

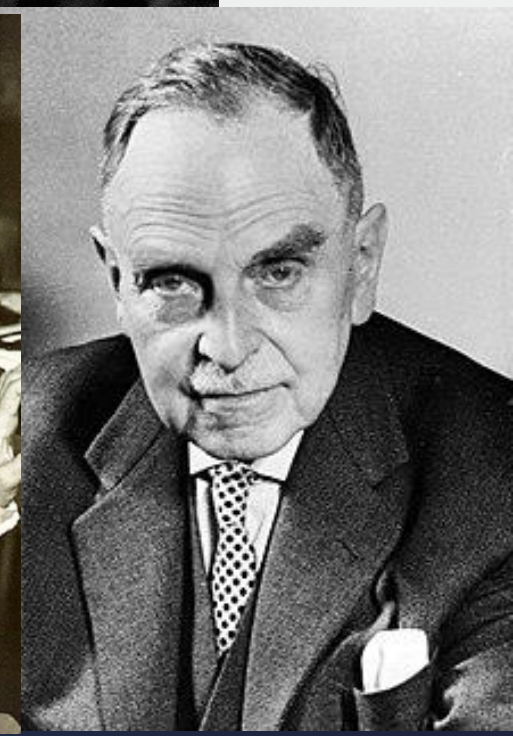
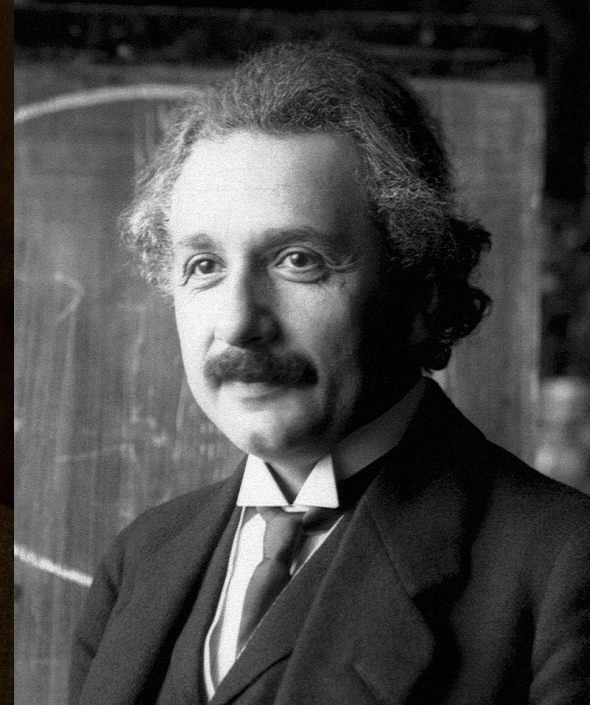


Sulasoolreaktorid & Eesti

Kalev Kallemets | MTÜ Eesti Tuumajaam

Sisukord

- Tuumaenergeetika alused
- 20. sajandi tuumaenergia
- Sulasoolreaktorite uurimise ajalugu
- Sulasool põhiomadused
- Arendatavad reaktoritüübi (TerraPower, Moltex, Terrestrial Energy, Seaborg)
- Mida teha Eestis?



Tuumaenergia põhiarvud

1. Otto Frisch: „Lise Meitner... worked out that the two nuclei formed by the division of a uranium nucleus together would be lighter than the original uranium nucleus by about one-fifth the mass of a proton. Now whenever mass disappears energy is created, according to [Einstein's](#) formula $E = mc^2$, and one-fifth of a proton mass was just equivalent to 200 MeV. So here was the source for that energy; it all fitted!“
2. Ühes grammis uraanis on $2,56 \cdot 10^{21}$ aatomituuma
3. **1 grammist U235** saab $2,56 \cdot 10^{21} \cdot 200 = 5,12 \cdot 10^{23}$ MeV = $8,2 \cdot 10^{10}$ J = **0,95 MW/h**
4. Kaasaegsete veereaktorite kütuse kasutuse efektiivsus (burnup) **60 GWpäeva/t**. Kiirete neutronitega sulasoolreaktori burnup **500 GW päeva/t**. Kütusena pooldub 60% poolduvast kütusest (kas U235 või Pu239) võrreldes vaid 5% veereaktoris.
5. Veereaktorite kasutatud kütuses on peamiseks probleemiks pika radioaktiivsusega (N sajandit) **aktiniidid** (ameriitsium, kүүrium, neptuunium), mis moodustavad **vaid 3% kasutatud kütuse massist** annab 95% radioaktiivsusest.

Allikad: A.Paist; R. Kruus. Tuumareaktorid. TTÜ 2011; <http://www.radioactivity.eu.com> ; Bob Weintraub. [Lise Meitner \(1878–1968\): Protactinium, Fission, and Meitnerium](#). Retrieved on June 8, 2009.

