

# Hur länge är kärnavfallet farligt?

- Mats Törnqvist -

Sifferuppgifterna som cirkulerar i detta sammanhang varierar starkt. Man kan få höra allt ifrån 100-tals år till miljontals år. Vi har en spännvidd mellan olika uppgifter på åtminstone en faktor 10 000.

SKB hävdar att det radioaktiva utbrända kärnbränslet är ofarligt om 100 000 år medan SKI brukar tala om någon eller några miljoner år vilket kan vara anledning nog att titta närmare på denna fråga. Farlighet är egentligen ett mycket oprecist begrepp, men för att inte krångla till det ska jag här anamma SKBs sätt att definiera begreppet när de förklarar att det högaktiva avfallet "på ca 100 000 år avklingat till en ofarlig nivå eller till vad som förekommer naturligt i jordskorpan". (eftersom den radioaktivitet som förekommer naturligt i jordskorpan både varierar från plats till plats och kan medföra risker för människors hälsa, till exempel i form av höga radonhalter i vattentäkter och byggnader, är naturligtvis detta ofarlighetsbegrepp invändningsfritt, men liksom SKB bortser jag från detta tills vidare).

Frågan blir alltså hur snabbt avfallet sönderfaller och vid vilken tidpunkt radioaktiviteten blir så låg att den inte längre utgör någon fara för hälsa och miljö.

För att kunna svara på den frågan behöver vi veta vilka långlivade ämnen som ingår i bränslet, hur snabbt de sönderfaller och vad som är att betrakta som en "naturlig nivå". Men därutöver tillkommer att vi behöver veta något om på vilket sätt dessa ämnen sönderfaller.

## Uran och kärnbränsle

Låt oss därför först titta lite närmare på vad kärnbränsle är för något. Att det består av uran är bekant för de flesta. Men vad mera är - det består av tre olika varianter, eller isotoper, av uran, vilka skiljer sig åt genom att deras atomkärnor innehåller olika många neutroner. Detta medför att de sinsemellan har olika fysikaliska egenskaper, till exempel att deras kärnor sönderfaller olika fort och på olika sätt. De reagerar inte heller på samma sätt när de utsätts för det neutronbombardemang som äger rum i en kärnreaktor. Dessa uranisotoper brukar betecknas U-234, U-235 och U-238. Den isotop som är av avgörande betydelse för kärnklyvningsprocessen i våra svenska kärnkraftsreaktorer är U-235.

## Naturligt uran

Uran sådant som det vanligen påträffas i jordskorpan utgörs av en blandning av de tre isotoperna i följande sammansättning.

Uran-238	99,28%	$T_{1/2} = 4,468 \times 10^9 \text{ år}^*$
Uran-235	0,71%	$T_{1/2} = 7,037 \times 10^8 \text{ år}^*$
Uran-234	0,006%	$T_{1/2} = 2,454 \times 10^5 \text{ år}^*$
T <sub>1/2</sub> = Isotopens halveringstid		

Detta naturliga uran är inte direkt användbart till energiproduktion i det slags reaktorer som vi har. Halten av Uran-235 måste höjas för att detta ska bli möjligt. Anrikt uran till kärnbränsle innebär att man höjt halten av den klyvbara isotopen Uran-235. En vanlig anrikningsgrad är ca 3,5% Uran-235. Vid anrikningen stiger även halten av Uran-234.

Ett typiskt färskt kärnbränsle kan ha följande sammansättning.

Uran-238	96,47%	964,7 kg/ton
Uran-235	3,50%	35,0 kg/ton
Uran-234	0,03%	0,3 kg/ton

Den specifika aktiviteten hos de olika uranisotoperna ser ut på följande sätt.

Uran-238	12,447 MBq/kg*
Uran-235	71,114 MBq/kg*
Uran-234	2,303 x 10 <sup>5</sup> MBq/kg*

\*1MBq = 1 megabecquerel = 1 miljon sönderfall/sekund

De olika isotopernas bidrag till aktiviteten i ett ton typiskt (färskt) kärnbränsle blir därmed.

