

Fredag 13.e händelsen

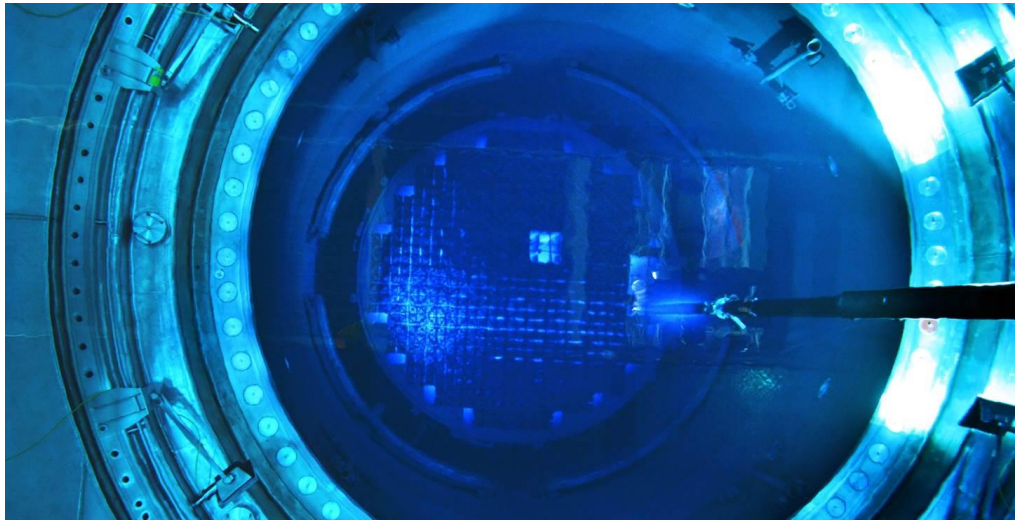
WIN frukostmöte
fredag 13.e mars, 2026

David Schrire – Studsvik Nuclear
fd Vattenfall Nuclear Fuel

© Forsmarks Kraftgrupp AB

Bakgrund – Internpumps BWR

- **Interna HC-pumpar i BWR**
  - HC-pumparna i en BWR ökar flödet av kylvattnet förbi bränslestavarna
    - ⇨ Vispar runt vattnet snabbare inuti reaktortanken
    - ⇨ Möjliggör högre effekt än naturcirkulation utan pumpar
  - Interna HC-pumpar jämfört med externa eller jetpumpar
    - ⇨ Interna pumpar utesluter risken för stora rörbrott under harden ✓
    - ⇨ Interna mindre storlek/vikt än externa/jetpumpar ☒
      - ⇨ Lågt rotationsmomentum ⇨ saktar ner snabbt vid bortfall av elmatning





https://external-content.duckduckgo.com/iu/?u=https%3A%2F%2Ftse4.mm.bing.net%2Fth%2Fid%2FOIP.nLj3qK1Bh2T6uGVMNaGJEQHaLG%3Fpid%3DApi&f=1&ipt=9ad711519eecb22a1e08a86d32c700c3ba1a11301b35f3bb967ee081a8fa23e1&ipo=images

Bakgrund – Internpumps BWR

- **Interna HC-pumpar i BWR**
  - HC-pumparna i en BWR ökar flödet av kylvattnet förbi bränslestavarna
    - ⇨ Vispar runt vattnet snabbare inuti reaktortanken
    - ⇨ Möjliggör högre effekt än naturcirkulation utan pumpar
  - Interna HC-pumpar jämfört med externa eller jetpumpar
    - ⇨ Interna pumpar utesluter risken för stora rörbrott under harden ✓
    - ⇨ Interna mindre storlek/vikt än externa/jetpumpar ☒
      - ⇨ Lågt rotationsmomentum ⇨ saktar ner snabbt vid bortfall av elmatning
  - För att motverka problemet med snabb inbromsning av HC-pumpar vid elbortfall
    - ⇨ FKA valde att införa ett svänghjul- (eng. flywheel) energilagringssystem
    - ⇨ Principen: roterande skiva (flywheel) som lagrar rotationsenergi
      - Laddas från ett elnät under normaldrift
      - Rotationsenergin omvandlas tillbaka till el mha. en generator vid nätbortfall
  - Med flywheel-energilagringssystemet i drift
    - ⇨ Kunde anta att HC-pumparna inte skulle stanna snabbt vid elbortfall
    - ⇨ Kunde anta att pumparna kunde styras ned på ett kontrollerat sätt
    - ⇨ Förutsättning vid planering av reaktorhärden och driften



https://external-content.duckduckgo.com/iu/?u=https%3A%2F%2Ftse4.mm.bing.net%2Fth%2Fid%2FOIP.nLj3qK1Bh2T6uGVMNaGJEQHaLG%3Fpid%3DApi&f=1&ipt=9ad711519eecb22a1e08a86d32c700c3ba1a11301b35f3bb967ee081a8fa23e1&ipo=images

© Forsmarks Kraftgrupp AB

Fredag 13.e - initierande händelsen

- **Fredag 13.06.2008: Blixtnedslag**
  - Blixtnedslag i kraftnätet ca 30 km bort från Forsmark
    ⇨ Kortslutning av samtliga tre faser under ca 85 ms
  - Elektriska störningen fortplantade sig in i Forsmark 2 elsystemet
    ⇨ Endast elförsörjningen till HC-pumparna drabbades
    ⇨ Inga andra väsentliga konsekvenser







© Forsmarks Kraftgrupp AB

Fredag 13.e - initierande händelsen

- **Fredag 13.06.2008: Blixtnedslag**
  - Blixtnedslag I kraftnätet ca 30 km bort från Forsmark
    - ⇨ Kortslutning av samtliga tre faser under ca 85 ms
  - Elektriska störningen fortplantade sig in i Forsmark 2 elsystemet
    - ⇨ Endast elförsörjningen till HC-pumparna drabbades
    - ⇨ Inga andra väsentliga konsekvenser

- **Brist i programmerad reglerlogik**
  - Felaktig logik (fokus på komponentskydd)
    - ⇨ Automatisk växling av elförsörjning till svänghjulsreservkraft (flywheel)
    - ⇨ Men signalen för nerstyrning av pumparna ej aktiverad
      - ⇨ Räckte till fullfart i 0,7 sekunder, sedan tog effekten slut
      - ⇨ HC-Pumparna avstannade snabbt (inom ca 1s)



