



TARTU ÜLIKOOL
EESTI RAHVUSÜLIKOOL



Tuumaenergia kütusetsükkel ja jäätmed

Uue põlvkonna tuumaenergia Eestile

Tallinna Kultuurikatel

Madis Kiisk, Volodymyr Gulik

TÜ Füüsika Instituut



28.01.2020

Ettekande eesmärk ja sisu

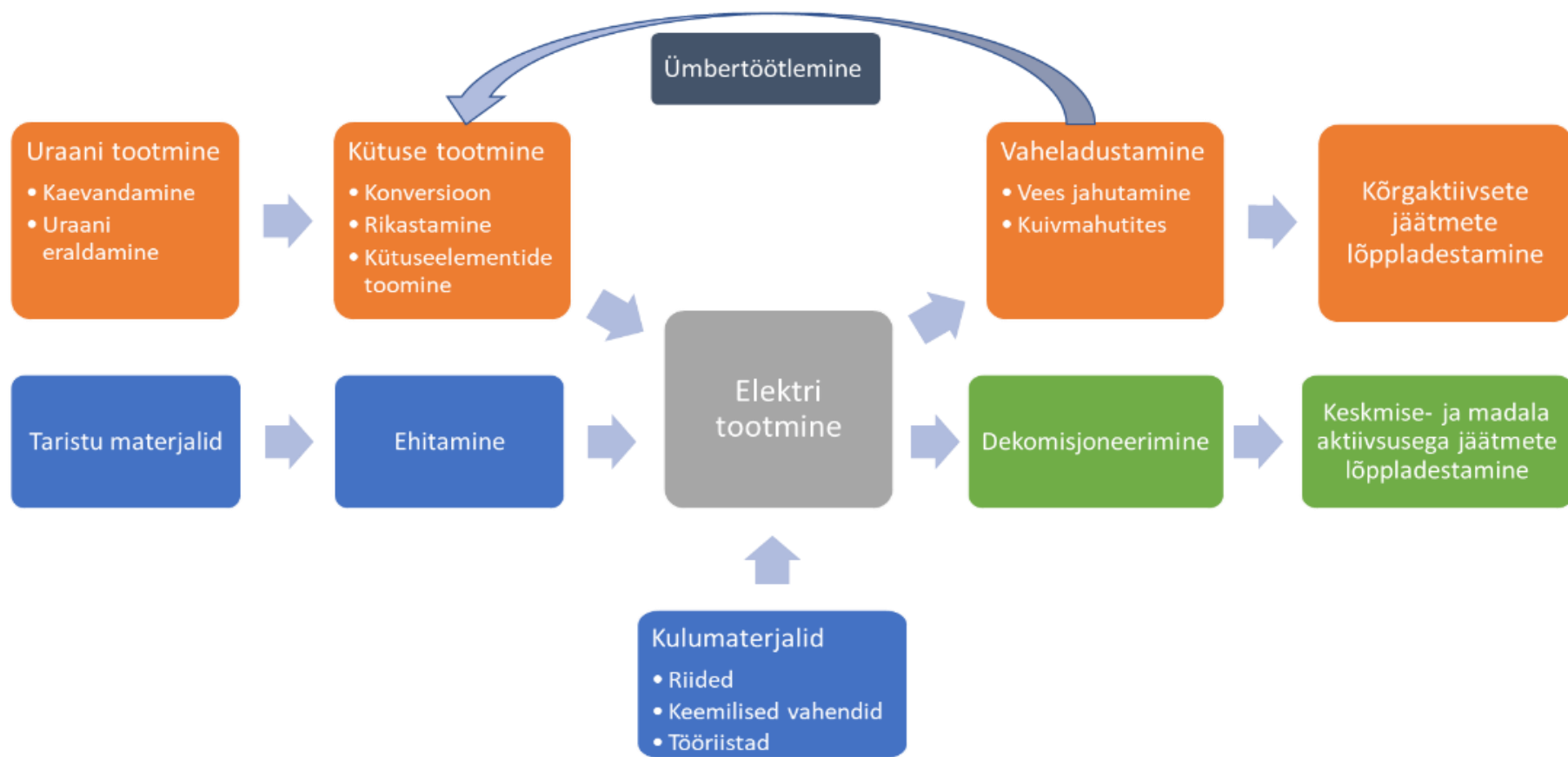
Eesmärk:

- Anda ülevaade kütusetsükli eri etappidest.
- Võrrelda analüüsis vaatluse alla võetud reaktoritehnoloogiate kütustetsüklite eeliseid ja puudusi – NuScale, GE Hitachi BWRX-300, IMSR-400, SSRW-300.

Ettekande sisu:

- Kirjeldan tuumaenergia kütusetsükli kütuse tootmise, kasutamise ning kasutatud kütuse ja jäätmete käitlemise protsessi.
- Teen kokkuvõtte kvantitatiivne hinnangu tulemustest neljale vaatluse all olnud tehnoloogiate kütusetsüklile.

Mis on kütusetsükkel?

