

Framtida behov av radionuklidanalyser inom den nationella strålskyddsberedskapen

- Radionuklider, analysmetodik, utrustningskrav och detektionsgränser

Henrik Ramebäck, Jan Johansson



FOI är en huvudsakligen uppdragsfinansierad myndighet under Försvarsdepartementet. Kärnverksamheten är forskning, metod- och teknikutveckling till nytta för försvar och säkerhet. Organisationen har cirka 1350 anställda varav ungefär 950 är forskare. Detta gör organisationen till Sveriges största forskningsinstitut. FOI ger kunderna tillgång till ledande expertis inom ett stort antal tillämpningsområden såsom säkerhetspolitiska studier och analyser inom försvar och säkerhet, bedömningen av olika typer av hot, system för ledning och hantering av kriser, skydd mot hantering av farliga ämnen, IT-säkerhet och nya sensorers möjligheter.



FOI
Totalförsvarets forskningsinstitut
NBC-skydd
901 82 Umeå

Tel: 090-10 66 00
Fax: 090-10 68 00

www.foi.se

Henrik Ramebäck, Jan Johansson

Framtida behov av radionuklidanalyser inom den nationella strålskyddsberedskapen - Radionuklider, analysmetodik, utrustningskrav och detektionsgränser

Utgivare FOI - Totalförsvarets forskningsinstitut NBC-skydd 901 82 Umeå	Rapportnummer, ISRN FOI-R--1740--SE	Klassificering Användarrapport
	Forskningsområde 3. Skydd mot NBC och andra farliga ämnen	
	Månad, år December 2005	Projektnummer A416
	Delområde 31 N-forskning	
	Delområde 2	
Författare/redaktör Henrik Ramebäck Jan Johansson	Projektledare Henrik Ramebäck	
	Godkänd av	
	Uppdragsgivare/kundbeteckning SSI	
	Tekniskt och/eller vetenskapligt ansvarig Henrik Ramebäck	
Rapportens titel Framtida behov av radionuklidanalyser inom den nationella strålskyddsberedskapen - Radionuklider, analysmetodik, utrustningskrav och detektionsgränser		
Sammanfattning <p>Denna utredning är tänkt som ett underlag för den organisationsplan som SSI skall arbeta fram för den nationella strålskyddsberedskapen. I denna fas inbegriper utredningen de relevanta radionukliderna för olika tänkta scenarier, de idag vedertagna analysmetoderna, tidsaspekter för resultatleverans och utrustningskrav. Dessutom diskuteras kortfattat angreppssätt för att ta fram relevanta detektionsgränser. Till delar bygger arbetet på den scenariobaserade behovsanalys som togs fram av Arbetsgruppen för laboratoriemätningar under 2003. Arbetet har fokuserats på radionuklidanalys. Däremot tas inte olika metoder för exempelvis retrospektiv dosimetri upp.</p> <p>Sammanfattningsvis behövs primärt analysmetodik för γ-strålning radionuklider (γ-spektrometri), ^{90}Sr och aktinider. Utöver detta kan ytterligare några radionuklider vara relevanta att kunna analysera, exv. ^{89}Sr.</p> <p>Denna utredning skulle med fördel följas upp med en ny som utreder vilka detektionsgränser som skulle vara relevanta för olika radionuklider och scenarier.</p>		
Nyckelord Strålskyddsberedskap, radionuklider, analysmetoder, utrustning		
Övriga bibliografiska uppgifter	Språk Svenska	
ISSN 1650-1942	Antal sidor: 18 s.	
Distribution enligt missiv	Pris: Enligt prislista	

