

TECHNOLOGY ASSESSMENT HTR

Samenvatting en conclusies

C.D. ANDRIESSE*

*Centrum voor Natuurwetenschappen, Universiteit Utrecht

Voorwoord

De voorliggende studie maakt deel uit van een reeks rapporten verschenen in het kader van een technology assessment van de Hoge Temperatuur Reactor (HTR), die ECN in samenwerking met de Universiteit Utrecht en in opdracht van het Ministerie van Economische Zaken in 1995 heeft uitgevoerd. Doelstelling van het onderzoek was een beter inzicht te krijgen in de maatschappelijke haalbaarheid van de inzet van HTR-technologie op de lange termijn. Daarbij stonden de inpasbaarheid en duurzaamheid van de technologie voorop. De inpasbaarheid heeft vooral te maken met de economische aspecten van de HTR, terwijl de duurzaamheid vooral te maken heeft met de milieukundige aspecten. Beide zijn van belang voor de maatschappelijke haalbaarheid van de technologie. De aanleiding voor het onderzoek was gelegen in de hoge verwachtingen t.a.v. de inherente veiligheid van de HTR t.o.v. conventionele ontwerpen. Een bredere evaluatie van de mogelijkheden en beperkingen van de HTR met inbreng uit een verscheidenheid van disciplines leek in dit kader wenselijk. De hieronder opgenomen lijst van deelstudies geeft aan dat het inderdaad een brede evaluatie betreft. De resultaten van deze deelstudies zijn samengevat in een apart rapport.

De studie is uitgevoerd onder leiding van C.D. Andriessse, destijds bij ECN-Beleidsstudies, maar inmiddels bij het Centrum voor Natuurwetenschappen van de Universiteit Utrecht werkzaam. Zoals de projectleider zelf al aangeeft in zijn bijdrage betreffende het duurzame van de HTR is het niet mogelijk een dergelijke studie te laten uitmonden in een gemeenschappelijke eindconclusie. Het begrip inpasbaarheid en duurzaamheid zijn daarvoor te weinig operationeel en te zeer normatief. In het kader van deze studie is ook niet gestreefd naar oplossing van langlopende controverses over de essentie van duurzaamheid in het algemeen en de maatschappelijke haalbaarheid van kernergie in het bijzonder. De duurzaamheid van de HTR technologie moet vooral gezien worden in vergelijking met de duurzaamheid van andere nucleaire opties. De deelstudies verschaffen aldus het achtergrondmateriaal voor een noodzakelijke dialoog over keuzes in de richting van nucleair onderzoek, indien het energiebeleid het open houden van de nucleaire optie wenselijk acht.

J.J.C. Bruggink
Unit manager ECN-Beleidsstudies

Rapporten verschenen in het kader van de HTR-technology assessment

Rapportnummer	Auteur(s)	Titel
ECN-C--96-050	C.D. Andriesse ¹	Technology assessment HTR Samenvatting en conclusies
ECN-C--96-041	H.M. van Rij ²	Technology assessment HTR - Deelstudie 1 Thermodynamisch potentieel van de Hoge Temperatuur Reactor
ECN-C--96-042	R. Smit ³ J.G de Beer ³ I.C. Kok ⁴	Technology assessment HTR - Deelstudie 2 Inpasbaarheid van Hoge Temperatuur Reactor in industriële processen
ECN-C--96-043	P. Lako ⁴	Technology assessment HTR - Deelstudie 3 Economie van nieuwe concepten van de modulaire Hoge Temperatuur Reactor
ECN-C--96-044	A.I. van Heek ²	Technology assessment HTR - Part 4 Power Upscaling of High Temperature Reactors
ECN-C--96-045	J.H. Bultman ²	Technology assessment HTR - Part 5 Thorium-fueled High Temperature Gas cooled Reactors
ECN-C--96-046	D.H. Dodd ² J.F.A. van Hienen ²	Technology assessment HTR - Part 6 The radiological risks associated with the thorium-fuelled High Temperature Reactor: a comparative risk evaluation
ECN-C--96-047	W. de Ruiter ³	Technology assessment HTR - Deelstudie 7 Maatschappelijk draagvlak voor de introductie van de Hoge Temperatuur Reactor
ECN-C--96-048	W.C. Turkenburg ³	Technology assessment HTR - Deelstudie 8 Kernenergie en duurzame ontwikkeling
ECN-C--96-049	C.D. Andriesse ¹	Technology assessment HTR - Deelstudie 9 Het duurzame van de Hoge Temperatuur Reactor

