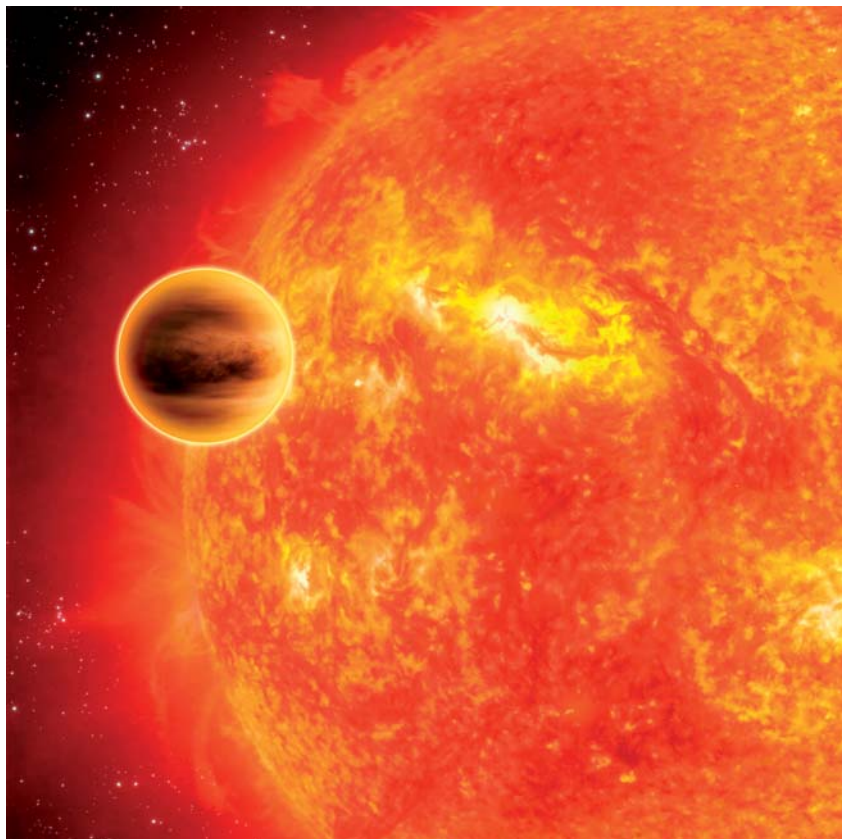


METEORS



SKi

Nr 4/2007



Omslagsbilden: Solens energi är en förutsättning för livet på jorden. Denna kärnreaktor har många likheter med de kärnkraftreaktorer som finns i drift i dag på vår planet. Det finns dock en avgörande skillnad. Solen är en fusionsreaktor, dvs. den alstrar energi genom att slå ihop atomkärnor medan de reaktorer vi får vår dagliga elektricitet från frigör energi genom att klyva atomkärnor. Men redan 1934 gjorde vetenskapsmannen Ernest Rutherford iakttagelsen att kärnsammanslagningen följde en relativt enkel process. Kan vi bemästra denna teknik får vi i ett slag tillgång till en närmast outtömlig energikälla - utan koldioxidutsläpp. Mot bakgrund av att de fossila bränslena - inklusive uran - är begränsade satsar EU tillsammans med sex andra enskilda stater miljardbelopp på att bygga en fusionsanläggning i Cadarache, Frankrike. Läs mer på sid 20 ff.

Illustration: © NASA

NUCLEUS 4/07

- 5 *Inledaren*
Organiserade fullskaleförsök på fusionsområdet
- 6 *Internationellt erfarenhetsutbyte kring robusta elsystem*
Forsmarkshändelsen var inte unik
- 14 *Transmutation ett huvudspår i forskningssamarbetet*
Återanvändning av långlivat avfall
och slutna bränslecykel möjlig i nya reaktortyper
- 20 *ITER-projektet*
Klimatfrågor och energikris starka drivkrafter
för internationell forskning kring fusionsenergi
- 26 *Myndigheten ser över regelverket*
Skärpta och tydligare villkor skall förhindra
att reaktorer körs med högre effekt än tillåtet
- 28 *Stora variationer i hur kärnkraftverken hanterar kompetensöverföringen*
Värdefull information kan gå förlorad
i samband med pensionsavgångar
- 32 *Kontroll av reaktorinneslutningar*
Ingen enskild metod ger i dag fullständigt resultat
– en kombination av olika metoder är nödvändig



Nucleus på svenska och engelska

Varje år sedan 2003 har Nucleus kommit ut med ett nummer på engelska. Normalt är det nummer tre på hösten. Innehållet i detta nummer baserar sig i huvudsak på artiklar som tidigare publicerats i den svenska versionen. Den som bara läser den svenska versionen missar alltså ingen väsentlig information.

Sedan vi nu spridit kunskapens frukt på engelska (se omslaget på förra numret 3/07) till såväl enskilda som myndigheter i ett 40-tal länder är vi tillbaka på originalspråket.

De kommande två numren är också på svenska - sedan sammanfattar vi de tre senaste numren på engelska som ett litet bidrag till den internationella erfarenhetsåterföringen.

Vad som händer efter halvårsskiftet nästa år är dock svårt att sia om nu när SKI då uppgår i en ny myndighet. Har du synpunkter på hur Nucleus fungerat som informationskanal hittills är du välkommen att skriva till:

*Chefredaktören för Nucleus
Lukasvägen 31
27295 Simrishamn*

*eller till:
nucleus@osterlen.info*

NUCLEUS

Chefredaktör
Raoul Hellgren

Ansvarig utgivare
Anders Jörle, SKI

Redaktionskommitté
Lars Bennemo, Lars van Dassen,
Ninos Garis, Lars Hildingsson,
Mattias Jönsson, Gustaf Löwenhielm,
Peter Merck, Leif Pettil, Per-Olof Sandén
och Öivind Toverud.

Layout
Infohuset Vik
Simrishamn

Tryck
Intellecta Tryckindustri AB
Solna

Upplaga
6.000 exemplar

ISSN-nummer
ISSN 1104-4578

Redaktion/adressändringar m.m.
Nucleus
Infohuset Vik
Lukasvägen 31
272 95 Simrishamn

E-post
nucleus@osterlen.info
info@ski.se

Telefon
0708-758 900
Vx/SKI 08-698 84 00

Webbplats
www.ski.se

Artiklar i Nucleus utgår ofta från FoU-projekt och deras tillämpningar vid Statens kärnkraftinspektion, SKI. Tidningen bidrar därmed till SKI:s information när det gäller att sprida ny kunskap om risker och säkerhetshöjande åtgärder. Målgrupper är i första hand lokala säkerhetsnämnder, anställda i kärnkraftsbranschen, forskare, beslutsfattare, media och en intresserad allmänhet. Författarna svarar själva för innehållet i sina artiklar. Materialet får användas fritt om källan uppges. För illustrationer och bilder krävs dock skriftligt tillstånd från upphovsrättsinnehavaren.

Organiserade fullskaleförsök på fusionsområdet

Regeringen har beslutat sig för att testa den fysikaliska teorin kring energins oförstörbarhet genom att slå ihop de två fristående kärntekniska myndigheterna Statens kärnkraftinspektion och Statens strålskyddsinstitut. Att frigöra energi genom att slå ihop två kärnor har länge absorberat ett stort antal forskare runt om i världen. Redan 1934 gjordes upptäckten att fusion mellan atomkärnor var möjlig. Så varför skulle det då inte gå att slå ihop två kärnsäkerhetsmyndigheter år 2008.

Ann-Louise Eksborg som har förordnats till särskild utredare skall dra upp riktlinjerna inför det förestående fullskaleförsöket vilket kommer att genomföras vid halvårsskiftet nästa år (2008). Ann-Louise Eksborg tillträder då tjänsten som generaldirektör för den nya myndigheten.

Vid en internationell jämförelse kan man också konstatera att tillsynen på detta område i de klart övervägande fallen ligger på en myndighet, inte två. Att det finns en gemensam nämnare har också under åren visats genom en viss personalöverströmning mellan de båda myndigheterna. Även om det finns kulturella skillnader mellan organisationerna torde det gå att frigöra en del energi när den nya myndigheten formulerar sin tillsynsstrategi.

Fast teori och praktik är inte alltid samma sak. Efter mer än 70 år sedan de första landvinningarna gjordes på fusionsområdet storsatsar nu EU tillsammans med USA, Ryssland, Japan, Kina, Indien och Sydkorea på att bygga en fusionsanläggning som senare skall bana väg för kommersiella fusionsreaktorer. Lokaliseringen av denna anläggning stod länge och vägde mellan Japan och Frankrike. EU gick segrande ur den kampen och lokaliseringen bestämdes till Cadaracheområdet i Frankrike. Redan nästa år kan bygget kring själva reaktorn börja. Och då gäller det att alla parter drar åt samma håll för att man skall uppnå de hett eftersträlvade målen.

*Raoul Hellgren
chefredaktör*

telefon 0708-758 900



Foto: Ninos Garis © 2006

Internationellt erfarenhetsutbyte kring Forsmarkshändelse



Av Per Bystedt

Artikelförfattaren är utredare på enheten för Anläggningssäkerhet vid Statens kärnkraftinspektion, SKI. Han var tillika samordnare för den internationella konferensen i Stockholm

Kortslutningen i Forsmark sommaren 2006 då delar av säkerhetssystemen slogs ut tvingade fram omedelbara kontroller av elsystemen på samtliga svenska reaktorer. Forsmarkshändelsen fick även stor uppmärksamhet utomlands. I Frankrike, Finland och speciellt i Tyskland återgavs händelsen med stora rubriker. I ett mycket tidigt skede tog SKI kontakt med den finska säkerhetsmyndigheten STUK och den tyska myndighetens expertorgan GRS för att ge information om händelsen samt för att få assistans i utredningsarbetet.

DiDELSYS
Stockholm 5-7 September 2007

Olika myndighetsexperter med lång erfarenhet från arbete kring säkerhet i elsystem kunde snabbt ställa upp och bidra till utredningen. Den stora öppenhet som Forsmarks Kraftgrupp AB (FKA) visade kring händelsen, som även var vägledande för SKI, gav prov på hur värdefullt ett erfarenhetsutbyte kan vara mellan olika länder där liknande händelser inträffat.

I samma anda redovisade SKI tillsammans med Forsmarksverket händelsen i december för OECD/NEA:s expertkommitté CNRA (Committee on Nuclear Regulatory Activities). Det är den grupp som driver samarbetet mellan kärnsäkerhetsmyndigheter inom OECD.

Även OKG (som driver Oskarshamnsverket) var med vid tillfället och presenterade de åtgärder man vidtagit vid reaktorn Oskarshamn 1.

Internationell "workshop"

Från flera håll gav man uttryck för behovet av en bredare genomlysning av säkerhetsfrågorna för

robusta elsystem n var inte unik

elektriska system varför det föll sig naturligt att SKI, på förfrågan från CNRA, tog sig an uppgiften att organisera ett specialistmöte i Stockholm den 5-7 september 2007. OECD/NEA samt IAEA ställde upp som medarrangörer.

Mötet fick benämningen: ”*International Workshop on Defence in Depth aspects in Electrical Systems of Importance for Safety*.” Avgränsningen gjordes för att fokus skulle ligga på ett robust utförande av säkerhetsrelaterade elektriska system. Det mer populära namnet på konferensen blev DiDELSYS.

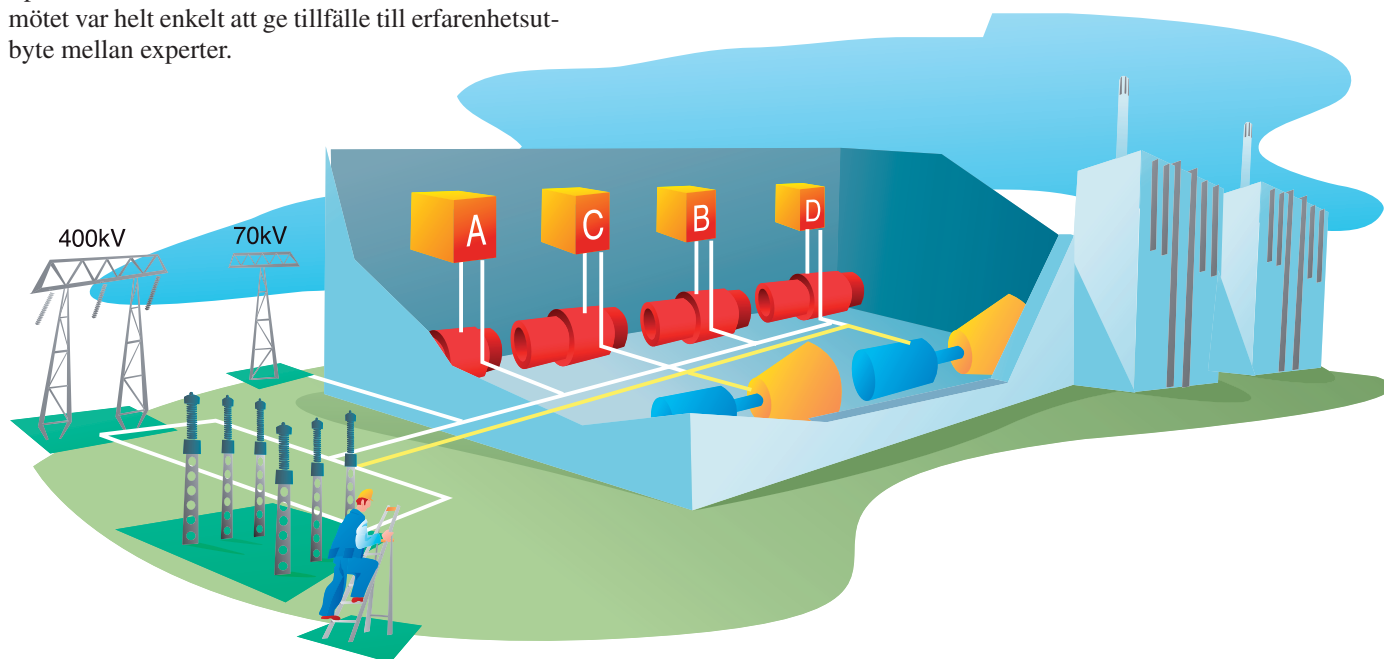
Den programidé som kom att ligga till grund för mötet innefattade tre steg. Först en presentation av händelsen i Forsmark men även av andra händelser involverande elektriska system och som lyft fram problem av generiskt intresse. Därefter en diskussion kring konstruktion och analys av elsystem. Och till sist en diskussion kring samspelet mellan kärnkraftverket och kraftnätet inklusive samverkan mellan de kraftbolag och myndigheter som är aktörerna i produktion och distribution av elkraft. Målet med mötet var helt enkelt att ge tillfälle till erfarenhetsutbyte mellan experter.

Kortslutningen

Den 25 juli 2006 var Forsmark 1 i full drift, 990 MW eleffekt. Efter ett felaktigt utfört underhållsarbete i ställverket kortslöts 400kV-nätet. Anläggningens båda huvudbrytare, en för vardera turbingeneratoren, öppnade och skilde Forsmark 1 från nätet. Dessa första sekunder var förloppet egentligen inte unikt, liknande situationer har tidigare inträffat vid Forsmark liksom vid andra verk.

Det förväntade fortsatta förloppet var att blocket skulle gå över i så kallad husturbindrift, det vill säga att reaktor och turbiner går på tomgång och producerar endast den kraft som anläggningens egna system kräver.

Om inte husturbindriften skulle fungera skulle reaktorn snabbstoppa. Kraft till anläggningens säkerhetssystem matas då antingen från ett lokalt nät med en spänning på 70kV (kan även matas från gasturbin) eller från dieselaggregaten.



I samband med ett underhållsarbete i juli 2006 i 400-kV-ställverket uppstod en kortslutning som drabbade reaktorn Forsmark 1. En spänningspuls gick in i anläggningen och stoppade två av de fyra kraftmatningarna till säkerhetssystemen.

Illustration: Lasse Widlund © Analysgruppen vid KSU

På flygbilden över Forsmarks kärnkraftverk syns ställverket i förgrunden - där den stora kortslutningen inträffade sommaren 2006 efter ett felaktigt utfört underhållsarbete. I mitten av bilden finns de två reaktorblocken 1 & 2 där block 1 (t.h.) var i full drift med 990 MW eleffekt när ställverket kortslöts. Längst till vänster syns block 3.

Foto: Göran Hansson © Forsmarksverket

DiDELSYS

Stockholm 5-7 September 2007

Oväntad effekt på den säkerhetsrelaterade kraftmatningen

Säkerhetssystemen är i allt väsentligt uppbyggda med fyra identiska stråk (A, B, C och D) som var för sig kan försörjas med kraft från ett dieselaggregat. Dessa skall kopplas in automatiskt om spänningen sjunker på elskenan för säkerhetskraften. Allt detta enligt noga genomarbetade analyser.

Men denna tisdag blev utfallet ett annat. Efter någon minut var två av de fyra säkerhetsrelaterade elkraftskenorna matade från sina respektive dieselaggregat. Men de andra två skenorna var spänningslösa, trots att även deras dieslar hade startat.

Anläggningens allmänna nät, det som driver system som inte är säkerhetssystem, var dock spänningssatt från 70kV-nätet. Det paradoxala var att blockets ordinarie kraftmatning fungerade (belysning, kontorsmaskiner etc.) medan endast hälften av den säkerhetsrelaterade kraftmatningen fungerade. Den senare har naturligtvis den högsta förväntade tillförlitligheten.

