

Forskning

---

**Internationellt samarbete inom  
OECD/NEA 2006 avseende nukleär  
kriticitetssäkerhet**

Dennis Mennerdahl

Mars 2007

## SKI Perspektiv

Vid hantering, bearbetning och lagring av kärnämne vid en anläggning ska åtgärder vidtas för att förhindra kriticitet. För att kunna göra det utförs kriticitetssäkerhetsanalyser. SKI behöver för att kunna bedöma dessa ha tillgång till aktuell kunskap om metoder och analysprogram. Därför bevakar SKI OECD/NEA:s Nuclear Science Committee (NSC) arbete med frågor som behandlar kriticitetssäkerhet och utbränningskreditering vid kriticitetsanalyser. Dessutom är det ett stöd för NSC:s i deras arbete med kriticitetssäkerhet.

Uppdraget har syftat till att delta i möten och tillhörande arbete som organiseras av NSC:s Working Party on Nuclear Criticality Safety och anknytande expertgrupper. Uppdraget omfattar arbete rörande utbränningskreditering, materialsammansättning hos bestrålat bränsle, referensdata för kriticitetssäkerhet, beräkningsmetoder, utvärdering av kriticitetsförlopp och kriticitetsexperiment.

Uppdraget har bidragit till forskningsmålet att ge underlag till SKI:s tillsynsverksamhet avseende kriticitetssäkerhet. Dessutom bidrar det till säkerhetsarbetet rörande kriticitetssäkerhet dels i Sverige dels i de länder som deltar i NSC:s arbete.

SKI:s handläggare Jan In de Betou  
Projektnummer 200606024  
Diarienummer SKI 2006/308



## Forskning

---

# Internationellt samarbete inom OECD/NEA 2006 avseende nukleär kriticitetssäkerhet

Dennis Mennerdahl  
E Mennerdahl Systems  
Starvägen 12, 183 57 Täby

Mars 2007

Denna rapport har gjorts på uppdrag av Statens kärnkraftinspektion, SKI. Slutsatser och åsikter som framförs i rapporten är författarens/författarnas egna och behöver inte nödvändigtvis sammanfalla med SKI:s.



## Sammanfattning

Deltagande i internationellt samarbete inom OECD/NEA:s Nuclear Science Committee och dess Working Party on Nuclear Criticality Safety har fortsatt under 2006 med stöd av SKI. Inga stora projekt där jag varit mycket aktiv har pågått. Däremot har jag deltagit i arbetet genom granskning av förslag till slutrapporter, vid bedömning av nya projekt samt i fortsatt redigering av slutrapport för studie avseende referensvärden.

Ett projekt som pågått under lång tid avser utbränningskreditering. Just nu pågår inga omfattande studier och samarbetsintresset verkar vara lägre än tidigare. Det finns viktiga frågor som behöver studeras men ingen har gjort något förslag än. Den nya utgåvan av programpaketet SCALE 5.1 kanske kan stimulera till sådana förslag.

Ett annat projekt som pågått under lång tid är framtagning och underhåll av ICSBEP-handboken. Den innehåller nya utvärderingar av nya och gamla kritiska och underkritiska experiment. Utvärderingarna är avsedda att användas som benchmarks för test av beräkningsmetoder. Den första handboken kom ut 1995 och den har sedan uppdaterats i september varje år. Det är ett mycket lyckosamt och värdefullt projekt. Sverige har inte bidragit med experimentella resultat.

I slutet av 2006 tillfrågades jag av projektledaren om att försöka bidra med utvärdering av några experiment utförda vid den snabba experimentreaktorn FR-0 i Studsvik 1964-1971. Jag har accepterat och har påbörjat förstudie.

Ett projekt som förtjänar en fortsättning avser bestämning av referensvärden för system av specifika klyvbara material i enkla geometrier. På grund av bristande ledning har denna expertgrupp avslutats av OECD/NEA och WPNCS. Slutrapport, baserad på mina utvärderingar och sammanställning (delvis på uppdrag av SKI), publicerades av OECD/NEA i februari 2007.

Andra projekt avser källkonvergens, utvärdering av kriticitetsförlopp, bestämning av sammansättning av bestrålat bränsle samt förberedelser för internationell konferens ICNC 2007 i S:t Petersburg.

## Summary

The participation in international cooperation within the OECD/NEA Nuclear Science Committee and its Working Party on Nuclear Criticality Safety has continued during 2006, supported by SKI. No large projects where I have been particularly active have been going on. However, I have participated in several projects by reviewing of proposed final reports, by evaluation of new projects and by continued editing of the final report for the reference values study.

A project that has been going for a long time is burnup credit. At this time there are no major studies and the interest for cooperation appears lower than earlier. There are important issues that need studying but nobody has made any proposal yet. The new release of the program package SCALE 5.1 may encourage such proposals.

Another project that has been going for a long time is the development and maintenance of the ICSBEP Handbook. It contains new evaluations of new and old critical and subcritical experiments. The evaluations are intended to be used as benchmarks for testing of calculation methods. The first issue of the Handbook is from 1995 and it has been updated in every September since then. It is a very successful and valuable project. Sweden has not contributed with experimental results.

At the end of 2006, I was asked by the project chairman to try to contribute with an evaluation of some of the experiments carried out at the fast experimental reactor FR-0 in Studsvik during 1964-1971. I have accepted and have started a preliminary study.

A project that deserves continuation is the determination of reference values for systems with fissionable materials in simple geometries. Due to management problems this expert group has been dissolved by OECD/NEA and by the WPNCS. The final report, based on my evaluations and compilations (partly supported by SKI), was published by OECD/NEA in February 2007.

Other projects include source convergence, evaluation of critical excursions, determination of composition of irradiated fuel and preparations for the international conference 2007 in S:t Petersburg.

# Innehåll

1.	Inledning.....	1
2.	Working Party on Nuclear Criticality Safety .....	2
3.	Utbränningskreditering.....	2
3.1.	Fas IIC. Variation i axiella utbränningsprofiler för PWR-bränsle .....	2
3.2.	Fas IID. Inverkan av absorbatörer under reaktordrift (PWR) .....	2
3.3.	Fas IIE. Axiell utbränningsfördelning och absorbatörer (PWR).....	3
3.4.	Fas V. Summering av intryck från expertgruppen 1991-2006. ....	3
4.	Referensvärden (Minsta kritiska värden) .....	3
5.	Benchmarks för utvärdering av bestrålat bränsle .....	5
5.1.	Bakgrund .....	5
5.2.	VVER och andra bränsletyper än BWR och PWR .....	5
5.3.	SFCOMPO – Revidering och utökning.....	6
6.	Källkonvergens.....	6
6.1.	Fas I: Beräkning av utvalda problem (ej benchmarks).....	6
6.2.	Fas II: Sammanställning av metoder och kriterier.....	6
7.	Simulering av kriticitetsförlopp.....	6
8.	ICSBEP-handboken med benchmarks.....	7
8.1.	ICSBEP-handboken.....	7
8.2.	Svenskt bidrag avseende FR-0 i Studsvik .....	7
9.	ICNC 2007.....	8
	Referenser.....	9
	Appendix A. Reservation to evaluation of fission density distributions .....	11
	Appendix B. Evaluation of criticality safety reference values – First iteration .....	15



## Akronymer och beteckningar

ANS	American Nuclear Society
Benchmark	Utvärderat modell för test av beräkningsmetod
Bias	Systematisk avvikelse mellan uppskattat och korrekt värde
DfT	Department for Transport (Storbritannien)
DOE	Department of Energy
EMS	E Mennerdahl Systems
ICSBEP	International Criticality Safety Benchmark Evaluation Project
$k_{\text{eff}}$	Den effektiva neutronmultiplikationskonstanten
Kritiskt experiment	Mätning där stabil kriticitet har skapats
NEA	Nuclear Energy Agency
NRC	Nuclear Regulatory Commission, USA
NSC	Nuclear Science Committee (inom NEA)
OECD	Organisation for Economic Cooperation and Development
SKI	Statens kärnkraftinspektion
Validation	Testning av beräkningsmetod mot benchmarks
WPNCs	Working Party on Nuclear Criticality Safety (inom NSC)

# 1. Inledning

Denna rapport innehåller en sammanfattning av arbete, resor och intryck under 2006 avseende deltagande i OECD/NEA/NSC Working Party on Nuclear Criticality Safety (WPNCS) och dess expertgrupper. Uppdraget avser enbart 2006.

