



DokumentID 1369704	Version 2.0	Status Godkänt	Reg nr	Sida 1 (20)
Författare Fredrik Johansson			Datum 2013-11-25	
Kvalitetssäkrad av			Kvalitetssäkrad datum	
Godkänd av Ulrika Broman			Godkänd datum 2013-12-19	
Kommentar Sakgranskat enligt SKBdoc 1419852.				

Kriticitetsanalys och utbränningskreditering - Metodikrapport

Sammanfattning

Det här dokumentet beskriver de principer och den metodik som SKB ska använda sig av gällande kriticitetsanalys, BA-kreditering och utbränningskreditering. Metodiken är avpassad för såväl SKB:s nu existerande anläggningar (Clab) som de planerade (Clink) och Kärnbränsleförvaret.

Innehåll

1	Inledning	3
1.1	Kriticitetskontroll i SKBs anläggningar	3
1.2	Styrande dokument	4
2	Dokumentstruktur.....	4
3	Begränsningar och avgränsningar	5
4	Grundläggande krav	6
5	Händelseklassning och acceptanskriterier	6
5.1	Acceptanskriterier för händelseklass H1-H4.	6
5.2	Händelser med lägre sannolikhet.....	7
6	Metodik för kriticitetsanalys - Generellt	7
6.1	Krav på modellering.....	7
6.2	Kriterium för att säkerställa underkriticitet	8
6.3	Krav på validering	8
6.4	Hantering av osäkerheter	9
7	Metodik för kriticitetsanalys – Utbränningskreditering.....	10
7.1	Aktinider och fissionsprodukter	10
7.2	Krav på validering vid utbränningskreditering.....	10
7.3	Isotopvalidering.....	11
7.3.1	Validering av nuklidkompositionen.....	11
7.3.2	Validering av kriticitetsberäkning.....	12
7.3.3	Trendanalyser	12
7.4	Hantering av osäkerhet i utbränning och drifhistorik	12
7.4.1	Utbränning.....	12
7.4.2	End effect.....	12
7.4.3	Radiell utbränningsfördelning	13
7.4.4	Axiell temperaturfördelning.....	13
7.4.5	Styrstavar och brännbara absorbatörer.....	13
7.4.6	Osäkerhet pga geometriförändringar pga bestrålning.....	13
7.4.7	Osäkerhet i effekthistorik, bränsletemperatur och avklingningstid.....	13
7.5	Mätning av utbränning	13
8	Metodik för kriticitetsanalys – BA-kreditering	14
8.1	Principer för analysen.....	14
8.2	Hantering av osäkerheter vid BA-kreditering.....	14
8.2.1	Tillgodoräknade isotoper	15
9	Beräkningsförutsättningar	15
9.1	Program.....	16
9.2	Referensbränsle	16
9.3	Beräkningsförutsättningar för validering.....	16
9.4	Beräkningsförutsättningar för kriticitetsanalysen.....	16
9.5	Beräkningsförutsättningar för BA-kreditering.....	17
9.6	Beräkningsparametrar.....	17
9.6.1	Keno.....	17
9.6.2	Tsunami	17
10	MTO	17
11	Definitioner och begrepp	18
12	Referenser	19

1 Inledning

I sina ansökningar för Clink och Kärnbränsleförvaret har SKB tidigare lämnat in kriticitetsanalyser som använder sig av utbränningskreditering. För Clab finns sedan tidigare godkända kriticitetsanalyser som använder sig av BA-kreditering. Denna rapport sammanfattar de principer och den metodik som SKB avser att använda när det gäller kriticitetsanalys, validering av beräkningsmetoder, samt BA- och utbränningskreditering för SKB:s alla anläggningar.

Viss del av informationen i denna rapport kan hittas i olika ansökansdokument, t ex Spent Fuel Report (SKB 2010), och kapselkriticitetsrapporten (SKBdoc 1193244). Detta dokument ger dock en sammanfattning och uppdatering av dessa principer samt en mer detaljerad beskrivning av metodik och arbetssätt.

SKB avser att tillämpa utbränningskreditering för PWR och BA-kreditering för BWR i samtliga SKBs anläggningar, både existerande (Clab) och kommande (Kärnbränsleförvaret och Clink). I nuvarande kapselkriticitetsrapporten (SKBdoc 1193244) används utbränningskreditering för både BWR och PWR.

Den nya metodiken är anpassad för att möta internationella och på senare år uppdaterade rekommendationer och standarder framtagna främst i USA. Metodiken är omarbetad gentemot vad som fanns i ansökan rörande Kärnbränsleförvaret och Clink vilket medför att kriticitetsanalyserna behöver uppdateras. Även Clabs kriticitetsanalyser kommer på sikt att uppdateras för att stämma överens med metodiken i denna rapport.

Vissa begrepp och definitioner är specifika för kriticitetsanalys. För att stödja läsaren finns därför en begreppslista i kapitel 10.

1.1 Kriticitetskontroll i SKB:s anläggningar

Kriticiteten vid SKB:s anläggningar kontrolleras genom någon av följande åtgärder eller kombination av dessa.

- Begränsning av maximal tillåten anrikning.
- Krav på minimal nödvändig BA-insats (BA-kreditering).
- Krav på minimal nödvändig knippesutbränning (utbränningskreditering).
- Pluggad position i kassett.

I tabellen nedan visas vad SKB idag tillämpar för respektive anläggning samt vad som avses att tillämpas i framtiden.

	Clab idag	Clab framtid	Clink - nuvarande ansökan	Clink - komplettering	Kärnbränsleförvaret - nuvarande ansökan	Kärnbränsleförvaret - komplettering
BWR	BA-kreditering över 3,6% U-235 anrikning. Plugg krävs för vissa bränsletyper.	BA-kreditering över, en i analys bestämd, U-235 anrikning.	BA-kreditering och utbränningskreditering.	BA-kreditering.	Utbränningskreditering.	BA-kreditering.
PWR	Färskt bränsle med plugg upp till 4,6% U-235 anrikning.	Utbränningskreditering för bränsle med hög U-235 anrikning.	Utbränningskreditering.	Utbränningskreditering.	Utbränningskreditering.	Utbränningskreditering.

1.2 Styrande dokument

I SSMFS2008:1 finns huvudsakligen följande paragrafer som behandlar kriticitet:

6 kap. 2 §

”Vid hantering, bearbetning och lagring av kärnämne vid anläggningen ska åtgärder vidtas för att förhindra kriticitet. Sådana åtgärder ska framgå av säkerhetsredovisningen enligt 4 kap. 2 §.”

De allmänna råden till 6 kap. 2 §

”För att minska risken för kriticitet i kärnämnesförråd och i system för kärnämneshantering bör fysikaliska principer tillämpas. Ett lämpligt sätt att minska risken för kriticitet är att använda geometriskt säkra konfigurationer.”

Bilaga 1

Följande händelser eller förhållanden ska hänföras till kategori 1:

”Oplanerad reaktivitetsökning i reaktor, eller oavsiktlig kriticitet i reaktor eller kriticitet i utrymme där kärnämne hanteras, lagras eller förvaras”.

Det kan konstateras att SSM inte har utfärdat specifika riktlinjer för kriticitetsanalys av den typ som utfärdas av NRC i USA. De svenska kraven har etablerats genom de kriticitetssäkerhetsanalyser som SSM har accepterat.

För SKBs del styrs kravbilderna när det gäller kriticitetssäkerhet av Clab SAR.