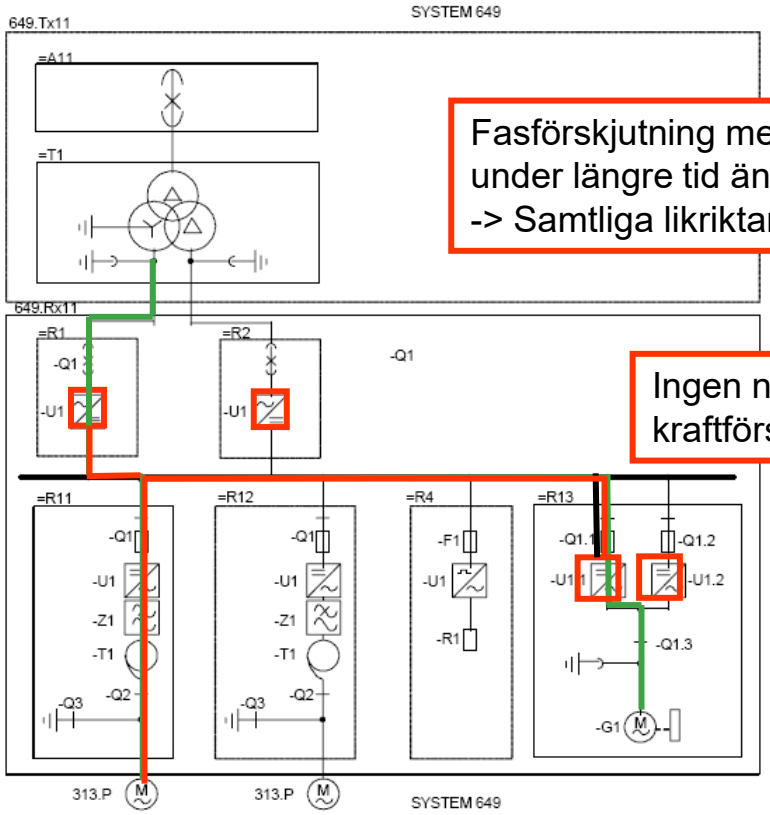




© Forsmarks Kraftgrupp AB

Fredag 13.e - initierande händelsen - elstörningen

1 kedje (av 4)



Fasförskjutning mer än 8 grader under längre tid än 80 ms
-> Samtliga likriktarna löser ut

Ingen nerstyrningsvillkor, kraftförsörjning räcker endast 0.7 s

Transient dryout in Forsmark 2 during a fast pump runback – course of events, fuel investigations and measures taken
Eric Ramenblad, David Schrire, Björn Schröder, TopFuel 2009, Paris

© Forsmarks Kraftgrupp AB

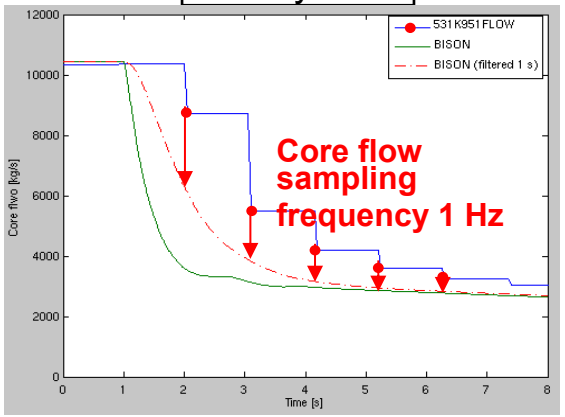
Studsvik VATTENFALL

Fredag 13.e - torrkokningshändelsen

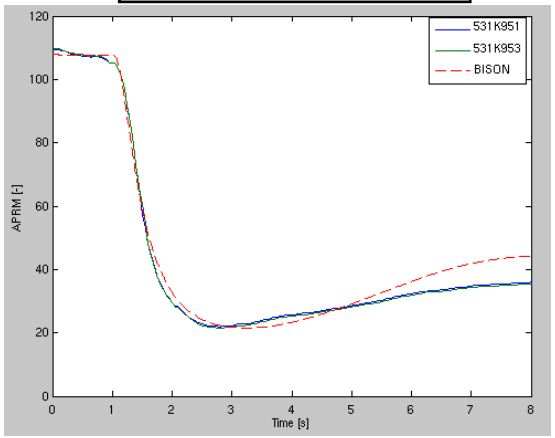
- **Kortvarig torrkokning (“dryout” eller “DO”)**
  - HC-pumparna saktar ner och stannar
    - ⇨ Härdflödet (kylningsvattnet uppåt genom bränslet) minskar snabbt
      - ⇨ Vattnet kokar mer (voidhalten ökar)
        - ⇨ Moderering minskar pga ökad voidhalt
        - ⇨ Fissionseffekten i bränslestavarna minskar

Transient predictions (Westinghouse code BISON) vs in-core instrumentation

Härdkylflöde



APRM neutronflöde



© Forsmarks Kraftgrupp AB

Studsvik VATTENFALL

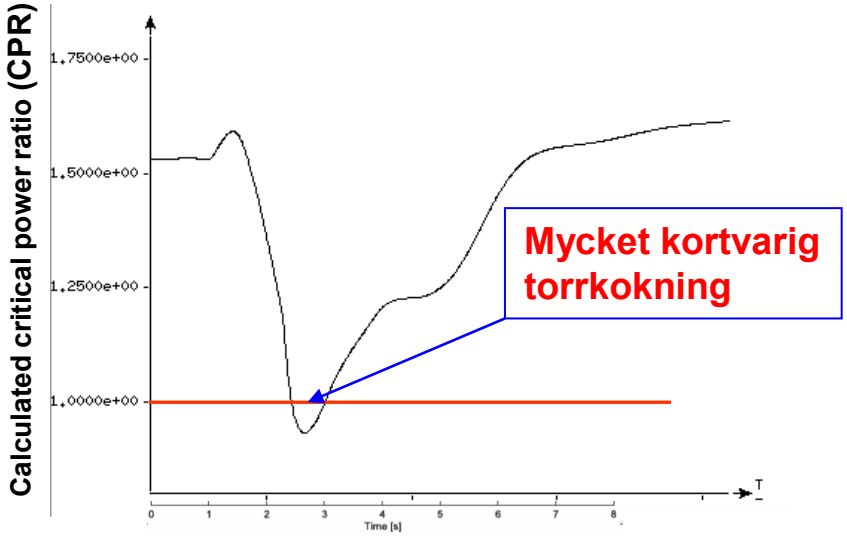
Fredag 13.e - torrkokningshändelsen

- **Kortvarig torrkokning (“dryout” eller “DO”)**
  - HC-pumparna sakta ner och stannar
    - ⇨ Härdflödet (kylningsvattnet uppåt genom bränslet) minskar snabbt
      - ⇨ Vattnet kokar mer (voidhalten ökar)
        - ⇨ Moderering minskar pga ökad voidhalt
        - ⇨ Fissionseffekten i bränslestavarna minska

