

# Beheerde etsing van die SiC-laag in TRISO-bedekte partikels in 'n nie-termiese CF<sub>4</sub> plasma

## Outeurs:

Renier Koen<sup>a</sup>  
Izak J van der Walt<sup>a</sup>  
Arnold A Jansen<sup>a,b</sup>  
Philippus L Crouse<sup>b</sup>

## Affiliaties:

<sup>a</sup>Die Suid-Afrikaanse Kern-energiekorporasie (Necsa)  
Posbus 582, Pretoria 0001,  
Suid-Afrika

<sup>b</sup>Departement Chemiese  
Ingenieurswese, Universiteit  
van Pretoria, Lynnwoodweg,  
Pretoria 0001, Suid-Afrika

## Korresponderende outeur:

Renier Koen  
E-pos:  
koen.renier87@gmail.com

## Datums:

Ontvang: 10/05/19  
Aanvaar: 04/11/19  
Gepubliseer: 03/04/20

## Hoe om hierdie artikel aan te haal:

Renier Koen, Izak J van der Walt, Arnold A Jansen, Philippus L Crouse, Beheerde etsing van die SiC-laag in TRISO-bedekte partikels in 'n nie-termiese CF<sub>4</sub> plasma, *Suid-Afrikaanse Tydskrif vir Natuurwetenskap en Tegnologie* 39(1) (2020). <https://doi.org/10.36303/SATNT.2020.39.1.748>

An English copy of this paper is available online at <http://www.satnt.ac.za/index.php/satnt/article/view/748>

## Kopiereg:

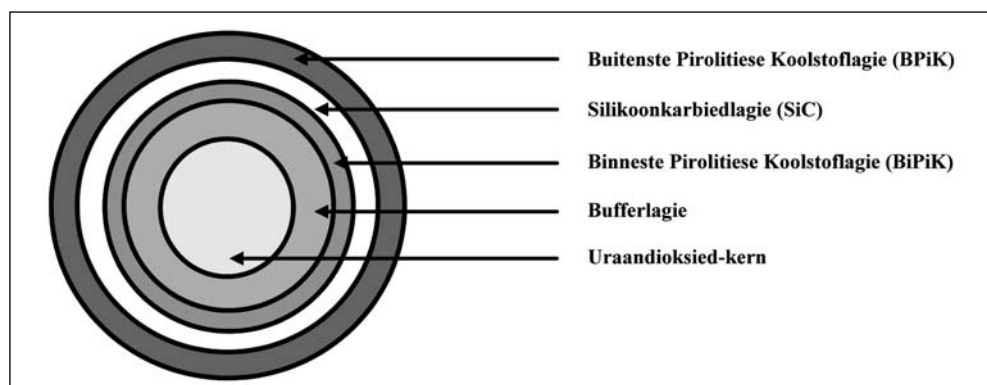
© 2020. Authors.  
Licensee: *Die Suid-Afrikaanse Akademie vir Wetenskap en Kuns*. Hierdie werk is onder die Creative Commons Attribution License gelisensieer.

Die fluoorradikale wat in 'n nie-termiese CF<sub>4</sub>-radiofrekwensieplasma (glimontladingsplasma) opgewek word, reageer geredelik met silikoonkarbid (SiC) met die vorming van vlugtige SiF<sub>4</sub> en CF<sub>4</sub>. In 'n spuitbedopstelling wat hier gebruik word, bewerkstellig dit binne 14 tot 15 h die volledige verwydering van die SiC-deklaag vanaf TRISO-partikels, met uitstekende beheer oor die proses vir analitiese en kwaliteitsbeheerdoeleindes. Die proseskinetika word deur massa-oordrag beheer.

**Controlled etching of the SiC layer in TRISO coated particles using CF<sub>4</sub> in a non-thermal plasma:** The fluorine radicals generated in a CF<sub>4</sub> non-equilibrium RF plasma readily react with silicon carbide (SiC) forming volatile SiF<sub>4</sub> and CF<sub>4</sub>. In a spouted-bed configuration this enables the complete removal of the SiC layer of TRISO coated particles in 14–15 h with excellent control of the process for analysis and quality control of the coatings. The process kinetics is mass-transfer controlled.

## Agtergrond

Die afhanklikheid van die suksesvolle bedryf van modulêre gasverkoelde hoëtemperatuurkernreaktore van die verrigting en strukturele stabiliteit van die TRISO-bedekte brandstofpartikels is goed gedokumenteer (Gulol *et al.* 2006, Seibert *et al.* 2019, Verfondern *et al.* 2007). Die term TRISO verwys na 'n tri-strukturele isotropiese partikel wat normaalweg bestaan uit 'n ~0.5 µm kloofbare UO<sub>2</sub>-kern bedek met 'n opeenvolgende reeks van vier chemiesedamp-gedeponeerde (CDG) deklages. (Del Cul *et al.* 2003). Hierdie deklages word verteenwoordig deur 3 struktuurtypes, naamlik poreuse koolstof, pirolitiese koolstof en SiC. 'n Binneste poreuse koolstoflagie dien as 'n bufferlaag vir gasvormige klowingsprodukte en word beskerm deur 'n hoëdigtheid pirolitiese koolstoflaag (BiPiK). Beide hierdie koolstoflaë word omhul deur 'n β-silikoonkarbid deklaag. 'n Aantal van hierdie partikels word vir een brandstofkorrel (Eng. fuel pebble) benodig. 'n Addisionele pirolitiese koolstoflagie (BPiK) word rondom die SiC laag gedeponeer om heging tussen die bedekte partikels en die amorf koolstof van die brandstofkorrel te verbeter. 'n Skematiese voorstelling van die algemene struktuur van TRISO-bedekte brandstofpartikel word in Figuur 1 getoon.



