

Docent Olle Grönder, P-M Technology AB¹

Maj 2016

Kritiska frågeställningar beträffande korrosion och säkerhet vid slutförvar av radioaktivt avfall i kopparkapslar

1. INLEDNING

Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB) har i sin licensansökan för ett förvar för slutdeponering av förbrukat kärnbränsle i Forsmark föreslagit att det radioaktiva avfallet skall placeras i kopparkapslar, vilka placeras i berggrunden på ett djup av ca 500 m vid Forsmark, Östhammars kommun, Sverige. Förvaret av det radioaktiva avfallet skall ske enligt KBS-3 konceptet, som har utvecklats av SKB.

Säkerhetsaspekterna för detta slutförvar är av utomordentligt stor betydelse då den föreslagna placeringen vid Forsmark är lokaliserad delvis under Östersjön. Ett läckage och utsläpp av radioaktivt avfall kommer att generera en miljökatastrof av enorma proportioner och påverka alla länder runt Östersjön.

Det är värt att notera att olika frågeställningar och undersökningar relaterade till det svenska konceptet KBS-3 för slutförvar har tidigare studerats nästan uteslutande vid SKB's Äspö laboratorium i Laxemar, Oskarshamns kommun. Denna plats betraktades tidigare som en trolig lokalisering för slutförvaret.

Förhållandena vid den föreslagna placeringen av slutförvaret i Forsmark skiljer sig markant på många områden från förhållandena vid Äspö laboratoriet. Detta medför att det för det föreslagna slutförvaret i Forsmark föreligger stora osäkerheter och brist på data av fundamental betydelse för säkerhetsanalysen.

Detta gäller för inflödet av grundvatten till kapslarnas deponeringshål, sammansättningen hos den gasfas och det vatten som omger kapslarna och tiden det tar för bentoniten som omger kapslarna att bli mättad med vatten. Det har vidare inte gjorts några korrosionsförsök med kopparkapslarna under de förhållanden som föreligger vid det föreslagna slutförvaret i Forsmark.

Det optimala valet av material för en viss applikation eller produkt baseras generellt på ett flertal faktorer, både ekonomiska och tekniska. Uttrycket *Best Available Technology (BAT)* användes ofta i detta sammanhang. Materialet måste kunna uppfylla de funktionella krav som ställs för den aktuella

¹ För CV se bilaga 1.

applikationen med avseende på mekaniska egenskaper, korrosion -, oxidation-strålning-resistans och andra egenskaper. Korrekt val av material för kapslarna är självfallet av helt avgörande betydelse för KBS-3 konceptet. Ett felaktigt val kommer att innebära att kapslarna havererar i förtid, vilket resulterar i ett utsläpp av stora mängder radioaktivt material och en omfattande miljökatastrof.

Målsättningen med detta dokument är att belysa nuvarande omfattande brist på information och experimentella resultat, i laboratorie- pilot- eller fullskala, under de förhållanden som råder i Forsmark. Detta förhindrar en utvärdering av om koppar är ett lämpligt korrosionsresistent material för slutförvar av radioaktivt avfall i den svenska berggrunden. Tvärtemot visar mycket av den information som finns tillgänglig att koppar inte är lämplig för denna applikation.

2. VAL AV MATERIAL I KAPSELN

Ett flertal författare har nyligen diskuterat olika aspekter beträffande säkerheten hos slutförvaret enligt KBS-3 konceptet och med utgångspunkt från potentiella korrosionsangrepp på kopparkapslarna. Scully och Hicks (1) samt Szakalos och Seetharaman (2) har grundligt utvärderat de korrosionsmekanismer som är av betydelse för kapslarnas livslängd och risken för att kopparskalet penetreras av omgivande grundvatten. Detta skulle då leda till läckage av det radioaktiva avfallet till omgivningen. Dessa författare har också fastslagit att det föreligger ett behov av ytterligare information och studier av olika korrosionsmekanismer för koppar.

Naturskyddsföreningen och Miljöorganisationernas kärnavfallsgranskning, MKG, har också uttryckt stark oro rörande användning av koppar som kapselmateriäl för det radioaktiva avfallet under de förhållanden som föreligger i det föreslagna slutförvaret i Forsmark (3). Detta underlag innehåller en sammanställning av de osäkerheter och brister på information beträffande kopparkorrosion vid deponering av radioaktivt avfall i Forsmark, enligt konceptet KBS-3.

De krav som föreligger på koppars korrosionsresistans är helt unika då koppars måste motstå en komplex och allvarlig korrosionsmiljö i åtminstone 100 000 år och helst 1 000 000 år.

Utvärdering av lämpliga kapselmateriäl måste baseras på:

- Den korrosiva miljön dvs. den kemiska sammansättningen hos de omgivande gas- och vattenfaserna, kapselns yttemperatur och tiden.

- Teoretisk analys av de potentiella korrosionsmekanismerna, deras respektive korrosionshastigheter och möjliga synergistiska effekter mellan olika korrosionsmekanismer.
- Fältprover under förhållanden som väntas föreligga i slutförvaret och extrapolering av uppmätt korrosion under 5-20 års exponering till 100 000 års exponering.

