



Figur 1. Panoramabild inuti den nya valvformade sarkofag som sedan 2016 täcker den gamla sarkofagen över den havererade reaktor 4 i Tjernobyl. Sarkofagen är 108 meter hög, 162 meter lång och har en spännvidd på 257 meter. Syftet med konstruktionen är att skydda den inre sarkofagen från väder och vind samt att agera strålskydd för personal som arbetar i närområdet. Bildkälla: State Specialized Enterprise "Chernobyl NPP" [1].

Det ökande neutronflödet i Tjernobyl

Vid en vetenskaplig konferens i april 2021 rapporterades om ett ökat neutronflöde från en del av den havererade reaktorn i Tjernobyl. Neutronflödet började öka 2016 när en ny sarkofag placerades över reaktorn och är ett förväntat händelseförlopp. Ökningen startade från en låg nivå och sker i en långsam takt, men observeras noggrant. I värsta fall skulle den kunna leda till något mer besvärliga arbetsförhållanden inuti sarkofagen, men det är inte ett strålskyddsproblem utanför anläggningen. Här presenteras en förklaring av vad som observeras samt möjliga orsaker och konsekvenser.

Sammanfattning

Här sammanfattas i punktform bakgrunden till rapporteringen från en konferens i april 2021 om ökad strålning i Tjernobyl. Resten av rapporten ger en mer detaljerad förklaring av statusen vid den havererade reaktorn.

- Ökade nivåer av neutronstrålning har observerats på en plats i den havererade reaktor 4 i Tjernobyl.
- Neutronstrålningen har ökat långsamt sedan den nya sarkofagen kom på plats 2016 och är nu dubbelt så hög som innan 2016, men från en väldigt låg nivå.
- Troligtvis beror ökningen på att vatten dunstar bort från rester av reaktorns bränsle, vilket på den specifika platsen ökar möjligheten för kärnklyvningar att ske.

- Tidigare läckte regnvatten in och täckte bränslet med vatten. Efter att den nya sarkofagen kom på plats läcker inte något nytt vatten in.
- Händelseförloppet är förväntat sedan tidigare.
- En liknande ökning av neutronstrålning observerades på samma ställe under några dagar i juni 1990. Ökningen var då 60 gånger högre än normalvärdet. Det ledde dock inte till någon ökad strålning utanför byggnaden och processen avstannade efter några dagar.
- Ökningstakten nu är mycket långsammare än den i juni 1990. Det är inte säkert att den nuvarande situationen kommer utvecklas på samma sätt som 1990, men om så sker är det rimligt att förvänta sig likvärdiga eller lägre strålningsnivåer än då. Dessa strålningsnivåer är

närmast försumbara jämfört med den strålning som redan finns på platsen sedan olyckan 1986.

- Personal på platsen följer händelseförloppet för att få en bättre förståelse och för att vid behov vidta åtgärder.

Bakgrund

Tjernobylolyckan den 26 april 1986 är historiens värsta kärnkraftsolycka. Det finns gott om rapportering om händelseförloppet vid olyckan och konsekvenserna för människor och miljö [2]. I den här rapporten fokuseras på den rådande situationen inne i den havererade reaktorn. I april 2021 hölls konferensen INUDECO i staden Slavutych i Ukraina, 40 km från Tjernobyl. Konferensen handlade huvudsakligen om den nuvarande hanteringen av den havererade reaktorn [3]. Några konferensbidrag rapporterade om ett ökande neutronflöde i reaktorbyggnaden och har fått medial uppmärksamhet [4]. Här förklaras vad som observerats och vad det kan innebära, men först ges en summering av situationen direkt efter olycksförloppet och hur det har utvecklat sig sedan 1986.

Reaktorhärden efter olyckan

Direkt efter olyckan vid reaktor 4 i Tjernobyl riktades alla insatser på att få stopp på utsläppen av radioaktiva ämnen. För att lyckas med detta var det viktigt att släcka den intensiva brand som startat i reaktorn, avbryta en eventuell fortsatt kedjereaktion av kärnklyvningar, och kunna kyla bränslet som på grund av radioaktiva sönderfall avger värme [5]. Den första nattens försök att släcka branden med vatten visade sig vara verkningslös inne i själva reaktorbyggnaden, och tillförseln av vatten avbröts när den hotade att översvämma de andra reaktorerna. Därför fattades beslut om att täcka härden med ämnen som har olika kemiska och kärnfysikaliska egenskaper. Ämnena bestod av:

- bly för att kyla bränslet och agera som strålskärm,
- borkarbid för att hindra eller dämpa en självuppehållande kedjereaktion i bränslet genom att absorbera neutroner som annars skulle kunna orsaka kärnklyvningar,
- dolomit för att släcka bränder och absorbera värme, samt
- sand och lera för att kväva branden och förhindra radioaktiva ämnen från att spridas ut i atmosfären.

