



Strål  
säkerhets  
myndigheten

Swedish Radiation Safety Authority

Författare: Sophie Grape  
Staffan Jacobsson Svärd  
Peter Jansson  
Carl Hellesen  
Erik Branger

Forskning

2016:32

Forskning inom teknisk  
kärnämneskontroll vid Uppsala  
universitet under 2014–2015



## **SSM perspektiv**

### **Bakgrund**

Kompetens inom området nukleär icke-spridning är en förutsättning för att ett land ska kunna leva upp till de internationella krav som följer av fredlig användning av kärnenergi. I Sverige finns det begränsade satsningar från andra aktörer såsom Vetenskapsrådet och SKB inom området kärnämneskontroll och det är viktigt att det finns långsiktiga forskningsprogram på flera universitet för att upprätthålla kompetensnivån i landet. SSM bidrar därför till finansieringen av forskning vid Uppsala universitet inom kärnämneskontroll, både i form av ett forskningsbidrag men även med mer riktade satsningar.

Metoderna för kärnämneskontroll syftar till att mäta och verifiera egenskaper hos material för att säkerställa att en operatörs angivna data är korrekta och kompletta, d.v.s. att inget material har avletts. Vid verifiering av använt kärnbränsle nyttjas ofta begreppen gross och partial defect, vilka ger ett mått på vilken noggrannhet som tekniken för mätningen måste uppfylla. I dessa sammanhang kan man förenklat uttryckt säga att gross defect motsvarar om ett helt kärnbränsleelement har bytts ut eller avletts, medan det i partial defect fallet motsvarar att delar, mer än hälften av stavarna, i ett bränsleelement har bytts ut eller avletts.

Kärnämneskontrollen är till sin natur ett internationellt område och SSM sätter stor vikt vid att de forskargrupper vi stödjer aktivt deltar för att bidra till utvecklingen av internationella krav och riktlinjer, likväl som i det internationella vetenskapssamhället. Gruppen vid Uppsala universitet har en lång tradition av att arbeta i nära samarbete med operatörer och kontrollmyndigheter, vilket ger dem en unik möjlighet att sätta sin forskning i ett sammanhang.

### **Syfte**

För SSM finns dubbla syften med satsningen. Forskningen i sig bygger upp långsiktig nationell kompetens både vid universitetet och hos SSM:s egen personal, och den bidrar också till att besvara specifika frågeställningar nationellt och internationellt.

### **Resultat**

Gruppen vid Uppsala universitet för Fissionsdiagnostik och kärnämneskontroll har under perioden forskat främst kring olika metoder för att verifiera använt kärnbränsle men även deltagit i utvecklingen av koncept för kärnämneskontroll för smältsalt reaktorer. Rapporten beskriver fyra forskningsområden närmare och sammanfattar verksamheten som har genomförts inom respektive område.

### **Projekt information**

Kontaktperson SSM: Camilla Andersson

Referens: SSM 2014-1880

Aktivitet: 7037016-31





**Strål  
säkerhets  
myndigheten**

Swedish Radiation Safety Authority

**Författare:** Sophie Grape, Staffan Jacobsson Svärd, Peter Jansson,  
Carl Hellesen, Erik Branger  
Avdelningen för tillämpad kärnfysik, Uppsala universitet, Uppsala

# 2016:32

Forskning inom teknisk  
kärnämneskontroll vid Uppsala  
universitet under 2014–2015

Datum: September 2016

Rapportnummer: 2016:32 ISSN: 2000-0456

Tillgänglig på [www.stralsakerhetsmyndigheten.se](http://www.stralsakerhetsmyndigheten.se)

Denna rapport har tagits fram på uppdrag av Strålsäkerhetsmyndigheten, SSM. De slutsatser och synpunkter som presenteras i rapporten är författarens/författarnas och överensstämmer inte nödvändigtvis med SSM:s.

# Innehåll

<b>1. Inledning</b> .....	<b>4</b>
<b>2. Digital Cherenkov Viewing Device (DCVD)</b> .....	<b>6</b>
<b>2.1 Introduktion</b> .....	<b>6</b>
<b>2.2 Forskningsfrågor</b> .....	<b>6</b>
<b>2.3 Genomförande och resultat</b> .....	<b>7</b>
2.3.1 Bildanalys.....	7
2.3.2 Grundläggande Tjerenkovstudier.....	9
2.3.3 Anpassning av mjukvara och utveckling av ny metod för Tjerenkovljusestimering.....	11
2.3.4 DCVD i obevakat läge.....	12
2.4 Projektets fortsättning.....	13
<b>3. Next Generation Safeguards Initiative (NGSI)</b> .....	<b>14</b>
<b>3.1 Introduktion</b> .....	<b>14</b>
<b>3.2 Forskningsfrågor</b> .....	<b>14</b>
<b>3.3 Genomförande och resultat</b> .....	<b>15</b>
3.3.1 Studier av instrumentrespons på asymmetriskt utbrända bränslen .....	15
3.3.2 Anpassning av DDA-instrumentet för olika applikationer.....	16
3.3.3 Framtagande av en DDA-prototyp för Clab.....	18
3.4 Projektets fortsättning.....	20
<b>4. Verifiering av atypiska bränsleobjekt</b> .....	<b>21</b>
<b>4.1 Introduktion</b> .....	<b>21</b>
<b>4.2 Forskningsfrågor</b> .....	<b>21</b>
<b>4.3 Genomförande och resultat</b> .....	<b>22</b>
4.3.1 Bakgrundsinformation och verifieringsbehov.....	22
4.3.2 Mättekniker och instrument.....	23
4.3.3 Rekommendationer från studien.....	24
<b>4.4 Projektets fortsättning</b> .....	<b>25</b>
<b>5. Generation IV</b> .....	<b>26</b>
<b>5.1 Introduktion</b> .....	<b>26</b>
<b>5.2 Forskningsfrågor</b> .....	<b>26</b>
<b>5.3 Genomförande och resultat</b> .....	<b>27</b>
5.3.1 Resurshushållning och avfallsförbränning med Gen IV-system.....	27
5.3.2 Kärnämneskontroll för saltsmältareaktorer.....	29
<b>5.4 Projektets fortsättning</b> .....	<b>29</b>
<b>6. Avslutande diskussion och utblick</b> .....	<b>30</b>
<b>7. Publikationslista</b> .....	<b>31</b>

# Sammanfattning

Uppsala universitet har inom ramen för olika avtal med SSM under 2014-2015 bedrivit ett omfattande forskningsprogram inom kärnämneskontroll. Forskningsprogrammet har under denna tid innefattat 3 doktorander med dedikerade forskningsprojekt och ett flertal seniora forskare som helt eller delvis har varit engagerade inom kärnämneskontroll.

Denna rapport uppmärksammar särskilt fyra forskningsområden av hög relevans för den globala kärnämneskontrollen, vilka benämns; DCVD, Next Generation Safeguards Initiative, verifiering av atypiska bränsleobjekt och Generation IV kärnkraftsystem. Även andra forskningsaktiviteter har genomförts inom ramen för forskningsprogrammet, vilka dock ligger utanför redovisningen i denna rapport.

Under perioden 2014-2015 producerades inom forskningsprogrammet 9 artiklar som skickats till vetenskapliga tidskrifter med peer-review-granskning. Därutöver gjordes medvetna satsningar på att lyfta fram forskningen på de arenor som är av störst betydelse för det internationella kärnämneskontrollarbetet, d.v.s. på de symposier och möten som arrangeras av FN:s internationella atomenergiorgan (IAEA), det europeiska samarbetsorganet ESARDA och den amerikanska organisationen INMM. Vid dessa internationella konferenser publicerades ytterligare 15 vetenskapliga artiklar med unikt innehåll under perioden. En publikationslista med samtliga forskningsarbeten som producerats under perioden redovisas i denna rapport.



# Summary

Uppsala University has conducted an extensive research programme devoted to research within nuclear safeguards during 2014-2015, with financial support from SSM. The research programme has comprised 3 PhD students and several senior researchers who have been involved in nuclear safeguards research to various degrees.

This report highlights four chosen research areas with a high degree of relevance for global nuclear safeguards; i) DCVD-research, ii) Next Generation Safeguards Initiative, iii) verification of atypical fuel items and iv) Generation IV nuclear energy systems. Also other activities have been included within the research programme, but lie outside the scope of this report.

During 2014-2015, the research programme produced 9 papers in peer-reviewed scientific journals. In addition, Uppsala University chose to present this research at the arenas which are of highest importance for research on international nuclear non-proliferation and safeguards – meetings and symposia arranged by the International Atomic Energy Agency (IAEA), the European Safeguards Research and Development Association (ESARDA) and International Nuclear Material's Management (INMM). At these arenas, additionally 15 scientific papers were published and presented during 2014-2015. A publication list is enclosed at the end of this report.

# 1. Inledning

Uppsala universitet har en lång tradition av forskning inom kärnämneskontroll, som startades redan på 1980-talet, då med stort fokus på mätning av bestrålade kärnbränsle på det Centrala lagret för använt kärnbränsle, Clab, i Oskarshamn och med en liten men fokuserad forskningsgrupp bestående av två personer. Sedan dess har både forskningsområdet och gruppen växt och idag bedrivs ett relativt omfattande forskningsprogram med flera inriktningar kopplade till kärnämneskontroll. Gemensamt för forskningen är att fokus ligger på verifiering av kärnbränslen, framtagande av nya eller förbättrade icke-destruerande mättekniker och mätmetodiker för detta ändamål, genomförande av mätningar samt dataevaluering och dataanalys. Vissa andra engagemang ingår också inom ramen för verksamheten, såsom medverkan i olika internationella arbetsgrupper, med den gemensamma nämnaren att aktiviteterna på något sätt ska vara relevanta för och främja den globala kärnämneskontrollen eller nukleära icke-spridningen.

De fyra projekt som lyfts fram i den här rapporten har delfinansierats av SSM, och beskrivningen gäller den forskning som bedrivits under 2014-2015.

- *Digital Cherenkov Viewing Device (DCVD)*  
Utveckling av instrumentet Digital Cherenkov Viewing Device (DCVD) har intresserat SSM under lång tid. Arbetet har bedrivits, och bedrivs fortfarande, inom ramen för det svenska stödprogrammet till IAEA med deltagare från det svenska och kanadensiska myndigheterna, externa svenska konsulter och själva instrumenttillverkaren från Kanada. Sedan 2006 har Uppsala universitet varit involverat i projektet i syfte att ge vetenskaplig vägledning i termer av råd och granskning på den verksamhet som bedrivs. Under 2013 tog verksamheten runt DCVD-instrumentet en ny vändning i och med att SSM beslutade att utöver utveckling inom stödprogrammet även stödja forskning av betydelse för förbättrad mätmetodik och mätdataevaluering inom DCVD-projektet inom ramen för ett separat doktorandprojekt vid Uppsala universitet. Projektet har nu kommit ungefär halvvägs.
- *Next Generation Safeguards Initiative (NGSI)*  
Next Generation Safeguards Initiative (NGSI)-projektet initierades av amerikanska Department of Energy för över sju år sedan i syfte att under fem års tid utreda olika tekniska och icke-tekniska utmaningar som kärnämneskontrollen då bedömdes stå inför. En stor mängd forskare engagerades och inom ramen för underprojektet kopplat till verifiering av bestrålat bränsle (NGSI-SF) inleddes ett samarbete mellan Uppsala Universitet och Los Alamos National Laboratory (LANL) som ledde denna del av projektet. Samarbetet bestod i finansiering av en gemensam doktorand, som sedan december 2012 forskat på en av de föreslagna verifieringsteknikerna vid namn Differential Die-Away (DDA). Ett urval av hitintills genomförd forskning presenteras i den här rapporten.
- *Verifiering av atypiska bränsleknippen*  
I Sverige planeras sedan länge ett geologiskt slutförvar för använt kärnbränsle. Bränsle kommer att kapslas in och grävas ner c:a 500 meter ner i berggrunden. Inför inkapsling kommer bränslet troligtvis att verifieras experimentellt i enlighet med de internationella åtaganden som Sverige har gentemot IAEA och under Euratomfördraget. Det finns ett relativt stort antal (icke-förstörande) mätmetoder som kan komma att bli aktuella och de förväntas kunna verifiera majoriteten av

de bränsleknippen som ska kapslas in. Tveksamheter finns i en del fall kring verifiering av så-kallade ”atypiska bränsleknippen” (vilka beskrivs närmare i avsnitt 4), för vilka de konventionella mätmetoderna kanske inte fungerar som avsett. P.g.a. denna situation har vi studerat ett fall av atypiska bränsleknippen som idag förvaras på Clab, i syfte att ge en första indikation på hur verifiering skulle kunna gå till.