Issuing organization FOI – Swedish Defence Research Agency NBC Defence SE-901 82 Umeå	Report number, ISRN FOI-R--1740--SE	Report type User report
	Programme Areas 3. NBC Defence and other hazardous substances	
	Month year December 2005	Project no. A416
	Subcategories 31 Nuclear Defence Research	
	Subcategories 2	
Author/s (editor/s) Henrik Ramebäck Jan Johansson	Project manager Henrik Ramebäck	
	Approved by	
	Sponsoring agency SSI	
	Scientifically and technically responsible Henrik Ramebäck	
Report title (In translation) Future requirements for radionuclide analysis in Swedish radiation preparedness - Radionuclides, methods, equipment and detection limits		
Abstract <p>This investigation will serve as grounds for the organisational structure which is to be drawn up by the Swedish Radiation Protection Institute (Swedish acronym, SSI) regarding the preparedness for radiation emergencies. Within this phase, the investigation will comprise the following elements; the relevant radionuclides used under various hypothetical scenarios, the current established methods of analysis, the aspect of time when it comes to deliverance results as well as equipment demands. Also, details on how to develop relevant detection limits will be briefly discussed. Partly, the work is based on the scenario-based requirements analysis developed by the Working Group on Laboratory Measurements in 2003. The work has focussed on the analysis of radionuclides. However, methods of retrospective dosimetry, for example, are not presented.</p> <p>In conclusion, an analysis method for γ-emitting radionuclides (γ-spectrometry), ^{90}Sr and actinides is a primary need. Furthermore, additional radionuclides may be of relevance, for example ^{89}Sr.</p> <p>It would be favourable to see this investigation being followed by one investigating the detection limits which could be relevant for various radionuclides and scenarios.</p>		
Keywords Radiation preparedness, radionuclides, analytical methods, equipment		
Further bibliographic information	Language Swedish	
ISSN 1650-1942	Pages 18 p.	
	Price acc. to pricelist	

Innehållsförteckning

1 RELEVANTA RADIONUKLIDER	6
1.1 Strålkällor	6
1.2 Nedfall från kärnladdningsdetonation	7
1.2.1 Externbestrålning	7
1.2.2 Intag via föda	7
1.2.3 Intag via luftvägar	8
1.3 Nedfall från kärnreaktorolycka	8
2 ASPEKTER PÅ ANALYSMETODIK	9
2.1 Radiometrisk kontra icke-radiometrisk detektion	9
2.3 Metoder vid misstanke om illegal hantering	11
3 UTRUSTNINGSKRAV	12
4 RESULTATLEVERANS	13
5 DETEKTIONSGRÄNSER	14
6 REFERENSER	15
BILAGA 1: RADIONUKLIDER I STRÅLKÄLLOR	16
BILAGA 2: RADIONUKLIDER FRÅN KÄRNVAPENSPRÄNGNINGAR	18

1 Relevanta radionuklider

Kortfattat torde det vara relevant att bygga analysberedskap för de radionuklider som förekommer i kärnbränslecykeln¹, och som efter en händelse skulle ge signifikanta dosbidrag (dvs. fissonsprodukter, aktiveringsprodukter och transuraner). Förutom kärnbränslecykelns radionuklider förekommer även några radionuklider som produceras för diverse applikationer i form av strålkällor. Dessa strålkällor kan exempelvis vara avsedda för medicinskt bruk, RTGs och diverse industriella applikationer.

Den scenariobaserade behovsanalysen som gjordes av arbetsgruppen för laboriemätningar under 2003 [1] listade ett antal relevanta radionuklider utifrån tänkta scenarier för analysberedskap. De scenarier som belystes var: nedfall från kärnladdningsdetonationer, reaktorolycka, terrorism ("smutsig bomb", kontamination), borttappade strålkällor, transportolyckor, industriella olyckor och satelliter.

1.1 Strålkällor

I ett scenario innefattande strålkällor inbegrips avsiktlig och oavsiktlig utspridning eller utplacering, transportolyckor, industriella olyckor och borttappade källor (att likna med oavsiktlig utplacering). IAEA listar strålkällor enligt en kategorisering som bland annat bygger på mängd aktivitet, hur mobila de är etc. Man har fastslagit fem kategorier för hur farliga de är [2]:

Kategori 1: Extremt farliga att vistas vid endast några minuter (oskärt). Ger möjligtvis - dock osannolikt - livshotande eller permanenta skador på personer som vistas nära en utspridningspunkt (utspridning genom olycka eller oavsiktlig pga. exv. brand etc.).

Kategori 2: Mycket farliga att vistas vid redan efter en kort tid (minuter till timmar). Ger möjligtvis - dock mycket osannolikt - livshotande eller permanenta skador på personer som vistas nära en utspridningspunkt.

Kategori 3: Farliga att vistas vid några timmar. Ger möjligtvis - dock extremt osannolikt - livshotande eller permanenta skador på personer som vistas nära en utspridningspunkt.

