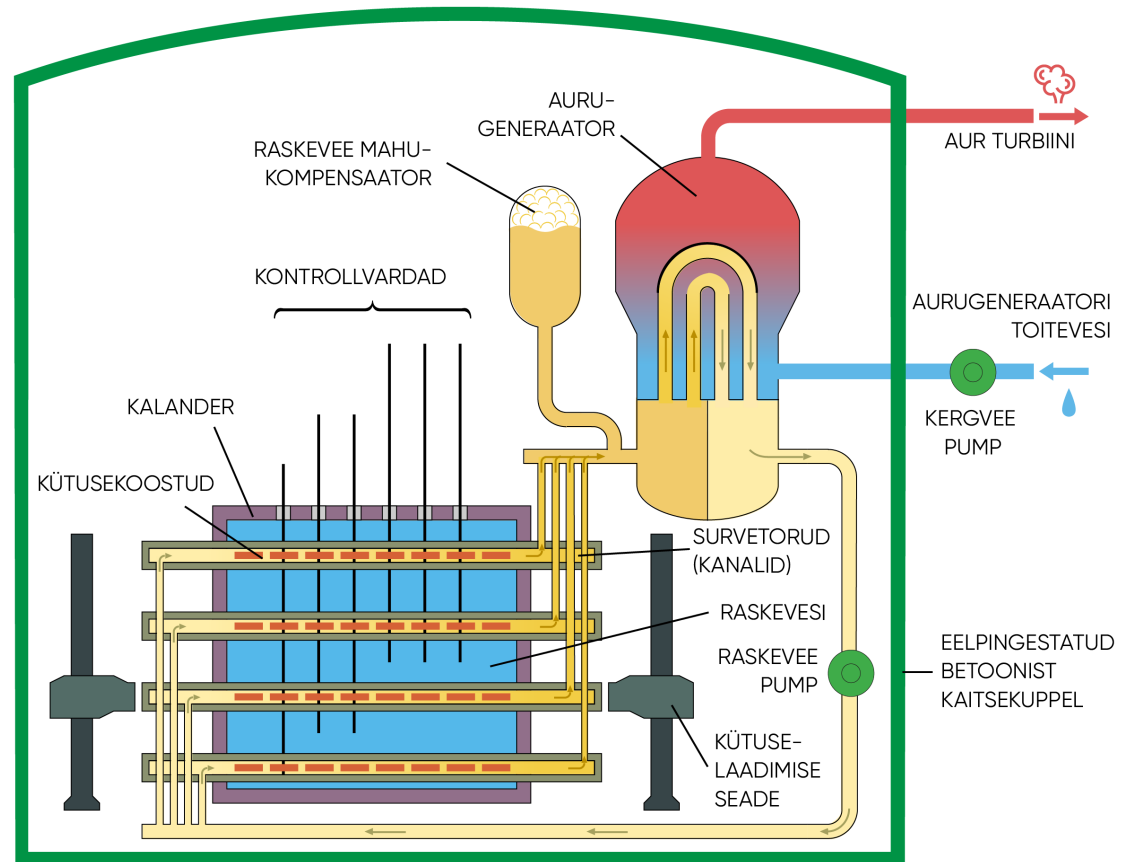
~15% maailma reaktoritest





CANDU (CANada Deuterium Uranium)

CANDU REAKTORI SKEEM



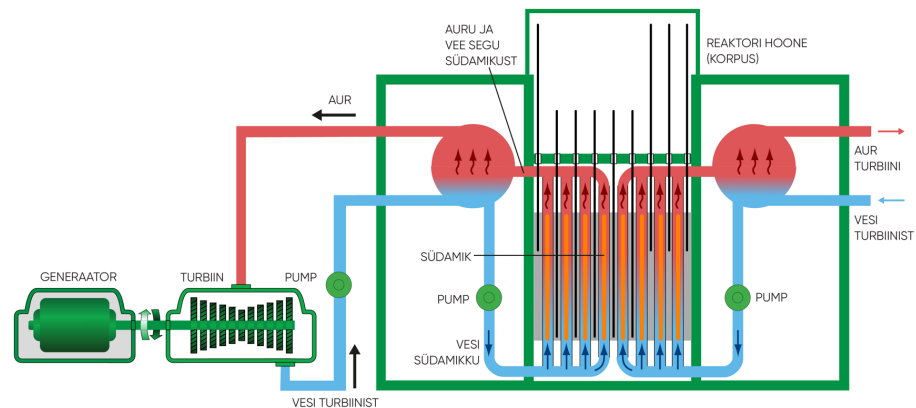


RBMK (Tšornobõl, Ignalina, Leningrad jne)

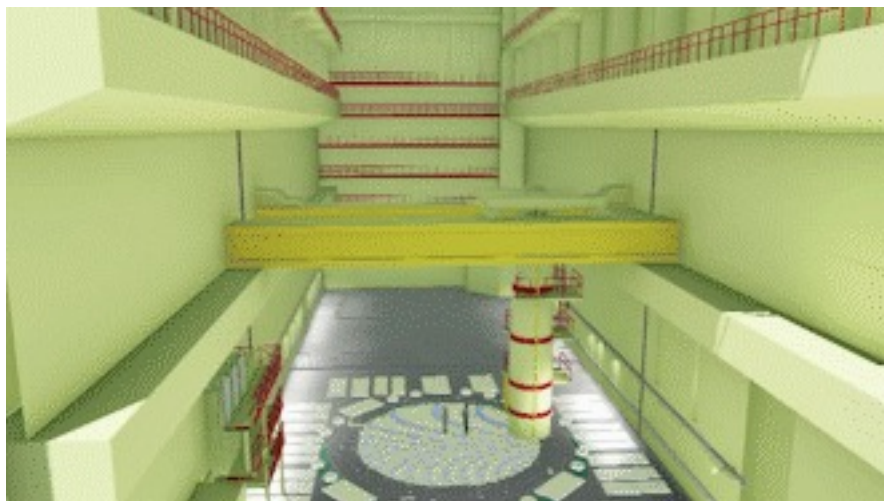
Kurski jaama juhtpaneel



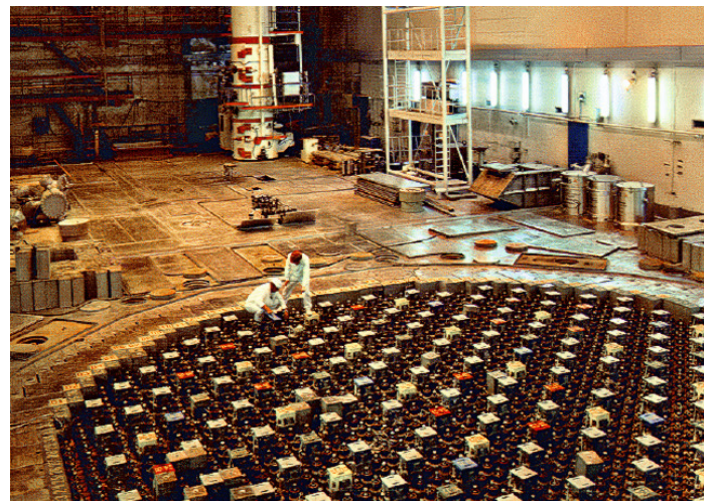
RBMK-REAKTORI SKEEM



Reaktorihall, anum ja torustikud



Ignalina reaktori pealtvaade





TAVAPÄRANE TUUMAJAAM

1,600 MW

€ 7-11 miljardit

8-14 a.