3. KORROSIONSFÖRHÅLLANDENA I FORSMARK

Kopparkapslarna har i KBS-3 konceptet en avgörande funktion, som barriär mellan berggrunden och det radioaktiva avfallet och skall förhindra läckage av radioaktivt material till omgivningen. Kopparkapslarna kommer att utsättas för korrosionsangrepp under hela slutförvaret och måste vara tillräckligt intakta efter 100 000 år så att de inte har penetrerats av vare sig omgivande gas- eller vattenfaser. Kapslarna får vidare inte ha spruckit på grund av någon försprödnings-mekanism, spänningskorrosion eller krypprocess.

Kopparkapslarna kommer att exponeras under dessa 100 000 år för en mycket komplex korrosionsmiljö, inkluderande ett flertal korrosionsmekanismer och mekanisk belastning. Det föreligger interaktion mellan olika mekanismer, samt mellan korrosion och mekanisk belastning potentiellt i form av spänningskorrosion (4). Kopparn kommer vidare att utsättas för några potentiella försprödnings-mekanismer från väte (2) och svavel (5).

Inflödet av grundvatten till deponeringshålen för kapslarna kommer att vara mycket begränsat i det föreslagna slutförvaret i Forsmark. Det kommer enligt undersökningar utförda av SKB ta i storleksordningen 1 000 till 6 000 år innan deponeringshålen har fyllts med vatten. Det inströmmande grundvattnet skall också mätta den bentonit som är placerad i deponeringshålen och omger kapslarna. Kapslarnas yttemperatur kommer uppgå till 90-100°C enligt SKB under de första tusentals åren efter deponeringen av kapslarna på grund av sönderfall av det radioaktiva avfallet.

Grundvatten kommer att strömma in i deponeringshålen genom sprickor i berggrunden. Detta grundvatten kommer efter en viss tid att komma i kontakt med de varma kopparytorna, vilket resulterar i att grundvattnet förångas. Den bildade vattenångan kommer därefter att kondensera i de kallare områdena i deponeringshålen men också till viss del i ovanliggande deponeringstunnlar.

Mängden grundvatten som strömmar in i deponeringshålen är en mycket viktig parameter vid utvärdering av flera säkerhetsaspekter för slutförvaret.

Kopparkapslarna kommer initialt under några tusentals år utsättas för gasfaskorrosion. Den gasfas som omger kapslarna kommer att innehålla syrgas under en mycket begränsad tidsperiod efter förslutning av deponeringshålen. En del av syret kommer att förbrukas genom reaktion med kopparn under bildning av kopparoxid men det mesta av syret kommer att konsumeras vid bakteriella reaktioner i bentoniten.

Kopparkapslarna kommer under de första tusentals åren vara exponerade för tre typer av korrosion:

- Vattenkorrosion i de nedre delarna av kapslarna då en separat vattenfas har utbildats.
- Gasfas korrosion på de övriga delarna av kopparkapslarna som ligger över den utbildade vattenfasen.
- Gränsskiktsskorrosion av kopparkapslarna i en zon angränsande till vattenytan.

Gränsskiktsskorrosion är en aggressiv korrosionsmekanism och kommer att äga rum i en zon mellan gas- och vattenfasen där vattenfasen kommer att innehålla höga halter av lösta salter främst klorider och sulfider.

3.1 Förångning av grundvatten – Sauna-effekten

Grundvatten kommer att strömma genom de sprickor som finns i berget till deponeringshålen. SKB (4) uppskattar att flödet av grundvatten in i deponeringshålen i normalfallet är mindre än 0.01 liter/min per deponeringshål. Detta vatten kommer efter en viss tid i kontakt med de varma (90-100 C°) kopparytorna, vilket resulterar i att det förångas. Detta förhållande är av avgörande betydelse för funktionen och säkerheten hos KBS-3 konceptet.

SKB har angivit att varje deponeringshål är ett *hermetiskt slutet system*. Enligt SKB kan då inte förångat grundvatten tränga ut i överliggande deponerings- och transporttunnlar och all bildad vattenånga blir kvar och kondenserar i deponeringshålen. Detta innebär då enligt SKB att den kemiska sammansättningen hos vattnet i deponeringshålen är densamma som hos grundvattnet och inte förändras med tiden.

Szkalos och Seetharaman (2) samt Grinder (3) har presenterat en rakt motsatt modell för mass-transport av förångat vatten. Dessa författare har föreslagit att åtminstone en del av vattenångan kan passera genom det bentonitlock och de bentonitpellets som placerats ut ovanpå varje deponeringshål. Denna vattenånga kommer då att kondensera i deponeringstunnlarna och absorberas av den

bentonit som finns i dessa tunnlar. Denna modell kallar författarna för *Sauna-effekten*.

SKB har nyligen studerat Sauna-effekten experimentellt, se (5). Författarna av denna rapport (5) gör följande slutsats på sid. 23:

“Substantial amount of vapour was able to flow through the pellets filling without being absorbed by apparently rather dry bentonite.”

Slutsatsen stödjer den föreslagna Sauna-modellen och visar att inget av deponeringshålen utgöres av ett hermetiskt slutet system. Detta är helt enligt den modell som föreslagits av Szakalos och Seetharaman (2) samt Grinder (3).