MEN

  - Värmeöverföringen ut från bränslekutsarna till vattnet minskar långsammare än minskningen av kylningen från vattnet på utsidan av stavarna
    - ⇨ Tillfällig obalans mellan värmen ut och kylningen

⇨ Kortvarig torrkokning (dryout) kunde ske trots den minskande effekten



Erfarenhetsåterföring och lärdomar 1

- **Common cause failure (CCF)**
  - Samtliga 8 HC-pumpar stannade samtidigt
    - ⇨ Fel med gemensam orsak (CCF)
    - ⇨ Viktiga lärdomar för programmerbara styrsystem

- **Hur osannolik var den initierande händelsen?**
  - Olkiluoto 1 drabbades av en liknande händelse
    - ⇨ Också initierad av en elektrisk transient
    - ⇨ Också resulterade i att samtliga HC-pumpar stannade

- **Fredag 13.e vs Fredag 30.e**
  - Olkiluoto 1 händelsen inträffade på fredag 30.e maj (precis 2 veckor innan F2 händelsen)
    - ⇨ Pumptrippen ledde inte till torrkokning i OL1
  - Forsmark 2 händelsen inträffade på fredag 13.e juni
    - ⇨ Pumptrippen ledde till (kortvarig) torrkokning i OL1
    - ⇨ Varför är fredag 30.e en mer turlig dag än fredag 13.e? 😂

UNITED STATES
NUCLEAR REGULATORY COMMISSION
OFFICE OF NUCLEAR REACTOR REGULATION
OFFICE OF NEW REACTORS
WASHINGTON, DC 20555-0001

September 10, 2010

NRC INFORMATION NOTICE 2010-17: COMMON CAUSE FAILURE OF BOILING-WATER REACTOR RECIRCULATION PUMPS WITH VARIABLE SPEED DRIVES

IN 2010-17
Page 2 of 3

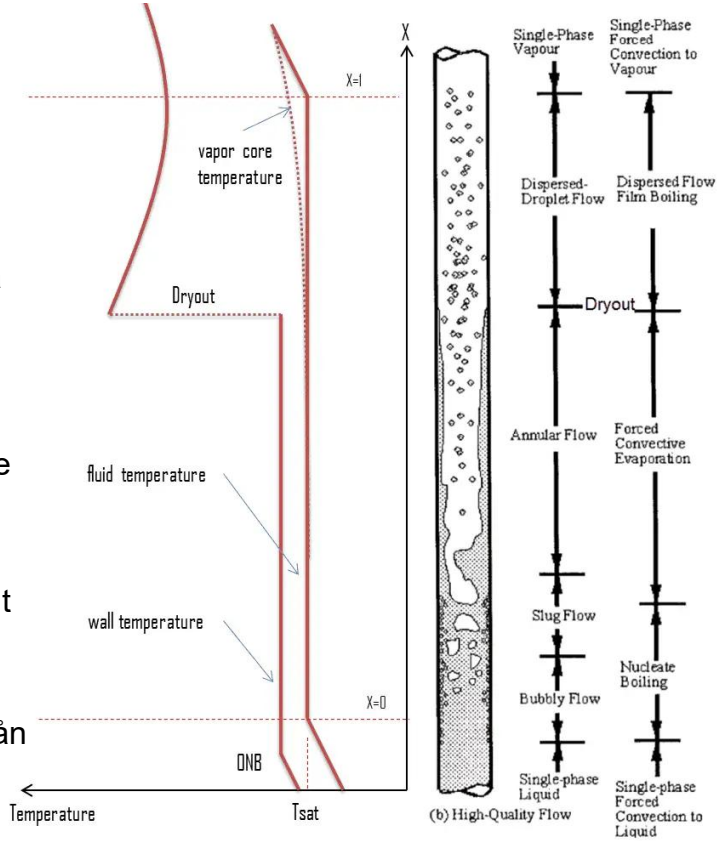
As a result, the recirculation pump motors rapidly consumed the flywheel-generator's stored energy. With no available energy storage, the recirculation pumps reduced speed faster than the assumed transient analyses in the Forsmark Unit 2 safety analysis report. The reduced coastdown time resulted in a short violation of the safety limit minimum critical power ratio on 84 core channels/fuel elements and a transient dryout condition in 18 of those core channels. Based on its review of the analysis and inspection results that revealed no fuel damage, the Swedish Radiation Safety Authority granted the licensee's request for continued use of the affected fuel.

On May 30, 2008, Olkiluoto Unit 1 in Finland had a reactor trip from 60 percent power. An electrical transient resulted in a common cause failure that caused all six recirculation pumps to stop unexpectedly. Although the coastdown of the recirculation pumps was shorter than expected, the transient had no effect on fuel integrity.

© Forsmarks Kraftgrupp AB

Kort bakgrund om kokning och torrkokning i BWR

- **Torrkokning i BWR - Dryout**
  - BWRs har normalt bulkkokning i större delen av härden
    - ⇨ Andelen ångfas (“void”) ökar med ökande axiell nivå i bränsleknippen
    - ⇨ Under normala driftförhållanden är kapslingens yta alltid täckt av ett tunt skikt av vätska (“vätad”)
  - Ifall den totala effekten i hela bränsleknippet inte räcker, eller om det lokala ytvärmeflödet på en bränslestav överstiger det nödvändiga kylflödet kan **vattenskiktet på kapslingsytan ta slut**
    - ⇨ **Dryout**
- **Torrkokningsförhållanden**
  - Torrkokning brukar börja precis uppströms (dvs nedanför) en spridare
    - ⇨ Spridarna förbättrar den lokala vätningen och kylningseffekten
    - ⇨ Därför minskar risken för torrkokning ovanför (nedströms) spridarna
    - ⇨ Det lokalt torrlagda och varma området (eng. “patch”) kan förbli lokalt eller sprida sig
    - ⇨ Kapslingens temperature stiger snabbt men kan stabilisera sig (framförallt om den torrlagda ytan är begränsad) tack vare kylning från små vattendroppar som träffar ytan



https://www.nuclear-power.com/nuclear%EF%BF%BEengineering/heat-transfer/boiling-and%EF%BF%BEcondensation/boiling-boiling-characteristics/film-boiling/

