Reaktortanken i Halden

Kjell Svanholm, dr. techn. 18.07.2011

Innledning

En av de mest enestående produkter som har kommet ut fra Kværner Brugs verkstedlokaler i Lodalen er vel tanken til Haldenreaktoren. Det er i alle fall den eneste reaktortanken Kværner Brug har bygget.

Man kan også beskrive den organisasjonen som oppstod rundt denne tanken som enestående. Det ble utviklet et internasjonalt forskningsinstitutt som i dag omfatter nær 20 nasjoner, det ble utviklet forskningsverktøy uten paralleller i verden, her utføres det målinger på reaktorbrensel som ikke kan utføres andre steder.

Utformingen av anlegget har vist seg meget praktisk. Dette har gjort det mulig å utføre eksperimenter av svært forskjellig karakter. I denne ene og samme reaktoren har man gjort målinger på kjølekanalers termohydraulikk, reaktorbrensels temperaturforhold og mekaniske dimensjonsforandringer, frigjøring av gasser fra brenselet, materialforskning på reaktorbyggematerialer som korrosjonsegenskaper og sprekkvekst under spenning under stråling med kontrollert vannkjemi, for å nevne noe.

Denne mangfoldigheten har også gitt ansatte ved Haldenprosjektetet en kompetansebredde, nær sagt, uten sidestykke. Målinger av en parametersammenheng blir belyst av alle de andre fenomenene som er typiske for nukleære reaktorer.

Det er derfor all grunn til nå å nedskrive historien bak denne reaktortanken på en måte som kan ha noe å gi i historisk perspektiv på en allmenn måte.

Det foreligger en rapport (1) om byggingen og operasjonshistorien, skrevet i 1970, da det forelå 12 års vellykket drift av anlegget. Den gir en god rapport om byggingen, med omfattende opplysninger om materialenes sammensetning, og om valg som måtte gjøres.

I denne rapporten fastslås det også at på den tiden var Haldenreaktoren den eldste nukleært fyrte dampproduserende trykkbeholder i drift. Dette gjelder da også, så meget mere, i dag.

1. Bygging av reaktortanken

Tanken ble bygget i årene 1957 – 1958 ved Kværner Brugs verksted i Lodalen

1.1. De enkelte delene

Figur nr. 1. viser tanken i lengdesnitt, med et bilde av lokket med sine mange gjennomføringer inntegnet.

Tanken består av følgende deler:

1. En kurvet endebunn.

2. En sylindrisk del, som ble satt sammen av fire deler, valset og sveiset sammen til en sylinder før de ble sveiset sammen med endebunnen.

Disse fem delene er laget av 60 mm tykt kjelestål med et påvalset (roll-bonded) lag av 5 mm austenittisk rustfritt stål.

Emnet til endebunnen ble levert av Lukens Steel Company i USA og presset til endelig form av Avesta Jernverks Aktiebolag i Sverige.

De fire sylindriske delene ble levert av Degerfors Järnverks Aktiebolag i Sverige

3. Innløpsstuss

Endebunnen er forsynt med en innløpsstuss sentralt. Den er levert av Avesta Jernverks Aktiebolag i Sverige.

