

Analys av Örjan Bernander

Kärnkraftens utvecklingsmöjligheter

Förord av Hans Blix, fd. generaldirektör för FNs atomenergiorgan IAEA

En god energiförsörjning är som ett väl fungerande blodomlopp för världen och ländernas ekonomi. Frågor som den kraftigt växande befolkningen i världen, begränsningarna i världens oljetillgångar och tidiga förhoppningar om kärnkraftens utvecklingsmöjligheter dominerade den internationella energidebatten fram till cirka 1980. De senaste 20 åren har de viktigaste energifrågorna varit kärnkraftens acceptansproblem och fossilförbränningens miljö- och klimatpåverkan.

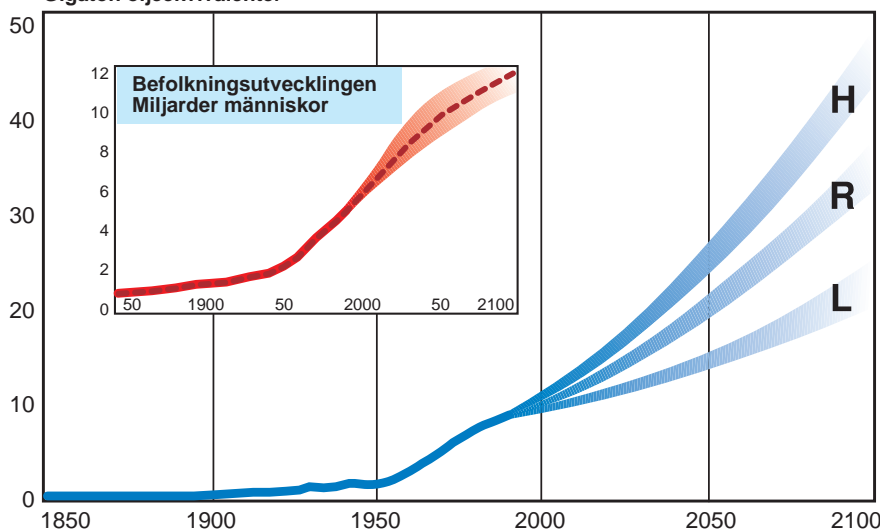
World Energy Council är kanske vid sidan av IEA (OECD) det internationella organ som mest seriöst bearbetar de globala energifrågorna. Nedanstående diagram ger en lärorik beskrivning av tänkbara utvecklingstendenser för världens befolkning och dess energibehov.

Framtidens samlade produktion och konsumtion av energi behöver förvisso bli mer miljövänlig än dagens, men – om man begränsar perspektivet till så där 50 år – blir den

med säkerhet inte det ena eller det andra utan en mix av flera energikällor. De fossila bränslena, kol, olja och gas, utgör idag mer än 85 % av världens totala kommersiella energi. De kommer inte att försvinna som genom ett trollslag, men användningen av dem behöver minska samtidigt som världens energibehov stiger. Vi skulle därför behöva öka utnyttjandet av såväl kärnkraft som förnybara energikällor. På samma gång behöver vi anstränga oss att undvika slöseri i produktion och konsumtion av samtliga energikällor, och söka minimera deras miljöpåverkan.

Bakom fasaderna pågår ett omfattande utvecklingsarbete inom alla energiområden. Den analys om kärnkraftens utvecklingsmöjligheter som publiceras här känns frisk och uppmuntrande. Om utvecklingen kan fortsätta på det sätt som antyds – och det tror jag den kan göra – finns det anledning till ökande optimism om den framtida energiförsörjningen i världen. □

Gigaton oljeequivalenter



Figur 1. Utvecklingen av världens befolkning och framtida energibehov från år 1850 och prognoser till 2100 enligt World Energy Council (WEC) Ref. 1. I figuren visas tre scenarier för utvecklingen under de närmaste 100 åren:

- H = hög, "business as usual"
- R = referens
- L = låg, ekologiskt scenario

Kärnkraftens utvecklingsmöjligheter

En allmän uppfattning är att dagens kärnkraft är färdigutvecklard, att den har nått vägs ände och att dess utveckling avstannat.

En sådan syn kan inte försvaras eftersom kärnkraften faktiskt byggs ut. Dessutom är dess utvecklingspotential stor, energiråvaran långsiktigt uthållig och i ett globalt perspektiv kan en stor ökning av energibehovet väntas under det närmaste seklet. Det framgår tydligt i prognoserna från World Energy Council på föregående sida.

I denna Bakgrund analyseras dessa faktorer samt förutsättningarna och drivkrafterna för en fortsatt utveckling av kärnkraften och hur den kan komma att se ut. I detta sammanhang intar frågor om säkerhet och ekonomi en central plats, liksom framtida begränsningar i användningen av fossila bränslen på grund av deras klimateffekt.

Örjan Bernander

Perspektiv

Utgångsläget för analysen är att det i världen finns nära 440 kraftproducerande reaktorer i drift i 32 länder (mars 1998). Den totala kapaciteten var under 1997 ca 350 000 MW (i Sverige 10 000 MW) och produktionen ca 2 700 TWh (70 TWh elenergi, omkring 17 % (50 %) av den totala elproduktionen [1] [2].

Den sammanlagda drifterfarenheten var i början av 1999 nära 9 000 driftår. Under 1998 var drygt 30 reaktorer under byggnad i 13 länder. Den helt dominerande reaktortypen är system som är modererade och kyllda av vatten, i huvudsak lättvattensystem (Light Water Reactors, LWR). All kommersiell nybyggnad består av tryckvatten- eller kokvattenreaktorer (PWR, inklusive tungvattensystem, respektive BWR).

Energikonsumtionen ökar

De framtida energibehoven är naturligt nog svåra att uppskatta och kommer att bero av växelverkan med den politiska, sociala och industriella utvecklingen i en stor del av världen.

Inverkan av nya energiproduktions-sätt (t ex solenergi, fusion), tekniska framsteg i energihushållningen och el-kostnadernas utveckling bidrar likaså till att göra prognoserna osäkra.

Enligt Världsenegerirådet (World Energy Council, WEC), kommer energikonsumtionen att öka till minst det dubbla under de kommande 50 åren [3]. Se Fig. 1.