- Kap 3.7.1 redovisar de krav på marginal mot kriticitet som gäller för Clab. Grundkravet är att den beräknade effektiva neutronmultiplikationsfaktorn (k_{eff}) inklusive osäkerheter ska vara mindre än 0,95 för samtliga händelseklasser. Vid händelser eller händelsesekvenser med låg sannolikhet, det vill säga ej förväntade/osannolika händelser (missöden) – händelser i händelseklass H3/H4 – kan det beräknade värdet för k_{eff} överskrida 0,95 men ska under alla förhållanden vara mindre än 0,98, osäkerheter beaktade.
- Kap 8.3.7 Redovisar utförda säkerhetsanalyser med avseende på kriticitet.

Texten i 3.7.1 baserar sig på SKI-beslutskrivelse för kompaktkassetter (SKI 1992).

Förutom detta styrande dokument har SKB valt att utgå från följande amerikanska standarder i utarbetande av denna metodik.

- ANSI/ANS-8.24-2007 - Validation of neutron transport methods for nuclear criticality safety calculations (ANS 2007)
- ANSI-ANS-8.27-2008 - Burnup credit for LWR fuel (ANS 2008)

Kontroll har också gjorts av att metodiken uppfyller kraven gällande kriticitet i IAEA Safety Standards (IAEA 2012). En avvikelse mot denna har observerats och kommenteras i kapitel 7.5.

2 Dokumentstruktur

Basen för SKB:s metodik för kriticitetsanalys, inklusive utbränningskreditering och BA-kreditering ska finnas beskriven i tre dokument.

1. Metodikrapport. Denna rapport.
2. Valideringsrapport färskt bränsle. Validering av de beräkningskoder som SKB använder sig av för kriticitetsanalys av färskt bränsle. Valideringen görs mot kriticitetsexperiment och beräkningsosäkerheter skattas.

3. Valideringsrapport utbränning. Validering av de koder SKB använder sig av för utbränt bränsle. Skattning av beräkningsosäkerheter inklusive osäkerheter i beräknad reaktivitetsminskningen på grund av utbränning.

Baserat på dessa dokument tas själva kriticitetsrapporterna fram.

- Kriticitetsanalys för Clab
- Kriticitetsanalys för Clink
- Kriticitetsanalys för Kärnbränsleförvaret

För PWR tillgodoräknas utbränning för högre anrikningsnivåer.

För BWR görs kriticitetsanalyserna för maximalt tillåten anrikning utan BA. För högre anrikningar görs separata analyser där BA krediteras. Den reaktivitetshämmande effekt som insats av BA ger redovisas för att visa att maximala tillåtna reaktivitetsnivån i referensanalyserna säkerställs. En analysrapport för BA-kreditering i Clab är framtagen som täcker upp till 5% U-235 anrikning. Denna kommer inom kort att skickas in till SSM.

- Clab – Kreditering av BA i BWR-bränsle för BWR kompakt- och normalkassett (SKBdoc 1391444).

Då (SKBdoc 1391444) endast täcker Clab kommer motsvarande analyser tas fram för Clink och Kärnbränsleförvaret.

- BA kreditering för Clink och Kärnbränsleförvaret.

3 Begränsningar och avgränsningar

Metodiken beskriven i denna rapport gäller för.

- Intakt och oskadat bränsle. Den kan appliceras för skadat bränsle då det kan bevisas att geometri och material inte påverkats på ett sådant sätt att det påverkar reaktiviteten på ett säkerhetsmässigt ofördelaktigt sätt.
- Intakt geometri i förvaringen. Det vill säga analysen för kapseln är i strikt mening endast giltig för den tidsperiod då kapseln och dess insats fortfarande kan antas intakt. Dock antas vattenfylld kapsel vilket endast kan ske då samtliga barriärer utanför bränslet har havererat.
- Anrikningar upp till 5% U-235.
- Utbränningar upp till 60 MWD/kgU (här avses medelutbränning knippe).
- Metodiken gäller för samtliga bränsletyper godkända av SKB för lagring i Clab. Dock kan viss individuell hantering förekomma av udda bränsle som ligger utanför valideringsrapporternas giltighetsområde. Kriticitetsanalysen måste då speciellt beskriva varför analysens slutsatser är giltiga även för dessa bränslen. Kriticitetsanalyser ska även vara giltiga för all tänkbara kombinationer av olika bränsletyper.
- Bränslet ska vara i formen av Uranoxid. (MOX-bränsle behandlas med samma metodik men då mängden bränsle är liten kan anpassad individuell hantering förekomma).
- Gadolinium som brännbar absorberator för BWR.

Metodiken beskriver inte hur SKB:s ledningssystem är uppbyggt och hur där i kontroller av nya bränsletyper och anläggningsändringar, vilka kan ha påverkan på kriticitetssäkerhet, beskrivs.

Dokumentet omfattar inte transportsystemet. Kriticitetssäkerhet för transportbehållarna regleras av transportbehållarlicensen (SKBdoc 1256495) som är utfärdad av TN International och licensierade av franska kärnsäkerhetsmyndigheten (Autorité de Sûreté Nucléaire, ASN).

4 Grundläggande krav

Kraven nedan är i enlighet med gällande praxis för modellering inom kriticitetsanalys såväl internationellt som i Sverige.

- Beräkningsmetoderna ska vara kvalificerade såväl med tanke på numeriska metoder som fysikaliska modeller.
- När en kriticitetssäkerhetsutvärdering genomförs, ska sammansättningen och den nukleära karakteristiken av bränslet vara sådan att maximal neutronmultiplikation för systemet erhålls.
- Om kriticitetssäkerheten är beroende av administrativa rutiner, ska dessa rutiner vara identifierade och införda i driftinstruktionerna och/eller de säkerhetstekniska driftförutsättningarna.
- Brännbar absorptor (BA) kan krediteras i beräkningen genom att bestämma en maximal bränslepatronreaktivitet som funktion av utbränning och sammanhörande osäkerheter.
- Utbränningskreditering kan krediteras förutsatt en noggrann analys av utbränningsförhållandena så att det kan säkerställas att den maximalt möjliga reaktiviteten täcks in av den krediterade utbränningsnivån.

5 Händelseklassning och acceptanskriterier

Analysen av kriticitetssäkerhet ska utgå ifrån de händelseklassningar och missödesanalyser som har gjorts i respektive anläggning. Det är av yttersta vikt att dessa analyser görs med beaktande av händelser som kan påverka förhållandena för kriticitet.

Händelseklassningen för Kärnbränsleförvaret beskrivs i (SKBdoc 1091141).

Händelseklassningen för Clab beskrivs i kapitel 8 av Clab SAR (SKBdoc 1069171).

Missödesfallen som beaktats i Clinks kriticitetsanalys beskrivs i (SKBdoc 1053999).

Det bör noteras att händelseklassningen och missödesanalysen både för Clink och Kärnbränsleförvaret är under omarbetning. Nya kriticitetsanalyser kommer basera sig på den senaste framtagna missödesanalysen och händelseklassningen.

5.1 Acceptanskriterier för händelseklass H1-H4.

SKI-beslut (SKI 1992) anger följande:

"Det centrala säkerhetskravet ur kriticitetssynpunkt är att betryggande underkriticitet upprätthålls i Clab. Kvantitativt uttrycks detta genom att den effektiva neutronmultiplikationsfaktorn (k_{eff}) får högst bli 0,95 inklusive osäkerheter. Vid missöden får inte kriticitet inträffa även om två sällsynta oberoende störningar sker. Detta kvantifieras genom att den effektiva neutronmultiplikationsfaktorn får då högst bli 0,98 inklusive osäkerheter."

