NTNU

Kunnskap for en bedre verden

Moderne reaktorteknologi

som maritim kraftkilde

27.mai 2020

Håvard Vollset Lien, NTNU

NTNU

Kunnskap for en bedre verden

Kraftkilder – historisk sett

Går vi litt tilbake i tid, hadde vi i all hovedsak to energikilder for fremdrift av skip:

1. Olje - tungolje for store skip og dieselolje for de mindre skipene. Så og si alle sivile skip brukte olje som drivstoff.

2. Trykkvannsreaktorer (Pressurized Water Reactors - PWR) med uran som brensel. Brukt til større marinefartøy, strategiske ubåter, og de største isbryterne.

   - ✓ Marinefartøyer bruker HEU (High Enriched Uranium) som brennstoff, for å unngå refuelling.
   - ✓ Sivile kraftstasjoner bruker LEU (Low Enr….), som krever regelmessig utskifting av brenselet.

NTNU

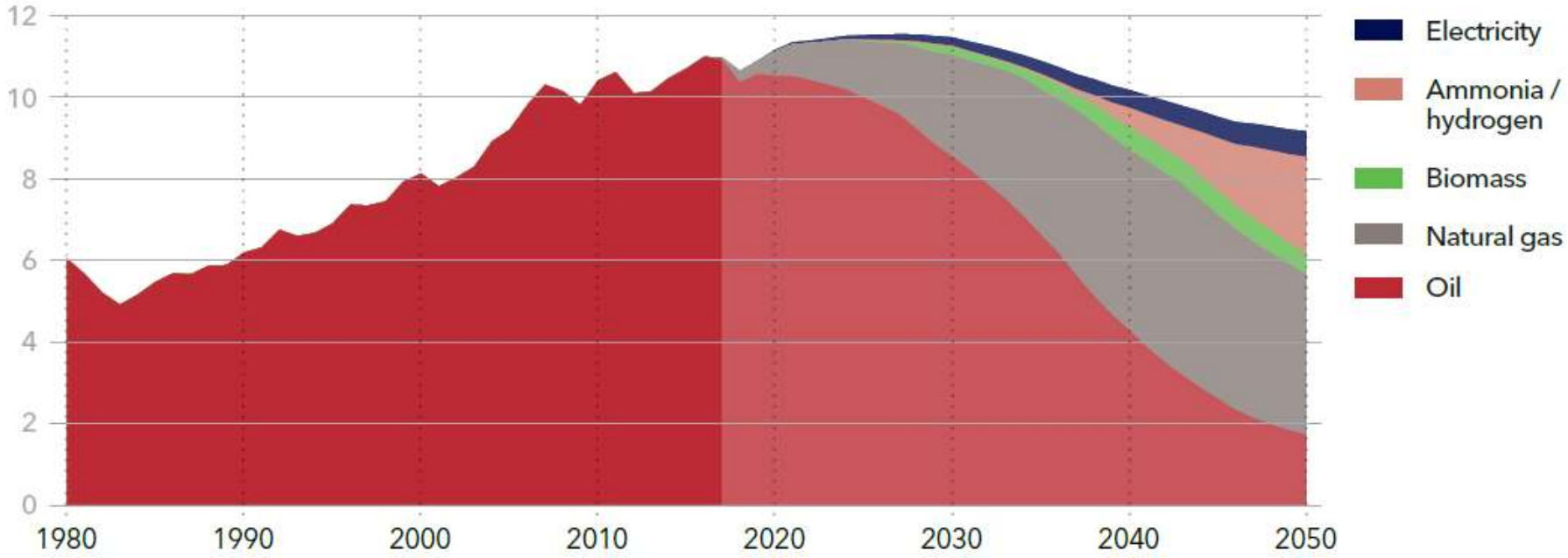
Kunnskap for en bedre verden

DNVGL Energy Transition Outlook 2019

FIGURE 4.1.15

World maritime sub-sector energy demand by carrier

Units: EJ/yr



Natural gas includes LNG and LPG. Biomass includes advanced biodiesel and LBG.
Historical data source: IEA WEB (2018)

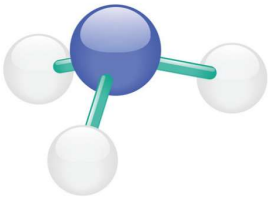
NTNU

Kunnskap for en bedre verden

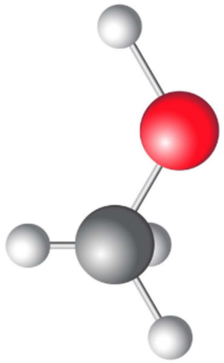
Utfordringen

- ✓ Ingen av de beskrevne løsningene i DNVGL sin fremskriving er utslippsfrie energi<u>kilder</u>.
- ✓ De vil innebære et fremskritt mtp. luftforurensing, men ikke i forhold til global oppvarming og ressursbruk og påvirkning på land (externalities).
- ✓ Ammoniakk, metanol, hydrogen og elektrisitet må produseres, og til det trengs det <u>mye</u> energi.
- ✓ I realiteten flyttes utslippet fra sjø til land, og behovet for ny infrastruktur vil være enormt. Den totale virkningsgraden går betraktelig ned.

NH_3



CH_3OH



H

NTNU

Kunnskap for en bedre verden

Klima & miljø

Siden 1990 har man i stadig økende grad innsett at fossilt brennstoff må fases ut, på grunn av:

- ✓ Utslipp av NO_x, SO_x og PM (Particulate Matter) på grunn av lokal forurensing. Disse kan i dag renses, men systemene for å gjøre dette er omfattende, dyre og kompliserte, og man får biprodukter som må håndteres, spesielt svovel når den vaskes ut av eksosen på motorer som går på tungolje.