© Forsmarks Kraftgrupp AB

Kort bakgrund om kokning och torrkokning - tips

- **Studera kokningsfenomen hemma**
  - Normalkokning och torrkokning kan studeras i köket
    - ⇨ Reaktorbränsle simuleras bäst med en gammal elspis
    - ⇨ Spisens värmeplatta (helst spiral) motsvarar bränslekutsarna
    - ⇨ Kastrullens undersida motsvarar bränslekapslingen
    - ⇨ Vattnet inuti kastrullen motsvarar kylmedlet i reaktorhärden
  - Olika typer av kokning
    - ⇨ Underkyld kokning – När vattnet börjar sjuda, och små bubblor bildas på botten av kastrullen
    - ⇨ Bulkkokning - När vattnet kokar kraftigt
    - ⇨ Torrkokning – När man glömmer kastrullen på spisen och allt vatten kokar bort
  - ”Kapslingens” yttemperatur
    - ⇨ Kan provas med lämpligt plastföremål
    - ⇨ Bulkkokning - Smälter inte vid kontakt med kastrullens botten
    - ⇨ Torrkokning - Smälter snabbt vid kontakt med kastrullens botten





OBS: Vidta lämpliga säkerhetsåtgärder
⇨Använd inte Teflon eller liknande belagda kärl
⇨Låt inte yngre barn ser vad du håller på med

© Forsmarks Kraftgrupp AB

Korttids konsekvenserna av händelsen

- **Överskred en driftgräns**
  - Marginalen till torrkokning kallas för Critical Power Ratio (CPR)
    ⇨ Kvoten mellan
    - kritiska värmeflödet som leder till torrkokning och
    - aktuellt värmeflödet (overallt i ett bränsleknippe)
  - Det finns en gräns på minsta tillåtna marginal till torrkokning (MCPR)
    ⇨ Dessutom ansätts en säkerhetsmarginal ⇨ SLMCPR
  - Ifall den beräknade CPR (även ögonblickligen) understiger SLMCPR
    ⇨ > N% sannolikhet för DO
  - **I detta fall beräknades 84 st bränslepatroner ha underskridit SLMCPR**
  - **Varav 18 st bränslepatroner beräknades ha underskridit CPR = 1**
    OBS: CPR kan inte mätas, endast beräknas

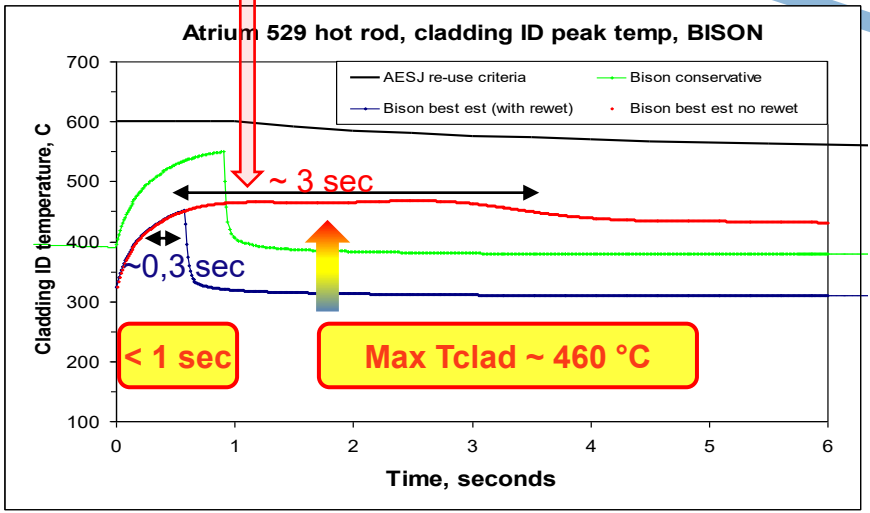
OBS: Inga bränsleskador
⇨Ingen risk för bränsleskador bedömdes förekomma
⇨Inga bränsleskador inträffade pga händelsen

- **Bränsleknippen formellt ej godkända för vidare drift**
  - Trots att inga kapslingsskador eller allvarlig inverkan på bränslet förväntades
    ⇨ Samtliga 84 bränsleknippen med CPR < SLMCPR laddades ut under en cykel
    ⇨ Under tiden skulle man verifiera att de var OK för vidare drift

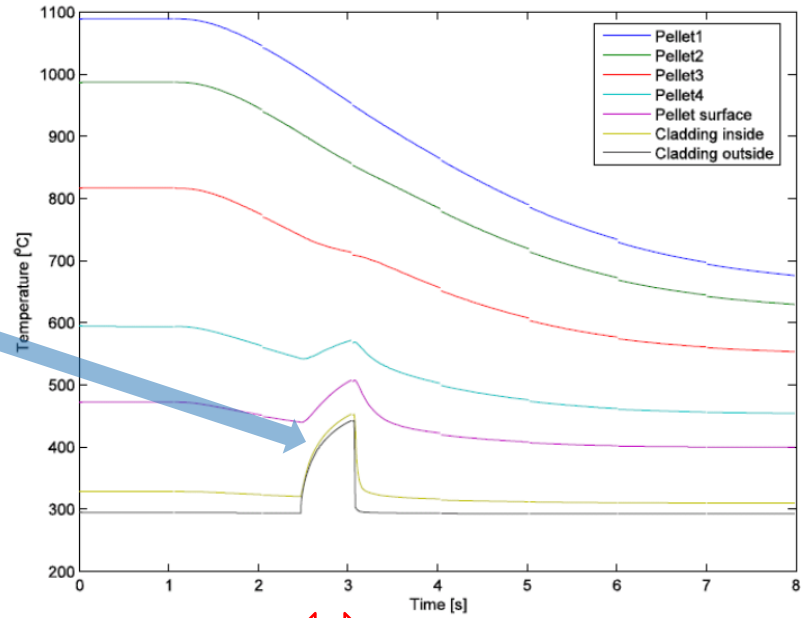
© Forsmarks Kraftgrupp AB

Beräknad överhettning i varmaste staven i hela härden

- **Beräkningar**
  - Kortvarig överhettning av kapslingen beräknades i de hetaste stavarna i samtliga berörda knippen
  - Oberoende beräkningar gjordes av Vattenfall och Areva
    ⇨ Överens om vilket knippe som upplevde högsta kapslingstemperatur (Bounding Bundle)
    ⇨ Överens om vilken stav i knippet med högsta kapslingstemperatur (Bounding Rod)
    ⇨ Realistisk beräkning ca 460 °C i < 1 sek
    ⇨ Konservativ beräkning ca 460 °C i ca 3 sek



Beräknad temperaturhistorik vid olika radiella positioner (BISON-SLAVE)



Tiden med torrkokning (med återvätning efteråt)

Ref: D Schrire et al., "Transient dryout in Forsmark 2 during a fast pump runback – verification of peak cladding temperature", Topfuel 2012, Manchester 2-6 Sept. 2012

