

Thorium.

Inleiding.

We hebben elektrische energie nodig, zelfs in toenemende mate zoals voor warmtepompen, elektrisch rijden en elektrificatie van de industrie. Fossiele energie geeft fijnstof en stikstofdioxide en dat is slecht voor de gezondheid. Bovendien veroorzaakt het klimaatverandering. Zon en wind kunnen niet voldoende elektriciteit opleveren en hebben als nadeel dat ze onregelmatig energie leveren, en maken gebruik van een energiebron met een lage energie dichtheid zodat veel materiaal en veel ruimte nodig zal zijn. Kernenergie, even veilig als zon en wind, levert stroom zonder CO₂-uitstoot en vraagt veel minder materiaal en ruimtebeslag. De kernindustrie renoveert voortdurend. Er zijn, onder meer wat de veiligheid betreft, verbeterde kerncentrales in ontwikkeling. Tevens zijn er nieuwe concepten zoals de gesmolten zout reactor.

Waar komt thorium vandaan?

In 1928 ontdekte Berzelius het element thorium, en gaf het de naam van de Noorse god Thor. Daar bleef het bij want veel nut had thorium niet. Nu is thorium zo ongeveer een toverwoord, een geschenk voor de mensheid. IJdele hoop of werkelijkheid?



Andromeda galaxy

Niemand kent de namen van de sterren die miljarden jaren geleden in een reeks ontzagwekkende kernexplosies als supernova's aan het einde van hun leven kwamen. De waterstof, waaruit deze sterren bestonden, werd daarbij omgezet in de elementen die wij nu kennen. Honderd in getal, ieder element met zijn eigen nummer, van één tot honderd, het getal dat aangeeft hoeveel positief geladen deeltjes, protonen, in de kern van het atoom aanwezig is, en dat ook bepaalt om welk element het gaat, goud, kwik, magnesium, zuurstof, thorium, het laatste ongeveer evenveel als lood. Een wonder van de natuur.

Tegelijkertijd werd van ieder element een aantal varianten gevormd, isotopen genoemd, met in de atoomkern, naast de positieve deeltjes, nog een variërend aantal neutrale deeltjes, neutronen. Deze isotopen waren allemaal radioactief, met ieder hun eigen halfwaardetijd, wat inhoudt dat in die halfwaardetijd, soms slechts secondes, soms langer tot vele eeuwen toe, de radioactiviteit telkens gehalveerd wordt. Tot er niets meer over is, helemaal vanzelf. Radioactiviteit verdwijnt, vroeg of laat, altijd vanzelf.

Deze bij de supernova's gevormde elementen en hun isotopen zweefden door het heelal. Ze zijn de basis waaruit uiteindelijk ook de aarde is ontstaan. Als gevolg van de hoge temperatuur en ontbreken van vloeibaar water was in dat begin geen leven op aarde mogelijk. Geleidelijk daalde de temperatuur en ook verloren de stoffen hun radioactiviteit zodat het leven op aarde mogelijk werd.

Nog drie radioactieve elementen over.

Echter, drie daarvan hebben het tot op heden weten vol te houden, en zijn nog steeds radioactief, kalium, uranium en thorium. Ook deze drie zullen, net als alle radioactieve stoffen, op den duur hun radioactiviteit verliezen. Wij zullen dat niet meer meemaken omdat de zon zelf dan al lang aan de

beurt is geweest om als supernova te ontploffen, en daarbij alle planeten zal verzwelgen, ook onze aarde. Gelukkig is de straling van deze drie, kalium, uranium en thorium, heel zwak. Het eerste, kalium, daarvan zit een beetje in ons lichaam. En dat is maar goed ook want we kunnen niet zonder kalium, ons hart zou bijvoorbeeld stoppen. Door dat kalium zijn we wel allemaal een klein beetje radioactief.

De andere twee, uranium en thorium, komen overal op aarde in de bodem voor, uranium ook in het oceaanwater. Zij zijn verantwoordelijk voor een flink deel van de natuurlijke straling die overal op aarde aanwezig is. Op sommige plaatsen, zoals Sardinië, is die straling meer dan tweemaal zo hoog als bij ons, wat kennelijk niet veel kwaad kan want de mensen worden daar stokoud. In Ramsar in Iran is de natuurlijke straling zelfs bijna honderd keer hoger dan bij ons, toch zijn daar niet meer kankergevallen.