Händelseklassningen bestäms baserat på uppskattad händelsefrekvens. Sannolikheten för händelserna i respektive händelseklass i enlighet med de gränser som tillämpas i de svenska kärnkraftanläggningarna, vilka i sin tur baserats på gränserna för de inledande händelserna i ANSI/ANS 51.1 och ANSI/ANS 52.1.

Händelseklass H1-H2	frekvens $>10^{-2}$ per år.
Händelseklass H3-H4	frekvens $>10^{-6}$ per år.

Acceptanskriterierna för kriticitetsanalyserna är

Händelseklass H1-H2	$k_{\text{eff}} < 0,95$
Händelseklass H3-H4	$k_{\text{eff}} < 0,98$ (inkluderar Double contingency)

”Double contingency” innebär att två osannolika och oberoende incidenter eller onormala händelser postuleras att samtidigt inträffa.

Speciellt har SKB antagit att för all torr förvaring gäller att förvaringsobjektet som fylls med vatten betraktas som Händelseklass 2. I IAEA:s standard för förvaring av använt kärnbränsle (IAEA 2012) uttrycks det att torrfforråd ska räknas som vattenfyllda (flooded) om detta inte kan uteslutas genom förvarets placering eller design. Det kan dock noteras att inga missöden i händelseklassningen för Kärnbränsleförvaret innebär att kapseln skadas på ett sådant sätt att geometrin förändras och att kapseln vattenfylls.

5.2 Händelser med lägre sannolikhet

Enligt SSMFS 2008:17 finns utöver händelseklass H1-H4 även händelseklass H5. Syftet med att beakta frekvenser lägre än H1-H4 är att undvika händelser med potentiellt stora omgivningskonsekvenser.

Då SKB:s anläggningar Clab, Clink och Kärnbränsleförvaret har byggts och planeras att byggas utan kriticitetsövervakning och larm är det nödvändigt att i kriticitetsutvärderingen visa att kriticitetsolyckor har en sannolikhet motsvarande restrisk enligt de principer som tillämpas inom reaktorsäkerhetsområdet så som exempelvis restriskdefinitionen i 2 § SSMFS 2008:17. Detta innebär att alla inträffad händelser som identifierats i anläggningarnas händelseklassning som kan leda till kriticitet ska ha en sannolikhet motsvarande restrisk.

I rapporten ”Clab - Omgivningspåverkan vid en kriticitetsolycka” (SKBdoc 1065916), analyseras händelsen att bottenplåten i kompaktkassetten lossnar och bränslet åker ut ur kassetten och friläggs. Händelsen bedöms ha en sannolikhet mindre än 10^{-7} . Slutsatsen av rapporten är att omgivningskonsekvenserna av en kriticitetsolycka i Clab blir relativt små. För Kärnbränsleförvaret dras motsvarande slutsats i (SKBdoc 1417199). En kriticitetsolycka i SKB:s anläggningar bedöms därför inte kunna ge upphov till sådana omgivningskonsekvenser att det är motiverat att i kriticitetsanalysen beakta händelseklasser med lägre sannolikhet än de som motsvarar händelseklass H4.

6 Metodik för kriticitetsanalys - Generellt

6.1 Krav på modellering

Kraven i detta avsnitt är i enlighet med gällande praxis för modellering inom kriticitetsanalys såväl internationellt som i Sverige.

- Modellen av normaltillståndet för bränsle och förvaringskassetter bör i allt väsentligt vara verklighetsnära, men där samtliga data, såsom geometrier, materialmängder, anrikning, neutrongift, avstånd, bränsletyper med mera, samt utbränning om den krediteras, ska modelleras konservativt. Alternativt kan medelvärden användas om toleranser och avvikelser behandlas konservativt i osäkerhetsanalysen.
- Drifhistoriken ska modelleras konservativt.
- Den grundläggande modelleringen ska dokumenteras.

6.2 Kriterium för att säkerställa underkriticitet

Systemets multiplikationsfaktor ska beräknas med hänsyn taget till följande, (ANS 2008):

$$k_p + \Delta k_p + \Delta k_i + \Delta k_b \leq k_c - \Delta k_c - \Delta k_x - \Delta k_m,$$

där:

k_p är den beräknade multiplikationsfaktorn för det utvärderade systemet; k_p ska innehålla en bias korrektion i de fall det finns en negativ bias relaterat till modellering som inte inkluderas i andra termer.

Δk_p är ett påslag för:

- statistiska och konvergens osäkerheter i bestämmandet av k_p
- material och tillverkningstoleranser
- osäkerheter i den geometriska/materiella representationen i modellen som använts för att bestämma k_p

Δk_i är ett påslag för:

- bias och osäkerhet i k_p beroende på utbränningsosäkerhet i den beräknade nuklidkompositionen

För färskt bränsle är denna term lika med noll.

Δk_b är påslag för:

- osäkerhet i k_p beroende på ansatt utbränningsvärde

SKB kommer att hantera denna osäkerhet genom ett extra påslag på av kraftverken uppskattad utbränning, se kapitel 7.5. För färskt bränsle är denna term lika med noll.

k_c är den beräknade multiplikationsfaktorn för de kritiska experimenten ingående i benchmarkserien av den i analysen använda beräkningsmetoden och neutron databiblioteket och differensen ($1 - k_c$) representerar bias i beräkningen. Om k_c överstiger 1,0 ska k_c sättas till 1,0.

Δk_c är avdrag för:

- statistiska och konvergens osäkerheter i bestämmandet av k_c
- osäkerheter i de kritiska experimenten ingående i benchmarkserien
- osäkerheter i extrapolationen utanför experimentell data
- osäkerheter pga begränsningar i den geometriska eller materiella representationen i modellen som använts för att bestämma k_c

Δk_x är ett avdrag på k_c för att hantera bias och osäkerheter i tvärsnittsdata som inte adekvat täcks in av de kritiska experimenten ingående i benchmark.

Δk_m är marginalen för okända osäkerheter nödvändig för att säkerställa underkriticitet. Traditionellt har denna marginal satts till 5%.

6.3 Krav på validering

Syftet med valideringen är att bestämma bias ($1 - k_c$) och osäkerheten i bias (Δk_c) i beräkning av neutronmultiplikationskonstanten relativt kritiska benchmarkexperiment.

SKB ska följa kraven i den amerikanska standarden ANSI/ANS-8.24-2007 (ANS 2007). Då avsteg görs ska detta dokumenteras och förklaras i valideringsrapporten.

Detta innebär bland annat att följande punkter ska vara tillgodosedda.

- Alla beräkningar ska utföras på ett och samma datasystem med samma versioner av programvara. Vid byte av datasystem ska valideringens giltighet konfirmeras. Versionsnummer av alla ingående beräkningsprogram ska dokumenteras i valideringsrapporterna.
- Utvalda experiment ska täcka parametervidden hos de system som valideringen ska gälla för. I de fall då detta inte är möjligt ska konsekvenserna av detta analyseras.
- För att undvika systematiska beroenden ska utvalda experiment komma från flera olika experimentserier.
- Modeller och indata ska genomgå kvalitetskontroll på SKB oavsett om indata tidigare kontrollerats av andra.
- Förkastande av extrempunkter ska göras baserat på avvikelse ifrån kända fysikaliska beteenden eller med hjälp av statistiska urvalsmetoder.