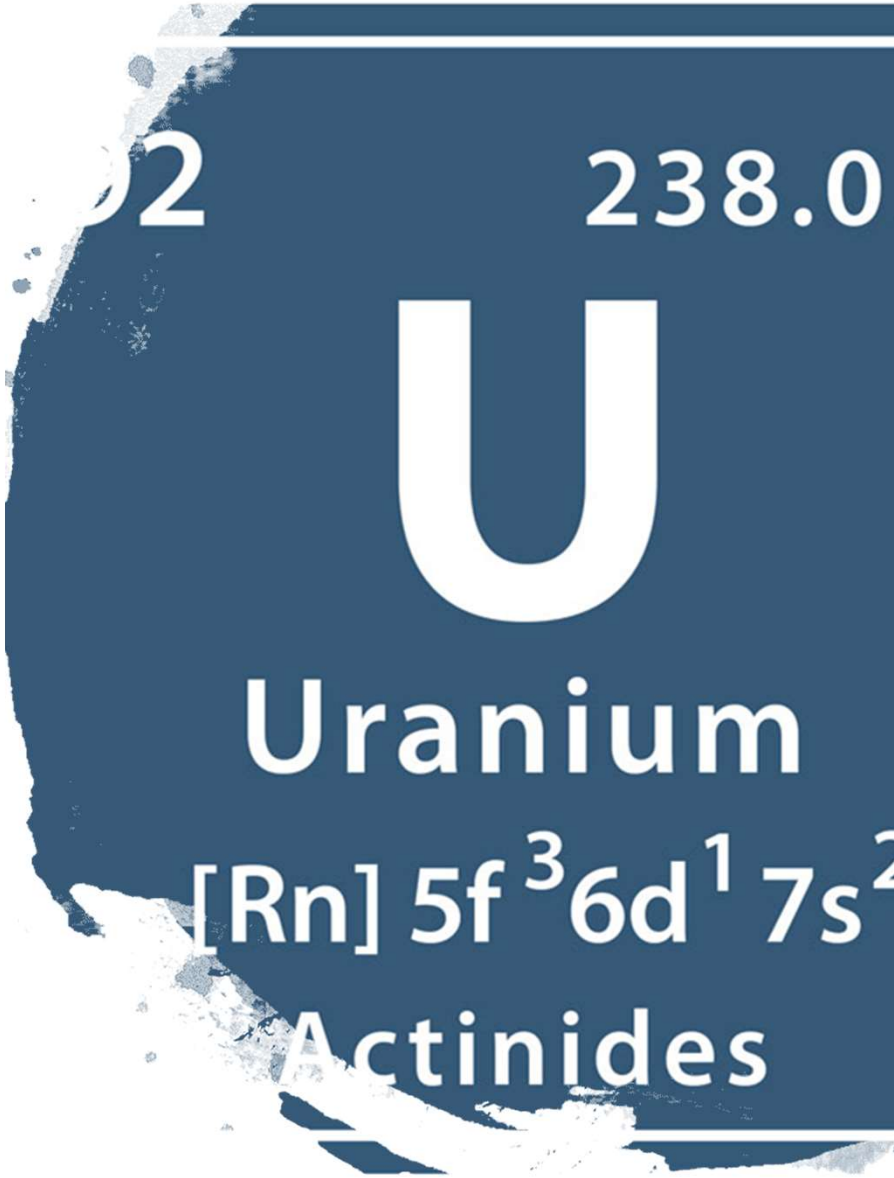
- ✓ Utslipp av CO_2 og CH_4, som fører til global oppvarming og reduksjon av ozonlaget.

NTNU

Kunnskap for en bedre verden

Kjernekraft - PWR

- ✓ Trykkvannsreaktorer (Pressurized Water Reactors – PWR) med uran-235 som brensel er historisk sett en trygg energikilde. Dette er den vanlige reaktortypen brukt i dag i sivile kraftverk på land og til energiproduksjon til sjøs.
- ✓ De tre hendelsene Three Mile Island i 1979, Tsjernobyl i 1986 og Fukushima i 2011 har gitt kjernekraft et omdømmeproblem.
- ✓ Men også objektivt sett har trykkvannsreaktoren flere bakdeler.



NTNU

Kunnskap for en bedre verden

Kjernekraft - PWR

Trykkvannsreaktorens egenskaper :

- ✓ Ressurskrevende å bygge, selv om den er utslippsfri i normal drift.
- ✓ Opererer under høyt trykk (ca. 150 bar), og kan dermed eksplodere om prosessen kommer ut av kontroll.
- ✓ Kjernekraft produserer varme, og dermed er kjølingen kritisk. Mister man kjølingen, produseres hydrogen => stor eksplosjonsfare.
  - ✓ Når ca. 1 % av uranet er «brukt», må de resterende 99 % tas ut og lagres trygt i hundretusenvis av år. Avfallsproblemet er allerede svært utfordrende globalt.
  - ✓ Trykkvannsreaktorer med uran som brensel produserer plutonium => produksjon av atomvåpen.

NTNU

Kunnskap for en bedre verden

Kjernekraft - MSR

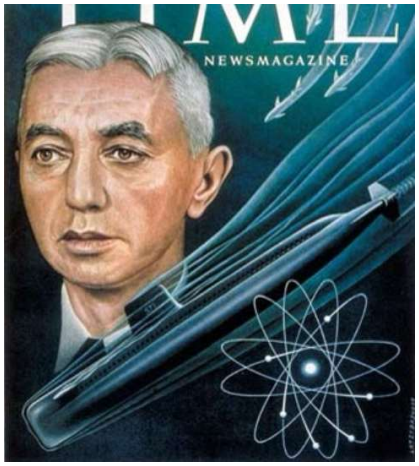
- ✓ Et glimrende alternativ til trykkvannsreaktoren er saltsmeltereaktoren – The Molten Salt Reactor – MSR.
- ✓ Den kan drives med både thorium og uran som drivstoff, og har nesten ingen av utfordringene som trykkvannsreaktoren har.
- ✓ Mer presist så dannes isotopen uran-233 fra thorium, og det er denne isotopen som reagerer i reaktoren og danner varme.
- ✓ MSR kan også gå på uran-235, som er en isotop av uran-238, altså samme brensel som trykkvannsreaktorene bruker i dag.