Akuta tillståndet hävt efter 22 minuter

Operatörerna som tjänstgjorde i kontrollrummet fick hantera en situation som var långt mer krävande än vad som övats i simulatorn. Störningen initierade ett stort antal automatiska funktioner i anläggningen medan visningen i panelerna i kontrollrummet inte var komplett eftersom ett antal instrument saknade el-matning. Operatörerna hanterade situationen förtjänstfullt enligt sina störningsinstruktioner. Efter 22 minuter kopplade de in matningen från 70kV även till de säkerhetsrelaterade skenorna och den akuta delen av händelsen var avslutad.

Det kylvatten som de två fungerande hjälpmatarvattenkretsarna pumpade in i reaktorn var fullt tillräckligt för att hålla bränslet kylt under hela förloppet. Ingen del av reaktorn eller bränslet kom till skada.



Rekonstruktion av förloppet

Orsakssambanden bakom händelsen var en komplex kombination av fel som hade sitt ursprung i konstruktionsfel och i underhållsbrister. Åtskilligt arbete har ägnats åt att rekonstruera förloppet i alla sina detaljer för att finna alla bidragande orsaker.

Händelsen har många dimensioner till exempel konstruktion och analys av elkraftssystem, införande av anläggningsändringar, moderniseringar, kvalitet i underhållsarbete, arbetssituationen i kontrollrum, beslutsfattande i störningssituationer, information till allmänhet samt naturligtvis erfarenhetsåterföring.

I denna artikel beskrivs inte själva förloppet mer i detalj även om det innefattar många intressanta aspekter. Information kring detta finns publicerat i andra sammanhang. I stället koncentreras på säkerheten i elsystem och vad som hänt under det år som gått och vad SKI ser framför sig som fortsatt uppföljning.

Förenklat kan sägas att problemet i Forsmark 1 var att kortslutningen på 400kV nätet genererade en kraftig spänningspuls på generatorskenorna. Denna puls slog ut två av fyra UPS:er, (uninterruptible power supply, aggregat som levererar avbrottsfri kraft från batterier) på grund av att de hade felaktiga inställningar på sina elektriska skydd på såväl ingångs- som utgångssidorna. Ett konstruktionsfel kopplat till automatiken på dieselgeneratorerna



innebar att dieselgeneratorerna var beroende av kraft matad från UPS för att automatiskt anslutas till elsystemet. Med den uppdelning på fyra redundanta stråk som säkerhetssystemen har blev följaktligen de två dieslar som hör samman med de två drabbade UPS:erna inte inkopplade.

Fel med gemensam orsak

Att **ett** fel eller **en** påverkan leder till att flera redundanta system (läs övertalighet i syfte att öka funktionssäkerheten) slås ut benämns CCF, (Common Cause Failure, fel med gemensam orsak). CCF är något som har stor inverkan på säkerheten i kärnkraftverken då de kan hota en hel säkerhetsfunktion. Trots att verken är utrustade med redundanta (övertaliga) säkerhetssystem, vilka ger ett bra skydd mot enstaka fel och mot ett begränsat antal oberoende fel, är det ytterst viktigt att göra noggranna analyser för att bringa full klarhet i bakomliggande orsaker när fel av denna karaktär inträffar.

Hektisk fas under driftstoppen

Tiden efter den 25 juli var naturligtvis hektisk. Noggranna kontroller på alla svenska kärnkraftverk gjordes för att undanröja eventuella liknande fel. Vid Forsmark 1 och även vid Forsmark 2 ändrades inställningarna på skydden för UPS. Dieselaggregatens automatik byggdes om så att de blev oberoende av matning via UPS. Ett flertal förändringar gjordes också på andra system på Forsmarksanläggningen.

FKA stod naturligtvis i centrum av uppmärksamheten; kring själva händelseförloppet, kring säkerheten och kring beslutsfattandet. Även vid Oskarshamnsreaktorerna fick vissa inställningar ändras i skydden till UPS. Viktiga erfarenheter kom att dras för Oskarshamn 1. OKG fattade efter ingående analyser beslut att komplettera reaktorns elsystem med ytterligare oberoende matningar för att motverka risken för CCF. Oskarshamn 1 har relativt nyligen genomgått en omfattande modernisering av bl.a. el- och kontrollsystemen. Trots detta valde OKG att ta ett relativt omfattande stopp för ytterligare ombyggnader.

Ringhals AB (RAB) fann i sina analyser att inga direkta åtgärder var nödvändiga i Ringhalsreaktorerna för säker fortsatt drift. Tiden var även hektisk för SKI med de granskningar och beslut som var nödvändiga. I och med att Oskarshamn 1 startade igen i januari 2007 var åter alla svenska block i drift. Fasen med direkt driftpåverkan var därmed över.

Myndigheten ställer tio krav

Det analysarbete som följde på Forsmarkshändelsen visade att en rad frågor behövde bearbetas på sikt. Som exempel visade det sig att säkerhetsrapporterna för alla reaktorer behövde kompletteras med information om vilka krav som gäller på tålighet mot spänningspulser, liknande den som var den direkta orsaken till CCF i Forsmark 1.

Detta visar att kunskapen om effekten av störningar i elkraftsystemen inte var samlad och presenterad på ett tillfredsställande sätt. SKI satte upp en lista på tio punkter som stöd för inventering av behov av utredningar på en rad skilda områden. De tre punkter med vidhängande frågeställningar som tydligast adresserar säkerheten i elsystemen var:

1. Breddad analys av anläggningens kontroll- och elkraftsystem

Kan felfungerande skydd, enskilt eller i kombination, orsaka att störningar tränger djupare in i anläggningen än förutsett med risk att säkerhetsutrustning påverkas? Kan komplexa störningar ge motsägelsefulla följdfunktioner? Hur påverkas situationen av införande av digitala kontrollsystem?

2. Tillförlitlighet av yttre nät

Är driften av stamnätet samt planering och genomförande av arbeten i ställverk eller andra delar omgärdade av erforderlig kvalitetssäkring för att minimera risken för störningar med säkerhetspåverkan? Är kommunikationen mellan Svenska Kraftnät och kärnkraftverken tillräcklig? Hur förändras eventuellt med tiden tillförlitligheten hos yttre nät?

3. Grundläggande aspekter på diversifiering och robusthet

Ökad säkerhet kan nås genom en utbyggd diversifiering av säkerhetsfunktioner för att skapa

Forsmark 1 – förenklat elschema. Viktiga säkerhetssystem matas från de understa skenorna. Spänningspulsen stoppade UPS-erna A och C. Motsvarande dieselaggregat kopplades inte in. Därför blev skenorna A och B spänningslösa. På C och D fanns spänning från dieselaggregaten.



extra tålighet mot CCF samt genom att eftersträva robusthet. SKIFS 2004:2 ställer explicit krav på detta. Ett antal förslag om åtgärder för införande har presenterats av tillståndshavarna. Med händelsen som bakgrund bör diskussion föras kring grundläggande aspekter av diversifiering och robusthet. Hur omfattande diversifiering bör eftersträvas för bästa säkerhetsnytta?

Diskussion och genomförande av projekt

RAB, OKG och FKA inventerade sina egna behov av utredningar i det längre perspektivet, enskilt och på vissa punkter i samarbete. Därefter formulerades olika utredningsprojekt.

SKI träffade under hösten och vintern företrädare för de tre kraftbolagen för diskussioner om dessa projektplaner. RAB:s projekt benämnt "Robusta Elsystem" kan tjäna som exempel då det är det mest samlade. Arbetet är indelat i faser och planeras vara genomfört i början av 2009. De områden som ingår i fas 1 i RAB:s plan följer nedan (summeriskt) för att ge en kortfattad bild av de problemställningar som kraftbolagen bearbetar.

1. Konstruktionsförutsättningar

Hanterar principer för konstruktion av avbrottsfria nät med beaktande av modern elutrustning samt konstruktionsförutsättningar för komponenter i elsystem.

2. SKIFS / Robusthet

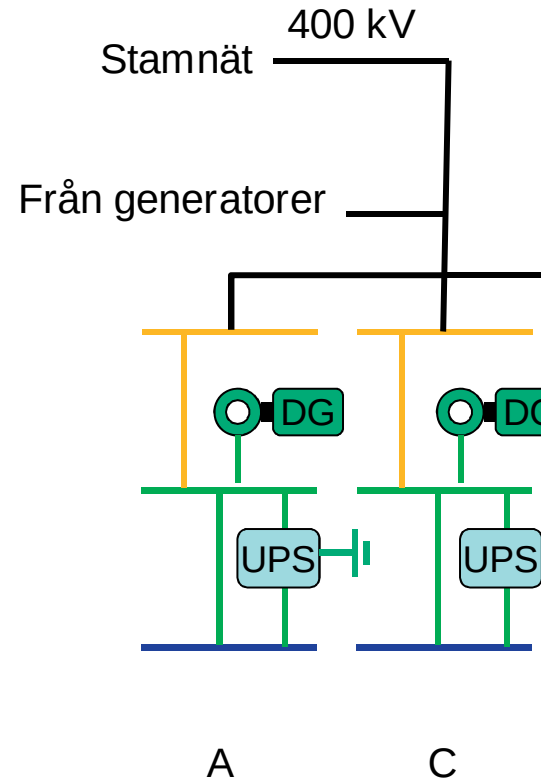
Hanterar tolkningar av SKI:s föreskrift om "Konstruktion och utförande av kärnkraftsreaktor". Redundans, diversifiering, selektivitet och oberoenden mellan delsystem studeras som metoder att nå eftersträvd robusthet.

3. Provning och förebyggande underhåll

Hanterar ett antal frågeställningar om provning av t.ex. reläskyddskretsar samt av moderna komponenter av digitalt utförande.

4. Skyddskoordinering

Hanterar lämpliga principer för inställning och koordinering av skydd så att den eftersträvide selektiviteten nås vid störningar.



5. Dokumentation

Genomgång av säkerhetsredovisningen (SAR) samt värdering i vad mån uppdatering erfordras vad avser nätstörningar.

6. Modellering / analys

Simulering av olika händelser i kraftnätet och deras påverkan genom frekvens- och spänningsavvikelser på elsystemen i Ringhals.

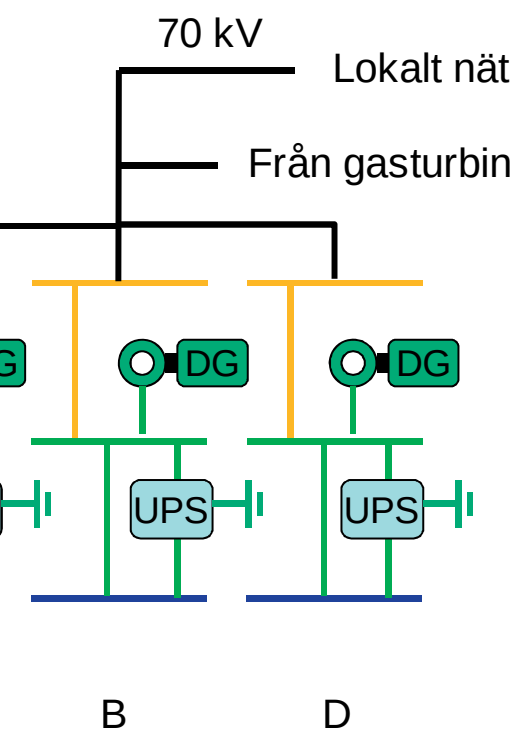
7. Projektstyrningsmodell

Översyn av rutinen för anläggningsändringar.

Samarbetet med OECD/NEA och IAEA kring planeringen av mötet DiDELSYS innebar att inbjudan som gick ut genom deras kanaler fick en mycket stor spridning.

Målsättningen formulerades: "Syftet med mötet är, att baserat på erfarenheter från Forsmarkshändelsen och från händelser i andra kärnkraftverk vinna kunskap om eventuella svagheter i konstruktion, i säkerhetsanalys och i drift av elektriska system som är viktiga för säkerheten och finna tillvägagångssätt att bearbeta och korrigera sådana svagheter."

Självfallet gav Forsmarkshändelsen även värdefulla insikter i mänskligt handlande och i organisatoriska frågor inom begreppet säkerhetskultur. För att organisationen av mötet inte skulle gapa över ett alltför omfattande program gjordes det klart i inbju-



dan att fokus var på de tekniska frågeställningarna och att övriga frågor fick hänvisas till andra sammanhang.

Uppdämt behov diskutera elsäkerhet

Ganska snabbt kom det in tillräckligt med förslag till presentationer för att med råge fylla den tid som var avsatt för mötet. Efter hand strömmade även deltagaranmälningar in i en takt som gjorde att en rejäl omplanering fick göras. Den ursprungliga tanken med en "workshop" med ett begränsat antal specialister fick ge vika för ett mer regelrätt symposium med föreläsningar.

Det stora intresset tolkades som ett uppdämt behov att diskutera just erfarenheter och kunskaper kring elsystemens betydelse för säkerheten. De frågor som restes i ljuset av Forsmarkshändelsen är aktuella i flera sammanhang förutom i samband med inträffade händelser. De är i högsta grad relevanta i samband med modernisering av reaktorer och inte minst vid introduktion av moderna programmerbara system. De är även intressanta när det gäller konstruktionskrav för elsystem i reaktorer på väg att introduceras.

Deltagarantalet blev till sist 150 varav 80 tillresta från utlandet. Naturligtvis var flertalet deltagare från Europa men där fanns även långresenärer från USA och Kanada, Sydafrika och Indien. Totalt 18 länder var representerade. Deltagarnas bakgrund var en blandning av hemmahörighet i kraftbolag, tillver-

kare, tekniska stödorganisationer och myndigheter. Detta hade väsentlig betydelse för mötets positiva atmosfär.

Presentationer i tre sessioner

Resultaten av 28 presentationer med efterföljande frågor och diskussioner låter sig inte lätt summeras kortfattat på ett rättvisande sätt men ett försök följer här i nedan uppsatta punkter. Grupperingen följer rubrikerna på de tre sessionerna.

1. Händelser av generisk betydelse

- Även om Forsmarkshändelsen var något av ett huvudnummer så presenterades flera andra händelser som inneburit i många fall överraskande felsekvenser i elsystem och som inneburit en hög potential för CCF. Analyser av några händelser visade en betydande höjning av den beräknade risken för härdskada. Orsakerna berodde oftast på brister i krav eller i specifikationer, i gransknings- och/eller verifieringsprocesser eller i provning av system och komponenter.
- Störningar i elsystem innebar att information gick förlorad i kontrollrum vilket försvårade operatörernas hantering.
- Händelsen i Forsmark indikerade att mer uppmärksamhet måste riktas mot analyser av olika systems tålighet mot störningar samt konsekvenser av komplexa kombinationer av fel.
- Även betydelsen av rapportering och erfarenhetsutbyten diskuterades. Det gavs exempel på att händelser upprepats därför att information om tidigare incidenter inte spridits eller fångats upp på ett effektivt sätt.

2. Konstruktion och analys

- Mycket av diskussionen kretsade kring risken att fel introduceras i samband med moderniseringar och teknikbyten. Krav gällande för befintlig utrustning är ofta inte tillräckliga att gälla för utrustning som sätts in i dess ställe. Även om inte de övergripande systemfunktionskraven förändras så kan teknikbyten innebära att krav måste revideras för att vara kompatibla.
- Även gradvisa förändringar av olika systems egenskaper kan sammantaget innebära att ursprungliga konstruktionsförutsättningar inte längre är fullt relevanta. Revideringar inklusive kompletterande analyser kan bli nödvändiga.
- Modern utrustning är ofta standardiserad vilket innebär att den kan ha inbyggda egenskaper anpassade för flera olika tillämpningar. Om man inte noga preciserar den funktion som utrustningen skall ha - samt de funktioner den inte får ha - kan oönskade funktioner inträffa i samband med ovanliga händelsekombinationer. Dessa fel kan vara svåra att avslöja vid funktions- och samfunktionsprovning. Stora krav måste ställas på att en tillverkare lämnar fullständig information om sin komponents alla egenskaper.

Bilden som är tagen på Skansens mekaniska verkstad i Stockholm får här illustrera en åldrad utrustning som behöver bytas ut. Vid flera kraftverk pågår eller planeras i dag omfattande moderniseringar av bland annat elsystemen. Ofta innebär det att äldre teknologi ersätts med system som bygger på programmerbar teknik.

Foto: © Per Bystedt

DiDELSYS

Stockholm 5-7 September 2007

- Elektriska transienter som kan uppstå till följd av t.ex. kortslutningar måste analyseras och specificeras ytterligare och tydligare anges som konstruktionsförutsättningar för system och komponenter.
- Utveckling av standarder pågår visserligen men inte i den utsträckning och i det tempo som introduktionen av modern utrustning kräver. Komplexiteten i modern utrustning gör även att det ställs andra krav på standarder.
- Oberoende kontroller av elsystem utförs i en del länder enligt myndigheters föreskrifter. Frågan diskuteras vad gäller nyttan av oberoende om grundfelet kan vara otillräcklig kvalitet i underlaget.

