Utvecklingen av svenska tungvatten-reaktorer 1950–1970

Av Harry Brynielsson

Även om tungvattenreaktorn inte blev den typ som valdes för det kommersiella svenska kärnkraftprogrammet utgjorde erfarenheterna från utvecklingen av denna reaktortyp en god grund även för introduktionen av svenska lättvattenreaktorer. Det gäller särskilt rörande reaktormaterial inklusive bränsleelement, säkerhetsfrågor, värmeteknik, projektarbete och industrierfarenheter. En kort summering av dessa arbeten kan därför ha ett industrihistoriskt intresse.

Varför tungvattenlinjen?

Den svenska energipolitiken under 1950-talet hade två, delvis sammanfallande huvudsyften. Det ena var att begränsa den alltmer ökande importen av bränsle, särskilt olja, som utgjorde en handelspolitisk belastning. Det andra var att skapa större trygghet mot tillfälliga avbrott i bränsleimporten. Man hade krigsårens erfarenheter i gott minne. Motståndet mot en fortsatt exploatering av vår stora inhemska energiresurs, vattenkraften, blev också alltmer kännbart.

Mot bakgrunden av våra – visserligen låghaltiga men mycket stora – egna urantillgångar betraktades kärnenergin, eller som man då sade atomkraften som ett för Sverige särskilt intressant alternativ. 1951 års bränsleutredning kallade sitt 1956 publicerade betänkande "Bränsleförsörjningen i Atomåldern".[1] I utredningens slutsatser sägs bl a "Det torde knappast finnas något annat industriland, som av behov och tillgångar så entydigt som Sverige hänvisas till att för en tryggad energiförsörjning snabbt utveckla atomvärme och atomkraft". Man var medveten om att det svenska uranet måste bli dyrare än utländskt, som framställts ur högvärdiga mineral. Kravet på självförsörjning bedömdes dock som mycket viktigt. "Fördelen av en lägre kostnad för importerat uran än för inhemskt lär aldrig kunna bli så stort att den uppväger beredskapsvärdet av en av världsmarknadsläget oberoende, kontinuerlig uranproduktion."

Självförsörjningsaspekten var det kanske viktigaste incitamentet för den kraftiga svenska satsningen på kärnkraftutveckling. Det enda atombränsle som bedömdes vara av intresse för vårt land var då naturligt uran. Studier visade att vi inte kunde ha resurser att uppföra sådana enorma anrikningsanläggningar som stormakterna, främst USA, hade i gång särskilt som det tekniska underlaget ej var tillgängligt. Vid drift av reaktorer med naturligt uran bildas vidare plutonium, som senare skulle kunna användas för låganrikning av det naturliga uranet och i framtiden för breederreaktorer med mångfaldigt högre utnyttjande av atombränslet.

Tänkbara reaktortyper

Med naturligt uran som bränsle fanns det två tänkbara reaktortyper, grafitreaktorer och tungvattenreaktorer. Grafitreaktorer, som bl a byggdes i England och Frankrike krävde för varje enhet betydande mängder, flera tiotal ton, uran och högren grafit, medan tungvattenreaktorer kunde göras betydligt mindre.

Hade man tillgång till anrikat uran med t ex 2–3 % uran 235 mot 0,7 % i natururan, kunde man som moderator och kylmedel använda vanligt "lätt" vatten. Sådana reaktorer utvecklades främst i USA. Man brukade säga att det behövdes antingen anrikat uran och naturligt (lätt) vatten eller naturligt uran och anrikat (tungt) vatten.

Valet av tungvattenlinjen

Medan anrikat uran låg utanför våra möjligheter att framställa kunde tungt vatten erhållas med metoder inom räckhåll för våra tekniska resurser. Bakom valet av tungvattenlinjen låg således klara tekniska överväganden. Om beslutet att starta med tungvattenlinjen rådde också full teknisk och politisk enighet. Många andra länder satsade också på tungvattenreaktorer därför att reaktortypen ansågs ha goda utvecklingsmöjligheter och man kunde bli oberoende av import av anrikat atombränsle. Detta betraktades som ett strategiskt material som kunde beläggas med handelsrestriktioner och villkor.

Ledande i utvecklingen av tungvattenreaktorer var Kanada, som helt baserar sin utbyggnad på denna reaktortyp. Den kanadensiska kärnkraftutbyggnaden, som idag är större än den svenska, har varit framgångsrik och man har även exporterat några tungvattenreaktorer. Andra länder, som under 1950-talet planerade tungvattenreaktorer var England, Frankrike, Italien, Norge, Schweiz, Japan och Indien. I samband med att anrikat bränsle blivit tillgängligt på kommersiella villkor har de flesta av dessa projekt avvecklats.

Det har spekulerats om det svenska tungvattenprogrammets koppling till frågan om svenska atomvapen. Fram till 1966 gällde som officiell svensk policy den s k handlingsfrihetslinjen. Statsmakterna skulle, om så bedömdes nödvändigt, ha möjlighet att senare fatta beslut om svensk kärnvapentillverkning. För att en sådan policy skulle ha någon trovärdighet internationellt krävdes att vi hade egna

kunskaper om uranproduktion, reaktorkonstruktion och upparbetning av använt kärnbränsle. Det civila programmet gav sådana erfarenheter och tillfredsställde därmed även dessa politiska krav. Det var dock helt inriktat på atomvärme och atomkraft för civilt bruk.

Ansvarigt för detta utvecklingsprogram var det halvstatliga AB Atomenergi, (Atombolaget) där de löpande kostnaderna täcktes av årliga statsanslag.

Forsknings- och utvecklingsarbete

Det tekniska underlaget för reaktorkonstruktion var vid början på 1950-talet både tunt och glest. Av militära skäl hemlighöll stormakterna många nyckeldata. Det var först i samband med Genevekonferensen 1955 som "deklassifieringen" kom igång på allvar.

För ett land som Sverige fanns det två samverkande sätt att få fram den information som krävdes: eget FoU-arbete och internationellt samarbete. Erfarenheter från ett eget utvecklingsarbete krävdes för att man skulle kunna förstå och utnyttja andras resultat och det kunde vidare utnyttjas i det internationella samarbetet.

Det var främst inom fyra områden som kunskapsunderlaget behövde breddas:

reaktorfysik
reaktormaterial inklusive bränsle
reglerings och säkerhetsteknik
värmeöverföring.

På alla dessa områden krävdes en stor satsning för att man skulle få fram ett underlag, som möjliggjorde projektering och uppförande av reaktorer för produktion av värme och el.

Reaktorfysik

Reaktorfysiken är den styrande faktorn vid alla reaktorkonstruktioner och berör inte bara bränsle och moderator utan även konstruktionsmaterial, reglerutrustning, temperatur- och tryckförhållanden m m. Genom att bygga en experimentreaktor R1 fick man de första erfarenheterna av uppförande och drift och kunde göra mätningar av betydelse för kommande projekt.

Med dagens måttstock var R1 en enkel reaktor: den arbetade med låg effekt, vid låg temperatur utan tryck. Vid den tidpunkten var R1-bygget ett mycket kvalificerat projekt ur både teoretisk och praktisk synpunkt. Det lyckade resultatet och den intressanta forskning som bedrevs vid reaktorn gav internationell respekt och blev av stor betydelse för samarbetet med andra länder.

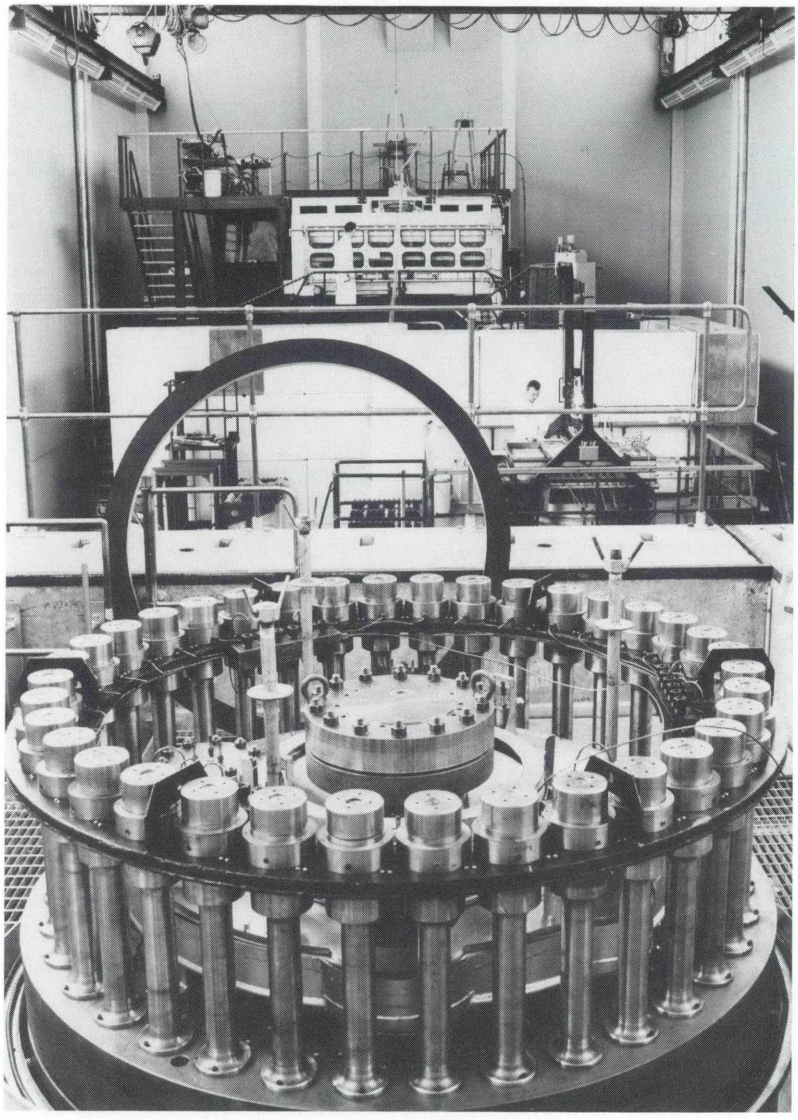
R1 Reaktorn innehöll ca 3 ton uranmetall kapslat i aluminiumrör och ca 5 ton tungt vatten. Vid den tidpunkten hade vi inga möjligheter att framställa uranmetall utan fick hjälp av de franska myndigheterna. De levererade uranstavarna mot löfte att återfå motsvarande mängd uran i koncentratform, då vår produktion i Kvarntorp kommit igång om ett par år. Det förhållandet att vi utvecklade metoder att industriellt utvinna uran ur de låghaltiga skiffrarna i Närke och Västergötland – Europas största uranförekomst – bidrog till att vi internationellt ansågs som en intressant samarbetspartner.

Det tunga vattnet inköptes från Norsk Hydro, som hade en produktion i Rjukan. Norge satsade också på tungvattenreaktorer och vi hade ett nära samarbete med Institutt för Atomenergi i Kjeller. R1 placerades vid Drottning Kristinas Väg nära KTH så att den skulle kunna användas vid forskning och undervisning där. Att den förlades i ett bergrum ca 15 m under marken sammanhängde främst med att övriga på området verksamma institutioner ivrigt bevakade sina expansionsmöjligheter ovan jord. Det faktum att R1 blev världens första bergrumsförlagda reaktor innebar samtidigt en extra skyddsbarriär mot strålning och bidrog säkert till att inga allvarliga invändningar gjordes av dem som hade sina bostäder och arbetsplatser i närheten.