Kategori 4: Troligtvis inte farliga: Ger troligen inte permanenta skador, eventuellt temporära. Ger ej permanenta skador efter utspridning.

Kategori 5: Inte farliga: Ger ej permanenta skador vare sig att vistas vid eller efter utspridning.

¹ Med kärnbränslecykelns radionuklider avses också radionuklider som kan komma ifråga vid en kärnladdningsdetonation.

Utöver skador (livshotande, permanenta eller temporära) på personer som vistats vid eller kring oskärmade strålkällor eller vid en direkt utsläppspunkt diskuteras möjligheten att kontaminera en vattentäkt så att nivåerna av radioaktiva ämnen blir farliga. Man konstaterar [2] att strålkällor, av någon av kategorierna, högst osannolikt skulle kunna ge upphov till några farliga nivåer även om de var lösliga. Vad som däremot skulle kunna bli ett problem är att stora områden ($> \text{km}^2$ för kategori 1-källor, $< \text{km}^2$ för kategori 2-källor och del av km^2 för kategori 3-källor) måste saneras. Denna sanering kommer att kräva stora mätesurser för friklassning.

En laboratorieförmåga med rutiner bör byggas upp för att analysera prover innehållande de enligt Appendix I förekommande radionukliderna i olika matriser (främst de i de farligare kategorierna, dvs. γ -strålande radionuklider, ^{90}Sr , $^{238, 239}\text{Pu}$ och ^{241}Am).

1.2 Nedfall från kärnladdningsdetonation

De radionuklider som anses relevanta beträffande nedfall från kärnladdningsdetonationer finns listade i ett antal referenser [3, 4]. Underlaget bygger på nedfall från de atmosfäriska kärnvapenprov som genomfördes främst fram till början på 1960-talet. Listningen är gjord utifrån tre exponerings vägar: externbestrålning, intag via föda och intag via luftvägar. Dessa de mest relevanta radionukliderna finns listade i Appendix II och en kort genomgång ges nedan. Sammanfattningsvis borde en laboratorieberedskap för följande radionuklider prioriteras: ^{131}I , ^{137}Cs , ^{89}Sr , ^{90}Sr , $^{144}\text{Ce}/^{144}\text{Pr}$, $^{106}\text{Ru}/^{106}\text{Rh}$, $^{239-241}\text{Pu}$, ^{241}Am , $^{95}\text{Zr}/^{95}\text{Nb}$, $^{140}\text{Ba}/^{140}\text{La}$.

1.2.1 Externbestrålning

De radionuklider som initialt, dvs. första året efter ett nedfall, ger mest dosbidrag via externbestrålning är $^{95}\text{Zr}/^{95}\text{Nb}$ (ca 50 % initialt [4]). Tillsammans med $^{140}\text{Ba}/^{140}\text{La}$ är bidraget ca 70 % av den totala initiala dosen från externbestrålning. Dock kommer ^{137}Cs redan efter ett fåtal år att börja dominera bidraget (ca 75 % efter 10 år).

1.2.2 Intag via föda

För intag via föda är det initiala bidraget störst från ^{131}I och ^{137}Cs (ca 90 %), men redan efter ett fåtal år dominerar bidragen från ^{90}Sr och ^{137}Cs [4].²

² Dosbidragen från ^{14}C och ^3H är inte försumbara. Dock dominerar de inte under de första åren efter en nukleär eller radiologisk händelse.

1.2.3 Intag via luftvägar

Störst dosbidrag initialt för intag via luftvägar svarar ^{144}Ce , ^{106}Ru och Pu+Am för (ca 80-90 %). På längre sikt kommer aktiniderna att dominera [4].

