



Strål  
säkerhets  
myndigheten

Swedish Radiation Safety Authority

Författare: Sophie Grape

Technical Note

# 2016:33

Översikt över mättekniker för verifiering  
av atypiska bränsleobjekt på Clab



## **SSM perspektiv**

### **Bakgrund**

Strålsäkerhetsmyndigheten (SSM) granskar Svensk Kärnbränslehantering AB:s (SKB) ansökningar enligt lagen (1984:3) om kärnteknisk verksamhet om uppförande, innehav och drift av ett slutförvar för använt kärnbränsle och av en inkapslingsanläggning. Som en del i granskningen ger SSM forskare och konsulter uppdrag för att inhämta information i avgränsade frågor. I SSM:s Technical note-serie rapporteras resultaten från dessa uppdrag.

### **Projektets syfte**

Före inkapslingen av det använda kärnbränslet ställs krav på att verifiera bränslets egenskaper i syfte att säkerställa att inget bränsle har förändrats eller avletts. Det antas idag att denna verifiering kommer att genomföras experimentellt med någon form av icke-förstörande mätutrustning i enlighet med de internationella åtaganden som Sverige har gentemot IAEA och under Euratomfördraget.

I Sverige idag finns det ett flertal s.k. atypiska bränsleelement som består av bränslestavar med olika utbränning, kyltid och anrikning. Dessa atypiska element utgör en särskild utmaning att verifiera med de icke-förstörande mättekniker som finns under utveckling idag. Denna utredning syftar till att göra en inledande undersökning i hur verifiering av dessa objekt skulle kunna gå till genom att jämföra olika typer av icke-förstörande mätmetoder.

### **Författarnas sammanfattning**

Det finns på Clab och kärnkraftverken "magasin" som består av stavar som man av olika anledningar plockat ur olika bränsleelement. Stavarna har alltså samlats i ett tomt skelett och bildat ett nytt bränsleknippe. Det betyder att detta nya bränsle innehåller stavar med helt olika utbränning, kyltid, historik mm.

Med tanke på UU:s expertis inom mättekniker för kärnämneskontroll har vi möjlighet att föreslå verifieringsmöjligheter för sådana magasin. Det rör inte bara kärnämneskontrollaspekten utan även verifiering av andra viktiga parametrar inför slutförvaret såsom resteffekt och kriticitet.

### **Projekt information**

Kontaktperson på SSM: Camilla Andersson  
Diarienummer forskningsavtal: SSM2014-1880  
Aktivitetsnummer: 7037016-31





Strål  
säkerhets  
myndigheten

Swedish Radiation Safety Authority

Författare: Sophie Grape  
Uppsala Universitet, Uppsala

Technical Note 95

2016:33

Översikt över mättekniker för verifiering  
av atypiska bränsleobjekt på Clab

Datum: September 2016

Rapportnummer: 2016:33 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. Introduktion</b> .....	<b>2</b>
<b>2. Egenskaper hos de atypiska bränsleobjekten</b> .....	<b>3</b>
<b>3. Översikt av verifieringsbehov</b> .....	<b>4</b>
<b>Kärnämneskontroll</b> .....	<b>4</b>
<b>Resteffekt</b> .....	<b>5</b>
<b>Kriticitet</b> .....	<b>5</b>
<b>4. Översikt av verifieringstekniker</b> .....	<b>6</b>
<b>Idag tillgängliga mätmetoder</b> .....	<b>6</b>
Irradiated fuel attribute tester (IRAT) .....	6
Spent fuel attribute tester (SFAT) .....	7
FDET (Fork detector) .....	7
Safeguards MOX python (SMOPY) .....	8
Digital Cherenkov Viewing Device (DCVD) .....	8
Högupplöst $\gamma$ .....	9
Kalorimetri .....	10
Gammatomografi .....	11
<b>Utveckling av nya mätmetoder inom NGS</b> .....	<b>12</b>
Lätta och mobila tekniker .....	13
Större, dyrare och potentiellt noggrannare tekniker .....	16
Integration av NGS-teknikerna med övriga tekniker .....	19
<b>5. Rekommendation från denna studie</b> .....	<b>20</b>
<b>6. Sammanfattning</b> .....	<b>22</b>
<b>7. Författarens tack</b> .....	<b>23</b>
<b>8. Referenser</b> .....	<b>24</b>

# 1. Introduktion

Det finns på Clab och på kärnkraftverken ”magasin” som består av stavar som man av olika anledningar plockat ur olika bränsleelement. Stavarna har alltså samlats i ett tomt skelett och bildat ett nytt bränsleknippe. Det betyder att detta nya bränsle innehåller stavar med helt olika utbränning, kyltid, historik mm.

Med tanke på UU:s expertis inom mättekniker för kärnämneskontroll har vi möjlighet att föreslå verifieringsmöjligheter för sådana magasin. Det rör inte bara kärnämneskontrollaspekten utan även verifiering av andra viktiga parametrar inför slutförvaret såsom resteffekt och kriticitet.



## 2. Egenskaper hos de atypiska bränsleobjekten

Information om bränslen som kan innefattas i beskrivningen ”atypiska bränsleobjekt” har erhållits från Annika Eliasson på Clab (SKB). Den dokumentation författaren har tagit del av visar *ett* stavmagasin som består av både tomma och fyllda stavpositioner; 8x8 positioner totalt varav 35 av dem är fyllda i ett till synes slumpvis mönster. 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>1</sup>. Stavmagasinet har ett lock som omöjliggör visuell verifiering. Idag sker verifiering med en SFAT-mätning. Kyltiden på stavarna är knappt 35 år.

Hur många olika typer av atypiska bränslen det idag finns på Clab (och på kärnkraftverken), vilka egenskaper objekten har och hur stor variationen mellan de enskilda stavarna i objekten är, har författaren bara fått begränsad information om. Den information som har erhållits är en kortfattad lista med ett antal objekt på Clab som troligtvis också kommer kräva speciella verifieringar. Dessa objekt inkluderar, utöver ett halvdussin bränslen som påminner om det som finns beskrivet ovan,:

- C:a 10 ”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 ”H-kassett”,
- enstaka stavmagasin med böjda/sneda stavar och
- c:a 20 andra objekt för vilka beskrivning helt saknas.

Det är dock nödvändigt att få mer information än så för att kunna yttra sig om hur verifieringen kan gå till.