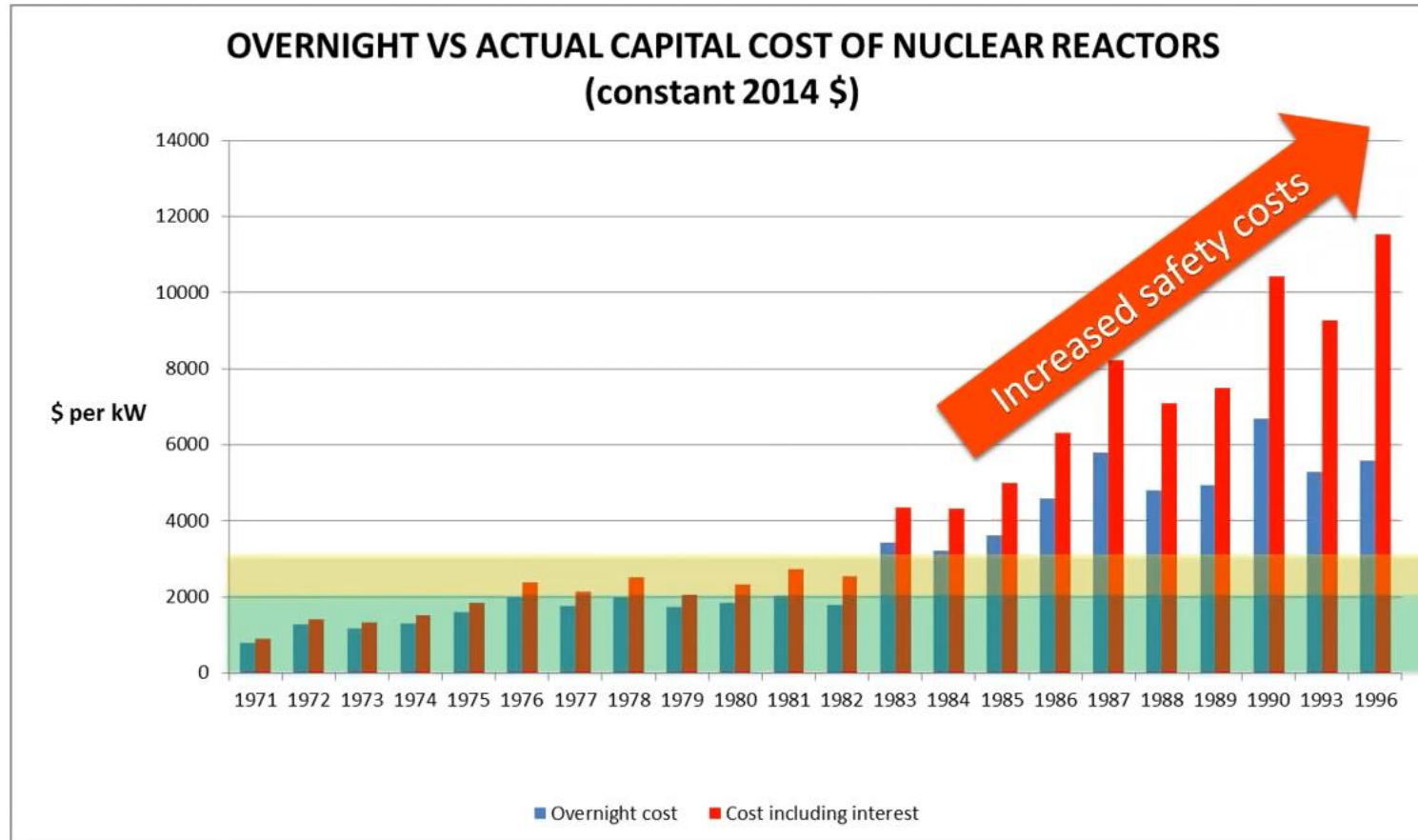
MIS ON EESTI ELEKTRIVARUSTUSE TULEVIK?

- 2018 CO₂ hind 18,5€/t; 2020+ ca 30-40€/t
- Narvas 2019. suletakse 600MWe võimsust; 2025 tõenäoliselt veel 600MWe
- NordPool 2018 **keskmise** elektri hind **45,8€/MWh. Tipud 60€/MWh**
- 2017- 2018 rajati Eestis o uut tuulikut. Puiduga koostootmise potentsiaal täidetud.
- 2021 Norrast valmib **KOLM** 1400MW ühendust UK, Saksaga.
- 2021-2023 Saksamaa sulgeb 8 tuumajaama, Rootsi 2 reaktorit (1730MW) suletakse 2019-2020.
- 2030 elektri hind päeva tippudes ca 70-80€/MWh, keskmine 60-70

Miks suured, veejahutusega tuumajaamad **ei ole** tulevik?

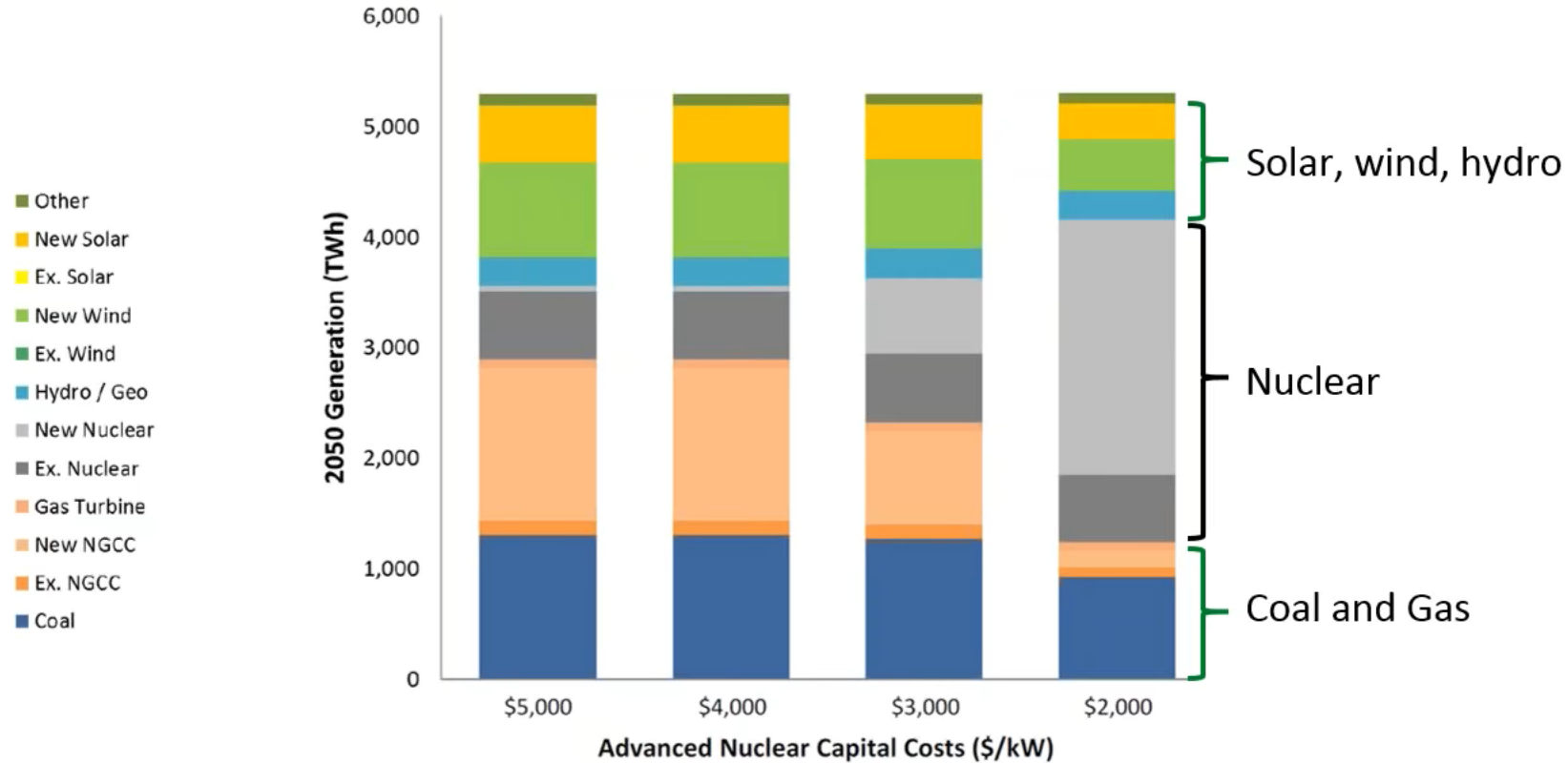
- UK Hinkley Point EPRi valitsuse garanteeritud hind 90€/MWh
- Olkiluoto 3 valmimine 9 aastat hiljem ja **6,3 miljardit EUR üle** eelarve.
- Flamaville EPR- 6 aastat üle tähtaja ja **7 miljardit EUR üle** eelarve
- Vee temperatuur reaktoris 315 °C, mille juures surve 155 baari (15.5 [MPa](#) 153 [atm](#)), mistõttu suure surve hoidmiseks vajalikud massiivsed reaktorid, terastorustikud, aurugeneraatorid ja betoonstruktuurid.
Tšernobõlis oli peamine avarii auruplahvatus.
- Tahke kütusega kaasneb radioaktiivsete gaaside teke (jood, tseesium)
- Vee ja tsirkooniiumi kõrgtemperatuurine reaktsioon -> vesinik. Fukushima toimus vesinikplahvatus.