Forskningsreaktorn R1 har tidigare beskrivits i olika sammanhang, bl a i Daedalus 1981.[2,3] Här behöver endast konstateras att den utgjorde ett pionjärprojekt av stor betydelse för den svenska kärntekniska utvecklingen.

Zebra, R0, TZ och KRITZ Uranstavarna i R1 var placerade i ett fast geometriskt mönster, som inte utan ombyggnad av reaktorn kunde förändras. För optimering av kommande reaktorer var det av intresse att studera hur stavarnas dimensioner och inbördes placering i moderatorn påverkade reaktiviteten. Därför byggdes intill R1 en uppställning Zebra (zero energy bare reactor assembly) där man kunde omflytta bränslet och studera olika bränslegeometrier. Den flyttades sedan till Studsvik och ombyggdes till en "tryckzebra" TZ, (levererad av Kockums Mekaniska Verkstad) för mätningar upp till 250°C. I Studsvik uppfördes även en nolleffektreaktor R0, som kunde uppnå kritikalitet och för mätningarna inte behövde den externa neutronkälla som fanns hos zebrorna.

År 1969 ombyggdes TZ till en 0-effektreaktor KRITZ, som bl a användes till utprovning av bränsleelementen för den första Oskarshamns-reaktorn. Till R1 och experimentanläggningarna hade som nämnts uranet varit i metallform, kapslat i aluminiumrör. För de höga temperaturer som erfordras i elproducerande reaktorer är denna kombination inte möjlig. Lösningen blev här uranoxid UO_2 i form av pressade och sintrade små cylindrar, s k kutsar kapslade i rör av

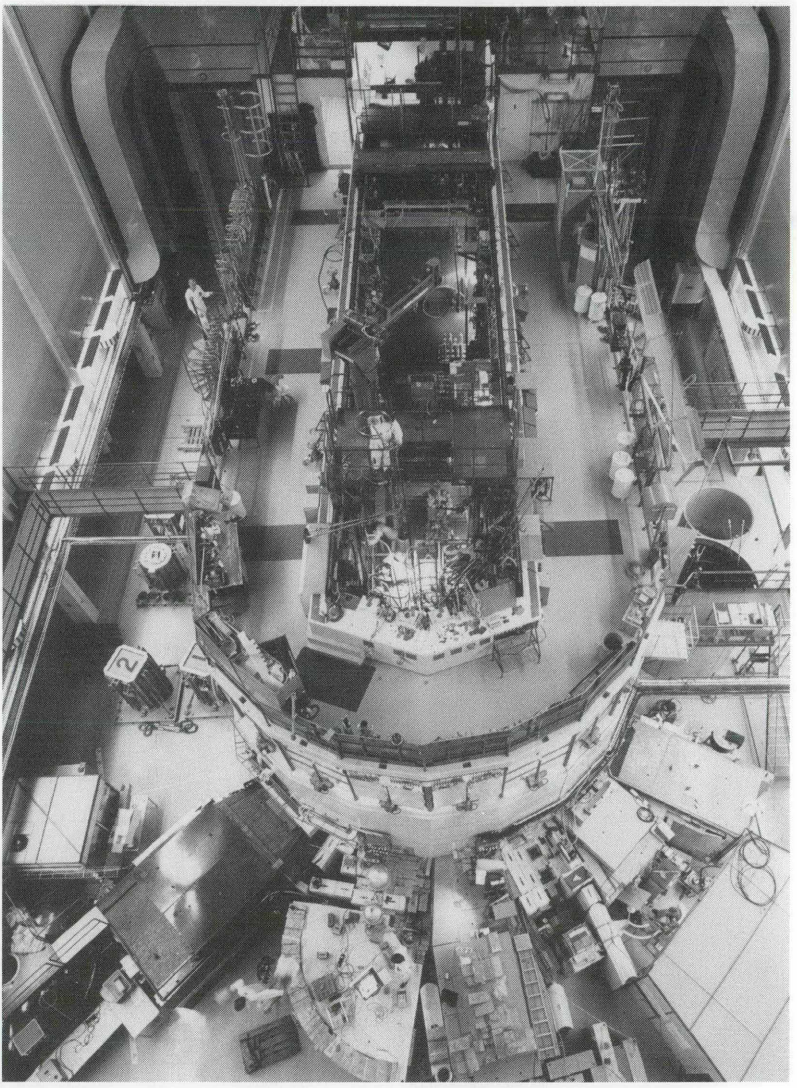


1. Närmast kameran KRITZ-reaktorns överdel, längst bort R0-reaktorn.

zirkoniumlegeringen Zircaloy 2. Metoder för framställning av oxidbränsle utvecklades och en mindre fabrik uppfördes i Stockholm. Zircaloyrör utvecklades av Sandviken i samarbete med Atombolaget och levererades senare även på export.

I bränsleelementfabriken tillverkades element till forskningsreaktorer i Studsvik och utlandet, till Halden-reaktorn i Norge samt till Ågesta och Marviken. Till Ågesta-elementen levererade även ASEA och Kohlswa jernverk uranoxidkutsar.

I en reaktor råder en hög intensitet av neutroner som på olika sätt



2. R2-anläggningen i Studsvik. Den 9 m djupa bassängen, som är fylld med vatten, är delad i tre avdelningar. Närmast kameran reaktorkärnan, därefter förvaringsutrymmen och längst bort R2-0-reaktorn. På golvet framför bassängen experimentuppställningar för forsknings- och utvecklingsarbete.

påverkar ingående material: bränsle, kapsling, reglerutrustning och konstruktionsmaterial inklusive själva reaktortanken. Dessa frågor studeras i materialforskningsreaktorer, där neutronintensiteten kan vara många gånger högre än i kraftproducerande reaktorer och man alltså kan göra accelererade prov.

R2 Ursprungligen var tanken att i Studsvik bygga en materialprovningsreaktor av tungvattentyp ungefär motsvarande den kanadensiska

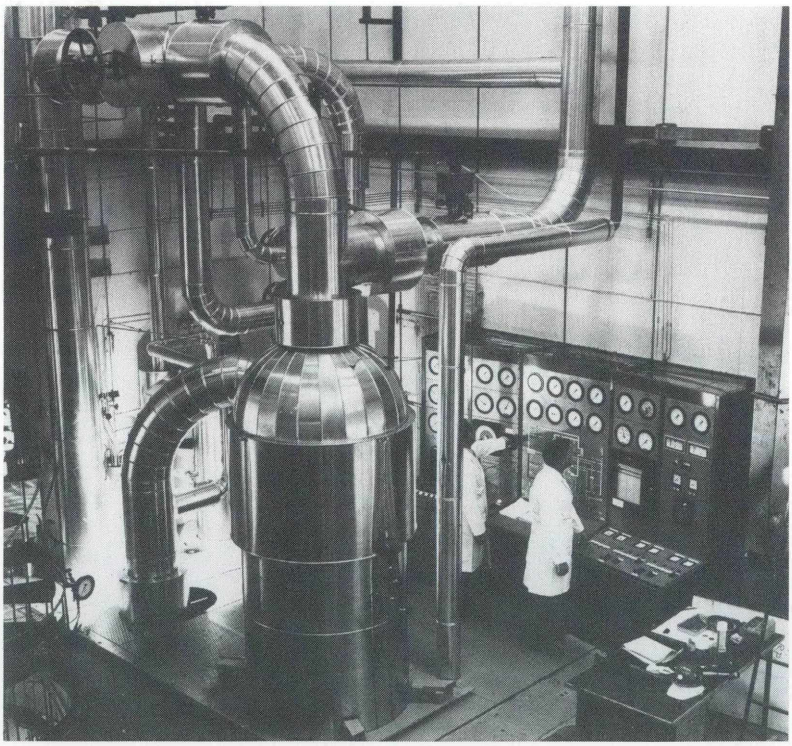
NRX-reaktorn. Sedan USA erbjudit vissa mängder anrikat uran för forskningsändamål anskaffades i stället en anrikad "bassängreaktor" av MTR-typ, R2, inköpt från ACF-Industries i USA. I samma bassäng uppfördes en nolleffektreaktor (levererad av ASEA) för kartläggning av R2-reaktorns kärna med experimentanordningar och för strålskyddsmätningar.

Efter bestrålning i en materialforskningsreaktor blir proven starkt radioaktiva och måste undersökas i "aktiva" laboratorier med strålskydd och manipulatorer. Materialforskningsreaktorn R2 och de aktiva laboratorierna utgör centrala delar i den forskningsstation Studsvik, som började byggas 1955. R2-reaktorn, som blev färdig 1960 är fortfarande i drift med uppdrag från Sverige och utlandet.

Inne i reaktorkärnan arrangeras ett antal "slingor", där man efterliknar den miljö (kylmedium, tryck, temperatur etc) som råder i en kraftproducerande reaktor.

Reaktorsäkerhet

Förutom de "normala" säkerhetsföreskrifter, som tillämpas för apparater som arbetar vid förhöjda tryck- och temperaturförhållanden tillkommer vid reaktoranläggningar för energiproduktion de speciella villkor som den radioaktiva strålningen medför.



3. Försökskretsen SEPA för ångvattenseparation i det värmetekniska laboratoriet. Experimenten sker i full skala med normala driftdata 70 bar och 285°C.

Strålningens inverkan på konstruktionsmaterial har tidigare berörts. Då det gäller det radiologiska skyddet för personal och omgivning hade vi i Sverige en fin tradition att bygga vidare på genom bl a professor Rolf Siewerts arbeten vid Radiofysiska Institutionen, Karolinska Sjukhuset. Redan vid projekteringen av R1 bildades en sektion för strålskydd, som nära samarbetade med in- och utländska experter. Det var också ett område, där det internationella samarbetet inte begränsades så mycket av "red tape". Det visade sig också i det fortsatta arbetet på värme- och kraftproducerande reaktorer att strålskyddsfrågor kunde utgöra en styrande faktor.

I nära samarbete med strålskyddsspecialisterna arbetade instrumentsektionen som bearbetade regler- och kontrollsystem för reaktorer. Ett grundläggande och delvis nytt område gällde neutronmätningar, där nya instrument utvecklades.

Värmeteknik

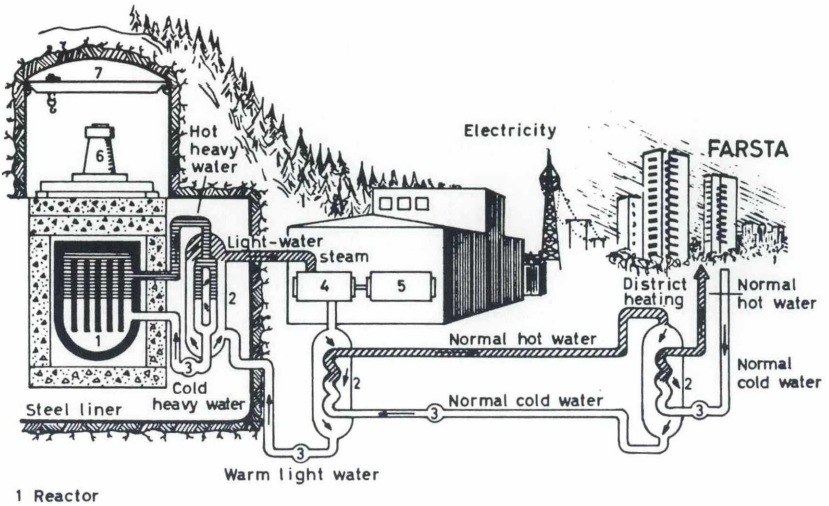
Karakteristiskt för kärnenergin är den mycket stora energitäthet som råder i ett bränsleelement och som optimalt måste utnyttjas. Värmeöverföring och därmed sammanhängande strömnings- och kokningsförhållanden studerades i ett värmetekniskt laboratorium i Studsvik. Här utprovades också flera av de komponenter som ingick i prototypreaktorerna. Studier av "burn-out"-förhållanden hos bränslet och ång/vattenseparation i kokarreaktorer blev av intresse för både tungvatten- och lättvattenreaktorerna.