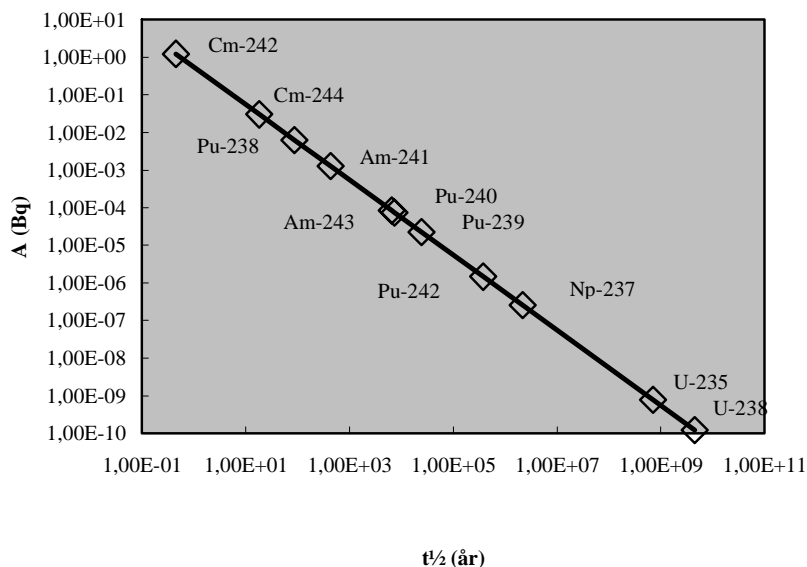
1.3 Nedfall från kärnreaktorolycka

Jämfört med ett bombnedfall förekommer i stort sett samma radionuklider vid ett utsläpp från en kärnreaktorolycka. Dock kommer bland annat exempelvis ^{134}Cs och troligtvis ^{242}Cm att tillkomma. Dessutom kommer, dels beroende på olyckans natur, proportionerna mellan de olika radionukliderna att skilja sig åt jämfört med nedfall från en kärnladdning. Ämnen som enkelt gasar av (ädelgaser, jod och cesium) från kärnbränslet kommer att släppas ut i större omfattning än de som inte gasar av i så stor utsträckning (exempelvis aktinider).

2 Aspekter på analysmetodik

2.1 Radiometrisk kontra icke-radiometrisk detektion

I radiometrisk detektion kommer mätsignalen från den interaktion den utsända partikeln, exv. α -partikeln eller γ -kvantat, ger upphov till i den detektor man använder. I masspektrometri kommer mätsignalen från den analytjon (isotop) man analyserar. Alltså är mätsignalen i masspektrometrisk detektion (fixt instrument) beroende på mängd analyt, dvs antal atomer av den isotop man avser att detektera. I radiometrisk detektion (fixt instrument och fix geometri) däremot beror mätsignalen även på radionuklidens halveringstid och utbytet av den emitterade partikeln, exempelvis fotonutbyte. Då inses att 'långlivade' radionuklider är kandidater för att detekteras med masspektrometri, medans 'kortlivade' radionuklider är kandidater för radiometrisk detektion. Vidare kan man för fixa instrument (masspektrometri och exv. α -spektrometri) till första approximationen räkna fram en halveringstid där detektionsmetoderna är jämbördiga mot detektionsgräns. För radionuklider med längre halveringstid kommer då detektionsgränsen till första approximationen att vara lägre med den masskänsliga detektionsmetoden och tvärtom. Smith *et al.* [5] belyser detta på ett bra sätt.



Figur 1 Sambandet mellan massa och aktivitet. Linjen visar vilken aktivitet 10 fg motsvarar som funktion av halveringstid på radionuklid.

I figur 1 (från Nygren [6]) visas sambandet mellan massa och aktivitet för radionuklider. Exempelvis ser man att en detektionsgräns/rapporteringsgräns för α -spektrometri på 1 mBq motsvarar en detektionsgräns med masspektrometri på 10 fg³ för en radionuklid

³ 10 fg är en detektionsgräns som med relativ enkelhet (någon minuts mättid) kan uppnås med en modern ICP-MS.

med en halveringstid på ca 400 år, dvs den för ^{241}Am . Noterbart är den utveckling som skett de senaste 10 åren. Tidigare masspektrometrar (ICP-MS) hade en känslighet som var runt 2 tiopotenser lägre, dvs den 'kritiska' halveringstiden låg kring 30000 år [7]. Helt klart är att den framtida utvecklingen kommer att göra metodik med ICP-MS ännu mer attraktiv.