NTNU

Kunnskap for en bedre verden

Kjernekraft - MSR

- ✓ Saltsmeltereaktoren ble utviklet i USA omtrent parallelt med trykkvannsreaktoren i 1940- og 50-årene.
- ✓ Trykkvannsreaktoren ble da valgt fordi den hadde et forsprang i tid, samt potensiale til å produsere plutonium til atomvåpen. Det hastet for US Navy å få sjøsatt en strategisk atomubåt-flåte.
- ✓ Videre forskning på saltsmeltereaktorer ble drevet helt frem til 1976, da tilskuddene ble fjernet. Dette på tross av positive resultater.
  - ✓ Saltsmeltereaktoren er m.a.o. ikke et nytt konsept, men teknologien har blitt videreutviklet etter årtusenskiftet.



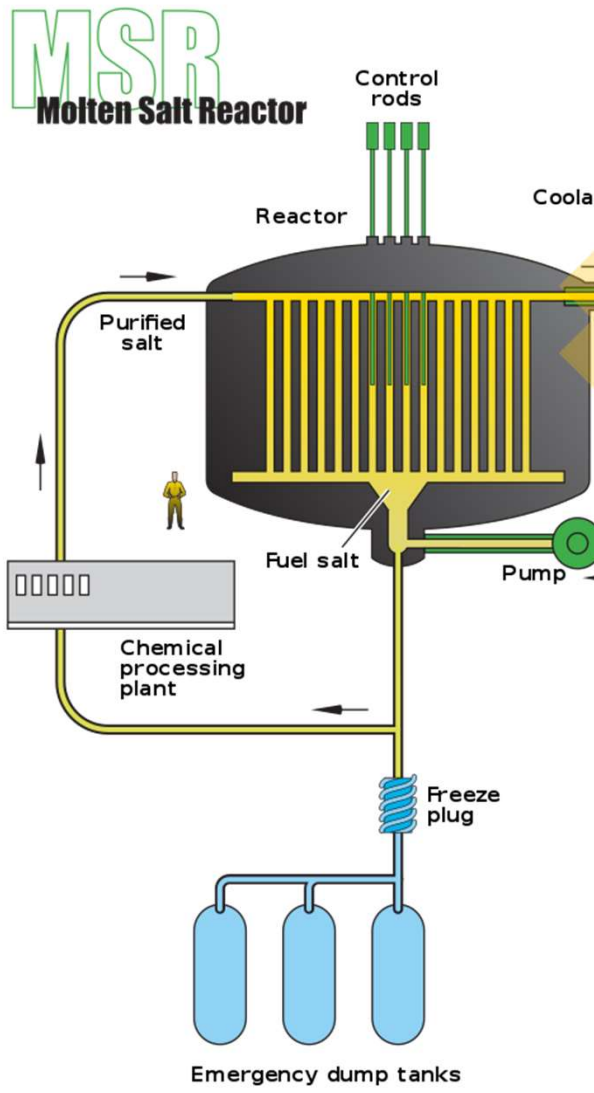
NTNU

Kunnskap for en bedre verden

Kjernekraft - MSR

Saltsmeltereaktorens fordeler:

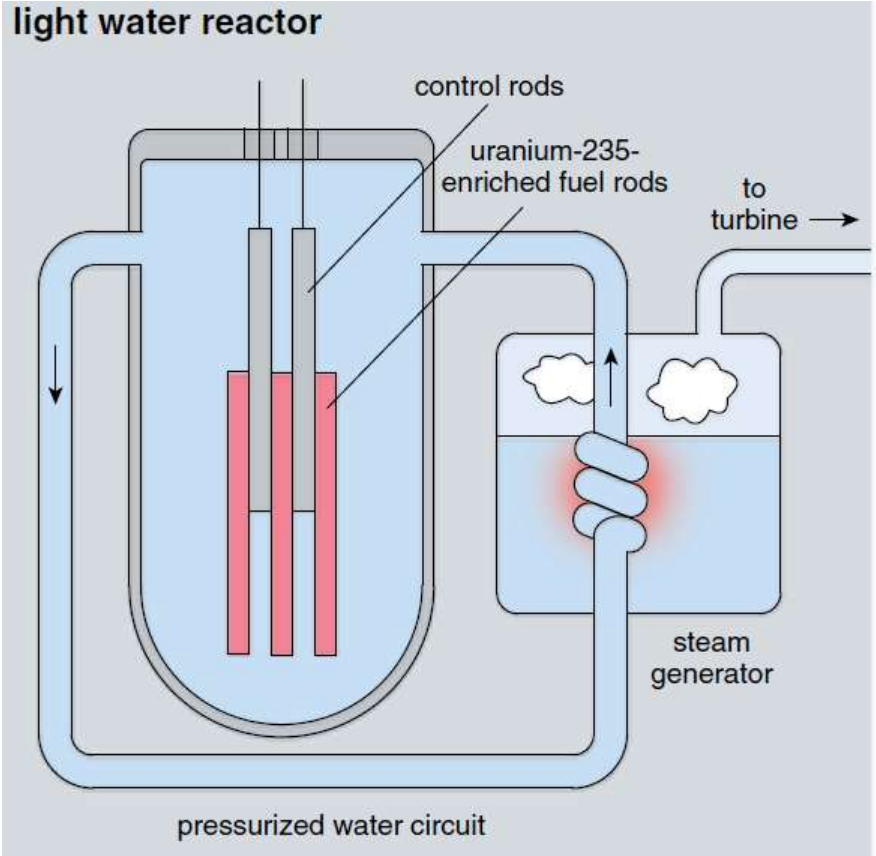
- ✓ Opererer under atmosfærisk trykk, og har dermed ingen eksplosjonsfare. Brenselet flyter i saltsmelten og er dermed en del av kjøleprosessen.
- ✓ Brenselet forbrennes så å si fullstendig (99 %), slik at avfallsproblemet er minimalt sammenlignet med trykkvannsreaktorer.
- ✓ En MSR kan også forbrenne atomavfall fra trykkvannsreaktorer, og til og med utdaterte atomvåpen.
  - ✓ Fisjonsprosessen produserer så å si ikke noe plutonium, og dermed er teknologien også relativt trygg ift. misbruk til produksjon av atomvåpen.