3. Samspel mellan kraftverk och kraftnät.

- Den genuina kunskapen om egenskaper hos kraftverkens elektriska system och dess samspel med nätet tenderar att ersättas med alltför direkt användning av standarder. Även standarder är inkompleta och införande av ny utrustning kräver att specifikationer baseras på genuina insikter i egenskaperna hos de elektriska systemen för att kvalitet skall kunna uppnås.
- Simuleringar av elektriska transienter är en viktig metod i säkerhetsanalysen. Utvecklade verktyg finns tillgängliga men ytterligare arbete med att jämföra beräkningar med uppmätta data från verkliga störningar behövs.
- Kraven på elsystem i kärnkraftverk sett från en reaktorteknisk synpunkt kan verka vara i konflikt med kraven som ställs på leveranssäkerhet av kraft till nätet. Det är viktigt att kunskaperna är goda vad gäller samverkan mellan kraftverk och nät för att kunna definiera de händelser som styr egenskaper och analysförutsättningar för utrustning.
- Utveckling av kontakterna mellan kraftverken och myndigheter med ansvar för reaktorsäkerhet respektive leveranssäkerhet bör ske. För Sveriges del gäller detta mellan SKI och Svenska Kraftnät och med de olika kraftbolagen. Ökad samkörning mellan nät i olika länder kräver ökad koordinering internationellt.
- Husturbindrift i samband med nätbortfall är ett förväntat driftsätt i flertalet länder. Argument fram-

fördes såväl för att detta innebär en risk som en säkerhetsnytta. En överkoppling till husturbindrift anser några kan utsätta anläggningens elsystem för påfrestningar som är negativa för säkerheten. En lyckad överkoppling innebär positiv säkerhet genom säkrad kraftmatning till anläggningen.

Sammanfattande slutsats

Robusthet i elektriska system vilar på hög kvalitet i konstruktion, drift, underhåll och testning. Robusthet skall demonstreras genom ett vidsynt analysarbete som baseras på gedigen kunskap inom eltekniken och på erfarenheter från händelser. Detta skall kompletteras genom analys som använder metoder såsom feleffektsanalys, dynamisk transientanalys samt probabilistisk säkerhetsanalys.

Förhoppningsvis kommer nyttan av mötet att kunna avläsas på flera sätt. Erfarenheterna bör kunna berika det utredningsarbete som nu drivs av FKA, RAB och OKG kring behov och möjligheter att göra de elektriska systemen ännu mer robusta. I RAB:s projektarbete ingår en rad olika frågeställningar och det känns angeläget att säkerheten i de elektriska systemen nu uppmärksammas med ett brett angreppssätt. Detta har stor betydelse även för utvecklandet av kompetensen inom området.

För SKI kommer erfarenheterna att nyttjas i den förstärkning av uppmärksamheten kring elsystem som nu sker i tillsynen. Bland annat har SKI för-





”... En av grundpelarna i säkerhetsarbetet är erfarenhetsåterföring... Problemet är oftast inte brist på uppgifter eller kunskap. Svårigheten ligger i stället i att samla in, bearbeta och effektivt sprida relevanta data... SKI har mot den bakgrunden verkat för att erfarenhetsåterföringen kring elsystemens betydelse för säkerheten fått så stor spridning som möjligt...”

sig en god anledning till fortsatta kontakter mellan länder för att senare få tillgång till sådana resultat.

Det stora internationella intresset som visades för DiDELSYS ger också goda förutsättningar för fortsatt uppmärksamhet kring säkerheten i elsystem. SKI kommer i slutet av året att föra frågan till NEA och föreslå att en grupp etableras inom OECD/NEA med ansvar att vidareutveckla samarbetet kring frågorna. Underhandskontakter visar att det finns intresse inom NEA att initiera en grupp. Mer exakt vilken form samarbetet skall ha och under vilket mandat får diskuteras inom NEA.

Grundpelare i säkerhetsarbetet

En av grundpelarna i säkerhetsarbetet är erfarenhetsåterföring. Den information som i princip fanns tillgänglig före händelsen hade om den tolkats och nyttjats rätt kunnat uppdaga bristerna tidigare.

Detta är ytterligare en påminnelse om svårigheten med erfarenhetsåterföring. Problemet är oftast inte brist på uppgifter eller kunskap. Svårigheten ligger i stället i att samla in, bearbeta och effektivt sprida relevanta data.

SKI har mot den bakgrunden verkat för att erfarenhetsåterföringen kring elsystemens betydelse för säkerheten fått så stor spridning som möjligt.

Under hela skedet har SKI gett insyn i hanteringen och beslut kring händelsen. Genom åtagandet att arrangera DiDELSYS har Sverige verkat för att ett relativt brett spektrum av frågor med direkt eller indirekt anknytning till händelsen och av mer långsiktig karaktär har lyfts fram och diskuterats. Även andra händelser som innefattat störningar i elsystem diskuterades. Intresset för mötet vittnar om att ett möte med detta innehåll var angeläget.

Störningar i elsystem i kärnkraftverk kommer att inträffa i framtiden. Rätt uppföljning av frågor som rymts inom DiDELSYS och rätt framtida ambition kan förhoppningsvis medverka till att sådana störningar inte kommer att utgöra något hot mot säkerheten.

Per Bystedt

stärkt bemanningen inom området. Detta innebär att vi nu är bättre rustade i vårt tillsynsarbete av pågående moderniseringar av kraftverken som i flera fall innefattar relativt omfattande utbyten av el- och kontrollsystem. Viktiga granskningar vi nu har på vårt bord gäller förslagen från kraftbolagen om åtgärder för att förbättra säkerheten enligt kraven i vår ”konstruktionsföreskrift” för kärnkraftverk (SKIFS 2004:2). Verksamhetsplanerna innefattar även att driva några utvecklingsprojekt inom området. Till en början ser vi framför oss behov av att initiera studier inom preliminärt följande områden

- Normer, Standard, Krav
- Kontroll, Provning
- Dynamiska analyser. Simulering
- Systemanalys

Ett uppdrag har redan initierats inom området kontroll och provning.

Förebyggande utredningar

Flera länder informerade vid mötet om att utredningar kring elsystem initierats då informationen om händelsen i Forsmark blev känd. Inriktningen hade varit, i första hand naturligtvis att söka finna eventuella liknande brister i kraftverk i drift men även att göra lite mer principiella översyner på sikt. Flera av dessa studier pågår varför slutsatser inte var tillgängliga för presentation vid mötet. Detta ger i

Transmutation ett huvudspår i forskningssam Återanvändning av lång sluten bränslecykel möj

Foto: © Lina Bertling



Av Janne Wallenius
Doc

Artikelförfattaren är chef för Avdelningen för reaktorfysik
vid Kungliga Tekniska högskolan

Begreppet kärnavfall har gett upphov till myter och legender som få andra substanser i den moderna världen. Medan det finns ämnen tillverkade av människor som är betydligt farligare för människokroppen än använt kärnbränsle, är det ett faktum att kunskap om hur man hanterar högaktivt avfall är nödvändig för att avfallet inte skall utgöra en risk för människors liv och hälsa.

Idag finns dock etablerade procedurer för strålskydd som gör att arbete inom kärnkraftsproduktion är ett utmärkt sätt att försäkra sig om ett långt och hälsosamt liv. Metoder har utvecklats för att isolera det högaktiva avfallet från biosfären under hundratusentals år. Grundtanken är att en serie av (passiva) tekniska och geologiska barriärer skall förhindra att läckage av radioaktiva ämnen bidrar med mer än en bråkdel till den naturliga stråldos människor och djur i närheten av ett djupförvar skall utsättas för. Olika tekniska koncept har utarbetats, och oavsett om de baseras på inkapsling i koppar och bentonit, som i det svenska KBS-3, eller stål och salt som i det tyska konceptet, så säger decennier av forskning oss att en flygresa över Atlanten, eller en sommarvistelse i delar av Bohuslän, ger upphov till en långt större ökning i dosbelastning än att hela sitt liv dricka vatten ur en brunn borrhälsat ovanpå ett djupförvar. Är då detta inte tillräckligt?

Ett informationsdilemma

En aspekt som SKB har tagit upp i sina studier är frågan om hur vi skall kunna informera framtiden om att ett oskyddat intrång i ett förvar kan leda till fara för liv och hälsa? Denna fråga är tämligen invecklad att svara på och leder till intressanta socio-antropologiska reflektioner. Låt oss anta att vi lyckas tillverka en skylt som förklarar att det vid en bestämd plats finns ett förvar av ting som är farliga att undersöka utan vederbörliga skyddsåtgärder. Låt oss samtidigt anta att vi befinner oss i en samhälls-epok där den tekniska nivån är sådan att man kan

arbetet

livat kärnavfall och lig i nya reaktortyper

borra djupa hål, men samtidigt saknar kunskap om kärnkraft och radioaktivitet. Skulle en sådan skylt då fungera avskräckande, eller skulle den ha motsatt effekt? Det är inte helt långsökt att spekulera i det senare. Besvärjelserna runt faraonernas gravar hindrade uppenbarligen inte gravarna från att utsättas för systematisk plundring. Å andra sidan vet vi att legenden om att en kejserlig grav i Kina skulle vara omgiven av en underjordisk kvicksilversjö faktiskt har fått vår tids forskare att närma sig graven med viss försiktighet.

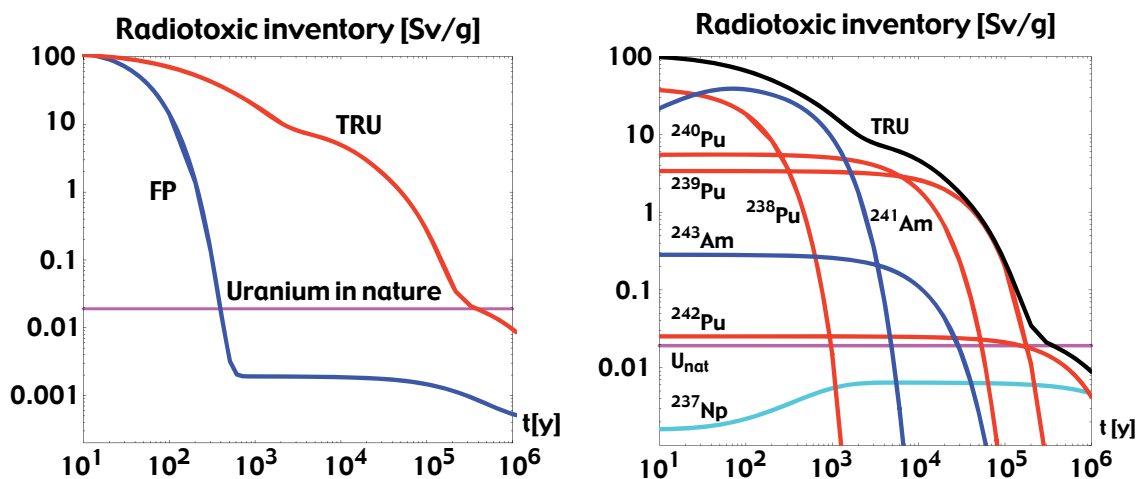
Återanvändning av långlivat kärnavfall

Transmutation av långlivat kärnavfall är en teknik som skulle möjliggöra nya svar på frågan huruvida vi kan informera framtiden om vårt radioaktiva arv. Med transmutation avser vi här en metod som förutsätter att man separerar de ämnen som utgör huvuddelen av det långsiktigt radiotoxiska inventariet i använt kärnbränsle. Som figur 1 visar handlar detta

främför allt om två element: plutonium och americium. Räknet per gram är det uteslutande dessa ämnen som gör använt kärnbränsle farligare än uran i naturen efter 300 års avklingningstid.

Etablerad teknik

Teknik för att separera och återanvända plutonium i industriell skala finns redan idag. I La Hague i Frankrike återförs 99,9% av plutoniumet i använt uranbränsle från Frankrike och Schweiz. Detta material blandas sedan med utarmat uran till en så kallad blandoxid (Mixed Oxide, MOX) som reguljärt används som bränsle i 20-talet reaktorer. Fram tills nyligen har även Tyskland och Belgien använt sig av samma strategi. I Japan avser man att börja använda MOX-bränsle i industriell skala. Till och med i Sverige har vi provat smärre mängder MOX i Oskarshamn under tidigt sjuttital, och inom de närmaste åren kommer hundratalet MOX-knippen med plutonium från sjuttitalets svenska kärnkraftspro-



Figur 1 (t.v.) visar radiotoxicitetens tidsberoende hos fissionsprodukter (FP, blå linje) och transuraner (TRU, röd linje) i använt kärnbränsle. Den lila linjen anger radiotoxicitetsinventariet i ett gram uran i naturen, inklusive urandötrar (radium, radon etc), och är 20 mSv/gram uran. Man kan konstatera att det är transuranerna som dominerar radiotoxiciteten i använt kärnbränsle på lång sikt. De fissionsprodukter (eller klyvningsprodukter) som bidrar mest till radiotoxiciteten är cesium-137 och strontium-90. Hos transuranerna är det plutonium och americium. I figur 1 (t.h) visas bidragen från olika transuranisotoper till radiotoxiciteten.

duktion att användas som bränsle av Oskarshamns Kraftgrupp AB. Tillstånd för detta har beviljats av regeringen efter hörande av SKI.

Tekniska begränsningar

Det finns tekniska begränsningar som gör att MOX-bränsle av traditionellt snitt inte helt kan ersätta uranbränsle i våra nuvarande reaktorer. Den ofrånkomliga närvaron av plutoniumisotopen ^{240}Pu , som är en kraftig absorber av epitermiska neutroner, men klyvbar av snabba neutroner, innebär dels att styrvägsinsättning och borinsprutning blir betydligt mindre effektiv än i traditionella bränslen, dels att voidvärdet vid förlust av kylmedlet kan bli positivt efter upprepad återanvändning av Pu. För att bibehålla avstängningsmarginaler begränsar man därför

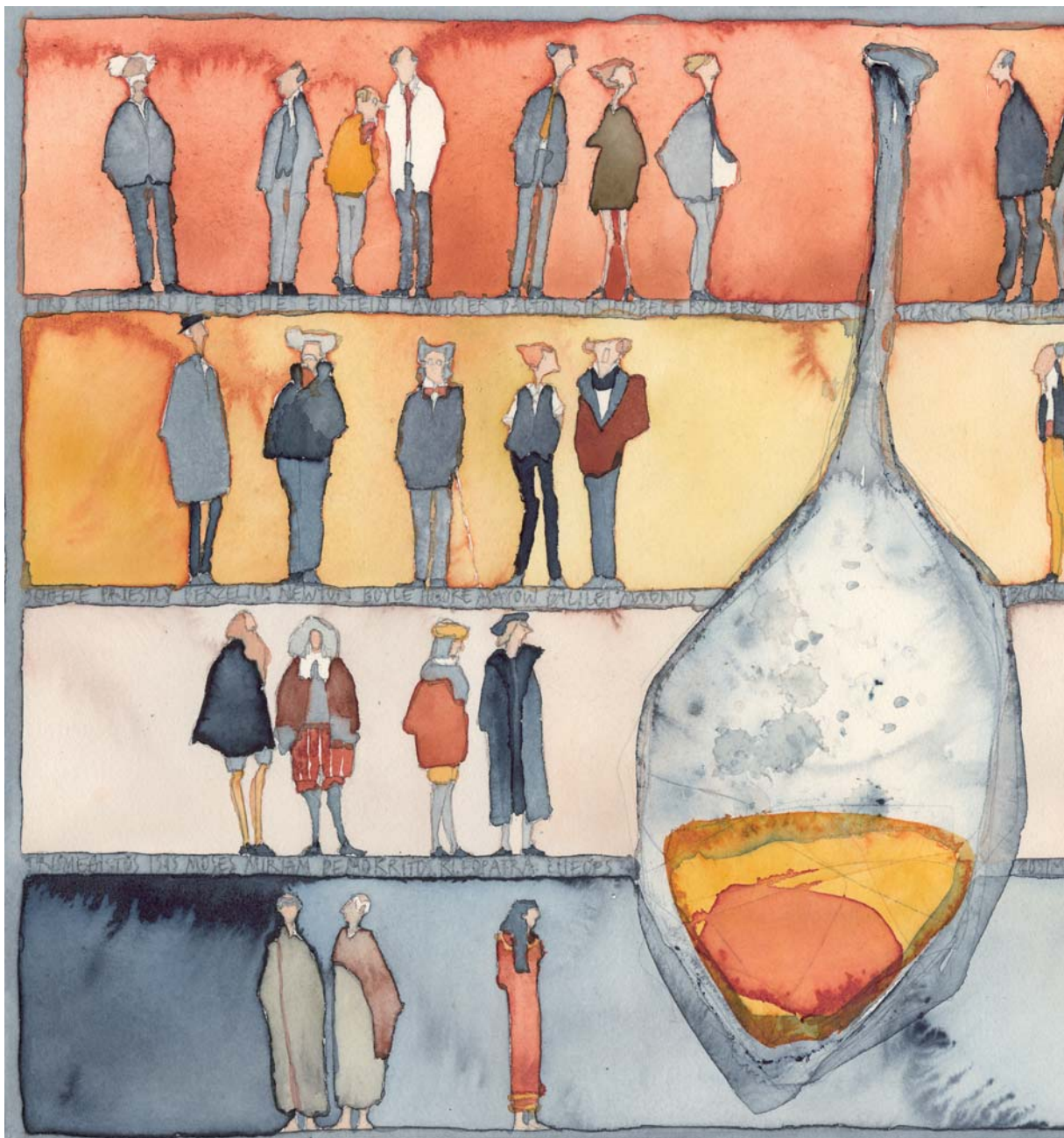
idag MOX-innehållet i en härd till mellan 30 och 50%. Dessutom begränsar man antalet återföranden av plutonium från använt MOX till en eller två.