Samarbetet startade redan 1980 med en studie avseende jämförelse av beräkningsmetoder för beräkning av  $k_{\text{eff}}$  för transportflaskor med bestrålat bränsle. Då var inte utbränningskreditering aktuellt. DOE tog initiativet till studien och har fortfarande samma grundproblem: ansvar för allt bestrålat bränsle från kärnkraftverk i USA.

Sedan 1991 har samarbetet gällt utbränningskreditering och andra projekt. De som pågår eller avslutats under 2006 listas nedan.

- Expertgrupp för utbränningskreditering
  - ✓ Fas IIC avseende axiella variationer i axiell utbränningsprofil. Förslag till slutrapport finns men min kritik har försenat den
  - ✓ Fas IID avseende inverkan av rörliga neutronabsorbatorer på sammansättningen av bestrålat PWR-bränsle.
  - ✓ Fas V avseende sammanställning av slutsatser och rekommendationer avseende hittills genomförda faser.
- Expertgrupp för minsta kritiska värden (jag kallar dem referensvärden) för oxider och nitrat av uran och plutonium (ej blandningar).
- Expertgrupp för källkonvergens
  - ✓ Fas I avser ett antal beräkningsproblem som skapats för att ge underlag för jämförelser och att ge konvergensproblem.
  - ✓ Fas II avser en sammanställning av metoder och rekommendationer för att underlätta för kriticitetsspecialister.
- Expertgrupp för utvärdering av kriticitetsförlopp. Fas I avser ett antal benchmarks baserade på experiment analyserats med preliminära metoder.
- Expertgrupp för benchmarks avseende sammansättning av bestrålat bränsle. Nyligen påbörjad studie avser uppdatering och uppgradering av databasen SFCOMPO samt sammanställning av använda metoder.
- ICSBEP-handbok med benchmarks baserade på kritiska experiment. Jag har tillfrågats om och accepterat försök att skapa benchmarks från kritiska experiment under 1960-talet i Studsviks snabba reaktor FR-0.
- Förberedelse för internationell konferens ICNC 2007 i S:t Petersburg.

Jag har varit aktiv men arbetet har fördelats jämnare över fler områden än tidigare.

Under 2006 har, förutom det årliga mötet i Aix-en-Provence, två extra möten hållits av WPNCS. Båda avsåg förberedelser för ny studie avseende databas med benchmarks, baserade på kemisk analys, för bestämning av innehåll i bestrålat bränsle. Det ena var ett tvådagars möte i Rez utanför Prag och det andra ett endagsmöte i Paris.

## **2. Working Party on Nuclear Criticality Safety**

Det åttonde mötet av WPNCS hölls i Aix-en-Provence den 1 september 2006. Agendan innehåller en kort summering av aktiviteter i varje medlemsland och därefter en genomgång av olika studier och förslag som avser WPNCS.

Under detta möte hände inte mycket specifikt som inte beskrivs i separata avsnitt i denna rapport. Jag lämnade ett förslag till att hålla frågan om referensvärden öppen men intresset var svagt och därmed får detta viktiga projekt anses vara avslutat.

## **3. Utbränningskreditering**

### **3.1. Fas IIC. Variation i axiella utbränningsprofiler för PWR-bränsle**

Mycket arbete har tidigare lagts ned på att visa expertgruppen att koordinatören och författaren till slutrapport för Fas IIC missuppfattat huvudprinciperna för fysik och statistik i sitt förslag till slutrapport. Ordföranden i expertgruppen har försökt rätta till problemet under 2006 men inte lyckats. Jag har vid möte i september 2006 föreslagit en reservation på fyra sidor som baseras på mina omfattande beräkningar och resonemang, speciellt sommaren 2005. Det är accepterat.

De problem som Fas IIC lett till gäller inte bara slutrapportens kvalitet. Det gäller allmän förståelse för viktiga och egentligen självklara fysikaliska sammanhang, för statistisk bearbetning samt för betydelsen av termen "konvergens" vid beräkning av  $k_{\text{eff}}$ . Kritiken mot det aktuella förslaget till slutrapport berör många fler än författaren av rapporten och många som inte är inblandade i Fas IIC.

Mitt förslag till reservation visas i Appendix A. Den är baserad på rapportutkast som modifierats av ordföranden i expertgruppen. Eftersom koordinatören för Fas IIC inte har varit nöjd med ordförandens ändringar kan reservationen behöva modifieras.

### **3.2. Fas IID. Inverkan av absorbatörer under reaktordrift (PWR)**

Projektet är intressant men också förutsägbart. Jag har inte deltagit eftersom jag inte bedömt SCALE 5.0 tillräckligt bra och då ORNL deltagit med detta program. SCALE 5.1 verkar tillräckligt bra och Fas IID kan då bli en bra test.

Slutrapport för Fas IID har publicerats [8] under 2006 och Fas IID är därmed avslutat.

### **3.3. Fas IIE. Axiell utbränningsfördelning och absorbatorer (PWR)**

En fas som initierades 2005 av samma koordinatör som för Fas IIC. Det är en kombination av effekter enligt Fas IIC och Fas IID. Specifikationer fastställdes under 2006 och några resultat presenterades vid mötet 2006. De innehåller underligheter om källkonvergens av liknande typ som finns i förslag till slutrapport för Fas IIC.

Jag har inte prioriterat Fas IIE eftersom SCALE 5.1 behövs först. Dessutom har diskussionerna om Fas IIC minskat mitt förtroende för att Fas IIE skall bli lyckosamt.

### **3.4. Fas V. Summering av intryck från expertgruppen 1991-2006.**

Avsikten är att dokumentera slutsatser avseende utbränningskreditering med utgångspunkt från de faser som expertgruppen genomfört sedan starten. Förslag till artiklar för publicering i facktidskrift (troligen Nuclear Science and Engineering) skulle vara klara i slutet av 2006.

Jag har tillfrågats om bidrag men har inte prioriterat sådant arbete. En anledning är att jag inte tycker expertgruppen har arbetat på ett effektivt sätt och att viktiga aspekter saknas. Dessa har jag presenterat vid IAEA-möten. OECD/NEA-gruppen har sällan gett stöd för mina förslag direkt utan först efter att de fått genomslag på annat sätt. Exempel är presentation vid IAEA-möten och erfarenheter från verkliga tillämpningar typ transportflaska TN/17-2, ”gap” i neutronabsorbatorer i bränslebassänger i USA. Erfarenheterna från diskussioner avseende fas IIC har bidragit till min tveksamhet.

