

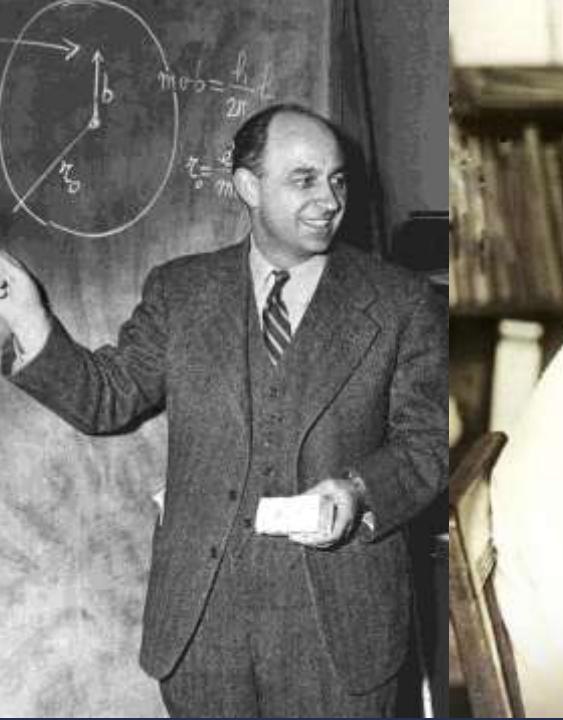
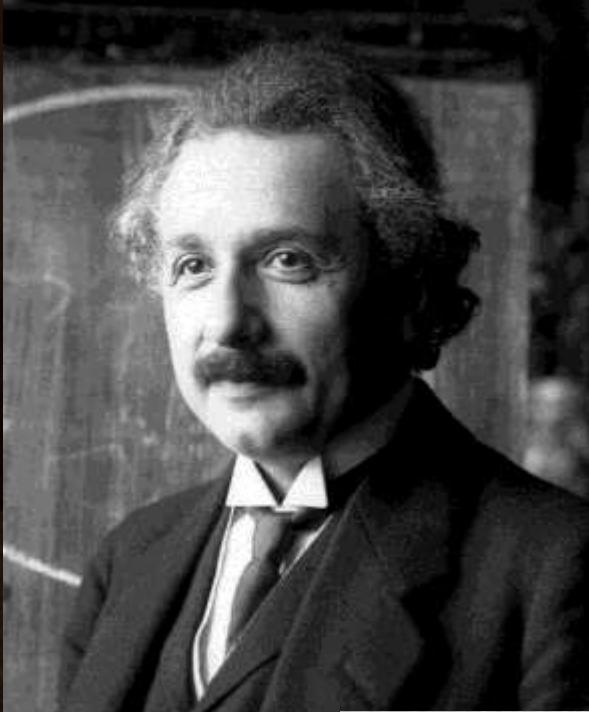


# Eesti elektri varustuskindluse tagamine väikese moodulreaktoriga

Kalev Kallemets | MTÜ Eesti Tuumajaam

# Sisukord

- Tuumaenergeetika alused
- 20. sajandi tuumaenergia
- Sulasool põhiomadused (termilised, kiired)
- Sulasoolreaktorite uurimise ajalugu
- Arendatavad reaktoritübi (TerraPower, Elysium, ThorCon, Terrestia Energy, Moltex)
- Mida teha, et saaks Eestis enne 2030 alustada rajamist?



# 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  $2,56 \times 10^{21}$  aatomituuma
3. 1 grammist saab  $2,56 \times 10^{21} \times 200 = 5,12 \times 10^{23}$  MeV =  $8,2 \times 10^{10}$  J = 0,95 MW ööpäevas
4. Kaasaegsete veereaktorite burnup 60 GWd/tU. Kiirete neutronitega vedlesoolreaktori „burnup“ 500 GW d/t. Kütusena pooldub 60% poolduvast kütusest (kas U<sub>235</sub> või Pu<sub>239</sub>) vörreldes vaid 5% surveveereaktorites.
5. Veereaktorite kasutatud kütuses on peamiseks probleemiks pika radioaktiivsusega (N sajandit) **aktiniidid** (ameriitsium, küürium, neptuonium), mis moodustavad vaid 3% kasutatud kütuse massist annab 95% radioaktiivsusest.

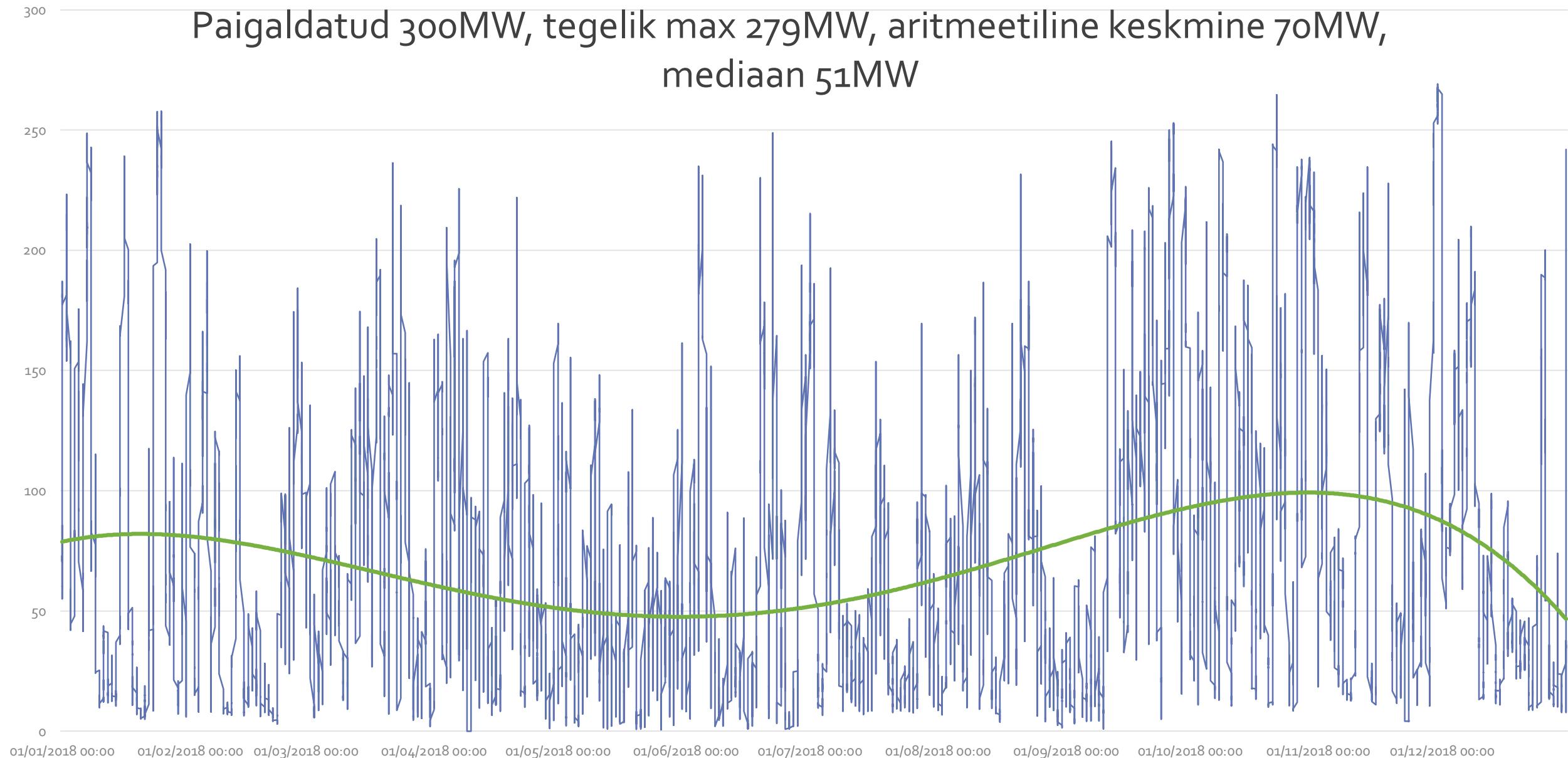
Allikad: A.Paist; R. Kruus. Tuumareaktorid. TTÜ 2011; <http://www.radioactivity.eu.com> ; Bob Weintraub. *Lise Meitner (1878–1968): Protactinium, Fission, and Meitnerium*. Retrieved on June 8, 2009.