Sauna-effekten resulterar i masstransport av vattenånga från de varma deponeringshålen till de kalla deponeringstunnlarna. Denna process kommer att äga rum under de första tusentals åren efter förslutning av deponeringshålen tills dessa är fullständigt fyllda med vatten och bentoniten är vattenmättad.

Det grundvatten som strömmar in i deponeringshålen innehåller 0.95% salt och Sauna-effekten kommer obestridligt att leda till en anrikning av salt i bentoniten, på kopparkapslarnas ytterytor samt i det vatten som finns i deponeringshålen.

Det är välkänt från avsaltningens anläggningar att exponering av varm metall för saltrikt vatten som förångas ger en extremt korrosiv miljö, vilken är helt olämplig för koppar. Szakalos och Seetharaman (2) anger att saltanrikning på kopparytorna kommer att äga rum en kort tid efter deponeringen av kapslarna dvs. redan under den oxidiska perioden.

De kriterier som gäller för uppkomst av spänningsskorrosion och punktfrätning kan också föreligga genom kombinationen av höga salthalter och förekomst av gasformiga nitrosa- och vätesulfid-föreningar, se nedan.

Den avgörande frågeställningen i detta sammanhang är att Sauna-effekten aldrig har studerats experimentellt och under de korrosionsförhållanden som råder i slutförvaret (Forsmark). Detta innebär att koppars korrosionshastighet och säkerhetsanalysen har beräknats utan kunskap om den korrosiva miljön dvs. den kemiska sammansättningen hos vattnet i deponeringshålen.

3.2 Närvaro av metan och vätesulfid

Szakalos och Seetharaman (2) har utförligt diskuterat den potentiella effekten

av mycket små halter av metan och vätesulfid på kopparns korrosionshastighet i slutförvaret. SKB har mätt halterna av dessa gaser i grundvattnet vid Forsmark (6). De metan- och vätesulfid-gaser som är lösta i grundvattnet kommer att stå i jämvikt med den gasfas som omger kapslarna under de första tusen åren.

Halten vätesulfid i gasfasen kommer endast att uppgå till några ppm enligt termodynamiska beräkningar utförda av Szakalos och Seetharaman (2). Emellertid har flera författare (12-14) rapporterat att spår eller några ppm vätesulfid mycket kraftigt accelererar kopparkorrosion i fuktig gasatmosfär.

Sauna-effekten som diskuterats tidigare kommer att leda till kraftigt ökade halter av lösta salter (klorider, sulfider och sulfater) och gaser i det grundvatten som omger kopparkapslarna. Den strålning från det radioaktiva avfallet som passerar kapselväggarna kommer att generera salpetersyra HNO_3 i gasfasen. Det är välkänt att även spår av HNO_3 dramatiskt ökar kopparkorrosion i gasfas under fuktiga förhållanden (15-16).

Förekomsten av lösta gaser som vätesulfid, metan och salpetersyra i det grundvatten och i den gasfas som föreligger i deponeringshålen har således en direkt inverkan på kopparns korrosionshastighet under de första tusentals åren av slutförvaret.

4. KORROSIONSFÖRHÅLLANDENA VID LAXEMAR OCH FORSMARK

Det föreligger stora skillnader mellan korrosionsförhållandena vid den primära lokaliseringen vid Forsmark och alternativet vid Laxemar.

Äspö-laboratoriet är lokaliserat nära det område vid Laxemar som varit föreslaget för slutförvar och förhållandena är ungefär desamma. De huvudsakliga skillnaderna i korrosionsmiljö mellan Laxemar och Forsmark uppkommer under den inledande fasen innan deponeringshålen har fyllts med vatten:

- Kopparkapslarnas exponering för gasfaskorrosion är mycket längre i slutförvaret i Forsmark (några tusentals år) jämfört med endast några år upp till några tiotals år i Laxemar. Detta förorsakas av att inflödet av grundvatten till deponeringshålen är mycket större i Laxemar.

- Förångning av grundvatten i deponeringshålen (Sauna-effekten) kommer att leda till utskiljning av hygroskopiska saltkristaller på kopparytorna. Dessa kommer sedan bli helt eller partiellt täckta av ett saltlager. Det föreligger risk för uppkomst galvaniska celler om kopparytorna är endast partiellt täckta av saltskiktet. Korrosion av varma metaller inklusive koppar är mycket hög när de exponeras i en korrosiv miljö med höga salthalter och hög fuktighet.
- Det är sannolikt att atmosfären i deponeringshålen innehåller spår eller ppm-halter av gaser som H₂S, HNO₃ vilka accelererar gasfaskorrosion av koppar.

SKB har valt att exkludera denna korrosionsmekanism i sin säkerhetsanalys och anger att korrosion förorsakad av utskiljda saltkristaller inte kan äga rum, vilket skiljer sig från den allmänna uppfattningen inom området, se t.ex. King och Litke (15).

Av utomordentligt stor betydelse är att SKB hitintills inte verifierat sina slutsatser experimentellt i laboratorieskala eller genom fält-test där de korrosiva förhållandena motsvarar vad kopparkapslarna kommer att utsättas för under de första tusentals åren vid det föreslagna slutförvaret i Forsmark.