Ågestaprojektet

Adam och R3

Då det gällde de första energialstrande reaktorerna fanns det olika förslag. Vattenfall i samarbete med ASEA lanserade projekten Adam och Eva, där Adam var en enbart värmeproducerande reaktor, som arbetade vid låg temperatur, och Eva ett atomkraftverk för elproduktion. Inom Atombolaget bearbetades R3-projekten, där R3a var en värmeproducerande reaktor och R3b en värmereaktor med mottrycksdrift, där en del av energin kunde tas ut som el. Det senare alternativet var visserligen tekniskt svårare men gav samtidigt erfarenheter av drift vid höga temperaturer. Alla dessa projekt baserades på systemet med naturligt uran och tungt vatten. Vissa diskussioner fördes även om lättvattenreaktorer med anrikat uran, men självförsörjningsargumentet för bränsle vägde tyngre. De anrikade systemen ansågs då mer intressanta för mycket små värmeverk och fartygsdrift.

Det stora intresset för värmeproduktion sammanhängde med att Bränsleutredningen bedömt att vi skulle behöva ett stort antal, kanske 100 atomvärmeverk för att effektivt bromsa oljeimporten. Det var



1 Reactor
2 Heat exchanger
3 Pump
4 Turbine
5 Generator
6 Charge machine
7 Overhead crane

4. Principskiss för Ågesta kraftvärmeverk.

först i slutet av 50-talet som man insåg, att huvudintresset för vår kärnkraft gällde elproduktion.

Om man planerar ett atomvärmeverk behöver man en tillräckligt stor värmekund, som via ett fjärrvärmenät kan nyttiggöra energin. Vattenfall träffade för Adam överenskommelse med Västerås stad och Atombolaget ingick 1956 ett avtal med Stockholms Elverk om värmeleveranser till förorten Farsta, som då var under utbyggnad. Båda projekten skulle enligt planerna i huvudsak finansieras via statsanslag via Vattenfall resp Atomenergi. Under arbetets gång visade det sig, att projekten krävde större insatser av arbete och pengar än vad de första optimistiska kalkylerna visat. Under hösten 1958 skedde därför en sammanslagning till ett projekt som blev R3b. Projektet kallades en tid R3/Adam, men fick senare namn efter förläggningsplatsen Ågesta.

Avtalet mellan Atomenergi och Elverket beträffande värmeleveranser kvarstod. Finansieringen av reaktordelen delades mellan Atombolaget och Vattenfall och ASEA blev huvudleverantör för stationen.

Ågesta dimensionerades för en effekt av 65 MW, varav 55 MW togs ut som värme och 10 MW som el. Efter några års drift höjdes dessa värden till 80 resp 12 MW. Värmeproduktionen räckte till ca 3500 hushåll i Farsta. Förläggningen ordnades även denna gång i ett bergrum 3,5 km från Farsta centrum. Det var första gången en reaktor förlades så nära tät bebyggelse, och för att bergrummet skulle bli helt tätt "tapetserades" det med ett svetsat skal av 4–8 mm stålplåt.

Motstånd mot Ågesta

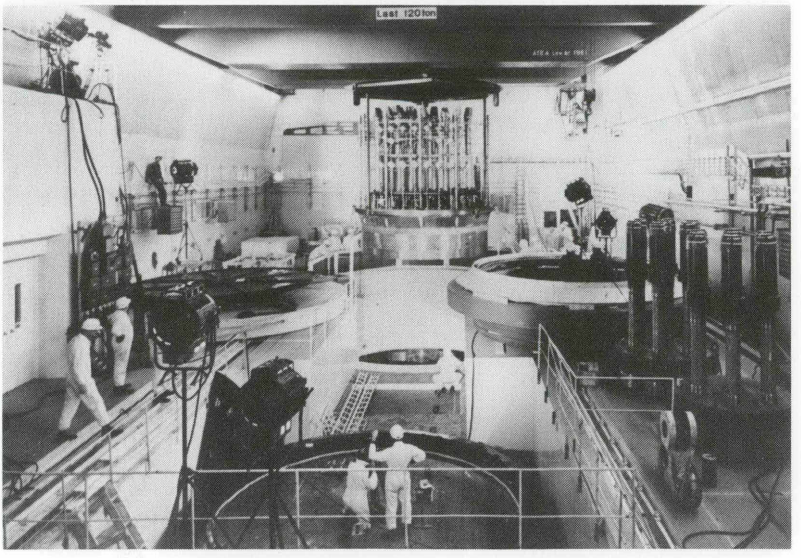
Det kan vara intressant att konstatera, att rädslan för strålningsrisker fanns även då. Motståndarna till verket organiserade sig i Magelungens intresseförening, som på olika sätt protesterade mot verket. Särskilt gällde detta i Vattenöverdomstolen, som skulle ta ställning till utsläpp av små mängder radioaktivt vatten i sjön Magelungen. Som expert anlitade intresseföreningen bl a nobelpristagaren Linus Pauling. Efter långa diskussioner, där de svenska myndigheterna ansåg förläggningen godtagbar beviljades de tillstånd som krävdes för stationens drift.

Som reserv för stationen byggdes nära Farsta ett oljeeldat värmeverk, som skulle träda i funktion, då Ågestaverket inte kunde leverera värme på grund av t ex bränslebyte eller underhållsarbeten. Vid ett par tillfällen, då den oljeeldade stationen var i drift, ringde Farsta-bor till Ågesta och frågade, när man skulle köra igång reaktorn. Röken och sotet från den oljeeldade centralen upplevdes som störande.

Industribilden

En huvuduppgift för Ågestaverket var att ge svensk industri erfarenheter av de kvalitetskrav som kärnkraften ställer. Fordringarna på tillförlitlighet och precision, materialbeständighet, täthet och renhet är betydligt strängare än vad industrin normalt tillämpar. Begreppet "reaktorkvalitet" användes såväl i Sverige som internationellt.

Samordnande huvudleverantör var som nämnts ASEA, som även levererade många komponenter, bl a kontrollutrustningen. Reaktortanken – det största föremål som dittills transporterats på järnväg i Sverige – tillverkades av Degerfors. Den stora laddningsmaskinen



5. Från monteringen av Ågesta. Närmast kameran schaktet för reaktortanken, längst bort tanklocket med genomföringar.

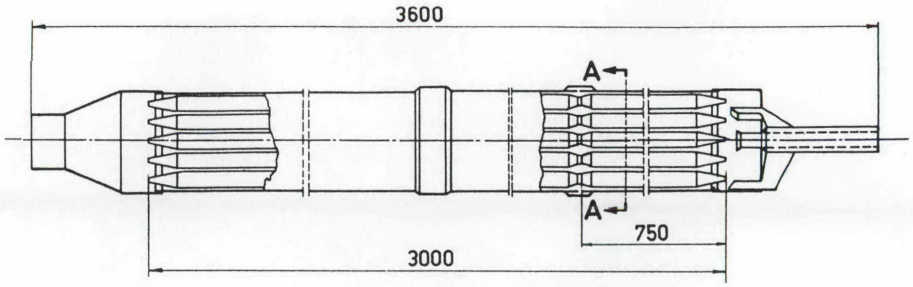


6. Reaktortanken och yttre termiska skyddet på plats i Ågesta.

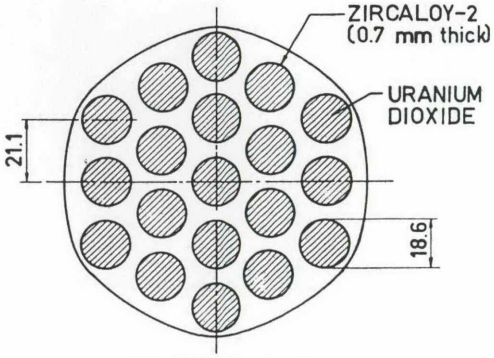
beställdes från NOHAB inom Boforsgruppen och värmeväxlarna från JMW och Rosenblads Patenter. De enda centrala delarna i den primära kretsen som importerades var huvudpumparna för tungt vatten som köptes från Hayward Tyler, England.

Nedanstående uppställning ger några av stationens viktigaste data:

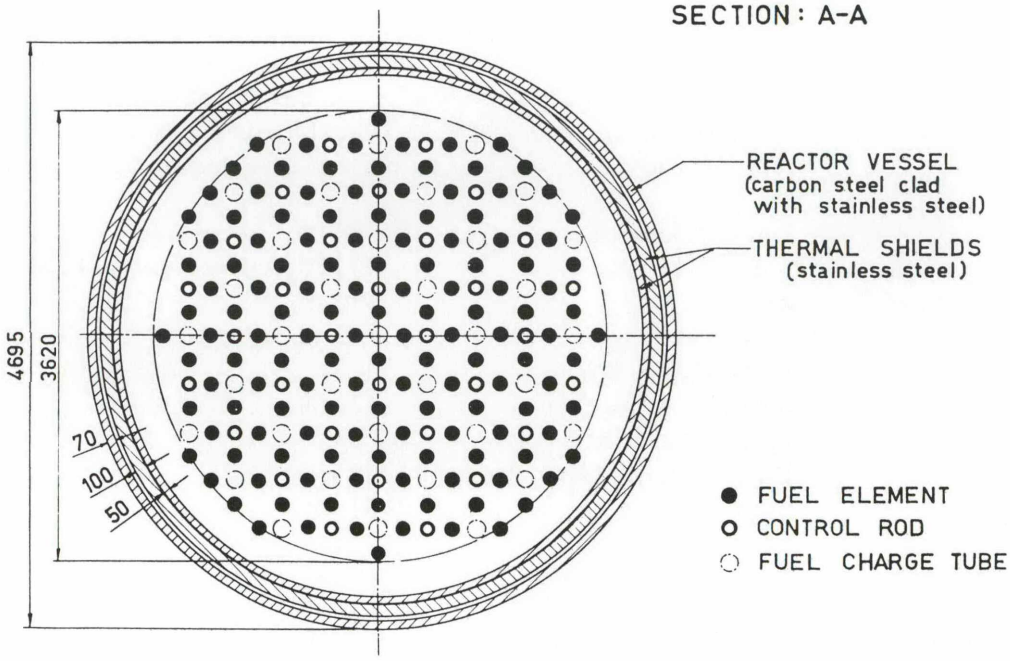
konstruktionseffekt	65 MW, senare höjt till 80 MW
därav el	10 MW, senare höjt till 12 MW
drifttryck	33 bar
bränsleladdning	18,5 ton UO_2
bränsleelementknippen	140 st
bränslestavarnas diameter	17 mm
bränslets medeltemperatur	500°C
bränslets maximumtemperatur	1 325°C
tungt vatten	69 ton
tungt vatten i reaktorn	51 ton
tungt vatten i externa kretsar	18 ton
effekt i bränsle	60 MW
effekt i moderator	5 MW
arbetstemp i ånggeneratorer	196–215°C
temp varmvatten till Farsta	75–120°C
temp varmvatten från Farsta	52–68°C
ångproduktion	105 ton/h



FUEL ELEMENT



SECTION : A-A



HORIZONTAL SECTION

7. Bränsleelementen i Ågesta.

En fullständig teknisk beskrivning av Ågesta finns i boken "The Ågesta Nuclear Power Station, a staff report". AB Atomenergi 1964.[4]

Tidtabellen för verkets utbyggnad är i stora drag:

November 1956: preliminära studier och avtal med Stockholms Elverk
November 1957: utsprängningen av bergrummet börjar
Hösten 1958: sammanslagning av R3 och Adam till Ågesta
Januari 1960: bergrummet färdigutsprängt
December 1962: provkörningar med lätt vatten, bränsleelement och kontrollsystem
Juli 1963: första kriticitet
Våren 1964: full effekt och leverans av värme och el
1965: Vattenfall övertar driften av Ågesta
Juni 1974: reaktordriften upphörde

Enligt avtalet med Elverket betalades värme- och elkraften med ett pris, som motsvarade framställningskostnaderna vid en oljeeldad anläggning. För en liten försöksanläggning som Ågesta innebar det, att man inte fick full täckning för de löpande kostnaderna. Vissa ytterligare marginella inkomster erhölls genom att en del bränsleelementpositioner uthyrdes för prov av bränsle och material i reaktormiljö. Totalt belastade dock driften Vattenfalls och Atomenergis budget med ca 4 milj kronor per år.