Nuclear Energy is too Expensive



Nuclear viable
Nuclear dominant

The importance of capital cost



At \$3000 /kW nuclear is viable, at \$2000 it is dominant

History of the Molten Salt Reactor

1944: Eugene Wigner argued for a thermal-breeder program using thorium as the fertile material and U-233 as the fissile material.



1944: Wigner's protégé, Alvin Weinberg, followed Wigner's path at the Oak Ridge National Lab.

1952: Homogeneous Reactor Experiment (HRE-1) built and operated successfully (100 kWe, 550K)

1958: The Molten-Salt Reactor Program (MSRP) was begun at ORNL under H.G. "Mac" MacPherson

1959: AEC convenes "Fluid Fuels Task Force" to choose between aqueous homogeneous reactor, liquid fluoride, and liquid-metal-fueled reactor. Fluoride reactor is chosen and AHR is cancelled.

1965: The MSRE went critical on June 1. It operated for 4.5 years until it was shut down in December 1969. The MSRE was the first (and probably only) reactor to operate on all three fissile fuels: U-233, U-235, and Pu-239.

1973: The MSRP program was canceled in January.

1972: The AEC moved to cancel the MSRE. In part because the AEC was heavily committed to the sodium-cooled fast breeder.

1940

1950

1960

1970

1980

1947: Eugene Wigner proposes a fluid-fueled thorium reactor



1950: Alvin Weinberg becomes ORNL director



1954: The Aircraft Reactor Experiment (ARE) operated for a 1000hr cycle in 1954.

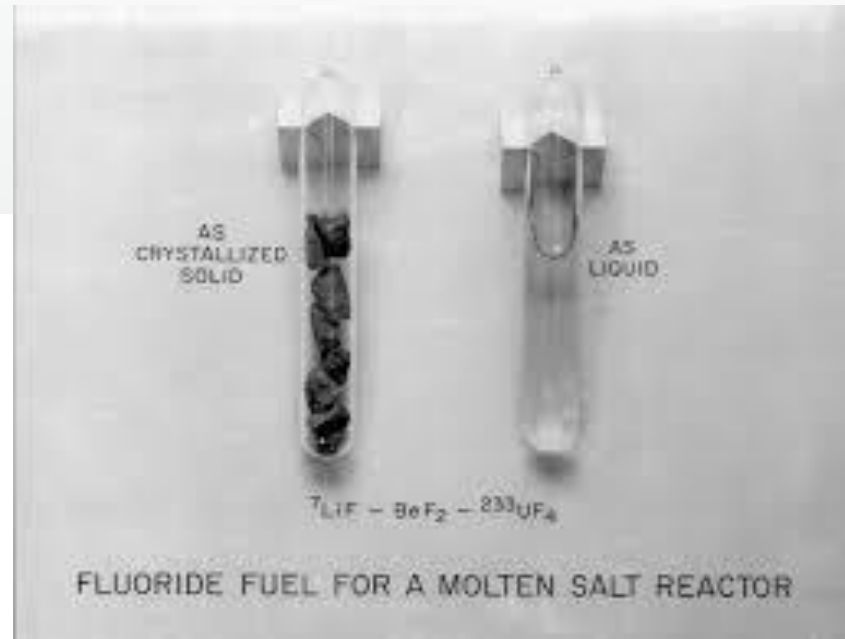
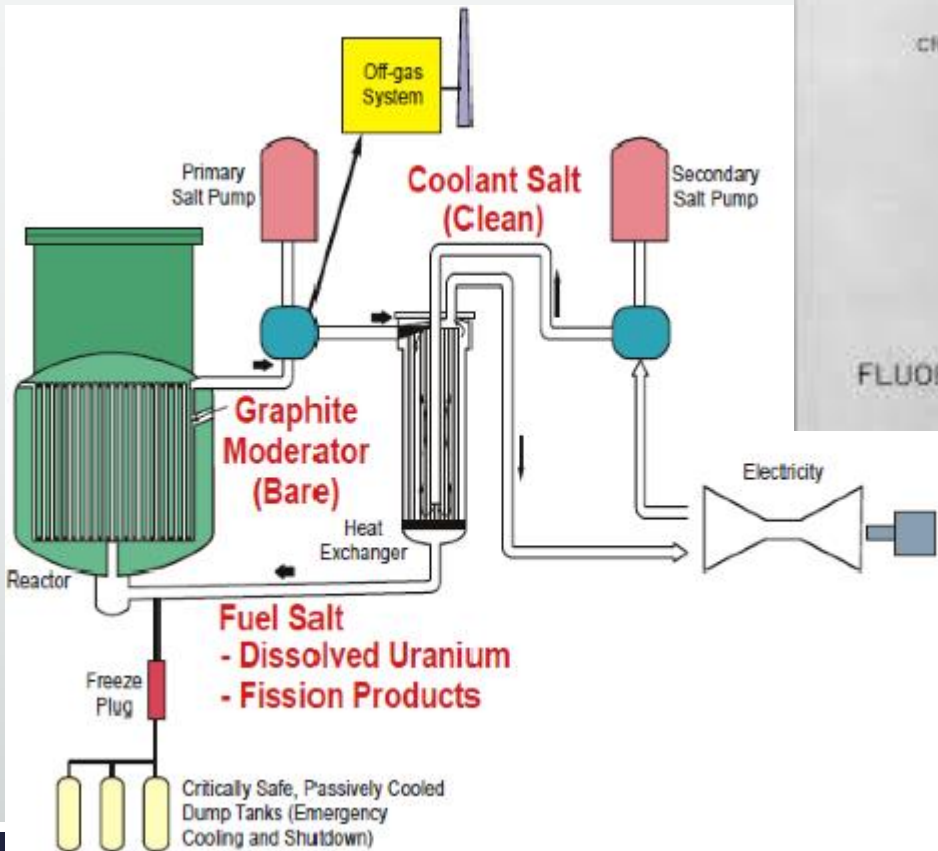
1961: Design and construction of the Molten-Salt Reactor Experiment (MSRE) began. It was a "true" liquid-fluoride power reactor.