Totalt dumpades omkring 5000 ton av de olika ämnena den första veckan, följt av ytterligare 11 000 ton den efterföljande månaden [6]. Ämnena släpptes i säckar från helikoptrar rakt över den skadade reaktorbyggnaden. På grund av den intensiva strålningen höll sig helikoptrarna högt ovanför reaktorn. Den större delen av ämnena hamnade därför på fel ställen och orsakade ibland skador på inre strukturer. Tio dagar efter olyckan, 5 maj 1986, minskade de radioaktiva utsläppen drastiskt, men det var

oklart vad som var orsaken. I ett senare skede hölls olika polymerer på för att binda radioaktivt damm [7].

Vid tiden för olyckan innehöll reaktorn 190 ton bränsle och det fanns ytterligare 15 ton i en bassäng för använt bränsle, samt 5 ton färskt bränsle i reaktorhallen [8]. Vid det explosiva olycksförloppet totalförstördes reaktorn och delar av den omgivande byggnaden. Bland annat kastades det stora betongblock på över 1000 ton, den så kallade övre biologiska skärmen, upp flera meter i luften och föll sedan ned hängande på högkant över reaktorutrymmet. Den nedre biologiska skärmen under själva reaktorn trycktes ned fyra meter, antingen som en följd av det explosiva förloppet eller på grund av att delar av dess struktur löstes upp av det smälta bränslet [9]. En del av bränslet spreds ut ur byggnaden i form av gas, aerosoler och mindre fragment, men större delen, 95 procent eller mer, fanns kvar i byggnaden och främst nedanför det utrymme där reaktorn funnits. Större delen av bränslet befann sig i smält eller kraftigt upphettat tillstånd, vilket frigör mer radioaktiva ämnen. Dessutom fanns det en oro att det skulle kunna ske en självuppehållande kedjereaktion om bränslet befann sig i geometriska konfigurationer som möjliggör att frisläppta neutroner orsakar nya kärnklyvningar (se faktaruta).

Det smälta bränslet reagerade kemiskt med omgivande material som zirkon, stål och betong, och i viss grad med de ämnen som dumpats uppifrån. Reaktionerna skapade material med olika struktur, på engelska kallas dessa ämnen fuel containing materials, FCM. En del av materialen var i ett lavaliknande tillstånd, ofta kallat corium, och rann eller smälte sig nedåt i byggnaden. I figur 2 visar de röda områdena var det finns material som innehåller olika blandningar av bränsle. Med tiden har ämnena svalnat och stelnat i olika former. Den största ansamlingen av FCM är i rum 305/2 som är utrymmet direkt under härdens ursprungliga plats. Omkring 85 ton av härden har kunnat lokaliseras i form av FCM i rum 305/2. Den totala volymen av dessa material är omkring 500 kubikmeter. I olika delar inuti och utanför den havererade byggnaden har sensorer placerats för att kunna mäta olika variabler som temperatur, luftfuktighet, strålningsintensitet och neutronflöde. Dessa sensorer har varit viktiga verktyg för att kunna bedöma händelseutvecklingen och planera vilka åtgärder som behöver vidtas.

Sarkofagen och vattenläckage

Den betongsarkofag som byggdes runt den havererade reaktorn syftade till att skydda omgivningen från joniserande strålning. Sarkofagen byggdes i rekordfart under stora svårigheter och stod klar i november 1986. Den var långt ifrån perfekt, och hade flera öppningar som utsatte innanmätet för olika väderlek. Förutom de stora mängder

vatten som initialt användes vid släckningsarbetet så utsattes sarkofagen regelbundet för regnvatten som kom in via öppningarna. Dessutom är den instabil på flera ställen, och det har förekommit ras. Åtgärder har därför vidtagits för att stärka och stötta upp både sarkofagen och den ursprungliga reaktorbyggnaden. I samband med sådana arbeten på 1990-talet täcktes en stor del av öppningarna för, men det fanns ändå vägar kvar för regnvatten att ta sig in. Flera våningsplan har därför varit delvis täckta av vatten, och delar av de material som

innehåller bränsle har varit mättade av vatten från återkommande regn. Öppningarna har också orsakat säsongsrelaterade temperaturvariationer och ökad luftfuktighet under sommarhalvåret, vilket bidrar till erosion och korrosion. Dessutom har skiftande väderlek gett upphov till vinddrag inuti sarkofagen, vilket spridit radioaktivt damm mellan olika delar i sarkofagen och ut i omgivningen. Inbyggt i sarkofagen finns anläggningar för att kunna sprida polymerer som binder damm, samt gadoliniumnitrat som absorberar neutroner.

Vattnets roll för kriticitet i en reaktor

Uran, som utgör huvuddelen av bränslet i de flesta reaktorer, består av två olika isotoper; uran-235 och uran-238. Det är bara uran-235 som kan klyvas (fissioneras) och när så sker frigörs två eller tre neutroner. Om någon av dessa neutroner träffar en ny kärna av uran-235 så kan den också klyvas, och frigör i sin tur nya neutroner. Det kallas **kedjereaktion**. Neutronerna frigörs med hög hastighet och det är svårt att klyva uran-235 med snabba neutroner. För att det ska kunna ske måste neutronerna bromsas ned, modereras, genom att krocka mot ett annat material, en **moderator**. I de flesta fall används vatten som moderator, som då också fungerar som kylmedel. När neutronerna krockar med väteatomerna i vatten förlorar de energi och bromsas ned. I en grafitreaktor, som den i Tjernobyl, används istället grafit som moderator. Vatten används då enbart för att kyla bränslet.