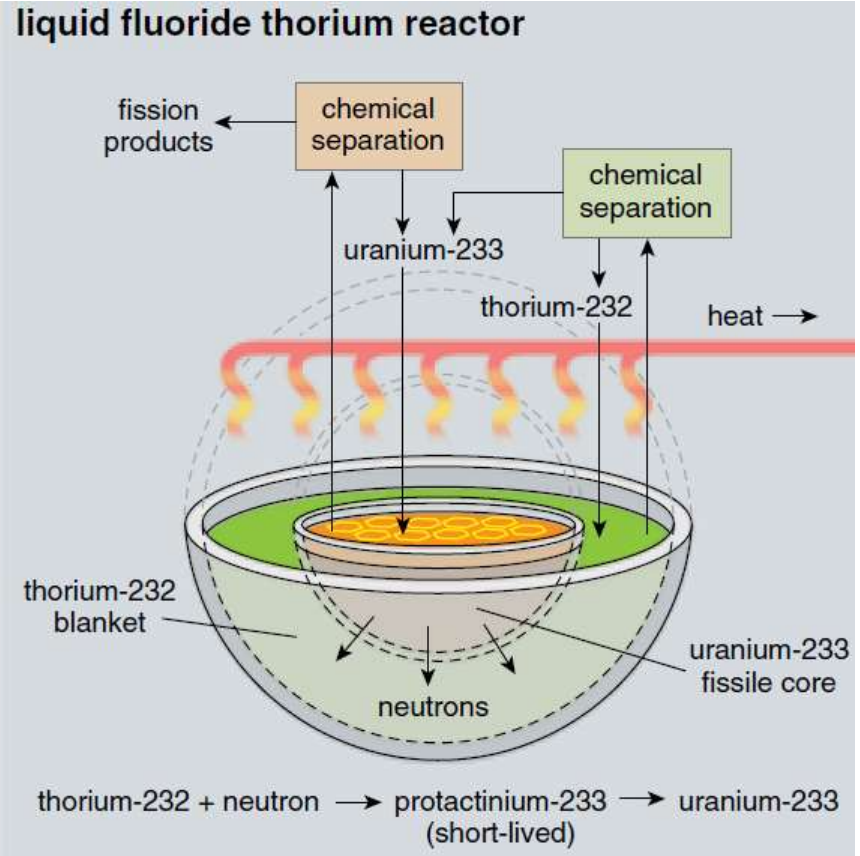


NTNU

Kunnskap for en bedre verden

Kjernekraft – PWR vs. MSR

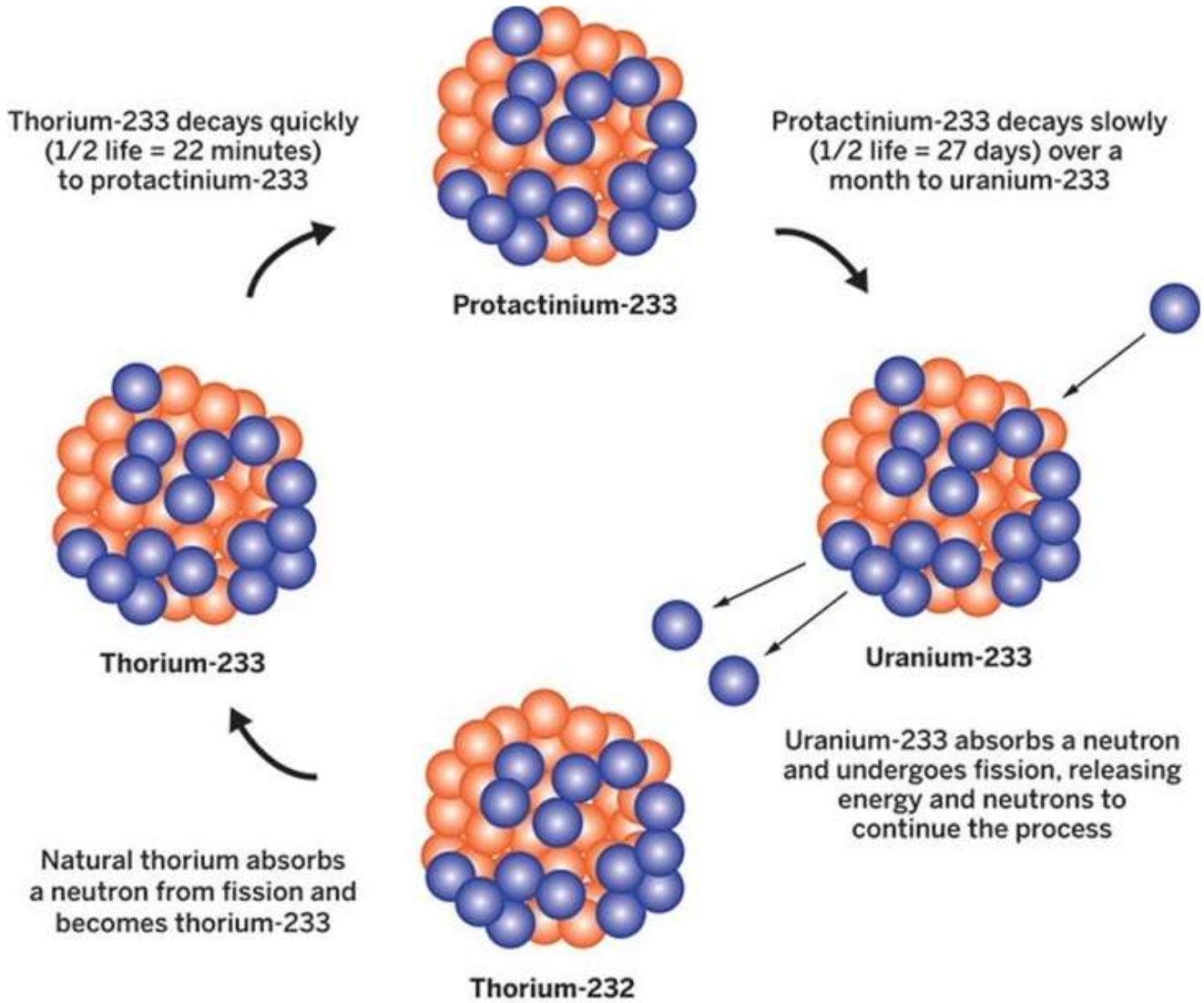


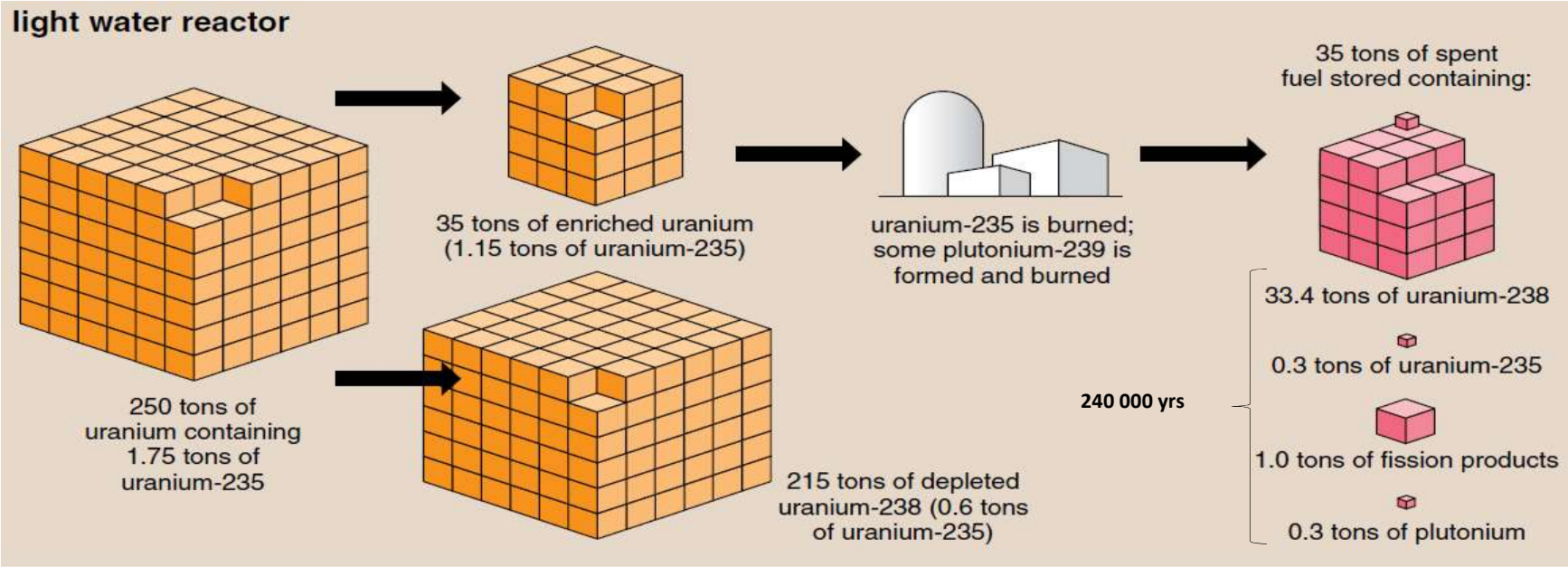


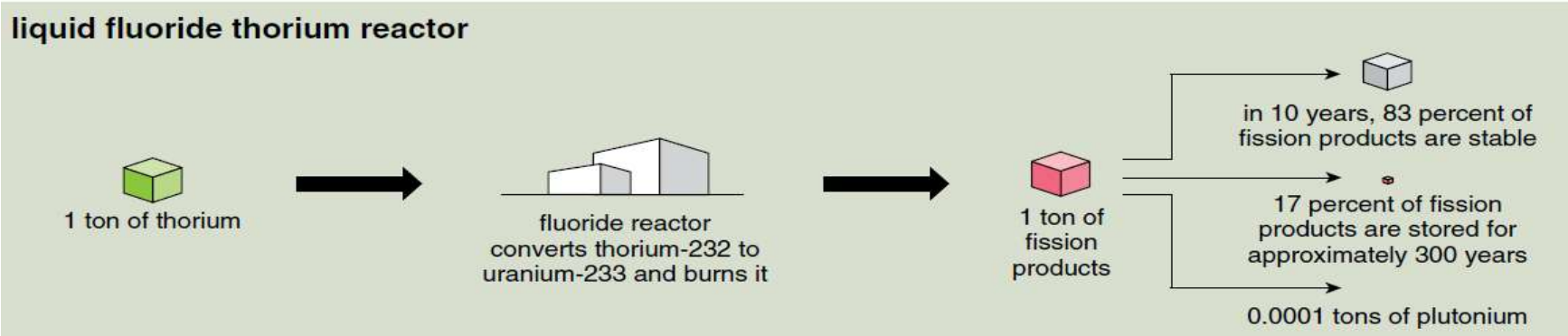
NTNU

Kunnskap for en bedre verden

Omgjøring fra Th-232 til U-233

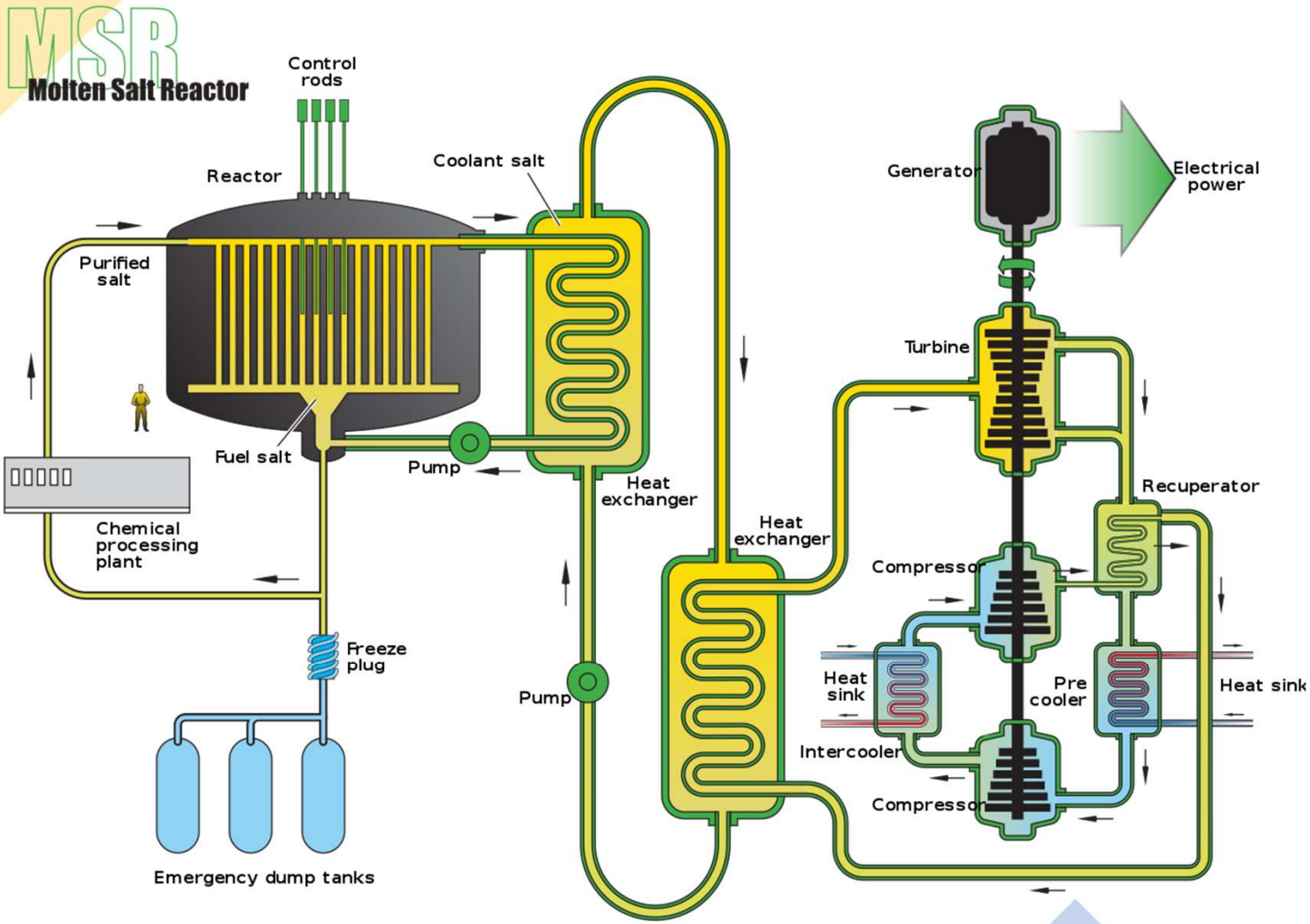



light water reactor
250 tons of uranium containing 1.75 tons of uranium-235
35 tons of enriched uranium (1.15 tons of uranium-235)
215 tons of depleted uranium-238 (0.6 tons of uranium-235)
uranium-235 is burned; some plutonium-239 is formed and burned
240 000 yrs
35 tons of spent fuel stored containing:
33.4 tons of uranium-238
0.3 tons of uranium-235
1.0 tons of fission products
0.3 tons of plutonium


liquid fluoride thorium reactor
1 ton of thorium
fluoride reactor converts thorium-232 to uranium-233 and burns it
1 ton of fission products
in 10 years, 83 percent of fission products are stable
17 percent of fission products are stored for approximately 300 years
0.0001 tons of plutonium

NTNU

Kunnskap for en bedre verden



NTNU

Kunnskap for en bedre verden

MSR som maritim energikilde

2-taktsmotor, 20 MW:

- ✓ Vekt ca. 600 tonn
- ✓ 10 m lang, 16 m høy, 9 m bred (inklusiv servicemål) + kjøle og fuelsystem.
- ✓ Vil i løpet av 25 år forbrenne over 500 000 tonn olje.
- ✓ De største lasteskipene har gjerne en bunkerskapasitet på 6-7000 tonn.