Detta förutsätter att effekten av energihushållning får gott genomslag. Utan

en sådan hushållning kommer energibehovet att öka väsentligt mycket mer (enligt WECs högalternativ, H i diagrammet).

Ändliga resurser

Hur ska dessa stora energibehov kunna tillgodoses samtidigt som kraven på att hålla igen på fossileldad kraft växer?

Problemet är inte bara hänsynen till möjlig klimatpåverkan genom utsläpp av bland annat koldioxid, utan också att olja och kol är ändliga resurser med andra nuvarande och framtida användningar än för energiproduktion. Vi behöver bara tänka på plaster och konstruktionsmaterial, och långsiktigt kanske på produktion av födoämnen.

Det är i dag svårt att se hur de förnybara energislagen som vindkraft, biomassa, geotermisk energi och solenergi, som i dag bidrar med ca 1 % av den installerade eleffekten i världen, ska kunna fylla hela behovet inom den diskuterade tidsramen [4]. I ett sådant scenario kan kärnkraften spela en viktig roll för världens energiförsörjning.

Långsiktig resurshushållning

Det vore förmätet och ansvarslöst av oss att inte söka ta vara på den möjlighet som kärnkraften uthålligt kan ge, förutsatt att det sker ekonomiskt och på ett för människor och miljö säkert sätt.

Perspektivet i den här Bakgrunden omfattar dels den nära liggande tiden, dvs en fortsatt utbyggnad av "konventionella" reaktorsystem de närmaste 10 till 30 åren som baseras på en stegvis utveckling av dagens reaktorer.

Dels kan man blicka bortom denna tid då nya innovativa system erfordras för att klara den långsiktiga resurshushållning och ökande mängder avfall.

Den senare ansatsen kan tyckas vara något spekulativ, men den skisserade utvecklingen är klart realiserbar.

Innehåll

Perspektiv	2	På lång sikt – innovativa reaktorsystem	6
Förutsättningar och drivkrafter	3	Råvarutillgångar	8
På kort sikt: stegvis utveckling av tekniken	3	Slutord Referenser	10
Exempel på stegvis utveckling	4	Några begrepp inom reaktortekniken	11

Förutsättningar och drivkrafter

Kärnkraften har en stor inneboende utvecklingspotential. Utbyggnaden måste vara kommersiellt konkurrenskraftig och förutsätter givetvis att allmänhetens förtroende för kärnkraften ökar.

Speciellt bör den oro för säkerhet, avfallshantering och spridning av vapenmaterial som anförs mot kärnkraft kunna stillas. Det måste visas att kärnkraften kan bli en uthållig energikälla bortom år 2050.

Kärnkraften contra andra energislag

För en bedömning av kärnkraftens framtidsmöjligheter relativt andra energislag behöver många faktorer vägas in, bland annat följande:

- Utvecklingstakten av andra produktionstekniker (bioenergi, solkraft, vind, fusion, etc.)
- Miljöpåverkan, avfallshantering
- Omgivningssäkerhet vid drift
- Långsiktighet i energiförsörjningen
- Råvaruresurser
- Ny teknik – material, IT-tillämpningar
- Kommersiell konkurrens mellan energislag, inräknat inverkan från avreglering av elmarknaden och av miljöskatter på framför allt fossila bränslen.

Utvecklingsarbetet måste inriktas på fortsatt ökning av säkerheten och tillförlitligheten samt på att minska kostnaderna.

Några för kärnkraften specifika frågor där fortsatt utveckling är viktig:

• Säkerhetsförbättringar för acceptans gällande:

- Prestanda som ökar tåligheten för driftstörningar
- Säkerhetssystem, ofta passiva sådana, för förhindrande av härdskada. Dessutom konsekvenslindrande system (dvs ett utvecklat ”djupförsvar” mot olycksituationer)
- Svåra haverier: hantering av eventuell härdsmläta inne i anläggningen utan att radioaktivitet sprids till omgivningen.

- **Ringa miljöpåverkan**
- **Ekonomisk konkurrenskraft**

Kärnkraften måste naturligtvis kunna konkurrera på likvärdiga ekonomiska villkor med andra energislag. Den hade tidigare ett klart ekonomiskt försteg framför exempelvis kolkraft.

Fallande kolpriser, höjda prestanda i kolkraftanläggningar och fördyrad drift av kärnkraftverken har lett till att produktionskostnaderna idag är nästan likartade (beroende på lokala förhållanden). Detta ställer krav på högre drifttillgänglighet och lägre driftkostnader hos kärnkraftverken.

På en avreglerad elmarknad har kraften från kol och naturgas dessutom kort-siktiga fördelar genom att den är mindre kapitalintensiv och att byggnadstiderna är korta.

För ny kärnkraft gäller därför att förenklingar, standardisering, och bättre byggnadsteknik – allt med skärpta säkerhetskrav – måste ge lägre kapitalkostnader. Investeringen i ny kärnkraft måste således ske så att både kapital- och driftkostnaderna minskas.

På kort sikt, stegvis utveckling av etablerad teknik

En fortsatt utveckling av den i huvudsak etablerade tekniken bygger på att förbättringar, baserade på bland annat drifterfarenheter, stegvis införs.

Erfarenhetsåterföring blir då ett viktigt begrepp. Detta innebär bland annat att tillverkaren i ett samarbete tar till vara reaktoroperatörernas drifterfarenheter och synpunkter på systemutformning samtidigt som hänsyn tas till ändrade och nya krav från tillsynsmyndigheten.

Ett sådant förfarande ger väsentliga förbättringar jämfört med de förhållanden som rådde då de första kärnkraftverken kom till. Mångfalden i utvecklingen tillgodoses av att det finns flera aktörer i många länder.

Nya system

För nya system definieras övergripande mål och funktionella krav. Några exempel är:

- ökade tekniska marginaler till givna gränsvärden
- förenklingar i konstruktionen
- minskat beroende av operatörsingrepp
- ökad tolerans för fel
- ökad tillförlitlighet

- längre komponentlivslängder
- kortare byggnadstid
- minskad tid för bränslebyte och revision
- minskade stråldoser till personalen.

Tydliga mål ställs upp för att ytterligare reducera sannolikheten för svåra olyckor. På samma sätt anges tydligt ramarna för investeringskostnaderna och driftökonomi.