Nya typer av MOX-bränsle

För att kunna utföra upprepad transmutation av plutonium och därmed minska inventariet av radiotoxicitet signifikant har franska forskare under det senaste decenniet utformat nya typer av MOX-bränsle. Genom att blanda ut plutoniumet med uranisotopen ^{235}U , kan man hålla den absoluta koncentrationen av ^{240}Pu nere i acceptabla nivåer. Denna utspädning kan ske på stavnivå, genom att man blandar UOX-bränsle med MOX-bränslestavar i ett och samma knippe, i det så kallade CORAIL-konceptet. Ett mer effektivt alternativ är att tillverka

Redan de gamla alkemisterna försökte sig på transmutation (att omvandla ett grundämne till ett annat) när de skulle framställa guld ur mindre värdefulla metaller som kvicksilver och bly. En mer aktuell form av transmutation är att omvandla aktinider och långlivade fissionsprodukter till kortlivade nuklider, som en följd av kärnreaktioner i en kärnreaktor.

Illustration: © Anna Törnquist



MOX-bränslekutsar med anrikat uran. Knippen med MOX-UE (MOX supported by enriched uranium) har säkerhetsparametrar fullt i klass med reguljära uranbränslen, och är så pass effektiva förbrännare av plutonium, att det skulle räcka att en tredjedel av alla reaktorer laddas med sådana knippen, för att nettoproduktionen av plutonium skall bli noll /Vasile03/. Laddar man en större andel reaktorer med MOX-UE, kan man också bli av med tidigare ackumulerat plutonium.

Americium en svår nöt

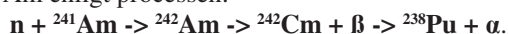
För transmutation av plutonium finns det alltså en lösning mycket nära till hands. En fjärdedel av allt plutonium omvandlas dock till americium vid återanvändning av plutonium i lättvattenreaktorer. Och

”...Klassiska bridreaktorer med natriumkylning har per definition ett snabbt neutronspektrum, och kan relativt lätt modifieras så att de bränner plutonium istället för att tillverka ämnet. Därmed blir de också den reaktortyp som ligger närmast till hands för syftet att transmutera americium och curium...”



americium är en betydligt svårare nöt att knäcka. Förutom att americium kräver betydligt mer skärmning vid bränsletillverkning har det dålig inverkan på i stort sett alla viktiga säkerhetsparametrar. Båda dessa aspekter kan i princip hanteras genom att hålla americiumkoncentrationen i både bränsle och härd på låga nivåer. Ett MOX-UE-knippe med 1% americiuminnehåll skulle kunna bibehålla acceptabla säkerhetsegenskaper och bränna americium i samma takt som det produceras ifall 40% av alla reaktorer laddas med detta bränsle. Flera praktiska problem gör dock att det idag anses vara omöjligt att utföra detta i praktiken.

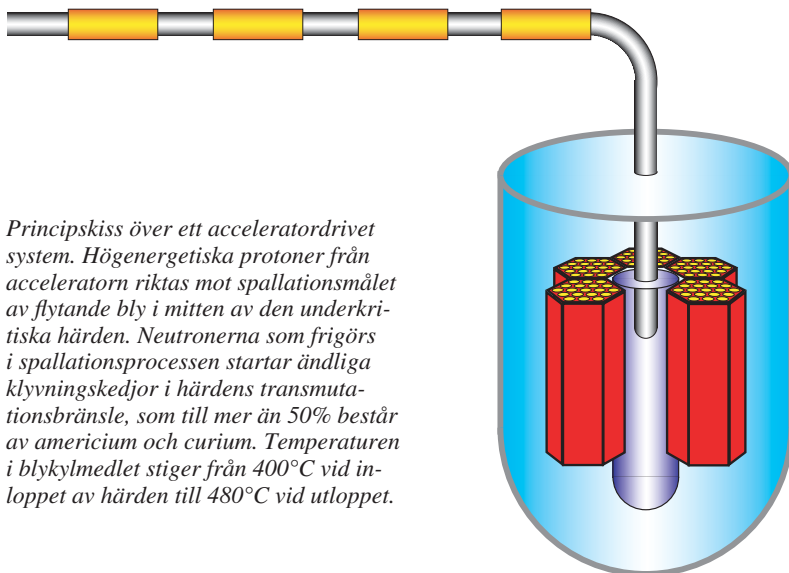
För det första produceras stora mängder helium i bränslet vid transmutation av americiumisotopen ^{241}Am enligt processen:



Emedan curiumisotopen ^{242}Cm har en halveringstid på 162 dygn, sker denna omvandling till stor del under reaktordrift. Gasproduktionen i americium-innehållande bränslen är därför betydligt större än i MOX-bränslen, vilket leder till problem med bränslesvällning och/eller trycksättning av bränslestaven.

För det andra är americium mycket svårt att separera från curium, åtminstone med metoder som har potential för att användas i industriell skala. Vid bestrålning av curium i en lättvattenreaktorer bildas californium genom upprepade neutroninfångningar. Californium, ^{252}Cf är en mycket stark neutronkälla, vilket innebär att neutrondosraterna ökar med en faktor upp till 10 000 vid bränsletillverkningsprocessen, jämfört med nuvarande MOX-bränslen. Detta är huvudsälet till varför man idag anser det vara nödvändigt att utveckla nya reaktortyper med så kallat ”snabbt” neutronspektrum, för att kunna transmutera americium och curium /Salvatores05/.

I ett snabbt neutronspektrum är klyvningssannolikheten för fertila curiumisotoper runt 50%, varför jämviktskoncentrationen av ^{252}Cf i färskt bränsle minskar med en faktor 100 - 1000 jämfört med transmutation i en lättvattenreaktor. Även om det fortfarande blir komplicerat att tillverka curi-



Principskiss över ett acceleratordrivet system. Högenergetiska protoner från acceleratorn riktar mot spallationsmålet av flytande bly i mitten av den underkritiska härden. Neutronerna som frigörs i spallationsprocessen startar ändliga klyvningskedjor i härdens transmutationsbränsle, som till mer än 50% består av americium och curium. Temperaturen i blykylmedlet stiger från 400°C vid inloppet av härden till 480°C vid utloppet.

Ordförklaringar

Bridreaktor: en kärnreaktor i vilken fler fissila atomkärnor produceras än som förbrukas.

Doppleråterkoppling: en ökning av sannolikheten (tvärsnittet) för infångning av neutroner i kärnor som U-238 och Pu-240 när bränsletemperaturen ökar.

Epitermiska neutroner: neutroner vars hastighet ligger mellan de snabba och de termiska.

Fertila isotoper: sådana isotoper som direkt eller indirekt kan omvandlas till fissila genom neutroninfångning.

Fissila isotoper: sådana isotoper som kan undergå fission (klyvning) vid neutroninfångning.

Fördröjda neutroner: neutroner som sänds ut av sönderfallande klyvningsprodukter upp till en minut efter själva klyvningsprocessen.

Prompt kriticitet: när reaktorn går kritiskt på de prompta neutronerna, d.v.s. neutroner som frigörs ut i själva klyvningsprocessen.

Snabba neutroner: neutroner som har hög hastighet.

Snabbreaktor: en reaktor i vilken fissionerna åstadkommes huvudsakligen av snabba neutroner.

Spallation: en process där neutroner rivs ut ur en kärna som träffas av högenergetiska protoner.

Temperaturkoefficient: ändring i reaktorns reaktivitet relativt temperaturökningen.

Termiska neutroner: neutroner som har låg hastighet.

Voidvärde: ändring i reaktorns reaktivitet när kylmedlet försvinner ur härden.

um innehållande bränslen på grund av hög värmeutveckling från alfa-sönderfallande ^{244}Cm , finns det metoder som verkar tillräckligt robusta för att kunna tillämpas i en industriell process. Till dessa hör infiltrationsmetoden, som innebär att en lösning av curiumnitrat infiltreras i ett fast material med hög porositet.

Modifiering av Bridreaktorer

Klassiska bridreaktorer med natriumkylning har per definition ett snabbt neutronspektrum, och kan relativt lätt modifieras så att de bränner plutonium i stället för att tillverka ämnet. Därmed blir de också den reaktortyp som ligger närmast till hands för syftet att transmutera americium och curium. Vi stöter dock på patrull om vi försöker sätta in americium i snabbreaktorbränsle i större mängder. Förvisso är snabbreaktorbränsle även i normala fall utrustat med stora gasplenumvolymmer, där plats kan upplåtas för heliumutsläpp från bränslekutsarna. Dock kvarstår americiums dåliga inflytande på reaktorsäkerheten. Vi vet till exempel att americium leder till

- 1) Kraftigt reducerad Doppleråterkoppling
- 2) Minskad andel fördröjda neutroner
- 3) Mer positiv temperaturkoefficient för kylmedlet
- 4) Ökat voidvärde för kylmedlet

Sammantaget innebär detta att den övre gränsen för americiumkoncentrationen i en natriumkyld snabbreaktor av traditionellt snitt är mellan två och tre procent. Detta är tillräckligt för att reaktorn skall kunna återanvända sitt eget avfall, men potentialen för att ta hand om allt americium som produceras i våra lättvattenreaktorer är tämligen begränsad.

Förbättrad förmåga bränna americium

Fjärde generationens reaktorer med snabbt neutronspektrum avses utformas med förbättrad förmåga att bränna americium. Detta låter sig göras genom att till exempel förändra kylmedlet och/eller bränsleformen. Till exempel kan man använda sig av metalliskt bränsle i stället för oxidbränsle. Den relativt goda termiska expansionen (och det därmed temperaturberoende neutronläckaget) för metallegeringar kan i viss mån kompensera den av americiumet förorsakade bristen på Doppleråterkoppling. Andra möjligheter är att ersätta kylmedlet natrium med blylegeringar eller heliumgas, vilka båda är mindre känsliga för temperaturförändringar.

Sluten bränslecykel

Även om detaljerade studier ännu inte är tillgängliga, brukar man uppskatta att den tillåtna americiumkoncentrationen i fjärde generationens snabbreaktorbränsle är maximalt fem procent. Detta skulle möjliggöra förverkligandet av en så kallad "sluten bränslecykel", där americium och curium från lättvattenreaktorparken transmuteras i snabbreaktorer. Andelen kärnkraft som måste härstamma från fjärde

generationens snabbreaktorer, för att produktion och konsumtion av americium och curium skall balansera varandra, kan då uppskattas till c:a 35% /NEA02/.

Huvudspår i forskningssamarbetet

I länder som Frankrike, Japan, USA och Ryssland utgör transmutation i fjärde generationens snabbreaktorer huvudspåret för dagens forsknings- och utvecklingsarbete. I Frankrike har man också bestämt att en Generation-IV-reaktor skall tas i drift senast 2020.

Ett alternativ, som främst studerats i EU och Japan är att använda sig av underkritiska, accelerator-drivna system (ADS) (se fig t.v.) för transmutation av americium och curium. Genom att hålla marginalen till prompt kriticitet tillräckligt stor (typiskt $k < 0,97$), blir reaktorn okänslig för temperaturförändringar i både kylmedel och bränsle, och kan därmed fungera med ett bränsle som innehåller upp till 50% americium. En ADS kan därför bränna upp till tio gånger mer americium per producerad kWh än en kritisk reaktor, vilket gör att andelen kärnkraft som måste produceras i en ADS för att möjliggöra en sluten bränslecykel hamnar på siffror mellan 3-10%, beroende på vilken lösning för plutoniumhantering man bestämmer sig för.

En svag punkt

Till nackdelarna hör att en ADS måste drivas med en kraftig extern neutronkälla. Den starkast tänkbara neutronkällan utgörs av protoninducerad spallation i smältor av bly eller bly-vismut. Denna del av systemet har länge ansetts vara ADS-konceptets svagaste punkt. Hösten 2006 utfördes dock det första storskaliga provet av flytande bly-vismut som spallationsmål vid Paul Scherrer Institute i Schweiz, och man lyckades i det så kallade MEGAPIE-experimentet framgångsrikt producera neutroner under fyra månaders tid vid en acceleratoreffekt om 700 kW.

Prototyp kan tas i drift år 2020

Inom EUs EUROTRANS-projekt utförs design- och säkerhetsanalys av en ADS-prototyp med 60 MW termisk effekt, driven av en 2 MW protonstråle, kylt med bly-vismut och laddad med MOX-bränsle. Denna prototyp skulle kunna konstrueras i Belgien och tas i drift runt 2020, ifall EUs medborgare tillhandahåller tillräcklig finansiering. KTH deltar i olika aspekter av EUROTRANS-projektet, bland annat provar vi kylmedlets förmåga att föra bort restvärme med naturlig cirkulation /Ma07/.

Tid för vägval

Vilken väg skall man då välja för att nå fram till en tekniskt, ekonomiskt och socialt acceptabel lösning? Medan blyreaktorer existerar redan idag, kräver ADS ännu ett par decenniers utveckling för att kunna tillämpas i industriell skala. Då skall man samtidigt komma ihåg att kapacitet för separation

av americium och curium, samt tillverkning av motsvarande bränsle, måste byggas upp innan man kan ladda någon transmutationsreaktor med dessa element, en process som hur som helst tar ett par decennier i anspråk. Forskning om förbättrade separationsprocesser fortgår i EU-projektet ACSEPT med svenskt deltagande från Chalmers.

Kostnadsbedömningar är förstås svåra att göra. En enkel uppskattning, som bygger på det faktum att snabbreaktorer idag är ungefär 50% dyrare än lättvattenreaktorer att uppföra, ger vid handen att alternativet med kritiska reaktorer (65% LWR + 35% Gen-IV) producerar kärnkraftsel till en snittkostnad som ligger $20 \pm 5\%$ högre än om man fortsätter med dagens öppna bränslecykel. På KTH har vi studerat kostnaden för ADS-elektricitet och hamnat på en ungefärlig nivå om tre gånger den för LWR. Om man då antar att det krävs 10% ADS-elektricitet (90% LWR + 10% ADS) för att ta hand om americium och curium från lättvattenreaktorer med UOX & MOX-UE-bränsle resulterar även det i en ökad snittkostnad för kärnkraftsel på $20 \pm 5\%$ /Runevall06/.

Därmed verkar båda alternativen hamna i samma kostnadsrum. Huruvida elkonsumenterna är beredda att betala denna extra pålaga för en nytta som mest har att göra med hänsyn till kommande generationers frihet att gräva fritt i marken är en fråga öppen för debatt. Men med fortsatt forskning inom området kan kanske mer kostnadseffektiva lösningar dyka upp. Exempelvis vore det intressant att utvärdera huruvida våra svenska kokvattenreaktorer kan modifieras för att delvis operera på snabba neutroner, och därmed möjliggöra transmutation av americium och curium, utan att nya reaktorer behöver uppföras /Wallenius07/.

Janne Wallenius

Referenser:

Weimin Ma, Aram Karbojian and Bal Raj Sehgal, *Experimental study on natural circulation and its stability in a heavy liquid metal loop, Nuclear Engineering and Design* 237 (2007) 1838.

NEA, *Accelerator-driven Systems (ADS) and Fast Reactors (FR) in Advanced Nuclear Fuel Cycles, OECD/NEA 2002. ISBN 92-64-18482-1.*

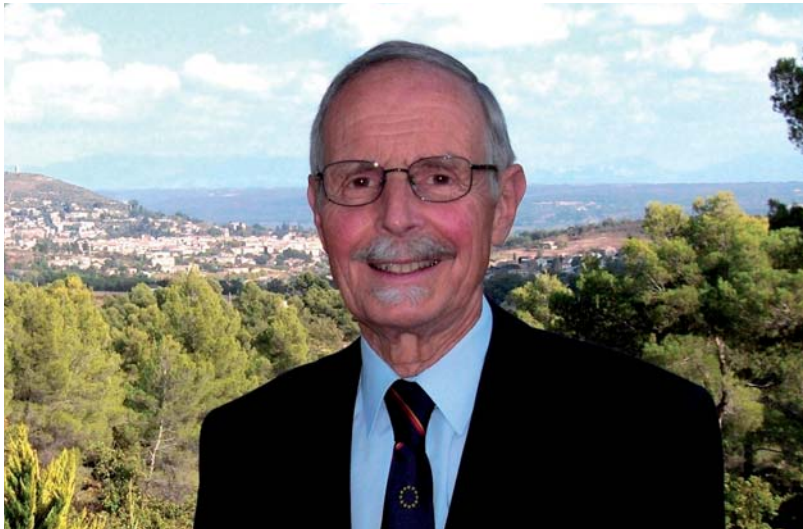
Odd Runevall, *The economic impact of introducing partitioning and transmutation in the Swedish nuclear power system, Master of Science Thesis, KTH (2006).*

Massimo Salvatores, Christine Chabert, Igor Slesarev, Gilles Youinou, *Intercomparison of systems for TRU recycling at equilibrium, In Proc. GLOBAL 2005, Tsukuba, Japan, Oct 9-13 2005.*

Janne Wallenius and Daniel Westlén, *Hafnium clad fuels for fast spectrum BWRs, Annals of Nuclear Energy, in press (2007)*

A. Vasile et al, *Advanced fuels for plutonium management in pressurized water reactors, Journal of Nuclear Materials* 319 (2003) 173-179

Klimatfrågor och energi för internationell forsk



Av Peter von der Hardt
Dr

Artikelförfattaren var tidigare EU:s representant och ordförande i styrgruppen för PHEBUS-projektet i Cadarache

För ytterligare information om ITER-projektet
besök den utmärkta webbplatsen:
www.iter.org

Om knappt ett år startar ITER-projektet bygget av den länge emotsedda fusionsreaktorn där tanken är att energi skall utvinas genom att slå samman två atomkärnor - i stället för att klyva kärnorna som man gör i dagens kärnkraftreaktorer. De sju samarbetsparterna som ingår i projektet representerar nästan 50 % av jordens befolkning. Lyckas man i ITER-projektet kan det bli ett avgörande steg på vägen mot en outtömlig koldioxidfri energikälla, skriver Peter von der Hardt i denna artikel författad speciellt för Nucleus.