Den sammanställning av referenser avseende utbränningskreditering som jag gjort för SKI under 2005 har efter förfrågan från OECD/NEA bantats och lämnats över. Den finns på skyddad hemsida. Det kan ses som ett bidrag till Fas V. Länder med VVER har kompletterat listan med referenser avseende sådant bränsle.

## **4. Referensvärden (Minsta kritiska värden)**

Denna expertgrupp har enligt min mening haft den viktigaste av uppgifterna hittills. Det innebär jämförelse av olika specialisters bedömningar av realistiska (inte konservativa) värden på  $k_{\text{eff}}$  för ett antal väl definierade system med enkel geometri och sammansättning. Det har gällt oxider och nitrat av antingen uran eller plutonium (inte blandat) med olika isotop-sammansättningar.

Några av de klart formulerade avsikterna med expertgruppens studie var att identifiera felaktigheter i handböcker för kriticitets säkerhet, att ta fram underlag som kan användas vid standardiseringsarbete inom ISO, att utvärdera metoder för bestämning av nuklidsammansättning i kemiska lösningar, etc. Det krävdes mycket arbete men slutrapporten innehåller dessa mål. Studien borde ha fått fortsätta med fler faser men på grund av ledningsproblem (OECD/NEA, WPNCs och ordföranden i expertgruppen), har så inte kunnat ske.

Som tidigare beskrivits så spårade projektet ur ganska tidigt eftersom ordföranden i expertgruppen dels inte delade majoritetens uppfattningar och dels inte hade stöd på

hemmaplan. Planering av kommande möten och framställning av slutrapport blev till slut helt inställt trots att OECD/NEA lovades resultat ”snart”. Under 2004 hade OECD/NEA och WPNCs tröttnat och avslutade expertgruppen. Varje expertgrupp har bara tre års mandat att färdigställa en godkänd studie.

En månad innan årets möte 2004 tillfrågades jag om att ordna möte där framställning av slutrapport var huvudpunkten. Under mötet accepterade jag uppdraget att göra klart ett förslag till slutrapport. Efter mycket arbete var förslaget klart i maj 2005. Därefter har ett antal förseningar skett. OECD/NEA glömde att låta WPNCs granska rapporten (fel av WPNCs som inte sagt till om det). Jag själv fick inte möjlighet att kontrollera att överföringen från format i Microsoft Word till OECD/NEA:s system blev korrekt (massor av fel, inklusive hela och delar av tabeller som förlorades). Den felaktiga rapporten trycktes utan kontroll hösten 2005 men distribuerades aldrig.

Efter granskning av WPNCs under våren 2006 gjorde jag en del mindre ändringar. OECD/NEA har på grund av begränsade resurser inte fått publiceringen klar förrän i slutet av februari 2007 [4]. Rapporten innehåller många färgade figurer och flera granskare angav att rapporten bör tryckas i färg. Det blir dock för dyrt och alternativet valdes att enbart distribuera den omfattande rapporten (mer än 500 sidor) med huvudkapitlet i pappersformat och resten som CD-ROM.

Slutrapporten innehåller mycket viktiga erfarenheter, resultat och tillämpningar som ligger långt före andra liknande arbeten. Detta har exempelvis uttryckts flera gånger vid ISO- och ANS-möten (Calvin Hopper). Det är min avsikt att följa upp arbetet med uppdateringar av jämförelser och av referensvärden baserad på nyare information.

Vid ANS Winter Meeting i november 2005 presenterade jag [5] några resultat och slutsatser från slutrapporten, se också Appendix B. Jag har även presenterat resultat och slutsatser vid ISO-möten 2005 och 2006.

Den validering som jag presenterade i [4] avseende SCALE 5 och MCNP 5 med olika tvärsnittsbibliotek har kommit till användning för att styrka kontrollberäkningar vid granskning och för att förstå redovisningar bättre. Formulering av fysikaliska samband och kombination av variationer (osäkerheter med mera) som påbörjades i [4] har vidareutvecklats och tillämpats i praktiken.

De metoder som demonstrerades i [4] är viktiga för att ge stöd för ökad realism i utvärdering av kriticitetssäkerhet.

Under hösten 2006 fick jag efter många försök tillgång till japanska resultat [6] varav många avsåg system identiska med de i [4]. Den japanska myndighet som sponsrat beräkningarna har inte tillåtit JAEA (tidigare JAERI) att distribuera resultaten. Beräkningarna var gjorda med tvärsnittsbiblioteket JENDL-3.2, alltså inte det senaste som är JENDL 3-3. Resultaten innehåller korrektioner för bias. Överensstämmelsen med mina resultat för JENDL-3.2 (också biaskorrigerade) är mycket god för nästan alla jämförbara system.

De stora fel och osäkerheter som finns enligt [4] i de ekvationer som används för att bestämma atomdensiteter av komponenter i lösningar av typ uranylnitratlösning (UNH) är oroväckande. Liknande fel kan finnas också i ekvationer för  $\text{UO}_2\text{F}_2$ -lösning i vatten.

## 5. Benchmarks för utvärdering av bestrålat bränsle

### 5.1. Bakgrund

En fara är att låta krav på kvalitet styras av olika specialister på metoder eller av generella kriterier. Så har gjorts tidigare i kriticitetssäkerhet och speciellt komplicerat vid utbränningskreditering. Det är slutanvändarna som skall avgöra vad som är en värdefull benchmark. Ibland är en mycket stor osäkerhet helt acceptabel, i andra fall inte. Varje objektiv observation kan vara värdefull som benchmark.

Som exempel kan nämnas att en 50 % osäkerhet (99 % konfidens) i inverkan av fissionsprodukter på  $k_{\text{eff}}$  kan ge tillräcklig noggrannhet. Man kanske bara behöver beakta 20 % av den bästa uppskattningen av verklig inverkan för att få tillräcklig säkerhet.

När det gäller bestrålat bränsle så undrar man hur det över huvud taget kan tillåtas att det hanteras, förvaras och transporteras. Vad finns det för benchmarks som kan styrka att inte  $k_{\text{eff}}$  utan fissionsprodukter och många absorberande aktinidnuklider ökar vid bestrålning (aktuella kriterier av NRC)? Det är lång erfarenhet av reaktordrift, upparbetning, studier av bridning, etc. som har lett till denna slutsats. För BWR-bränsle, med närvaro av brännbara absorberare, är det dessutom inte korrekt vilket förvånansvärt många inte förstått förrän nyligen.

Även kemiska analyser med stor osäkerhet kan alltså vara värdefulla att ta med som benchmarks om man kan specificera osäkerheten på något trovärdigt sätt.

### 5.2. VVER och andra bränsletyper än BWR och PWR

Många av öststaterna i Europa och Finland har reaktorer av typ VVER. Bränslet har annan utformning (hexagonal bränslepatron) men driftförhållanden är till viss del likadana som för PWR. Industri och myndigheter i stater med VVER är intresserade av bättre stöd för att implementera utbränningskreditering.

Eftersom OECD/NEA i andra sammanhang stöttat projekt för speciella behov önskade några stater med VVER stöd från OECD/NEA för att utföra och utvärdera nya kemiska analyser av bestrålat bränsle av ty VVER. Ett tvådagars möte ("Workshop") hölls därför i Rez utanför Prag för att diskutera befintliga resultat och möjligheter att gå vidare.

Jag deltog i mötet och gjorde en presentation av några nya erfarenheter avseende utbränningskreditering. Intresset var stort och många föredrag från USA och Frankrike visade att man där såg frågan om VVER som väsentligt även för länder utan VVER.