Sauna-effekten förorsakar en mycket viktig skillnad i den korrosiva miljön mellan de föreslagna slutförvaren i Forsmark och Laxemar efter det att alla deponeringshål fyllts med vatten:

- Förångningen av det grundvatten som flyter in i deponeringshålen ger direkt en anrikning av lösta salter i det vatten som finns i deponeringshålen med klorid-, sulfid- och sulfat-joner. Detta kommer att leda till höjd salthalt i vattnet. Det är känt att förhöjda halter av klorid- och sulfid-joner kraftigt ökar kopparkorrosionen (16).
- Det vatten som kommer att ansamlas i deponeringshålen i slutförvaret i Forsmark kommer att ha en mycket högre halt av lösta salter jämfört med den alternativa placeringen av slutförvaret i Laxemar.
- Vid alla fältförsök som SKB har gjort tidigare vid Äspö-laboratoriet har salthalten i vattnet varit mycket lägre än vad som förväntas gälla vid slutförvaret i Forsmark.

De är tydligt att inverkan av Sauna-effekten på halten lösta salter i vattnet måste fastställas och fältförsök måste utföras under de förhållanden som gäller i Forsmark. Nuvarande resultat från fältförsök vid Äspö-laboratoriet är av begränsat värde.

5. UTVÄRDERING AV KORROSIONRESISTANSEN HOS KOPPARKAPSLARNA FRÅN FÄLT-TEST

Kopparkapslarna kommer i Forsmark att utsättas för en helt unik korrosionsmiljö och exponeringstid. Det föreligger inga tidigare experimentella resultat som kan ge vägledning. Omfattande fältförsök måste genomföras och under förhållanden motsvarande de som kapslarna kommer att utsättas för när de har placerats i deponeringshålen.

Ur säkerhetssynpunkt är det avgörande att studierna av koppars korrosionsresistans och hållfasthet genomförs under förhållanden som är relevanta för slutförvaret. Värdet hos dessa försök ökar också med försökstiden.

Korrosionsförsöken måste simulera förhållandena då koppar initialt är utsatt för gasfaskorrosion, inkluderande gränsskiktsskorrosion och vattenkorrosion då deponeringshålen är vattenfyllda. Det kommer att innebära åtminstone två skilda försöksserier. Dessa experiment måste ge information om följande frågeställningar:

- Förångning och kondensation av vatten i deponeringshålen och deponeringstunnlarna.
- Föreliggande korrosionsmekanismer
- Bildning av korrosionsprodukter på kopparytorna
- Utskiljning av kopparföreningar i bentoniten
- Utskiljning av salter från grundvattnet i bentoniten och på kopparytorna
- Korrosionshastigheter

SKB har publicerat experimentella resultat från egna korrosionsförsök i laboratorieskala och pilotskala vid Äspö-laboratoriet. Flera författare (2, 3 och 18) har ifrågasatt utförandet av försöksserierna och de slutsatser som SKB dragit utgående från de experimentella resultaten.

Omfattande korrosionsförsök har nyligen genomförts vid Ångströmlaboratoriet, Uppsala Universitet, i avsikt att utröna huruvida koppar korroderar i högre, syrefritt (anoxiskt) vatten. De experimentella förhållandena vid dessa försök var tyvärr sådana att de erhållna resultaten inte bidrog till ökad förståelse av den aktuella frågeställningen huruvida koppar korroderar i syrefritt högre vatten.

6. SÄKERHETSANALYS AV KORROSIONRESISTANSEN HOS KOPPARKAPSLARNA

6.1 Osäkerheter beträffande korrosionsmekanismer och korrosionshastigheter

Det är utomordentligt viktigt att en teoretisk analys genomförs beträffande säkerheten hos slutförvaret för radioaktivt avfall i Forsmark och då särskilt livslängden hos kopparkapslarna och risken för att dessa havererar innan stipulerade 100 000 år. Ett förtida haveri innebär att kapslarna penetreras och grundvatten reagerar med det radioaktiva avfallet.

SKB har gjort sin säkerhetsanalys baserat på:

- Antagande om vilka olika korrosionsmekanismer som skulle kunna ge korrosionsangrepp på kopparkapslarna.
- Uppskattning av möjliga korrosionshastigheter för dessa korrosionsmekanismer. Dessa uppskattningar bygger ofta på massbalanser och antagen kemisk sammansättning hos primärt gasfasen och vattnet i deponeringshålen.
- Deras egna tolkningar av resultaten från korrosionsförsök utförda vid Äspö-laboratoriet.

Tre krav måste uppfyllas för en korrekt analys av säkerheten och livslängden hos kopparkapslarna och därigenom av hela slutförvaret:

- Det måste föreligga noggranna experimentella resultat från den aktuella korrosionsmiljön och framtagna under en period av många år. Dessa resultat måste ge information om föreliggande korrosionsmekanismer, korrosions-hastigheter för både allmän korrosion och lokal korrosion (punktfrätning) samt risken för försprödning av kopparn. Experimenten skall omfatta såväl gaskorrosion (dvs. förhållandena innan deponeringshålen är vattenfyllda) som vattenkorrosion. Den potentiella anrikningen av salt i deponeringshålen måste klargöras.
- Den termodynamiska och kinetiska analysen av korrosionshastigheterna måste vara baserad på noggranna analyser av den kemiska sammansättningen hos gasfasen och vattnet i deponeringshålen.
- Alla potentiella korrosionsmekanismer måste undersökas och inkluderas i säkerhetsanalysen. Dessutom måste potentiella synergistiska effekter mellan olika korrosionsmekanismer fastställas.