4. Flensringen

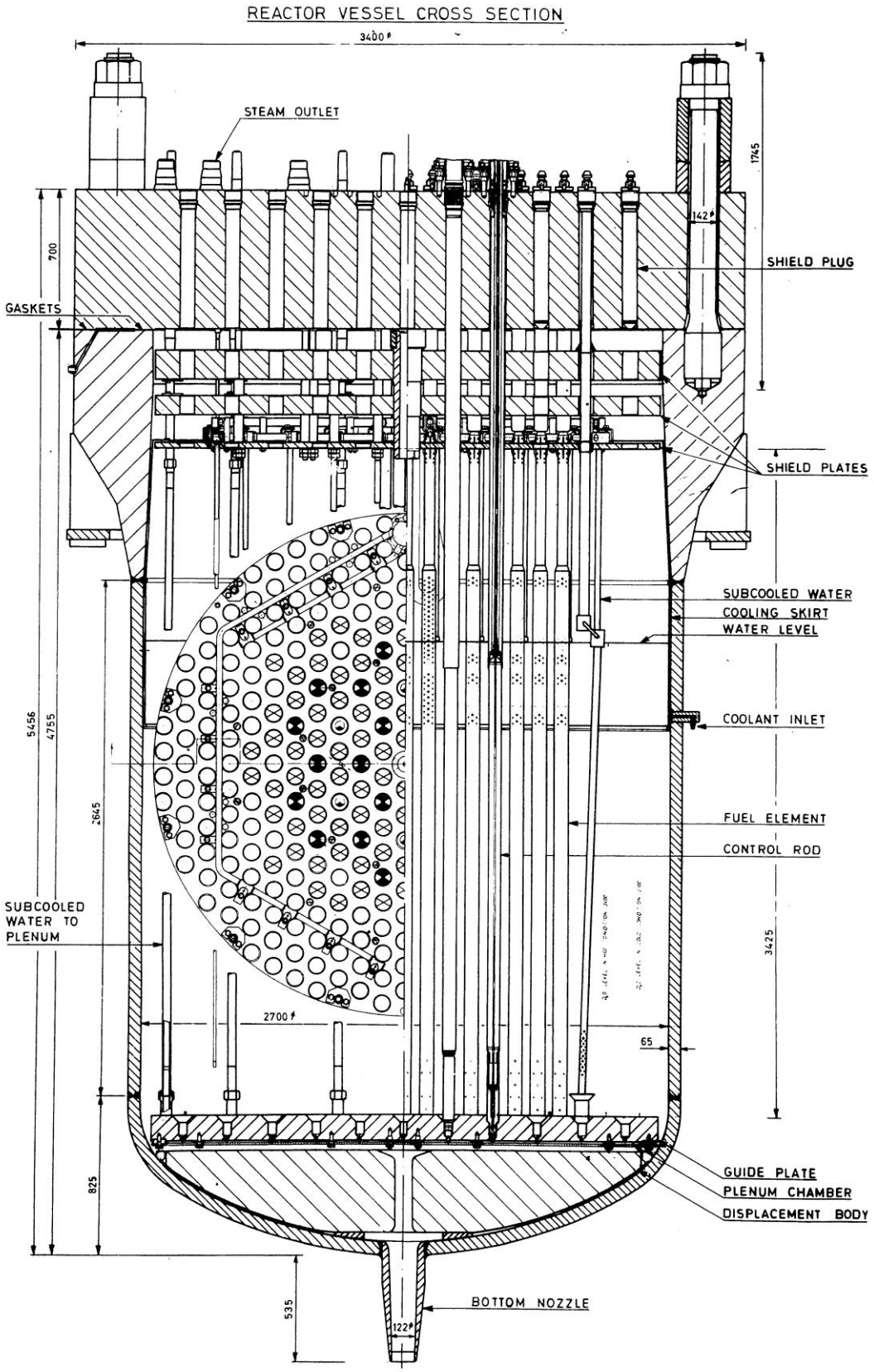
Emnet til flensringen ble smidd av Betlehem Steel Company, USA. Den ble pålagt et lag påsveist rustfritt stål på innsiden av Kværner Brug.