## MIS ON EESTI ELEKTRIVARUSTUSE TULEVIK?

- 2018 CO<sub>2</sub> hind 18,5€/t; 2020+ ca 30-40€/t
- Narvas 2019. suletakse 600MWe võimsust; 2030 veel 800MWe
- NordPool 2018 **keskmise elektri hind 45,8€/MWh. Tipud 60€/MWh**
- 2017- 2018 rajati Eestis 3 uut tuulikut. Puiduga koostootmise potentsiaal täidetud. 2030 50% taastuvenergia ebareaalne.
- 2021 Norrast valmib **KOLM** 1400MW ühendust UK, Saksaga. Rootist 600MW
- 2021-2023 Saksamaa sulgeb 8 tuumajaama, Roots 2 reaktorit (1730MW) suletakse 2019-2020.
- 2025 ei rajata ühegi Vene või Valgevene lahtiühendatavale ühendusele konverterit.
- 2030 elektri hind päeva tippudes ca 70-80€/MWh, keskmise 60-70

# Tuuleenergia 2018 aasta tunnipõhine toodang

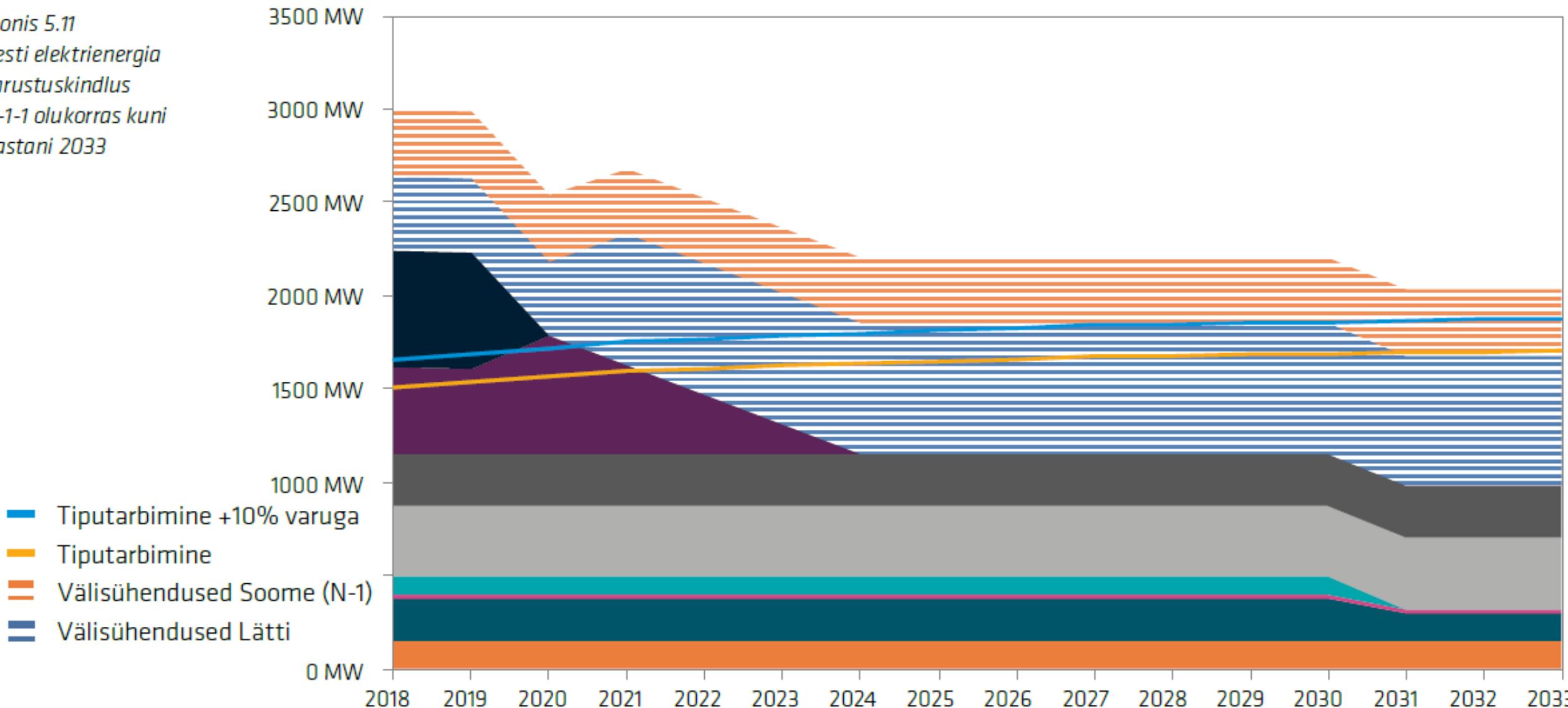
Paigaldatud 300MW, tegelik max 279MW, aritmeetiline keskmise 70MW,  
mediaan 51MW



# Mis on pildil valesti? Varustuskindlusega

Joonis 5.11

Eesti elektrienergia  
varustuskindlus  
N-1-1 olukorras kuni  
aastani 2033



# FINLAND'S INTEGRATED NATIONAL ENERGY AND CLIMATE PLAN

Draft version submitted to the European Commission  
20 December 2018

*Table 12. Projection of demand, generation capacity and interconnector capacity in peak load situations [MW].<sup>30</sup>*

	2020	2030	2040
<b>Peak demand</b>	15,300	16,200	17,000
<b>Generation capacity *</b>	13,680	13,920	12,960
<b>Deficit</b>	1,620	2,280	4,040
<b>Interconnector capacity</b>	4,850	6,050	6,050

*\*including strategic reserves in 2020, wind power equalling 6% of installed capacity, PV capacity not included*