SKB ska för valideringen använda sig av den uppsättning väl beskrivna experiment utgivna av OECD/NEA, "the International Handbook of Evaluated Criticality Safety Benchmark Experiments", ICSBEP-handbook (OECD/NEA 2013).

Urval av experiment ska göras enligt följande riktlinjer.

1. Experiment ska först väljas ut vilka, med avseende på tvärsnittens känslighet, liknar SKB:s applikationer. Till detta ska programmet Tsunami användas.
2. Urvalet gjort med hjälp av Tsunami ska kompletteras med experiment så att alla i applikationen ingående material som har betydelse för reaktiviteten finns representerade. Om material saknas i experimentunderlaget ska detta beaktas i uträkandet av osäkerhetspåslag.
3. Urvalet gjort med hjälp av Tsunami ska kompletteras så att hela spännvidden av viktiga fysikaliska parametrar beaktas i experimentunderlaget. Följande parametrar ska ingå: Stavdelning, anrikning och EALF.
4. Hänsyn ska tas till att experiment kan vara korrelerade. Därför ska experiment väljas ur flera av varandra oberoende experimentserier.

6.4 Hantering av osäkerheter

Behandlingen av osäkerheter beskrivs i denna rapport på flera olika ställen. De behandlas på olika sätt för olika typer av analyser. Detta kapitel avser att ge en kortfattad beskrivning av de olika typerna av osäkerhet och dess principiella hantering. Gemensamt för alla osäkerheter är att de ska behandlas på ett sådant sätt att resultatet medför en betryggande säkerhetsmarginal i varje del av analysen.

- SKB kommer att använda en Monte-Carlo baserad metod för kriticitetsberäkningar. På grund av sin statistiska natur har alla Monte-Carlo baserade beräkningar en medföljande osäkerhet i sina resultat. SKB ska för all produktionsberäkningar specificera denna i indata och standardavvikelsen ska inte vara större än 0,0001 (10pcm) vid beräkandet av k_{eff} .
- I alla beräkningsresultat i en kriticitetsanalys finns osäkerhet som kan bero på bristfällig beskrivning av neutrontvärsnittet eller andra approximationer som gjorts i själva beräkningsverktygen. Därför ska en osäkerhetsterm alltid läggas till beräkningsresultaten. Denna ska baseras på jämförelse med kritiska experiment eller annan benchmark som så gott som möjligt efterliknar de system som ska utvärderas.
- I alla beräkningar finns en osäkerhet i indata. I de flesta fall behandlas den i SKB:s metodik genom att anta ett begränsande konservativt fall och anta detta för all indata. Ett exempel på detta är att vid alla beräkningar används minimum tolerans av borhalt i borkassetterna. I de fall där det experimentella underlaget är tillräckligt stort kan istället en statistisk behandling göras. Beräkningarna görs då med nominella data och efteråt läggs det på en marginal som

baseras på mätningar av parametern i fråga. Exempel på sådana parametrar är osäkerhet i deklarerad utbränning och osäkerhet i bränslekutsgeometri.

- Statistisk osäkerhet ska beräknas med 95 % sannolikhet vid 95 % konfidensnivå.
- Addition av osäkerheter ska göras med vanlig addition om det inte kan visas att statistisk summering av osäkerheterna är rättfärdigad.

7 Metodik för kriticitetsanalys – Utbränningskreditering

7.1 Aktinider och fissionsprodukter

Vid drift i reaktorn kommer reaktiviteten i bränslet att minska dels på grund av att mängden fissilt material minskar och dels på grund av att det bildas ämnen som absorberar neutroner.

I samband med utbränningskreditering används traditionellt två begrepp:

- kreditering av aktinider
- kreditering av aktinider och fissionsprodukter

Vid kreditering av aktinider utnyttjas den reaktivitetssänkning som kommer av nettominskningen av fissilt material och neutronabsorbktion i de aktinider som bildas under bestrålningen. De ämnen som krediteras är uran, plutonium, americium och neptunium.

Vid kreditering av aktinider och fissionsprodukter utnyttjas dessutom den reaktivitetssänkning som neutronabsorbktion i ett antal fissionsprodukter ger upphov till. Viktiga fissionsprodukter är exempelvis neodym, samarium, europium och gadolinium.

Förutom fissila aktinider kan nuklider som absorberar neutroner utnyttjas utbränningskreditering. Ett antal kriterier bör vägas in i detta urval:

- nukliden ska bidra till att sänka reaktiviteten
- nukleära data för nukliden ska vara kända
- nukliden ska vara icke-flyktig, icke-gasformig och stabil
- beräkning av halten av nukliden ska vara verifierad

I NRC (2012) ”Interim Staff Guidance – 8, revision-3” som är ett vägledande dokument utgivet av NRC för dess inspektörer inom avdelningen ”Spent Fuel Storage and Transportation” görs följande uppdelning som SKB kommer att använda sig av.

Huvudsakliga aktinider
U-234, U-235, U-238, Pu-238, Pu-239, Pu-240, Pu-241, Pu-242, Am-241
Övriga aktinider och fissionsprodukter
U-236, Np-237, Am-243 Mo-95, Tc-99, Ru-101, Rh-103, Ag-109, Cs-133, Sm-147, Sm-149, Sm-150, Sm-151, Sm-152, Nd-143, Nd-145, Eu-151, Eu-153, Gd-155

7.2 Krav på validering vid utbränningskreditering

De generella kraven för validering uttryckta i avsnitt 6.3 gäller även för validering av utbränning. För validering av utbränning tillkommer dock ett antal steg, dessa beskrivs nedan.

SKB ska följa kraven i den amerikanska standarden ANSI/ANS-8.27 (ANS 2007). Då avsteg görs ska detta dokumenteras och förklaras i valideringsrapporten.

Valideringen av utbränningskreditering kan använda sig av två olika metoder.

I den första metoden delar man upp valideringen i två komponenter. En där osäkerheten i att bestämma nuklidinnehållet bestäms (validering av utbränningsberäkning) och en för osäkerheten i att bestämma k_{eff} förutsatt att nuklidinnehållet är känt (validering av kriticitetsberäkning).

Osäkerheten i att bestämma nuklidinnehållet görs genom jämförelse med mätdata från förstörande prövning, så kallad Radio Chemical Assay (RCA). Urankutsar från utbränt bränsle löses upp, nuklidinnehållet mäts och jämförs med det beräknade nuklidinnehållet. Osäkerheten i bestämning av nuklidinnehållet och dess påverkan på reaktiviteten uppskattas. Endast en delmängd av nuklider som finns i utbränt bränsle mäts. Detta innebär att man endast kan tillgodoräkna sig den effekt på reaktiviteten som finns för de isotoper som uppmäts. I verkligheten finns det en mängd av andra isotoper i bränslet som tillsammans har en reaktivitetshämmande effekt. Denna effekt krediteras inte.

Osäkerheten i att bestämma k_{eff} förutsatt att nuklidinnehållet är känt görs på samma sätt som för validering av färskt bränsle. Dock innehåller utbränt bränsle plutonium och fissionsprodukter. Det är därför nödvändigt att de kritiska experimenten som används i jämförelsen innehåller åtminstone plutonium.

