



Näringsdepartementet
Näringsdepartementet
energiproduktions-
forskning

SE8200076

Ångexplosioner i natriumkylda
bräddreaktorer

Bertil Lundell

STUDSVIK - NR -- 82 - 82 ✓

NE/TEKNIK-82/8



Ångexplosioner i natriumkylda
bridreaktorer

Bertil Lundell

STUDSVIK-NR--82-82✓

NE/TEKNIK-82/8

RAPPORT INOM NE-OMRÅDET TEKNIKBEVAKNING

Rapportnummer: NE/TEKNIK-82/8

Projektledare: Bertil Lundell

NE:s delområde: Ny kärnteknik

NE:s projektnummer: 5860 041 FBR Ångexplosion

NE:s projekthandläggare: Birgit Bodlund

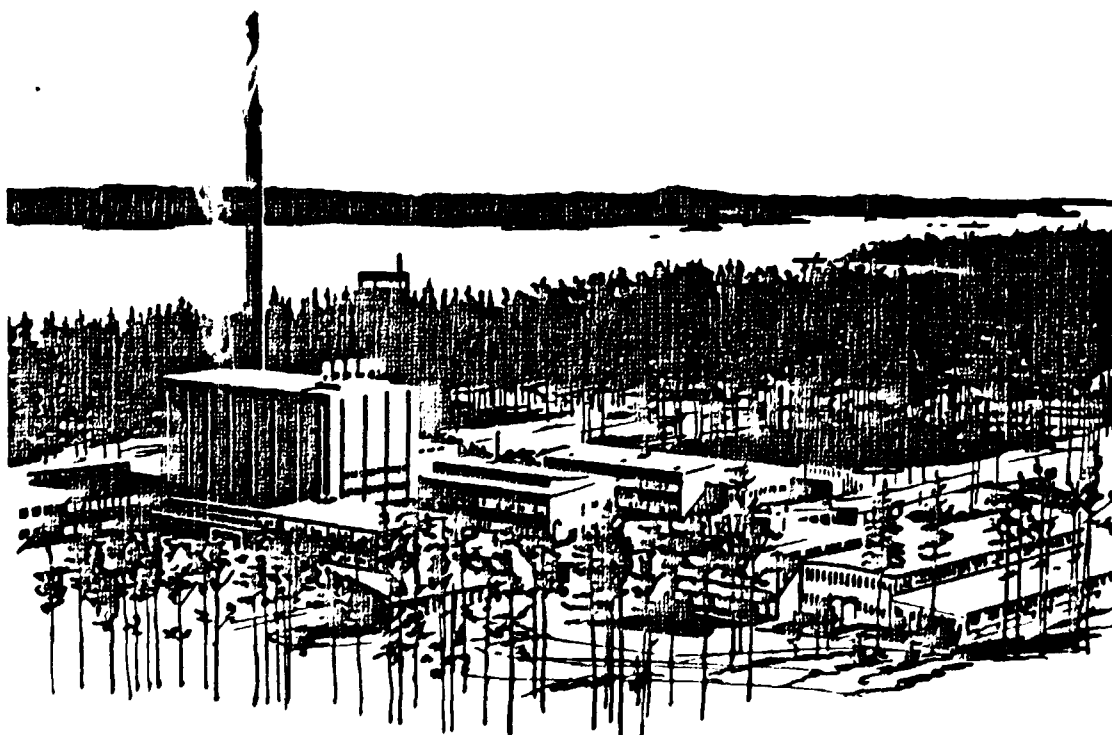
Övrigt: Saknar engelsk sammanfattning

Denna rapport är ett slutresultat av ett NE-projekt vilken vidare distribueras i informationssyfte. För åsikter och slutsatser i denna rapport svarar projektledaren.

ÅNGEXPLOSIONER I NATRIUMKYLDA BRIDREAKTORER

NE-projekt 5860 041 FBR Ångexplosion

Bertil Lundell



1982-01-18

5860 041 FBR Angexplosion

Bertil Lundell

Nämnden för Energiproduktions-
forskning

ANGEXPLOSIONER I NATRIUMKYLDA BRIDREAKTORER

HUVUDINNEHÅLL

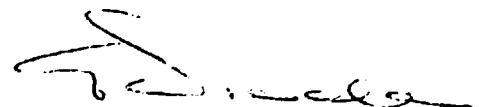
Angexplosioner (AX) har länge varit av betydelse vid säkerhetsanalys av kraftbridreaktorer. AX är en fysikalisk process, genom vilken värme överförs från hett, smält bränslematerial till vätskeformigt kylmedel så hastigt att kylmedlet försätts i explosionsartad kokning. Genom så bildade tryckvågor, överförs en del av det smälta bränslets värmeenergi till mekanisk energi, som kan tryckbelasta reaktortanken och latent hota dess täthet. Angexplosioner har åstadkommit experimentellt med flytande urandioxid och natrium, men förloppet kan ännu inte fullständigt förklaras teoretiskt.