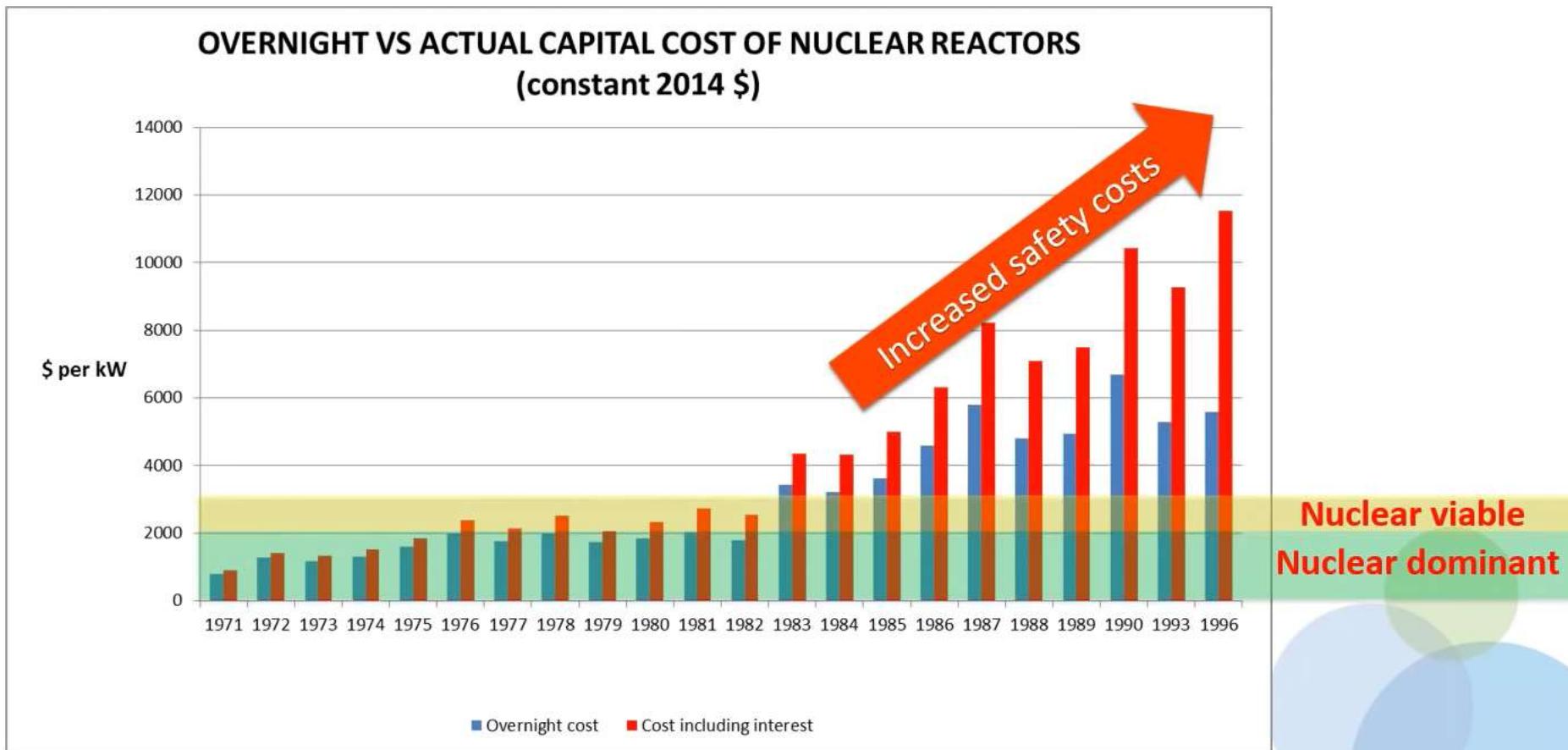
## Sweden's draft integrated national energy and climate plan

„The production of wind power will increase to 2040. In 2040, wind power production is over 50 TWh compared to 19 TWh in 2020. In 2030, solar power is also increasing and in 2040 it is almost 5 TWh in the energy system. An electricity system with a large share of variable electricity, such as wind and solar power, will bring several challenges in terms of power control. Without any other power source that replaces nuclear power, there is an increased risk of power failure situations occurring more often in the future.“

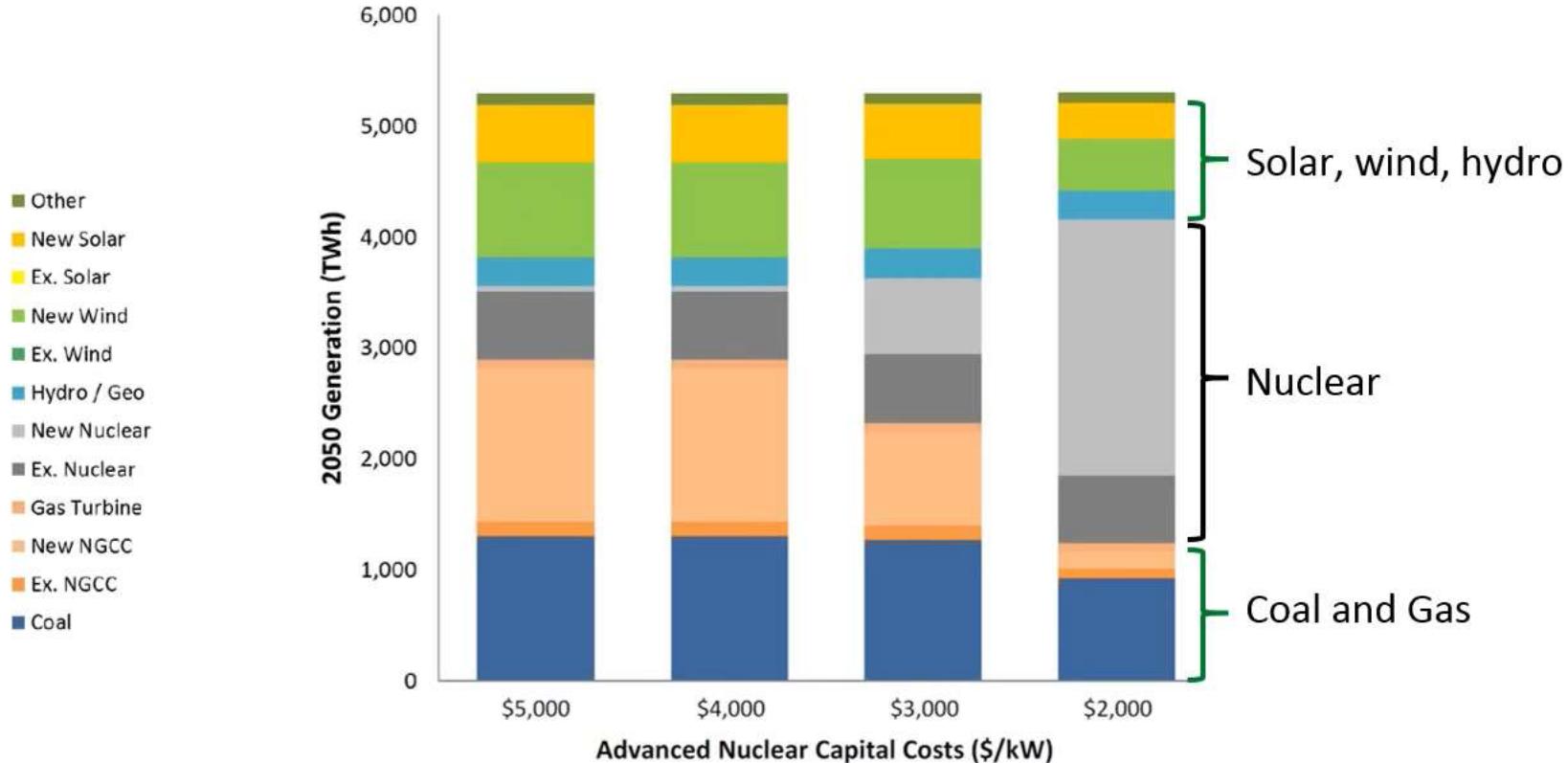
# Miks suured, veejahutusega tuumajaamad **ei ole tulevik**

- 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 (iod, tseesium)
- Vee ja tsirkooni kõrgtemperatuurne reaktsioon -> vesinik. Fukushimas toimus vesinikplahvatus.