Metoden brukar gå under namnet isotopvalidering och beskrivs utförligt i NUREG 7108 (Radulescu et al. 2012) och NUREG7109 (Scaglione et al. 2012).

I den andra metoden bestäms den totala osäkerheten i beräkningsmodeller för utbränningskreditering utan att delas upp i separata komponenter. Valideringen av modellerna görs genom analys av applicerbara kritiska system innehållande utbränt bränsle med känd utbränningshistoria. I valideringen kan driftdata ifrån reaktorer användas, t ex kalla kritiska mätningar i BWR eller fluxmapsmätningar i PWR. Ett exempel på hur denna kombinerade metod kan användas för att få fram ett osäkerhetspåslag har beskrivits i EPRI-rapporterna (EPRI 2011, 2012). Denna metodik är mer av typen ”best estimate” än isotopvalidering då den tar hänsyn till hela isotopinnehållet och andra övriga effekter i bränslet (såsom t ex utbränningsberoende geometriförändringar).

Eftersom metodiken beskriven i EPRI (2011, 2012) inte är beprövad och ännu inte licensierad någonstans i världen ska SKB tillsvidare använda sig av isotopvalidering. Den kombinerade metoden har dock fördelar som gör att det är fullt möjligt att SKB i ett senare skede ansöker om att istället få använda sig av denna metod.

I SKB:s validering av beräkningar på utbränt bränsle kommer termerna Δk_i , Δk_c och Δk_x att bestämmas. Δk_p och Δk_b bestäms och används i själva kriticitetsanalysen.

7.3 Isotopvalidering

Vid användandet av isotopvalidering måste valideringen delas upp i två komponenter. Först validering av nuklidkompositionen och sedan validering av reaktivitetsberäkningarna som krediterar dessa isotoper.

7.3.1 Validering av nuklidkompositionen

I ISG-8 (NRC 2012) hänvisas till att den metod och de värden på osäkerheter som är framräknade i Radulescu et al. (2012) kan användas under förutsättning att:

- man kan visa att de applikationer som analysen ska vara giltig för liknar de applikationer som använts i Radulescu et al. (2012)
- man använder samma utbränningskod och tvärsnittsbibliotek som användes i Radulescu et al. (2012) och Scaglione et al. (2012)

SKB tänker använda sig av detta tillvägagångssätt och visa på likheten mot applikationerna i Radulescu et al. (2012) genom en jämförelse av C_k -värden beräknade med hjälp av Tsunami.

7.3.2 Validering av kriticitetsberäkning

Metodiken att bestämma bias ($1 - k_c$) och osäkerheten i bias (Δk_c) i beräkning av neutronmultiplikationskonstanten ska använda sig av jämförelse med kritiska experiment. k_c och Δk_c ska bestämmas på principiellt samma sätt som vid validering för färskt bränsle, i enlighet med ANSI/ANS-8.24-2007. Bias och osäkerhetstermer för nuklider som inte ingår i experimenten ska tas hänsyn till genom termen Δk_x . SKB tänker använda sig av de rekommendationer som finns i ISG-8 (NRC 2012) för att ta hänsyn till osäkerheter gällande fissionsprodukter.

7.3.3 Trendanalyser

Osäkerhetstermernas variation med utbränning och andra relevanta parametrar ska undersökas och dokumenteras.

7.4 Hantering av osäkerhet i utbränning och drifthistorik

Eftersom olika drifthistorik innebär olika uppbyggnad av fissionsprodukter och kriticitetsberäkningarna ska täcka alla bränslekniptens individuella historia krävs att följande utbränningsberoende osäkerheter beaktas vid beräkandet av k_p .

- Konservativ axiell profil på utbränningen. (End effect).
- Konservativ horisontell profil på utbränningen.
- Hänsynstagande till insats av styrstavar eller brännbara absorbatörer.
- Konservativt vald bränsletemperatur, moderatordensitet, borhalt, effekthistorik och avklingningstid.

Hänsyn måste också tas till osäkerheten i ansatt utbränningsvärde (Δk_b). SKB kommer att hantera detta påslag genom ett höjt krav på krävd utbränningsnivå motsvarande osäkerheten i kraftverkens uppmätta/uppskattade utbränningar.

7.4.1 Utbränning

Osäkerheter i den deklarerade utbränningen kommer ifrån osäkerheter i bestämning av reaktorns termiska effekt, osäkerheter i härdens radiella effektfördelning och osäkerheter i beräkningskoder för härduppföljning.

Hänsyn till detta, baserat på utbränningsdata ifrån Ringhals PWR, ska tas i kriticitetsanalysen.

7.4.2 End effect

Utbränningen redovisas normalt som en medelutbränning för ett element. Vid utbränningskreditering relateras detta värde till en reaktivitetsnivå.

Så kallad ”end effect” kan uppkomma på grund av den axiella effektfördelningen i reaktorn som leder till att ändzonerna i bränslet får låg utbränning på grund av det axiella neutronläckaget. Tar man hänsyn till den axiella utbränningsfördelningen kan elementets reaktivitet bli större jämfört det fall då elementet antas ha en jämn utbränningsfördelning.

Konsekvensen av detta är att den rapporterade medelutbränningen för ett element inte ger ett bra mått på reaktiviteten utan fördelningen av utbränningen måste tas med i beräkningen. Hänsyn till detta, baserat på utbränningsdata ifrån Ringhals PWR, ska tas i kriticitetsanalysen.

7.4.3 Radiell utbränningsfördelning

I ett bränsleelement kan en radiell gradient av utbränningen produceras om elementet är placerat i ett område med en effektgradient. Ett konservativt antagande baserat på utbränningsdata ifrån Ringhals PWR ska göras i kriticitetsanalysen.

7.4.4 Axiell temperaturfördelning

Utbränningen, som rapporteras från kraftverken kan ge en icke konservativ uppskattning av bränsleelementets k_{eff} beroende på att vattentemperaturen och densiteten varierar axiellt. En lägre vattendensitet kan leda till ett hårdare neutronspektrum, vilket genererar relativt sett mer Pu239, som i sin tur ger en ökning av reaktiviteten. Denna effekt ska hanteras genom att i kriticitetsanalysen beräkna nuklidhalterna vid en vattentäthet som motsvarar utgående temperatur i PWR-reaktorer, det vill säga hela elementet bränns ut med den densitet som ger den högsta Pu239 produktionen.

7.4.5 Styrstavar och brännbara absorbatörer

I en PWR under drift är styrstavar normalt helt eller nästa helt utdragna. Skulle styrstavar systematiskt vara införda i ett bränsleelement på grund av någon avvikelse ifrån normal reaktordrift bör denna information följa med elementet och bli föremål för en separat kontroll.

I de första PWR-härdarna fanns ett antal BPR (Burnable Poison Rods) i härden för att dämpa reaktiviteten. De bränslepatroner som utsattes för denna påverkan är dock så pass låganrikade att de inte kommer att kräva utbränningskreditering. Således behöver ingen hänsyn tas till denna effekt.

Inblandning av BA (Gd) i bränslet medför alltid en lägre reaktivitet än motsvarande anrikat bränsle utan Gd. Således behöver ingen hänsyn tas till BA då SKB inte tillgodoräknar sig det för PWR.