60 a.

950,000 m³

Elektriline netovõimsus

Maksumus

Ehitusaeg

Kasutusaeg

Hoone maht

VÄIKEREAKTOR

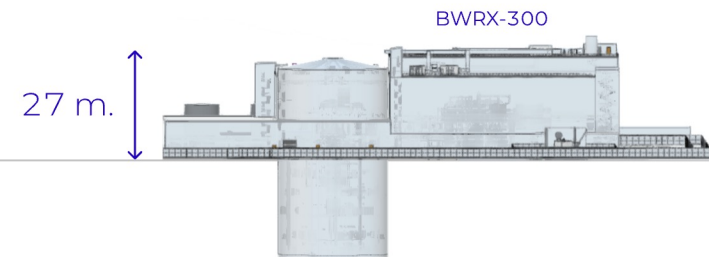
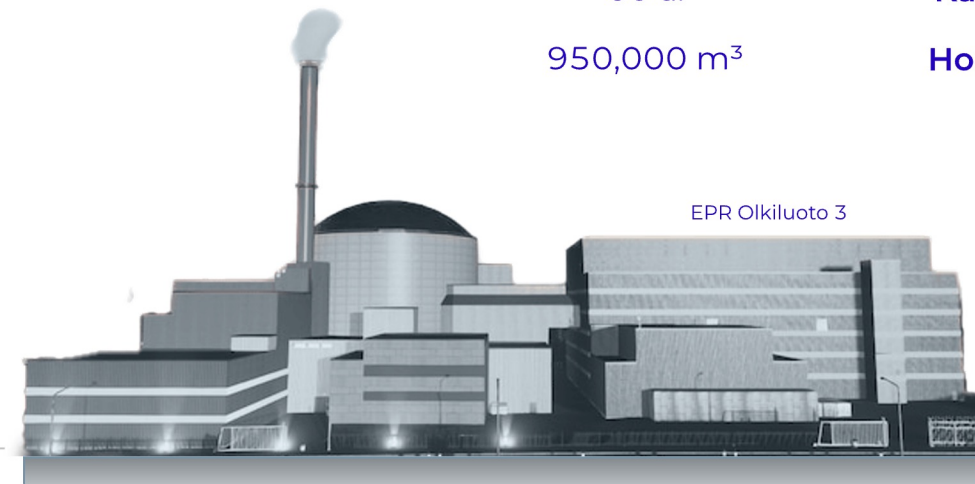
300 MW

€ 1 miljardit

3 a.

60 a.