¹ Centre for the Natural Sciences, Utrecht University.

² Unit ECN-Nuclear, Netherlands Energy Research Foundation.

³ Department of Science, Technology and Society, Utrecht University.

⁴ Unit ECN-Policy Studies, Netherlands Energy Research Foundation.

INHOUD

HOE DE HTR TE BEOORDELEN?	7
BEOORDELING VAN DE INPASBAARHEID	7
BEOORDELING VAN DE DUURZAAMHEID	10

Hoe de HTR te beoordelen?

Zolang het publiek de kerntechniek niet vertrouwt kan ze geen rol van betekenis spelen; om dit vertrouwen te winnen lijkt de ontwikkeling van nieuwe vormen van kernenergie noodzakelijk. Aldus een conclusie (nummer 6) van het laatste (16^e) wereld-energiecongres, dat overigens vooral over kosten en duurzaamheid ging.

In dit rapport wordt de vraag beantwoord of de ontwikkeling van de Hoge Temperatuur Reactor (HTR) het publieke vertrouwen in kernenergie herstellen kan. Door zijn opzet heeft de HTR van alle nieuw ontworpen kernreactoren de hoogste graad van inherente veiligheid. Om vertrouwen te winnen zal die uiterste veiligheid geëist mogen worden, maar ze kan een prijs hebben die te hoog is om de HTR concurrerend te maken, en ze kan op gespannen voet staan met het tegenwoordige streven naar duurzaamheid. Om een beeld van de maatschappelijke aanvaardbaarheid te krijgen moeten alle aspecten van de HTR aan de orde komen.

Wij geven dus een complete technologie-beoordeling van de HTR. De centrale vraag was: Kan de (uiterst veilige) HTR een nuttige en betaalbare bijdrage leveren aan de productie van warmte en elektriciteit, als hij ontwikkeld wordt om een veel voorkomende grondstof te gebruiken en zo weinig mogelijk milieubelastende afvalstoffen te maken? Voor het antwoord op die vraag hebben we twee studies verricht. De eerste richtte zich op de inpasbaarheid van HTR-technologie in onze chemische en elektrische industrie, in vergelijking met alternatieven. De tweede richtte zich op de duurzaamheid van een HTR-technologie waarin het schaarse uranium voorzover mogelijk door het overvloedige thorium vervangen is.

Beoordeling van de inpasbaarheid

Zoals elke kernreactor, is ook de HTR gewoon een warmtebron. Zijn warmte komt echter bij de hoge temperatuur van circa 950°C vrij, wat zijn thermodynamische potentieel groter maakt dan van andere kernreactoren. Deze warmte ontstaat door splijtingsreacties in uraniumkorrels, die in grafitelementen zijn ingebed, en ze wordt in een stroming van heliumgas bij een druk van 50 bar afgevoerd. De hoge temperatuur doet niets af aan de nucleaire veiligheid. De veiligheid hangt samen met de kleine vermogensdichtheid en de grote warmtecapaciteit van de reactor. Het ergst denkbare ongeluk ontstaat als de heliumdruk wegvalt, waardoor geen koeling meer mogelijk is; dan schakelt de reactor zichzelf af en neemt hij de nawarmte der splijtingsreacties op zonder oververhit te raken.