# Nuclear Energy is too Expensive



# The importance of capital cost



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

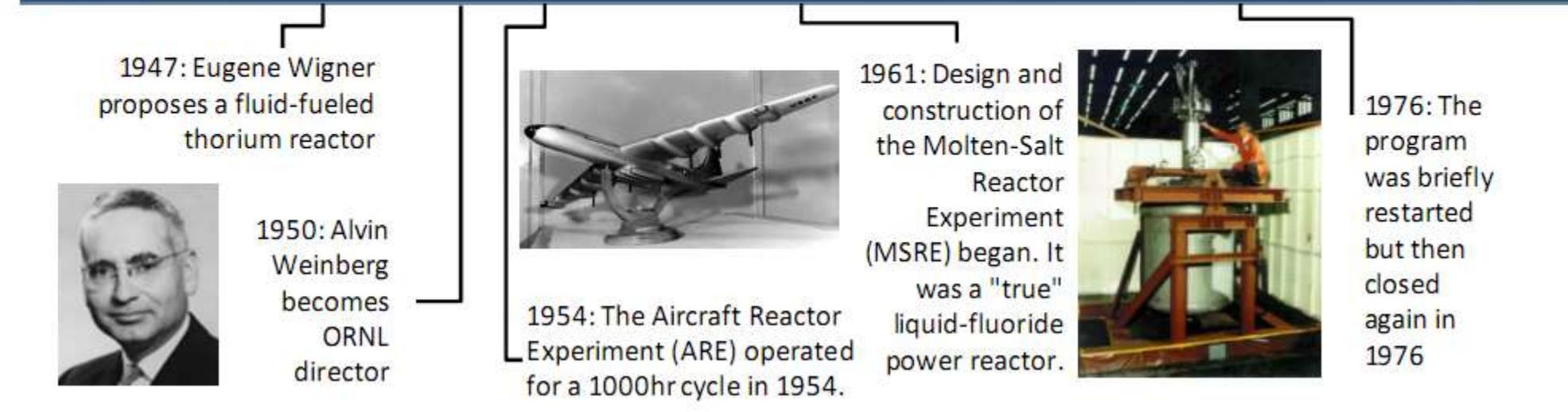
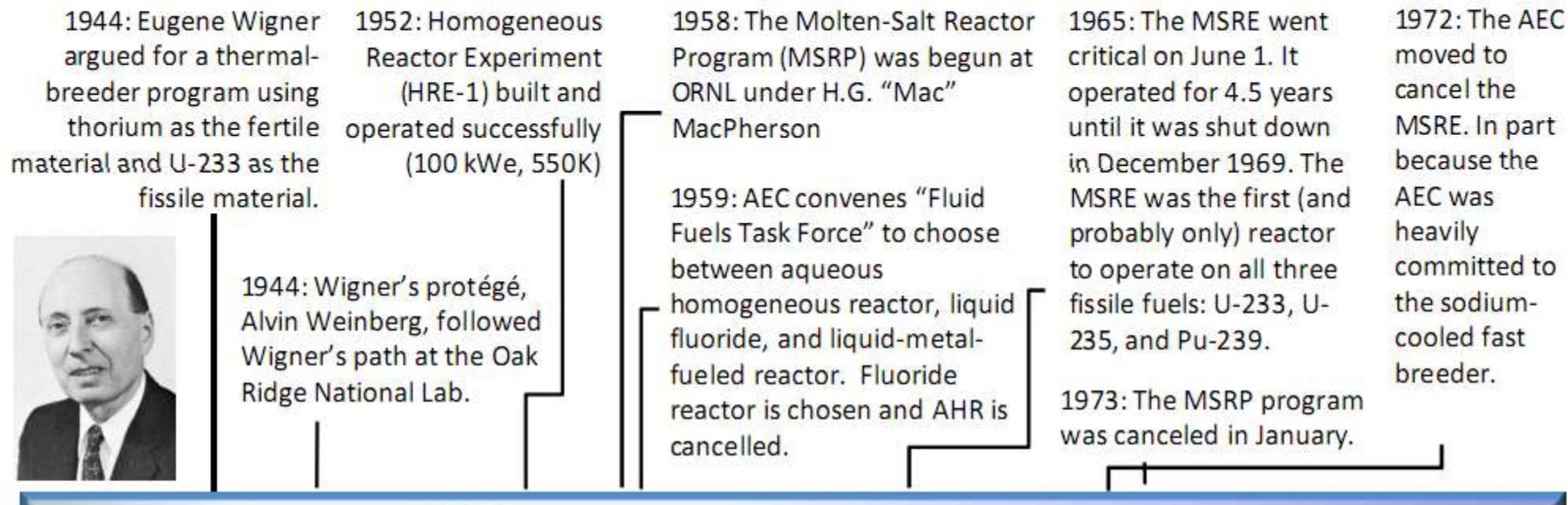
# Sulasoolade eelised

- Passiivne ohutus (MSR katseliselt tõestatud)
- Ei ole rõhu all – midagi ei saa plahvatada ; seiskamata kütusevahetus
- Ei eraldu kütusest kõrgradioaktiivseid gaase
- Võimalus kasutada kasutatud kütust, tooriumi, lihtsam kütusetootmine, kordi efektiivsem kütusekasutus (vähem jäätmeid)
- Lihtne ja ohutu tähendab **odav**.

## Probleemid:

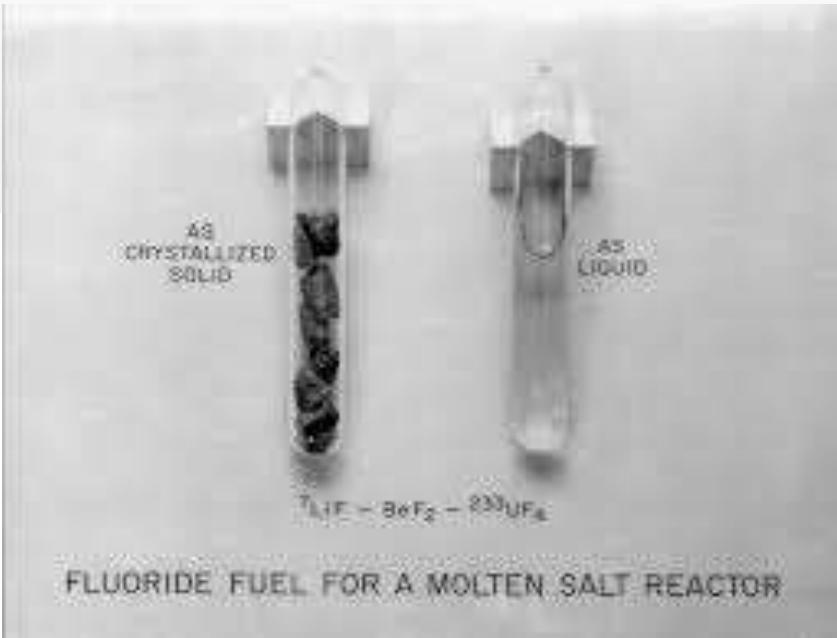
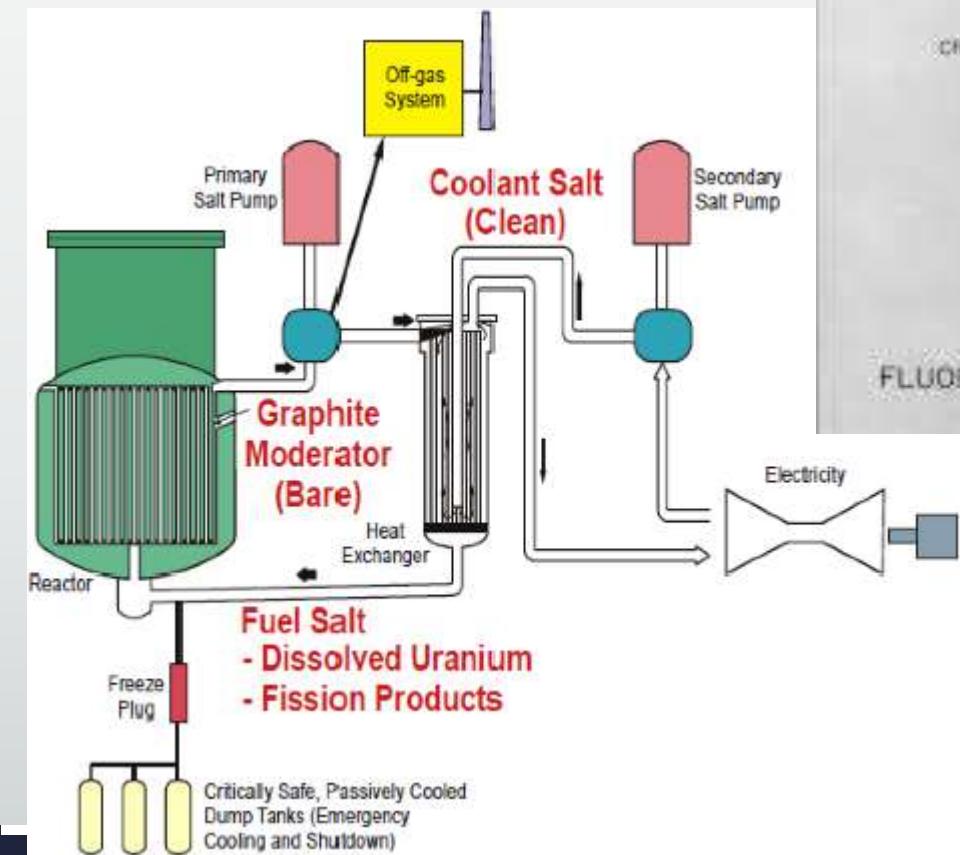
- Kütusesoola voolamise korral n-korrosioon/creep, hilinenud neutronid, uus modelleerimine, moderaatori kulumine, litsentseerimine.
- Kütuse voolamisel kõrgradioaktiivne lekkerisk.
- Online kütuse keemiline puhastamine
- Senised suurettevõtted, personal, regulaator harjunud veereaktoritega.