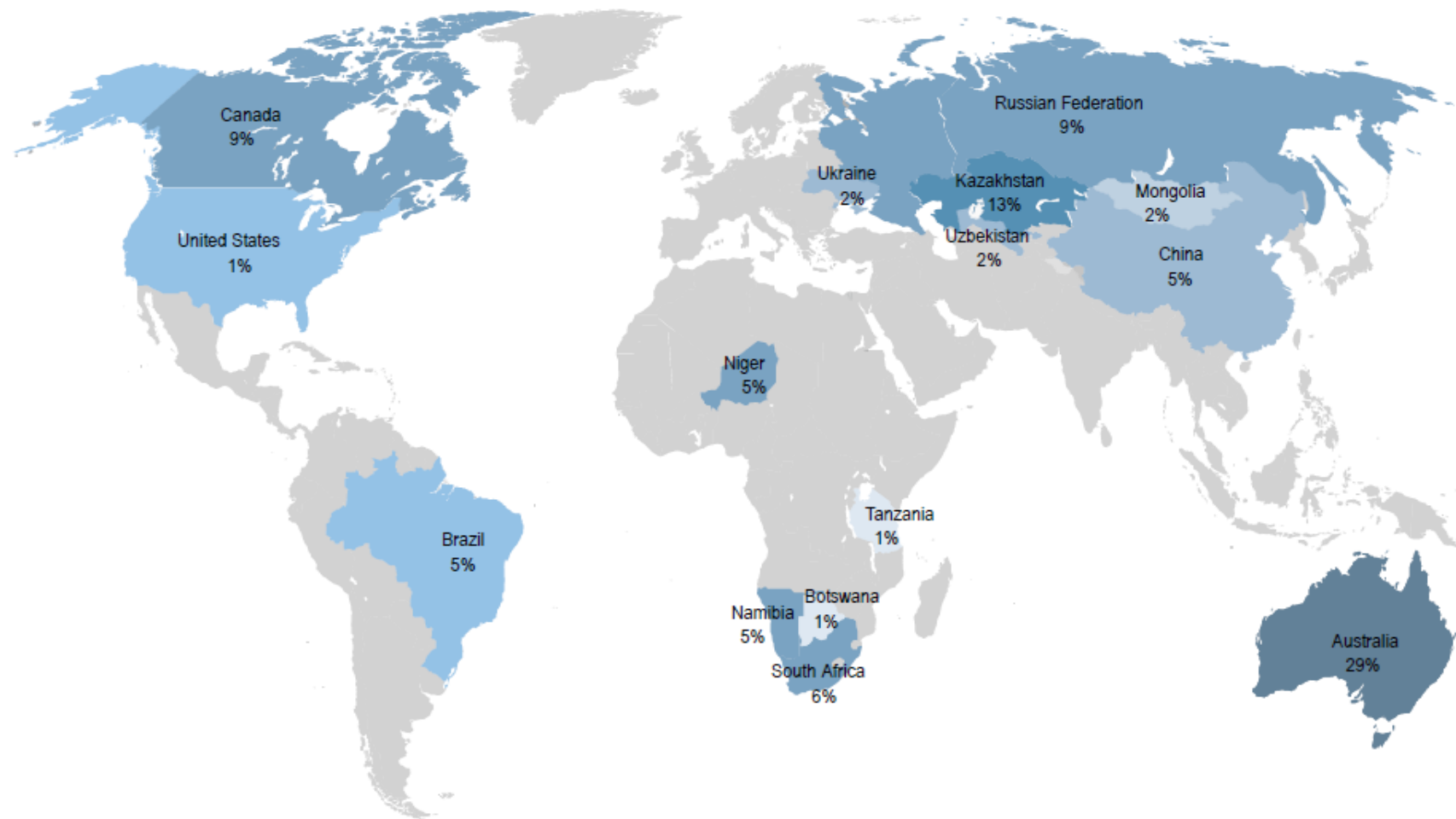


Uraanivarud

OECD report „Uranium
2016: Resources,
Production and Demand“:

Figure 1.1. Global distribution of identified resources

(<USD 130/kgU as of 1 January 2015)



The global distribution of identified resources among 15 countries that are either major uranium producers or have significant plans for growth of nuclear generating capacity illustrates the widespread distribution of these resources. Together, these 15 countries are endowed with 95% of the identified global resource base in this cost category (the remaining 5% are distributed among another 22 countries). The widespread distribution of uranium resources is an important geographic aspect of nuclear energy in light of security of energy supply.

Uraankütuse toore

OECD ja IAEA poolt 2016 a koostatud raport „Uranium 2016: Resources, Production and Demand“:

- ❑ Maailmas avastatud ressursside suurus hinnatud 5 718 400 tU (130USD/kgU) – 7 641 600 tU (260USD/tU).
- ❑ Uraani toodangumaht 2015 - 55 975 tU.
- ❑ Käesolev aruande järgi jätkub nimetatud klassi uraaniressursse ca 100-150 aastaks.



Austraalia avatud-tüüpi uraani-kaevandus (<https://www.mining-technology.com/news/thousands-new-australian-mining-jobs-remain-vacant/attachment/ranger-uranium-mine-3/>).

Konventsionaalse uraankütuse tootmine

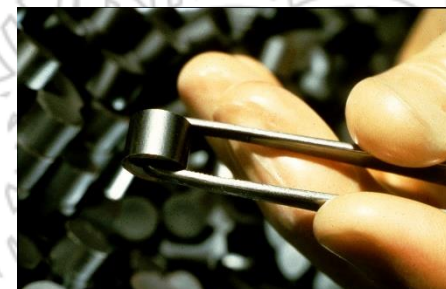
- ❑ Kergvee-reaktorid vajavad U-235 rikastatud kütust (kuni 5%).
- ❑ Konventsionaalsed reaktorid kasutavad uraani UO_2 vormis.
- Kaevandustest pärit kollakoogi (U_3O_8) konversioon.
- UF_6 rikastamine tsentrifuugimise või difusiooni teel.
- Uraani muundamine UO_2 .
- UO_2 paagutamine ning vormimine kütusepelletiteks (7mm(Ø)x10 mm).