**FIGUUR 1:** Skematiese voorstelling van die laagiesamestelling van 'n TRISO UO<sub>2</sub> partikel (Gulol *et al.* (2006), Verfondern *et al.* (2007)).

Die SiC deklaag van die TRISO partikel (Figuur 1) dien as die hoofdrukvat teen die interne kragte uitgeoefen deur die gasvormige klowingsprodukte en funksioneer terselfdertyd as 'n stewige diffusieversperring vir die gevaarlike metaalklowingsprodukte (Fukuda *et al.* 1991). Dit is dus belangrik dat die strukturele integriteit van die SiC deklaag behoue bly selfs na blootstelling aan hoë stralingsdosisse en hoë interne druk van klowingsprodukte vanaf die  $UO_2$  kern (Gulol 2006). Ten einde die moontlikheid van brandstofkorrelfaling tydens bestraling en postuleerbare ongelukstoestande te ondervang is 'n goed-gedefinieerde spesifikasie vir die SiC lagie nodig sodat perke vir sleuteleienskappe afgedwing kan word. Verrigtingstoets word dus benodig om hierdie spesifikasies te ontwikkel sodat die kritieke perke vir materiaaleienskappe vasgestel kan word.

Hierdie kwaliteitsbeheermetodiek benodig die ontwikkeling van 'n proses wat uiteindelik lei tot 'n geharde verrigtingstoetspraktik. Hierdie studie dien dus as 'n beginselbewys van 'n doeltreffendheidsevaluasie vir die gebruik van 'n laetemperatuur- $CF_4$ -plasma in 'n spuitbedopstelling om 'n eenvormige etsproses op die SiC lagie van 'n TRISO-partikel te indueer.

Indien eenvormige etsing behaal kan word, word gepostuleer dat die doeltreffendheid van die dampdeponeringsproses en die kwaliteit van die SiC lagie so gevalueer kan word, deur met gereelde tussenposes vir die migrasie van klowingsprodukte in na-bestraalde korrels te analiseer tydens die etsproses. Enige merkbare toename in die lektempo van klowingsprodukte vergeleke met die voorafbepaalde gekwalifiseerde en geïdealiseerde spesifikasie sal dui op 'n foutiewe SiC deponeringsproses. Gevolglik sal hierdie partikels as buite-spesifikasie geklassifiseer word en regstellende aksie geneem moet word.

Die voorgestelde tegniek is 'n modifikasie op vorige werk deur van der Walt *et al.* (2011) waarin 'n alternatiewe metode vir die herwinning van  $UO_2$  kerne vanaf buitespesifikasie TRISO partikels ondersoek is. Sodanige partikels word gekenmerk deur onvoldoende strukturele integriteit as gevolg van 'n defektiewe GDG bedekkingsprosedure. Dit was dus noodsaaklik dat die  $UO_2$  kerne herwin word vir herbedekking. Daar is getoon dat die SiC laag volledig verwyder kan word deur die aktiewe fluoorspesies teenwoordig in 'n nie-termiese radiofrekwensie- $CF_4$ -plasma, maar dat die etsing van die partikels in 'n vastebedopstelling egter oneweredig was. Alhoewel hierdie metode ontwikkel was vir herwinning van die  $UO_2$  kerne, was die geleentheid geïdentifiseer om 'n metode te ontwikkel waarmee die SiC lagie eenvormig geëts kan word om sodoende die strukturele integriteit van die lagie te evalueer na bestraling.

Die benadering hier was die gebruik van 'n spuitbedopstelling om die effek daarvan op die eenvormigheid van die etsproses en die estempo te ondersoek. Hierdie tipe

opstelling bied die voordeel van 'n meer chaotiese lukraak partikelsirkulasie wat verseker dat daar 'n meer uniforme kontak tussen die fluoorradikale en die SiC sperlaag plaasvind (Flamant 1994, Duarte *et al.* 2008). In hierdie ondersoek word die effektiwiteit van die eksperimentele spuitbedopstelling, om 'n eenvormige etsproses van die TRISO partikel se SiC lagie te indueer, ge-evalueer. Dit dien dan verder ook as 'n beginselbewys vir verdere kwaliteitsbeheer ontwikkelinge.