5. Lokket

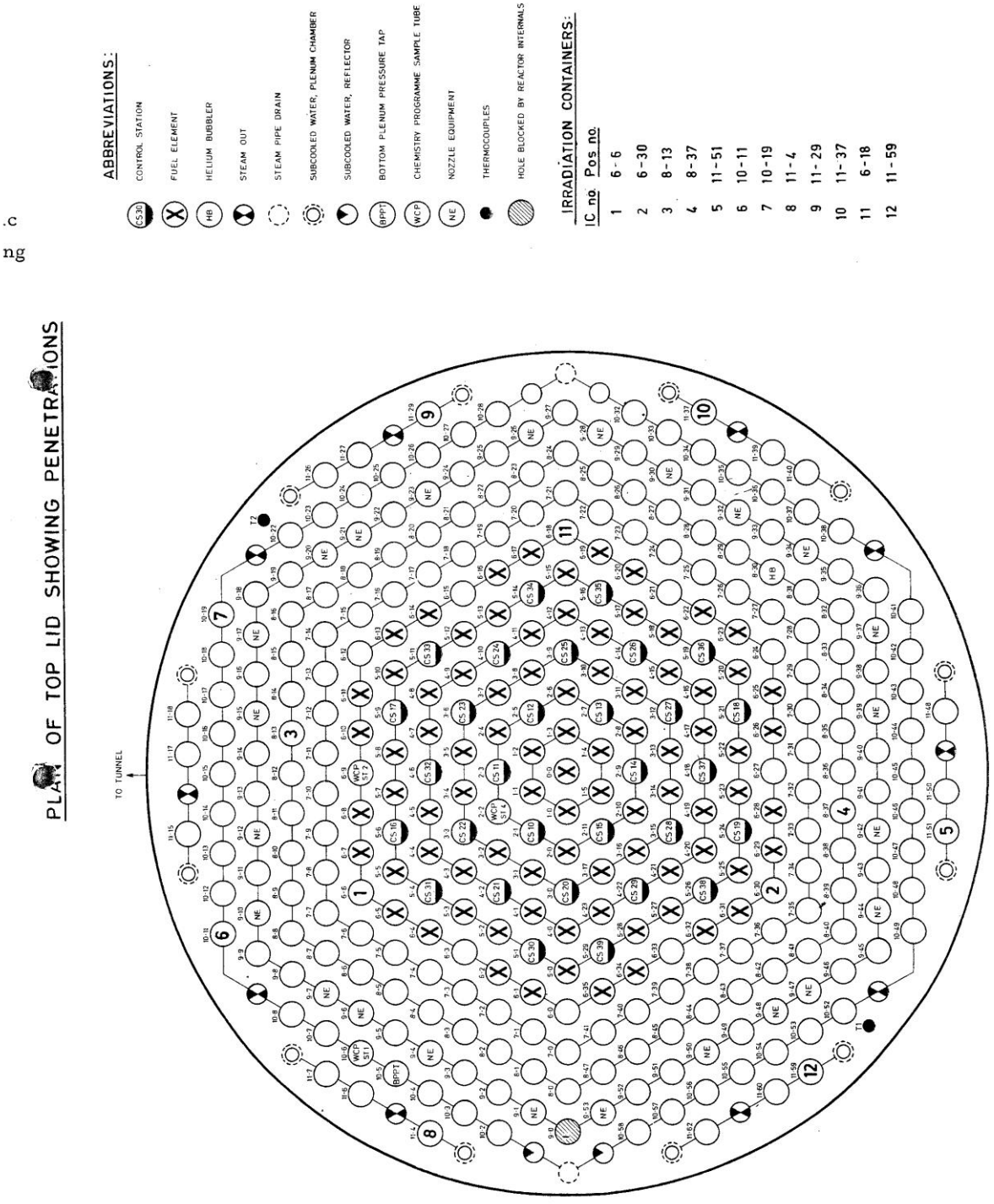
Emnet til lokket ble smidd av Betlehem Steel Company. Innsiden ble pålagt et lag nikkel, tykkelse 25 mikron, ved en kjemisk (electroless) prosess.

Et meget uvanlig trekk ved dette lokket er det store antall hull som måtte bores, tilsamen 366 stykker for brenselelementer, kontrollstaver, damputløp, vanntilførsel og annet. Se figur nr. 2.

Figur nr. 1. Haldenreaktoren



Figur nr. 2. Gjennomføringer i lokket



Flatt lokk ble valgt for at alle posisjoner for brenselselementer skulle få den samme lengden, slik at brenselselementene skulle kunne settes i den (radielle) posisjonen som ga den rette eksperimentbetingelsen, og skulle kunne flyttes etter behov.

6. Bolter, mutre og underlagsskiver).

Emner for bolter, mutre og underlagselementer ble levert av Vereinigte Österreichische Eisen- und Stahlwerke, AG, og ble ferdigstilt av Kværner Brug.

7. Pakninger.

Under lokket ligger det to pakningsringer, de ble fremstilt av aluminium som ble laget av Institutt for Atomenergi (senere gitt navnet Institutt for Energiteknikk). Begge pakningene ble sveiset sammen av elleve stykker hver.

1.2. Sammenbyggingen

Tanken ble bygget ved Kværner Brug av de delene som er beskrevet ovenfor.

De fire delene av det sylindriske partiet ble sveiset sammen i vertikal posisjon. Innsiden av X-sømmene ble først sveiset med to til tre lag. Under sveisingen av sømmene fra utsiden oppdaget man at sveisene ble bøyd innover, opp til 5 mm av radien. Sveisingen fra innsiden kunne ikke gjenopprette den riktige formen, og sveisene ble tvunget til riktig form ved hydrauliske jekker, og holdt i riktig posisjon ved stålbjelker. Disse ble ikke fjernet før etter varmebehandlingen.