- *Generation IV*  
Genom historien är det känt att utvecklingen av kärnvapen förekom utvecklingen av civil kärnkraft, och att denna i sin tur förekom utvecklingen av den globala kärnämneskontrollen. I tider där klimatpåverkan och elproduktion av låga CO<sub>2</sub>-utsläpp, det säkerhetspolitiska läget och utveckling av terroristverksamheter frekvent debatteras kan man peka på fördelar med framtida s.k. generation IV kärnkraftssystem. Dessa inkluderar bl.a. ett ökat resurshushållsande, reducerade avfallsvolymer och lagringstider, minskat behov för anrikning av uran och en möjlighet att ”bränna” upp känsligt plutonium som annars kan missbrukas för vapenframställning. Eftersom systemen inte existerar i kommersiell bemärkelse i dagsläget, utan fortfarande är på forsknings- och utvecklingsstadiet, finns stora möjligheter att påverka utformningen av framtidens kärnämneskontroll *innan* utvecklingen av kärnkraftsystemen äger rum.

Forskningen i denna rapport har möjliggjorts i huvudsak av bidragsmedel från SSM (Diarienummer SSM2014-1880, delaktivitetsnummer 7037016-31), för vilka Uppsala universitet finansierar majoriteten av en heltidstjänst för en forskare som har till syfte att huvudsakligen bedriva och koordinera forskningen inom kärnämneskontroll vid Uppsala universitet. Dessa bidragsmedel möjliggör bl.a. handledningsresurser för doktorandprojekt, möjlighet att bedriva egen forskning inom andra projekt, samt utgör medfinansieringsmedel i den mån sådana krav finns. Doktorandprojektet inom DCVD finansieras till 60% av SSM genom ett separat bidrag (Diarienummer SSM2012-2750, delaktivitetsnummer 7037016-24). Utöver forskningen som tas upp i denna rapport bedrivs ytterligare forskning och verksamhet inom kärnämneskontroll vid Uppsala universitet. Ett exempel på sådan forskning rör gammaemissionstomografi, där detaljerade mätningar av gammastrålningen utanför ett bränsleelement följt av tomografisk rekonstruktion av tvärsnittsbilder av bränslet erbjuder en möjlighet att dra slutsatser om enskilda bränslestavar utan krav på demontering av elementen.

Den samlade publikationslistan för UU:s forskningsprogram inom kärnämneskontroll under åren 2014-2015 presenteras i avsnitt 7 i denna rapport. Läsare som är intresserade av att veta mer, uppmanas kontakta författarna, vilka är verksamma vid Avdelningen för tillämpad kärnfysik, Institutionen för fysik och astronomi, Uppsala universitet.

# 2. Digital Cherenkov Viewing Device (DCVD)

## 2.1 Introduktion

DCVD-instrumentet är ett av de tekniska hjälpmedel som IAEA använder vid verifiering av använt kärnbränsle i bränslebassänger. Instrumentet mäter det karaktäristiska Tjerenkovljus som uppkommer i vattnet runt mycket starka radioaktiva källor. Framtagandet av instrumentet har på många sätt drivits som ett utvecklingsprojekt snarare än ett forskningsprojekt. Därför startades ett doktorandprojekt vid Uppsala universitet utifrån målet att genomföra en vetenskapligt grundad studie av uppkomsten av Tjerenkovljus från bestrålat kärnbränsle och dess beroende av olika förutsättningar i en förvaringsbassäng. Syftet är att förbättra och vidareutveckla detektionen och evalueringen av detta ljus för att möta myndigheters krav och önskemål. En annan målsättning är att utreda möjligheterna att med bildanalys förbättra möjligheterna att detektera eventuella avvikelser av betydelse ut ett kärnämneskontrollperspektiv.

Projektet bedrivs alltså i doktorandform (doktorand Erik Branger), d.v.s. sträcker sig över fyra år i tiden med tillägg för undervisning, och påbörjades i slutet av 2013. Projektet är halvvägs när denna rapport skrivs, och framläggandet av en licentiatavhandling är planerad till hösten 2016. Som stöd till arbetet har en referensgrupp bestående av personer med erfarenhet av och intresse för DCVD-forskningen startats. Denna grupp får ta del av resultaten under projektets gång, och har möjlighet att påverka vilka och i vilken ordning forskningsfrågorna bemöts. I den här referensgruppen finns deltagare från SSM (Joakim Dahlberg), DCVD-gruppen (Dennis Parcey och Erik Sundkvist), EC (Stefano Vaccaro och Lukasz Matloch), IAEA (Davide Parise) och Uppsala universitets Centrum för bildanalys (Anders Hast).

## 2.2 Forskningsfrågor

Det finns en rad forskningsfrågor som har varit, och är, vägledande för projektet:

- Vilka kärnbränsleparametrar och -egenskaper påverkar emission av Tjerenkovljus och på vilket sätt ser den här påverkan ut?
  - Utred beroende av anrikning, utbränning och kyltid samt bestrålningshistorik
  - Utred beroendet för olika bränsletyper och bränslegeometrier
- Vilka kärnbränsleparametrar och -egenskaper påverkar Tjerenkovljusets transport från kärnbränslet och upp till detektorn?
  - Hur ser bränslestavarnas ytegenskaper ut och hur påverkar det ljustransporten – beskrivning och kvantifiering av reflektion och absorption från stavar och strukturmaterial
- De teoretiska sambanden som beskriver Tjerenkovljusets emission och detektion behöver verifieras systematiskt med mätdata

- Hur kan vi förbättra instrumentets förmåga till att bekräfta närvaron av bränsle i en bränslebassäng (gross defect detection)?
  - Utvärdering och förbättring av bakgrundsbestämning och bakgrunds-kompensation
    - Vad menar vi med bakgrund och hur mäts denna?
    - Kvantifiering av ljuset från närliggande bränslen och förslag till kompensering därav
  - Finns det andra, bättre sätt att evaluera bestrålat bränsle än med en total-intensitet?
  - I vilken utsträckning, och hur, kan analys av bilden som instrumentet tar underlätta verifieringen?
  
- Hur kan vi förbättra instrumentets förmåga till partial defect detection?
  - Metoderna för bakgrundsbestämning och -kompensation bör ses över (se även punkten ovan)
  - Hur och hur mycket påverkas Tjerenkovljusets emission och detektion om bränslestavar avleds eller ersätts?
  - Hur ser denna påverkan ut för olika bränsletyper och avledningsscenarioer?
  - Hur detekterar man bäst med hjälp av Tjerenkovljuset dessa scenarier?
  - Hur kan man verifiera bestrålat bränsle där delar av ljuset blockeras?
  - I vilken utsträckning, och hur kan analys av bilden som instrumentet tar underlätta verifieringen?
- Kan instrumentet användas utan aktiv medverkan av en inspektör ("unattended mode") och hur skulle det i så fall gå till?
- Hur kan modelleringsförfarandet utvecklas för att både utreda så många av dessa frågor som möjligt, samt för att göra beräkningarna hanterbara i termer av beräkningstid och -kapacitet?

## 2.3 Genomförande och resultat

### 2.3.1 Bildanalys

Initialt i projektet studerades redan tagna bilder av olika bestrålade bränslen, i syfte att tillsammans med forskare inom bildanalys analysera vilken information som bilden innehåller och som i framtiden skulle kunna användas i analysen. Läsare som är intresserade av att ta läsa mer om denna forskning hänvisas till bidrag [27] i publikationslistan.

Inledningsvis undersöktes vilka källor till osäkerheter som finns gällande mätningar. Bilden som är resultatet av en DCVD-mätning består t.ex. av både relevant och irrelevant information, och för att kunna uppskatta och kvantifiera Tjerenkovintensiteten krävs att man inte bara känner till, utan även kan uppskatta och helst kompensera för inverkan av andra irrelevanta ljuskällor som påverkar intensiteten eller fördelningen av ljus i bilden. Ytterligare ett flertal komponenter som påverkar mätresultatet har också identifierats. Felkällorna redovisas i tabell 1 nedan och diskuteras vidare i [27].

**Tabell 1.** Identifierade felkällor och uppskattningar av deras storlek. Baserad på tabell från [27].

Documented error sources		Error magnitude
a	Alignment	5 % on total intensity
b	Varying quantum detection efficiency	6 % on average for UV light
c	Zoom	3 % on total intensity
d	Temperature of sensor	10% $K^{-1}$
Error sources with unknown magnitude		
e	Non linear sensor response vs gain	Studied earlier
f	Vignetting	depends on lens and zoom
g	Water surface ripples	a function of pool conditions and integration time
h	Underwater turbulence	a function of pool conditions and integration time
i	Water quality	can be measured
j	Ambient light	can be measured
k	Nearest-neighbour effect	a function of the surrounding fuel, studied earlier
l	Bowed fuel assembly	different for each fuel assembly
m	Background subtraction	depends on subtraction routine
n	Vibrations	depend on measurement conditions

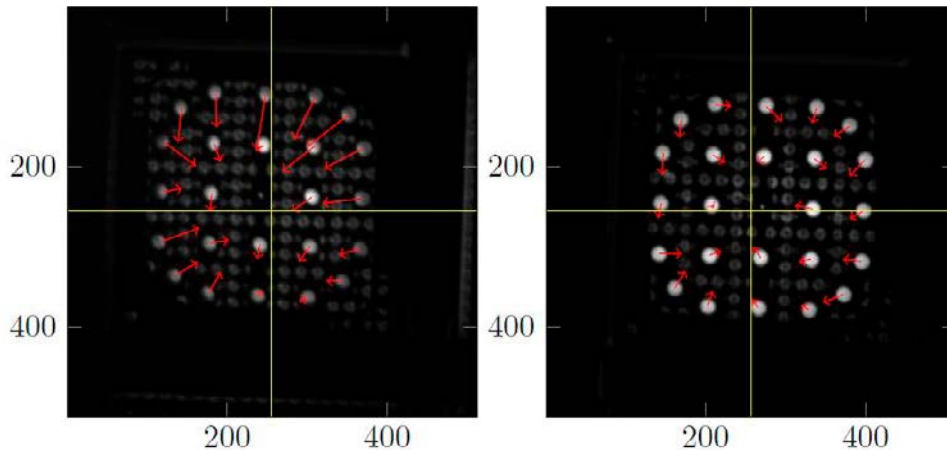
Vidare innefattade studierna i [27] en identifiering av de ljuskomponenter som tillsammans bygger upp den totala Tjerenkovintensiteten. Komponenterna benämns diffust ljus och kollimerat ljus och beskriver spritt ljus som kan härledas till det egna eller närliggande bränslen respektive ljus som med hjälp av stavarnas geometri kollimeras och riktas uppåt mot instrumentet. Den förstnämnda komponenten påverkas inte av instrumentets positionering, medan den andra i mycket stor utsträckning gör det. Distinktionen mellan och förståelsen av ljuskomponenterna kan vara mycket viktig i ett senare skede av arbetet då t.ex. bakgrundsbestämning och instrumentpositionering ska utredas vidare.

Studierna i [27] påvisar också den potentiella nyttan med att använda en kalibreringsljuskälla, då både responsen från mätningar i olika bränslebassänger och med olika instrument ger olika avläsningsvärden, vilket gör att resultat från olika mätkampanjer idag inte kan jämföras eller relateras med varandra. Genom att rutinemässigt använda en kalibreringsljuskälla vid varje mätkampanj, samt att spara bilderna från mätningarna kan man bygga upp en stor databas över instrumentresponsen på ett stort antal bränslen, vilket kan vara en stor fördel för fortsatta forskningsstudier i syfte att förstå, förklara, verifiera och förbättra metodiken och analysen.