7.4.6 Osäkerhet pga geometriförändringar pga bestrålning.

Kriticitetsberäkningarna ska göras med antagandet att bränslegeometrin är nominell. Viss geometriförändring kan ske under patronernas utbränningsförlopp. Viktiga mått ur kriticitetssynpunkt är stavdelningen och bränslestavarnas ytterdiameter. En minskning av stavdiametern eller en ökning av stavdelningen leder till högre reaktivitet i bränslet. Hänsyn till detta, baserat på bränsledata ifrån Ringhals PWR, ska tas i kriticitetsanalysen.

7.4.7 Osäkerhet i effekthistorik, bränsletemperatur och avklingningstid.

Utbränningsberäkningarna ska göras med konservativa antagande gällande dessa parametrar.

7.5 Mätning av utbränning

I SKB:s metodik för utbränningskreditering ingår inget krav på individuell verifiering av utbränning annan än den som görs på kraftverken. Detta är i enlighet med den metodik som praktiseras i USA och beskrivs i ISG-8 (NRC 2012). Värdena på utbränning baseras på de data som beräknats av kraftverken och vars riktighet följs upp under reaktorernas drift med hjälp av härdetektorer och uppstartsmätningar. Osäkerheter i dessa beräkningar medtages i kriticitetsanalysen.

Vid hantering i Clink kommer mätning av bränslet att göras av safeguard-identifiering och resteffektbestämningsskäl. Denna mätning kommer att användas för att verifiera att det är rätt bränsle som hanteras och att det inte skett misstag i hanteringskedjan ifrån Clab.

Risken för missöden i hanteringskedjan mellan kraftverken och SKB analyseras vidare i MTO-rapport för utbränningskreditering (SKBdoc 1414633).

I IAEA Safety Standards (IAEA 2012) uttrycks i appendix 2 ”the minimum required burnup value should be verified by independent measurement”. En annan praxis har etablerats i USA av NRCs och uttrycks i deras riktlinjer (NRC 2012). Här accepteras frånvaro av individuell mätning om procedurernas lämplighet kan visas genom ett dataunderlag av mätningar. SKB avser följa praxis i USA. SKBs procedur och dataunderlag kommer att dokumenteras. Detta tillsammans med den genomgång av de administrativa rutinerna som rekommenderas i MTO-rapporten (SKBdoc 1414633) bedöms vara tillräckliga för att säkerställa ett säkert hanterande utan en av reaktordata oberoende mätning.

8 Metodik för kriticitetsanalys – BA-kreditering

Vid BA-kreditering krediteras det faktum att BA är en integrerad del av bränslet. BA kommer att brännas ut under sin tid i reaktorn och bränsleknippet kommer nå sitt reaktivitetsmaximum då den brännbara absorbatoren är slututbränd. Bränslets nuklidinventarium vid utbränningsnivån som ger reaktivitetsmaximum i de analyserade bränsleförvaringssystemen är input till kriticitetsanalyserna.

BA-kreditering kan ses som ett specialfall av utbränningskreditering men skiljer sig ifrån denna på ett principiellt viktigt sätt. Vid BA-kreditering visas att bränsleknippets reaktivitet under hela sin utbränningshistoria är mindre reaktivt än ett visst gränsvärde. Det finns således ingen minsta utbränning som bränslet måste uppnå för att accepteras i Clink eller Kärnbränsleförvaret. Allt bränsle som uppfyller kraven på minsta BA-insats kan oavsett historik placeras på vilken position som helst i hela SKB:s förvaringskedja och ingen ”loading curve” behövs som avgör tillräcklig utbränning.

8.1 Principer för analysen

SKB:s metodik för BA-kreditering baseras på samma principiella tillvägagångssätt som redovisades och godkändes av SSM vid ansökan om BA-kreditering för Clab 1994, (SKI 1995). Det innebär att analysen visar att bränsle med specificerade anrikningsnivåer och BA-insatser har lägre reaktivitet i Clab vid normala förhållanden jämfört med bränslet i Clabs referensanalys. Det kontrolleras också, på ett förenklat sätt, att även onormala tillstånd och missödesfallen kommer att ge lägre reaktivitet jämfört med referensbränslet, när det ersätts med bränsle med en lägre reaktivitet.

I analysen studeras ett antal anrikningsnivåer i intervallet upp till 5%. För varje nivå antas en radiell fördelning av stavarikningar som är konservativ med avseende på reaktivitet jämfört med fördelningar i verkliga bränslen. För varje anrikningsnivå söks en minsta BA-insats med avseende på antal BA-stavar och halt av Gd_2O_3 som ger lägre reaktivitet i de aktuella förvaringsförhållandena jämfört med referensbränslet. Placering av BA-stavar väljs konservativt för att maximera bränslets toppreaktivitet under Gd-utbränning.

De osäkerheter i beräknad multiplikationskonstant vid toppreaktivitet som inte täcks in av konservativa antaganden adderas till beräkningsresultaten och det verifieras att det totala resultatet innebär en reaktivitet lägre än den för bränslet i referensanalysen.

8.2 Hantering av osäkerheter vid BA-kreditering

I detta avsnitt behandlas osäkerheter som hanteras på ett sätt unikt för BA-kreditering. Övriga osäkerheter ska i analysen behandlas på samma sätt som för utbränningskreditering och annan kriticitetsanalys.

Vanlig utbränningskreditering för BWR är behäftad med stora osäkerhetspåslag på grund av att olika drifhistorik (voidhistoria, axiell effektprofil, styrvavshistoria) och kan ge relativt stora skillnader i uppbyggnad av plutonium och olika fissionsprodukter. Dess osäkerhetspåslag ökar med ökad

utbränning. Vid BA-kreditering täcks dessa osäkerheter in genom ett antal konservativa antaganden i analysen.

Följande antagande ska göras vid BA-kreditering för att säkerställa ett konservativt resultat.

- Placering av BA-stavar väljs konservativt med avseende på reaktivitetsmaximum.
- Drifthistoria väljs konservativt med avseende på reaktivitetsmaximum.
- Reaktivitetsmaximum antas att samtidigt inträffa i bränsleknippets alla axiella segment.

Reaktivitetsmaximum har ett starkt beroende till hur snabbt BA bränns ut. Denna osäkerhet ska beaktas i analysen genom följande konservativa antagande.

- Gd-koncentration ska sättas till minimum inom toleransintervallet.
- Ett extra straff ska adderas för att ta hänsyn till eventuella fel vid beräkning av reaktivitetstoppen för Gd. Detta ska motiveras i analysrapporten.

8.2.1 Tillgodoräknade isotoper

I BA-kreditering tillgodoräknas följande isotoper,

Huvudsakliga aktinider
U-234, U-235, U-238, Pu-238, Pu-239, Pu-240, Pu-241, Pu-242, Am-241
Övriga aktinider och fissionsprodukter
U-236, Np-237, Am-243 Mo-95, Tc-99, Ru-101, Rh-103, Ag-109, Cs-133, Cs-135, Nd-143, Nd-145, Sm-147, Sm-149, Sm-150, Sm-151, Sm-152, Sm-154, Eu-151, Eu-153, Eu-155, Gd-154, Gd-155, Gd-156, Gd-157, Gd-158, Gd-160

Denna nuklidlista innehåller stabila nuklider som har betydelse för reaktiviteten i bassängförhållande.