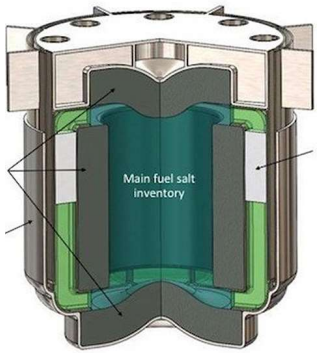
NTNU

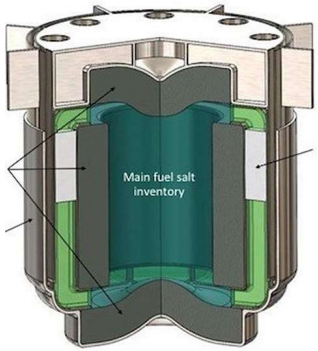
Kunnskap for en bedre verden

MSR som maritim energikilde

Saltsmeltereaktorer, 2 stk. 10 MW:

- ✓ Vekt 2 x 600 tonn.
- ✓ Hver reaktor 4 m diameter, 5 m høy + kjølesystem og saltrensesystem
- ✓ Driver en closed-cycle gassturbin (evt. dampturbin)
- ✓ Trenger ingen tilførsel av fuelsalt. Det trengs ca. 4 tonn uran eller thorium for 25 års drift.





NTNU

Kunnskap for en bedre verden

Økonomi

Nylige sammenligninger mellom 2-taktsmotorer og MSR viser at:

- ✓ Lasteskip 10000 t dødvekt
  => MSR 8 % høyere LFC enn MDO
- ✓ Lasteskip 110000 t dødvekt
  => MSR 47 % lavere LFC enn MDO
- ✓ Lasteskip 380000 t dødvekt
  => MSR 60 % lavere LFC enn MDO

(LFC = Life Cycle Costs)

Propulsion life cycle; Estimate Diesel

DIESEL POWER	Small	Handy dry	MR wet	Ultra dry	Kamsar dry	Afra wet	Suez wet	Cape dry	VL wet	VL dry
VSL kDWT	10,000	30,000	50,000	65,000	80,000	110,000	160,000	225,000	320,000	380,000
Diesel BHP	3,000	6,000	9,000	10,000	14,000	20,000	25,000	30,000	40,000	40,000
Power to weight	30.0%	20.0%	18.0%	15.4%	17.5%	18.2%	15.6%	13.3%	12.5%	10.5%
CAPEX $mill	3	4	6	7	8	9	10	10	12	12
Cons/day laden MTs	12	20	25	30	40	40	50	65	80	80
Cons/day Ballast MTs	7	15	20	25	35	35	45	60	75	75
Cons in port MTs	2	3	8	5	7	10	15	15	20	20
% Laden	70%	70%	65%	65%	60%	60%	50%	50%	50%	50%
% Ballast	20%	20%	25%	25%	30%	30%	40%	40%	40%	40%
% port	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%
Days laden	255.5	255.5	237.25	237.25	219	219	182.5	182.5	182.5	182.5
Days ballast	73	73	91.25	91.25	109.5	109.5	146	146	146	146
Days port	36.5	36.5	36.5	36.5	36.5	36.5	36.5	36.5	36.5	36.5
Lube oil $ p/a	180,000	360,000	540,000	600,000	840,000	1,200,000	1,500,000	1,800,000	2,400,000	2,400,000
Maint.$ p/a	120,000	240,000	360,000	400,000	560,000	800,000	1,000,000	1,200,000	1,600,000	1,600,000
Eng crew	3	4	5	5	5	5	6	6	6	6
Crew cost $ p/a	30,000	40,000	60,000	50,000	50,000	60,000	60,000	50,000	60,000	50,000
Total crew cost	90,000	160,000	300,000	250,000	250,000	300,000	360,000	300,000	360,000	300,000
Fuel MCR	30%	30%	30%	30%	30%	30%	30%	30%	30%	30%
Carbon tax base	360	600	750	900	1200	1200	1500	1950	2400	2400
Carbon tax	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Carbo tax p/a	65,700	109,500	136,875	164,250	219,000	219,000	273,750	355,875	438,000	438,000
Fuel Cost pmt	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450
Total fuel cost	1,642,500	2,841,525	3,621,713	4,311,563	5,781,600	5,830,875	7,309,125	9,526,500	11,826,000	11,826,000
Lifecycle years	30	25	20	25	25	20	20	25	20	25
Total OPEX	455,700	869,500	1,336,875	1,414,250	1,869,000	2,519,000	3,133,750	3,655,875	4,798,000	4,738,000