SKB har i flera rapporter presenterat resultat från olika fälttester med kopparprover och mini-kapslar utförda vid Äspö-laboratoriet. Rapporterna har

kritiserats i några publikationer t.ex. (2, 3, 18) för olämplig forskningsmetodik och för att författarna inte följt god vetenskaplig praxis. Det finns flera exempel i rapporter från SKB t.ex. (19, 20) i vilka författarna felberäknat korrosionshastigheterna för koppar och presenterat korrosionshastigheter vilka varit avsevärt lägre än vad som uppmätts.

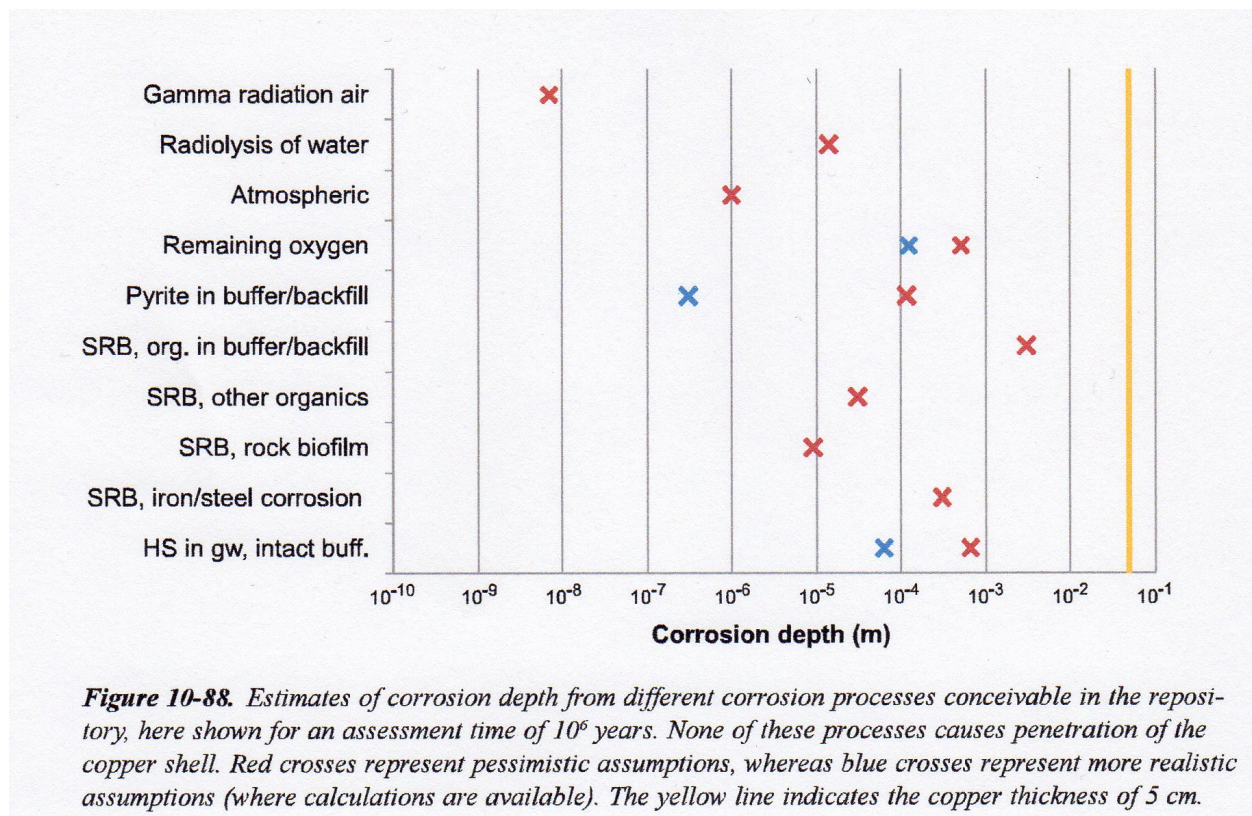
SKB har också funnit höga korrosionshastigheter för koppar i flera försöksserier och förklarat att detta måste ha orsakats av förekomst av löst syre i vattnet (19) då de uppmätta korrosionshastigheterna var mycket högre än vad SKB hade förväntat utgående från teoretiska beräkningar. Dessa experimentella försöksresultat kasserades av SKB.

6.3 Uppskattningar av koppars korrosionshastighet

SKB har i företagets rapport om säkerheten för slutförvaret (8) presenterat nedanstående figur på sid 424 (8), vilken summerar beräknade korrosionsdjup från olika korrosionsmekanismer efter 1 000 000 år. Den gula vertikala linjen anger tjockleken (5cm) på kopparkapslarna. Slutsatsen är sålunda att det totala korrosionsdjupet under pessimistiska antaganden är i storleksordningen några millimeter. Detta korrosionsdjup skall då jämföras med väggtjockleken hos kopparkapslarna på 50 mm.