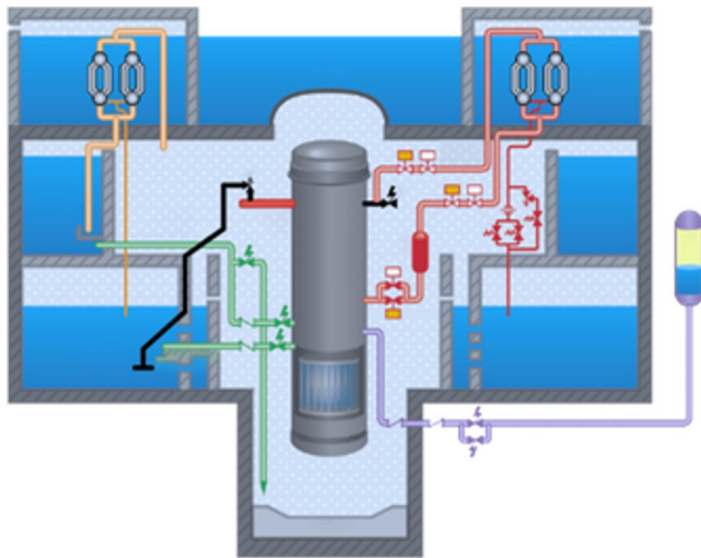
225,000 m³





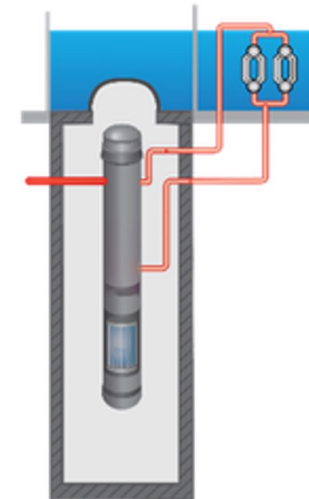
Suure keevaveereaktor VMR versioon

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

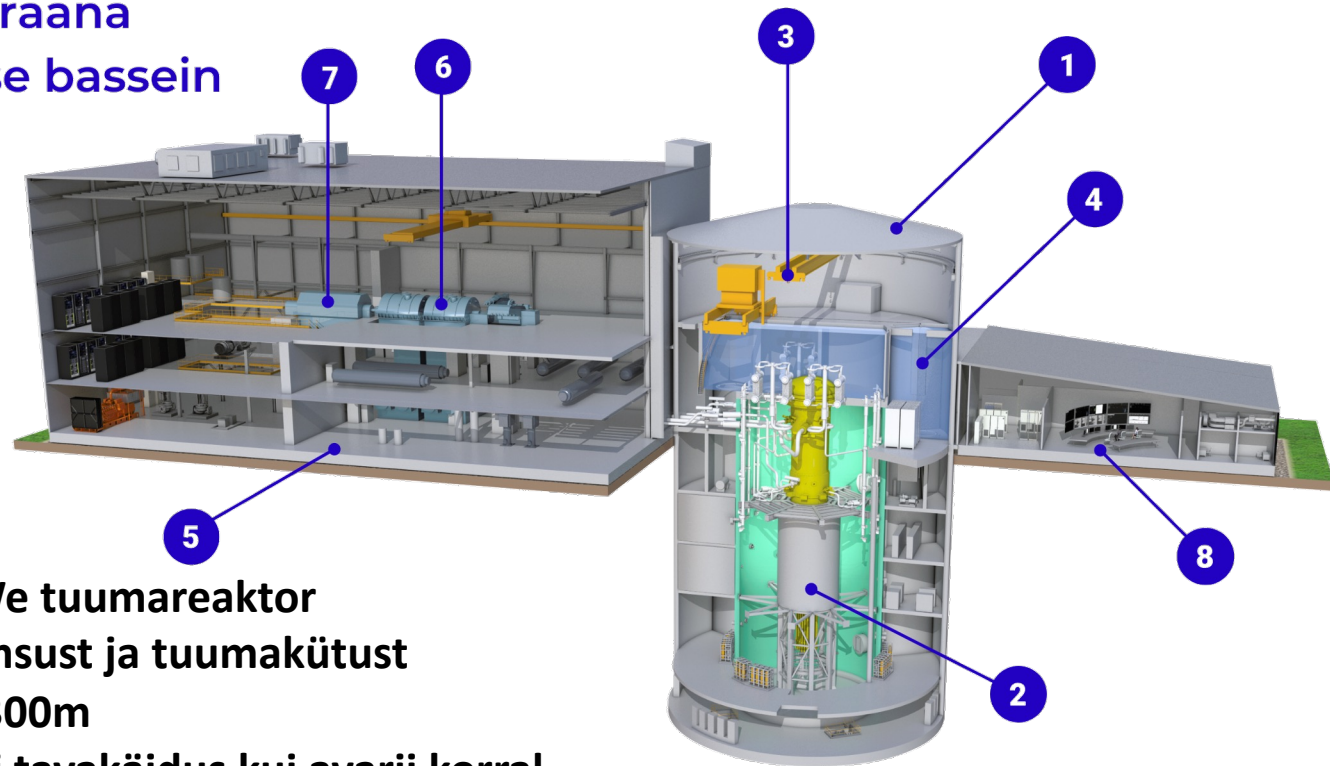
4 - Kasutatud kütuse bassein

5 - Turbiinihoone

6 - Turbiin

7 - Generaator

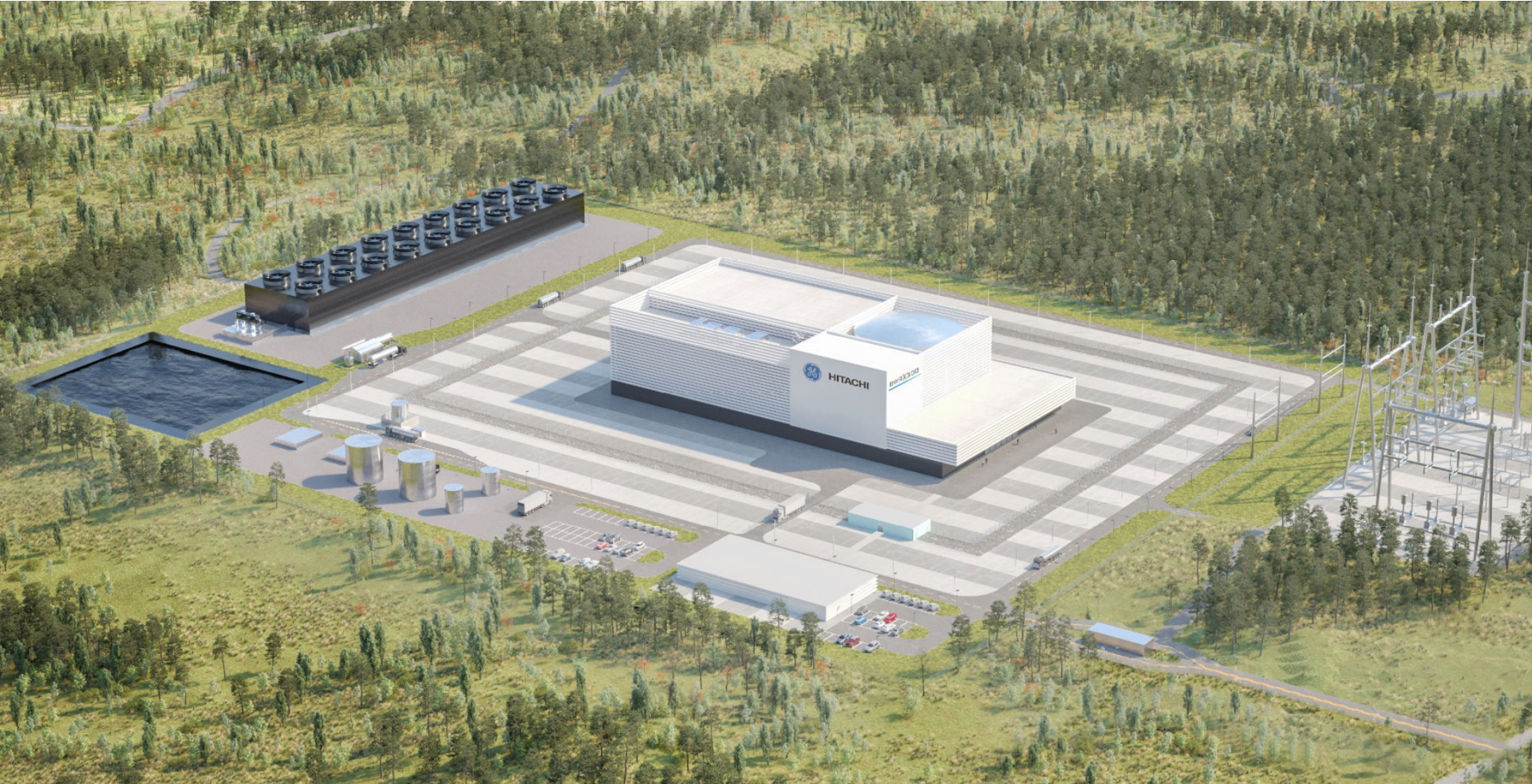
8 - Kontrollruum



- 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
- Pikaajaline BWR kogemus Soomes, Rootsis



GEH BWRX-300 (300 MWe/870 MWth)

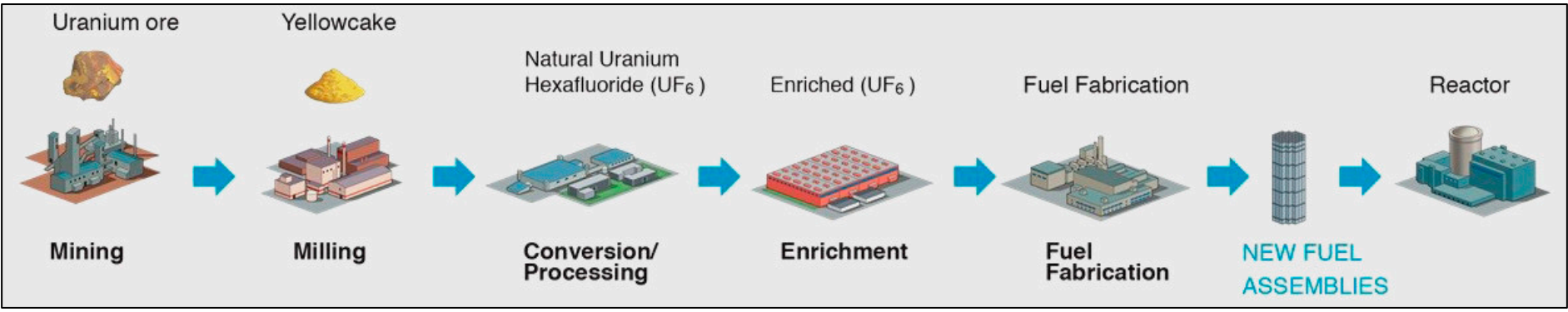




Tuumakütus ja tuumajäätmed



Tuumkütuse elutsükkel



BWR/6 FUEL ASSEMBLIES & CONTROL ROD MODULE

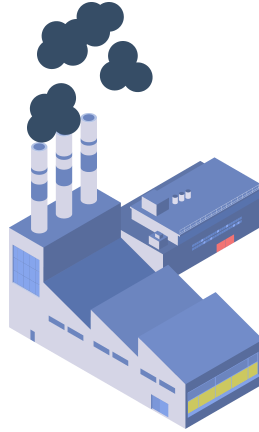
- 1.TOP FUEL GUIDE
- 2.CHANNEL FASTENER
- 3.UPPER TIE PLATE
- 4.EXPANSION SPRING
- 5.LOCKING TAB
- 6.CHANNEL
- 7.CONTROL ROD
- 8.FUEL ROD
- 9.SPACER
- 10.CORE PLATE ASSEMBLY
- 11.LOWER TIE PLATE
- 12.FUEL SUPPORT PIECE
- 13.FUEL PELLETS
- 14.END PLUG
- 15.CHANNEL SPACER
- 16.PLENUM SPRING