Experimentresultat antyder att sannolikheten för ångexplosioner i bridreaktorer är liten och att verkningsgraden vid omvandling av smältvärme till mekanisk energi är väsentligt lägre än det teoretiska maximalvärdet.

Mekanisk belastning på reaktortanken genom inverkan från AX förefaller knappast kunna äventyra dess täthet.

Detta arbete har finansierats av Nämnden för Energiproduktionsforskning som projekt 5860 041 FBR Angexplosion S.

Godkänd av



1982-01-18

INLEDNING

Angexplosion (AX) är en fysikalisk process vid vilken värme mycket snabbt överförs från hett, vanligtvis vätskeformigt material, till en kallare vätska, så att den senare råkar i explosionsartad kokning. Därigenom bildas tryckvågor, som omvandlar en del av det heta materialets värmeenergi till mekaniskt arbete (kinetisk energi). Tryckvågorna eller av dessa utkastade missiler utgör ett latent hot mot reaktortanken och ytterst reaktorinneslutningens täthet. AX är väl kända från bl a gjuteriindustrin, men anses även ha betydelse i samband med t ex vulkanutbrott under vatten (1). Detta kan delvis stå i motsats till ångexplosionskommitténs slutsatser, som berörs i det följande.

Inom reaktortekniken har AX inträffat i samband med reaktorhaverier med bränslemältning, och de har studerats ingående både experimentellt och teoretiskt.

Experiment har gjorts med många olika materialkombinationer bl a urandioxid/vatten och urandioxid/natrium. Blandning av urandioxid/vatten orsakar relativt ofta AX men långt ifrån alltid. Urandioxid/natrium ger mer sällan AX vid blandning, och man trodde en tid att sådana ej var fysikaliskt möjliga. Experiment gjorda på senare tid har emellertid resulterat i AX (2).

1982-01-18

I Sverige har risken för AX i lättvattenreaktorer studerats av den skångexplosionskommittén, som kom fram till att AX kan inträffa, men utan att skada reaktortankens täthet. AX, som samtidigt omfattar en stor del av reaktorhårdens bränsle, ansågs vara fysikaliskt omöjliga, eftersom den energi, som krävs för att blanda en så stor mängd flytande bränslematerial och vatten, är stor i förhållande till tillgänglig energi i det heta materialet (3). Angexplosionskommitténs underlagsmaterial hämtades delvis från rapporter, som insamlats inom detta NE-projekt.

Förutom experimentella undersökningar har ett relativt omfattande teoretiskt arbete utförts internationellt med målsättning att finna en fysikalisk förklaring till AX. Detta mål har ännu inte nåtts, även om vissa delar av förloppet kan förklaras.

Två principiellt olika teorier är av störst intresse. Den ena har framförts av amerikanerna Fauske och Henry (4) och den andra av engelsmännen Board och Hall (5). Båda teorierna förutsätter att relativt stora droppar av den heta vätskan (smält bränsle) blandas i den kalla vätskan (kylmedlet), och att filmkokning inträffar, så att de heta dropparna isoleras av ånga från den kalla vätskan och endast långsamt avger sitt värme under ett initialskeede. Vidare förutsätter båda teorierna att ångfilmen kollapsar, och att direkt vätskekontakt uppstår. Därefter ökar värmeavgivningen radikalt.

Enligt den ena teorin måste de heta dropparna fragmenteras så att deras värmeavgivande yta emot den kalla vätskan ökas. Genom samverkan av

1982-01-18

direkt vätske kontakt och finfördelning (fragmentering) skapas förutsättning för AX.

Fragmenteringsfasen är den del, som är svårast att beskriva teoretiskt. De modeller, som finns, kan indelas i två grupper: den ena förutsätter att fragmentering orsakas av termiska effekter och den andra att hydrauliska effekter inverkar. AX har iakttagits i system, där inga hastighetskillnader existerat mellan hett och varmt material, vilket antyder att termiska förlopp orsakat fragmentering t ex genom kollaps av ångblåsor eller ångfilm. Vidare kan sprickbildning i samband med frysning tänkas inverka (Fig 1).

Både Fauske, Henry och Board, Hall anger filmkokning som en nödvändig förutsättning för AX. Villkoren för filmkokning kring de heta dropparna kan beräknas relativt väl (6). De beror av bl a de heta dropparnas storlek och graden av vätning med den kalla vätskan. Enligt beräkningarna uppstår filmkokning omkring droppar av smält urandioxid i natrium, om deras diameter är större än 1 mm, och om natriets temperaturdifferens är högre än 200°C. Båda villkoren torde i allmänhet vara uppfyllda i praktiska situationer (Fig 2).