De industrialiserade ländernas ekonomier är beroende av importerad olja och gas. Dessa resurser kommer att minska inom en snar framtid och lämpliga alternativa energier är i nuläget inte tillgängliga och kommer heller inte att hinna bli det [1].

De som minns oljekrisen 1973-74 kan förutse vad den slutgiltiga oljekrisen kommer att innebära: kollapsande ekonomier, massarbetslöshet och fattigdom, kraftig återgång till trä och kol med bl.a. kraftiga koldioxidutsläpp.

Runt 2003 började det dyka upp vetenskapliga artiklar om oljebristen och möjliga alternativ [2]. Dagspressen och politiker hakade då på ämnet. FN:s klimatrappport (december 2006/januari 2007) bekräftade ett andra hot, nämligen det som orsakas av människans utsläpp av växthusgaser (huvudsakligen koldioxid och metangas).

Båda frågorna, energiresurserna och klimatförändringen, behandlades nyligen i två filmer riktade till den breda allmänheten [3]. Jakten på en outtömlig energikälla, fri från koldioxidutsläpp blev med ens en stor utmaning för alla industrialiserade länder.

Vid sidan om uran, som utgör en ändlig resurs och de förnybara energierna (vind, vatten, sol, biomassa) vilka inte kan ersätta de enorma mängder energi som fossila bränslen ger, har uppmärksamheten nyligen vänts mot termonukleär fusion.

Grundläggande principer

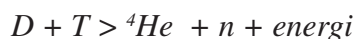
Kärnsammanslagning (fusion) som upptäcktes 1934 av Ernest Rutherford, följer en enkel process. När två mycket lätta atomer kommer tillräckligt nära

En kris starka drivkrafter kring kring fusionsenergi

varandra kommer de att fusionera och bilda en tyngre kärna och samtidigt ge ifrån sig energi plus en neutron. För att fusion ska ske måste dock tryck, tid och temperatur vara de rätta. Även en kortvarig kontinuerlig process måste komma till stånd vilken endast kan åstadkommas vid mycket höga temperaturer, 10 till 100 miljoner grader C.

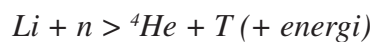
Precis som Sir Edward Eddington antog redan 1926, är fusion stjärnornas energi, ja även vår sols.

Flera kombinationer av lätta kärnor kan leda till fusion, men alla under vissa givna förhållanden. Normalt används två väteisotoper, deuterium (D) och tritium (T) som bränsle. Fusionen genererar då helium, samt neutroner och energi:

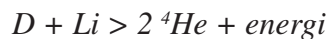


Deuterium finns i oändlig mängd på jorden då vanligt vatten t.ex. innehåller 0,003 viktprocent D_2O (tungt vatten). Produktion och hantering av deuterium är bekant och har förekommit industriellt i årtionden i framför allt tungvattenreaktorer. Dessa reaktorer har även varit en stor tritiumkälla, det andra fusionsbränslet och en "biprodukt" i tungvatten-styrda re-

aktorer. För fusionsanläggningar som behöver 50 till 100 kg tritium per år, frambringar man tritiumet i själva anläggningen genom att utnyttja den neutron som avges från fusionsprocessen tillsammans med ämnet litium (Li):

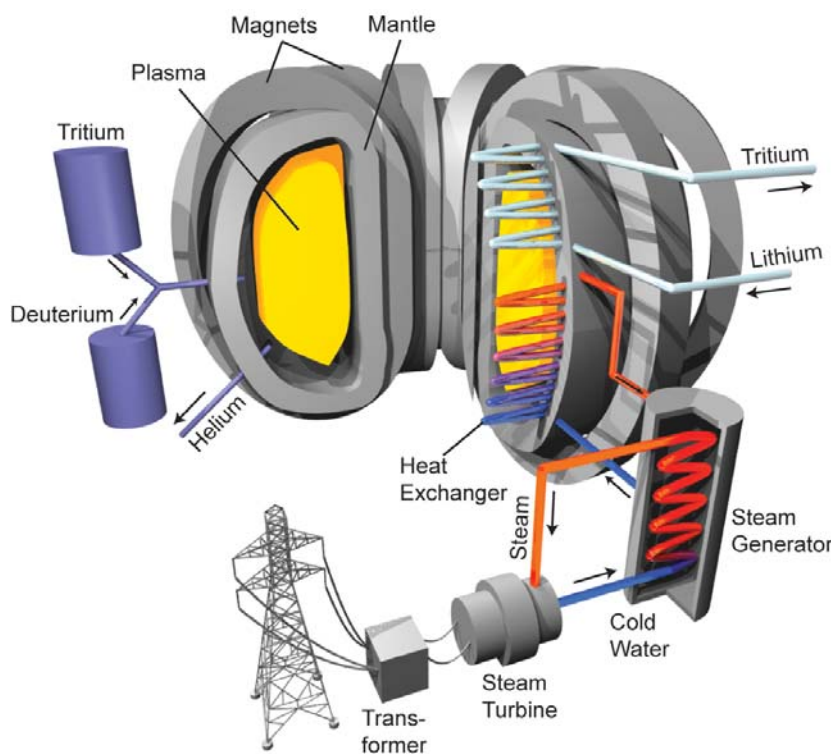


Då enbart en neutron genereras från varje fusion samtidigt som det förekommer oundvikliga neutronförluster p.g.a. "parasitiska" erövringar, måste man använda "neutronförökare". En är kärnreaktionen $(n, 2n)$. Den totala bränslecykeln i en fusionsreaktor ser då förvånansvärt enkel ut:



Litium är i princip tillgängligt i oändlig mängd i jordskorpan. Industriellt används det för närvarande i s.k. högprestandabatterier.

De största riskerna med fusion finns i lagringen av tritium och i anläggningens neutronaktiverade stora komponenter. En tritiummängd på en till tio kg (12,3 års halveringstid, β strålkälla) kräver bland



I en framtida fusionsreaktor, fångas neutronernas rörelseenergi upp i ett kylmedium som t.ex. vatten eller heliumgas som finns i en mantel i reaktorns vägg.

Kylmedlet för ut energin ur reaktorn via vämeväxlare och turbiner på samma sätt som i dagens kärnkraftverk.

Illustration: © ITER

annat tredubbel inneslutning samt uppsamling av T-läckor för att förhindra utsläpp till omgivningen.

Den grundläggande tritiumhanteringsteknologin har tillämpats i kärn- och andra industriella applikationer i tiotals år. Att hantera stora mängder aktiverade komponenter innebär dock en ny utmaning. Jämfört med fissionsreaktorer är dock aktivitetsnivåerna lägre och halveringstiden kortare men i stället är mängderna större.

Termonukleär fusion avser att möta kraven på en varaktig framtida energikälla som följd av att den:

- baseras på en outtömlig bränslekälla,
- inte ger något utsläpp av växthusgaser och
- är gynnsam ur säkerhets- och sabotagesynpunkt

Teknologi

Framtida fusionskraftverk kommer enbart att ha den elgenererande delen (turbiner, generatorer, ställverk) gemensam med nuvarande termiska fissionsanläggningar. En fusionsreaktors viktigaste komponenter beskrivs kortfattat nedan.

Uppfattningen i dagsläget är att fusion lämpar sig bäst för relativt stora anläggningar, dvs. med en elektrisk effekt på 1 till 5 GW.

Inneslutning

Vid höga temperaturer förvandlas gasblandningen inuti en fusionsreaktor till plasma, dvs. fria elektroner och joner. Eftersom plasman är en elektrisk ledare, kan den hållas på plats med hjälp av magnetfält utan att vidröra vakuumkärlets väggar.

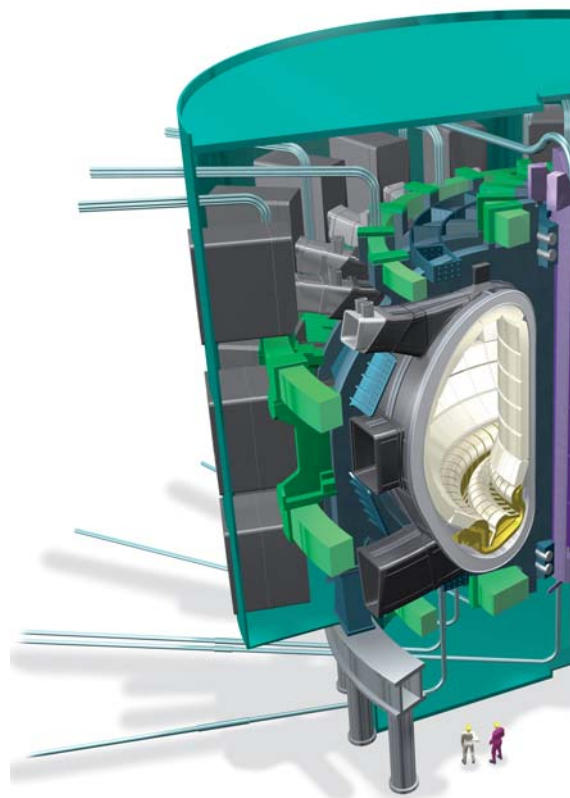
De flesta experimentella fusionsanläggningar runt om i världen använder sig av en magnetisk inneslutning för att positionera den varma plasman inuti en vakuumbehållare.

Behållaren är ringformad med ett D-format tvärsnitt. Tre magnettyper används: de som innesluter vakuumbehållaren (toroidalfältsspolar), de som är parallella med vakuumbehållaren (poloidalfältsspolar) samt en magnetvariant med en centrerad solenoid. Den uppsättning som har en ringformad behållare med magnetisk plasmainslutning, kallas tokamak (från ryskans förkortning av "torusformad behållare med magnet").

Plasmauppvärmning

Det krävs externa värmekällor för att få upp plasman i reaktionstemperatur och för att kompensera för energiförlusterna mot vakuumkärlets väggar. Systemen som används är:

- Ohmsk uppvärmning där man tillför ström till plasmaringen genom att använda den centrala solenoiden som den primära spolen i en transformator.
- Neutral partikelinsprutning där deuteriumpartiklar accelereras till hög hastighet (=hög energi) i acceleratorer och sprutas in i plasman,



- Radiofrekvenssystem där elektromagnetiska vågor av MHz och GHz frekvenser skickas in i plasman.

Avlägsnande av föroreningar

Under processen blir plasman förorenad av helium som genereras i fusionsprocessen och av strukturmateriapartiklar som stöts bort av plasmafraktioner som rymmer från den magnetiska "buren". Föroreningarna rensas genom ett avledarsystem i botten av vakuumbehållaren (s.k. divertor).

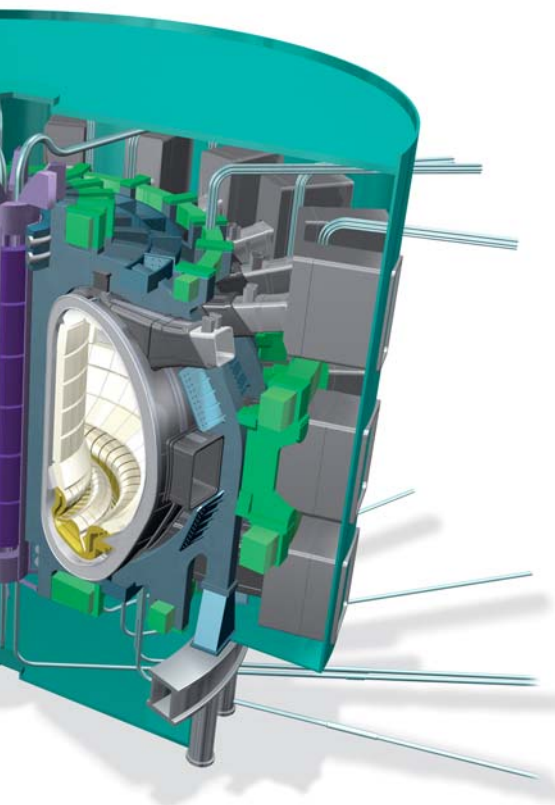
Fjärrstyrd hantering

Underhåll, reparation och utbyte av komponenter kräver speciella robotverktyg som måste klara av att avlägsna och ersätta alla delar i vakuumbehållaren och i dess närhet. Delar som kan väga tio eller hundra ton. Typiska problem som man kan stöta på i fusionsreaktorer är:

- begränsad tillgänglighet och dålig sikt
- höga och varierande strålningsfält
- tritiumförorening
- radioaktivt och giftigt damm.

System för elgenerering

Under fusionsprocessen frigörs energi från heliumkärnan (4,8 MeV per reaktion) och från neutronen (14 MeV). Heliumenergin överförs lätt till plasman och bidrar till plasmauppvärmningen. De mycket snabba neutronerna lämnar plasman mot de inre behållarväggarna. De måste bromsas ner i bromsplåtar för att:



Figuren visar den inre kärnan av ITER. I genomskärningen syns de vitala delarna av fusionreaktorn som nu byggs på ett internationellt initiativ. Observera figuren i nedre delen av bilden.

Illustration: © ITER

- skydda behållaren från snabba neutronstrålningsskador,
- återvinna energin för att användas till kraftgenereringen och
- fånga neutronen i Li-komponenterna vilket medför att T alstras.

Beroende på det valda kraftgenereringssystemet är det primära värmeöverföringsmediet vatten eller helium. Antingen överförs värme till ånggeneratorer som driver turbiner eller så används heliumgasturbiner direkt.

Tritiumalsstring

Litium kan användas i vätskeform (Pb-Li eutektisk), smält salt (FLiBe) eller i keramisk fast form (t.ex. Li_2O). Tritiumet som tillverkas förs ut genom en gasledning till en förberedelseanläggning innan det injiceras in i vakuumbehållaren.

Säkerhet

Radioaktivitet och halveringstid är generellt lägre än i fissionsreaktorer. Händelser som plasmasplittningar medför att reaktorn avstannar och omöjliggör okontrollerade effekttoppar.

Eftersom reaktorn saknar direkta kopplingar mellan plasman (värmekällan) och dess kontrollsystem (magneterna) samt har externt kylsystem

utesluts olyckor som förorsakas av att man tappar kontrollen över reaktorn eller att man tappar kylmedel. Fusionsreaktorbränsle är dessutom ointressant för militärt bruk.

ITER-historia

Civil forskning om kärnfusion började först 1958. Inom EU skapade Euratom ett nätverk av nationella laboratorier som arbetade med ämnet. Inom EU har principen om samordning av forskning inom kärnfusion gällt sedan starten. Flera forskningsanläggningar har byggts, däribland ett antal tokamaks för plasmafysikforskning.

Den största tokamaken som byggts, JET (Joint European Torus) i Culham, Oxfordshire, togs i drift med D-T blandningar 1991 och nådde upp i en fusionskraft på 16 MW under en 1-sekunds puls 1998. Nästa steg togs av den europeiska arbetsgruppen i Garching, nära München, i NET-projektet (Next European Torus) som har pågått sedan 1983.

Samarbete mellan de fyra stora

Baserat på ett förslag av president Gorbachov upprättade länderna för de fyra stora fusionsprogrammen (EU, Japan, Sovjet – senare den Ryska federationen – och USA) år 1985 ett samarbetsprogram kallat ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor, dvs. internationell termonukleär forskningsreaktor). Programmet skulle ske under överinseende av IAEA, det internationella kärnenergiorganet. Arbetet med ITER:s övergripande konstruktion inleddes i april 1988 av arbetsgrupper i Garching, Naka i Japan och San Diego i USA. Nästa steg i processen, s.k. engineering design, varade mellan 1994 och 1998 och ledde till en slutgiltig konstruktionsrapport, kostnadsplan och en allmän säkerhetsanalys.

Efter fyra år lämnade USA projektet. Mot bakgrund av finansiella och tekniska problem beslutade då de kvarvarande samarbetsländerna att omarbete konstruktionen samtidigt som man minskade den tekniska ambitionen och därmed den totala kostnaden.