# History of the Molten Salt Reactor

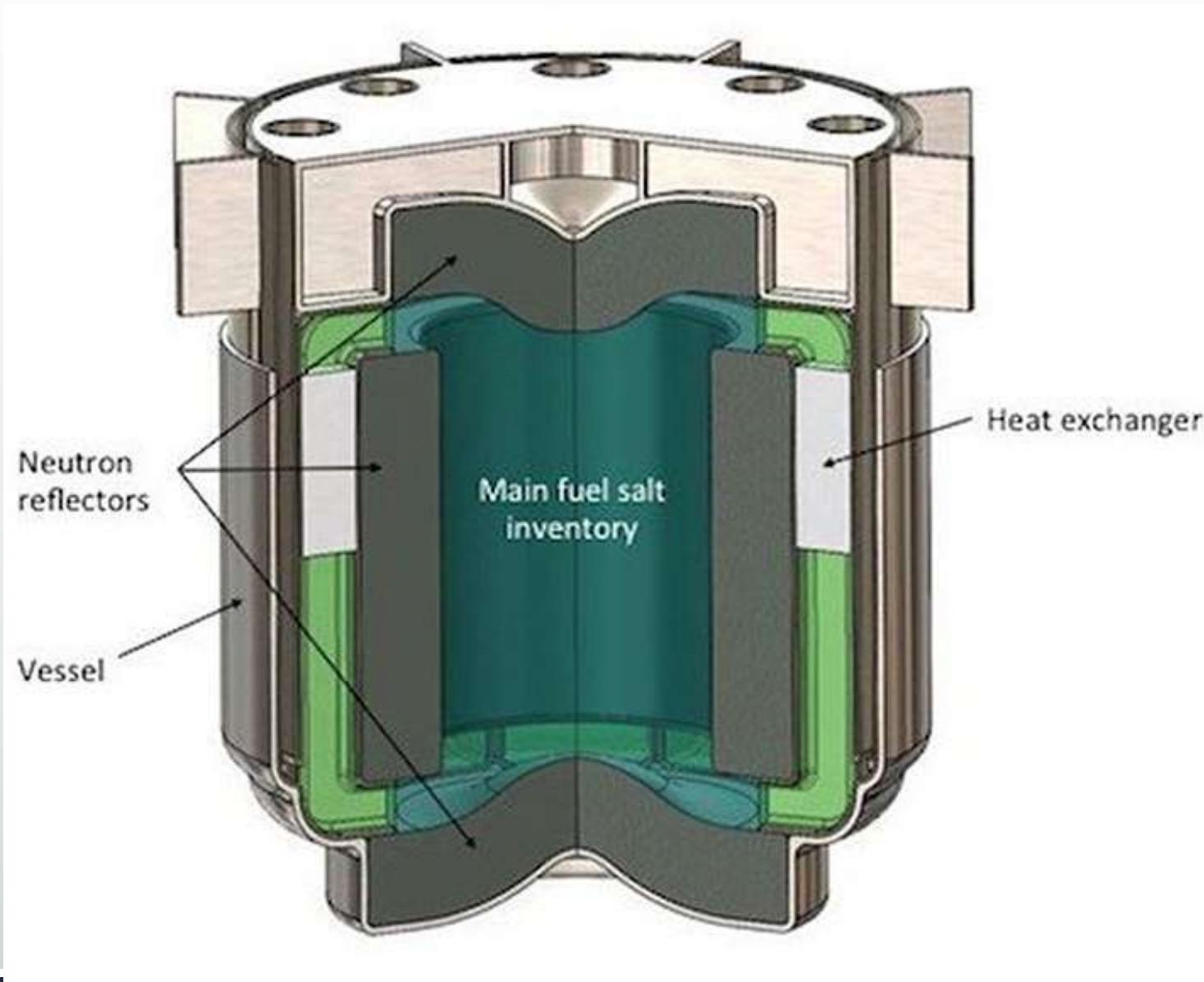


Denatured Molten Salt Reactor (DMSR) in the early 1980s

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



# Terra Power MSCR



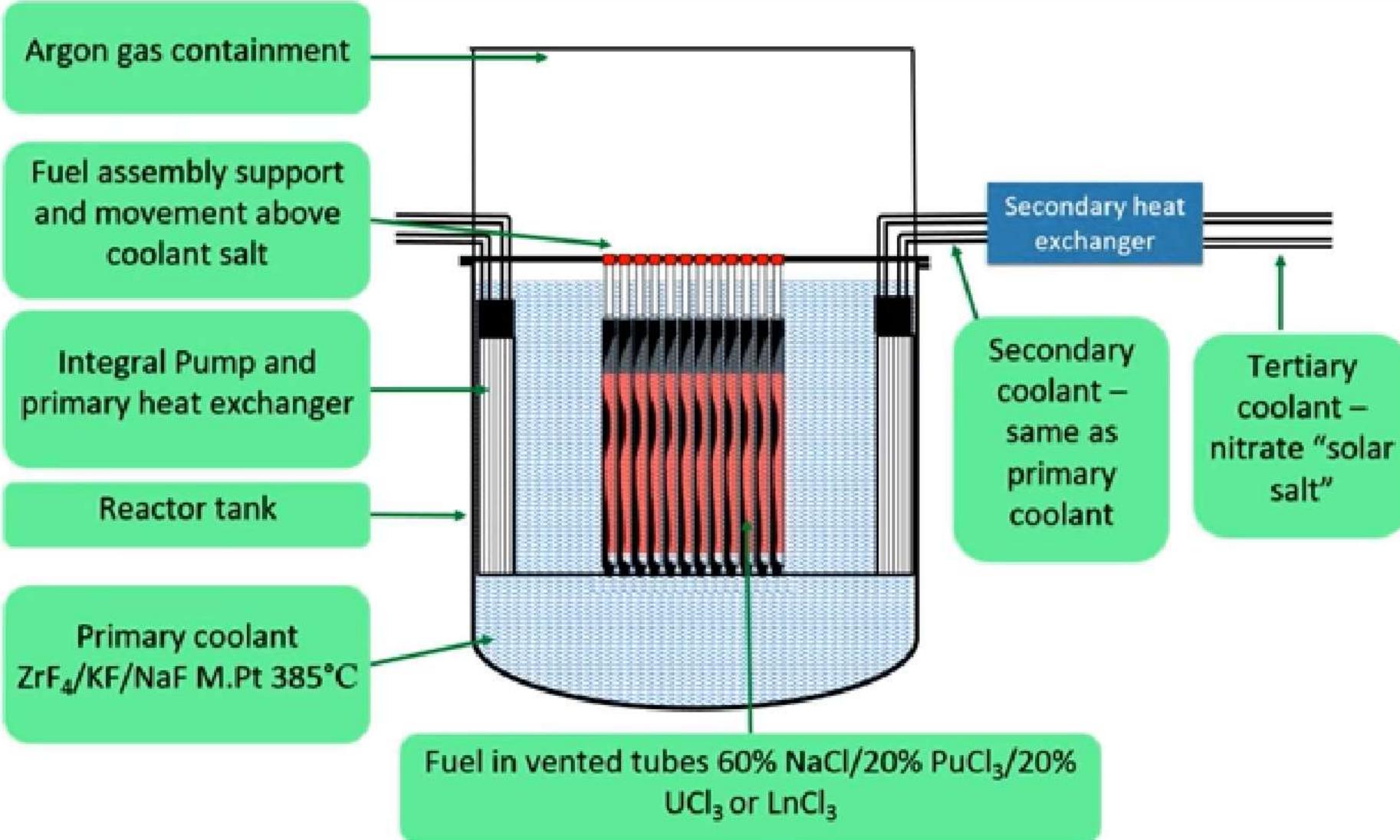
## Terra Power MSCR

- The U.S. Department of Energy already invested more than \$28 million in cost-shared funds for the project to further identify and test materials used in the reactor.
- testing in a \$20 million test loop facility starting in 2019.
- 1,100-megawatt prototype reactor by 2030.
- design uses liquid chloride salts as a coolant and fuel that flow through the reactor core—allowing the fission to directly heat the salts.