---

<sup>1</sup> Värden från SKB-dokument om bränsledata till ”B2 – Stavar uttagna 1980 och 1981”

# 3. Översikt av verifieringsbehov

I problemformuleringen för denna översikt framgår att det finns behov av att verifiera bränslet för kärnämneskontrollbehov, för resteffekt och kriticitet.

## Kärnämneskontroll

Kraven för kärnämneskontrollen bestäms av de tre organisationerna IAEA, Euratom och SSM. Den faktiska kravbilderna från dessa instanser är dock oklar i dagsläget. Av denna anledning redovisas här förekommande spekulationer kring vad det är som kan komma att verifieras och i vilken omfattning.

Från kommunikation med IAEA har det framgått att använt kärnbränsle troligen kommer behandlas som poster (*items*) till dess att de grävs ner i det geologiska djupförvaret. Detta kan komma att innebära att kärnämneskontrollen t.ex. med icke-destruerande mätmetoder (NDA) ska verifiera att bränslet är intakt eller att gjorda förändringar (t.ex. borttagna stavar) är korrekt deklarerade av operatören. Dessutom kan objektets korrekthet gällande bränsleparametrarna anrikning (IE), utbränning (BU) och kyltid (CT) verifieras.

Vad gäller parametern att bränslet är intakt, ”completeness” kan man förvänta sig att mätningar på de flesta använda bränslemagasinen kommer genomföras för att verifiera att inga så kallade ”partial defects” förekommer (IAEA 2010). Anledningen är att bränslena går att montera isär - de är inte sammansvetsade - och att inga tidigare ”partial defects”-verifieringar systematiskt har genomförts på bränslena. Enligt IAEA innebär ”partial defect”-verifiering att man med minst 90% konfidensintervall ska kunna säga att minst hälften av stavarna är närvarande (IAEA 2009). Det är dock inte omöjligt att nivån på ”partial defects” kan komma att skärpas så att avsaknad av ett minsta antal stavar ska kunna detekteras. Ytterligare önskemål är att tekniken ska vara obemannad, robust, ha hög datasäkerhet samt att man ska kunna dela instrumenten och datan mellan de inspekterande organisationerna för att på så sätt minska kostnader och dela på underhåll.

Man kan även tänka sig att krav på verifiering av fissilt innehåll kan tillkomma. Det är inte heller fastlagt i vilken omfattning man kan använda sig av deklarerad information i verifieringen, och i vilken utsträckning man måste bestämma informationen oberoende av operatörsdeklarationer.

## Resteffekt

Resteffekten är viktig för att säkerställa att bufferten i slutförvaret fungerar tillfredställande. Om resteffekten hos bränslena är för stor innebär det att färre bränslen kan laddas i en kapsel och därmed att fler kapslar och fler deponeringsplatser än planerat behövs. Detta kommer resultera i ökade kostnader för slutförvaret.

## Kriticitet

Det är viktigt att säkerställa att kriticitet inte kommer uppstå i de nedgrävda kopparkapslarna. Detta kan inträffa om alltför mycket fissilt material packas tätt, och innebär att en okontrollerad kedjereaktion riskerar att uppstå. För att försäkra att detta inte ska kunna hända, planerar SKB att begränsa det s.k.  $k_{eff}$ -värdet för varje kopparkapsel till maximalt 0,95.

# 4. Översikt av verifieringstekniker

Det finns en mängd icke-destruerande mätmetoder att tillgå för verifiering av använt kärnbränsle. De flesta bygger på detektion av gamma- eller neutronstrålning, eller en kombination av båda. Det pågår också en hel del forskning och utveckling av nya mätmetoder, som förhoppningsvis kommer vara tillgängliga för verifiering av bränsle lite längre fram i tiden. Exempel på detta är mättekniker som undersöks inom ramen för NGSi-projektet (Next Generation Safeguards Initiative) och som inkluderas här.

## Idag tillgängliga mätmetoder

I detta avsnitt beskrivs några vanliga instrument som idag används för verifiering av använt kärnbränsle. Instrumenten finns i viss mån upptagna i IAEAs egen manual över tillgängliga instrument för kärnämneskontroll (IAEA 2011). IAEA beskriver där en egen uppdelning av utrustning enligt sex kategorier: neutron/ $\gamma$ , medelupplöst  $\gamma$ , passiv koincidens, Tjerenkov, Intensitets skanning och obemannad övervakning. Dessvärre innefattar tre av kategorierna inga instrument som används för att just verifiera använt kärnbränsle, och inom ramen för de återstående tre kategorierna finns följande instrument nämnda i (IAEA 2011):

- 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.

Detta avsnitt tar upp dessa fem tekniker, men även ett urval av andra tekniker där utrustningen inte är kommersiellt tillgänglig men mätmetoden är välkänd.

### Irradiated fuel attribute tester (IRAT)

IRAT är ett smalt instrument bestående av en CdZnTe gammadetektor och en kollimator, som närmar sig bränslet från sidan och mäter närvaron av fissionsprodukter hos bränslet. Instrumentet detekterar både fissionsprodukter i bränslet och aktiveringsprodukter i strukturmateriel. Bränslet behöver alltså flyttas från sin lagringsposition för att kunna mätas med detta instrument. Syftet är att verifiera närvaron av använt kärnbränsle genom att med hjälp av spektralupplöst data specifikt söka efter vissa gammaenergier såsom i huvudsak från Cs-137, Cs-134, Pr-144 och Eu-154.



Figur 1. Bild på instrumentet IRAT.

### Spent fuel attribute tester (SFAT)

SFAT består också av en gammadetektor (NaI eller CdZnTe) med kollimator som mäter närvaron av fissionsprodukter. Mätningar sker precis ovanför (ovanpå) bränslet i förvaringsbassänger, och bränslet behöver alltså inte flyttas för att mätas. Det uppmätta spektrumet från bränslet jämförs med ett uppmätt spektrum från vattengapet mellan bränslena. Närvaron av Cs-137 hos bränsle med lång kyltid, eller Zr-95/Nb-95 för korta kyltider, tolkas som att objektet ifråga är ett autentiskt bränsle. Instrumentet kan också detektera aktiveringsprodukter såsom t ex Co-60.



Figur 2. Bild på instrumentet SFAT.