Problem med dagens sätt att uppskatta bakgrunden i bilden uppmärksammades också inom ramen för dessa studier. Dagens bakgrundsubtraktion är mycket förenklad och består endast av att subtrahera bort intensitetsvärdet för den mörkaste pixeln i det valda bildområdet. Detta är inte bara en riskabel teknik i och med att pixeln kan vara död eller felkalibrerad, utan man kan också ifrågasätta både vad man faktiskt menar med bakgrund, var denna bör mätas/uppskattas och hur det bäst görs. Förslagsvis bör varje mätkampanj ackompanjeras av en dedikerad bakgrundsmätning, och bakgrunden bör i framtiden bestämmas i ett område som ligger utanför det aktuella bränslet och regionen från vilken bakgrunden beräknas bör vara större än en pixel. Mer detaljerade studier av såväl lämpliga metoder för bakgrundsbestämning som dessas noggrannhet är planerade inom projektets fortsättning.

Utöver dessa generella bildanalysaspekter, studerades specifikt PWR-bränslen som har en topplatta som blockerar en stor del av det Tjerenkovljus som genereras i vattnet mellan bränslestavarna. Följaktligen fokuserade studierna på den del av ljuset som dominerar bilden, dvs ljuset från ledrören. Symmetrier, eller brist på symmetrier, från ledrörsljuset

visade sig kunna indikera möjlig felaktig positionering (upplinjering) av instrumentet då ljusgradienterna undersöktes, se figur 1. I samband med detta uppmärksammades också behovet av att spara information om instrumentets inställning (framför allt zoom, avstånd till vattenyta och bränsle samt eventuell bildbehandling) tillsammans med bilderna.



**Figur 1.** Bild på två bestrålade kärnbränslen. Röda pilar markerar beräknar intensitetsgradienter i ledrören och bildens center är markerat med ett gult hårkorset. Hårkorset markerar centrum i bilden och pilarna gradienterna för ljuset i ledrören, vilka kan användas för positionering av DCVD:n [27].

Studierna visade också att man vid insamlandet av en bild med DCVD:n bör fördela datainsamlingstiden på ett större antal korta exponeringar, vilka sedan analyseras och läggs samman till en bild. Proceduren där de korta exponeringarna läggs samman bör då innefatta korrektioner för vattenturbulens och vågrörelser på vattenytan. Detta kan företrädelsevis göras med befintliga tekniker för bildbehandling inom t.ex. astronomin, där motsvarande korrektioner för turbulens i atmosfären standardmässigt görs för teleskop på jorden.

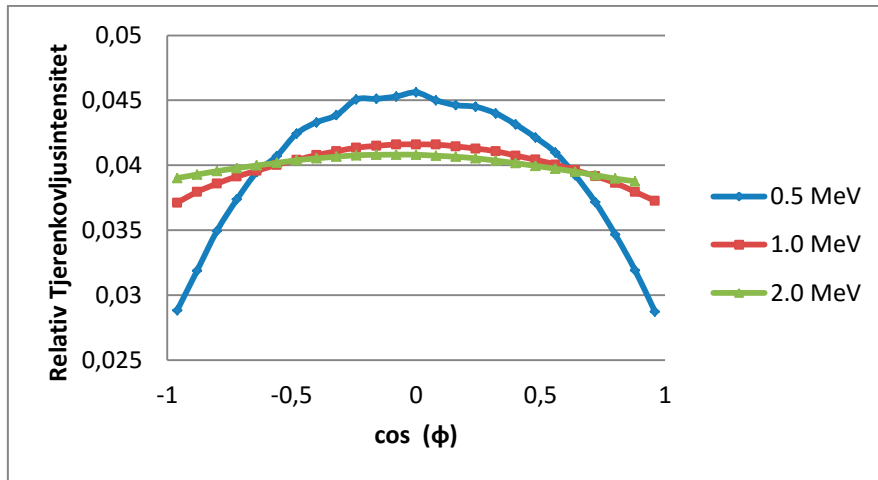
### 2.3.2 Grundläggande Tjerenkovstudier

Doktoranden har i mycket omfattande utsträckning ägnat sig åt studier av hur Tjerenkovljuset genereras från den speciella typ av objekt som kärnbränsleelement utgör. Fenomenen bakom hur joniserande strålning från bränslestavar som befinner sig i lagringsbassänger transporteras ut i vattnet för att där generera Tjerenkovljus har inte utretts i detalj tidigare, och studierna har inbegripit att sätta sig in i Tjerenkovemissionens fysikaliska grunder i syfte att bättre förstå de processer som är av betydelse. En vetenskaplig artikel som beskriver detta arbete har skickats in under våren 2016 för publikation (se [1] i publikationslistan).

Studierna har undersökt både gamma- och betastrålningsinducerat Tjerenkovljus och kommit till slutsatsen att det i första hand är gammastrålande fissionsprodukter som ger de största bidragen, men att det också finns situationer där andra bidrag behöver beaktas. Detta gäller exempelvis för bränsletyper med liten stavdiameter och tunn kapsling, där betasönderfall från primärt Y-90 är det mest betydande och det kan vid långa kyltider utgöra ett antal procent av den totala ljusintensiteten.

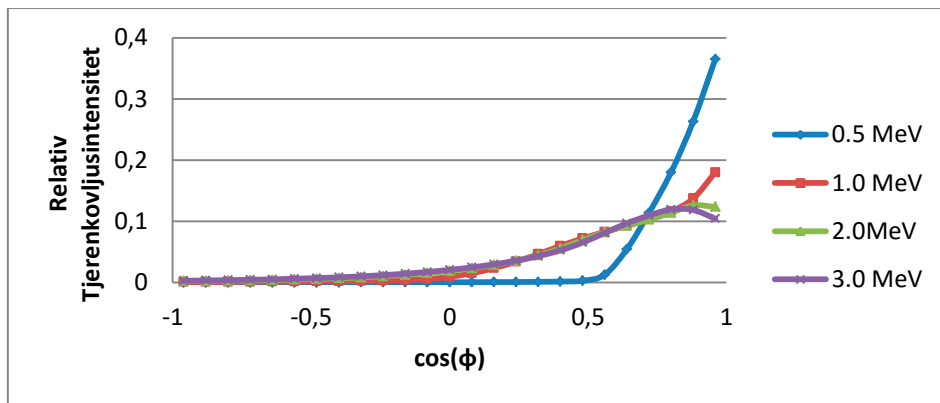
Från studierna av gammastrålning har resultat framkommit som bl.a. visat att bränslestavarnas geometri i mycket hög grad påverkar riktningen i vilken Tjerenkovstrålningen sänds ut. Även om radioaktiva sönderfall sker isotropt, gör den avlånga formen på stavarerna att den gammastrålning som går i vertikal riktning dämpas i högre grad än den som är

horisontellt riktad, vilket får som resultat att Tjerenkovljuset som skapas i vattnet inte är isotropt fördelat (se figur 2). Detta är viktigt eftersom DCVD:n mäter den vertikala ljuskomponenten.



**Figur 2.** Tjerenkovljus producerat från en bränslestav med homogent källfördelning, där vinkeln  $\phi$  är vinkeln till den upptriktade vertikala axeln, så att  $\cos(\phi) = 1$  motsvarar ljus emitterat i riktning mot DCVD:n under mätning.

Ytterligare ett beroende som ökar komplexiteten är energin på strålningen; högenergetisk strålning har en större sannolikhet att ta sig ut i vattenet och ge upphov till Tjerenkovljus jämfört med lågenergetisk strålning eftersom den inte dämpas lika mycket (se figur 3). Energifördelningen på strålningen är dock inte konstant i tiden. Hos bränslen med korta kyltider finns ett större inventarium av kortlivade radioaktiva isotoper som sönderfaller och emitterar relativt högenergetisk strålning. Detta resultat utgör ett skäl till varför man behöver ta bestrålningshistoriken i beaktande vid modellering och uppskattning av Tjerenkovljusintensiteten hos bränslen med korta kyltider, trots att detta inte behöver göras för långa kyltider där  $^{137}\text{Cs}$  är den helt dominerande källan. Denna effekt har IAEA:s inspektörer vid faktiska mätkampanjer sedan tidigare uppmärksammat, då man noterat att den existerande (och på flera sätt förenklade) modellen för att uppskatta den förväntade Tjerenkovljusintensiteten inte lämpar sig speciellt bra för just bränslen med korta kyltider. Däremot har det saknats en lämplig metod att använda istället, dock har ett förslag till sådan metod utvecklats inom ramen för detta projekt (se avsnitt 2.3.3 Anpassning av mjukvara och utveckling av ny metod för Tjerenkovljusestimering).



**Figur 3.** Vinkelberoende hos det utsända Tjerenkovljuset jämfört med riktningen för initialgammakvantat.



Gammastudierna har också visat att även bränslestavarnas diameter påverkar Tjerenkovljusets riktning där tjocka stavar resulterar i en mindre mängd Tjerenkovljus. Dessutom har Tjerenkovljuset ett tydligare riktningsberoende för låga gammaenergier (med fördel för horisontell emission) i och med att denna strålning starkt dämpas i staven.

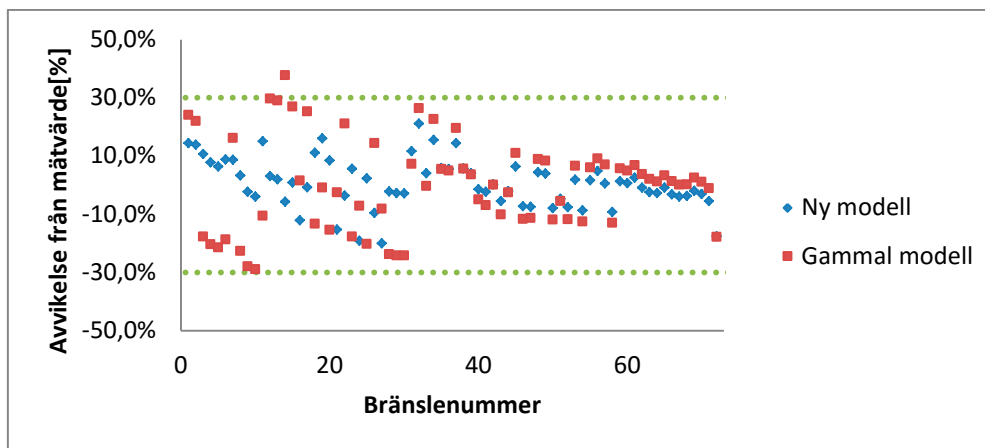
Vidare har studierna visat att fördelningen av källtermen i staven har betydelse för Tjerenkovljusets emission. Antagande om en homogen fördelning av Cs-137, som är den för långa kyltider dominerande källan till Tjerenkovljus, kontra en fördelning där Cs-137 eventuellt med anledning av höga temperaturer har migrerat till bränslestavens rand, resulterar i Tjerenkovintensiteter som skiljer sig ungefär med 5%. Eftersom eventuell migrering är okänd för en inspektör utgör detta en felkälla som kan vara svår att komma tillrätta med.

### **2.3.3 Anpassning av mjukvara och utveckling av ny metod för Tjerenkovljusestimering**

För att kunna utreda, och så småningom införa de resultat man kommit fram till i modelleringen, krävs kontinuerlig anpassning och vidareutveckling av mjukvaran som IAEA:s inspektörer använder för att prediktera den förväntade ljusintensiteten. I detta fall har mjukvaruutvecklingen har också lett till utvecklandet av en ny föreslagen metod som möjliggör ökad noggrannhet och prediktionsförmåga för beräkning av Tjerenkovljusprediktion i fält. Framför allt möjliggör den prediktering av Tjerenkovljus från bränslen med kyltider under ett år, något som hitintills inte kunnat göras på ett tillförlitligt sätt. Metoden beskrivs närmare i publikation [4].

Principen för prediktion av Tjerenkovintensiteten vid mätning i fält, som föreslås i [4], bygger på att fullskalesimuleringar av Tjerenkovljusets emission för en viss bränsletyp simuleras med en Monte Carlokod (här används Geant4) för olika energiintervall, och att resultaten lagras i ett generellt bibliotek för senare användning. I fält kan inspektören sedan mata in data för de aktuella bränslena i termer av bränsletyp, anrikning, utbränning och kyltid samt för bränslen med korta kyltider även information om hur bestålningshistoriken sett ut och på någon sekund utföra en snabb utbränningsberäkning i ORIGIN. Detta resulterar i ett källspektrum, som tillsammans med resultaten av de lagrade fullskaleberäkningarna resulterar i en mycket mer noggrann uppskattning av den förväntade ljusintensiteten. Hela proceduren genomförs på några få sekunder och ger inspektören resultaten direkt innan nästa bränsleelement undersöks.