Etter sveisingen ble den sylindriske delen av tanken varmet opp til 530 grader og holdt på den temperaturen i 3 timer, før den langsomt ble avkjølt til romtemperatur.

Flensringen ble deretter sentrert på det sylindriske skallet og delene ble sveiset sammen, med kontinuerlig kontroll av formen. Deretter ble det gjennomført en ny varmebehandling med oppvarming til 520 grader gjennom 20 timer.

Tilslutt ble endebunnen med innløpsstussen sveiset til den sylindriske delen, og ny oppvarming ble utført, denne gangen med oppvarming av den nedre delen til 520 grader, 475 grader for flenspartiet, gjennom elleve timer.

Etter at reaktortanken var ferdig ble den utsatt for et omfattende testprogram ved Kværner Brug:

1. Kald trykkprøving for Dampkjelmyndighetene.
2. Strekklappmålinger for kontroll av spenningsberegningene.
3. Kontroll av deformasjoner i lokk og flens sammen med målinger av relativ bevegelse mellom dem.

4. Valg av materiale for pakningen mellom lokk og flens.
5. Tankens oppførsel under hurtige temperaturforandringer
6. Bestemmelse av maksimal avkjølingshastighet.

2. Operasjonshistorien i de første årene.

Ut fra resultatene fra testprogrammet ble det den maksimalt tillatte oppvarmings- og avkjølingshastigheten fastlagt til 10 grader C pr. time. Noen få ganger ble det tillatt større hastighet, opp til 36 grader pr. time, på grunn av helt spesielle forhold.

I den første operasjonsperioden fikk man øyeblikkelige temperaturfall på 22 grader ved nødstopp (Scram). Bedring av kontrollsystemene reduserte dette fallet til 15 grader.

3. Erfaringer med lokkpakningene.

Figur nr. 3 viser hovedflensområdet, med bolter og pakninger. Pakningene ble laget med en opprinnelig tykkelse på 1,65 mm. Ved den (termiske) strammingen av boltene ble tykkelsen redusert til 1,2 mm. Da den andre operasjonsperioden startet i 1962 var tykkelsen redusert til 1,0 mm.

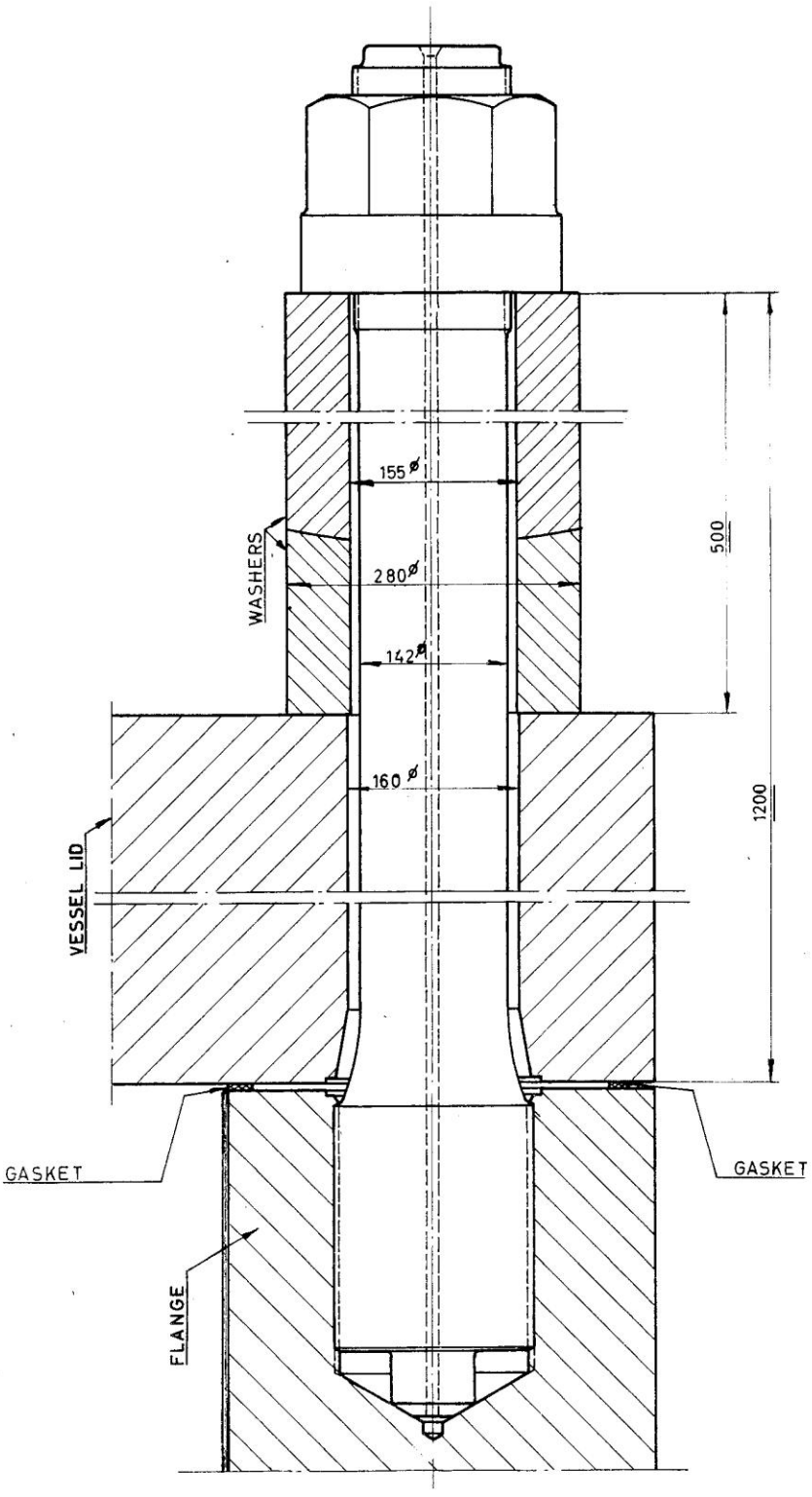
Frem til 1970 ble det ikke observert noen lekkasje fra den indre pakningen. Man skal være klar over ar rommet mellom de to pakningene er drenert, slik at eventuelt utlekkende tungtvann kan samles opp og gjenvinnes. Dette er vist i Figur nr. 1.