Den förmodade anledningen till själva explosionsförloppet är emellertid olika för de båda teorierna och några av skillnaderna anges i följande avsnitt.

1982-01-18

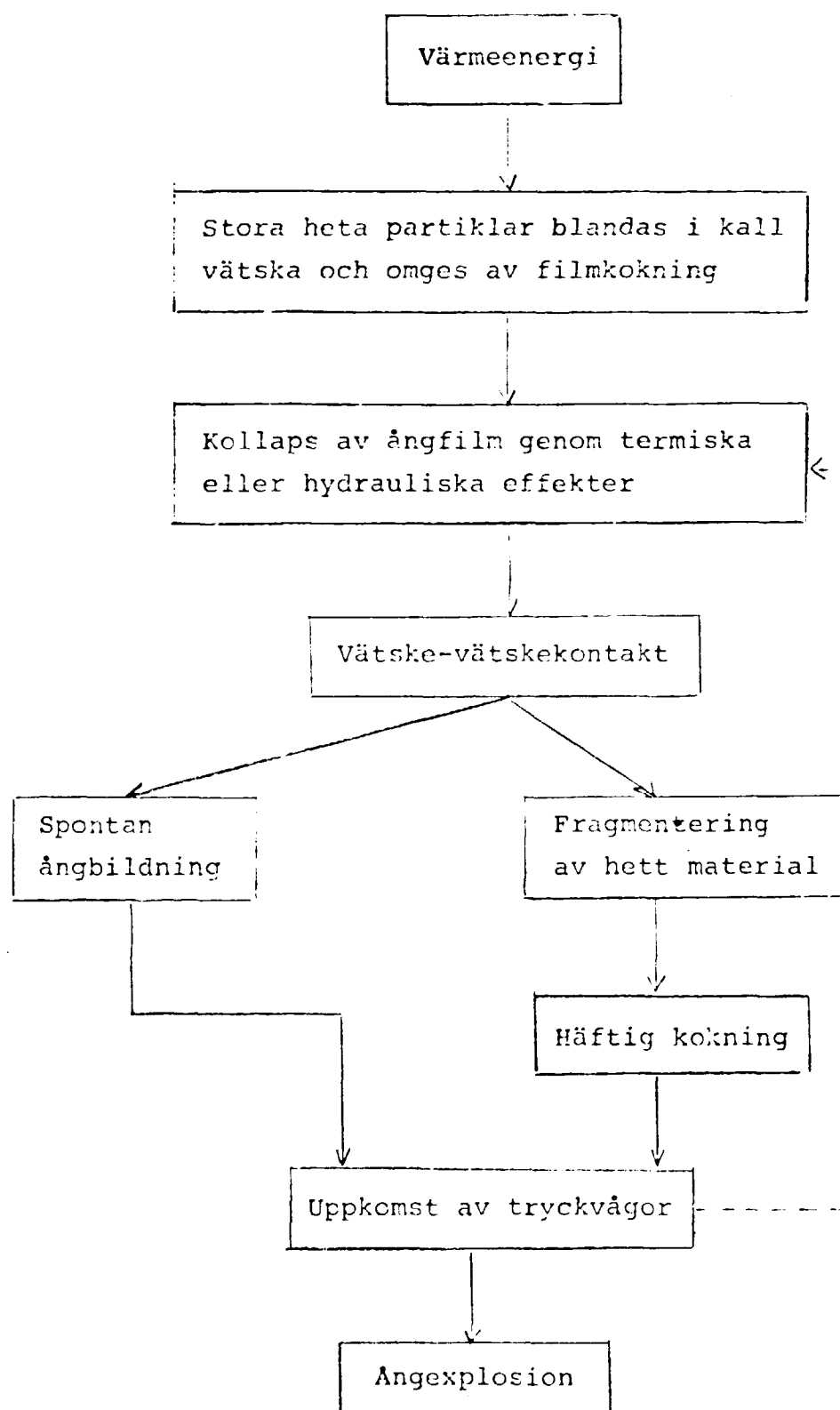


Fig. 1 Schematiska händelsekedjor för ångexplosion

1982-01-18

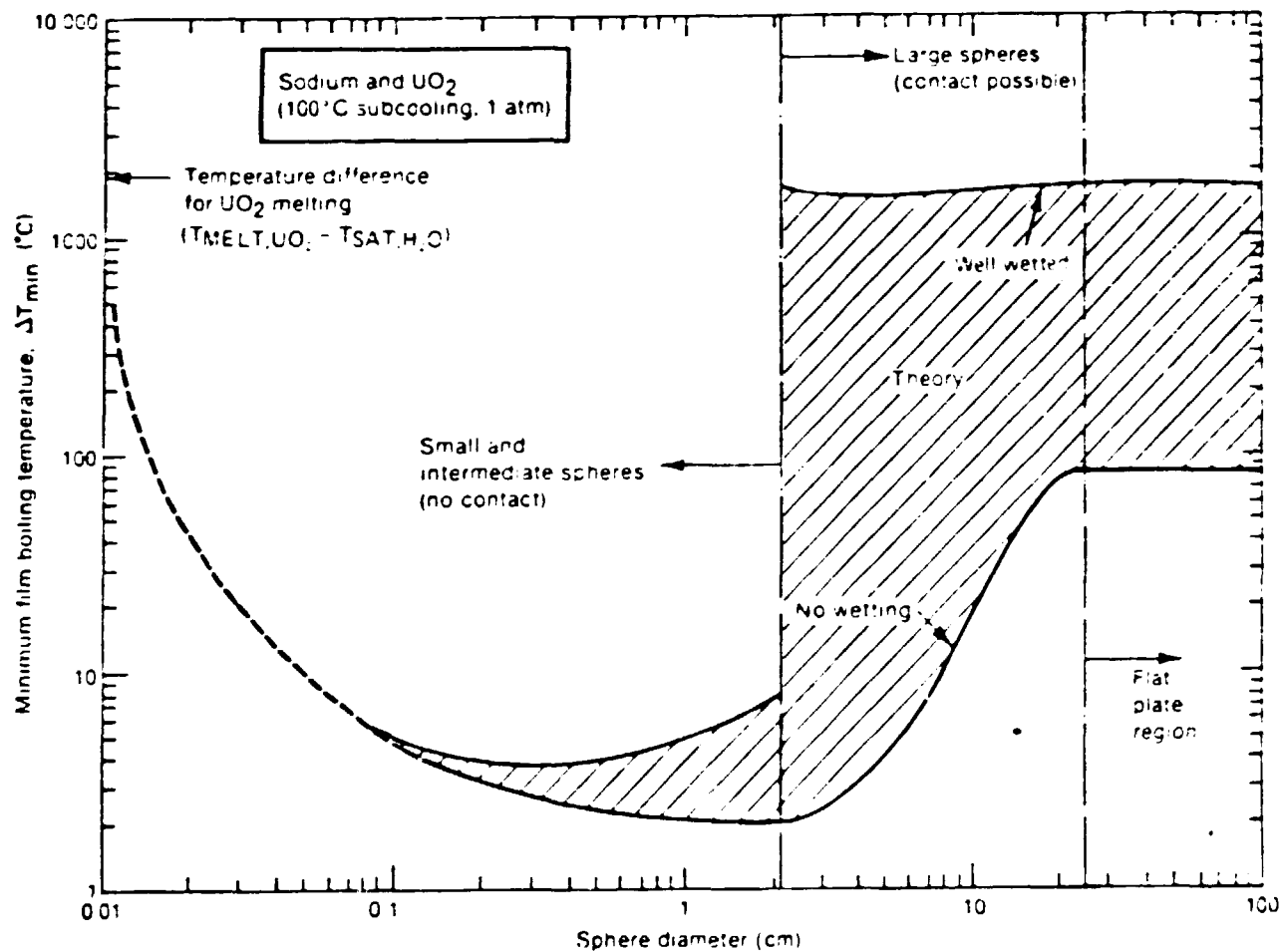


Fig. 2 Beräknad lägsta temperatur för filmkokning kring UO_2 i underkyllt natrium (0.1 MPa) (Ref 6)

1982-01-18

TEORIER

Den första plausibla och sammanhängande teorin för AX uppställdes av Fauske. Hans modell har kritiserats, men ger god insikt i några av de fysikaliska förlopp, som är grundläggande. Modellen anger följande villkor för AX som nödvändiga:

- direkt kontakt mellan vätskefaser av hett och kallt material (ev. ångfilm måste genombrytas)
- temperaturen i kontaktytan mellan het och kall vätska måste överstiga den kalla vätskans gränstemperatur för spontan ångbildning.

Spontan ångbildning inträffar, när ångtrycket i en vätska kan övervinna ytspänningen kring ett embryo till en ångblåsa. Vid kontakt mellan materiel med olika temperatur uppstår en temperaturfördelning kring kontaktytan och en yttemperatur i själva gränsskiktet (T_I). Om denna temperatur överstiger vätskans temperatur för spontan ångbildning kan AX inträffa enligt Fauskes teori.