En slutrapport från mötet har nyligen publicerats [3].

### **5.3. SFCOMPO – Revidering och utökning**

Databasen SFCOMPO [9] innehåller ett antal äldre specifikationer för bestrålade bränsleprovers bestrålningshistorik och resultat från kemisk analys av proverna. Avsikten är att använda specifikationerna som benchmarks för test av beräkningsmetoder.

Expertgruppen avseende utbränningskreditering har tagit initiativ till en ny, självständig expertgrupp för att uppdatera och utvidga SFCOMPO med nya specifikationer. Det är viktigt att detta arbete inte begränsas till utbränningskreditering och inte heller till kriticitetssäkerhet. Det primära med projekt som detta är att skapa benchmarks för test av beräkningsmetoder. En speciell uppgift är också att dokumentera metoder för och erfarenheter från kemisk analys av bestrålat bränsle.

Ett ”kick-off”-möte, där jag deltog tillsammans med David Shrire från Vattenfall, hölls i Paris i oktober 2006 för att förbereda kommande studie. Tiden från preliminärt beslut om bildande av expertgruppen i början av september till mötet var för kort för att få fram de (för WPNCs) nya specialisterna avseende kemisk analys som efterfrågades. Det verkar dock som om projektet blir av. Föreslagen representant för Sverige (industri och SKI) är Hans-Urs Zwicky.

Ett möte med eventuella föredrag kommer att hållas i samband med ICNC 2007 i S:t Petersburg i slutet av maj 2007.

## **6. Källkonvergens**

### **6.1. Fas I: Beräkning av utvalda problem (ej benchmarks)**

OECD/NEA/NSC/WPNCs expertgrupp avseende källkonvergens har avslutat fas 1 och en slutrapport har publicerats under hösten 2006 [10]. Jag har deltagit aktivt både i beräkningar, möten och vid granskning av slutrapport (många ändringar).

### **6.2. Fas II: Sammanställning av metoder och kriterier**

Arbetet fortsätter med fas 2 som avser rådgivning avseende källkonvergens. Eventuellt blir jag medförfattare i presentation vid ICNC 2007. Jag representerar slutanvändaren medan några andra mer representerar programutvecklare.

## **7. Simulering av kriticitetsförlopp**

Både OECD/NEA och ISO arbetar med denna fråga. OECD/NEA:s expertgrupp har avslutat fas 1 som avser preliminär utvärdering med metoder som är under utveckling. Jag har varit intresserad av att delta aktivt men inte lyckats få tag på lämpligt beräkningsprogram. Utkast till slutrapport för fas 1 har granskats för OECD/NEA och en del tekniska felaktigheter upptäcktes.

## 8. ICSBEP-handboken med benchmarks

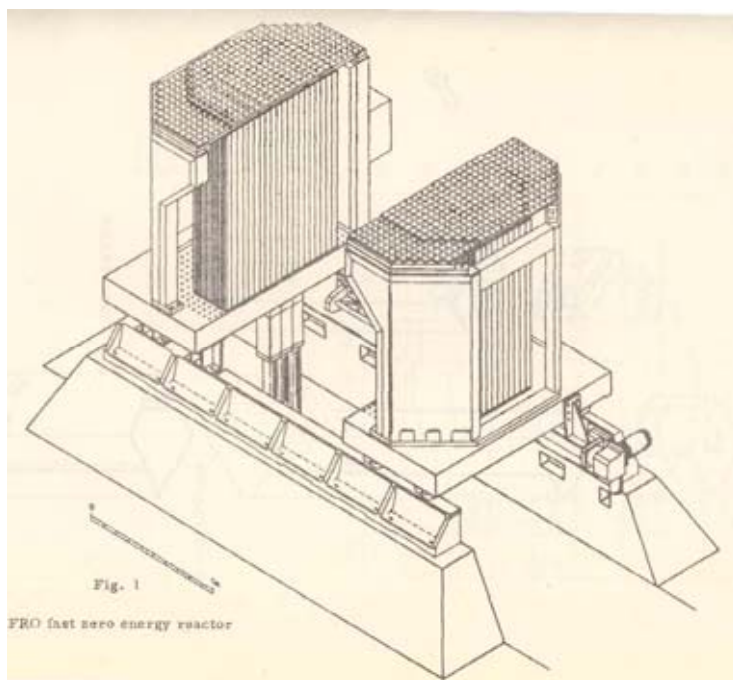
### 8.1. ICSBEP-handboken

Ny version av ICSBEP-handboken kom ut i september 2006 [2]. Efter den stora validering och utvärdering som gjordes hösten 2004 avseende OECD/NEA-studie av referensvärden så har jag inte lagt ned någon tid på validering av beräkningsmetoder. I den nya handboken finns dock många nya benchmarks varav många är intressanta vid tillämpningar i Sverige.

### 8.2. Svenskt bidrag avseende FR-0 i Studsvik

Många länder har deltagit och bidragit med experimentella resultat till handboken, dock inte Sverige. Under ANS-möte i november blev jag tillfrågad av ledaren av ICSBEP, Blair Briggs om en experimentserie som utfördes vid FR-0 reaktorn i Studsvik under mitten av 1960-talet. Det fanns intresse i USA av dessa experiment. Senare fick jag ett email med en direkt inbjudan att bidra med utvärdering av experimenten och framtagning av specifikationer i form av benchmarks.

Jag har svarat Briggs att jag skall göra allt jag kan för att få fram tillräckligt underlag och sammanställa benchmarks. Ett antal öppna Studsviksrapporter har lånats från Studsviksbiblioteket i december 2006 och tidskriftsartiklar har kopierats. Studsvik har medgivit tillgång till en del interna dokument som kan kopieras (om de kan hittas i arkivet). Arbetsdokument kan avgöra hur stora osäkerheter som kommer att behäfta färdiga benchmarks. Några av de som deltog i experimentserien har bidragit med värdefulla uppgifter.



Figur 1. Den snabba experimentreaktorn FR-0 i Studsvik på 1960-talet



## 9. ICNC 2007

En ny stor internationell konferens avseende kriticitetssäkerhet närmar sig [12]. Det gäller ICNC 2007 i S:t Petersburg i slutet av maj 2007. Enligt officiella uppgifter är det konferens nummer 8 och det kan stämma men det är tveksamt om listan är korrekt. De konferenser som jag (och andra) anser vara de två första konferenserna var i Karlsruhe 1961 och i Stockholm 1965 (Alt 1 och Alt 2 nedan) medan de som anges som de två första sedan ICNC 1995 egentligen var slutna möten med speciella intressen.

1. 1980 i Los Alamos, USA. Möte avseende kritiska experiment med ett begränsat antal inbjudna specialister från länder som hade sådana anordningar vid aktuell tid. Någon publicering av information från detta möte har såvida jag vet aldrig gjorts. Jag var inte med.

Alt 1 1961 Karlsruhe, Tyskland. OECD-konferens för generell kriticitetssäkerhet

2. 1983 i Dijon, Frankrike. Fortsättning av samarbete avseende kritiska experiment enligt möte 1. Endast inbjudna deltagare från länder med kritiska experiment. Jag deltog efter att ha frågat själv (ej inbjuden från början).

Alt 2 1965 i Stockholm. IAEA-konferens för generell kriticitetssäkerhet.