Jämfört med utbränningskreditering tillgodoräknas flera Gd-isotoper samt ett antal ytterligare fissionsprodukter. Detta motiveras av att vid BA-kreditering används inte isotopvalidering för att beräkna osäkerhetspåslaget då det experimentella verifieringsunderlaget är begränsat för BWR vid lägre utbränningar (toppreaktivitet). I brist på ett statistiskt adekvat verifieringsunderlag tillämpas därför praxis enligt rekommendationen i NRC (1998). Det innebär att den beräknade multiplikationskonstanten för bestrålat bränsle höjs med ett påslag Δk_{BU} lika med 5% av reaktivitetssänkning mellan nollutbränning och den aktuella utbränningen. För bränsle med BA beräknas Δk_{BU} som skillnad mellan multiplikationskonstanten för färskt bränsle med BA borttaget och multiplikationskonstanten vid toppreaktivitet.

Tillämpning av SKB:s metodik och behandling av osäkerheter beskrivs närmare i rapport ”Clab – kreditering av BA i BWR-bränsle för BWR kompakt- och normalkassett, (SKBdoc 1391444).

9 Beräkningsförutsättningar

I detta kapitel redovisas de beräkningsförutsättningar och program SKB ska använda sig av i validering och kriticitetsanalys. Vid utnyttjandet av BA-kreditering används CASMO för beräkning av reaktivitetssänkande effekten av BA, CASMO finns närmare beskrivet i (SKBdoc 1391444).

9.1 Program

SKB ska använda sig av programpaketet Scale ifrån Oak Ridge National Laboratory (ORNL 2011). Versions nummer och tvärsnittsbibliotek av ingående koder ska redovisas i valideringsrapporterna.

9.2 Referensbränsle

Det mest reaktiva bränslet som finns i SKB:s inventarium, för respektive BWR och PWR, ska användas i kriticitetsanalysen. Detta bränsle kallas referensbränslet. Vid godkännande av nya bränsletyper ska det verifieras att dessa inte är mer reaktiva än referensbränslet, eller att eventuella reaktivitetsökningen täcks in av marginaler i analysen för referensbränslet. Vid verifieringen ska inverkan av olikheter i bränslets tillverknings toleranser jämfört referensbränslet beaktas. Detta arbetssätt finns beskrivet i SKB:s ledningssystem, rutin SD-045.

Kriticitetsanalysens referensbränsle ska inte förväxlas med typbränsle eller typkapsel som används i andra delar av ansökan om Kärnbränsleförvaret. Referensbränslet är endast ett referensbränsle för kriticitetsanalysen.

9.3 Beräkningsförutsättningar för validering

För att säkerställa att rätt experiment väljs ut som efterliknar de av SKB:s applikationer som är av vikt i säkerhetsanalysen ska följande gälla.

- Referensbränslet ska användas vid Tsunami-beräkningar.
- Nominella värden på alla indataparametrar som beskriver referensbränslet ska användas.
- Maximalt tillåten anrikning för färskt bränsle utan Gd ska användas.
- Tsunami-urvalet görs för alla former av kassetter (inkl kopparkapseln) i normalt drifttillstånd.
- Borhalten i kompaktkassetten sätts till minimum tolerans.

För att säkerställa korrekt och konsistent behandling av de kritiska experimenten ska de modelleras efter experimentbeskrivningens kapitel 3 i OECD/NEA (2013).

9.4 Beräkningsförutsättningar för kriticitetsanalysen

För att säkerställa ett konservativt beräkningsresultat ska följande förutsättningar användas vid kriticitetsberäkningar.

- En konservativt vald anrikningsfördelning ska användas.
- 5% U235 anrikning ska användas för PWR. Detta innebär att högsta tillåten anrikning är 5% - tillverknings tolerans.
- För BWR ska högsta tillåten anrikning utan BA-insats användas.
- Lagringskassetter och kapseln ska modelleras i tre dimensioner.
- Dellånga stavar ska modelleras.
- Detaljer i bränslekonstruktionen, såsom t ex bottenplattor kan förenklas men alla förenklingar ska ha marginell eller konservativ inverkan på kriticitetsanalysen.
- All data för kassetter och kapseln ska sättas till minimum eller maximum tolerans (beroende på vad som maximerar reaktiviteten) enligt materialspecifikationerna.
- Tätheten av UO₂ ska sättas till kutsens nominella täthet istället för den effektiva kutsplatarens täthet. Detta innebär att mängden UO₂ i en bränslestav överskattas.
- Bränslet ska modelleras med nominella mått. Osäkerheten i dimensionerna ska behandlas med statistisk analys tillsammans med övriga osäkerheter.
- Bränslet ska modelleras utan spridare.
- Axiellt ska hänsyn tas till bränslets aktiva längd.

- Reflekerande randvillkor ska användas. Det innebär att modellen motsvarar ett oändligt kassettgitter.
- Beräkningarna ska utföras på kompletta bränsleelement. Effekten av bortplockade bränslestavar analyseras separat.
- Tillverkningstoleranser i kasset-, insats- och kapselmått ska hanteras genom att alla mått modelleras på minimum toleransnivå, vilket ger den högsta reaktiviteten i normal förvaring.
- Bränslets ska placeras på ett sådant sätt i förvaringspositioner att den högsta reaktiviteten erhålls.
- Inverkan av temperaturen ska tas hänsyn till genom att beräkningen görs vid den temperatur som ger den högsta reaktiviteten.

9.5 Beräkningsförutsättningar för BA-kreditering

För att säkerställa ett konservativt beräkningsresultat har ett antal beräkningsförutsättningar använts vid reaktivitetsberäkning med BA, för mer detaljer se SKBdoc 1391444. De är till stor del de samma som beräkningsförutsättningarna för kriticitetsanalysen, t ex modelleras dagens mest reaktiva bränsle och tillverkningstoleranser för kassetmått sätts till minimum tolerans. Men BA-krediteringsanalysen använder ett annat beräkningsverktyg CASMO som är en 2D deterministisk transportteorikod. Beräkningsförutsättningar är anpassade efter detta faktum. Det viktiga är att beräkningsförutsättningarna är satta så att resultatet är otvetydigt konservativt i relation till det som har använts i kriticitetsanalysens beräkningar. Detta ska visas i analysrapporterna.

9.6 Beräkningsparametrar

Valet av beräkningsparametrar är gjort för att säkerställa ett så korrekt beräkningsresultat som möjligt.

9.6.1 Keno

Generellt gäller att de default-värden som rekommenderas av ORNL ska användas. För att säkerställa pålitliga resultat ska stora värden användas på antalet neutroner per generation och antalet skippade neutroner per generation, standardavvikelsen ska sättas lågt. SKB använder sig av följande värden på dessa parametrar.

npg=10000 (Antalet neutroner per generation)

nsk=200 (Antalet skippade neutroner per generation)

sig=0,0001 (Standardavvikelsen i beräkningar ska vara mindre än 0,0001)

9.6.2 Tsunami

Tsunamiberäkningarna ska kontrolleras med hjälp av störningsanalys. Alla isotoperna med en känslighet över 0,05 och åtminstone en absorberator och en fissil isotop från bränslet, plus en isotop från moderatorn ska kontrolleras.

Beräkningsparametrar och detaljering i modellering ska väljas på ett sådant sätt att känsligheten för dessa isotoper överensstämmer inom 5% med resultaten från störningsanalysen. Avvikelser ifrån detta ska dokumenteras och motiv ska ges varför resultaten ändå är användbara.

10 MTO

En MTO-värdering har gjorts både för utökad BA-kreditering (SKBdoc 1393009) och utbränningskreditering (SKBdoc 1414633).