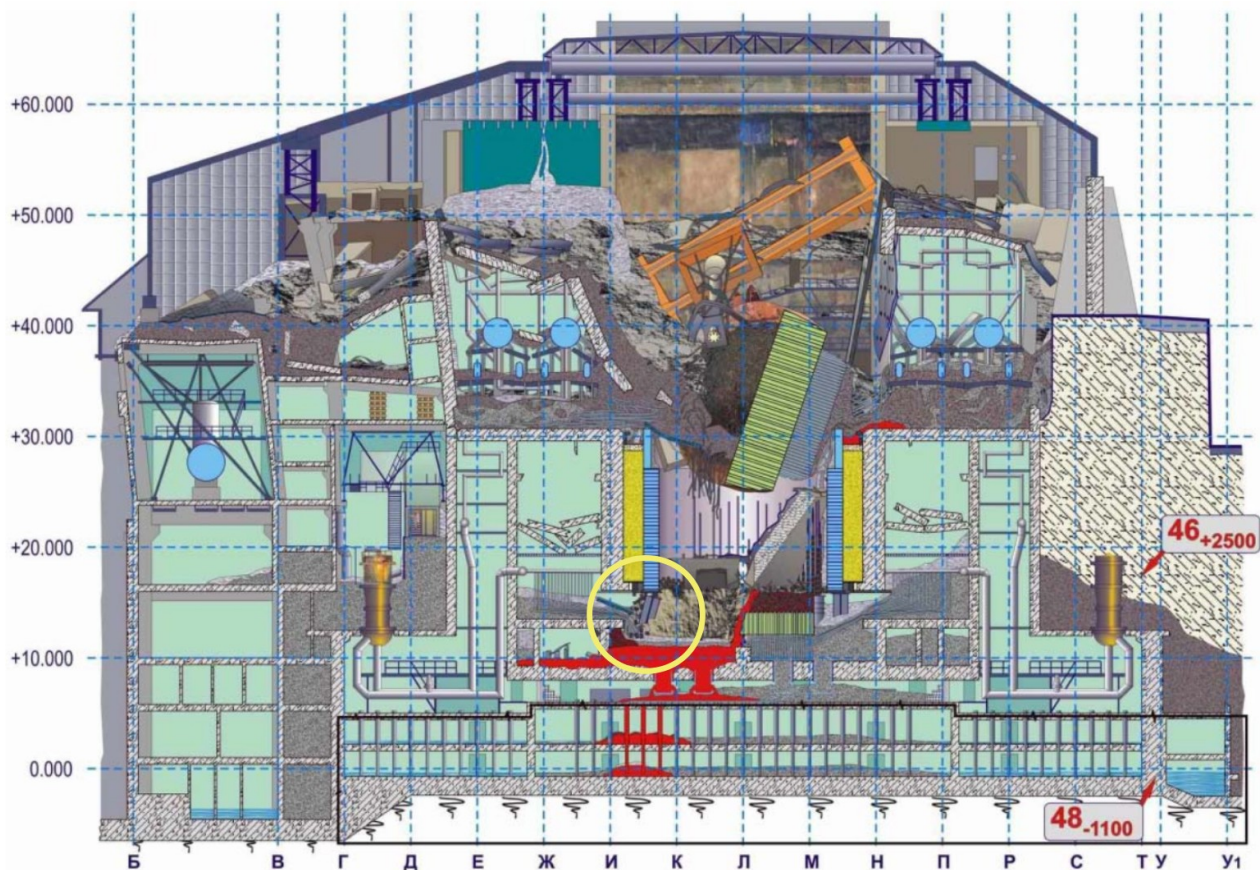
När en kärnreaktor har en självuppehållande kedjereaktion av kärnklyvningar säger vi att den är **kritisk**, vilket innebär att för varje kärnklyvning är det exakt en frigjord neutron som orsakar en ny klyvning. I en **underkritisk** reaktor minskar antalet klyvningar då mindre än en frigjord neutron orsakar en ny klyvning, det leder till att effekten minskar. En **överkritisk** reaktor har ökande effekt då mer än en neutron från varje klyvning orsakar en ny klyvning. I kärnreaktorer kan kriticiteten styras genom att manövrera styrtavar eller ändra flödet av kylmedel genom reaktorn. En kärnreaktor har alltid ett lågt flöde av neutroner som kommer från spontan klyvning, vilket kan ske i uran-238. De frigjorda neutronerna kan orsaka klyvningar i uran-235 men i en underkritisk reaktor är det inte tillräckligt för att skapa en självuppehållande kedjereaktion, reaktorn förblir underkritisk.