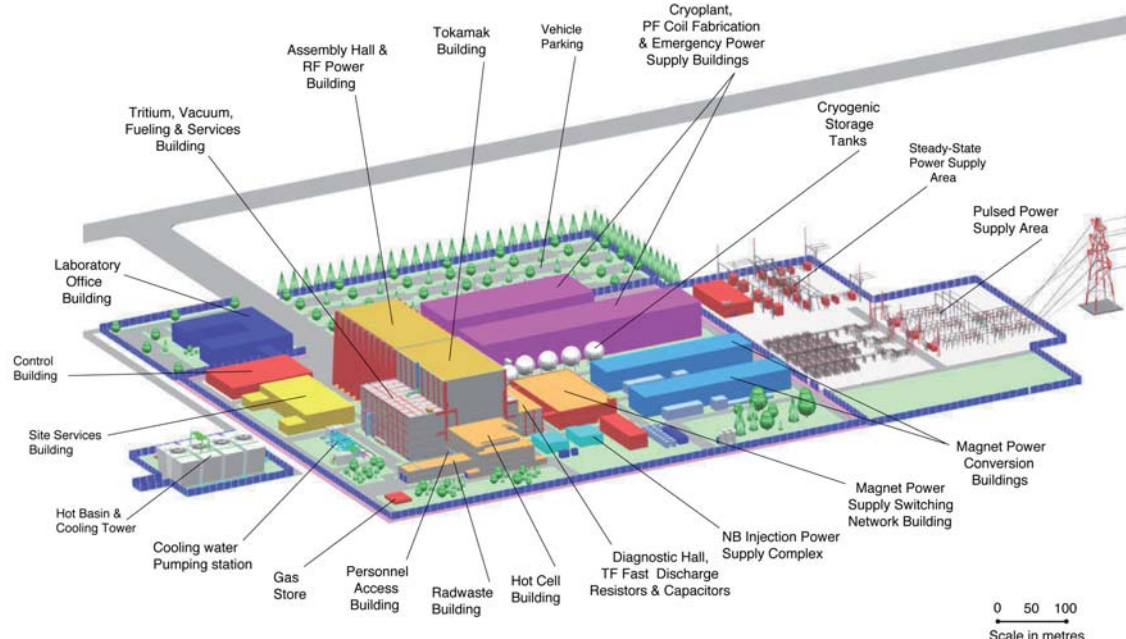
Nystart med sju parter

Den omarbetade konstruktionsrapporten, kostnadsanalysen och säkerhetsbedömningen presenterades i juli 2001. Processen för val av plats för anläggningen började 2002. I november 2003 beslutade EU att föreslå Cadarache i Frankrike som förlägningsplats. Japan framhöll dock Rokasho på den norra delen av huvudön som den bästa platsen.

”Platskampen” höll på till juni 2005 då Cadarache antogs inom ramarna för en allmän internationell fusionsutvecklingsöverenskommelse. Under tiden hade USA kommit tillbaka till projektet och Kina, Sydkorea och Indien hade anslutit sig till ”klubben”. De sju samarbetspartnerna undertecknade överenskommelsen den 21 november 2006 och samtidigt bildade de ITER-organisationen med

ITER har förvärvat ett område på 180 ha intill Cadarache forskningsanläggning i Frankrike där man avser att börja bygga den internationella fusionsanläggningen under andra hälften av 2008. De förberedande byggnadsarbetena startade dock redan i slutet av 2006 med vissa kringbyggnader.

Illustration: © ITER



Planering

internationell rättslig identitet. Partnerländerna representerar nästan 50 % av jordens befolkning.

Organisation

Som nämndes ovan har ITER:s Organisation (IO) egen rättslig identitet. Kontakter medlemmarna emellan sker via organisationer i länderna. EU:s organ inom området finns i Barcelona sedan mars 2007. Verkställande direktör är IO:s generaldirektör som rapporterar till ITER-rådet som har representanter från de sju medlemsländerna. Förutom av ITER:s ledning leds det praktiska arbetet av rådgivande forsknings- och teknologikommittéer. Biträdande generaldirektörer ansvarar för projektledning, administration, fusionsvetenskap och teknologi, tokamak, teknik- och anläggningsstöd, kontroll, värme och diagnostik (instrumentering) m.m.

Personalstaben kommer att öka till 650 under anskaffnings- och uppförandefaserna för att sedan dras ner till 300 under anläggningens rutinmässiga drift. Mellan 3000 och 4000 människor kommer att jobba för ITER runt om i världen.

Investeringar och drift

Den totala kostnaden för uppförandet beräknas till 5 miljarder euro och lika mycket beräknar man att driften kommer att kosta. IO använder sig av IUA (International units of accountancy, dvs. internationella redovisningsenheter) för att undvika växelkurs- och valutaproblem. Den totala kostnaden delas mellan EU (5/11) och de sex andra medlemmarna (1/11 var). En stor del av bidragen kommer som "in-kind", dvs. i form av betalning med komponenter och personal. Som medlemsland kommer Frankrike att bidra med infrastrukturservicen. En särskild organisationsenhet har satts upp för att övervaka planering och kostnader för denna service.

ITER har förvärvat ett 180 ha område intill Cadarache centret i nordvästlig riktning. Figuren på föregående uppslag visar den inre delen av fusionsreaktor ITER.

Byggnadsarbetena tog sin början i slutet av 2006 då temporära byggnader sattes upp för IO:s personal. Anställning av personal har pågått sedan slutet av 2006 och antalet anställda kommer att vara över 200 i slutet av 2007.

I slutet av 2005 påbörjades processen för att få ett godkännande för anläggningskonstruktionen hos de franska säkerhetsmyndigheterna. Tiden riskerar att bli knapp då man avser att börja bygga anläggningen under andra hälften av 2008.

Uppförande och driftstart planeras att vara klara i mitten av 2016 och den första plasman beräknas att kunna produceras inuti vakuumbehållaren innan slutet av samma år. ITER kommer sedan att vara i drift i ungefär 30 år.

Beskrivning av ITER-anläggningen - Konstruktionsbegränsningar

ITER kommer inte att alstra tritium (förutom i test-modulerna) och inte heller kommer anläggningen att generera elektricitet. ITER kommer att fungera i pulserad drift och leverera en lägre neutronexplosion än vad en framtida reaktor skall leverera. Några av dessa begränsningar beror på den förenklade konstruktionen från 1998-2001, andra beror på brist på relevant data. ITER är dock ändå den största och kraftfullaste tokamak som byggs och den ska ses som en förberedelse för nästa steg vilket planeras bli en anläggning som genererar elektricitet.

Utformningsöversikt

Tokamaken inklusive dess yttre system (magneter, kretsar för flytande helium, plasmavärmesystem, kontrollfunktioner, allt vägande 23 350 ton) är in-

kapslade i en enväggsbehållare ("cryostat") och en cylindrisk betonginneslutning.

Den omgivande byggnaden med anslutande monteringshall är 75 m hög, varav 25 m under jord, 50 m bred och 150 m lång. Mindre sidobyggnader innehåller tritiumanläggningen och de diagnostiska kontrollpanelerna.

Andra byggnader på ITER-området är ämnade för eltillförsel, kylkretsar, temporära förvar av avfall i gas, flytande och fast form, lagring och analys av data samt kontor.

Forsknings- och utvecklingsprogram

Som en del av överenskommelsen från juni 2005, beslöt ITER-medlemmarna att inleda ett FoU-program för de resterande frågorna med en framtida el-producerande demonstrationsanläggning (DEMO). Till skillnad mot vad som först var tänkt, kommer FoU-programmet att innehålla DEMO-relaterad forskning parallellt med att ITER fortfarande verkar. Detta kommer att skynda på möjligheten att tidigare introducera fusionskraften med 10-15 år.

I februari 2007 skrev EU och Japan under en överenskommelse som innefattar ett 10-årsprogram med 340 miljoner Euro från EU. Några av de viktiga punkterna är:

- Utformningen av en internationell fusionsbestrålningsanläggning IFMIF (International Fusion Materials Irradiation Facility) med uppgift att testa material med neutronflöden på 14 MeV neutroner som ett led i utvecklingen av lämpliga väggmaterial.
- Grundandet av ett internationellt forskningscenter för fusionsenergi i Japan
- Ett tokamakprogram för att stödja utvecklingen av plasmafysiken relaterad till både ITER och DEMO samt uppgradera den Nakabaserade JT-60 till JT-60 SA.

EU å sin sida kommer att informera de olika plasmaforskningsanläggningarna i EU:s medlemsländer om vikten av ett brett stöd för ITER och DEMO.

Sammanfattning

Den annalkande energikrisens allvar och det brådskande behovet av att finna en betydande energikälla som inte släpper ut växthusgaser, har nyligen lett till kraftigt ökade ansträngningar med att tämja fusionskraften för framtiden. ITER stöds nu av sju och inte längre bara av tre samarbetspartners, vilka även beslutat att finansiera byggandet och driften av fusionsanläggningen. Dessutom har nya internationella och samordnade forskningsprogram startat. Som bäst skulle fusionsproducerad elkraft i industriell skala kunna bli tillgänglig inom 40 år från nu men det kommer att bli en kamp mot klockan.

ITER ("vägen" på latin) är ett stort steg på vägen mot en outtömlig koldioxidfri energikälla.

Peter van der Hardt.

REFERENSER

[1] Diverse artiklar

Nucl. Europe Wordscan, augusti 2000
"Der Spiegel", augusti-september 2000,...
februari-april 2007
Science, augusti 1998, november 2000,
januari 2004, oktober 2006

"Die Zeit", 9 november 2000
Europeiska kommissionen, *"Green Book"*
COM(2000)769, november 2000

Vetenskaplig artikel av Christian Ngo,
Cadarache, september 2001
Artikel av P.-R. Bauquis, RGN N°5, oktober-november 2001

[2] Böcker

Paul Roberts, *"The End of Oil"*,
Bloomsbury, 2004

David Goodstein, *"Out of Gas"*, W.W.
Norton & Co, 2004

Michael T. Klare, *"Blood and Oil"*, Pen-
guin Books, 2004

Sonia Shah, *"Crude – The Story of Oil"*,
Allen & Unwin, 2004

Craig Morris, *"Zukunftsenergien"*, Heise-
Verlag, 2005

Bernard Wiesenfeld, *"L'énergie en 2050"*,
EDP Sciences, 2005

A. Wiese (ed.) et al. "Erneuerbare Ener-
gien", Springer, 2006.

[3] Filmer

Al Gore, *"An Inconvenient Truth"*, Para-
mount Pictures, 2007

Ray McCormick, Basil Gelpke, *"A Crude*
Awakening – The Oil Crash", 2007

[4] Konferensrapporten från det interna- tionella seminariet "ITER, a major step toward nuclear fusion energy", Aix-en- Provence, Frankrike, 22-24 januari 2007.

[5] Fusion Engineering and Design, 55 (2- 3), 2001

Skärpta och tydligare att reaktorer körs med



Av Kristina Johansson

Artikelförfattaren är utredare på enheten för reaktorteknologi och strukturell integritet vid Statens kärnkraftinspektion

SKI har beslutat att skärpa villkoren för driften av landets reaktorer. Detta sker sedan man kunnat konstatera att de tillåtna effektnivåerna vid vissa tillfällen överskridits. De skärpta villkoren innebär både att tolkningen av tillståndens effektbegränsning klarställs och att tydligare krav ställs på analys, kontroll och kalibrering. Kraven blir speciellt tydliga i samband med kommande effekthöjningar.

I lagen om kärnteknisk verksamhet (1984:3) slås fast att ingen kärnteknisk verksamhet, med vissa undantag, får bedrivas utan särskilt tillstånd. För kärnkraftreaktorerna utgörs tillstånden av de så kallade drifttillstånden som beslutas av regeringen.

Drifttillstånden har tidigare sett lite olika ut för de olika reaktorerna, men i dagsläget är skrivningarna så gott som samstämmiga. I tillstånden anges som villkor den högsta termiska effekt som får tas ut ur reaktorn. Det heter i tillstånden att reaktorn får drivas "med en termisk effekt av" alternativt med "en högsta uttagbar termisk effekt av..."

I regeringstillstånden framgår dock inte närmare hur denna begränsning av den termiska effekten mer konkret skall uttolkas. Det har inte heller tidigare funnits ett dokumenterat ställningstagande från SKI eller dess föregångare om tolkningen av effektvärdet.

I oktober 2006 fattade SKI emellertid beslut om tolkningen i form av tre förtydligande villkor.

Innebörd och betydelse av fattade beslut

SKI:s beslut klarlägger den juridiska tolkningen och betonar betydelsen av att drifttillståndens effektvillkor efterlevs. Dessutom innebär besluten vissa förändringar i verksamheten vid kärnkraftverken. Som exempel kan nämnas arbetet med anläggningarnas säkerhetsredovisningar och säkerhetstekniska driftföresättningar samt utökad kontroll och kalibrering av mätpunkter och i vissa fall justering av effekten.

De beslutade villkoren dokumenterar både tidigare praxis och innebär en skärpning av kraven. Särskilt måste frågan om osäkerhet i bestämning av termisk effekt uppmärksammas.

I kärnkraftverkens transient- och haverianalyser är reaktorns termiska effekt ofta en av ingångsparametrarna. Inte minst mot bakgrund av de planerade och genomförda effekthöjningarna är det viktigt att giltigheten hos den använda effektnivån i de nya analyserna säkerställs.

Grundläggande begrepp leder till diskussion

Definitionen av begreppet termisk effekt är inte helt entydig. I många länder används begreppet licensierad effekt för den effektnivå som anges i det som motsvarar de svenska drifttillstånden. Sverige har inte ett licensieringsförfarande för reaktorerna, varför begreppet licensierad effekt inte formellt kan användas.

Vid en snabb genomläsning av SKI:s föreskrifter har man kunnat (miss)tolka regelverket så att den termiska effekten även skulle innefatta all tillförd effekt, det vill säga till exempel den effekt som pumparna i systemet kan tillföra.

En rimligare tolkning är dock att den termiska effekt som åsyftas är den effekt som härden tillför

villkor skall förhindra högre effekt än tillåtet

kylmedlet. I besluten används därför termen termisk fissionseffekt. Begreppet har medfört en del diskussioner, men används just för att markera att det är den effekt som härden tillför kylmedlet som är den intressanta i sammanhanget.

Förtydligande och beslutade villkor

Uttolkningen av effektbegränsningen i drifttillståndet måste ta hänsyn till såväl juridiska som tekniska och säkerhetsmässiga aspekter. En förutsättning har också varit att villkoren skulle kunna formuleras på likalydande sätt för alla reaktorer, trots att förutsättningarna delvis skiljer sig åt. De tre villkoren lyder som följer:

1. Den termiska medelfissionseffekten under två timmar får inte överskrida regeringstillståndets effektgräns, och
2. Den termiska fissionseffekten får inte variera så att den i tillståndet uppgivna effektnivån överskrids med mer än 2 %, och
3. Den totala osäkerheten i bestämningen av den termiska fissionseffekten får inte vara större än skillnaden mellan den högst valda medeleffektnivån och den effektnivå som använts i anläggningens transient- och haverianalyser.

Förklaring och innebörd av villkoren

Genom att i det första villkoret specificera att medeleffekten inte får överskrida regeringstillståndets effektgräns ställs indirekt krav på regelbundna utvärderingar om något systematiskt fel kan förekomma i effektbestämningen.

Två timmar har beslutats vara ett lämpligt intervall. Tidsintervallet måste vara så pass långt så att man kan hinna kompensera för vissa naturliga variationer. Ett långt tidsintervall öppnar dock samtidigt upp möjligheter till ur vissa aspekter oönskad driftläggning.

Det andra villkoret begränsar hur mycket över tillståndets gräns den termiska effekten som mest får variera, det vill säga hur mycket man får pendla kring den i tillståndet uppgivna nivån. Siffran 2 % är vald med hänsyn till vad som kan anses vara en lämplig tolkning av regeringstillståndet. Den skall dock inte blandas ihop med det påslag på 2 % som traditionellt använts i vissa transient- och haverianalyser.

En koppling till reaktorns transient- och haverianalyser finns istället i det tredje villkoret som innebär att hänsyn måste tas till osäkerheten i effektbestämningen, och att denna osäkerhet inte får vara större än det påslag som gjorts i relevanta transient-

och haverianalyser. Om så inte är fallet måste antingen analyserna göras om vid en högre effektnivå, effektbestämningen förbättras eller medeleffektnivån sänkas. I villkoret ligger också implicit en mängd förutsättningar och ställningstaganden.

Vårt att uppmärksamma är att kravet utgår från medeleffektnivån, och inte från, vilket skulle kunna uppfattas som mer naturligt, det momentana värdet. Det innebär bland annat att den övre begränsningen istället sätts av kravet i punkt 2. Det innebär också att en kompromiss gjorts mellan betydelsen av effektnivå i kort- respektive långtidsperspektivet. För till exempel hårdnödskylningen är långtidsperspektivet det viktiga, vilket gör att slumpmässiga, mer eller mindre normalfördelade osäkerheter spelar mindre roll.

Genom kravet har SKI tagit ställning till att effektpåslaget i relevanta transient- och haverianalyser åtminstone skall täcka osäkerheten i effektbestämningen. Det kan dock vara så att påslaget ibland måste vara större.

Villkoret säger inte heller något om att det enbart är de mer eller mindre slumpmässiga mätosäkerheterna som det handlar om, utan hänsyn kan behövas även till andra möjliga okända osäkerheter eller fel.

Grunden till kravet är naturligtvis att försäkra att man med rimlig säkerhet håller sig inom analyserat område genom att ha kontroll över osäkerheterna i effektbestämningen. Med "rimlig säkerhet" menas här att det sanna värdet med åtminstone 97,5-procentig konfidens ligger under den effektnivå som använts i anläggningens transient- och haverianalyser.

Det innebär i sin tur att man måste göra en värdering av osäkerheten i effektbestämningen. Man måste dessutom hålla god kontroll över alla påverkande faktorer genom regelbundna kontroller, kalibreringar och utvärderingar (exempelvis av den använda värmebalansberäkningen och där nyttjade konstanter).