2.2 Genomgång av idag använda detektionsmetoder för analys av radionuklider

Nedan ges en kortfattad och generell listning av för- och nackdelar med olika detektionsstrategier för analys av radionuklider.

a. γ -spektrometri med halvledardetektorer

- Fördelar:**
- Möjligheter att analysera prover utan kemisk separation
 - Enkelt: operatör kan byta prover och köra mätningar (dock svårare att analysera komplexa spektra)
- Nackdelar:**
- Begränsad till analys av γ -emitterande radionuklider
 - Svårigheter att analysera aktinider (i viss mån skulle ^{241}Am kunna detekteras, men det kan också ifrågasättas när det rör sig om ett färskt nedfall från reaktorhaverier)
 - Kräver kylning ($\text{N}_2(\text{l})$ eller elektriskt, dvs tillgång till flytande N_2 eller elektricitet. Dock krävs elektricitet till i stort sett all radioanalytisk instrumentering)

b. α -spektrometri med halvledardetektorer

- Fördelar:**
- I sammanhanget billig instrumentering
 - Högre känslighet för kortlivade radionuklider (se diskussionen ovan)
- Nackdelar:**
- Kräver preparering av fasta prover (elektrodeponering eller fällning), vilket förlänger analysiden
 - Lägre känslighet för långlivade radionuklider (se diskussionen ovan)
 - Kan ej lösa upp ^{239}Pu och ^{240}Pu i spektra
 - Tar generellt längre tid för analys och detektion jämfört med ICP-MS
 - I viss mån större krav på kemisk separation jämfört med ICP-MS (se nedan)

c. Vätskescintillationräkning (LSC)

- Fördelar:**
- Kräver inte fastprovpreparering
 - α/β -diskrimineringsmöjligheter (har sina begränsningar)
 - Eventuell potential för exempelvis totalalfamätningar
- Nackdelar:**
- I stort sett helt ospecifik detektion (specificiteten bygger på den kemiska separationen. Dock kvarstår problem om flera radioaktiva isotoper av samma element förekommer i provet)

d. Masspektrometri (ICP-MS)

- Fördelar:**
- Snabb detektion
 - Högre känslighet för långlivade radionuklider
 - Kräver inte fastprovpreparering
 - Möjlighet att göra isotopkvotmätningar
 - I viss mån lägre krav på kemisk separation jämfört med α -spektrometri (gäller främst krav på separation från matrisen)
- Nackdelar:**
- Stor investeringskostnad
 - Kräver mer av infrastruktur (gas till instrument, kylning) jämfört med α -spektrometri
 - Lägre känslighet för kortlivade radionuklider

2.3 Metoder vid misstanke om illegal hantering

Förutom radioanalytisk förmåga bör det även finnas en forensisk kapacitet för de fall då en händelse bedöms kunna ha kriminellt ursprung. Då detta kanske inte helt ligger inom SSI:s ansvar bör en samverkan initieras mellan de myndigheter, inom N-plattformen, som har intresse i att en sådan kapacitet finns på nationell nivå.

3 Utrustningskrav

För att kunna genomföra analys av radionuklider krävs i stort sett instrumentering för de olika tekniker som går igenom i punkt 2.2. Sammanfattningsvis består de olika mätsystemen av följande delar:

- **γ -spektrometrisystem** för de radionuklider som ger upphov till γ -fotoner vid sitt sönderfall:
 - HPGe-detektor
 - Pb-skydd
 - Tillhörande elektronik (HV-modul, spektrometriförstärkare, mångkanalsanalysator, dator, programvara för analys och utvärdering)
- **α -spektrometrisystem**
 - Halvledardetektor
 - Vakuumkanare
 - Vakuumpump
 - Elektronik etc.
- **LSC** för rena β -strålare eller β -strålare som bara sänder ut mycket lågintensiv γ -strålning. (Sådanda radionuklider kan, i viss mån, även analyseras med ICP-MS.)
 - LSC
 - Dator och programvara
- **Masspektrometri (ICP-MS)** främst för aktinider, men redan idag torde tekniken lämpa sig för andra radionuklider
 - ICP-MS
 - Ar-gasförsörjning
 - Kylning till pumpar och plasma
 - Dator med programvara

Annan instrumentering kan tillkomma beroende på vilken/vilka metoder som används i specifika fall (exempelvis kan atomabsorptionsspektrometri (AAS) tillkomma vid ^{90}Sr -analys för utbytesbestämning). I övrigt skall laboratorierna ha kalibreradekalibrerade vågar, pipetter och utrustning för provberedning. Provberedningsutrustning kan exempelvis vara kvarnar, torkskåp, ugnar, mikrovågsugnar etc.

