

Kvalitetssäkring

2017-09-04 Helene Åhsberg (TS)

2017-09-04 Martin Sjölund (Godkänd)

Kommentar

Strålsäkerhetsmyndigheten
Att: Ansi Gerhardsson
171 16 Stockholm

Svar till SSM på begäran om komplettering kring försprödningsmekanismer för kapseln

Strålsäkerhetsmyndigheten, SSM, har i skrivelse till Svensk Kärnbränslehantering AB, SKB, begärt kompletterande information kring försprödning i form av statisk och dynamisk åldringsdeformation hos kapselns segjärnsinsats enligt följande:

SSM önskar att SKB kommenterar processerna statisk och dynamisk deformationsåldring (static and dynamic strain aging) och deras möjliga koppling till segjärnsinsatsens hållfasthet utifrån nyligen rapporterade studier (Pihlajamäki, 2017) som lyfts fram av Kärnavfallsrådet i sitt yttrande över SKB:s Fud-program 2016. Processerna beskrivs även utförligt i (Honeycomb, Bhadeshia, 1995).

SKB:s svar

Bakgrund

Deformationsåldring är en härdnings- och försprödningsmekanism som kan uppkomma för vissa kombinationer av deformations- och temperaturförhållanden i t ex stål och gjutjärn. Fenomenen är relaterade till plastisk deformation. Om försprödningsen sker efter deformationen kallas fenomenet statisk deformationsåldring och om den sker samtidigt benämns det dynamisk deformationsåldring. Fenomenen har varit känt och har studerats hos såväl stål som gjutjärn åtminstone sedan början av 1900-talet, se vidare bilaga 1. Förutom temperaturen har halten av vissa legeringsämnen och föroreningar, särskilt kol och kväve, i materialen en avgörande betydelse för försprödnings omfattning och genom att styra legerings- och föroreningshalterna kan man göra materialen åldringsbeständiga. Det segjärn som kapselinsatserna tillverkas av är den form av gjutjärn som är mest tålig mot deformationsåldring.

Åldringsfenomen uppkommer då legeringselement och föroreningar omfördelas i ett material eller nya partiklar skiljs ut. Detta sker genom att föroreningarna diffunderar till och ansamlas kring positioner som är energimässigt mer stabila, som dislokationer och korngränser. Jämviktsfördelningens utseende i ett givet material beror av dess temperatur. En grundläggande fråga, relaterad till den om deformationsåldring, är huruvida föroreningarna i det *oplasticerade* materialet är rumsligt fördelade så att de är i jämvikt. Om så inte är fallet kan omfördelning med tiden ske också i det *oplasticerade* materialet. Man talar då om *kylåldring* eftersom åldringen i det fallet drivs av en obalans som uppstår till följd av att temperaturen sjunker efter tillverkningen. Av bilaga 1 framgår att segjärnet i SKB:s insatser uppvisar en svag men påvisbar förbättring av materialegenskaperna över tid. Materialet kan således bedömas vara i god balans initialt och trenden på sikt indikerar en svag förbättring av egenskaperna.

Vad gäller *dynamisk deformationsåldring* framgår av tillgängliga data för segjärn att fenomenet börjar uppträda vid cirka 200 °C och har ett maximum vid temperaturer omkring 400 °C, till skillnad mot andra gjutjärn där maximum kan ligga redan vid 300 °C, se vidare bilaga 1. Tillgängliga data tyder också på att segjärnet i insatsen inte är benäget att undergå *statisk deformationsåldring* vid låga temperaturer, se bilaga 1. Kapselinsatsens temperatur i förvaret stiger till ett maximum kring 120 °C något tiotal år efter deponering (Raiko et al. 2010, avsnitt 4.1) för att sedan understiga 80 °C cirka 100 år efter deponering och 50 °C cirka 1000 år efter deponering (SKB 2011, avsnitt 10.3.4). Detta ger en första indikation på att fenomenet är av begränsad betydelse i slutförvarsmiljön. En annan fundamental orsak till detta är att kapselns insats är dimensionerad för att motstå de lastfall som förekommer i slutförvaret utan att plasticeras, undantaget osannolika fall med stora skjuvlaster. I det följande görs en kort genomgång av lastfallen i slutförvaret.