In "Thermodynamisch potentieel van de Hoge Temperatuur Reactor" wordt uiteengezet hoe men de warmte in het heliumgas het beste in arbeid ('kracht') om kan zetten. (Uiteraard kan die warmte ook geheel of ten dele in fysisch-chemische processen worden gebruikt; de warmte/kracht-toepassing van de HTR komt straks aan de orde.) Als het gas wordt gebruikt om stoom op te wekken, die vervolgens een stoomturbine aandrijft, dan kan de hoge temperatuur van 950°C niet ten volle worden benut; boven 450°C heeft stoom namelijk een onhanteerbaar hoge druk. Dus moet men een stoomcyclus vermijden en proberen een directe heliumgascyclus toe te passen. Met een heliumgasturbine, die overigens

nog in ontwikkeling is, kan iets meer dan 50% van de warmte in arbeid worden omgezet (en die arbeid is praktisch volledig in elektriciteit om te zetten). Zo'n goed resultaat kan zonder naschakeling van een stoomcyclus worden bereikt, wat van belang is voor de nucleaire veiligheid. De turbine moet dan wel alle bruikbare warmte in de uitlaat weer aan de ingang gebruiken, anders blijft het rendement bij 40% steken; voor dit hergebruik is een zogenaamde recuperator nodig. Ook een voorcoeler levert winst op; koeling van het heliumgas tijdens de compressie maakt de omzetting in arbeid weliswaar iets slechter, maar stelt een groter deel van de warmte voor andere processen beschikbaar. De optimale warmte-kracht verhouding is 60%-40% voor een compressie-verhouding van 6,7 en een warmtelevering bij 325°C.

De hoge temperatuur van zijn warmte maakt de HTR heel geschikt als bron van warmte/kracht. Als men er alleen elektriciteit mee opwekt zullen de grondstoffen niet optimaal worden gebruikt. Dit geldt wel als de warmte (zoals die vrijkomt) wordt toegepast in chemische processen en, uiteraard, in warmte/kracht-systemen. Dus zal de inpasbaarheid van de HTR speciaal op deze twee terreinen beoordeeld moeten worden. Het gaat er om of de toepassingen daar technisch kunnen en economisch rendabel zijn.

Een inventarisatie van de industriële warmtevraag leert dat de aardgasomzetting met stoom ('reforming') en het naftakraken het beste bij de mogelijkheden van de HTR passen. Na een beschrijving van de diverse mogelijkheden wordt de "Inpasbaarheid van de Hoge Temperatuur Reactor in industriële processen" daarom toegespitst op de 'reforming' van aardgas (CH₄) naar synthesegas (CO met H₂). Uit synthesegas kan ammoniak worden gemaakt, of methanol (CH₃OH) - een potentieel belangrijke brandstof voor het verkeer. De 'reforming' vergt een aanvoer van warmte bij circa 860°C naar buizen, waar een mengsel van stoom en aardgas door wordt gevoerd. In principe kan hier heliumgas uit een HTR voor gebruikt worden; er bestaat een 30 MW HTR-ontwerp voor de produktie van 165 ton synthesegas per dag. In de tegenwoordige methanolfabrieken wordt die warmte verkregen door in een fornuis (dat om die buizen heen gebouwd is) aardgas te verbranden. Hier heeft het aardgas dus de rol van brandstof en van grondstof, en dat maakt een proces-integratie mogelijk. Omdat integratie tot lagere kosten leidt kan worden verwacht dat aparte 'reforming' het op den duur tegen deze geïntegreerde synthesegasproduktie af zal leggen. Waarschijnlijk sluit dit een toepassing van de HTR voor de methanolproduktie uit.