Propulsion life cycle; Estimate MSR

MSR POWER	Small	Handy Dry	MR Wet	Ultra Dry	Kamsar dry	Afra wet	Suez wet	Cape dry	VL wet	VL dry
VSL kDWT	10,000	30,000	50,000	65,000	80,000	110,000	160,000	225,000	320,000	380,000
MWth	4.5	9.0	13.5	15.0	21.0	30.0	37.5	45.0	60.0	60.0
Eff. Delta	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%
MWe	2.25	4.50	6.75	7.50	10.50	15.00	18.75	22.50	30.00	30.00
BHP equivalent	3,060	6,120	9,180	10,200	14,280	20,400	25,500	30,600	40,800	40,800
Unit Price $ mill	22,500,000	22,500,000	22,500,000	22,500,000	22,500,000	22,500,000	28,125,000	33,750,000	45,000,000	45,000,000
Unit Cost $ mill	45,000,000	45,000,000	45,000,000	45,000,000	45,000,000	45,000,000	56,250,000	67,500,000	90,000,000	90,000,000
Margin	22,500,000	22,500,000	22,500,000	22,500,000	22,500,000	22,500,000	28,125,000	33,750,000	45,000,000	45,000,000
Margin %	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%
Core fuel cost	4,500,000	9,000,000	13,500,000	15,000,000	21,000,000	30,000,000	37,500,000	45,000,000	60,000,000	60,000,000
Blanket cost	342,000	684,000	1,026,000	1,140,000	1,596,000	2,280,000	2,850,000	3,420,000	4,560,000	4,560,000
Monitor	600,000	600,000	600,000	600,000	600,000	600,000	600,000	600,000	600,000	600,000
Tech heads	2	2	3	2	2	3	3	2	3	2
Tech costs	60,000	60,000	60,000	60,000	60,000	60,000	60,000	60,000	60,000	60,000
Total Crew cost	120,000	120,000	180,000	120,000	120,000	180,000	180,000	120,000	180,000	120,000
Years / Life	30	25	20	25	25	20	20	25	20	25
Total OPEX	720,000	720,000	780,000	720,000	720,000	780,000	780,000	720,000	780,000	720,000
Life OPEX	21,600,000	18,000,000	15,600,000	18,000,000	18,000,000	15,600,000	15,600,000	18,000,000	15,600,000	18,000,000
Life fuel	4,842,000	9,684,000	14,526,000	16,140,000	22,596,000	32,280,000	40,350,000	48,420,000	64,560,000	64,560,000
LIFE CAPEX + OPEX + Fuel	71,442,000	72,684,000	75,126,000	79,140,000	85,596,000	92,880,000	112,200,000	133,920,000	170,160,000	172,560,000
Lifetime cost difference	$5,496,000	-$24,091,625	-$30,045,750	-$71,005,313	-$113,669,000	-$83,117,500	-$106,657,500	-$205,639,375	-$174,320,000	-$253,540,000
Lifetime diff %	8%	-25%	-29%	-47%	-57%	-47%	-49%	-61%	-51%	-60%
Cost p/day Diesel	$6,022	$10,606	$14,407	$16,454	$21,837	$24,109	$29,980	$37,212	$47,189	$46,696

Kilde: Core-Power Holding Ltd.

NTNU

Kunnskap for en bedre verden

Utvikling av MSR

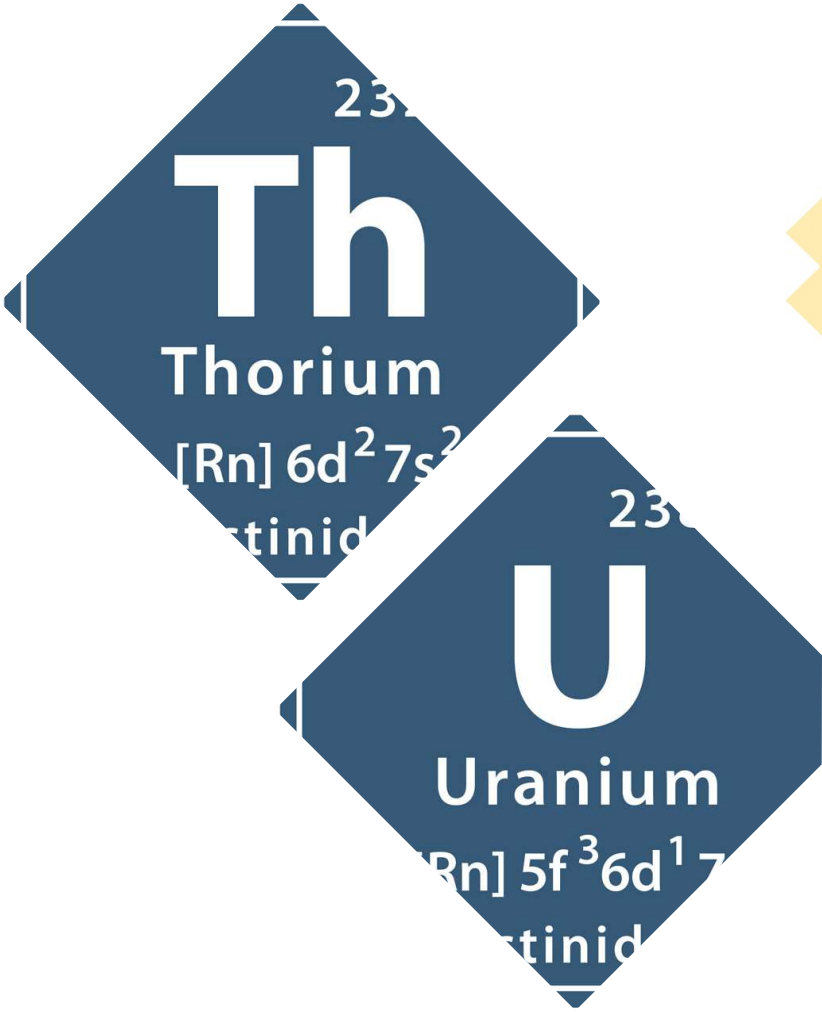
Det drives utvikling av landbaserte saltsmeltereaktorer både i USA, UK, India og i Kina, i tillegg til mindre initiativer i andre land. Det jobbes også med modulariserte løsninger, blant annet for skip.

- ✓ Saltsmeltereaktoren er den eneste energikilden på trappene i dag uten større bakdeler for miljøet og klimaet.
- ✓ Den har ingen av ulempene ved dagens kjernekraftløsninger.
- ✓ En pilot for maritim fremdrift antas å være i drift om 8-9 år.
- ✓ Norge har en av verdens største forekomster av thorium. Dette er en stor mulighet på lengre sikt, men da spesielt mulighetene for å utvikle og eksportere teknologi i forbindelse med dette.

NTNU

Kunnskap for en bedre verden

Kjernekraft - MSR

Selskap som jobber med utvikling av saltsmeltereaktorer av forskjellig typer:

- ✓ Flibe Energy, USA - LFTR (Liquid Fluoride Thorium Reactor)
- ✓ TerraPower, USA: MCFR (Molten Chloride Fast Reactor)
- ✓ Moltex Energy, UK/Canada: SSR (Stable Salt Reactor)
- ✓ Thorium Tech Solutions, Japan: Fuji MSR
- ✓ Core Power Ltd, Singapore: m-MSR
  => En marinisert saltsmeltereaktor