Pakningstykkelsen er blitt målt jevnlig gjennom tidene, og de siste målingene av pakningstykkelsen viser at tykkelsen nå er redusert med ca. 0,9 mm til ca. 0,3 mm. Forspenningen i boltene er derfor redusert og det ble i 2008 gjennomført en ettertrekning av boltene for å få tilfredsstillende pakningstrykk under alle driftsbetingelser ved opp- og nedkjøring.

4. Erfaring med tetningene i topplokket.

Det er til sammen 335 tetninger for brenselselementer, kontrollstaver og eksperimentalutstyr i lokket. Diameteren i disse tetningene er 80 mm, og den samlede lengden av tetningene er ca 85 meter. Figurene nr. 4 og nr. 5 viser tetningene for henholdsvis brenselelementer og kontrollstaver. Prinsippet er stålkonus presset mot konisk stålsete.

Figur nr. 3. Flensforbindelse med bolter og pakninger

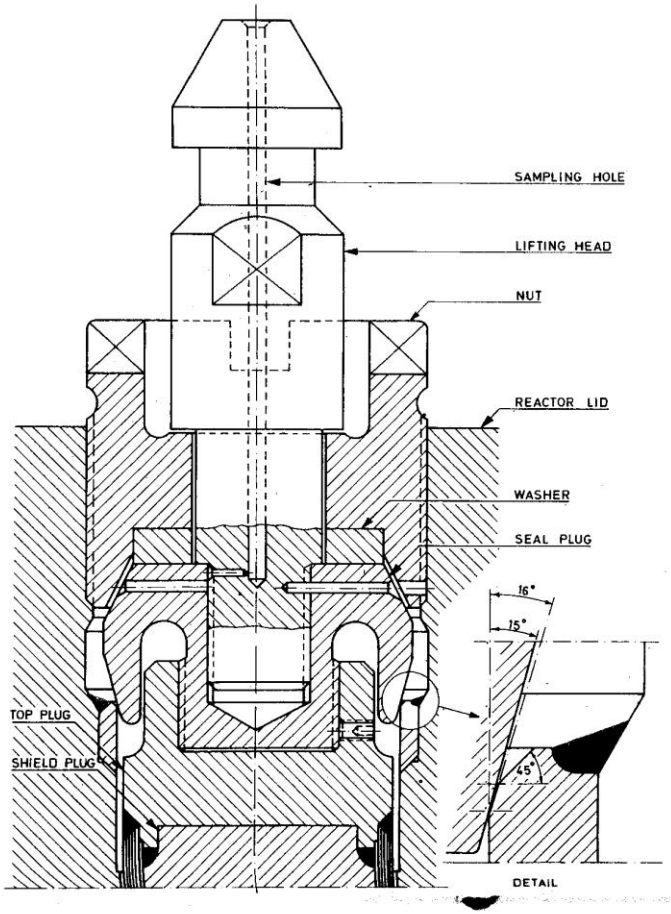


REACTOR LID SEALS

Figur nr. 4

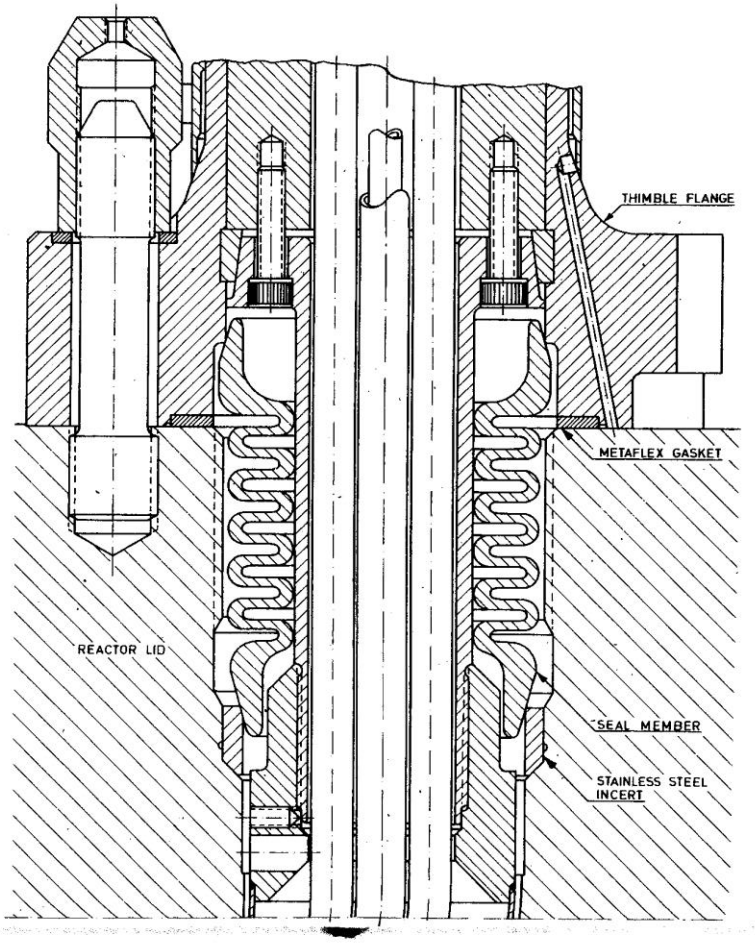
FIG. 7

FUEL ELEMENT POSITION SEAL



Figur nr. 5.

CONTROL STATION SEAL



Allerede i året 1970 hadde man erfaring fra 600 åpninger og lukkinger av disse tetningene. I årene senere har antallet vokst med minst 100 årlig. Tetningsflatene blir hver gang nøye inspisert, og i noen tilfeller må tetningsflaten overhales.

Disse tetningene har fungert meget tilfredsstillende, og de har bare forårsaket ubetydelig tap av tungtvann.

5. Strålingsskader på tankmaterialet.

Det er en kjent sak at stålmaterialer kan bli sprøtt av nøytronbestråling (hurtige nøytroner). Temperaturnivået for omslag fra seigt til sprøtt materiale øker.

Av den grunn ble det produsert et stort antall (540) prøvestykker for Charpy testing av tankmaterialet og installert i reaktortanken, de fleste nær tankveggen.

Den initielle omslagstemperaturen ble slik fastlagt at man foreskrev en minimumstemperatur for tanken på 45 grader C. Man har gjennom disse prøvene sett en viss økning i omslagstemperaturen, som har ledet til at i dag er den tillatte minimumstemperaturen 70 grader C.