Bij het radioactief verval van uranium en thorium komt warmte vrij. Dat heeft ervoor gezorgd dat, aangevuld met wat warmte vanuit het binnenste van de aarde, de aardbodem een beetje warm is geworden, naarmate je dieper komt steeds warmer. We benutten het als aardwarmte.

Uranium en thorium.

Uranium kennen we allemaal, van de kernwapens en kernenergie. Beiden zijn gebaseerd op het splijten van het uranium-atomen, maar daarbij houdt iedere overeenkomst op. Uranium uit de natuur bestaat bijna helemaal uit uranium-atomen met 238 deeltjes in de kern, U-238. Slechts 0,7% is U-235 met 235 deeltjes in de kern. Voor de werking van de kerncentrales is U-235 essentieel, hoewel een deel van de energie is ook afkomstig van gespleten U238. Daarvoor moet het gehalte aan U-235 eerst tot enkele procenten worden verhoogd, het zogeheten verrijken. In Nederland gebeurt dit bij Urenco in Almelo.

De brandstofstaven in een kerncentrale bestaan dus bijna uitsluitend uit U-238 met slechts een paar procent U-235. In een kernwapen moet dat net andersom zijn, dat moet allemaal U-235 zijn en U-238 mag er niet in zitten. Een kernexplosie is bij een kerncentrale daarom onmogelijk.

Wel hebben er ongevallen met kerncentrales plaatsgevonden. Bij de bekendste ramp, de semi-militaire kerncentrale in Tsjernobyl in Oekraïne, toen nog in de Sovjet Unie, die vooral ook bedoeld was om plutonium voor kernwapens te maken, ging het helemaal verkeerd door een combinatie van foutief ontwerp van de reactor en onverantwoord handelen van het bedienend personeel. Dat type kerncentrale komt in ons land niet voor, en wordt niet meer gebouwd. Het smelten van de brandstofstaven daar, de beruchte meltdown, had tot gevolg dat radioactieve stoffen in de atmosfeer terecht kwamen.

Kernenergie blijkt, samen met zon en wind, de veiligste manier te zijn om elektriciteit te produceren. In totaal zijn maar heel weinig doden gevallen door kernenergie-ongelukken. Veel meer doden vallen door verkeerd gebruik van medicijnen, fijnstof, stikstofoxiden en door chemische fabrieken.

De eerste gesmolten-zout reactor.

Kernfysicus Alvin Weinberg begreep dat een meltdown vermeden moet worden. Hij bedacht een type kernreactor waarbij een meltdown uitgesloten is: de gesmolten-zout reactor, de MSR (molten salt reactor) genoemd. In 1963 startte hij een proefexemplaar van dit nieuwe type reactor. Die heeft een paar jaar probleemloos gewerkt, en is de geschiedenis ingegaan als het "Oak Ridge Experiment". Helaas lukte het hem niet de Amerikaanse Senaat ervan te overtuigen dat de MSR te verkiezen was boven de op dat moment al volop in gebruik zijnde reactoren. President Nixon koos voor de lichtwater reactor, hetzelfde type zoals wij nu nog kennen. Vermoedelijk heeft meegespeeld dat de gesmolten zout reactor geen plutonium voor kernwapens kon maken, iets wat wij nu juist als een groot voordeel zien.

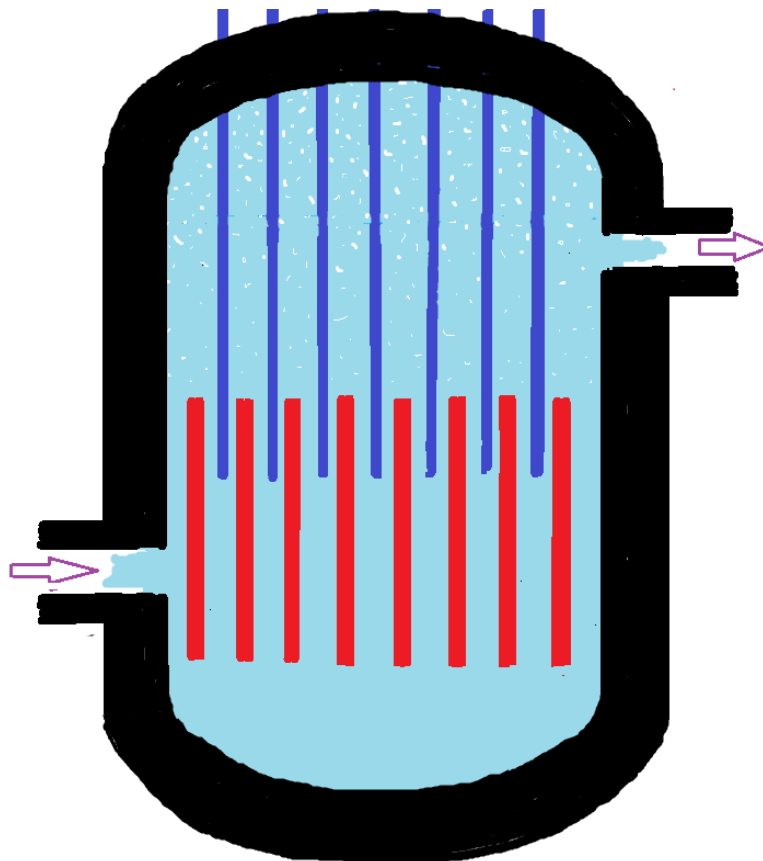
De twee bezwaren.