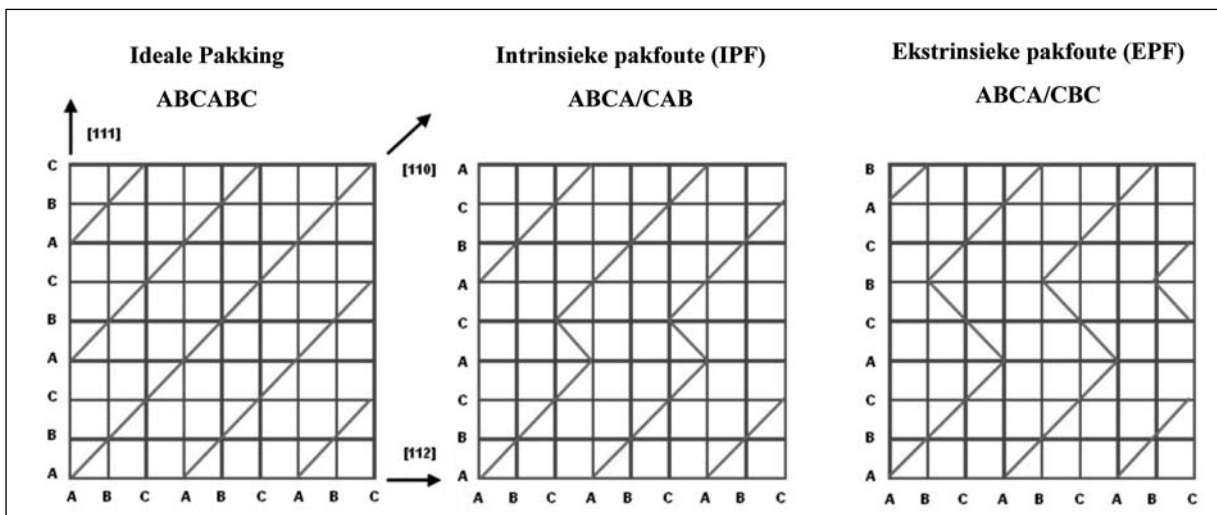
## Strukturele oorwegings

Die struktuur van SiC kan beskryf word as 'n hoogs-kovalente samestelling wat bestaan uit tetrahedra gesentreer rondom óf silikoon- óf koolstofatome (Zhang 2012). Hierdie rangskikking stel 'n diggepakte raamwerk daar, met helfte van die beskikbare tetrahedrale roosterposisies gevul. 'n Verskeidenheid pakmodusse gee aanleiding tot 'n uitgebreide reeks politipes wat afhang van die rangskikking langs die *c*-as (Knippenberg 1963). Die heksagonale 2H, 4H, 6H en 15R ( $\alpha$ -SiC) en 3C ( $\beta$ -SiC) fases kom mees algemeen voor. Slegs die kubiese  $\beta$ -SiC polimorf is vir kerntoepassings geskik vanweë sy besondere dimensionele stabiliteit tydens bestraling (Lopez-Honorato *et al.* 2008).

Sommige van die  $\beta$ -SiC lagies wat tydens TRISO korrelvervaardiging gedeponeer word, mag nie voldoen aan die neergelegde strukturele spesifikasies nie, hoofsaaklik as gevolg van onsuiverhede en/of pakfoute wat aanleiding mag gee tot verdere ongewenste fase-oorgange. Verder kan intrinsieke defekte soos vakante posisies, tussenruimtes en anti-posisies die meganiese eienskappe van die makrostruktuur negatief beïnvloed (Käckell *et al.* 1998).

Bogenoemde pakfoute is al beskryf as hoofsaaklik verantwoordelik vir die struktuurafval van die SiC deklaag in TRISO korrels (Zhang 2012, Jiang *et al.* 2016). Hierdie vervormings kan gedefinieer word as wanordelike gedeeltes van die oorhoofse ordelike opeenvolging in die fcc-tipe rooster en kan óf intrinsieke (IPF) of ekstrinsieke (EPF) pakfoute wees (Käckell *et al.* 1998). In die geval van IPF is 'n dubbellaag verwyder uit die geordende (ABC) stelsel met die gevolg dat 'n (ABC)(A\\C)(ABC)-tipe rangskikking voorkom. By EPF word 'n dubbellaag in die geordende stelsel geïnkorporeer en 'n (ABC)(A//C//BC)(ABC) rangskikking kom voor (Figuur 2). Hierdie pakfoute mag lei tot die bevordering van lokale glyvlakke wanneer die BPiKdie glij van gedeeltelike ontwigtings bevorder wanneer dit aan oormatige interne druk in die BBBbbb lagie aan oormatige interne druk blootgestel word. Die gevolg hiervan is dat 'n potensiële ontsnaproete vir vlugtige klowingsprodukte mag vorm. Vergeleke met ontwigtings en vakante posisies word geen bindings gebreek deur pakfoute nie, sodat daar slegs 'n klein energieverkil tussen foutiewe en perfekte strukture is.

