

R-99-58

Plutonium – data, egenskaper med mera

sammanställning gjord av
Per-Eric Ahlström

Svensk Kärnbränslehantering AB

November 1999

Svensk Kärnbränslehantering AB

Swedish Nuclear Fuel
and Waste Management Co
Box 5864

SE-102 40 Stockholm Sweden

Tel 08-459 84 00
+46 8 459 84 00

Fax 08-661 57 19
+46 8 661 57 19



ISSN 1402-3091

SKB Rapport R-99-58

Plutonium – data, egenskaper med mera

sammanställning gjord av
Per-Eric Ahlström

Svensk Kärnbränslehantering AB

November 1999

Förord

I diskussionen om det använda kärnbränslet nämns ofta plutonium särskilt. Det är angeläget att debatten grundas på så riktiga data och fakta som möjligt. Med hänsyn till det intresse som finns för plutonium har några data och egenskaper för plutonium samlats i denna rapport. Den tar också upp ett par exempel som förekommit i den svenska debatten under 1990-talet. Syftet är att ge intresserade läsare en lättillgänglig och samlad bild av plutoniums viktigaste egenskaper, förekomst, användningsområden och hälsoeffekter/farlighet. Denna utgåva är en reviderad upplaga av den tidigare R-97-10. Några nya data som framkommit under senare år har tillagts och vissa beräkningar har reviderats med hänsyn till ICRP Publication 68. I bilaga 2, som tillkommit, refereras några i den vetenskapliga litteraturen rapporterade resultat från ett antal medicinska studier av människor och djur som utsatts för exponering av plutonium. Rapporten utarbetades som en del av projektet BAR – Beskrivning Av Risk – vid SKB.

Per-Eric Ahlström

Sammanfattning

I diskussionen om det långlivade radioaktiva avfallet nämns ofta plutonium särskilt. Plutonium upptäcktes och framställdes första gången i början av 1940-talet som ett led i framställningen av de första kärnvapnen.

Plutonium är grundämne 94 dvs atomkärnan har 94 protoner. Antalet neutroner i kärnan kan variera från 134 till 153 dvs atomvikten från 228 till 247. Alla plutoniumisotoper är instabila. Halveringstiderna varierar från mindre än 4 millisekunder för Pu-228 till 80,8 millioner år för Pu-244. Rent plutonium är ett metalliskt ämne med en täthet mellan 15,9 och 19,8 g/cm³ beroende på temperaturen. Metallen reagerar lätt med luft och bildar oxider, varav plutoniumdioxid är vanligast med en täthet på 11,4 g/cm³.

Det sägs ofta att plutonium är ett ämne som skapats av människan. Detta är inte sant. I rika uranmalmer kan finnas plutonium som bildats i naturen. Mängden är ungefär en billiondel av uranmängden. Detta är inte mycket men visar dels att plutonium bildas naturligt och dels att det sitter kvar hos uranet när uranet sitter fast i berget. Den mängd plutonium som finns naturligt i bergen är dock mycket liten jämfört med den mängd som framställts av människan.

Plutonium används dels som bränsle i kärnreaktorer, dels i kärnvapen och dels i vissa typer av batterier med stora krav på livslängd. I reaktorer och vapen är det framförallt plutonium-239 (halveringstid 24100 år) som används, medan man för batterier använder plutonium-238 (halveringstid 88 år).

Plutonium i använt kärnbränsle och i batterier är i oxidform – plutoniumdioxid. Denna form är mycket svårslöslig i vatten. Den lilla mängd plutonium som kan lösas i vatten fastnar dessutom lätt på lerpartiklar och bergytor. Detta innebär att även om en kapsel med använt kärnbränsle skulle vara defekt och ta in vatten när den deponeras i ett djupförvar kommer inget plutonium att hinna vandra ut genom den lerbuffert som omger varje kapsel. Det omvandlas genom det radioaktiva sönderfallet till uran innan det kommer igenom leran.

Plutonium är ett i några avseenden mycket farligt ämne. Det är mycket farligt att få in i kroppen särskilt via inandning. Om plutonium kommer in via mag-tarmkanalen går största delen rakt igenom och tas inte upp av kroppen. All hantering av plutonium måste på grund av inandningsrisken ske i sk handskboxar dvs täta skåp med styrd och filtrerad ventilation. De vanliga plutoniumisotoperna som finns i kärnbränsle eller batterier avger inte stark genomträngande strålning som kräver skärmning.

Även om det innebär en stor hälsorisk att få i sig plutonium så finns det andra ämnen, som många människor använder dagligen, som är lika farliga. Det finns även ämnen som är mycket giftigare än plutonium t ex botulin ett kemiskt ämne som kan bildas i gammalt kött.

De kortlivade plutonium-isotoperna är mycket farligare att få in i kroppen än de långlivade, som utgör den större mängden. Detta innebär att farligheten för plutonium i använt kärnbränsle minskar snabbare än totala mängden plutonium.

Förekomsten av plutonium har inte varit någon viktig orsak till strålskada i de olyckor med reaktorer eller strålkällor som är kända. Vid kraftig överexponering med plutonium

ökar risken för lungcancer påtagligt. Det tar decennier för att utveckla sådan cancer. Sådan överexponering har förekommit vid kärnvapenanläggningar i Ryssland. Studier av dem som drabbats visar dock att tobaksrökning utgjort en större riskfaktor även bland dem som arbetat med plutonium i de ryska anläggningarna. De som arbetat vid motsvarande anläggningar i USA har inte drabbats på samma sätt trots flera fall av överexponering.

Innehållsförteckning

	page
1 Inledning	9
2 Plutoniums fysikaliska egenskaper	9
3 Plutoniums kemiska egenskaper	10
4 Plutoniums isotopsammansättning	10
5 Plutoniums användning	11
5.1 Kärnbränsle	11
5.2 Kärnladdningar	12
5.3 Batterier	13
6 Plutonium i naturen	13
7 Plutoniums hälsoeffekter	14
8 Plutonium från kärnkraftsel enligt Eva Goës	18
9 Plutonium i en snusdosa från Greenpeace	18
10 Referenser	19
Bilaga 1: Plutonium i USA	21
Bilaga 2: Plutoniums hälsoeffekter – sammanställning av några observationer	23
1 Uppföljning av 26 arbetare vid Los Alamos – Manhattan Project	23
2 Uppföljning av alla Pu-arbetare vid Los Alamos – Manhattan Project	23
3 Uppföljning av arbetare vid Rocky Flats	24
4 Uppföljning av arbetare vid Mayak	24
5 Uppföljning av kvinnor som målat med radiumfärg	26
6 Observationer på hundar som utsatts för plutonium eller radium	27
7 Akut giftighet för plutonium hos hundar	28
8 Diskussion	28
9 Referenser	30

PLUTONIUM – data, egenskaper m m

1 Inledning

I diskussionen om det långlivade radioaktiva avfallet nämns ofta plutonium särskilt. Plutonium upptäcktes år 1941. Nobelpristagaren i kemi, Glenn Seaborg ger följande uppgifter i en intervju /Nukem, 1996/:

- Plutonium upptäcktes 23–24 februari 1941 vid University of California, Berkeley, Gilman Hall; det var Pu-238 framställt genom deutroneutronstrålning¹ av U-238-kärnor.
- Den första synliga mängden isolerades 20 augusti 1942 i University of Chicago, Jones Lab.
- Den första vägbara mängden – 2,77 mikrogram – 10 september 1942 också i Chicago.

Under 1945 hade man för första gången fått fram kilogrammängder, tillräckligt för att framställa de kärnladdningar som detonerade vid Alamogordo² och över Nagasaki.

Plutonium beskrivs ibland som världens farligaste ämne. Greenpeace påstår i en broschyr att utbränt bränsle motsvarande den mängd som ryms i en snusdosa är tillräcklig för att utrota hela Sveriges befolkning och att det är de mycket långlivade radioaktiva ämnena, t ex plutonium, som är den största faran /Greenpeace, 1995/. Miljöpartisten Eva Goës sade i en riksdagsdebatt att när en familj lagar sin middag med kärnkraftsel bildas plutonium tillräckligt för att döda hela familjen /Riksdagen, 1996/. I det följande har några data och fakta om plutoniums egenskaper sammanställts. Underlaget har huvudsakligen hämtats från /GSE, 1989/.

2 Plutoniums fysikaliska egenskaper

Rent plutonium är ett metalliskt ämne. Metallen förekommer i sex olika faser (tillstånd) och har en smältpunkt på 640 °C. Se följande tabell /DOE, 1999/:

Temperatur °C	Fas	Kristallform	Täthet g/cm ³
< 122	Alfa	Monoklin	19,84
122–206	Beta	Monoklin	17,70
206–319	Gamma	Ortoromb	17,14
319–451	Delta	Kub	15,92
451–485	Delta-prim	Tetraheder	16,00
485–640	Epsilon	Kub	16,51

¹ Deutroneutron = tung väteatomkärna bestående av en proton och en neutron.

² Alamogordo i New Mexico var platsen för den första provsprängningen i juli 1945. Hiroshima-bomben tillverkades av uran-235.

Två av fasövergångarna med stigande temperatur ger täthetsökning. Plutonium är därmed den enda metall som drar sig samman när temperaturen ökar!

Plutoniummetall reagerar med luft och bildar oxid. Den vanligaste oxiden är plutoniumdioxid PuO_2 med en täthet på $11,4 \text{ g/cm}^3$ och en smältpunkt på $2290 \text{ }^\circ\text{C}$.