Charpy-testene ble meget populære, og antall originale prøvestykker ble snart for lite for ønskene om flere tester. Det ble utviklet en metodikk for å ta de to stykkene etter en test og forlenge ved å sveise på dem forlengelser. Dette ble utført ved friksjonssveis, slik at oppvarmingen av prøvestykket ble begrenset til et meget lokalt område.

Prosessen kunne gjentas, og tilslutt kom man opp i 8 tester fra hvert originale prøvestykke.

Senere har interessen for Charpy-tester avtatt. Dette kan skyldes erkjennelsen av at tanken aldri kommer under omslagstemperaturen, og den er alltid trykkavlastet når den kommer ned til 100 grader C. I dag er det mer interesse for strekkfasthetsprøver.

Det foregår kontinuerlig vurdering av tankens mulige levetid, og tester viser at rektoren, materialteknisk sett, kan driftes til etter år 2100.

6. Vurderinger i konstruksjonsfasen.

Mye av tenkningen og vurderingene i konstruksjonsfasen er nå tapt historie.

Konstruktørene hadde det problemet at ingen egentlig visste hvordan en slik reaktor skulle være. Men kanskje det var en fordel, man kunne være helt fri fra forutfattede meninger. ”Den som går ut i ukjent terreng trenger ikke kart.” (denne bemerkningen tillegges dronning Kristina av Sverige).

Det er nokså sikkert at Gunnar Randers' høyre hånd, Odd Dahl, var den som insisterte på et flatt lokk. Når det fra kyndig hold ble påpekt at enhver trykkbeholder skal ha en kurvet endebunn, svarte han at det er en kurvet endebunn inne i stålblokken, vi lar bare være å fjerne en masse stål. Det har også vist seg å være av avgjørende verdi at forsøkselementer kan flyttes til forskjellige radielle posisjoner for å tilpasse effekten etter behov.

Som maksimal temperatur for reaktoren valgte man 230 grader C. Man var klar over at dette var på den lave siden. Men det ble antatt at det allikevel vil gi forhold representativt for større kraftreaktorer, samtidig som man unngikk de høye trykk med større krav om veggtykkelse i tank og rørsystem.

7. Det eksperimentelle arbeidet

I Figur nr. 1 finner man avmerket "Fuel element" (Standard brenselselementer). Dette består av et hylserør, med en ytre diameter på ca 75 mm og en veggtykkelse ca 1 mm. Inne i røret er det plassert zircaloyrør med ytre diameter ca 12 mm, også her er veggtykkelsen ca 1 mm. Rørene er fylt med brensel, i form av sylindriske pellets av uranoxid. Antall brenselspinner er 8, og de plasseres sirkulært inne i hylserøret. Lengden av brenselsrørene er nå normalt 800 mm, men har tidligere vært opptil 1200 mm. Med en spesifikk varmeutvikling av 300 - 400 W/cm blir da effekten i en slik kanal 200 - 250 kW.

Antallet standard brenselselementer i kjernen er i området 60 – 80.

I den første designfasen planla man å sette brenselstavene ned i reaktoren uten hylserøret. Det oppstod fort betenkeligheter om et uryddig strømningsbilde i vann-dampblandingen, med konsekvenser for varmeovergangsforhold, og det ble besluttet å gi elementgruppene hylserør. I figur nr. 1 kan man også se hullene i hylserøret, nederst for innløp av vann, øverst for utløp av vann-dampblandingen.

Da hylserørene ble innført måtte man øke diameteren for hullene i lokket, hvilket medførte at lokkets tykkelse måtte økes.

Kjølingen foregår vanligvis som koking ved naturlig sirkulasjon. Vannets innløpshasighet går ved økende effekt fra null og til et maksimum på ca 0,7 m/s ved forholdsvis lav effekt, og avtar ved videre økende effekt. Ved høy effekt kan innløpshastigheten begynne å svinge, med en periode av ca 1 sek.

I 1966 ble det gjennomført eksperimenter som klarla hvilken strupning av innløpet som var nødvendig for å oppnå stabil innløpshastighet. Det ble også klarlagt hvilke innløpshastigheter som var nødvendige for å unngå tørrkoking på brenselsrørene.