In die konteks van hierdie ondersoek kan bogenoemde pakfoute en  $\beta$ -fase onsuiverhede tot noemenswaardige



FIGUUR 2: Pakkingsorde vir (a) Ideale, (b) IPF and (c) EPF for fcc-tipe konformasies, aangepas vanaf Zhang (2012)

strukturele gebreke en bykomende struktuurspannings in die SiC deklaag van die TRISO partikel aanleiding gee wat die stabiliteit en robuustheid daarvan kan beïnvloed en tot die ontwikkeling van potensieële ontsnaproetes vir vlugtige klowingsprodukte kan lei.

## Eksperimenteel

### Prosesmodifikasie vir optimale SiC etsing

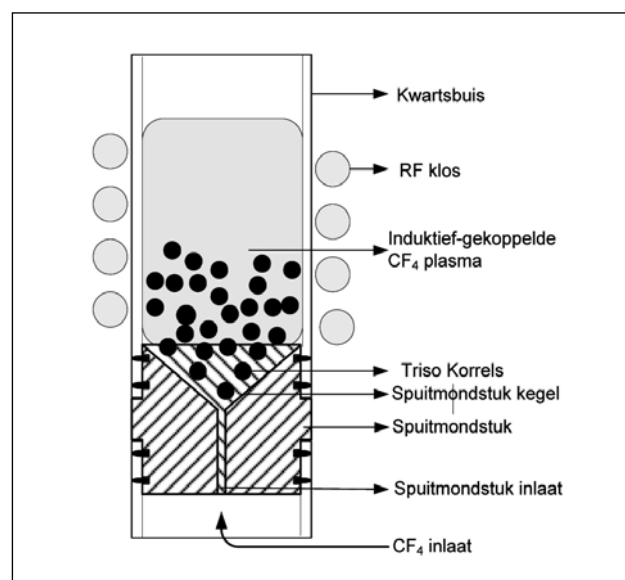
In ons vorige werk (van der Walt *et al.* 2011) is die etswerk uitgevoer in 'n gepaktebed-opstelling en is voorkeuretsing waargeneem aan die stroom-op kant van die partikels. Vir die werk gerapporteer, is 'n spuitbedopstelling (Figuur 3) gebruik in 'n poging om die partikels deur die lukrake beweging van die bed eweredig bloot te stel aan etsing deur die  $CF_4$ -glimontlading-plasma.

Gespuitebedplasmareaktore is bekend vir hul voortreflike vermengings van die vaste fase en uitstekende hitte- en massaordrag tussen die plasma en die vaste fase. Hierdie tegniek word gewoonlik toegepas wanneer stabiele swewing moeilik bereikbaar is (Duarte *et al.* 2008). Vorige ondersoek het getoon dat kennis van die plasma- en partikeldinamika in die spuitbed belangrik is vir die evaluering van die partikelsirkulasietempo en die plasma-vastestof-kontakdoeltreffendheid (Flamant *et al.* 1994). 'n Stabiele spuitaksie hang af van die vastestofeienskappe, kolomgeometrie, bedhoogte, reagens-vloeiempo ( $CF_4$ ) en, in 'n mate, die inlaatontwerp. Vir enige gegewe stel vastestofeienskappe en kolomgeometrieë sal stabiele spuiting afhang van: die drukval oor die bed, minimum gasvloeiempo, maksimum spuitbare bedhoogte en maksimum spuitbedhoogte (Mathur *et al.* 1974).