Uran-238	$964,7 \times 12,447 = 12\,007,6$ MBq
Uran-235	$35,0 \times 71,114 = 2\,489,0$ MBq
Uran-234	$0,03 \times 2,303 \times 10^5 = 69\,090$ MBq

Totala aktiviteten är 83 587 MBq eller ca 83,6 GBq.\*  
\*1GBq = 1 gigabecquerel = 1 miljard sönderfall/sekund

Trots att isotopen Uran-234 endast utgör 3 hundraedels procent av bränslematerialet bidrar den pga sin förhållandevis mycket korta halveringstid som synes med större delen av det färskas bränslets aktivitet, ca 82,6%.

### Från färskt till utbränt kärnbränsle

Vid klyvningsprocessen i reaktorn sker ett intensivt neutronbombardemang varvid framför allt Uran-235-atomerna splittras till mindre fragment, s.k. klyvningsprodukter, bestående av instabila isotoper av lättare grundämnen såsom exempelvis Cesium-137, Strontium-90, Technetium-99 och Krypton-85. Dessutom sker en absorption av neutroner i bl.a. Uran-238-atomernas kärnor vilket leder till att tyngre instabila grundämnen, s.k. transuraner bildas såsom till exempel Plutonium, Americium och Neptunium.

Från att således från början endast ha bestått av tre uranisotoper kommer bränslet efter att ha använts i reaktorn att innehålla ett mycket stort antal radioaktiva isotoper med sinsemellan högst skiftande egenskaper. Detta innebär också att bränslet när det tas ur reaktorn kommer att ha en avsevärt högre aktivitet än vad det hade när det en gång sattes in. Som framgår av tabellen nedan ökar aktiviteten några miljoner gånger.

1 Färskt uranbränsle 3,5% anrikning	80GBq/ton
2 Kärnreaktor	
3 Utbränt kärnbränsle 38MWd/kg U.* (1 månad efter uttag)	3,35 x 10 <sup>8</sup> GBq/ton (335 000 000 KBq/ton)

\*Mått på utbränningsgraden, 35-40 MWd/kg U är det normala i svenska kärnkraftverk.

## Avklingningen

Det utbrända bränslets höga aktivitet vid uttaget från reaktorn härrör till betydande del från kortlivade klyvningsprodukter. Detta innebär att aktivitetens avtagande går mycket snabbt från början för att sedan plana ut alltmer.

### Avklingning för utbränt kärnbränsle

Tid efter uttag ur reaktorn (år)	Aktivitet (GBq/ton)
40	7 000 000
100	1 700 000
1000	72 000
10 000	16 000
100 000	2 300
1 miljon	900
10 miljoner	215
4,5 miljarder	85

Av ovanstående sammanställning framgår att det utbrända kärnbränslet först efter 4,5 miljarder år börjar komma ned till en aktivitetsnivå som motsvara det färska bränslets. Eftersom saken i detta sammanhang gäller frågan om när det utbrända bränslet kan ha "avklingat till ofarlighet" kan vi lämna det korta perspektivet och de kortlivade klyvningsprodukterna därhän. Och det som är intressant i det längre perspektivet är vad som återstår av de ursprungliga uranisotoperna och vad som finns av nybildade transuraner i det utbrända bränslet.

### Innehåll av några tunga nuklider i utbränt kärnbränsle.


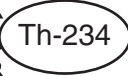
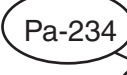
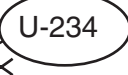
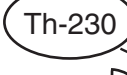
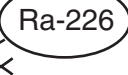
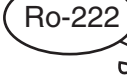
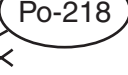
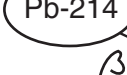
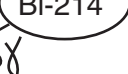
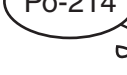
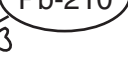



Nukleid	Gram/ton bränsle	T1/2 (år)
Uran-235	7 400	7,037 x 10 <sup>8</sup>
Uran-234	200	2,454 x 10 <sup>5</sup>
Uran-238	945 000	4,468 x 10 <sup>9</sup>
Neptunium-237	440	2,14 x 10 <sup>6</sup>
Plutonium-238	150	88
Plutonium-239	4 700	24 100
Plutonium-240	2 000	6 570
Plutonium-241	1 000	14,4
Plutonium-242	660	376 000
Americium-243	100	7 370
Curium-244	30	18,1

Vad säger nu oss denna tabell? Alldeles bortsett ifrån att den visar att vi kommer att ha ungefär ett kilo plutonium per ton avfall efter 100 000 år så visar den att bränslet fortfarande innehåller nära 95% Uran-238 och 0,7% Uran-235.