## Moltex Energy (UK)

- Kiirete neutronite reaktor
- Kasutab kütusena kas kasutatud kütust, uraani või tooriumi
- Burnup 500GW/d
- Vedelkütus ei ole voolav kontuuris vaid kütusevarrastes
- Puudub reaktori seiskamine kütusevahetuseks
- Litsenseerimisel Kanadas. Ehitus planeeritud 2024

# Basic design cartoon of the Stable Salt Reactor – Wasteburner



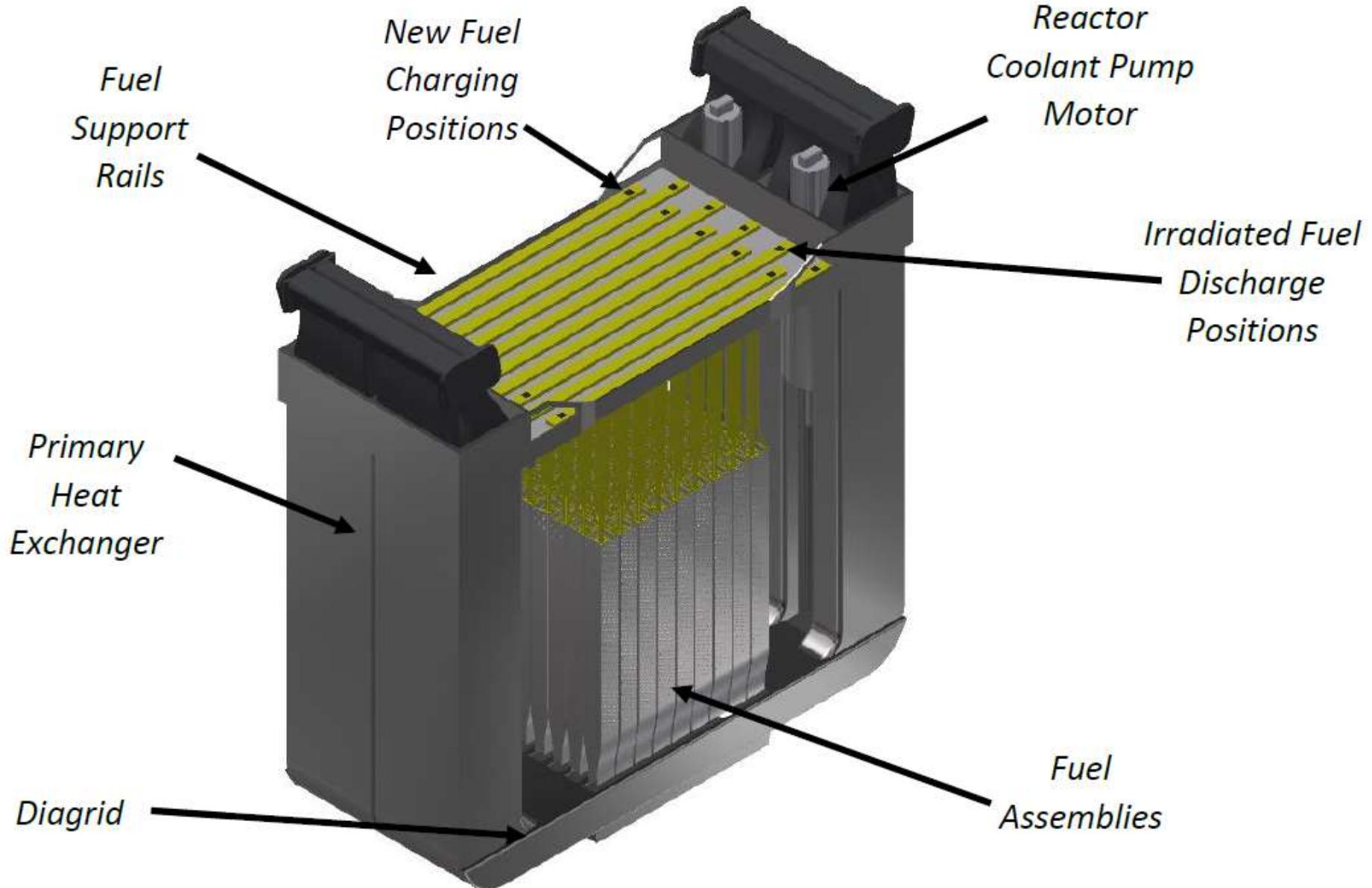
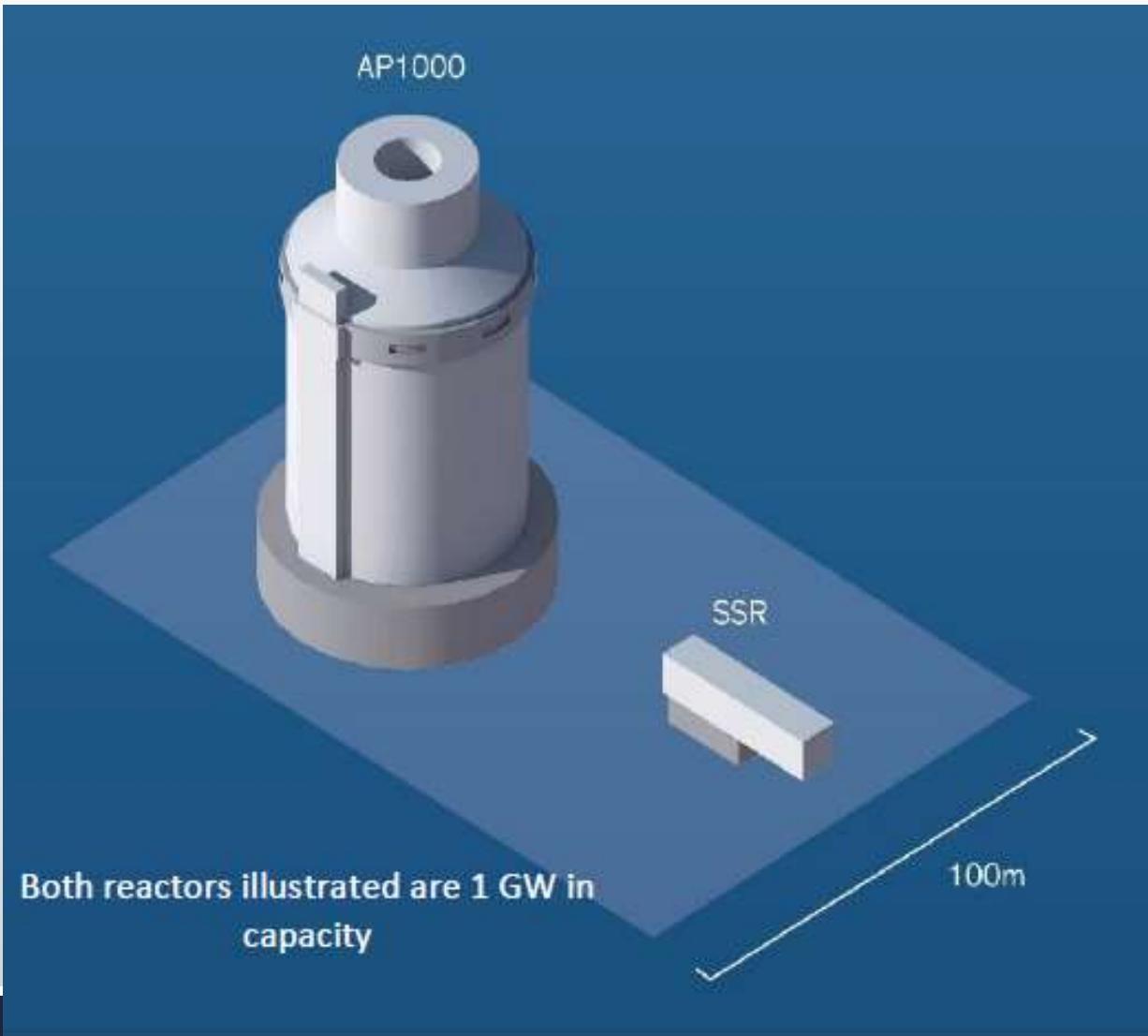