Kollakook



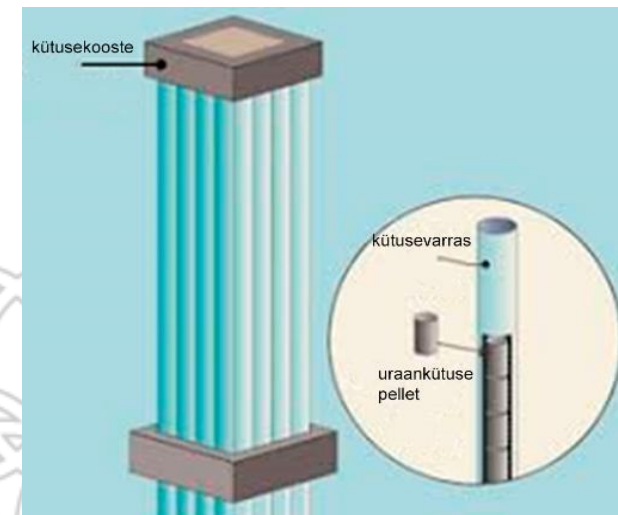
Rikastustsentrifuugid



kütusepellet⁶

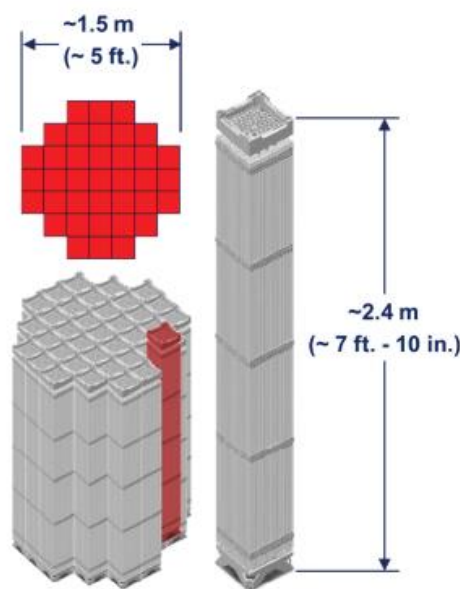
Uraankütuse tootmine - kütusekooste

- ❑ Pelletid laaditakse hermeetiliselt kütusevarrastesse.
- ❑ Vardad komplekteeritakse kütusekoostuks.
- ❑ Koostete geomeetria reaktoris seotud reaktoritehnoloogiaga.
- ❑ Avatud tsükliga UO_2 , suletud tsükliga nn MOX-kütus.
- ❑ Sulasoolkütuse korral kandesooladega segatud vedelat uraantetrafluoriidi (UF_4) (IMSR-400) või PuO_2 ja UF_4 seg (SSR-W).



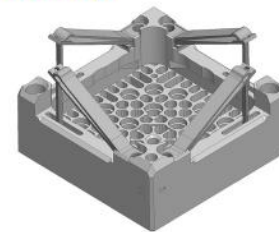
Kütusekoostud - NuScale

- Enimlevinud kooste tüüp maailmas
- Arendus koostöös ettevõttega Framatome
- NuScale koost 17x17 vardast koos 24 juhtvardaga
- Reaktori tuumas kokku 37 koostukomplekti
- Pikkus 2,4 m tavapärase 4 m asemel.

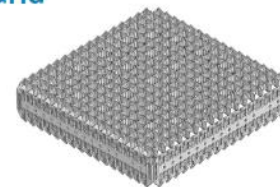


All components of the fuel assembly are already in reload use for PWRs

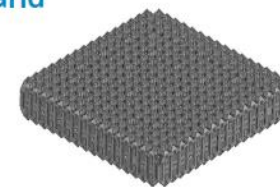
Top Nozzle Assembly



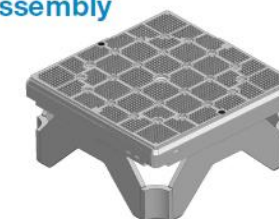
HTP™ Spacer Grid



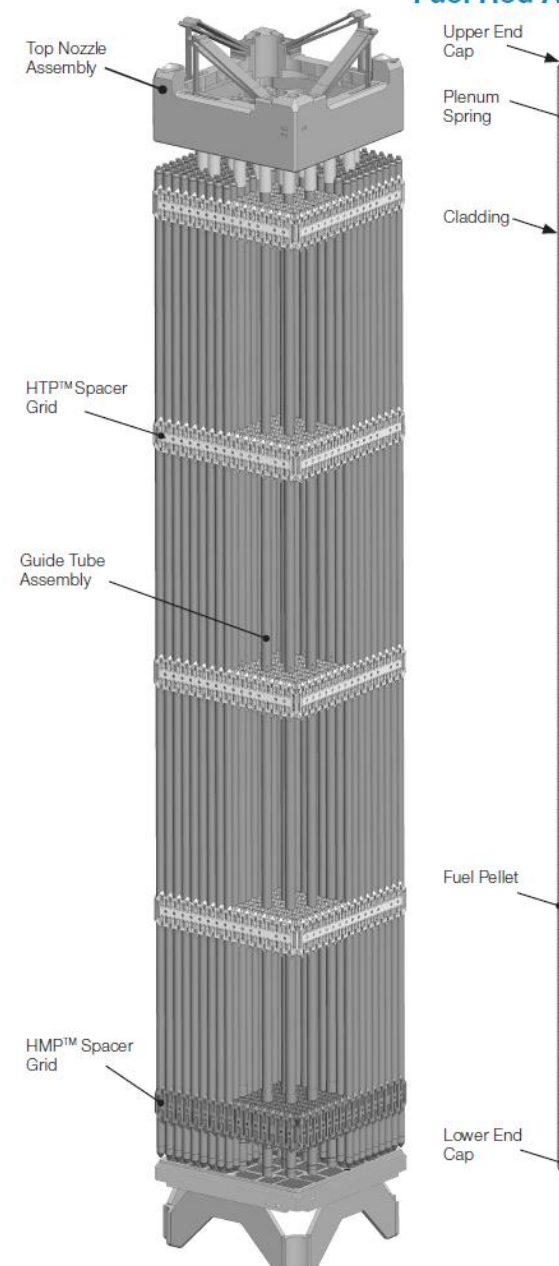
HMP™ Spacer Grid



Bottom Nozzle Assembly



Fuel Rod Assembly



Kütusekoostud – GE Hitachi, BWRX 300

- ❑ Põhineb GNF2 koostul.
- ❑ kasutusel üle 80% praegustest keevveereaktoritest.