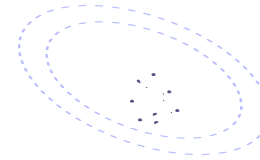


~3 000 000 tonni
kivisütt aastas

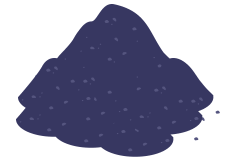
Kivisütt põletav elektrijaam
elektrilise võimsusega 1000 MW



~ 7 000 000 tonni
jätmeid aastas, põhiliselt
gaasid CO₂ ja SO₂



150 000 kuni 200 000
tonni lendtuhka



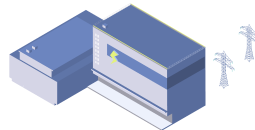
Tuhk tuhaväljal

Mõlema jaama aastane elektritoodang oleks ~8 TWh



~ 25 tonni
uraani UO₂ aastas

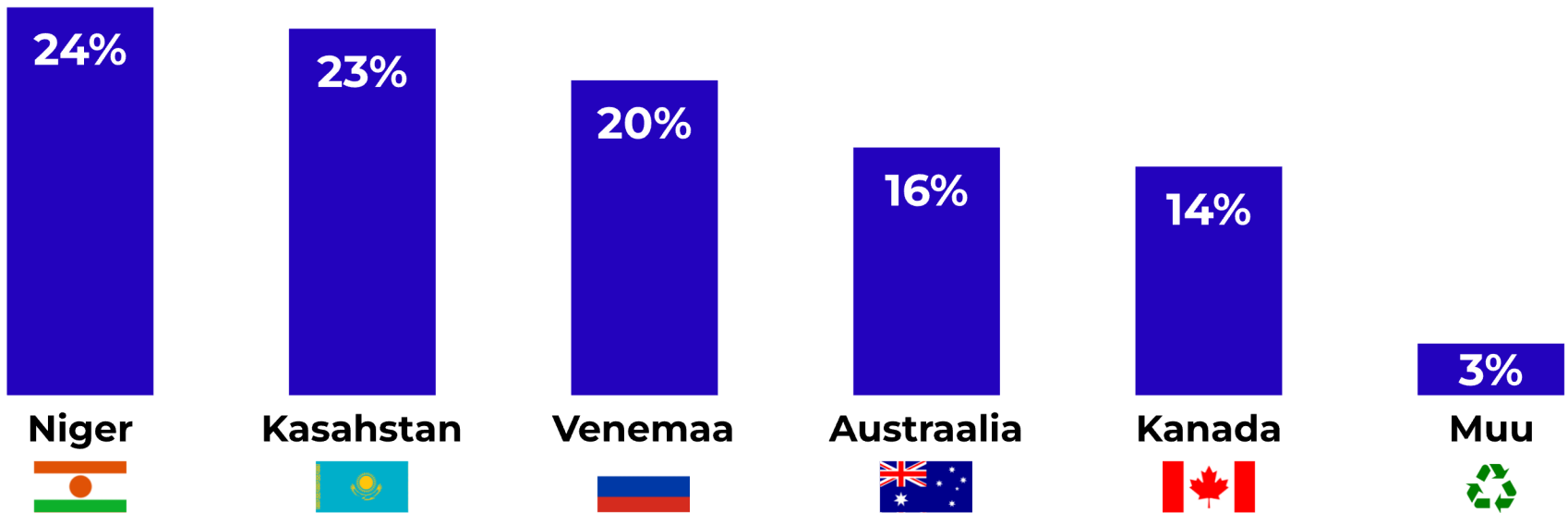
Tuumaeletrijaam
elektrilise võimsusega 1000 MW



25 tonni kõrgradioaktiivset
jäädet, mida saab
turvaliselt geoloogiliselt
ladustada