Från juridik till teknik

Drifttillståndet och vad som står där har en direkt innebörd för den dagliga driften av de svenska kärnkraftsreaktorerna. Många såväl tekniska som juridiska frågor, ibland outredda, kan gömma sig bakom ett kort textstycke. Även om denna artikel främst behandlat den juridiska uttolkningen av den tillståndsgivna effektnivån, så är tanken att en kommande artikel skall behandla några av de mer tekniska frågorna.

Kristina Johansson

Stora variationer i hur kärnkraftverken hanterar Värdefull kunskap i samband med pen



Av Kjell Ohlsson
Professor

*Artikelförfattaren är professor i Människa-Maskin Interaktion
vid Institutionen för Ekonomisk och Industriell Utveckling
på Linköpings Universitet*

Under de närmaste åren kommer ett stort antal s.k. nyckelpersoner att pensioneras vid våra kärnkraftverk. Dessa avgångar blottlägger en sårbarhet i flera organisationers kompetenssäkring på såväl det teoretiska området som ifråga om rent praktiska färdigheter. Fenomenet är inte unikt för Sverige utan globalt. Detta har också uppmärksamrats internationellt under senare år. Kompetensöverföring mellan olika generationer blir därför allt viktigare när anläggningar åldras, förnyas eller ersätts.

Kompetenskraven förändras över tid, vilket innebär att alla pensionsavgångar inte med automatik innebär en kompetensförlust. Bristen på systematik kan därför förklara varför man vid de svenska kärnkraftverken mer eller mindre tydligt identifierat personer som besitter nyckelkompetens för att möta morgondagens krav.

Två pilotstudier

En forskargrupp vid Linköpings Universitet har i början av året på uppdrag av SKI färdigställt en forskningsrapport (Larsson, A., Ohlsson, K., och Roos, A. 2007. "Kompetensöverföring på svenska kärnkraftverk i samband med pensionsavgångar," SKI Rapport 2007:27) som redovisar två pilotstudier som innefattat metodik, och strategier för att fånga upp så kallad tyst kunskap i organisationen för att bibehålla kompetensen när personal går i pension.

Syftet med studierna har framför allt varit att beskriva hur kompetensöverföringen genomförs vid olika anläggningar och vilka metoder, samt utvärderingsmetoder som används.

Resultaten visar att kompetensöverföringen sköts på olika sätt vid varje anläggning. Vid ett kärnkraftverk har man tagit ett samlat grepp och lagt upp ett speciellt program som inkluderar mentorer med speciell kompetens som man vill överföra till speciellt utvalda adepter, som anses vara betjänta av att genomgå ett relativt strukturerat kompetensöverföringsprogram.

kompetensöverföringen kan gå förlorad sionsavgångar

Vid övriga kärnkraftverk har man inte på samma sätt insett behovet av ett strukturerat kompetensöverföringsprogram utan nöjer sig med att låta adepter till en viss del gå parallellt med äldre, erfarna medarbetare. Där ligger tyngdpunkten på överföringen i själva mötet mellan mentor och adept. Därmed är det också svårare att ange vad som överförs, samtidigt som det är svårt att studera överföringsprocessen och att mäta resultatet.

Hitintills har inte kompetensöverföringen setts som ett stort problem. Det har dock aktualiserats under senare tid efter några incidenter. Forskarteamet har mot den bakgrunden frågat om man missat något i överföringen av kompetenser/attityder?

Litteraturstudie

En litteraturgenomgång som genomfördes i den första pilotstudien visar att det förekommer en lång rad olika kompetensöverföringsmetoder som används vid olika kärnkraftverk runt om i världen. Få av dessa metoder har plockats upp vid de svenska kärnkraftverken, där den dominerande metoden är att utnyttja parallelltjänstgöring, vilket är ett osäkert (med avseende på resultat), dyrt och kostnadsineffektivt sätt att förmedla kunskap på.

I rapporten beskrivs användandet av andra kompetensöverföringsmetoder, som i mycket liten utsträckning tillämpats vid svenska kärnkraftverk. En sådan metod är visualisering och simulering av processer på olika nivåer; något som med fördel kan användas i såväl byggnads-, som drift-, och underhållsfaser, samt vid avveckling av teknik, processer, anläggningar etc.

Generationsskifte

Svensk kärnkraftsindustri står inför ett generationsskifte, där många hundra personer går i pension under den närmaste 10-årsperioden. Många av dessa har varit med från början med att bygga upp kärnkraftverken och besitter därmed en värdefull kunskap, som snabbt kan gå förlorad. Samtidigt har "outsourcing" av kompetenser och en "naturlig" rörlighet i vissa personalkategorier gjort företagen mer beroende av utomstående konsulter, vilket enligt vissa forskare kan vara kontraproduktivt ur säkerhetssynpunkt.

Att sakna kompetens inom de egna väggarna kan på längre sikt utgöra en säkerhetsrisk. Forskare vid Linköpings Universitet har utifrån detta perspektiv, på uppdrag av SKI, genomfört två pilotstudier som syftat till att kartlägga de kompetensöverföringsmetoder och utvärderingsmetoder som används för närvarande vid de svenska kärnkraftverken. Dessutom har man inventerat användbara metoder som används utomlands.

Forskargruppen har under ledning av professor Kjell Ohlsson intervjuat företrädare för kärnkraftsindustrin. De har även skriftligt besvarat en enkät. Några handledare/mentorer och adepter har dessutom observerats under kortare arbetspass. Vidare har en internationellt förankrad litteraturgenomgång genomförts.

Därutöver har forskargruppen tagit del av företagsspecifik dokumentation som berör utbildningsinsatser m.m. Företagen har själva utsett personer som betraktas som nyckelpersoner på företagen och vars kunskaper man vill föra över till den yngre generationen.

Svårt att mäta resultat

Resultaten pekar på att man använder mentorer som under parallelltjänstgöring med nyrekryterade adepter antas föra över nödvändig kunskap. Rent generellt lovordas denna kompetensöverföringsmetod av IAEA, för att den gör den så kallade tysta kunskapen tydlig.

Merparten av de intervjuade klagar på att det är avsatt för litet tid för denna kompetensöverföring. För ca två tredjedelar av de intervjuade finns inte någon extra tid avsatt för kompetensöverföring. Vissa adepter går parallellt med en mentor endast några veckor, medan andra har ett flerårigt program inplanerat.

Det är endast vid ett kärnkraftverk som man följt IAEAs rekommendationer och för vissa utvalda nyckelpersoner lagt upp individuella program för kompetensöverföringen. Men dessa program har varit mycket generella och saknar fortfarande en klar bild över vad som skall överföras, kriterier för måluppfyllelse, och mätmetoder för att avgöra när kompetensöverföringen anses vara avslutad.

Dessa svagheter är noterade från pedagogisk synvinkel, liksom det faktum att metoden är tidskrävande och saknar motivationshöjande inslag. Dessutom kan ju metoden om man endast till vardags deltar i "överföring av kunskap" resultera i att mycket "okunskap", och osunda attityder och "fel" också överförs.

Återkoppling saknas

Personalen saknar också återkoppling på den kompetensöverföring som genomförs. Merparten av verkens personal är aldrig involverad i någon systematisk kompetensöverföringsprocess.

Vid samtliga anläggningar har flera seniorer uttryckt att oklara och alltför allmänna befattningsbeskrivningar försvårat kompetensöverföringsarbetet.

Befattningsbeskrivningar ger ingen vägledning om vilken kompetens som är av strategisk betydelse för företaget, eller vilket innehåll eller vilka moment utbildningsansvariga skall prioritera.

Verkens historik anses vara bland det svåraste att överföra till nästa generation. Detta beror bland annat på att det är långt ifrån allt som är dokumenterat. Fortfarande kontaktas vid behov pensionerade nyckelpersoner, som passerat 70-årsåldern, vilket indikerar att kompetensöverföringen inte fungerar speciellt bra.

Metodik och procedurer för kompetensöverföringen varierar inte bara mellan kärnkraftsföretagen utan också högst påtagligt inom varje företag. Detta är lovvärt ur individualiserings- och motivationssynpunkt, men det har varit svårt att via intervjuer och enkäter få fram en systematisk strategi som

förklarar dessa skillnader. Många av de intervjuade uppger att det inte finns någon styrning av kompetensöverföringen. Avstämningar sker i regel oregelbundet och högst informellt.

Praktikgemenskaper finns då nyanställda sätts in i större projekt tillsammans med personer med annan bakgrund, vilket sker vid projekt kring anläggningens förnyelse. Detta är ett bra komplement till mentorskap, men bör struktureras upp med avseende på att betona inlärningsstyftet, samt att följa upp inläringen även där.

Databas med händelser önskvärd

Något som flera efterlyst är ett bättre dokumentationssystem av händelser och uppbyggande av en gemensam databank, som är lätt sökbar. De informationskällor och databaser som man normalt använder sig av är relativt otillgängliga och oöverskådliga.

Synen på hur man förvärvar kunskap och färdigheter varierar i olika företagskulturer, mellan olika praktikgemenskaper och dessvärre också mellan individer. Men i pedagogiska sammanhang har man studerat hur olika metoder befrämjar inläring och vad som genererar färdigheter/expertis. Systematisk utbildning och teoretisk kunskap kan inte nog poängteras för att kunna haka upp vardagslivets erfarenheter på en tolkningsram, där händelser, tekniska lösningar, sociala relationer etc. sätts in i sitt sammanhang.

Förklaringsbakgrund saknas

Procedurell kunskap är nödvändig i kärnkraftssammanhang, men det är inte alltid som den är tillräcklig i ett säkerhetsperspektiv. Verken har ingen metodik för att överföra relevant kunskap; varför man gör på ett speciellt vis eller varför något är konstruerat på ett sätt men inte ett annat, eller varför man valt att göra vissa saker suboptimalt.

I dag när kärnkraftverken varit i drift i årtionden - till skillnad från när de var nya - har man inte heller några möjligheter att experimentera och prova på för att se vad som händer och därigenom bygga en mer komplett insikt om varför det ser ut som det gör.

Den moderna träningen i simulatorer erbjuder dock utmärkta möjligheter att bygga upp virtuella scenarier, visualisera tekniskt komplicerade processer, bygga funktionella användargränssnitt etc. Fördelarna är många – man kan t.ex.:

- köra tekniskt avancerade experiment utan att äventyra säkerheten,
- presentera optimal återkoppling i varje givet ögonblick,
- gå tillbaka i händelsekedjan för att fånga upp information som man missat eller tolkat fel,
- utnyttja historiska data i framtåtriktade scenarier,
- predicera händelseutveckling utifrån det sätt deltagarna hanterar situationen,

Exempel på kompetensöverföringsmetoder

- Formell utbildning inom prioriterade nyckelområden.
- Nyrekrytering av personal med "rätt" kompetensprofil.
- Konstruktivistiska metoder, som utgår från deltagarnas vardagliga erfarenheter.
- Praktikgemenskaper, där deltagarna gemensamt fördjupar sitt engagemang och sina kunskaper genom att samspela/kommunicera med mer erfarna medarbetare. Praktikgemenskaper kan innefatta "story telling", informella samtal, coaching och lärlingskap.
- Arbetsrotation.
- Mentorskap.
- Etablering av personliga nätverk.
- Systematisk dokumentation av expertkunskap.
- Dialogmetoder i seminarieform.
- Verbala protokoll, där en persons tankar kring en process som vederbörande utför dokumenteras t. ex. med hjälp av bandspelare.
- Dagboksanteckningar.
- Fokusgrupper, oftast med ett mindre antal experter inom en viss domän, som samlas kring ett gemensamt problem.
- "Brainstorming" för att hitta kreativa lösningar på ett givet problem.
- Intelligent informationssystem och lätt sökbara databaser.
- Visualiserings- och simuleringstekniker.
- Scenariogenerering och modellering av typhändelser.
- Olycks- och incidentrapporteringssystem, kan också användas vid kompetensöverföring.
- Olycks- och haveriutredningar, kan ligga till grund för att lära av andras misstag.

- upptäcka svagheter och flaskhalsar i det totala systemet,
- ära sig procedurer för felidentifikation, riskhantering, och akuta åtgärder,
- samt jämföra olika designalternativ med avseende på prestanda, effektivitet, kostnader, användarvänlighet etc.

Projektteamet föreslår därför att simulering, modellering och visualisering av anläggningar, procedurer, operationer, etc. blir till en integrerad del av framtida kompetensöverföringsprogram vid svenska kärnkraftverk.

Underbemanning kan hota säkerheten

Flera av de intervjuade mellancheferna klagar på att de lider av underbemanningen, vilket kan äventyra säkerheten vid anläggningen. Kraven på medarbetarna blir också helt annorlunda när anläggningarna uppgraderas. Samtliga anläggningar i Sverige har blivit mer beroende av konsulter för att upprätthålla säkerheten, vilket nästan samtliga intervjuade beklagar. Den slutsats som forskarteamet har gjort kring denna frågeställning är att det högsta kompetenslyftet för kärnkraftverken i Sverige är att anställa de nyckelkompetenser som man idag hyr in från konsultföretag. Detta skulle sannolikt gagna säkerheten mer än t.ex. tätare revisioner. Under de senaste två åren har de svenska kärnkraftverken haft ungefär dubbelt så många konsulter som egen personal involverade i omställnings- och förnyelseprogram.

Från myndighetshåll insåg man tidigt sambandet mellan kompetens och säkerhet. Nu har man också höjt ribban. I dag skall såväl kärnkraftverkens entreprenörer som underentreprenörer vara auktoriserade av SKI.

Viktigt vistas i miljön

Mycket av det man behöver överföra ligger på igenkänningsnivå, vilket påkallar behovet av att se systemet/objektet i fråga och vistas i den miljön för att komma ihåg saker om det. Därför kan man heller inte förutsätta att det finns möjligheter i vardagen för att tillräckligt mycket ska komma fram och kunna överföras. Framför allt indikeras detta genom att man i intervjuerna nämner att det inte räcker att titta på ritningar och berätta därifrån. Man behöver också vara ute på blocket och titta. Just möjligheten att genom visualisering komma åt de platser på kärnkraftverken man inte kan se vanligtvis skall därför inte undervärderas.

Att kunna titta på ställen man normalt inte kan komma åt är vad som gör revisionerna till utmärkta tillfällen för inläring, nämner man i intervjuerna. Om man kan diskutera strukturer och teknik innan revisionen med hjälp av en tredimensionell visualisering, kan man komma med djupare frågor under själva revisionen och sparar därmed tid. Revisionerna skulle kunna utgöra utmärkta undervisnings-

tillfällen för nya adepter, men dessa utnyttjas inte vid något kärnkraftverk i Sverige, med hänvisning till den tidsbrist (och intäktsbortfall) som alltid gäller. En annan invändning kan vara att det bidrar till att öka den kollektiva dosbelsatningen.

Tips från intervjuerna

Under intervjuerna har flera idéer till hur man kan eller bör arbeta med generationsskiftet lyfts fram. Några redovisas nedan:

- Hitta singelkompetenser på andra avdelningar genom att se vilka man själv kontaktar för att få hjälp, om detta bara är en person eller flera.
- Återföra kunskap om hur andra arbetat med kompetensöverföringen så att man kan skapa en lista med för- och nackdelar med olika arbetssätt.
- Ett större samarbete efterfrågas mellan kärnkraftverken, så att man kan dra nytta av varandras erfarenheter gällande kompetensöverföringen.
- Överföra kompetensen sekventiellt för att undvika att nyligen överförd kompetens försvinner när en nyanställd slutar.
- Ge de nyanställda eget ansvar, men se till att de inte får för mycket att göra, "filtrera" gärna deras arbete med hjälp av chef och mentor så man kan märka att det är en lagom mängd.
- Lägg inte ansvaret för kompetensöverföringen på cheferna, eftersom de har svårt att prioritera den när det finns mycket att göra och när de själva har mycket att göra.
- Ge de blivande pensionärerna en "morot", exempelvis i form av egen kompetensutveckling inom annat område, för att öka motivationen att syssla med kompetensöverföring.

Slutsatser

Ett strukturerat arbetssätt för kompetensöverföring saknas till stor del vid samtliga kärnkraftverk i Sverige. Mycket skulle vara vunnit ur säkerhets-synpunkt om kärnkraftverken kunde samverka med att ta fram gemensamma kompetenskrav för olika befattningshavare, gemensamma kompetensöverföringsprogram, utvärderingskriterier, utvärderingsmetoder och utbildningspaket. Den slutsats man kan dra av inventeringarna gjorda i de två förstudierna är att kärnkraftverken står inför en stor utmaning att säkra den kompetens som finns eller har funnits i organisationerna. Detta är centralt för att man på ett trovärdigt sätt kunna upprätthålla en acceptabel säkerhetsnivå – genom att genomföra mer grundläggande studier om effektiva kompetensöverföringsmetoder, ta fram vetenskapligt underbyggda kriterier och mätmetoder.

Den intresserade läsaren som vill veta mer om specifika resultat och resonemang kring kompetensöverföring hänvisas till rapporten (SKI Rapport 2007:27) som finns att ladda ner på myndighetens webbplats www.ski.se.