1976: The program was briefly restarted but then closed again in 1976

Denatured Molten Salt Reactor (DMSR) in the early 1980s

Integral Fast Feactor 20MWe (sodium cooled) 1984-1994



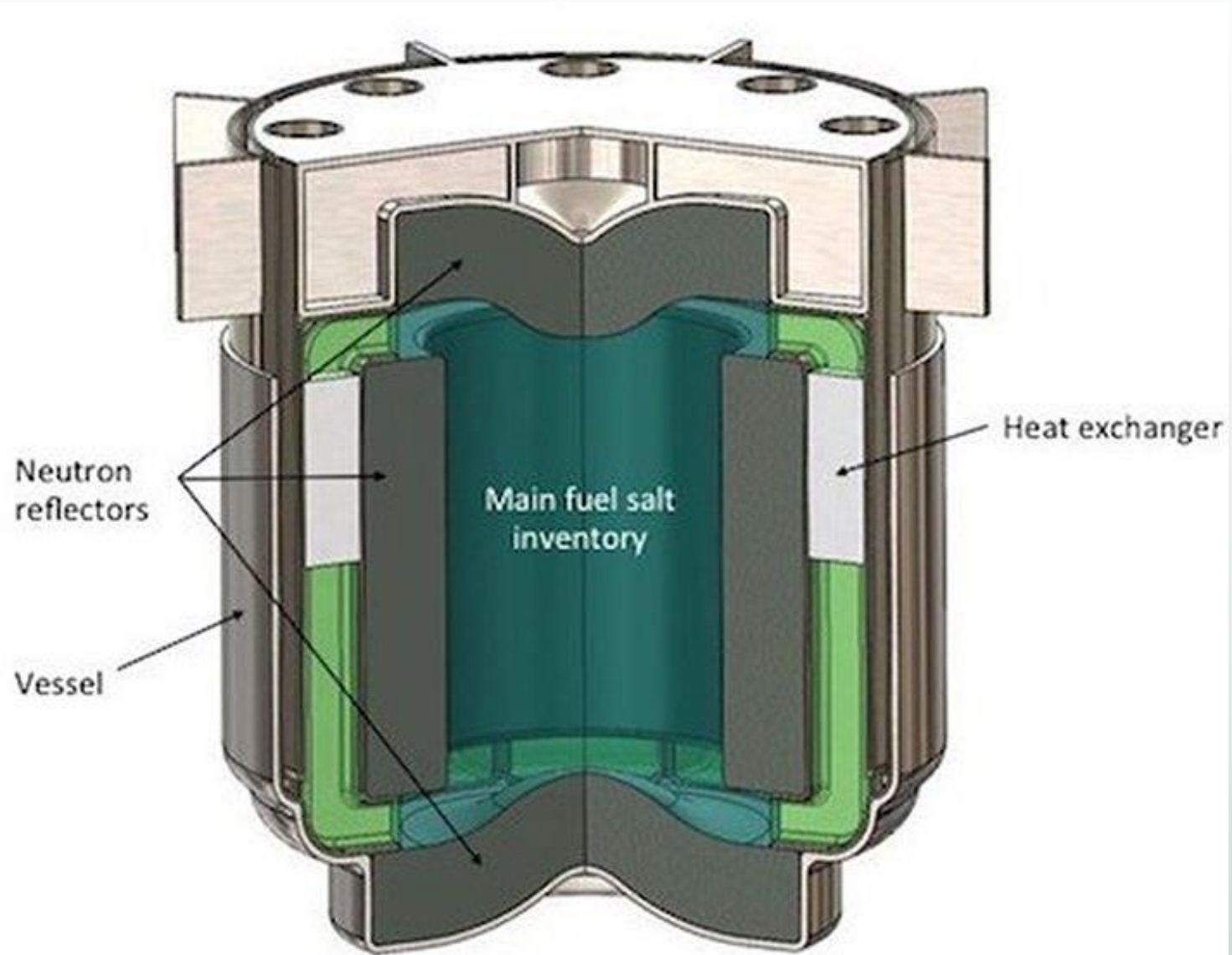
Vedelsoolade eelised

- Passiivne ohutus (MSR katseliselt tõestatud)
- Ei ole rõhu all; seiskamata kütusevahetus
- Negatiivne reaktiivsuskoeffitsient (ohutus)
- On sulanud (ei saa ära sulada)
- Ei eraldu kütusest kõrgradioaktiivseid gaase
- Võimalus kasutada kasutatud kütust, tooriumi, lihtsam kütusetootmine, kordi efektiivsem kütusekasutus(vähem jäätmeid)

Probleemid:

- Kütusesoola voolamise korral n-korrosioon/creep, hilinevad neutronid, uus modelleerimine, moderaatori kulumine, litsentseerimine.
- Kütuse voolamisel kõrgradioaktiivne lekkerisk.
- Online kütuse keemiline puhastamine
- Senised suurettevõtted, personal, regulaator harjunud veereaktoritega.