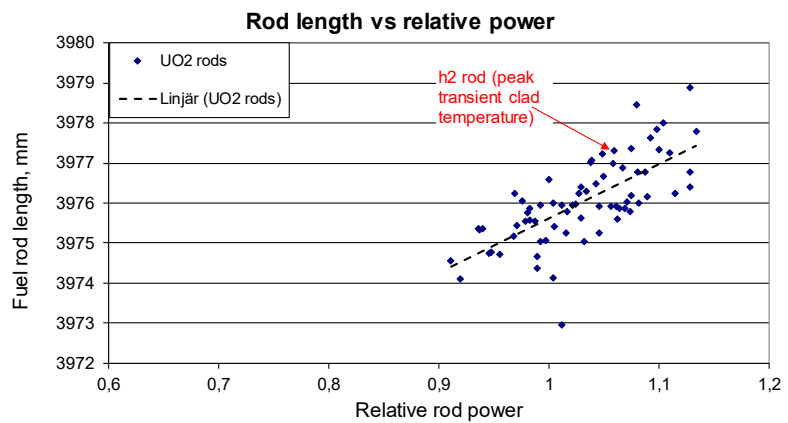
© Forsmarks Kraftgrupp AB

Studsvik VATTENFALL

Åtgärdsprogram – verifiera att bränslet OK för vidare drift

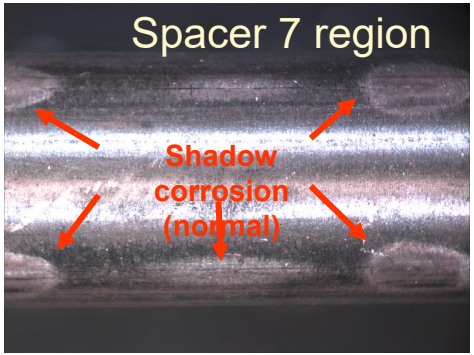
- **Inspektion i bassängen (hetaste knippet)**
  - Hetaste knippet i harden
    ⇨ Täcker in alla andra drabbade knippen (Bounding Bundle)
  - Visuellt såg alla stavar bra ut
    ⇨ Inga konstiga utseenden där torrkokningen kan ha skett
    ⇨ Inga tecken på ovanlig korrosion
  - Längdmätningar på samtliga stavar i knippet
    ⇨ Staven med högst beräknad temperatur stack inte ut jämfört med stavar som omöjligen haft torrkokning
  - Staven som upplevde högst beräknad temperatur under händelsen togs ut från knippet (Bounding Rod)
    ⇨ Skickades till Studsvik för efterbestrålningsundersökning (EBU)





Åtgärdsprogram – verifiera att bränslet OK för vidare drift

- **EBU i heta celler (hetaste staven)**
  - Visuell inspektion
    ⇨ Inget ovanlig syntes
  - Stavdiametermätningar (profilometri)
    ⇨ Inga tecken på minskad diameter där torrkokningen kan ha skett
    ⇨ Befarad nerkrypning kunde uteslutas
  - Mikroskopi och mikrohårdhetsmätningar
    ⇨ Ingen mätbar minskning i kapslingens hårdhet
    ⇨ Återhämtning av bestrålningshårdnande är det mest begränsande fenomenet för fortsatt drift av bränslet

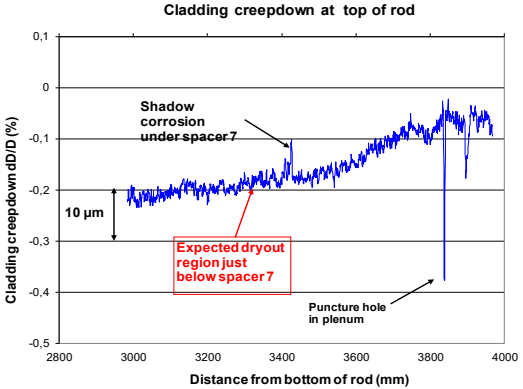


No indication of overheating caused by dryout

No significant recovery of irrad. hardening

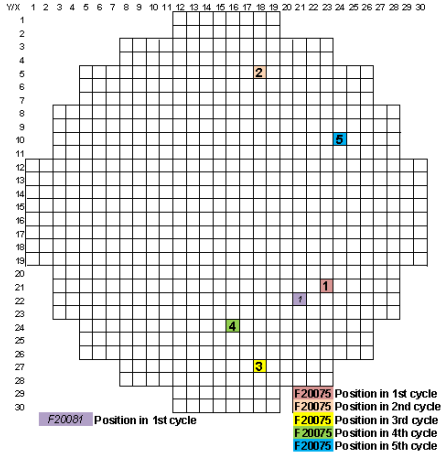
	Distance from bottom of rod (mm)	Description of specimen location	Microhardness mean ± σ_{mean} (Hv-50g)
1	3454	12 mm above spacer 7	281 ± 0,8
2	3418	Mid- spacer 7	283 ± 0,8
3	3388	12 mm below spacer 7	280 ± 0,6
4	3031	Middle of node 21	283 ± 0,7
5	234	Middle of node 2	282 ± 0,8
6	Reference	Unirradiated archive	189 ± 2,4