Nedläggning av Ågesta

År 1974 bedömdes att de ytterligare erfarenheter, som en fortsatt drift skulle ge inte motiverade denna kostnad, varför man beslöt avbryta driften och avveckla verksamheten.

Några månader senare steg i oljekrisens skugga priserna kraftigt innebärande, att verket skulle kunnat täcka sina löpande kostnader. Beslutet om nedläggning kvarstod dock, ty delar av anläggningen, bl a plåtskalet var i behov av översyn och reparation.

Sammanlagt hade då Ågesta levererat 800 000 MWh värme och 415 000 MWh el. Under perioden 1964–1974 hade stationen varje år under eldningssäsongen varit i drift med mycket hög tillgänglighet. Enda undantaget var under en period 1968 då skador på några bränsleelement gjorde att reaktorn fick stängas av. Även denna i och för sig negativa händelse gav dock värdefulla erfarenheter för bränsleelementens konstruktion och för hantering av starkt radioaktivt material.

Kostnader

Ågesta drabbades, liksom motsvarande prototypanläggningar i andra länder av fördyringar och förseningar i förhållande till de ursprungliga planerna totalkostnaden blev ca 205 Mkr inklusive indexmässiga fördyringar mot drygt 100 Mkr i de första kalkylerna. Till största delen berodde detta på att man underskattat behovet av arbetsinsatser

och hjälputrustningar. Inte minst säkerhetsfrågorna spelade en stor roll, t ex den dyrbara plåtinklädnaden av bergrummet.

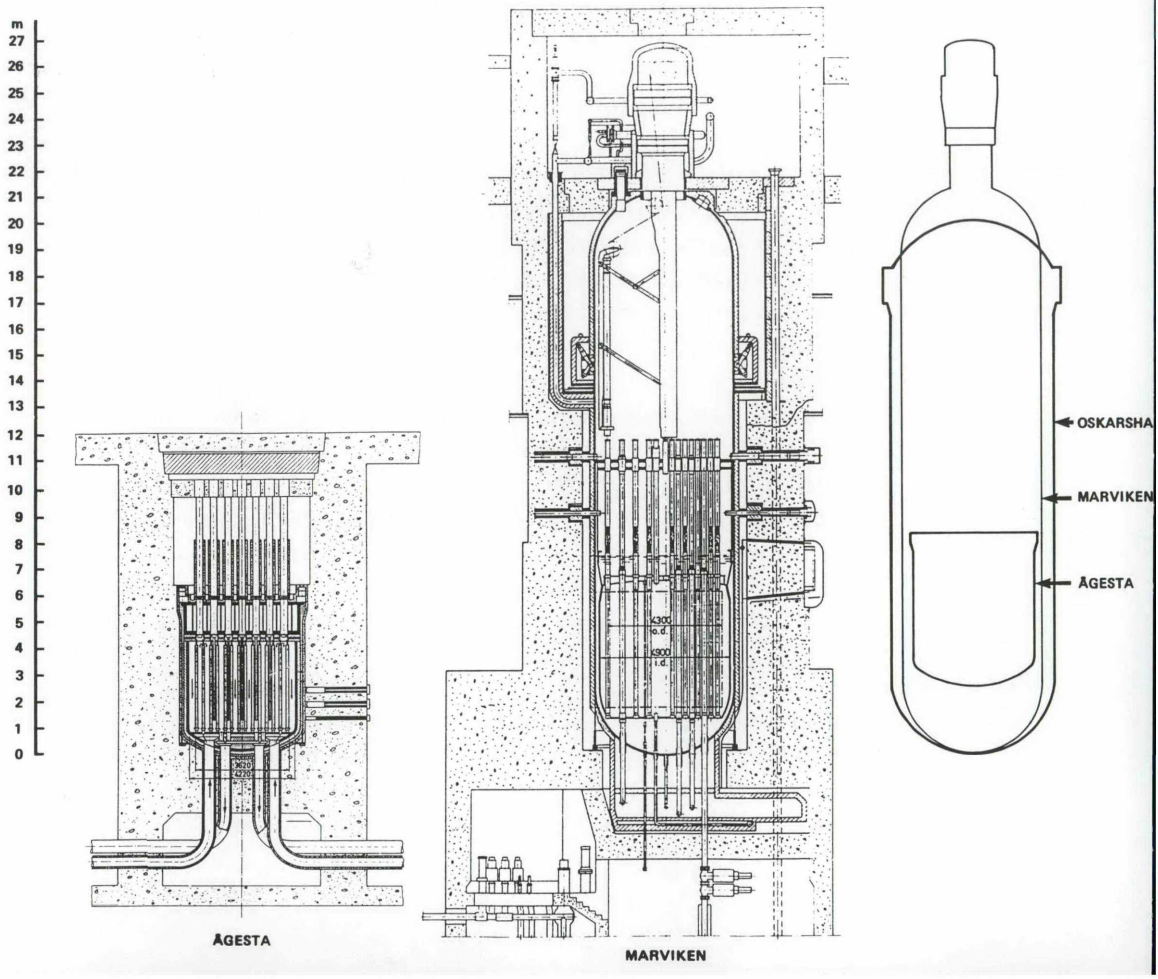
Alla deltagarna i projektet fick dock de första erfarenheterna av konstruktion, tillverkning, montering och drift av ett industriellt kärnkraftverk.

Marvikenprojektet

Medan Ågesta kan betraktas som ett lyckat projekt, som gav de önskade erfarenheterna beträffande uppförande och 10 års drift blev läget för Marviken det motsatta. Det blev en reaktorstation, som uppfördes, men aldrig togs i drift. På sitt sätt utgör den en illustration av uttrycket: "det bästa kan bli det godas fiende".

Med facit i hand kan det vara intressant att följa projektets utveckling och se vilka faktorer som påverkade utformningen.

8. Genomskärning av Ågesta- och Marvikenreaktorerna. T h har som jämförelse medtagits tanken för Oskarshamn 1.

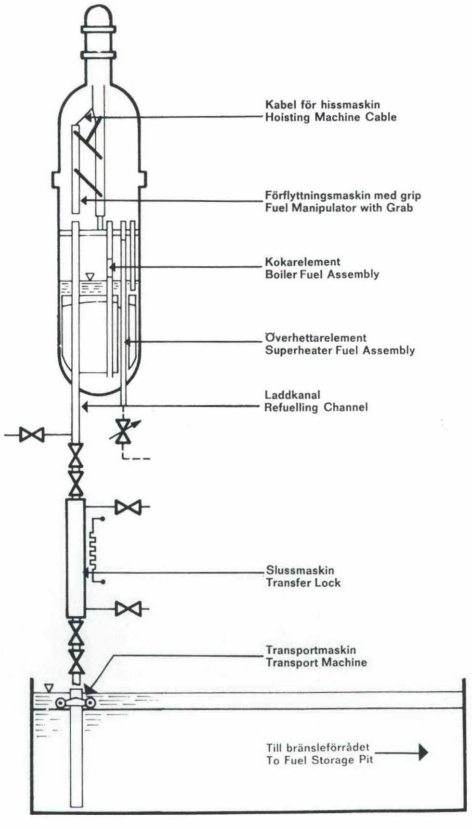


Eva och R4

Erfarenheter utifrån och beräkningar här hemma visade storleksfaktorns betydelse för ekonomin. Först vid mycket stora anläggningar kunde priset på atomkraften bli konkurrenskraftigt. Med "mycket stora" anläggningar menade man då effekter om 400 MWel eller mer. Man var överens om, att man inte kunde gå direkt från Ågesta till en anläggning av den storleken utan att det behövdes ett mellansteg. Vattenfalls Eva och Atomenergis R4 var sådana mellansteg på ca 100 MWel. Kostnadsutvecklingen och bristen på kvalificerad personal medförde även här en sammanslagning av de två projekten. En tid användes beteckningen R4/Eva, som sedan blev Marviken efter förläggningsplatsen vid Bråvikens södra strand.

Då det gällde typvalet var två frågor särskilt viktiga: konstruktionsprincip och kylmedel. Skulle man välja det kanadensiska utförandet med trycktuber av Zircaloy eller behålla det trycktanksutförande, som använts i Ågesta? Vilket kylmedel var mest lovande: vatten, ånga eller gas?

Efter ingående överläggningar stannade man för trycktankskonstruktionen, som också användes i de amerikanska lättvattenreaktorerna. Även då det gällde kylmedel var man konservativ och behöll inledningsvis Ågestalösningen med tungt vatten under tryck. Att det



9. Anordning för bränslebyte under drift i Marviken.

skulle vara en tungvattenreaktor, som kunde drivas med naturligt uran var alla överens om. Reaktorn var liksom de kanadensiska planerad för bränslebyte under drift, vilket möjliggör högre utbränning av bränslet, och bättre ekonomi.

Det avtal som tecknades mellan Vattenfall och Atomenergi i september 1957 gällde alltså en 100 MWel reaktor med tungt vatten under tryck. Denna princip bibehölls ända till 1962 och man kan i efterhand beklaga, att den då ändrades.

Redan då avtalet mellan Vattenfall och Atombolaget slöts fanns det många som tyckte att man borde ta ett djärvare utvecklingssteg, särskilt som kokarreaktorer började tilldra sig allt större intresse i många länder.

Tidsplanen

Vad gäller tidplanen ville man naturligtvis dra största möjliga nytta av de erfarenheter, som successivt kom fram i Ågesta-projektet. Förseningarna i Ågesta innebar därmed automatiskt en försening även för Marviken. Atomenergi och den tillverkande industrin ville dock att tidsmellanrummet mellan de två projekten inte skulle bli alltför stort, då man önskade kontinuitet i verksamheten och annars riskerade att förlora kvalificerad personal.

Efter Suez-krisen var även Vattenfall intresserat av ett snävt program, då man förutsåg ett ganska nära behov av stora atomkraftverk för att ersätta oljeimporten. CDL framhöll 1959 att man senast 1965 måste ha tillgång till stora atomkraftverk och föreslog import för att man skulle kunna hålla denna tidsplan.