Uran-238 har som synes en halveringstid på ca 4,5 miljarder år, vilket är detsamma som att hälften av den angivna mängden fortfarande kommer att återstå vid denna avlägsna tidpunkt i jordens framtid. Detta innebär också att avfallets innehåll av Uran-238 inte kommer att genomgå någon påtaglig minskning under vare sig 100 000 eller några miljoner år.

Men det kommer att hända något annat intressant i sammanhanget. Uran-238 kommer med tiden att sönderfalla i stabilt bly, men detta sönderfall sker stegvis över andra radioaktiva ämnen i en mycket strikt ordning.

## Sönderfallskedja för Uran-238

		Isotop	Halveringstid
1		Uran-238	4 510 000 000 år
2		Thorium-234	24,1 dagar
3		Protaktium-234	1,2 minuter
4		Uran-234	247 000 år
5		Thorium-230	80 000 år
6		Radium-226	1 602 år
7		Radon-222	3,8 dagar
8		Polonium-218	3,1 minuter
9		Bly-214	26,8 minuter
10		Vismut-214	19,7 minuter
11		Polonium-214	164 mikrosekunder
12		Bly-210	21 år
13		Vismut-210	5 dagar
14		Polonium-210	138,4 dagar
15		Bly-206	Stabil

$\alpha$  = alfastrålning       $\beta$  = betastrålning       $\gamma$  = gammastrålning

Sönderfallet sker i 14 steg och bilden visar hur detta sker, vilka nya radioaktiva ämnen som successivt bildas, deras halveringstider och vilken typ av strålning respektive ämne avger vid sitt sönderfall. Samtliga dessa ämnen kommer alltså att uppstå i avfallet och för all framtid finnas där i mängder som är direkt proportionella mot deras halveringstider. Vad vi alltså får i långtidsperspektivet är en urangruva med uranhalt över 90% och med all de besvärliga radioaktiva mellanprodukter som till exempel Radium, Radon och radondöttrar som finns i en sådan. Fortfarande efter 4,5 miljarder år har vi (om vi nu föreställer oss att den plats där vi lagt ned bränslet intakt, vilket vi måste betrakta som högst osannoligt) således en sådan urangruva, nu med uranhalt 50%. Frågan man nu alltså skall ställa sig är om detta är något som kan betraktas som "en ofarlig nivå eller vad som förekommer naturligt i jordskorpan". Låt oss därför titta på en annan tabell.

## Naturlig förekomst av Uran

I jordskorpan	0,0004%
I Ranstad	0,03%
I Rössinggruvan	0,045%
I Rangergruvan	0,25%
I Key Lake	2,0%
I Cigarr Lake	12%

Som framgår av denna tabell är de halter av uran som står att finna i naturliga förekomster långt blygsammare än ens de knappa femtio procent som vårt kärnbränsleförvar kan uppvisa fortfarande efter 4,5 miljarder år. Uranhalter över 1% är mycket sällsynta och gruvan Key Lake i Kanada betecknas vid upptäckten som en "monstergruva". Cigarr lake, likaledes i Kanada är världens i dag rikhaltigaste gruva och brytningen där sker p.g.a. den höga radioaktiviteten med hjälp av fjärrstyrd utrustning.

Det kan därför inte vara korrekt att hävda vare sig att det utbrända kärnbränslet efter 100 000 år avklingat till ofarlighet eller att dess aktivitet då ligger i nivå med vad som förekommer naturligt i jordskorpan. Att påstå att så skulle vara fallet om något eller några miljoner år är visserligen ett steg i rätt riktning men ligger ändå mycket långt från sanningen.

Den verkliga sanningen är att det utbrända kärnbränslet aldrig någonsin i vår jords framtida historia kommer att avklinga till nivåer som är naturligt förekommande på vårt klot! Frånsett vad som ovan sagts kan man naturligtvis fråga sig om avfallet är att betrakta som ofarligt ens när det i sin helhet förvandlats till bly. Bly betraktas ju som en av våra giftigaste tungmetaller och något som vi till varje pris vill hindra från att spridas i vår miljö. De 500 meters bergtäckning som f.n. planeras för kärnavfallsförvaringen kommer heller inte att förslå långt i det aktuella tidsperspektivet om man betänker att den för ändamålet så lovprisade skandinaviska urbergsskölden skalats av minst 10 kilometer på höjden under de gångna 1,8 miljarder åren. Det deponerade materialet kommer oundvikligen som en följd av erosionens krafter att förr eller senare hamna i marknivå och därmed kommer det också att fritt kunna sprida sig i biosfären.