Sommigen wijzen kernenergie af om de twee redenen, de mogelijkheid van een meltdown en het kernafval. Niemand in ons land is ooit omgekomen of ziek geworden of heeft materiële schade geleden door kernenergie, maar de vrees daarvoor leeft. Onbekend maakt onbemind. De hoeveelheid kernafval is zeer beperkt, de kerncentrale in Borssele geeft ruim één kubieke meter kernafval per jaar, dat na een paar honderd jaar zo ver uitgewerkt dat je het zonder gevaar kunt oppakken, toch wordt kernafval als een probleem gezien.

Beide bezwaren kunnen met de thorium gesmolten-zout reactor uit de weg geruimd worden. Om dat te begrijpen moeten we eerst eens kijken hoe de huidige kerncentrales, de licht-water reactoren ofwel LWR's, werken.

De LWR, licht-water reactor.

De kerncentrale in het Zeeuwse Borssele is een licht-water reactor. Dat “licht” klinkt heel bijzonder maar betekent gewoon kraanwater. Een gewone elektriciteits-centrale bestaat uit twee delen, een deel waar met bijvoorbeeld aardgas of kolen warmte wordt gemaakt en daarmee stoom, en een ander deel waarin die stoom gebruikt wordt om elektriciteit op te wekken. In een kerncentrale is het warmte-deel vervangen door een kernreactor. Daarin ontstaat warmte doordat U-235 atomen spontaan uiteenvallen (een natuurlijk proces) en daarbij neutronen produceren, waardoor vervolgens andere uraniumatomen worden gespleten. Spontane splijting van U-228 atomen draagt niet bij aan de warmteontwikkeling, maar splijting van U-238 door deze neutronen wel.



*LWR, licht-water reactor
licht blauw: water
rood: brandstofstaven
donkerblauw: regelstaven*

In het reactorvat bevinden zich splijtstofstaven, vaak ook brandstofelementen genoemd. Dat zijn lange buizen met daarin opeen gestapelde tabletjes uranium. Die tabletjes lijken net paracetamolletjes, maar dan zwart. Het uranium, en zoals we eerder zagen alleen het U-235, valt langzaam uiteen waarbij neutronen vrijkomen. Verder gebeurt er niets. De vrijgekomen neutronen hebben namelijk een geweldig hoge snelheid, en vliegen daardoor andere U-235 atomen voorbij, zonder ze te raken.

Het reactorvat is met water gevuld dat, via een tussenstap, de stoom levert voor de elektriciteit-turbine van de centrale. Het water heeft nog een tweede functie, het is de moderator. Met moderator bedoelen we dat die stof neutronen vertraagt. Omdat vertraagde neutronen, kernfysici noemen dat thermische neutronen, niet meer zo snel vliegen, raken ze de uranium-atomen wel, waardoor die splijten. Er bestaan overigens ook andere types kernreactoren waarbij geen moderator nodig is. Bij dat splitsen komt de gewenste warmte vrij, maar ook weer nieuwe neutronen die op hun beurt weer atoomkernen splitsen. Dat gaat allemaal razendsnel en zou tot een rampzalige kettingreactie kunnen leiden.