### FDET (Fork detector)

Forkdetektorn använder sig av både gamma- (jonisationskammare) och neutrondetektering (fissionskammare). Instrumentet är designat i form av ett U och omger bränslet på tre sidor under mätning. Bränslet lyfts från sin ordinarie lagringsposition och hålls fast av en hanteringsmaskin, samtidigt som FDET förs ner i vattnet för att mäta på objektet.

Genom att mäta totalt antal detekterade gammakvanta samt totalt antal detekterade neutroner kan instrumentet användas för att verifiera närvaron av kärnbränsle, samt för att verifiera deklarerade operatörsdata (BU och CT) (Borella et al. 2011). Det förutses att IE samt bestrålningshistorik är kända för inspektören. Kvoten mellan gammasignalen och neutronsignalen används för att uppskatta utbränningen och kyltiden.



Figur 3. Bild på Forkdetektorn som mäter ett använt kärnbränsle i en vattenbassäng.

En förbättrad FORK-detektor har utvecklats, denna kallas ”enhanced FORK” eller EFDET (Tiitta et al. 2002). Detta instrument har utrustats med CdZnTe-detektorer som även ger användaren spektroskopisk information. Spektroskopisk information är användbar vid mätning på bränslen med korta eller medellånga kyltider. Vid mätning på bränslen med långa kyltider (över 12 år) uppskattas de båda instrumenten ge lika användbar information.

### Safeguards MOX python (SMOPY)

SMOPY är rent innehållsmässig lik EFDET – båda instrument innehåller fissions- och jonisationskammare samt CdZnTe-detektorer. SMOPY mäter både neutron- och spektralupplösta gammasignaler, men i syfte att särskilja MOX-bränsle från låganrikat uranbränsle. Även om instrumentet innehåller både CdZnTe-detektorer och fissionskammare, har det en helt annan design än FDET. Instrumentet mäter kärnbränslet från sidan, och under mätning lyfts det från sin lagringsplats och upp förbi instrumentet. SMOPY kan användas för verifiering av ”partial defects” i kombination med operatörsdata på utbränningsberäkningar, men det råder viss oklarhet kring hur väl dessa kan verifieras (Tiitta et al. 2002) (Van der Meer och Coeck 2006).



Figur 4. Bild på SMOPY-detektorn under vatten. Den högra bilden kommer från (LeBrun, 2009)



### Digital Cherenkov Viewing Device (DCVD)

DCVD:n är ett instrument som digitalt detekterar och sparar bilder av Cherenkovljuset från använt kärnbränsle i vatten. Instrumentet har flera icke-digitala föregångare (t.ex. ICVD) som använts i stor omfattning under lång tid. DCVD:n har dock mycket större känslighet och kan verifiera bränslen med låg utbränning och lång kyltid (10 MWd/kgU och 40 års kyltid). Instrumentet används idag både för att verifiera närvaron av kärnbränsle (gross defect) och för att upptäcka bortplockade stavar via ”partial defect”-verifiering (Chen 2010).



Figur 5. Bild på DCVDn som är fäst på räcket ovanför bränslebassängen.

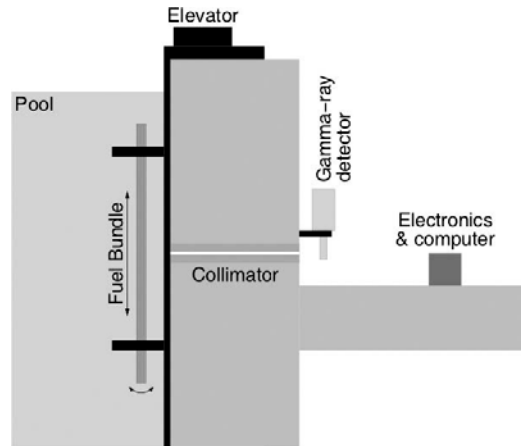
Instrumentet monteras på räcket på bryggan över vattenbassängerna och tar därifrån bilder på kärnbränslet rakt nedanför i vattnet.

Instrumentet är aldrig i direkt anslutning till bränslet, och själva datainsamlingen går snabbt. Tekniken begränsas till det som är synligt i bränslegeometrin eftersom det är i vattnet mellan stavarna som Tjerenkovljuset genereras. Således kan täckande toppstrukturer såsom handtag och topplatta försvåra verifieringen av de delar som skymms av dessa strukturer. Inspektören ser hela tiden en bild av bränslet och kan variera hur denna bild ska framträda på skärmen. Med hjälp av en artificiell färgskala kan olika delar av bilden fås att framträda tydligare. Analys av data sker i anslutning till mätningarna då all data samlats in.

## Högupplöst $\gamma$

Passiva högupplösta gammatekniker bygger på detektion av den gammastrålning som emitteras av bränsleobjektet självt, och detektion sker med hjälp av en HPGe-detektor som har mycket hög upplösning. Av intresse är t.ex. detektion av enskilda gammaenergier, eller av kvoterna mellan intensiteterna av olika gammaenergier exempelvis från Cs-134, Cs-137 och Eu-154 för bestämning av bränsleparametrarna IE, BU och CT för kyltider kortare än  $\sim 20$  år. Utbränning kan bestämmas även för längre kyltider om en kalibrering genomförs (Jansson 2002). Genom att detektera gammasignaler kan man indirekt också uppskatta restvärmen.

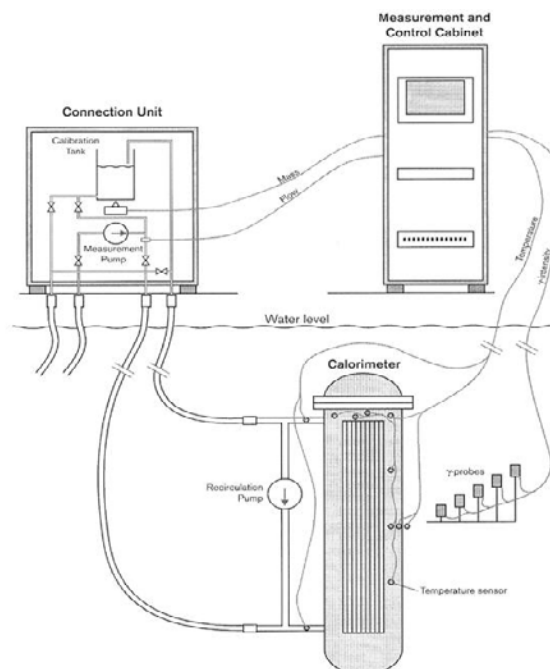
Tekniken är etablerad och välkänd och i bruk sedan decennier. Svagheter är att attenueringen av gammaemissionen är stor i själva bränslet så att det till största del bara är de yttersta stavraderna som bidrar till den uppmätta signalen. Det krävs också aktiv kylning av detektorn med flytande kväve eller mekanisk kylning.