I början av 1960-talet ändrades situationen och oljan blev både lättillänglig och billig. Behovet av stora atomkraftverk för elproduktion var inte längre lika aktuellt, och man kunde ur den synpunkten ha mer tid för projektering. Tidpunkten för färdigställande av Marviken, som ursprungligen hade angetts till 1963 försköts successivt till slutet av 1968.

Kokning och överhettning

Under dessa år fördes en intensiv debatt om Marvikenreaktorns utformning. Det var framförallt två frågor som behandlades: kokning och överhettning. I en kokarreaktor med direktcykel behöver man inte de dyrbara värmeväxlare och pumpar, som krävs i en tryckvattenreaktor. Om man dessutom kunde lösa frågan om nukleär överhettning skulle man nå de temperaturer som den modärna turbintekniken utnyttjade och därmed höja verkningsgraden. Diskussionen påverkades av både studier här hemma och impulser utifrån. De som föreslog gaskylning önskade likaledes komma upp i högre temperaturer och förbättra verkningsgraden. Gaskylningen avskrevs dock, då den skulle innebära en för oss ny och okänd materialteknologi.

Reaktorexperimentet RX

Under dessa diskussioner kom tanken på ett särskilt "reaktorexperiment RX" i Studsvik att spela en viss roll. Atombolaget föreslog i slutet av 1959 att man skulle utreda om en anläggning kunde byggas, som innehöll "en utskuren del" av en stor reaktorkärna med samma kylmedel och data betr temperatur och tryck som den tänkta fullstora anläggningen. Med flera bränsleknippen skulle man även få viss statistik på bränslestavarnas och andra komponenters uppförande. Efter något år avbröts dessa studier, då man fann att anläggningen skulle bli för dyr och komplicerad. Med hänsyn till det stora intresset för mer avancerade konstruktioner för Marviken diskuterades RX-konceptet dock under de kommande åren som alternativ eller komplement till Marviken.

Den intressantaste frågan var hur man skulle få erfarenheter av kokarreaktorer. Sedan 1958 deltog Sverige tillsammans med ett flertal europeiska länder i Halden-projektet i Norge. Reaktorn där var en tungvattenkokare, som dock inte hade turbin utan enbart inriktades på ångproduktion. Halden var av särskilt intresse för oss eftersom Atombolaget levererade bränslelementen till reaktorn. Sverige hade personal vid Haldenreaktorn så att vi kunde få direkta erfarenheter av kokning. I slutet av 1961 förordade regeringens rådgivande Atomenergidelegation att man skulle utreda om reaktorexperimentet RX kunde utformas just för studium av kokning. Vidare skulle man vidareutveckla ett förslag om att tryckvattenreaktorn i Marviken skulle förses med en mindre kokartillsats om ca 20 MW. Våren 1962 föreslogs att Marviken även skulle kompletteras med en tillsatsturbin om ca 30 MW.

Intresset för kokarreaktorer var som synes i tilltagande. Även de enskilda kraftproducenterna hade 1959 planerat en importerad lättvattenkokare om 60 MWel till Simpevarp. Ett genombrott för kokarreaktorer kom 1960 då lättvattenkokaren Dresden i USA om 210 MWel togs i drift. Tillverkare var General Electric, medan den andra stora amerikanska reaktorleverantören Westinghouse satsade på tryckvattenreaktorer.

Marviken K200

Det var under sommaren 1962 som förslaget om en omläggning av Marvikenprojektet från tryckvatten- till kokarreaktor, Marviken K200, lades fram av ASEA och Atomenergi. Det hade föregåtts av många interna studier, bl a den s k Bashful-utredningen (Boiling And SuperHeating FULlscale Reactor). För att man skulle få ut ytterligare erfarenheter skulle Marvikenreaktorn byggas så att man där även kunde utprova nukleär överhettning. Alla var medvetna om att detta var ett djärvt steg. Man tog det för att "hämta in stormakternas försprång". Vattenfall förordade dock att projektet fortsatte som tryckvattenreaktor med kokartillsats.

På Delegationens begäran inriktade samtliga deltagare, Atom-

energi, ASEA och Vattenfall arbetet på att till slutet av 1962 ta fram erforderligt projekteringsunderlag för en offert på Marviken K200.

Man kan säga, att detta ställningstagande till K200-idén var ett tecken på en gradvis förskjutning av motiven för kärnenergisatsningen från energipolitik till industripolitik. Kvar stod dock kravet på att stationen skulle kunna drivas med naturligt uran om än med något reducerad effekt.

Överhettning osäker faktor

Det som kvarstod som den största osäkerhetsfaktorn var överhettningen. I många länder bedrevs nu och under de närmaste åren ett omfattande arbete att få fram bränsleelement, som kunde arbeta vid de höga temperaturer turbinkonstruktörerna var vana vid. För de dittills byggda och projekterade kraftreaktorerna hade man fått använda specialturbiner för mättad ånga – ett förhållande som gäller även idag. Av turbiner för enbart mättad ånga fanns då knappast några nyinstallationer efter första världskriget i storlekar som var intressanta och turbintypen bedömdes av många som 1800-talsmässig.

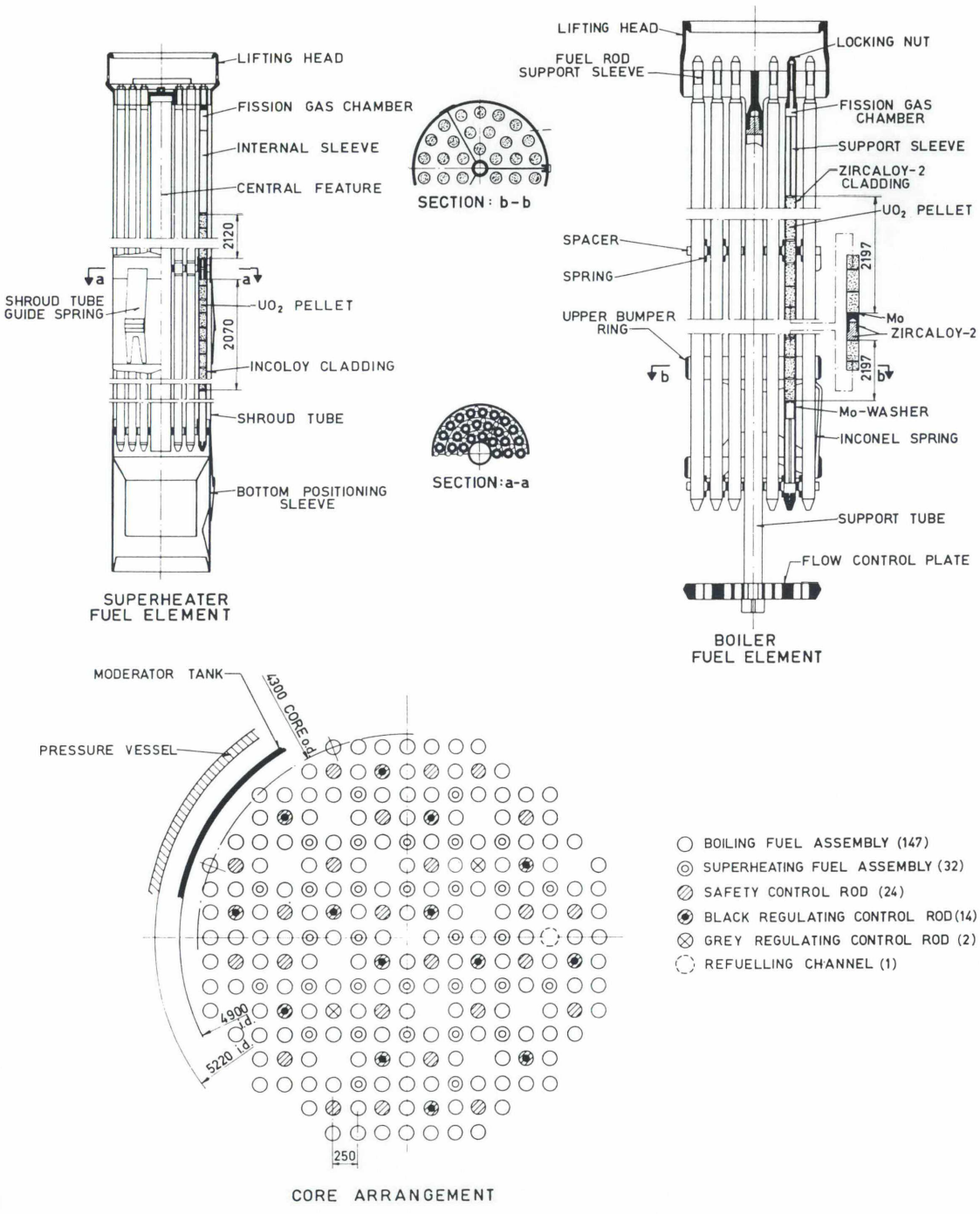
Optimismen om överhettning var stor. I USA byggdes 1961 tre reaktorer för studier av överhettning, Borax, Bonus och Pathfinder och i USSR en i Byeloyarsk. Två gästforskare från Borax kom 1964 till Sverige och medverkade i Marviken. Även i England och Tyskland planerades reaktorer för överhettning och vid Genevekonferensen 1964 rapporterades goda framsteg. Målet i Marviken var att kunna utprova överhettning men man betonade att frågan inte var löst.

Av betydelse vid bedömningen av dessa frågor var också den s k turbinutredningen, som utförts av berörda industrier och som visade att det var möjligt att konstruera turbinerna tillräckligt täta för att tillåta drift med tungvattenånga.

I den rapport som Atomenergi och Vattenfall i december 1962 överlämnade till Delegationen redovisades tre driftsfall:

enbart mättad ånga	anrikning 1,2 %	effekt 138 MWel
överhettad ånga	anrikning 1,2–1,8 %	effekt 206 MWel
beredskapsdrift	naturligt uran 0,7 %	effekt 130 MWel

För överhettningen var anrikning nödvändig på grund av framför allt den speciella kapsling som krävdes. Även för normaldrift med kokning föreslogs viss anrikning. Utsikterna att erhålla amerikanskt anrikat uran för kraftreaktioner hade förbättrats och 1966 slöts ett avtal med USA, som möjliggjorde inköp av anrikat uran för svenska kraftreaktorer. Med de gällande priserna gav en lätt anrikning bättre ekonomi och högre utbränning. Möjligheten att driva stationen även med naturligt utan hade bl a krävts av riksdagens statsutskott. Vid



10. Bränsleelementen i Marviken.

större reaktoreffekter, t ex 400 MWel skulle drift med naturligt uran vara kommersiellt intressant.

Fig 8 visar en genomskärning av reaktortanken. Drift enligt det första alternativet förutsatte att man inte i tid kunnat lösa överhettarfrågan och att överhettarkanalerna då skulle vara tomma och tjäna som utlopp för den mättade ångan. Den komplicerade utformningen av härden skapade svårigheter vid säkerhetsbedömningen och farhågor beträffande driftsförhållanden och tillgänglighet. Det gällde särskilt överhettningen. Vattenfall föreslog därför att man skulle slopa överhettningen och i stället bygga en tungvattenkokare av enklast möjliga utförande. Projektet hade nu alltmer fått karaktär av utvecklingsarbete varför Atomenergi måste ta ansvaret för reaktordelen. Ett avtal med denna innebörd slöts under 1964. Då intresset för överhettning kvarstod, reaktortank och andra styrande komponenter redan upphandlats, vilket blockerade större konstruktionsförändringar, fortsatte dock projektet och Marviken K200 blev det utförande, som skulle föras fram till färdigställande i slutet av 1968.