Den andra teorin för ångexplosionsförlopp bygger på tanken att en stötvåg utbreder sig genom blandningen av stora droppar av het i kall vätska. De heta dropparna omges av en ångfilm, som begränsar deras värmeavgivning. Ångfilmen kollapsar under stötvågens tryck, varigenom värmeöverföringen ökar.

Vidare accelererar tryckvågen vätskeblandningen, varvid uppstår en hastighetsskillnad mellan de olika vätskorna (under förutsättning att de har

1982-01-18

olika densitet, vilken vanligen gäller). Därigenom fragmenteras de heta dropparna till väsentligt mindre partiklar och den värmeöverförande ytan blir mycket större, vilket tillsammans med förbättrad värmeövergång genom vätske-vätske kontakt orsakar snabb förångning av den kalla vätskan och tryckökning. Om denna process blir självunderhållande uppstår en ångexplosion (Fig 3).

Invändningar har riktats även mot denna teori. Bl a tycks finnas oklarheter beträffande den nödvändiga tryckvägens uppkomst och styrka.

1982-01-18

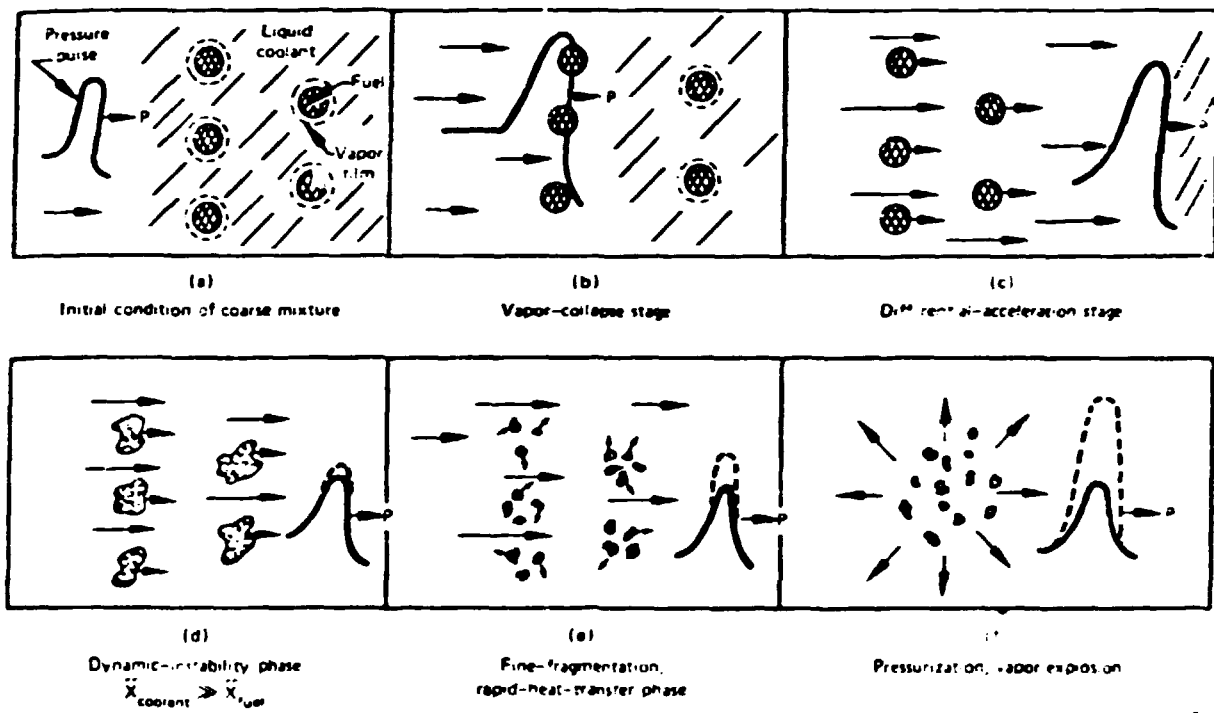


Fig. 3 Illustrativ beskrivning av stötvågsstyrd ångexplosion (ref Cronenberg, Nuclear Safety, vol 21, No 3, May-June 1980, p 321)

1982-01-18

PRAKTISK TILLÄMPNING AV TEORI FÖR SPONTAN
ANGBILDNING

Teorin för spontan ångbildning har mött flera invändningar bl a i form av motsägelsefulla experimentresultat. Trots detta ger den en intressant inblick i några av de fysikaliska förlopp, som är väsentliga för AX. I det följande ges därför de numeriska beräkningar, som leder fram till bestämning av temperaturen för spontan ångbildning för fallet med smält urandioxid i flytande natrium. Först bestäms kontakttemperaturen (T_I), som uppstår i gränsskiktet mellan hett och kallt material:

$$T_I = \frac{T_H + T_C \sqrt{\frac{k_C \cdot \rho_C \cdot c_C}{k_H \cdot \rho_H \cdot c_H}}}{1 + \sqrt{\frac{k_C \cdot \rho_C \cdot c_C}{k_H \cdot \rho_H \cdot c_H}}}$$

där k termisk konduktivitet
c specifik värme
 ρ densitet
T temperatur
H het vätska (bränsle)
C kall vätska (kylmedel)

data:

		urandioxid	natrium
k	W/m ² ·K	2.45	70.0
c	W/kg·K	3.97·10 ²	1.27·10 ³
ρ	kg/m ³	10.05·10 ³	7.96·10 ²