Beräkningarna är primärt baserade på massbalansberäkningar innefattande ingående halter av syre och sulfider och under antagande att dessa element deltar direkt i korrosionsprocesserna. Emellertid är denna metodik för bestämning av korrosionshastigheterna i högsta grad osäker då SKB saknar information om den kemiska sammansättningen hos de reagerande gas- och vattenfaserna och därigenom även om halterna av de föreningar som reagerar, se sektion 3 ovan och Sauna-effekten.

SKB tar i sin säkerhetsanalys (8) hänsyn till 10 olika korrosionsmekanismer, se nedan figur 10-88 och i flera fall anges korrosionsdjup byggande på optimistiska (blå kryss) och pessimistiska (rött kryss) antaganden. Enligt SKB erhålles sammantaget för att de 10 korrosionsmekanismerna ett korrosionsangrepp på några mm under pessimistiska förhållanden efter 1 000 000 års exponering. Vilket skall jämföras med godstjockleken på 50 mm hos kopparkapslarna.



Szakalos och Seetharaman (2) anger att “it is not possible to estimate the copper corrosion rates by oxygen and sulfur mass balance calculation since other species takes part in the copper corrosion process as well. Water molecules as moisture or in aqueous corrosion as hydroxide ions are probably the most frequent species that will react and form copper corrosion products in such a complex environment as expected in a repository with different trace gases and salts”.

Dessa författare (2) har utarbetat en egen säkerhetsanalys och beräkningar av kopparkorrosion i slutförvaret baserat på tillgängliga data för korrosionshastigheten. Szakalos och Seetharaman (2) har vidare helt korrekt inkluderat i sin säkerhetsanalys följande korrosions- och försprödningsmekanismer som SKB försummat att ta med:

Korrosionsmekanismer

- Korrosion av kopparkapslarna på insidan på grund av radiolys (2)
- Atmosfärisk (gasfas) korrosion med spår- till ppm-halter av vissa gaser som H₂S, HNO₃ och metan, vilka accelererar gasfaskorrosion av koppar under den första gasfasperioden under några tusentals år (2)
- Korrosion förorsakad av saltanrikning på de yttre kopparytorna under gasfasperioden (Sauna-effekten)
- Anoxisk atmosfärisk korrosion kombinerad med radiolys (17)

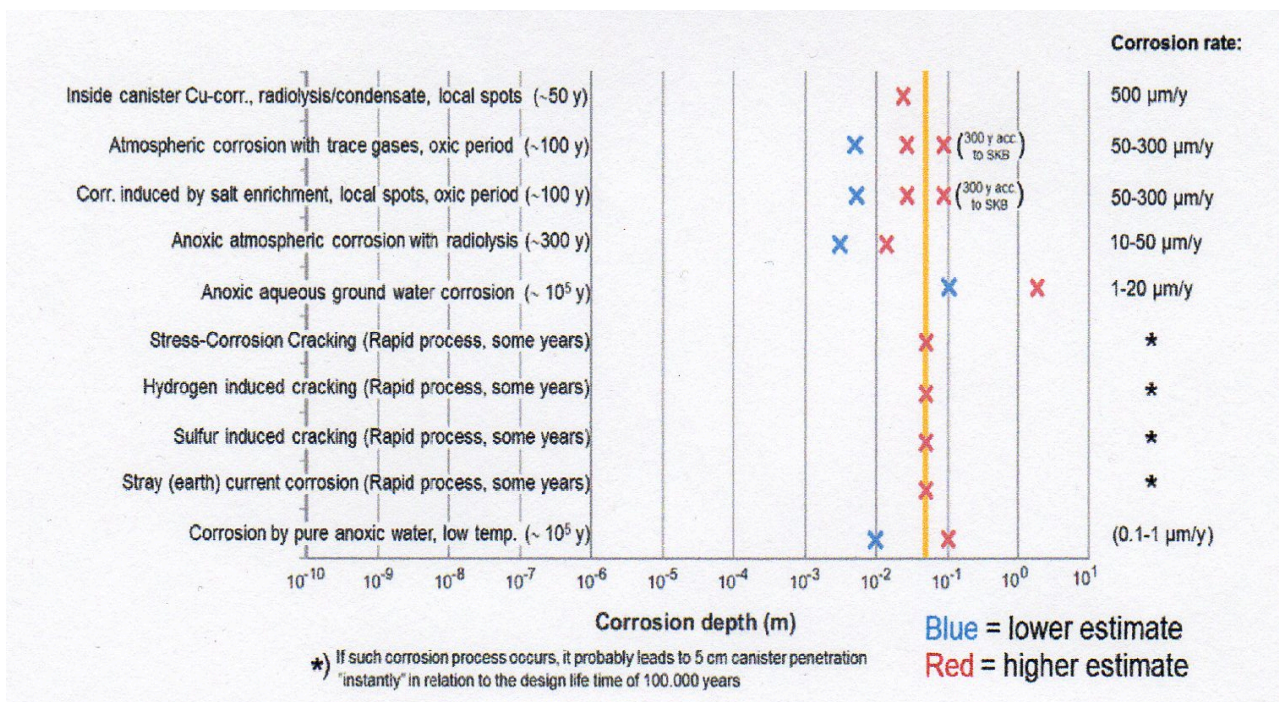
- Korrosion förorsakad av vatten i deponeringshålen där vattnet innehåller höga halter av löst salter dvs. ett direkt resultat av Sauna-effekten
- Korrosion förorsakad av läckströmmar (25, 26)