Plutonium är grundämne 94 dvs atomkärnan har 94 protoner. Antalet neutroner i kärnan kan variera från 134 till 153 dvs atomvikten från 228 till 247. Alla plutoniumisotoper är instabila. Halveringstiderna varierar från mindre än 4 millisekunder för Pu-228 till 80,8 millioner år för Pu-244 /Chu, 1999/. Isotoperna 239 och 241 är fissila³ och därför mycket bra som bränsle i kärnreaktorer. Tvärsnittet för kärnklyvning av Pu-239 är ca 1,4 ggr större och för Pu-241 ca 1,9 ggr större än för U-235. Detta betyder att det behövs mindre mängd Pu-239 och ännu mindre Pu-241 än U-235 för att åstadkomma en kedjereaktion. Vidare är utbytet av neutroner per kärnklyvning större för plutonium än för uran, vilket gör det möjligt att konstruera sk bridreaktorer (se nedan).

3 Plutoniums kemiska egenskaper

Plutonium kan förekomma i åtminstone fyra olika valenstillstånd (+3, +4, +5, +6) och dess kemi är därför mycket komplex jämfört med vanliga metalliska grundämnen.

Plutonium i metallisk form reagerar med luft och bildar oxider. Reaktionen kan under vissa förhållanden ske spontant vid rumstemperatur. All hantering av plutoniummetall bör därför ske i slutna och torra utrymmen.

Den vanliga formen av plutonium i använt kärnbränsle är plutoniumdioxid, ett keramiskt material som är mycket svårslösligt i rent vatten. Plutoniums löslighet i vatten är ungefär 2 mikrogram per liter. Plutonium löst i vatten tenderar att fastna på ytor som vattnet kommer i kontakt med. Detta gäller t ex lera och sprickytor i berg vid ett djupförvar. Den buffert av lera som föreslås omge varje kapsel i ett djupförvar är en mycket effektiv barriär för plutonium /Sellin, 1997/.

4 Plutoniums isotopsammansättning

Plutonium bildas (till övervägande del) genom infångning av neutroner i uran-238 bland annat i vanligt kärnbränsle. De viktigaste isotoperna i kärntekniska sammanhang upptas i tabell 1.

³ Fissila eller klyvbara isotoper är isotoper som kan klyvas i två fragment med termiska/långsamma neutroner. Vid kärnklyvning frigörs även neutroner som kan ge ytterligare kärnklyvningar. Neutronernas energi är i medeltal över 2 MeV (megaelektronvolt). Kärnklyvning sker lättast med termiska/långsamma neutroner som har energi av storleken 0,02–0,1 eV. Moderatorn, t ex vatten, i reaktorn bromsar neutronerna till lämplig energi.

Tabell 1. Halveringstider för några plutoniumisotoper och isotopsammansättning för plutonium i använt bränsle från en kokvattenreaktor, BWR.

Isotop	Halverings- tid år	Sönder- fallstyp	Halt och sammansättning av plutonium i BWR-bränsle med utbränningen 38 MWd/kg efter år				
			0	100	1 000	10 000	100 000
Totalt g Pu / kg U			9,2	7,8	7,4	5,0	0,7
Pu 236	2,858	alfa	0,00001 %	–	–	–	–
Pu 238	87,7	alfa	2 %	1 %	0,0009 %	–	–
Pu 239	24 110	alfa	52 %	60 %	62 %	72 %	37 %
Pu 240	6 563	alfa	27 %	32 %	30 %	17 %	0,009 %
Pu 241	14,35	beta	13 %	0,1 %	–	–	–
Pu 242	373 300	alfa	6 %	7 %	8 %	11 %	63 %
Pu 244	80,8 miljoner	alfa	0,0004 %	0,0004 %	0,0005 %	0,0007 %	0,005 %

5 Plutoniums användning

Plutonium har tre betydande användningsområden dels i kärnbränsle, dels i kärnladdningar och dels i batterier för speciella ändamål.

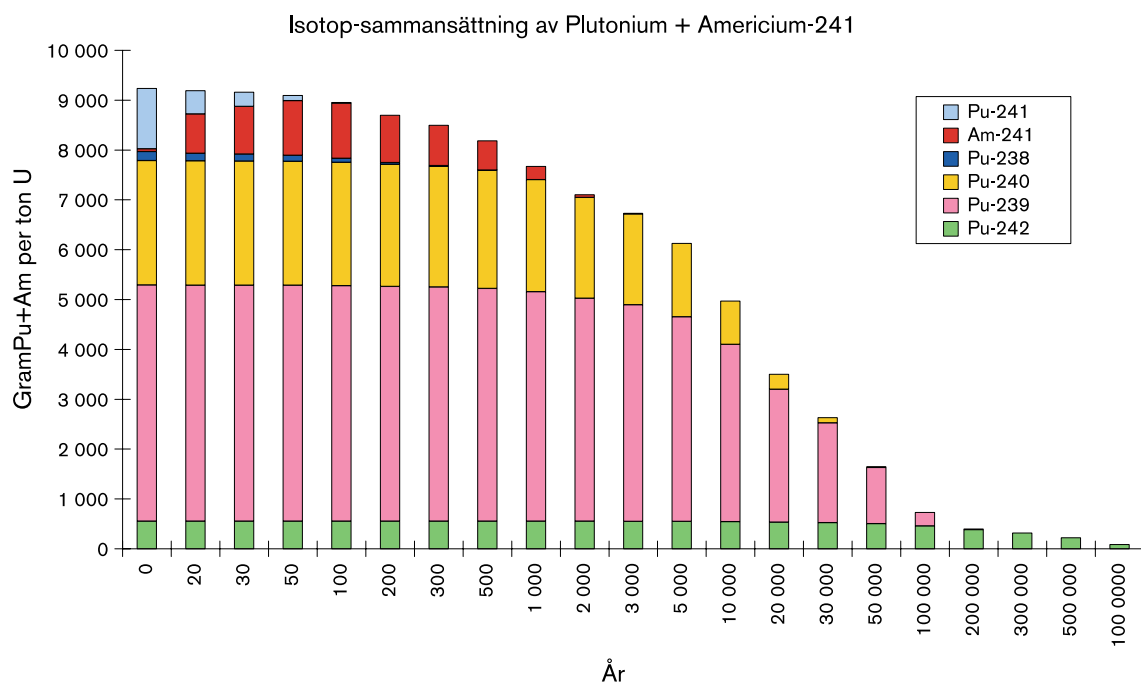
5.1 Kärnbränsle

Plutonium bildas genom infångning av neutroner i uran-238 i vanligt kärnbränsle. En del av det plutonium som bildas, förbränns (genom kärnklyvning) på plats medan bränslet sitter kvar i reaktorn och bidrar därmed till energiproduktionen. I genomsnitt i en modern lättvattenreaktor med anrikat uran bränsle kommer ca en tredjedel av energiuttaget från kärnklyvningar av plutonium. Utbränt lättvattenreaktorbränsle innehåller knappt 10 kg plutonium per ton uran – sammansättningen framgår av tabell 1 och figur 1. Kvarvarande plutonium i lättvattenreaktorbränsle kan återvinnas genom uppärbetning (i en kemisk fabrik) och återanvändas i samma reaktor eller i en annan reaktor som s k MOX-bränsle⁴. Sådan s k plutoniumåterföring sker i ett antal reaktorer i Frankrike, Schweiz, Tyskland m fl länder. Erfarenheter från reaktordrift med denna typ av bränsle finns sedan slutet av 1960-talet. I Sverige har försök med ett mindre antal MOX-bränslestavar genomförts i Ågesta och Oskarshamn 1. Av olika skäl kan plutonium från uppärbetat MOX-bränsle återföras till nytt bränsle endast ett litet antal gånger. Efter två à tre återföringar har kvaliteten på plutonium försämrats genom ökad andel av bland annat plutonium-238, -240 och -242 vilket försvårar hanteringen av plutonium och dess användning i lättvattenreaktorer.

Under 1960- och 1970-talet utvecklades bridreaktorer där man använder plutonium som bränsle och där uran-238 omvandlas till plutonium. Reaktorn kan konstrueras så att det bildas mer plutonium än som förbrukas⁵. På så sätt skulle man kunna omvandla en betydande del av det uran-238 som tas upp ur gruvor till plutonium direkt användbart som kärnbränsle. Energiuttaget per utbruten mängd uran skulle kunna ökas från någon procent till kanske 70 procent av teoretiskt energiinnehåll. Utvecklingen av bridreaktorer

⁴ MOX = mixed oxide fuel = blandoxidbränsle - blandning av plutonium- och uran-oxider.

⁵ Brid av eng. breed = föröka; Breeder reactor – bridreaktor.



Figur 1. Sammansättningen av plutonium och americium-241 (bildat av plutonium-241) från BWR-bränsle med utbränningen 38 MWd/kgU som funktion av tiden efter uttag ur reaktorn. Plutonium-239 och -240 dominerar upp till ca 50 000 år. Ordinatateln visar gram per ton uran i bränslet.

avstannade under 1980-talet i flera länder av ekonomiska och politiska skäl. För att starta en stor bredreaktor – typ Superphenix i Frankrike med 1200 MW eleffekt – behövs 3 å 4 ton plutonium.

5.2 Kärnladdningar

För tillverkning av kärnladdningar använder man plutonium med hög andel plutonium-239, s k vapenplutonium. Den mängd plutonium-239 som behövs för att tillverka en kärnladdning är i storleken några få kilogram. Plutonium i metallisk form legeras med ett annat ämne för att stabilisera materialet. Man uppger att vapenplutonium innehåller minst 93 % plutonium-239. För att erhålla sådan kvalitet måste bränslet tas ut efter en låg utbränning, mindre än 1 MWd/kg dvs ett par procent av vad som är normalt i lättvattenreaktorer.