Gelukkig gebeurt dat niet omdat sommige atomen eerder en andere later worden gespleten. Daardoor gaat het allemaal niet zo extreem snel, en kunnen we de kernreactie prima regelen. Dat doen we door neutronen met regelstaven weg te vangen, en wel zoveel dat in de reactor precies zoveel uranium atomen gespleten worden als nodig is om de gewenste elektriciteitsproductie op constant niveau te houden.

De LWR, een enorm dik vat.

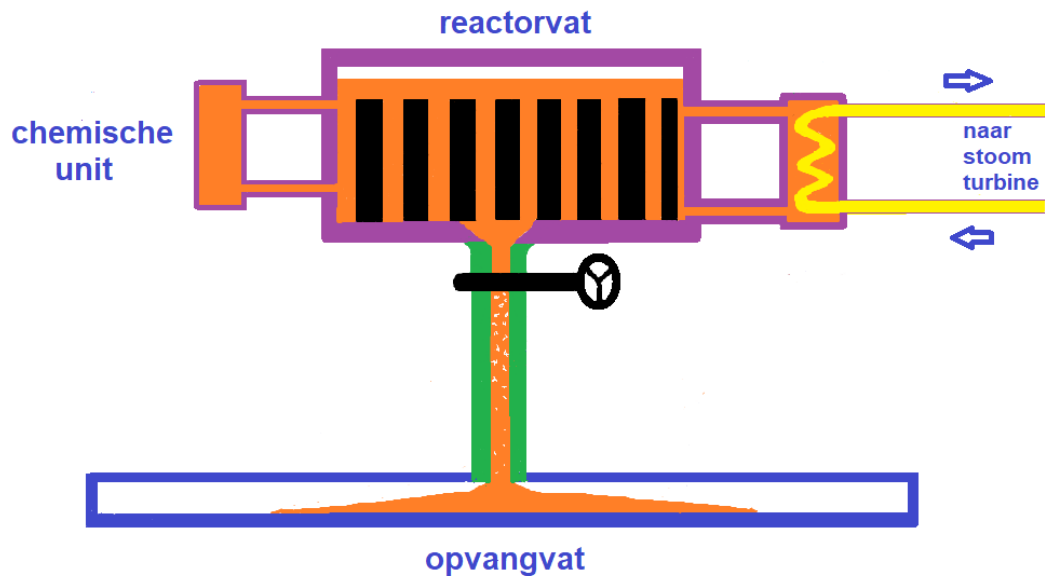
De wand van het met water gevulde reactorvat is wel twintig centimeter dik want het vat dat onder hoge druk staat, 155 atmosfeer. Die druk ontstaat doordat het water tot 315 graden wordt verhit. Door de hoge druk wordt verhinderd dat water in stoom overgaat.

In de kernreactor worden de atomen gespleten, waarbij de ontstane stukjes radioactief zijn, het zogeheten kernafval. De stukjes hebben allemaal hun eigen halfwaardetijd. Die met een korte halfwaardetijd zullen snel uitgewerkt zijn, andere langer. Kernafval heeft daardoor na honderd jaar 90% van zijn radioactiviteit geleidelijk verloren, en na nog zo'n tijd vrijwel alles. Wat dan nog overblijft is plutonium, ongeveer 1% van het kernafval. Plutonium blijft eeuwenlang radioactief. Maar de straling daarvan is heel zwak. Je kunt het vergelijken met een kaars. Met een grote vlam is hij snel opgebrand maar met een heel klein vlammetje kan hij heel lang branden. Hierover straks meer.

Geen meltdown en geen afvalprobleem.

De huidige kerncentrales zijn goed beveiligd tegen een meltdown. Door over te stappen op de gesmolten zout reactor is de kans op een meltdown eenvoudigweg uit te sluiten. Als we bovendien thorium als brandstof gebruiken ontstaat geen kernafval dat lange tijd opgeborgen moet worden.

Eerst de meltdown.



MSR, thorium gesmolten-zout reactor

Het reactorvat van de gesmolten zoutreactor is een stalen vat. Omdat er geen overdruk heerst kan het een eenvoudig vat zijn. De brandstof thorium is opgelost in het gesmolten zout. In het reactorvat bevindt zich grafiet als moderator waardoor de kernreactie mogelijk wordt gemaakt. Grafiet kennen we allemaal van het potlood.