Anders ligt dat bij het naftakraken. Nafta (C_nH_{2n+2}, n > 5) is een grondstof voor etheen (C₂H₄), dat weer een grondstof voor kunststoffen is. Het kraken van nafta houdt in dat de ketens van koolwaterstof gebroken worden in een reactie met stoom bij hoge temperatuur. De tegenwoordige kraakinstallaties bestaan uit aardgas-gestookte fornuizen met buizen waar (van te voren in dampvorm gebrachte) nafta door wordt gevoerd. Behalve voor het verdampen van de nafta is extra warmte nodig voor het opwekken en het oververhitten van de stoom. Het kraken gaat er 'slap' of 'scherp' aan toe: 'slap' is bij 750°C en in 1 seconde, 'scherp' bij 1000°C en in 0,2 seconde. Met name bij 'scherp' kraken wordt een grote warmteflux geëist, die echter wel in het heliumgas van een HTR beschikbaar is. Er is een kraker van 675 kiloton nafta per jaar ontworpen, die van warmte wordt voorzien door 3 HTR-eenheden van 170 MW. Maar voor een conclusie dat de HTR inderdaad kan worden toegepast is het nog te vroeg; eerst moeten

geschikte helium-warmtewisselaars en buizen ontwikkeld worden. Ook over de concurrentie die de HTR het aardgas-gestookte fornuis aan kan doen valt nog weinig te zeggen.

Het gaat hier om een vraagstuk dat los staat van de toepassing in naftakraken. De kosten van warmte bij hoge temperatuur zijn een onderdeel van de kosten van warmte/kracht, of van 'kracht' (elektriciteit) alleen, waar we wél aandacht aan hebben besteed. Al eerder was uitgerekend dat voor de extra veiligheid, die een HTR in vergelijking met gangbare kernreactoren te bieden heeft, en die voor de veiligheid ook nog uit kleine eenheden (modulen) is opgebouwd, zo'n 2 cent per kWh extra betaald moet worden. Dit brengt de kWh-prijs juist boven de 10 cent, wat een beletsel voor de marktintroductie kan zijn.

Daarom wordt in "Economie van nieuwe concepten van de modulaire Hoge Temperatuur Reactor" het kostenvoordeel berekend van een vereenvoudiging van de reactorconstructie (zonder dat de veiligheid wordt aangetast) en van het reactorbedrijf. Men kan er namelijk aan denken om nieuwe splijtstof bij beetje (peu à peu) in het reactorvat te brengen, juist voldoende om de splijtingsreactie op gang te houden, en pas uit het vat te halen als dat na verloop van jaren vol is. Het leeghalen van het vat en het behandelen van de gebruikte splijtstof, wat kostbaar is, wordt dan tot een enkele activiteit teruggebracht. Daar zijn grote, hoge vaten voor nodig, waar maar weinig warmte uit kan komen. Zo'n HTR is niet voor het jaar 2015 op de markt te verwachten.

Er zijn 4 peu à peu scenario's doorgerekend, met vultijden van het vat van 2 en 20 jaar, thermische vermogens van 20 tot 80 MW en verrijkingen in U-235 van 15 tot 93% (het laatste percentage geeft bij toepassing van thorium een minimale produktie van zware actiniden). De vraag of deze HTR als warmte/kracht eenheid kan concurreren met een aardgasgestookte STEG wordt beantwoord door de prijzen voor splijtstof en voor aardgas (tussen 2015 en 2040). Die moeten geschat worden; ook de onderhouds-, bedienings- en ontmantelingskosten van de HTR moeten geschat worden. Concurrentie lijkt niet mogelijk als de prijs voor aardgas laag blijft, maar dat wordt anders als de prijs zich verdubbelt. Dan zou één scenario concurrerend kunnen worden. In dit (80 MW) scenario wordt thorium toegepast, waarbij het uranium sterk verrijkt moet zijn, wat de mogelijkheid biedt om lang met de versplijting door te gaan en de splijtstofkosten te verlagen. De investeringskosten mogen in dat geval bijna 5000 gulden per kW elektriciteit bedragen. In de andere 3 scenario's (bij dubbele aardgasprijs) mogen deze kosten niet boven 2300 tot 3600 gulden per kW komen. Voor zo weinig geld kan waarschijnlijk geen enkele kernreactor gebouwd worden.