1982-01-18

$$\sqrt{\frac{k_c \cdot S_c \cdot C_c}{k_H \cdot S_H \cdot C_H}} = \sqrt{\frac{70 \cdot 7.96 \cdot 10^2 \cdot 1.27 \cdot 10^3}{2.45 \cdot 10 \cdot 0.05 \cdot 10^3 \cdot 3.97 \cdot 10^2}} = 2.69$$

Smälttemperatur för urandioxid är 2850°C och koktemperatur för natrium 883°C. Med dessa värden blir

$$T_I = \frac{2850 + 883 \cdot 2.69}{1 + 2.69} = 1416^\circ\text{C}$$

Beroende bl a på inverkan av bränslets kapselmaterial, som har lägre smältpunkt än själva bränslematerialet torde, den effektiva bränslesmälttemperaturen bli lägre och har uppskattats till ca 2000°C; natriets temperatur kan även vara lägre, kanske 700°C, i så fall blir

$$T_I = \frac{2000 + 700 \cdot 2.69}{1 + 2.69} = 1052^\circ\text{C}$$

Bildningsfrekvensen för ångbubblor bestäms av uttrycket

$$J = A \cdot e^{-\frac{W}{kT}}$$

I = bildningsfrekvens för ångbubblor per volymenhet

A = konstant

1982-01-18

k = Boltzmanns konstant

W = mekanisk energi för bildning av ångblåsa med kritisk storlek

T = temperatur $^{\circ}\text{K}$

W kan approximativt bestämmas genom uttrycket:

$$W = 4\pi r^2 \sigma - \frac{4}{3}\pi r^3 (P_v - P_l)$$

där

r = ångblåsans radie

σ = ytspänning

P_v = ångtryck

P_l = vätskans tryck

I bildningsögonblicket råder balans mellan ångtryck och ytspänning, vilket kan uttryckas:

$$P_v - P_l = \frac{2\sigma}{r}$$

Genom elimination av r erhålles:

$$W = \frac{16\pi \sigma^3}{3(P_v - P_l)}$$

Följande samband har angetts för ytspänning i flvtande natrium (7):

$$\sigma = 0.229 - 99.4 \cdot 10^{-6} T_K \quad \text{N/m}$$

och för ångtryck:

$${}^{10}\log P_{\text{N/m}^2} = 9.5772 - \frac{58.26.1}{T_K}$$

1982-01-18

Med angivna siffervärden fås temperaturen för spontan ångbildning

$$T_{SN} \approx 1850^{\circ}\text{C}$$

En tumregel säger att T_{SN} är ca 90 % av den kritiska temperaturen, vilken för natrium är 2300°C .

$$T_{SN} \approx 0,9 \cdot 2300 = 2070^{\circ}\text{C}$$

Överensstämmelsen är inte särskilt god. Skillnaden torde bl a bero på otillfredsställande noggrannhet i uttrycket för ytspänningens temperaturberoende.

Enligt ovanstående är yttemperaturen ($T_I \sim 1416^{\circ}\text{C}$) lägre än temperaturen för spontan ångbildning ($T_{SN} \sim 1850^{\circ}\text{C}$), och enligt Fauskes teori skulle ångexplosioner i systemet urandioxid/natrium vara fysikaliskt omöjliga.

EXPERIMENTELLA RESULTAT

Atskilliga experiment har utförts med materialkombinationen urandioxid/natrium. De flesta har ej resulterat i AX, men vid några tillfällen har sådana inträffat, vilket alltså motsäger Fauskes teori. Ett fall, som har omtalats (8), kan möjligen förklaras så att natrium har inneslutits i urandioxid och därigenom blivit starkt upphettat. Ett sådant förlopp är naturligtvis fysikaliskt möjligt, men klassificeras icke som egentlig ångexplosion. En sådan händelsekedja kan knappast samtidigt omfatta stora materialmängder och därför ej orsaka AX med stor energifrigörelse.