Terra Power



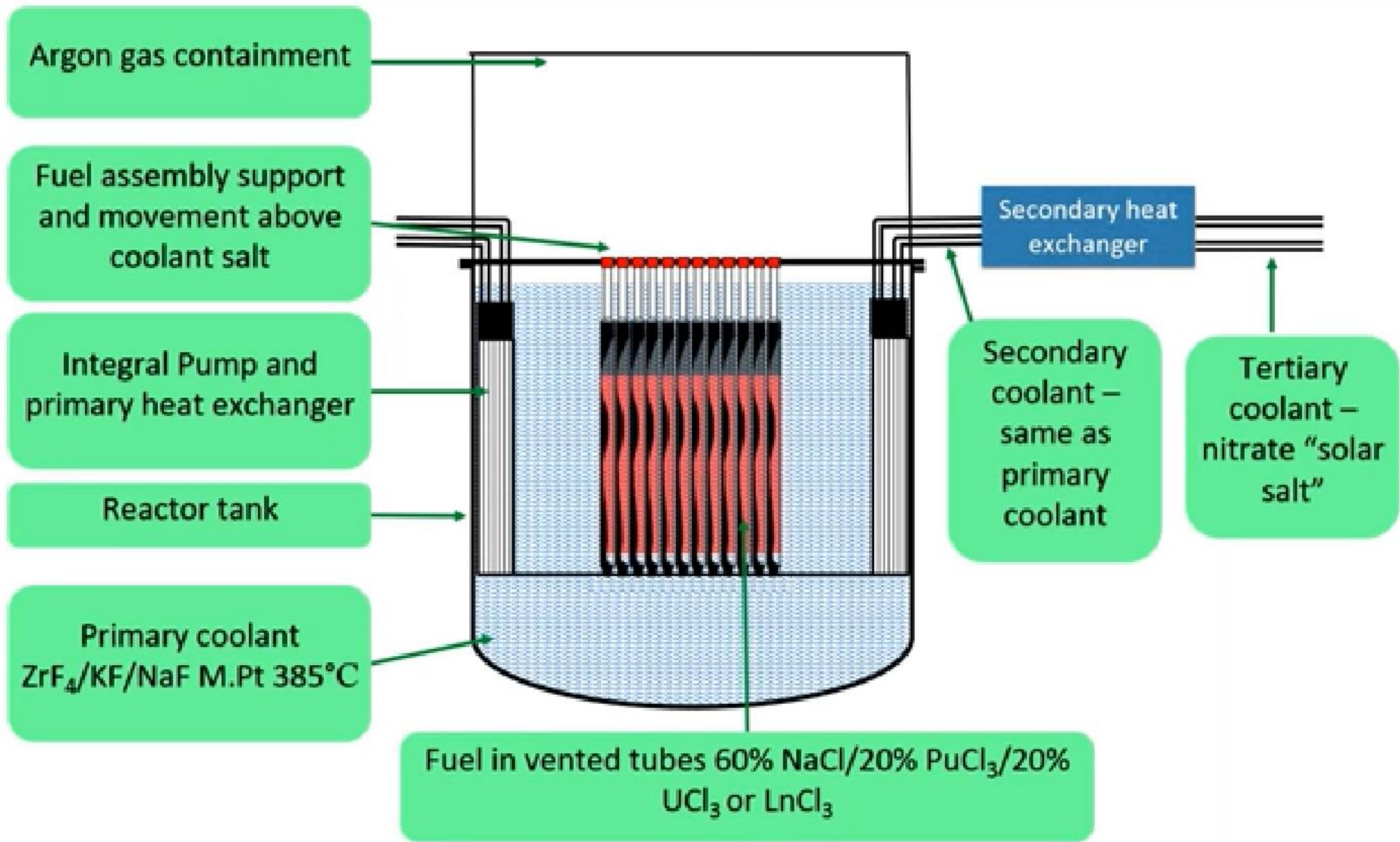
Terra Power MSCR

- U.S. Department of Energy investeerinud \$28 miljonit USD jagatud kulude põhiselt materjalide uuringutesse
- \$20 miljon investeeringut sulasoola katsetesse alates 2019.
- 1100 MWe prototüüp 2030.
- Kasutab kütusena ja jahutina kloriidsoolasid.

Moltex Energy (UK)

- Kiirete neutronite reaktor
- Kasutab kütusena kasutatud kütust, uraani või tooriumi.
- Vedelkütus ei ole voolav kontuuris vaid kütusevarrastes
- Puudub reaktori seiskamine kütusevahetuseks
- Litsenseerimisel Kanadas. Ehituse algus 2024
- Eeldatav omahind 45€/MWh või 49€/MWh juhitud