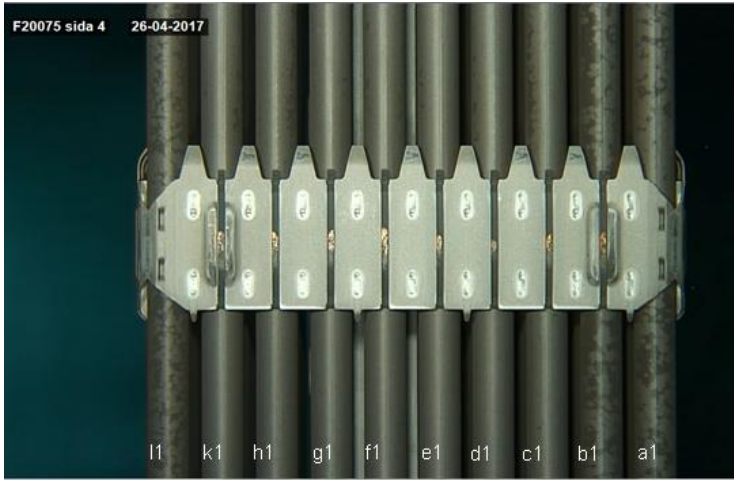
No creepdown



Vidare drift till normal full livstid

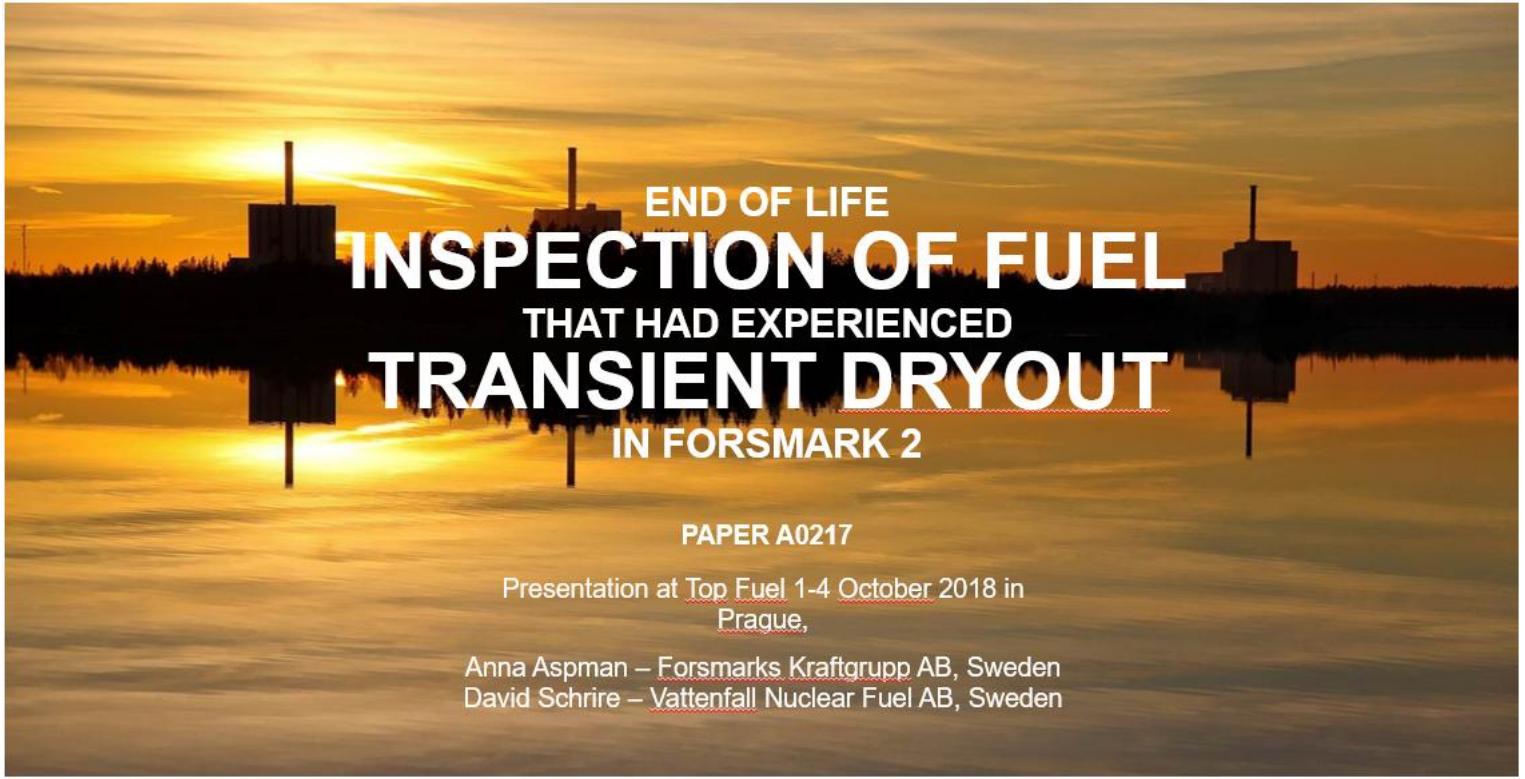
- **Återinförande av de uttagna knippen i härden**
  - Baserat på utfallet av verifikationsarbetet
    - ⇨ Samtliga aktuella knippen (84 st) fick återladdas i härden
  - Inga särskilda driftrestriktioner
    - ⇨ De återladdade knippen fick användas utan särskilda restriktioner
    - ⇨ De fick köras till det normala planerade slutet av livet
- **Fortsatt drift till slutet av ordinarie livet (“EOL”)**
  - Samtliga 84 knippen kördes vidare till slutet av deras planerat liv
  - Inga bränsleskador eller andra problem inträffade
    - ⇨ Bekräftade det förväntade utfallet då ingen påverkan hade setts
  - Stort (internationellt och eget) intresse för “hur det gick sedan”
    - ⇨ Beslutades att inspektera ett av knippen vid slutet av livet
- **Inspektion vid slutet av ordinarie livet**
  - Ett av de återinsatta knippen inspekterades vid EOL (5 cykler)
  - Beräknad MCPR vid händelsen: 0,981
    - ⇨ Beräknades verkligen ha upplevt torrkokning
    - ⇨ Beräknad max kapslingstemperatur vid händelsen: ~417 °C
  - Inspektionsresultaten visade bra och helt normalt utseende
    - ⇨ Ingen skillnad i oxid eller ytans utseende nedanför spridaren (där torrkokningen inträffade) jämfört med ovanför spridaren





© Forsmarks Kraftgrupp AB

Inspektion vid slutet av normal full livstid



Erfarenhetsåterföring och lärdomar 2

- **Händelsen orsakade ingen påverkan på bränslet**
  - Det ägnas mycket resurser åt att försöka undvika en sådan händelse (exempelvis införandet av svänghjulsreservkraft, omfattande analyser inför varje cykel)
    ⇨ Men när det ändå inträffade så hände inget med bränslestavarna!
  - Kunde man använda lärdomen för att tillåta kortvariga/milda torrkokningstransienter?
    ⇨ Kunde man tillåta en liten temperaturhöjning av kapslingen under en kort tid?
    ⇨ Kunde man definiera en lämplig ”tid-temperatur” (**t@T**) gräns?

- **Hårdhetsmätningar som “termometer”**
  - Den aktuella (endast beräknad men overifierad) t@T på den undersökte staven gav ingen minskning (“återhämtning” eller “glödgning”) av kapslingens bestrålningshårdnande
    ⇨ Vad är lägsta t@T som hade orsakat en mätbar återhämtning?
    ⇨ Detta skulle motsvara den högsta möjliga t@T som staven verkligen hade upplevt
      ⇨ Skulle vara en experimentell verification av beräkningarna
  - För att få svar på denna fråga utfördes speciella tester i Studsviks heta celler
    ⇨ Små prover av bestrålad kapsling värmdes till olika temperaturer under korta tider (“simulerade torrkokningstransienter”)
    ⇨ Sedan mättes graden av återhämtning av bestrålningshårdnandet
      ⇨ En formel som korrelerar % återhämtning till t@T har tagits fram
  - Maximal tillåten t@T föreslagen nu som alternativ till förbjud mot kortvarig transient torrkokning
    ⇨ Arbetet har rönt stort internationellt intresse och nu vill bl. a. USA industrin följa samma linje