Kort sagt, anläggningen ska vara säker, användarvänlig och ekonomisk.

Stegvis utveckling

De i Sverige senast idrifttagna reaktorernas konstruktion togs fram redan i slutet av 70-talet eller i början av 80-talet.

Nu kan de omfattande drifterfarenheterna med dessa system komma till god nytta.

Styrkan i en sådan stegvis utveckling är givetvis att ett nytt system kan byggas med minimal osäkerhet beträffande funktionalitet och kommersiella villkor.

Några viktiga faktorer kan nämnas.

- **Bred acceptans inom elkraftindustrin och hos tillsynsmyndigheten.**

Ett sätt för en leverantör att nå acceptans för en reaktorkonstruktion är att uppfylla en av kraftindustrin accepterad

kravbild. En som växt fram i samarbete med erfarna kraftverksägare, och som också berörda tillsynsmyndigheter kan granska och godkänna.

Två exempel på sådana kravbilder är dels den samverkan mellan kraftbolag som sker i amerikanska Electric Power Research Institute, EPRI, med sina Utility Requirements Documents (URD). Dels sker ett samarbete i det europeiska EUR-projektet – European Utility Requirements.

EUR-projektet startades ursprungligen av det franska kraftbolaget Electricité de France och nio tyska kraftföretag, men har sedan utvidgats till att omfatta deltagare från andra länder, bland andra Sverige. Olika tillverkare har här tillfälle att bidra med praktiska lösningar och synpunkter, men projektet samordnas av kraftföretagen.

Övergripande krav av säkerhetskaraktär specificeras, men varje tillverkare är fri att föreslå egna tekniska lösningar.

• Förenklad licensiering

Man eftersträvar en generell och av myndigheter accepterad säkerhetsbas, t ex enligt EUR-rekommendationerna. Så långt möjligt ska inga oklarheter kvarstå om vad som i den färdiga anläggningen är säkerhetsmässigt acceptabelt. Förfarandet ger mycket stora fördelar när en serie reaktorer byggs av samma modell.

• Minskade kostnader för konstruktion, bygge och anläggningsdelar

Standardisering av reaktortyp och komponenter, ny byggnadsteknik och nya typer av komponenter, nya material och förenklingar i systemlösningar kan ge kortare byggnadstid och därmed minskade kostnader, trots att utökade säkerhetskrav ställs.

Exempel på nya lösningar är att öka prefabricering av bygg-, installations- och systemmoduler.

Att använda moderna hjälpmedel för konstruktion och projektstyrning (CAD) är viktigt i sammanhanget.

• Minskade osäkerheter och störningar under konstruktion och montage

Hög utnyttning av tidigare systemerfarenheter gör att man undviker kostsamma störningar i konstruktions- och byggnadsarbetet.

• Minskning av drifts- och underhållskostnader

För att hålla nere kostnaderna finns flera sätt, exempelvis:

– Bygga större enheter, upp till ca 1500 MWe.

De flesta elnät i Västeuropa klarar idag att hantera denna kapacitet.

– Drifttillgängligheten bör uthålligt vara minst ca 90 %, inklusive avställning för underhåll och bränslebyte som bör ta högst ca 20 dagar.

Sådana resultat har redan uppnåtts för en del reaktorer i Sverige och Finland.

– Förbättra bränsleutnyttningen genom att bland annat öka det specifika energi-

uttaget, dvs den totalt producerade mängden värmeenergi per bränsleelement.

– Med långa driftcykler (1,5–2 år) kan den totala tiden för avställning för underhåll reduceras ytterligare.

Det är viktigt när kärnkraften året runt går i baslastdrift som t ex i Finland. En förutsättning är att en ökad del av underhållet kan ske under drift.

– Ökad termisk verkningsgrad, mer än 34 % netto för vattenkylda system.

– Förenkling i underhåll och drift med bland annat minskad stråldosbelastning.

Några viktiga hjälpmedel för en reduktion av kostnaderna är:

– Effektiva konstruktionshjälpmedel. Här ingår t ex datalagring för beskrivning av hela stationen: tredimensionella CAD-program för byggnadslayout, installation av mekanisk och elektrisk utrustning, rördragning, ventilation och elektrisk ledningsdragning

– En mer fullständig övergång till övervakning och styrning via moderna datorsystem i kontrollrummen

– Avancerad elektronik gör det möjligt att programmera säkerhetssystemen med hjälp av datorer

– Effektivare byggnads- och systemkonstruktioner, t ex med prefabricerade delar, vilket ger kortare byggnadstid

– Avancerad probabilistisk säkerhetsanalys för att kunna lokalisera och förstärka svaga punkter i konstruktionerna.

Exempel på stegvis utveckling

Det finns exempel från flera länder på fortsatt stegvis utveckling av reaktorsystem utgående från system som idag är i drift.

De befinner sig för närvarande på planerings- och utvecklingsstadiet och utnyttjar samverkan mellan tillverkare och kraftbolag.

Samtidigt tas hänsyn till tillsynsmyndigheternas nya krav på säkerhet. Två fall, som ligger nära till hands för oss i Europa, utgör bra exempel.

Tryckvattenreaktorer (PWR)

Med utgångspunkt från de senaste reaktorgenerationerna i Tyskland (de så kallade Konvoi-reaktorerna levererade av

Siemens) och Frankrike (N4-generationen från Framatome) pågår i samarbete mellan de två länderna EPR-projektet (The European Pressurized Water Reactor).

Konstruktionen ska följa EURs rekommendationer.

Sommaren 1997 var grundkonstruktionen klar och närmast följer nu arbetet med detaljkonstruktionen.

I EPR är några av de viktigaste förbättringarna som har bäring på säkerhet och ekonomi följande.

– Dubbelväggig reaktorinneslutning av betong, som ytterligare reducerar risken för utsläpp av radioaktivitet till omgivningen efter en svår härdskada,

– Långt driven redundans och fysisk separation av säkerhetssystem (dvs många olika och av varandra oberoende säkerhetssystem),

– Kontroll av en eventuell härdsmlätas utbredning så att den inte kan skada inneslutningen,

– Rationellare byggnadslayout och systemkonstruktion, som är väl dokumenterad i en omfattande databas.