Basic design cartoon of the Stable Salt Reactor – Wasteburner



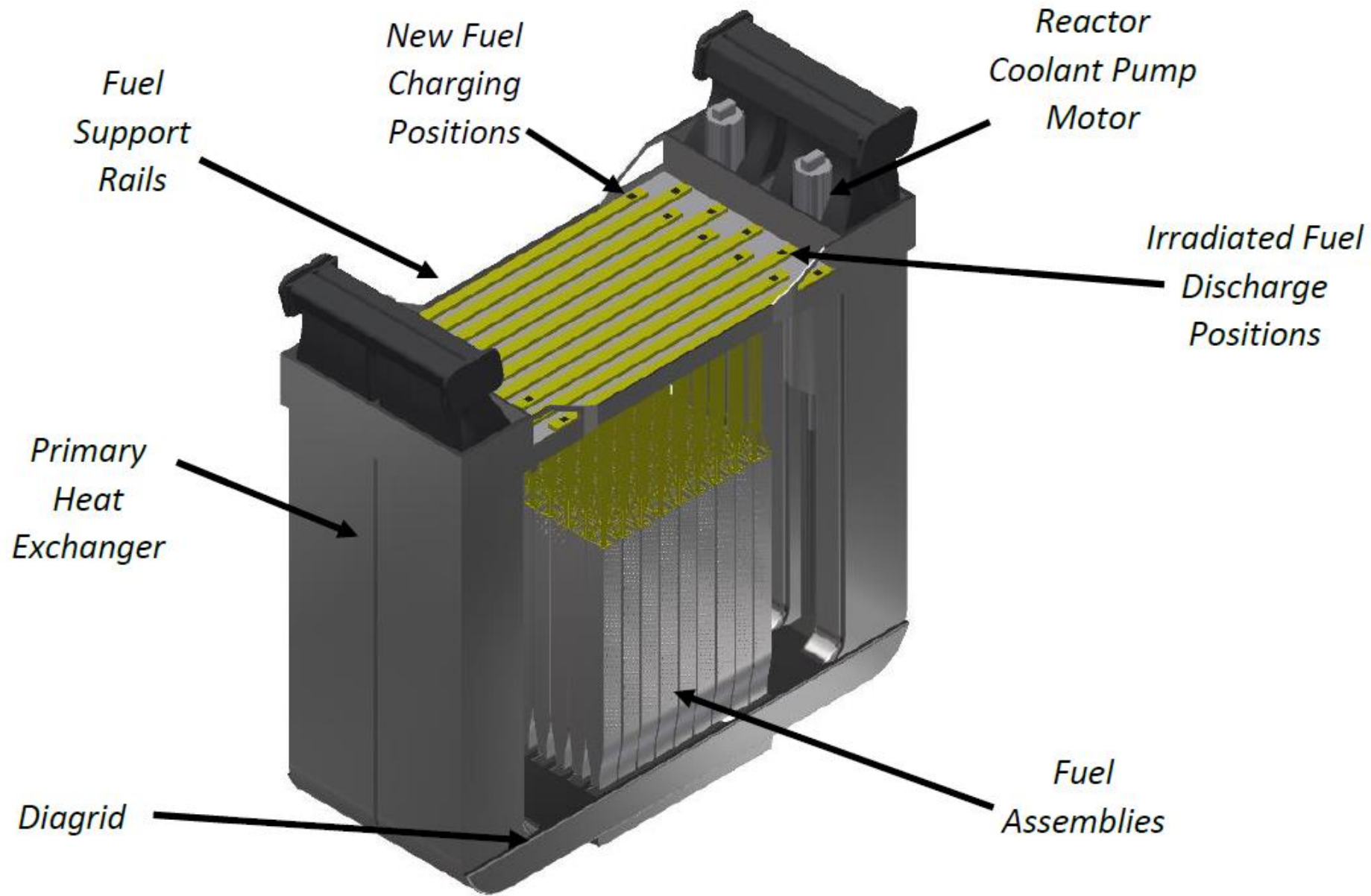
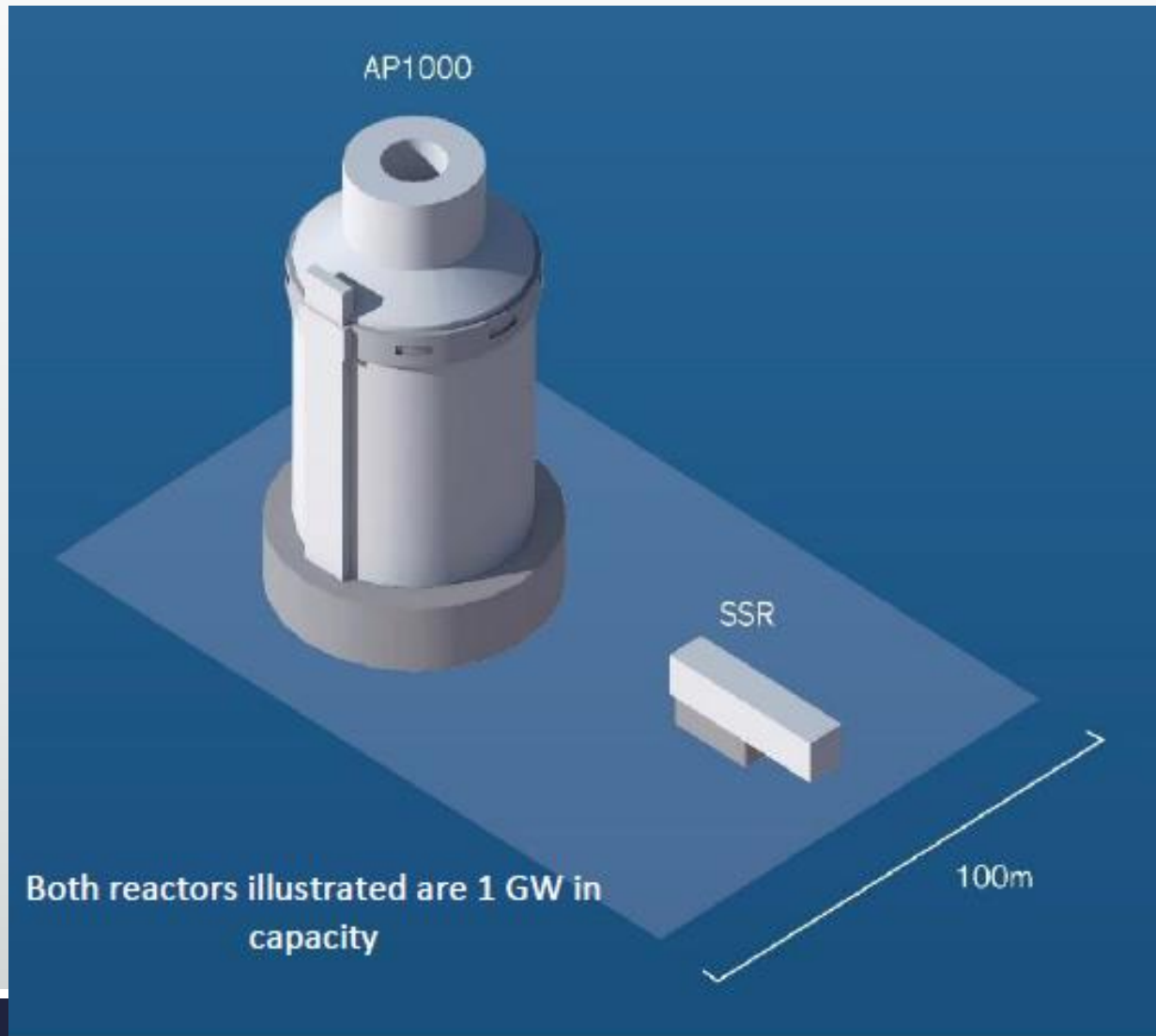
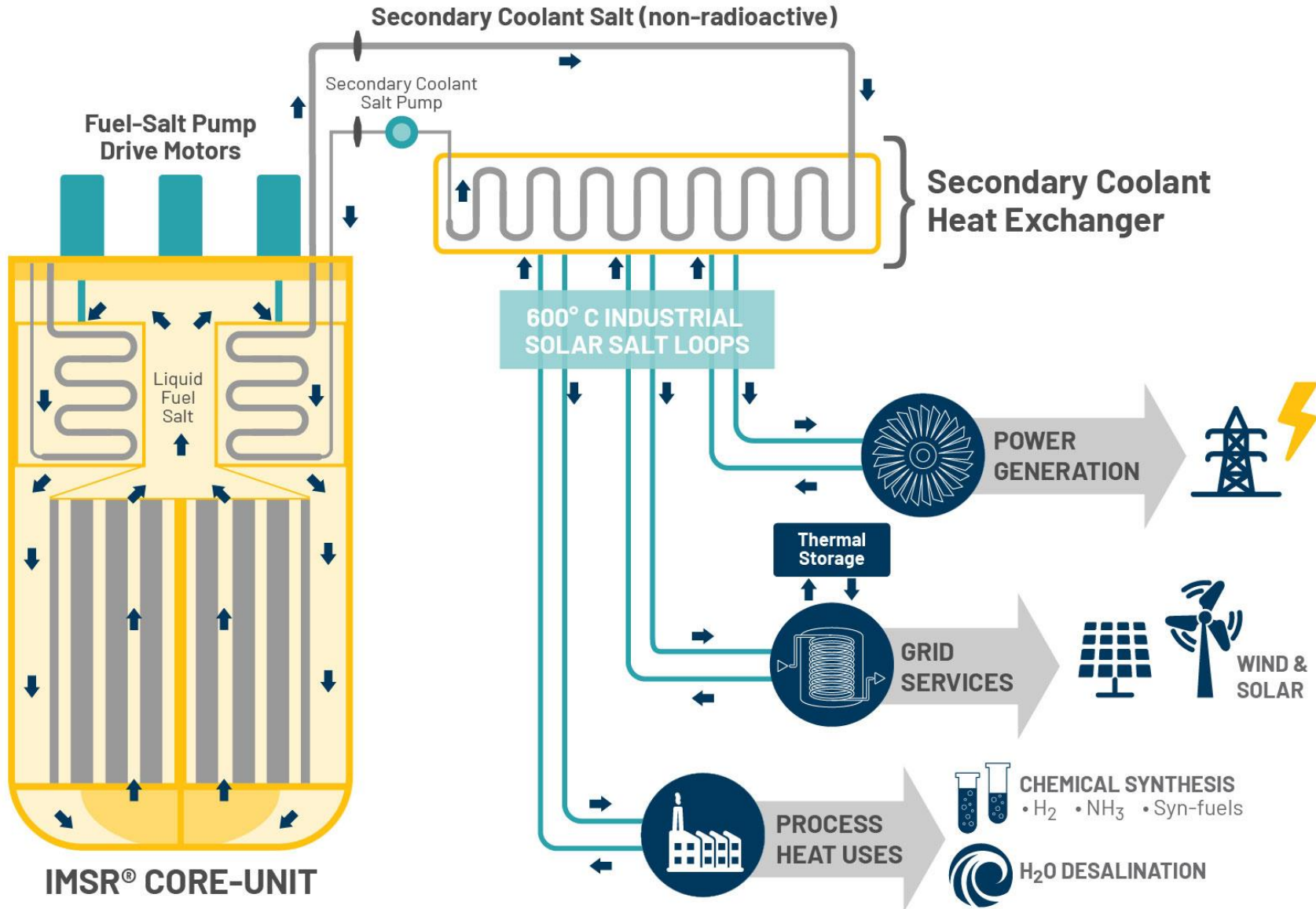