Effekt på lastfallen i slutförvaret

I slutförvaret kan kapselns segjärnsinsats i korthet utsättas för asymmetriska laster under buffertens vattenmättnadsförlopp, isostatiska laster efter fullständig mättnad av bufferten och skjuvlaster om jordskalvsinducerade skjuvrörelser skulle uppträda i bergsprickor som skär deponeringshålet.

Asymmetriska laster kan uppträda till följd av ojämn bevätning av bufferten under den inledande tiden då temperaturen i kapseln är förhöjd, men ändå långt under de temperaturer där deformationsåldring observerats. Vidare är lasterna under detta skede för små för att orsaka plasticering av insatsen (Raiko et al. 2010) och därmed finns varken den deformation eller den temperatur som krävs för deformationsåldring hos segjärn.

De isostatiska laster som uppträder under tempererade klimathållanden anges i säkerhetsanalysen SR-Site till maximalt 15 MPa och detta ger stor marginal till plasticering av insatsen (Raiko et al. 2010). Den isostatiska lasten kan bli förhöjd till följd av en framtida överliggande inlandsis, och kapselinsatsen är dimensionerad för att motstå också sådana laster utan att plasticeras. Då har också temperaturen hos kapseln avtagit till att ligga nära den opåverkade temperaturen hos berget på förvarsdjup i Forsmark, cirka 11 °C vilket således är långt under den temperatur där deformationsåldring eventuellt skulle kunna inträda hos segjärn.

Jordskalvsinducerade skjuvlaster kan i princip uppträda under hela miljonårsperioden för slutförvaret. Den årliga sannolikheten är mycket låg och den ackumulerade sannolikheten att någon enda av de 6000 kapslarna ska drabbas av en skjuvrörelse som leder till kapselskador bedömdes i säkerhetsanalysen SR-Site till mindre än 0,1 (SKB, 2011, avsnitt 10.4.5). Under de inledande 1000 åren med förhöjd temperatur beräknas sannolikheten till 2×10^{-5} (SKB 2011, avsnitt 10.4.5). Man har här att ta ställning till dels om dynamisk åldring skulle kunna inträffa vid själva skjuvrörelsen, dels om statisk åldring skulle kunna inträffa efter rörelsen.

Vad gäller dynamisk deformationsåldring under skjuvrörelsen konstateras att rörelserna sker på bråkdelar av en sekund, medan den dynamiska deformationsförsprödning som observerats för segjärn är påtaglig vid cirka 400 °C och på tidsskalor av minuter som vid dragprovning, se bilaga 1. Den observerade effekten kräver således både långsammare pålastning och högre temperatur än i slutförvaret. Man har också att ta ställning till om den värme som frigörs vid skjuvdeformationen lokalt och temporärt skulle kunna ge en så hög temperatur att dynamisk deformationsåldring inte kan uteslutas. SKB noterar då först att brottseghetsprovning som genomförts vid hög hastighet och som redovisas utförligt i SKBdoc 1353649, 1355310 och 1355363 visar att materialegenskaperna som skjuvberäkningarna bygger på innehålls. I dessa försök uppkommer deformationsvärme och detta blir således

invägt i resultatet. För det andra har deformationsvärmen skattats i Appendix 1 och bedöms där vara mindre än 1 °C, vilket alltså är försumbart i sammanhanget.

Vad gäller kapselns mekaniska egenskaper efter en skjuvrörelse konstateras i säkerhetsanalysen SR-Site (SKB 2011, avsnitt 10.4.5) att tåligheten mot en maximal isostatlast inte påverkas om kapseln först utsatts för den dimensionerande och plasticerande skjuvrörelsen 5 cm. Eftersom tillgängliga data tyder på att segjärnet i insatsen inte är benäget att undergå statisk deformationsåldring vid låga temperaturer bedöms statisk deformationsåldring inte påverka insatsens egenskaper efter en plasticerande skjuvrörelse. SKB noterar också *i*) att marginalen med vilken egenskaperna hos en insats som plasticeras av en skjuvrörelse skulle kunna modereras utan att tåligheten mot en efterföljande isostatlast påverkas kan vara betydande men frågan är inte utredd, samt *ii*) att fallet att en plasticerande skjuvrörelse följs av en maximal isostatisk last är mycket osannolikt också i ett miljonårsperspektiv.