Slike forsøk var nå muliggjort ved en utvikling av instrumenter for målinger inne i reaktoren. Dette var en bevisst politikk fra Haldenprosjektets side allerede fra 1962,

og de termohydrauliske eksperimentene som er nevnt ovenfor demonstrerte hvor langt denne utviklingen var kommet allerede i 1966. Siden har dette bare fortsatt, og det er ennå ingen ting som tyder på at andre organisasjoner vil prøve å utvikle noe tilsvarende. Utviklingen av et finmekanisk verksted med det håndverksmessige nivå som det her i Halden vil under alle omstendigheter være meget omfattende og krevende prosess. Den vil for øvrig være bortkastet hvis man ikke samtidig utvikler en elektroteknisk avdeling som er villig til, i likhet med det mekaniske verkstedet, å gi seg i kast med oppgaver som på forhånd ser ut til å være umulige.

De avanserte eksperimentene utføres i spesielle instrumenterte brensels-eksperimentenheter, (IFA, Instrumented Fuel Assembly). Antallet av disse er i området 15 – 30. De bidrar med 2,5 – 5 MW av en total produksjon på 18 MW.

Den nedre enden av disse elementene settes ned i reaktorens bunnplate, og gies forbindelse til plenumkammeret. Elementet er utstyrt med en ventil som kan stilles om til tilførsel av underkjølt vann fra plenumkammeret, og man kan da måle kanalens effekt som produkt av vannstrøm og temperaturøkning fra inn- til utløp. (2)

Dette er den ubetingede viktigste måling som foretas. Sammen med det forhold at en tungtvannsreaktor har en meget regulær effektfordeling, kan den lokale effekten i en brenselstav bestemmes med god nøyaktighet. Med fire aksialt fordelte nøytronfluxmålere kan den beskrives ved en fireleddet sinusserie. Den lokale effekten kan således bestemmes på et hvilket som helst sted på en brenselsstav med et standardavvik på 3%. Siden denne størrelsen, sammen med den tilnærmet proporsjonale temperaturøkningen i brenslet, bestemmer omtrent alt som foregår i brenslet, så er dette betingelsen for at målingene skal ha noen som helst teknisk-vitenskapelig verdi. Også på dette punktet er Haldenreaktoren enestående.

Figur nr. 4 viser gjennomføringen av et brenselselement i topplokket. Denne figuren er representativ for standard brenselselement uten instrumentering. For en instrumentert utgave føres det elektriske ledere for instrumentsignaler og for strømforsyning til utstyr, rør for gasstrykk og for trykkvann gjennom denne tetningen. Det maksimale antall signalkabler kan være nær 80.

<u>En rask liste over størrelser som måles:</u>

Vannhastigheter, med turbinmålere.

Vanntemperaturer, med termoelementer (Cr/Al).

Forlengelse av brenselstaver.

Forlengelse av uranbrenselet.

Diameterforandringer av brenselstaver.

Temperatur i brenselet med termoelementer (W/W-Re)

Gasstrykk i brenselstaver.

Klaring mellom brensel og rør.

Sprekkvekst i stål prøvestykker under belastning, med variasjon av vannkjemien og belastning.

Det var først på 1980-tallet det ble uttrykt ønske om målinger på reaktorbrensel ved trykk høyere enn det Haldenreaktoren hadde. Det vanlige trykket i en kokereaktor er 75 bar, og i en trykkvannsreaktor er det 150 bar. Ønskene ble innfridd ved at man bygget metallflasker tilpasset det aktuelle trykket og plasserte brensel og instrumenter inne i røret. De var også forsynt med sitt eget ytre sirkulasjonssystem. Flaskene fikk også et ytre hylserør, med noen millimeter større radius enn trykkflasken. Med stengt utløp øverst ble mellomrommet fylt med overhetet damp som sørget for god varmeisolasjon, og det ble enkelt å oppnå høyere temperatur inne i trykkflasken. En motstrøms varmeveksler i den øverste delen av flasken bidro også til dette.

Da man hadde lært seg å bygge og drive disse høyttrykksystemene åpnet dette også for nye forsøksfelter, som for eksempel korrosjonstester for reaktormateriale ved strålingsbetingelser og med kontrollert vannkjemi.

Referanseliste.

(1) HPR-119
”Fabrication and Operation History of the HBWR Pressure Vessel
Steinar Aas 1970

(2) HPR-559
“In-Pile Power Calibration Methodology at the HBWR” Kjell Svanholm 1998

HPR: Halden Project Report

For allmenn lesning:

“Lysår” Gunnar Randers

“Strålende forskning” Olav Njølstad, 1999. Tano Aschehoug