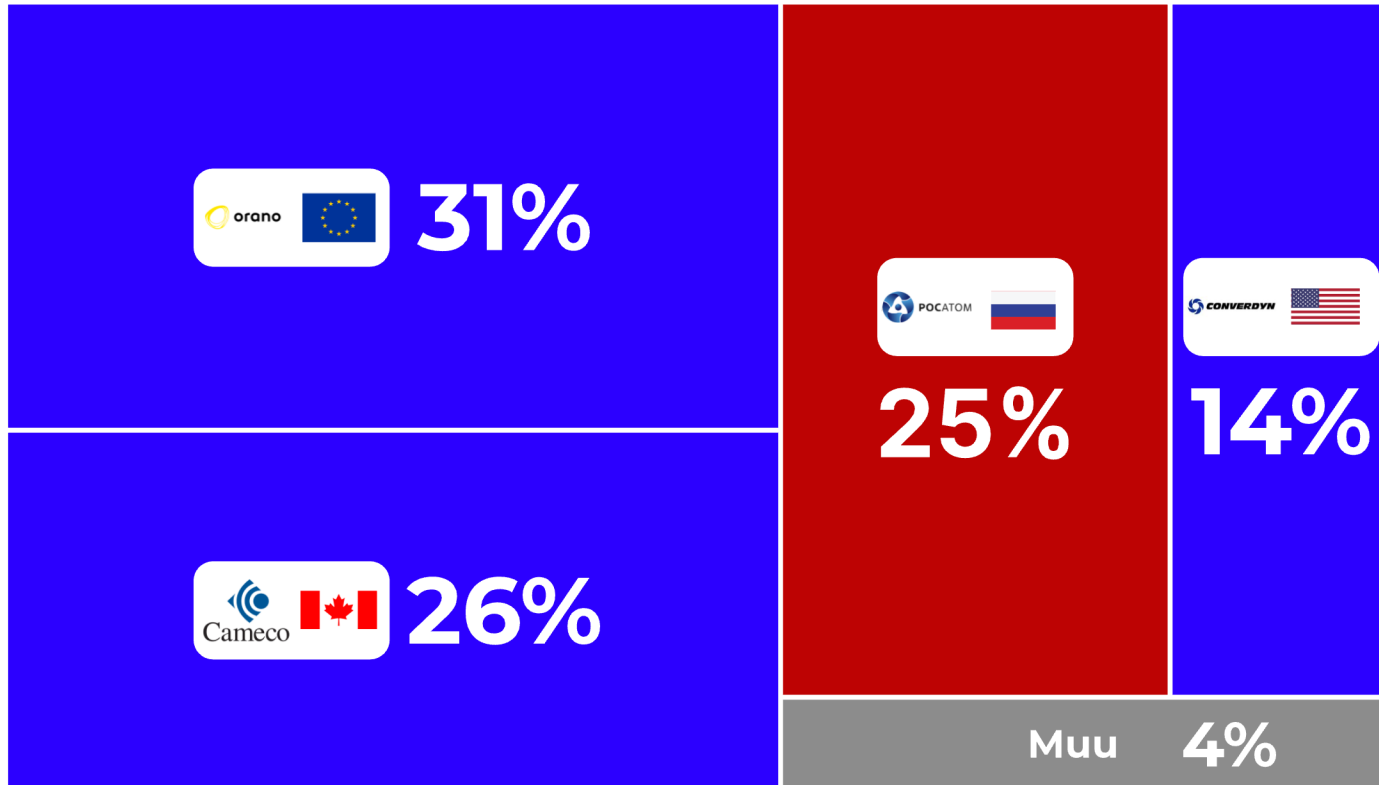


ELi tarnitud uraani päritolu | 2021



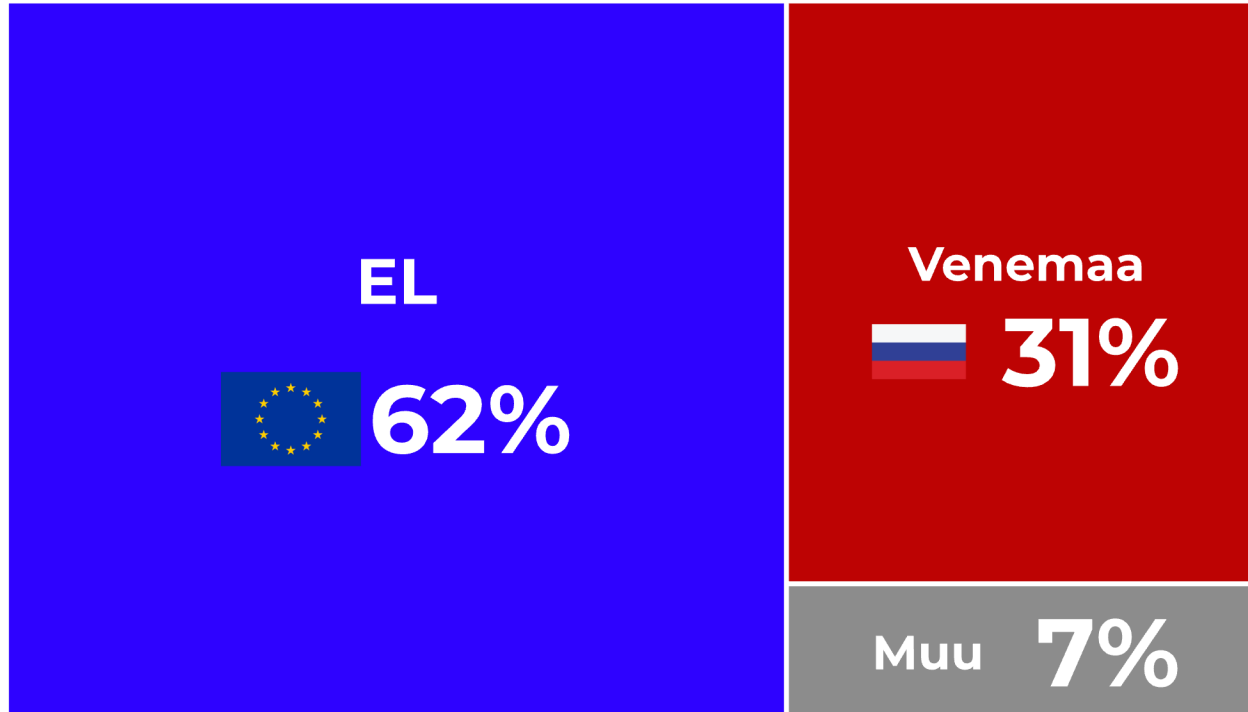


Uraani konversiooniteenused ELi jaoks | 2021



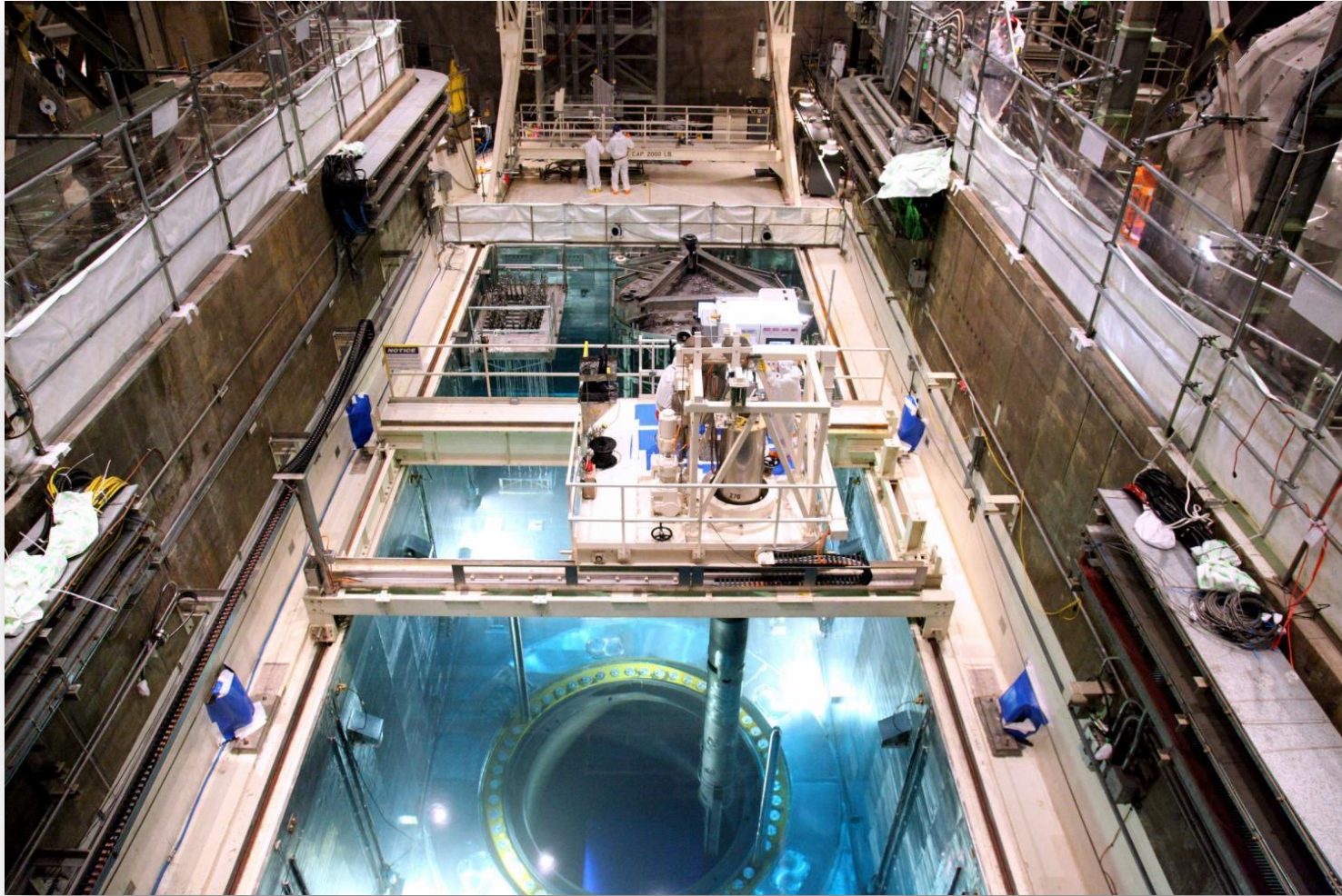


Uraani rikastamise teenused ELi jaoks | 2021



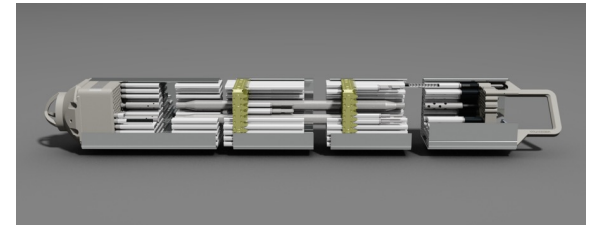


Tuumkütuse vahetus

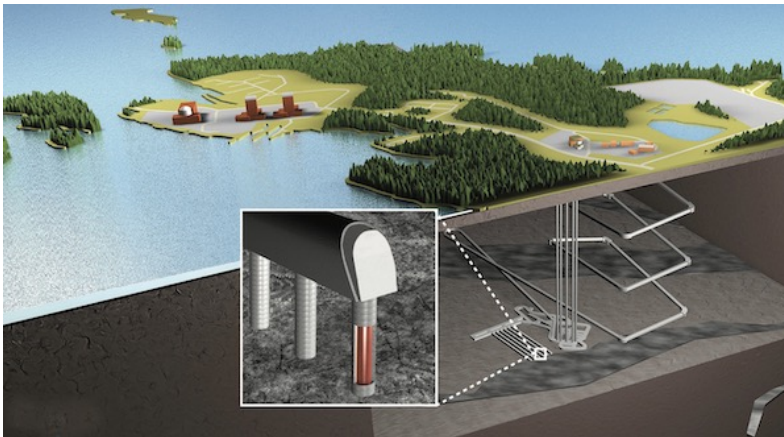




Kõrge radioaktiivsusega jäätmed (kasutatud tuumkütus)



- Moodustavad umbes **2% kõigist radioaktiivsetest jäätmetest**, sisaldades 95% radioaktiivsusest.