Försprödningsmekanismer

- Spänningskorrosion (4)
- Väteförsprödning (26)
- Svavel inducerad sprickbildning (5)

De flesta av dessa korrosions- och försprödningsmekanismer har diskuterats ovan i denna rapport. Kopparkorrosion kan också induceras från de mycket höga läckströmmar som föreligger i slutförvaret. Dessa läckströmmar bildas från högspänningsledningarna i Forsmark och kommer från det närliggande kärnkraftverket. Nissen et al (25) har rapporterat korrosionsattacker i form av punktfrätning och spaltkorrosion på mätutrustning i form av syrafast rostfritt stål (316L) efter endast 10 dagars exponering i det tänkta slutförvaret. Taxén (26) har senare gjort en teoretisk analys och baserat på denna fastslagit att läckströmskorrosion inte kan uppstå i det föreslagna slutförvaret i Forsmark.

Nedanstående sammanställning är från Szakalos och Seetharamans (2) uppskattningar av korrosionshastigheter för 10 olika korrosions- och försprödningsmekanismer. Denna figur skall jämföras med ovanstående utarbetad av SKB. Det är uppenbart att skillnaderna är mycket stora mellan de två säkerhetsanalyserna.



Ett flertal av de korrosions- och försprödningsmekanismer, som Szakalos och Seetharaman (2) behandlar i deras säkerhetsanalys, har inte beaktats av SKB och omvänt. Vidare har inte SKB tagit hänsyn till någon form av försprödningsmekanism i deras säkerhetsanalys. Szakalos och Seetharaman (2) anger att de flesta av de mekanismer de analyserat skulle kunna ge kapselhaveri inom 50-100 år. Figuren visar att det föreligger mycket stora skillnaderna i livslängder mellan SKB:s (8) och Seetharaman och Szakalos (2) beräkningar och uppskattningar. Dessa sammanställningar visar att det erfordras mycket mer direkta experimentella resultat och med kopparkorrosionsdata som anger korrosions-hastigheterna under de aktuella förhållandena.

7. SLUTSATSER

Det är vår bestämda uppfattning att det för närvarande är omöjligt att genomföra en seriös teoretisk analys av riskerna för förtida haverier av kopparkapslarna placerade i det föreslagna slutförvaret i Forsmark och därigenom också av säkerheten för slutförvaret. Vår bas för detta påstående är enligt följande:

- Inte ett enda korrosionsförsök (i laboratorie-, pilot- eller fullskaleanläggning) har utförts vid Forsmark eller på någon annan plats där förhållandena är ekvivalenta med förhållandena 500 meter ned i berggrunden i Forsmark.
- Kopparkapslarna kommer att ha en yttemperatur av 90-100°C under de inledande första tusentals åren efter deponeringen. Det kommer att leda till den så kallade Sauna-effekten med förångning av grundvatten, mass-transport av rent vatten från deponeringshålen till deponeringstunnlarna. Detta kommer att resultera i utskiljning av salter i bentoniten och på kopparkapslarnas ytor samt kraftigt förhöjda salthalter i det vatten som finns deponeringshålen, vilket medför kraftigt försvårad korrosionsmiljö. Dessa förhållanden har inte beaktats av SKB i företagets säkerhetsanalys.
- Sammansättningen är okänd hos gasfasen i deponeringshålen innan dessa är vattenfyllda. Det är troligt att denna gasatmosfär efter ett antal år innehåller gaser som vätesulfid (från berggrunden) och salpetersyra (som radioalys produkt). PPM-halter av dessa gaser ökar mycket kraftigt kopparns korrosionshastighet.
- SKB har helt försummat flera olika viktiga kopparkorrosionsmekanismer i företagets säkerhetsanalys samt kraftigt undervärderat betydelsen av andra.

Sammanfattningsvis finns det ett flertal frågeställningar och faktorer, specifikt relaterade till förhållandena i Forsmark, som måste klargöras innan en utvärdering av säkerheten kan genomföras beträffande teoretisk funktionell livslängd hos kopparkapslarna.