För att kunna få en kärnreaktor kritisk behöver bränslet placeras i rätt geometri. Denna geometri ser olika ut beroende på reaktortyp. I **lättevattenreaktorer**, som vi har vid de svenska kärnkraftverken, kan inte reaktorn drivas på naturligt uran. Istället är uranet anriktat till 4-5 procent, vilket innebär att halten uran-235 höjts från den naturliga halten. För att kunna driva reaktorn behöver de neutroner som frigörs från kärnklyvningar bromsas ned till låga hastigheter för att kunna orsaka nya kärnklyvningar. Optimal geometri är därför att ha bränslet i form av cylindriska kutsar med omkring 1 cm diameter, placerade 1,5-2 cm från varandra. Mellan stavarna finns vatten. De neutroner som frigörs vid kärnklyvning lämnar kutsarna och far ut i vattnet där de snabbt modereras genom upprepade kollisioner med vattenmolekylerna. När en neutron når samma hastighet som molekylnas rörelser, så kallad **termisk** energi, fortsätter den spridas mellan vattenmolekylerna, och om den far in i en urankut är det stor sannolikhet att en ny kärnklyvning kan ske.

Om det finns för mycket vatten fungerar inte den självuppehållande klyvningsprocessen. Dels blir det för stora avstånd så att neutronerna inte når bränslet, dels kan neutroner absorberas av väteatomerna i vattnet och därmed förloras från processen. Om det tvärtom finns för lite vatten blir neutronerna inte effektivt nedbromsade till det termiska området och de absorberas då i uran-238 eller andra material istället för att orsaka klyvning i uran-235. I lättevattenreaktorer utnyttjas denna effekt som säkerhetsfunktion där en för hög effekt på reaktorn leder till att vattnet blir varmare (tryckvattenreaktor) eller kokar till ånga (kokvattenreaktor). I båda fallen leder det till längre avstånd mellan vattenmolekylerna och därmed blir nedbromsningen av neutroner sämre, och färre klyvningar sker.

I de **grafitreaktorer** av modell RBMK som användes i Tjernobyl, hade bränslet en anrikningsgrad på 2 procent. Det innebär att det behöver bytas ut oftare än i en lättevattenreaktor. Men istället för vatten används grafit (dvs kolatomer) som moderator. Fördelen är att kolatomerna inte är lika benägna att absorbera neutroner som vatten, så en större andel neutroner överlever och kan orsaka nya kärnklyvningar. Mängden grafit mellan bränslet är dock större och det behövs fler kollisioner med kolatomerna för att bromsa ned neutronerna. Vatten används för att kyla bränslet och finns i kanaler runt bränslestavarna. En liten andel neutroner absorberas av vattnet istället för att bromsas ned i grafiten. Men när vattnet värms eller kokar minskar absorptionen och fler neutroner orsakar kärnklyvningar. Till skillnad från i en lättevattenreaktor kan därför reaktorn därför få en positiv återkoppling där minskad mängd vatten leder till ökad effektutveckling. Ur säkerhetssynpunkt är detta inte bra och är en viktig anledning till att sådana reaktordesigner valdes bort utanför Sovjetunionen.

Vid en **härds smälta** förlorar bränslet den geometri som gör den optimal för en självuppehållande kedjereaktion. I en lättevattenreaktor innebär det vanligtvis att bränslet ligger för tätt samman för att vatten ska kunna bidra till en kritisk konfiguration. I en grafitreaktor är inte vattnet avgörande för att reaktorn ska kunna uppnå kriticitet, därmed kan en smält hård hamna i geometrier som möjliggör en kritisk konfiguration. Beroende på geometri kan vatten bidra till, eller försvåra att, kriticitet uppnås.