Figure 6: Overview of Stable Salt Reactor Core Module

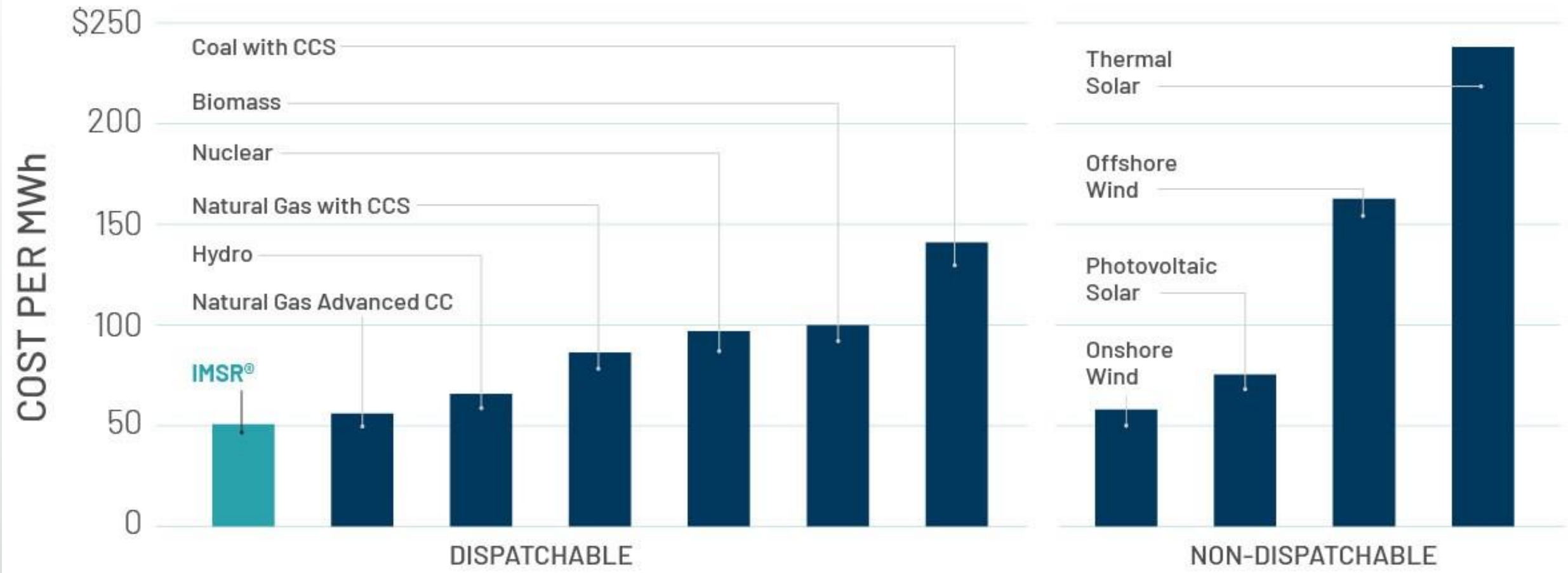
Suurus loeb. Väiksem on odavam



Terrestrial Energy (Kanada) 200MW ISMR



TOTAL SYSTEM COST



Tööstuslikud partnerid



Terrestrial ISMR

- Alustas oktoobris 2018 Kanadas Vendor Design Review 2 faasi
- Alustas vesiniku tootmise uuringuid Southern Company'ga (USA)
- L3 MAPPS'iga alustas simulatsioonitarkvara arendamist
- Terrestrial Energy USA sai \$3.15 miljonit USA valitsuse toetust tehnoloogia arendamiseks.
- Terrestrial Energy USA ja Energy Northwest allkirjastasid asukoha valiku, ehituse ja opereerimise lepingu Idaho National Laboratory's.
- Käivitatud ISMRi rajamise teostatavusuuring Canadian Nuclear Laboratories