Den nya metoden för beräkningar av Tjerenkovintensiteter har nyligen testats i jämförelser med experimentella data för en uppsättning PWR-bränslen med nio månaders kyltid. Det var en IAEA-inspektör som utförde mätningarna medan UU:s doktorand utförde beräkningarna. Resultatet av mätkampanjen var mycket lovande. Standardavvikelsen mellan beräknade och uppmätta Tjerenkovintensiteter var 8,4% för den nya metoden, medan den var 15,4% (nästan dubbelt så stor) för den hitintills implementerade metoden.



**Figur 4.** Resultat från en mätkampanj på PWR-bränslen med 9 månaders kyltid, där både den nya och den gamla prediktionsmodellen användes. Resultaten visar att den nya modellen predikterar ljusintensiteten för dessa bränslen betydligt bättre än den gamla modellen.

Detta ledde i sin tur till att inspektören med den nya metoden kom till slutsatsen att samtliga bränslens uppmätta intensiteter överensstämde med de förväntade (d.v.s. låg inom 30% från dem), medan inspektören med den gamla metoden fann att vissa uppmätta bränslen avvek mer än 30% från sina förväntade värden, vilket kan indikera partial defects.

### 2.3.4 DCVD i obehållat läge

Inför att bestrålat kärnbränsle ska placeras i ett slutförvar, ser IAEA och andra kontrollorganisationer och tillsynsmyndigheter framför sig att bränslet och dess egenskaper behöver verifieras (bl a för partial defect detection) på ett effektivt, standardiserat och tidsoptimerat vis. Detta har lett till att denna verifiering föreslås genomföras på ett automatiserat vis utan att någon människa ska behöva styra eller övervaka processen.

Då DCVD-instrumentet har egenskaper som många andra instrument saknar – såsom att inte behöva komma i fysisk kontakt med bränslet, att mät- och analystiderna är mycket korta och att den är godkänd för partial defect verifiering – är det av stort intresse att se om och i så fall hur instrumentet kan anpassas för obehållade mätningar. Av avgörande betydelse för DCVD:ns framgång här är förstås huruvida mätningar kommer genomföras i vått eller torrt tillstånd. Detta är upp till operatören SKB att föreslå och myndigheten SSM att godkänna eller inte.

Forskningen inom det här området har pekat på att det finns en rad aspekter att beakta och förbättra inför en fast installation av DCVD-instrumentet vid en eventuell inkapslingsanläggning. Bland slutsatserna i [19] kan speciellt noteras följande:

- Ett flertal källor till störningar av mätdata har identifierats, vilka man kan ta hänsyn till i en dedikerad fast installation. Detta rör t.ex. hur man kan minimera bakgrundssignaler från externa UV-källor och störningar från vibrationer, turbulens och vågor i vattnet, men också hur man kan använda en kalibreringsljuskälla för att försäkra sig om att vattenkvaliteten håller en konstant god nivå.
- Vid en obehövad mätning är det viktigt att utrustningen automatiskt kan centreras över bränslet, i linje med bränslestavarna. För detta ändamål kan bildanalys utgöra ett funktionellt verktyg, genom de metoder som presenteras i avsnitt 2.3.1 ovan.

Arbetet i sin helhet finns publicerat i [19].

## 2.4 Projektets fortsättning

Detta är som beskrivits ett pågående doktorandprojekt, och beräknas fortsätta ytterligare omkring två år med fortsatt fokus på de forskningsfrågor och forskningsområden som listats i avsnitt 2.2 Forskningsfrågor. Redan nu kan man dock konstatera att den genomförda forskningen har fått praktisk betydelse i och med att IAEA arbetar för att implementera den analysmetodik som presenteras i avsnitt 2.3.3 för att användas vid inspektion. Detta visar på ett tydligt sätt hur den bedrivna forskningen spänner hela vägen från grundläggande fysik till praktisk tillämpning.

# 3. Next Generation Safeguards Initiative (NGSI)

## 3.1 Introduktion

I USA initierades i slutet av 2008 ett stort projekt av Department of State, via National Nuclear Security Administration, som fick namnet Next Generation Safeguards Initiative (NGSI). Projektet innefattade flera kommande utmaningar för kärnkraften, där bland annat framtida kompetensförsörjning och utvecklandet av nya tekniker för verifiering av bestrålat kärnbränsle ingick. Underprojektet kopplat till just utvecklandet av nya tekniker för kärnbränsleverifiering går under namnet NGSI-Spent Fuel (NGSI-SF), och har med tiden förlängts från att initialt vara femårigt.

I samarbete med Los Alamos National Laboratory (LANL), som ledde just NGSI-SF, initierade UU i början av 2013 ett doktorandprojekt i syfte att forska kring en av initialt 14 icke-förstörande tekniker som bedömts vara lovande. Tekniken heter Differential Die-Away (DDA), och är en aktiv neutronteknik som använder sig av en neutronkälla för att bestråla det använda kärnbränslet i syfte att bestämma plutoniuminnehåll, bränsleparametrar och huruvida bränslet i fråga lider av partial defects eller ej. Doktoranden finansieras helt av Uppsala universitet och LANL; SSMs forskningsbidrag täcker delar av handledningen.

## 3.2 Forskningsfrågor

Liksom för de övriga NGSI-SF-teknikerna är den övergripande frågan för DDA-tekniken, huruvida plutoniuminnehållet i det bestållade bränslet kan bestämmas med denna metod. Om svaret på den frågan är ja, ställs följdfrågorna hur väl detta låter sig göras och under vilka omständigheter.

Utöver denna huvudfråga finns andra, idag högst aktuella, frågor som utreds och kommer att fortsätta utredas:

- Kan det totala fissila innehållet i ett bränsleelement kvantifieras med denna metod? Om ja, hur väl och under vilka omständigheter?
- Kan bränsleparametrarna initial anrikning (IE), utbränning (BU) och kyltid (CT) bestämmas? Kan parametrarna verifieras?
- Hur väl kan tekniken upptäcka partial defects för en rad olika avledningsscenarior (ersättning eller bortplockning och på vilken nivå)?
- I och med att SKB med tiden engagerat sig i NGSI-SF och utvecklat ett eget samarbete står numera också frågor om restvärmebestämning och kriticitet på agendan.

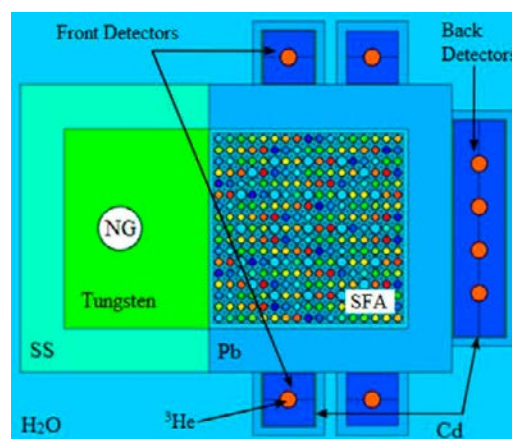
Studierna kring teknikerna har hitintills förlitat sig på i huvudsak simuleringar med den etablerade simuleringskoden MCNP, inte minst med tanke på att MCNP-koden utvecklas av LANL och att de har väldigt stora möjligheter att anpassa koden för nya behov. Från

UU:s sida ligger vår styrka och erfarenhet mer på det praktiska planet och är kopplat till framtagandet av instrument, testmätningar på faktiskt bränsle och på utvärdering av mätdata. Således är vi mycket intresserade av att instrumentet eller en prototyp konstrueras och testas så att man kan validera instrumentets påstådda egenskaper, upptäcka brister och eventuellt åtgärda dessa. I dagsläget saknas t.ex. helt information eller uppskattningar om systematiska osäkerheter och därmed mätnoggrannhet. Men framför allt baserar sig bestämningen av såväl fissilt material som bränsleparametrar på en underliggande teoretisk modell där bränslet som studerats har bestrålats och flyttats runt i reaktorn under exakt definierade (snarare än realistiska) former. Vidare har endast begränsade simuleringar gjorts av instrumentets respons på BWR-bränslen, då det i huvudsak är PWR-bränslen som studerats inom NGSI.

## 3.3 Genomförande och resultat

### 3.3.1 Studier av instrumentrespons på asymmetriskt utbrända bränslen

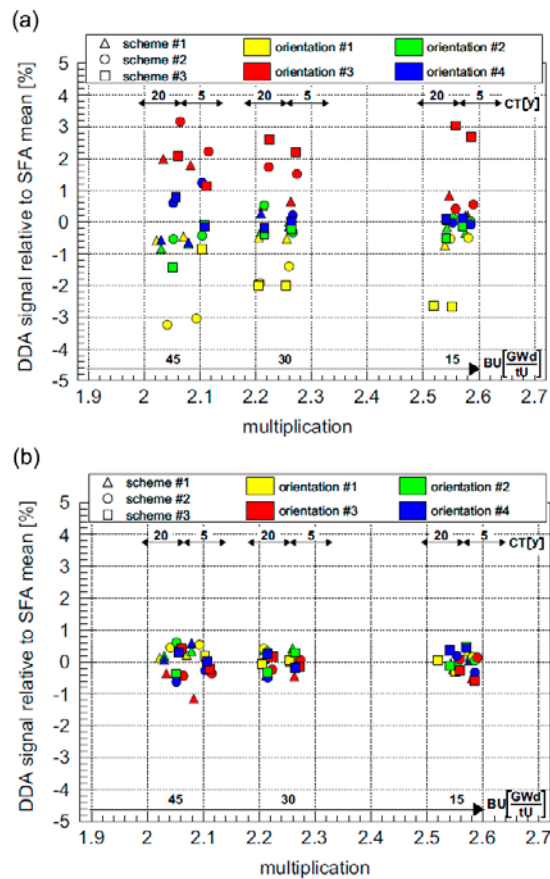
Initialt studerades inom ramen för projektet hur DDA-tekniken responderar på bränslen med asymmetrisk utbränning (se [5] i publikationslistan). Det är mycket möjligt att det kan finnas en utbränningsgradient för bränslen i härden och att den är olika stor beroende på hur bränslet har flyttats och vilket neutronflöde det har utsatts för under sin livstid. Detta kommer i sin tur att resultera i en gradient hos en rad olika isotoper som är av betydelse för DDA-instrumentets respons, såsom exempelvis U-235, Pu-239 och Gd-155. DDA-tekniken bygger på att bränslet från en sida utsätts för ett flöde från en neutronkälla, och att fission kommer induceras i bränslet så att neutroner kan detekteras på tre sidor runt om bränslet (se figur 5). Beroende på om neutronkällan sitter mot sidan som har hög eller låg utbränning, kommer detektorerna runt om att mäta olika stor DDA-signal (totalt antal detekterade neutroner).



Figur 5. Illustration av DDA-instrumentet som användes vid studierna av asymmetriskt utbrända bränslen [5].<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Reprinted from Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, Volume 788, T. Martinik, V. Henzl, S. Grape, S. Jacobsson Svärd, P. Jansson, M.T. Swinhoe, S.J. Tobin, Simulation of Differential Die-Away instrument's response to active interrogation of asymmetrically burned spent nuclear fuel, Pages 79-85, (2015), with permission from Elsevier.

LANL har för NGSF-studierna tagit fram olika bränslebibliotek innefattande bränslen med olika egenskaper. I den här studien undersöktes bränslen med 4% anrikning, en utbränning av 15, 30 eller 45 GWd/tU och en kyltid av fem eller 20 år. Dessutom var bränslena utsatta för olika tre olika omflyttningsscenarioer i reaktorn. Det som undersöktes var instrumentresponserna från alla fyra olika sidor av bränslet, och man kunde konstatera att detektorerna är olika känsliga för asymmetrin i utbränning och specifikt att de två detektorerna närmast neutronkällan uppvisar stor variation på uppemot 4% i DDA-signal för olika rotationer, medan de bakre fyra detektorerna är nästan helt okänsliga för samma sak (se figur 6).