Det är dock möjligt att tillverka kärnladdningar av plutonium med lägre halt plutonium-239, men det kräver större mängd och sannolikt en mer avancerad teknik. Exempelvis innehåller plutonium från högutbränt LWR-bränsle ca 2 % plutonium-238. Detta avger så stark alfastrålning att värmeutvecklingen blir så hög i metallen att den måste kylas. Problemet accentueras ytterligare när plutonium-241 sönderfaller till americium-241. På mycket lång sikt minskar mängden av de mer kortlivade plutoniumisotoperna och den relativa halten plutonium-239 ökar till som mest ca 77 % efter ca 25 000 år. Samtidigt har emellertid den totala mängden plutonium gått ned till en tredjedel.

I USA har det militära programmet producerat sammanlagt 111,4 ton plutonium sedan 1945 /Nukem, 1996/. Det ryska lagret av plutonium uppskattas till 120 å 200 ton. Se även bilaga 1.

Plutonium från nedfallet efter de atmosfäriska kärnvapenproven har av olika skäl en annan sammansättning än vapenplutonium – 84 % plutonium-239, 15 % plutonium-240 och ca 1 % plutonium-241 (denna isotop har dock nu minskat väsentligt och omvandlats till americium-241 – halveringstiden för plutonium-241 är 14,35 år).

5.3 Batterier

Plutonium i batterier utgörs av huvudsakligen plutonium-238 (80–89 %), vilket som redan nämnts är en stark alfa-strålare och därmed en långlivad värmekälla⁶. Sådana batterier har använts som energikälla i satelliter, för att driva instrument på månen, i fyrar och andra typer av apparater på isolerade platser men även i sk pacemakers. Enligt en uppgift hade 1560 stycken sådana pacemakers inplanterats fram till 1986 och av dessa var 900 i drift. Batterierna innehåller 150–250 mg plutonium-238 (= 100–150 GBq). Beräknad helkroppsdos till bäraren är mindre än 5 mSv/år, till maken/makan ca 75 mikroSv/år och till andra familjemedlemmar 1–15 mikroSv/år /Kolb, 1999/. (Man kan notera att aktiviteten är 1,2 à 1,8 miljoner gånger den aktivitet som skulle ge en arbetare högsta tillåtna årsdos 20 mSv vid intag via föda /ICRP68/). Batteriet till rymdfarkosten Cassini som under 1998 sändes upp för att utforska planeten Saturnus innehåller tre termoelektriska generatorer med sammanlagt ca 33 kg plutonium-238-dioxid /Nasa, 1997/. De avger tillsammans ca 13 kW värme som omvandlas till knappt 900 W elektrisk effekt.

6 Plutonium i naturen

Plutonium anges ofta som ett konstgjort – av människan skapat – grundämne. Detta är inte helt korrekt. I naturen finns små mängder plutonium som bildas genom att fria neutroner infångas av uran på samma sätt som i en kärnreaktor. I en uranmalm finns för varje gram uran något eller några pikogram (10^{-12} gram) plutonium. Undersökningar av rika uranmalmer t ex från Cigar Lake i Kanada visar att uppmätt mängd plutonium stämmer väl med beräknad mängd med antagandet att jämvikt uppnåtts mellan bildat och sönderfallande plutonium. Beräknade värden är 2 à 5 pikogram per gram uran (lika med mikrogram/ton); uppmätta värden är 1,9 à 3,2 pikogram/gram /Cramer, 1994/. Denna överensstämmelse visar också att uran och plutonium under normala geokemiska förhållanden inte separeras från varandra under mycket lång tid – många 10 000-tals år. Totalt uppskattas att den övre jordskorpan innehåller några kilogram naturligt bildat plutonium-239.

I naturen finns också spår av det plutonium-244 (80,8 miljoner år halveringstid) som bildades när jordens alla övriga grundämnen bildades.

Plutonium har också spritts i naturen av människan framför allt genom de atmosfäriska kärnvapenproven under främst 1950-talet och 1960-talet, men även genom att satelliter med plutonium-källor har störtat. Totalt finns från provsprängningarna ca tre ton plutonium kvar i naturen, utspritt över hela jordklotet men med ca 80 % på norra halvklotet. Man kan därav beräkna nedfallet av plutonium över Sverige till ca 4 kilogram. Sannolikt är det väsentligt större om man beaktar att en stor del kommer från de sovjetiska proven vid Novaja Semlja, vilka gav relativt sett stort nedfall i norra Sverige. Utsläppet från kärnreaktorolyckan i Tjernobyl beräknas ha innehållit ca 20 kg (55 TBq) av plutonium-

⁶ Americium-241 – dotterprodukt till plutonium-241 – används i vanliga brandvarnare / rökdetektorer. En brandvarnare för hemmabruk innehåller högst 37000 Bq americium-241 (1 mikroCurie).

239 och -240 varav ca 90 % föll ned i det dåvarande Sovjetunionen. Några satelliter med plutonium-238-källor har störtat. Enligt uppgift innehöll en sådan källa från Apollo 13 en aktivitet av $1,65 \text{ PBq}^7$ (= 44 500 Curie) eller ca 2,6 kg plutonium-238. Denna ligger i sin kapsel på havets botten. Andra liknande källor från USA och Sovjet (SNAP-9A år 1964 och Cosmos 954 år 1978) spreds ut i atmosfären när satelliterna störtade /ANS, 1995/.

Den vetenskapliga tidskriften Nature rapporterade den 7 januari 1999 att plutonium har rört sig med grundvattnet i bergen under Nevadaöknen /Kersting, 1999/. Små mängder plutonium från en underjordisk kärnvapenexplosion 1968 har fastnat på små partiklar (kolloider). Dessa har följt med grundvattnet som sedan, i mitten på 1990-talet, pumpats upp från 700 meter till nära 1200 meter djupa borrhål på 1300 meters avstånd från explosionsplatsen.

Möjligheten av kolloidtransport av plutonium och andra ämnen påpekades redan i KBS-2 /KBS, 1978/. Alltsedan dess har gjorts många undersökningar av kolloider. Resultaten har bland annat sammanfattats i en rapport 1995 /Laaksoharju, 1995/. Alla undersökningar inklusive de nya från Nevadaöknen visar att halten av kolloider i djupa grundvatten är låg. Den mängd plutonium som skulle kunna transporteras med grundvatten är därför liten och kan ej ge strålskyddsproblem. Detta bekräftar av mätningarna i Nevada. Mätningarna där ger plutoniumhalter i grundvattnet på 0,1 Bq/liter eller lägre. Detta är långt under halter som skulle vara farliga.

Plutonium och andra långlivade, närbesläktade radionuklider (transuraner) t ex americium har mycket stark vidhäftning på lerpartiklar och dessutom mycket låg löslighet i grundvatten. Transporten av dessa ämnen genom en lerbarriär blir därför mycket långsam. I själva verket visar analyser att även om en deponerad kopparkapsel är defekt från början kommer inget plutonium (eller americium) igenom buffertbarriären innan dessa ämnen har försvunnit genom radioaktivt sönderfall /Sellin, 1997/. Leran släpper inte igenom kolloider och ej heller transuraner.

7 Plutoniums hälsoeffekter

Plutonium är i huvudsak en alfastrålare. Gammastrålningen är mycket svag. Plutonium kan därför endast skada en människa om det kommer in i kroppen. Upptaget i kroppen beror på den kemiska formen hos det plutoniumstoft som man kommer i kontakt med. Upptag genom hud eller via mag-tarmkanalen (dvs via föda eller dryck) är mycket lågt (mindre än 0,01 %, utom i speciella fall /ICRP68/) varför det farligaste är om plutonium som stoft kommer in i lungorna via inandning.

Radioaktiva ämnen som kommer in i människokroppen kan, beroende på mängden, ge antingen akuta eller sena hälsoeffekter. Akuta effekter uppkommer om den tillförda mängden är så stor att ett stort antal celler i vitala organ förstörs. Den akuta giftigheten hos olika ämnen anges ofta i s k LD50-värden varmed förstås den mängd av ämnet som leder till akut död för 50 % av de människor som får i sig denna mängd. Man kan säga att för en individ är det bara 50 % chans att man överlever om man får i sig en LD50-mängd. Tabell 2 anger LD50 i mg/kg kroppsvikt för ett antal giftiga ämnen /GSF, 1989/. (Se även avsnitt 7 i bilaga 2).

⁷ PBq = petabequerel = 10^{15} Bq; TBq = terabequerel = 10^{12} Bq; GBq = giga-bequerel = 10^9 Bq; MBq = megabequerel = 10^6 Bq; 1 Curie = 37 GBq.

LD50-värdet är omdiskuterat, det avser akuta effekter inom viss kortare tid (vanligen 30 dygn) och tar ej hänsyn till sena skador. Eftersom olika ämnen har olika snabb verkan på organismen är det svårt att göra jämförelser som är helt rättvisande. Värdena i tabell 2 är erhållna från djurförsök på smågnagare och för plutonium på hundar. Om man antar att de gäller även för människa innebär de att för en fullvuxen person leder inandning av ca 90 mg plutonium-239 (eller injektion i blodet av ca 20 mg) med 50 % sannolikhet till akut död.

Tabell 2. LD₅₀-värden mg per kg kroppsvikt för några olika ämnen och för plutonium-239 baserade på djurförsök /GSF, 1989/.

Ämne	LD ₅₀ mg/kg	Sätt för intag
Ren alkohol	10000	Injektion i buken
Morfin	900	Injektion i buken
Nikotin	1	Injektion i buken
Kadmium	1	Inandning
Plutonium 239	0,3	Injektion i blodet
Plutonium 239	1,3	Inandning
Dioxin	0,001	Injektion i buken
Botulin	0,00001	Injektion i buken

Andra källor /Sutcliffe, 1995/ uppger att akut dödlig dos för intag via mag-tarm-kanalen är 0,5 gram och via lungorna 20 milligram plutoniumdamm.