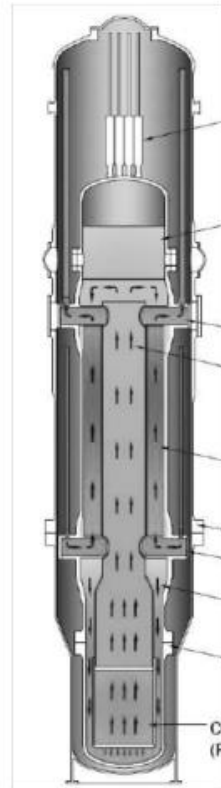
Proprietary ultra compact design

250 MWth,
in a 20' container,
50 ton, 35 m³



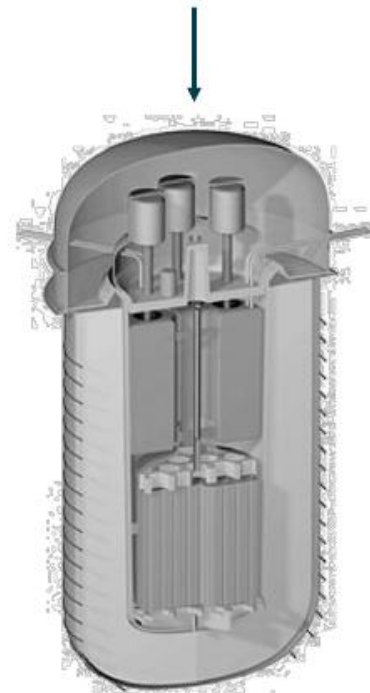
Seaborg CMSR
250/100 MW

2,7m x 20m
Without pumps

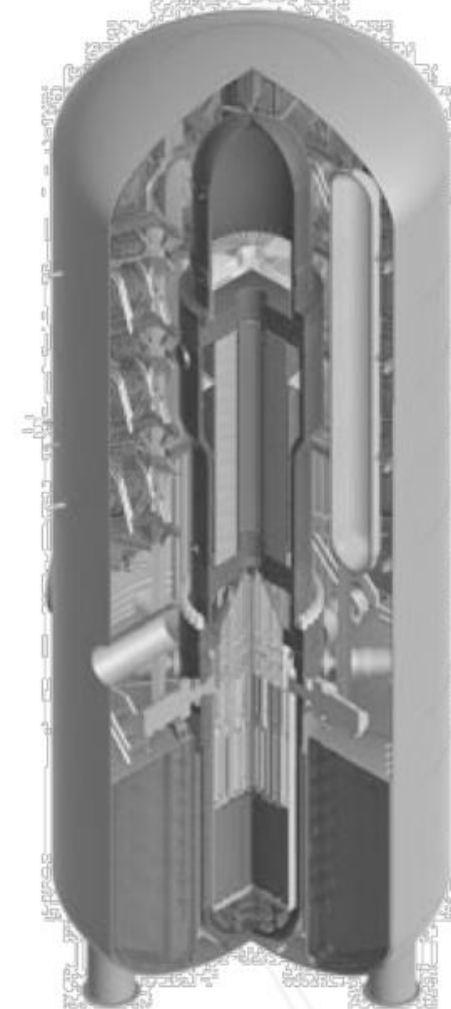


NuScale LWR
160/50 MW

Closest competitor
(400-500 ton)



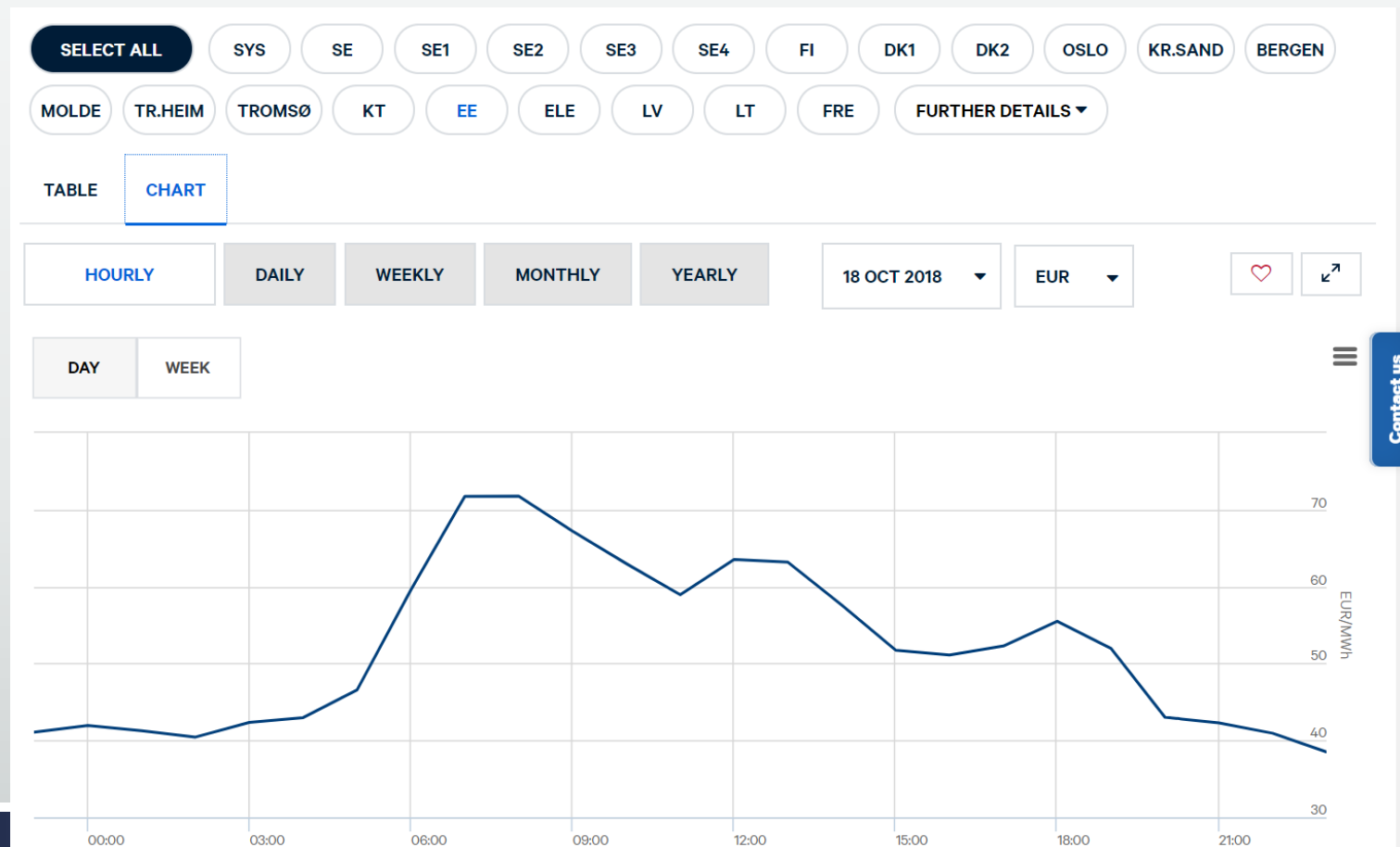
Downscaled IMSR
300/125 MW



Westinghouse LWR SMR
600/225 MW

Salvestuse eelis

- 600C vedelsoola temperatuur ja soojuse salvestus võimalda b 300MWe reaktoril toota ja salvestada sooja soola 24h, kuid sellest toota elektrit 8 tunnil päevast (kõige kallimal ajal).
- 18 oktoober- 12h alla 50€/MWh
- 12 h üle 50 €/MWh
- 8 h üle 60 €/MWh
- „Salvestuse“ hind 5€/MWh



Päikselektri jaama sulasoola termiline salvestus



Mida tuleks Eestis teha?

1. Huvitatud osapooltega arutelu energiajulgeoleku tulevikust ja tuumaenergeetika võimalustest üle Eestis
2. Kiirguskaitseseaduse täiendus? Inseneritehnilise rajatise loa peaks andma TJA, mitte Keskkonnaamet
3. Regulaatiivne võimekus (rajamisluba, opereerimisluba, järelevalve)
4. Asukoha valik
5. Kompetentside arendamine (stipendiumid)