Figur 6. Bild på gammascanningsutrustningen på Clab i Oskarshamn.

## Kalorimetri

Kalorimetri är ett sätt att direkt mäta den termiska effekten från ett kärnbränsle. Detta görs genom att bränslet i flera timmar förvaras i en vattenfylld kalorimeter, och ett samband mellan temperaturökningen i kalorimetern och en elektrisk effekt kan etableras. Därefter använder man en kalibrering för att avgöra vilken effekt som lett till den detekterade uppvärmningen. Tekniken är mycket noggrann, men det tar många timmar att genomföra en mätning på ett bränsle. Korrektion måste ske för att ta hänsyn till den strålning som inte stannar kvar i kalorimetern. (SKB 2006)

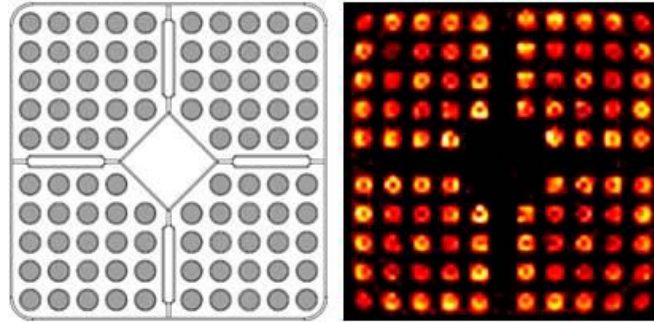


Figur 7. Schematisk illustration över ett kalorimetriskt mätsystem för kärnbränsle som används i Clab i Oskarshamn.



## Gammatomografi

Gammatomografi erbjuder möjligheten att få tvådimensionella tvärsnittsbilder av det använda kärnbränslet, vilka i sin tur kan analyseras både för att avgöra om bränslet är komplett, och för att stavvis uppskatta aktiviteten i bränslet (Jacobsson Svärd et al. 2005). Mätningar har gjorts på BWR-bränslen, men inte på PWR-bränslen som är större i dimension.



Figur 8. Bild på tvärsnittet av ett kärnbränsle (vänster) och en tomografisk rekonstruktion av samma bränsle.

De ursprungliga studierna i Uppsala syftade till att fastställa stavaktiviteterna för att på så sätt verifiera de koder som operatörerna använder sig av i sina beräkningar. Ett senare uppstartat IAEA-projekt (UGET) (S Jacobsson Svärd 2014) har istället fokus på att utreda teknikens lämplighet för kärnämneskontrollsyften. Detta projekt täcker även PWR geometrier.

Tekniken är tidskrävande, men tiden beror på hur många detektorer som används parallellt och på hur många axiella positioner som ska mätas. Analys av mätdata sker typiskt i efterhand, men man förväntar sig att analysteknikerna kommer att utvecklas och möjliggöra online-analys.

# Utveckling av nya mätmetoder inom NGS

Parallellt med användandet av de redan existerande tekniker 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.

Vid framtagandet av teknikerna delades de in i två kategorier: lätta och mobila tekniker, samt fysiskt sett större, dyrare och potentiellt noggrannare tekniker. Man kan notera att av de tio teknikerna som omnämns här är åtta neutrontekniker och två gammatekniker. Av de åtta neutronteknikerna är tre passiva (DDSI, PNAR-FC, SINRD) och fem aktiva (CIPN, DDA, DN, LSDS, NRTA, ). Av de två gammateknikerna är en passiv (XRF) och en aktiv (DG). Till skillnad från en passiv teknik kräver en aktiv teknik någon form av extern källa som interrogerar objektet, exempelvis en neutrongenerator.

Många av teknikerna har studerats tidigare men är inom ramen för NGS på något sätt unika genom att man gjort modifieringar jämfört med tidigare forskning t ex genom att applikationen ändrats eller att metodiken ser annorlunda ut.

Eftersom instrumenten i det här avsnittet är under utveckling är det inte möjligt att säga om eller när de kommer finnas tillgängliga för verifiering av atypiska bränsleobjekt. I den här översynen gör vi antagandet att verifiering av kärnbränsle inför slutförvar kommer pågå under mycket lång tid, så när teknikerna är tillgängliga är inte en kritisk frågeställning. Fokus ligger istället på att presentera teknikernas fördelar (och nackdelar), för att kunna säga något om huruvida de kan anses lämpliga för att verifiera de atypiska bränsleobjekten på Clab som beskrivits tidigare.

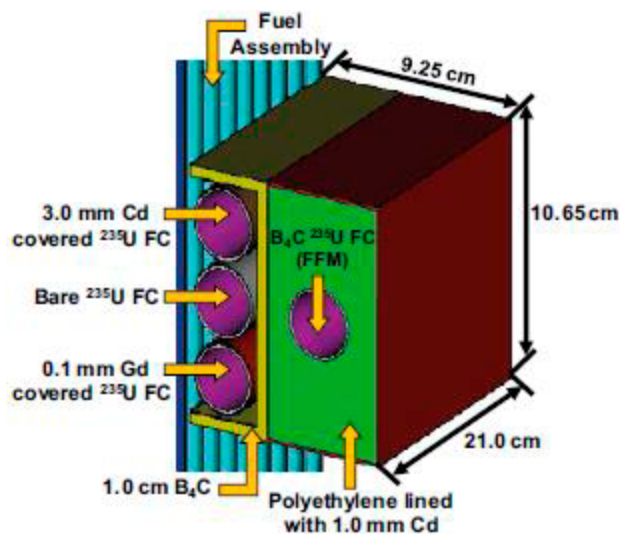
Gemensamt för alla tekniker inkluderade i NGS är att flera parametrar i dagsläget är oklara, eftersom det handlar om pågående forskning. Det gäller t.ex. hur kalibrering av de olika teknikerna ska gå till, vilka systematiska osäkerheter som finns och hur stora dessa kan vara, deras respons på BWR-bränslen och hur integrering med andra instrument (vilket föreslås i de flesta fall) ska gå till. Beroendet av simuleringsmjukvara och beräkningar är också stort, i princip varje teknik förlitar sig på simuleringar med bränslebibliotek innehållande varierande värden på bränsleparametrarna IE, BU och CT. Hur väl detta överensstämmer med verkligheten återstår att se i experimentella mätkampanjer på använt kärnbränsle.