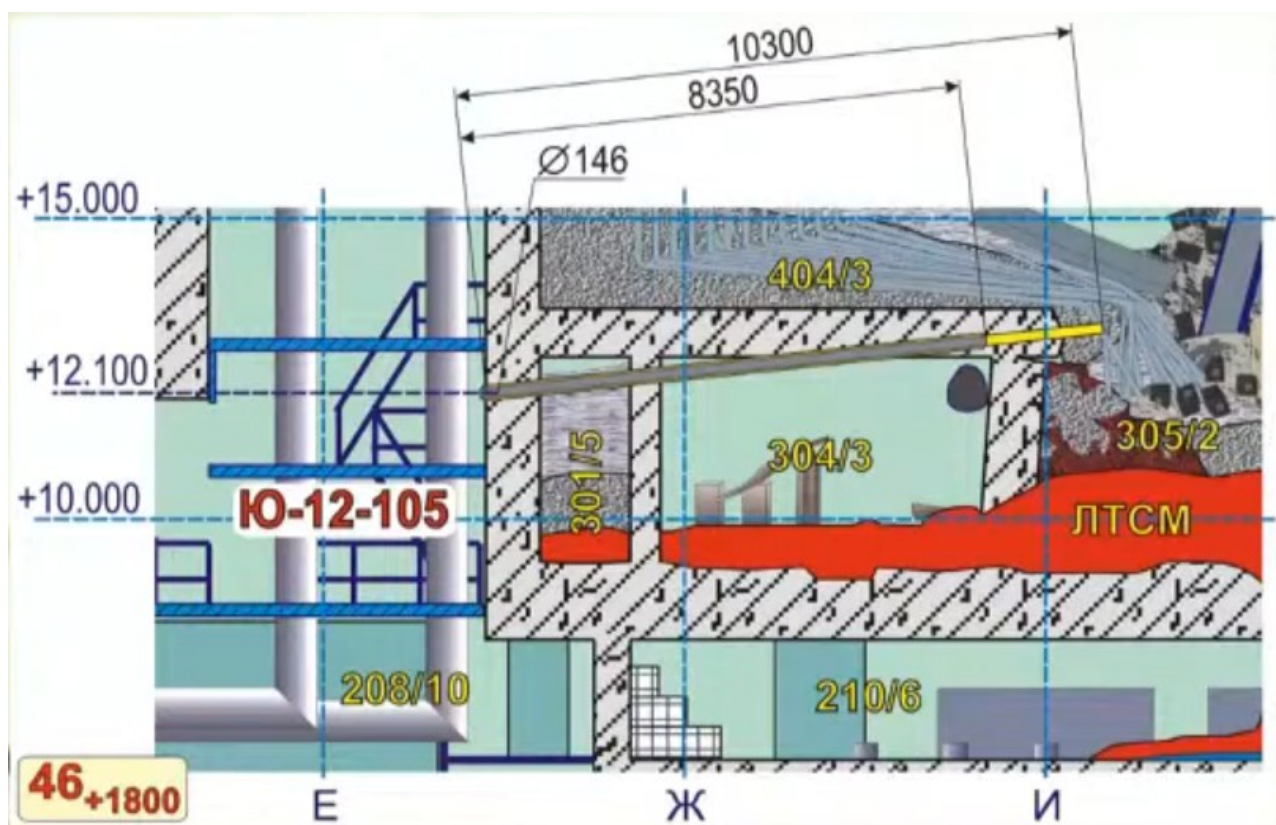
Figur 2. En tvärsnittsbild av situationen inuti den inre sarkofagen. Innan olyckan befann sig härden i utrymmet mitt i bilden (vid koordinaterna Л (L) och +20.000). Röda områden visar var material med bränsle har lokaliserats, där det mesta finns under rum 305/2 (ungefär vid koordinaterna K och +10.000). Ovanför härden syns den biologiska strålningsskärm (grön) som kastades upp vid explosionen 1986 och har hamnat på högkant. Ovanför den biologiska skärmen syns traversen för bränslebytesanläggningen (orange) som rasat ned, och till vänster om den syns stora mängder av material (grått) som dumpats från helikoptrar. Den gula cirkeln visar det område i rum 305/2 där detektorer uppmätt ett ökande neutronflöde. Bildkälla: [9].

En ny sarkofag och nya utmaningar

Det stod tidigt klart att sarkofagen inte var en långsiktig lösning, och ambitionen har hela tiden varit att på sikt ta hand om innanmätet. Efter många års försening, inte minst av finansiella orsaker, färdigställdes i november 2016 en ny sarkofag som sköts på plats över den gamla sarkofagen. Den nya sarkofagen är byggd i form av ett valv som är över 100 m högt och 250 m brett. Den håller de inre delarna skyddade mot skiftande väderlek och är en viktig komponent för att långsiktigt kunna sanera och riva reaktorn, ett arbete som uppskattas ta omkring hundra år. Det är ett svårt arbete som måste få ta tid, inte minst på grund av de höga strålningsnivåerna. Samtidigt är det viktigt att övervaka alla delar av reaktorbyggnaden för att kunna vidta åtgärder om det finns risk för nya ras eller andra förändringar. De stora mängder med ämnen som dumpades över byggnaden direkt efter olyckan bidrar till att försvåra arbetet. Arbetet vid kärnkraftverket i Tjernobyl är ett internationellt åtagande med många samarbetspartners, men det leds huvudsakligen av det statliga företaget State Specialized Enterprise "Chernobyl

NPP" (SSE ChNPP) [1] med aktivt deltagande av forskare vid Institute for Safety Problems of Nuclear Power Plants (ISPNNP) vid Ukrainas Vetenskapsakademi [10].

Sedan den nya sarkofagen installerades kommer inte regnvatten in i reaktorbyggnaden, och vattenmängderna har minskat eller försvunnit helt på flera våningsplan. På vissa ställen leder de minskade vattenmängderna till att koncentrationen av radioaktiva ämnen ökar i det kvarvarande vattnet. På andra ställen leder den kombinerade exponeringen av fukt och luft till att olika material vittrar sönder, vilket i sin tur leder till ökad spridning av radioaktiva klyvningsprodukter i form av damm och aerosoler. På det stora hela är det en positiv sak att vattnet försvinner, och det förenklar oftast arbetsförhållandena, men på ett ställe har neutronflödet ökat sedan den nya sarkofagen kom på plats.