© Forsmarks Kraftgrupp AB

Erkännande

Ett stort tack till alla inblandade

- Ingrid Thune och hennes kollegor på Forsmark som drev igenom handlingsplanen för friskförklaring av 84 bränslepatroner
- Inspektionerna i bassäng gjordes av Framatome GmbH med hjälp av FKA
- Hot cell undersökningarna som gjordes av Studsvik Nuclear AB
- Många års analysarbeten hos FKA och VNF
- Simulerade “t@T” torrkokningstester efter händelsen
- Alla andra som har jobbat med denna fråga under många år
- Undersökningarna finansierades av FKA och VNF

© Forsmarks Kraftgrupp AB

Backup bilder

Possible/plausible phenomena affecting fuel rod

Possible and plausible phenomena

GOOD BAD

- **Annealing of cladding**
  - Recovery of cladding irradiation hardening (”recovery”)
  - ⇨ Partial or full reduction of yield strenth to initial unirradiated level
  - ⇨ Reduction of creep strength during continued operation or backend drying
  - ⇨ Softening of liner towards unirradiated level (good for PCI)
  - ⇨ *Secondary phase particles re-precipitate and/or grow (good for BWR corrosion)*
  - ***(SPP growth only occurs at really high heat inputs)***
- **Cladding creepdown/collapse during transient**
  - **Only at relatively high temp/time** (e.g. in Oskarshamn 2 dryout event 1987-88)
  - ⇨ **Cladding creeps down onto pellets under external system pressure**
- **α-β phase transition during transient**
  - **Including dissolution of secondary phase particles in Zr-alloy**
  - ⇨ **Corrosion and H pickup behaviour (in continued operation), reduced ductility**
- **Cladding corrosion and embrittlement during transient**
  - **Only at very high temperature & sufficient time**
  - ⇨ **Excessive high temperature cladding oxidation (ECR) and hydriding**
  - ⇨ **Embrittlement due to oxygen in β-phase and/or α-phase**
- **Geometry changes**
  - **Caused by e.g. temperature gradients, creep, massive hydriding etc.**
  - ⇨ **Rod bow distortion and/or length changes**
- **Impact on fuel pellets**
  - ⇨ **Fission gas release during transient** (usually insignificant due to low burnup)
  - ⇨ **Fuel centerline melting**
  - **Only at very high pellet temperatures**

Most limiting (occurs first)

Important/limiting for continued operation

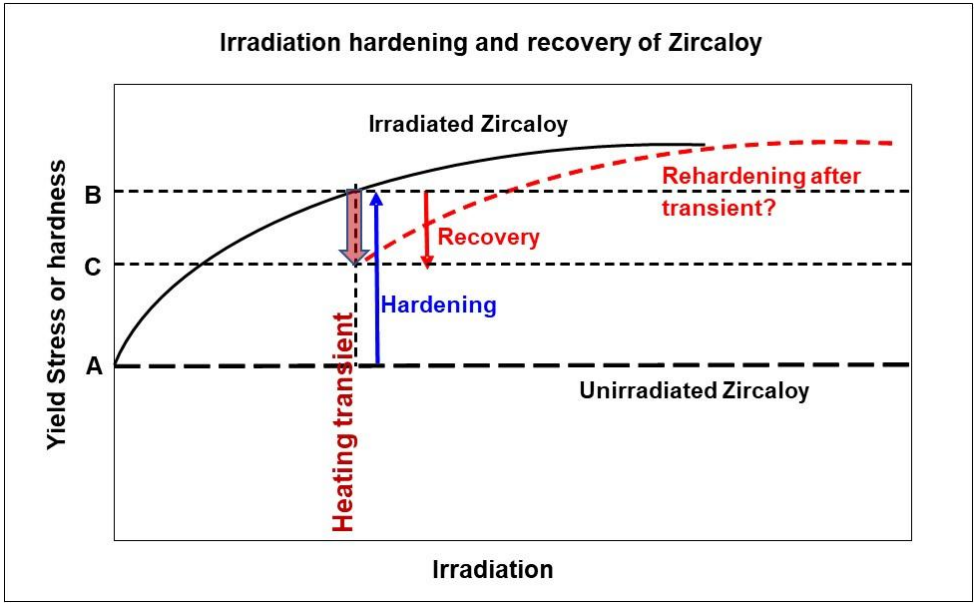
Important/limiting for cladding failure

Severity of impact on continued fuel operation

© Forsmarks Kraftgrupp AB

Studsvik VATTENFALL

Phenomena affecting cladding – recovery of hardening



Recovery of hardening is the phenomenon that happens at the lowest time-at-Temperature

⇨ Potentially most limiting for continued operation

Why does recovery of hardening matter?

- **Reduced in-pile creep strength**
  - Recovery of irradiation hardening
    - ⇨ Faster creep-down during further operation
    - ⇨ Can impact e.g. PCI margins
    - ⇨ Small impact on pre-calculated ΔLHR to 1% strain
- **Reduced cladding yield stress**
  - Recovery of irradiation hardening
    - ⇨ Reduction in yield stress of cladding
    - ⇨ Can invalidate original fuel rod design analysis with respect to cladding stresses during normal operation and AOOs
- **Reduced thermal creep strength**
  - Recovery of irradiation hardening
    - ⇨ Faster creep-out during backend drying
    - ⇨ Can impact allowable max temperature in cask (or allowable decay heat)

© Forsmarks Kraftgrupp AB

Studsvik VATTENFALL

Comparing different times and temperatures (4)

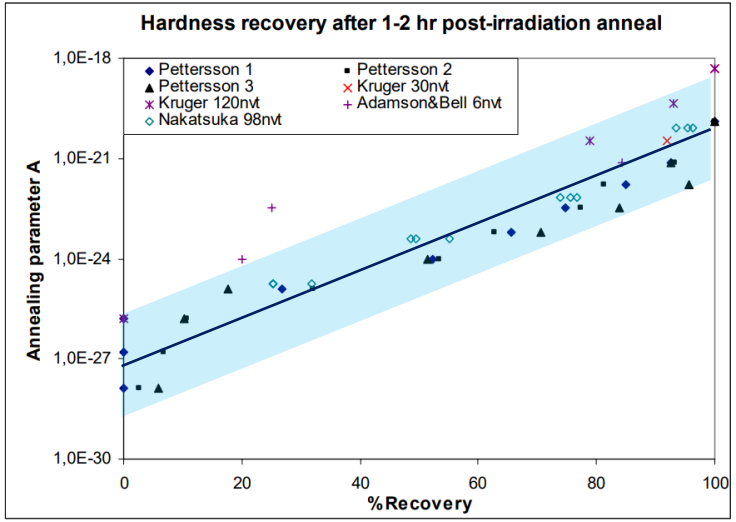
- **Example: Recovery (annealing) of irradiation hardening**
  - Nakatsuka proposed that recovery of irradiation hardening could be described by a function of Annealing Parameter A
    ⇨ This could then cover different time scales and temperatures
  - Tested by fitting such a function to recovery data from long-term tests
    ⇨ Then check how well it predicts short duration (transient) recovery