NGS-teknikerna beskrivs översiktligt här, för mer information se (Tobin 2013).

## Lätta och mobila tekniker

### Self-Integration Neutron Resonance Densitometry (SINRD)

SINRD mäter neutronintensiteten i fyra utvalda regioner av neutronspektrumet med hjälp av olika detektorer omgivna av olika typer av absorberande material. I den händelse att materialet som ska kvantifieras i bränslet innehåller samma material som finns i fissionskamrarna, uppstår en ökad känslighet i den detektorn p.g.a. resonanser i neutronspektra. Detta innebär att en fissionskammare med Pu-239 är mer känslig för denna isotop i kärnbränslet, jämfört med en fissionskammare med U-235.

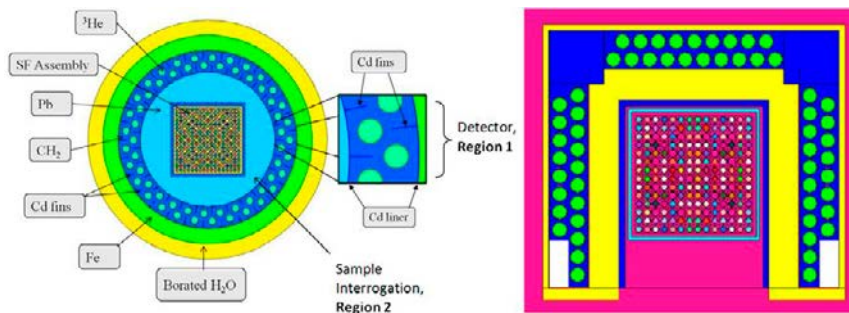


Figur 9. Schematisk design av SINRD-uppställningen.

Signalen som mäts är proportionell mot bränslets innehåll av U-235 och Pu-239 i de yttersta tre stavraderna, och därmed mot utbränningen, och man kan alltså uppskatta massan av dessa isotoper i kärnbränslet. Mättiden är ganska lång och rör sig om timmar, men den kan kortas om man använder en extern neutronkälla (vilket i så fall gör den till en aktiv teknik).

### Differential Die-away Self Interrogation (DDSI)

DDSI är en teknik som påminner om DDA (se aktiva neutrontekniker) men som saknar extern källa. Upphovet till kärnklyvningen är här spontan fission, och med instrumentet mäter man emitterade neutroner i olika tidsfönster för att tillåta moderering till termiska energier. Det är två signaler som mäts; den ena är kvoten av antalet detekterade neutroner i ett tidigt tidsfönster till den i ett senare tidsfönster, och den andra är kvoten av detekterade dubletter i det senare tidsfönstret, till antalet singlar.



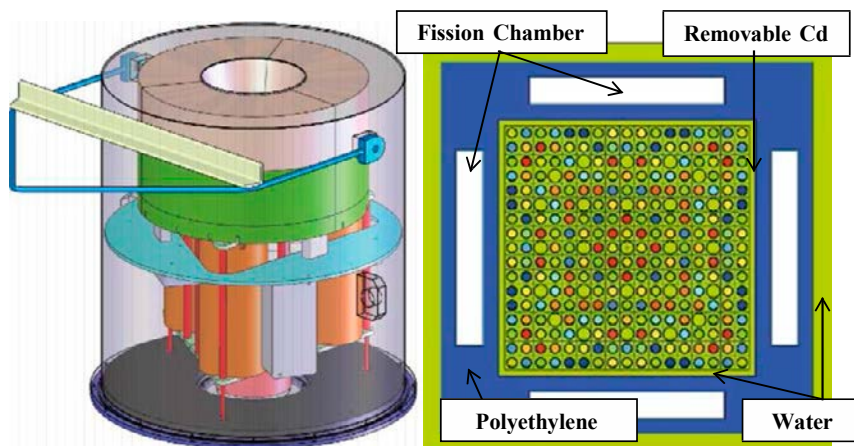
Figur 10. Schematisk bild på DDSI-konceptet.

Det är tänkt att tekniken ska integreras med PG och TN för att kunna bestämma bränsleparametrarna IE, BU och CT.

### Passive Neutron Albedo Reactivity with Fission Chambers (PNAR-FC)

Den här tekniken mäter totalantalet neutroner i två konfigurationer: en då bränslet har ett tunt Cd-skikt runt om sig och ett där detta saknas. På detta vis kvantifierar man neutronmultiplikationen och man hoppas kunna bestämma bränsleparametrarna genom att integrera instrumentet med PG och TN. För att kvantifiera det fissila innehållet behöver korrektion för neutronabsorption göras.

Tveksamheter rör idag teknikens systematiska osäkerheter och instrumentets ”dynamic range” d.v.s. vilka intervall på bränsleparametrar som tekniken faktisk är känslig för.

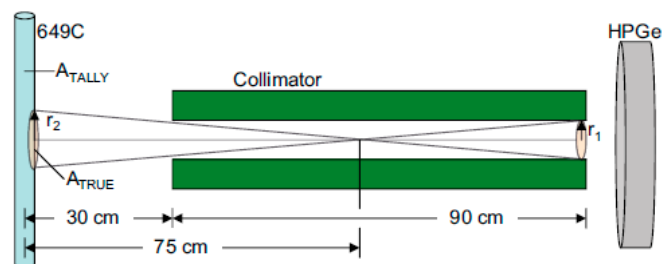


Figur 11. Bild på mekanisk konstruktion och konceptuell design för PNAR-FC.

## X-ray Fluorescence (XRF) – Passiv teknik

Denna teknik finns både i kategorin ”Lätta och mobila tekniker” och ”Större, tyngre och potentiellt noggrannare tekniker”.

XRF mäter röntgenstrålning som emitteras från kärnbränslet. Denna röntgenstrålning, med energi på omkring 100 keV och en räckvidd på ca 0,5 mm i bränslet, är karakteristisk för olika grundämnen, och tekniken är därför känslig för det relativa innehållet av t.ex. plutonium till uran men inte för enskilda isotoper. Beräknar man sedan innehållet av uran i staven (exempelvis med hjälp av gamma- eller neutronmätningar), kan man få information om den totala plutoniummängden också. Som ett sista steg extrapolerar man plutoniuminnehållet i hela bränsleknippet, utifrån plutoniummassan i de yttersta stavraderna av bränslet.