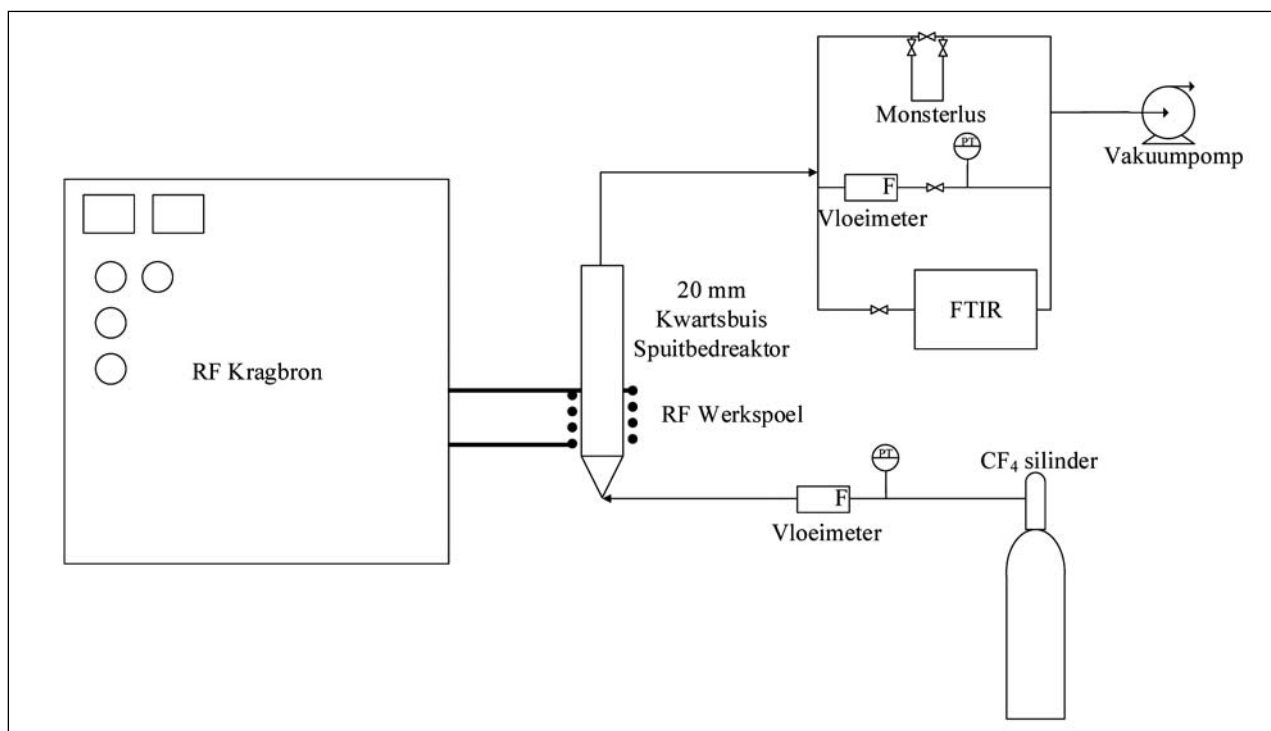
Empiriese toetse om die minimum spuitbedparameters te bepaal is aanvanklik gedoen voor die aanvang van die

plasma-etseksperimente. Hierdie toetse het parameters soos vakuumpodisies en spuitbedplasmakondisies in ag geneem om die spuitbedparameters, soos hierbo beskryf, te bepaal. Die resultate het gewys dat 'n 5 mm TRISO-partikelbed, bestaande uit ongeveer 30 partikels, gebruik kan word met 'n minimum spuitsnelheid van  $2 \cdot 10^{-4}$  m/s by die bogenoemde kondisies. Die drukval oor die bed was weglaatbaar klein.

Vir hierdie ondersoek is TRISO-bedeekte sirkoniumoksied ( $ZrO_2$ ) partikels as surrogaat Hoë Temperatuur Reaktor (HTR) voermateriaal gebruik. Die relevante fisiese eienskappe was: diameter ( $d_p$ ) = 0.858 mm, partikeldigtheid ( $\rho_p$ ) = 5 890 kg/m<sup>3</sup>, hoopdigtheid ( $\rho_b$ ) = 3 534 kg/m<sup>3</sup>.



FIGUUR 3: Skematiese voorstelling van 'n gespuitebed-reaktoropstelling



FIGUUR 4: Skematiese voorstelling van die eksperimentele opstelling.

## Apparaat en eksperimentele kondisies

Die eksperimentele opstelling wat tydens hierdie ondersoek gebruik is (Figuur 4), is soortgelyk aan dié wat voorheen beskryf is (van der Walt *et al.* 2011), buiten vir die gebruik van 'n spuitbed pleks van 'n vaste bed. Die spuitbedgas ( $\text{CF}_4$ ), wat ook dien as plasmagas, word van onder in die reaktorbuis ingelaat deur 'n koniese mondstuk met 'n 0.8 mm inlaat. Dit veroorsaak lukrake spuitbeweging van die partikels soos voorheen bespreek.

Die boorsilikaat-reaktorbuis met 'n 20 mm diameter was toegerus met 'n  $60^\circ$  PTFE-spuitmondstuk met 'n inlaatdiameter van 0.8 mm om te verhoed dat die TRISO-partikels onder uitval tydens die begin van die eksperiment. Die  $\text{CF}_4$ -plasma is opgewek m.b.v. 'n 1.5 kW 13.56 MHz radiofrekwensiekragbron. Die gemiddelde  $\text{CF}_4$ -gasvloei was  $7.33 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$  en die effektiewe toevoerkrag (plaatkrag) na die plasma was 0.3 kW, wat uitwerk op 'n reaktorentalpie van  $147.3 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ . Die sisteemdruk is gehandhaaf tussen 1 en 6 kPa (abs) deur 'n vakuumpomp met die uitlaat deur 'n skropper.

## Algemene eksperimentele prosedure

Die partikelmonster is voorberei deur dit oornag by  $1000^\circ\text{C}$  in 'n lugstroom te verhit om die BPiK deklagie te verwyder en die SiC-lagie bloot te stel vir die plasma-etsproses. 'n Aanvanklike monster van 30 van hierdie partikels (korrels) is vervolgens toenemend aan die plasma blootgestel vir 1 h per lopie, tot 'n maksimum van 6 h reaksietyd. Die  $\text{CF}_4$  gastoevoer, reaktordruk en kraginset is deurgaans konstant gehou vir die reeks eksperimente.