Aan deze berekening wordt een beschouwing toegevoegd over het kleiner worden van de investeringskosten per kW als de HTR groter wordt gemaakt. "Power upscaling of High Temperature Reactors" (Het opschalen van HTR-vermogens) en het effect daarvan op de kosten is af te leiden uit gegevens van reactoren die gebouwd zijn bij Fort Saint Vrain in de Verenigde Staten en bij Hamm in Duitsland. Ook kan waarde worden toegekend aan ontwerpen die uit de ervaring met deze reactoren zijn voortgekomen en die ten grondslag liggen aan Japanse en Chinese reactoren in aanbouw. Naast de grootte blijkt ook de mogelijkheid om de reactoren in serie te bouwen

en om ze te vereenvoudigen een rol te spelen. De investering I wordt gegeven door

$$I = I_0 n^{(s-g)} - B$$

waar I_0 de referentie is (zoals de investering in een gangbare kernreactor) en B de besparing door een vereenvoudiging, waarbij componenten zonder veiligheidsfuncties een lagere kwaliteit mogen hebben; B kan een groot deel van I uitmaken. Verder zijn n , s en g resp. het aantal modules, de seriefactor en de groottefactor; uit de beschikbare gegevens volgt $s = 0,6$ à $0,8$ en $g = 0,8$ à $0,9$. Omdat s niet veel van g verschilt lijkt de investering weinig van het aantal modules af te hangen. Maar de conclusie dat vergroting van HTR-vermogens (door modules samen te voegen) dus geen kostenvoordeel oplevert kan nog niet getrokken worden. Daarvoor zijn de reactorgegevens te schaars en te inhomogeen.

Beoordeling van de duurzaamheid

We beginnen hier met een overzicht van de fysische implicaties van het gebruik van thorium in de HTR, omdat verondersteld mocht worden dat thorium beter aansluit bij ideeën over duurzaamheid dan het wat schaarse uranium. "Thorium-fueled High Temperature gas cooled Reactors" (Hoge Temperatuur Reactoren met thorium-splijstof) maakt duidelijk dat uranium nodig blijft wanneer het relatief overvloedige thorium gebruikt zal worden. Het thorium (Th-232) moet namelijk eerst in splijtbaar U-233 worden omgezet, en daar is splijtbaar materiaal zoals U-235 of plutonium voor nodig; men ontkomt ook niet aan de opwerking van de splijstof indien voor een gesloten cyclus gekozen wordt. Wil men zo weinig mogelijk zware actiniden krijgen, dan ligt een zo hoog mogelijke verrijking van U-235 (of U-233) voor de hand. Volgens tegenwoordige opvattingen over de mogelijkheid om dit materiaal te bewaken draagt dit bij aan het proliferatierisico. Maar het voordeel is niet alleen dat er meer grondstof beschikbaar is, er zullen ook minder zware actiniden worden gevormd, wat betekent dat de hoeveelheid radioactief afval met zeer lange halveringstijden kleiner zal zijn. Door het gebruik van thorium worden de zeer goede veiligheidseigenschappen van de HTR iets aangetast, maar ze blijven goed. Die eigenschappen worden wél slechter wanneer men de aanmaak van U-233 net zo groot zou willen maken als de versplijting van U-233 . Zoiets is bij een ruime thoriumvoorraad overigens niet nodig. Voor een dergelijke, zich zelf onderhoudende, splijstofkringloop moet de reactor worden vergroot. Dat maakt de passieve koeling slechter. Ook neemt het proliferatie-risico toe wanneer U-233 in de kringloop voorkomt. Wil men dit risico verkleinen door U-233 met U-238 te mengen, dan zal de gesloten kringloop zich echter geleidelijk aan met plutonium vullen en daardoor 'vuiler' worden. Maar er is, zoals gezegd, geen noodzaak om dit na te streven.