REFERENSER

1. Scully J.R. & Hicks T.W.; Technical Note. Initial Review Phase for SKB's Safety Assessment SR-Site. Corrosion of Copper. Swedish Radiation Safety Authority. SSM 2012:21.
2. Szakalos P. & Seetharaman S.; Technical Note. Corrosion of Copper Canister. Swedish Radiation Safety Authority. SSM 2012:17.
3. Grinder O.; Comments on SKB's application for final disposal of nuclear waste and the associated safety assessment SR-Site. Swedish Society for Nature Conservation Office for Nuclear Waste Review, MKG. May 2012.
4. Taniguchi H. & Kawasaki M.; Influence of sulfide concentration on the corrosion behavior of pure copper in synthetic seawater. J. of Nuclear Materials. Vol. 379 (2008) pp. 154-161.
5. Arilahti E., Lehtikuusi T., Olin M., Saario T. & Varis P.; Evidence for internal diffusion of sulphide from groundwater into grain boundaries ahead of a crack tip in a CuOFP copper. 4th international workshop on long-term prediction of corrosion damage in nuclear waste systems. Brugges, Belgium, June 28 – July 2, 2010.
6. SKB. Long-term safety for KBS-3 repositories at Forsmark and Laxemar – a first evaluation. Main report of the SR-Can project. October 2006. TR-06-09.
7. Birgersson M. & Goudazi R.; Studies of vapour transport from buffer to tunnel backfill (Sauna effects). December 2013 R-13-42.
8. SKB. Long-term safety for the final repository for spent nuclear fuel at Forsmark. Main report on the SR-Site project. Vol. 1-3. March 2011. SKB TR-11-01.
9. Leygraf C. Graedel T.; Atmospheric Corrosion. Willey. Sept. 2000.
10. Shreir, L.L.; Jarman, R.A.; Burstein, G.T. (1994) Corrosion (3rd Edition) Volumes 1-2, Netherlands, Elsevier.
11. Demirkan K., Derkits Jr. G.E., Fleming D.A., Franey J.P., Hannigan K., Opila R.L., Punch J., Reents Jr. W.D., Reid M., Wright B. & Xu C.; Corrosion of Cu under Highly Corrosive Environments. J. of the Electrochemical Society. Vol. 157:1 (2010) pp. C30-C35.
12. Samie F.; Ph.D. thesis. HNO₃-Induced Atmospheric Corrosion of Copper, Zinc and Carbon Steel. Royal Institute of Technology, Stockholm.
13. Reed D. & Konynenburg R.; Progress in evaluating the corrosion of candidate HLW container metals in irradiated air-steam mixture. CONF-910945-1. Focus'91: nuclear waste packaging, Las Vegas, NV, 29 Sept. – 4 Oct. 1991.

14. Boman M., Ottosson M., Berger R., Andersson Y., Hahlin M., Björefors F. & Gustafsson T.; Corrosion of copper in ultrapure water. April 2014. R-14-07.
15. King F. & Litke C.D.; The corrosion of copper in synthetic groundwater at 150°C, Part I. Atomic Energy of Canada, TR-428, 1987.
16. Hsu C.-N., Liang T.-J.; Corrosion reactions of copper and Ti-Grade 2 in MCC simulated brine. J. of Radioanalytical and Nuclear Chemistry Vol. 182:2 (1994) p. 281.
17. Björnbacka Å.; Radiation induced corrosion of copper. Ph.D. thesis. Royal Institute of Technology. (2015)
18. Baldwin T.D. & Hicks T.W.; Quality Assurance Review of SKB's Copper Corrosion Experiments. Swedish Radiation Safety Authority. SSM 2010:17.
19. SKB. Corrosion calculations report for the safety assessment SR-Site. December 2010. TR-10-66
20. Karnland O., Olsson S., Dueck A., Birgersson M., Nilsson U., Hernan-Håkansson T., Pedersen K., Nilsson S., Eriksen T.E. & Rosborg B.; Long term test of buffer material at the Äspö Hard Rock Laboratory LOT project. Final report on the A2 test parcel. November 2009. SKB TR-09-29.
21. SKB. Fuel and canister process report for the safety assessment SR-Site. December 2010. TR-10-46.
22. JNC TN1410 2000-003. Japan Nuclear Development Institute, H12; Project to Establish the Scientific and Technical Basis for HLW Disposal in Japan. Supporting Report 2, Repository Design and Engineering Technology. April 2000.
23. King F., Ahonen L., Taxén C., Vuorinen U. & Werme L.; Copper corrosion under expected conditions in a deep geologic repository. SKB TR-01-23, page 135. (2001).
24. Nissen J., Gustafsson J., Sandström R., Wallin L. & Taxén C.; Forsmark site: investigation: Some corrosion observations and electrical measurements at drill sites DS4, DS7 and DS8. SKB P-05-265. (2005).
25. Taxén C.; Possible effects of external electrical fields on the corrosion of copper in bentonite. P-11-43. (2011).
26. Nakahara S. & Okinaka Y.; The Hydrogen Effect in Copper. Materials Science and Engineering A. Vol. 101 (1988) pp. 227-230.
27. Lousada C.M., Soroka I.L., Yagodzinsky Y., Tarakina N.V., Todoshchenko O., Hänninen H., Korzhavyi P.A. & Jonsson M.; Gamma radiation induces hydrogen absorption by copper in water. Sci. Rep. 6, 24234 (2016) pp. 1-9.

Bilaga 1

CV: Olle Grönder

Född: 1945 i Spånga, Stockholm

Utbildning:

- Bergsingenjör, teknisk doktor, docent Sektionen för Bergsvetenskap, Kungliga Tekniska Högskolan, Stockholm

Bakgrund:

- 1970-1977 Forskare vid Axel Johnson Institutet för Industriforskning
- 1977-1986 Avdelningschef Institutet för Metallforskning, (Swerea Kimab AB)
- Docent och föreläsare vid KTH
- Egen företagare och VD för P-M Technology AB

Yrkesinriktning:

Tillämpad forskning, teknisk utveckling och applikationer av metalliska material. Uppdragsgivare och samarbetspartners i Nordamerika, Europa och Japan.