Sena hälsoeffekter kan uppkomma genom att cellkärnans DNA i vanliga celler eller könsceller skadas av strålning från de radioaktiva ämnena eller av ämnen som bildats vid bestrålningen (s k fria radikaler) och att dessa skador senare utvecklas till cancer eller ärftliga skador. Eftersom plutonium som kommer in i kroppen i första hand fastnar i levern, lungorna eller skelettet är troligen risken för cancer mångfaldigt större än för ärftliga skador.

Cancertumörer till följd av att man fått plutonium i kroppen har man inte direkt kunnat påvisa hos människor. Detta gäller för övrigt de flesta ämnen som anses cancerogena. Omfattande studier har gjorts både på människor och djur av individer som på ett eller annat sätt kommit i kontakt med plutonium. Bland dem som i USA och Sovjetunionen arbetade med plutonium för tillverkning av kärnvapen förekom under de tidiga åren många fall av överexponering i synnerhet jämfört med nuvarande mycket strikta gränsvärden. I Bilaga 2 ges en kort sammanfattning av ett antal studier av personer som arbetat med plutonium för kärnvapen dels i USA i Los Alamos under det s k Manhattan Project⁸ och i Rocky Flats⁹ dels i Ryssland (Sovjetunionen) vid Mayak¹⁰. Hälsoeffekterna

⁸ Manhattan Project var det strängt hemliga projekt som under andra världskriget ledde till framställning av de första kärnladdningarna. Los Alamos är ett federalt forskningslaboratorium i New Mexico grundat under andra världskriget.

⁹ Rocky Flats en anläggning i Colorado för framställning av delar till kärnvapen grundad under 1950-talet.

¹⁰ Mayak är en anläggning i Ryssland för framställning och bearbetning av plutonium grundad i slutet av 1940-talet.

på dessa personer har följts upp under flera år. Resultaten är att bland plutoniumarbetare i USA har man inte kunnat finna någon medicinsk påverkan som kan antas bero på att de exponerats för plutonium. Av nära 23 000 manliga vita arbetare hade drygt 2 400 utsatts för ”signifikant exponering” av plutonium. Vid den ryska anläggningen i Mayak har överexponeringarna varit betydligt större än vid de amerikanska anläggningarna. Särskilt bland dem med de högsta doserna finns en markant ökad frekvens av lungcancer. Samtidigt konstateras i en av studierna att lungcancerriksen till följd av tobaksrökning var större än till följd av plutoniumexponering även bland dem som arbetade med plutonium i Mayak.

Eftersom plutonium är en alfa-strålare liksom radium är en annan studie av intresse i sammanhanget nämligen uppföljningen av de kvinnor som på 1920-talet (och tidigare) målade urtavlor m m med radiumfärg. Studien avsåg 759 kvinnor varav 55 drabbades av ett par olika former av cancer i skelettet. Det är påtagligt att alla de drabbade finns i gruppen med de högsta exponeringarna för radium. Vid lägre intag än 1–4 MBq radium finns inga observerade fall av skelettcancer.

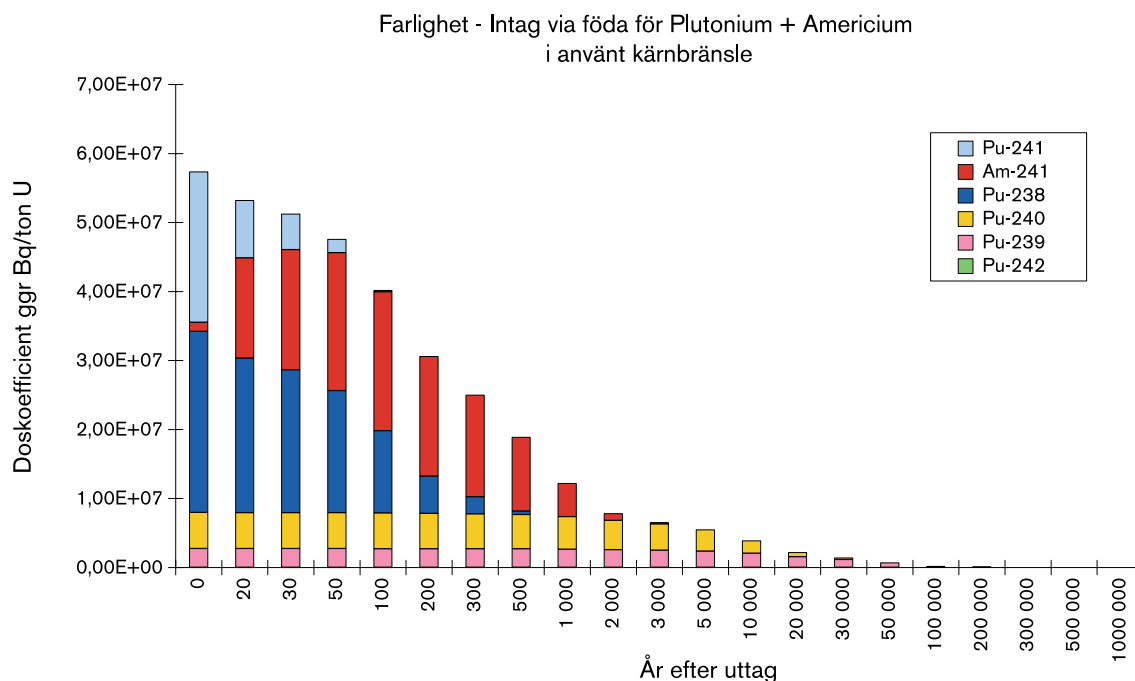
I bilaga 2 refereras också studier av hundar som utsatts för plutonium eller radium. Även dessa studier indikerar att under en viss ”tröskeldos” ser man inga medicinska effekter, men ovanför denna har man påtagliga effekter.

Den internationella strålskyddskommissionen ICRP angav tidigare s k ALI-värden dvs högsta tillåtet årligt intag (Annual Limit of Intake) för personer i radiologiskt arbete. Dessa har numera ersatts av doskoefficienter, vilka med också av ICRP angivna högsta tillåten årlig stråldos 20 mSv kan omräknas till ALI-värden /ICRP68/. För de alfa-strålande plutonium-isotoperna blir detta värde ca 625 Bq för intag via lunga och ca 80 000 Bq för intag via mag-tarmkanalen (föda). ALI-värdet för föda (t ex dricksvatten) motsvarar ca 35 mikrogram plutonium-239. Eftersom lösligheten är 2 mikrogram per liter kan man således dricka ca 17 liter lösning mättad med plutonium-239 innan man överskrider högsta tillåten årlig stråldos för en person i radiologiskt arbete.

Som allmän kommentar till ”giftigheten” hos plutonium från använt kärnbränsle kan man konstatera att den är mycket hög, men att det finns andra ämnen som har lika hög eller högre ”giftighet”. ”Giftigheten” för denna typ av plutonium minskar väsentligt med tiden allt eftersom de mer kortlivade isotoperna avklingar. Detta illustreras av tabell 3.

Tabell 3. Relativ giftighet för plutonium i använt kärnbränsle vid olika tidpunkter efter tiden för uttag från reaktorn.

Tid år	Relativ radiotoxicitet för kvarvarande plutonium i BWR-bränsle med 38 MWd/kg	
	Per kvarvarande gram plutonium	Per kg kärnbränsle
0	100 %	100 %
100	42 %	36 %
1000	16 %	13 %
10 000	13 %	7 %
100 000	4 %	0,3 %



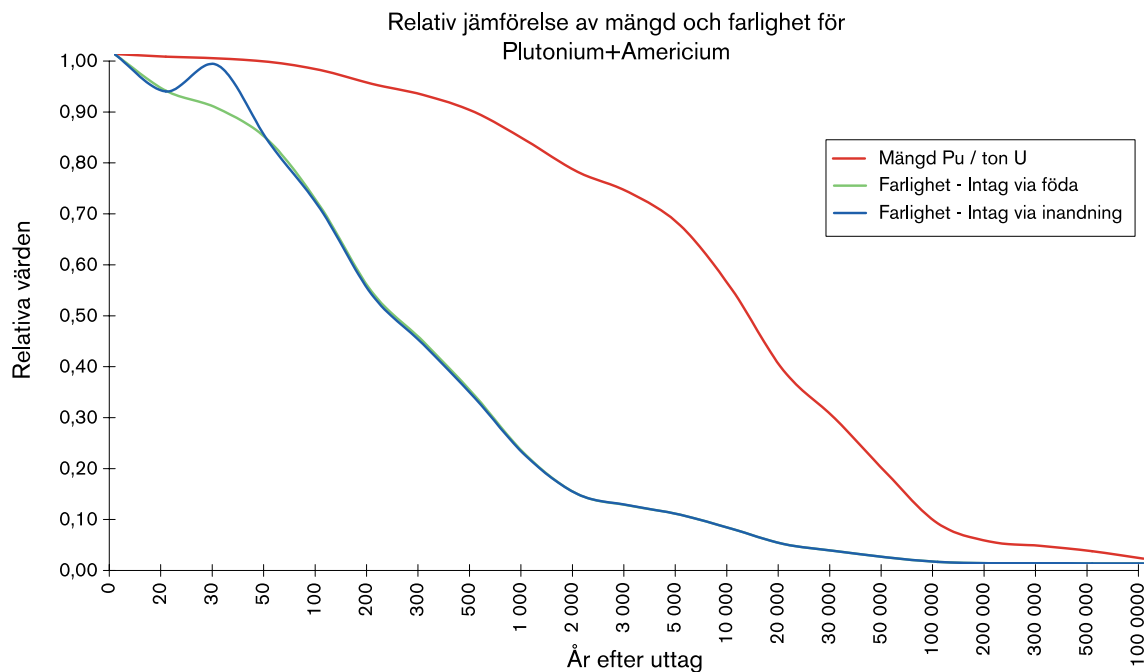
Figur 2. Farligheten vid intag via föda för plutonium och därav bildat americium-241 som funktion av tiden. Sammansättningen är densamma som illustreras i figur 1. Farligheten anges som doskoefficienten (Sv/Bq) för en viss isotop gånger antalet Bq per ton bränsle.