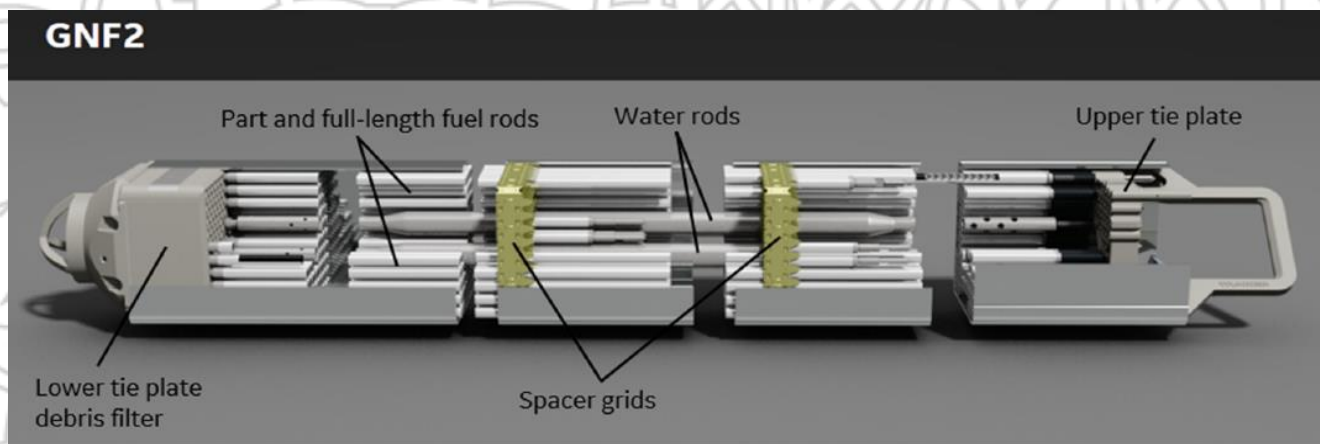


Figure 6-1: GNF2 Fuel Bundle

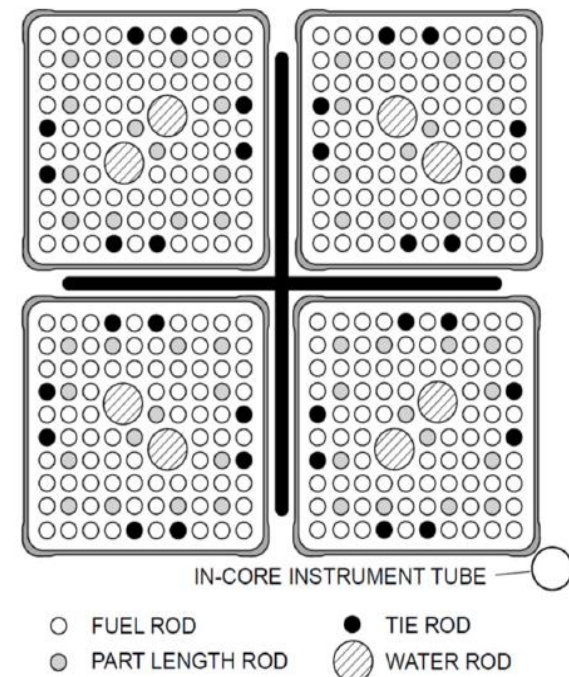
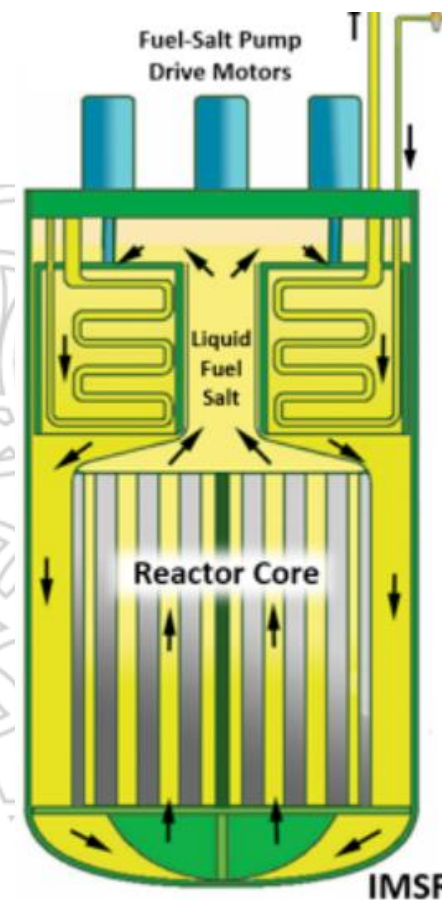


Figure 6-2: Four Bundle Fuel Module (Cell)

Reaktorikütus - Terrestrial IMSR400

- ❑ Sulasoolkütus – kandesoolad + UF_4 .
- ❑ Täidab ka soojuskandja rolli.
- ❑ Esialgu planeeritud avatud kütusetsükliga.
- ❑ Eeldatakse kütuse odavamast tootmiskulu.
- ❑ kütusetüüp vajab enne kasutuselevõttu potentsiaalselt mitmeaastast kütusekvalifitseerimist.