Vervolgens komen de risico's van de HTR aan de orde, met name de gevolgen van ioniserende straling die bij HTR-technologie te verwachten is. "The radiological risks associated with the thorium-fuelled High Temperature Reactor" (De stralingsrisico's van de op thorium gebaseerde HTR-splijstofkringloop) moeten worden geschat, want er is geen ervaring

met die kringloop. De schatting is gebaseerd op een vergelijking met stralingsrisico's van de splijtstofkringloop voor de gangbare lichtwaterreactoren (LWR), waar wél enige ervaring mee is. Omdat ook nog niet bekend is welke kringloop de HTR-splijtstof doorlopen zal, moet die schatting met een korrel zout genomen worden. Maar het is wel zeker dat het risico bij het reactorbedrijf zeer klein is: onder normale omstandigheden is het honderd keer zo klein als bij een LWR, en bij ongelukken een miljoen keer zo klein. Bij geen enkel ongeluk met de HTR zullen mensen direct gedood kunnen worden. Ook het risico bij de thoriumwinning, die mijnbouw en ertsbewerking omvat, is kleiner dan bij de uraniumwinning, want er komt minder radon bij vrij. Uraniumwinning, die nodig zal blijven (zie boven), is riskant. Opwerking van gebruikte HTR-splijtstof is echter véél riskanter, want daar kunnen splijtstof- en activeringsprodukten bij vrij komen. Omdat geen grote verschillen met LWR-splijtstof verwacht mogen worden, zal het risico bij opwerking circa 100 mentsievert per gigawattjaar elektriciteit bedragen. Dit is het dominante risico. Waarschijnlijk wordt het vooral bepaald door C-14 (radioactieve koolstof) dat door neutronvangst in koolstof, stikstof en zuurstof kan ontstaan. Die C-14 ontstaat overigens ook in de natuur door de inwerking van kosmische straling op lucht, en wel in een grotere mate dan van reactorsplijtstof verwacht kan worden. Of dat uitmaakt voor de perceptie van het risico is echter niet bekend.

Het "Maatschappelijk draagvlak voor de introductie van de Hoge Temperatuur Reactor" is af te leiden uit een analyse van 'diepe' bronnen. Onder de journalistieke rapportage over kernenergie in kranten, radio en televisie heeft zich namelijk een 'diep' beeld vastgezet in films, romans, toneelstukken, documentaires en populair-wetenschappelijke boeken. Dit beeld is duister en getuigt van een nucleaire vrees die zeer eigen gronden heeft. Het door experts berekende risico blijkt consistent kleiner te zijn dan het door leken gepercipieerde risico. De meest uitgesproken sociaal-psychologische dimensies van de vrees zijn biocidaliteit (het vermogen te doden) en temporaliteit (het tijdsverschil tussen oorzaak en gevolg) van de ioniserende straling die kernenergie veroorzaakt. Het beeld kan positiever worden als er gedurende een lange periode geen nucleaire ongelukken gebeuren, als er meer nadruk gelegd wordt op de risico's van alternatieven (met name fossiele energie), en als er veiliger kernreactoren komen. De ontwikkeling van de HTR kan het maatschappelijk draagvlak voor kernenergie daarom versterken, maar veel zal het niet kunnen zijn. Door de HTR zal slechts in 1 van de 11 sociaal-psychologische dimensies een wezenlijke verandering optreden, namelijk in dat van de katastrofaliteit. In de overige 10 dimensies zullen nauwelijks veranderingen optreden, waardoor de risico-perceptie van de HTR sterk negatief blijft.