SKBs påstående att det utbrända kärnbränslet är ofarligt om 100 000 år leder också till orimliga konsekvenser, om man jämför detta med hanteringen av och synen på det låg- och medelaktiva avfallet som skall slutförvaras i Forsmark, SFR.

Aktiviteten i det utbrända bränslet kommer om 100 000 år att ha sjunkit till ungefär 2 300 GBq/ton. I Forsmarkslagrets bergrum, 60 meter under marknivå, skall enligt gjorda prognoser 60 000 m<sup>3</sup> avfall med en sammanlagd aktivitet på 5-10 miljoner GBq deponeras. Fram till den 31/12 1997 hade man deponerat ca 22 850 m<sup>3</sup>. denna avfallsvolym hade enligt uppgift från SKB vid samma tidpunkt den sammanlagda aktiviteten 340 000 GBq vilket betyder 15 GBq/m<sup>3</sup>. Utgår vi ifrån att volymvikten 1 ton/m<sup>3</sup>, vilket torde vara lågt räknat, håller detta avfall i genomsnitt en aktivitet på 15 GBq/ton.

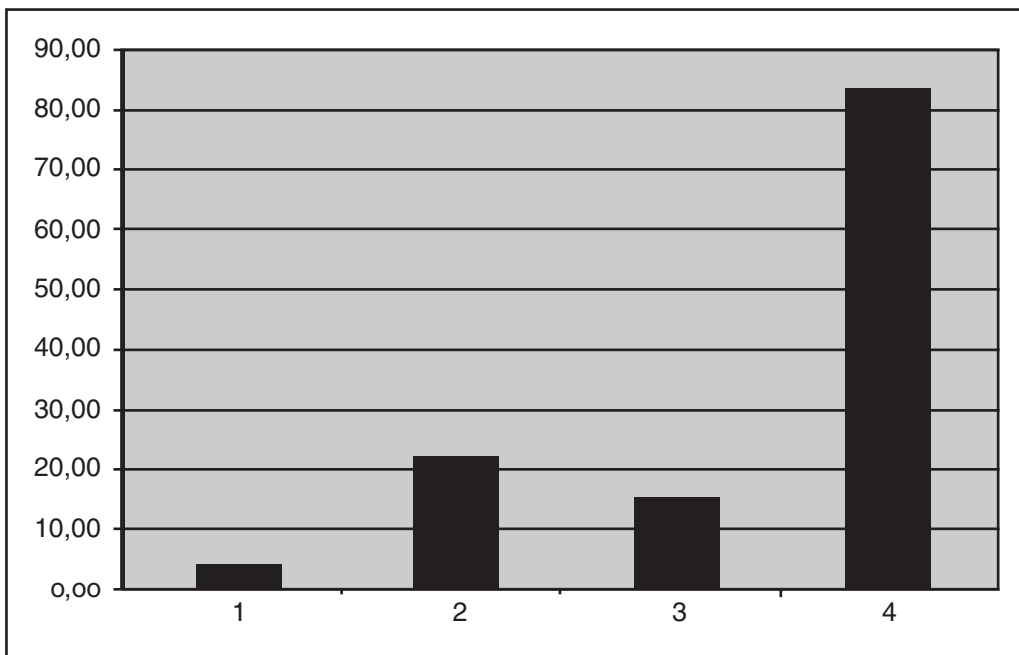
Detta innebära att SFR-avfallets aktivitet vid deponering uppgår till högst 0,65% av den aktivitet som för det högaktiva avfallet angivits som ofarligt. Den fråga som man osökt ställer sig, är varför man gör sig så mycket besvär med att ordna ett avfallsförvar 60 meter ner i bergrunden och vidtar så rigorösa försiktighetsåtgärder för ett avfall vars aktivitet inte ens når upp till en hundradel av den nivå som förklarats som "ofarlig".

Om man vänder på resonemanget något kan man ställa följande fråga: - När kommer aktiviteten i det utbrända bränslet att ha sjunkit till samma nivå som det avfall som nu deponeras i SFR? Svaret blir: om sisådär 10-22 miljarder år. Men då har vår sol för länge sedan slocknat och livet i vårt solsystem är något som tillhör en mycket avlägsen tid i universums historia. De ovan gjorda aktivitetsjämförelserna mellan uranmalm, SFR-avfall och utbränt kärnbränsle framgår kanske något åskådligare i de diagram som följer.