Kütusekoostud - Moltex

- ❑ Kiiretel neutronitel töötav nn. „jäätmepõletaja“.
- ❑ Klassikalises koostu formeeringus, kütusevarras täidetud sulasoolaga.
- ❑ Kütusetüüp vajab enne kasutuselevõttu potentsiaalselt mitmeaastast kütusekvalifitseerimist.

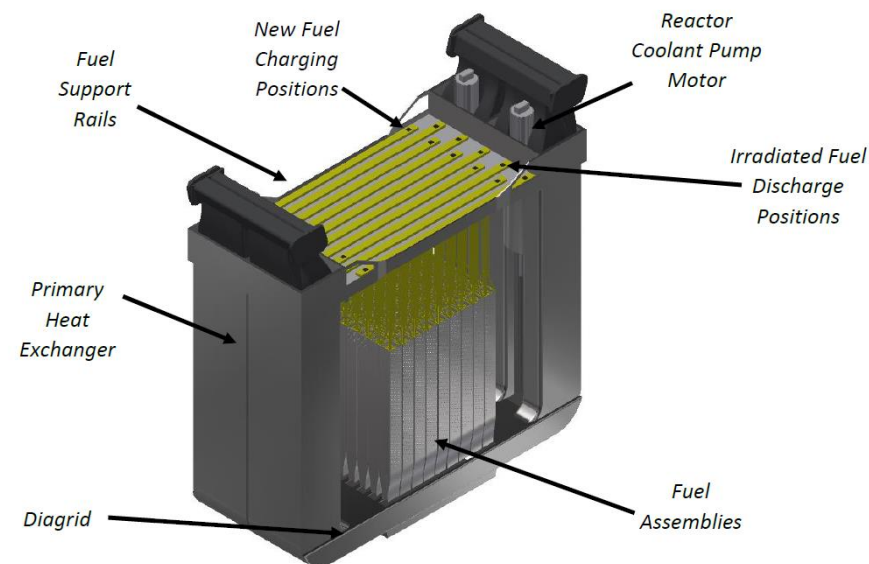
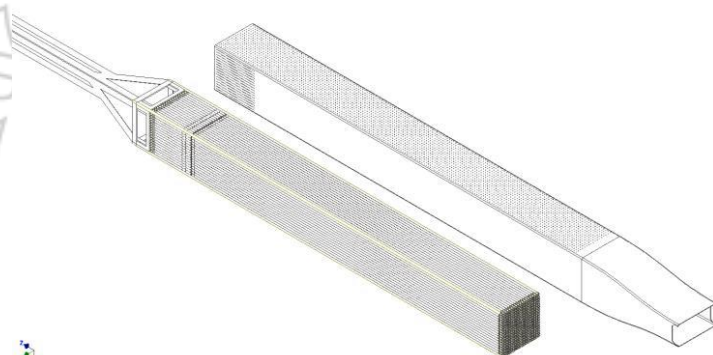
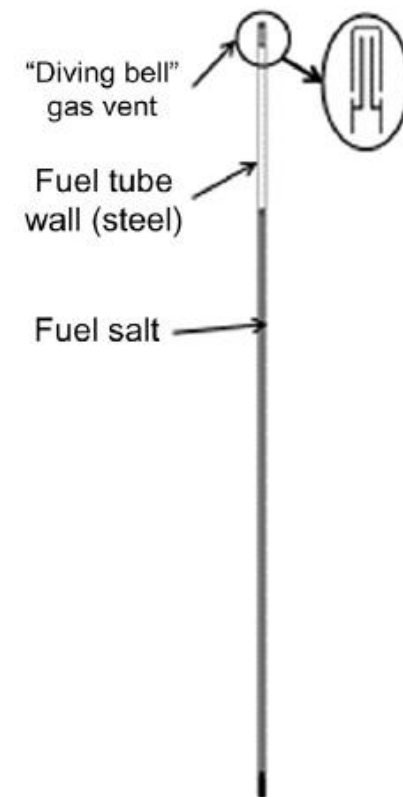


Figure 6: Overview of Stable Salt Reactor Core Module



Kasutatud tuumkütus

- ☐ Sisaldab erinevaid radioaktiivseid lõhustumisprodukte ja transuraanseid elemente ning liigitub seetõttu kõrge radioaktiivsusega jäätmeks.
- ☐ Esimesed 3-5 a hoitakse jahutusbasseinides.
- ☐ Hiljem võimalik kuivladustamine.

Kasutatud kütuse käitlemisel kasutusel kaks lähenemist:

- ☐ Ümbertöötlemine
- ☐ Lõppladestamine

Radioaktiivsete jäätmete käitlemine

- ❑ Eesti on ühinenud kasutatud tuumakütuse ja radioaktiivsete jäätmete ohutu käitlemise konventsiooniga.
- ❑ Jäätmete käitlemine on ohutuse tagamiseks rangelt reguleeritud riikliku seadusandluse ning pädeva riikliku asutuse poolt.
- ❑ **Kehtivad põhimõtted:**
 - Jäätmekäitlusega seotud kulud katab jäätmete tekitaja.
 - Tuumaelektrijaamadest saadud energiat kasutav generatsioon vastutab ka kaasnenud jäätmete turvalise ning ohutu lõppladustamise eest.