- Erineva tehnoloogiaga tuumareaktorite kasutatud kütuse vahetus tsükkel on erinev
- Kõrge radioaktiivsusega jäätmete hoidla vajab **eraldi riigi eriplaneeringut** parima asukoha leidmiseks.



Posiva lahendus Soomes

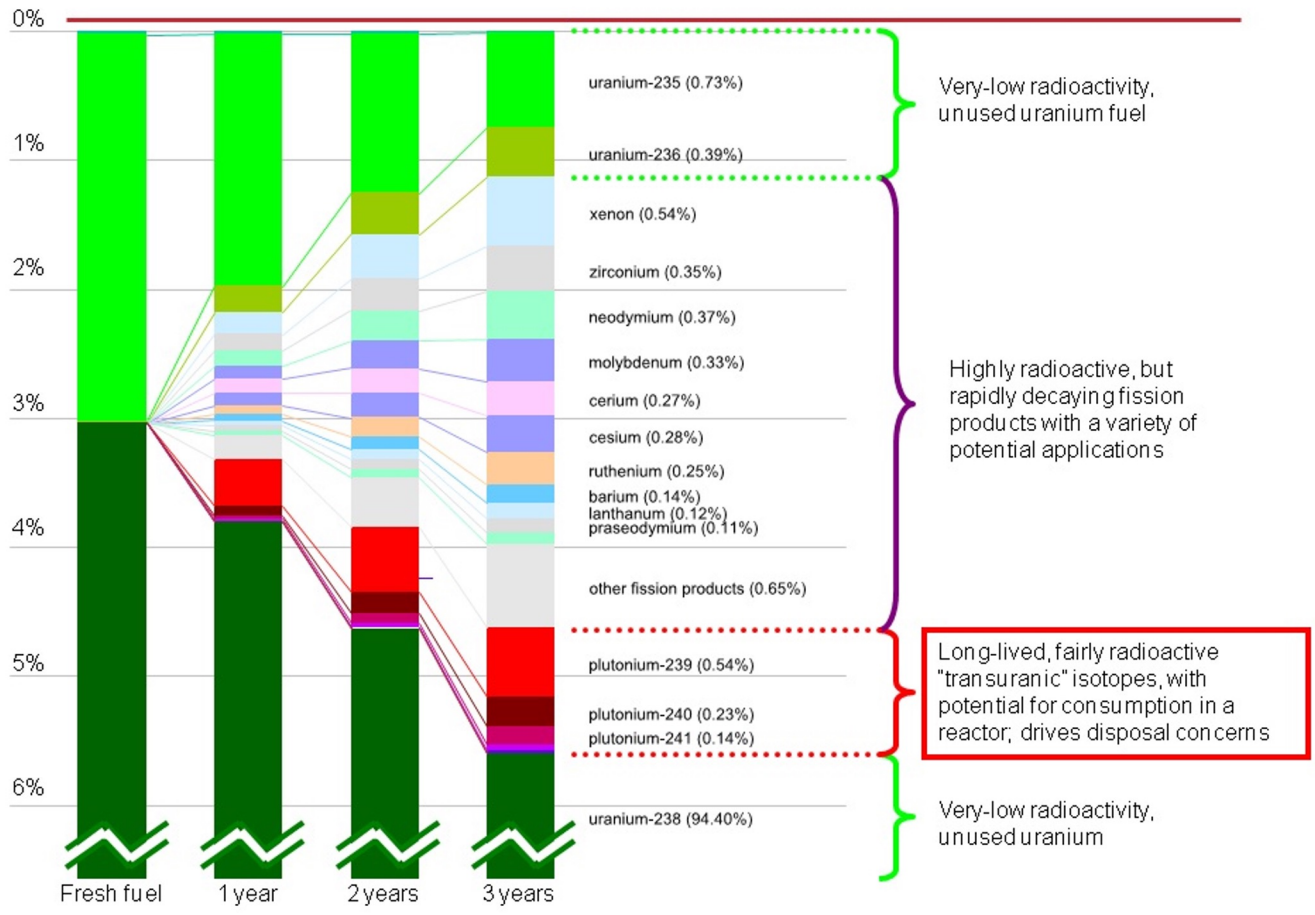


horisontaalosa on 2 km,
Uurimisel olev süvapuuraugu lahendus



Composition of Conventional Nuclear Fuel

(17x17 Westinghouse, 3% enr., 1100 day irradi, 33000 MWD/MTU, discharge composition, Origen Arp analysis)