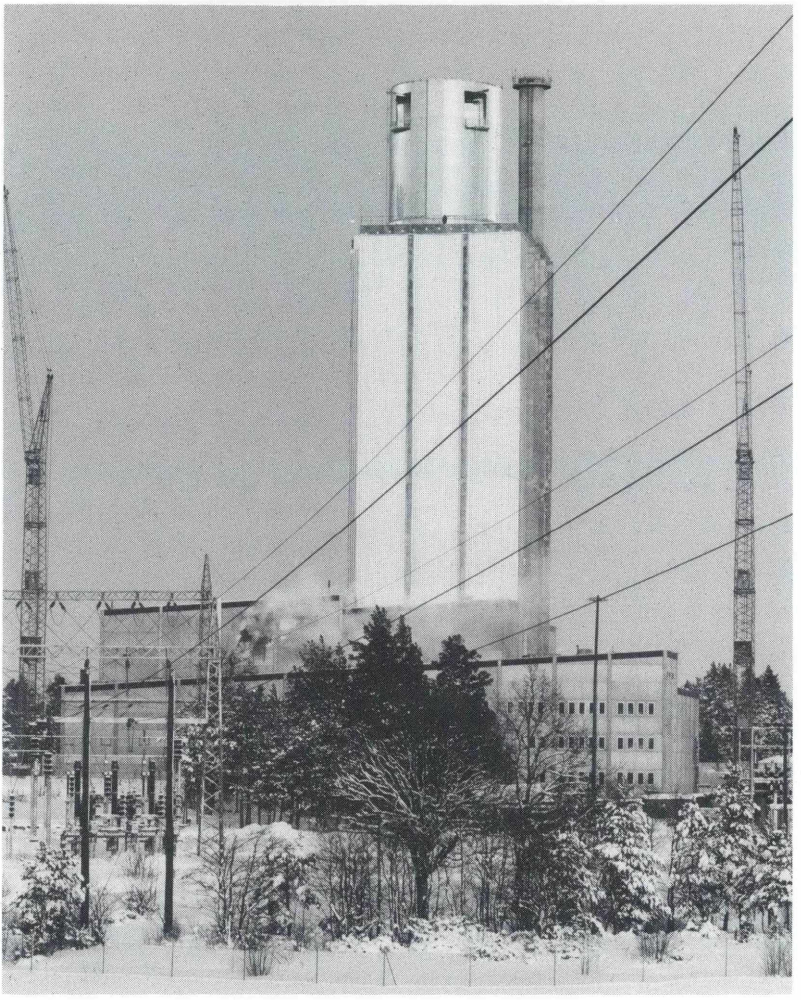
Tekniska data

Följande tabell ger några viktiga konstruktionsdata för Marviken K200[5]

	Enbart kokare	Överhettning
Termisk effekt	463 MW	593 MW
Elektrisk effekt netto	132 MW	193 MW
Bränsleladdning	26,3 ton UO_2	+ 7,3 ton UO_2
Bränsleknippen	147 st	+ 32 st
Anrikning	1,35 % U235	1,75 % U235
Tungt vatten	180 ton	
Drifttryck	49,5 bar	
Temperatur utg ånga	259	472
Temperatur matarvatten	120	126

Industribilden

Vad gäller konstruktion, tillverkning, montage och kontroll ville man liksom i Ågesta i största möjliga utsträckning engagera svenska industrier. ASEA och Nohab bildade 1958 samarbetsgruppen R4/Eva, som fick i uppdrag att utarbeta offert på reaktordelen i tryckvattenversionen. Atomenergi svarade för bränsle och tungt vatten. Sedan konstruktionen ändrats till Marviken K200 gav 1964 en industrigrupp Reaktorteknik (ASEA, Johnsongruppen, Nohab och Uddeholm) in en offert på reaktordelen. Offerten bedömdes av Atomenergi och Vattenfall som bristfällig och priset var alltför högt, varför offerten avböjdes. I stället offererade ASEA kokardelen till ett pris som var mer acceptabelt. Här ingick alla utrustningar och funktioner som erfordrades för kokningsdrift, erforderliga samfunktioner och ställda säkerhetskrav. I juni 1964 upphandlades därför kokardelen hos



11. Reaktorbyggnaden i Marviken.

ASEA, som blev huvudleverantör. Avtalet kompletterades 1965 med överhettarutrustningen samt en i kontrollsystemet integrerad dator för registrering och styrning. Såsom framgår av fig 8 utgjorde överhettardelen en med reaktorn i övrigt sammanbyggd del. Som kapslingsmaterial för överhettarelement bedömdes legeringen Incoloy positivt efter prov i utländska reaktorer. Ett samarbete inleddes med den amerikanska atomenergikommissionen AEC om överhettning i vattenreaktorer.

Projekt-organisationen

Ansvarsfördelningen var alltså den att Atomenergi svarade för reaktordelen, där ASEA var huvudleverantör och Vattenfall för stationen i övrigt. För att man skulle få en effektiv koordinering av arbetena placerades Atomenergis projektledare och stab hos Vattenfall i Råck-



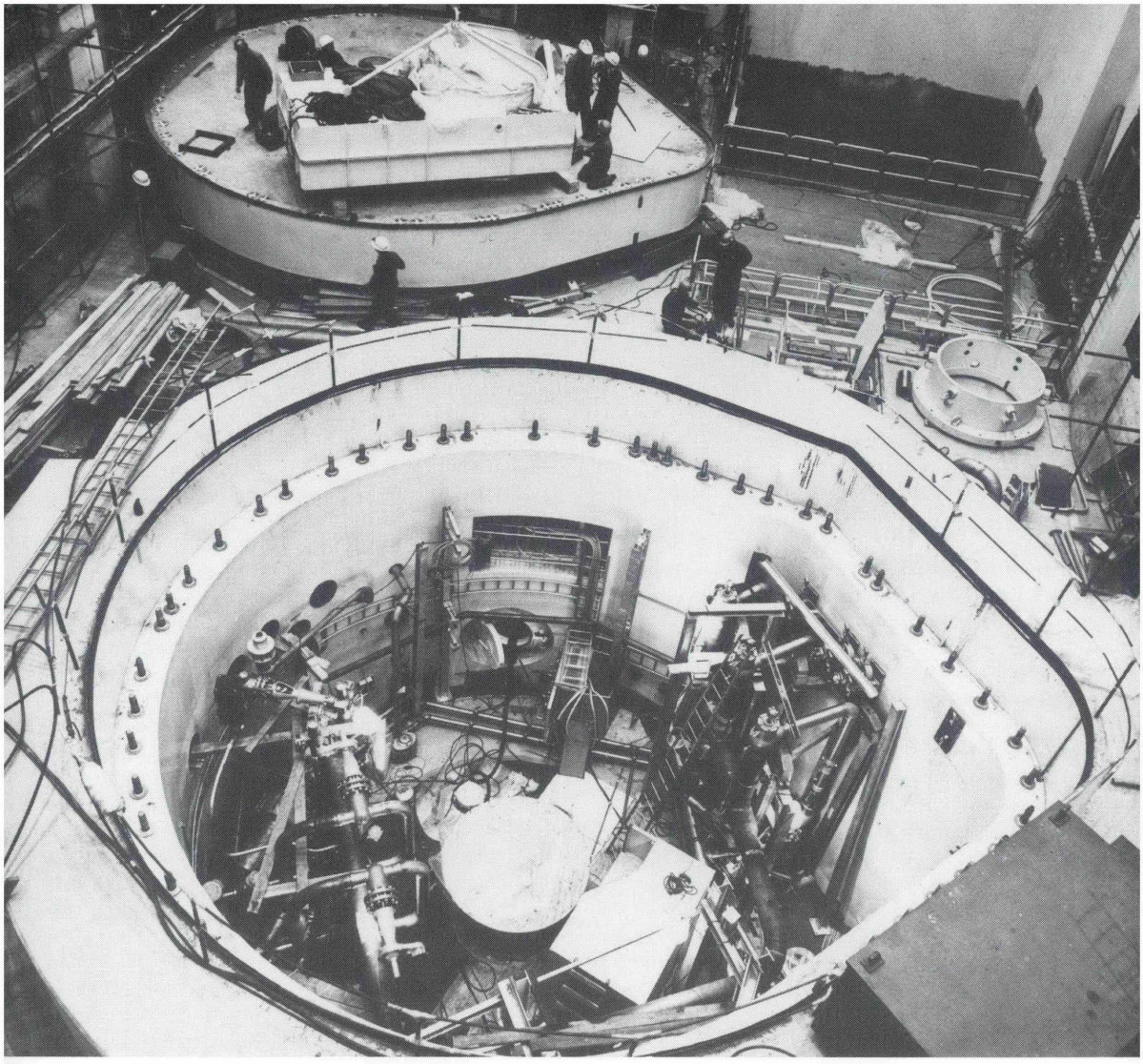
12. Reaktortanken (vikt 180 ton) transporterades från Uddeholms AB, Degerfors järnverk till Marviken på Göta kanal.

sta. Ett nära samarbete etablerades också med den organisation som ASEA byggde upp för sitt åtagande. Som ett viktigt planeringsinstrument användes den i Sverige då rätt nya "PERTmetoden" och datakörningarna skedde hos SAAB i Linköping. Erfarenheterna från denna projektorganisation blev av betydelse för de kommande kärnkraftprojekten.

Sedan Reaktorförläggningskommittén 1963 rekommenderat ett prliminärt tillstånd för Marvikenförläggningen exklusive överhettning kunde byggnadsarbetena komma igång genom Vattenfalls byggnadsavdelning först med vägar och grundläggningsarbeten samt process- och serviceinstallationer och sedan med de olika stationsbyggnaderna. Koncession för kokarutförandet meddelades i november 1963.

Stations-byggnaden

Själva reaktorbyggnaden, ca 90 m hög inklusive källare uppfördes med glidformsgjutning av Skånska Cementgjuteriet och kunde 1967 ta emot den stora reaktortanken, här liksom i Ågestafallet levererad av Degerfors Jernverk. Denna leverans som var styrande för hela tidsprogrammet hade beställts redan 1963. Transporten av trycktanken (ca 200 ton, längd 22 m, diameter 5,5 m) skedde denna gång med tåg



13. Schaktet för reaktortanken i Marviken. Reaktorlocket i bakgrunden.

från Degerfors till Otterbäcken och sedan med båt genom Göta kanal och fram till Marviken, där en av ASEAs stora kranar lyfte den på plats. Tanken täthetprovades med gott resultat i början av 1968.

Reaktorinneslutningen gjordes med den av General Electric utvecklade "pressure suppression principen", där själva reaktorkärlet inryms i ett trycktätt rum av förspänd betong och ångan vid ett ev rörbrott får passera en vattenbassäng i botten av inneslutningen, där den kondenseras. Denna princip används nu allmänt för kokarreaktorer både här hemma och utomlands.

Montage

Montagearbetena i Marviken för system såväl till reaktordelen som stationen i övrigt hade varit igång sedan 1965. Bränsleelementen för

kokarkanalerna tillverkades vid Atomenergis fabrik i Stockholm och levererades i form av 4,5 m långa stavar med UO_2 i Zircaloykapsling till Marviken, där de byggdes ihop till knippen om 36 element i varje ledrör. 40 ton anrikat uran med 1–2 % U 235 hade 1964 beställts hos den engelska atomenergimyndigheten UKAEA. Zircaloyrören tillverkades av Sandviken, som även levererat till Ågesta. Det tunga vattnet sammanlagt 180 ton levererades huvudsakligen från USA 1968.