Tredimensionella CAD-program används generellt och utnyttjas också för simuleringar av processer och underhållsarbeten,

– Avancerade instrument- och kontrollsystem baserade på modern programmerbar elektronik,

– Bättre hjälpmedel i kontrollrummet för att göra det lättare för driftpersonalen att övervaka processen,

– Utökad intern instrumentering av reaktorhärden. För att ytterligare reducera risken för kylmedelsförlust ska det inte finnas några rör genomföringar i reaktortankens botten.

– Partiell effektreduktion vid vissa störningar i stället för snabbstopp, vilket ska minska oplanerad avställningstid.

IUSA har såväl ABB Combustion Engineering som Westinghouse lanserat egna vidareutvecklade PWR. Tillsynsmyndigheterna har granskat dessa båda företags nya konstruktioner, System 80+ respektive AP 600.

Efter granskning av de redovisade standardkonstruktionerna har myndigheterna utfärdat generella typgodkännande, som medger en mycket enkel granskning och tillståndsgivning i kommande verkliga projekt.

EPRIs URD-rekommendationer har därvid tillämpats. I Ryssland pågår en motsvarande utveckling mot mera avancerade PWR.

Kokvattenreaktorer (BWR)

Utvecklingen för BWR kan exemplifieras med utgångspunkt från reaktorerna av ABB Atoms BWR 75, Forsmark 3/Oskarshamn 3 i Sverige samt General Electric ABWR i USA och i Japan (där Kashiwazaki Kariwa 6 och 7 nu tagits i drift).

ABB Atom har sedan 1986 arbetat på och offererat en moderniserad BWR,



ABB Atoms utvecklingsprojekt BWR 90+

kallad BWR 90, med sikte på den internationella marknaden. BWR 90 utvärderas för närvarande mot EUR.

Dessutom pågår inom ABB Atom arbetet på en vidareutvecklad version efter Forsmark 3 och Oskarshamn 3, BWR 90+. Se figuren ovan.

Här har de nordiska kraftbolagen ett intresse av att bidra med erfarenheter och synpunkter.

För Sveriges del ser kraftbolagen en möjlighet att arbetet kan ge förslag till åtgärder inom ramen för förbättringsarbetena för befintliga reaktorsystem.

Arbetet sker också med tanke på en eventuell ny, femte, reaktor i Finland.

Några av de föreslagna stegvisa förbättringarna för ABB BWR 90+ är följande.

– Vidareutvecklad konstruktion av reaktorinneslutningen. Framför allt ska den effektivt lindra konsekvenserna för omgivningen av den mycket osannolika men svåra olycka, som en härdsmläta skulle innebära.

Om trots allt reaktortanken skulle ska-

das måste säkerhetssystemen skydda reaktorinneslutningen, så att spridning av radioaktivitet till omgivningen kraftigt begränsas.

En eventuell smälta ska tas om hand väl inne i inneslutningen och utan att alltför höga tryck, som kan skada inneslutningen, byggs upp.

Automatisk tryckavlastning via filterad ventilation finns kvar liksom i dagens ABB-reaktorer, men ska utnyttjas så sent som möjligt efter ett svårt haveri.

Om en i sig osannolik förlust av kylmedel skulle inträffa under bränslebyte, kan utrymmet runt reaktortanken fyllas med vatten. Detta för att förhindra fortsatt kylmedelsförlust och därmed säkra härdens kylning.

Glidformsgjutning av betonginneslutningen i hela dess höjd möjliggör att den kan byggas snabbare och billigare.

– Härdens resteffekt förs bort med hjälp av både aktiva och passiva kylsystem.

– Rationellare byggnadslayout med minskade byggnadsvolymer.

- Prefabricerade anläggningsdelar för snabbare byggnation.
- Ökad servicevänlighet för att möjliggöra minskat underhållsarbete och lägre stråldosbelastning.
- Färre lågspänningssystem i verkets kraftförsörjning.
- Avancerade instrument- och kontrollsystem. Med avancerad datorbaserad

processelektronik kan omfattande förändringar införas.

Självkontrollerande elektronik och elektronisk avkänning av utrustningars prestanda sparar underhållsarbete.

- Utökad diversifiering av automatiska säkerhetsfunktioner på så sätt att olika arbetsprinciper utnyttjas i parallellt arbetande, av varandra oberoende, säkerhetssystem.

- Utveckling av kontrollrummet ger bättre överblick av delprocesser och helheten.

Andra BWR-koncept utvecklas av Siemens (SWR-1000 med inriktning på flera passiva säkerhetssystem) och General Electric (SBWR).

Den senare omnämns nedan som mera svarande mot innovativa reaktorsystem.

Avancerade lättvattenreaktorer, under utveckling

Beteckning	Typ	Effekt [MW(e)]	Leverantör/Konstruktör	Status
APWR	PWR	1300	Westinghouse – Mitsubishi	Konceptstudie
BWR 90	BWR	1200	ABB Atom	Detalj-/Grundkonstr.
AP-600/EP 1000	PWR	600/1000	Westinghouse/Genesi (Italien)	Grundkonstruktion
EPR	PWR	1500	NPI (Siemens, Framatome)	Grundkonstruktion
SBWR	BWR	600	General Electric	Detalj-/Grundkonstr.
ESBWR	BWR	1190	General Electric	Preliminär konstr.
KNGR	PWR	1350	Korea Electric Power Corp.	Grundkonstruktion
Sizewell C	PWR	1250	National Nuclear Corp. (UK)	Konceptstudie
System 80+	PWR	1350	ABB Combustion Eng. (USA)	Detalj-/Grundkonstr.
SWR 1000	BWR	1000	Siemens	Konceptstudie
VVER- 640/1000	PWR	640/1000	Atomenergoexport (Ryssland)	Detalj-/Grundkonstr.
AC-600	PWR	600	CNNC (Kina)	Konceptstudie
HSBWR	BWR	600	Hitachi	Grundkonstruktion
MS-600	PWR	600	Mitsubishi	Detalj-/Grundkonstr.
ISIS	PWR	300	Ansaldo (Italien)	Konceptstudie
JPSR	PWR	630	JAERI (Japan)	Konceptstudie
PIUS	PWR	650	ABB Atom	Grundkonstruktion
SPWR	PWR	600	JAERI	Konceptstudie
VPBER-600	PWR	630	OKBM (Ryssland)	Konceptstudie

På lång sikt – innovativa reaktorsystem

Listan på innovativa, mer eller mindre realiserbara koncept för fortsatt reaktorutveckling kan göras lång. Denna genomgång begränsar sig därför till några av de hittills mest bearbetade idéerna eller till koncept där en framtida tillämpning kan tänkas vara intressant.