Den vänstra kolumnen visar giftigheten per viktsenhet kvarvarande plutonium i förhållande till giftigheten per viktsenhet färskt reaktorplutonium; rent plutonium-239 motsvarar i denna skala ungefär 10 %. Ett gram "färskt" reaktorplutonium är således 25 ggr giftigare än ett gram 100 000 år gammalt plutonium. Den högra kolumnen visar giftigheten per kg av bränslet och tar således hänsyn även till att den absoluta mängden plutonium i bränslet minskat på grund av det radioaktiva sönderfallet.

Figur 2 visar farligheten¹¹ vid intag via föda för plutonium och därur bildat americium-241 vid olika tidpunkter med den i figur 1 visade sammansättningen. Isotoperna 238 och 241 (Am och Pu) dominerar under flera hundra år varefter 240 och 239 tar över i tur och ordning.

Figur 3 visar att farligheten (radiotoxiciteten) hos plutonium (+ därav bildat americium) minskar väsentligt snabbare än mängden plutonium (+ därav bildat americium) i bränslet på grund av att de kortlivade isotoperna dominerar under de första tusen åren.

¹¹Det här använda måttet på **farlighet** är doskoefficienten Sv/Bq för intag via föda respektive via inandning multiplicerad med antal Bq per ton använt kärnbränsle.



Figur 3. Jämförelse mellan mängd och farlighet för plutonium plus därav bildat americium-241 i använt kärnbränsle.

8 Plutonium från kärnkraftsel enligt Eva Goës

Låt oss nu fundera över Eva Goës inlägg i riksdagen om att när en familj lagar sin middag med kärnkraftsel bildas tillräckligt med plutonium för att döda hela familjen /Riksdagen, 1996/. Antag att middagen drar 0,5 kWh energi för tillagning (0,75 kW under 40 min) och att denna elenergi kommer från en BWR där bränslet byts efter 38 MWd/kg. "Middagsströmmen" ger då upphov till ca 15 mikrogram plutonium. Detta är ca 5 ggr beräknat ALI-värde (enligt /ICRP68/) för "dricksvatten" med plutonium (med den tidigare angivna sammansättningen) från en lättvattenreaktor. Det är också ca 150 ggr mindre än LD50-värdet för injektion i blodet. Andas familjen in hela plutoniummängden när den är "färsk" innebär det en stor risk att minst en av dem får cancer inom 10–50 år.

9 Plutonium i en snusdosa från Greenpeace

Vi kan jämföra nedfallet av plutonium från kärnvapensprängningar med Greenpeace påstående att det kärnavfall som ryms i en snusdosa är tillräckligt för att utrota hela Sveriges befolkning /Greenpeace, 1995/. En snusdosas volym motsvarar ca 1,5 kg plutoniummetall eller ca 0,8 kg plutoniumdioxid. Under främst 1950- och 1960-talen spreds således minst 3 "snusdosor" plutonium i atmosfären över Sverige på ett mycket "effektivt" sätt. Inga hälsoeffekter kan påvisas eller förväntas från detta.

Jämför vi de tabell 2 angivna LD50-värdena med innehållet i "en Greenpeace-snusdosa" med ca 1,5 kg plutoniummetall (med en sammansättning som "färskt" plutonium från högutbränt reaktorbränsle) finner vi att den "räcker" till att fördela LD50-dos till 170 000 personer om de "sniffar" eller till 750 000 personer om den injiceras i blodet.

Snusdosan med ca 1,5 kg plutoniummetall räcker alternativt till att ca 100 miljoner människor "sniffar" var sin 37 kBq-dos (16 mikrogram Pu-239). Om denna utdelning

genomförs (utan spill) kan 2 % eventuellt få cancer några decennier senare. Nuvarande "naturliga" cancerfrekvens är ca 25 % vilken sålunda eventuellt skulle öka till 27 % bland Greenpeace's "plutonium-sniffare".

Antar vi att Greenpeace kommit över en snusdosa med rent plutonium-238 så räcker den till ca 5000 pacemakers åt personer med hjärtstörningar. Och – det behövs drygt 40 dosor med sådant "Extra Greenpeacesnus" för att ge värme och el till instrumenten på rymdsonden Cassini på väg till Saturnus.

10 Referenser

ANS, 1995. American Nuclear Society: Protection and Management of Plutonium. Special Panel Report. Augusti 1995. ISBN: 0-89448-561-X.

Cancerkom, 1984. Cancer – Orsaker, Förebyggande m m. Betänkande av Cancerkommittén. SOU 1984:67.

Chu, 1999. S Y F Chu, L P Ekström and R B Firestone: WWW Table of Radioactive Isotopes 2/28/99. URL <http://nucleardata.nuclear.lu.se/toi/>.

Cramer, 1994. J Cramer (Ed), J Smellie (Ed): Final Report of the AECL/SKB Cigar Lake Analog Study. SKB TR 94-04, May 1994, Svensk Kärnbränslehantering AB.

DOE, 1999. National Low-Level Waste Management Program. Radionuclide Report Series. Volume 17: Plutonium-239. Published March 1999. DOE/LLW-251.

Greenpeace, 1995. Greenpeace – Det radioaktiva arvet. Radioaktiv från 0–240000 år. Broschyr 1995.

GSF, 1989. GSF Mensch+Umwelt Ein Magazin der Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung München 6. Ausgabe, September 1989 – Plutonium.

Holm, 1994. E Holm (Editor): Radioecology. Lectures in environmental radioactivity. World Scientific 1994.

ICRP68. Annals of the ICRP, Volume 24 No 4 1994, ISSN 0146-6453, ICRP Publication 68; Dose Coefficients for Intake of Radionuclides by Workers. Replacement of ICRP Publication 61.

KBS, 1978. KBS 1978: Slutförvaring av använt kärnbränsle. Del II Teknisk del, sid 170, september 1978. Svensk Kärnbränsleförsörjning/Projekt KBS.

Kersting, 1999. Kersting A B et al, Migration of plutonium in ground water at the Nevada Test Site. Nature, Vol 397, 7 January 1999, sid 56–59.

Kolb, 1999. W Kolb: Plutonium-238 containing cardiac pacemakers. Email-meddelande 25 maj 1999 från Kolb till radSAFE@romulus.ehs.uiuc.edu erhållet via lars.persson@ssi.se.

Laaksoharju, 1995. Laaksoharju M et al, Studies of colloids and their importance for repository performance assessment. SKB TR 95-24, december 1995, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Nasa, 1997. NASA: Explaining the risks of the Cassini mission. <http://www.jpl.gov/cassini/rtg/risk.htm>.

NEA, 1989. OECD/NEA Plutonium Fuel – An Assessment. Report by an expert group. Paris 1989.

Nukem, 1996. NUKEM Market Report May 1996 Part I Plutonium: Nuclear Pieces into Nuclear Peace pp 13.

Riksdagen, 1996. Riksdagsprotokoll 1995/96:68 13 mars 1996, 8 § Kärnavfall m m, sid 26.

Sellin, 1997. Sellin P, Använt kärnbränsle – Barriärernas säkerhetsmässiga betydelse. SKB R-97-20, sid 23–24, december 1997, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Sutcliffe, 1995. W G Sutcliffe et al: A perspective on the Dangers of Plutonium. April 14, 1995. Center for Security and Technology Studies – CSTS. UCRL-JC-118825; CSTS-48-95

Weast, 1988. R C Weast (Editor): Handbook of Chemistry and Physics. 68th edition 1987–1988.

Plutonium i USA

I USA har det militära programmet framställt sammanlagt 111,4 ton plutonium sedan 1945. Ca 12 ton har "förbrukats" i kärnvapenprov, processförluster, m m. dvs 99,5 ton finns kvar i lager. Av detta är 85 ton (vapenkvalitet < 7 % Pu-240), 13,2 ton (bränslekvalitet 7 %–19 % Pu-240) och 1,3 ton (reaktorkvalitet > 19 % Pu-240).

Uppgifter anger att amerikanska kärnvapen innehåller ca 3 kg Pu per laddning.

Källor till plutonium i USA:

1.	Hanford	67,4 ton	54,5 ton vapenkvalitet
2.	Savannah River	36,1 ton	ca 29 ton vapenkvalitet
3.	Från andra länder	5,7 ton	5,4 ton från UK enl avtal
4.	USA civila reaktorer	1,7 ton	
5.	Andra USA reaktorer	0,6 ton	0,1 ton vapenkvalitet
	SUMMA	111,5 ton	

Uttag från Pu-lager i USA:

1.	Använt vid vapenprov	3,4 ton
2.	Avfall i normala processer	3,4 ton
3.	Inventariespill	2,8 ton
4.	Fission och transmutation	1,2 ton
5.	Till andra länder	0,7 ton
6.	Sönderfall och annat bortfall	0,4 ton
7.	Till forskning	0,1 ton
	SUMMA	12,0 ton

Nuvarande inventarium i USA:

1.	Pantex och DOD	66,1 ton
2.	Rocky Flats	12,7 ton
3.	Hanford	11,0 ton
4.	Argonne West	4,0 ton
5.	Los Alamos	2,7 ton
6.	Savannah River	2,0 ton
7.	Idaho Nat Eng Lab	0,5 ton
8.	Livermore	0,3 ton
9.	Övrigt	0,2 ton
	SUMMA	99,5 ton

Det ryska lagret av Pu uppskattas till 120 à 200 ton.