**Figur 6.** Resultaten från asymmetristudierna där man i a) ser den simulerade responsen för de främre detektorerna och i b) responsen för de bakre detektorerna [5].<sup>1</sup>

Även den så kallade Die-Away-tiden, vilken beskriver hur snabbt den inducerade signalen avtar, påverkas av asymmetrin. De främre två detektorerna påvisar åter igen en mycket större spridning, medan de bakre detektorerna igen är relativt okänsliga. Dessa två olika beteenden för de främre och bakre detektorerna beror troligtvis på att de bakre detektorerna detekterar neutroner som gått igenom hela bränslet och därmed passerat den fulla gradienten, medan de främre detektorerna i större utsträckning bara detekterar neutroner som gått igenom ett mycket litet gradientområde.

### 3.3.2 Anpassning av DDA-instrumentet för olika applikationer

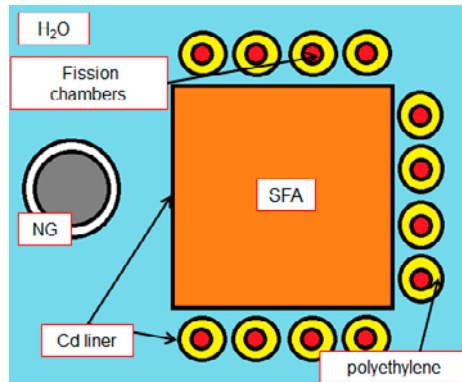
DDA-instrumentets design har över tiden utvecklats och anpassats för olika syften. En dedikerad studie (se [18] i publikationslistan) gjordes och presenterades på IAEA-

symposiet 2014 inom ramen för doktorandprojektet och rörde olika applikationer och geometrier för instrumentet.

Framför allt presenterades tre designalternativ för DDA-instrumentet, utöver ”standardinstrumentet”:

- En portabel instrumentdesign
- En minimalistisk design
- En dedikerad partial defect-design

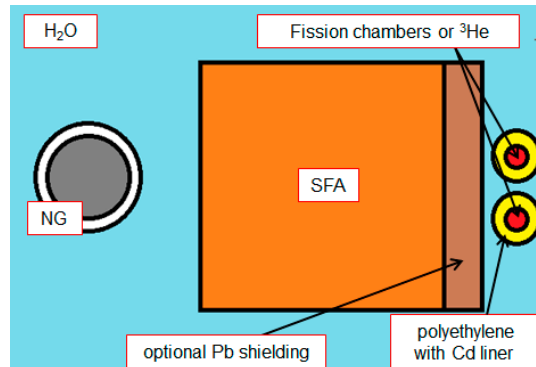
Det *portabla instrumentet* (se figur 7) saknar i huvudsak två tunga komponenter jämfört med standardinstrumentet, i syfte att underlätta transport av instrumentet. Denna instrumentdesign saknar helt blyskärmning för detektorerna och s.k. tailoring-material för neutrongeneratorn. Det sistnämnda har till uppgift dels att i viss mån sakta ner neutronerna från neutronkällan, och dels att eventuellt boosta neutronsignalen genom (n,2n)-reaktioner.



Figur 7. Illustration av det portabla instrumentet [18].

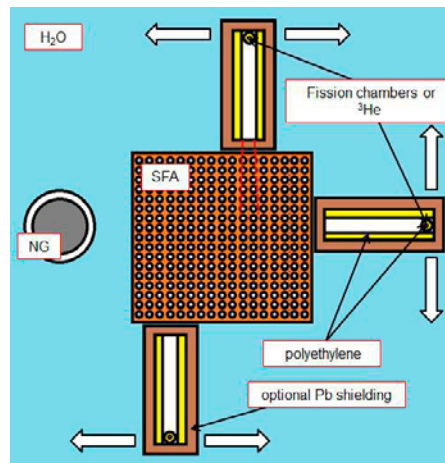
Effekten av att skärmningsmaterialet runt detektorerna tas bort är att de kommer utsättas för en betydligt högre räknehastighet, vilket  $^3\text{He}$ -detektorerna inte klarar av. Således har de i den här designen bytts ut mot fissionskammare, med en detektionseffektivitet på ungefär en hundradel av den hos  $^3\text{He}$ -detektorerna. Effekten av att tailoringmaterialet tas bort och ersätts med vatten är att neutronspektrumet förändras. Beroende på hur långt bort från bränsleknippet som neutronkällan placeras, kommer neutronerna att modereras mer eller mindre. Dessutom kan det hända att neutroner reflekteras tillbaka in i bränsleknippet efter att ha tagit sig ut i vattenet, vilket i sin tur kan leda till ett oönskat beteende hos DDA-signalen. En lösning på detta problem kan vara att införa ett kadmiumfilter längs bränslesidan mot neutrongeneratorn.

Den *minimalistiska designen* (figur 8) har utöver bortplockad skärmning också betydligt färre detektorer än standardinstrumentet. Syftet med det här instrumentet är att ta fram en så robust version som möjligt till en så låg kostnad som möjligt. Det kan eventuellt komma att efterfrågas om rutinundersökningar förutses i anläggningar där detaljerad information om bränslet inte efterfrågas. Att just de två bakersta detektorerna har behållits innebär i praktiken att instrumentet blir känsligt för generella bränsleegenskaper (globala), men kommer sakna känslighet för bränsleknippets olika (lokala) delar.



Figur 8. Illustration av det minimalistiska instrumentet [18].

*Partial defect designen* (figur 9) är en instrumentdesign med en detektor som flyttas runt instrumentet. Man har gjort denna design avsiktligt känslig för bränsleknippets olika delar genom att sätta en kollimator framför detektorn. Genom att klä kollimatorns sidor i polyetylen utformas den så att endast signaler från ett mycket lokalt område, i princip två bränslerader, i bränsleknippet når detektorn.



Figur9. Illustration av partial defect instrumentet [18].

Eftersom användandet av en kollimator kraftigt kommer att begränsa räknehastigheten föreslås detektorerna utgöras av  $^3\text{He}$ -detektorer och inte fissionskammare. Instrumentet föreslås användas i ett scanningsmod längs bränsleknippets olika sidor för att på så sätt detektera förändringar i signalstyrka, vilket kan påvisa partial defects.

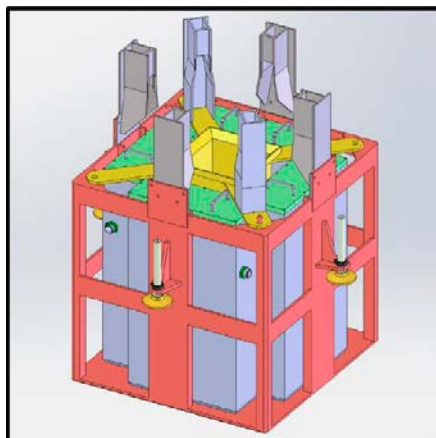
### 3.3.3 Framtagande av en DDA-prototyp för Clab

Under projektets senaste fas har fokus varit att ta fram en prototypdesign av DDA-instrumentet som kan komma att bli aktuell för montering och användande i det svenska mellanlagret Clab. (För detaljer, se [2] i publikationslistan.) Dessa studier har varit helt inriktade på att ta fram det för DDA-metoden bästa resultatet, även om DDA-instrumentet troligtvis (om det kommer användas) kommer att integreras med andra mättekniker och således få en annan design. Redan då dessa studier genomfördes var det känt att önskemål fanns om integrering med det så kallade DDSI-instrumentet<sup>2</sup>. P.g.a. detta förutsattes det i

<sup>2</sup> DDSI betyder Differential Die-Away Self Interrogation. DDSI-tekniken påminner om DDA, men den används utan en yttre neutronkälla och baseras istället på spontan fission från bränslet självt.



de här studierna att den mekaniska konstruktionen som föreslagits för DDSI-instrumentet också skulle gälla här (se figur 10).



Figur 10. Illustration av instrumentet i sin mekaniska ram [2].<sup>3</sup>

Det ingår en mängd olika komponenter i ett DDA-instrument och för att optimera DDA-instrumentet som helhet behöver varje komponent utredas både individuellt och i grupp. De komponenter som studerades i detta skede var neutrongeneratorns intensitet, användande och skärmning; detektortyp, detektordimensionering och detektorskärmning med hänsyn tagen till det förväntade neutronflödet samt utfyllnad av gap mellan bränsleknippe och instrument.

I de undersökningar som redovisas i mer detalj i publikation [2] genomfördes MCNP-simuleringar för att beräkna det förväntade neutronflödet (framför allt maxvärdet) i <sup>3</sup>He-detektorerna samt för att ta fram förväntade värden på signal-till-bakgrundkvoten i detektorerna. Studier av neutronflödet kring bränsleknippet och detektorerna genomfördes för två extremfall av bränsleknippet – ett med hög utbränning (60 GWd/tU) och ett med låg utbränning (15 GWd/tU) – och för olika neutrongeneratorpulser (pulslängder i intervallet 01-90  $\mu$ s). Resultaten visade att det är en fördel att ha små detektorer så att inte detektionsraten blir för hög, och att små detektorer dessutom kan möjliggöra mer avgränsade mätningar i vertikal ledd. Dessutom visade simuleringarna att pulslängden förslagsvis bör vara omkring 50  $\mu$ s för en design liknande den undersökta för att ge ett bra signal-till-bakgrundsförhållande och samtidigt möjliggöra en bra pulsseparation. Simuleringarna visade också att detektorerna behöver skärmning för att inte mätas av signaler. I detta fall gäller det att hitta en bra avvägning mellan att få en tillräckligt hög signalstyrka för att inte förlora värdefull information, samtidigt som störande signaler från omgivningen behöver begränsas. Utifrån simuleringsresultaten bedömdes en fem cm tjock blyskärm vara tillräcklig för ändamålet. Även neutrongeneratorn behöver skärmning för att inte degraderas av gammastrålning från de bränsleknippet som mäts eller befinner sig i omgivningen. Simuleringar av olika skärmmingsmaterial och tjocklekar resulterade i ett förslag på att tre cm wolfram ska placeras mellan neutrongeneratorn och bränsleknippet. Detta innebär att neutronkällans position flyttas längre bort från både bränsleknippet och detektorerna, vilket i sin tur försämrar signal-till-bakgrundsförhållandet något, men studier visar att försämringen ligger på en acceptabel nivå.

<sup>3</sup> Reprinted from Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, Volume 821, T Martinik, V. Henzl, S. Grape, P. Jansson, M. Swinhoe, A.V. Goodsell, S.J. Tobin, *Design of a Prototype Differential Die-Away Instrument proposed for Swedish Spent Nuclear Fuel Characterization*, Pages 55-65, (2016), with permission from Elsevier.

Begränsade simuleringar gjordes också kring användandet av ett tunt kadmiumfilter runt bränsleknippet, i syfte att förhindra att neutroner läcker ut från bränslet, termaliseras i vattnet och återvänder in i bränslet. Simuleringarna visade att betydelsen av kadmiumfilter växer om ett stort vattengap omger bränsleknippet, men att effekten av det vid ett smalt vattengap ( $<1$  cm) är nästintill försumbar.

Utöver dessa designaspekter av instrumentet som har simulerats, noterades det att man behöver en extra neutronflödesmätare för att verifiera neutronflödet från neutronkällan både under specifika mätkampanjer, samt över tiden för att få en indikation på om prestandan försämras. Förmodligen är den bästa positionen för den detektor som behöver implementeras strax bakom neutrongeneratoren, i riktning bort från bränsleknippet. Dessutom poängterades det i [2] att studierna hitintills rört PWR-knippen, medan den överväldigande majoriteten av bränslen på Clab är BWR-bränslen. Det finns indikationer på att instrumentresponserna även kommer vara god för dessa bränslen, men det återstår att se i dedikerade BWR-simuleringar och framför allt vid faktiska mätningar på denna typ av bränsle.