Innovativa system kan sägas vara sådana vars funktion i någon grad behöver demonstreras i en prototypanläggning, åtminstone för viktiga delar av anläggningen, innan systemet kan introduceras på en kommersiell marknad.

Vidareutveckling av LWR-system

För både PWR och BWR finns långt gångna studier gjorda.

I ett svenskt sammanhang är ABB Atoms SECURE/PIUS-koncept väl bekant.

PIUS är en PWR med betongtryckkärn av bassängtyp och med nästan ute-

slutande passiva säkerhetssystem, dvs sådana som inte fordrar aktiva ingrepp i processen.

Det är i dagens läge oklart om konceptet kommer att bearbetas vidare, trots ett principiellt stort intresse internationellt.

En orsak kan vara att sannolikheten

för svåra olyckor med påtagliga omgivningskonsekvenser redan i de vidareutvecklade systemen, som behandlats i tidigare kapitel, bedöms bli synnerligen låg.

Inga kylvattenpumpar

General Electric har gjort detaljerade studier på en BWR utan forcerat kylflöde till härden, Simplified BWR (SBWR).

Genom att basera kylningen av härden på självcirkulerande kylvatten behövs inte längre några kylvattenpumpar.

Därmed reduceras ytterligare risken för kylmedelsförlust, eftersom alla stora

röranslutningar till reaktortanken kan elimineras.

Gemensamt för PIUS och SBWR är att de fordrar mer eller mindre verifikation i en prototypanläggning innan kommersialisering.

Resurssnålhet

Dessa system uppfyller inte heller de krav på reaktorsystem som troligen måste ställas på mycket lång sikt.

För fortsatta satsningar på innovativa system kommer troligen resurssnålhet och effektivare avfallshantering att bli viktiga särdrag.

Med fördyrad och kanske återhållsam brytning av låghaltiga uranmalmer ökar intresset för konvertering (transmutation) av uran-238 och torium-232 till lätt klyvbara kärnslag i högkonverterande system eller bridreaktorer.

En följd av detta är att upparbetning av bestrålat bränsle i stor utsträckning blir nödvändig, eftersom de fissila ämnena behöver separeras från det förbrukade bränslet för att återföras till reaktorerna i nytt bränsle.

”Snabba” bridreaktorer

Nettoproduktionen av klyvbara isotoper i bridreaktorer ger möjlighet till en mycket långsiktig resurshushållning.

En typ av bridreaktorer är system där de nybildade energirika (”snabba”) neutronerna inte bromsas ned till låga energier.

Idén om snabba bridreaktorer fanns redan i kärnkraftens barndom under 1940-talet. Världens första kraftproducerande reaktor, EBR I (Experimental Breeder Reactor) var en bridreaktor. Den var i drift från 1951 till 1963 i Idaho, USA.

I Skottland startades en mindre kraftproducerande bridreaktor 1959. Den fick 1975 en efterföljare i PFR, Prototype Fast Reactor, med en eleffekt på 250 MW.

I Frankrike byggdes Phénix och Superphénix, den senare med en eleffekt på 1 000 MW. Samtliga dessa reaktorer är nu nerlagda, i huvudsak av ekonomiska skäl.

Bridreaktor hushållar med uranet

Det som lockat fram utvecklingen av bridreaktor är att den hushållar med

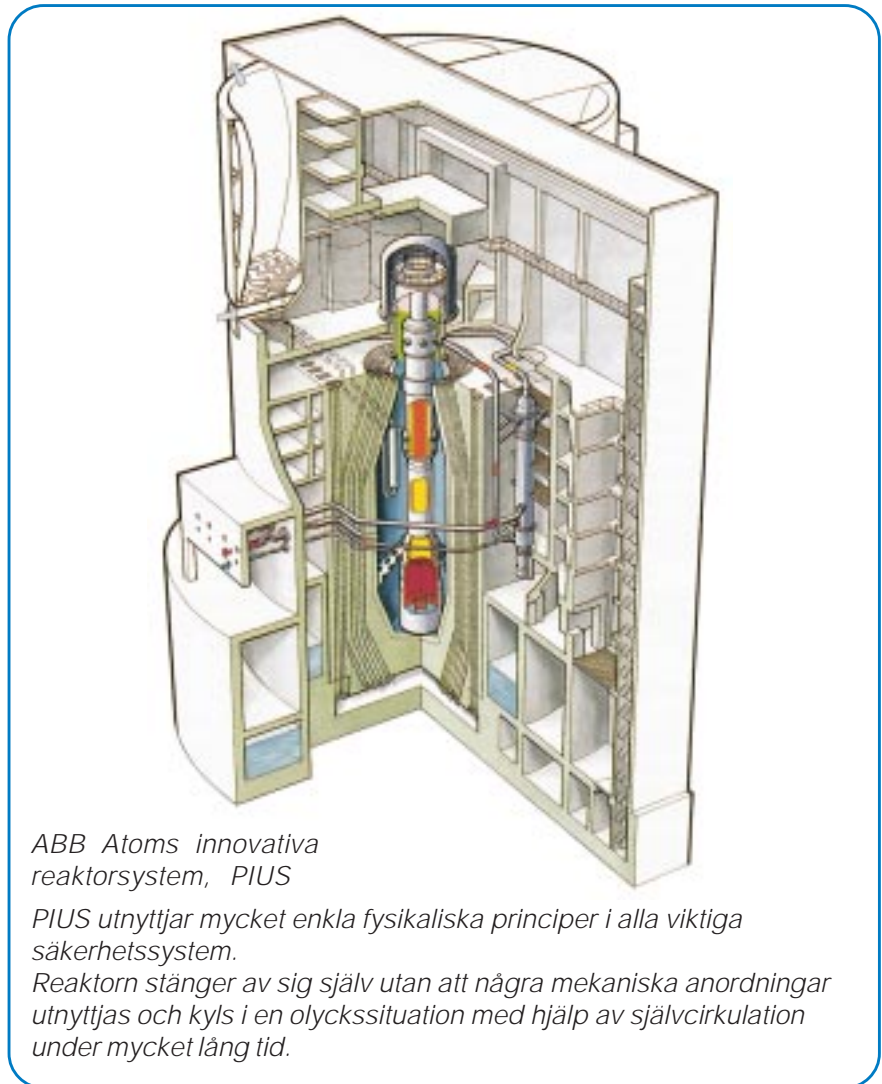


ABB Atoms innovativa reaktorsystem, PIUS

PIUS utnyttjar mycket enkla fysikaliska principer i alla viktiga säkerhetssystem.