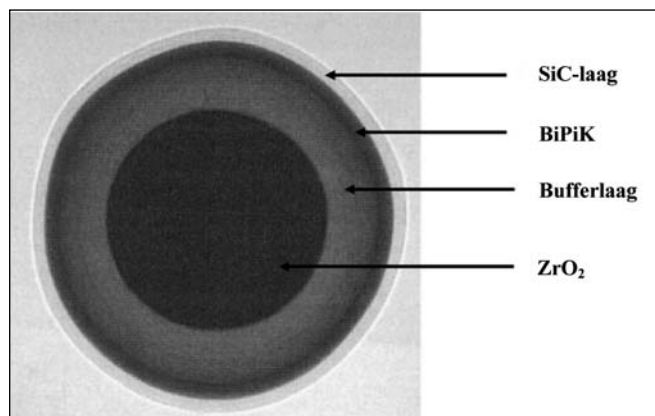
Die hele monster is voor en na elke uurlange lopie geweeg. Na elke lopie is 5 partikels verwyder sodat die lagiedikte van die oorblywende SiC bepaal kon word deur massaverliesberekening. Die oorblywende deel van die monster is weer geweeg en in die reaktor teruggeplaas vir die daaropvolgende lopie. Die sistematiese afname van die totale blootgestelde SiC oppervlakte in die monster a.g.v. die monsterneming sowel as die etsproses is in ag geneem by die berekening van die proseskinetika. Vir kennisname moet genoem word dat die plasmagas/spuitgas nie beperk was tot stoigiometriele hoeveelhede nie. Om by die minimum spuitsnelheid uit te kom, moes 'n oormaat  $\text{CF}_4$  gas gebruik word.

## Resultate en bespreking

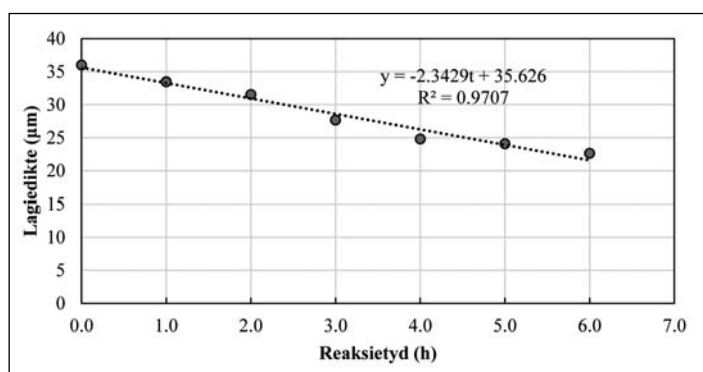
'n SEM foto van 'n TRISO partikel wat die egalige etsing van die SiC lagie toon na 7 ure se blootstelling aan 'n nietermiese  $\text{CF}_4$  glimontladingsplasma, word in Figuur 5 aangedui.

Die spesifieke massaverliestempo tydens die etsproses is bereken vanaf die partikel-oppervlakarea soos bereken uit die partikeldigtheid, diameter en lagiedikte soos gerugsteun deur SEM analises en die aantal partikels in die monster.

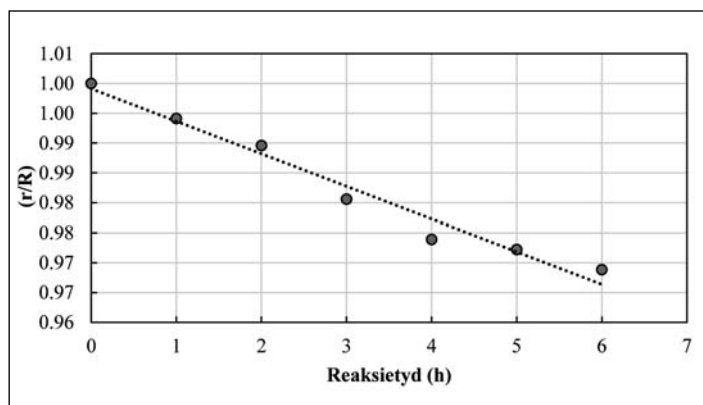
Die verandering van SiC lagiedikte met tydsverloop word in Figuur 6 getoon. Die reglynige passings van die data dui op 'n verstrooide verspreiding van datapunte ( $R^2 = 0.9707$ ). Die beraamde tydsverloop ( $t_p$ ) vir volle verwydering van die SiC lagie is ongeveer 15 h en is dus aanvaarbaar vir industriële toepassing.



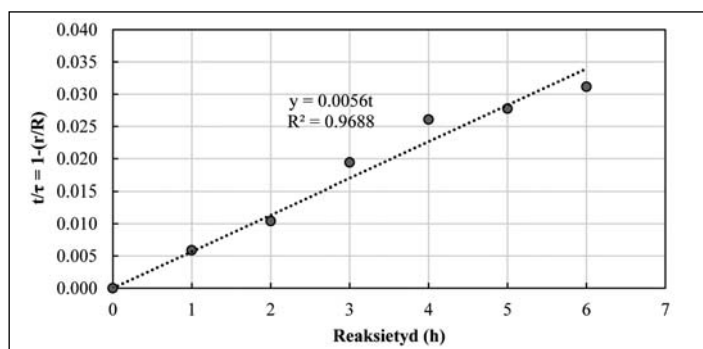
FIGUUR 5: Skematiese voorstelling van die uniforme etsing van die SiC deklagie TRISO partikel na 7 ure se blootstelling aan die  $CF_4$  plasma.