Figur 3. En närbild av situationen vid rum 305/2 där ett ökat neutronflöde uppmätts. En kanal har borrats från rum 208/10, genom rum 304/3 till rum 305/2 där den större delen av bränslet befinner sig. Genom kanalen kan det neutronabsorberande ämnet gadoliniumnitrat injiceras, men på grund av de stora mängder med annat material tycks ämnet inte ha någon effekt på det ökande neutronflödet. Bildkälla: [11].

Det ökade neutronflödet

Vad är det som observeras?

Ett av de många ställen som observeras med neutron-detektorer är rum 305/2 som ligger direkt under den ursprungliga reaktorhärden, det är där den större delen av bränsleresterna finns. I figur 2 syns att det utrymmet är fyllt av olika komponenter från reaktorn, rester av bränslet (rött) samt delar av de material som dumpades från helikoptrar 1986. Efter att den nya sarkofagen kom på plats 2016 har flera neutrontektorer i rum 305/2 registrerat en långsam ökning av neutronflödet, i en detektor är nu flödet dubbelt så högt som 2016. Denna fördubbling är från en väldigt låg nivå så det finns ingen anledning till omedelbara åtgärder. Flera gånger har det neutronabsorberande ämnet gadoliniumnitrat injicerats på platsen. Hittills har detta inte lett till någon förändring av trenden, utan neutronflödet har fortsatt att långsamt öka [11]. Figur 3 visar en närbild på området vid rum 305/2, där syns bland annat en kanal som borrats fram till området med ökande neutronflöde.

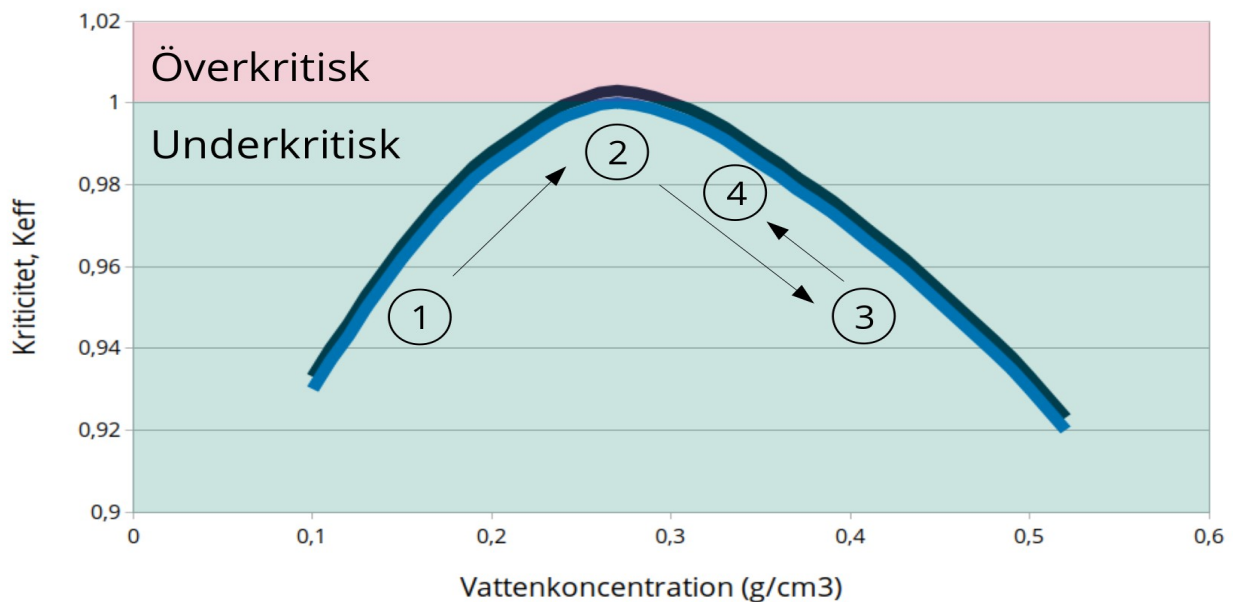
Tänkbara orsaker med ledtrådar från 1990

Eftersom de höga strålningsnivåerna efter olyckan 1986 gör det omöjligt att vara på den plats där neutronflödet

ökar så är det svårt att undersöka orsaken närmare. Här presenteras den teori som presenterades på INUDECO-konferensen i slutet av april 2021 [3]. Teorin är inte ny utan har diskuterats sedan tidigt på 1990-talet efter en liknande händelse.

Vid ett större regnoväder i juni 1990 observerades ett ökat neutronflöde från samma plats som nu i rum 305/2. Vid det tillfället var det en så pass stor ökning att delar av FCM uppnådde kriticitet under nästan fyra dygn innan kedjereaktionen avstannade [12]. Från de observerade neutronflödena i detektorerna har olika modeller tagits fram för att kunna förklara händelseförloppet [13]. Figur 4 är ett förenklat sätt att visualisera detta.