Av större intresse är en rad nyare experiment, som utförts med bränsletstavar i natrium. Dessa

1982-01-18

bränslestavar har nukleärt upphettats till hög temperatur genom att pulsa reaktoreffekten. Vid ett experiment undersöktes en stav med 5.83 mm ytterdiameter i en kapsel med stillastående natrium. Reaktorn gjordes prompt överkritisk och under mindre än 1 sek frigjordes maximalt 3.25 kJ/g (max radiellt medelvärde) i bränslematerialet. Detta kom därvid att delvis förångas, vilket resulterade i en tryckpuls i experimentkapseln med maximalt tryck 53.9 MPa. Ca 7 ms, senare uppmättes en andra tryckpuls med maximal amplitud 31.1 MPa. Den andra tryckpulsen anses orsakad av en ångexplosion, vars verkningsgrad uppmättes till $3 \cdot 10^{-4}$ (mekanisk energi/totalt frigjord energi). Fig 4 visar de trycktidsförlopp som uppmättes i experimentkapselnns undre- resp övre del (9). Detta experiment är ett av de mycket få som resulterat i AX.

1982-01-18

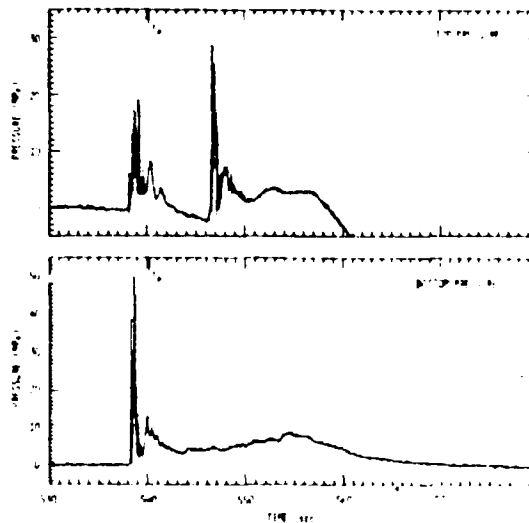


Fig 4 Tryckpulser som funktion av tiden vid experiment med smält uranoxidbränsle i natrium (ref 9).

1982-01-18

ANGEXPLOSION I KRAFTBRIDREAKTOR

De nuvarande teorierna för AX (ångexplosion) är ofullständiga och kan icke användas för kvantitativa beräkningar. AX är uppenbarligen fysikaliskt möjliga vid kontakt mellan smält urandioxid och natrium om vissa, delvis okända förutsättningar är uppfyllda. En uppskattning av möjlig tryckbelastning från AX i samband med maximalt härdhaveri i FBR måste därför göras med konservativa antaganden. En sådan har gjorts av bl a Hicks och Menzies (10). Enligt dem kan maximalt ca 200 J/g UO_2 omsättas till mekaniskt arbete genom adiabatisk expansion av natriumånga, som bildas genom momentan överföring av det värme, som finns i smält urandioxid, mellan dess kokpunkt ($3200^{\circ}C$) och den blandningstemperatur som uppstår efter uppnådd värmebalans med en viss mängd natrium. Maximal omvandling av bränslematerialets värme till mekanisk energi inträffar vid ett massförhållande natrium/urandioxid på ungefär 0.07, vilket motsvarar ett volymsförhållande på ca 0.8. En normal kraftreaktorhård har ett volymsförhållande mellan natrium och urandioxid på ca 0.7. De svåraste härdhaverierna bedöms kunna inträffa i samband med torrkokning av reaktorhärden, vilket skulle kunna orsaka en kraftig positiv reaktivitetsramp och åtföljande snabb bränslesmältning i härden. Vid en sådan händelse kan en mindre mängd natrium tänkas finnas kvar på kapselrören i härden och orsaka en ångexplosion. Volymsförhållandet natrium/urandioxid i en sådan situation bör emellertid vara väsentligt lägre än 0.7, vilket kraftigt reducerar den mängd rörelseenergi, som kan frigöras genom natriumångans expansion. En viss möjlighet finns att härden återfylls med natrium innan de smälta bränslestavarna sönderdelats. I så fall finns förut-

1982-01-18

sättning för en effektivare AX. Den teoretiskt maximala verkningsgraden för AX i systemet UO_2/Na har uppskattats till ca 15 %, dvs den andel av tillgänglig värmeenergi i smält urandioxid, som kan överföras till mekaniskt arbete (rörelseenergi) genom AX i flytande natrium. Experimentellt uppmätta värden på verkningsgraden ligger genomgående väsentligt lägre. Vid snabb bränslesmältning i härden kan vissa centrala delar förångas. Samtidigt ger gasformiga och förångade fissionsprodukter bidrag till gastryck i bränslematerialet. När kapselrören bryts sönder kan därför smält bränslematerial kastas ut i kylkanalerna av detta gastryck. Därigenom skapas förutsättningar för AX inom motsvarande delar av härden. Bränslematerial och kylmedel är redan "blandade" i den normala härdgeometrin och gastrycket från förångade fissionsprodukter och bränslematerial ger möjligheter för ytterligare finfördelning i urandioxid i natrium. Experimentella resultat visar emellertid att gas i kylmedlet minskar verkningsgraden i AX genom gasens värmeisolerande funktion och dess dämpning av hydrauliska krafter.