3. 1987 Tokyo, Japan. Kallad ICSC '87. Denna gång var konferensen öppen och avsåg hela området kriticitetssäkerhet.
4. 1991 i Oxford, Storbritannien.
5. 1995 i Albuquerque, USA.
6. 1999 i Versailles, Frankrike
7. 2003 i Tokaimura, Japan
8. 2007 i S:t Petersburg, Ryssland

Avseende ICNC 2007 har jag deltagit i utvärderingen av förslag till föredrag. Av totalt cirka 170 förslag så bör endast cirka hälften accepteras som föredrag om agendan skall följas med två parallella sessioner. En stor del av de övriga kan bli posters. Jag har sett samtliga inlämnade förslag till föredrag men endast lämnat synpunkter på cirka 50 av dem (det saknades granskare så några fick ta på sig mer än vad som planerats). Mitt förslag som till stor del bygger på arbete för SKI och DfT under 2006 är accepterat som poster.

## Referenser

- [1] OECD/NEA/NSC Working Party on Nuclear Criticality Safety, <http://www.nea.fr/html/science/wpncs/index.html>
- [2] International Criticality Safety Benchmark Evaluation Project, *International Handbook on Evaluation of Criticality Safety Benchmark Experiments*, OECD/NEA/NCS/WPNCs, 2006
- [3] Workshop Proceedings, *The Need for Post Irradiation Experiments to Validate Fuel Depletion Calculation Methodologies*, OECD/NEA/NSC/WPNCs, Workshop on 11-12 May 2006 i Prag. Publicerad december 2006.
- [4] D. Mennerdahl, *Reference Values for Nuclear Criticality Safety*, OECD/NEA/NSC/WPNCs, Slutrapport distribuerad februari 2007. <http://www.nea.fr/html/science/pubs/2006/nea5433/>
- [5] D. Mennerdahl, *Evaluation of Criticality Safety Reference Values – First Iteration*, Sid 249-250 i Transactions, ANS Winter Meeting, november 2005.
- [6] MEXT, *Data Collection II*, Sammanställning av referensvärden utförda av JAERI (numera JAEA) med tvärsnittsbiblioteket JENDL-3.2. På japanska, mars 2004.
- [7] J. C. Neuber with slight modifications by M. Brady-Raap, *Burnup Credit Criticality Benchmark*, Utkast från september 2006.
- [8] A. Barreau, *Burn-up Credit Criticality Benchmark, Phase II-D, PWR-UO<sub>2</sub> Assembly, Study of Control Rod Effects on Spent Fuel Composition*, OECD/NEA/NSC/WPNCs,. Publicerad december 2006, <http://www.nea.fr/html/science/nea6227-burnupIID.pdf>
- [9] OECD/NEA/NSC, SFCOMPO, <http://www.nea.fr/sfcompo/>
- [10] R. Blomquist et. al., *Source Convergence in Criticality Safety Analyses, Phase I: Results for Four Test Problems*, OECD/NEA/NSC/WPNCs, 2006. <http://www.nea.fr/html/science/pubs/2006/nea5431-source-convergence.pdf>
- [11] Y. Miyoshi et al., *Inter-Code Comparison Exercise for Criticality Excursion Analysis, Benchmark Phase 1: Pulse Mode Experiments with Uranyl Nitrate Solution using TRACY and SILENE*, Utkast september 2006.
- [12] The 8th International Conference On Nuclear Criticality Safety, 28 maj – 1 juni, 2007, S:t Petersburg, Ryssland, <http://www.icnc2007.com/>
- [13] OECD/NEA/NSC/WPNCs, *Burnup Credit Criticality – Summary Record of the Fifteenth Meeting*, 30 augusti 2006. Protokoll distribuerat 7 november 2006.
- [14] M. Brady-Raap, *Lessons Learned from International Investigations of Burnup Credit Criticality*, Utkast för diskussion, 14 oktober 2006.
- [15] OECD/NEA/NSC/WPNCs, *Source Convergence Analysis – Summary Record of the Sixth Meeting*, 31 augusti 2006. Protokoll distribuerat 29 november 2006.
- [16] R. N. Blomquist et al., *NEA Expert Group on Source Convergence Phase II : Guidance on Source Convergence to Criticality Safety Computations*, Förslag till presentation vid ICNC 2007.
- [17] OECD/NEA/NSC, *KICK OFF meeting of the OECD/NEA Expert Group on Assay Data of Spent Nuclear Fuel*, Protokoll från möte 27 oktober 2006.
- [18] NEA/SEN/NSC/WPNCs(2006)1, *Summary Record of the Tenth Meeting*, Working Party on Nuclear Criticality Safety (WPNCs), Distribuerat i februari 2007 (mötet var 1 september 2006).
- [19] NEA/SEN/NSC/WPNCs(2006)?, *Summary Record of the Sixth Meeting of the Expert Group on Criticality Excursion Analyses*, Utkast I februari 2007 (mötet var 31 augusti 2006).



## Appendix A. Reservation to evaluation of fission density distributions

Dennis Mennerdahl, E Mennerdahl Systems (EMS)

The Phase IIC study by the Burnup Credit Expert Group of the OECD/NEA/NSC Working Party on Criticality Safety is of special interest because it is based on realistic axial burnup profiles. Further, the availability of nuclide densities for the most significant actinide and fission product nuclides makes calculation comparisons easy and clear.

The final specifications for Phase II-C are dated December 3, 2000. They are available on the web page for the Burnup Credit Expert Group. Reference 3 in the final report is a document that was distributed in July 2002, after the contributions from participants were made. The July 2002 document adds the claim that convergence of the fission source distribution requires more neutron histories than the calculation of  $k_{\text{eff}}$ .

Criticality safety specialists recognize that a reliable  $k_{\text{eff}}$  determination using a Monte Carlo code requires a converged fission source distribution. The specialists who contributed results surely considered those results to be based on converged fission source distributions.

This reservation refers to the emphasis given in the final report on zones with very low fission probabilities and without significance to  $k_{\text{eff}}$ . A logarithmic scale of the charts of normalised fission densities emphasizes such zones. The convergence of a distribution has been confused with convergence of fission densities in each zone.

The final report also claims that the axial fission density distribution reflects the importance of each axial zone for the reactivity of a fuel assembly. This is not correct; there is no such direct relationship between fissions and reactivity.

The problem in using non-significant zones to determine source convergence while determining  $k_{\text{eff}}$  was pointed out by several participants during the study. In particular, results by JAERI were published in March 2003 [1]. During Expert Group meetings and in comments to various draft reports for the study, EMS has been careful to point out the problems leading to this reservation.

The suggestion that statistical convergence of fission densities in each individual zone is required for convergence of the overall fission density distribution used to determine  $k_{\text{eff}}$  or reactivity (a change in  $k_{\text{eff}}$ ) is not acceptable. It can lead to extremely long calculation times without giving any additional information.

Further, if an accurate determination of the fission density in a zone is requested for some reason, it should be done right. In a Monte Carlo calculation, the determination of local fission densities should start only when the fission density distribution is converged. How such convergence is obtained is not essential for the study. It may be obtained through preparatory calculations or during the same run as the final determination. In the first case, the number of skipped generations will be small or zero, while it can be large for the second case. There is no magic number of initial generations that should be skipped since such conclusions depend on the starting source distribution.

The absolute (as opposed to the normalised) fission density depends on the source. The benchmark specifications did not include a source. The participants typically chose to track between one and ten million neutrons. It is often not necessary to track so many neutrons but the calculation time is normally not a problem. Increasing it by a factor hundred would be.

What are the correct fission densities in various zones if the total source is ten million neutrons or less? Several contributions indicate that some densities should be zero. Additional studies by JAERI [1], EMS and by the coordinator confirm this.