FIGUUR 6: Verloop van SiC laagdikte teenoor reaksietyd.



FIGUUR 7: Verhouding van partikelradiusse teenoor reaksietyd



FIGUUR 8(a): Chemiese-reaksiebeheer model, soos beskryf in Verg (1)

Twee kinetikamodelle is op die krimpende partikel data toegepas, nl. vir reaksiebeheer en diffusiebeheer deur 'n stagnante gasfilm. Die uitdrukkings (Levenspiel 1999) vir die twee gevalle is repektiewelik:

$$\frac{t}{\tau} = 1 - \left(\frac{r}{R}\right) = 1 - (1 - X_B)^{1/3} \quad (1)$$

wat identies is aan die uitdrukking vir partikels wat geen grootteverandering ondergaan nie, en

$$\frac{t}{\tau} = 1 - \left(\frac{r}{R}\right)^2 = 1 - (1 - X_B)^{2/3} \quad (2)$$

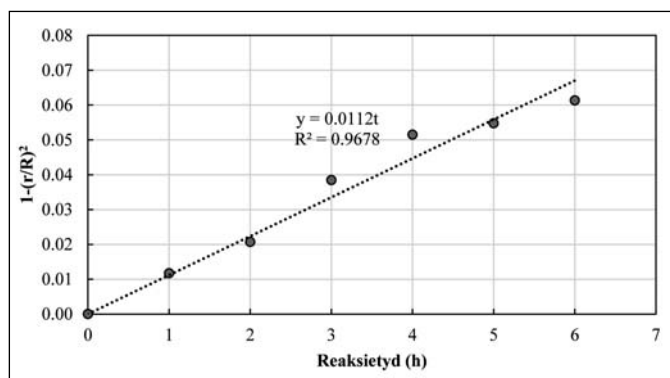
Hier dui  $t$  die reaksietyd aan en  $\tau$  die tyd benodig vir die volledige etsing van 'n teoretiese SiC partikel (hierdie aanname word benodig vir toepassing van die kinetikamodelle).  $R$  is die oorspronklike buitediaameter van die partikel by tyd  $t = 0$  en  $r$  is die partikelradius by tyd  $t$  tydens etsing. Die beraamde tydsverloop  $t_f$  vir volle verwydering van die SiC laag, word waargeneem wanneer die binnediameter van die partikel 'n verhouding van  $(r/R) = 0.916$  bereik. Indien die aanname gemaak word dat die oorspronklike partikel slegs uit SiC saamgestel is, kan die omvang van die reaksie beskryf word deur  $X_B$  waar  $0 \leq X_B \leq 1$ .

Die verhouding van partikelradiusse ( $r/R$ ) teenoor tyd, soos aangedui in Figuur 7, was aangewend ter toepassing van beide die reaksiebeheer- en diffusiebeheerkinetikamodelle, soos beskryf in Verg (1) en Verg (2), en word geïllustreer in Figuur 8 (a) en (b) hieronder. Die reglynige passingsvergelykings en hul  $R^2$  waardes is op die figure aangebring.

Die beraamde tydsverloop ( $t_f$ ) van 15.1 h vir volle verwydering van die SiC laag is bepaal m.b.v. die waarde van die reglynige helling in Figuur 7. Hierdie tydsverloop is vergelykbaar met die berekende waardes van die data in Figuur 6.

Die  $t_f$  waardes, bereken vanaf die  $\tau$  waardes in Figuur 8(a) en (b), vir die reaksie- en diffusiebeheermodelle, waar  $(r/R) = 0.916$ , is onderskeidelik 14.9 h en 14.4 h. Aangesien beide  $R^2$  waardes amper identies is en hul beraamde tydsverloop vir volledige etsing ( $t_f$ ) binne die foutgrens van mekaar is, kan daar geen onderskeid getref word vir 'n voorkeurmeganisme nie.