Reaktorn stänger av sig själv utan att några mekaniska anordningar utnyttjas och kyls i en olycksituation med hjälp av själv-cirkulation under mycket lång tid.

uranet på ett sätt som gör uranbränslet till en uthållig resurs under tusentals år eller kanske mycket mer.

Erfarenheterna från snabba reaktorer, kyllda med smält natrium, har varit goda beträffande reaktor fysikaliska och bränsletekniska prestanda.

Uran/plutonium-cykeln har bäst förutsättningar i sådana system. Användningen av natrium har dock visat sig vara tekniskt svår och elproduktionskostnaden är klart högre än för dagens LWR.

Snabba reaktorer kommer troligen inte att byggas ut förrän bridning blir kommersiellt intressant, dvs först då priset på uran och andra energiråvaror ökat kraftigt jämfört med dagens nivå.

Detta innebär att nya bridreaktorer inte torde vara kommersiellt intressanta inom de närmaste 30 – 50 åren.

En vidareutveckling av ”snabba” system är tänkbar med användning av andra

kylmedel, t ex bly eller en gas (helium). Bly har redan använts i ryska marina reaktorer.

Högkonverterande system

Krav på hantering av avfallet kan leda utvecklingen till att avfallsmängderna ska minimeras.

Detta kan ske i högkonverterande system, som har liten nettoförbrukning av råvaror, eftersom nyproduktionen av lätt klyvbara nuklider genom transmutation närapå motsvarar förbrukningen.

En demonstration av de fysikaliska förutsättningarna för en sådan lättvatthård har gjorts i Schweiz.

Radkowsky Thorium Reactor

Som ett exempel på innovativa, men ännu oprövade system, kan nämnas ett koncept av PWR-typ (Radkowsky Thorium Reactor), som lanserades 1997.

Det bygger på att genom neutronabsorption omvandla Th-232 till U-233 i undermodererade delar av härden.

Anrikat uran (eller plutonium) placeras i små drivzoner (s k seeds) med mycket god moderering och därför ett "mjukt" neutronspektrum.

Syftet är, förutom att utnyttja torium, att endast en liten andel högre aktinider bildas och att bränslet efter ca tio års exponering direktdeponeras så att inget vapenmaterial renframställs.

Konceptet bearbetas nu i ett samarbete mellan Ryssland, Israel och USA. Professor *Alvin Radkowsky* har gjort ett antal uppfinningar av stor teknisk betydelse inom reaktortekniken i USA. Han är numera bosatt i Israel.

HTGR

Högtemperaturreaktorer baserade på grafitmoderering och heliumgaskylning (HTGR) har länge varit intressanta pga hög verkningsgrad och produktion av

process-ånga till industrin. Prototyper har byggts och drivits, men ännu bedöms de vara kommersiellt olönsamma.

Systemen kännetecknas av hög säkerhet mot svåra haverier och god konvertering till klyvbara isotoper, även med Th.

I framtiden kan innovativa varianter av sådana system bli aktuella även för främst elproduktion.

Termiska bridreaktorer

För bridning av Th till U-233 är lågenergetiska – termiska eller nära termiska ("långsamma") – neutronspektra överlägsna.

Möjligheten till bridning har med framgång demonstrerats i Shippingport-reaktorn (en PWR-prototyp) i USA.

Utvecklingslinjen har hittills inte fullföljts eftersom den byggde på uppbyggnad av förbrukat Th-bränsle och återföring av U-233 i nytt bränsle, en teknik som ännu inte demonstrerats i kommersiell skala.

I framtiden kan dock systemet exploateras för utnyttjning av Th.

Energiparker

På längre sikt är det troligt att man eftersträvar en mix av reaktorsystem med olika prestanda, företrädesvis i så kallade energiparker.

Systemen får varierade och kompletterande uppgifter såsom elproduktion, generering av processånga, bridning eller reduktion av avfallsmängder.

Både torium och uran utgör bränsle och uppberedningen av använt bränsle och tillverkning av nytt sker lokalt.

På så vis kan man med tiden inrikta råvaruförsörjningen och avfallshanteringen till alltmer optimala betingelser med tanke på miljö och säkerhet.

I denna mix kan eventuellt underkritiska acceleratordrivna system (ADS) få en plats genom stor potential att transmuttera många kärnslag.

Råvarutillgångar

Uran och torium finns i förhållandevis stora mängder i jordskorpan.

Alternativ användning av dessa ämnen för andra ändamål än för energiproduktion är även långsiktigt mycket liten, medan motsatsen gäller gas, olja och kol. Framför allt för de senare som får en allt större betydelse som råvaror i många industriella processer för plaster och andra konstruktionsmaterial.

Uran

En enda med termiska ("långsamma") neutroner lätt klyvbar nuklid finns i naturen, nämligen U-235 med en halt av bara 0,71 % i "natururan".

Se figur 2 på nästa sida om uranets väg från gruvan till använt bränsle.

Den låga halten medför att i bränsle för de flesta reaktorsystem behöver isotopen U-235 anrikas. I lättvattenreaktorer behöver U-235 anrikas till i medel 3 à 4 %, vilket innebär att stora lager av utarmat uran (som innehåller ca 0,3 % U-235) byggs upp.

Detta uran representerar potentiellt en väldig energireserv om det kan utnyttjas i transmutterande system (bridreaktorer) där U-238 kan konverteras i stor skala till lätt klyvbart bränsle, främst Pu-239.