En projektgrupp med deltagare från Atomenergi och Vattenfall i förberedde idrifttagning. Personal för den blivande driftorganisationen utbildades i Ågesta.

Lättvattenreaktorernas genombrott

Medan monteringen av stationen pågick inträffade flera händelser som skulle få stor betydelse för den fortsatta utvecklingen. Lättvattenreaktorerna fick sitt definitiva genombrott som ekonomiska och driftsäkra anläggningar. USA var berett att leverera anrikat material för bränsle även till kraftalstrande reaktorer och även andra länder, England, Frankrike och USSR väntades kunna offerera anrikat material. Lättvattenreaktorer blev därför den reaktortyp som kraftföretagen i de flesta länder valde för sin utbyggnad.

Under 1965 träffades samarbetsavtal mellan ASEA och Atomenergi inte bara rörande stora tungvattenkokare utan även lättvattenkokare. Projekterings- och konstruktionsarbetet utfördes av ASEA och Atomenergi medverkade med utredningar i reaktorfysik, värmeteknik och bränsleelementteknologi samt bränsleprov under reaktordrift. En licensöverenskommelse träffades även varigenom Atomenergis erfarenheter av bränsle för vattenkylda reaktorer ställdes till ASEAs förfogande.

Oskarshamn och Ringhals

ASEA offererade samma år en 400 MW lättvattenkokare Oskarshamn 1 till Oskarshamnsverkens Kraftgrupp och i juli beställdes denna första på kommersiella grunder upphandlade svenska kärnkraftanläggning. Den tidigare planerade importerade lättvattenkokaren var inte längre aktuell. 1968 beställde Vattenfall av ASEA den första lättvattenkokaren till Ringhals kärnkraftstation och samtidigt en tryckvattenreaktor från Westinghouse.

Asea Atom bildas

Sommaren 1968 bildades av staten och ASEA AB Asea-Atom för att bedriva en "självständig, konkurrenskraftig och lönsam industriell verksamhet på kärnkraftområdet" främst rörande termiska reaktorer. Personalen rekryterades främst från ASEA och Atomenergi och Atomenergis bränsleelementfabrik liksom ASEAs kärnkraftlaboratorium och bränslefabrik i Västerås överfördes till det nya bolaget. Atomenergis resurser särskilt i Studsvik skulle stödja såväl Asea-Atom som andra svenska företag. Bildandet av Asea-Atom var ett

naturligt sätt att utnyttja de samlade svenska resurserna till att bygga upp en svensk kommersiell reaktorindustri. Till det nya bolaget överfördes beställningarna av Oskarshamn 1 och Ringhalsreaktorn, däremot inte Marviken som var ett utvecklingsprojekt.

Asea-Atomsatsningen innebar den slutliga tyngdpunktsförskjutningen av det svenska kärnkraftsarbetet från att huvudsakligen ha energipolitiska motiv till att bli industripolitiskt. Visserligen hade riksdagens Statsutskott betonat att Marviken som en beredskapsåtgärd skulle kunna drivas med inhemskt naturligt uran, men reellt hade detta argument nu föga tyngd. Även lättvattenreaktorer har energipolitiska fördelar jämfört med fossila bränslen och i det marknadsläge som rådde fick det räcka.

Alla dessa faktorer, lättvattenreaktorernas genombrott, beställningarna av Oskarshamn 1 och Ringhals och tillkomsten av Asea-Atom kom att i hög grad påverka Marvikenreaktorns öde.

Överhettningen slopas

Under 1969 blev problemen för Marviken allt svårare. Projektet var inemot ett år försenat. Från olika håll i omvärlden rapporterades, att överhettningen ur ekonomisk synpunkt endast skulle ge mycket marginella förbättringar. Lösningen av de svåra tekniska problemen hade däremot knappast gjort några framsteg. De amerikanska försöken med överhettarreaktorer upphörde därför. Pathfinderreaktorn byggdes om till ett gaseldat kraftverk. Hos oss innebar överhettningen problem bl a då det gällde säkerhetsbedömningen och möjligheten till drifttillstånd. Man beslöt därför att avstå från möjligheten att utprova överhettning och i stället utföra Marviken som tungvattenkokare. Den komplicerade konstruktionen med överhettarkanalerna som utlopp för den mättade ångan gick dock inte att ändra på. Vid provdriften med lättvatten visade ångan för hög fuktighetshalt vilket krävde vissa modifikationer. Det mest allvarliga var dock att nya beräkningar, där underlaget under hand hade förstärkts, visade att man inte i alla lägen kunde garantera full stabilitet för reaktorn utan en ombyggnad av bränsleelementknippet. Stabiliteten var givetvis en förutsättning för stationens drift.

Säkerheten kräver ombyggnad

Ombyggnaden beräknades kosta ca 40 MKr och innebära ett par års försening. Då tungvattenreaktorn inte längre bedömdes aktuell för den fortsatta svenska utbyggnaden, beslöts i början av 1970 att projektet skulle avvecklas. Härom var alla deltagare, Atomenergi, Vattenfall och ASEA överens.

Projektet avvecklas

Man kan säga att bakom beslutet att avbryta arbetena fanns tre skäl. Säkerhetsfrågorna måste vara lösta. Då reaktortypen inte längre var aktuell för utbyggnaden kunde kostnaderna för att lösa säkerhetsfrågan inte motiveras. För att satsningen på ASEA-Atom skulle lyckas

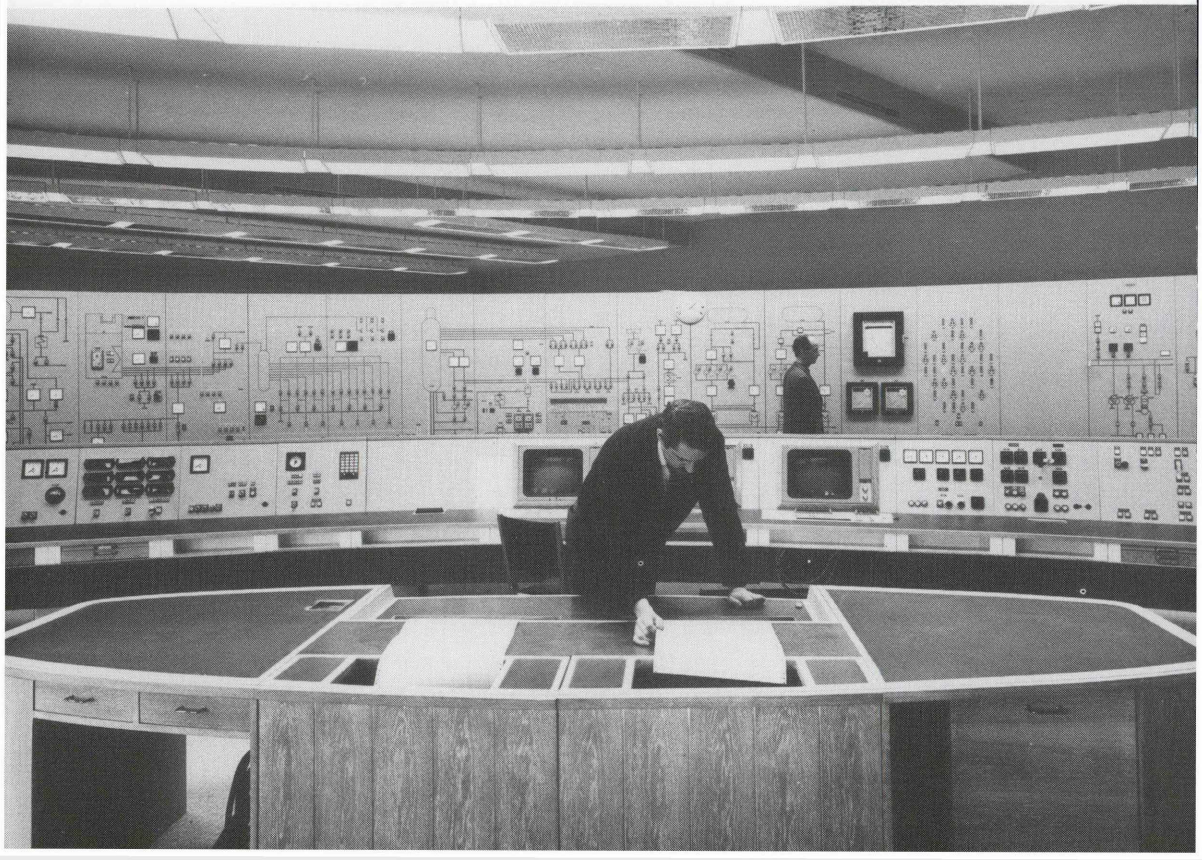
och utbyggnaden med lättvattenreaktorer skulle bli framgångsrikt måste alla krafter sättas in härpå och en splittring på två reaktorlinjer var därför inte möjlig. Det var naturligtvis ett svårt men nödvändigt beslut som måste fattas. Om reaktortypen efter ombyggnad 1972 hade varit av intresse för den svenska kraftindustrin hade det kanske varit aktuellt att satsa de 40 MKr, – motsvarande ca 10 % av reaktorkostnaden – som krävdes, men med hänsyn till lättvattenreaktorernas goda ekonomi och etablerade ställning fanns inga hållbara motiv.

Anläggningskostnaderna för Marviken utgjorde för Atomenergis del ca 210 MKr och för Vattenfall ca 290 MKr eller sammanlagt ca 500 MKr. Nedläggningen av Marviken väckte naturligtvis stor uppmärksamhet både här hemma och internationellt. Sverige hade vid sidan av Kanada varit ett ledande land i utvecklingen av tungvattenreaktorer. Många länder med tungvattenreaktorer på sitt program beklagade det svenska beslutet, men har – med undantag för Kanada – senare fått göra samma bedömning.

Kritiken mot Marviken

Kritiken här hemma blev naturligtvis kraftig såväl bland politiker och tekniker som i massmedia. Regeringen lät utarbeta en vitbok[6], där de olika faserna av kärnenergipolitiken belystes. Ingen ifrågasatte dock riktigheten av beslutet i det läge som uppstått. I massmedia som under

14. Manöverrummet, Marviken.



årens lopp rapporterat om projektets utveckling och svårigheter blev det förstasideskommentarer med både berättigad och dåligt underbyggd kritik. I manöverrummet på Marviken hade personalen satt upp två textade anslag. Det första löd: "Egen härd är guld värd." Det var det motto som hade varit huvudmotivet för satsningen på reaktorer som kunde drivas med naturligt svenskt uran och tungt vatten. Det hade inte längre någon större tyngd. Det andra anslaget löd: "Det är skönare lyss till den sträng som brast..." De omdömen som följde på nedläggningsbeslutet var dock inte sköna att lyssna på. Marviken blev ett av de mest utskällda projekten i svensk industrihistoria. Och visst fanns det anledning till kritik då ett så stort och ambitiöst projekt inte kunde fullföljas utan måste avvecklas. Många av de mest utpräglade kritikerna var dock ganska okunniga om den utveckling som ledde fram till beslutet.

Den ofta överdrivna kritiken drabbade också oförskyllt de många skickliga tekniker på olika nivåer, som gjort en förnämlig insats och löst många mycket svåra tekniska problem...

Hur utnyttja Marviken?