IV põlvkonna reaktorid



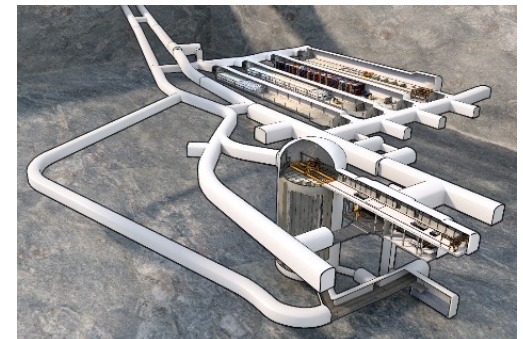
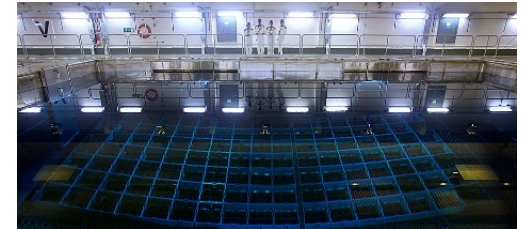
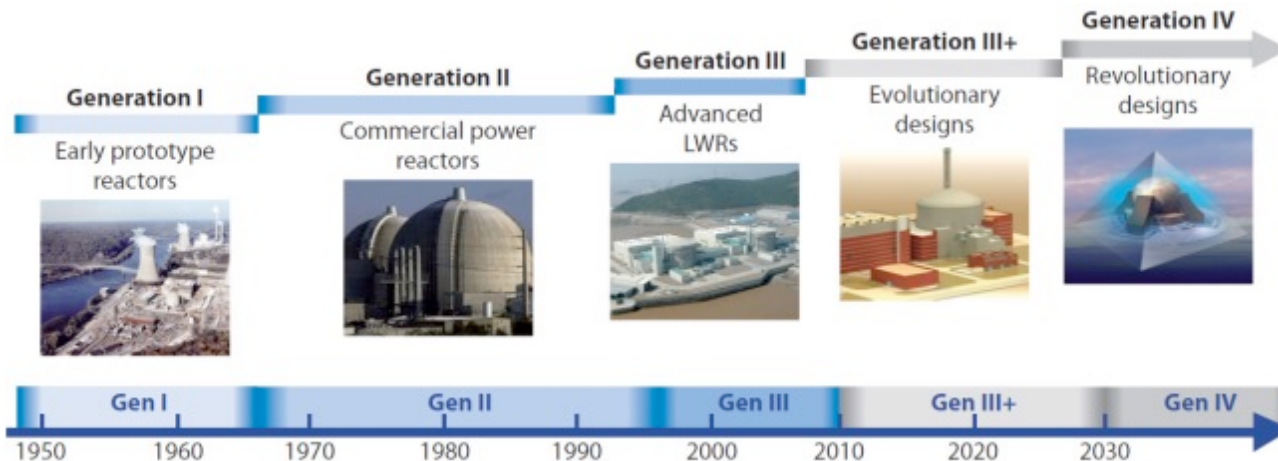
Tuumaenergeetika IV põlvkond