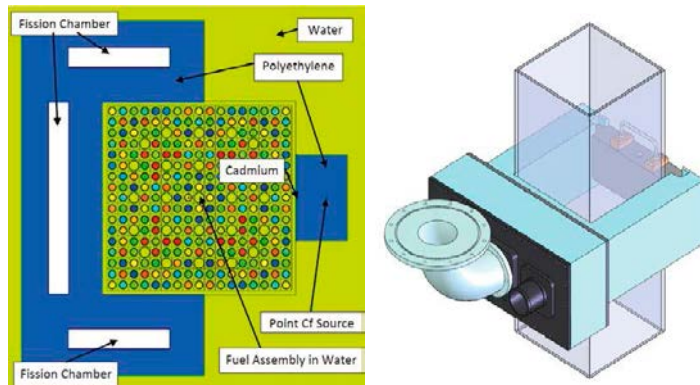
Figur 12. Schematisk bild över XRF-tekniken

Korrekationer behöver göras för att Pu inte är fördelat homogent i en stav, utan primärt finns i stavens utkant. Det finns ingen känslighet för ”partial defect”-detektion, och mättiderna är väldigt långa med endast en detektor (~10h för 3% osäkerhet i bestämningen av Pu-röntgenintensiteterna från ett bränsleknippe). Kalibrering är dock inte ett problem för denna metod.

## $^{252}\text{Cf}$ Interrogation with Prompt Neutron Detection (CIPN)

CIPN är en teknik som med hjälp av en flyttbar extern  $2 \times 10^8 \text{ n/s}$   $^{252}\text{Cf}$ -källa inducerar fission i bränslet.

Mätning görs först med källan på avstånd för att uppskatta det passiva neutronflödet, och sedan med källan intill bränslet. På så sätt mäter man det totala antalet neutroner som når detektorn, vilket i sin tur ger bränslets neutronmultiplikation.



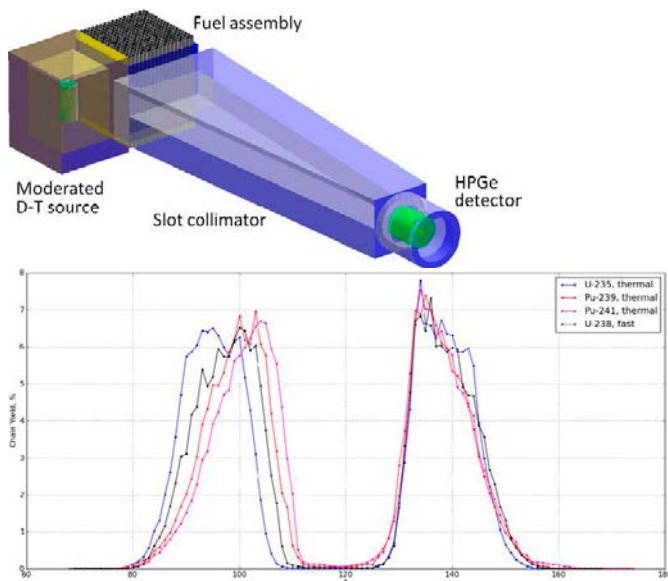
Figur 13. Bild på en schematisk CIPN-design.

Instrumentet är tänkt att omsluta bränslet, och planer finns på att integrera tekniken med PG och TN för att på så sätt bestämma bränsleparametrarna IE, BU och CT.

## Större, dyrare och potentiellt noggrannare tekniker

### Delayed gamma (DG)

Tekniken mäter fotoner som emitteras från fissionsprodukterna under sekunder till minuter efter det att en extern pulsad neutronkälla eller neutrongenerator bestrålat kärnbränslet. Av primärt intresse är att analysera den högenergetiska delen av fotonernas energispektrum, d.v.s. fotoner med energi mellan 3 och 6 MeV. Denna region av gammaspektrumet innehåller väldigt lite bakgrund från passiv gammastrålning och är därför fördelaktigt att analysera.



Figur 14. Konceptuell design för DG samt en bild över produktionerna av fissionsprodukter vid fission i U-235, Pu-239, Pu-241 och U-238.

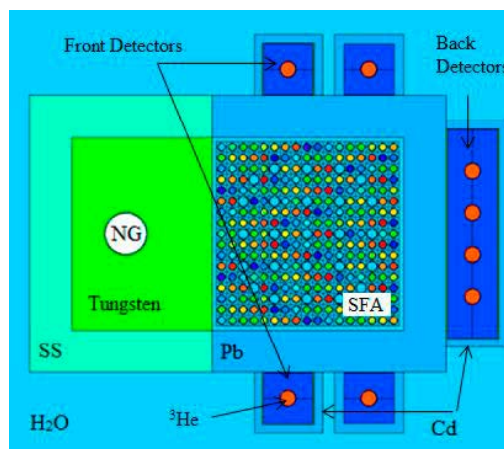
Genom att kompensera för detektorns responsfunktion, genom avfaltung av det uppmätta spektrumet, kan man dra slutsatser om innehållet av de fyra isotoperna U-235, U-238, Pu-239 och Pu-241. Man tror sig också kunna bestämma bränsleparametrarna IE, BU och CT genom att integrera instrumentet med någon neutronteknik såsom DN och DDA, samt med PG och TN.

Tekniken tros inte vara känslig mot innehållet i mitten av kärnbränslet, och det eventuella användandet av en linjäraccelerator (LINAC) spås bli kostsamt och komplicerat. Eventuellt kan en stark DT-källa också användas.

### Differential Die-Away (DDA)

Denna teknik bygger på att en extern pulsad neutronkälla interrogerar ett bränsle genom att inducera fission i det. Under ett kort tidsintervall efter neutronpulsen detekterar man neutroner i flera positioner runt bränslet, varpå källan sedan levererar en ny puls och scenariot upprepas. Man detekterar neutroner med en energi över 0,5 eV, i och med att detektorerna omges av Cd. Detta ger ett mått på neutronmultiplikationen i bränslet.