Givetvis krävs det också laboratorielokaler som är väl lämpade för att hantera prover med radioaktivitet (dragskåp försedda med filter på utventilation etc.). Viktigt är att laboratorierna har fungerande rutiner (och lokaler) för mottagning och beredning av prover etc. för att undvika kontamination av laboratorielokaler och mellan prover.

4 Resultatleverans

Hur snabbt resultat måste komma beslutsfattande/beslutsfattare till del, är beroende på scenariet.. För nedfall från reaktorolyckor och kärnladdningsdetonationer är det dessutom till viss del årstidsberoende [8]. En av de viktigaste prioriteringarna bör vara att säkra livsmedelsproduktionen. De ur livsmedelsproduktionens synvinkel viktigaste radionukliderna är ^{131}I , $^{134, 137}\text{Cs}$ och $^{89, 90}\text{Sr}$. I inledningsskedet (första veckan/veckorna) kommer då ^{131}I att dominera medan de andra två blir signifikanta därefter. Å andra sidan kan det vara bra att på så tidigt stadium som möjligt få en uppfattning om nivåerna för $^{134, 137}\text{Cs}$ och ^{90}Sr . Mätbehoven utifrån olika tidpunkter efter ett nedfall kan delas in i [8]:

1. **De första dygnet:** En grov kartläggning av nedfallet genomförs. Här erhålls data för att besluta var, och vilka, åtgärder som kan behövas sättas in.
2. **Från de första dygnet till de första veckorna:** ^{131}I kommer att vara dominerande ur livsmedelssynpunkt, men betydelsen från $^{134, 137}\text{Cs}$ och $^{89, 90}\text{Sr}$ kommer att öka. Under denna period kan kontroll av livsmedel komma att vara betydande. Även om sådan produktkontroll är livsmedelsindustrins ansvar måste det kunna verifieras att den efterlevs.
3. **Tiden efter de första veckorna:** Fortsatt kontroll av främst livsmedel.

Vid riktade illvilliga attacker direkt mot exempelvis livsmedelsproduktionen kan mätbehoven komma att vara annorlunda utifrån ett tidsperspektiv. Här kan scenariet vara att livsmedelsprodukter redan finns ute i distributionskedjan. Detta ställer mycket högre krav på responsen från ett *Beredskapslaboratorium*. I värsta fallet kan hela landets butiker behöva "frysa" försäljningen av ett eller flera livsmedel. Dessutom kan det finnas ett mörkertal beträffande produkter, och kvantitet, som redan konsumerats. I ett sådant läge kan analysmetodik för humanverifikation vara viktigt. Mätbehovet är alltså i stort sett momentant, eller åtminstone bör en första prognos föreligga inom ett dygn eller snabbare. Samma diskussion som ovan är i stort sett tillämplig på scenarier där starka strålkällor placerats ut i illvilligt syfte.

5 Detektionsgränser

Den centrala utgångspunkten för vilka detektionsgränser som kommer att behövas måste vara vad som är ”*fit-for-purpose*” (uppfyller förspecifierade krav som snabbhet, specificitet etc.). Ett angreppssätt skulle kunna vara att utifrån aktionsnivåer för olika livsmedel [9], vilket direkt skulle ge detektionsgränser som en fraktion av aktionsnivån för just livsmedel, och transferfaktorer genom näringskedjan till människa erhålla relevanta detektionsgränser för olika prov typer (jord, betesgräs, spannmål, etc.). Aktionsnivåerna är tänkta att vara begränsade till att användas under första året efter en nukleär eller radiologisk händelse. Det innebär att man kan få ett ”spann” av relevanta detektionsgränser utifrån scenarier och tidpunkter efter händelsen. Man skulle kunna tänka sig att man initialt snabbt behöver få fram information om nivåer, dvs. man använder sig av metodik med relativt höga detektionsgränser, medan man efter tiden använder känsligare, men eventuellt mer tidskrävande metoder om resultatet från den första snabba analysen inte detekterade någon aktivitet eller för att verifiera de första analyserna. En viktig komponent för att kunna styrka eller avfärda en eventuell händelse är här *nollprovet*, dvs vilka nivåer var det innan händelsen.