Figure 6: Overview of Stable Salt Reactor Core Module

# Suurus loeb. Väiksem on odavam



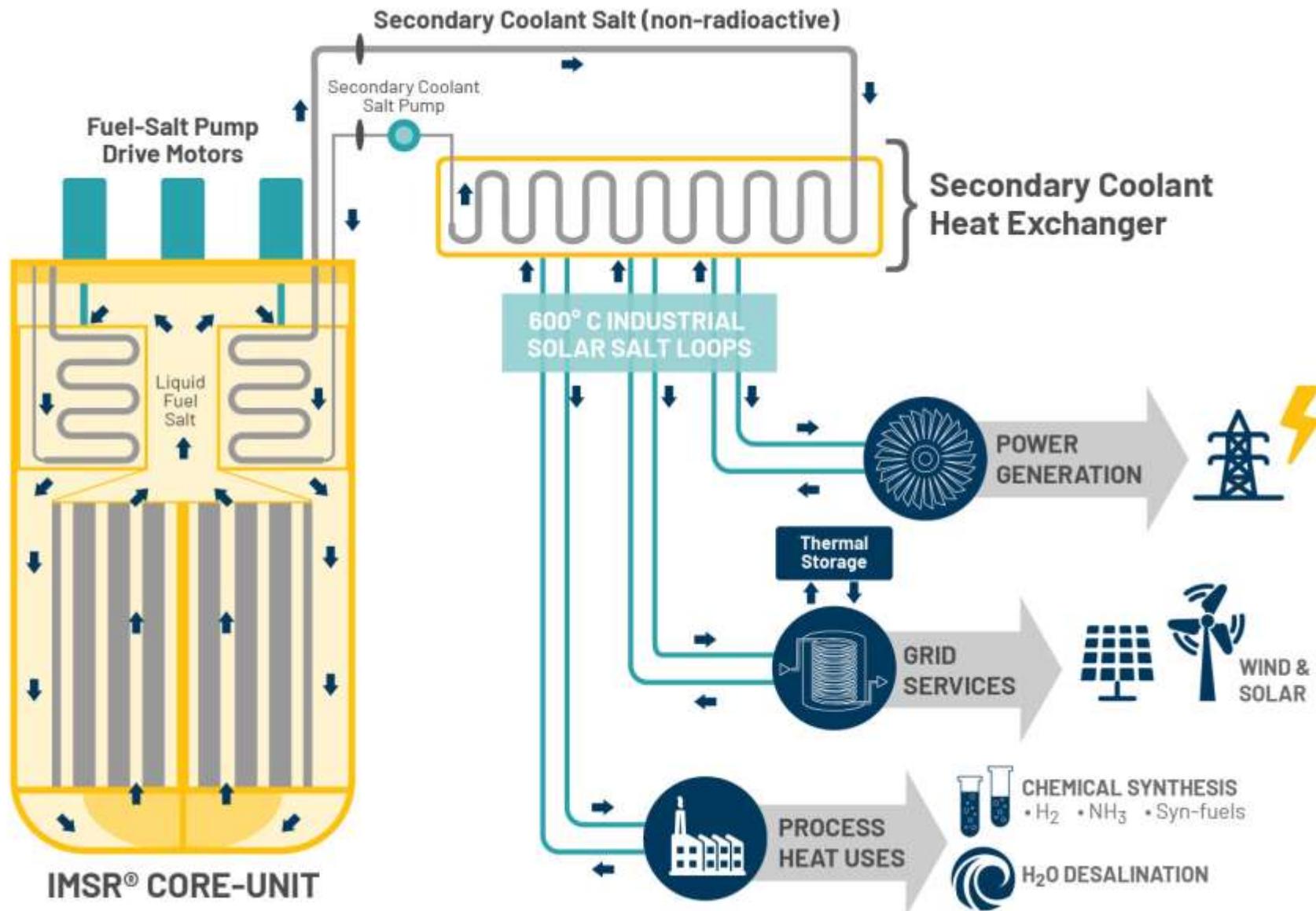
NuScale Module  
50MWe **700t\*, 415m<sup>3</sup>**

\*ref: [www.nuscalepower.com](http://www.nuscalepower.com)