Forskning har visat att det finns en koppling mellan den detekterade signalen och bränsleparametrarna IE, BU och CT om analys görs i ett väl bestämt tidsfönster efter interrogation. Tekniken är dock tänkt att integreras med PG och TN för att få så sätt öka möjligheterna att bestämma parametrarna noggrannare.

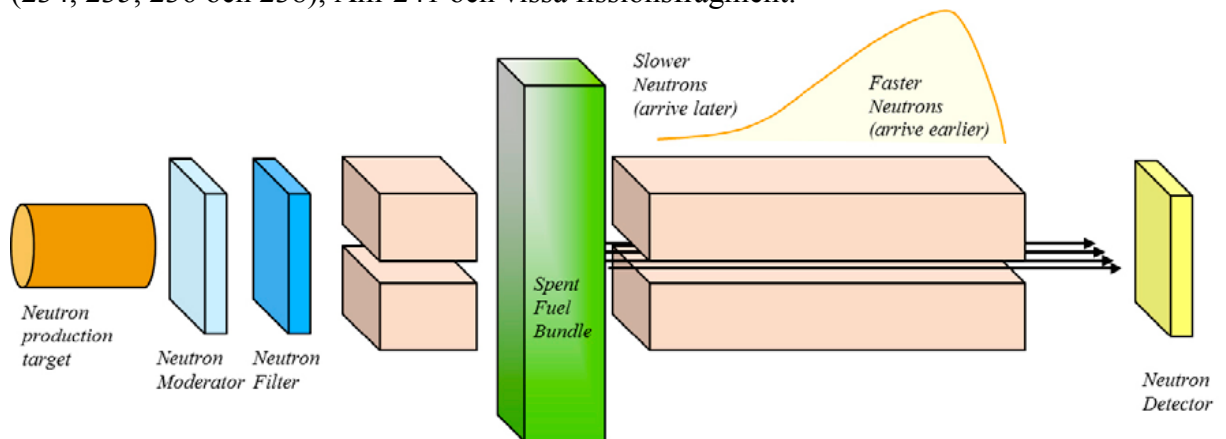


Figur 15. Schematisk bild på ett DDA-system.

### Neutron Resonance Transmission Analysis (NRTA)

Tekniken mäter transmissionen av neutroner genom ett kärnbränsle som funktion av neutronernas energi. Neutronerna emitteras från en pulsad partikelaccelerator och efter en rad interaktioner kommer dessa neutroner ha flera olika energier. Eftersom neutronpulsen är kort och avståndet till kärnbränslet är långt nog, anländer i princip monoenergetiska neutroner samtidigt till bränslet. För bästa resultat behövs detaljerad analys av neutronspektra och det är dessutom viktigt att de transmitterade strålarna inte interfererar med varandra. På detta sätt hoppas man kunna

kvantifiera massan av fyra Pu-isotoper (238, 239, 240 och 242), fyra uranisotoper (234, 235, 236 och 238), Am-241 och vissa fissionsfragment.

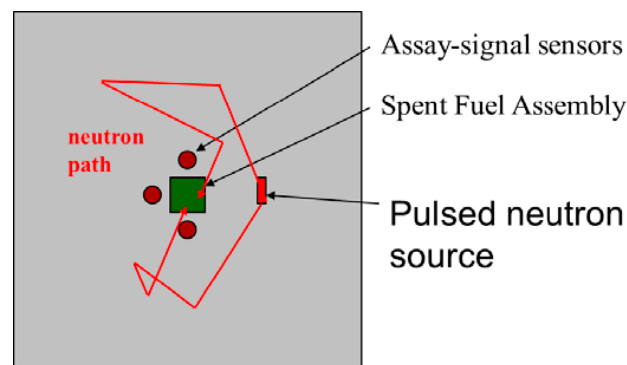


Figur 14. Konceptuell bild av NRTA-systemet.

Tekniken begränsas av att mätningen inte innefattar bränslets centrum, utan endast (maximalt) de yttersta 8 stavrader. Dessutom krävs en mycket stark neutron-accelerator på  $1 \times 10^{13}$  n/s för att mäta en axiell bränslenod på omkring 40 minuter. Systemet förutspås bli stort och mycket dyrt. Systemet föreslås integreras med PG och TN.

### Lead Slowing Down Spectroscopy (LSDS)

Även denna teknik kräver en extern neutronkälla, men den placeras i detta fall i en stor kub av extremt rent bly för att neutronerna där ska kunna saktas ner innan de når bränslet. Prompta neutroner från fission i de fissila kärnorna i det använda kärnbränslet mäts sedan upp med detektorer.



Figur 15. Bild på LSDS-principen.

Det är känt att den inre delen av ett kärnbränsle inte mäts lika väl som dess utsida då den skärmas mer. För att avgöra de fissila isotopernas massor behöver man utöver det uppmätta neutronspektrumet känna till neutronernas penetration i bränslet, något som är mycket utmanande att avgöra.



## Integration av NGSi-teknikerna med övriga tekniker

Som noterats i beskrivningarna av de olika teknikerna förutspår man integrering av flera olika mättekniker. Syftet är att genom integration i större grad kunna frikoppla sig från simuleringar, som annars ligger till grund för prediktionerna. I huvudsak föreslås många av teknikerna integreras med passiv gamma (PG) och mätning av totalantalet neutroner (TN). I huvudsak studerades PG med jonisationskammare och HPGe-detektorer.

TN är en teknik där man mäter det totala antalet neutroner som når detektorn. Denna signal är proportionell mot neutronmultiplikationen multiplicerat med den passiva neutronemissionen från primärt Cm-244, men även Cm-242 (kort kyltid), Pu-240 och  $(\alpha,n)$ -reaktioner. Informationen kan sedan kopplas till värden på bränsleparametrarna IE, BU och CT som man tror sig kunna bestämma om instrumentet integreras med PG.

I den mån det är möjligt är det också en fördel att mäta koincidenta neutroner (CN). Det innebär mätning av tidskorrelerade neutroner, så kallade dubletter då man simultant detekterar två neutroner eller tripletter då man simultant detekterar tre neutroner. I praktiken är det bara med DDSI-instrumentet som detta är möjligt, och då med användandet av andra tidsfönster än i DDSI-tekniken. Tidsfönstren öppnas så snart som möjligt följande en neutrontekning i CN-fallet, och i DDSI-fallet är tidsfönstret avsiktligt öppet under lång tid.