## Aktivitet jämförelser i diagram

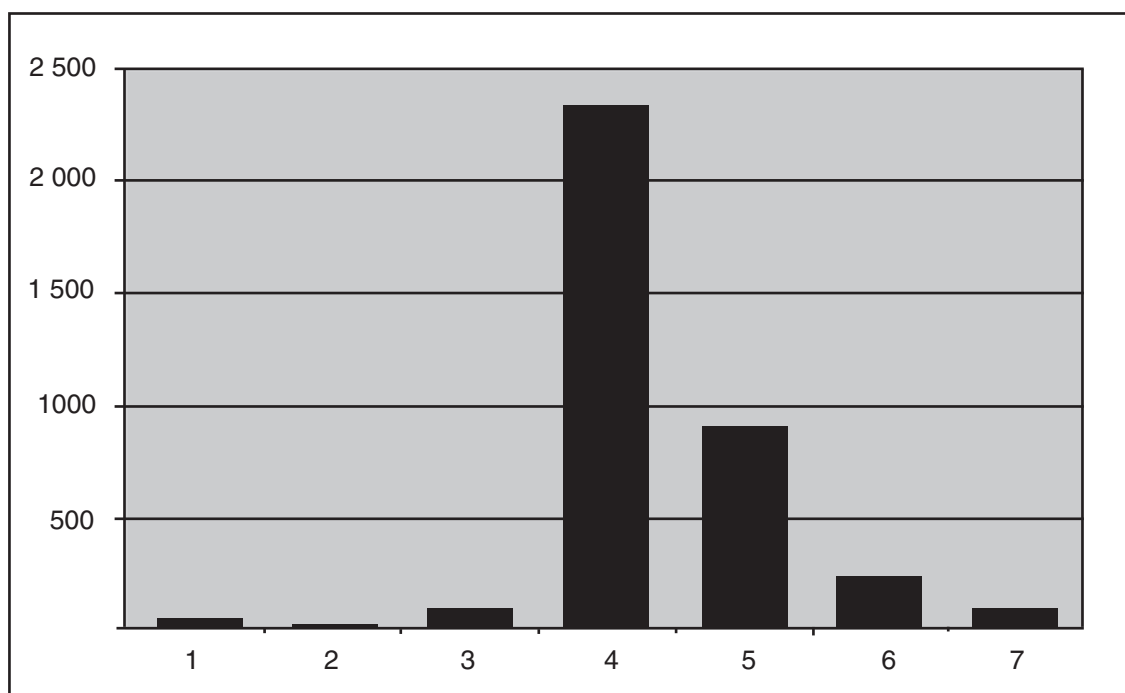
### Uranmalm, kärnavfall och kärnbränsle

		Aktivitet GBq/ton
1.	Key Lake	3,6
2.	Cigarr Lake	21,5
3.	SFR-avfall vid deponering	15
4.	Färskt kärnbränsle	83,6



## Uran och kärnavfall

		Aktivitet GBq/ton
1.	Cigarr Lake	21,5
2.	SFR-avfall vid deponering	15
3.	Färskt kärnavfall	83,6
4.	Utbränt bränsle efter 100 000 år	2 300
5.	Utbränt bränsle efter 1 miljon år	900
6.	Utbränt bränsle efter 10 miljoner	215
7.	Utbränt bränsle efter 4,5 miljarder år	85



## Referenser

- SKB rapport R-97-02. "Använt kärnbränsle - hur farligt är det? Sid. 14  
Nuclear Words and Terms. Miles Goldstick.  
SKB-rapport. PR D-96-016. Förstudie Östhammar. Sid. 35.  
Kärnbränslecykelns slutsteg. Använt kärnbränsle KBS-3, SKBF 1983  
Dödens sten. En bok om uranbrytning. ISBN 91-87200-04-x. Energiflödet 1991.  
Årsrapport SFR, 1998-01-27. Deponerade mängder mm. 1997.  
SKBF. Kärnkraftens slutsteg. "Plutoniumanvändning i svenska reaktorer". 1982.  
"Slutförvar för reaktoravfall - SFR" Informationsskrift, SKB 1987.

Mats Törnqvist  
Söderboda 3601  
740 71 Öregrund  
2000-11-13