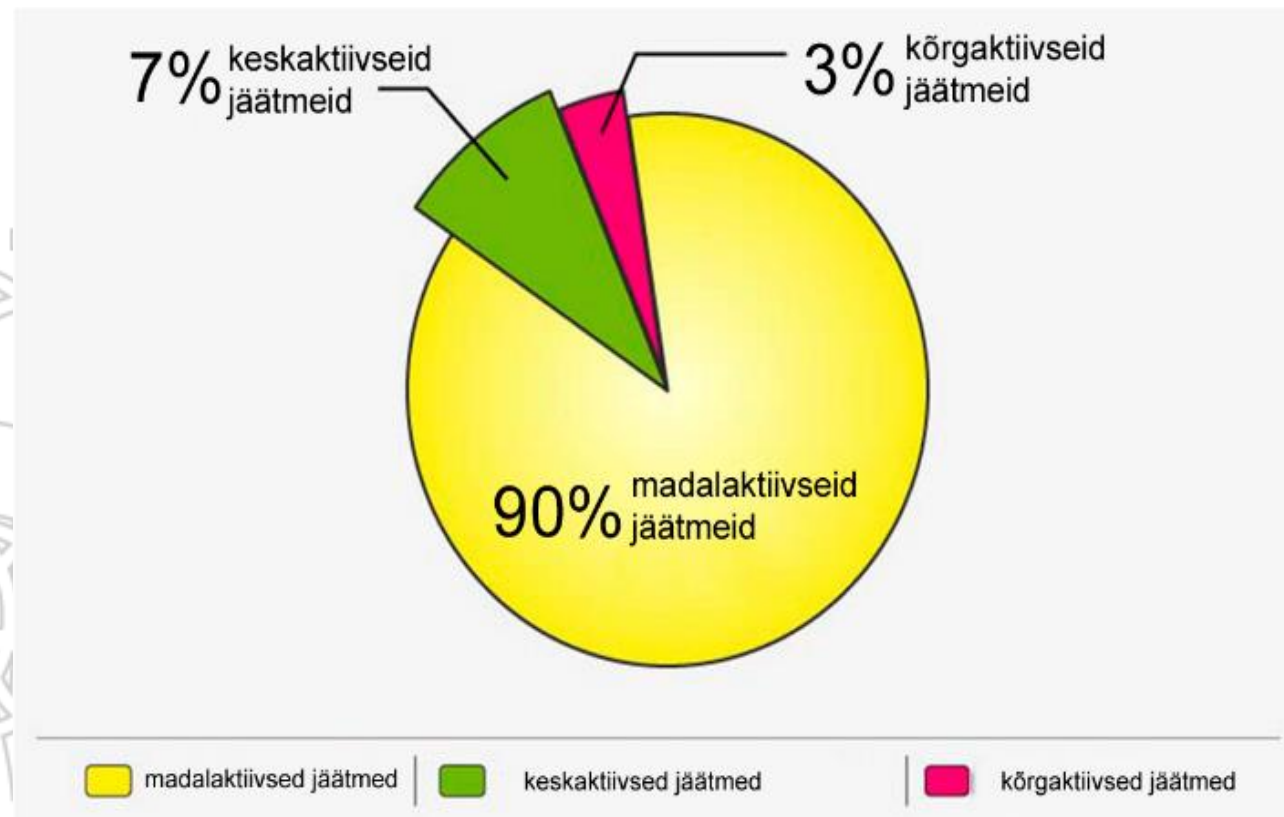
Jäätmete kirjeldus

Praktika jaoks on olulised kaks aspekti:

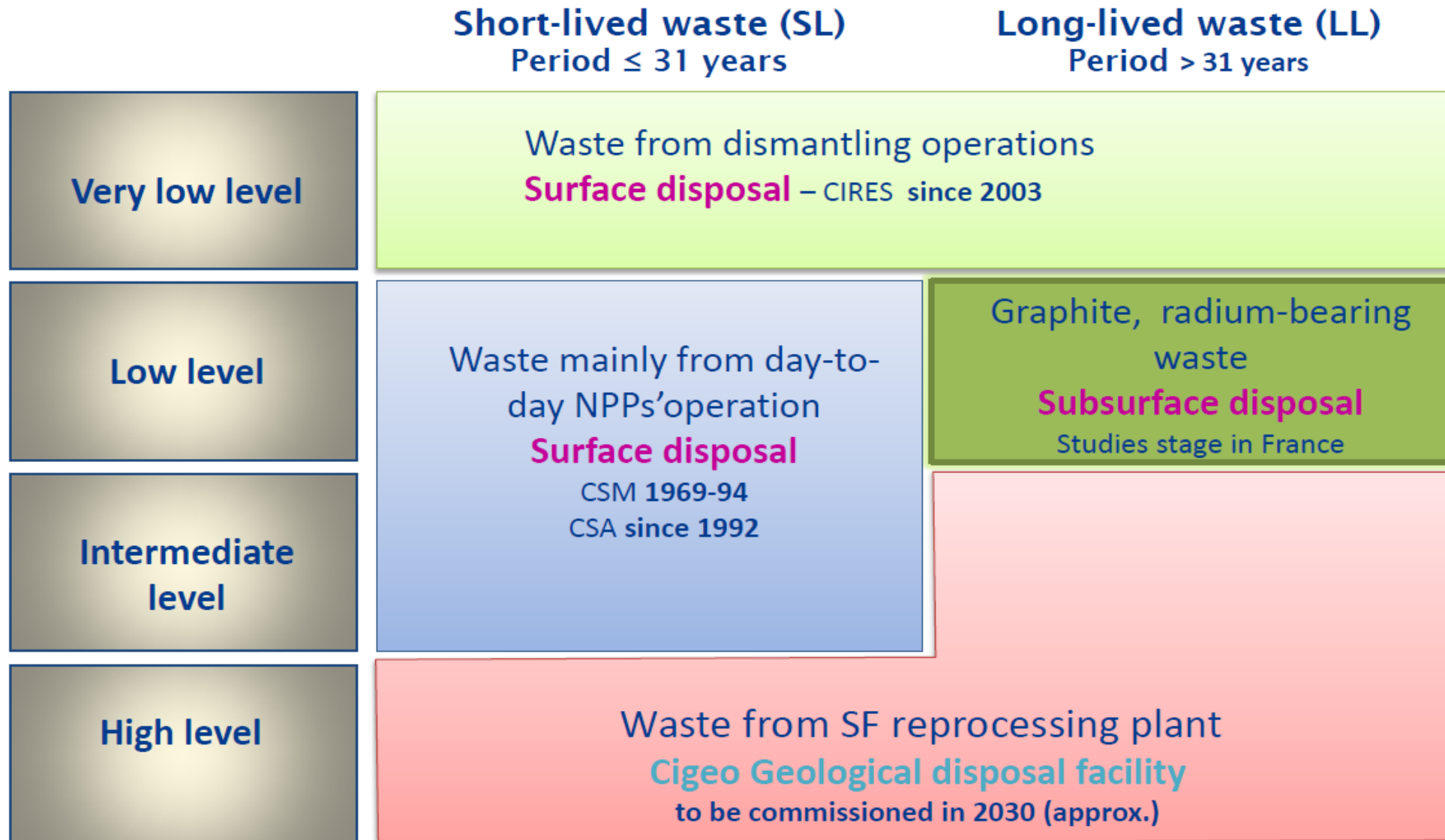
- ☐ Jäätmete radioaktiivsuse tase ning
- ☐ radioaktiivsete jäätmete poolestusaeg (eluiga).