## 5. Rekommendation från denna studie

Det har inte varit lätt att erhålla information om den spännvidd bland objekt som kan tänkas ingå i den kategori som benämns ”atypiska bränsleobjekt”. I dagsläget har författaren fått ta del av dokumentation på ett täckt stavmagasin innehållande stavar med låg anrikning och varierande, låg utbränning. Stavarna är positionerade i ett oregelbundet mönster och magasinet täcks av ett lock.

En översiktlig genomgång av idag tillgängliga instrument ger direkt att:

- 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.
- FORK-detektorn (eller den förbättrade versionen) 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 FORK-detektorn. FORK-detektorn 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. Verifiering av att bränsleparametrarna är korrekta och att bränslet är intakt kan förmodligen inte göras för det här studerade atypiska bränslet och denna detektortyp.
- Gammalspektroskopi 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 hopplock av flera olika bränslen med olika egenskaper och historiker. Gammalspektroskopi kan således användas för att påvisa närvaron av nukleärt material, men inte för att verifiera korrekta bränsleparametrar eller att bränslet är intakt.

- 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.
- Tomografi skulle kunna vara ett verifieringsalternativ (helst mätning av både Cs-137 och Cs-134, men efter 35 års kyltid syns bara Cs-137), eftersom man ser ett tvärsnitt av bränslet och därigenom kan avgöra om det är intakt eller inte. Rekonstruktion av stavaktiviteterna borde också kunna göras, och därifrån kan man få en uppskattning av bränsleparametrarnas korrekthet. Dessvärre finns inget instrument i dagsläget tillgängligt för mätning.

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 ren spekulering, 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 föreslagna teknikerna 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 mäter en sak i taget.

## 6. Sammanfattning

Rapportens syfte är att beskriva ett urval instrument och metoder, både sådana som i dagsläget existerar och sådana som är under utveckling, som kan användas för verifiering av använt kärnbränsle. Motivationen är att det finns ett antal ”atypiska bränsleobjekt” som behöver verifieras inför inkapsling och att det idag är oklart hur verifiering kan komma att ske.

Författaren till rapporten har endast fått information om ett specifikt atypiskt bränsleobjekt, och av den anledningen har fokus legat på hur detta specifika objekt skulle kunna verifieras och i vilken utsträckning. Det är känt att det finns en betydande variation av bränsleobjekt som kan klassificeras som atypiska, både vid kärnkraftverken och i lagringsbassängerna på Clab, och av den anledningen är det omöjligt att dra generella slutsatser om hur deras verifiering kan komma att se ut. Det är tydligt att man behöver se till objektets specifika egenskaper för att kunna besvara den frågan.

## 7. Författarens tack

Författaren vill rikta ett tack till Annika Eliasson på SKB för hjälp med att få fram data, och till Staffan Jacobsson Svärd och Peter Jansson vid Uppsala universitet för deras genomläsning och respons på rapportens innehåll.

## 8. Referenser

**Borella et al 2011** Borella A, Carchon R, DeLimelette C, Symens D, van der Meer K, 2011. Spent fuel measurements with the fork detector at the nuclear power plant of Doel. In Proceeding of ESARDA 33<sup>rd</sup> annual meeting, Budapest, 16–20 May 2011. Luxembourg: Publications Office of the European Union.

**Chen 2010** Chen J D, Parcey D A, Kosierb R, Larsson M, Axell K, Dahlberg J, Lindberg B, Sundkvist E, Estrampes Blanch J, Norder Aspholm M, 2010. Detection of partial defects using a digital Cerenkov viewing device. In Preparing for future verification challenges: proceedings of an International Safeguards Symposium, Vienna, 1–5 November 2010. Available at: <http://www.iaea.org/safeguards/Symposium/2010/Documents/PapersRepository/338.pdf>

**IAEA 2009.** Safeguards criteria: special criteria for difficult-to-access fuel items. SG-SC-Annex-04, Version 2, Version Date: 2009-09-02. International Atomic Energy Agency, Vienna.

**IAEA 2010.** Model integrated safeguards approach for a spent fuel encapsulation plant. SG-PR-1305, Version 1, Version Date: 2010-10-06. International Atomic Energy Agency, Vienna.

**IAEA 2011.** Safeguards techniques and equipment. Vienna: International Atomic Energy Agency. (International Nuclear Verification series 1, Rev 2)

**Jansson P 2002.** Studies of nuclear fuel by means of nuclear spectroscopic methods. PhD thesis. Uppsala University, Sweden. (Comprehensive summaries of Uppsala dissertations from the Faculty of Science and Technology 714)

**LeBrun 2009** A LeBrun et al., Active Neutron Interrogation for the Verification of Irradiated HEU Residues, Proceedings of , DOI 10.1109/ANIMMA.2009.5503776

**SKB 2006.** Measurements of decay heat in spent nuclear fuel at the Swedish interim storage facility, Clab. SKB R-05-62, Svensk Kärnbränslehantering AB.

**S Jacobsson Svärd et al 2005** Jacobsson Svärd S, Håkansson A, Bäcklin A, Osifo O, Willman C, Jansson P, 2005. Non-destructive experimental determination of the pin-power distribution in nuclear fuel. Nuclear Technology 151, 70–76.

**S Jacobsson Svärd et al 2014** S Jacobsson Svärd et al., Gamma-ray Emission Tomography: Modelling and evaluation of partial-defect testing capabilities, Paper at IAEA, Vienna 2014.

**Tiitta et al, 2002** Tiita A, Saarinen J, Tarvainen M, Axell K, Jansson P, Carchon R, Gerits J, Kulikov Y, Lee Y G, Investigation on the possibility to use fork detector for partial defect verification of spent lwr fuel assemblies. Final report on Task JNT A 1071 (BEL, FIN, SWE) of the member states' support programme to IAEA. Radiation and Nuclear Safety Authority (STUK), Finland, 2002

**Tobin and Jansson 2013** S.J. Tobin, P. Jansson, Nondestructive assay options for spent fuel encapsulation. SKB Technical report TR-13-30, Svensk Kärnbränslehantering AB.

**UGET** Unattended Gamma Emission Tomography (UGET) Phase I, JNT A 1955, Joint Work Plan, Developed by the GET Working Group in the UGET project.

**Van der Meer K, Coeck M, 2006.** Is the fork detector a partial defect tester? In Addressing verification challenges: proceeding of an International Safeguards Symposium, Vienna, 16-20 October 2006, IAEA-CN-148/68.



2016:33

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)