Kjell Ohlsson

Kontroll av reaktorinneslutningar

Ingen enskild metod ger i – en kombination av olika



Av Peter Merck

Artikelförfattaren är utredare på enheten för reaktorteknologi och strukturell integritet vid Statens kärnkraftinspektion

Säkerheten kring en kärnkraftreaktor skall upprätthållas så att radiologiska olyckor förebyggs. Detta förebyggande skall ske genom att det finns flera successiva barriärer och ett s.k. djupförsvär. Barriärerna är själva bränslet med dess kapsling, primärsystemet med reaktortryckkärlet samt reaktorinneslutningen. Alla barriärer är viktiga för anläggningens säkerhet men har olika säkerhetsbetydelse vid olika drifttillstånd, störningar och haverier. Inneslutningens funktion skall upprätthållas vid alla händelser och behöver därmed kunna klara höga tryck och belastningar. Detta ställer extra höga krav på konstruktionen samt funktion och tillstånd.

Specifika regler på teknisk utformning av kärnkraftreaktorer och deras inneslutningar finns i Statens kärnkraftinspektions föreskrifter om konstruktion och utförande av kärnkraftreaktorer (SKIFS 2004:2). I dessa föreskrifter ställs det bland annat krav på att inneslutningsfunktionen skall upprätthållas vid alla händelser – till och med vid osannolika händelser.

Inneslutningen skall motstå mycket osannolika händelser

Dessutom ställs det krav på att inneslutningen skall vara konstruerad med beaktande av fenomen och belastningar som kan uppstå i händelseklassen mycket osannolika händelser i den utsträckning som behövs för att begränsa utsläpp av radioaktiva ämnen till omgivningen.

Med mycket osannolika händelser menas händelser som kan leda till stora härdsador. Exempel på sådana händelser och fenomen, som anges i allmänna råd till föreskriften SKIFS 2004:2 och som kan föranleda åtgärder, är högtrycksgenomsmältning av reaktortryckkärlet, ångexplosion, återkriticitet, vätskebrand och undertryck i reaktorinneslutningen.

Av SKI:s föreskrifter följer vidare två grundläggande konstruktionskriterier på inneslutningen,

dag fullständigt resultat metoder är nödvändig

nämligen att den skall uppfylla uppställda täthetskrav och motstå de belastningar, både termiska laster och trycklaster (statiska och dynamiska), som kan uppstå vid postulerade haverier. I haverifallen med allvarliga härdsador måste inneslutningen behålla sin integritet under mycket lång tid.

Kombination av laster

Under ett haveri kommer inneslutningsstrukturen, inklusive det täta skalet, att påverkas av tryck- eller temperaturlastningar, oftast en kombination av båda. När det gäller riskdominerande laster under förhållanden inom design så är ett exempel pooldynamiska laster i kokvattenreaktorer.

Pooldynamiska belastningar uppstår i samband med blåsning av gas och/eller ånga från inneslutningens primärutrymme (drywell) till kondensationsbassängen i sekundärutrymmet (wetwell) och orsakas av nivåhävning¹, kondensationsoscillationer² och chugging³.

För haverier utanför design, dvs. svåra haverier, är tryckbelastningar viktiga under hela haveriförloppet (dock är exceptionella belastningar på inneslutningen innan tankgenomsmltning mindre sannolika) medan temperaturlastningar utgör ett hot mot inneslutningens integritet först efter tankgenomsmltning.

Fenomen som måste analyseras

Under ett svårt haveri, med partiell eller fullständig härdsmlta, kan reaktorinneslutningen och interna inneslutningsstrukturer påverkas av exceptionella tryck- och/eller temperaturlastningar.

Följande fenomen kan ge upphov till dessa belastningar: direktuppvärmning av inneslutningen i samband med högtrycksgenomsmltning av reaktortanken, ångexplosioner i inneslutningen, vätgasförbränning, smälta-betong interaktion, höga temperaturer i inneslutningen, reaktionskrafter vid tankgenomsmltning och återkriticitet vid återflödning av skadad härd i kokvattenreaktorer.

Även om sannolikheten för allvarliga inneslutningsskador, inklusive inneslutningsbrott, på grund av ett svårt haveri bedöms som liten är det viktigt att förstå dessa fenomen och deras påverkan på inneslutningen eftersom flera av dessa potentiellt kan

orsaka tidigt inneslutningsbrott med stora omgivningskonsekvenser som följd.

Inneslutningarnas tillstånd måste bevakas

Reaktorinneslutningar är robusta och tåliga konstruktioner med huvudsakligen goda drifterfarenheter. De skador och försämringar som inträffat visar att dessa huvudsakligen har orsakats av brister i samband med uppförandet eller vid senare anläggningsändringar. Det är i första hand korrosionsskador i inneslutningarnas metalliska delar som har inträffat. Liknande erfarenheter finns internationellt. Med hänsyn till svårigheterna att tillförlitligt kontrollera reaktorinneslutningarna och andra vitala byggnadsstrukturer är det emellertid angeläget att andra möjliga åldrings- och skademekanismer som kan påverka delarnas integritet utreds och bevakas.

Skademekanismer

Mekanismer som kan påverka själva betongdelarna är bl.a. kemiska reaktioner, urlakning, sulfatangrepp, cementballastrektioner och karbonatisering. När det gäller dessa skademekanismer har hittills genomförd forskning visat att miljön i svenska inneslutningar är sådan att risken för olika miljöbetingade skador eller andra försämringar av betongdelarna generellt sett är liten. Å andra sidan visar de inträffade skadorna att avvikelser från ritningsenligt utförande har lett till skador i ett senare skede.

Risken för olika skademekanismer kan därför inte enbart baseras på driftmiljöbetingelserna och den nominella konstruktionen, utan måste också bedömas mot bakgrund av de rapporterade skadorna. Frågor om vilka ytterligare kontrollprogram och kontrollmetoder som behöver utvecklas för att kunna möta eventuella hot mot inneslutningarnas täthet och integritet i tid måste därför också bevakas och utredas.

Täthetsprovningar

I SKI:s föreskrifter om mekaniska anordningar i vissa kärntekniska anordningar (SKIFS 2005:2) finns omfattande krav på tillståndshavaren att kontrollera tryckbärande och andra mekaniska anordningar. Detta gäller framförallt tryckkärl, rörled-

”...Ett integralt täthetsprov måste föregås av en visuell kontroll av inneslutningen, alla för ögat åtkomliga ytor skall granskas. Om den visuella kontrollen avslöjar skador som kan innebära ett hot mot integriteten av inneslutningen skall dessa repareras innan tillåtelse kan ges för att utföra provtyp A...”

ningar, pumpar och ventiler i en reaktors primär- och säkerhetssystem. För sådana komponenter skall det finnas ett kontrollprogram där kontrollens omfattning är relaterad till den risk för härdskada, utsläpp till omgivningen, oavsiktlig kedjereaktion eller andra brister i säkerhetsnivån som kan uppkomma till följd av ett fel på just den komponenten.

För mekaniska anordningar som utgör integrerade delar av reaktorinneslutningen gäller inte dessa föreskrifter. Kontrollkrav finns men är ännu så länge begränsade till åtkomliga delar av bl.a. tätplåtar och spännkablar samt återkommande täthetsprovningar.

Integrala täthetsprov

Dessa provningar, s.k. integrala täthetsprov (benämnda provtyp A) utgör tillsammans med lokala täthetsprov (benämnda provtyp B och C) idag de huvudsakliga kontroller som görs för att verifiera integriteten och tätheten hos reaktorinneslutningen.

Ett integralt täthetsprov innebär att man utför läckagemätningar av en trycksatt inneslutning. Läckaget får inte överstiga acceptanskriterierna för provet. Acceptanskriterier, trycknivåer och intervaller för utförande av integrala täthetsprover är definierade och har sitt ursprung i regler som tillsynsmyndigheten i USA, Nuclear Regulatory Commission (NRC) angivit i Appendix J till lagen 10 CFR Part 50.

Ett integralt täthetsprov måste föregås av en visuell kontroll av inneslutningen, alla för ögat åtkomliga ytor skall granskas. Om den visuella kontrollen avslöjar skador som kan innebära ett hot mot integriteten av inneslutningen skall dessa repareras innan tillstånd kan ges för att utföra provtyp A.

Anpassade provningsintervall

Acceptanskriterier, trycknivåer och intervaller för periodiska A prov regleras enligt två förekommande alternativ i Appendix J, en s.k. option A och en s.k.

option B. Option A tillåter provtryckning 3 gånger jämt fördelade på 10 år vid minst halva det tryck som kan uppkomma vid ett konstruktionsstyrande rörbrott, sk DBA-trycket. Option B som tillkom 1995 är ett komplement till regelverket och tillåter ett tillståndsbaserat provintervall på upp till 10 år.

Att provintervall är tillståndsbaserat betyder att provfrekvensen kan bestämmas med hänsyn tagen till tidigare mätningars provresultat. I praktiken betyder det att om tidigare täthetsprovningars resultat har varit positiva, i den bemärkelsen att acceptanskriterierna för proven inte överskridits, så kan provintervall förlängas. Man kan på så vis anpassa provintervallen för varje kraftverk. SKI har med hänsyn till dels skadeerfarenheter, dels att viktiga förutsättningar för intervallförlängningar skiljer mellan svenska och amerikanska reaktorer dock inte accepterat 10-års intervall för täthetsprovningar av svenska reaktorinneslutningar.

Täthetsprovningarna ger en god återkommande bild av reaktorinneslutningarnas täthet, men som alla sådana prov upptäcks skador och andra försämringar först när läckage uppkommit. Det finns därför behov av oförstörande provningsmetoder som kan upptäcka skador i ett tidigare skede. Som ett led i SKI:s vidare utredningar av vilka ytterligare krav på kontroll av reaktorinneslutningar som behöver ställas har myndigheten deltagit i och finansierat ett antal forskningsprojekt med syfte att klargöra möjligheter och begränsningar hos olika oförstörande metoder för provning av betongstrukturer.

Oförstörande provningsmetoder

För kontroll av betongkonstruktioner och speciellt inneslutningarna finns idag metoder baserade på elektromagnetiska vågor (radar, röntgen), akustiska tekniker med mekaniska vågor (ultraljud, impact echo, akustisk emission). Det finns också metoder som baseras på elektriska och magnetiska fält, metoder som utnyttjar värmestrålning (termografi), samt optiska metoder (t.ex. shearografi).

– Akustiska metoder

De ultraljudsmetoder som idag används för betongkonstruktioner har mycket lägre frekvenser än de för metalliska material. Lägre frekvenser ger lägre upplösning. Lika som för ultraljudsmetoder för metalliska material går utvecklingen mot användandet av matriser av ultraljudssökare och lovande resultat har visat att sådana typer av ultraljudssökare kan finna håligheter och kartlägga spännarmering i betongkonstruktioner. En fördel med ultraljudsteknik är att signalerna kan tränga igenom metalliska material i en betongkonstruktion och ändå återge information djupare ner i materialet. Motsatt gäller för håligheter eftersom ultraljudsvågor har mycket låg utbredning i luft. Utvecklingen av sökare går snabbt framåt och det senaste för ultraljud av betongkonstruktioner är

en sökare med en stålspets för generering av longitudinella och transversella vågor.

En vanlig metod för tjockleksmätning och lokalisering av håligheter i betong är Impact echo. Metoden genererar en akustisk signal genom att skjuta en kula mot ytan. Frekvensen ligger mellan 1-100 kHz. Ekon registreras av accelerometrar som fixeras mot ytan.

Akustisk emission är en passiv metod som lyssnar efter sprickbildning i betong eller i spännarmering. Tekniken filtrerar bort bakgrundsbrus och kan lokalisera sprickbildning genom att en mängd sensorer placeras på konstruktionen. Metoden är mycket bra på att lokalisera varifrån signalerna kommer. En begränsning är att metoden kräver belastning av strukturen som skall provas.

– Elektromagnetiska metoder

Radiografering är en metod som återger objektet som en bild och resultatet är förhållandevis enkelt att tolka. Metoden kräver dock för tjocka betongväggar högenergetisk elektromagnetisk röntgenstrålning för att klara av att tränga igenom strukturen och nå detektorn. Metoden kräver tillgänglighet på båda sidor om konstruktionen och utrustningen är otymplig och det tar lång tid att inspektera små ytor. Den utveckling som sker inom digitala detektorer för röntgenstrålning talar för metoden och möjliggör högupplösta bilder trots de höga energierna.

GPR (Ground Penetrating Radar) är en teknik baserad på radar. Metoden är mycket bra på att detektera metallobjekt i en betongstruktur. Däremot är det svårt att se mer än första metallstrukturen på grund av att allt reflekteras när vågorna når metallytan.

– Övriga tekniker

ESPI och shearografi är optiska tekniker som bygger på interferens vid laserscanning. Metoderna är mycket rörelsekänsliga och kräver belastning av konstruktionen som provas. Det finns även en rad elektriska tekniker som arbetar med magnetiska fält, likt en metalldetektor. Dessa metoder är enkla och snabba och klarar att lokalisera och bestämma djupet ner till första armeringen. Metoden har begränsningar i djup. Det finns också metoder som med magneter bildar ett magnetfält som genererar ett magnetiskt fält i armeringen. Skador i armeringen kommer i dessa fall att orsaka ett läckage i fältet och på så sätt detekteras skador.

Förutom utveckling av teknik krävs åtkomlighet och metoder för att inspektera stora ytor. Det finns nu tillämpningar av bärutrustningar som med hjälp av en kraft mot betongytan kan ta sig fram på vertikala betongväggar.

Slutsatser och vidare utvecklingsarbeten

De slutsatser som kan dras av hittills utförd utredning och forskning är att det för närvarande inte

finns någon enskild teknik som direkt kan appliceras för kontroll av betong och ingjutna delar med avseende på degradering, ofullständig eller skadad armering, konditionen på ingjutna tätplåtar eller genomföringar. Flera av befintliga tekniker kan däremot kombineras för att uppnå en fullständig provning. I ett Europeiskt forskningsprojekt med benämningen CONMOD⁴ där SKI deltagit har bl.a. olika kontrollmetoder studerats. I det projektet har angreppssättet varit att på bred front studera och utveckla metoder som kan kombineras för aktuell kontrolltillämpning. Flera av metoderna ovan har i det projektet utvecklats och anpassats för just inneslutningstillämpningar.

Scanning av stora volymer är svårt och omöjligt med vissa av metoderna men med samma resonemang som ovan kan viktiga områden scannas med olika tekniker för att genomföra noggrannare undersökningar inom bestämda områden eller vid påträffad skada med en lämplig metod för just den tillämpningen eller det problemet.

SKI:s vidare arbete inom området

SKI fortsätter att stödja forskning för att kartlägga oförstörande provningsmetoder dels inom det s.k. ELFORSK^e-programmet inom betongkonstruktioner samt inom andra mindre projekt. Det sker också ett eget utredningsarbete inom SKI där bland annat kraven för kontrollprinciperna kommer att utvecklas vidare och skärpas för inneslutningarna.

Peter Merck

Fotnot

1. Nivåhävning uppkommer i initialskedet vid blåsning av gas och/eller ånga till kondensationsbassängen. Vattnet nedanför nedblåsningsrörens mynning stiger snabbt.
2. Kondensationsoscillationer uppkommer efter nivåhävning då andelen ej kondenserbar gas minskar. Kondensationen vid nedblåsningsrörens mynning blir instabil och skapar oscillationer.
3. Vid låga ångflöden och mindre gasblandningar kan ångbubblan kollapsa på grund av för kraftig kondensationsökning. Detta brukar kallas "Chugging".
4. CONMOD = Concrete containment management using the Finite Element technique combined with in-situ Non-Destructive Testing of conformity with respect to design and construction quality
5. ELFORSK driver med finansiering från de svenska tillståndshavarna och SKI ett projekt där kartläggning av oförstörande provningsmetoder ingår som en del. (ELFORSK = Svenska Elföretagens Forsknings och Utvecklings- ELFORSK- AB)



F&U-MAGAZINET NUCLEUS GES UT AV STATENS KÄRNKRAFTINSPEKTION

POST-
TIDNING
A

Sverige
SKi
Porto betalt

Avsändare/Returadress: Infohuset Vik, Lukasvägen 31, 272 95 Simrishamn



*Vill du ha en egen
gratis prenumeration på Nucleus?
Fyll då i en kupong här bredvid
så få du din första tidning
då nästa nummer utkommer!*

STATENS KÄRNKRAFTINSPEKTION

SVARSPOST

110 620 100

110 00 STOCKHOLM

Frankeras ej

SKI

betalar portot

Ja tack, jag vill gärna prenumerera gratis på Nucleus

Namn _____

Företag _____

Adress _____

Postnummer _____ Postadress _____

STATENS KÄRNKRAFTINSPEKTION

SVARSPOST

110 620 100

110 00 STOCKHOLM

Frankeras ej

SKI

betalar portot

Ja tack, jag vill gärna prenumerera gratis på Nucleus

Namn _____

Företag _____

Adress _____

Postnummer _____ Postadress _____

REPLY PAID/REPOSE PAYEE

SWEDEN/SUEDE

STATENS KÄRNKRAFTINSPEKTION

S-110 00 STOCKHOLM

SWEDEN

By air mail

Par avion

NE PAS AFFRANCHIR

NO STAMP REQUIRED

IBRS/CCRI: 110 620 100

Ja tack, jag vill gärna prenumerera gratis på Nucleus

Namn _____

Företag _____

Adress _____

Postnummer _____ Postadress _____

Land _____