Jäätmed jagunevad:

- ☐ Kõrgaktiivsed
- ☐ keskaktiivsed
- ☐ madalaktiivsed radioaktiivsed jäätmed



Overview of radioactive waste classification



- Below 100-day period, management through in-situ radioactive decay.
- Only solid waste are to be disposed of.

Jäätmekäitlusrajatiste näited - Prantsusmaa

Lühiealiste ILW ja LLW hoidlad - CSA

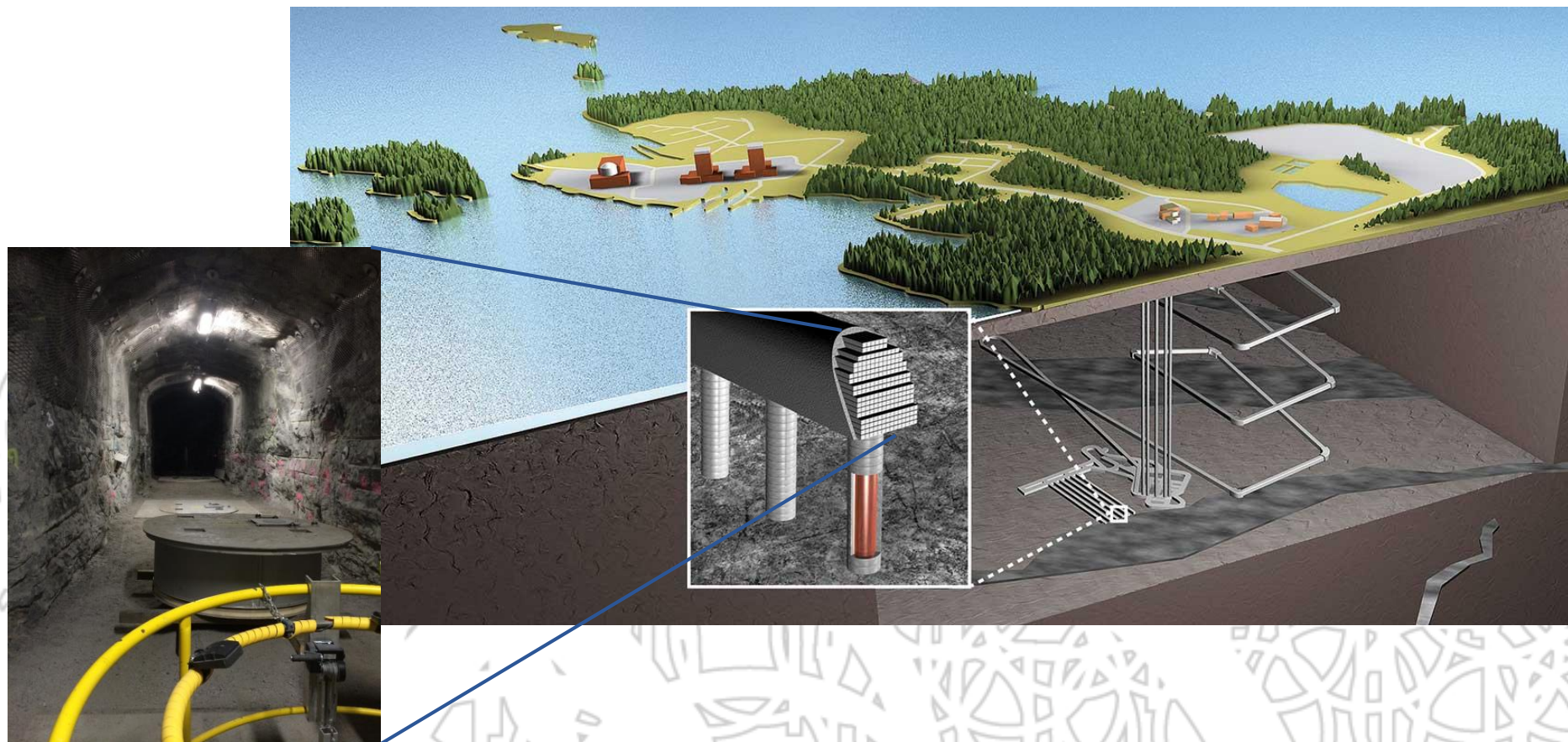


Financed by Andra
500€/m³
CLIS
280 000 m³
650 000 m³

madalaktiivsusega jäätmete lõppladestus - CSA



Jäätmete lõppladestamine - Onkalo lõppladestusrajatis

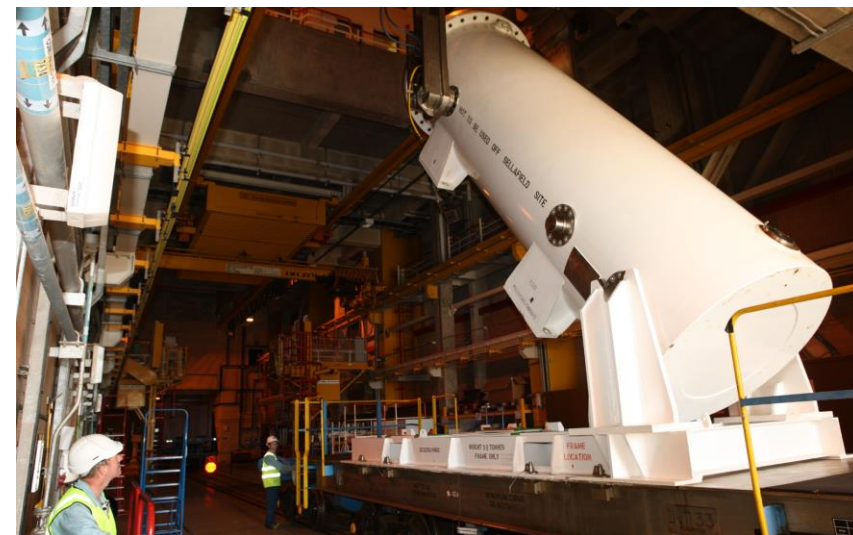


Onkalo hoidla piloottunnel.

https://en.wikipedia.org/wiki/Onkalo_Nuclear_Power_Plant

Kütuse ja Jäätmete transport

- ❑ Transport on kütusetsükli loomulik osa.
- ❑ Transport peab vastama kindlatele ohutusnõuetele ja on rangelt standardiseeritud.
- ❑ Õhu-, mere-, raudtee- ja maanteetranspordil kasutatakse spetsiaalseid veokonteinereid. Veose konteiner peab pakkuma vajalikku kiirgusvarjestust, olema lekkekindel ja pidama vastu võimalikele avariiolukordadele.
- ❑ Transport ei vaja eritaristut, kuid vajalik on pädeva veokorraldaja olemasolu.
- ❑ Peab arvestama ka varguse ja võimaliku sabotaažiga - arvestada ja rakendada vajalikke ohutus- ja turvameetmeid.



Dekomisjoneerimine

- ❑ Dekomisjoneerimine määratletakse kui radioaktiivsusest puhastamist ja tuumaelektrijaama demonteerimist. Dekomisjoneerimine on lõpule viidud pärast saastest puhastamise kontrollimist ja jäätmete eemaldamist.
- ❑ Dekomisjoneerimist viiakse üldjoontes läbi ühel alljärgnevatest viisidest:
 - Kohene demonteerimine:
 - Konserveerimine:
 - Kapseldamine:
- ❑ Dekomisjoneerimise kulude eest vastutab käitaja või omanik, panustades osa elektritootmise tuludest vastavasse fondi.