### **3.4 Projektets fortsättning**

UU:s deltagande i det internationella samarbetet inom NGSi-projektet kommer fortsätta men det är i dagsläget oklart under vilka former. Forskningen har hitintills pekat på ett stort fortsatt behov av både simuleringar men framför allt faktiska mätningar och verifiering av simulerade resultat och metoder. Utvecklingen av en prototyp för Clab fortgår. Forskningsfrågorna identifierade i anslutning till projektet är fortfarande högst aktuella och kommer driva även arbetet i fortsättningen.

# 4. Verifiering av atypiska bränsleobjekt

## 4.1 Introduktion

Genom den svenska kärnkraftdriftens historia har det hänt att bränsleelement har rekonstruerats på olika sätt, t.ex. med anledning av bränsleskador eller i syfte att återanvända de stavar som har kunnat återinföras i reaktorn. I samband med detta har stavar samlats i olika skelett som har bildat nya objekt, vilka nu finns på CLAB och på kärnkraftverken. Dessa objekt benämns ofta ”atypiska bränsleobjekt” och ter sig vid en första anblick snarlika vanliga bränslepatroner, men de kan innehålla stavar med helt olika utbränning, kyltid, bestrålningshistorik och initialanrikning, vilka utgör en utmaning att verifiera ur ett kärnämneskontrollsperspektiv. Andra utmaningar avseende dessa objekt gäller viktiga parametrar för slutförvaret, såsom resteffekt och kriticitet. Rapporten som beskriver detta arbete finns listad som [25] i publikationslistan och har tagits fram av en av UU:s seniora forskare.

## 4.2 Forskningsfrågor

Det finns en mängd frågor kring de atypiska bränsleobjekten och deras verifiering. Innan man kan yttra sig om möjliga mättekniker som kan komma att användas behöver man en hel del bakgrundsinformation om objekten i fråga.

Dessa frågor är t ex:

- Hur ser de atypiska objekten ut (dimension, topplatta och strukturmaterial, stavantal, vattenkanaler etc.)?
- Hur många är de till antal och var finns de?
- Vilka egenskaper har bränslestavarna som finns i kassetterna?
- Vilket spann finns på bränsleparametrarna inom samma och mellan olika stavskelett?

Därefter kan man börja undersöka sakfrågan om bränslets verifiering:

- Vad vill man verifiera när det gäller dessa kassetter?
- Har kassetterna verifierats förut och hur?

Tillslut kan själva forskningsfrågorna adresseras:

- Med vilka tekniker eller instrument kan dessa bränsleobjekt verifieras?
- Vilken noggrannhet/konfidens kan teknikerna ge?
- Finns det några begränsningar i teknikernas användning?

## 4.3 Genomförande och resultat

### 4.3.1 Bakgrundsinformation och verifieringsbehov

En tidig avgränsning i studien blev att enbart försöka titta på atypiska bränsleknippen som idag lagras på Clab. Utöver dessa finns det s.k. bränslerester från skadade bränslen, som idag lagras i Studsvik, vilka alltså inte ingått i denna studie. Det visade sig vara relativt svårt och ta lång tid att få information om objekten, men till slut visade en översikt att det rörde sig om

- c:a 10 så kallade ”stavskelett” från Forsmark 1-reaktors initialhärd, med stavar ihopsatta med nya spridare och topplatta,
- ett dussintal skadade eller läckande stavar ihopsatta i ett ”stavskelett”,
- c:a 10 stavmagasin utan jordbävningsklack som inte går att placera i en så kallad ”H-kassett”,
- enstaka stavmagasin med böjda/sneda stavar, och
- c:a 20 andra objekt för vilka beskrivning i dagsläget saknas.

För ett av stavskeletten var det möjligt att få lite mer detaljerad information som avslöjade hur många stavar det rörde sig om, var i skelettet de satt och vilken anrikning, utbränning och kyltid de hade. Dessa stavar var placerade i en 8x8-geometri där totalt 35 till synes slumpmässiga positioner var fyllda av stavar. Stavarnas nominella anrikning var antingen 1,18% eller 1,98% och den angivna medelutbränningen för stavarna varierade mellan 7 730 MWd/tU och 13 800 MWd/tU<sup>4</sup>. Stavmagasinet hade ett lock som omöjliggjorde visuell verifiering och en notering fanns om att verifiering idag sker med hjälp av en så kallad SFAT-mätning. Kyltiden på stavarna var knappt 35 år.

Gällande verifieringen angavs inga speciella önskemål; utgångspunkten var att man troligtvis kommer att vilja verifiera operatörens uppgifter så noggrant som möjligt. Vid verifiering av (typiska) bränsleobjekt är man intresserad av att verifiera ”correctness” (operatörens deklarerade uppgifter om bränsleparametrarna anrikning (IE), utbränning (BU) och kyltid (CT)) och ”completeness” (att objektet är intakt och fullständigt, innefattar eventuellt också partial defect detektion).

Med den knapphändiga informationen som fanns tillgänglig om det enstaka stavskelettet var det inte möjligt att yttra sig generellt om hur verifiering kan komma att ske, men en översikt av tillgängliga instrument och instrument under utveckling gjordes enligt nedan.

---

<sup>4</sup> Värden från SKB-dokument om bränsledata till ”B2 – Stavar uttagna 1980 och 1981”

### 4.3.2 Mättekniker och instrument

Följande instruments mätprinciper och kapaciteter gicks igenom, enligt uppdelningen i olika kategorier som görs av IAEA: medelupplöst  $\gamma$ , neutron/ $\gamma$ , Tjerenkov, passiv koincidens, intensitetsskanning och obemannad övervakning. Dessvärre innefattar ingen av de tre sistnämnda kategorierna instrument som används för att just verifiera använt kärnbränsle, men inom ramen för de första tre kategorierna finns följande instrument för närvarande tillgängliga<sup>5</sup>:

- medelupplöst  $\gamma$ 
  - IRAT – Irradiated fuel attribute tester
  - SFAT – Spent fuel attribute tester
- neutron/ $\gamma$ 
  - FDET – Fork detector
  - SMOPY – Safeguards MOX python
- Tjerenkov
  - DCVD – Digital Cherenkov Viewing Device.

Parallellt med användandet av de redan existerande teknikerna pågår utveckling av nya tekniker som på något sätt ska komplettera de som redan finns. Det kan t ex handla om att teknikerna ska vara mer noggranna, kunna mäta något som inte mäts idag, eller att de ska kunna mäta flera saker samtidigt. Ett exempel på var utveckling sker av nya och fler sådana tekniker är t.ex. inom ramen för NGSF projektet (se avsnitt Next Generation Safeguards Initiative (NGSI)).

Vid redovisningen av teknikerna som är under utveckling inom NGSF projektet delades de in i två kategorier: lätta och mobila tekniker, samt fysiskt sett större, dyrare och potentiellt noggrannare tekniker. En redovisning av dessa tekniker, och andra, finns tillgänglig i en rapport<sup>6</sup> från Los Alamos National Laboratory i USA. I denna studie har elva tekniker under utveckling beaktats, varav åtta är neutrontekniker och tre är gammatekniker. Av de åtta neutronteknikerna är två passiva (DDSI, PNAR-FC) och sex aktiva (CIPN, DDA, DN, LSDS, NRTA, SINRD). Av de tre gammateknikerna är två passiva (XRF och GET) och en aktiv (DG). Till skillnad från en passiv teknik kräver en aktiv teknik någon form av extern källa som interagerar med objektet, det kan t ex vara en neutrongenerator.

Eftersom huvuddelen av dessa mättekniker eller instrument är under utveckling saknas information om huruvida de alls i framtiden kommer byggas och med vilken noggrannhet de kommer kunna ge mätdata, även om simuleringsstudier har utförts och kan ge indikationer. En teknik där utvecklingen har kommit längre är GET (gammaemissionstomografi) där mätningar har genomförts bland annat med en prototyp som har utvecklats specifikt för kärnämneskontrolländamål, med goda resultat<sup>7</sup>.

<sup>5</sup> IAEA, *Safeguards Techniques and Equipment: 2011 Edition*, International Nuclear Verification Series No. 1 (Rev. 2), 2011

<sup>6</sup> S. J. Tobin, P. Jansson, "Nondestructive Assay Options for Spent Fuel Encapsulation", Report LA-UR-13-22050. I denna rapport redovisas bl.a. följande tekniker: Differential Die-Away Self-Interrogation (DDSI), Passive Neutron Albedo Reactivity with Fission Chambers (PNAR-FC), <sup>252</sup>Cf Interrogation with Prompt Neutron Detection (CIPN), Differential Die-Away (DDA), Delayed Neutron (DN), Lead Slowing Down Spectrometry (LSDS), Neutron Resonance Transmission Analysis (NRTA), Self-Integration Neutron Resonance Densitometry (SINRD), X-Ray Fluorescence (XRF), Gamma Emission Tomography (GET) och Delayed Gamma (DG).

<sup>7</sup> F. Levai, T. Honkamaa, et al., "Evaluation of an exercise on testing the Prototype Tomographic system at the VVER NPP Lovisa," report (2014)

### 4.3.3 Rekommendationer från studien

Sammanfattningsvis pekade studien på ett antal rekommendationer:

- IRAT och SFAT kan användas för att påvisa närvaro av bestrålat bränslestavar, men inte för att verifiera korrekthet i bränsleparametrarna eller att objektet är intakt.
- FDET-detektorn (eller den förbättrade versionen av instrumentet som är under utveckling) kan för normala bränslen verifiera operatörsdata, men det är tveksamt hur användbar en mätning på detta objekt blir eftersom neutronsignalen kommer vara mycket svag och själva mätscenariot ligger långt ifrån det användningsområde som är typiskt för FDET. FDET ger dessutom endast två eller tre numeriska värden som resultat från en mätning, och från dessa måste inspektören göra en egen tolkning, vilket förmodligen kommer bli mycket svårt i det här fallet. Studier visade att verifiering av att bränsleparametrarna är korrekta och att bränslet är intakt kan förmodligen inte genomföras för det här studerade atypiska bränslet med hjälp av FDET.
- SMOPY-detektorn är inte aktuell efter som bränslet inte innehåller MOX-bränsle.
- DCVD:n är inte heller aktuell för verifiering då det saknas fri siktlinje till bränslet.
- Passiv gammaemissionstomografi skulle kunna vara ett verifieringsalternativ, eftersom man ser ett tvärsnitt av bränslet och därigenom kan avgöra om den deklarerade stavkonfigurationen är korrekt eller inte. Kvantitativ mätning av stavaktiviteterna borde också kunna göras, och därifrån kan man få en uppskattning av bränsleparametrarnas korrekthet, åtminstone stavarnas utbränning. Ett tomografiinstrument är under utveckling inom IAEA:s stödprogram, och kallas PGET<sup>8</sup>.
- Högupplöst gammaspektroskopi är en annan verifieringsmöjlighet, men en begränsad sådan eftersom tekniken ger ett medelvärde av responsen från hela bränslet, och bränslet är i det här fallet ett hopplöck av flera olika bränslen med olika egenskaper och historiker. Gammaspektroskopi kan således användas för att påvisa närvaron av nukleärt material, men inte för att verifiera korrekta bränsleparametrar eller att bränslet är intakt.

Man kan också tänka sig att verifiering skulle kunna göras längre fram i tiden med hjälp av instrument som i dagsläget är under utveckling. Detta blir naturligtvis i hög grad spekulativt, i och med att vi inte vet om något och i så fall vilket instrument som kommer vara tillgängligt, än mindre känner vi till dess detektionsförmåga och känslighet i praktiken. Fördelen med de tekniker som är under utveckling är att ett troligt instrument skulle komma att innefatta flera olika detektionstekniker, och att man via ett intelligent dataevalueringsystem borde kunna kvantifiera fler egenskaper hos det atypiska bränsleobjektet än vad man kan med dagens instrument som typiskt är begränsade till en egenskap.

---

<sup>8</sup> Honkamaa T, Levai F, Turunen A, Berndt R, Vaccaro S, Schwalbach P, "A Prototype for passive gamma emission tomography". 2014 IAEA Safeguards symposium

## 4.4 Projektets fortsättning

Det finns ett behov av att identifiera vilka tekniker som är lämpligast för att verifiera atypiska bränsleobjekt, men med tanke på den pågående utvecklingen inom området så kan det vara lämpligt att avvakta med att avgöra vilken teknik som ska användas. Den teknik som i dagsläget ser ut att ha störst potential är GET, men dess användbarhet beror i hög grad på utkomsten av det pågående arbetet med PGET och liknande projekt.