På platsen vid rum 305/2 antas det finnas en relativt hög andel uran i blandningen av bränsle och andra ämnen. Blandningen var underkritisk (se faktaruta) efter olyckan 1986. Vid regnovädet ökade tillförseln av vatten i materialet, vilket förbättrade nedbromsningen av neutroner från spontan kärnklyvning. Därmed var det fler neutroner som orsakade nya kärnklyvningar i bränslet, och för varje ökning av vattenhalten stabiliserades neutronflödet på en högre nivå. Vid regnovädet ökade vatteninnehållet i materialet så pass mycket att bränsleblandningen uppnådde en kritisk konfiguration med en



Figur 4. En beskrivning av hur kriticiteten i rum 305/2 kan tänkas bero på vattenkoncentrationen i det bränsleblandade materialet. Efter olyckan 1986 var materialet i en underkritisk konfiguration (1) med en okänd vattenkoncentration. Ett regnoväder 1990 ledde till att vattenkoncentrationen ökade så pass att kriticiteten ökade och bränsleblandningen uppnådde en kritisk (ljusblå) eller lätt överkritisk (mörkblå) nivå (2). Vattenkoncentrationen ökade ytterligare, vilket ledde till att bränsleblandningen åter blev underkritisk (3). Vatten har sedan 1990 tillförts av regn och bränsleblandningen har varit kvar i samma underkritiska tillstånd. När den nya sarkofagen kom på plats 2016 upphörde tillförseln av regnvatten. Sedan dess dunstar kvarvarande vatten sakta bort, vilket ökar kriticiteten och orsakar den observerade ökningen av neutronflödet (4).

självuppehållande kedjereaktion. När mer vatten tillfördes materialet passerades den optimala punkten för kriticitet, vattnet började nu absorbera neutroner vilket ledde till att bränsle-blandningen blev underkritisk igen. Vid tillfället tillfördes också gadoliniumnitrat som kan ha bidragit till att minska neutronflödet.

Sedan 1990 har bränsleblandningen befunnit sig i ett tillstånd med hög vattenhalt. Det vatten som dunstat bort har ersatts av nytt vatten vid regn. När den nya sarkofagen placerades över den gamla sarkofagen 2016 stoppades tillförseln av mer regnvatten. Vattenmängderna har därefter sakta dunstat bort vilket leder till att färre neutroner vid spontan kärnklyvning absorberas, kriticiteten ökar.

Det går att tänka sig andra orsaker till den observerade ökningen av neutronflödet, men ingen av de alternativa förklaringarna stämmer överens både med händelsen i juni 1990 och vad som observeras nu.

Konsekvenser och motåtgärder

Att neutronflödet ökar tyder på ökad kriticitet i delar av de material som innehåller bränsle. Så länge som kriticiteten är mindre än 1,0 så kan inte processen löpa amok. De viktiga frågorna nu är om bränsleblandningen åter kommer uppnå kritisk konfiguration och hur lång tid det i så fall kommer att ta. Det är inte alls säkert att kriticiteten når 1,0 den här gången då sammansättningen

av bränsleblandningen kan skilja sig på flera sätt från den som rådde 1990. Om det trots allt sker så förväntas förloppet bli mer kortvarigt än 1990 eftersom jämviktsläget kommer rubbas av att vatten dunstar, eller kokar bort, och inte ersätts med nytt vatten.

Vad blir konsekvenserna om bränsleblandningen åter blir kritisk? Det är inte ett önskvärt förlopp eftersom det ytterligare kan försvåra arbetet på plats, men det innebär trots allt inte en så värst allvarlig situation. För att förklara det kan vi jämföra med vad som hände 1990. Då uppnåddes en kritisk konfiguration i totalt 92 timmar (nästan fyra dygn). Neutronflödet ökade som mest omkring 60 gånger från den normala nivån. Det ökade antalet kärnklyvningar orsakade en värmeutveckling på omkring 400 W, och temperaturen i materialet ökade med 5 grader celsius. Varje kärnklyvning skapar radioaktiva klyvningsprodukter som skulle kunna spridas till omgivningen. I tabell 1 jämförs hur mycket radioaktivitet som skapades 1990 för några relevanta nuklider med vad som spreds efter själva olyckan 1986. Eftersom temperaturen är alltför låg jämfört med vid själva olyckshändelsen, så är det endast ädelgaser som xenon-133 som kan tänkas frigöras från det bränsleblandningen, de övriga ämnena når aldrig koktemperatur. Om vi tänker oss att även jod-131 skulle frigöras så innebär det en mängd med radioaktivitet som är lägre än en sköldkörtelbehandling med jod-131. Med tanke på att strålningsnivåerna på platsen är avsevärt mycket högre så är det inte ett stort strålskyddsproblem.

Tabell 1. En jämförelse av storleken på utsläppet av några vanliga klyvningsprodukter vid Tjernobylolyckan 1986 och den mängd som skapades vid kriticitetshändelsen 1990, samt vid behandling av sköldkörtelcancer. Radioaktiviteten anges här i TBq, där en TBq är tusen miljarder becquerel.