The specifications of irradiated fuel need to include axial variations to give support for an accurate determination of  $k_{\text{eff}}$ . Near the top and bottom of the fuel assembly, the axial height of the zones should be no more than 20 cm while it can be larger in a zone near the axial centre of the assembly. Low or zero fission densities in some of the zones is not necessarily a reason to worry. Only if the densities are different than expected, and this goes for any deviation (high or low), additional studies may be motivated. Keeping the specifications of the fuel identical in evaluations of different scenarios is an advantage when searching for consistency between calculations and expectations.

The final report points out contributions with low fission densities as less reliable than others. If accurate fission densities are requested for some reason, it should be the other way around; contributions with high fission densities where they are not expected could be questioned. However, the purpose of the study was criticality safety with  $k_{\text{eff}}$  and reactivity determinations. Large variations in insignificant zones are not a problem.

The final report recalculations of fission densities are not correct for many zones. Calculations made by EMS in the summer 2005 using SCALE 5, KENO-V.a and 238 group cross-sections give statistically more accurate results than previous contributions. The neutrons were started near the top, in a region 350-370 cm from the bottom of the active fuel section. There were 5 000 neutrons per generation, 100 000 generations from which the first 5 000 generations were skipped. This means a total of 475 million active neutrons per case.

The results are clear and revealing. Several cases still have zero fission densities. For case 19, doubling the number of histories does not reduce the number of zero fission density zones. Rather, the results indicate that some of the zone densities for the first run with 475 million histories are not converged. In order to get non-zero fission densities for all zones, it is probable that thousands of millions ( $10^9$ ) active neutrons need tracking. Calculations have also been made with MCNP5 using similar statistics. The results confirm the very low fission probabilities from KENO-V.a in some zones.

Charts with calculation results for cases 1-34 are shown on the following pages. In logarithmic charts, zero fission densities are replaced with some very low number to avoid complaints from Microsoft Excel about logarithms of zero. All calculated values are within the shown scales.

## Reference

T. Kurioishi et al., *Extended Calculations of OECD/NEA Phase II-C Burnup Credit Criticality Benchmark Problem for PWR Spent Fuel Transport Cask by Using MCNP-4B2 Code with JENDL-3.2 Library*. JAERI-Tech 2003-021, March 2003.