Een andere benadering van de vraag of er een (nieuw) draagvlak voor kernenergie te vinden is, bestaat uit de associatie met een positief begrip. In "Kernenergie en duurzame ontwikkeling" wordt nagegaan onder welke voorwaarden kernenergie een bijdrage kan geven aan de duurzame ontwikkeling die mondiaal, in het kader van de Verenigde Naties, wordt nagestreefd. Hierin richt men zich op harmonie, of een beter evenwicht, tussen doelen van mensen en mogelijkheden van de natuur. Deze ontwikkeling komt neer op het vermijden van macrorisico's, het besparen op grondstofgebruik (waar mogelijk door hergebruik in een kringloop) en het beter benutten van de stromingsbronnen. Zo wordt vorm gegeven aan een solidariteit met latere generaties. Ook in de toekomst zal energie, een

grondslag voor welvaart en welzijn, beschikbaar en betaalbaar moeten zijn, terwijl de (commerciële) energievoorziening nu al voor de halve wereldbevolking onbetaalbaar is en nog duurder worden zal als de milieukosten van die voorziening in rekening worden gebracht.

Tegen de achtergrond van macrorisico's van klimaatverstoringen door het gebruik van fossiele brandstof, en van tekorten door de bescheiden bijdrage van stromingsbronnen, kan kernenergie een rol spelen, mits de installaties belangrijk veiliger worden. Deze veiligheid moet 'inherent' worden om geloofwaardig te zijn, wat tot eisen aan de installaties leidt (waaraan de HTR voldoet). Duurzaamheid eist echter meer dan dat. Het radioactieve afval zal getransmuteerd moeten worden, zodat het sneller vervalt en toekomstige generaties niet meer tot last is. Er mag ook niet veel splijtstof in zitten dat geschikt zou zijn voor kernwapens, terwijl de verspreiding van radioactieve koolstof en krypton begrensd moeten worden. Lijken dit moeilijk te vervullen eisen, de volgende zijn snel vervuld. Er is genoeg grondstof (van uranium en thorium) om kernenergie duurzaam toe te kunnen passen. En de prijs van nucleaire elektriciteit ligt niet boven de 12-15 cent per kWh, die 'duurzame' elektriciteit (uit stromingsbronnen) naar verwachting zal gaan kosten.

Als dit de voorwaarden zijn waaronder kernenergie aan een duurzame ontwikkeling bij kan dragen, dan rest de vraag of de HTR er aan voldoet. "Het duurzame van de Hoge Temperatuur Reactor" gaat daartoe eerst nog even op de risico's in die elke technologisch bepaalde ontwikkeling met zich mee brengt. Méér technologie verkleint de risico's niet, leert de ervaring, ze vergroot ze daarentegen. Het zou uitzonderlijk zijn als dit niet voor de HTR-technologie zou gelden, en die is inderdaad niet uitzonderlijk. Het gebruik van thorium, wat gewenst is voor de duurzaamheid, vereist een zorgvuldig ontwerp om dezelfde veiligheid van de reactor te verkrijgen. Maar niet dit, iets anders is bepalend voor zijn risico's: de HTR kan zoveel radioactieve koolstof gaan bevatten dat hij (bij de voor duurzaamheid gewenste splijtstofopwerking) het stralingsrisico van de tegenwoordig gangbare reactoren overtreffen kan. Ook als we een berekening van dit risico door een gevoelsmatige schatting vervangen blijft de conclusie dezelfde, namelijk dat de uiterst veilige HTR de nucleaire vrees niet weg kan nemen. Dit komt vooral door de perceptie van risico voor de komende generaties. Terwijl de transmutatie van lichte actiniden in het afval al bijna onmogelijk is, is die van de radioactieve koolstof uitgesloten. Ook is het onzeker of voldaan kan worden aan de eis dat de HTR weinig splijtstof bevat die geschikt zou zijn voor kernwapens.

Onze conclusie moet zijn dat de HTR-technologie in een aantal opzichten duurzamer is dan de bestaande kerntechnologie, maar dat dit niet betekent dat kernenergie daarmee een maatschappelijk draagvlak krijgen kan. Daar zijn ontwikkelingen voor nodig die niet direct of alleen te maken hebben met voordelen van de HTR.