Uppskattade urantillgångar

Tillgångar av olika slag	Kvantitet miljoner ton uran	Varaktighet (år) vid nuvarande förbrukning
– Civila lager	0.2	3
– Militära lager	0.6	9
– Kända malmer	4.5	70
– Uppskattade geologiska tillgångar med rimligt pris	11	170
Summa	16,3	252

Av **natururanet** används efter anrikning i lättvattenreaktorer ca 0,4 – 0,45 procentenheter U-235 i reaktorbränsle där det förbränns till kanske 80 %.

Detta innebär att högst ca 0,35 %-enheter eller ca hälften av från gruvan utvunnen U-235 förbrukas.

Av ursprungligt U-238 överförs via transmutation till Pu-239 ungefär lika mycket, dvs totalt används effektivt bara ca 0,7 % av brutet uran.

Det kvarvarande uranet i det slutanvända bränslet (ca 96 % av initialinsatsen) representerar en ytterligare energireserv om det efter kemisk uppberedning återförs till bränslecykeln.

Den mängd uran som finns tillgänglig till rimligt pris för användning i konventionella reaktorer har en varaktighet på cirka 70 år vid nuvarande förbrukningstakt. Om man inkluderar uppskattade tillgångar på samma prisnivå blir varaktigheten flera hundra år.

På sikt – av allt att döma i tusentals år eller mer – möjliggör bridning en mycket uthållig energikälla även vid en kraftig expansion av kärnenergens användning i världen.

De redan existerande lagren av utarmat uran utgör då en lagerreserv, som gör att ingen nybrytning av uran skulle behöva ske på lång tid.

Torium

I jordskorpan finns ca fyra gånger så mycket torium (Th) som uran.

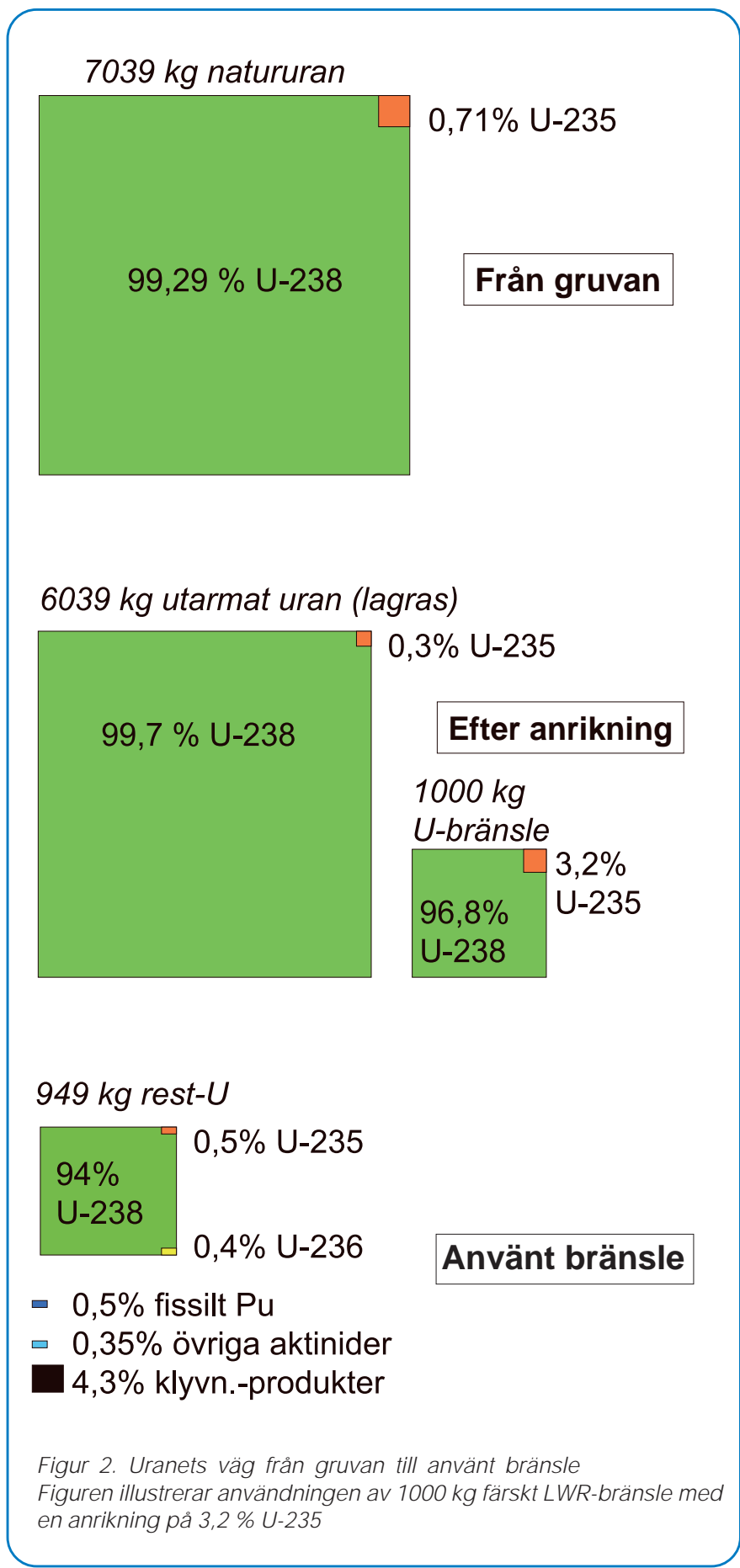
Den enda i naturen förekommande toriumisotopen som kan användas för energiproduktion är Th-232.

Den transmuterar genom neutroninfångning till Th-233, som i sin tur via betasönderfall omvandlas till den lätt klyvbara U-233.

Th-mineral är också mera lättillgängliga än uranmineralerna, så att miljöpåverkan vid brytning blir liten. Om Th kan utnyttjas effektivt för bridning till U-233 finns här alltså ytterligare väldiga energitillgångar.

En väsentlig fördel med torium/uran-cykeln är att uppbyggnaden av de tyngre aktiniderna – Np, Pu, Am, Cm, osv – är väsentligt mycket mindre än för uran/plutonium-cykeln.

Skillnaden kan vara en faktor 50 à 100. En sådan volymreduktion av långlivat högaktivt avfall förenklar deponeringen väsentligt.



Slutord

Vi kan inte komma ifrån att vi inför de närmaste 50 åren står inför en enorm utmaning att tillgodose världens behov av energi, även med en mycket aktiv energihushållning.