MTO-rapporterna summerar att det finns förutsättningar för att bränsle med 5 % anrikning kan hanteras på ett kvalitetssäkrat sätt av SKB, dock behöver de administrativa rutinerna ses över och eventuellt förstärkas. Arbete med detta har vid skrivandet av denna metodikrapport påbörjats och vissa

rutiner och procedurer har uppdaterats. I en framtida anmälan om att uppdatera Clab SAR och kreditera utbränning måste denna översyn vara genomförd.

11 Definitioner och begrepp

Applikation: De målsystem eller ”safety cases” för vilka kriticitetsanalysen ska säkerställa underkritiska förhållanden. En applikation kan tex vara PWR-kompaktkassett i Clab eller BWR kopparkapsel.

EALF: Energy of the Average Neutron Lethargy of Fission. Medelenergi för de neutroner som skapar fission. Traditionellt en av de viktigaste parametrarna för att karaktärisera en applikation och se att den liknar de kritiska experiment man jämför med.

Stavdelning: Avståndet mellan stavar i ett bränsleknippe. Traditionellt en av de viktigaste parametrarna för att karaktärisera en applikation och se att den liknar de kritiska experiment man jämför med.

Casmo: CASMO är en deterministisk 2D-neutrontransportkod som används av många kraftverk både i Sverige och internationellt.

Scale: Scale är en modellering- och simuleringssvit för kriticitetsanalys. Den har utvecklats och underhålls av Oak Ridge National Laboratory. Ingående program kan utföra beräkningar inom reaktorfysik, kriticitetssäkerheten och strålskärning.

Keno: KENO är ett tredimensionellt multigrupp Monte Carlo program för kriticitetssäkerhetsanalys. Keno ingår i Scale-sviten. Keno används främst till att beräkna ett värde på neutronmultiplikationsfaktorn k_{eff} för ett av användaren specificerat system.

Tsunami: Tsunamin beräknar systemets k_{eff} -känslighet för tvärsnittsdata. Det vill säga hur mycket k_{eff} förändras vid en specifik störning av en nuklids tvärsnitt. Om två olika system, en applikation och ett experiment, har en liknande respons betyder det att de är lika ur reaktivitetssynpunkt. Det betyder i sin tur att experimentet är lämpligt att använda i en validering och ger en bra bild av hur bra beräkningskoden fungerar för applikationen. Tsunami ingår i Scale-sviten.

Monte Carlo beräkningar: Monte Carlo-metoder är en brett använd klass av algoritmer som används för att simulera olika fysiska och matematiska system. De skiljer sig från andra simuleringmetoder genom att vara stokastiska, det vill säga icke-deterministiska.

Störningsanalys: I denna rapport avses med störningsanalys reaktivitetsberäkningar där koncentrationen av en viss nuklid varieras och dess effekt på reaktiviteten analyseras.

Kritiska experiment: Kan även benämnas kriticitetsexperiment eller kritiska benchmarkexperiment. Detta avser experiment där i en noggrant kontrollerad och uppmätt miljö en specifik konfiguration innehållande fissilt material försätts i kritiskt tillstånd, det vill säga $k_{eff}=1.0$. Det kan tex vara en uppsättning uranstavar i en bassäng där vatten fylls på tills kriticitet uppnås. Vattennivån uppmäts och resultatet jämförs med beräknat k_{eff} från de koder som ska valideras/verifieras.

Referenser

ANS, 2007. ANSI/ANS-8.24-2007: Validation of neutron transport methods for nuclear criticality safety calculations. New York: American Nuclear Society.

ANS, 2008. ANSI/ANS-8.27-2008: Burnup credit for LWR fuel. New York: American Nuclear Society.

EPRI, 2011. Benchmarks for quantifying fuel reactivity depletion uncertainty. Report 1022909, EPRI, Palo Alto, CA.

EPRI, 2012. Utilization of the EPRI depletion benchmarks for burnup credit validation. Report 1025203, EPRI, Palo Alto, CA.

IAEA, 2012. Storage of spent nuclear fuel. Vienna: IAEA. (Safety Standards Series SSG-15)

NRC, 1998. Guidance on the regulatory requirements for criticality analysis of fuel storage at light-water reactor power plant. Washington, DC: U.S. Nuclear Regulatory Commission.

NRC, 2012. Division of spent fuel storage and transportation: Interim staff guidance – 8, revision 3. Burnup credit in the criticality safety analyses of PWR spent fuel in transportation and storage casks. Washington, DC: U.S. Nuclear Regulatory Commission.

OECD/NEA, 2013. International handbook of evaluated criticality safety benchmark experiments (ICSBEP handbook). Paris: OECD/NEA.

ORNL, 2011. SCALE: A comprehensive modeling and simulation suite for nuclear safety analysis and design. Version 6.1. ORNL/TM-2005/39, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN.

Radulescu G, Gauld I C, Ilas G, Wagner J C, 2012. An approach for validating actinide and fission product burnup credit criticality safety analyses – isotopic composition predictions. NUREG/CR-7108 ORNL/TM-2011/509, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC.

Scaglione J M, Mueller D E, Wagner J C, Marshall W J, 2012. An approach for validating actinide and fission product burnup credit criticality safety analyses – criticality (k_{eff}) predictions. NUREG/CR-7109 ORNL/TM-2011/514, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC.

SKB, 2010. Spent nuclear fuel for disposal in the KBS-3 repository. SKB TR-10-13, Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKI, 1992. CLAB-96 – Slutlig Säkerhetsrapport för kompaktkassetter – Beslutsskrivelse – 1992-02-13 - SKI ref 1091/90, Statens kärnkraftinspektion.

SKI, 1995. SKI-beslut 8.49-941074 1995-02-22, Statens kärnkraftinspektion.

Opublicerade dokument

SKBdoc 1053999 ver 1.0. INKA – Kriticitetsanalys. Svensk Kärnbränslehantering AB. /företagsinternt dokument

SKBdoc 1065916 ver 1.0. Clab – Omgivningspåverkan vid en kriticitetsolycka. Svensk Kärnbränslehantering AB. /företagsinternt dokument

SKBdoc 1069171 ver 2.0. Clab – SAR Allmän del kapitel 8 – Säkerhetsanalys. Svensk Kärnbränslehantering AB. /företagsinternt dokument

SKBdoc 1091141 ver 3.0. Säkerhetsredovisning för drift av slutförvarsanläggning för använt kärnbränsle (SR-Drift) kapitel 8 – Säkerhetsanalys. Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKBdoc 1193244 ver 4.0. Criticality safety calculations of disposal canister. Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKBdoc 1256495 ver 1.0. TB-licens F/270/B(M)F-85 T (Kad). Svensk Kärnbränslehantering AB. /företagsinternt dokument

SKBdoc 1391444 ver 1.0. Clab – Kreditering av BA i BWR-bränsle för BWR kompakt- och normalkassett. Svensk Kärnbränslehantering AB. /företagsinternt dokument

SKBdoc 1393009 ver 1.0. MTO-analys av höjd anrikning med BA-kreditering. Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKBdoc 1414633 ver 1.0. MTO-värdering av SKBs förmåga att administrativt hantera utbränningskreditering av PWR bränsle med anrikning upp till och med 5 %. Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKBdoc 1417199 ver 1.0. What if criticality in the final repository. Svensk Kärnbränslehantering AB.