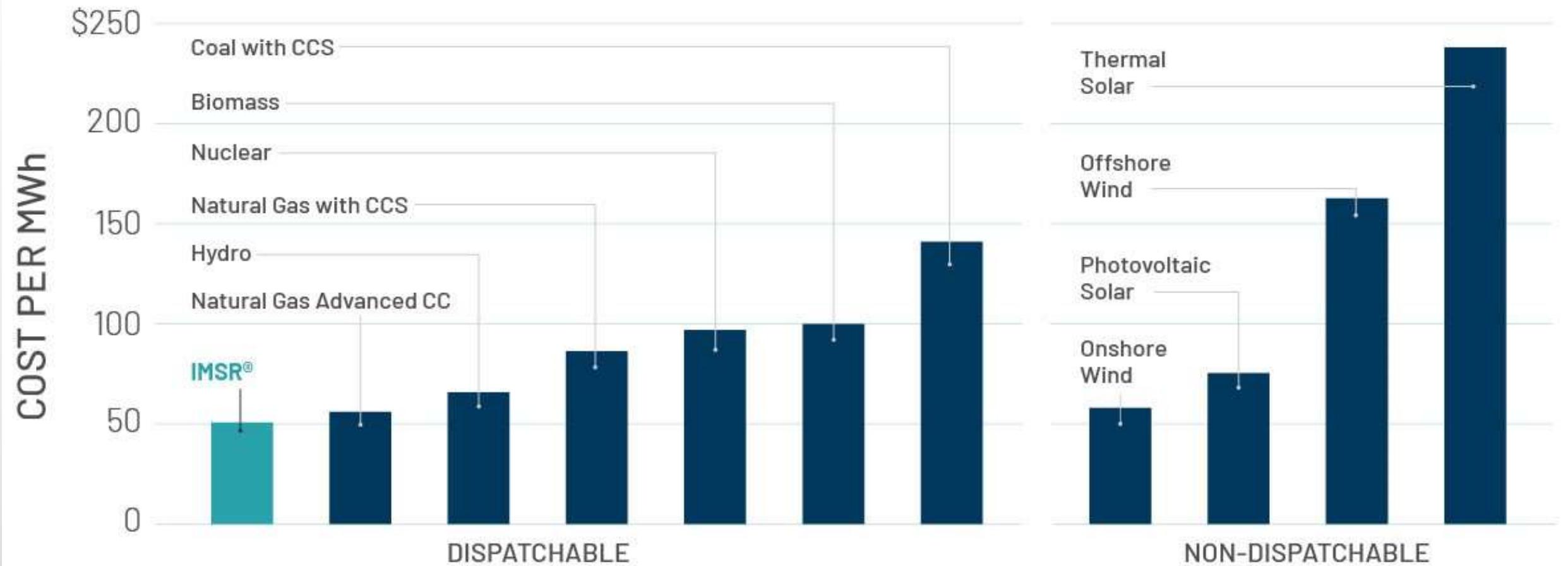


Moltex SSR Module  
150MWe **18t, 50m<sup>3</sup>**

# Terrestrial Energy (Kanada) 200MW ISMR



# TOTAL SYSTEM COST





## Terrestrial Energy – ISMR 400

- 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

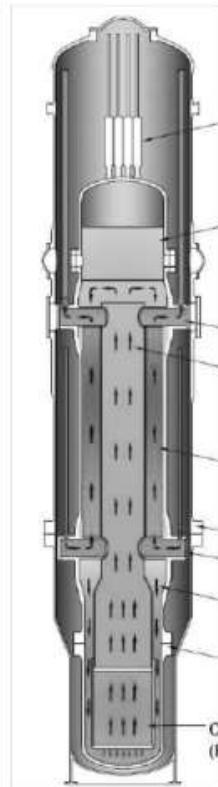
# Proprietary ultra compact design

250 MWth,  
in a 20' container,  
50 ton, 35 m<sup>3</sup>



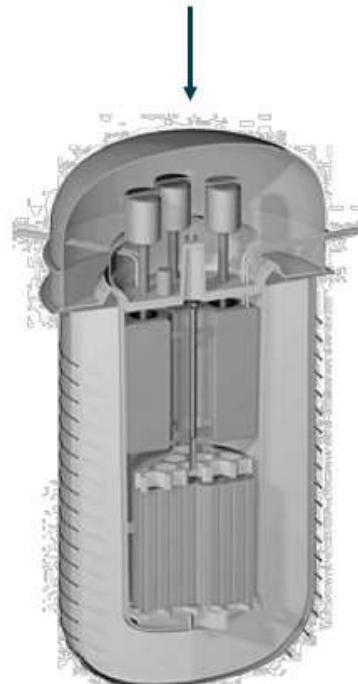
Seaborg CMSR  
250/100 MW

2,7m x 20m  
Without pumps

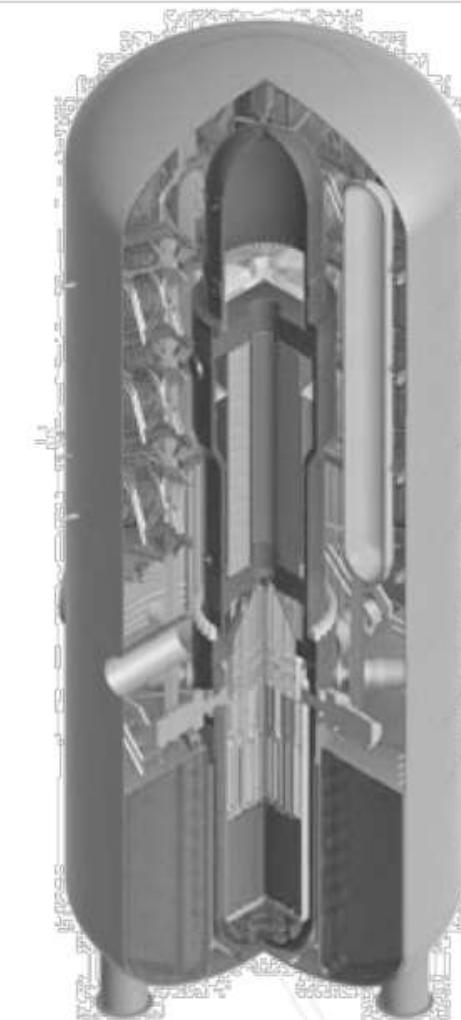


NuScale LWR  
160/50 MW

Closest competitor  
(400-500 ton)



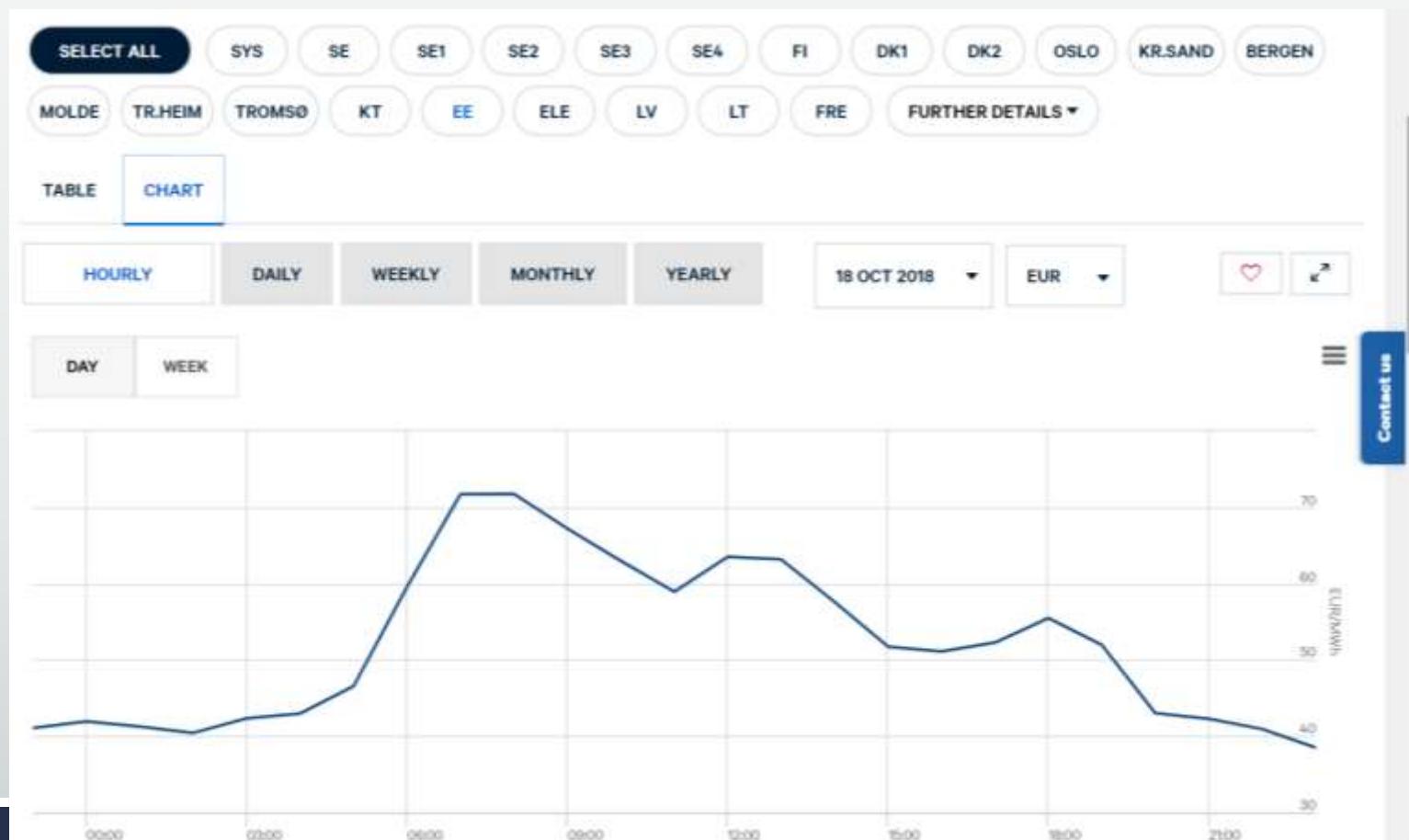
Downscaled IMSR  
300/125 MW



Westinghouse LWR SMR  
600/225 MW

# Salvestuse eelis

- 600C sulalsoola 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



- Commercially deployed molten salt heat store



# Mida tuleks Eestis teha?

1. Sisukas arutelu energiajulgeoleku/kliimapoliitika valikutest. Riiklik positsioon, kas SMR sobiks
2. Kompetentside arendamine – uuringud, stipendiumid, koostöö partneritega
3. Asukoha valik
4. Kiirguskaitseseaduse täiendus
5. Regulatiivne võimekus (rajamisluba, opereerimisluba, järelevalve)