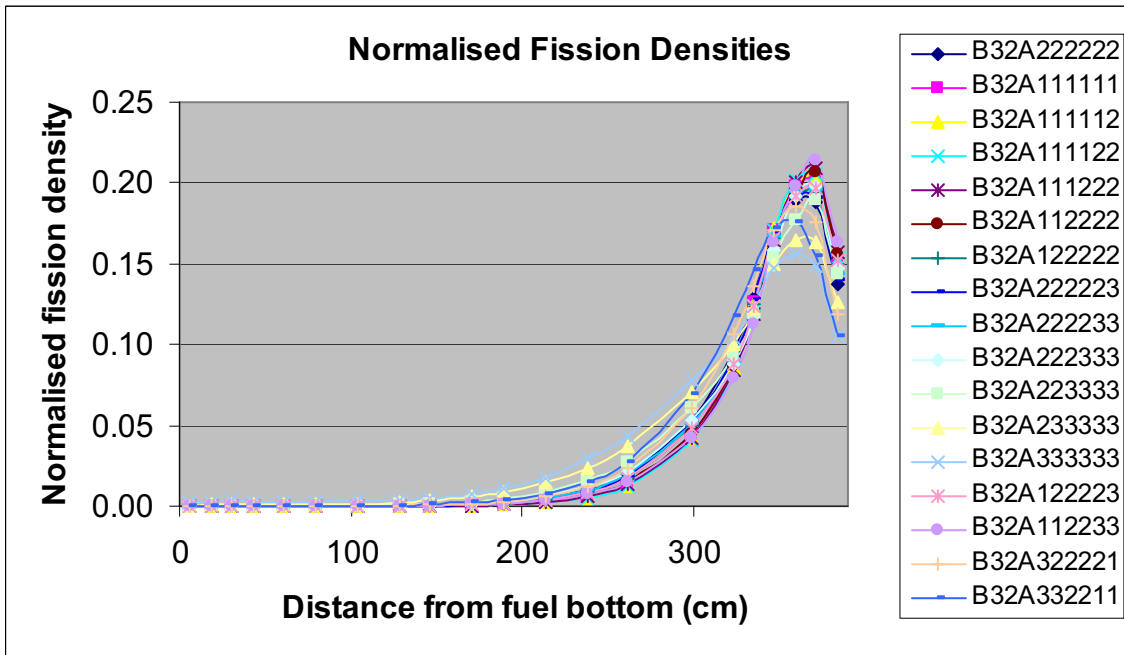


Figure 1. Average burnup of 32 GWd/tU, linear scale

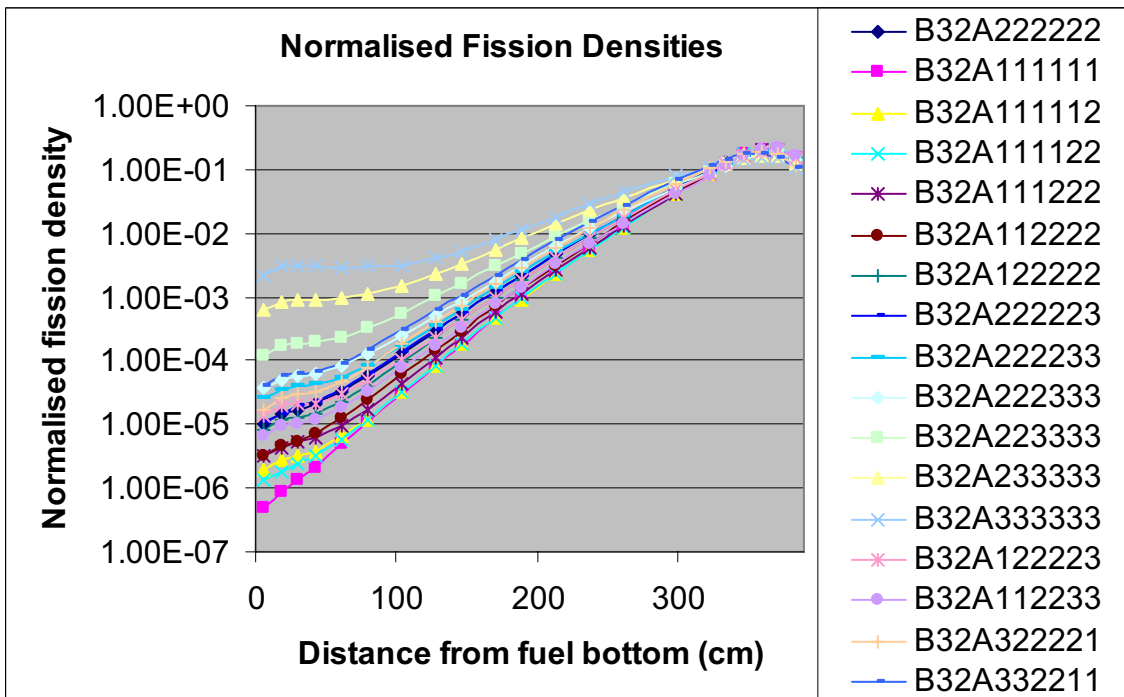


Figure 2. Average burnup of 32 GWd/tU, logarithmic scale

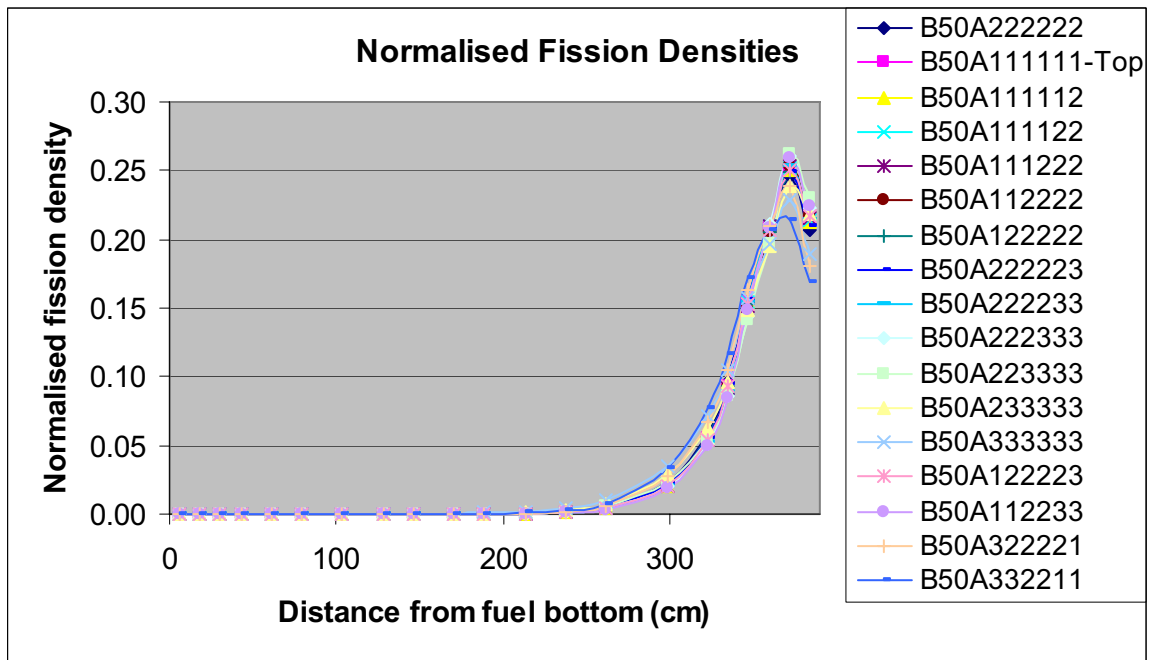


Figure 3. Average burnup of 50 GWd/tU, linear scale

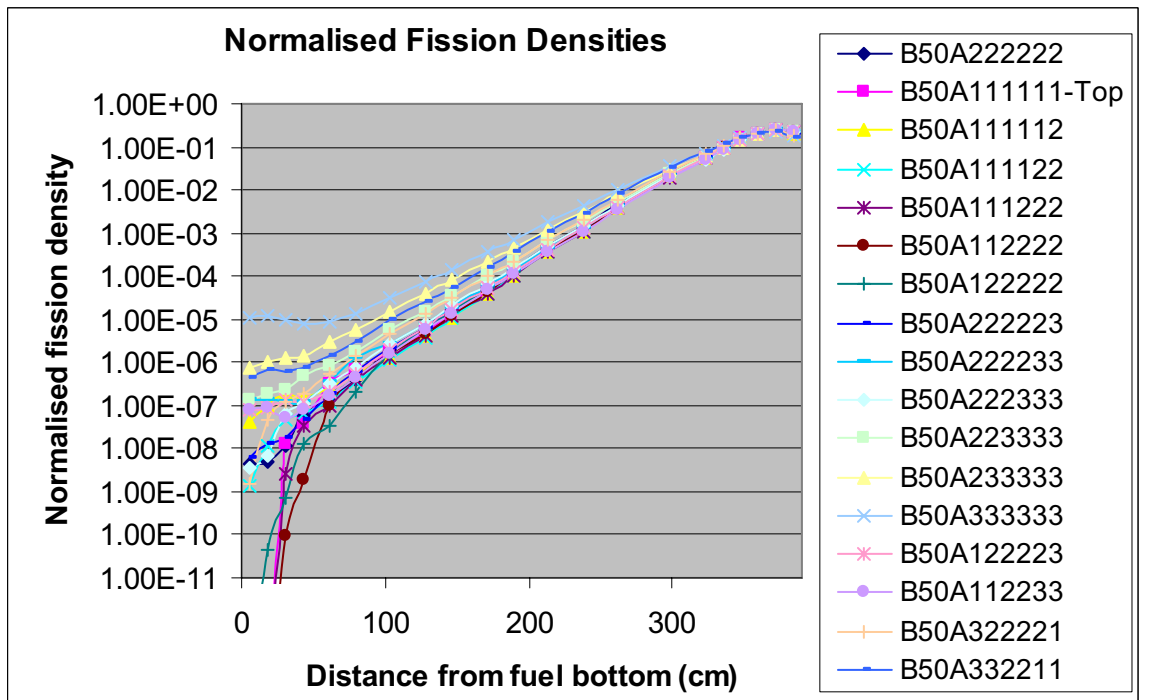


Figure 4. Average burnup of 50 GWd/tU, logarithmic scale

## Appendix B. Evaluation of criticality safety reference values – First iteration

### INTRODUCTION

This presentation refers to an evaluation by the author related to a study titled Minimum Critical Values by an international expert group. The study was started around 1999 by the Working Party on Nuclear Criticality Safety (WPNCS), administrated by the Nuclear Science Committee (NSC), which is supported by the Nuclear Energy Agency within the Organisation for Economic Cooperation and Development (OECD/NEA). Preliminary work of the group was reported at ICNC 2003 [1]. A draft report covering the evaluation has been proposed to OECD/NEA.

Reference values in the form of parameter values (e.g. mass, volume, cylinder diameter, slab thickness, fissile material concentration, moderation ratio) that give criticality or some other value of  $k_{\text{eff}}$  for systems under well-specified conditions represent physical constants. The true values are thus independent on calculation methods, data, measurements, safety criteria, policies, etc. Reference values are not restricted to minimum critical values or systems with specified  $k_{\text{eff}}$  values. Values of  $k_{\infty}$  are examples of special interest.

Reference values are essential in the generation of safety values and limits, benchmarks for calculation methods, support for emergency preparedness, comparison of calculation methods, etc.

Reference values are perfect applications for testing of validation techniques. Once validated, the reference values turn into benchmarks themselves, often with lower uncertainties than individual experimental benchmarks.

### SCOPE AND OBJECTIVES

The expert group compiled various estimates of the requested physical constants [1]. The values came from handbooks, direct and bias-corrected calculation results. The bias-corrections were based on very broad validation efforts that should not be expected to give very accurate results for specific applications. The large uncertainties make the validations appropriate for safety applications but not for determination of physical constants.

A major objective was to identify and explain discrepancies. The spread of results was sometimes confusing. To determine if a deviation also was a discrepancy, it was essential to determine a best-estimate reference value using some relatively objective method.

Another primary objective was to evaluate methods for determination of nuclide densities, in particular in soluble fissile materials. Unfortunately, the materials representing the regions between solubility limits and crystal densities were not specified clearly enough. The

intention was a homogeneous mixture of a solution at the limit and the material in crystallised form.

The fissile materials were limited to either uranium or plutonium in dioxide or nitrate chemical forms (no acid). The selected actinide nuclides were  $U^{235}$ ,  $U^{238}$ ,  $Pu^{239}$ ,  $Pu^{240}$ ,  $Pu^{241}$  and  $Pu^{242}$ . A range of isotopic distributions was selected for either actinide (five for uranium and six for plutonium).