En stor kraftreaktor innehåller drygt 30 ton bränslematerial. Vid en svår effekttransient bedöms den smälta delen av härden begränsas till ca 2/3 genom inverkan av reaktoreffektens rumsfördelning, som ger lägre effekt i härdens perifera delar. 20 ton smält bränslematerial innehåller inemot 10 GJ energi tillgängligt för AX och teoretiskt maximalt mekaniskt arbete blir med 15 % verkningsgrad mellan 1 och 2 GJ. Detta "teoretiskt ej omöjliga" bidrag till mekaniskt arbete är av samma storleksordning eller större än det uppskattade bidraget från vid samma

1982-01-18

transient förångat bränslematerial. Detta har för den franska reaktorn Super Phenix beräknats uppgå till 0.8 GJ. Storleken av vid AX frigjord mekanisk energi begränsas av friktionsförluster och värmeöverföring till kallt material i samband med expansionsförloppet.

Av det ovanstående framgår, att de skäl, som angivits för att bortse från inverkan av AX i samband med säkerhetsbedömning av termiska lättvattenreaktorer, knappast gäller för bridreaktorer. Anledning till detta är att möjligheten för snabba effekttransienter beaktas vid analys av bridreaktorer men ej lättvattenreaktorer.

Vid snabba effekttransienter kan bränslesmältning inträffa medan härdens kylkanaler fortfarande är öppna för kylmedel. Detta möjliggör att bränsle och kylmedel är blandade så att det första kravet för AX är uppfyllt (fig 1). Vid säkerhetsanalys av härds smältning i lättvattenreaktorer förutsattes att en torr reaktorhård förblir utan kylning och långsamt smälter genom inverkan av resteffekten. De skäl, som anses utesluta kraftiga AX i detta fall (stort blandningsarbete), gäller ej för bridreaktorer.

De fysikaliska förloppen i samband med AX i systemet urandioxid/natrium är för närvarande inte tillräckligt väl kända för att medge att sannolikheten för AX sätts till noll i samband med analys av hypotetiska haverier med omfattande härds smältning i bridreaktorer. Experimentella resultat antyder att denna sannolikhet är liten och att verkningsgraden är låg vid överföring av smältvärme i bränslematerial till mekaniskt arbete. Eventuell inverkan på reaktortanken bedöms bli måttlig eller ingen.

1982-01-18

REFERENSER:

1. COLGATE, S A och SIGURGEIRSSON, T
Dynamic Mixing of Water and Lava,
Nature vol 244, Aug 31, 1973, p 552-555
2. REIL, KENNETH O och YOUNG, MICHEL F
Prompt Burst Energetics in the Oxide/Sodium
System
Proc. of the International Meeting on Fast
Reactor Safety Technology
Seattle Wash. Aug 19-23, 1979
3. Angexplosioner i lättvattenreaktorer
Betänkande av Angexplosionskommittén
DSI 1980:28
4. HENRY, ROBERT E och FAUSKE, HANS K
Nucleation Characteristics in Physical
Explosions
Third Specialists Meeting on Sodium
Fuel Interactions in Fast Reactors
Tokyo, Japan, 22-26 March, 1976
5. BOARD, S J och HALL, P W
Recent Advances in Understanding Large
Scale Vapour Explosions
Third Specialist Meeting on Sodium
Fuel Interactions in Fast Reactors
Tokyo, Japan, 22-26 March, 1976
6. GUNNERSSON, F S och CRONENBERG, A W
Film boiling and vapour explosion phenomena
Nuclear Technology vol 49, Aug 1980,
p. 380-391
7. YEVICK, JOHN G
Fast Reactor Technology
The M.I.T. Press, 1966
8. ARMSTRONG, D R et al
Interaction of Sodium with molten UO_2 and
stainless steel using a dropping mode of
contact.
USAEC Report ANL-7890, 1971
9. REIL, K O och YOUNG, M F
Prompt burst energetics in the oxide/sodium
system
Proc. of the international meeting on
Fast Reactor safety technology
Seattle, Wash., Aug 19-23, 1979

1982-01-18

10. HICKS, E P och MENZIES, D C
Theoretical studies on the fast reactor
maximum accident.
Proc. of the conference on safety fuels and
core design in large fast power reactors
1965, ANL 7120.

/BA