Och energiproducenterna måste göra det på ett för miljö och klimat skonsamt vis.

Kärnkraften kan här ge ett fortsatt betydande bidrag genom att verkligen ta vara på dess stora inneboende möjligheter. Redan idag visar utvecklingsarbetet klart, att en ny generation lättvattenreaktorer kan uppfylla väsentligt ökade krav på säkerhet och driftsekonomi.

Möjligheten att resurssnålt utnyttja

energiråvarorna – uran och torium – i brydreaktorer har redan demonstrerats och tekniken att återcykla plutonium i MOX-bränsle till lättvattenreaktorer är etablerad.

Med ytterligare förfinad bränsleteknik och utveckling av flera innovativa reaktorkoncept kan i framtiden råvarorna utnyttjas mycket långsiktigt och ut hålligt.

Vi bör inte försumma tillfället att väl förbereda oss inför den, globalt sett, starkt ökande efterfrågan på energi.

En förhoppning är därför att kärnkraftens roll i framtidens energiproduktionssystem ska prövas med en öppen

attityd och att fördelar och nackdelar seriöst får vägas mot varandra.

Naturligtvis ska en sådan prövning omfatta inte bara reaktorens ekonomi, driftsäkerhet och uthållighet, utan också alla frågor kring vapenmaterial och radioaktivt avfall.

Örjan Bernander

Örjan Bernander är fil lic i fysik och har varit verksam vid ASEA/ABB Atom inom området reaktorfysik med inriktning på experiment, driftsättning av reaktorer och utveckling av analysmetoder, bränsle och härd. I dag är han verksam som konsult.

Referenser

1. Status of Advanced Light Water Cooled Reactor Designs 1996
International Atomic Energy Agency, IAEA TECDOC-968 (Sep., 1997)
2. World Nuclear Status Report '96, Nuclear Europe Worldscan (July-Aug., 1997)
3. Energy for our Common World, World Energy Council (Tokyo 1995)
4. Nuclear Energy in the 21st Century H. Blix, Nuclear News (Sep., 1997)

Några begrepp inom reaktortekniken

Snabba neutroner

De vid kärnklyvning bildade neutronerna är snabba och har en mycket hög energi, ca 2 millioner elektronvolt (MeV), motsvarande en hastighet av omkring 2×10^7 meter/sekund (2 000 mil/sekund).

Snabba reaktorer

Reaktorer där kedjereaktionen underhålls av snabba och endast måttligt nedbromsade (modererade) neutroner.

Termiska neutroner

Neutroner vars rörelseenergi svarar mot värmerörelsen i det omgivande mediet. Vid 20 °C är medelenergin 0,025 elektronvolt (eV) vid en hastighet av 2 200 meter/sekund.

Moderering

Nedbromsning av de snabba neutronerna till intermediära eller termiska energier genom spridning mot i huvudsak lätta atomslag (t ex väte, tungt väte, kol, syre).

Termiska reaktorer

Reaktorer där kedjereaktionen underhålls med i huvudsak termiska neutroner.

Transmutation

Omvandling av ett kärnslag till ett annat genom kärnreaktioner. I reaktorer sker detta övervägande genom absorption av neutroner.

Konvertering

Omvandling av fertilt material till fissilt material.

Fertilt material

Material som består av nuklider som direkt eller indirekt kan omvandlas till fissil nuklid genom neutroninfångning.

Fissilt material

Material som består av nuklider som kan undergå fission vid infångning av termiska neutroner.

Fission

Klyvning, vilket innebär delning av en tung atomkärna i två eller flera ungefär lika delar, vanligen under utsändande av bland annat nya (snabba) neutroner.

Bridning

Vid bridning är konverteringen av fertila kärnslag så stor att den skapar mera nytt fissilt bränsle än vad som förbrukas. Uttrycket kommer från engelskans "breed", som betyder avla, föröka.

Bridreaktorer

Reaktorer som kan upprätthålla bridning. De kan i princip vara både snabba och termiska reaktorer.

Kärnkraftsäkerhet och Utbildning AB (KSU)

Kärnkraftsäkerhet och Utbildning AB (KSU) ansvarar för vissa gemensamma säkerhets- och utbildningsfrågor på uppdrag av ägarföretagen Barsebäck Kraft AB, OKG AB och Vattenfall AB

Företaget utbildar kontrollrumsoperatörerna vid kärnkraftverken i Barsebäck, Forsmark, Oskarshamn och Ringhals genom bland annat träning i simulatorer och teoretiska kurser i kärnkraftteknik på högskolenivå. KSU utvärderar också störningar som inträffat i svenska och utländska kärnkraftverk och är den svenska länken i ett internationellt nätverk för utbyte av drifterfarenheter.

Dessutom svarar företaget genom Analysgruppen för vetenskapligt grundad samhällsinformation om reaktorsäkerhet, radioaktivitet och dess verkningar samt jämförelser av risker vid olika slags energiproduktion. Gruppen består av experter inom och utom svensk kärnkraftindustri.

Huvuddelen av KSUs verksamhet är förlagd till Studsvik, belägen vid Östersjökusten tre mil norr om Nyköping.

Analysgruppen vid KSU

Jean-Pierre Bento, civilingenjör, JPB Consulting AB

Per-Åke Bliselius, tekn lic, Sycon Energikonsult AB

Hans Ehdwall, fil. kand, K S U AB

Monica Gustafsson, docent, IAEA, Wien

Ingemar Lindholm, tekn. lic, Projekt Kärnbränsle & Miljö

Gustaf Löwenhielm, tekn dr, Forsmarks Kraftgrupp AB

Anders Pechan, utredn. sekr, Analysgruppen vid KSU

Agneta Rising, fil. kand, Vattenfall AB, Ringhals

Evelyn Sokolowski, docent

Gunnar Walinder, professor, strålningsbiolog

Carl-Erik Wikdahl, civilingenjör, EnergiForum AB

Internet

Analysgruppens rapporter och faktasammanställningar samt såväl nationella som internationella länkar till forskningsinstitutioner, kärnkraftmyndigheter och kraftföretag finns på den regelbundet uppdaterade hemsidan:

www.apec.se

Sekretariatets e-postadress är analys@apec.se