En viktig fråga var nu hur man skulle kunna utnyttja så mycket som möjligt av anläggningen. För den levererade turbinen beställde Vattenfall en oljeeldad panna och man fick därmed ett reservkraftverk om ca 200 MW. Det tunga vattnet och bränslematerialet försåldes, vilket inbringade ca 65 MKr. Man undersökte möjligheten att utnyttja byggnader och hjälputrustning för en lättvattenkokare, men förslaget bortföll av ekonomiska skäl.

Internationellt projekt för reaktorsäkerhet

I stället blev det för experimentella studier av säkerhetsfrågor vid kärnkraftanläggningar som Marvikens reaktorutrustning kom att spela en intressant roll.

En av de svåraste bedömningarna vid alla reaktorbyggen är konsekvenserna av en allvarlig olyckshändelse, t ex brott på en huvudledning för ångan eller en härdsmälta. I båda fallen frigörs momentant inte bara mycket stora ångmängder utan även radioaktiva aerosoler, som rycks med i den häftiga ångströmmen. Hur fungerar kondensationen och hur mycket radioaktivitet går vidare till omgivningen? Svar på sådana frågor krävde experimentell verifikation, helst i full skala.

Som nämnts var Marvikens reaktorbyggnad konstruerad för "pressuresuppression" inneslutning av reaktortanken, och här fanns en unik möjlighet att simulera vissa tänkbara olycksfallsförlopp. Atomenergi (numera Studsvik AB) utarbetade en serie testprogram, som väckte stort internationellt intresse. Med hjälp av en elektrisk ångpanna kunde vattnet i reaktortanken uppvärmas till ca 275°C och 57,5 bar och med hjälp av sprängbleck kunde man simulera brott på huvudångledningen. Då tanken var dimensionerad för en tungvatten-

kokare var den större än aktuella lättvattentankar och försöken blev därför i full skala. Ångflöden på 14 ton/sek kunde erhållas. Med tillsats av inaktiva isotoper kunde beteendet hos klyvningsprodukter från en härdsmälta studeras.

Under åren 1972–1985 genomfördes i Marviken fem experimentserier med sammanlagt ett 60-tal försök med kylmedelsbortfall och 5 experiment med aerosoltransport av inaktiva ämnen motsvarande klyvningsprodukter från en härdsmälta.

Följande länder deltog i olika omgångar i experimenten och bidrog med finansieringen: Danmark, England, Finland, Frankrike, Förbundsrepubliken Tyskland, Italien, Japan, Kanada, Nederländerna, Norge, Sverige och USA. Försöken samordnades med andra säkerhetsexperiment och studier i främst Tyskland och USA. Dessa arbeten har gett ett väsentligt säkrare underlag för bedömning av konsekvenserna av ett reaktorhaveri. Det största experimentet gällde just aerosolers uppträdande och resultaten från storskaleförsöken i Marviken, Karlsruhe och Hanford behandlades vid ett symposium i Schweiz sommaren 1988. En utförlig översiktsrapport förbereds nu. Dessa arbeten i Marviken kostade sammanlagt ca 170 MKr. Bidrag om ca 120 MKr erhölls genom det internationella deltagandet.

Tvärströms-reaktorn

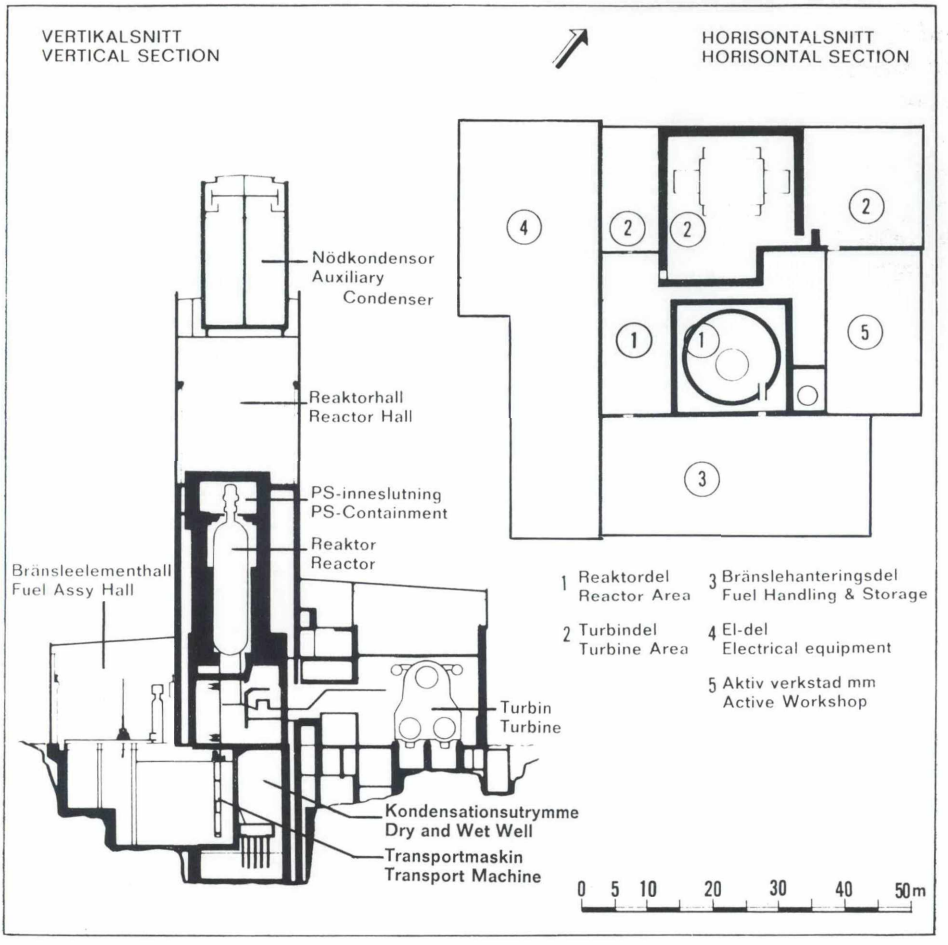
Även i denna summariska redogörelse över utvecklingen av tungvattenreaktorerna bör nämnas två mer udda projekt: Tvärströmsreaktorn PHWR och Betongtanksprojektet. Båda var nära knutna till tungvattenprogrammet och tilldrog sig även visst internationellt intresse, men är idag bortglömda.

Under arbetena med Ågesta och Marvikens tryckvattenversion lanserades idén, att man inte behövde ha bränsleelementen ordnade i knippen, omslutna av ledrör. Om man i stället hade bränsleelementen jämnt fördelade i reaktortanken fick man en mer direkt kontakt mellan bränsle och moderator/kylmedel. Den negativa temperaturkoefficienten gav därvid en bättre självreglerande effekt, vilket kunde förenkla kontrollsystemet. Konstruktionen intresserade bl a Johnsonkoncernen, som tillsammans med Atomenergi lät Westinghouse och Bechtel i USA göra en utvärdering, som visade att ekonomin var jämförbar med lättvattenreaktorer av tryckvattentyp.

I mars 1964 slöts en överenskommelse med den indiska atomenergikommissionen om en projektstudie av en PHWR-reaktor på 350 MW i Kalpakkam nära Madras. Indien, som sedan flera år samarbetat med Kanada och hade en kanadensisk trycktubsreaktor i drift valde dock slutligen att fortsätta med den kanadensiska typen.

Betongtanks-projektet

Ett problem för alla trycktanksreaktorer och särskilt för tungvattenvarianten, som måste ha större volym för att kunna använda naturligt uran, var själva reaktortanken. Inte minst transporten av stora och



15. Planskiss över Marviken.

tunga stråltankar från tillverkaren till reaktorstationen skapade ibland svårigheter. Vidare oroades vissa experter av möjligheten till och konsekvenserna av ett momentant tankbrott. Numera känner man bättre brottsmekanismen och bedömer att en eventuell sprickbildning kommer att ske gradvis, och kan upptäckas vid de återkommande inspektionerna.

Ett sätt att komma ifrån dessa problem vore om man på platsen kunde bygga en trycktank av armerad betong. Sådana trycktankar hade redan använts för de gaskylda reaktorerna i England och Frankrike. Det gällde nu att finna en konstruktion, som lämpade sig för vattenreaktorer, vilket krävde andra isoleringssystem och avtagbart lock. Denna lösning skulle vara av särskilt intresse för länder, som saknade resurser att framställa stora ståltankar. Under 1966 gjorde Atomenergi, ASEA och Vattenfall utredningar om betongtankar för vattenreaktorer, som visade på besparingar vid reaktorer på 600 MW och högre. År 1967 kom man överens om att bygga en trycktanksmodell i Studsvik i ungefär halv skala. Deltagare och finansiärer i projek-

tet var de danska, finska och norska atomenergimyndigheterna och från Sverige Atomenergi, ASEA, Vattenfall och de enskilda kraftproducenterna. Erfarenheterna bedömdes som intressanta för såväl tungvatten- som lättvattenreaktorer.

Tanken, som byggdes av Skånska Cementgjuteriet hade en inre diameter på 2 m och en inre höjd på 4 m, medan yttermåtten var 4 resp 7 m. 120 horisontella och 120 vertikala kablar svarade för förspänningen med dragkrafter på 170 resp 45 ton. Tanken provtrycktes med gott resultat 1970. I en fortsatt fas 1971–1973 med ytterligare deltagare studerades genomföringar för vatten och ånga och gjordes simuleringar av olyckor. Arbetena inriktades främst på kokarreaktorer. I en sista verifikationsfas deltog som associerade intressenter England, Frankrike och Italien. Särskilt Frankrike var aktivt intresserat fram till 1975, då man beslöt att överge kokarlinjen och endast gå in för tryckvattenreaktorer.

Ståltankarna hade under tiden etablerats som en säker teknologi även i mycket stora enheter och intresset för betongtankar upphörde. Utvecklingsarbetena visade dock på en alternativ trycktanksteknologi och har även varit av intresse i samband med ASEAs arbeten på Secureреaktorn.

Litteratur

1. Bränsleförsörjningen i Atomåldern, SOU 1956–46.
2. Kärnreaktorn R1, K E Larsson, Daedalus 1981.
3. Kärnkraftens historia i Sverige, K E Larsson, Kosmos 1987.
4. The Ågesta Nuclear Power Station, AB Atomenergi 1964.
5. Marviken, Ragnar Nilson, Nuclear Engineering, juni 1966.
6. Svensk Atomenergipolitik, Industridepartementet 1970.

The Development of Swedish Heavy Water Reactors

Summary

The very considerable Swedish investment in nuclear power during the 1950s was principally dictated by the demands of energy politics. The only type of reactor possible for us, which fulfilled those demands, was the heavy water reactor using natural uranium. The prototype reactors were of the pressure tank kind fuelled by uranium oxide canned in zircaloy. Both pressurized water and boiling water reactors were studied.

However, the market developed towards light water reactors which came to dominate reactor expansion both at home and internationally. The scientific and technical know-how which had been built up for the heavy water system constituted a good basis for the introduction of light water technology. The similarities between the two lines are especially evident with regard to the question of materials (fuel, canning, pressure tank etc) but even the reactor physics, thermo-hydrodynamics, control and safety questions have clear points in common. Ågesta and Marviken supplied the manufacturing and power industries with experience of the manufacture, erection and running of nuclear power stations. Many of the installations in Studsvik could also be utilised in the light water programme. The heavy water investment has therefore contributed greatly to laying the foundations of the high standards which characterise the Swedish nuclear power industry.