Ref: M. Nakatsuka et al., "Annealing study on neutron irradiation effects in resonance frequencies of Zircaloy plates by EMAR method". J. Nucl. Sci. and Techn. 44, 10, p 1285 (2007)

$$\%\ Recovery = c_1 \cdot \ln\left(\frac{A}{c_2}\right)$$

$$where\ A = \int_0^t e^{-Q/RT(t)}dt$$

- **How did it go?**
  - Recovery data (for RXA Zircaloy-2) after 1-2 hour anneal
  - Both published and unpublished data, different sources
    ⇨ Plotted Recovery vs log (A-parameter)
    ⇨ Found a reasonable linear fit



© Forsmarks Kraftgrupp AB

Studsvik VATTENFALL

Comparing different times and temperatures (5)

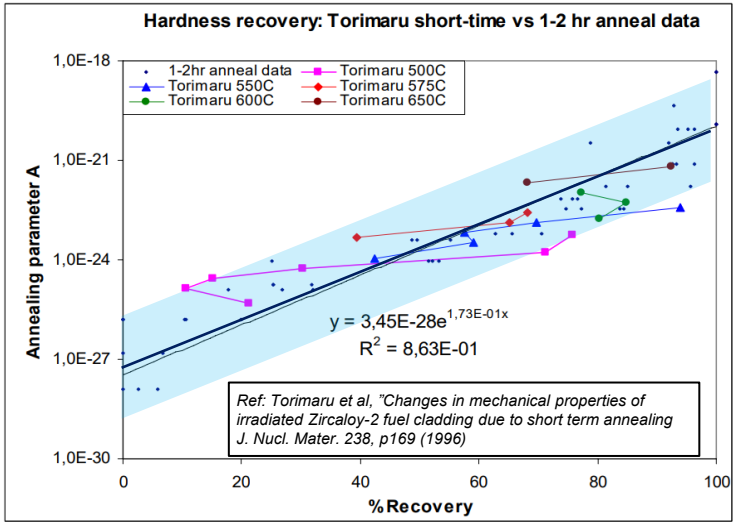
- **Example: Recovery (annealing) of irradiation hardening**
  - Nakatsuka proposed that recovery of irradiation hardening could be described by a function of Annealing Parameter A
    ⇨ This could then cover different time scales and temperatures
  - Tested by fitting such a function to recovery data from long-term tests
    ⇨ Then check how well it predicts short duration (transient) recovery

Ref: M. Nakatsuka et al., "Annealing study on neutron irradiation effects in resonance frequencies of Zircaloy plates by EMAR method". J. Nucl. Sci. and Techn. 44, 10, p 1285 (2007)

$$\%\ Recovery = c_1 \cdot \ln\left(\frac{A}{c_2}\right)$$

$$where\ A = \int_0^t e^{-Q/RT(t)} dt$$

- **How did it go?**
  - Recovery data (for RXA Zircaloy-2) after 1-2 hour anneal
  - Both published and unpublished data, different sources
    ⇨ Plotted Recovery vs log (A-parameter)
    ⇨ Found a reasonable linear fit
  - Then plotted published short-term test results (Torimaru)
    ⇨ Data fitted reasonably to the correlation derived for long duration (1-2 hr) tests
    ⇨ Supported the equivalence of short and long duration annealing on recovery for RXA Zircaloy-2

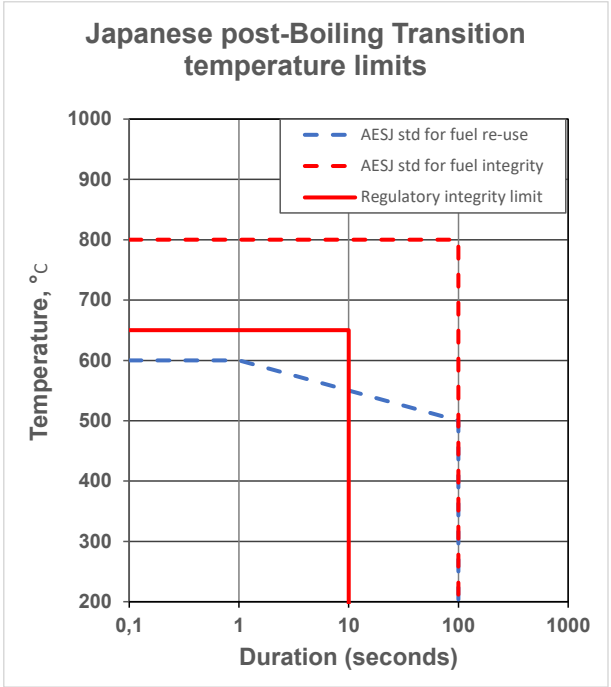


© Forsmarks Kraftgrupp AB

Studsvik VATTENFALL

Some existing fuel failure criteria - Japan (4)

- **Industry R&D basis for post-CHF criteria**
  - Extensive experimental basis established including
    - ⇨ Validation of methodology to conservatively predict Tclad (including validation of prediction of rewetting)
    - ⇨ Experimental determination of cladding creepdown vs t@T
    - ⇨ Experimental determination of recovery of irrad. hardening vs t@T
    - ⇨ Halden IFA-613 tests and older in-pile tests
- **Criteria for cladding integrity**
  - Atomic Energy Society of Japan (AESJ) standard
    - ⇨ Requires use of stipulated methodology to predict t@T
    - ⇨ Limit on Time vs Temperature (t@T)
  - Authority NSC approved limit for cladding integrity
    - ⇨ Significantly lower than AESJ standard
  - Proposed methodology for implementation
    - ⇨ Fuel vendor would perform TaT analysis following an AOO
- **AESJ standard for for fuel re-use**
  - AESJ proposed standard for further operation following CHF
    - ⇨ Would result in < 10 µm creepdown and limited recovery annealing
  - Not yet accepted by authority or implemented *(to my knowledge)*



Ref: T. Hara et al, "Current status of the post boiling transition research in Japan". J. Nucl. Sci. Techn. 40, 10, p 852, October 2003

Ref: H. Ono et al, "Proposal for a Fuel Integrity Evaluation System under a BWR Post-BT Condition". TopFuel 2006, Salamanca Spain, October 2003

© Forsmarks Kraftgrupp AB

Studsvik VATTENFALL