Indien die data vir die voorheen gerapporteerde gepaktebedkonfigurasië (van der Walt *et al.* 2011) ook deur die bogenoemde sistematiek geanaliseer sou word, blyk dit asof daar aansienlik korter reaksie tye ( $t_f$ ) sal wees vir die gepakte bed. Twee moontlike redes word aangevoer naamlik: eerstens, wanneer die relatiewe plasmagassnelhede met mekaar vergelyk word, is dit duidelik dat die gepakte bed, met 'n ongevolde bedvolume van 35 %, en al die ander parameters soortgelyk aan die spuitbedreaktor, se plasmagassnelheid ongeveer drie keer hoër is as dié in die spuitbed-



FIGUUR 8(b): Diffusiebeheer model deur 'n stagnante gasfilm, soos beskryf in Verg (2)

reaktor. Tweedens, as gevolg van bogenoemde rede, reageer die partikels in die spuitbedreaktor met 'n heelwat laer konsentrasie fluorradikale as die partikels in die gepaktebedreaktor. Hierdie verduidelikings dui daarop dat 'n massa-oordragmeganisme heers. Dit is nie duidelik as slegs na die data gekyk word nie, maar uit die bogenoemde bespreking kan afgelei word dat 'n massa-oordragmeganisme (Verg 2) wel die tempobepalende meganisme is.

Soos voorheen waargeneem (van der Walt *et al.* 2011), is  $CF_4$ ,  $SiF_4$ ,  $C_3F_6$ ,  $C_4F_8$  en  $CO_2$  weer in die afgasstroom waargeneem. Daarbenewens is natrium-aluminium-fluoried as wit vlokies aan die binnewand van die boorsilikaat reaktorbuus gevind wat ooreenstem met die fluorering van die reaktorwand wat gebruik is.

## Gevolgtrekkings

Die resultate in hierdie studie komplementeer die data voorheen verkry met 'n gepaktebed opstelling. Eenvormige etsing van die uiters inerte SiC deklagie van TRISO partikels word gedemonstreer. Die fluorradikale wat gevorm word in 'n  $CF_4$ -glimontladingplasma reageer geredelik met SiC om die vlugtige  $SiF_4$  en  $CF_4$  te vorm. Die verwydering van die 36  $\mu m$  deklagie in 'n spuitbed opstelling neem 14 tot 15 h, wat uitstekende beheer oor die proses vir analise- en

kwaliteitsbeheer moontlik maak. Die proseskinetika in die gespuitebed word beheer deur die diffusie van fluorradikale deur die stagnante gasfilm rondom die partikels. Hierdie is in teenstelling met die gepaktebedopstelling, waar die onegalige etsing vinniger plaasvind en die kinetika deur die chemiese reaksie beheer word.

## Verwysings

- Del Cul GD, Spencer BB, Forsberg CW, Collins ED, Rickman WS. 2002. TRISO-coated fuel processing to support high-temperature gas-cooled reactors. Annual Report 2002: Oak Ridge National Laboratories, Oak Ridge, USA.
- Duarte CR, Murata VV, Barrozo MAS. 1991. Experimental and numerical study of spouted bed fluid dynamics. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 25,95–107.
- Flamant G. 1994. Plasma fluidized and spouted bed reactors: an overview. *Pure and Applied Chemistry*, 6, 1231–1238.
- Fukuda K, Ogawa T, Hayashi K, Shiozawa S, Tsuruta H, Tanaka I. 1991. Research and development of HTTR coated fuel. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 28, 570–581.
- Gulol OO, Coluk U, Yirim B. 2006. Performance analysis of TRISO coated fuel particles with kernel migration. *Journal of Nuclear Materials*, 374, 168–174.
- Jiang M, Peng SM, Zhang HB, Xu CH, Xiao HY, Zhao FA, Liu ZI, Zu XT. 2016. *Ab initio* molecular dynamics simulation of the effects of stacking faults on the radiation response of 3C-SiC. *Science Reports*, 6, 20669–20680.
- Käckell P, Furthmüller J, Bechstedt F. 1998. Stacking faults in group-IV crystals: an *ab initio* study. *Phys Rev*, B 58, 1326–1330.
- Knippenberg WF. 1963. Growth phenomena in silicon carbide. *Philips Res Report*, 18, 161–274.
- Levenspiel O. 1999. *Chemical Reaction Engineering*, 3rd edition, John Wiley & Sons, Hoboken.
- Lopez-Honorato E, Meadows PJ, Tan J, Xiao P. 2008. Control of stoichiometry, microstructure and mechanical properties in SiC coatings produced by fluidized bed chemical vapor deposition. *Journal of Materials Research*, 23, 1785–1796.
- Mathur KB, Epstein N. 1974. Spouted Beds, *Academic Press Inc.*, New York, USA, 1–304.
- Seibert RL, Jolly BC, Balooch M, Schappel DP, Terrani KA. 2019. Production and characterization of TRISO fuel particles with multi-layered SiC. *Journal of Nuclear Materials*, 515, 215–226.
- Van der Walt JJ, Nel JT, Crouse PL, Jansen AA, Kekana SJ. 2011. The treatment of TRISO coated particles with  $CF_4$  in a low temperature plasma. *Journal of Nuclear Materials*, 413, 156–161.
- Verfondern K, Nabielek H, Kendall JM. 2007. Coated particle fuel for high temperature gas cooled reactors. *Nuclear Engineering and Technology*, 39, 603–616.
- Zhang HB. 2012. Mechanical and microstructural study of silicon carbide and pyrolytic carbon coating in TRISO fuel particles. *PhD Thesis: University of Manchester*, Manchester, UK.