SKB:s slutsats

Efter genomgång av tillgänglig litteratur och av lastfallen i slutförvaret bedömer SKB att varken statisk eller dynamisk deformationsåldring äventyrar kapselinsatsens mekaniska egenskaper eller funktioner i slutförvaret. Dels krävs plasticerande laster för att fenomenen ska uppstå medan kapselinsatsen är dimensionerad så att plasticering inte uppnås utom i osannolika fall, dels är temperaturen i slutförvaret betydligt lägre än de temperaturer vid vilka särskilt dynamisk åldring uppträder. Segjärn är vidare den form av gjutjärn som är mest tålig mot deformationsåldring.

Med vänlig hälsning

Svensk Kärnbränslehantering AB
Avdelning Kärnbränsle

Helene Åhsberg
Projektledare Tillståndsprövning

Bilagor

- 1 Åldring, deformationsåldring, blåsprödhet av segjärn. SKBdoc 1602640 ver 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Referenser

Referenser i ansökan

Hernelind 2010. Modelling and analysis of canister and buffer for earthquake induced rock shear and glacial load. SKB TR-10-34, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Raiko H, Sandström R, Rydén H, Johansson M, 2010. Design analysis report for the canister. SKB TR-10-28, Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB, 2010. Design, production and initial state of the canister. SKB TR-10-14, Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB, 2011. Long-term safety for the final repository for spent nuclear fuel at Forsmark. Main report from the SR-Site project. SKB TR-11-01, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Övriga referenser

Hult J, 1989. Bära brista – Grundkurs i hållfasthetslära. Andra upplagan. Almqvist & Wiksell.

Opublicerade dokument

SKBdoc 1206894 ver 1.0. Uneven swelling pressure on the canister simplified load cases derived from uneven wetting, rock contours and buffer density distribution. Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKBdoc 1353649 ver 2.0. Uppskattning av dJ/dt för brottseghetsprover. Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKBdoc 1355310 ver 1.0. Kommentar – Belastningshastighetens inverkan på insatsens brottseghet, KTH. Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKBdoc 1355363 ver 2.0. Förtydligande information angående belastningshastighetens inverkan på brottsegheten för insatsen. Svensk Kärnbränslehantering AB.

Appendix 1. Skattning av frigörelse av värme vid skjuvdeformationen.

En skjuvdeformation av kapseln leder väsentligen till en böjning vad gäller formförändring. Vid små böjningar fungerar kapseln elastiskt, medan de böjningar som förekommer i skjuvfallet ger plasticering. Om man betraktar det hypotetiska fallet att hela denna böjning sker elastiskt kommer den energi som åtgår för en sådan böjning att överskattas eftersom spännings-töjningskurvan är icke-linjär med avtagande lutning i området där plasticeringen sker. Om all den så upplagrade elastiska energin blir till värme överskattas den frigjorda värmen för böjningen ifråga.

För att få en första approximation av den elastiska energin betraktas kapselinsatsen som en elastisk balk. Den elastiska energin, U , för böjning av en elastisk balk ges av Ekvation 90, avsnitt 5.2:3 i Hult (1989)

$$U = \frac{P^2 L^3}{6EI} \quad (1)$$

där

P är den böjande kraften,
 E är elasticitetsmodulen,
 I är tröghetsmomentet och
 L är balkens längd.

Sambandet mellan böjningen, δ , och P ges av Ekvation 92, avsnitt 5.2:3 i Hult (1989)

$$\delta = \frac{PL^3}{3EI} \quad (2)$$

Kombineras (1) och (2) fås sambandet mellan den elastiska energin och böjningen som

$$U = \frac{3EI}{2L^3} \delta^2 \quad (3)$$

Med

$E = 1,66 \times 10^{11}$ Pa (Raiko et al., 2010),
 $I_{PWR} = 0,031$ m⁴ (SKBdoc 1206894),
 $L = 4,8$ m (SKBdoc 1206894), och
 $\delta = 0,05$ m, bestämt ur underlaget till Figure A1-1 i Hernelind (2010),

fås $U \approx 0,17$ MJ. Med insatsens värmekapacitet 450 J/(kg × °C) och massa 16 400 kg (SKB 2010) ger detta en temperaturhöjning på cirka 0,024 °C fördelad jämnt i hela insatsen. Det plasticerade området kan skattas till 1 m i axiell led i t ex Figure A1-15 i Hernelind (2010) och i detta område kan ungefär hälften av segjärnet bedömas ha plasticerat, vilket grovt räknat betyder att cirka 10 % av insatsens material plasticeras. Om den alstrade energin i stället fördelas i detta område blir temperaturhöjningen således omkring 0,24 °C.