- ❑ 2016. aasta lõpuks on suletud umbes 115 kommertstuumajaama, 48 eksperimentaalset või prototüüpreaktorit, üle 250 uurimisreaktori ja mitu kütusetsükli rajatist. Vähemalt 17 rajatist on täielikult demonteeritud.

Kokkuvõte (1) – kütuse toorme tarnekindlus

Kütusetehnoloogia:

- ☐ NuScale ja BWRX-300 põhinevad konventsionaalsetel kütusetehnoloogiatel, kütusetsükli eri etappide suhtes on pikaajaline kogemus - tehnoloogia on hästi välja arendatud.
- ☐ Sulasoolreaktorid (IMSR400, SSR-W) on suure potentsiaaliga, kuid tehnoloogia on arendusjärgus ning napib kasutuskogemust (maailmapraktika piirdub uurimisreaktoritega).

Kütuse tarnekindlus:

- ☐ Kütuse tootmine, tarnimine ja kättesaadavus – uraanil põhineva konventsionaalse kütuse tarneahel on hästi väljakujunenud turuga ja tarnijatega.

Kasutatud kütuse ümbertöötlemine

- ☐ Ümbertöötlemine on kallis ja tehniliselt keeruline. Praktikas kasutavad seda suurte jäätmemahutudega suured riigid.
- ☐ Pigem lähtuda printsiibist „oota ja vaata“.

Kokkuvõte (2) – radioaktiivsed jäätmed

Kasutatud kütus:

- ❑ Kui välismaiste ettevõtetega kütuse ladustamise või ümbertöötlemise lepinguid ei sõlmita, peab Eesti tagama, et vastav hoidla loodaks Eesti territooriumile.

Radioaktiivse jäätmed:

- ❑ Madala ja keskmise radioaktiivsusega jäätmed. Mistahes reaktoritehnoloogia tarnija korral vastutab Eesti riik kesk- ja madalradioaktiivsete jäätmete ümbertöötlemise ja ladustamise eest ehk vastava hoidla ehitamine võib olla vajalik.
- ❑ Lõppladestamine. Kuna jäätmete lõppladestamiseni on kaua aega, on võimalus, et Eesti saab vajadusel kasutada rahvusvahelist lõppladestushoidlat. Kui rahvusvaheline lõppladestamine ei ole võimalik, peab Eesti olema valmis ehitama ja käitama lõppladestushoidlat oma territooriumil sarnaselt Soomes ja Rootsis kavandatavale.



Täna tähelepanu eest!