6 Referenser

Scenariobaserad behovsanalys för en bättre nationell strålskyddsberedskap, SSI 73/2228/03, 2003

- 1 *Categorization of radioactive sources. Revision of IAEA-TECDOC-1191, Categorization of radioation sources*, IAEA-TECDOC-1344, 2003
- 2 UNSCEAR: *Ionizing radiation: Sources and biological effects*, UNSCEAR 1982 Report
- 3 UNSCEAR: *Sources and effects of ionizing radiation*, UNSCEAR 2000 Report
- 4 Smith, M.R., E. Wyse J., Koppenaar, D.W., J. Radioanal. Nucl. Chem., **160**, 341, 1992
- 5 Nygren,U., *Radioanalytical Chemistry in Emergency Preparedness*, Licentiatavhandling, Luleå Tekniska Högskola, 2001:69, ISSN 1402-1757, 2001
- 6 Ramebäck, H., *Development and Applications of Some Radioanalytical Procedures*, Doktorsavhandling, Chalmers Tekniska Högskola, ISBN: 91-7197-642-6, 1998
- 7 Bergman, R., *Radiakproblem inom livsmedelssektorn*, FOA-R--95-00140-4.3—SE, ISSN 1104-9154, 1995
- 8 *Preparedness and Response for a Nuclear or Radiological Emergency*, IAEA Safety Standards Series No. GS-R-2, IAEA, 2002

Radionuklider i strålkällor

Radionuklider förekommande i olika typer av strålkällor och kategorisering enligt IAEA [1].

Kategori 1:

^{90}Sr
 ^{137}Cs
 ^{238}Pu
 ^{60}Co

Kategori 2 (borträknat de som finns i högre kategori):

^{192}Ir
 ^{169}Yb
 ^{170}Tm
 ^{60}Co

Kategori 3 (borträknat de som finns i högre kategori):

^{241}Am (aktiviteter som förekommer motsvarar kategori 2-3)
 ^{252}Cf
 $^{241}\text{Am/Be}$ (aktiviteter som förekommer motsvarar kategori 3)
 $^{239}\text{Pu/Be}$ (aktiviteter som förekommer motsvarar kategori 3)

Kategori 4 (borträknat de som finns i högre kategori):

^{226}Ra
 ^{125}I
 ^{198}Au
 ^{85}Kr
 ^{147}Pm
 ^{244}Cm
 ^{109}Cd
 ^{153}Gd
 ^{210}Po
 ^{99}Mo (aktiviteter som förekommer motsvarar kategori 3-4)
 ^{131}I (aktiviteter som förekommer motsvarar kategori 4)

Kategori 5 (borträknat de som finns i högre kategori):

⁵⁵Fe

⁵⁷Co

⁶³Ni

³H (aktiviteter som förekommer motsvarar kategori 5)

¹⁰⁶Ru/Rh

¹⁰³Pd

⁶⁸Ge

³²P (aktiviteter som förekommer motsvarar kategori 5)

Radionuklider från kärnvapensprängningar

Mest dosbidragande radionuklider vid nedfall från kärnvapensprängningar enligt UNSCEAR [3, 4]. (Radionukliderna är inte listade i någon särskild ordning.)

A. Extern bestrålning

¹³¹I
¹⁴⁰Ba, ¹⁴⁰La
¹⁴¹Ce
¹⁰³Ru
⁹⁵Zr, ⁹⁵Nb
¹⁴⁴Ce, ¹⁴⁴Pr
⁵⁴Mn
¹⁰⁶Ru, ¹⁰⁶Rh
¹²⁵Sb
¹³⁷Cs

B. Intag via föda

¹³¹I
¹⁴⁰Ba, ¹⁴⁰La
⁸⁹Sr
⁹⁰Sr
⁵⁵Fe
¹³⁷Cs

C. Intag via luftvägar

¹³¹I
¹⁴⁰Ba, ¹⁴⁰La
¹⁰³Ru
¹⁴¹Ce
⁸⁹Sr
⁹¹Y
⁹⁵Zr, ⁹⁵Nb
¹⁴⁴Ce, ¹⁴⁴Pr
⁵⁴Mn
¹⁰⁶Ru, ¹⁰⁶Rh
¹²⁵Sb
⁵⁵Fe
⁹⁰Sr
¹³⁷Cs
²³⁹⁻²⁴¹Pu, ²⁴¹Am