Referens: NUKEM Market Report, May 1996, Part I Plutonium: Nuclear Pieces into Nuclear Peace.

Plutoniums hälsoeffekter – sammanställning av några observationer

1 Uppföljning av 26 arbetare vid Los Alamos – Manhattan Project

Tjugosex vita män som arbetade med plutonium under andra världskriget under mycket primitiva förhållanden i Los Alamos har studerats genom noggrann medicinsk uppföljning vart femte år sedan 1952 /Voelz, 1985, 1991, 1997; även i UNSCEAR, 1994; ATSDR, 1990; Bird, 1996; Cohen, 1975/. Senaste rapporterad uppföljning gjordes år 1994 – dvs ca femtio år efter exponeringen. Gruppen exponerades för plutonium under 1944 och framförallt under 1945. Huvudsaklig exponering var via inhalation. Flertalet (21 stycken) lämnade Los Alamos 1946 eller innan och endast ett fåtal har efter 1946 i sitt arbete exponerats för plutonium eller annan radioaktivitet.

Senaste uppskattning av plutonium depositionen i dessa individer varierar mellan 52 och 3180 Bq med medianvärdet 500 Bq. (Tidigare rapporteringar ger väsentligt högre värden. Cohen uppger sammanlagt 10 mCi dvs 370 kBq eller 14 kBq per person. Bird et al uppger 25 ggr nu tillåten mängd ("vilket numera anses vara dödlig dos"). ICRP:s dosfaktor för arbetare motsvarar 625 Bq för inhalation.)

Integrerade expositionen (t o m 1994 eller dödsfall) anges till mellan 70 och 5071 GBq-s eller omräknat till effektiv dos 0,10 resp 7,2 Sv /Voelz, 1997/. Detta motsvarar 5 resp 360 tillåtna maxärsdoser för arbetare enligt ICRP. Extern effektiv dos (från gamma) anges till mindre än 0,1 Sv.

T o m 1994 hade sju personer avlidit – mot statistiskt förväntat 16 beräknat på medeltal för vita män i USA. Bland de 26 hade 8 fått cancer varav 4 i prostatan, 3 i lungorna och en i skelettet. Tre av dessa hade avlidit (1 prostata, 1 lungor, 1 skelett); statistiskt förväntat antal dödsfall i cancer är 4. Alla som fått lungcancer är eller har varit rökare under längre tid.

Gruppen har också jämförts med en grupp om 876 personer som samtidigt anställdes i Los Alamos och som ej exponerats. Även inom denna grupp är dödligheten lägre än statistiskt medeltal för vita män i USA. Dödligheten bland de 26 jämfört med gruppen om 876 är ännu något lägre men skillnaden är inte statistiskt signifikant.

2 Uppföljning av alla Pu-arbetare vid Los Alamos – Manhattan Project

I en separat studie av alla arbetare med en uppskattad intern deposition av plutonium på 370 Bq eller mer per den 1 januari 1974 identifierades 224 vita män (m h t senare revision av utvärderingen av urinprov skall troligen dessa 370 Bq reduceras) /Voelz, 1991; ATSDR, 1990/. Av dessa hade 43 avlidit fram till och med 1983 mot förväntade 77 baserat på medeltal för hela USAs befolkning. Åtta hade avlidit på grund av cancer mot förväntade 15, antalet lungcancerfall var ett mot förväntade fem.

En grupp på 15 727 vita män som varit anställda vid Los Alamos åren 1943–1977 har studerats med avseende på dödlighet t o m utgången av 1990 /Wiggs, 1994/. Genomsnittliga uppföljningstiden var 29 år. Totalt hade 3 196 avlidit, vilket är väsentligt mindre

än det förväntade antalet 5105 baserat på statistik för hela USAs befolkning. Dödligheten var väsentligt lägre än förväntat för alla dödsorsaker, för alla cancerformer sammantaget och för många cancerformer var för sig. Ingen specifik dödsorsak låg signifikant över förväntat antal. Totalt hade 3 775 arbetare av hela gruppen haft sådant arbete att de övervakats med plutonium. Av dessa hade 303 "exponerats" dvs fått en uppskattad "body burden" på mer än 74 Bq. Dödligheten bland de plutonium-exponerade var något lägre än bland gruppen i övrigt men avvikelsen var ej signifikant. Ingen enskild dödsorsak avvek statistiskt signifikant i frekvens bland de plutonium-exponerade i jämförelse med gruppen icke-Pu-exponerade. Frekvensen lungcancer var dock något högre (totalt 8 fall bland de 303; men hela gruppen hade 179 fall mot förväntat 400). Den "låga" lungcancerfrekvensen i hela gruppen antas bero på mindre rökning.

3 Uppföljning av arbetare vid Rocky Flats

En undersökning av 7112 vita manliga arbetare sysselsatta vid Rocky Flats under åren 1952, då anläggningen startades, till december 1979 visade att 452 av dessa hade avlidit fram till december 1979 /Voelz, 1983/. Statistiskt förväntat antal dödsfall var 831. Antalet dödsfall i olika cancerformer var också lägre än förväntat (107 vs 167). Av de 7112 arbetarna hade 2130 utsatts för signifikant exposition av plutonium definierat som mer än 1 mikrocurie-dygn (=100 Bq-år). Bland dessa 2130 hade 98 avlidit mot förväntat 259, varav 20 i cancer mot förväntat 53. Alla maligna cancerformer och alla dödsorsaker var lägre än statistiskt förväntat.

4 Uppföljning av arbetare vid Mayak

Lungcancerfrekvensen har studerats åren 1970–1989 bland 2346 arbetare vid Mayak radiokemiska anläggningar i Ryssland /Hohryakov, 1994; även i UNSCEAR, 1994/. Dessa har exponerats såväl externt med gammastrålning som internt av plutonium. Den totala dosen till lungorna var 4812 Sv varav 3327 Sv från extern strålning och 1485 Sv från plutonium i lungan. Följande tabell visar statistik över inträffade och förväntade lungcancerfall i grupper med olika bestrålning av lungorna.

Kumulativ ekvivalent lungdos – Sv	Antal arbetare	Antal inträffade lungcancerfall	Förväntat antal lungcancerfall
0–0,25	470	0	2,1
0,26–1,00	607	4	6,2
1,01–4,0	929	19	16,2
> 4,0	340	22	8,1
Alla fall	2 346	45	32,6

I gruppen med högsta dosen (> 4,0 Sv) är det ett kraftigt överskott av lungcancerfall jämfört med normalfrekvensen bland befolkningen i tidigare Sovjetunionen.

En annan undersökning omfattar 500 arbetare vid Mayak /Tokarskaya, 1995; Tokarskaya, 1997/. Av dessa hade 162 drabbats av lungcancer åren 1966–1991, medan 338 utgör en kontrollgrupp som (haft liknande arbetsförhållanden men) ej fått lungcancer. År 1991 var 6 av de 162, som fått lungcancer, i livet (96 % dödsfall) och 280 av de 338 i kontrollgruppen (17 % dödsfall). 14 av 162 och 42 av 338 var kvinnor. Kontrollgruppen matchades med avseende på kön, ålder, anställningstid och arbetsuppgifter. För män var

matchningen 2 i kontrollgruppen per 1 lungcancerfall och för kvinnor 3/1. Extern gammastrålning registrerades med dosimetrar; plutoniumupptag med urinprovsanalyser.

Upptaget av plutonium (Pu-239 body burden) har sammanställts i följande tabell /Tokarskaya, 1997/:

Pu upptag – intervall kBq	D:o medel	Totalt antal individer	Antal fall lungcancer	Antal i kontroll-grupp	Andel lungcancer
0–0,148	0,01	130	44	86	34 %
0,149–0,59	0,34	68	16	52	24 %
0,60–2,29	1,18	125	28	97	22 %
2,30–8,99	4,2	95	24	71	25 %
9,00–35,5	16,5	63	33	30	52 %
35,7–140,6	54,2	19	17	2	89 %

Multivariat-analys av gruppen pekar på att riskfaktorer för framkallande av "lungcancer" är i fallande ordning; rökning > plutonium i lungan (plutonium pneumosclerosis) > totalt plutonium i kroppen > kronisk lungsjukdom > nedsatt kroppsvikt > yttre gammastrålning. För totalt plutonium upptag härleds genom statistisk analys ett dos/effektsamband med en tröskeldos på 3,7 à 6,7 kBq (Pu-239 body-burden) eller 0,79 à 1,0 Gy i absorberad lungdos och ett kvadratisk eller lineär-kvadratisk dosberoende.

Vidare noteras att inget dos/effektsamband kan härledas för extern gammastrålning. För rökning har dos/effektkurvan lineär karaktär där ett paket "papirosy" (ryska cigaretter) per dag under 5, 10 och 20 år ger respektive dubbel, fyrdubbel och åttadubbel lungcancerfrekvens.

Rökning synes vara en viktigare faktor för uppkomsten av lungcancer än plutonium. Följande tabell ger "odds-ratio" för fem olika faktorer som anses signifikanta (Table 2 i /Tokarskaya, 1995/):

Faktor	"Gränsvärde"	"Odds-ratio"	95 % konfidens-intervall
Rökning	(ja – rökare)	6,6	3,2–13,7
Plutonium pneumosclerosis	(ja – fastställt)	4,6	1,8–11,9
Plutonium body burden	< 5550 Bq	1,0	
Plutonium body burden	> 5550 Bq	3,1	1,8–5,1
Kronisk lungsjuka	(ja – fastställt)	2,1	
Låg kroppsvikt	< 25 kg/m ²	1,8	1,1–2,6

"Odds-ratio" betyder att i den undersökta gruppen (om 500 personer) var frekvensen av lungcancerfall 6,6 ggr högre bland rökare än bland icke-rökare, 1,8 ggr högre bland dem som hade lägre kroppsvikt än 25 kg/m² än bland dem med högre kroppsvikt osv.