Under de kommande åren kommer dock forskargruppen i Uppsala att studera hur så kallad multivariat dataanalys (MVA) kan användas för att kombinera olika signaler för att på bästa sätt bestämma egenskaperna hos typiska och atypiska bränsleobjekt vid t.ex. CLAB. Signalerna kan t.ex. utgöras av uppmätta intensiteter av gammastrålning vid olika energier och/eller neutronbaserade mätdata.

# 5. Generation IV

## 5.1 Introduktion

Generation IV kärnkraftssystem (Gen IV) är ett forskningsområde under framväxt hos UU. Under 2009 kom ett stort forskningsbidrag från Vetenskapsrådet (VR) till UU, Chalmers och KTH kopplat till detta område, och forskningen pågick under de följande fyra åren inom ramen för det s.k. Geniusprojektet. Ytterligare forskningsmedel fördelades ut år 2011 och 2013 av VR för forskningssamarbeten med franska forskare gällande Frankrikes Gen IV-program inom ramen för ett svenskt-franskt samarbetsavtal på kärnteknikområdet. Sedan dess har dock ytterligare nationella utlysningar av finansiering inom Gen IV-området uteblivit, främst mot bakgrund av att ingen svensk forskningsfinansiär ser detta som ”sitt” ansvarsområde.

Generation IV kärnkraftssystem omfattas av sex olika reaktorkoncept (högtemperaturreaktorer, saltmältereaktorer, natriumkylda snabbreaktorer, blykylda snabbreaktorer, reaktorer med superkritiskt vatten, och gaskylda snabbreaktorer), och associerad bränsleåtervinning och bränsletillverkning. Det finns väldefinierade mål med systemen som omfattar både hållbarhetsperspektiv, säkerhetsaspekter, ekonomi och icke-spridning/kärnämneskontrollfrågor. Tanken är att systemen måste vara konkurrenskraftiga inom alla dessa områden för att i framtiden kunna hävda sig i konkurrensen med övriga energisystem. Denna rapport beskriver studier gjorda av seniora forskare vid UU, där fokus ligger på kärnämneskontroll och nukleära icke-spridningsaspekter.

## 5.2 Forskningsfrågor

Med avstamp i det doktorandprojekt inom kärnämneskontroll vid UU som ingick i Geniusprojektet, har UU:s forskare under 2014-2015 bedrivit forskningsverksamhet kopplad till Gen IV med fokus på följande forskningsområden eller forskningsfrågor:

- Vad bör man tänka på när man utformar kärnämneskontrollsystemen för Gen IV-system, med tanke på de möjligheter som ges att införliva kärnämneskontrollen redan under Gen IV-systemens designfas, s.k. ”Safeguard-by-design”?
- På vilket sätt skiljer sig kärnbränslecykeln för Gen IV från Gen II/III-reaktorer och vilka implikationer får det på kärnämneskontrollen?
- Vilka nya möjligheter medför Gen IV systemen med avseende på kärnämneskontrollen, och hur tar man bäst tillvara på dessa?
- Var finns de största riskerna för avledning eller missbruk av material eller teknologier?
- Hur kan vi uppmärksamma dessa svagheter så att de bemöts?
- Hur kan vi verka för att åtgärda svagheter?
- Vilka nya instrument, mätmetoder eller analystekniker kan man tänka sig behöver tas fram för att möta det framtida behovet av kärnämneskontroll för Gen IV-system?



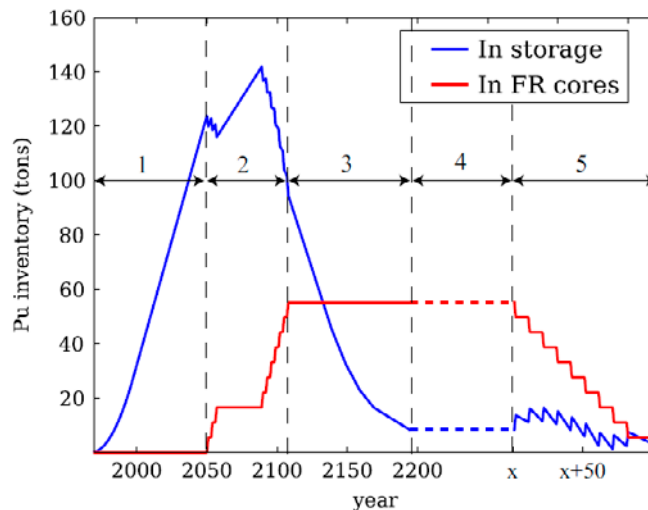
## 5.3 Genomförande och resultat

### 5.3.1 Resurshushållning och avfallsförbränning med Gen IV-system

Som kortfattat nämnts i introduktionen kan en rad fördelar med Gen IV-system identifieras. Exempel är att bidra till uppfyllande av globala klimatmål genom att erbjuda ett koldioxidsnålt elproduktionsalternativ, och att utreda hur systemen kan bidra till icke-spridning av kärnvapenmaterial genom att erbjuda ett sätt att förbränna plutoniumreserver. Just det sistnämnda är en sällan diskuterad fördel med Gen IV-system. Detta material produceras under drift av Gen II- och Gen III-reaktorer och även om en viss förbränning också sker, blir nettoeffekten ett överskott. Dessutom finns i dagsläget lagrat plutonium som framställts i dedikerade anläggningar för kärnvapenändamål. Det finns således idag ett överskott av plutonium, men inget kontrollerat och civilt sätt att göra sig av med materialet, vilket riskerar att utgöra en potentiell säkerhetsrisk under överskådlig framtid.

Världens tillgångar av plutonium har varit fokus för ett projekt som pågått vid UU under 2014, och som resulterade i en publikation i tidsskriften Energy Policy [8]. Inom ramen för projektet lyftes Gen IV-målen fram för att peka på systemens kapacitet att minska världens lager av plutonium. I exemplet valdes ett scenario där ett litet land med tio lättvattenreaktorer (LWR), var och en med en produktion av 1 GW(e), vill behålla sin nivå av elproduktion och samtidigt från och med år 2050 övergå till en mer hållbar kärnkraftproduktion av Gen IV-typ.

*Fem faser* för kärnkraften identifierades i detta exempelscenario. Den *första fasen* sträcker sig fram till och med år 2050 och utmärks av att lättvattenreaktorer (LWR) används för elproduktion. Under denna tid kommer avfallsmängden att öka. Den *andra fasen* inleds 2050 då de första snabbreaktorerna tas i bruk och börjar ersätta lättvattenreaktorerna. Snabbreaktorerna kommer initialt att köras i så kallad burnermode för att konsumera det plutonium som byggts upp av LWR-driften. Nettoeffekterna av snabbreaktorernas konsumtion och lättvattenreaktorernas produktion kommer bli en måttlig ökning av plutonium under den här fasen. Under den *tredje fasen*, som startar omkring år 2100, ersätts alla återstående LWR med snabbreaktorer som körs i burnermode, och som följd kommer plutoniumlagren snabbt att minska. Under den *fjärde fasen*, som startar omkring år 2200 då nästan allt producerat plutonium konsumerats kommer snabbreaktorerna konverteras till s.k. breedingreaktorer som i stort sett producerar det bränsle de själva behöver – de är självförsörjande. Det enda som behöver tillföras är natururan eller annat uran som redan finns i bränslecykeln (uran från bestrålat LWR-bränsle eller utarmat uran). Man kan också tänka sig att torium kan användas som bränsle. Denna fas kan pågå under valbart lång tid, och när man vill fasa ut även snabbreaktorerna inleds den *femte fasen* då allt plutonium utom det från den sista snabbreaktor förbrukas upp. Denna fas kommer pågå i c:a 50-100 år. Faserna kan ses i figur 12.



**Figur 12.** De fem identifierade faserna för scenariot där snabbreaktorer fasas in som ersättning för lättvattenreaktorer.

Speciellt kan man notera att den identifierade användningen av Gen IV-systemen möjliggör elproduktion med kärnenergi under så lång tid som framtida generationer bedömer att det krävs för att uppnå koldioxidneutral produktion, samtidigt som världens plutonium-tillgångar hålls på en hanterbar nivå. Dessutom möjliggör systemen att kärnkraften till sist kontrollerat fasas ut och att en mycket begränsad mängd plutonium återstår, vilken kan förbrännas i t.ex. acceleratordrivna system.

I studien lyfter vi också fram möjligheten att i snabbreaktorerna göra sig av med militärt vapenmaterial och nedrustningsmaterial, genom att snabbreaktorerna erbjuder det enda civila sättet att faktiskt förbruka materialet och därmed göra det otillgängligt. Att vapenmaterial har förbrukats på ett civilt sätt under framgångsrika former är Megaton till Megawattprogrammet<sup>9</sup> ett exempel på. Här blandades under tjugo år 500 ton höganrikat uran från ryska stridsspetsar ut till uran som användes som bränsle i kommersiella reaktorer i USA. Liknande planer finns för att ta omhand plutonium, men de har ännu inte implementerats.

För att man ska kunna uppnå det framtidsscenario som identifierats inom denna studie krävs att kärnämneskontrollen och icke-spridningsfrågor på allvar adresseras inom Gen IV-system. Man behöver också tidigt vara medveten om att eventuell introduktion av dessa system i sin tur kräver en noggrann utredning av de nya utmaningar som följer. Exempelvis kan man se framför sig en rad utmaningar som måste adresseras: ökad uppärbetning och återvinning av bränsle, ökade transporter och hantering av känsligt material samt design av det nya kärnkraftssystemet som helhet behöver göras med kärnämneskontrollens bästa i åtanke.

<sup>9</sup> *The Megatons to Megawatts program.* Information finns tillgänglig via United States Enrichment Corporation på: <http://www.usec.com/russian-contracts/megatons-megawatts>

### 5.3.2 Kärnämneskontroll för saltsmältareaktorer

Ett liknande initiativ som föregående forskningsprojekt inleddes under 2015 vid Uppsala universitet. I det här fallet gäller det dock inte en översyn av Gen IV-system generellt, utan snarare detaljstudier av en reaktortyp som tillhör Gen IV-koncepten, nämligen saltsmältareaktorn (MSR). På initiativ av professor Thomas Dolan vid *Nuclear, Plasma, and Radiological Engineering Department* vid universitetet i Illinois, har ett flertal internationella forskare anlitats för att skriva olika kapitel i en bok som för närvarande tituleras ”Molten Salt Reactors and Thorium Energy”.

Inom ramen för ett dedikerat kapitel om kärnämneskontroll- och icke-spridningsaspekter kopplade till MSR har Uppsala universitet åtagit sig att utreda vilka egenskaper med bäring på kärnämneskontrollen som MSR har. Utredningen belyser både för- och nackdelar med reaktortypen och dess associerade kärnbränslecykel. Exempelvis erbjuder systemen en möjlighet att återvinna bränsle, samtidigt som dagens väldefinierade bränsleobjekt upphör att existera för att bytas ut mot mer svårverifierat flytande bränsle. Detta utgör en betydande utmaning för kärnämneskontrollen, som idag är välanpassad till dagens kärnbränslecykel och ännu inte lika väl till framtidens.

## 5.4 Projektets fortsättning

Det är i dagsläget oklart vilka forskningsprojekt kopplade till kärnämneskontroll och Gen IV som kommer att bedrivas vid UU under de kommande åren. Det finns dock en avsikt att fortsätta med denna forskning av flera skäl; (1) Gen IV-system kan komma att spela en stor roll för den globala energiförsörjningen i framtiden i och med att de erbjuder långsiktig, koldioxidfri elproduktion; (2) det pågår omfattande internationell utveckling på Gen IV-området, som det kan finnas ett nationellt, svenskt intresse att ha god kännedom om; (3) de tekniker som utvecklas inom Gen IV-området kan finna användningsområden också inom dagens kärnkraft, och; (4) kärnämneskontroll och nukleär icke-spridning för framtida kärnkraftssystem är viktiga frågor för den globala säkerheten, och den forskning som bedrivs inom dessa frågor är följaktligen viktig, oavsett vilket land som innehar systemen.