Radionuklid	Halveringstid	Kokpunkt	Utsläpp april 1986	Kriticitetshändelsen 1990	Sköldkörtelbehandling
xenon-133	5 dagar	-108 ° C	6500 000 TBq	0,0004 TBq	
jod-131	8 dagar	184 ° C	1760 000 TBq	0,0003 TBq	0,003 – 0,005 TBq
cesium-137	30 år	671 ° C	85 000 TBq	0,0002 TBq	

Det är inte klarlagt exakt vilken mekanism som orsakar det ökade neutronflödet, och alla antaganden är belagda med stora osäkerheter eftersom det är svårt att arbeta på platsen. Det är dessutom svårt att komma åt den del av bränsleblandningen där neutronflödet ökar eftersom det är begrävat under stora mängder material. Men det generella resonemanget om att den stoppade tillförseln av regnvatten leder till minskad vattenhalt och därmed en förändring av kriticiteten är både förväntad och rimlig. De neutronmonitorer som finns i närheten bekräftar detta. Personalen på plats observerar noga händelseförloppet och använder alla tillgängliga data för att utveckla modeller som beskriver skeendet.

Vid konferensen diskuterades planer på att använda maskininlärning till att förbättra möjligheterna att göra mer tillförlitliga modeller. Nya metoder behöver också utvecklas för att mer effektivt kunna tillföra gadolinium-nitrat till platsen [11]. Flera forskare var tydliga med att en situation som leder till kriticitet är ett worst-case scenario och inte den förväntade händelseutvecklingen. Eftersom alla antaganden har stora osäkerheter blir det vilseledande att fokusera på ett worst-case scenario. Det viktiga är för tillfället att samla in data och förbättra modellerna innan beslut om eventuella åtgärder vidtas. Efter konferensen har ISPNPP och SSE ChNPP gått ut med varsitt pressmeddelande [14, 15].

Några ord om ordval

På svenska används oftast ordet **sarkofag** om de gamla och nya konstruktionerna över den havererade reaktorbyggnaden. Samma ord används i denna text, men det leder lätt till missuppfattningen att konstruktionen är avsedd att begrava reaktorn för all framtid. På ryska och ukrainska används både саркофаг (sarkofag) och ordet об'єкта Укриття som direkt översatt till svenska blir **skyddsobjekt**. I engelskspråkig litteratur används oftast Shelter Object. Detta ordval ligger närmare sanningen då syftet med konstruktionen var att skydda omgivningen från strålningen i den havererade reaktorn. Den nya sarkofagen kallas нового безпечного конфайнмента, vilket på engelska blir New Safe Confinement, det vill säga **ny säker inneslutning** på svenska. Den nya sarkofagen kallas också The Arch på grund av sin valvformade design.

Författare: Mattias Lantz, Uppsala universitet

Granskning: Carl Hellesen, doktor i tillämpad kärnfysik

Källor och kommentarer

1. State Specialized Enterprise "[Chernobyl NPP](#)".
2. Se t.ex. Analysgruppen, "[Chernobyl's legacy: Health, Environmental and Socio-economic Impact – Den verkliga omfattningen av olyckan](#)", Bakgrund 3-2006.
3. 6th International Conference on Nuclear Decommissioning and Environmental Recovery (INUDEC 2021), Slavutych, 27-29 April 2021. Länk till konferensens [webbsida](#). Länk till [webbsändningarna](#) med de tekniska presentationerna.
4. R. Stone, "[It's like the embers in a barbecue pit: Nuclear reactions are smoldering again at Chernobyl](#)", Science, 5 maj 2021.
5. Den intresserade kan få en uppfattning om osäkerheten och de resonemang som ledde till olika beslut i en svensk översättning av delar av Valerij Legasovs bandinspelningar från 1988: Analysgruppen, "[Rysk självrannsakan efter Tjernobyl](#)", Bakgrund 8-1988.
6. OECD Nuclear Agency, "Chernobyl: Assessment of Radiological and Health Impacts", 2002.
7. A. R. Sich, "The Chernobyl Accident Revisited: Source Term Analysis and Reconstruction of Events During the Active Phase", PhD thesis, Massachusetts Institute of Technology, 1994.
8. V. A. Babenko et al., "Nuclear Power Industry: Tendencies in the World and Ukraine", Physics of Particles and Nuclei 38 (2007) 795–826.
9. S. Bogatov et al., "[Half an hour after the beginning of the accident](#)", Moscow, 2005.
10. Institute for Safety Problems of Nuclear Power Plants (ISPNPP).
11. A. Doroshenko och D. Muliak, "Efficiency of subcritical control systems at the Shelter facility", INUDEC 2021, 29 april 2021.
12. K. Sushchenko och R. Godun, "Comprehensive analysis and interpretation of a neutron incident recorded on the periphery of a FCM accumulation in June 1990", INUDEC 2021, 29 april 2021.
13. E. D. Vysotskiy et al., "[Neutron-physical characteristics of nuclear dangerous accumulations of fuel contained materials](#)", Problems of safety of nuclear power plants and Chernobyl, Issue 12, 2009.
14. ISPNPP, "[On the State of the Shelter Object Nuclear Safety](#)", 12 maj 2021.
15. State Specialized Enterprise "Chernobyl NPP" (SSE ChNPP), "[Refutation of the information about potential risks](#)", 13 maj 2021.