Het gesmolten zout (circa 700 °C) circuleert door een warmtewisselaar waarin de stoom ontstaat voor de turbine-generator combinatie die de elektrische stroom opwekt. De reactor is ook voorzien van een chemische unit. Daarin wordt nieuw thorium aan het gesmolten zout toegevoegd. Door het uiteenvallen van thorium ontstaan stoffen die de werking van de reactor verstoren doordat ze neutronen wegvangen. Die worden in de chemische unit verwijderd. De chemische unit verwerkt per dag een paar liter vloeistof.

In het reactorvat is geen water aanwezig. Daarom zijn een stoom explosie (zoals in Tsjernobyl) of een waterstof explosie (zoals in Fukushima) onmogelijk.

Uniek is de beveiliging door middel van een prop gestold zout omdat deze beveiliging ook zonder menselijk handelen werkt. Tijdens normaal bedrijf koelt een elektrische ventilator de verbindingbuis tussen het reactorvat en een lager gelegen opvangvat. Deze ventilator koelt de buis af waardoor het gesmolten zout op die plaats stolt. Dat verhindert het leeglopen van het reactorvat. Als de stroom uitvalt koelt de ventilator niet meer, het zout smelt, het reactorvat loopt leeg en het splijtingsproces stopt. Het opvangvat heeft een groot oppervlak zodat natuurlijke luchtcirculatie voor voldoende koeling zorgt.

Bij een LWR (de huidige kerncentrales dus) is in het reactorvat brandstof voor vier jaar aanwezig. In een gesmolten zout reactor slechts voor een paar dagen. De hoeveelheid ongewenste stoffen, zoals radioactief jodium en cesium, zijn bij een gesmolten zout reactor slechts een fractie van wat bij een LWR vrij kan komen.

Het kernafval.

De kerncentrale in Borssele geeft per jaar anderhalve kubieke meter kernafval. Dat past dus in een bestelbusje. Als we een thorium gesmolten zout reactor gebruiken komt er honderd keer minder afval omdat thorium voor de volle honderd procent bruikbaar is, en van het uranium alleen de 0,7%

U-235.

Om te begrijpen hoe we door gebruik van thorium kunnen zorgen dat kernafval niet meer lang buiten het milieu gehouden hoeft te worden, moeten we eerst even kijken hoe dat bij de huidige kerncentrales zit. Kernafval ontstaat omdat uranium door neutronen in delen wordt gesplitst. Soms blijft echter een neutron in een uranium-atoom steken zonder splijtingseffect. Als dat bij U-238 gebeurt, dus met 238 deeltjes in de kern, ontstaat een atoomkern met 239 deeltjes, en dat wordt plutonium. Gelukkig is dat plutonium ongeschikt voor kernwapens doordat het ook andere isotopen van plutonium bevat. Die maken dat een wapen daarmee gemaakt op een onvoorspelbaar moment afgaat, en dat vinden generaals niet leuk. Dit plutonium, ongeveer 1% van het kernafval, is de reden waarom kernafval lang buiten het milieu gehouden moet worden.

De twee delen waarin het uranium is gespleten zijn radioactief, ieder met zijn eigen halfwaardetijd. Daardoor verliest dit afval geleidelijk zijn radioactiviteit. Na honderd jaar is 90% verdwenen en na nog zo'n tijd vrijwel alles. Maar het plutonium niet, dat houdt het vele eeuwen lang vol. Die straling is, zoals eerder gezegd, heel gering. Bovendien is de straling van plutonium alfastraling.

Alfastraling is zo zwak dat het niet eens door een papertje komt. Je kunt kernafval na een paar honderd jaar dan ook zonder gevaar oppakken. Overigens moet dit plutonium toch altijd buiten het milieu gehouden worden, want als je het in je lichaam zou krijgen is alfastraling wel degelijk gevaarlijk.

Ondanks dat kernafval na een aantal jaren dus niet meer gevaarlijk is, denken sommigen dat kernafval levensgevaarlijke straling geeft, en dat die straling vele eeuwen lang blijft voortduren. Gelukkig is dat een misverstand.

Kernafval bij thorium.

Bij een we thorium gesmolten zout reactor gaat het heel anders. Thorium heeft 232 deeltjes in de atoomkern. Natuurlijk kan een neutron soms ook in een thorium atoom blijven steken. Dan heb je het atoom thorium-233 gekregen. Maar om de 239 van plutonium te bereiken moet zeven keer achter elkaar een neutron in één en hetzelfde thorium atoom blijven steken. De kans daarop is te verwaarlozen, alsof iemand zeven keer achter elkaar de honderdduizend wint. Bij thorium wordt dus geen plutonium gevormd.