Ett exempel på forskning som är tänkt att genomföras inom detta område vid UU de närmaste åren gäller multivariat dataanalys (MVA), vilket är en teknik som kan erbjuda förstärkt förmåga till kontroll av kärnämne genom samtidig analys av flera olika mätsignaler från ett eller flera instrument. Särskilt fokus avses läggas på applikationer för sådana mätsystem vid inspektion och övervakning av de återvinningsanläggningar som många Gen IV-system förknippas med.

## 6. Avslutande diskussion och utblick

Det finns flera utmaningar, rent forskningsmässigt, inom kärnämneskontrollen framöver. Från ett svenskt perspektiv är verifiering av bränsle inför slutförvar ett område med stort behov av forskningsinsatser, där flera tekniker i dagsläget undersöks men där kravbilden är väldigt oklar. Det är i dagsläget inte ens känt om mätningar ska göras i vått eller torrt tillstånd, vilket lämnar öppet för ett stort spann av aktuella mättekniker.

Andra utmaningar ligger inom forskningen kopplad till Gen IV-system, ett område där dock finansieringsfrågan är oklar. Att systemen är nygamla öppnar upp både för många möjligheter men också mycket osäkerhet, samtidigt som det av många kan upplevas som en självklarhet att forska på den här typen av system i tider när både hushållningsprinciper, avfallsfrågan och klimatfrågan ofta och länge diskuteras.

Internationella och nationella samarbeten med andra forskare har varit mycket givande för den forskning som har beskrivits i denna rapport. Inom ett antal projekt har forskare från andra discipliner och instanser involverats, t ex inom DCVD-projektet. Att rent generellt engagera forskare från andra discipliner, eller att bredda forskningens fokus, kan även ses som positivt då forskningen har chans att få större exponering. Ett breddat fokus är t.ex. det vi ser framför oss med den kommande satsningen vid Uppsala universitet på multivariat dataanalys där signaler från olika typer av instrument kombineras. Inom detta projekt väntas en bredare kompetens och bredare samarbeten komma till nytta.

# 7. Publikationslista

## Vetenskapliga publikationer i tidsskrifter:

- [1] E. Branger et al., *How Cherenkov light intensities from irradiated nuclear fuel rods in wet storage depend on rod properties*, inskickad till *Annals of Nuclear Energy* i April 2016.
- [2] T Martinik, V. Henzl, S. Grape, P. Jansson, M. Swinhoe, A.V. Goodsell, S.J. Tobin *Design of a Prototype Differential Die-Away Instrument proposed for Swedish Spent Nuclear Fuel Characterization*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, ISSN 0168-9002, Vol. 821, 55-65. June 2016. Available online 24 February 2016, <http://dx.doi.org/10.1016/j.nima.2016.02.052>.
- [3] N. Lundkvist, A.V. Goodsell, S. Grape et al., *A Qualitative Analysis of the Neutron Population in Fresh and Spent Fuel Assemblies during Simulated Interrogation using the Differential Die-Away Technique*. ESARDA Bulletin, No 53. December 2015.
- [4] E. Branger, S. Grape, P. Jansson, S. Jacobsson Svärd, *Improving the prediction model for Cherenkov light generation by irradiated nuclear fuel assemblies in wet storage for enhanced partial-defect verification capability*. ESARDA Bulletin, No 53. December 2015.
- [5] T. Martinik, V. Henzl, S. Grape, S. Jacobsson Svärd, P. Jansson, M.T. Swinhoe, S.J. Tobin, *Simulation of Differential Die-Away instrument's response to active interrogation of asymmetrically burned spent nuclear fuel*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, Volume 788, 11 July 2015, Pages 79-85, ISSN 0168-9002, <http://dx.doi.org/10.1016/j.nima.2015.02.058>
- [6] S. Jacobsson Svärd, S. Holcombe, S. Grape, *Applicability of a set of tomographic reconstruction algorithms for quantitative SPECT on irradiated nuclear fuel assemblies*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, ISSN 0168-9002, Vol. 783, 128-141. May 2015
- [7] S. Grape, S. Jacobsson Svärd, *Recent modelling studies for analysing the partial-defect detection capability of the Digital Cherenkov Viewing Device*, ESARDA Bulletin, No 51. December 2014
- [8] S. Grape, S. Jacobsson Svärd, C. Hellesen, P. Jansson, M. Åberg Lindell, *New perspectives on nuclear power - Generation IV Nuclear Energy Systems to Strengthen Nuclear Non-Proliferation and Support Nuclear Disarmament*, *Energy Policy*, Vol. 73, pp. 815–819, October 2014
- [9] S. Grape, S. Jacobsson Svärd, B. Lindberg, *Partial defect evaluation methodology for nuclear safeguards inspections of used nuclear fuel using the Digital Cherenkov Viewing Device*, *Nuclear Technology*, vol. 186(1), pp. 90-98, April 2014.

### **Vetenskapliga artiklar vid internationella konferenser:**

- [10] Vo D, Andrea F, Grogan B, Jansson P, Liljenfeldt H, Mozin V, et al. *Determination of Initial Enrichment, Burnup and Cooling Time of Pressurized-Water-Reactor Spent Fuel Assemblies by Analysis of Passive Gamma Spectra Measured at the Clab Interim-Fuel Storage Facility in Sweden*. Institute of Nuclear Materials Management (INMM) annual meeting, July 2015.
- [11] T. Martinik, V. Henzl, S. Grape, P. Jansson, M.T. Swinhoe, A.V. Goodsell and S. J. Tobin, *Development of Differential Die-Away Instrument for Characterization of Swedish Spent Nuclear Fuel*. ESARDA-symposium, Manchester, maj 2015.
- [12] K. Ianakeiv, M. Swinhoe, M. Iliev, S. Tobin, A. Sjöland, H. Liljenfeldt and P. Jansson, *Underwater Testing of Detectors and Electronics Hardware for Spent Fuel Measurements*. ESARDA-symposium, Manchester, maj 2015.
- [13] Davour, S. Jacobsson Svärd and S. Grape, *Image analysis methods for partial defect detection using tomographic images on nuclear fuel assemblies*. ESARDA-symposium, Manchester, maj 2015.
- [14] P. Jansson, P. Andersson, T. White and V. Mozin, *Monte Carlo simulations of a Universal Gamma-Ray Emission Tomography Device*. ESARDA-symposium, Manchester, maj 2015.
- [15] S. Jacobsson Svärd, P. Andersson, A. Davour, S. Grape, S. Holcombe and P. Jansson, *Tomographic determination of spent fuel assembly pin-wise burnup and cooling time for detection of anomalies*. ESARDA-symposium, Manchester, maj 2015.
- [16] T.A. White, S. Jacobsson Svärd, L.E. Smith, V. Mozin, P. Jansson, A. Davour, S. Grape, H. Trelle, N. Deshmukh, R.S. Wittman, T. Honkamaa, S. Vaccaro and J. Ely, *Passive Tomography for Spent Fuel Verification: Analysis Framework and Instrument Design Study*. ESARDA-symposium, Manchester, maj 2015.
- [17] S. Grape, K. Persson och E. Andersson Sundén, *Building a Strategy for ESARDA - Education, Training and Knowledge Management*. ESARDA-symposium, Manchester, maj 2015.
- [18] T. Martinik, V. Henzl, M. T. Swinhoe, P. Jansson, S. Grape, S. Jacobsson Svärd, S. J. Tobin *Characterization of Spent Nuclear Fuel with a Differential Die-Away Instrument*, IAEA's internationella symposium för kärnämneskontroll, Wien, oktober 2014.
- [19] E. Branger, S. Jacobsson Svärd, S. Grape, E. Wernersson, *Towards unattended partial-defect verification of irradiated nuclear fuel assemblies using the DCVD*, IAEA's internationella symposium för kärnämneskontroll, Wien, oktober 2014.
- [20] S.J. Tobin, H. Liljenfeldt, H. Trelle, G. Baldwin, A. Belian, D. Blair, T. Burr, P. De-Baere, M. Fensin, A. Favalli, J. Galloway, I. Gauld, S. Grape, B. Grogan, Y. Ham, J. Hendricks, V. Henzl, J. Hu, K. Ianakiev, G. Ilas, P. Jansson, A. Kaplan, T. Martinik, H.O. Menlove, V. Mozin, M. Newell, P. Polk, C. Rael, S. Pozzi, P. Santi, P. Schwalbach, A. Sjöland, S. Jacobsson Svärd, M.T. Swinhoe, T.J. Ulrich, S. Vaccaro, D. Vo, A. Worrall, *Experimental and Analytical Plans for the Non-destructive Assay System of the Swedish*

*Encapsulation and Repository Facilities*, IAEAs internationella symposium för kärnämneskontroll, Wien, oktober 2014.

[21] S. Jacobsson Svärd, T. A. White, L. E. Smith, V. Mozin, P. Jansson, A. Davour, S. Grape, H. Trelle, N. Deshmukh, R. S. Wittman, S. Holcombe, *Gamma-ray Emission Tomography: Modelling and evaluation of partial-defect testing capabilities*, IAEAs internationella symposium för kärnämneskontroll, Wien, oktober 2014.

[22] P. Jansson, S. Jacobsson Svärd, A. Davour, S. Grape, *Gamma transport calculations for gamma emission tomography on nuclear fuel within the UGET project*, IAEAs internationella symposium för kärnämneskontroll, Wien, oktober 2014.

[23] M. Åberg Lindell, A. Håkansson, P. Andersson, S. Grape, *Safeguarding advanced Generation IV reprocessing facilities: Challenges, R&D needs, and development of measurements*, IAEAs internationella symposium för kärnämneskontroll, Wien, oktober 2014.

[24] E. Branger, E. Wernersson, S. Grape, S. Jacobsson Svärd, "Improved DCVD Assessment of Irradiated Nuclear Fuel using Image Analysis Techniques", Oral presentation and paper at *The INMM annual meeting 2014*. Atlanta, Georgia, July 2014.

**Andra rapporter:**

[25] S. Grape, *Översikt över mättekniker för verifiering av atypiska bränsleobjekt på Clab*, rapport till SSM, december 2015, diarienummer SSM2014-1880-12

[26] S. Grape, K. Persson, T. Jonter, *Visions for the development of ESARDA and ESARDA TKM WG*, ESARDA Bulletin, No 51. December 2014

[27] E. Branger et al., *Image analysis as a tool for improved use of the Digital Cherenkov Viewing Device for inspection of irradiated PWR fuel assemblies*, Department of Physics and Astronomy, Uppsala University, June 2014.



2016:32

Strålsäkerhetsmyndigheten har ett samlat ansvar för att samhället är strålsäkert. Vi arbetar för att uppnå strålsäkerhet inom en rad områden: kärnkraft, sjukvård samt kommersiella produkter och tjänster. Dessutom arbetar vi med skydd mot naturlig strålning och för att höja strålsäkerheten internationellt.

Myndigheten verkar pådrivande och förebyggande för att skydda människor och miljö från oönskade effekter av strålning, nu och i framtiden. Vi ger ut föreskrifter och kontrollerar genom tillsyn att de efterlevs, vi stödjer forskning, utbildar, informerar och ger råd. Verksamheter med strålning kräver i många fall tillstånd från myndigheten. Vi har krisberedskap dygnet runt för att kunna begränsa effekterna av olyckor med strålning och av avsiktlig spridning av radioaktiva ämnen. Vi deltar i internationella samarbeten för att öka strålsäkerheten och finansierar projekt som syftar till att höja strålsäkerheten i vissa östeuropeiska länder.

Strålsäkerhetsmyndigheten sorterar under Miljödepartementet. Hos oss arbetar drygt 300 personer med kompetens inom teknik, naturvetenskap, beteendevetenskap, juridik, ekonomi och kommunikation. Myndigheten är certifierad inom kvalitet, miljö och arbetsmiljö.

Strålsäkerhetsmyndigheten  
Swedish Radiation Safety Authority

SE-171 16 Stockholm  
Solna strandväg 96

Tel: +46 8 799 40 00  
Fax: +46 8 799 40 10

E-mail: [registrator@ssm.se](mailto:registrator@ssm.se)  
Web: [stralsakerhetsmyndigheten.se](http://stralsakerhetsmyndigheten.se)