110 systems were selected leading to 132 requested reference values. The minimum fissile concentration corresponds to the maximum moderation atomic ratio. The atomic ratio is a “cleaner” control than the concentration in g/l since that depends on additional specifications. All systems were reflected by water and the water moderation was optimized for each system.

### VALIDATION

Since the initiation in 1980, OECD/NEA criticality safety studies have started with calculations of experimental benchmarks to support evaluation of later evaluation problems. The ICSBEP handbook [2] has later become an excellent support for such validation.

Some of the contributors provided bias-corrected values, based on validation against critical experiment benchmarks.

During the final evaluation, a number of uranium and plutonium benchmarks were selected by the author from the ICSBEP handbook. The primary criterion was simplicity in geometry and limitation of materials to the most significant.

Another important selection criterion was the uncertainty of each benchmark. A benchmark with a low uncertainty should be weighted higher than one with a higher uncertainty (square to the uncertainty ratio).

The new SCALE 5 [3] TSUNAMI tools were used to further select and weight various benchmarks. The EALF (energy corresponding to average lethargy of neutrons causing fission) value generated in SCALE 5 and MCNP5 [4] outputs appears to be a good trending parameter. Another trending parameter is  $^{235}\text{U}$  enrichment.

The input data for SCALE 5 and MCNP5 validation were taken from the ICSBEP handbook. These are intended as examples and to support the documentation of the calculation results given in the handbook. They are not intended for validation of methods. Some serious errors were found in the handbook example input data.

It became clear that for many systems, the selected benchmarks or their sample inputs were not sufficient. For demonstration, the validation results were still used to bias-correct the calculated values.



## METHODS USED IN THE FINAL EVALUATION

SCALE 5 together with the 27 group ENDF/B-IV as well as with the 44-group and 238-group ENDF/B-V libraries were selected due to their popularity and long-term use in criticality safety applications. In addition, MCNP5 and a large number of cross-section libraries in continuous energy format were selected due to their importance and availability. The MCNP5 libraries (sources are given in the report) can be identified from their short names: ENDF/B-V, ENDF/B-VI.2, ENDF/B-VI.6, ENDF/B-VI.8, ENDF/B-PreVII, JEF-2.2, JEFF 3.0, JENDL-3.2 and JENDL-3.3.

A target accuracy of the reference values was set to 0.001 at the 95 % level of confidence. The Monte Carlo statistics were set to generate standard deviations about 0.0005 or lower.

In addition to four of the above bias-corrected calculations (SCALE 5 with the 238-group library and MCNP5 with the latest version of each of the three major libraries) carried out by the author, bias-corrected calculation results contributed by Serco Ass. (UK), IPPE (Russia) and IRSN (France) were used to derive a first iteration of reference values, see Table I.

During the study, it became clear that deterministic code calculations for fast systems, in particular for slabs, require tighter convergence, mesh, angular quadrature, scattering order, more energy groups, etc. than for well-moderated systems.

Material	Critical mass (kg)	Critical volume (litre)	Critical cyl. $\Phi$ (cm)	Critical slab T (cm)	Critical U/Pu C (g/litre)
U(100)O <sub>2</sub>	0.798	4.38	12.47	3.45	12.18
U(20)O <sub>2</sub>	5.22	10.78	17.97	7.24	64.0
U(5)O <sub>2</sub>	37.0	27.91	25.68	12.17	285.6
U(4)O <sub>2</sub>	55.1	35.7	28.25	13.77	369.3
U(3)O <sub>2</sub>	99.0	53.5	32.79	16.69	522
U(100)NH	0.826	6.70	14.95	5.46	12.23
U(20)NH	6.13	16.30	21.00	9.29	64.8
U(5)NH	75.4	80.7	37.9	20.04	311.4
U(4)NH	144	136	45.4	25.05	416
U(3)NH	469	370	64.8	37.5	629
Pu(100)O <sub>2</sub>	0.510	1.151	7.68	1.721	7.28
Pu(95/5)O <sub>2</sub>	0.621	1.236	7.95	1.934	7.88
Pu(80/10/10)O <sub>2</sub>	0.686	1.288	8.04	1.912	8.16
Pu(90/10)O <sub>2</sub>	0.754	1.307	8.15	2.066	8.56
Pu(80/15/5)O <sub>2</sub>	0.874	1.367	8.27	2.096	9.09
Pu(71/17/11/1)O <sub>2</sub>	0.907	1.413	8.37	2.104	9.28
Pu(100)NH	0.524	7.36	15.56	5.67	7.33
Pu(95/5)NH	0.639	10.78	17.94	7.18	7.93
Pu(80/10/10)NH	0.707	12.18	18.74	7.61	8.19
Pu(90/10)NH	0.777	13.42	19.48	8.11	8.59
Pu(80/15/5)NH	0.905	15.42	20.54	8.75	9.15
Pu(71/17/11/1)NH	0.948	15.83	20.72	8.89	9.31

Table I. Reference values – First iteration

## EVALUATION RESULTS

For nitrate systems above the solubility limit, only IRSN results were considered validated due to the issue of nuclide densities. IPPE results are also credible at or near the crystal densities.

The validation sometimes was quite successful, sometimes not. The full report shows how the reference values were determined as well as suggested uncertainties. It will be easy to improve many values, in particular in a continued OECD/NEA study. However, as a first iteration based on many recent cross-section libraries, validation using many ICSBEP handbook benchmarks, similarity testing using TSUNAMI tools and some nuclide density checking, the first iteration of reference values shown in Table I should be of some interest. A comparison of values for Pu(95/5)O<sub>2</sub> and Pu(80/10/10)O<sub>2</sub> is particularly interesting (slab).

## CONCLUSIONS

With proper validation it is today possible to derive reference values with small uncertainties for most of the systems studied. It seems likely that the uncertainty for each reference value can be made smaller than the uncertainties of most experimental benchmarks. The reference values become benchmarks.

One of the purposes of the expert group study was to identify discrepancies in handbooks and other published values and to explain them. Several large discrepancies have been identified and explained during the study.

A continued study would be expected to lead to a consensus on many reference values, with low uncertainties. Such a study would fit very well within the current OECD/NEA efforts related to data improvement, benchmark compilations, methods comparison, etc.

## REFERENCES

- [20] 1. W. Weber, D. Mennerdahl, "Results of an OECD/NEA Comparison of Minimum Critical Values", ICNC 2003, Tokai-Mura, October 2003.
- [21] 2. International Criticality Safety Benchmark Evaluation Project Handbook, OECD, NEA/NSC/DOC(95)03. September 2004.
- [22] 3. "SCALE 5", Vols. I-III, ORNL/TM-2005/39, ORNL, RSICC package CCC-725, April 2005.
- [23] 4. "MCNP5\_RSICC\_1.30", LANL X5 Team, RSICC package C00710MNYCP02, November 2004.

[www.ski.se](http://www.ski.se)

**STATENS KÄRNKRAFTINSPEKTION**  
Swedish Nuclear Power Inspectorate

**POST/POSTAL ADDRESS** SE-106 58 Stockholm

**BESÖK/OFFICE** Klarabergsviadukten 90

**TELEFON/TELEPHONE** +46 (0)8 698 84 00

**TELEFAX** +46 (0)8 661 90 86

**E-POST/E-MAIL** [ski@ski.se](mailto:ski@ski.se)

**WEBBPLATS/WEB SITE** [www.ski.se](http://www.ski.se)