Kernafval vernietigen.

Een MSR heeft nog een voordeel. Stop je het huidige kernafval in een gesmolten-zout reactor, dan wordt het plutonium daarin door de vangst van neutronen onschadelijk gemaakt. En, zoals we al zagen, in een thoriumreactor wordt geen nieuw plutonium gevormd. Op deze manier kun je kernafval in een thorium gesmolten zout reactor vernietigen, of anders gezegd opruimen.

Daarmee zijn de twee vaak genoemde bezwaren van kernenergie uit de weg geruimd, geen ontploffen (meltdown) mogelijk, en geen afvalprobleem. Ook van belang is dat veel meer thorium op aarde beschikbaar is, ongeveer evenveel als lood, veel meer dan uranium. Het winnen van thorium is ook veel eenvoudiger dan van uranium, en verrijken zoals bij Urenco in Almelo bij uranium gebeurt, is bij thorium niet nodig. Alle thorium is bruikbaar, en niet alleen de 0,7% zoals bij uranium, waardoor honderd keer minder thorium in een gesmolten zout reactor nodig is dan uranium in een licht water reactor. In India zit in rivierzand soms wel 6% thorium.

Waarom nog geen thorium?

Waarom hebben we met al die voordelen dan niet al lang thoriumcentrales? Hoe is het mogelijk dat nog steeds geen thoriumcentrales worden gebouwd? Terwijl zo'n centrale evenveel stroom levert als duizend windmolens, zonder dat dure opslag in accu's nodig is, zonder het met veel verlies van energie omzetten van stroom in waterstof, zonder het kostbaar ombouwen van het lichtnet ten behoeve van zon- en windenergie? Het antwoord is eenvoudig, velen zien kernenergie niet zitten en

de voordelen van thorium zijn nog onbekend.

Daar komt bij dat de kernenergie-industrie thorium als een te grote stap ziet. Het ontwerp en de constructie van een gesmolten-zout reactor zijn totaal anders dan van de huidige kerncentrales. Zij hebben veel geïnvesteerd in de uranium-technologie en willen dat niet zomaar overboord gooien. Je kunt het misschien vergelijken met de auto-industrie die de elektrische auto lang heeft tegengehouden.

Technisch gezien zijn er nog wel een paar problemen op te lossen. De gesmolten-zout reactor uit 1963 heeft maar een paar jaar gewerkt. Wij willen kerncentrales die minstens zestig jaar meegaan. Zijn de reactorvaten bijvoorbeeld wel zo lang bestand tegen het hete gesmolten zout? Dat wordt onder meer in Delft onderzocht. Wel heeft China onlangs al een eerste thoriumreactor gesmolten zout reactor gebouwd.

De toekomst.

Een ander proces dat nog uitgewerkt moet worden is het tijdens bedrijf van de reactor nieuw thorium toevoegen en afvalproducten afvoeren. De proefreactor in 1963 had die voorzieningen nog niet. Vooral het afvoeren van splijttingsproducten is nodig omdat daar stoffen bij zitten die neutronen afvangen. Als er niet voldoende neutronen meer zijn stopt de reactor. Vanwege het nog ontbreken van toevoer en afvoerfaciliteiten is de mening van deskundigen dat de gesmolten-zout reactor nog wel enkele tientallen jaren op zich laat wachten. In het buitenland wordt geïnvesteerd in verschillende typen thoriumreactoren. Nederland doet mondjesmaat mee met onderzoek.

Een lichtpunt is dat we best even kunnen wachten.

We kunnen de overstap op CO₂-vrije energie opwekking bespoedigen door nu zo snel mogelijk met de nieuwe SMR's (small modulair reactor) te beginnen. SMR's zijn kleine LWR's die seriematig in een fabriek gebouwd worden en dan per vrachtauto of de trein naar de gewenste plaats vervoerd worden. Seriematige bouw is aanzienlijk goedkoper dan de grote eenmalige inspanningen zoals in UK, Finland en Frankrijk die tot grote kostenoverschrijdingen hebben geleid.

Deze SMR's zullen onvermijdelijk kernafval produceren. Dat kernafval kan bewaard worden totdat de thorium gesmolten zout reactoren beschikbaar zijn, zodat het kernafval daarin vernietigd kan worden.

Thorium, groene kernenergie, een geschenk voor de mensheid.

Mei 2022, Gerard Smals.