Slutligen noteras de mycket anmärkningsvärda ekvivalenta doserna om man summerar extern gamma- plus intern alfa-dos (Table 1 i /Tokarskaya, 1997/):

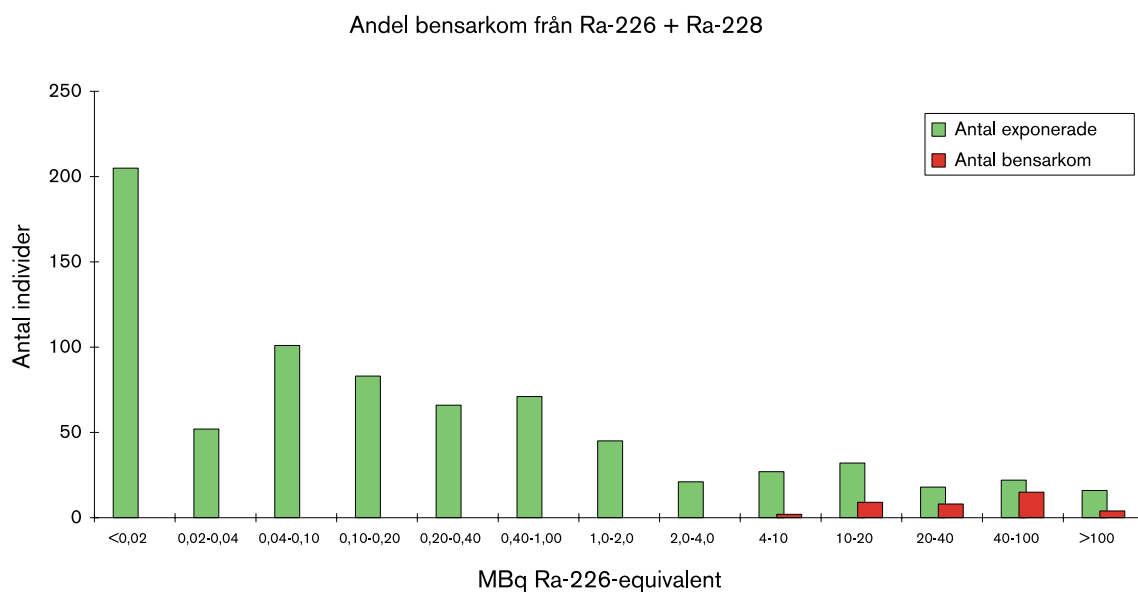
Dosintervall Sv	Medelvärde Sv	Antal individer	Frekvens lungcancer
0-0,8	0,31	86	31 %
0,81-6,0	2,91	227	26 %
6,1-20,0	10,2	97	25 %
20,1-50,0	31,4	45	42 %
50,1-107	73,2	25	56 %
108-344	187	20	90 %

5 Uppföljning av kvinnor som målat med radiumfärg

En studie av bensarkom hos kvinnor som målat radiumfärg på urtavlor m m redovisas av /Rowland, 1978/. Kvinnorna hade fått i sig radium – en blandning av Ra-226 och Ra-228. Exponeringarna skedde i huvudsak före år 1926 då säkerhetsföreskrifterna skärptes avsevärt. Intaget har omräknats till ekvivalent mängd Ra-226 med formeln $Ra-226 + 2,5 * Ra-228$.

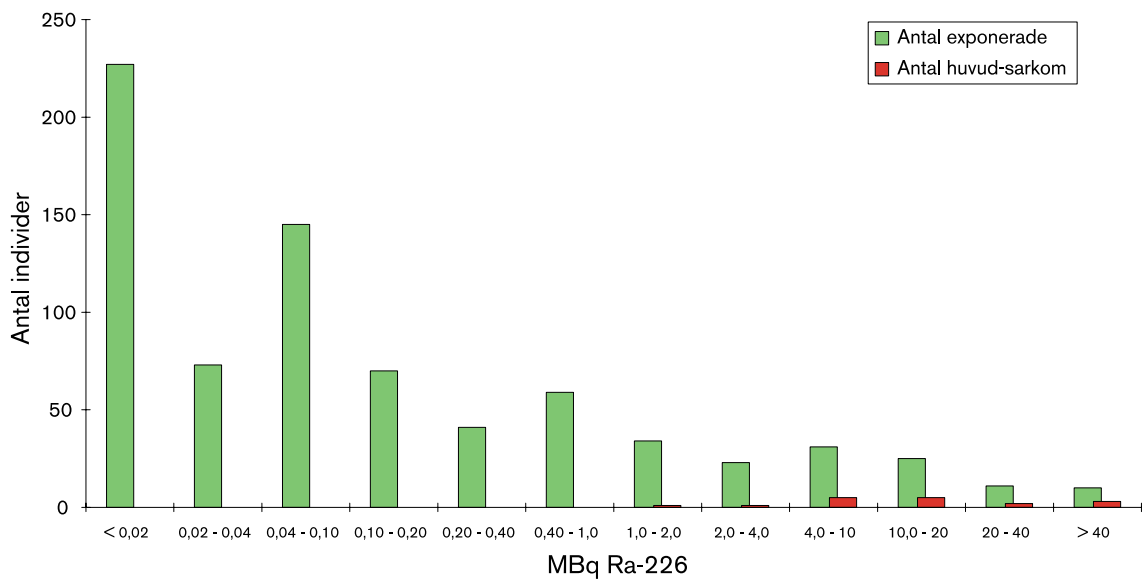
Figur B1 visar antal kvinnor i olika exponeringsgrupper och antalet som utvecklat bensarkom mellan 7 och 52 år efter första exponering. Totalt ingår i studien 759 kvinnor varav 38 drabbades av bensarkom. Medeltiden var 27,3 år från första exponering till diagnos av tumör. Ett tröskelvärde synes eventuellt föreligga vid ca 4 MBq ekv Ra-226 dvs 100 mg (mikrogram).

Studien omfattar även kvinnor som fått huvudsarkom. I detta fall redovisas resultaten endast för de 749 kvinnor som överlevt de första tio åren efter första exponering. Av



Figur B1. Antal kvinnor som fått bensarkom efter målning med radiumfärg.

Andel huvudsarkom från Ra-226



Figur B2. Antal kvinnor som fått huvudsarkom efter mätning med radiumfärg.

dessa drabbades 17 av huvudsarkom. Medeltiden från första exponering till diagnos av tumör var 39,4 år med ett spann på 19 till 52 år. Ett tröskelvärde synes eventuellt föreligga vid ca 1 MBq Ra-226 (observera att av någon anledning anges i detta fall enbart Ra-226 utan bidrag från Ra-228) dvs 25 mg. Figur B2 visar antal kvinnor i olika exponeringsgrupper och antal fall av huvudsarkom i respektive grupp.

6 Observationer på hundar som utsatts för plutonium eller radium

En studie av inverkan av plutonium m m på vuxna hundar (beagles) som fått injektioner av Pu-239 m fl radioisotoper redovisas av /Dougherty, 1962/. Hundarna indelades i grupper om 9–12 hundar per grupp. Inom varje grupp injekterades varje hund med en viss mängd av en viss isotop. Sex grupper injekterades med olika mängder Pu-239 från 0,6 till drygt 100 kBq/kg kroppsvikt. Bland dem som fick mindre än 1,5 kBq/kg inträffade inga fall av bentumörer och bland dem som fick mer än ca 12 kBq/kg fick alla bentumörer. Se figur B3.

Omräknat till individer med 70 kg kroppsvikt och till viktsvärden för Pu-239 innebär kurvan i figur 3 att en injektion av < 50 mg ej utvecklar bencancer medan fyra gånger den mängden leder till bencancer i vartannat fall (200 mg – 50 %). Antages människan på grund av livslängd och andra förhållanden vara 5 ggr känsligare än de hundar som undersöktes skulle alltså <10 mg vara ”ofarligt” men 40 mg leda till bencancer i 50 % av fallen.

Upptaget av plutonium som kommer in via mat eller dryck är normalt mycket litet < 0,001 %. ”Ofarlig” mängd att äta skulle således enligt denna kalkyl vara < 1 g (Pu-239-oxid).

I samma studie gjordes injektioner av radium-226. Injekterad mängd i varje grupp varierade i medeltal från ca 2 till ca 380 kBq/kg kroppsvikt. Bland dem som fick mindre än 13 kBq/kg kroppsvikt inträffade inga fall av bentumörer och bland dem som fick mer än 120 kBq/kg fick alla bentumörer.

Omräknat till individer med 70 kg kroppsvikt och till viktsvärden av radium-226 innebär resultaten på hundarna att injektion av < 25 mg radium ej ger bencancer medan ca 100 mg leder till bencancer i vartannat fall.

7 Akut giftighet för plutonium hos hundar

I /Stannard, 1976/ refereras till bland annat försök på hundar och anges LD_{50/30}-värden på den akuta verkan för plutonium-239 på 0,32 mg/kg (= 740 kBq/kg) för intravenös injektion och 1,3 mg/kg (=3000 kBq/kg) för inandning. (LD_{50/30}-värdet är den dos som leder till död för 50 % av fallen inom 30 dygn).

I samma rapport anges, också för hundar, värden för minsta mängd som leder till cancer:

- 0,26 mg/kg (= 0,6 kBq/kg) för intravenös injektion (bensarkom), och
- ca 1 mg/kg (= 2,4 kBq/kg) för inandning (alla cancerformer).