Eesmärgid

- Jätksuutlikkus
 - 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

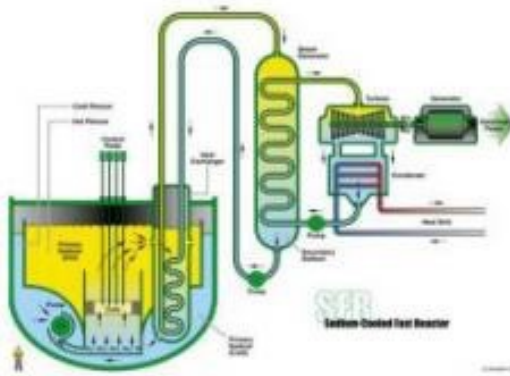
Reaktoritüübid

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

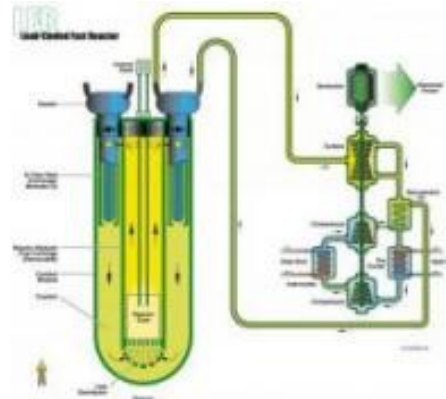




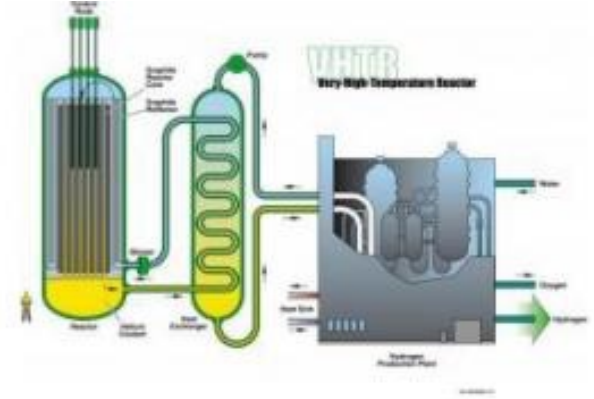
IV põlvkond 6 tehnoloogiat



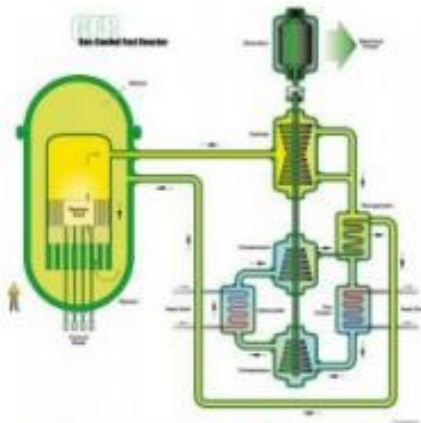
Sodium Fast Reactor



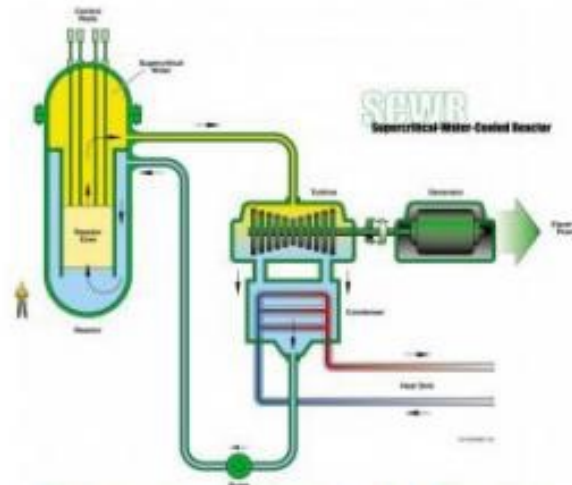
Lead Fast Reactor



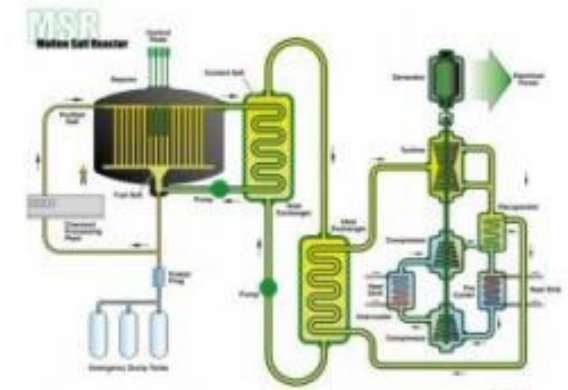
Very High Temperature Reactor



Gas Cooled Fast Reactor



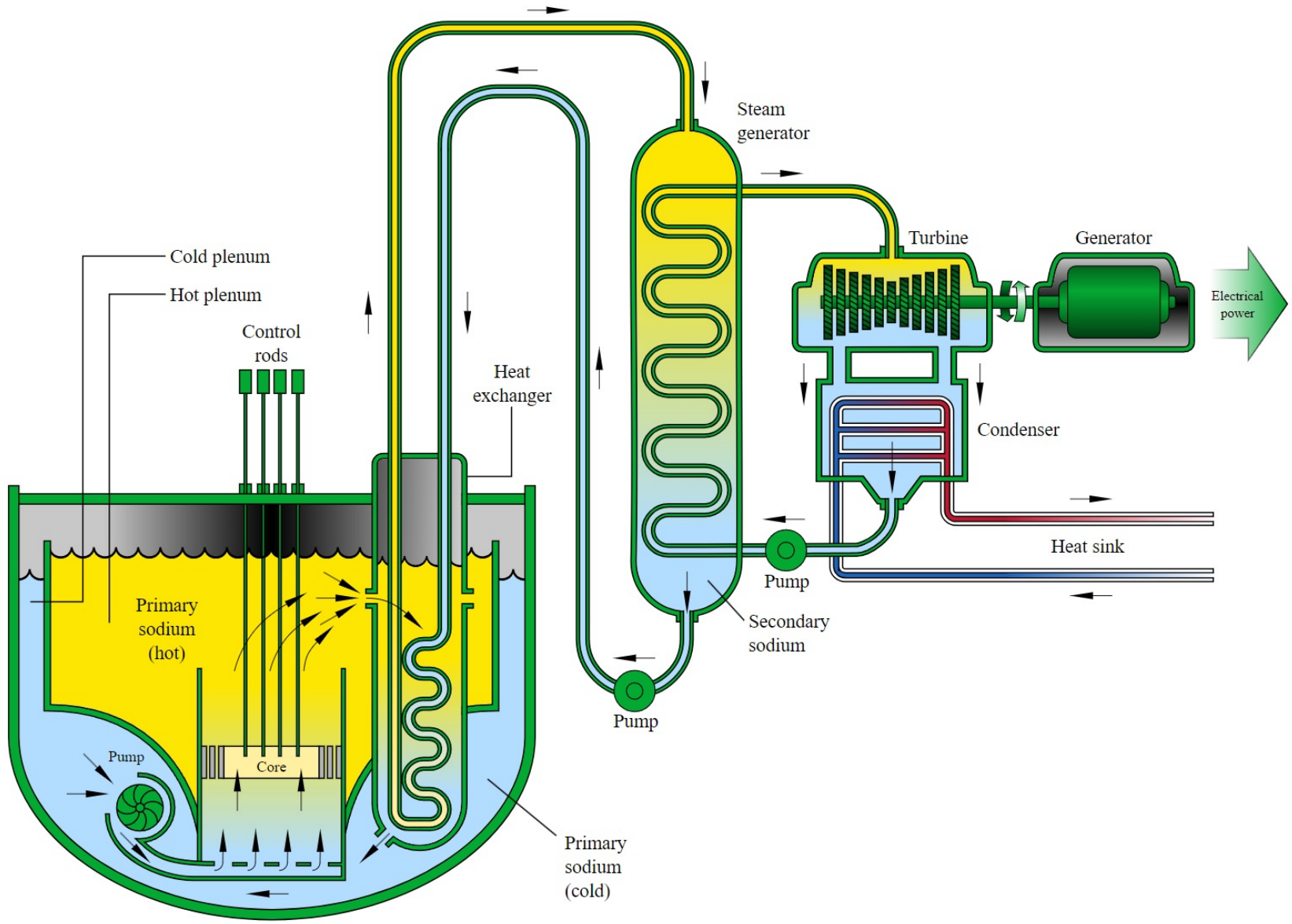
Supercritical Water Cooled Reactor



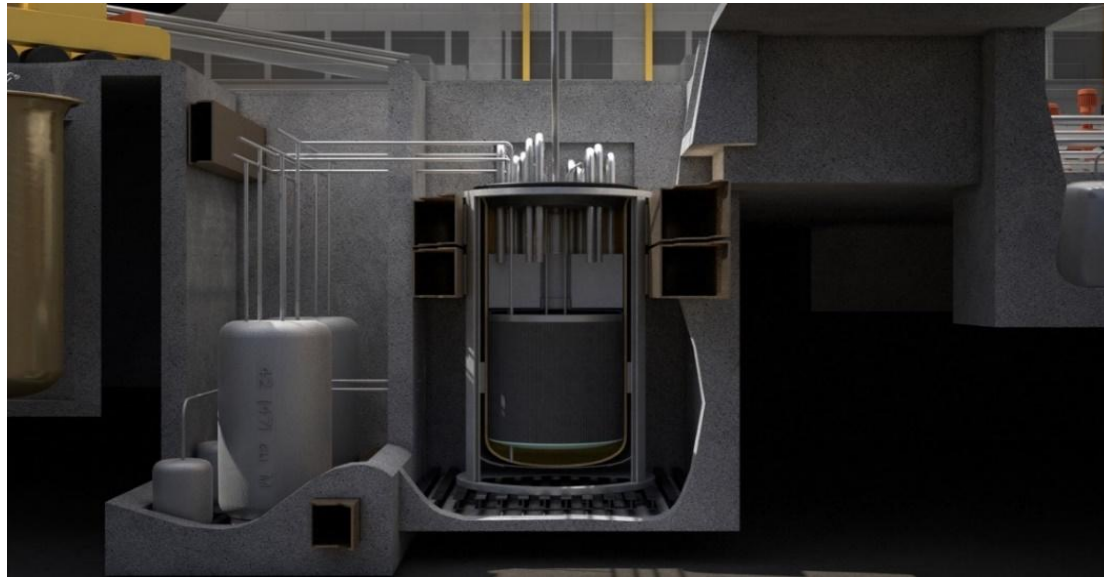
Molten Salt Cooled Reactor



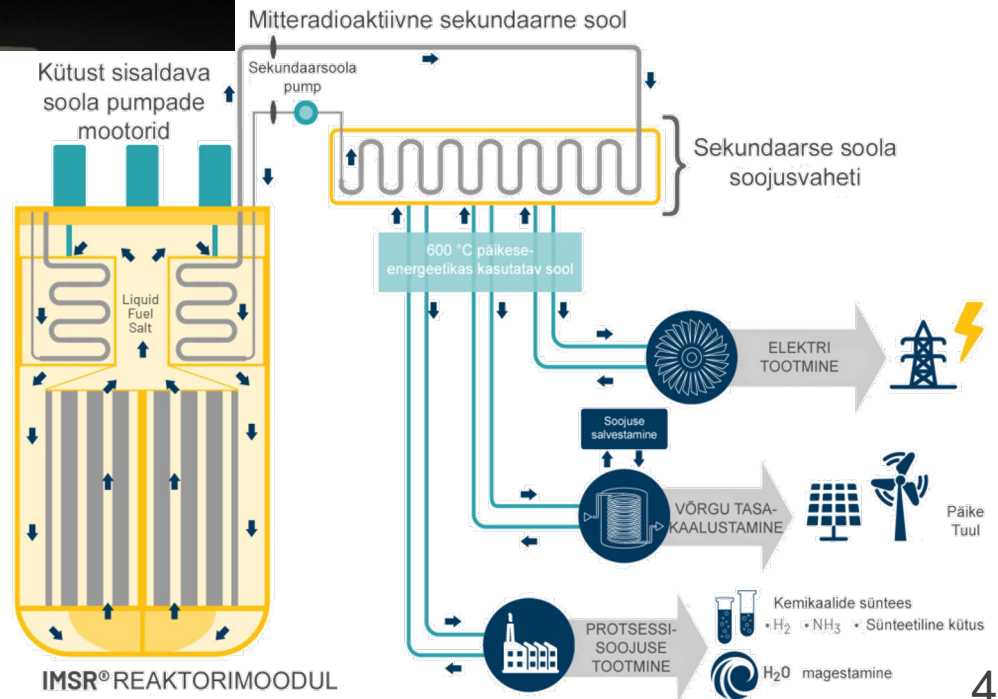
Metall jahutusega reaktorid



F. Sulasoolareaktor



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





Kokkuvõte

- Kliima soojeneb, Eesti varustuskindlus langeb ja enamuse 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 tarneaahelad 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



Thank U!