Omräkning av dessa värden för hundar till fullvuxen människa om 70 kg (med antagandena att människan m h t längre livslängd m m är 5 ggr känsligare än hunden för att utveckla cancer samt att 10⁻⁵ av det som kommer in via mag-tarm-kanalen går ut i blodet (gäller för plutoniumdioxid)) ger följande:

- LD_{50/30}-värde – inandning ca 90 milligram = 210 MBq,
- Min för cancer – oralt intag ca 360 milligram = 830 MBq,
- Min för cancer – inandning ca 14 mikrogram = 32 kBq.

Av det som inandas deponeras ca 25 % i kroppen dvs sista punkten ovan motsvarar ca 8 kBq "body burden" vid jämförelse med i tidigare avsnitt angivna värden.

8 Diskussion

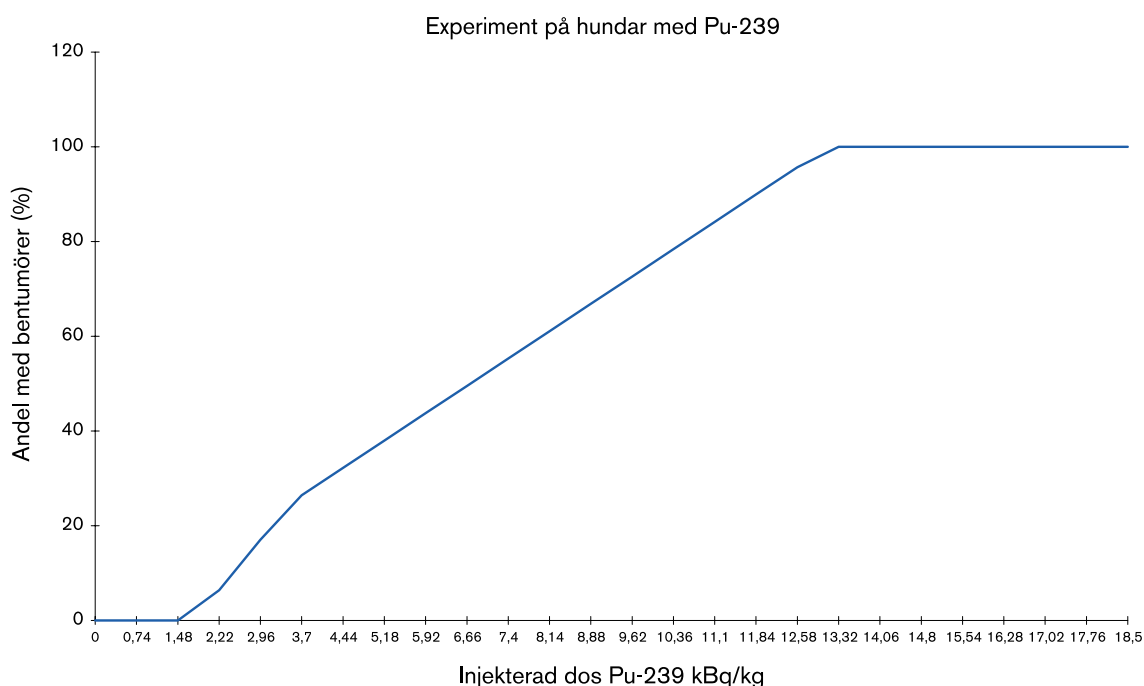
Arbetare inom Manhattan-projektet har fått i sig upp till 4 kBq plutonium utan att drabbas av lungcancer eller annan sjukdom i större omfattning än andra människor.

Arbetarna vid Mayak-anläggningen har drabbats av en ökad mängd lungcancerfall i den grupp som fått en kumulativ ekvivalent lungdos överstigande 4,0 Sv. Av lungdosen hänför sig 30 % till intern bestrålning från plutonium. Antas konservativt att alla extra lungcancerfall beror på plutonium-exponeringen så skulle en eventuell "tröskeldos" kunna vara ca 1,2 Sv.

För den "andra" gruppen Mayak-arbetare har med en statistisk analys beräknats en tröskeldos för ökad lungcancer risk på 3,7 à 6,7 kBq Pu-239 body burden eller 0,79 à 1,0 Gy absorberad lungdos. {Tröskeldosen i Sv anges till 15 à 30 Sv i /Tokarskaya, 1997/.}

Observationerna på Mayak-arbetare indikerar att en "body-burden" på 9–35 kBq Pu-239 fördubblar lungcancerfrekvensen och över ca 35 kBq får de flesta lungcancer.

Studierna på hundar antyder en "tröskelvärde" på deposition av plutonium-239 på ca 1,5 kBq/kg kroppsvikt injekterad i blodet för att utveckla bencancer. Omräknat till 70 kg kroppsvikt är detta ca 100 kBq eller med en faktor 5 korrektion för människans längre livslängd m m ett "tröskelvärde" på ca 20 kBq.



Figur B3. Andel hundar med bentumörer efter injektion av Pu-239.

Studierna på hundar antyder ett "tröskelvärde" på deposition av radium-226 på ca 15 kBq/kg kroppsvikt injekterad i blodet för att utveckla bencancer. Omräknat till 70 kg är detta ca 1000 kBq.

Studien av kvinnor som målat urtavlor med radiumfärg antyder en tröskeldos för bencancer på ca 4000 kBq och för huvudsarkom på ca 1000 kBq. Detta verkar storleksmässigt stämma med resultaten från injektering av radium i hundar. Det betyder dock i så fall att människan tål ungefär lika mycket radium som en hund räknat per kg kroppsvikt.

Översiktligt kan dessa resultat omräknade till 70 kg fullvuxen människa (som med hänsyn till livslängd m m är 5 ggr känsligare för plutonium än hundar; men ej för radium) sammanfattas i följande tabell:

Ämne	Cancerform	Tröskel (?) kBq i kroppen	Referens
Plutonium	lunga	> 4	Los Alamos-män
Plutonium	lunga	> 5	Mayak-män+kvinnor
Plutonium	lunga	> 8	Stannard – hundar
Plutonium	skelett	> 20	Dougherty – hundar
Plutonium	skelett	> 8	Stannard – hundar
Radium	skelett	> 4000/1000	Rowland – kvinnor
Radium	skelett	> 900	Dougherty – hundar

Sammanfattningsvis indikerar således dessa data att ett tröskelvärde för att framkalla bencancer genom upptag av plutonium via blodet kan ligga i området 10 à 20 kBq för fullvuxna människor. För lungcancer kan värdet vara ca hälften dvs 4 à 8 kBq. Latens-tiden synes vara 10–50 år. (För radium synes ett eventuellt tröskelvärde – för skelett-

cancer – vara väsentligt större än för plutonium. De doskoefficienter som anges i ICRP68 är dock av samma storlek för både plutonium och radium-226.)

Av den mängd plutonium(oxid) som kommer in via födan tas ca 0,001 % upp i kroppen och av den mängd som inandas upptas ca 25 % av kroppen. Detta betyder att eventuellt tröskelvärde för cancer skulle vara ca 1 GBq (ca 0,4 g Pu-239-oxid) för intag via föda och ca 20 kBq (ca 10 mg Pu-239) för inandning. För akuta skador krävs betydligt högre intag.

9 Referenser

ATSDR, 1990. "Toxicological profile for Plutonium" ATSDR TP-90-21 pp 26.

Bird, 1996. Bird et al: Radiological and Chemical Toxicity of Used CANDU Fuel; AECL TR-767, COG-96-582-1 p 13.

Cohen, 1975. Bernhard Cohen "The hazards in plutonium dispersal" – GE 1975 p 15 även Nuclear News, June 1975.

Dougherty, 1962. Dougherty et al, Studies of the Biological Effects of Ra²²⁶, Pu²³⁹, Ra²²⁸(MsTh1), Th²²⁸(RdTh), and Sr⁹⁰ in Adult Beagles. Radiation Research 17, 625–681 (1962).

Hohryakov, 1994. V F Hohryakov, Lung cancer in radiochemical industry workers, Sci Total Environ 142 (1994) 25–28.

Rowland, 1978. Rowland et al, Dose-Response Relationships for Female Radium Dial Workers. Radiation Research 76, 368–383 (1978).

Stannard, 1976. Stannard J N, Plutonium toxicology and other toxicology in The health effects of plutonium and radium, The J W Press, Salt Lake City, Utah 1976.

Tokarskaya, 1995. Tokarskaya et al, The influence of radiation and nonradiation factors on the lung cancer incidence among the workers of the nuclear enterprise Mayak. Health Physics 69(3):356–366; Sept 1995.

Tokarskaya, 1997. Tokarskaya et al, Multifactorial analysis of lung cancer dose-response relationships for workers at the Mayak nuclear enterprise. Health Physics 73(6):899–905; Dec 1997.

UNSCEAR, 1994. UNSCEAR 1994 Report p 72 par 317.

Wiggs, 1994. L D Wiggs, Mortality through 1990 among white male workers at the Los Alamos National Laboratory: Considering exposures to plutonium and external ionizing radiation. Health Physics 76(6):577–588; 1994 Dec.

Voelz, 1983. G L Voelz et al: An update of epidemiologic studies of plutonium workers. Health Physics 44, Supplement 1, 493– 503, 1983.

Voelz, 1985. G L Voelz et al: A 37-year medical follow up of Manhattan Project Pu Workers; Health Physics 48(3), 249–259, 1985.

Voelz, 1991. G L Voelz and J N P Lawrence: A 42-y medical follow-up of Manhattan Project plutonium workers; Health Physics 61(2), 181–190, 1991.

Voelz, 1997. G L Voelz et al: Fifty years of plutonium exposure to the Manhattan Project plutonium workers: An update. *Health Physics* 73(4) 611–619, 1997 Oct.